

计测技术

第34卷

3
2014

METROLOGY & MEASUREMENT TECHNOLOGY

第34卷

成都开谱电子科技有限公司 KAIP

-----提供高精密电容标准、电感标准的设计和制造

成都开谱电子科技有限公司, 是专业从事电学计量器具的研发单位。凭借在电学计量领域的先进技术和制造经验, 专注于标准电容器、标准电容箱、标准电感器、标准电感箱以及相关配套设备的设计与生产, 旨在为您提供国际一流的计量标准。

CH-12 标准电容器

- 标准电容量: 1pF、10pF、100pF、1nF、10nF、100nF、
1 μ F、10 μ F、100 μ F、1000 μ F。
- 允许误差极限: 1pF—1 μ F: $\pm 0.02\%$
10 μ F—1000 μ F: $\pm 0.05\%$
- 输出方式: 四端对输出



CH-18 精密十进位标准电容箱



该产品是国内、外标准电容箱制造厂(公司)中的佼佼者, 指标可高达 $\pm 0.01\%$, 零位电容量可精确至 $\leq 0.000005\text{pF}$, 能够满足($\pm 0.05\%$ 指标)RLC数字测量仪、数字电容桥、燃油测量仪…等的量传。

- 零位电容量: $C_0 \leq 0.000005\text{pF}$
- 电容量范围: 1pF—1.111110 μ F(六位十进制); 最小步进量: 1pF
- 允许误差极限: $\pm 0.01\%$
- 输出方式: 三端输出

ZK-2718 标准电感箱 (1、2、5进制)



- 电感量范围: 1 μ H—500H
- 允许误差极限: 1 μ H—500mH: $\pm 0.05\%L + 0.05\mu\text{H}$
1H—1000H: $\pm 0.2\%$
- 输出方式: 三端或四端对输出

ZK-2712 标准电感器



- 标准电感量: 100 μ H、1mH、
10mH、100mH、1H
- 允许误差极限: 100 μ H: $\pm 0.05\%$
1mH、10mH、100mH、1H: $\pm 0.02\%$
- 输出方式: 三端或四端对

本公司还提供以下产品:

CH-11型 高精度标准电容器; CH-14型 精密十进位标准电容箱;
CH-14A型 精密十进位标准电容箱; CH-14B型 精密十进位标准电容箱;
CH-14C型 精密十进位标准大电容箱; CH-16型 精密十进位标准电容箱;
CH-16B型 精密十进位标准电容箱; ZK-2710型 低频模拟标准电感器;
ZK-2711型 高频模拟标准电感器; ZK-2716A型 高精标准电感箱;
ZK-2717型 高精标准电感箱; 请登录www.kaip.cn了解更多详情……

成都开谱电子科技有限公司

联系人: 金先生 手机: 13608233082

电话: 028-69692021 传真: 028-83323029

地址: 成都市高新区 网址: www.Kaip.cn

电子邮件: 2652713152@qq.com

計測技術

JI CE JI SHU

1958 年创刊 双月刊

2014 年第 34 卷第 3 期(总第 203 期)

2014 年 6 月 28 日出版

《计测技术》第四届编辑委员会

主 任: 曹英杰

副 主 任: 张 力 张广军 陈 刚

特邀委员: (以姓氏笔画为序)

王立鼎 叶声华 李天初 张彦仲

张钟华 俞鸿儒

委 员: (以姓氏笔画为序)

于 梅 王子钢 王 雪 王 路

王德友 石小江 冯克明 龙祖洪

伍 凡 巩 岩 刘 民 朱振宇

朱崇全 张书练 张志民 张宝珠

李玉龙 邵 力 沙定国 陈大为

陈 兴 陈 明 陈京桦 陈 霞

何 闻 何 昭 周自力 周伦彬

周维虎 杨春涛 费业泰 段宇宁

郭俊杰 赵维谦 梁志国 韩春好

谭久彬 蔡小斌 廖 理 樊尚春

主管单位: 中国航空工业集团公司

主办单位: 中国航空工业集团公司

北京长城计量测试技术研究所

编辑出版: 《计测技术》编辑部

社 长: 孙千军

主 编: 陈 霞

副 社 长: 杜 江(兼广告负责人)

编 辑: 张 进 韩 冰 李莉萍

英文编辑: 李莉萍

电 话: (010) 62457159(编辑部)

(010) 62457160(广告部)

传 真: (010) 62457159

通讯地址: 北京市海淀区 1066 信箱杂志社

邮政编码: 100095

E-mail: mmt304@126.com

网 址: www.jicejishu.com

印 刷: 北京国防印刷厂

国内总发行: 北京报刊发行局

邮发代号: 80-441

国外发行: 中国国际图书贸易集团有限公司

北京 399 信箱(100048)

发行代号: BM7117

刊 号: ISSN 1674-5795

CN 11-5347/TB

广告经营许可证: 京海工商广字第 0341 号

国内定价: 10 元/册; 国外定价: 8 美元/册

版权声明: 凡投稿本刊或允许本刊登载的作品, 均视为作者已同意将其作品刊载于本刊网络版或电子版, 其使用费已包含在本刊所付稿酬中。作者如不同意, 投稿时敬请说明。

目 次

综合评述

卫星微振动检测技术 田玉春 曹乐 樊尚春 (1)

复合材料多轴联动超声 C 扫描检测技术评述

..... 王东升 杨党纲 刘颖韬 徐娜 李硕宁 (6)

理论与实践

微谐振式压力传感器的差动输出设计与建模 杨朔 邢维巍 (11)

基于线性趋势与神经网络的校准间隔组合预测

..... 曹伙俊 赵芳 (16)

基于 ADAMS 平台的四足机器人越障仿真与测试 张鹏 朱岩 (20)

新技术新仪器

提高膜片式 F-P 腔光纤压力传感器灵敏度的试验研究

..... 张慧君 张立喆 段玉培 陈喜 (26)

基于温控方案的一种 MEMS 惯性测量装置设计

..... 何海洋 王章波 (29)

500 kN 液压式叠加式力标准机的研制 熊俊 刘建斌 (33)

几种典型燃烧室高温气流温度传感器的设计 李亚晋 赵俭 (37)

计量、测试与校准

双闭环兰姆凹陷激光稳频方法

..... 李华丰 朱振宇 王霖 李强 高珊 (41)

光频测量用飞秒激光频率梳光谱扩展实验研究

..... 张大鹏 梁志国 叶蓬 (44)

平均值-极差控制图在地面放射性测量模型标准

装置核查中的应用 王新兴 胡明考 张积运 欧阳游 (48)

二因素随机效应模型下评估 X 射线单晶定向系统的

重复性和再现性 马春喜 (52)

湿度变化对置换法气体小流量装置影响的研究 向德华 (56)

计量信息化及管理

构建民用飞机参数量值溯源体系的探讨

..... 张学涛 邢向楠 周世锋 李少壮 (59)

LabVIEW 应用于自动控制系统的内存管理 赵静 张宁宁 (63)

基于 LabVIEW 的相位式激光测距系统的软件设计与实现

..... 蔡薇 李昆 (66)

基于 PPC4E 数字式压力控制器的压力仪表自动

检定/校准技术研究 郑金娟 郭勇冠 (71)

9016 型电子压力扫描阀自动化检定系统 涂斌 (74)

谈谈航空企业计量管理工作应注意的几个问题 张啸南 (77)

经验与体会

关于铂电阻温度传感器修正方法的探讨 吕伟 谢静 高颖 (80)

军用实验室检查工作探讨 侯兴勃 (83)

影响压力测量审核结果的因素分析 张贤 (86)

直流电阻箱误差对检定二次仪表的影响 詹喻威 李瑞泉 (88)

动态与信息

科技重大专项“十三五”规划研究编制工作启动 (24) 福禄克红外热像仪助力 LED 散热器大评比 (39) 《化学分析计量》2014 年第 3 期目次 (70) 总装与国家质检总局签署《军民融合计量战略合作框架协议》(76) 第十四届全国压力

计量与测试技术学术交流会征文通知 (91) 第十五届中国湿度与水分学术交流会议及征集论文通知 (92)

Main Contents

Survey and Review

- (1) Micro-vibration Detection Technology for Satellites
..... TIAN Yuchun, CAO Le, FAN Shangchun
- (6) Review of the Multi-axis Ultrasonic C-scan Technique for Composites
..... WANG Dongsheng, YANG Danggang, LIU Yingtao, XU Na, LI Shuoning

Theory and Practice

- (11) Design and Simulation of Differential Outputs for Resonant Pressure Microsensors
..... YANG Shuo, XING Weiwei
- (16) Combined Forecast of Calibration Interval Based on Linear Trend Model and Neural Network
..... CAO HuoJun, ZHAO Fang
- (20) Simulation and Measurement for Quadraped Robot to Cross over Obstacles on ADAMS Platform
..... ZHANG Peng, ZHU Yan

New Technology and Instrument

- (26) Research on Improvement of Sensitivity of Diaphragm Type Optical Fiber Pressure Sensors Based on F-P Cavity Interference
..... ZHANG Huijun, ZHANG Lizhe, DUAN Yupei, CHEN Xi
- (29) Design of MEMS Inertia Measurement Unit Based on Temperature-controlling Scheme
..... HE Haiyang, WANG Zhangbo
- (33) Development of the 500kN Piling Type Force Standard Machine
..... XIONG Jun, LIU Jianbin
- (37) Design of Some Kinds of Combustor Airflow High Temperature Sensors
..... LI Yajin, ZHAO Jian, WANG Jianjun

Metrology, Measurement and Calibration

- (41) Double Closed-loop Lamb Dip Stabilized Laser
..... LI Huafeng, ZHU Zhenyu, WANG Ji, LI Qiang, GAO Shan
- (44) Research on Spectrum Expanding of a Femtosecond Optical Synthesizer for Absolute Frequency Measurement
..... ZHANG Dapeng, LIANG Zhiguo, YE Peng
- (48) Applications of Average-Range Control Chart in Verification of Measuring Radioactivity in Ground Standard Equipment Model
..... WANG Xinxing, HU Mingkai, ZHANG Jiyun, OUYANG You
- (52) Assess R&R of the X-ray Orientation Determining of a Single Crystal System via the Two-way Random Effects Model
..... MA Chunxi
- (56) Study on the Effect of Humidity Changes on the Displacement Small Gas Flow Device
..... XIANG Dehua

Measurement Information Technology and Management

- (59) Discussion on Building a Civil Aircraft Parameter Measurement Traceability System
..... ZHANG Xuetao, XING Xiangnan, ZHOU Shifeng, LI Shaozhuang
- (63) LabVIEW Used in the Automatic Control System Memory Management
..... ZHAO Jing, ZHANG Ningning
- (66) Software Design and Implementation of Phase Laser Ranging System Based on LabVIEW
..... Cai Wei, Li Kun
- (71) Pressure Meter Automatic Verification / Calibration Technology on Base of PPC4E Digital Pressure Controllers
..... ZHENG Jinjuan, GUO Yongguan
- (74) Automatic Test System of Model 9016 Ethernet Intelligent Pressure Scanner
..... TU Bin
- (77) Discussion on Some Issues in Metrological Management of Aviation Enterprises
..... ZHANG Xiaonan

METROLOGY & MEASUREMENT TECHNOLOGY

(Bimonthly)

Vol. 34 No. 3 2014 (Total No. 203)

4th Editorial Committee

Chairman CAO Yingjie

Vice Chairmen

ZHANG Li ZHANG Guangjun CHEN Gang

Invited Editorial Committee Members

WANG Liding YE Shenghua
LI Tianchu ZHANG Yanzhong
ZHANG Zhonghua YU Hongru

Editorial Committee Members

YU Mei WANG Zigang WANG Xue
WANG Lu WANG Deyou SHI Xiaojiang
FENG Keming LONG Zuhong WU Fan
GON Yan LIU Min ZHU Zhenyu
ZHU Chongquan ZHANG Shulian
ZHANG Zhimin ZHANG Baozhu
LI Yulong SHAO Li SHA Dingguo
CHEN Dawei CHEN Xing CHEN Ming
CHEN Jinghua CHEN Xia HE Wen
HE Zhao ZHOU Zili ZHOU Lunbin
ZHOU Weihua YANG Chuntao FEI Yetai
DUAN Yuning GUO Junjie ZHAO Weiqian
LIANG Zhiguo HAN Chunhao TAN Jiubin
CAI Xiaobin LIAO Li FAN Shangchun

Sponsor: Changcheng Institute of Metrology & Measurement

Editor & Publisher: Editorial Department
House of Metrology & Measurement Technology

Address: P. O. Box 1066, Beijing 100095, P. R. China

Chief Editor: CHEN Xia

Printing: Printing House of Beijing National Defence

Distributed abroad by: China International
Book Trading Corporation (P. O. Box 399, Beijing 100048, China)

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.01

卫星微振动检测技术

田玉春¹, 曹乐², 樊尚春³

(1. 山东华宇航天空间技术有限公司, 山东 烟台 264000; 2. 北京航空航天大学 仪器科学光电工程学院, 北京 100191; 3. 北京航空航天大学 惯性技术国防科技重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 微振动是限制高精密测试技术发展的关键因素之一, 本文以微振动在航空航天技术方向的测量研究为基础, 对微振动背景、测量技术进行了详细的阐释, 在传统光学测量分析的基础上, 分析了利用高精度微机械加速度计测量的可行性, 最后就微振动测量技术的发展方向做出了总结。

关键词: 微振动; 卫星; 加速度计

中图分类号: TB936; TH824.4

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0001-05

Micro-vibration Detection Technology for Satellites

TIAN Yuchun¹, CAO Le², FAN Shangchun³

(1. Shandong Huayu Space Technology Co., LTD, Yantai 264000, China; 2. School of Instrument Science & Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Inertial Technology Key Laboratory of National Defense Science and Technology, Beihang

University, Beijing 100191, China)

Abstract: Micro-vibration is one of the key factors that limit the development of high precision measuring technology. On the basis of research on micro-vibration in aerospace technology, this article introduced the background of micro-vibration and measuring technology in detail. The feasibility of testing method using high precision micro-mechanical accelerometer has also been analyzed based on traditional optical measurement method. Finally, the summary of development direction of micro-vibration detection technology has been made.

Key words: micro-vibration; satellite; accelerator

0 引言

随着航空航天技术的发展, 在利用卫星进行遥感、侦察、精密定位等领域, 测量精度需求不断地提高, 微振动测量与抑制技术已经作为关键技术, 得到了各国航空航天人的重视, 包括我国在内的各国航天机构纷纷建立相关研究实验室进行相关技术的探索, 以寻求新的解决方案和技术途径。

微振动一般是指结构本体受到环境变化、外部冲

击力、其他工作机构运动的影响产生的低 g 值振动。目前, 常用的测量方式有基于应变效应的测量、光学干涉、激光振动测量、高精度机械加速度计, 因其具有体积大、功耗高、成本高等因素, 在航空航天应用中受到了一定的限制。随着微机械技术的发展, 采用高精度微机械加速度计进行微振动测量开始出现, 随着研究的进一步深入, 可以预测, 其将成为微振动测量的主要技术手段。

本文将以卫星微振动背景和测量技术的发展为主线, 介绍和分析微振动测量技术的发展状况, 最后就微振动测量技术发展方向给出建议。

1 卫星微振动分析

卫星广泛应用在通信、侦察、遥感、导航等领域, 其有效载荷包含高清摄像机、高清照相机、合成孔径雷达、微重力微振动测量系统、星载计算机等关键设备以及作为能源来源的太阳能帆板、舱内冷却系统、

收稿日期: 2014-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61121003); 国家自然科学基金资助项目 (61273060)

作者简介: 田玉春 (1965 -), 从事航天工程相关研究工作和科研产业能力建设管理工作; 曹乐 (1986 -), 男, 博士研究生, 研究方向为精密仪器及微弱信号检测; 樊尚春 (1962 -), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为传感器技术及应用、MEMS。

供电系统以及反作用轮和机动动力系统等组成部分。各设备动作时会产生一定的惯性力矩, 导致卫星星体或者局部部件的转动, 通过星体连接结构, 影响有高稳定需求的有效载荷, 令其不能工作在高稳定性状态, 进而影响其工作性能, 在一定程度上限制了卫星应用的发展。

2013 年 12 月, 周东强等进行了我国在轨遥感卫星微振动测量试验^[1], 分别对星载主要活动部件以及活动部件对星载有效载荷的影响进行了测量, 试验结果表明: 遥感卫星上的主要干扰源有反作用轮和辐射计、散射计转动机构; 微振动的最大幅度已经达到 57 mg (0.56 m/s^2)。表 1 给出了待测试遥感卫星的主要活动部件的最大振动值。同时表明活动部件的动作会导致有效载荷的振动, 且频率响应不与动作部件完全一致。

表 1 遥感卫星主要活动结构的微振动最大值 mg

结构	卫星编号			
	1#	2#	3#	4#
反作用轮	23.5	21.3	21.9	14.2
辐射计/散射计	57.5	--	--	--
锁定后的天线驱动机构	--	2.3	2.6	3.4
太阳电池阵驱动机构	--	2.1	<1.0	2.1

2011 年 2 月, 李宁等人对航天器地面微振动测试方法进行了研究, 给出了测试方法和测试方案, 并对微振动传感器性能进行了分析, 通过实验表明, 满足测量分辨力为 $10^{-4} g$ 的微振动传感器能够满足其测试型号卫星的微振动测量^[2]。张振华等对国内外的微振动研究方法进行了分析^[3], 并对常见的干扰源部件进行了时域和频域模型建立, 给出了系统级的输入输出模型, 对于航天器设计提供了一定的依据。

2010 年, 石俊霞等人对 TDICCD 相机成像质量与卫星微振动的关系进行研究^[4], 研究发现, 卫星振动对 TDICCD 相机的 MTF 影响与相机本身的积分级数密切相关; 同时, 作者提出了基于快速 CCD 卫星振动检测方法和基于振镜的卫星振动补偿方法^[3], 实验结果表明, 通过抑制微振动, TDICCD 分辨力显著提高。

2006 年, 谭庆贵等人针对卫星微振动对 CDMA 通信影响进行了力学振动分析, 通过建立振动模型并结合波长、振动、码速率等因素综合分析, 得出 1550

nm 波段更适合星间通信系统^[5]。同时试验分析表明, 在码率为 622 Mbps 的 1550 nm 波段通信系统中, 卫星振动标准偏差 $\delta \geq 1.2 \times 10^{-6}$ 时, 星间难以实现通信。

卫星微振动存在于卫星系统之中, 同时对星载设备的正常稳定工作带来了挑战。针对星载设备自身稳定性需求的不断提高, 尤其是在下一代星载设备规划中其稳定需求远高于微振动的平均值, 由此, 一方面提高星载设备的自身抗振动能力, 另一方面通过采取一定的措施抑制微振动的影响。对于后者, 必须首先解决卫星微振动的测量。星载微振动测量系统必须满足星载载荷的低功耗、高精度、小体积、实时测量等需求, 同时能够适应高冲击力、高温差、高辐射等空间环境。从发展历程上看, 卫星微振动测量经历了从传统地面模拟测量、星载微振动实验到微振动实时在线监测等阶段。本文将就微振动测量中常用的测量手段进行分析。

2 微振动测量技术

卫星微振动测量是随着星载高精密仪器的高稳定性需求发展起来的关键技术, 主要包括传统光学测量方法、电容式非接触测量方法和基于高精度加速度计的惯性测量方法。采用传统测量手段能够满足测量精度的需求, 但因其功耗大和体积问题, 难以应用到星载设备上。上世纪 80 年代发展起来的 MEMS 加工技术, 逐步出现了满足高精度、低成本、低功耗等要求的微机械加速度计。随着微机械加速度计的应用, 美欧航天局利用微重力测量系统对在轨卫星进行了大量实验, 实验结果表明利用加速度计进行微振动测量的可行性。

2.1 光学测量技术

利用光学技术测量微振动是目前地面试验中最为常见的测量方式, 主要包括光纤激光自混合干涉方法和数字全息干涉方法。光学测量主要是依赖于激光的高稳定性、高可靠性和一致性, 借助于光学原理将微小振动位移通过激光干涉方法实现精密测量。

2009 年, 针对星载设备在真空环境中启动时必然产生振动, 直接影响到辐射定标的光学系统, 进而限制了辐射定标的精度, 向艳红等人设计了利用激光干涉法测量星载设备微振动的测量系统^[6], 其测量原理框图如图 1 所示。激光装置发射出的激光束经分光镜分解成两束等强光束, 一路光束经过透镜聚焦入射到被测物体的表面, 从被测物体的表面反射或散射回来

的信号光束和另一路参考光束在光敏元件上产生干涉现象，然后通过解算干涉波形即可获得被测物体的振动频率和幅度。

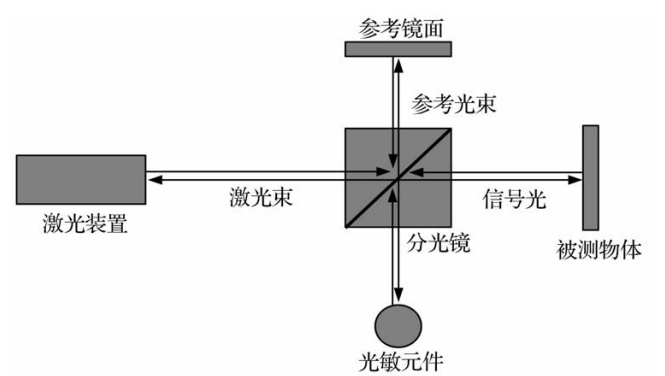


图1 激光干涉法测量星载设备原理框图

2.2 传统机械测量技术

2012 年，彭泳卿报道了一种专门测量航天器在轨微振动测量装置^[7]，其测量精度可达亚 μm 级水平，同时具有高灵敏度、高抗冲击性，可同时进行三轴测量，能够满足航天航空高精度微振动测量。表 2 中给出了该微振动传感器的主要性能指标。电容式微振动传感器具有温度稳定性好、非接触测量、频率响应快等特点，在高精密测量中广泛采用。

表 2 电容式非接触微振动传感器指标

传感器参数	量值	传感器指标	量值
量程	$\pm 200\text{ mg}$	频率范围	$0 \sim 20\text{ Hz}$
固有频率	143.7 Hz	噪声水平	$75.3\text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$
非线性度	0.13%	极板间隙	$35\text{ }\mu\text{m}$
输出灵敏度	30.8 pF/g	敏感质量块质量	145.6 mg
频率不平度	0.55%		

高精度静电悬浮加速度计是卫星等航天器的关键载荷之一，用来测量空间振动加速度、微重力加速度，具有灵敏度高、频带窄、适合低频微弱加速度测量等优点，得到了航天机构的广泛关注。图 2 中，给出了静电悬浮加速度计敏感结构的实物图^[8]，表 3 给出了当前国外产品的性能指标。

2007 年，清华大学给出了一款高精度静电悬浮加速度计设计图^[9]，其敏感结构如图 3 所示。根据设计参数，在量程 5 g 的范围内，测量分辨力可达 10^{-6} g 。

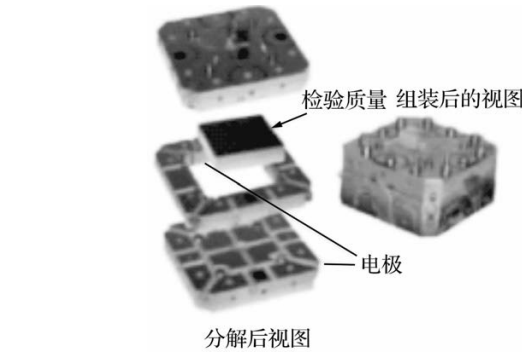


图 2 静电悬浮加速度计敏感结构

表 3 静电悬浮加速度计成熟产品指标

加速度计	噪声/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2})$	量程 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	带宽/Hz
ASTRE	1×10^{-8} (0.1 Hz)	1.30×10^{-2}	$\text{DC} - 1.9$
STAR	3×10^{-9}	1×10^{-4}	$2 \times 10^{-4} \sim 0.1$
SuperSTAR	1×10^{-10}	5×10^{-5}	$1 \times 10^{-4} \sim 0.1$
GRADIO	2×10^{-12}	6×10^{-6}	$5 \times 10^{-4} \sim 0.1$

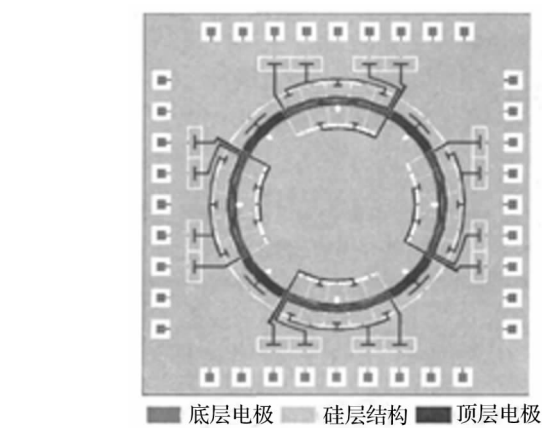


图 3 清华大学静电悬浮加速度计敏感结构版图

我国发射的载人航天航天器“神州”号，采用国产石英挠性加速度计作为核心器件进行飞船的瞬变加速度和振动加速度的测量^[10]，其测量水平可达 10^{-6} g 。其测量原理如图 4 所示。根据测量结果分析，航天器振动幅度在 10^{-6} g 以上，频域相应一般在 $0 \sim 100\text{ Hz}$ 之间，主要来源于飞船内设备的干扰和各种干扰的动力学响应。

2.3 MEMS 加速度计检测技术

微机械加速度计技术是上世纪 80 年代发展起来的基于微纳技术的高新技术，在硅等材料的基片上刻蚀结构，实现加速度计效应，其特点有批量成本低、体

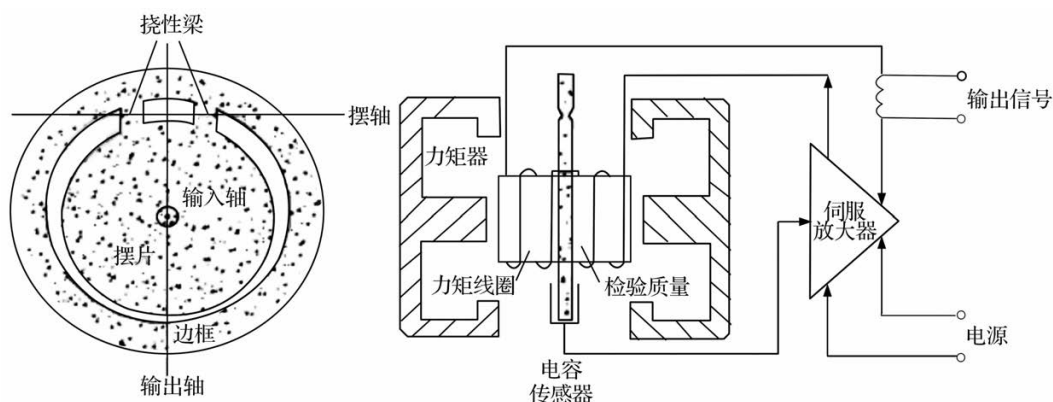


图4 神州飞船微重力微振动测量原理示意图

积小、功耗低、易于批量生产等，在航空航天领域微型化、微功耗、低成本的需求趋势下，得到各国的高度重视，纷纷投入大量人力财力进行研发试制。微振动测量要求测量精度达到 μg 量级，针对此要求，以下分析介绍当前高精度 MEMS 加速度计和卫星微振动测量应用的发展。

2011 年，台湾国立清华大学设计的一种高灵敏度、高稳定性的 MEMS 微机械加速度计^[11]，其灵敏度为 595 mV/g ，等效噪声水平为 $50 \mu g/\sqrt{\text{Hz}}$ ；2013 年，清华大学设计的一款微机械加速度计灵敏度为 650 mV/g ，噪声等效加速度为 $23.17 \mu g/\sqrt{\text{Hz}}$ ，非线性为 0.098% 。

2007 年，由 W T Pike 等人提出的基于电容检测的微机械加速度计^[12]，通过采用质量块由叠加的中字型框架作为支撑，通过叠加支撑结构，能够在保证结构抗冲击性能的基础上增加检测灵敏度，综合实验表明其检测精度达到了 $10^{-8} g/\sqrt{\text{Hz}}$ ，能够满足卫星微振动检测需求，结构图如图 5 所示。

NASA 最初使用美国高级微重力加速度测量系统 (AMAMS) 测量国际空间站的微重力。随着测量的不断深入，2001 年，DeLombard 等人利用准稳态高精度加速度计测量的数据分析得到了国际空间站存在频率低至 0.01 Hz 的微振动。该系统采用小体积、低功耗的微机械加速度计作为核心检测器件，同时将模拟信号转换为数字信号输出。目前，该项目已经应用到多个航天任务和国际空间站的微振动测量。

在国外，已经开始使用 MEMS 加速度计进行卫星微振动测量并得到了大量的有效数据，实测数据说明 MEMS 作为卫星在轨微振动和微重力测量的有效性和可行性。根据前面分析可知，我国当前阶段，为了保

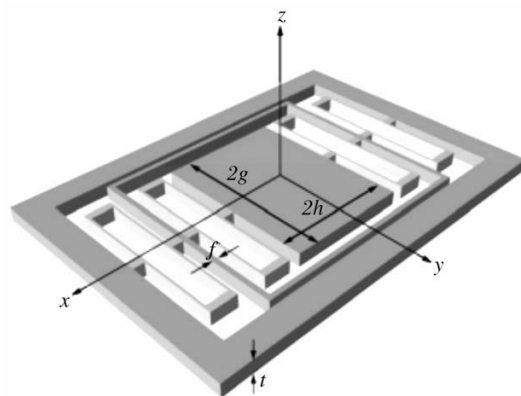


图5 采用叠加支撑结构的 MEMS 加速度计

证测量精度和可靠性，仍主要采用依靠传统机械加速度计进行在轨卫星微振动测量实验的方案。因此，在保持传统测量方案的同时，应大力发展 MEMS 技术。

2.4 谐振式微机械加速度计

谐振式微机械加速度计是一种直接输出频率的新型加速度计，因其具有数字信号输出、工作稳定等特点，国内外多家研究机构进行了研究。随着新结构、新检测方式的出现，其测量精度正接近传统高精度加速度计，就其性能指标而言，已可以应用于星载微振动测量。郭占社等人设计了基于音叉结构的谐振式微机械加速度计^[13]，结构框图如图 6 所示。其基本原理是，当外界有一水平方向的加速度，由于惯性作用，采用柔性支撑的质量块沿加速度相反方向产生相应的位移，即在左右两个音叉上产生一拉一压的大小相等的作用力，从而令谐振梁的刚度发生改变，其谐振频率也相应改变，通过检测谐振频率的变化可反推出外部加速度的变化，实现对加速度的测量。

2006 年，韩国 S. Seok 等人采用真空封装技术结合

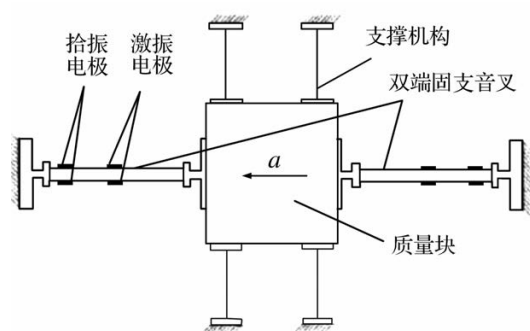


图6 谐振式微机械加速度计结构框图

硅-玻璃阳极键合技术，设计制作了一款高性能谐振式加速度计^[14]，该加速度传感器通过加速度产生的惯性力改变谐振梁的刚度，从而起到改变谐振梁谐振频率的目的，其结构如图7所示。实验表明，该传感器谐振梁基准谐振频率为24 kHz，测量灵敏度达128 Hz/g，最小可实现5.2 μg 加速度的测量。

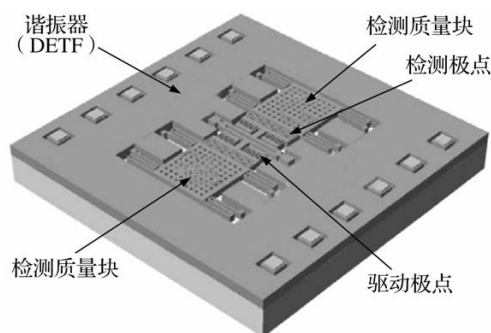


图7 谐振式加速度计设计版图

He Lin 等人采用将 DETF 的两根谐振梁中部连接的方式，实现了两谐振梁的振动相位正好相差180°，有效地避免了因加工工艺等因素带来的谐振梁的参数不完全一致，为提高谐振梁的稳定性提供了一种很好的解决方式，其结构如图8所示。根据其报道^[15]，该加速度计的灵敏度可达140 Hz/g，零偏稳定性达4 μg ，分辨率为20 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

随着 MEMS 加工工艺和结构设计的发展，谐振式加速度计其性能指标将不断提高，结合其高稳定性、数字频率输出，将开始应用于星载设备微振动测量等领域。

3 结束语

本文通过对卫星微振动的来源、作用机理等进行了分析，并通过实例说明了当前微振动已经限制了卫

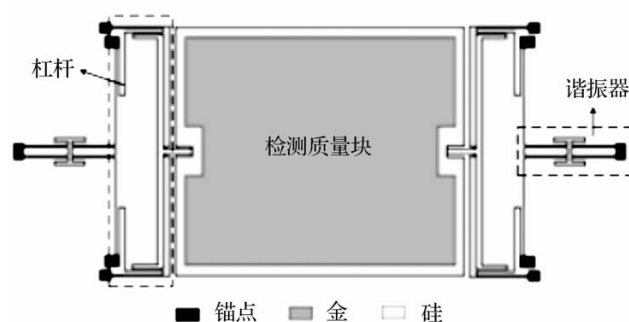


图8 谐振音叉中间连接结构图

星技术的发展。在此基础上，本文重点介绍了卫星微振动测量方法，通过分析对比发现，检测技术正在从传统检测方法向以 MEMS 技术为核心的低体积、低功耗方向发展，并随着技术的发展，进一步走向更高精度的谐振式加速度计解决方案。针对我国卫星振动检测技术多是采用传统检测技术的现状，为了满足将来卫星小型化、有效载荷进一步压缩等需求，在当前微振动测量技术发展基础之上，本文认为应重视以下几个方面：

- 1) 加快发展高精度微机械加速度计，并加快配套集成电路(IC)设计研发进程，同时从结构和电路处理两方面提高微机械加速度计的性能；
- 2) 研究直接输出频率的谐振式 MEMS 加速度传感器，直接输出数字信号，在此方向上缩短与发达国家的差距；
- 3) 结合微振动测量技术，研究基于主动抑制的阻尼减振平台，并进一步研究空间环境的微振动模型，从机理上提高微振动的检测精度；
- 4) 建立空间、地面微振动测试环境平台，通过实验方法获得有效的减振模型。

参考文献

- [1] 周东强, 曹瑞, 赵煜, 等. 遥感系列卫星在轨微振动测量与分析[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(6): 627-630.
- [2] 李宁, 韩晓健, 李俊慧, 等. 航天器微振动信号的地面测试方法[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(1): 67-71.
- [3] 张振华, 杨雷, 庞世伟. 高精度航天器微振动动力学环境分析[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(6): 528-534.
- [4] 石俊霞, 薛旭成, 郭永飞. 卫星振动对 TDICCD 成像质量的影响及补偿方法[J]. 光电工程, 2010, 37(12): 11-16.

(下转第10页)

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.02

复合材料多轴联动超声 C 扫描检测技术评述

王东升, 杨党纲, 刘颖韬, 徐娜, 李硕宁

(北京航空材料研究院 航空材料检测与评价北京市重点实验室, 北京 100095)

摘要: 随着航空、航天装备研制中非规则曲面复合材料制件比重的增加, 传统的超声 C 扫描检测手段已难以满足实际应用需求。多轴联动超声 C 扫描检测技术为非规则曲面复合材料制件的检测提供了重要技术支撑。本文分析和评述了多轴联动超声 C 扫描检测的技术原理、典型设备形式和主要功能, 分析了存在的问题, 并指出发展方向。

关键词: 复合材料; 超声检测; 非规则曲面; C 扫描检测

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-006-05

Review of the Multi-axis Ultrasonic C-scan Technique for Composites

WANG Dongsheng, YANG Danggang, LIU Yingtao, XU Na, LI Shuoning

(Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: With the rapid development of aerospace and aviation equipment, the demand for ultrasonic testing of irregular curved composites is increasing. For such application, the traditional ultrasonic C-scan technique can hardly meet the reliability requirements, and the multi-axis ultrasonic C-scan technique is becoming a critical technical support. In this paper, the technical principle, typical structures and main functions of multi-axis ultrasonic C-scan testing systems are analyzed and summarized, and the technical development direction is predicted.

Key words: composites; ultrasonic testing; irregular curved surface; C-scan testing

0 引言

超声 C 扫描检测技术已广泛用于航空、航天复合材料的缺陷检测。检测中, 保持探头声束与工件上各检测点的法矢方向一致, 同时保持探头、工件间相对距离一致, 是获得可靠检测结果的关键之一。

目前, 国内采用的超声 C 扫描检测系统大多是针对平面、圆筒、圆柱等具有规则形状的工件。而在我国航空、航天装备的研制中, 多品种、小批量非规则曲面复合材料制件的比重正在增加。对这类制件, 传统设备由于不能保证良好的检测耦合条件, 检测覆盖率和可靠性往往不足。

多轴联动超声 C 扫描检测系统集成检测技术、机器人技术、计算机技术、信号处理技术、CAD 相关技术于一体, 可完成复杂型面的追踪检测, 实现缺陷的可靠检测与评价, 并较大程度上保证检测覆盖率, 是复合材料制件检测技术发展的新方向。本文从设计和使

用角度, 结合国外检测系统, 对多轴联动超声 C 扫描检测的技术原理、典型设备形式、主要功能进行概括, 分析存在的问题, 并指出发展方向。

1 多轴联动超声 C 扫描检测技术

对于非规则曲面工件, 目前主要采用的超声检测方法: 一是将工件分为若干个区域, 每个区域近似为平面, 然后对每个区域分别进行手动或自动 C 扫描平面方式的扫查, 这种方法只适用于曲率较小的工件部位, 对曲率较大部位难以保证可靠性, 分区检测效率也低。二是采用多轴联动超声 C 扫描检测方式 (如图 1), 在测量或直接从 CAD 数据文件获取复杂形状工件的尺寸数据后, 对工件进行扫描轨迹规划, 再根据各检测点的位置和法矢自动控制探头对工件表面进行跟踪扫查, 并对检测结果进行自动记录和成像显示, 其主要优点在于:

1) 对于曲面工件的不同部位, 可最大限度保证探头声束与工件表面法矢重合, 并最大限度保持探头、工件间距离的一致性, 检测灵敏度一致性好, 检测覆盖率高。

2) 对曲面工件一次装卡可完成全部或绝大部分区

收稿日期: 2014-04-07; 收修改稿日期: 2014-04-17

作者简介: 王东升 (1980-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为无损检测技术及设备研发。

域的检测,避免了对工件按分区分块方式自动检测时需要多次重复装卡工件带来的效率低下问题。

3) 既可用于规则形状制件,也可用于各种非规则曲面制件,因此具有高柔性和高通用性,投入一台设备可实现多台专用检测设备的功能;该优势还体现在,对于复合材料研发过程中各种复杂形状的新产品具备快速适应能力,只需通过 CAD 数模导入(或仿形测量)、扫描轨迹规划等步骤即可实现检测,并提供高可靠检测数据,从而缩短复合材料研制周期。

4) 由于软件具备曲面造型及三维数据处理的能

力,可使工件检测结果以更为直观的三维方式显示,便于缺陷的定位,尤其对于曲率较大的部位,可使缺陷形状的显示及其尺寸的测量更加准确。

多轴联动超声 C 扫描检测系统一般同时支持喷水穿透法、喷水脉冲反射法这两种复合材料制件常用检测方式。此外,取决于具体的系统结构形式,部分检测系统还同时支持水浸脉冲反射法、水浸穿透法对金属制件、某些特殊结构制件进行检测。由此可见,该类检测系统具有较为广泛的适用范围。图 2 是不同检测方式示意图。

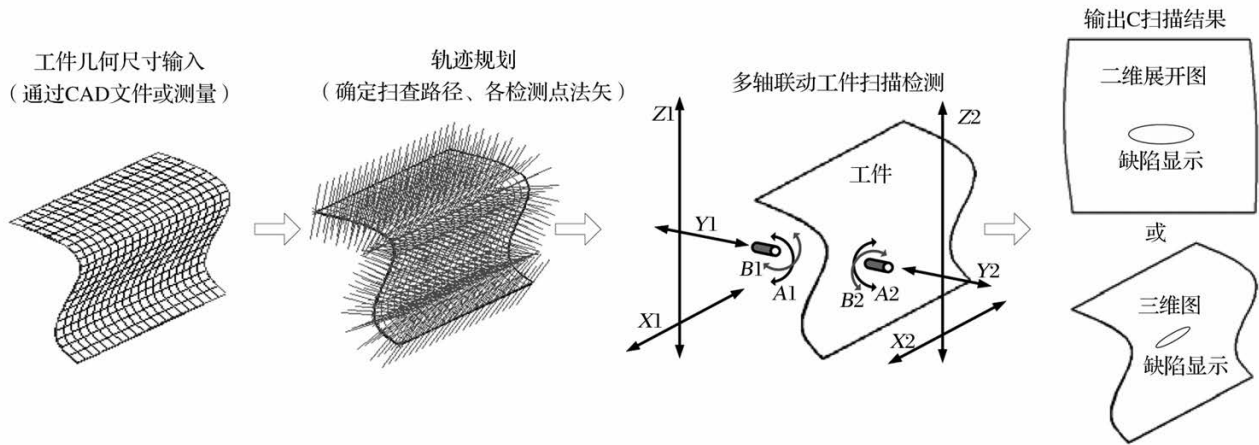


图 1 曲面工件多轴联动超声 C 扫描检测简图

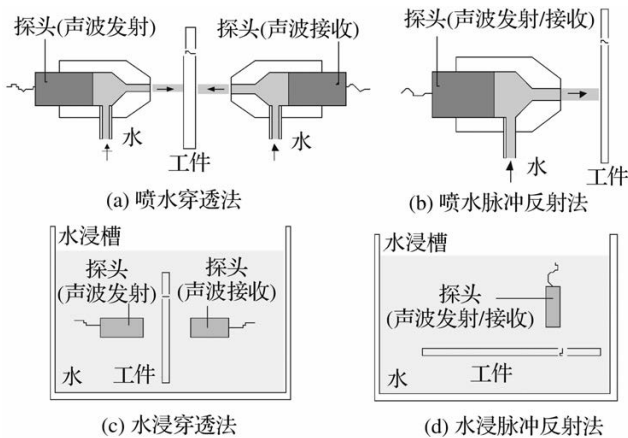


图 2 典型检测方式示意

2 检测系统主要结构形式

多轴联动超声 C 扫描检测系统在英国、美国、西班牙、德国等国家都有企业在开发^[1-7]。目前比较知名的制造商包括英国超声波科学有限公司(USL)、美国 GE 公司、西班牙 Tecnatom 公司等多家。此外,被公认为功能先进、强大的还有美国波音公司(Boeing)研发的多

轴联动超声 C 扫描检测系统,但目前未见对外销售。

根据资料和现场调研,尽管不同厂家所研制的多轴联动超声 C 扫描检测系统形式多样,但其主流形式仍可归纳为以下两类:一是采用水平臂结构的 10 轴大型检测系统(如图 3(a));二是采用垂直臂结构的 11 轴大型检测系统(如图 3(b));其中 10 轴水平臂系统包含了实现双曲率复合材料制件喷水穿透法检测所需的最基本的 6 个直线平移轴: X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2 , Z_1 , Z_2 ; 4 个探头角度调节轴: A_1 , A_2 , B_1 , B_2 。其主要特征是:探头及探头角度调节轴均安装于水平布置的 Y_1 、 Y_2 轴上。11 轴垂直臂系统包含了实现双曲率复合材料制件喷水穿透法检测所需的最基本的 7 个直线平移轴:主 X 轴、次 X 轴(X_1 与 X_2)及 Y_1 , Y_2 , Z_1 , Z_2 ; 4 个探头角度调节轴: A_1 , A_2 , B_1 , B_2 。其主要特征是:探头及探头角度调节轴均安装于垂直布置的 Z_1 , Z_2 轴上。除可实现双曲率工件的穿透法检测外,在 10 轴水平臂系统中通过采用 X_1 , Y_1 , Z_1 , A_1 , B_1 五轴联动或者 X_2 , Y_2 , Z_2 , A_2 , B_2 五轴联动,在 11 轴垂直臂系统中通过采用 X , Y_1 , Z_1 , A_1 , B_1 五轴联动或者 X , Y_2 , Z_2 , A_2 , B_2 五轴联动

等方式, 还可实现双曲率工件的脉冲反射法检测。

实际应用中, 以 10 轴水平臂结构、11 轴垂直臂结构为基础, 还可开发各种更为复杂的检测系统形式。比如, 为了能更好兼顾桶形件、锥形件等规则圆形曲面工件的检测, 各厂家会在上述两种检测系统中再增加 1 个转台轴。又如, USL 公司开发的 17 轴水平臂系统是在 10 轴水平臂系统的基础上增加了一个 5 轴电动工装和两个自动控制喷水流量的水泵控制“轴”。5 轴电动工装有 5 个可编程的运动轴——这些轴可在每次检测时自动带动工件移动到事先的编程位置, 从而可为每个零件类型提供一个稳定的、可重复的夹持位置和参考点; 水泵控制“轴”可在计算机系统控制下, 对喷水嘴喷出的水的流速进行实时控制, 对探头喷水角度和高度的变化进行自动补偿, 获得更加稳定的水流和检测信号。

通常来说, 对于特定结构形式的检测系统, 往往会有它更为适合的一类应用, 通过调研和分析发现, 以上水平臂系统、垂直臂系统也不例外, 分别具有其各自的优点。其中水平臂系统的优点体现在: ①零件

的每一边都有 5 个可独立运行的轴, 具有最大的自由度, 可最大限度地对曲面件实施跟踪检测; ②水平臂结构由于在 Y 方向上的尺寸不受探头角度调节轴水平延展长度的限制, 因此在用喷水穿透法检测凹陷较深的“C 型”零件的时候在零件的深度方向上可移动范围大, 空间限制小; ③10 轴联动比垂直臂的 11 轴联动控制更容易, 成本更低; ④能够集成一个在顶部安装的电机驱动的可编程定位工装。垂直臂系统的优点体现在: ①具有更好的机械稳定性; ②垂直的 Z 轴更适合检测转台上的零件, 尤其是穿透法检测时; ③垂直的 Z 轴允许在检测系统中增加一个水浸槽, 用于实现水浸脉冲反射法或水浸穿透法的检测, 而这是水平臂结构不容易做到的。

目前, 除水平臂系统、垂直臂系统两种主流形式外, 采用工业机器人的多轴联动超声 C 扫描检测系统 (图 3 (c)) 也是目前发展较为迅速的一类系统形式。通常认为, 这类系统应相对于水平臂、垂直臂等传统框架式结构具有更大的操作灵活性, 但由于种种原因, 目前此类结构形式的系统实际应用还相对较少。

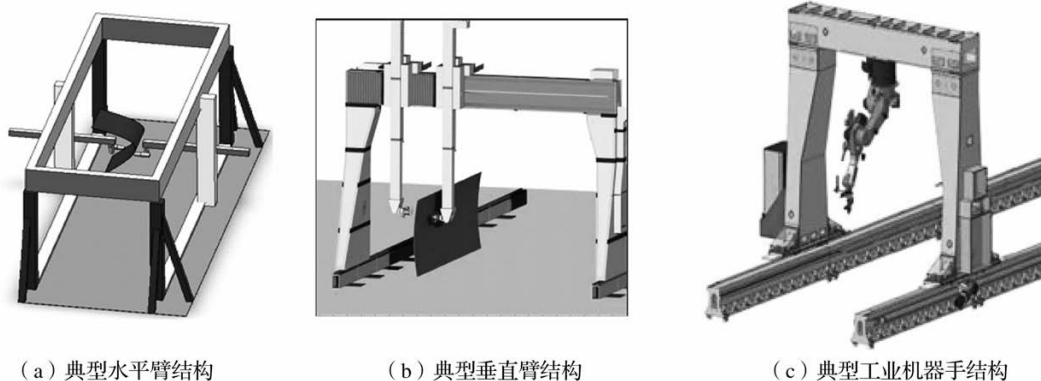


图 3 检测系统典型结构形式示例

3 主要功能特点

目前, 配合各种结构形式检测系统所开发的软件、电气功能也已非常成熟, 概括国外各公司产品检测功能的开发情况, 主要有以下特点:

3.1 CAD 文件导入及扫描轨迹规划功能

通过 CAD 模型文件导入工件的仿形数据, 生成相应的检测点位置和扫描轨迹, 并转换为扫描系统各个轴的空间坐标值, 然后输送给运动控制系统, 用于指挥各个轴对工件进行自动扫描。目前, 除了依据 CAD 模型文件自行生成扫描轨迹外, 为方便使用, 部分检测系统的软件还可直接读入由第三方 CAM 软件所生成

的扫描轨迹信息, 比如 USL 公司的软件可以读取 BAE-SYSTEMS 公司 CAD/CAM 软件所生成的扫描轨迹信息。

3.2 教学功能

现实中并不是所有工件均能提供 CAD 模型文件, 即便提供有 CAD 模型文件, 工件的实际形状也可能相对于 CAD 模型存在大的偏差。为此, 国际上先进的多轴联动超声 C 扫描检测系统中均集成了曲面测量示教功能。通过“教与学”方法, 由操作员在工件上选取不同点并“教授”出不同点处各个扫描轴的空间坐标位置来获得零件的仿形数据。教授点的数量依工件的复杂性、弯曲的程度和曲面的明显变化程度而定。当各教授点处对应的各个轴的空间坐标位置已确定并输

入软件后,在扫描时,教授点之间轴的位置,将随着系统的移动按一定的扫描轨迹规划算法被插入(典型是按照样条曲线插入)。目前采用的曲面测量示教方法多基于超声波测距原理,但也有采用激光测距原理的,如 GE 公司的部分检测系统。

3.3 定位偏差的矫正功能

对于复杂结构的工件,检测时需要事先在扫描范围内把工件装卡在已知的参考位置。然而,装卡过程中不可避免地会发生定位的偏差,或者装卡中因工装加压,工件变形而引起仿形数据——工件实际尺寸、位置的偏差,这些偏差均会影响检测的结果。目前矫正定位偏差的一种做法是首先在待测工件上选取定位基准点,然后利用超声测量或激光测量等方法获得待测工件的实际位置信息,并找到其与仿形数据之间的相对位置关系,再利用软件将仿形数据、工件实际位置数据通过旋转、平移等方式互相匹配,最后生成具有较高精度的探头运动轨迹。目前,在 USL 公司的多轴联动超声 C 扫描检测系统上即采用了与上述原理相类似的“3 点定位法”,此外,该公司还在软件中提供了“Brain line”功能,可进一步补偿工件在装卡过程中发生的变形。

3.4 噪声抑制功能

多轴联动超声 C 扫描检测系统普遍为尺寸数米长的大型系统。众所周知,在大型超声检测系统中,微弱的超声检测信号很容易因长距离传输衰减和受到噪音干扰(来自系统内部电机系统和外界电磁干扰)而变得无法有效识别。为了解决上述问题,一般采取的措施包括采用低噪声电机系统(或对电机系统进行噪声过滤),以及加强超声信号连接电缆的屏蔽等。此外,在涉及到超声信号远距离传输的场合,采用前置放大器也会是有效措施之一。前置放大器用于补偿信号在探头和探伤仪/卡之间远距离传输时产生的衰减,在靠近探头的一端对信号进行预先放大,由于信号衰减已提前得到了补偿,在到达探伤仪时就不必再采用高的增益来放大,这样在信号远距离传输过程中引入的噪声也就不会被过分放大,使信噪比得到改善。除以上常规措施外,各种新的噪声抑制技术正不断被开发,如 Tecnatom 公司采用了光纤技术,在超声探头接收到检测信号后首先进行数字化处理,然后通过光纤传送给远端的计算机处理,避免模拟超声信号传输中衰减的情况,同时数字化信号在传输过程中也具有强烈的抗空间电磁干扰能力。

3.5 检测图像三维显示与缺陷测量功能

上述公司开发的软件普遍具有三维图像可视化功能,允许对检测结果以三维方式显示,并允许操作人员在三维空间内调节图像以便从不同的方向来观察。此外,由于具备了三维图像处理功能,位于工件曲面部位的缺陷信号的真实尺寸(非二维投影尺寸)也可被准确地测量得到。如图 4 所示。

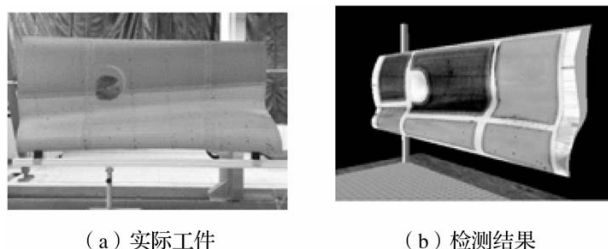


图 4 USL 公司曲面工件检测结果三维显示功能

3.6 扫描控制性能

在正确生成扫描轨迹的前提下,如何快速、精确地执行扫描计划,对于提升检测效率,保证检测结果可靠性至关重要。目前,USL 公司的 17 轴超声 C 扫描检测系统可在 500 mm/s 的较高扫描线速度下,保持较稳定的探头-工件耦合状态,检测出曲面上大约 4 mm × 4 mm 的制造缺陷^[7]。另据了解,波音公司自行研制的大型多轴联动超声 C 扫描检测系统即便对于曲率变化很大的组合曲面也可实现流畅的高速检测,可靠性也很高;其它如 GE 公司、Tecnatom 公司在相关设备的演示中也表现出很强的曲面检测能力。除检测速度和检测结果的可靠性外,如何防止机械系统与工件间干涉、碰撞,确保安全性,也是各厂家在检测系统的设计过程中所重点考虑的一个方面,比如 Tecnatom 公司专门针对曲面工件的检测开发了 SIROCO-3D 软件,该软件可以模拟当检测系统按照规划的扫描轨迹运行时的实际工作状态,为扫描轨迹的合理性、安全性检查,以及操作人员的培训提供了有效手段,GE 公司也开发有类似功能。

4 技术与应用展望

与传统材料相比,复合材料具有可设计性强、比强度比模量高、抗疲劳断裂性能好、结构功能一体化等一系列优越性能,是发展现代航空、航天技术不可缺少的基础材料。多轴联动超声 C 扫描检测技术能为复合材料的制造、应用提供高水平的检测技术支持,其潜在的应用前景是广阔的。目前我国已有数家航空企业从国外购买了多轴联动超声 C 扫描检测系统。

综合前面的分析来看,多轴联动超声 C 扫描检测技术目前已比较成熟。但是结合该技术的实际应用情况来看,应还有进一步提升的空间,比如,通过逐点教学获得曲面工件仿形数据的方式尽管可行,但当需要教授的点较多时,会影响检测效率,因此发展更为高效的曲面测量手段,如高精度、快速的 3D 激光测量技术^[8-9],有可能成为一种趋势。此外,就国内而言,尚未针对多轴联动超声 C 扫描检测系统建立统一的性能评价标准,尤其是在机械系统评价方面,尚未系统了解其精度变化对实际探伤性能的影响。

5 结论

1) 多轴联动超声 C 扫描检测技术为非规则曲面复合材料制件的检测带来突破。首先,它可以最大限度地保持探头、工件间耦合的一致性,在保证检测可靠性的同时,也可使检测覆盖率得到提高。其次,对曲面工件一次装卡即可完成全部或绝大部分区域的检测,避免了对曲面工件按普通的分区分块方式自动检测时,需要多次重复装卡工件带来的效率低下问题。再就是通用性强,投入一台设备可满足多种形状工件的检测需求。

2) 多轴联动超声 C 扫描检测技术目前已较为成熟,不仅检测系统结构形式多样,而且软件、电气功能丰富。但该技术应还有进一步提升的空间,比如发展应用更为高效的曲面测量手段。此外,对于多轴联

动超声 C 扫描检测技术,国内尚未建立统一的性能评价标准,还需要业界更多努力。

参考文献

- [1] Jeroen Rutten. Multi Aix Automated Ultrasonic Inspection Systems for new AIRBUS A380 composite Glare Panels [C] // Proceeding of Aerospace Testing Hamburg, 2004.
- [2] W. Haase, A. Maurer. Latest developments on industrial ultrasonic testing of aircraft components [C] // Proceedings of the World Conference on Non-Destructive Testing, 2004.
- [3] Daniel J. Cotter, Jennifer E. Michaels and Tomas E. Michaels, etc. Path controlled contour following for ultrasonic imaging of complex shape composite components [C] // Proceedings of the World Conference on Non-Destructive Testing, 2000.
- [4] 李志君. 先进复合材料的无损检测 [J]. 宇航材料工艺, 2000, 30 (5): 28-30.
- [5] 帅家盛. 航空制造业质量控制的创新——飞机部件智能超声检测系统 [J]. 航空制造技术, 2004, (10): 110-112.
- [6] 王晓宁. USL 超声 C 扫描喷水检测系统用于哈飞复合材料检测 [J]. 航空制造技术, 2008, (15): 40-42.
- [7] 王晓宁. 全自动超声 C 扫描系统在航空复合材料检测中的应用 [J]. 航空制造技术, 2008, (4): 57-59.
- [8] 毛方儒, 王磊. 三维激光扫描测量技术 [J]. 宇航计测技术, 2005, 25 (2): 1-6.
- [9] 许智钦, 闫明, 张宝峰, 等. 逆向工程技术三维激光扫描测量 [J]. 天津大学学报, 2001, 34 (3): 404-407.

(上转第 5 页)

- [5] 谭庆贵, 胡渝, 赵悦莹. 卫星振动对星间光码分多址系统性能的影响 [J]. 光子学报, 2006, 35 (11): 1730-1733.
- [6] 向艳红, 赵寿根, 杨林华. 关于微小振动的激光多普勒测量 [J]. 强度与环境, 2009, 36 (6): 50-54.
- [7] 彭泳卿, 陈巍, 陈青松. 高精度电容式微振动传感器的设计与实现 [J]. 遥测遥控, 2012, 33 (2): 67-71.
- [8] 宋仁旺, 陈琳英. 静电悬浮加速度计关键技术剖析 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45 (34): 67-70.
- [9] 刘云峰, 蔺高, 董景新. 静电悬浮微机械加速度计设计 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47 (2): 181-185.
- [10] 薛大同, 雷军刚, 程玉峰, 等. 神州号飞船的微重力测量

- [J]. 物理, 2004, 33 (5): 351-358.
- [11] 张霞. 微机械加速度计的研究现状综述 [J]. 功能材料和器件学报, 2013, 19 (6): 275-282.
- [12] Pike W T, Kumar S. Improved design of micromachined lateral suspensions using intermediate frames [J]. J. MICRO-MECH MICROENG, 2007, 17: 1680-1694.
- [13] 郭占社, 樊尚春. 一种谐振式加速度传感器及其设计 [J]. 中国机械工程, 2008, 19 (21): 2570-2572.
- [14] Seok S, Chun K. Inertial-grade in-plane resonant silicon accelerometer [J]. Electronics Letters, 2006, 42 (19): 1092-1094.
- [15] He Lin, Xu Yongping. A CMOS readout circuit for Sol resonant accelerometer with bias stability and resolution [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008, 43 (6): 1480-1490.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.03

微谐振式压力传感器的差动输出设计与建模

杨朔, 邢维巍

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 提出一种应用于微谐振式压力传感器的敏感结构, 其一次敏感元件为矩形硅膜片, 膜片的上表面架设有三个两端固支的硅谐振梁, 间接受压力作用, 根据膜片上不同位置设置的硅谐振梁的固有频率对于压力变化有不同的变化规律的特点, 实现对被测压力的差动输出检测。针对这种结构, 建立被测压力与谐振梁固有频率的数学模型。设计实际尺寸参数进行计算分析, 得出谐振梁的分布位置和几何参数对其振动特性的影响规律, 给出了由差动输出解算压力的公式, 验证了所提出的结构的设计思想和优化参数的可行性。

关键词: 硅微结构; 谐振梁; 压力传感器; 理论模型

中图分类号: TP212; TB935

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2014) 00-0011-04

Design and Simulation of Differential Outputs for Resonant Pressure Microsensors

YANG Shuo, XING Weiwei

(School of Instrumentation Science & Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: This paper proposes a pressure sensing structure with a square silicon diaphragm as its preliminary and direct sensing component and three silicon resonant beams as the final and indirect sensing units which are attached on the upper surface of the diaphragm. Natural frequencies of silicon resonant beams set at different locations of the diaphragm have different variations as the pressure changes, thus to attain the differential output. For this structure, this study builds the mathematical model of the pressure and the natural frequencies. It designs actual size parameter to make some simulations and calculations, obtains laws of the distribution position and features of the resonant sensing structure, gives the formula of calculating the pressure and validates the design thought and optimization parameters.

Key words: silicon microstructure; resonant beam; pressure sensor; theoretical model

0 引言

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 将电气和机械部件结合在单基板上, 是具有从亚微米级到毫米级结构的小型一体化设备, 由于体积的缩小, 机械性能的优良, 设计、制造、封装工艺的不断发展和较好的成本效益^[1], 孕育着广阔的前景、巨大的社会和经济效益, 是传感器发展的重要趋势之一^[2]。微传感器因其体积小、能耗低、响应快, 应用在航空航天领域有明显优势。其中, 谐振式微传感器将微机械加工技术和谐振传感技术相结合, 又具有高可靠性和数字输出等优点^[3]。

自 J. C. Greenwood 成功研制出谐振式硅微结构压力传感器以来, 美国、日本和欧洲的众多著名大学 (如 MIT、斯坦福、Twente 等) 以及相关领域的跨国公司 (如德鲁克、横河、斯伦贝格等) 都先后加强了谐振式硅微结构传感器及其制造工艺方面的研究力量。目前硅微机械传感器已经开始从实验室进入商业化阶段, 有的已经形成了产业^[4]。

谐振式硅微机械压力传感器采用复合敏感结构, 被测压力直接作用于一次敏感结构感压膜片的下表面, 感压膜片产生相应的应变与应力, 二次敏感结构硅谐振梁 (简称硅梁) 的两个固支端受到应力作用, 从而使硅梁的固有频率产生变化^[5]。在这种典型的微结构谐振式传感器的敏感结构的基础上, 本文提出一种改进方案, 使其具有差动输出, 提高了抗干扰能力。通过建立数学模型, 设计实际尺寸参数进行计算分析, 得出硅梁的分布位置和几何参数对其振动特性的影响

收稿日期: 2014-04-28; 收修改稿日期: 2014-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60927005)

作者简介: 杨朔 (1989-), 硕士研究生, 主要研究方向为微结构传感器及系统, 微弱信号检测技术; 邢维巍 (1973-), 男, 副教授, 博士, 主要研究领域为微机械传感技术及其信号处理技术、智能传感技术, 专长为模拟信号处理技术和微弱信号检测。

规律,验证了所提出的结构的设计思想和优化参数的可行性,为谐振式压力传感器敏感结构的设计提供了参考。

1 谐振敏感结构

有一种被研究过的微谐振式压力传感器的敏感结构,其一次敏感单元为矩形硅膜片,当敏感压力变化并将之转化为膜片的应变与应力时,膜片上表面架设的硅梁感受膜片的应力,其固有频率随被测压力的变化而变化。由文献 [6] 中对矩形硅膜片的相关分析知,在受到压力时,膜片中部受拉伸,而边缘受压缩,如在两区域内均架设梁谐振子,则膜片感受压力时,两区域内的梁谐振子的固有频率将向相反的方向变化。据此提出一种可实现差动测量的谐振敏感结构,示于图 1。

图 1 所示敏感结构由矩形硅膜片、3 个硅梁和边界隔离区域组成。被测压力直接作用于矩形硅膜片,使之转化为应力与应变,3 个硅梁作为二次敏感元件,感受膜片上表面的应力与应变。膜片的半边长、半边宽和厚度分别用 A, B, H 表示。在真空封装中,将三个双端固支的硅梁键和在膜片上表面的凹槽上,使之成为整体。硅梁 1 的长度、宽度和厚度分别用 l_1, b_1, h_1 表示;硅梁 2 的长度、宽度和厚度分别用 l_2, b_2, h_2 表示,硅梁 3 使整个结构对称,其分析与硅梁 2 相同,下文将省略。

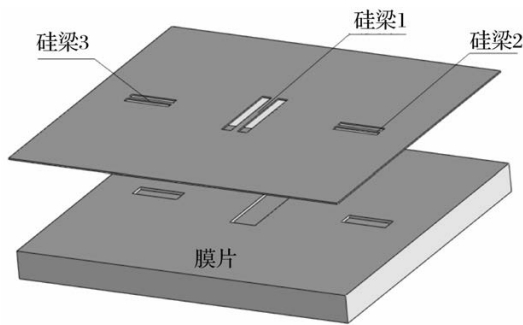


图 1 差动输出的硅微结构谐振梁式压力传感敏感结构

$$\sigma_x = \frac{-2 \overline{W_{\text{rec,max}}} HE}{1 - \mu^2} \cdot \left[\left(\frac{H}{A} \right)^2 \left(\frac{3x^2}{A^2} - 1 \right) \left(\frac{y^2}{B^2} - 1 \right)^2 + \mu \left(\frac{H}{B} \right)^2 \left(\frac{x^2}{A^2} - 1 \right) \left(\frac{3y^2}{B^2} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{-2 \overline{W_{\text{rec,max}}} HE}{1 - \mu^2} \cdot \left[\left(\frac{H}{B} \right)^2 \left(\frac{3y^2}{B^2} - 1 \right) \left(\frac{y^2}{A^2} - 1 \right)^2 + \mu \left(\frac{H}{A} \right)^2 \left(\frac{y^2}{B^2} - 1 \right) \left(\frac{3x^2}{A^2} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

图 3 所示为由公式 (3), (4) 得到的 x 轴和 y 轴上的应力曲线 (μ 取 0.278)。

2 矩形膜片模型

建立坐标系,如图 2 所示(图中量值单位为 mm)。要利用硅的频率特性实现测量,此种敏感结构在工作时,应使矩形膜片处于小挠度线性范围。

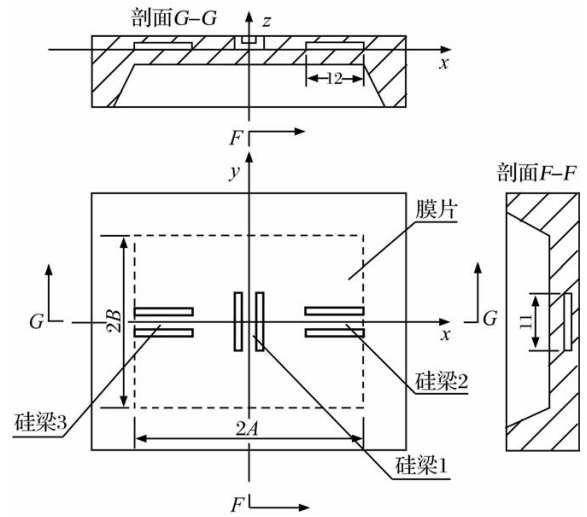


图 2 坐标系示意和机械结构

矩形膜片底部受到压力时,其法线 z 方向的位移为^[2]

$$\omega(x, y) = \overline{W_{\text{rec,max}}} H \left(\frac{x^2}{A^2} - 1 \right)^2 \left(\frac{y^2}{B^2} - 1 \right)^2 \quad (1)$$

$$\overline{W_{\text{rec,max}}} = \frac{147p(1 - \mu^2)}{32(7/A^4 + 7/B^4 + 4/A^2 B^2)EH^4} \quad (2)$$

式中: p 为均布压力, Pa; μ 为梁材料的泊松比, kg/m^3 ; E 为梁材料的弹性模量, Pa; $\overline{W_{\text{rec,max}}}$ 为膜的最大法向位移与其厚度之比^[2]。

$$\text{令 } \xi = \frac{147(1 - \mu^2)}{32 \left(\frac{7}{A^4} + \frac{7}{B^4} + \frac{4}{A^2 B^2} \right) EH^4}, \text{ 则公式 (2) 可简}$$

化为

$$\overline{W_{\text{rec,max}}} = \xi p$$

在均布压力 p 作用下,矩形膜片的上表面 ($z = +H/2$) 沿 x 轴和 y 轴的正应力分布分别为

由图 3 知,硅梁所感受的应力会因其所处位置的不同而不同,其固有频率也会产生相应的差别。当把

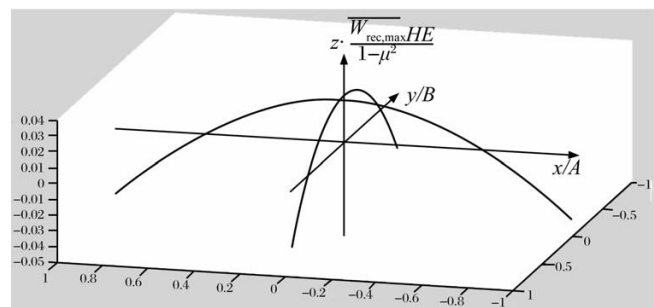


图3 沿坐标轴分布的应力

梁架设的位于膜片中部一定范围内则受拉伸，固有频率随均布压力 p 单调增加；把梁架设的靠近膜片边缘一定范围内则受压缩，固有频率随均布压力 p 单调减小，这是实现差动输出的关键所在。

3 梁谐振子的位置与尺寸的确定

键合在膜片上的硅梁的尺寸相对于膜片来说足够小，以至于公式 (3)，(4) 所表示的膜表面引力可以作为硅梁所受的“初始应力”。由文献 [6] 知，沿 y 轴的硅梁 1 以架设在正中央为佳。而硅梁 2 的一段应紧靠膜片边缘以受到最大的压缩作用。

由图 3 可知， x 和 y 轴上的包含原点（中心点）的一定范围内应力为正。若要使得沿 y 轴分布的硅梁 1 受拉，则它的长度需要控制在一定范围内；同理在膜片边缘沿 x 轴分布的硅梁 2 要受压，长度也应控制在一定范围内。若梁的两端跨过了应力曲线的零点，则梁的一部分受压，另一部分受拉，处于一种不稳定的受力状态，这种情况应当避免。

设膜片半边宽与半边长的比为 λ ，即 $\lambda = B/A$ 。确定参数 $\mu = 0.278$ ， $H = 0.1 \times 10^{-3} \text{ m}$ ， $A = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。表 1 讨论了当 λ 的值分别取 1，0.9 和 0.8 时，令 y 轴上硅梁 1 范围内 $\sigma_y > 0$ ， x 轴上硅梁 2 范围内 $\sigma_x < 0$ ，得到了硅梁 1 与硅梁 2 的长度 l_1 与 l_2 的取值范围。可见，当 A 的值固定时， λ 越接近 1，即膜片越接近正方形， l_1 和 l_2 的极限值越大。梁的长度对于梁的频率特性的影响很大，详见第 4 节。

表 1 固定 A 时 l_1, l_2 与 λ 的关系

λ	y 轴受拉段/ μm	l_1 极限值/ μm	x 轴受拉段/ μm	l_2 极限值/ μm
1	(-608.4, 608.4)	1216	(-608.4, 608.4)	391
0.9	(-603.1, 603.1)	1206	(-614.5, 614.5)	385
0.8	(-598.2, 598.2)	1196	(-622.6, 622.5)	377

4 梁的结构参数与频率特性

先看硅梁 1，在膜片的上表面，膜片沿 y 轴的位移为

$$v(x, y) = -2 \frac{\overline{W}_{\text{rec, max}} H^2}{B} \left(\frac{x^2}{A^2} - 1 \right) \left(\frac{y^2}{B^2} - 1 \right) \frac{y}{B} \quad (5)$$

根据敏感结构的实际情况及工作机理，压力作用下的在 y 轴方向上的梁的位移为直线，而且在梁的两端其轴向静位移和矩形膜片相应位置的轴向位移十分接近^[7]。当硅梁 1 设置在 $y \in [-l_1/2, +l_1/2]$ 时，由压力引起梁的初始应力为^[8]

$$\sigma_{0y} = E \varepsilon_{0y} = E \frac{v_2 - v_1}{l_1} \quad (6)$$

$$v_1 = \frac{\overline{W}_{\text{rec, max}} H^2}{B} \left(\frac{l_1^2}{4B^2} - 1 \right) \frac{l_1}{B} \quad (7)$$

$$v_2 = - \frac{\overline{W}_{\text{rec, max}} H^2}{B} \left(\frac{l_1^2}{4B^2} - 1 \right) \frac{l_1}{B} \quad (8)$$

式中： v_1, v_2 分别为硅梁 1 在其两个端点 $y = -l_1/2$ 和 $y = l_1/2$ 处的沿 y 方向的轴向位移。在初始应力 σ_{0y} 的作用下，硅梁 1 两端的一阶固有频率为^[2]

$$f_1 = \frac{4.73^2 h_1}{2\pi l_1^2} \left(\frac{E}{12\rho} \right)^{0.5} \left(1 + 0.2949 \frac{\sigma_{0y} l_1^2}{E h_1^2} \right)^{0.5} \quad (9)$$

对于硅梁 2，也有类似的规律。

利用上述模型所知的规律，本文提供了一组微传感器敏感结构的参数做为参考，其压力测量范围在 0 ~ 0.1 MPa，见表 2。

表 2 敏感结构参数参考值

参数	A/m	λ	H/m	μ	E/Pa	$p/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
量值	1×10^{-3}	0.9	0.1×10^{-3}	0.278	1.3×10^{11}	2.33×10^3

在表 2 的情况下，分别改变硅梁 1 和硅梁 2 的尺寸，得到相对零压力下的频率变化量 $\Delta f = f(p) - f(0)$ 及频率的相对变化率 $\beta = \Delta f/f(0)$ ， $p = 105 \text{ Pa}$ ，见表 3 和表 4。

可见梁的长度对固有频率变化范围有直接的影响，固定其他参数，梁的长度越大，其固有频率越低。图 4 所示为当硅梁 1 的参数满足表 2、表 3，且长度连续变化时，其长度与频率相对变化率的关系曲线。图 5 所示为当硅梁 1 的参数满足表 2、表 3，固定梁的长度不变，令其厚度连续变化时，其厚度与频率相对变化率的关系曲线。

表 3 硅梁 1 长度尺寸对频率特性的影响

$h_1/\mu\text{m}$	$b_1/\mu\text{m}$	$l_1/\mu\text{m}$	f_1 范围/kHz	$\Delta f_1/\text{kHz}$	$\beta_1/\%$
5	50	600	(106.64, 113.58)	6.94	6.51
		500	(153.36, 160.83)	7.47	4.87
		400	(239.94, 247.48)	7.54	3.14

表 4 硅梁 2 长度尺寸对频率特性的影响

$h_2/\mu\text{m}$	$b_2/\mu\text{m}$	$l_2/\mu\text{m}$	f_2 范围/kHz	$\Delta f_2/\text{kHz}$	$\beta_2/\%$
3	30	350	(188.03, 179.12)	-8.91	-4.74
		300	(255.93, 246.09)	-9.84	-3.84
		250	(368.54, 357.74)	-10.80	-2.93

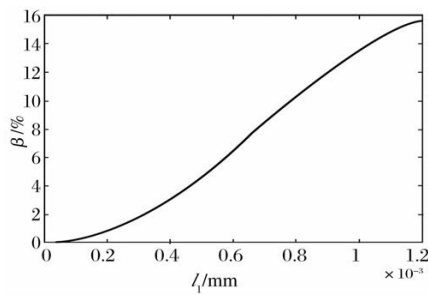


图 4 硅梁 1 长度与频率相对变化率关系曲线

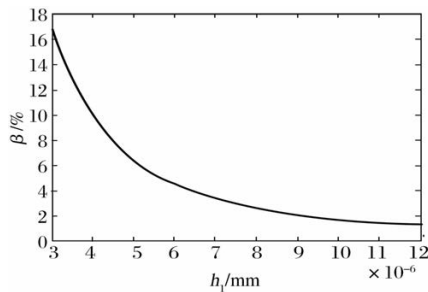


图 5 硅梁 1 厚度与频率相对变化率关系曲线

由以上可知,在硅梁长度的受限值范围内,其它参数固定且相同时,梁的长度越长,其频率相对变化率 β 越大,相对灵敏度越大;而当长度固定时,梁的厚度越厚,其频率相对变化率 β 越小,相对灵敏度越小。而由式(6)~(9)可知,当梁的长度和厚度成固定比例时,其相对灵敏度不随长度或厚度的变化而变化。对于硅梁 2,亦有类似的曲线和规律。

5 压力的解算

谐振式传感器的核心思想是将被测量转化为对谐振子的固有频率的测量,解算时,可使硅梁 1 与硅梁 2 的固有频率的函数做差,以消除共模干扰,得到表达压力大小的数字量。

对于硅梁 1,其在压力 p 下的固有频率为

$$f_1(p) = f_1(0) \sqrt{1 + 0.2949 \left(\frac{l_1}{h_1} \right)^2 \varepsilon_y} \quad (10)$$

对于硅梁 2,有类似表达。式中,沿 y 轴和 x 轴的应变分别为

$$\varepsilon_y = \frac{\overline{W}_{\text{rec,max}} H^2 (4B^2 - l_1^2)}{2B^4} \quad (11)$$

$$\varepsilon_x = -\frac{2 \overline{W}_{\text{rec,max}} H^2}{A^4} (A - l_2) (2A - l_2) \quad (12)$$

令 $\eta = H^2 (4B^2 - l_1^2) / (2B^4)$

$$\theta = -2H^2 (A - l_2) (2A - l_2) / A^4$$

则沿 y 轴和 x 轴的应变又可分别简化为

$$\varepsilon_y = \eta \overline{W}_{\text{rec,max}}$$

$$\varepsilon_x = \theta \overline{W}_{\text{rec,max}}$$

令固有频率的一个函数为

$$\gamma(f(p)) = \frac{f^2(p) - f^2(0)}{f^2(0)} \quad (13)$$

则硅梁 1 和硅梁 2 在压力 p 下的固有频率的函数可表示为

$$\gamma_1 = \gamma(f_1(p)) = 0.2949 \left(\frac{l_1}{h_1} \right)^2 \varepsilon_y = 0.2949 \left(\frac{l_1}{h_1} \right)^2 \eta \xi p \quad (14)$$

$$\gamma_2 = \gamma(f_2(p)) = 0.2949 \left(\frac{l_2}{h_2} \right)^2 \varepsilon_x = 0.2949 \left(\frac{l_2}{h_2} \right)^2 \theta \xi p \quad (15)$$

计算 $\gamma_1 - \gamma_2$,提取公因子 $0.2949 \xi p$ 并令 $X = (l_1/h_1)^2 \eta - (l_2/h_2)^2 \theta$,有

$$p = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{0.2949 X \xi} \quad (16)$$

参数 ξ, η, θ, X 仅与结构参数有关,当各结构参数确定后,参数 η, θ, ξ, X 均为固定常量。所以公式(16)是一个仅与硅梁 1 和硅梁 2 的谐振频率有关的简单表达式。

6 结论

针对一种差动输出的微结构谐振式压力传感器敏感结构,对此结构进行了方案的设计和结构建模、优化,研究了关于膜片形状、梁的位置与长度、以及相对灵敏度的设计规律,给出了压力输出的差动解算方法,验证了所提出的结构的设计思想和优化参数的可行性,为谐振式压力传感器敏感结构的设计提供了参考。

(下转第 65 页)

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.04

基于线性趋势与神经网络的校准间隔组合预测

曹伙俊¹, 赵芳²

(1. 海军计量办公室, 北京 100841; 2. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘 要: 为了实现对测量仪器校准间隔的优化, 对其校准数据进行建模, 用滑动平均建模法建立线性趋势模型, 预测参数的总体趋势, 在此基础上利用动态神经网络对预测残差序列进行补偿, 从而得到校准数据的预测值。给出基于线性趋势与神经网络的组合预测模型, 通过实验对预测模型进行了验证和对比分析, 并以此为根据对校准间隔进行优化。结果表明, 该组合模型比单一模型预测精度高, 既能预测总体趋势也能适应随机波动, 并且简单易行, 具有较强的普适性。

关键词: 滑动平均建模; 神经网络; 校准间隔; 组合模型

中图分类号: TB9; TP274; O211.67 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2014) 03-0015-04

Combined Forecast of Calibration Interval Based on Linear Trend Model and Neural Network

CAO Huojun¹, ZHAO Fang²

(1. Naval Metrology Division, Beijing 100841, China; 2. Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to realize the optimization of measuring instrument calibration intervals, we set up the model of the calibration data, and modify moving average modeling method to build the linear trend model. Then dynamic neural network is used to build the model of residual compensation and get the forecast value of calibration data. Combined forecast algorithm based on modified linear trend and neural network is given and verified through experiments, and then we optimize the calibration interval by the model. Results show that this combined model has better predicting effect than single model. It can not only predict the integral trend, but also adapt to random fluctuations. Beyond that, it is simple and has strong universality.

Key words: moving average; BP neural network; calibration interval; combined model

0 引言

测量仪器的校准间隔是一种多因素综合时间数据, 受到生产工艺、使用环境、使用频率、人员水平及其它干扰因素的影响, 从而产生偏差, 而在实际的校准过程中, 校准间隔通常是由生产厂家通过其他同类仪器使用状况来推荐的该仪器的固定校准间隔。因此有必要在实际工作中, 根据校准参数的历史数据, 对测量仪器进行校准间隔的优化。

在校准间隔优化算法的研究上, 组合预测模型由于能更加充分利用普通模型的优点, 弥补了单一模型存在的片面性, 有效提高了模型的预测精度, 从而受到了广泛的关注^[1]。组合预测, 顾名思义就是将不同的预测模型加以组合, 综合利用其模型有效信息, 它是在 1969 年由 Bates J N 和 Cranger C W J 首次提出的。Kin 等将指数平滑法与神经网络相结合构建组合模型,

用在金融时序数据预测上, 取得了良好效果^[2]。1989 年国际预测权威学术刊物“Journal of Forecasting”出版了组合预测的专辑, 充分说明了组合预测在预测领域的重要地位^[3-5]。目前, 组合模型已成为预测领域的一种发展趋势。

本文根据校准参数数据特点, 建立基于改进的线性趋势和神经网络组合模型, 对校准间隔进行优化, 并用实例进行了分析验证。

1 校准数据序列分析

根据测量仪器的历史校准数据建立相应的预测模型是比较流行的校准间隔优化方法。检测设备的校准数据呈现出动态发展的趋势, 历史校准数据序列可被划分为趋势项和随机项^[6], 趋势项表明了测量设备由于自身的特性引起变化的趋势, 随机项反映了由于外界的随机因素导致的波动。

针对校准数据序列的划分, 目前对于校准数据的处理有两种方法: 一种是提取和分离数据中的趋势项

收稿日期: 2014-04-03; 收修改稿日期: 2014-04-23

作者简介: 曹伙俊 (1974-), 男, 从事计量管理工作。

和随机项, 然后进行分别的预测和拟合^[7]; 第二种是由 Box 和 Jenkins 提出的, 对数据序列一直进行差分, 直到差分的结果可用平稳过程进行建模。两种方法都有其弊端, 第一种对趋势项和随机项的分离没有统一标准, 其通用性不可以保证; 第二种计算量巨大, 且预测效果一般。

因此可先对校准历史数据趋势项进行预测, 该预测值则包含了下一时刻的趋势项, 而校准数据的随机项则存在于预测残差中。再对残差项进行建模, 以前 k 个时刻残差预测下一时刻的残差, 并与趋势预测结果相融合得到最终预测值。趋势项的预测方法中, 比较典型的有滑动平均建模法 (Moving Average, MA) 和最小二乘法^[8], 本文拟建立 MA 模型对趋势项进行预测。用数据生成的方法对原始数据进行处理, 生成结果能减弱和消除随机干扰因素的影响, 使数据中蕴含的趋势性变化明显地表露出来。

对于校准数据序列的残差项, 由于动态神经网络的良好自适应性, 并能以任一精度去逼近非线性连续函数^[9-10], 因此用它对线性趋势模型预测残差进行建模, 动态神经网络的作用是逼近由残差项 $\varepsilon(k)$ 到 $\varepsilon(N+1)$ 的非线性映射, 从而实现对随机项成分的补偿。其关系式为

$$\varepsilon(N+1) = f(\varepsilon(k)) \quad (1)$$

式中: $k=1, \dots, N$ 。

2 基于线性趋势和神经网络组合预测

2.1 线性趋势模型的改进

滑动平均法是线性趋势模型建模的基本思想, 是利用历史数据对时间序列的变化趋势进行预测和反映。

有趋势性的时间序列数据, 用滑动平均法很不易得到比较理想的结果。例如, 当时间序列具有下降的线性趋势时, 会出现滞后偏差, 使预测值偏大^[11]。为消除模型的滞后偏差, 在传统一次滑动平均模型的基础上再作一次滑动平均, 即二次滑动平均, 有

$$A_t^{(2)} = \frac{A_t^{(1)} + A_{t-1}^{(1)} + \dots + A_{t-N+1}^{(1)}}{N} \quad (2)$$

式中: $A_t^{(1)}$ 是 t 时期数据第一次滑动平均的值; $A_t^{(2)}$ 是第二次滑动平均的值; N 为滑动平均的项数。

在两次滑动平均的基础上, 建立线性趋势模型为

$$\hat{x}_{t+\tau}^{(0)} = \hat{a}_t + \hat{b}_t \tau \quad (3)$$

式中: t 为当前时期; τ 为预测提前期; $\hat{a}_t$ 为截距; $\hat{b}_t$ 为斜率。 $\hat{a}_t, \hat{b}_t$ 与 $A_t^{(1)}, A_t^{(2)}$ 间的关系为

$$\hat{a}_t = 2A_t^{(1)} - A_t^{(2)} \quad (4)$$

$$\hat{b}_t = \frac{2}{N-1}(A_t^{(1)} - A_t^{(2)}) \quad (5)$$

求得 $\hat{x}^{(0)}$ 序列即为改进的线性趋势模型的预测值。

2.2 动态神经网络残差模型

设时刻 L 的原始数据 $x^{(0)}(L)$ 与预测值 $\hat{x}^{(0)}(L)$ 之差为时刻 L 的残差, 记为 $e^{(0)}(L)$, 即

$$e^{(0)}(L) = x^{(0)}(L) - \hat{x}^{(0)}(L) \quad (6)$$

对残差序列 $\{e^{(0)}(L)\}$ 进行动态神经网络建模, 其建模目的是通过前馈式的学习训练, 确定出合适的权值和阈值, 从而对校准数据随机项因素进行补偿。

设预测阶数为 S , 即用 $e^{(0)}(i-1), e^{(0)}(i-2), \dots, e^{(0)}(i-S)$ 的信息来预测 i 时刻的值。将 $e^{(0)}(i-1), e^{(0)}(i-2), \dots, e^{(0)}(i-S)$ 作为网络训练的输入样本, 将 $e^{(0)}(i)$ 作为网络训练的预测期望值, 即导师值。通过经验和实际计算比对, 确定出合适的网络结构和参数设置。用残差数据序列对神经网络进行训练和学习, 使得输入数据以预定的精度达到相应的输出值 (期望值)。这样得到的神经网络的阈值和权值等, 即为网络通过学习所得到的训练后的值, 从而可以将此模型作为残差数据序列的预测工具。进而可以对预测的未知校准参数进行误差补偿, 从而得到比较精确的预测值, 对校准间隔进行合理优化。

2.3 建模步骤

采用改进的线性动态神经网络模型对校准参数进行预测, 模型如图 1 所示。

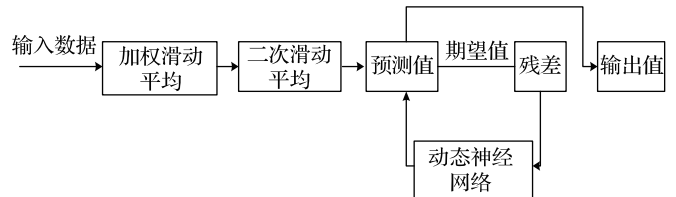


图1 基于改进的线性神经网络模型

基于改进的线性动态神经网络模型的建模步骤如下:

1) 对历史校准参数数列 $x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$ 确定其按照公式(2)至(5)确定权重并进行二次滑动平均, 经过建模计算得到预测数据序列 $\hat{x}^{(0)} = (\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \dots, \hat{x}^{(0)}(n))$ 。

2) 将预测数据序列与原始校准数据序列计算, 得到残差序列 $e = x^{(0)} - \hat{x}^{(0)}$ 。

3) 用动态神经网络对残差序列 $\{e^{(0)}(L)\}$ 进行学习训练, 并利用训练后的模型预测新的残差数据序列, 设其为 $\{\hat{e}^{(0)}(L)\}$, 从而得到原始时间序列新的预测值 $\hat{x}^{(0)}(i, 1)$, 有

$\hat{x}^{(0)}(i,1) = \hat{x}^{(0)}(i) + \hat{e}^{(0)}(1)$ (7)
 则 $\hat{x}^{(0)}(i,1)$ 就是该组合预测模型的输出值。

4) 将组合预测模型的结果, 分别与一次滑动平均模型以及动态神经网络模型的预测结果进行对比分析。

3 仿真计算与结果分析

本文用文献 [6] 的数据进行仿真计算, 该数据是一组合成标准不确定度 H_c 。在一年中的每个月里, 均采用 E1412A 数字万用表对 F5500A 校准器进行一次监控并对监控结果进行评估, 得到的试验数据分别为 0.0062%, 0.0066%, 0.0063%, 0.0070%, 0.0068%, 0.0071%, 0.0081%, 0.0074%, 0.0080%, 0.0081%, 0.0079%, 0.0083%。

3.1 改进的线性趋势模型预测结果

首先, 对校准数据进行两次滑动平均, 这两次滑动平均的步长取 2, 这样趋势模型的步长就为 4。取式 (5) 中 $\tau=1$, 即为单步预测, 最后求得预测值。模型预测结果如图 2 所示。

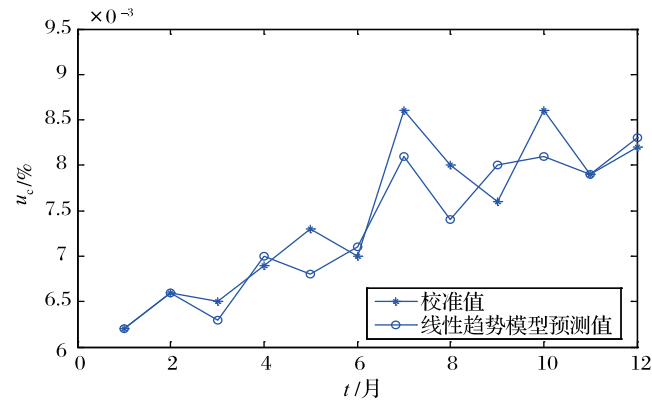


图2 趋势模型的预测结果

由图 2 可以看出, 线性趋势模型预测曲线较好地展现了测量不确定度的发展趋势。校准值和预测值的残差如图 3 所示。

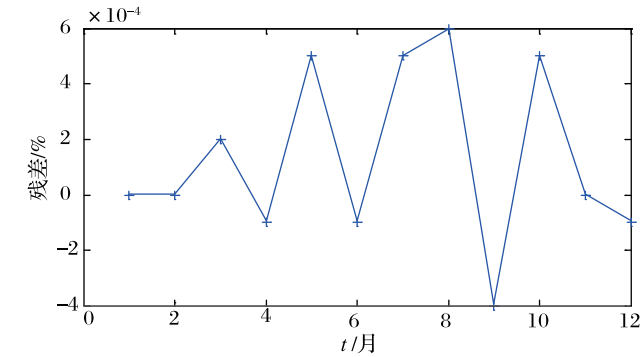


图3 预测残差

由图 3 可知, 线性趋势模型预测校准不确定度时, 残差均值为 0.00013%, 最大残差为 0.0006%。

3.2 组合模型预测结果及校准间隔优化

3.2.1 组合模型预测结果

采用动态神经网络模型对图 3 中的残差序列建模。神经网络模型设计采用 3 个输入采用特征参数, 1 个隐含层, 1 个输出节点数, 建立 $3-N-1$ 的神经网络模型, 中间隐含层的节点数量为 N 。为了确定最佳的 N , N 值一次取不同的数值, 并利用数据进行训练, 选择神经网络产生最小误差时所对应的 N 值, 作为隐含层的节点数。图 4 给出了隐含层所取不同节点数对应的误差, 由此可以发现最佳隐含层节点数为 8, 即神经网络最优结构为 $3-8-1$ 。

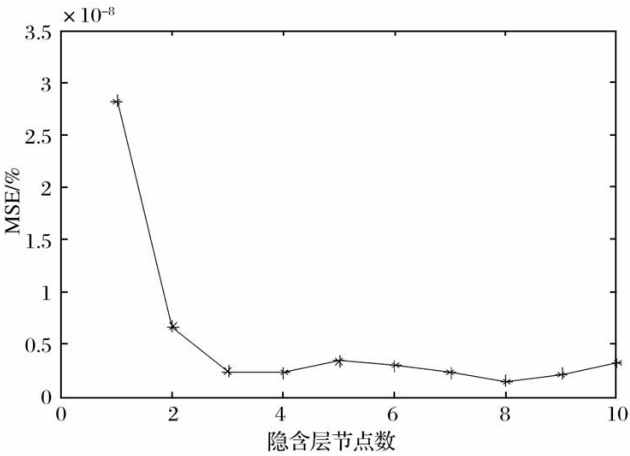


图4 隐节点数与均方误差 MSE 的关系

建立残差神经网络模型, 神经网络的学习率取 0.03。按图 1 的流程进行网络训练, 进行实验验证, 实验结果如图 5 所示。

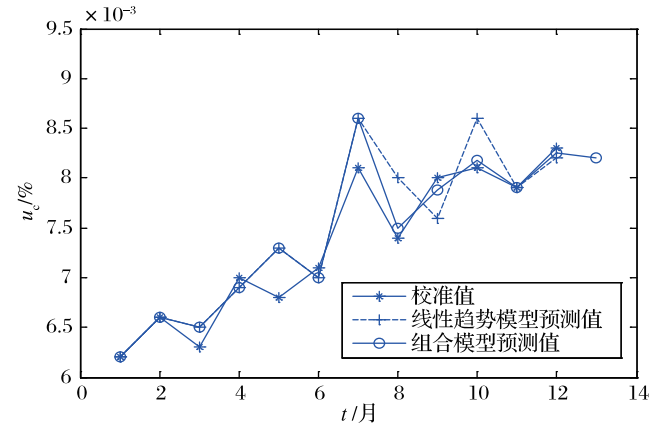


图5 基于改进线性动态神经网络模型预测结果

图中前 7 个点预测值没有进行神经网络残差补偿, 比较后 5 个点预测结果表明, 组合预测模型更加接近实际的测量结果。

为了直观的看出组合模型的优势, 将预测结果与线性趋势模型和动态神经网络时间序列预测进行比较, 评价指标是均方误差 MSE。预测效果如表 2。

表 2 三种模型预测效果

模型	MSE/%
改进的线性趋势模型	1.1167×10^{-7}
动态神经网络模型	1.5000×10^{-8}
组合模型	2.7833×10^{-9}

由表 2 可以看出, 改进的线性神经网络组合模型的预测效果要好于单一模型的预测效果。

3.2.2 校准间隔优化

在实际应用中, 校准给出的参数可能是合成标准不确定度 u_c , 也可能是校准均值 $\bar{x}$ 和重复测量引入的标准不确定度 u 。当校准参数为合成标准不确定度 u_c 时, 可直接进行后一至两个点的参数预测, 观察 $u_c(t+1)$ 是否超出要求而决定是否要调整校准间隔。当校准参数为均值 $\bar{x}$ 和标准不确定度 u 时, 可分别预测两者在其后一至两个点的值, 对于是否超出要求可以根据公式 $\bar{x}_{\text{down}} \leq \hat{x}(t+1) \pm \hat{u}(t+1) \leq \bar{x}_{\text{up}}$ 来确定, 其中 $\bar{x}_{\text{up}}$ 和 $\bar{x}_{\text{down}}$ 分别是该仪器校准参数均值上下限, 具体数值由工程要求给出。由此进一步可为其后的 1, 2 个月内是否进行校准监控提供决策依据。

本文中的仪器在实际监控中, 要求在测量标值称为 10 V 时, 不确定度 u_c 小于 0.01%。该组合模型在进行建模拟合时, 预测了未来第 13 个点的数据, 其值为 0.0082%, 小于工程要求, 因此可以建议其后 1 个月不进行校准监控, 将校准间隔延长为 2 个月。在接下来第 2 个月进行校准时, 可将实际校准值与前面的校准值进行建模, 运用模型进一步进行不等时间间隔的拟合预测, 重复进行并逐项推进, 进行校准间隔的优化。

4 结论

本文提出了基于改进的线性神经网络校准间隔组合预测算法, 该算法融合了神经网络和线性趋势模型的优点, 既利用了线性趋势模型对趋势项预测的优势,

又弥补了对随机扰动预测准确度低的缺陷。为了确保预测的准确可靠, 在实际应用的时候应不断考虑随着时间相继出现的随机扰动因素, 可以在预测数据之后的 1 点或 2 点的, 根据工程实际要求确定校准参数值是否有超差的风险。此方法简单易行、适用性强, 减小了以往许多预测算法存在的局限性缺陷。而且这种补偿是可以重复进行并逐项推进的, 因此可以对随机扰动进行实时的补偿, 从而实现对校准间隔的动态优化。

参考文献

- [1] 陈友华. 组合预测方法有效性理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] Kin K L, Yu L, Wang S Y, et al. Hubridizing exponential smoothing and neural network for financial time series predication [J]. Lecture Notes in Comprter Science, 2006, 2994: 493-500.
- [3] Bunn D W. Forecasting with more than one model [J]. Journal of Forecasting, 1989, 8 (3): 161-166.
- [4] Luo D, Liu S F, Dang Y G. The optimization of greymodel GM (1, 1) [J]. J Engineering Science, 2003, 5 (8): 50-53.
- [5] Granger C W J, Ramanathan R. Improved methods of combining forecasts [J]. Journal of Forecasting, 1984, 3 (2): 197-204.
- [6] 赵瑞贤, 孟晓风, 王国华. 基于灰色马尔柯夫预测的测量仪器校准间隔动态优化 [J]. 计量学报, 2007, 28 (2): 184-187.
- [7] 宋仙磊, 刘业政, 陈思凤, 等. 二重趋势时间序列的灰色组合预测模型 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47 (8): 115-117.
- [8] 牟峰, 吴开信, 李裕奇. 基于新息序列的多维 MA(q) 模型适时递推预测 [J]. 苏州科技学院院报: 自然科学版, 2008, 25 (2): 25-28.
- [9] Zhang Hua. The Research of Tourism Forecasting Demand Based on BP Neural Network [J]. Electronic Test, 2014, 1: 100-102.
- [10] Li Z, Xu J H, Wei Q. Investigation and comparison between GM(1, 1) and BPANN forecast models in Shanghai low-rent housing families [C] // Proc. of the IEEE International Conference on Information Engineering and Computer Science. [s. l.]: IEEE, 2010: 1-4.
- [11] 刘如峰, 李世平, 文超斌, 等. 基于线性趋势模型与 LSSVM 的校准间隔组合预测 [J]. 传感器与微系统, 2010, 29 (9): 61-63.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.05

基于 ADAMS 平台的四足机器人越障仿真与测试

张鹏, 朱岩

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 针对四足机器人在静步态行走过程中面对非平坦路面上障碍物的情况, 提出一套完整的四足机器人翻越障碍物的步态理论分析方法, 同时使用 ADAMS 虚拟样机软件对该步态进行运动仿真与测试。文中详细叙述了机器人膝关节与髋关节的运动轨迹规划, 将规划的轨迹离散化后导入 ADAMS 和利用 ADAMS/PostProcessor 得到仿真测试结果。该研究通过虚拟样机平台弥补了前期客观条件限制下的测试局限, 测试结果验证了四足机器人翻越障碍物的理论分析。四足机器人翻越障碍物的步态理论对未来四足机器人实物样机的设计和制造工作有着指导意义。

关键词: 四足机器人; 越障; 仿真; 虚拟样机

中图分类号: TP242.06

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0019-06

Simulation and Measurement for Quadruped Robot to Cross over Obstacles on ADAMS Platform

ZHANG Peng, ZHU Yan

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: To analyze the situation of quadruped robot facing obstacles on irregular terrain in static walking, a usual obstacles-spanning method is expressed, and the ADAMS virtual prototype software is used to simulate the obstacles-spanning motion. Described in detail, the knee and hip joints of the robot trajectory are planned, the trajectory planning discretization is imported to ADAMS and the results of simulation and measurement are got by using ADAMS / PostProcessor. Some experiments which cannot be done with real prototype have been done with the virtual prototype created by us. Measurement results validate the theoretical analysis for the quadruped robot crossing over obstacles. It is useful for the future design and manufacture of quadruped robot physical prototypes.

Key words: quadruped robot; cross over obstacles; simulation; virtual prototype

0 引言

当今世界各国已经开发出许多机器人, 四足机器人由于其特有的优势一直是机器人研究的热点。国外四足机器人如美国的 BigDog 能够实现基于多种步态的行走如爬跃、奔跑; 国内四足机器人如清华大学的 Biosbot 和上海交通大学的 JTUWM 也已实现基于动态步行方式的行走^[1]。但是四足机器人的行走步态仍与自然界的四足动物相差甚远, 所以四足机器人步态研究仍是四足机器人发展的重要课题。

根据任务需求, 要求机器人面对非平坦路面上的阻碍时不得避开, 而是要越过它, 这就要求机器人具备较强的通过障碍物的能力。但是通过障碍时的运动控制远比在平坦地形上的运动控制复杂得多, 所以现

在四足机器人的研究大多仍集中在平坦路面上^[2]。

本文关注的重点是四足机器人在非平坦路面上稳定行走的能力。首先依据非平坦路面的特点对四足机器人面对障碍物的情况进行了统一归类, 然后分析四足机器人面对障碍物时的关节运动轨迹的计算方法, 最后采用虚拟样机平台进行仿真测试, 验证四足机器人通过一定障碍物理理论分析方法的正确性。

1 虚拟样机仿真模型的建立

虚拟样机首先建立在 SolidWorks 中, 然后通过 Parasolid 接口导入 ADAMS 中, 在 ADAMS 环境下设置机器人四条腿材质为碳素钢, 机器人躯体为木质结构, 这样的设置是考虑到仿真既要体现机器人的腿部结实, 又要体现轻便的质量要求。虚拟样机模型如图 1。四足机器人由四条腿和躯干共五个相对独立的模块组成。躯干为箱型刚体, 躯干上放置的物体示意四足机器人负载, 负载分析不是本论文研究的重点, 所以把负载

收稿日期: 2013-12-19; 收修改稿日期: 2014-01-26

作者简介: 张鹏 (1985-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为测试计量技术与仪器。

碍物。

最后,在运动过程中还应当使机器人足底满足一定的起落条件、较好的时间特性和速度特性等。

一部分研究者在多足步行机器人的研究中,采用某些特定曲线作为机器人足底移动轨迹,如正弦线、抛物线、摆线、心形线等,它们都不同程度的有着各自的优点和缺点,但并不适合在越障中使用。足底端点的轨迹要满足上述轨迹规划的条件可以描述为:足底端点在特定的时间内经过一系列规定点,并且这些

规定点满足一定的运动约束条件^[3]。

本文采用分段规划的方法设计足底端点的运动轨迹,为了避免冲击,轨迹两端点的运动速度应为零,设迈腿高度为 H ,前进距离为 E ,摆动腿迈步腾空的时间周期为 T , t_0 为每个周期的初始时刻。

以足底端点初始位置 O 点作为原点,建立足端坐标系 $OXYZ$,则在该坐标系下足底端点前进过程中横向、前进方向和竖直方向关于时间的函数分别为 $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ 。具体表达式如下:

$$X(t) = \begin{cases} 2E(t-t_0)^2 & t_0 \leq t \leq t_0 + \frac{T}{2} \\ \frac{E}{2} + 2E\left(t-t_0 - \frac{T}{2}\right) - 2E\left(t-t_0 - \frac{T}{2}\right)^2 & t_0 + \frac{T}{2} < t \leq t_0 + T \end{cases} \quad (1)$$

$$Y(t) = 0 \quad t_0 \leq t \leq t_0 + T \quad (2)$$

$$Z(t) = \begin{cases} \frac{8H}{T^2}(t-t_0)^2 & t_0 < t \leq t_0 + \frac{T}{4} \\ \frac{H}{2} + \frac{4H}{T}\left(t-t_0 - \frac{T}{4}\right) - \frac{8H}{T^2}\left(t-t_0 - \frac{T}{4}\right)^2 & t_0 + \frac{T}{4} < t \leq t_0 + \frac{T}{2} \\ H - \frac{8H}{T^2}\left(t-t_0 - \frac{T}{2}\right)^2 & t_0 + \frac{T}{2} < t \leq t_0 + \frac{3T}{4} \\ \frac{H}{2} - \frac{16H}{T}\left(t-t_0 - \frac{3T}{4}\right) + \frac{8H}{T^2}\left(t-t_0 - \frac{3T}{4}\right)^2 & t_0 + \frac{3T}{4} < t \leq t_0 + T \end{cases} \quad (3)$$

通过调整公式中的 H 和 E 参数,可以获得不同的足底端点运动轨迹。图3所示的曲线即是在 H 为40 mm, E 为28 mm, T 为0.4 s的条件下,足底端点在 XOZ 平面的运动轨迹。

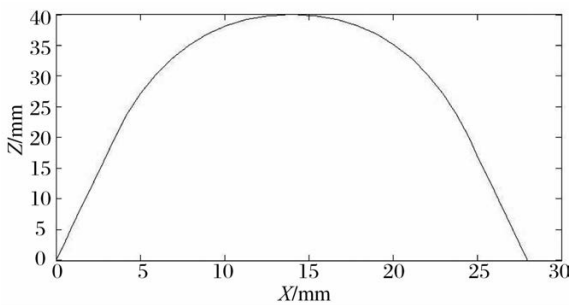


图3 摆动腿足底端点运动轨迹

在完成足底移动轨迹规划之后,利用单腿的初始位置值将足端坐标系中设计的参数转换到单腿坐标系中,并根据图4单腿坐标系的腿部杆件简化示意图所示的腿部约束关系,反解出膝关节和髋关节的关节变量 θ_1 和 θ_2 ,最终就可以通过控制 θ_1 , θ_2 完成四足机器人的摆动腿翻越一定高和宽的障碍物。

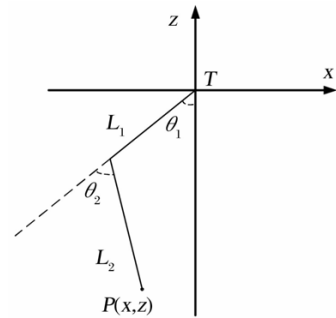


图4 单腿坐标系的腿部杆件简化示意图

根据图4可建立如下约束关系:

$$\begin{cases} x = L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \\ z = -L_1 \cos \theta_1 - L_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) \end{cases} \quad (5)$$

式中: L_1 为大腿的长度; L_2 为小腿的长度; θ_1 为杆件与垂直线的夹角; θ_2 为小腿杆件与大腿杆件的夹角; x , z 要满足在单腿坐标系 $OXYZ$ 中规划的 $X(t)$, $Z(t)$ 的轨迹。

求解公式(5),得

$$\begin{cases} \theta_1 = \arcsin\left(\frac{-j + \sqrt{j^2 - 4k}}{2}\right) \\ \theta_2 = \arcsin\left(\frac{-x - L_1 \sin \theta_1}{L_2}\right) + \theta_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$$j = -\frac{x(L_1^2 - L_2^2 + x^2 + z^2)}{L_1(x^2 + z^2)}$$

$$k = \frac{-4L_1^2 z^2 + (L_1^2 - L_2^2 + x^2 + z^2)^2}{4L_1^2(x^2 + z^2)}$$

2.3 越障步态运动样本生成

考虑到静爬行步态稳定性高, 因此选用该步态为越障行走的基本步态。

发现障碍物时, 根据假设的机器人的视觉伺服系统取得障碍物的空间位置和障碍物的三维体积情况, 并且将这些信息转换至机器人的单腿坐标系中。根据本文研究的重点, 假设障碍物空间位置刚好在四足机器人进行方向上且不用进行步态转换调整, 障碍物的横截面为 $H \times E$ 的矩形条。

根据以上假设, 当图 4 中足底端点的初始点 $P(x, z) = P(0, -436)$, 初始角度 $\theta_1 = 15.25^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$ 时, 由公式 (7) 和 (8) 可得到单腿坐标系下初始点坐标所对应的 E 和 H , 再联立公式 (1) ~ (3) 和 (6) 就可求出关节转角 θ_1, θ_2 。

$$E = x \quad (7)$$

$$H = z - 436 \quad (8)$$

为了保证式 (6) 求解的 θ_1, θ_2 均为实数 (为虚数时表示腿已运动到极限位置之外), 要求:

$$j^2 - 4k \geq 0 \quad (9)$$

由于机器人大腿长为 193 mm, 小腿长为 245 mm, 代入式 (9) 求解可得 x 与 y 的取值范围, 此范围即是四足机器人的越障范围。

求解的取值范围可以有多个解, 其中符合实际情况的结果为

$$\begin{cases} x = 0 \\ -438 \leq z \leq -52 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} 0 < x < 52 \\ -\sqrt{191844 - x^2} \leq z \leq -\sqrt{2704 - x^2} \end{cases}$$

考虑到稳定性因素, 单腿坐标系的腿部杆件极限位置由图 5 可知, 越障时摆动腿的跨越距离为

$$E_{\max} = \sqrt{(L_1 + L_2)^2 - 436^2} \quad (11)$$

得 $E_{\max} = 41.8$ mm。由于 $E_{\max} = x \in [0, 52]$, 将其代入公式 (10) 中, 有

$$\begin{cases} E \in [0, 41.8] \\ H \in [-436, -52] \end{cases} \quad (12)$$

式 (12) 为跨越高度 H 和跨越距离 E 的范围, 这个范围体现了机器人跨越障碍物的能力。

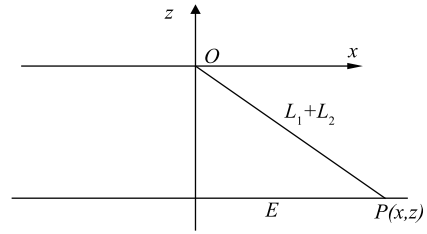


图5 单腿坐标系的腿部杆件极限位置示意图

3 仿真测试

在机器人行进方向上放置一个障碍物, 障碍物的横截面高为 40 mm, 宽为 28 mm, 如图 6。根据论文研究的重点, 障碍物的放置有所简化, 障碍物出现在机器人前进方向的一侧只挡住了一条腿的前进, 并且障碍物处的位置为该腿摆动相前发生碰撞的位置。

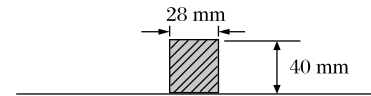


图6 障碍物示意图

将障碍物横截面数据代入式 (1) ~ (5) 求得摆动腿的关节轨迹, 然后在 MATLAB 中将规划的关节转角离散化, 并保存为 .mat 文件。

利用 ADAMS 输入实验数据功能选项将 .mat 文件读入 ADAMS, 利用 CUBSPL 函数对数据按照三次样条线插值方法进行微分计算, 得到各关节控制曲线, 进而得到四足机器人的仿真爬行运动。对规划的越障步态进行 10 s 仿真, 得到结果如图 7。

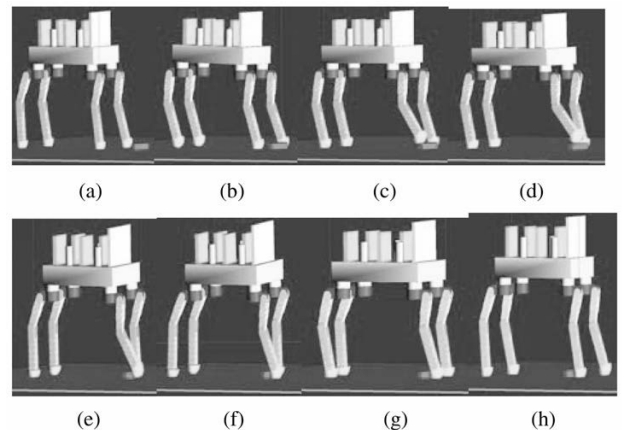


图7 越障步态仿真

图 7 (a) 显示机器人接近障碍物; 图 7 (b) 显示机器人右前腿到达障碍物边缘; 图 7 (c) ~ (g) 显示机器人迈腿越过障碍物; 图 7 (h) 显示机器人稳定

前进。

通过仿真运动图像可以看出机器人成功越过障碍物，并且在越过障碍物后依然保持稳定。

从 ADAMS 后期处理模块得到机器人躯体质心沿 X 、 Y 、 Z 方向的运动轨迹，如图 8 所示。通过质心位置的变化可以直接观察到机器人稳定情况，从图 8 可以看出机器人质心在 6.4 s 时沿 X 轴正方向进行 280 mm 的跨越，跨越过程质心在 Y 、 Z 轴方向没有变化，说明该跨越过程稳定。在通过障碍物后，从图中看出质心在 X 、 Y 、 Z 方向均出现小范围波动，此时机器人呈现出轻微晃动，这是由于在 ADAMS 中建立的四足机器人部件之间为刚体接触，足底落地时与地面接触产生轻微碰撞导致。

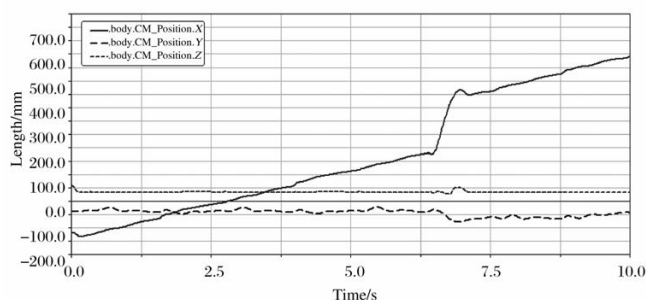
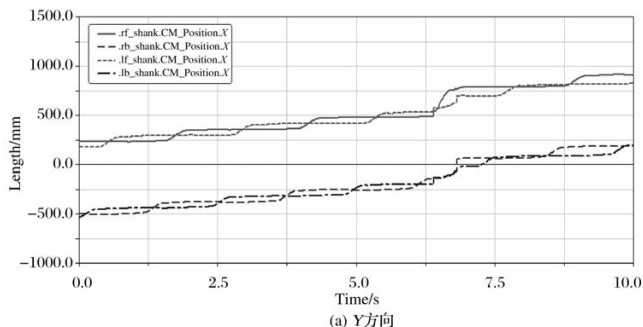


图 8 机器人躯体质心沿 X 、 Y 、 Z 方向的运动轨迹

机器人四条小腿重心沿 X 方向的运动轨迹如图 9 (a)，沿 Y 方向的运动轨迹如图 9 (b)，沿 Z 方向的运动轨迹如图 9 (c)。图 9 (a) 和 (c) 分别表达了机器人在 6.4 s 时沿 X 轴方向的跨越和沿 Z 轴方向的抬腿。图 9 (b) 看出机器人摆动足与地面接触之后机器人的右后腿和左后腿均在 Y 方向发生了偏移。这同样是因为四足机器人部件之间为刚体接触，导致越障时摆动腿腾空到落地时产生的冲击造成了机器人后腿偏移。图 9 (c) 右后腿和左后腿在 Z 轴方向上的运动距离同样反映出这个情况。



四足机器人足底端点沿 X 方向的运动轨迹如图 10

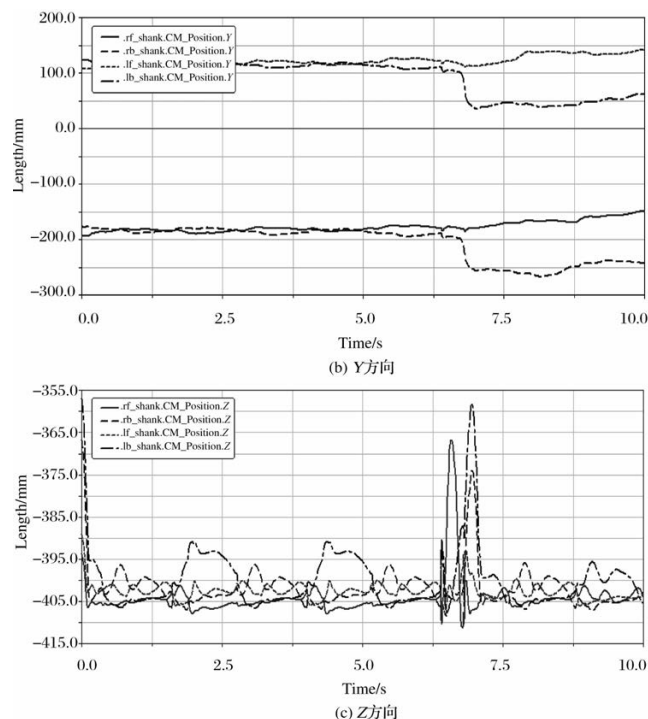


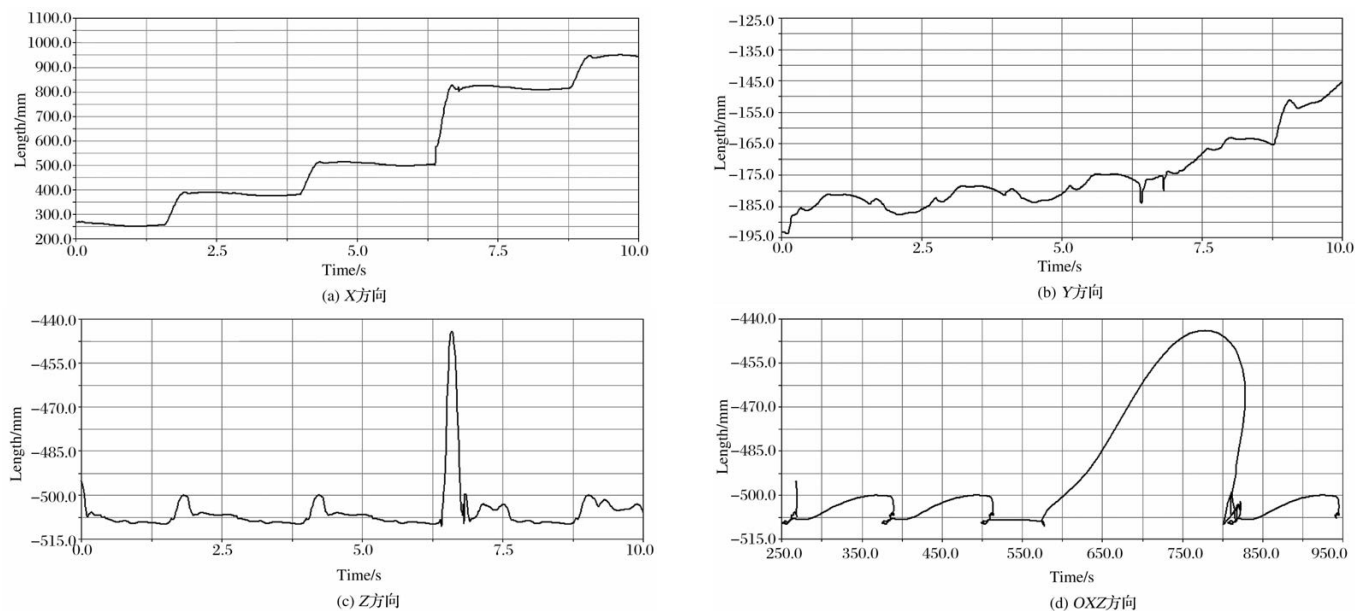
图 9 机器人四条小腿重心沿 X 、 Y 、 Z 方向的运动轨迹

(a)，沿 Y 方向的运动轨迹如图 10 (b)，沿 Z 方向的运动轨迹如图 10 (c)。以足底端点沿 X 方向的运动轨迹为横轴，沿 Z 方向的运动轨迹为纵轴，得到四足机器人足底端点在 X 、 Z 面内的运动轨迹如图 10 (d)。图 10 也看出了机器人的翻越情况，特别是看到机器人摆动腿翻越障碍物之后和障碍物发生了轻微碰撞，这由于建模时机器人脚的实际大小与理论计算时简化成一个点的区别所造成。

足底端点为了越过障碍物在 X 方向前进的距离为 300 mm，在 Z 方向前进的距离为 160 mm，这两个值大于障碍物的高和宽。这是因为机器人虚拟样机模型是按实物而得到，拥有实际的体积；仅按照障碍物的高和宽进行分析测试，机器人无法越过障碍物，所以对机器人关节轨迹曲线值适当进行了补偿和修正。

4 结论

本文构建了四足机器人虚拟样机模型平台，开展了机器人越障理论研究，得到了机器人面对障碍物时的关节运动轨迹的控制曲线。通过仿真测试，验证了越障理论分析方法的正确性。这些计算方法对未来四足机器人实物样机的设计和制造工作有着非常重要的指导意义。

图 10 四足机器人足底端点沿 X , Y , Z 方向及在 OXZ 面内的运动轨迹

参考文献

- [1] 王鹏飞, 孙立宁, 黄博. 地面移动机器人系统的研究现状与关键技术 [J]. 机械设计, 2006, 23 (7): 1-4.
- [2] 张亚磊. 类人猿机器人复杂地况条件下四足步行基础研

究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 16-17.

- [3] 何冬青, 马培荪. 四足机器人动态步行仿真及步行稳定性分析 [J]. 计算机仿真, 2005, 22 (2): 147-149.

科技重大专项“十三五”规划研究编制工作启动

近日, 科技部会同发改委、财政部 (三部门) 组织召开会议, 启动并部署重大专项“十三五”发展规划研究编制工作。会议由科技部重大专项办公室许惊主任主持, 三部门相关司局负责同志、各专项领导小组办公室及实施管理办公室主要负责同志、专项专职技术责任人/技术总师、副总师等参加了会议。

根据国家“十三五”发展规划和国家“十三五”科技发展规划研究编制的总体要求和工作部署, 按照国家科技重大专项 2014 年重点工作安排, 三部门认真研究, 制定了《关于研究编制〈国家科技重大专项 (民口) “十三五”发展规划〉的工作方案》。会上, 科技部重大专项办公室金奕名副主任对工作方案进行了详细介绍, 主要包括工作依据和总体思路、工作目标和主要任务、工作安排和时间节点以及基本要求等, 并对各专项下一步工作提出了明确要求。会议还下发了《关于开展重大专项 (民口) “十三五”发展规划研究编制工作的通知》。

许惊主任在总结中强调, “十三五”是全面完成国家科技重大专项战略任务的最后五年, 也是落实中央全面深化改革、实施创新驱动发展战略等系列决策部署的关键五年, 重大专项发展规划研究编制意义重大、时不我待。他指出, “十三五”发展规划既要面向 2020 年重大专项任务的全面完成和总体目标的实现, 在中期评估基础上进一步体现任务聚焦调整和资源集聚, 又要顺应新一轮科技革命和产业变革发展趋势, 面向战略必争重点领域紧迫需求, 体现采用非对称策略集中力量抢占和构建战略制高点; 要在发挥企业主体作用上有新办法, 发挥市场配置资源的决定性作用、更加关注企业发展需求, 真正反映企业意愿; 要强化专项成果应用成效, 突出与区域发展和产业发展的结合, 注重与产业、金融、财税等相关政策对接; 要突出体现深化科技体制机制改革的总体要求等。

摘自“中国计量测控网”

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.06

提高膜片式 F-P 腔 光纤压力传感器灵敏度的试验研究

张慧君, 张立喆, 段玉培, 陈喜

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 膜片式 F-P 腔光纤压力传感器是基于法布里-珀罗干涉原理, 采用微电子机械系统 (MEMS) 技术加工而成。在实际应用中, 不同的测试环境对传感器灵敏度的要求各不相同, 如果针对不同灵敏度, 分别采用 MEMS 工艺批量化生产, 则会造成生产成本过高, 经济化效益降低。本文利用湿法腐蚀的方法对传感器进行膜片减薄试验, 在一定范围内提高了传感器的压力灵敏度, 从而满足了不同的测试需求。膜片减薄后, 传感器的灵敏度可达 34.2 nm/kPa, 压力标定曲线的线性度为 0.9997, 传感器的非线性误差为 0.05%, 能够实现 0 ~ 120 kPa (绝压) 范围内压力的准确测量。

关键词: 湿法腐蚀; 压力灵敏度; 光纤压力传感器

中图分类号: TP212.161; TB935

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0025-03

Research on Improvement of Sensitivity of Diaphragm Type Optical Fiber Pressure Sensors Based on F-P Cavity Interference

ZHANG Huijun, ZHANG Lizhe, DUAN Yupei, CHEN Xi

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The fiber optic pressure sensors based on Fabry-Perot (F-P) interferometric principle are fabricated by employing the micro-electromechanical system (MEMS). In practical application, different sensitivities are required in different testing environments. The cost of production will be excessive if the sensors are fabricated by MEMS with different sensitivities. In this paper, the thickness-reduction of the diaphragm in sensors is discussed, and the pressure sensitivity is improved within certain limits through the wet-etching. The sensitivity reached 34.2 nm/kPa after the reduction of the diaphragm thickness. The result of the pressure calibration shows that the linearity of the curve is 0.9997, and the non-linear error reaches 0.05% in the range of 0 ~ 120 kPa (absolute pressure).

Key words: wet-etching; pressure sensitivity; optical fiber pressure sensor

0 引言

目前, 在微型传感器的制作技术方面, 微电子机械系统 (Micro Electro Mechanical Systems, MEMS) 技术已成为光纤传感器制作领域的新方向。MEMS 光纤压力传感器具有体积小、抗电磁干扰、动态范围大等优点, 已广泛应用于航空航天、石油、化工等领域。并且由于 MEMS 器件易于大规模集成化生产, 可以较

大程度地降低传感器的成本^[1-2]。

膜片式 F-P 腔光纤压力传感器是采用 MEMS 技术加工而成, 结构如图 1 所示。由于 MEMS 工艺批量化生产的特点, 同一批次传感器的灵敏度将具有较高的一致性。但是在实际应用中, 不同的测试环境对传感器的数量和灵敏度要求各不相同, 如果针对不同灵敏度, 分别进行批量化生产, 则会造成生产成本过高, 经济化效益降低。因此, 本文利用湿法腐蚀的方法对传感器进行膜片减薄试验, 通过计算腐蚀速率, 控制腐蚀时间, 可以在一定范围内提高传感器的灵敏度, 从而满足不同的测试需求。

1 膜片式压力传感器原理

膜片式 F-P 腔光纤压力传感器是基于法布里-珀罗

收稿日期: 2014-04-17; 收修改稿日期: 2014-04-25

基金项目: 中国航空工业集团公司技术创新基金项目 (2009F30472)

作者简介: 张慧君 (1988-), 女, 助理工程师, 硕士, 从事光纤压力传感器研究。

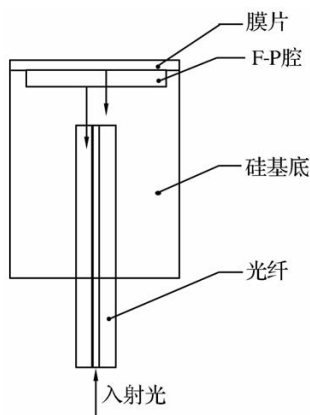


图1 膜片式 F-P 腔光纤压力传感器结构图

干涉原理,采用 MEMS 技术加工而成,敏感膜片由 Pyrex7740 玻璃组成。当外界压力作用于膜片时,膜片发生形变,导致 F-P 腔腔长改变,从而引起干涉光谱的变化。通过监测干涉光谱,并对其进行解调,即可得到作用在膜片上的压力大小^[3-4]。

根据弹性力学原理,压力变化 Δp 与腔长变化 Δd 的关系可以用表示为

$$\Delta d = \frac{3}{16} \frac{(1 - \mu^2)r^4}{Eh^3} \Delta p \quad (1)$$

式中: h 为膜片厚度; r 为膜片的有效半径; μ 为膜片的泊松比; E 为膜片的杨氏模量。

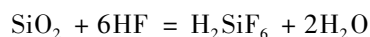
灵敏度 Y 可以表示为

$$Y = \frac{\Delta d}{\Delta p} = \frac{3}{16} \frac{(1 - \mu^2)r^4}{Eh^3} \quad (2)$$

理论上,Pyrex7740 玻璃在 25℃ 时的特性参数为:杨氏模量 $E = 62.75 \times 10^9$ Pa;泊松比 $\mu = 0.2$ 。由上式可以看出,膜片厚度越小,有效半径越大,传感器的灵敏度越高。但有效半径的增加会导致传感器尺寸的增大,因此可以通过减小膜片厚度的方法来提高传感器的灵敏度^[5]。

2 实验部分

对膜片的减薄可以通过氢氟酸的腐蚀来实现^[6]。氢氟酸可以与二氧化硅反应生成络合物,其化学反应式为



一般情况下,氢氟酸对二氧化硅的腐蚀速率较快,在工艺上很难控制。因此,在实际应用中,常加入氟化铵 (NH_4F) 作为缓冲剂,从而保持稳定的腐蚀速率^[7],这种腐蚀溶液常称为缓冲氢氟酸腐蚀剂 (BHF)。

将配制好的 BHF 溶液 (3mlHF 溶液 + 6g NH_4F + 10ml H_2O) 倒入特氟龙容器中,盖上盖子,水浴加热。然后连接传感器与解调设备,将传感头放入 BHF 溶液中,开始腐蚀,记录时间,实时监测传感器的腔长值。根据腔长的变化值,可以计算出传感器灵敏度的变化,最终计算出膜片的腐蚀速率。由于玻璃中含有一些氧化物如 CaO , Al_2O_3 等,会与氢氟酸生成不溶物沉积在膜片表面,从而影响到腐蚀质量^[8]。为了保证腐蚀的均匀性,在腐蚀过程中需用玻璃棒不断搅拌。腐蚀结束后,将传感头用去离子水冲洗,氮气吹干。

3 结果与讨论

3.1 HF 浓度对腐蚀速率的影响

由于 HF 腐蚀性较强, HF 的浓度很大程度上影响着膜片的腐蚀速率^[9]。将 BHF 溶液加热至 40℃,不同 HF 浓度下膜片的腐蚀速率如表 1 所示。从表 1 可以看出,随着 HF 浓度增大,膜片的腐蚀速率快速增加。当 HF 浓度增大到 20% 时,膜片表面较为粗糙,表明腐蚀速率过快。因此,为了较好地控制膜片的腐蚀速率, HF 的浓度应为 10%。

表1 不同 HF 浓度下的膜片腐蚀速率

浓度/%	10	20	30	40
腐蚀速率/($\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.245	0.493	0.862	1.791

3.2 温度对腐蚀速率的影响

温度是影响腐蚀速率的另一个重要因素。HF 浓度为 10% 时,不同温度下测得的膜片腐蚀速率如表 2 所示。从表 2 可以看出,温度升高,膜片腐蚀速率不断增大。为了保证腐蚀后膜片的质量不受影响,最佳的腐蚀温度应选为 40℃。此外,由于小范围的温度波动也会造成腐蚀速率发生变化,因此在腐蚀过程中必须严格控制温度。

表2 不同温度下的膜片腐蚀速率

温度/℃	30	40	50	60
腐蚀速率/($\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.164	0.245	0.452	0.718

3.3 膜厚及灵敏度

在腐蚀温度为 40℃, HF 浓度为 10% 时,选取编号为 #1 ~ #5 的传感器进行膜片腐蚀。当腐蚀时间为 5 min 时,传感器 #5 光谱信号消失,表明膜片已经被过度腐蚀,其余传感器光谱信号正常。根据腐蚀过程中传感器腔长值的变化,可以计算出膜片腐蚀后的灵敏

度,从而得到膜片的最终厚度,结果如表3所示。

表3 腐蚀后的膜片厚度

编号	初始灵敏度/(nm·kPa ⁻¹)	初始膜厚/μm	腐蚀时间/min	腐蚀速率/(μm·min ⁻¹)	腐蚀后灵敏度/(nm·kPa ⁻¹)	腐蚀后膜厚/μm
#1	22.6	28.297	15	0.245	34.3	24.623
#2	19.3	29.825	20	0.254	33.8	24.744
#3	21.0	28.998	12	0.239	28.7	26.130
#4	22.4	28.381	13	0.243	31.9	25.226

3.4 压力标定

在常温常压下,选取腐蚀后膜厚较小的两只传感器#1和#2,利用高精度压力测量设备对其分别进行了气压标定实验。其中,传感器#1腐蚀前后的压力标定曲线如图2~3所示。腐蚀前,传感器#1在0~180 kPa(绝压)范围内,灵敏度达到22.6 nm/kPa,曲线的线性度为0.9998,由于重复性较好,正负行程曲线基本重合。经计算,传感器的非线性误差为0.05%。腐蚀减薄后,传感器灵敏度可达到34.2 nm/kPa,与表3中的计算值基本符合,曲线的线性度为0.9997,正负行程曲线基本重合。此时传感器的非线性误差仍为0.05%,可实现0~120 kPa(绝压)范围内压力的准确测量。

对于传感器#2,腐蚀前,在0~200 kPa(绝压)范围内,灵敏度达到19.3 nm/kPa。传感器的非线性误差为0.05%。腐蚀减薄后,传感器的灵敏度可达到33.6 nm/kPa,与表3中的计算值基本符合。此时传感器的非线性误差为0.1%,可实现0~130 kPa(绝压)范围内压力的准确测量。

4 结论

膜片厚度决定了传感器的压力测量范围和灵敏度。为了满足不同测试环境对传感器灵敏度的不同要求,本文利用湿法腐蚀的方法对传感器进行膜片减薄试验,

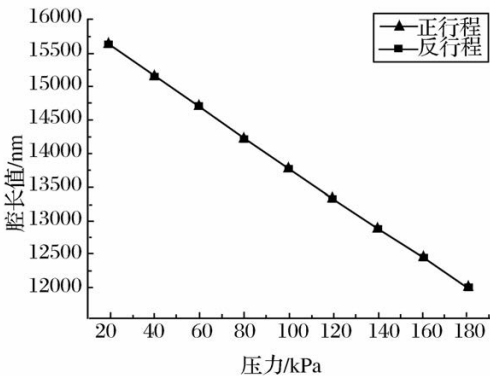


图2 腐蚀减薄前传感器#1的压力标定曲线

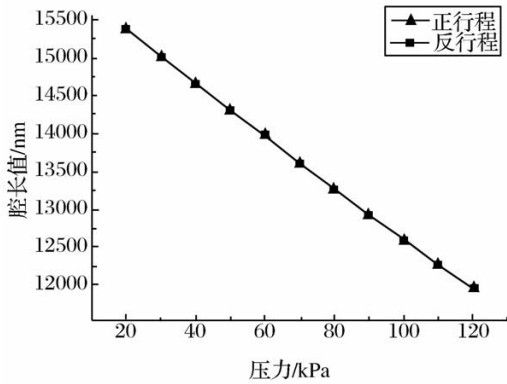


图3 腐蚀减薄后传感器#1的压力标定曲线

该方法工艺简单,成本低廉,可以在一定程度上提高传感器的压力灵敏度。试验表明, HF 浓度和腐蚀温度对腐蚀速率有重要的影响,腐蚀后的膜片质量与腐蚀速率有关。压力标定结果表明,膜片减薄后,传感器的灵敏度可达34.2 nm/kPa,与计算值基本一致。其标定曲线的线性度为0.9997,传感器的非线性误差为0.05%,可满足0~120 kPa(绝压)范围内压力的准确测量。但由于过度的腐蚀会使传感头损坏的几率变大,此方法只能在一定范围内提高传感器的灵敏度。因此,进一步确定灵敏度的可变化范围以及实现灵敏度变化的精确控制将成为未来的研究重点。

参 考 文 献

- [1] 张冬至,胡国清. 微机电系统关键技术及其研究进展[J]. 压电与声光, 2010, 32(3): 513-520.
- [2] Cary K Fedder. MEMS Fabrication [C] // 2003 IEEE International Test Conference (ITC). Charlotte, NC, USA: IEEE, 2003.
- [3] 韩冰,高超. 光纤F-P腔压力传感器的研究进展[J]. 计测技术, 2012, 32(2): 5-10.
- [4] 于清旭,贾春艳. 膜片式微型F-P腔光纤压力传感器[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 2887-2892.
- [5] 贾春艳. 微型低压光纤法布里-珀罗干涉传感器研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [6] 黄庆安. 硅微机械加工技术[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [7] 周健,闫桂珍. Pyrex玻璃的湿法刻蚀研究[J]. 微细加工技术, 2004(4): 41-44.
- [8] 崔峰,肖奇军,等. Pyrex玻璃金属化凹坑的湿法腐蚀[J]. 功能材料与器件学报, 2008, 14(1): 236-240.
- [9] Spierings G A C M. Wet chemical etching of silicate glasses in hydrofluoric acid based solutions [J]. Journal of materials science, 1993, 28: 6261-6273.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.07

基于温控方案的一种 MEMS 惯性测量装置设计

何海洋, 王章波

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 以提高 MEMS 惯性测量装置 (MIMU) 的测量精度为目的, 本文设计了一套温度控制系统和控制算法; 通过对 MIMU 进行精密温控, 改善了惯性器件的热环境, 抑制了外界温度变化对 MIMU 的干扰, 提高了 MIMU 的综合性能; 测试结果验证了方案的有效性。

关键词: MEMS 惯性测量装置; 温控系统; MEMS 陀螺; MEMS 加速度计

中图分类号: TB934; TH7

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0028-04

Design of MEMS Inertia Measurement Unit Based on Temperature-controlling Scheme

HE Haiyang, WANG Zhangbo

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy of MEMS Inertia Measurement Unit (MIMU), a temperature-controlling system is designed. The temperature in MIMU can be controlled accurately, and this is helpful to ameliorate the thermal environment of inertial sensors. The interference of environment temperature variability is decreased, and the performance of MIMU is improved. Finally, the effectiveness of the temperature-controlling scheme is verified.

Key words: MEMS Inertia Measurement Unit; temperature-controlling system; MEMS gyroscope; MEMS accelerometer

0 引言

MEMS 惯性测量装置 (MEMS Inertial Measurement Unit, 简称为 MIMU) 是一种自主式惯性测量装置, 具有隐蔽性好, 动态范围大, 可靠性高, 且体积和能耗小、成本低廉等优点^[1], 这种技术在军事导航及民用领域正起到越来越大的作用。因此, 微惯性测量装置的研究成为近年来惯性技术领域重点发展的关键技术之一^[2]。然而 MEMS 惯性仪表在全温范围内的精度不高^[3], 尤其是长时间工作时, 环境温度带来的惯性仪表的零位漂移, 它将对 MIMU 的精度产生直接影响。如何克服温度对 MIMU 性能的影响, 是 MIMU 实现工程化的重大难题之一。由于 MEMS 惯性器件参数的温度系数不稳定, 输出重复性差, 造成系统建模难度大, 采取温度补偿消除温度误差的方法不易实现, 而用温控的方法使惯性器件工作在恒定的温度条件下, 避免其输出受外界温度变化的干扰, 却是一种方便可行的方法。

1 设计方案选取

微机械惯性测量装置由三个 MEMS 陀螺、三个 MEMS 加速度计、信号采集和处理模块、温度控制模块和结构壳体组成, 组成框图如图 1, 内部结构图如图 2。

通过对选用惯性传感器温度特性分析, 采用恒温控制方法效果比较好。为了降低系统总功耗, 只对陀螺进行恒温控制, 对加速度计则采用间接加热与温度补偿相结合的方式, 这样, 加速度计的温补温度区间较小, 补偿效果较好。

由于惯性器件输出为模拟电压信号, 而输出要求是脉冲信号, 虽然可以直接采用 V/F 转换电路将惯性器件的输出转换为脉冲输出, 但这种方式不易于对惯性器件输出信号进行处理。因此, 本方案中考虑先采用高精度 A/D 转换器对惯性器件的模拟输出进行采样, 以实现惯性器件的数字化, 便于对其进行误差修正等处理, 最后, 由处理器控制脉冲信号的产生。

2 温控系统设计方案

2.1 指标要求

温控稳定温度: $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$; 温度控制精度: $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 温度稳定时间: $\leq 20\text{ min}$; 温控最大电流: $\leq 3.5\text{ A}$;

收稿日期: 2014-03-02

作者简介: 何海洋 (1982-), 男, 工程师, 从事空空导弹捷联惯导系统设计工作。

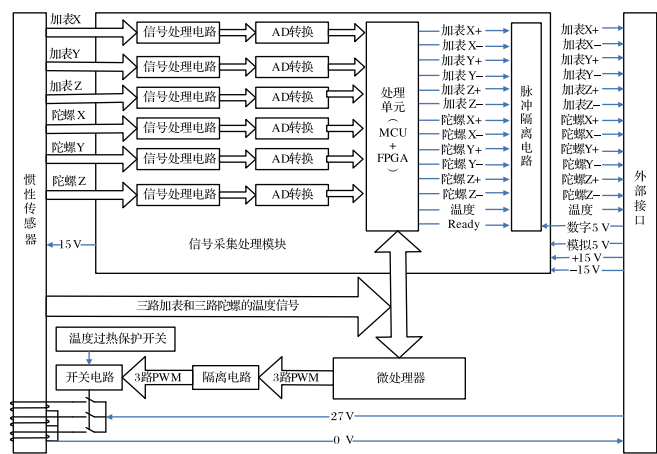


图1 微机械惯性测量装置原理框图

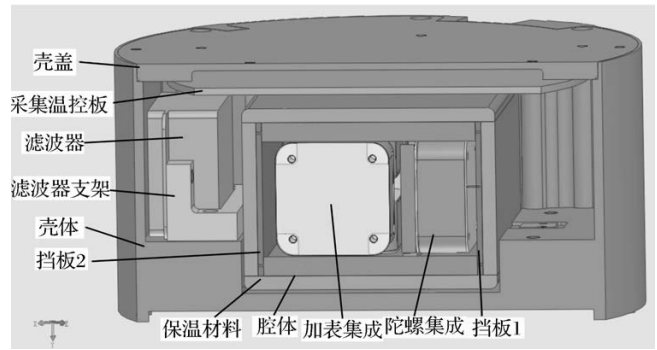


图2 微机械惯性测量装置结构示意图

温控稳态电流： $\leq 1.5\text{ A}$ 。以上是温控系统各指标要求。

2.2 工作原理和组成

温控系统采用分段控制的方案（如图3所示），与常规方法相比，该方案能够使MIMU的温度在短时间内达到稳定。系统开始上电时进入全速加温阶段（ $0 \sim t_1$ ），控制对象上的加热片全功率工作，温度快速上升。当温度接近设定的温控点时，温控进入精密温控阶段（ $t_1 \sim t_2$ ， $t_2 \approx 20\text{ min}$ ），此时，根据实时采集的温度信号，通过控制算法，实现精密温度控制。当MIMU的温度达到设定温度点时，系统的加温功率与热耗散功率保持平衡。

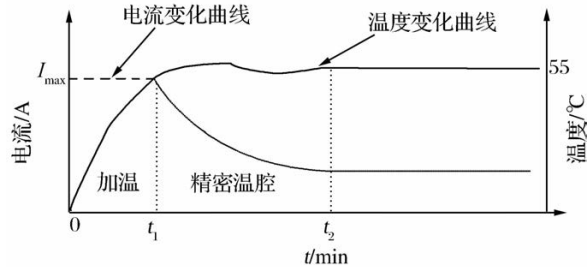


图3 分段温控工作流程图

温度控制模块主要由温度传感器、单片机（带内部A/D转换器）、场效应管、光耦等器件和加热片组成。温度控制模块组成框图见图4。

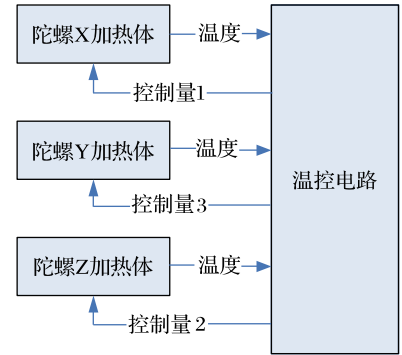


图4 温度控制系统组成框图

2.2 温控电路设计

温控系统通过PWM控制加热电流占空比来调节加热体的加热速度，即控制场效应管的导通与截止，从而实现对加热体电流的通断控制，PWM脉冲由单片机计算并输出。并在单片机与场效应管之间采用光电隔离，以提高系统的可靠性。温度控制电路如图5。另外，为了防止在软件失控后系统加热失控导致器件烧毁，在温控电路中增加一个温度开关，当腔体温度达到限制温度后自动断开加热电流，超温保护电路如图6。

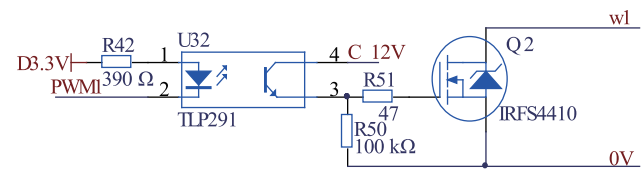


图5 温度控制电路

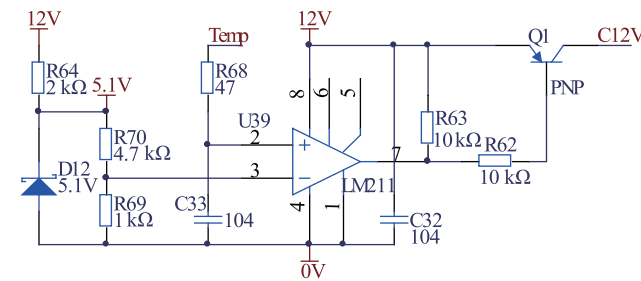


图6 超温保护电路

2.3 温控算法设计

温控系统采用增量式PID控制算法，基本原理为，通过A/D信号采集模块对惯性器件温度信号实时采集，并计算出惯性器件当前温度与目标温度之差，再

用PID控制算法计算出相应的控制量,然后以PWM脉冲形式向控制机构输出控制量,即相应占空比的PWM脉冲,进而控制加热器的平均加热电流,从而实现温度自动控制。图7为PID控制系统方块图。

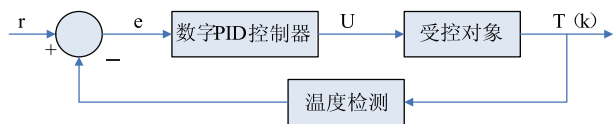


图7 PID控制系统方块图

温度控制系统主程序流程图如图8所示。开机复位时,系统进行初始化,接着检测温度,然后根据检测到的环境温度选择合适的PID参数,再根据反馈温度由PID增量式算法计算出控制量。本系统控制周期为1s,即每隔1s检测一次温度,输出一次控制量,对加热体加热电流调整一次。

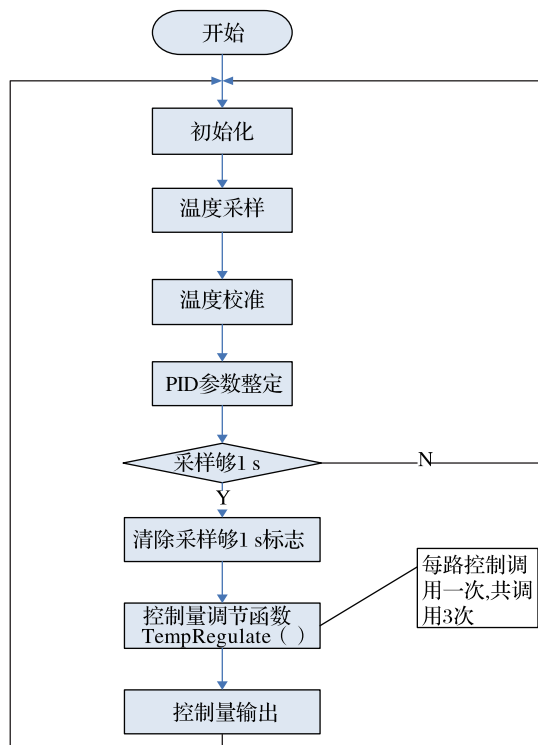


图8 温控系统主程序流程图

增量式PID控制算法如式(1):

$$\text{PID控制量} = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i f_e e(k) + K_d [e(k-2) \cdot e(k-1) + e(k-2)] \quad (1)$$

$$f_e = \begin{cases} 1 & |e| \leq 2 \\ (8+2-|e|)/8 & 2 < |e| \leq 10 \\ 0 & 10 < |e| \end{cases}$$

式中: K_p 为比例系数; K_i , f_e 为积分系数; K_d 为微分

系数; e 为当前偏差; $e(k-2)$, $e(k-1)$, $e(k)$ 分别为最近三次温度采样值与目标温度的偏差。

PID计算流程图如图9所示。

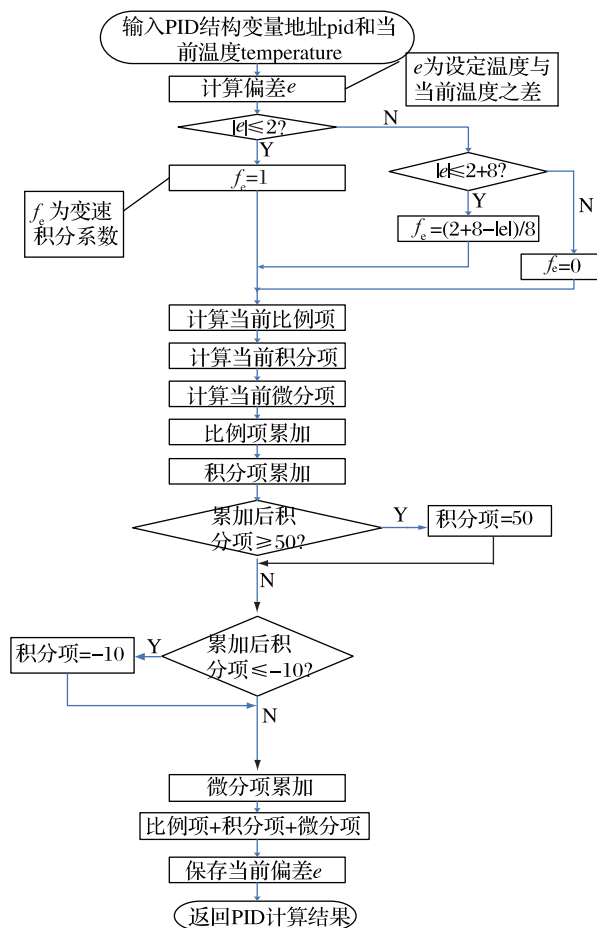


图9 PID计算流程图

3 试验验证

为了验证采取温控措施后对MIMU性能提高的实际效果,分别在温控系统不工作和工作的条件下,分别对MIMU进行了静态测试。测试状态为:MIMU自然放置在室温条件下,采样时间间隔为1s,得到部分测试结果如图10所示;在采取温控措施后对MIMU进行测试的结果如图11所示。

由图10、图11可看出,MEMS惯性测量装置温控后在较短时间即可达到输出稳定。

为了进一步评判温控MIMU的性能,在带温箱的三轴测试标定台中对其进行了低温(-40℃)、常温(20℃)、高温(+65℃)三个温度点的六位置性能测试,角速度通道和加速度通道测试结果分别见表1和表2。

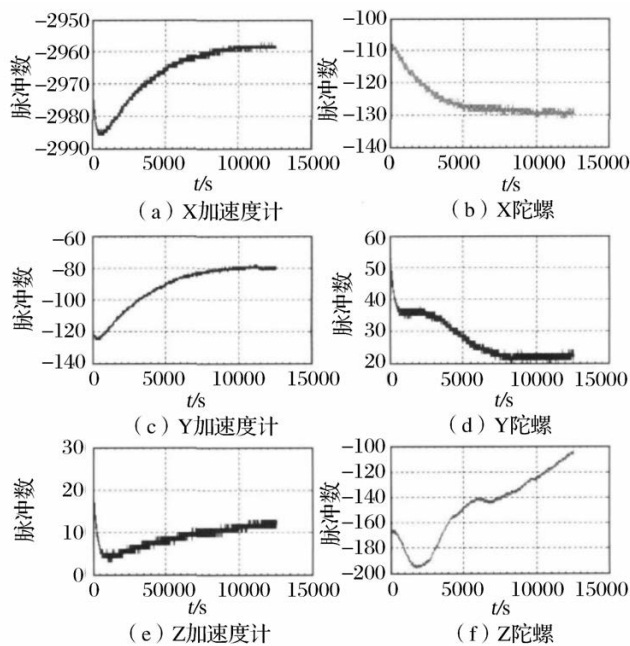


图 10 无温控时加速度计和陀螺输出曲线

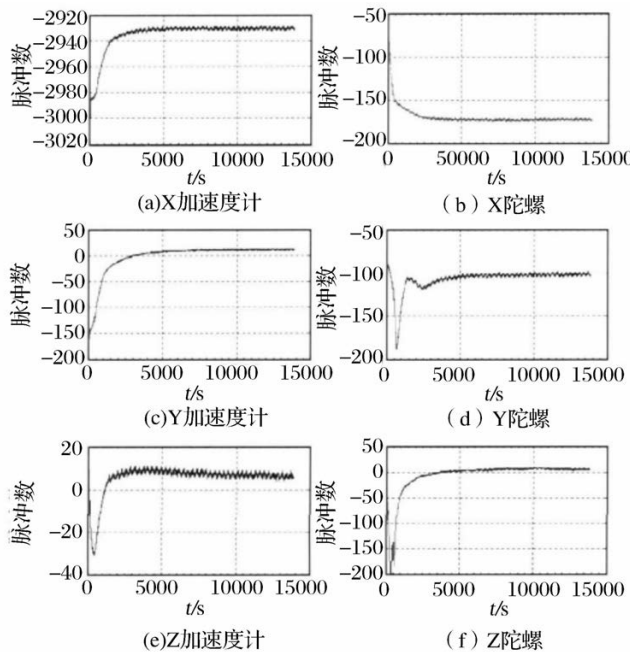


图 11 有温控时加速度计和陀螺输出曲线

根据测试结果统计,无温控措施、全温条件下 MEMS 惯性测量装置角速度通道零位漂移在 $-2000(^{\circ})/h \sim +2000(^{\circ})/h$ 范围内波动,非线性在 $-180' \sim +180'$ 范围内波动,且两项指标重复性较差;加速度通道零位漂移在 $-0.1g \sim +0.1g$ 范围内波动,非线性在 $-1\% \sim +1\%$ 范围内波动,且两项指标重复性较差。与表 1、表 2 中数据对比可知,在温控条件下角

表 1 角速度通道性能测试结果(温控下)

测试参数	测试温度		
	低温(-40°C)	常温	高温($+65^{\circ}\text{C}$)
M_x (零位漂移) $/(^{\circ})h^{-1}$	-248.85	-183.22	-210.35
M_y (零位漂移) $/(^{\circ})h^{-1}$	232.97	209.07	250.19
M_z (零位漂移) $/(^{\circ})h^{-1}$	158.51	-60.41	139.18
D_x (非线性) $/(^{\circ})$	11.84	2.77	9.57
D_y (非线性) $/(^{\circ})$	1.63	8.74	6.74
D_z (非线性) $/(^{\circ})$	46.33	7.30	2.72

表 2 加速度通道性能测试结果(温控下)

测试参数	测试温度		
	低温(-40°C)	常温	高温($+65^{\circ}\text{C}$)
NS_x (零位偏差) $/g$	-0.0052	-0.0013	-0.0009
NS_y (零位偏差) $/g$	0.0029	0.0008	-0.0006
NS_z (零位偏差) $/g$	-0.0065	-0.0028	-0.0013
NEL_x (非线性) $\%$	0.09	-0.05	-0.05
NEL_y (非线性) $\%$	0.19	-0.01	-0.01
NEL_z (非线性) $\%$	0.01	-0.02	-0.02

速度通道性能和加速度通道性能的测试指标精度远远优于无温控措施的结果,指标重复性也较强。

4 结论

采取了分段温控的方案,通过 PWM 温控电路和增量式 PID 控制算法实现了对 MEMS 惯性测量装置的实时温控,确保惯导系统恒温工作在精度较高的高温 $+55^{\circ}\text{C}$ 温度点,通过试验验证,结果表明温控后 MEMS 惯性测量装置在较短时间内达到了输出稳定,高低温下指标精度受外界温度影响较小,精度相比无温控措施下提高了 $0.5 \sim 1$ 个数量级,效果明显。

参 考 文 献

[1] 马春艳,王国锋. MEMS 组合惯导系统研究 [C] // 全国第十二届空间及运动体控制技术学术年会论文. 桂林: 2006: 185-189.

[2] 蒋庆仙. 关于 MEMS 惯性传感器发展及在组合导航中的应用前景 [J]. 测绘通报, 2006 (9): 5-8.

[3] Geiger W, Bartholomewczyk J, Breng U, et al. MEMS IMU for AHRS Applications [C] // Position, Location and Navigation Symposium. IEEE/ION, 2008, 5: 225-231.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.08

500 kN 液压式叠加式力标准机的研制

熊俊, 刘建斌

(中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610091)

摘要: 考虑到各种标准机的特点并结合实际工作情况, 本项目所研制的叠加式力标准机采用一个比被检定的测力仪准确度高的传感器作为标准, 将其与被校准或检定的传感器串联, 并以液压方式加载。通过研究分析伺服控制、液压动力系统的转速转矩、液压源的流量等关键参数以及控制软件, 实现了 0.03 级高准确度叠加式力标准机的研制。

关键词: 力标准机; 叠加式; 液压控制

中图分类号: TB931; TH703

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0032-04

Development of the 500kN Piling Type Force Standard Machine

XIONG Jun, LIU Jianbin

(Chengdu Aircraft Industry (Group) Co., Ltd. Chengdu 610091, China)

Abstract: Force Standard Machine is divided into weight type, lever type and piling type. Considering the characteristics of all kinds of standard machine according to the actual working condition, we developed a piling type force standard machine by making use of a sensor as the standard whose accuracy is higher than the verified dynamometer, and the sensor is connected in series with the calibrated or verified sensors, and is loaded by hydraulic force standard machine. Through the research and analysis of the speed and torque servo control, hydraulic power system, flow and other key parameters of the hydraulic source, and control software, we developed the 0.03 high accuracy piling type force standard machine.

Key words: force standard machine; piling type; hydraulic pressure control

0 引言

力标准机是产生标准力值的装置。主要用于力值传感器、称重传感器、标准测力仪等仪器的定度或检定。按照工作原理力标准机可分为静重式、杠杆式、叠加式。

静重式和杠杆式力标准机虽然具有较高的准确度等级, 但对制造成本及工作场所有较高的要求, 一般用于国家基准或有较大工作场所的单位。叠加式力标准机由于其结构简单、操作便捷, 在近几年中得以迅速发展。

叠加式力标准机是将被检测力仪与标准测力仪串联安装, 通过力源对两者同时施加负荷, 使标准测力仪复现定度时各力级的标准值, 同时测出被检测力仪所对应的各力级示值, 从而实现对测力仪的定度、检定或校准。要使叠加式力标准机工作准确可靠, 必须

解决控制系统稳定的难题, 否则会出现示值波动, 无法读数的情况。为满足传感器校准要求, 做到长期稳定性好, 准确度高, 并满足 JJG 734-2001 力标准机的要求, 研制了由伺服控制、液压源以及软件控制所组成的高精度液压控制系统, 准确度可达 0.03 级的 500 kN 叠加式力标准机。

1 方案设计

根据叠加式力标准机的功能需要、组成和各部分的连接关系, 考虑到现场校准工作的需求以及叠加式力标准机的工作原理, 总体布局由两个主要部分构成: 主机和控制系统。其中系统采用伺服控制、驱动器、油泵作为标准力的施加元件, 如图 1 所示。

1.1 主体结构设计

叠加式力标准机的主体主要由机架、传动箱、丝杆螺套、移动梁、反向器、油缸、标准传感器等组成。

1) 主机框架: 由上横梁及底座通过四根立柱连接, 两侧立柱间安装两根丝杆, 上横梁用于安装油缸,

收稿日期: 2014-01-07

作者简介: 熊俊 (1982-), 男, 工程师, 主要从事力学计量等方面的研究工作。

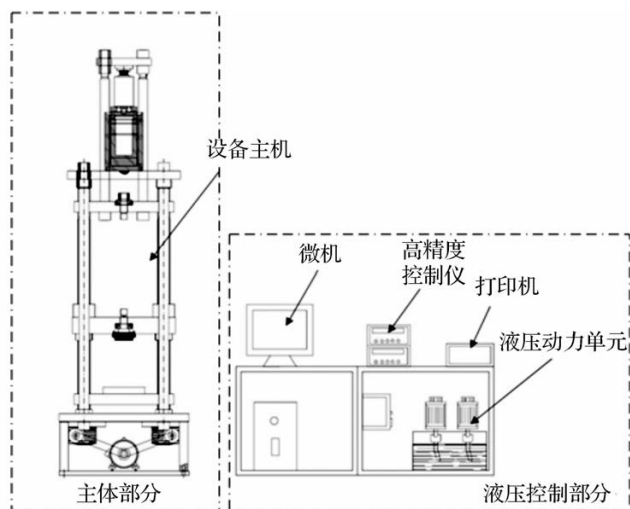


图1 叠加式力标准机结构图

底座内安装传动箱；

2) 传动箱：由异步电机、减速器、同步带轮等组成，安装于底座内，用于驱动丝杆的旋转，从而带动移动横梁的上下移动用以调整试验空间；

3) 丝杆螺套和移动梁：螺套和移动梁是刚性连接，丝杆旋转时移动梁在机架内上下移动，用于调整拉压试验的空间高低；

4) 反力向器：反力框架由上拉板、上下压板、上下反向拉杆等组成；

5) 油缸：由油缸和活塞组成，安装于主机框架的上支撑板上，通过液压回路与高准确度液压动力源联接，用于输出载荷；

6) 标准传感器组：由压板、压头、传感器等组成，安装于油缸活塞上，用于参考标准力值。

由此主机整体的功能为反力框架的上部安装于标准传感器压头上，下部安装于机架内，并通过移动梁将反力框架下部空间分隔成拉向和压向两个工作区域。其主要作用是将参考标准力值传递至被测传感器上，并将标准机输出力转成压向和拉向两种力。工作时将被测传感器装入反向器和移动梁之间（上空间为拉向，下空间为压向），启动控制系统使油缸向上移动，油缸通过标准传感器推动反向器向上移动，从而使被测传感器受力，如图2所示。

1.2 控制系统设计

控制系统是使叠加式力标准机工作准确可靠，保证输出标准力值稳定无波动的主要部件，也是本项目研制的关键点。为此，根据叠加式力标准机工作原理研制了由液压部分以及软件控制所组成的控制系统，

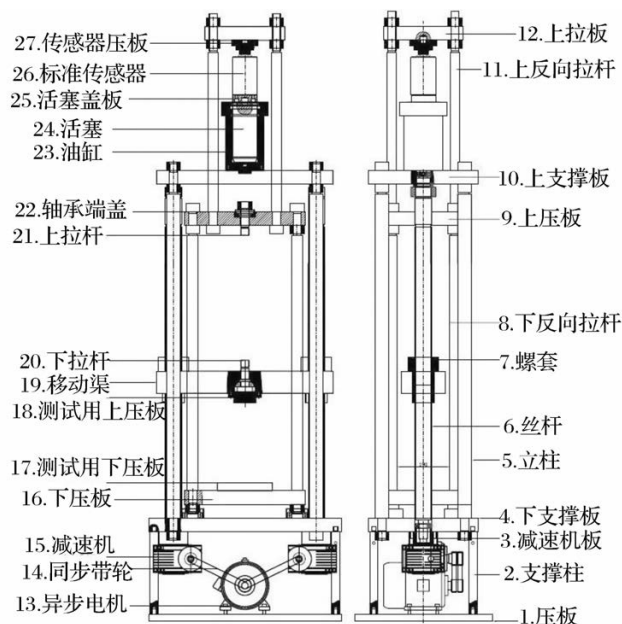


图2 叠加式力标准机主体结构图

以满足 0.03 级准确度的要求。

1.2.1 伺服控制

本项目研制的叠加式力标准机是以液压输出为控制方式，并配合安装于油缸活塞上方的标准力传感器作为输出力值的监控设备。购置 HBM 公司 0.01 级力传感器为力值输出的监控标准，而高准确度的液压控制系统是用于驱动和控制伺服油泵的转速和转矩以达到输出力值的控制，因此该部分为提供力标准机动力和控制的关键部件，并以伺服电机、驱动器和伺服油泵构成。

1) 伺服电机和驱动器的设计

力标准机通过伺服电机、驱动器驱动和控制伺服油泵的转速和转矩以达到提供动力和力源控制的目的。工作功率与转矩是选择伺服电机的关键参数。根据伺服电机的工作原理，其工作功率等于油缸腔内压强与油管输出流量的乘积，因此，假设电机工作时功率为 P ，油缸腔内压强为 F ，油管输出流量为 Q ，由此可得

$$P = F \cdot Q \quad (1)$$

而流量等于伺服电机的转速与油泵排量的乘积。同样，假设伺服电机的转速为 n ，r/s；油泵排量为 q ， m^3/r 。可得

$$Q = n \cdot q \quad (2)$$

由公式 (1)，(2) 可得

$$P = F \cdot n \cdot q \quad (3)$$

由公式 (3) 可知伺服电机的功率与油缸腔内压力、电机转速和油泵排量成正比。而伺服电机转矩与电机功率成正比，与转速成反比，可得转矩公式为

$$T_w = \frac{P}{2\pi n} \quad (4)$$

由此可知,只要动态调整伺服电机的转矩、转速,就能提供叠加式力标准机所需的液压动力和流量。

本项目选用排量为 0.3 mL/r 的油泵,根据公式(1),(4)可分别求得所选用电机的工作功率以及转矩应满足 150 W 和 0.95 Nm。

2) 伺服油泵的设计

伺服油泵用于液压油路的输出控制,根据电机选型配合选用排量为 0.3 mL/r,齿数为 100,额定压强为 25 MPa 的内合齿轮油泵,该油泵最小出油分度值为 $0.3 \text{ mL}/100 = 0.003 \text{ mL}$ 。

而在平均转速为 10 r/min 的工作条件下,要求油泵的供油情况为: $0.3 \text{ mL/r} \times 10 \text{ r/min} = 3.0 \text{ mL/min}$,如控制频率为 100 Hz (即为每秒钟调整 100 次),即 $60 \times 100 = 6000$ (次/min),可得出油泵输出流量的最小分度数为: $3.0/6000 = 0.0005$ (mL),小于 0.003 mL,远远高于油泵本身的分度值。并且当油泵在工作区域下限运转时,由于油泵的脉动变大会导致油源输出非线性加大,表现为液压系统的不稳定。

3) 问题及软件控制解决方案

根据上述分析,单油泵控制方式不足以满足本项目要求,故而选用双油泵控制方式,采用两个油泵同时控制油缸的进回油。

在设计中,将进、回油时油泵的最大转速分别设定为 310 r/min 和 300 r/min,其转速差与油泵排量的乘积为油泵对油缸的供油量。即为 $10 \text{ r/min} \times 0.3 \text{ mL/r} = 3.0 \text{ mL/min}$ 。此时,虽然油泵工作时产生的供油量依然为 3.0 mL/min,但经过油泵流量叠加后其最小分度数将变为 0.0001 mL,该值小于 0.0005 mL 的最低分度值要求。

因此,利用两个伺服电机分别驱动两个油泵,并分别控制油缸进回油,通过两个油泵的转速差决定油缸压力的增减,解决油泵低速运行的脉动现象,实现力源的高准确度控制。

伺服电机一般采用调节阀或溢流阀的方式来调节液压动力装置的输出压力和响应速度,该工作方式均可保证转速、转矩的参数固定不变,但其缺点表现为:①油泵始终处于大量出油状态,会导致油温升高,必须额外配置冷却系统,研制成本过高;②对液压油源质量要求较高;③适应范围较小、灵活性差;④低速或小流量启动时,响应速度慢,系统动态响应慢,适用范围局限性大。

而在过程的控制中,PID 算法是利用比例(P)、积分(I)和微分(D)的偏差进行控制,是应用最为广泛的自动控制器。具有原理简单、易于实现、适用面广、控制参数相互独立、参数的选定比较简单等优点。其调节规律是连续系统动态品质校正的一种有效方法,如图 3 所示。通过对液压控制系统的研究分析发现,在校准过程中油源的波动会产生“逆向效应”影响力值输出的准确性,而快速加压会因液压的滞后性产生输出力值过冲等问题。

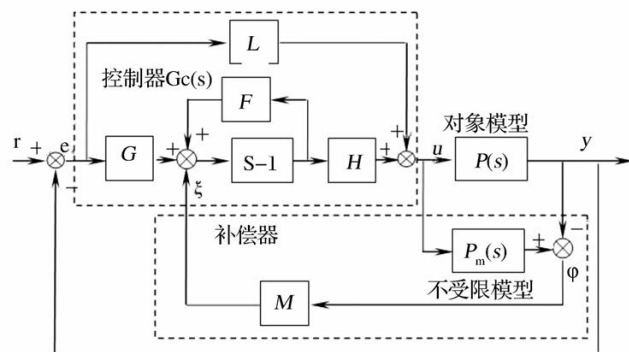


图 3 PID 工作图

因此,必须采用动态调整伺服电机的转速、转矩的方式来控制流量和压力。在快速加压且接近目标值时,控制系统以指数级衰减输出的方法实现输出油压的定位,多级指数衰减适应性不强,差异较大,所以必须同时提高动态控制频率至 100 Hz 以上,并建立可变参数表实现快速无过冲力源定位,以达到输出油源力源的稳定可靠。

4) 工作原理

根据上述解决方案,本项目力标准机的工作原理为:计算机根据被测传感器需要的检测点(可多点)设定标准力值,开始试验后,计算机通过标准传感器仪表采集标准传感器的实际信号,通过运算向 1 号伺服控制器发送速度、转矩指令,1 号伺服控制器控制对应油泵的转速、转矩,通过换向阀对油缸进油,两油缸之间的进油切换由另一换向阀负责,同样另一伺服控制器通过控制伺服电机来控制油泵、油缸的回油;两油泵间的转速差决定油缸的进退、压力、速度。油缸通过标准传感器仪表、标准传感器实时向计算机发送信号,计算机实时通过运算向两个伺服控制器发送速度、转矩指令,如此形成一个闭环控制。直到标准传感器的力值达到设定的力值,此时被测仪表采集被测传感器在设定力值的信号值,如图 4 所示。

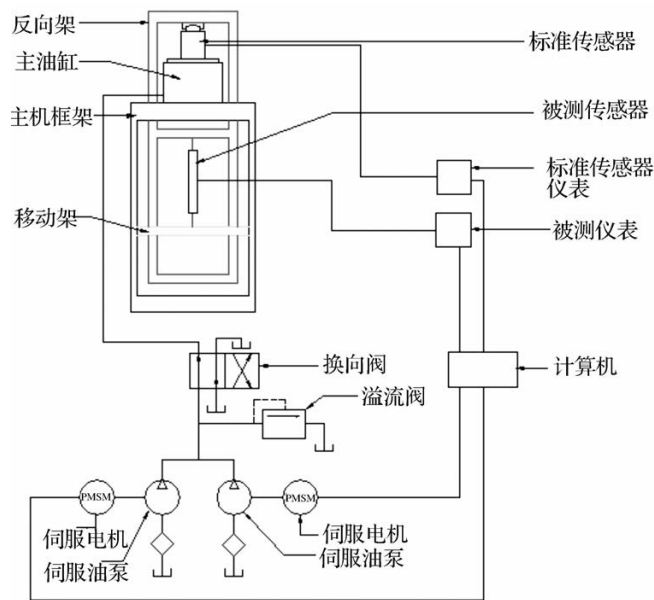


图 4 伺服控制工作原理图

1.2.2 软件控制

软件的作用是配合硬件实现力传感器的校准或检定，流程图如图 5 所示，其主要功能为：实现数据自动采集、自动处理；多单位转换；过冲保护。标准传感器最大信号保护、被检传感器量程过载保护等。

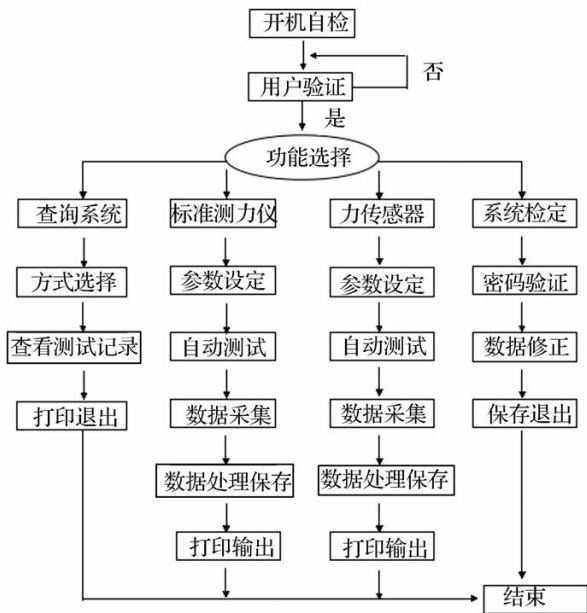


图 5 软件流程图

2 设计验证

研制后，针对系统装置实现的各项功能开展验证工作。选用 2H3-G1-300kN 等型号 300 kN 和 200 kN 的力传感器，按照国家计量检定规程 JJG 391-2009《力传感器检定规程》验证系统在检定力传感器项目的功能。检定力传感器包括零点输出、零点漂移、重复性、蠕变等项目的技术指标。同样，选用 Z4A/500kN，U2A/20t 标准测力仪，按照国家计量检定规程 JJG144-2007《标准测力仪检定规程》验证自动控制叠加式力标准机系统在检定标准测力仪项目的功能。检定标准测力仪包括长期稳定度、示值误差、方位误差、进回程误差等项目的技术指标。通过使用，系统功能符合国家检定规程，满足力传感器及标准测力仪的校准要求。

3 结论

传统的叠加式力标准机分为手动液压系统与自动液压控制系统，通常 30 s 力源波动度为 0.02%，100 s 力源波动度为 0.05%，基本能满足 0.05 级力标准的要求，但无法满足 0.03 级标准机要求。此次研究的由伺服电机、液压源以及软件控制所组成的高准确度自动液压控制系统，降低工作时油泵的输出量非线性问题影响油泵的脉动变化所导致的液压系统的不稳定，提高叠加式力标准机的准确度，使其满足力值误差 $\pm 0.03\%$ ，30 min 负荷波动性 0.01% 的设计目标。

参 考 文 献

[1] 洪宝林. 力学计量 (上册) [M]. 北京: 原子能出版社, 2002.

[2] 范巧成. 计量基础知识 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2004.

[3] 唐纯谦, 高富荣, 陈明华, 等. 3MN 叠加式力标准机的研制 [J]. 中国测试技术, 2008, 34 (2): 13-15.

[4] 马洪发, 张振洲, 吴虹, 等. 6000 kg 机械叠加式力标准机的研制 [J]. 仪表技术与传感器, 2008 (11): 32-33.

[5] 王斌, 宋华. 叠加式力标准机控制系统设计 [J]. 测控技术, 2008, 27 (11): 42-45.

[6] 张晓杰, 厉巍, 姜同敏. 力标准机控制系统改进的设计 [J]. 测控技术, 2010 (4): 51-55.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.09

几种典型燃烧室高温气流温度传感器的设计

李亚晋¹, 赵俭¹, 王建军²

(1. 中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 北京信息技术研究所, 北京 100094)

摘 要: 介绍了几种最新的用于航空航天动力设备地面燃烧室试验用的高温气流温度传感器; 针对不同测试工况和使用环境, 分析了传感器设计过程中的影响因素; 给出了材料选择、结构设计的思路 and 原则, 并指出了气流温度传感器设计未来的发展方向。

关键词: 温度传感器; 高温气流; 传感器设计; 燃烧室试验

中图分类号: TB942

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0036-04

Design of Some Kinds of Combustor Airflow High Temperature Sensors

LI Yajin¹, ZHAO Jian¹, WANG Jianjun²

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China; 2. Beijing Institute of Information Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: This paper introduced some state-of-the-art airflow temperature sensors applied in combustor ground tests for aeronautic and astronautic power equipment, and analyzed the influence of material and structure for designing these sensors in different test environments. The paper also pointed out the direction for the future development of the airflow high temperature sensors.

Key words: temperature sensor; high temperature airflow; sensor design; combustor test

0 引言

随着航空航天技术的不断进步, 各种飞行器的发动机温度也在不断提高。这些热工参量的获取对于发动机的设计、修正和制造、使用有重要意义, 因此高温气流温度测量技术越来越受到重视。新一代航空发动机涡轮前温度可达 2000 K^[1]; 液体火箭发动机地面试验中, 燃烧温度可达 3000 K, 流速达到 2 Ma。复杂苛刻的环境, 对温度测试提出了很高的要求^[2], 高温气流温度传感器的设计不仅要考虑传感器本身能否承受高温高压的侵蚀, 传感器小型化、经济性等要求也是设计传感器需要考虑的重要因素。本文从测量环境、传感器材料选择与结构几个方面对高温气流温度传感器的设计进行分析说明, 并给出了现场试验验证结果。

1 高温气流温度传感器的设计原则

气流温度传感器目前以接触式为主, 如热电偶、热电阻等温度传感器。这类传感器在测量气流温度时, 其指示温度只是敏感元件 (如热电偶测量端) 本身的

温度, 而不是被测气流的温度, 这之间的偏差是由传热、气动和温度的动态变化等原因造成的^[3]。在测量气流总温时, 测温误差主要有: 被测气流不能完全滞止引起的速度误差、热辐射引起的辐射误差、沿测温元件导热引起的导热误差和测温元件热惯性引起的动态误差。

在设计热电偶传感器时, 根据传感器使用工况的不同, 不同的误差类型将占据主导, 一般要遵循一些原则来尽可能地减小这些误差。在测量高速 ($Ma > 0.2$) 气流温度时, 速度误差比较大, 要考虑速度误差对测温结果的影响。通常采用恢复系数来评价测温的速度误差, 传感器的结构型式和安装方式对恢复特性影响较大, 通常裸露式热电偶比滞止式热电偶恢复系数小, 另外传感器的直径以及表面粗糙度对恢复系数也有影响。

在测量高温气流温度时, 传感器的辐射和导热往往是测温误差的主要来源, 结构上一般采取设计屏蔽罩使得热电偶测量的辐射误差减小。这是由于屏蔽罩与气流的对流换热使其温度较高, 热接点与屏蔽罩之间的温差较小, 减小了辐射误差。

对于由安装支座与测量端温度差引起的导热误差, 一般通过控制传感器的长径比 $\frac{L}{d}$ 来减小导热误差, $\frac{L}{d}$ 值越大, 导热误差越小。一般采用增加传感器浸入长

收稿日期: 2014-01-21

作者简介: 李亚晋 (1985-), 女, 助理工程师, 主要从事动态温度测试校准工作。

度的办法来增加长径比,对于裸露式热电偶, $\frac{L}{d} \geq 10$ 即可获得一定的准确度。

对于温度动态变化的气流,由传感器的热惯性引起的动态误差不可忽略。传感器的动态特性一般由温度传感器的时间常数来反映。传感器的形状不同,时间常数也不同。通常传感器的尺寸越小,质量越小,换热系数越大,时间常数越小。裸露式传感器一般比滞止式传感器的时间常数小,热电偶的接点若为铰接会使时间常数增大^[4]。

在传感器研制过程中,除了要采取一定的措施避免上述误差的影响,同时也要考虑在高温气流的环境里传感器使用可靠性等因素。因此,气流温度传感器的设计和制造要综合考虑各方面的因素,在满足使用环境要求的基础上提高测温准确度。

2 几种典型燃烧室高温气流温度传感器的设计

本节介绍三种用于航空航天燃烧室地面试验的高温气流温度传感器的设计。根据其使用工况,重点从材料选取、结构设计等方面进行介绍。

2.1 超燃冲压发动机燃烧室出口总温传感器设计

在超燃冲压发动机燃烧室地面试验中,利用接触式温度传感器直接测量燃烧室出口燃气总温以计算燃烧效率^[5]。超燃冲压发动机燃烧室出口气流特点是温度高,流速快,气流压力高达 5 MPa,采用接触式温度传感器测量总温需要解决耐高温、抗冲击、密封等技术难题。其结构如图 1 所示。



图 1 耐压环境总温传感器示意图

在材料方面,由于燃烧室出口气流总温最高接近 3000 K,选择钨合金为总温传感器壳体材料。钨的熔点高达 3410℃,同时为抑制钨合金壳体的氧化,在其表面进行了镀膜处理。热电偶丝材料选用 WRe5-WRe26,直径 0.3 ~ 0.8 mm,为了使热电偶能够适应氧化环境,采用电子束镀膜工艺对其表面进行镀膜处理。

在结构方面,总温传感器的设计中最重要的是滞止罩结构的设计。滞止罩需要将来流有效滞止,同时保证滞止罩内有较好的热交换性能,使得传感器能够快速响应。使用图 2 所示的半屏蔽直吹式总温传感器滞止罩,半屏蔽滞止罩能够使来流有效滞止,同时热电偶直接接触高温来流,保证了传感器的快速响应。

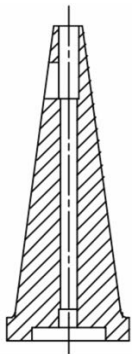


图 2 滞止罩结构示意图

在滞止罩内安装三支热电偶 T_1 , T_2 , T_3 , 其中 T_2 测量气流温度, T_1 和 T_3 测量滞止罩内壁温度,用于对总温传感器的辐射误差的修正,如图 3 所示。

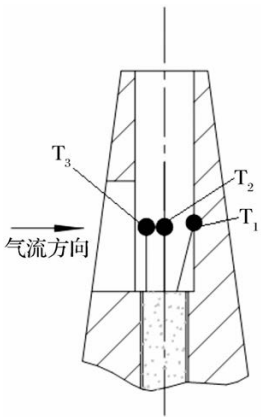


图 3 偶丝安装示意图

为了适应 5 MPa 气流压力,保证结构密封,该传感器设计了耐压安装座,由出线座、热电偶固定座和密封垫构成,并进行了 10 MPa 耐压试验。计算和试验

结果表明整支传感器在该压力环境下能够实现可靠密封。整支传感器外壳结构迎风面狭小,有利于减小阻塞比,提高测量准确度,保证传感器末端元件不受热流影响而失效^[6]。

2.2 固体冲压发动机地面试验总温传感器设计

固体冲压发动机地面试验的工况复杂恶劣,温度高达 2400 K,流速为 0.3 Ma。测量介质具有氧化性,会对传感器的外壳造成影响。

在材料方面,为了能在上述复杂环境下准确测量高温高速气流温度,采用表面改性钨铼热电偶传感器,该传感器的外壳结构可以有效保护热电偶不受燃气中运动粒子的影响。试验表明该总温传感器在该工况下能够取得很好的测温效果。

在结构方面,设计了如图 4 所示的可更换偶丝的热电偶结构,用于现场替换失效的热电偶。通常,为了固定偶丝,热电偶套管和传感器外壳之间的间隙通常采用高温水泥或密封胶填充。当工作时间过长导致偶丝失效时,无法更换偶丝,只能由生产单位进行修理,或者将整支传感器报废,增加了生产和使用成本,造成一定的浪费。

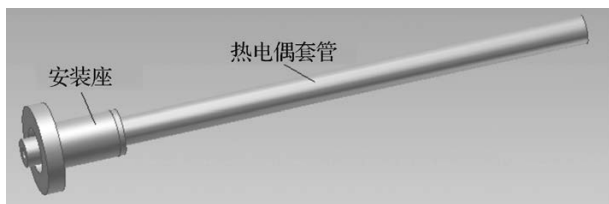


图 4 可更换热电偶结构

图 4 所示热电偶的特点是偶丝固定在特定安装座内,在使用时可以根据试验需要调节偶丝伸出的长短。在一些温度条件下,当偶丝工作失效或受到损坏时,使用者可以方便、快捷地在现场取出更换新的热电偶,而无需返回生产单位修理,比较方便经济。

2.3 微型总温传感器设计

在一些发动机燃烧室或涡轮机械流道内部试验中,安装空间很小,要求传感器具有较小的尺寸,并且保证工作强度和测温准确度。图 5 是一种微型测温传感器,外壳最大直径小于 6 mm,安装快速方便。

该传感器在燃烧室地面试验出口气流温度测试中得到应用。其中传感器外壳可以与试验器壁面连接,外压螺母起到固定作用。由于空间狭小,传感器与壁面距离很近,为减小辐射误差和导热误差,传感器外壳采用不冷却结构,头部采用进气孔与出气孔对称设计的直吹式结构,可以提高传感器内部的气流速度,

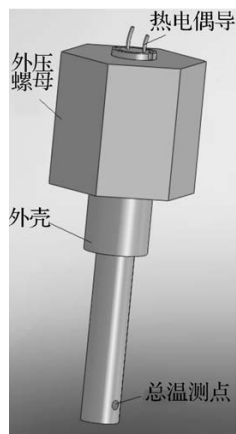


图 5 微型总温传感器示意图

加强对流换热,从而抑制辐射误差和导热误差。另外,制作时热电偶焊接球头也要尽可能小,以减小球头的热容量,提高传感器响应速度,同时避免在气流中碰到外壳壁面。

2.4 试验验证

上述三种特殊结构的气流温度传感器在相关燃烧室地面试验中得到了应用,经验证满足使用要求。

图 1 所示的燃烧室出口气流总温传感器在先期设计中,曾在中航工业北京长城计量测试技术研究所的热风洞中进行了标定试验。该传感器在 1500 K 和 1800 K 的总温条件下修正后,测量总温与标准气流温度传感器相比,误差小于 3%,满足了高温气流测量的要求。图 6 为该总温传感器在燃烧室地面试验中的测温曲线,其中热电偶 T_2 测量气流温度,热电偶 T_1 和 T_3 测量滞止罩内壁温,用于对总温传感器的辐射误差的修正。可以看出,在试验中总温传感器工作状态良好,达到热平衡后获得了燃烧室工作时稳定的总温数据^[5]。图 7 为固体冲压发动机地面试验测温曲线;由试验结果可以看出该传感器在燃烧室气流总温测量中有着快速的响应速度,可以稳定地获得燃烧室的气流总温。

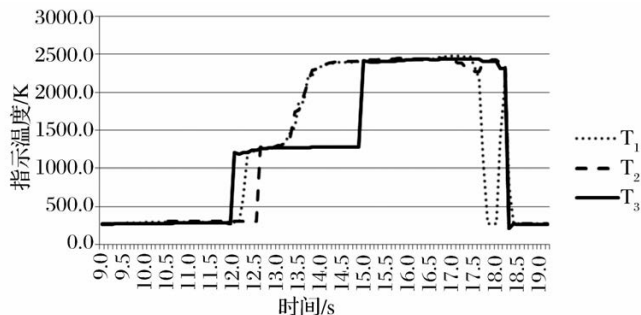


图 6 燃烧室出口总温传感器测温曲线

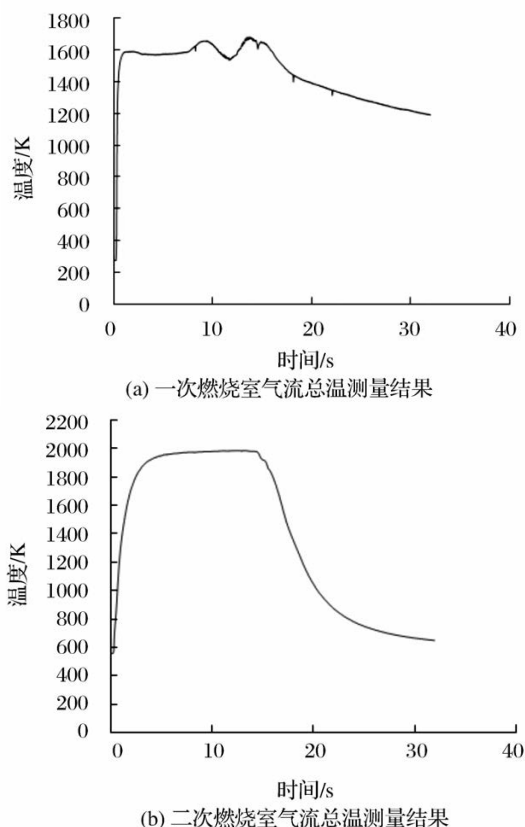


图7 固体冲压发动机总温传感器测温曲线

由于条件所限,微型总温传感器的试验数据并未获得,但前期工作表明其结构和性能已可以满足燃烧室地面试验中小空间的测温需求。

3 总结与展望

本文所介绍的三种典型气流温度传感器在材料及

结构设计方面均能适应相应的燃烧室地面试验,在预期的测试温度下,传感器响应速度能够达到测试需求,测温特性良好。

目前这类特殊气流温度传感器的应用越来越广泛,但使用环境的特殊性导致其结构的复杂多变,传感器性能的量化和结构设计的规范化存在一定的难度,生产和计量保障都需要进一步完善。航空航天科技的发展使得高超声速高温测试环境对气流温度传感器的设计提出了更高的要求。气流温度传感器的研制将更着眼于高温、高超声速以及高压环境下的温度的测量。传感器的结构也向着多元化的方向发展,微小体积传感器可以用于狭小试验空间的测量,多点温度传感器可以同时测得所需多组温度参数。传感器的材料也不限于金属,陶瓷基复合材料近年来逐渐应用到传感器中。这类传感器对高温气流测试有很大的推动。

参考文献

- [1] 方昌德,艾青译.2000年航空技术展望——先进飞行器概念预测[M].北京:航空工业出版社,1988:15-18.
- [2] 赵俭,杨永军,秦存民,等.瞬态超高温气流温度测量技术研究初探[J].计测技术,2008,28(6):26-27.
- [3] 马恒儒.热学计量[M].北京:原子能出版社,2002:285-292.
- [4] 金伟,柳靖波,白月飞.热电偶测温的误差分析[J].工艺与装备,2013,23(4):33-38.
- [5] 江强,王辽,郭金鑫,等.基于总温测量的超燃冲压发动机燃烧效率研究[J].实验流体力学,2012,26(5):1-5.
- [6] 成大先.机械设计手册:第2卷[M].5版.北京:化学工业出版社,2008:65-67.

福禄克红外热像仪助力 LED 散热体大评比

2014年6月,福禄克锐智系列红外热像仪 Ti400 作为指定检测设备助力“2014 康荣杯全国散热体设计大赛”圆满收官。本次大赛利用热像仪检测 LED 样灯在正常工作时的灯珠温度、散热效果,并结合散热体重量、尺寸、散热体性价比等各方面指标,对数十家知名参赛企业作品进行评比。

LED 灯具作为节能项目的重要手段,正得到越来越广泛的应用。大型 LED 灯具同样有相对较大的发热量,而散热结构的好坏影响着 LED 灯具的质量及寿命。

通过红外热像仪检测目标时,无需断电,操作方便。同时非接触测量使原有的温度场不受干扰、反应速度快。而且相对于传统的数据采集器及红外点温仪,可以获取被测目标的整体温度分布状况,避免因点测温造成的漏检。

福禄克 Ti400 红外热像仪作为大赛唯一指定检测设备,其业内首创的 LaserSharp® 激光自动对焦技术能够实现快速、精准对焦,在任何情况下都可以轻松捕获被测目标,从而呈现一贯完美图像。HDMI 高清视频输出及 500 万像素工业级高清数码相机更让细节一览无遗。采用福禄克专利 IR-Fusion® 技术,除了可以拍摄红外图像外,还可以同时捕获一幅可见光照片,并实现融合显示,帮助客户在第一时间识别和定位故障。

各企业工程师们通过拍摄后的一系列红外热图,改善散热设计,从而也提高了 LED 灯具的产品质量及寿命。无论从操作便利性、工作高效性亦或是产品智能性,福禄克热像仪都带给了用户前所未有的工作体验。

(陈娟 报道)

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.10

双闭环兰姆凹陷激光稳频方法

李华丰, 朱振宇, 王霖, 李强, 高珊

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 兰姆凹陷稳频激光器环境适应能力较差、在环境温度变化时容易失锁的问题, 主要是由于环境温度波动导致的激光器腔长变化超出了压电陶瓷的调整范围。本文提出将兰姆凹陷稳频技术与热稳频技术相结合的方法, 利用附加的温度控制系统补偿环境变化造成的激光器管壁温度变化, 使工作过程中激光器腔长基本保持稳定, 从而保证激光器谐振腔长变化不超出压电陶瓷的补偿范围。试验表明, 所用方法解决了兰姆凹陷稳频激光器容易失锁的问题, 提高了激光器的环境温度适应性, 为兰姆凹陷稳频技术在工业现场的应用创造了条件。

关键词: 兰姆凹陷稳频; 激光谐振腔长; 环境适应性

中图分类号: TN248; TB96

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0040-03

Double Closed-loop Lamb Dip Stabilized Laser

LI Huafeng, ZHU Zhenyu, WANG Ji, LI Qiang, GAO Shan

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing, 100095, China)

Abstract: Lamb dip stabilized He-Ne Laser has less environmental suitability because of the travel limit of piezoelectric ceramics. This weakness restricts the use of Lamb dip steady frequency technology in industrial field. Based on the analysis of control process, we found that the length change of the resonant cavity is the result of the fluctuant environment temperature as the main reason of the failed control. An external temperature control loop was applied in the control system to counteract the negative influence of the environment temperature. This technology combined Lamb dip stabilization method and thermal frequency stabilization method, and made it possible for Lamb dip stabilized He-Ne Laser to be used widely in industrial field.

Key words: Lamb dip; resonant cavity; environmental suitability

0 引言

气体激光器的兰姆凹陷现象, 是当激光器的输出频率与工作物质的中心频率重合时, 由于烧孔效应而出现的激光器输出功率达到某一极小值的现象, 该频率点称为激光器的兰姆凹陷点^[1]。

气体激光器的兰姆凹陷稳频技术以工作物质的原子跃迁谱线中心频率 ν_0 作为参考标准频率^[2], 以兰姆凹陷现象为控制依据, 利用压电陶瓷调节激光谐振腔长, 使激光器始终工作在其兰姆凹陷点, 从而保持激光器输出波长稳定的激光稳频技术。

兰姆凹陷稳频激光器以原子跃迁谱线频率为参考频率, 波长长期稳定度高、复现性好、互换性高; 以

压电陶瓷调节激光谐振腔长, 响应速度快, 跟踪迅速。这些优势使兰姆凹陷稳频技术在激光干涉测量等科学研究领域受到青睐。

在工业现场环境中, 环境温度变化较大, 通常在 15~35℃ 间, 引起激光器外腔温度变化, 往往导致激光器腔长的热膨胀变化幅度超出压电陶瓷的调整范围, 从而发生稳频激光器失锁的现象。这反映出兰姆凹陷稳频激光器环境适应性较差的弱点, 这一弱点限制了兰姆凹陷稳频技术在工业生产中的应用。

1 环境温度变化对激光器的影响

从激光器的发热与散热角度分析, 激光器处于一种热平衡状态。

以裸露于空气中的氦氖激光器为例进行分析, 激光器管壁与空气的换热形式主要是对流换热^[3]。根据牛顿冷却公式, 有

$$Q = \alpha F \Delta t \quad (1)$$

收稿日期: 2014-2-25; 收稿改稿日期: 2014-5-5

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目 (J052011A002)

作者简介: 李华丰 (1972-), 男, 河北武邑人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为微尺度校准技术。

式中： Q 为热流量； α 为导热系数； F 为散热面积； Δt 为激光管与环境温度差。

在工作过程中激光器的工作电流保持不变，所消耗功率除极少部分以激光形式发出外，其他部分均以热量形式散失，当达到平衡状态后，激光器的发热功率与管壁的对流散热功率一致，可以认为激光器的热流量 Q 不变。

在通常工作条件下，环境空间尺寸远大于激光器尺寸，激光器无强制制冷措施，可以看作工作于大空间自然对流换热模式，假设空气温度均匀、激光器管壁各部分温度一致，当激光器水平放置时，根据自然对流换热理论，在 20°C 附近时，有

$$\alpha = 1.388 \left(\frac{\Delta t}{l} \right)^{0.25} \quad (2)$$

式中： l 为激光器长度。

将公式 (2) 代入公式 (1) 中整理得

$$Q = 1.388 F (\Delta t)^{1.25} l^{-0.25} \quad (3)$$

选用长度 200 mm ，直径 5.4 cm ，输入功率 8 W 的兰姆凹陷氦氖激光器作为试验对象，将参数代入公式 (3)，有

$$Q = 0.176 (\Delta t)^{1.25} \quad (4)$$

激光器输入功率基本都用于发热， $Q \approx 8\text{ W}$ ，则有

$$T_{\text{管}} = \left(\frac{Q}{0.176} \right)^{0.8} + T_{\text{环境}} = 21^\circ\text{C} + T_{\text{环境}} \quad (5)$$

式中： $T_{\text{管}}$ 为激光器管壁温度， $^\circ\text{C}$ ； $T_{\text{环境}}$ 为环境温度， $^\circ\text{C}$ 。

可知管壁温度 $T_{\text{管}}$ 与环境温度 $T_{\text{环境}}$ 呈线性关系，即随着环境温度变化，激光器管壁温度也线性变化。

图 1 是实验用的氦氖激光器管壁温度随环境温度变化的理论计算曲线和实测曲线。

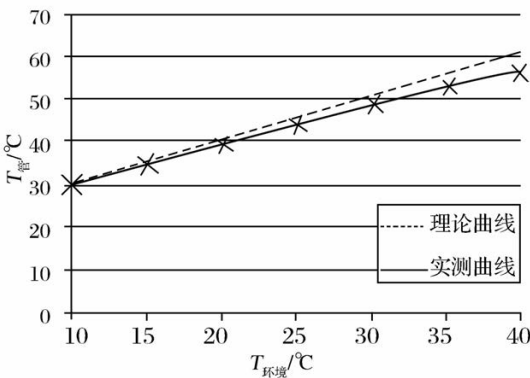


图 1 激光器管壁温度随环境温度变化曲线

从曲线可以看出，试验用的激光器管壁温度的理论分析结果与实测结果基本一致，偏差主要是由于理论推导过程中忽略了激光器端面散热、空气导热参数随温度变化而变化等因素造成的。

从图 1 可以得到：当环境温度从 10°C 变化到 40°C 时，氦氖激光器管壁温度变化约为 30°C ，对于试验中用到的由石英玻璃制作的腔长 200 mm 的激光器，由于管壁温度变化造成的腔长变化约为 $3\text{ }\mu\text{m}$ ^[4]，而通常兰姆凹陷稳频激光器中压电陶瓷的腔长调整范围约 $1\text{ }\mu\text{m}$ ，由于环境温度变化造成的激光谐振腔长变化超出了压电陶瓷的调整范围，这就是基于兰姆凹陷稳频的氦氖激光器环境适应性差的原因。

其他散热形式的激光器与之类似，也存在环境温度变化导致激光器谐振腔长变化较大的现象。

要实现兰姆凹陷稳频氦氖激光器的波形扫描与稳定锁频，必须保证压电陶瓷有至少 1 个激光波长的调整余量（约 $0.63\text{ }\mu\text{m}$ ），因此激光器管壁腔长变化应小于 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ ，对于上述试验用的激光器，其管壁温度变化应小于 3°C 。

2 双闭环兰姆凹陷激光稳频方法

从前面的分析可知，要提高兰姆凹陷稳频激光器的环境适应能力，需要补偿环境温度变化造成的激光器谐振腔长变化。

图 2 是采用双闭环控制方式实现激光器谐振腔长补偿的原理框图。在传统兰姆凹陷稳频激光器基础上，增加了激光器管壁温度检测与控制系统，在激光器管壁外包裹了电加热层，并粘贴温度传感器，通过温度控制环实现激光器管壁温度的稳定，即实现激光器管壁长度基本不变。环境温度的残余影响以及由于其他因素导致的激光器谐振腔长变化，则通过兰姆凹陷控制环驱动压电陶瓷管实现补偿。

图 3 为双闭环兰姆凹陷稳频激光器控制系统框图，其包括两个闭环控制回路，分别实现兰姆凹陷稳频控制与激光器管壁温度控制。

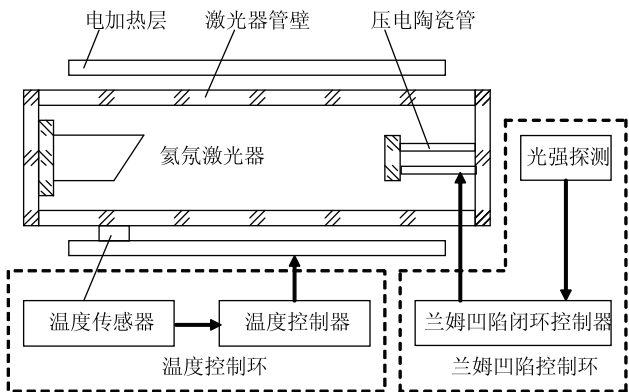


图 2 双闭环兰姆凹陷稳频激光器原理框图

兰姆凹陷稳频控制回路,通过控制压电陶瓷管的驱动电压实现激光器谐振腔长的调整,并在其上附加一载波,实现激光器谐振腔长的微小调制,谐振腔长调制导致激光器输出功率存在微小的交流波动,通过交流检波与相敏检测可以得到功率波动的相位信息,该相位信息代表了激光器在兰姆凹陷波形上的位置,通过将相位期望值设定为零,可以使激光器工作于兰姆凹陷点上^[1]。

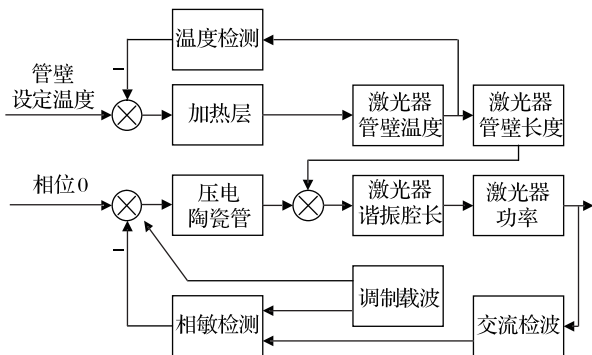


图3 双闭环兰姆凹陷稳频激光器控制系统框图

激光器管壁温度控制回路通过粘贴在激光器管壁上的温度传感器监测管壁温度,并通过调节加热层的驱动电流实现管壁温度的稳定,以抵消环境温度变化对管壁温度的影响。

由图3可以看出,激光器谐振腔长由两个控制回路联合调节,其中环境温度对谐振腔长的影响主要由管壁温度控制回路补偿,而其他因素造成的激光器失稳则由兰姆凹陷稳频控制回路补偿。

由图2所示的原理框图可知,双闭环兰姆凹陷稳频激光器系统中的散热是通过自然对流散热实现的,无强制制冷措施,即系统无法实现主动降温,因此要实现激光器管壁温度控制回路的正常工作,需要使管壁温度设定值高于自然对流散热状态下的最高工作温度。

图4为双闭环兰姆凹陷稳频激光器的激光器管壁温度与环境温度关系曲线。从实测结果可以看出,管

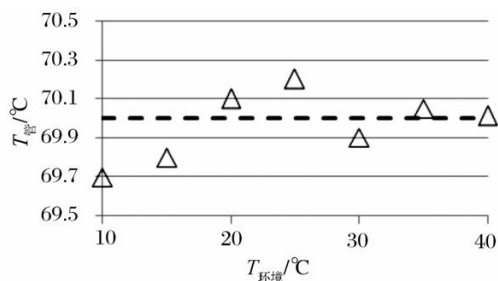


图4 双闭环激光器管壁温度与温度环境关系

壁温度变化可以控制在 0.6°C 范围内,系统有效补偿了环境温度变化对激光器管壁温度的影响,即可以保持激光器管壁长度相对稳定。

3 试验结果

双闭环兰姆凹陷稳频激光器与 $0.633\text{ }\mu\text{m}$ 波长副基准装置进行拍频试验,试验持续 9 h,期间被测激光器的工作环境从 10°C 匀速升至 40°C 再降至 10°C ,依据 JJG353-2006《633 nm 稳频激光器检定规程》,得到的 9 h 频率稳定度曲线如图 5 所示。

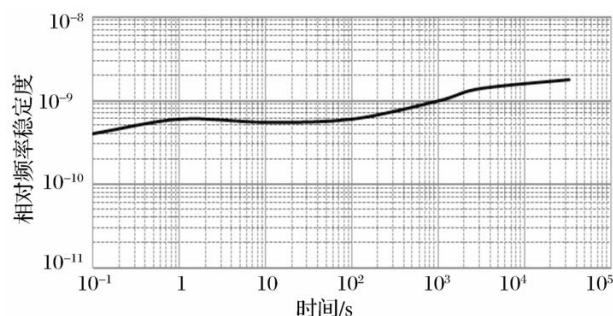


图5 频率稳定度曲线

从图5可以看出,双闭环兰姆凹陷稳频激光器在环境温度变化较大情况下,9 h 频率稳定度达到 2×10^{-9} ,完全可以满足工业现场对激光干涉仪光源频率稳定度的要求。

4 结论

双闭环兰姆凹陷激光稳频方法在传统兰姆凹陷激光稳频方法的基础上,增加了温度控制环节,通过调解激光器管壁温度抵消环境温度变化对激光器谐振腔长的影响,使稳频激光器可以在环境温度波动较大的工业现场正常使用。

双闭环兰姆凹陷激光稳频方法不仅提高了兰姆凹陷稳频激光器的环境适应能力,而且由于激光器的工作气体温度相对稳定,其吸收光谱变化也比较小^[5],利于提高激光器的波长稳定度。同时,由于对压电陶瓷调整范围的要求减小,激光器中选用长度较短的压电陶瓷管,这对提高激光器的谐振腔质量、降低加工难度非常有利。

参考文献

- [1] 苑丹丹,胡姝玲,刘宏海,等.激光器稳频技术研究[J].激光与光电子学进展,2011,48(8):081401.

(下转第 54 页)

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.11

光频测量用飞秒激光频率梳光谱扩展实验研究

张大鹏¹, 梁志国¹, 叶蓬²

(1. 中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 中国科学院物理研究所, 北京 100080)

摘 要: 在光频的绝对测量研究中, 本研究小组研制了光谱范围为 650 ~ 950 nm 波段、重复频率为 350 MHz 的“单块”结构钛宝石飞秒激光频率梳。为了实现其对 633 nm 波长国家副基准频率的绝对测量, 本实验分别采用棱镜对和啁啾镜对进行脉宽压缩, 然后注入光子晶体光纤进行光谱扩展。实验发现两者均可扩展出短波长方向的光谱, 但棱镜对扩谱结构由于具有较长的“光程臂长”容易受到扰动而造成光纤耦合的不稳定, 最终表现为光谱中各波长成分的光强不稳定而无法用于光频测量。啁啾镜对结构紧凑、稳定性强, 经过脉宽压缩及光子晶体光纤扩谱, 最终获得了光谱覆盖 600 ~ 950 nm 波段、各波长成分强度稳定、各光频齿频率稳定度同步于氢原子钟的可用于光频测量的飞秒激光频率梳。

关键词: 光频绝对测量; 飞秒激光频率梳; 光谱扩展

中图分类号: TB96; TN24

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0043-04

Research on Spectrum Expanding of a Femtosecond Optical Synthesizer for Absolute Frequency Measurement

ZHANG Dapeng¹, LIANG Zhiguo¹, YE Peng²

(1. ChangCheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China; 2. Institute of Physics CAS, Beijing 100080, China)

Abstract: A femtosecond laser optical synthesizer, with the repetition frequency of 350 MHz, whose spectrum bandwidth is from 650 nm to 950 nm, was developed for absolute frequency measurement. In order to measure the frequency of the national assistant wavelength reference, iodine-stabilized 633 nm He-Ne laser, we must expand its spectrum to contain 633 nm wavelength. After compressing the pulse duration by the prism pair and chirped mirror pair, the laser pulses were focused into the photonic crystal fiber. But the intensity of the expanded spectrum generated by prism pair changed rulelessly, because of the interfere of the environment. The chirped mirror pair, which is more compacted, could overcome this disadvantage. The broadband width spectrum after the chirped mirror pair and the photonic crystal fiber was steady for 5 hours, monitored continuously by the spectrum suit, which is suitable for optical frequency measurement.

Key words: absolute frequency measurement; femtosecond optical synthesizer; spectrum expanding

0 引言

1983 年, 国际计量委员会 (CIPM) 推荐将 $^{127}\text{I}_2$ 饱和吸收稳频的 633 nm He-Ne 激光波长作为复现米定义的标准^[1], 中航工业计量所 (CIMM) 建立的 633 nm 碘稳频激光装置于 1986 年被国家计量局定为国家副基准 (编号 NO. 02)。作为现行有效的 633 nm 波长国家副基准装置, 至今一直担负着为国防工业及科研机构进行量值传递及溯源的工作。

飞秒激光频率梳的出现, 建立了微波频率与光波

频率的直接链接, 在实现光学频率直接绝对测量的同时又将光频直接溯源至具有更高精确度的时间频率基准 (原子钟), 这给波长计量及光频标的建立带来了革命性的进展, 而有望成为下一代光频基准的组成部分^[2~4]。中航工业计量所作为现行有效的 633 nm 波长国家副基准装置的保有单位, 能够利用飞秒激光频率梳实现对编号 NO. 02 激光的各峰值频率的绝对测量成为颇具意义的工作。鉴于此, 为了利用本研究小组研制的 350 MHz 重复频率、650 ~ 950 nm 波段钛宝石飞秒激光频率梳来实现对编号 NO. 02 激光频率的绝对测量, 本小组在飞秒激光频率梳重复频率 f_{rep} 和载波包络相移频率 f_{ceo} 同时锁定到氢原子钟 10 MHz 参考频率标准的前提下, 分别采用棱镜对和啁啾镜对对脉宽进行了压缩, 然后注入光子晶体光纤进行扩谱实验以期得到适用于光频测量的覆盖 633 nm 波长的飞秒激光频

收稿日期: 2014-02-26; 收修改稿日期: 2014-03-15

基金项目: 国家“十一五”计划重点科研项目 (A 类) (07A401008)

作者简介: 张大鹏 (1981-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光频标及激光干涉测量研究。

率梳。

1 650 nm ~ 950 nm 波段钛宝石飞秒激光频率梳

本实验中钛宝石飞秒激光频率梳采用“单块”结构,图1给出其结构示意图。“单块”结构是指在获取载波包络相移信号 f_{ceo} 时采用了单独一块 MgO:PPLN 晶体来取代传统方案“ $f-2f$ ”结构中的光子晶体光纤 PCF 与非线性干涉系统以实现相应的非线性效应的光路结构。这避免了 PCF 耦合精度要求高、端面容易损坏、长期稳定性差等致命缺点,同时激光器结构更加紧凑,易于维护^[5]。

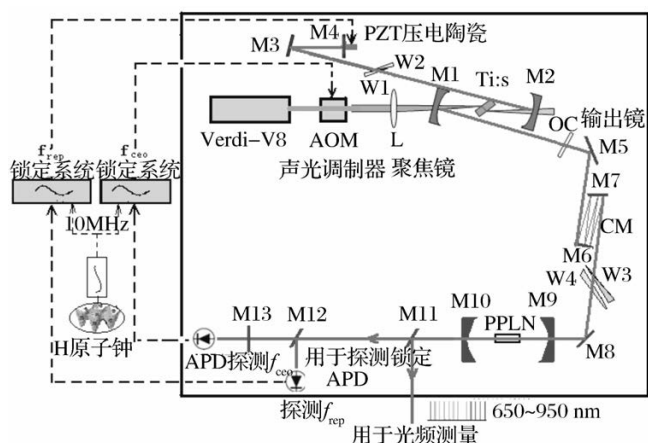


图1 650 ~ 950 nm 飞秒激光频率梳结构示意图

如图1所示,飞秒激光振荡器采用Z型折叠腔,泵浦源为半导体抽运的Nd:YVO4倍频532 nm固体激光器(Coherent,Verdi-V8),谐振腔内利用啁啾镜对(M1~M4)及光楔(W1,W2)进行色散补偿,工作物质为钛宝石晶体Ti:s,抽运功率在4.3 W时,钛宝石振荡器输出飞秒激光脉冲的平均功率为520 mW,脉宽为7.5 fs,重复频率为350 MHz。输出的飞秒激光脉冲由银镜M5导入啁啾镜对(M6,M7)及光楔(W3,W4)进行色散补偿后再由银镜M8注入PPLN晶体,M9,M10为凹面镜,在自相位调制(SPM)和非线性频率混合(倍频或差频)效应的作用下,在晶体中存在两个有重叠光频的飞秒激光频率梳,重叠部分外差相干后便得到了载波包络相移 f_{ceo} ;最后经半反半透镜M11透射的红外波段飞秒脉冲由光电探测器转化为电信号用于探测重复频率 f_{rep} 与载波包络相移 f_{ceo} ,图中M12为半反半透镜、M13为聚焦透镜。重复频率 f_{rep} 、载波包络相移频率 f_{ceo} 分别由频率稳定电路同时锁定到氢原子钟10 MHz参考频率上,图2给出了重复频率 f_{rep} 与载波包络相移 f_{ceo} 同时锁定后在PPLN晶体处

观察到的光谱曲线,此时该光谱未包含633 nm波段,若实现对633 nm光频的绝对测量,须进行光谱的扩展。

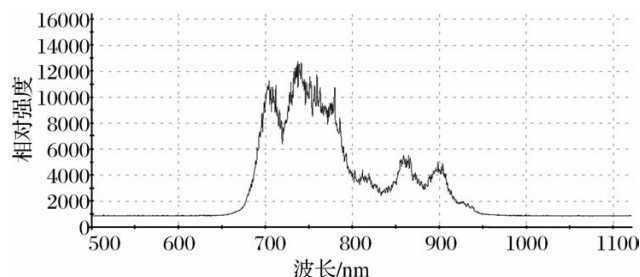


图2 650 ~ 950 nm 飞秒激光频率梳光谱曲线图

2 光子晶体光纤扩谱实验

光子晶体光纤(photonic crystal fiber)具有较强的非线性效应和可控的色散特性,当具有一定能量的飞秒激光脉冲通过光子晶体光纤时会产生频谱的极大展宽——超连续谱(Supercontinuum, SC),这使得光子晶体光纤成为激光频谱扩展的有效手段^[6-8]。本实验中选用的是Crystal Fiber公司Femtowhite800型非线性超连续谱发生器,其采用小的纤芯直径及大的包层纤芯折射率差来保障高的非线性系数。纤芯为有效模面积 $2\mu\text{m}^2$ 的单模光纤,长度为12 cm,其色散特性由图3给出,其零色散波长为750 nm。

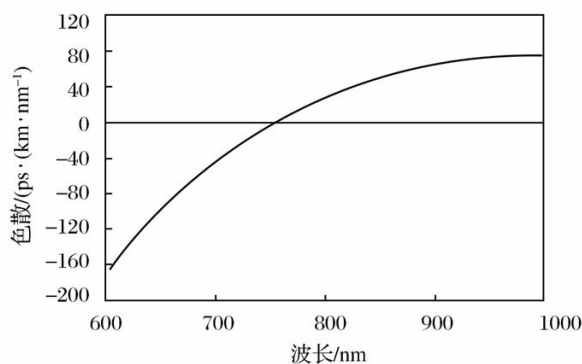


图3 Femtowhite800 光子晶体光纤色散特性曲线

图1所示钛宝石飞秒激光频率梳的平均输出功率为 $P=450\text{ mW}$,重复频率为 $f_{\text{rep}}=350\text{ MHz}$,单脉冲能量为 $\varepsilon=1.29\text{ nJ}$,输出窗口处脉冲宽度为100 ps。为了获得覆盖633 nm波长的更宽的光谱,首先需要对注入光子晶体光纤的飞秒激光频率梳脉冲进行脉宽压缩,以提高脉冲的峰值功率来产生更强的非线性效应。

常规进行脉宽压缩的方法采用图4所示光路进行,

P1, P2 为压缩脉宽用棱镜对, M1, M2 为导光银镜, 激光脉冲注入光子晶体光纤前由消色差物镜 Lens 进行聚焦缩束。图 5 给出棱镜对色散原理示意图, 图中 l 为棱镜对顶间距离, β 是空间啁啾引起的色散角度。

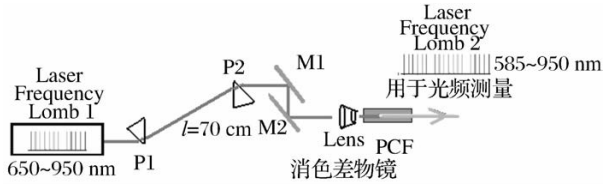


图4 棱镜对压缩脉宽扩谱光路示意图

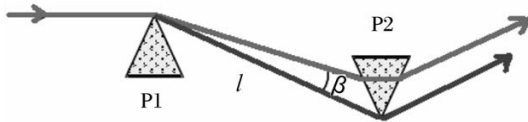


图5 棱镜对色散示意图

为最大限度的减少插入损耗, 需要设计棱镜使得入射角和出射角正好是布儒斯特角, 当光线经过棱镜对后, 对色散有贡献的光程为 $p = l \cos \beta$, 棱镜对系统的二阶、三阶群速度色散量分别为

$$\varphi'' = \frac{d^2 \varphi}{d\omega^2} = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2 p}{d\lambda^2} \quad (1)$$

$$\varphi''' = \frac{d^3 \varphi}{d\omega^3} = \frac{\lambda^4}{4\pi c^3} \left(3 \frac{d^2 p}{d\lambda^2} + \lambda \frac{d^3 p}{d\lambda^3} \right) \quad (2)$$

式中: λ 为光在空气中的波长, 对于图 1 所示宽波段光脉冲波长取 $\lambda = 800 \text{ nm}$ 。飞秒脉冲经过空气及棱镜等色散介质产生的色散, 可以根据 Sellmeier 方程得到。在棱镜参数确定的情况下, 色散主要依赖于棱镜对 P1, P2 的间距 l , 经计算, 本实验中棱镜间距设置为 70 cm , 其引入的色散量为 -1400 fs^2 , 可以很好地补偿二阶色散。经过棱镜对压缩脉宽后的光脉冲由银镜 M1, M2 注入光子晶体光纤, 图 6 给出了扩谱后飞秒激光频率梳的光谱曲线。相比扩谱前, 光谱向短波方向发生了“蓝移”, 覆盖 633 nm 波长, 最短波长低于 600 nm 。

在利用光谱仪持续观测该扩展后光谱时出现了整个光谱忽强忽弱的现象, 这将导致扩展出的 633 nm 波长成分无法用于频率测量, 这种现象可以从两方面给出解释: ①实验中整个光路裸露于空气中, 空气环境扰动导致经消色差物镜聚集后的光束偏离纤芯的模场空间而使得光纤耦合不稳定; ②由图 1 所示飞秒激光频率梳输出的激光脉冲, 经各器件到达光子晶体光纤 PCF 前的“光程臂长”过大 (约 1 m), 在“光程臂

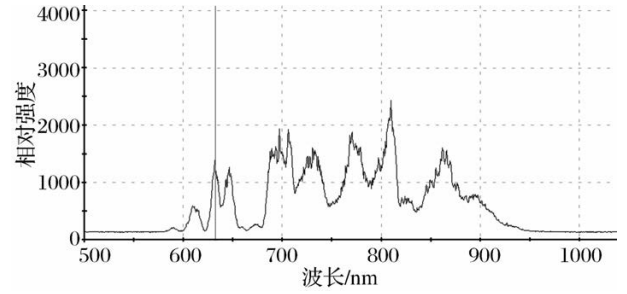


图6 棱镜对压缩脉宽扩谱光频曲线图

长”中某一器件引起的光路偏离在到达 PCF 时均被放大, 使其偏离纤芯模场空间。

综上两点, “光程臂长”过大是采用棱镜对压缩脉宽所导致的必然结果, 并且这将导致该扩谱结构对环境扰动极其敏感而无法得到稳定可用的光谱。对此, 本研究小组采用啁啾镜对代替棱镜对进行脉宽压缩, 光路如图 7 所示。啁啾镜对 CM1, CM2 采用 Layertec 公司产品, 在 $640 \sim 1000 \text{ nm}$ 波段镀有高反膜, 反射率高于 99.8% , 在 $680 \sim 940 \text{ nm}$ 波段群速色散量为 -50 fs^2 , 在啁啾镜对上反射 22 次后, 引入色散量 -1100 fs^2 , 脉宽压缩后的光脉冲由导光反射镜 M3 反射, 经 40 倍消色差物镜 Lens 注入光子晶体光纤 PCF 获得“蓝移”后的 $600 \sim 950 \text{ nm}$ 宽带光谱, 通过微调光子晶体光纤空间角度时可以实现光谱谱峰的可调, 图 8 给出了 633 nm 处于谱峰时的光谱曲线, 利用光谱仪经过对

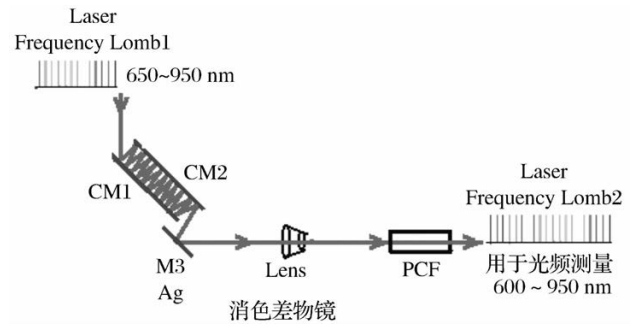


图7 啁啾镜对压缩脉宽扩谱光路示意图

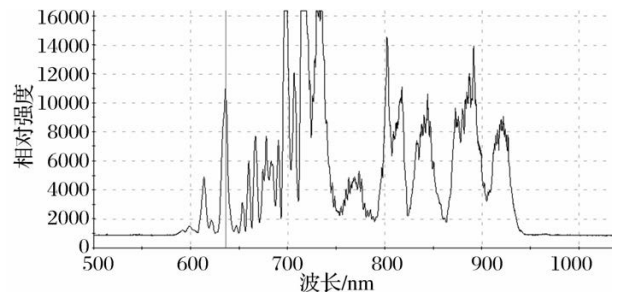


图8 啁啾镜对压缩脉宽扩谱光频曲线图

其 5 h 的实时观测, 该光谱曲线没有出现幅值抖动, 满足测量 633 nm 波长激光频率的光谱范围需求。

3 600 ~ 950 nm 飞秒激光频率梳稳定度分析

以上扩谱实验均在重复频率 f_{rep} 与载波包络相移 f_{ceo} 同时锁定到氢原子钟 10 MHz 参考频率标准上的前提下进行, 为了验证扩谱后的 600 ~ 950 nm 宽带飞秒激光频率梳的稳定情况, 采用两台 Agilent53132A 型频率计数器同时采集频率值 f_{rep} , f_{ceo} , 图 9、图 10 分别给出了 16000 s 时间内频率 f_{rep} , f_{ceo} 随时间变化的曲线。

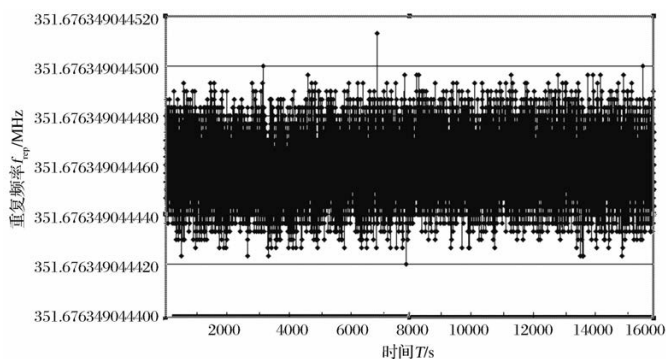


图 9 扩谱后 f_{rep} 随时间变化曲线图

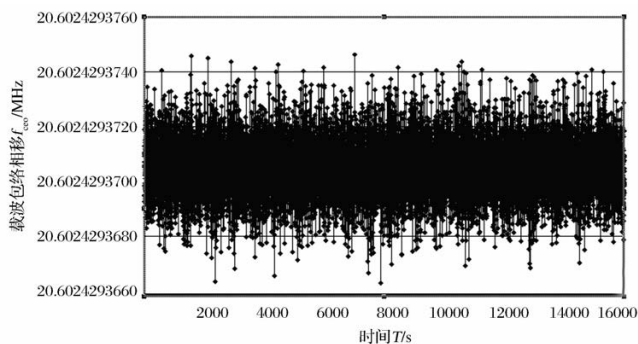


图 10 扩谱后 f_{ceo} 随时间变化曲线图

表 1 给出了在 16000 s 时间内, 频率 f_{rep} , f_{ceo} 及 633 nm 波长副基准 (2012 年由 633 nm 波长国家基准检定结果) 不同门时间对应的阿伦偏差值。

经频率计数器测量, 本实验中 16000 s 时间内重复频率和载波包络相移频率的均值分别为 $f_{\text{rep}} = 351.67634904446$ MHz, $f_{\text{ceo}} = 20.60242937$ MHz。飞秒激光频率梳在频域内表现为孤立的光频齿序列, 第 N 条梳齿的频率值表达式为 $f_N = Nf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$, 其中频率值 f_{ceo} 为 10^7 Hz 量级, 在上式中直接参与加减, 其频率变化量为 10^{-4} Hz/s 或 10^{-3} Hz/s 量级; 而频率值 f_{rep} 为 10^8 Hz 量级, Nf_{rep} 为 10^{14} Hz 量级, 其频率变化量为 10^2

Hz/s 量级, 故本实验中飞秒激光频率梳的光频齿频率稳定度完全取决于 f_{rep} 锁定后的稳定度, 由表 1 及氢原子钟的频率稳定度可以判断, 此 600 ~ 950 nm 波段飞秒激光频率梳的频率稳定度同步于氢原子钟。实验中 633 nm 波长副基准 e 吸收峰参考频率值为 $f = 473612366.961$ MHz, 对应飞秒激光频率梳光频齿的序列号为 $N_{633-e} = 1346728$, 这意味着在测量 e 峰光频时为飞秒激光频率梳中第 1346728 条光频齿与 e 峰进行拍频, 只需测量出二者频率差值便可得到 e 峰光频绝对值。综上, 经光谱扩展后光谱范围覆盖 600 ~ 950 nm 波段, 扩展后的飞秒激光频率梳频率稳定度同步于氢原子钟, 满足 633 nm 激光器光频绝对测量的需求。

表 1 f_{rep} , f_{ceo} 及 633 nm 波长副基准阿伦偏差

门时间/s	飞秒激光频率梳		633 nm 波长副基准/MHz
	$f_{\text{rep}}/\text{MHz}$	$f_{\text{ceo}}/\text{MHz}$	
1	2.4×10^{-14}	3.3×10^{-11}	1.6×10^{-11}
10	8.6×10^{-15}	9.7×10^{-12}	6.0×10^{-12}
100	3.2×10^{-15}	2.7×10^{-12}	1.4×10^{-12}
1000	2.7×10^{-15}	1.1×10^{-12}	8.1×10^{-13}

4 结论

为了利用 650 ~ 950 nm 波段“单块”结构钛宝石飞秒激光频率梳实现对 633 nm 波长副基准光频绝对测量, 本课题组利用光子晶体光纤进行了扩谱实验, 经实验对比, 采用啁啾镜对压缩脉宽可以避免棱镜对结构所固有的“光程臂长”过大而导致的光谱不稳定而无法实际用于光频测量的缺点, 最终获取了光谱范围覆盖 600 ~ 950 nm 波段、频率稳定度同步于氢原子钟、满足 NO. 02 激光器 633 nm 光频绝对测量需求的飞秒激光频率梳。

参考文献

- [1] 沈乃澂, 魏志义, 聂玉昕. 光频标和光频测量研究的历史、现状和未来 [J]. 量子电子学报, 2004, 21 (2): 139 - 145.
- [2] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W. Optical frequency metrology [J]. Nature, 2002, 416, 233 - 237.
- [3] Udem T, Reichert J, Holzwarth R, et al. Accurate measurement of large optical frequency differences with a mode-locked laser [J]. Opt. Lett, 1999, 24 (13): 881 - 883.

(下转第 61 页)

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.12

平均值-极差控制图在地面放射性测量模型标准装置核查中的应用

王新兴, 胡明考, 张积运, 欧阳游

(核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002)

摘 要: 地面放射性测量模型标准装置在国内属于最高计量标准, 无法直接溯源。为确认其系列标准量值处于受控状态, 本文采用了定期核查的方法, 对核查测量结果通过制作平均值-极差控制图来反映标准量值复现的重复性和稳定性, 进而确认标准量值的受控状态。

关键字: 平均值-极差控制图; 地面放射性测量模型标准装置; 核查; 受控

中图分类号: TB98; 0212

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0047-04

Applications of Average-Range Control Chart in Verification of Measuring Radioactivity in Ground Standard Equipment Model

WANG Xinxing, HU Mingkao, ZHANG Jiyun, OUYANG You

(Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry (ARCN), Shijiazhuang 050002, China)

Abstract: The ground radiometric model standard equipment is the highest grade of measurement standard in China, and it is not traceable directly. To confirm the magnitude of the series of the standards in a controlled state, this paper uses the periodic verification method for verifying the measurement results and makes the average-range control chart to reflect the magnitude of the repeatability and reproducibility of the stability criteria, and then confirms the controlled state of the standard value.

Key words: average-range control chart; ground radiometric model standard equipment; verification; controlled

0 引言

上世纪 70 年代末, 我国研建了地面放射性测量模型标准装置, 为地面铀资源普查测量的量值统一发挥了关键作用, 但该标准在国内属于最高计量标准, 无法直接溯源。采用国际比对因费用高、手续繁琐, 仅在 1993 年进行过一次国际比对。根据 JJF 1069-2012《法定计量检定机构考核规范》“应根据规定的程序和日程对计量基准、计量标准、传递标准或工作标准以及标准物质进行核查, 以保持其检定或校准状态的置信度”的要求^[1], 我们在上世纪 90 年代中期开始对地面放射性测量模型标准装置进行定期核查(监测), 选择应用平均值-极差控制图方法对地面放射性测量模型标准装置是否保持初始密封状态、量值是否稳定进

行控制。防止由于密封材料的老化龟裂, 造成模型内部氦气的泄漏, 引起测量标准量值的变化, 确保值传递的准确性。

1 地面放射性测量模型标准装置

地面放射性测量模型标准装置是由五种(钾、铀、钍、混合和本底)已知天然放射性核素且分布均匀、能在平面和垂向上模拟无限延伸地质体的体源饱和模型和相应的配套设备构成。单个模型形状为圆柱体, 直径 220 cm、高 60 cm, 重约 5 t, 模型表面采用环氧树脂密封, 其结构见图 1。系列体源模型由 1 个本底模型、1 个钾模型、1 个铀模型、1 个钍模型和 1 个混合模型等组成一套, 根据模型钾、铀、钍含量高低, 我站地面放射性测量模型由两套 10 个密封式饱和辐射体源模型组成, 均由已知含量的天然放射性铀、钍、钾矿粉和低本底石英砂、水泥混合浇注而成。配套设备主要为 GR320 多道 γ 能谱仪、6#标准固体镅点源及

收稿日期: 2014-02-26

作者简介: 王新兴(1958-), 男, 高级工程师, 从事电离辐射测量(计量)工作。

Diagram of a cylindrical container. The diameter is labeled as 220 cm. The height is labeled as 60 cm. The center point is marked with a cross and labeled '中心点'.

图 1 地面放射性测量模型结构图

2.1 核查数据

选择一台性能稳定且经过标准固体镭源检定的 FD-3013 γ 辐射仪, 对地面放射性测量模型标准装置每个月进行一次核查测量, 每次取 n 个重复测量数据的平均值 $\bar{x}$ 为本次核查值, 通常取 $n=6$ 。每个模型每次核查测量的最大值与最小值之差为极差, 用 R 表示。连续测量 24 个月共获取 24 组数据。以 10 个密封式饱和辐射体源模型之一的 YM1 模型为例, 核查数据见表 1。

表 1 对 YM1 表面中心点做重复测量的结果

核查 序号 <i>j</i>	测量日期	测量值/ (nGy · h ⁻¹)						$\bar{x}_j$ /	R_j /
		1	2	3	4	5	6	(nGy · h ⁻¹)	(nGy · h ⁻¹)
1	2001. 01. 12	1113. 3	1105. 7	1109. 8	1114. 3	1103. 5	1109. 2	1109. 3	10. 8
2	2001. 02. 20	1114. 4	1113. 1	1110. 1	1115. 8	1109. 9	1114. 5	1113. 3	5. 8
3	2001. 03. 14	1112. 8	1114. 9	1113. 3	1102. 5	1101. 6	1101. 5	1107. 8	13. 4
4	2001. 04. 19	1105. 4	1112. 0	1109. 2	1112. 4	1109. 8	1108. 7	1109. 6	7. 0
5	2001. 05. 21	1113. 3	1107. 7	1109. 0	1112. 5	1109. 8	1111. 1	1110. 7	6. 2
6	2001. 06. 17	1099. 3	1112. 0	1115. 2	1105. 7	1112. 2	1103. 6	1108. 0	15. 9
7	2001. 07. 13	1102. 8	1107. 6	1104. 7	1105. 5	1110. 1	1110. 2	1106. 8	7. 4
8	2001. 08. 04	1104. 8	1109. 3	1109. 0	1114. 2	1109. 5	1119. 5	1111. 0	14. 7
9	2001. 09. 18	1103. 9	1113. 0	1117. 6	1110. 9	1105. 7	1105. 3	1109. 4	13. 7
10	2001. 10. 17	1115. 1	1109. 2	1102. 1	1112. 4	1104. 5	1111. 9	1109. 2	13. 0
11	2001. 11. 19	1111. 5	1117. 3	1123. 0	1113. 6	1118. 1	1111. 8	1115. 9	11. 5
12	2001. 12. 10	1118. 5	1115. 5	1109. 8	1111. 8	1114. 7	1117. 6	1114. 6	8. 7
13	2002. 01. 14	1112. 2	1105. 4	1103. 4	1100. 6	1113. 4	1110. 4	1107. 6	12. 8
14	2002. 02. 22	1117. 1	1117. 1	1111. 0	1114. 0	1119. 9	1115. 5	1115. 8	8. 9
15	2002. 03. 17	1115. 8	1113. 3	1119. 0	1107. 5	1111. 1	1110. 9	1112. 9	11. 5
16	2002. 04. 19	1117. 6	1111. 9	1112. 2	1122. 0	1109. 5	1112. 5	1114. 3	12. 5
17	2002. 05. 11	1108. 2	1110. 4	1100. 4	1103. 1	1108. 8	1107. 2	1106. 4	10. 0
18	2002. 06. 14	1118. 9	1109. 4	1113. 4	1116. 4	1121. 6	1120. 2	1116. 7	12. 2
19	2002. 07. 13	1115. 7	1115. 3	1113. 2	1118. 4	1113. 3	1113. 3	1114. 9	5. 2
20	2002. 08. 15	1117. 1	1116. 9	1116. 3	1118. 4	1120. 0	1107. 7	1116. 0	12. 3
21	2002. 09. 17	1106. 3	1107. 8	1111. 0	1104. 5	1105. 9	1109. 1	1107. 4	6. 5
22	2002. 10. 15	1110. 9	1107. 9	1110. 7	1109. 1	1108. 0	1112. 6	1109. 9	4. 7
23	2002. 11. 19	1113. 5	1111. 2	1114. 0	1116. 8	1115. 6	1122. 7	1115. 6	11. 5
24	2002. 12. 10	1113. 7	1106. 7	1110. 0	1107. 4	1103. 8	1107. 3	1108. 2	9. 9
平均值/ (nGy · h ⁻¹)								1111. 3	10. 3

2.2 确定控制参数^[2]

绘制平均值控制图和极差控制图前, 先要计算中心线 (CL)、控制上限 (UCL) 和控制下限 (LCL) 等控制参数 (也称为控制限)。

计算平均值控制图的控制参数公式为

$$\text{中心线 } CL = \bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \bar{x}_j \quad (1)$$

$$\text{控制上限 } UCL = \bar{x} + A_2 \cdot \bar{R} \quad (2)$$

$$\text{控制下限 } LCL = \bar{x} - A_2 \cdot \bar{R} \quad (3)$$

计算极差控制图的控制参数公式为

$$\text{中心线 } CL = \bar{R} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m R_j \quad (4)$$

$$\text{控制上限 } UCL = D_4 \cdot \bar{R} \quad (5)$$

$$\text{控制下限 } LCL = D_3 \cdot \bar{R} \quad (6)$$

式中: A_2, D_3, D_4 称为控制限计算系数, 是由样本大小确定的^[3]; $\bar{x}_j$ 为每次核查测量数据的平均值, nGy/h; $\bar{x}$ 为 m 次核查测量结果的平均值, nGy/h; m 为核查次数; R_j 为每次核查测量数据的极差, nGy/h; $\bar{R}$ 为 m 次测量数据的极差平均值, nGy/h。

根据表 1 数据, YM1 模型 m 次核查测量结果的平均值 $\bar{x} = 1111.3$ nGy/h, 极差平均值 $\bar{R} = 10.3$ nGy/h, 本例中, 每次核查测量次数 $n = 6$, 由参考文献 3 可得: $A_2 = 0.483, D_3 = 0, D_4 = 2.004$ 。则由公式 (2), (3), (5), (6), 有

1) 平均值控制图控制上下限

$$UCL = \bar{x} + A_2 \cdot \bar{R} = 1116.3 \text{ nGy/h}$$

$$LCL = \bar{x} - A_2 \cdot \bar{R} = 1106.3 \text{ nGy/h}$$

2) 极差控制图控制上下限

$$UCL = D_4 \cdot \bar{R} = 20.6 \text{ nGy/h}$$

$$LCL = D_3 \cdot \bar{R} = 0$$

在计算平均值和极差的控制上、下限后, 如果有 $\bar{x}_j$ 或 R_j 超出控制上或下限, 那么, 这组数据将被剔除, 随后重新统计计算平均值控制限和极差控制限。由表 1 可以看到, 第 18 组数据 (1116.7 nGy/h, 12.2 nGy/h) 超出了控制上限, 需将此剔除。剔除超限数据后重新计算的控制参数值如下:

测量结果的平均值和极差平均值:

$$\bar{x} = 1111.1 \text{ nGy/h}, \bar{R} = 10.2 \text{ nGy/h}$$

平均值控制图控制上下限:

$$UCL = 1116.0 \text{ nGy/h}, LCL = 1106.2 \text{ nGy/h}$$

极差控制图控制上下限:

$$UCL = 20.4 \text{ nGy/h}; LCL = 0$$

同理, 10 个密封式饱和辐射体源模型中的其他 9 个模型 YU1, YTh1, YK1, YB1, YU2, YTh2, YK2, YM2, YB2, 可按照上述方法计算平均值控制图和极差控制图的控制参数值。

2.3 绘制控制图

控制图的纵坐标为核查数据计算得到的各统计控制量, 横坐标为时序坐标。并在图上画出 CL 、 UCL 和 LCL 三条控制界限。在图上标出各组相应统计控制量的测量点后, 将相邻的测量点连成折线, 即完成了控制图绘制。见图 2 YM1 平均值控制图和图 3 YM1 极差控制图。

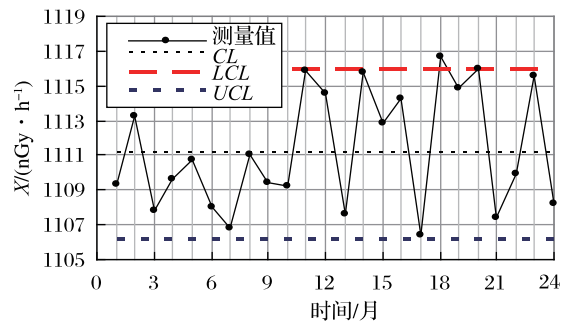


图 2 YM1 平均值控制图

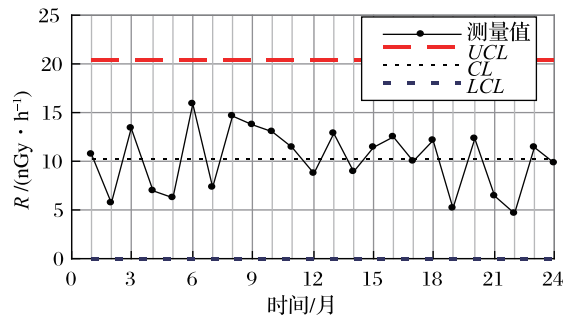


图 3 YM1 极差控制图

2.4 核查程序

建立了均值控制图和极差控制图后, 根据核查程序制定每年的核查计划, 使用 FD-3013 γ 辐射仪对地面放射性测量模型标准装置中的每个模型进行测量, 每次重复测量 6 次, 计算出本次测量的均值 $\bar{x}$ 和极差 R , 分别标注在均值控制图和极差控制图上。延长控制图的时间坐标, 使控制图转变为监测控制用控制图。核查频率确定每个季度进行一次, 测量数据同样也可用于重复性测试、稳定性考核。

2.5 结果的判定

模型监测值在控制限之内, 说明模型量值处于受控状态。在定期核查中, 如果地面放射性测量模型没

有发生氦气泄漏,一般模型平均值控制图和极差控制图中标注的统计测量点分布在中心线上下两侧,均不会超出控制限的范围。从地面放射性测量模型标准装置模型组中,选择检定工作中使用频率较高的 YU1 和 YTh1 模型来说明,从 1995 年到 2013 年共 19 年 76 组核查数据,绘制平均值控制图和极差控制图(见图 4 ~ 图 7),根据 GB/T 4091-2001《常规控制图》的判异原则,对模型标准装置监测结果表明测量过程没有受到不受控的系统效应影响及随机效应的影响(A, B, C 三个异常点除外)。

在二十多年的定期核查中,我们多次发现监测数据点超出控制限的异常情况,通过现场模型观察、重复监测和情况分析,及时确认了模型发生氦泄漏。例如:1995 年 9 月监测 YU1,2002 年 3 月监测 YTh1,数据点偏低超出控制限(图 4 中 A 点、图 6 中 C 点),通过对模型表面观察,发现有细微的裂痕,第二天对 YU1 和 YTh1 复测,数据点还是超出控制限,因此,确认模型密封层存在龟裂,发生氦气泄漏。通过重新密封,YU1 和 YTh1 监测值恢复到正常水平。也有监测数据点超出控制限,肉眼观察不出模型表面裂痕,被确认是氦气泄漏的情况,通过排除,避免了标准量值的失控,如 2002 年 6 月监测 YU1 数据值偏低超出控制限的异常情况(图 4 中 B 点)。

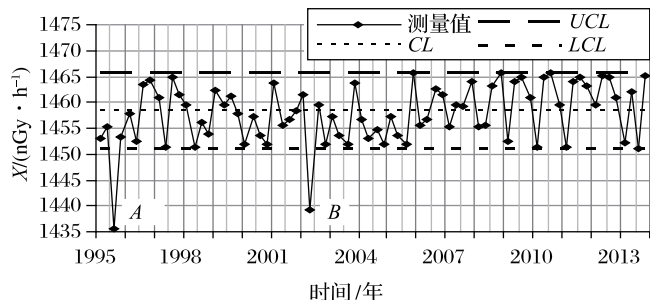


图4 YU1 平均值控制图(1995~2013年)

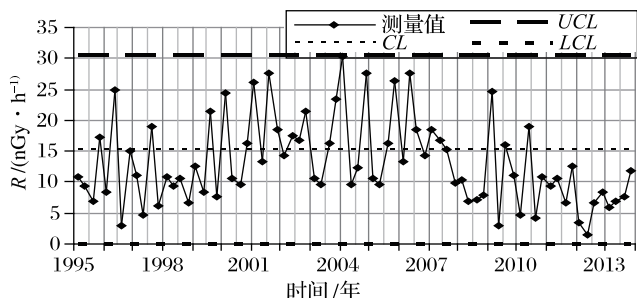


图5 YU1 极差控制图(1995~2013年)

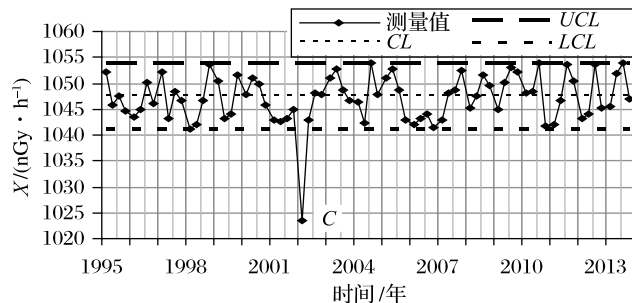


图6 YTh1 平均值控制图(1995~2013年)

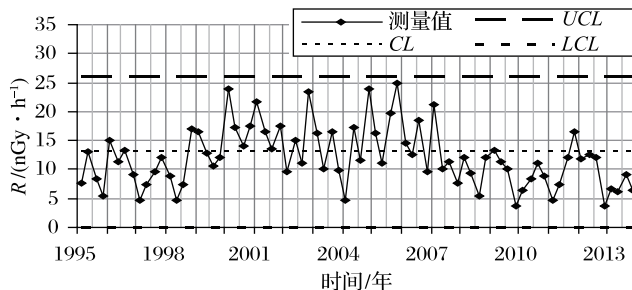


图7 YTh1 极差控制图(1995~2013年)

3 结论

地面放射性测量模型标准装置是由纯铀矿粉、纯钍矿粉或者铀钍混合矿粉与一定量的石英砂、硅酸盐水泥和水混合作而成,根据标准模型自身的特点,如果装置密封破损,发生氦气泄露,放射性衰变铀系列、钍系列平衡将被打破,被测量的标准模型比释动能将会降低。应用平均值-极差控制图方法对地面放射性测量模型标准装置进行定期核查(监测),通过观察测量结果的平均值和极差的变化,判断标准装置的量值是否处于受控状态,其方法直观,易于操作,保证对标准装置的状态实施有效的控制。

根据二十余年的监控测量数据值,有效监控了标准装置量值的物理测量示值状态,当模型表面密封层龟裂导致监控测量结果出现异常时,通过及时地排除,保障了标准装置计量性能的准确性和可靠性。

参考文献

- [1] 全国法制计量管理计量技术委员会. JJF 1069-2012 法定计量检定机构考核规范[S]. 北京:中国质检出版社,2012.
- [2] 全国统计方法应用标准化技术委员会. GB/T 4091-2001 常规控制图[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [3] 全国法制计量管理计量技术委员会. JJF 1033-2008 计量标准考核规范[S]. 北京:中国计量出版社,2008.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.13

二因素随机效应模型下评估 X 射线单晶定向系统的重复性和再现性

马春喜

(中国电子科技集团公司第四十六研究所, 天津 300220)

摘 要: 提出一种以总角度偏差作为观测数据, 通过适当转换, 从而方便地使用二因素随机效应模型评估 X 射线单晶定向测量系统重复性和再现性的方法。使用该方法安排了三组实验, 分别用 MINITAB 计算得出了三个测试系统的重复性和再现性, 并由此证明了即使在 X 射线单晶定向系统的校准满足要求的情况下, 其测试系统的重复性和再现性也不一定满足要求, 需要随时监控。

关键词: 单晶定向系统; 总角度偏差; 重复性; 再现性; 二因素随机效应模型

中图分类号: TB922; O212.1

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0051-04

Assess R&R of the X-ray Orientation Determining of a Single Crystal System via the Two-way Random Effects Model

MA Chunxi

(The 46th Institute of the China Electronic Technology Group Co., Tianjin 300220, China)

Abstract: Two-way random effects model is a common method for assessing repeatability and reproducibility of measurement system, but it cannot be implemented directly because of the particularity of the X-ray orientation determining of a single crystal system. A method is put forward for conveniently calculating the Gauge R&R of the orientation determining system based on the total angle bias. Three experiments were made to compute their Gauge R&R by MINITAB. It was proved that although the measurement system has been properly calibrated, the Gauge R&R of the system is not usually in compliance with requirements, and it need to be under surveillance at any time.

Key words: orientation determining of a single crystal system; total angle bias; repeatability; reproducibility; two-way random effects model

0 引言

单晶体的显著特性之一就是其各向异性, 即单晶体的不同方向上的性质各不相同, 利用这种特殊的性质, 人们可以制作各种不同功能的器件。因此, 准确地测定晶体的方向对晶体的下一步加工至关重要, 所以, 要求测量系统要有很好的测试能力。测量系统的测试能力有很多指标, 包括偏差、线性、准确性等, 本文只介绍整个测量系统的重复性和再现性计算。二因素随机效应模型是计算测量系统重复性和再现性的一种较准确的方法, 但计算量庞大。使用 MINITAB 软

件可以大大简化人工计算的工作量, 且运算精度高、速度快。但是由于 X 射线单晶定向系统测得的结果是四个角度值, 不便于计算, 所以目前没有较好的方法实现 X 射线单晶定向系统测量角度重复性和再现性的计算。

1 原理

1.1 二因素随机效应模型

X 单晶定向测量系统的重复性和再现性可以由 i 个操作者测试 j 个工件, 各重复测试 k 次来进行计算。所谓二因素随机效应是指操作者的随机效应 O_i 和产品部件的随机效应 P_j 。由于测量系统中存在着大量的波动源, 根据二因素随机效应模型概念, 每个测量值 θ_{ijk} 可以认为是由测量均值与各种波动的合成结果。

$$\theta_{ijk} = \mu + O_i + P_j + (OP)_{ij} + R_{k(ij)} \quad (1)$$

收稿日期: 2014-01-14; 收修改稿日期: 2014-02-26

作者简介: 马春喜 (1981-), 男, 工程师, 长期从事质量管理、科技管理、质量与可靠性技术、计量技术及相关领域研究工作。

式中: θ_{ijk} 为第 i 个操作者对第 j 个部件进行的第 k 次测量; μ 为总均值; O_i 为第 i 个操作者的随机波动; P_j 为第 j 个部件的测量波动; $(OP)_{ij}$ 为第 i 个操作者和第 j 个部件相互作用的波动; $R_{k(ij)}$ 为第 i 个操作者对第 j 个部件进行的第 k 次测量的重复测量效应。

在二因素随机效应模型中, 根据方差合成原理, 观测值 θ_{ijk} 的总波动等于各随机波动之和:

$$\sigma_{\theta}^2 = \sigma_o^2 + \sigma_p^2 + \sigma_{op}^2 + \sigma_r^2 \quad (2)$$

根据重复性和再现性的定义^[1], 可得, 测试系统的重复性为 σ_r^2 , 再现性为 $\sigma_o^2 + \sigma_{op}^2$ 。

1.2 单晶晶向的布喇格角

以三维周期性晶体结构排列的单晶原子可以看作原子排列于空间垂直距离为 d 的一系列平行平面, 一束平行的单色 X 射线射入该组平面产生各平面的反射光, 当各光路的光程差为 X 射线波长的整数倍时就会产生衍射, X 射线衍射光束强度将达到最大值^[2]。

X 射线衍射法定向仪是利用已知的单晶晶面的布喇格衍射角, 寻找需要确定晶向样品出现最大衍射强度的角度, 并以此确定单晶晶面晶向的仪器。其能测量出晶面初始及每旋转 90° 所得的角度, 分别为 θ_1 , θ_2 , θ_3 和 θ_4 ^[3]。通过测得的角度与布喇格角比较以确定晶面晶向角度。

可以直接使用 θ_1 , θ_2 , θ_3 和 θ_4 来计算测量系统的重复性和再现性, 但是要由 4 个角度来定义一个空间角度向量, 这将引入大量的向量计算, 且不便分析, 实际中很难应用。所以, 需要对测试结果进行简单的计算转换。

1.3 总角度偏差

角度的偏差是在空间三维坐标中产生的, 其总角度偏差 φ 可以通过计算两个相互垂直的偏差分量求得, 角度偏差分量 α 和 β 的计算公式为

$$\alpha = 1/2(\theta_1 - \theta_3) \quad (3)$$

$$\beta = 1/2(\theta_2 - \theta_4) \quad (4)$$

被测表面与所要求的结晶平面之间总的角度偏差 φ 可以由公式 (5) 求出:

$$\varphi = \arccos(\cos\alpha\cos\beta) \quad (5)$$

以总角度偏差 φ 作为计算测试系统重复性和再现性的观测数据要比直接使用测出的角度作为观测数据要优越的多。首先, 总角度偏差已经包含了三维空间中各个角度的偏差分量, 空间位置信息已经确定; 其次, 由总角度偏差计算重复性和再现性, 每次测量后

经过计算只有一个值, 理论清楚计算简单; 最后, 总角度偏差也是与晶向偏离度有关的参数, 其量值决定了晶向偏离度的大小。缺点是总角度偏差不服从正态分布, 无法直接使用 MINITAB 计算。

2 实验及结果

选择 3 台相同型号的 X 射线衍射法定向仪 (X, Y 和 Z), 其校准结果均符合相邻 5° 误差不大于 $10''$ 、旋转范围内转角误差不大于 $30''$ 、综合误差不大于 $2'$ 、测量重复性不大于 2% 的要求^[4], 如表 1。每台仪器分别对 10 个编号为 1-10 的 $\langle 111 \rangle$ 硅单晶样片测量 3 次, 测试方法采用 GB/T1555-2009《半导体单晶晶向测定方法》。实验考察 3 个测量系统, 每台定向仪及其操作人员 (甲、乙和丙) 就构成了一个测量系统。

表 1 仪器 X, Y, Z 的校准和检定结果

项目	X	Y	Z
相邻 5° 误差/($''$)	10	8	8
旋转范围内转角误差/($''$)	30	27	29
综合误差/($'$)	2	1.7	1.5
测量重复性/%	1.2	1.4	1.6
扩展不确定度/($''$)	3.0	2.3	2.3
k	2	2	2
检定结论	合格	合格	合格

采用总角度偏差 φ 作为测量值, 3 个测量系统 X, Y, Z 的测试结果分别见表 2、表 3 和表 4。

3 计算结果与分析

在本实验中, 计算结果的分布是非正态的, 而进行测量系统分析时需要使用服从正态分布的数据, 故会使用到 MINITAB 的 Box-Cox 数据正态处理功能将一组非负数据转换成服从正态分布的形式, 以利于使用 MINITAB 的其他分析功能继续处理分析。此外, 还需使用 Gage Study 测量系统重复性和再现性分析功能。Gage Study 是 MINITAB 软件中专用于测量系统重复性和再现性分析的一组工具包, 通过使用其中的工具分析确定测量系统重复性和再现性的能力, 以判断测量系统的能力是否满足要求。

将表 2、表 3 和表 4 中的数据分别作为仪器 X, Y, Z 的测量系统的原始结果, 将其分别录入 MINITAB, 使用 Box-Cox 转换, 并用 Gage R&R 分析转换后的数

表 2 仪器 X 系统测试样品总角度偏差 (°)

样品	甲			乙			丙		
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次
1	0.0559	0.082074	0.058926	0.082496	0.083333	0.052705	0.071686	0.060093	0.070711
2	0.07862	0.071686	0.067185	0.078617	0.053359	0.067185	0.068718	0.070711	0.071686
3	0.06509	0.065085	0.0712	0.065085	0.0712	0.078617	0.071686	0.07683	0.070711
4	0.07862	0.065085	0.079057	0.071686	0.065085	0.063465	0.058926	0.071686	0.065085
5	0.06509	0.060093	0.058926	0.053359	0.058926	0.070711	0.067185	0.071686	0.07683
6	0.07683	0.067185	0.075462	0.060668	0.05069	0.067185	0.0712	0.060668	0.0712
7	0.0712	0.083749	0.0712	0.067185	0.058926	0.074536	0.07683	0.060668	0.068718
8	0.05893	0.060668	0.067185	0.052705	0.068718	0.060668	0.369026	0.07683	0.068718
9	0.37268	0.369026	0.37657	0.369026	0.372678	0.384147	0.060093	0.37657	0.376478
10	0.33922	0.36912	0.34661	0.36912	0.353651	0.342884	0.361516	0.350495	0.354534

表 3 仪器 Y 系统测试样品总角度偏差 (°)

样品	甲			乙			丙		
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次
1	0.067185	0.065085	0.065085	0.082074	0.085797	0.041667	0.083333	0.07683	0.065085
2	0.060093	0.065085	0.07683	0.071686	0.048591	0.048591	0.0712	0.082496	0.053359
3	0.083333	0.060093	0.060093	0.071686	0.100692	0.065085	0.07683	0.070711	0.065085
4	0.078617	0.065085	0.065085	0.070711	0.060093	0.089753	0.068718	0.094281	0.070711
5	0.071686	0.067185	0.071686	0.053359	0.065085	0.070711	0.071686	0.07683	0.067185
6	0.0712	0.082074	0.074536	0.058926	0.087003	0.068718	0.068718	0.067185	0.0712
7	0.0712	0.082074	0.0712	0.074536	0.0712	0.055902	0.078617	0.063465	0.0712
8	0.079057	0.055902	0.07683	0.085797	0.079057	0.063465	0.372678	0.097539	0.101379
9	0.377583	0.369872	0.342884	0.380788	0.373143	0.383876	0.067185	0.380788	0.354534
10	0.365243	0.343187	0.365243	0.374536	0.354534	0.365908	0.365908	0.233482	0.340138

表 4 仪器 Z 系统测试样品总角度偏差 (°)

样品	甲			乙			丙		
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次
1	0.018634	0.016667	0.008333	0.063465	0.055902	0.055902	0.11577	0.093169	0.084984
2	0.078617	0.068718	0.078617	0.058926	0.060093	0.067185	0.05	0.065085	0.071686
3	0.070711	0.071686	0.053359	0.088585	0.065085	0.078617	0.074536	0.0712	0.070711
4	0.065085	0.065085	0.060668	0.060668	0.058333	0.067185	0.058333	0.060668	0.071686
5	0.053359	0.053359	0.018634	0.060093	0.0712	0.055902	0.100347	0.070711	0.055902
6	0.0712	0.078617	0.063465	0.068718	0.067185	0.058926	0.083333	0.087003	0.055902
7	0.0712	0.060668	0.090139	0.0712	0.075462	0.042492	0.108653	0.07683	0.055902
8	0.082074	0.095015	0.074536	0.068718	0.05069	0.034359	0.060668	0.0712	0.133593
9	0.369026	0.369872	0.369026	0.365243	0.387746	0.370153	0.38873	0.395108	0.380788
10	0.357848	0.37657	0.391311	0.357848	0.361516	0.369026	0.395899	0.354044	0.354044

据,得出相应的计算结果。

仪器 X 的测量系统计算结果界面图如图 1 所示。

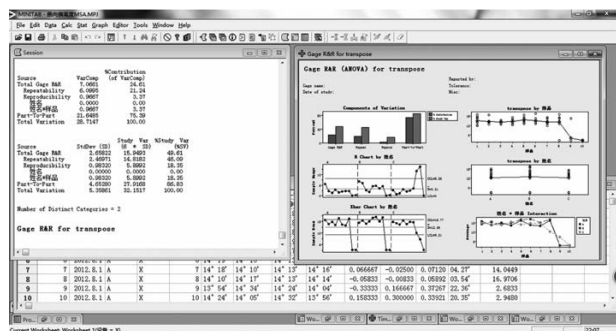


图 1 界面图

仪器 Y 和 Z 的测量系统计算情况同理。将仪器 X, Y 和 Z 的测量系统做重复性和再现性对比,可得表 5。

表 5 测试系统 X, Y 和 Z 的重复性和再现性对比

项目	X 测试系统	Y 测试系统	Z 测试系统
重复性	46.09%	37.89%	11.24%
再现性	18.35%	14.52%	11.01%
P/TV	49.61%	40.57%	15.73%
n	2	3	8

表 5 中, P/TV 是测量系统的系统波动与总波动的比值,一般 P/TV 以 30% 为限,超过 30% 认为测量系统是无效的^[5]; n 是测量系统的分辨力,是由 $\sqrt{2}\sigma_p/\sigma_{r+o+p}$ 计算得出的,一般其大于等于 5 时表示测量系统的分辨力是足够的,数据是可靠的。由表 5 的结果可以看出, X 和 Y 测试系统的 P/TV 已经超过 30%, 测量系统是不可接受的,需要对测量系统查明原因进行改进;由表 5 还可以明显地看出,测试系统 X 和 Y 的分辨力 n 严重不足,需要对其二者进行改进。反观 Z

测试系统,虽然其校准结果与测试系统 X, Y 的校准结果相差不大,且尽管三个测试系统检定均为合格,但 Z 测试系统的重复性和再现性要远远优于 X, Y 系统,且其分辨力充足 ($n > 5$),证明 Z 测试系统的重复性和再现性计算是可靠的。

4 结论

X 射线单晶定向仪的检定和校准情况与该仪器设备组成的测试系统的重复性和再现性没有直接关系,仪器的检定合格或进行有效校准只是该测试系统有效的必要条件。通过使用总角度偏差作为测试结果,应用二因素随机效应模型可以方便有效地计算 X 射线单晶定向系统的重复性和再现性。通过实验得出,在工业应用 X 射线单晶定向仪时,不仅要注重仪器设备的定期校准或检定,更要在不断的工作中,尤其是在使用前及时跟踪计算该测量系统的重复性和再现性,以保证测量结果的准确可靠,满足设计和工艺的要求。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 6379.1-2004 测量方法与结果的准确度(正确度与精确度)第 1 部分 总则与定义[S]. 北京:中国标准出版社,2004.
- [2] 刘来保,赵久. 应用 X 射线定向仪的晶体快速定向法[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2001:48-58.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 1555-2009 半导体单晶晶向测定方法[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1256-2010 X 射线单晶定向仪校准规范[S]. 北京:中国计量出版社,2010.
- [5] 马林,何桢. 六西格玛管理[M]. 北京:中国人民大学出版社,2004:175-199.

(上接第 42 页)

- [2] 北京交通大学. 稳频技术[EB/OL]. [2013-12-20]. <http://wenku.baidu.com/view/5f7708fc4693daef5ef73de8.html>.
- [3] 苏亚欣. 传热学[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2009.
- [4] 维基百科. 热膨胀系数[EB/OL]. [2014-01-22]. <http://zh.wikipedia.org/zh-cn/热膨胀系数.html>.
- [5] 马维光,尹王保,黄涛,等. 气体峰值吸收系数随压强变

化关系的理论分析[J]. 光谱学与光谱分析,2004,24(2):135-137.

QC检测仪器网

全 新 上 线

欢迎点击 查看更多 精彩内容

WWW.QCtester.com

更便于 搜寻仪器、专业展会、专业期刊

更多 行业信息、供求信息

咨询电话: 010-64385345

传真: 010-64374736

E-mail: qctester@126.com

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.14

湿度变化对置换法气体小流量装置影响的研究

向德华

(湖南省计量检测研究院, 湖南 长沙 410011)

摘 要: 测量了不同温度、不同湿度下的压缩空气和高纯氮气以不同流量进入装满水的容器后的湿度变化情况; 分析了气体湿度变化对置换法气体流量装置的影响, 提出了用气囊或隔膜把被测气体和水隔离的解决方法。

关键词: 流量装置; 置换法; 气体流量; 湿度变化

中图分类号: TB943

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0055-03

Study on the Effect of Humidity Changes on the Displacement Small Gas Flow Device

XIANG Dehua

(Hunan Institute of Metrology and Test, Changsha 410011, China)

Abstract: Humidity changes were measured respectively for compressed air and pure nitrogen with different temperatures and humidity when entering at different flow a container filled with water. The experiment shows that the gas humidity increases quickly. The impact of the air humidity changes on the displacement gas flow device is analyzed, and a solution of an air bag or diaphragm is proposed for isolating the measured gas and water.

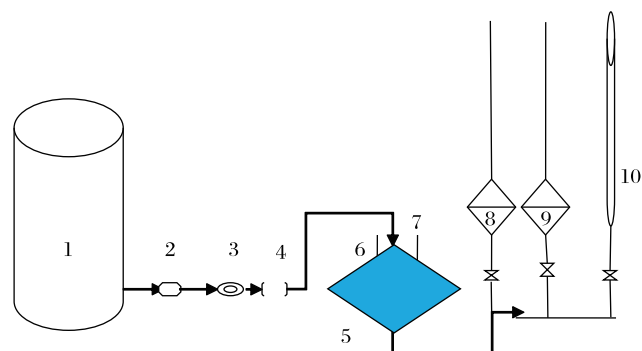
Key words: flow facility; displacement; gas flow; humidity change

0 引言

空气的物理化学性能相对稳定, 经常用作检测流量仪表的载体, 空气成分变化最大的组分是水蒸汽, 也就是湿度的变化, 精确测量气体流量一般需要考虑湿度的影响。一方面, 干空气的组分固定, 分子量、标准密度等理化指标基本是常数, 设计流量仪表、装置可以通过文献获得, 但实际使用时大部分介质是湿气体, 如空气湿度对音速文丘里喷嘴测量空气流量的影响, 当空气湿度为 50% RH, 温度为 20℃ 时, 湿度对流量测量的影响约为 0.24%^[1]; 用节流装置测量湿人工煤气时, 湿度对流量测量也有较大影响, 当湿度为 80% RH, 温度为 50℃ 时, 其影响达到 11.4%^[2]。另一方面, 在检定流量计时, 被测气体在被测流量仪表和标准装置两个位置的湿度不同也会产生测量误差, 使用气体置换水的气体流量装置检测气体流量仪表时就必须考虑测量过程中湿度变化的影响。

1 置换法气体小流量装置的原理^[3]

如图 1 所示, 一定压力的空气通过质量流量控制



1 - 空气稳压罐; 2 - 调压阀; 3 - 质量流量控制器; 4 - 被检表;
5 - 储水容器; 6 - 压力表; 7 - 温度计; 8, 9 - 标准金属量器;
10 - 液体玻璃管

图1 置换法气体小流量标准装置

器调节需要的流量, 再经被检表后流入装满水的储水容器中, 水受到气体的挤压进入标准量器, 进入容器中气体体积等于标准量器中水的体积增加值。根据类似于 $PVTt$ 装置的原理^[4], 即在某时间间隔 t 内气体流入特定储水容器的体积为 V , 测量容器内气体绝对压力 P 和热力学温度 T , 用气体状态方程计算出气体质量。流经被检仪表的气体质量等于储水容器的气体质量增加量, 因此, 可以计算出被检表示值误差。

收稿日期: 2013-12-03

作者简介: 向德华 (1969-), 高级工程师, 硕士, 从事流量标准装置及仪表研究。

2 计算公式

气体质量流量公式为

$$q_m = \frac{[\frac{P_2 V_2}{T_2} + (\frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1}) V_1] \frac{M}{R}}{Zt} \quad (1)$$

式中： q_m 为质量流量； V_1 为开始检测前，储水容器及被检表后管道阀门的气体空间体积， m^3 ； V_2 为气体排出水的体积， m^3 ； t 为测量时间，s； P_1 、 P_2 分别为测量开始前、后空气的绝对压力，Pa； T_1 、 T_2 分别为测量开始前后空气的热力学温度，K； Z 为空气压缩系数； R 为气体常数； $R=8.3144$ ； M 为空气分子量。

3 气体湿度变化实验

3.1 压缩空气

压缩空气压力 0.4 MPa，在 100.23 kPa，24.8℃ 时湿度为 30.50% RH。选 10 L 量器，不同流量做实验，观察当流量为 1，2，6，10，16 L/min（0℃，1 atm 为标准状态）时，流入储水容器（体积约 10 L）气体湿度的变化。湿度测量选用 0.2 级标准湿度传感器，向储水容器充气达到预定液位后，停止充气，立即把进入储水容器的空气放出，装入一个密封内置湿度传感器的塑料袋中，湿度示值稳定后，读出湿度值和温度值，实验数据如表 1 所示。

表 1 不同流量储水容器内空气的湿度变化

流量/L·min ⁻¹	湿度/% RH	温度/℃	备注
16	80.05	25.21	
10	80.12	25.22	环境温度
6	80.20	25.33	26.2℃， 大气压
2	81.16	25.30	100.23 kPa
1	81.49	25.41	

通过表 1 可以看出：环境温度 26.2℃，大气压 100.23 kPa 时，空气（相对湿度 30.50% RH）以 16 L/min 的流量进入装满水的容器中，当气体体积达到 10 L，约 37.5 s（加上操作时间，实际停留时间约 1 min）后，空气的相对湿度变为 80.05% RH（25.21℃）；当流量为 1 L/min 时，气体体积达到 10 L，约 10 min 后，空气的相对湿度为 81.49% RH（25.41℃）。水的蒸发速度非常快，26℃ 时 1 min 内气体的相对湿度从

30.50% RH 上升到 80.05% RH，延长到 10 min，湿度变化约 2% RH。

3.2 高纯氮气

用高纯氮气代替压缩空气重复上述实验，数据如表 2 所示。

表 2 不同流量储水容器内氮气的湿度变化

流量/L·min ⁻¹	湿度/% RH	温度/℃	备注
16	78.12	25.10	
10	78.02	25.20	环境温度
6	78.23	24.92	26.0℃， 大气压
2	78.89	24.85	100.20 kPa
1	79.58	24.80	

通过表 2 可以看出：环境温度 26.0℃，大气压 100.20 kPa 时，高纯氮气（相对湿度接近 0），以 16 L/min 的流量进入装满水的容器中，当气体体积达到 10 L，约 37.5 s（加上操作时间，实际停留时间约 1 min）后，氮气的相对湿度为 78.12% RH（25.10℃）；当流量为 1 L/min 时，气体体积达到 10 L，约 10 min 后，氮气的相对湿度为 79.58% RH（24.80℃）。由于水蒸发的影响，26℃ 时 1 min 内氮气的相对湿度从 0 上升到 78.12% RH，延长到 10 min，湿度变化约 3% RH。

3.3 不同温度的压缩空气

改变温度，用压缩空气进行上述实验，空气压力 0.4 MPa，在 99.86 kPa，22.81℃ 时，湿度为 26.30% RH，重复上述实验，结果如表 3 所示。

表 3 不同流量储水容器内空气的湿度变化

流量/L·min ⁻¹	湿度/% RH	温度/℃	备注
16	70.18	23.10	
10	69.73	23.30	环境温度
6	70.46	23.12	23.0℃， 大气压
2	72.85	23.02	99.86 kPa
1	73.58	23.28	

通过表 3 可以看出：环境温度 23.0℃，大气压 99.86 kPa 时，空气（相对湿度 26.3% RH）以 16 L/min 的流量进入装满水的容器中，当气体体积达到 10 L，约 37.5 s（加上操作时间，实际停留时间约 1 min）后，空气的相对湿度为 70.18% RH（23.10℃）；当流

量为 1 L/min 时, 气体体积达到 10 L, 约 10 min 后, 空气的相对湿度为 73.58% RH (23.28 ℃)。由于水蒸发的影响, 23 ℃时 1 min 内气体的相对湿度从 26.3% RH 上升到 70.18% RH, 延长到 10 min, 湿度变化约 4% RH。

结合上述三组实验可以得出结论: 水在密闭容器中, 1 min 内蒸发速度很快, 1 min 后蒸发速度下降, 1 ~ 10 min 水蒸发的变化量不大, 室温 23 ~ 26 ℃时, 约 (2 ~ 4)% RH; 水的蒸发与温度有关, 温度越高, 1 min 内密闭容器内气体达到的湿度越高; 对于 1 min 观测时间来说, 水的蒸发速度极快, 以至于可以忽略进入密闭容器气体的湿度大小, 不同湿度气体进入储水容器内 1 min 后湿度值基本接近。

4 湿度变化对置换法气体小流量装置的影响

使用置换法气体小流量装置时, 气体在储水容器内的停留时间一般超过 1 min, 温度在 23 ~ 26 ℃时, 气体湿度变化 (40 ~ 50)% RH。为了便于分析湿度变化对流量测量准确度的影响, 统一按最小变化量 40% RH 计算, 假设储水容器内气体压力为 110000 Pa, 如果不考虑湿度变化, 将对流量测量结果产生影响, 如表 4 所示。

表 4 湿度对流量测量的影响

温度/℃	水的饱和蒸汽压/Pa	湿度变化量/% RH	湿度变化对应分压/Pa	湿度变化的影响/%
23	2810.1	40	1124	1.03
24	2984.7	40	1194	1.10
25	3168.7	40	1267	1.17
26	3362.6	40	1345	1.24

通过表 4 可以看出: 由于进入储水容器的气体湿度增加, 导致装置测得的气体质量偏大, 在 23 ~ 26 ℃范围内超过 1%; 湿度变化对流量测量的影响随温度升高而加大。

5 问题的解决

由于气体湿度变化, 可以使装置的测量误差达到 1% 左右, 如果不解决该问题, 这种置换法气体装置将无法投入使用。主要有四种解决方法: 采用饱和蒸汽压低的油替换水, 在线测量容器内气体的湿度, 恒温使用和气水分离。用油替换水, 仍然会受油蒸汽压的

影响, 所以应选择饱和蒸汽压小的油, 此外由于油的粘度比水大, 会增加标准量器溯源的难度。在线测量湿度采用一般传感器准确度很难达到要求, 高精度传感器价格较贵。恒温使用要求每次测量期间环境温度变化不超过 0.3 ℃ (按该项不确定度分量不超过 0.02% 估算), 而且需要准确测量压缩空气的湿度, 比较麻烦。因此, 选择用气球把水气隔离的办法, 如图 2 所示, 被测气体经质量流量控制器调节流量后, 流过被检表, 进入气球, 测量气球内的温度和压力。该方法避免了水与被测气体接触, 保证置换法气体流量装置内气体组分与被检表内流过的组分完全相同。

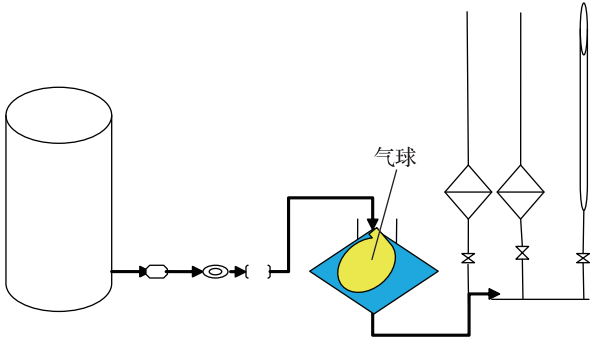


图 2 改造后的置换法气体小流量标准装置

6 结论

湿度较低的气体进入装水的密闭容器中, 气体的湿度将很快上升, 气体的组分因此改变, 在使用、设计类似于本文置换法气体小流量装置时要考虑被测气体组分变化, 如气体钟罩反吹收集气体时, 应考虑密封液体蒸发的影响。

参 考 文 献

[1] 陈忠基, 赫荣光. 空气湿度对音速文丘利喷嘴测量空气流量的影响 [J]. 计量技术, 1997 (10): 18-19.
[2] 王兆新, 李莉芝. 流量计量中湿度影响分析 [J]. 自动化仪表, 2009, 30 (9): 77-78.
[3] 向德华, 周艳, 李宁. 一种置换法气体小流量标准装置 [J]. 计量学报, 2012, 33 (5A): 126-129.
[4] 王池, 王自和, 张宝珠, 等. 流量测量技术全书 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 647-653.

订阅本刊可通过邮局或直接与编辑部联系。
邮发代号: 80-441。全年定价 60 元。
欢迎订阅! 欢迎赐稿! 欢迎发布技术和产品信息!

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.15

构建民用飞机参数量值溯源体系的探讨

张学涛, 邢向楠, 周世锋, 李少壮

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 适航审定对民机产品研制过程的参数量值控制提出了明确要求, 通过分析对比国内外民用飞机的量值溯源工作现状, 提出了面向产品测量需求的参数量值溯源体系概念, 给出了民用飞机参数梳理划分方案, 并通过实例探讨了民用飞机参数体系构建思路。

关键词: 民用飞机; 参数; 量值溯源体系

中图分类号: TB9; V271

文献标识码: C

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0058-04

Discussion on Building a Civil Aircraft Parameter Measurement Traceability System

ZHANG Xuetao, XING Xiangnan, ZHOU Shifeng, LI Shaozhuang

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: There are clear requirements on the parameter value control during the civil aircraft's airworthiness evaluation. Through the analysis and comparison of the domestic and foreign measurement traceability work status, the concept of a parameter measurement traceability system is proposed for the production and the framework of civil aircraft parameters. The ideas of building a civil aircraft parameter measurement traceability system are discussed through examples.

Key words: civil aircraft; parameter; measurement traceability system

0 引言

计量测试是民机工业重要的基础技术之一, 在保证民用飞机产品参数的测试数据准确和量值统一方面发挥着关键作用。民用飞机产品区别于一般工业产品最显著特征是适航审定, 适航审定特别注重对产品研制过程的参数量值控制, 要求产品测量参数必须通过可靠的量值溯源渠道统一到国家计量基准。

大型民用飞机具有全球化采购、国际化协作的技术特点, 是众多研究机构和生产企业共同参与的高难度大会战。为确保不同承制单位提供的零部件或系统产品参数测得到、测得准、测得可靠、量值统一, 同时又能满足适航符合性验证对数据的有效性、可溯性要求, 有必要以民机产品参数为切入点, 系统梳理相关测试试验设备的量值溯源渠道和方法, 研究构建面

向产品测量需求的参数量值溯源体系。

1 国内外民用飞机量值溯源工作现状

1.1 国外现状

当今, 民用航空制造业的两大巨头波音、空客在各自国家政府的支持下, 不仅建立了完备的研发制造技术体系, 还建立了包括产品参数性能验证与评价的量值溯源体系。民用飞机发展得到了完整的工业技术体系支撑。

由于各类通用/专用测试设备和综合试验系统是产品适航符合性验证的关键技术支持, 出于对企业核心利益保护的考虑, 波音、空客公司始终对测试试验手段及其量值溯源能力严格管控, 具体细节很少对外公开。在量值溯源工作方面, 目前只能从民机转包生产、对外合作引进等渠道了解到一些信息。

例如, 波音集中大批优秀工程技术人员, 根据飞机或产品设计时提出的要求, 设计出符合飞机各个系统或产品性能要求的专用测试试验设备, 这些设备大多在本公司生产, 也有一些在美国或其他国家的专门厂家生产, 但最后的校准工作都在波音公司进行, 并由专门人员统一校准程序, 以确保量值可控。

收稿日期: 2014-03-14

基金项目: 国家“十二五”民用飞机专项科研项目 (MJJ201127)

作者简介: 张学涛 (1983-), 男, 工程师, 工作领域为民用飞机计量测试技术研究与管理。

又如,在国内企业承接波音公司的民机转包生产过程中,美方始终坚持部分关键测试设备和计量标准需向波音计量中心量值溯源。在天津的空客总装基地也存在类似的状况,部分关键测试设备和计量标准目前还是要向法方溯源。这一切充分说明波音和空客公司已将民机研制的全过程纳入到量值溯源体系中,以确保在产品质量控制的各个环节都获得可靠的数据支撑。

1.2 国内现状

目前,国内航空工业部门尚未系统研究构建民用飞机的参数量值溯源体系,但国家和民航计量检定系统已经开展的量值传递工作,以及军民机型号研制和民用飞机转包生产中积累的量值传递工作经验,可以为民用飞机参数量值溯源体系研究构建提供借鉴。

按照计量学的十大专业,国家已建立起包含计量基准以及一系列计量标准、工作计量器具在内的量值传递体系,此体系覆盖了计量检定的各个领域,概括了量值传递技术全貌,反映了当代中国科学和法制计量水平。

为适应国际民航运输业发展的需要,民用航空管理局针对引进机型运营维护阶段专用测试设备的量值溯源需求,建立了包含飞机维修、空中交通管制、机场、航空油料等在内的民用航空专用计量器具检定规程体系,用于指导民航系统的量值溯源工作。

航空工业部门经过几十年的发展,已经针对部分军机型号建立了计量师系统,开展了大量型号专用测试设备的计量保证技术研究,形成了产品相应的量值溯源能力。在国外民机转包生产过程中,特别建立了英制量值传递系统和公英制转换量值传递体系,积累了丰富的民机生产量值溯源工作经验。

通过分析可以看出,目前国内尚未建立起从“飞机产品→测试设备→校准设备(工作计量器具)→计量标准→计量基准”的完整参数溯源链,大部分量值溯源工作对象仍停留在工作计量器具上,缺乏面向飞机产品的测量需求所开展的参数量值溯源体系研究。

2 民用飞机参数梳理划分方案

民用飞机参数梳理划分方案是研究构建参数量值溯源体系的基础。考虑到飞机定义的参数种类繁多、数量庞大,为实现本文的有限研究目标,需要确定参数梳理的范围与对象,便于以后参数量值溯源体系研究的任务分工。

2.1 范围定义

本文所指的民用飞机主要为《中国民用航空规章》

第25部适航标准(CCAR-25)定义的运输类飞机,且以大型民用支干线飞机为主要研究对象,暂不包括第23部、第27部和第29部适航标准(CCAR-23, CCAR-27, CCAR-29)定义的正常类、实用类、特技类、通勤类和旋翼类飞机。

本文所指的参数主要为表征民机整机级、系统级、分系统级或零部件级产品性能测试试验或工艺检测中定义的需量值控制的测量参数。

2.2 构建原则

参数梳理划分方案应遵循民用飞机研制程序和适航审定的特点,突出试验、检测这一条梳理参数量值溯源信息的重要渠道,具体构建原则如下:

1) 对研究对象的考虑

考虑到国内重点发展的民用支线/干线飞机的现状,在参数梳理划分方案研究对象的选择上,本文应主要瞄准代表当前技术发展方向的在研机型,紧跟型号的量值溯源需求,配套型号的计量测试保障体系建设。为此,拟参照大型民用干线飞机的系统设计和任务分工确定划分方案。

2) 对研究范围的考虑

考虑到民用飞机全寿命周期的量值溯源要求,在参数梳理划分方案研究范围的框定上,本文应重点关注研制阶段民机产品符合性验证的量值溯源,突出测试、试验这一关键环节。为此,拟参照民机研制程序的测试、试验类别和项目确定划分方案。

3) 对层次单元的考虑

考虑到此次研究的独立性及后续研究的扩展性,在参数梳理划分方案层次单元的设置上,本文应完整涵盖民机产品的类别和全寿命量值溯源过程,确定统一规范的表述形式。为此,拟参照大型民用飞机项目工作分解结构(WBS)的编号形式确定层次单元,便于为日后建立数据库查询提供条件。

2.3 划分方案

依据以上确定的构建原则,按照飞机产品分类及其研制过程对试验、检测的分类方式,提出民用飞机参数梳理划分方案,如图1所示,分为六个层次。

第一层,按照适航规章对飞机产品的分类方式,将民用飞机划分为23部类飞机、25部类飞机和27/29部类飞机三个结构单元;

第二层,按照飞机产品全寿命周期的定义,将本文研究的25部类飞机划分为设计、制造、试验验证和使用维修四个结构单元;

第三层, 参照大型民用飞机项目工作任务分解 (WBS) 对试验/检测类别的定义方式, 划分为风洞试验、制造检测、系统试验、结构试验、飞行试验、总体试验和维修检测七个结构单元, 并按所属的产品寿命阶段归类;

第四层, 根据各个试验/检测类别的专业细分, 划分试验/检测子类, 如对制造检测的专业细分, 可形成

机加工工艺检测、热表工艺检测、装配工艺检测、无损检测等子类。

第五层, 进一步对第四层试验/检测子类进行项目细分, 如对机加工工艺检测的项目细分, 可形成零件检测、工装检测等结构单元。

第六层, 即为各个试验/检测项目定义的关键被测参数。

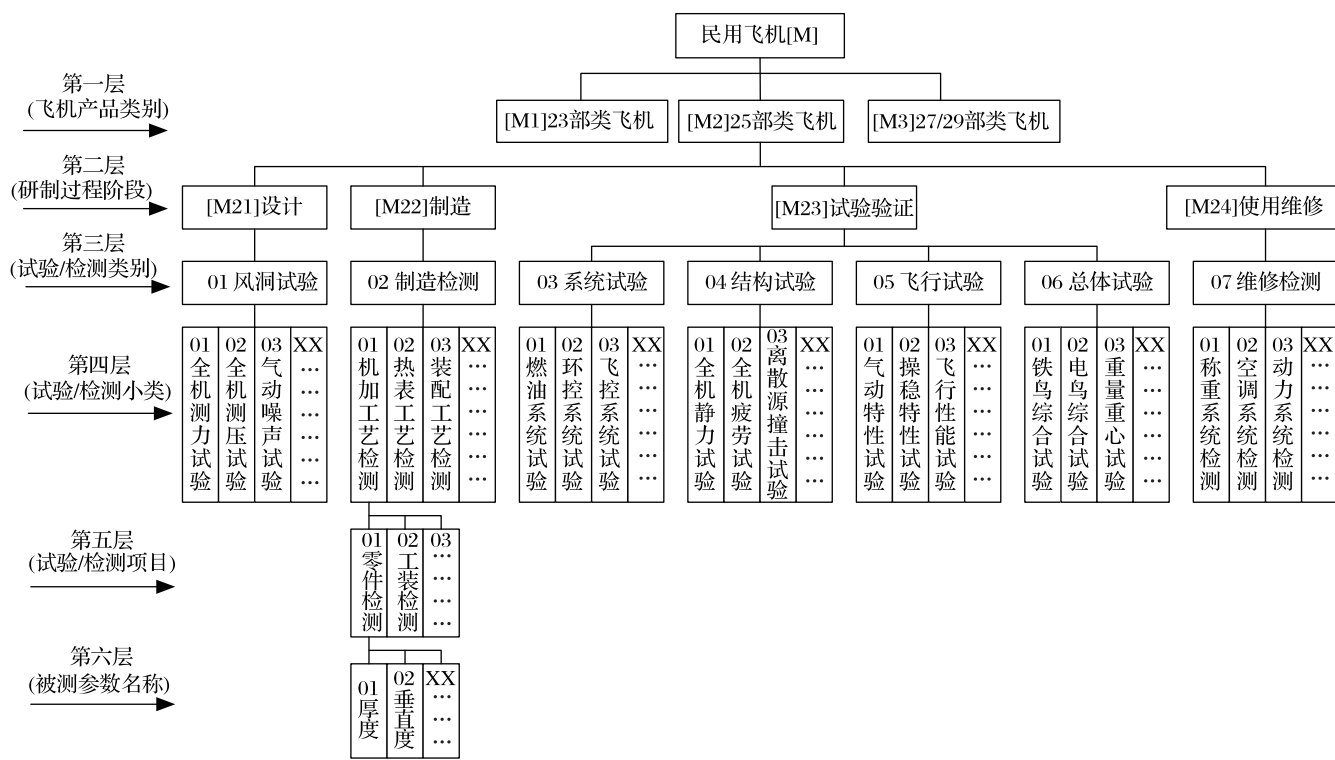


图1 民用飞机参数梳理划分方案

3 民用飞机参数量值溯源体系构建思路

考虑到被测产品参数的特殊性和复杂性, 民机研制过程中需要应用到大量的测试试验设备, 因此梳理分析这些测试试验设备的量值溯源性, 是研究构建民用飞机参数量值溯源体系的核心内容。

鉴于测试试验设备量大面广, 覆盖民机研制过程诸多专业领域, 本文拟依托民机产品设计、生产、试验等单位, 按照参数梳理划分方案确定的研究对象, 开展参数量值溯源信息采集与分析工作。为保证民用飞机参数量值溯源体系研究构建的形式统一、内容完整, 提出的总体思路如下:

3.1 确定研究对象及参数体系

依托相关专业单位, 确定参数量值溯源研究的具体对象, 形成本文图1所示的第四层至第五层结构单

元名称, 并绘制研究对象的参数体系图, 如图2所示。

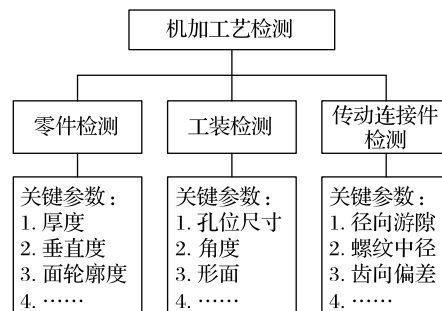


图2 民机机加工工艺检测参数体系

3.2 采集参数量值溯源信息

根据研究对象的参数体系图, 采集相关参数的测试试验设备及其校准信息, 填报参数量值溯源信息统计表, 如表1所示。

表 1 民机机加工工艺检测参数量值溯源信息统计

试验/检测需求			试验/系统或设备				校准/检定系统或设备				
被测参数名称	范围或量值/mm	使用允许误差/mm	系统或设备名称	参数和测量范围/mm	最大允许误差/ μm	是否专用	系统或设备名称	参数和测量范围/mm	最大允许误差准确度等级 测量不确定度	依据技术文件	量值溯源现状
厚度	0.012 ~ 40	0.025	测长机	0 ~ 1000	0.2	否	三等量块	0 ~ 1000	$U=0.1\ \mu\text{m}$ $+1\times10^{-6}L$	JJF1066 -2000	完善

3.3 构建参数量值溯源体系

对照参数量值溯源信息表，分析评价测试试验设备的量值溯源性，给出量值溯源对应关系，构建参数量值溯源体系图，如图 3 所示。图 3 中，试验/检测系统或设备量值溯源不完善的用虚线框表示，并在虚框内说明原因。

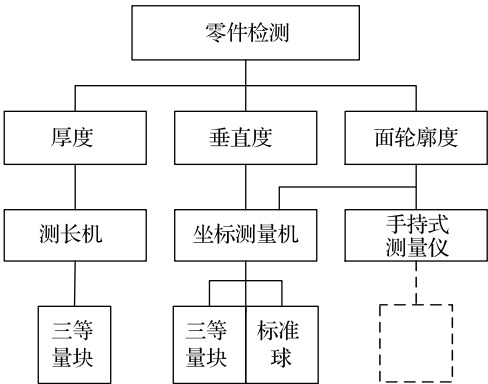


图 3 民机机加工工艺（零件检测）参数量值溯源体系

4 结束语

以民用飞机产品定义的测量参数为切入点，研究相关测试设备的量值溯源渠道和方法，进而形成参数量值溯源体系，是国内航空工业第一次针对飞机参数量值溯源开展的系统性研究，也是将传统的计量保证工作延伸至飞机产品测试活动的一次重要突破。通过探讨参数量值溯源体系的构建思路，可为相关部门规划民机计量测试技术体系、制定专业发展战略、明确技术攻关方向提供可靠的决策参考。

参 考 文 献

[1] 中国民用航空局航空器适航审定司. CCAR-25-R3 运输类飞机适航标准 [S]. 北京: 中国民用航空总局, 2007.

[2] Air Transport Association. ATA2200 Specification For Manufacture's Technical Data [S]. 2001.

[3] 中国质检出版社. 国家计量检定系统表框图汇编 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.

[4] 陈迎春, 宋文滨, 刘洪. 民用飞机总体设计 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2010.

(上接第 46 页)

[4] 钱进, 刘秀英, 黄晓荣, 等. 633nm 激光波长基准副基准比对 [J]. 计量学报, 2008, 29 (4A): 127-130.

[5] Fortier T M, Bartels A, Diddams S A. Octave-spanning Ti:sapphire laser with a repetition rate-1 GHz for optical frequency Measurements and comparisons [J]. Opt. Lett., 2006, 31 (2): 1011-1013.

[6] Russell P S J. Photonic crystal fibers [J]. Lightwave Technol., 2006, 24 (12): 4729-4749.

[7] Alfano R R, Shapiro S L. Emission in the Region 4000 to 7000 A Via Four-PhotonCoupling in Glass [J]. Phys. Rev. Lett., 1970, 24 (11): 584-587.

[8] Alfano R R, Shapiro S L. Observation of Self-Phase Modulation and Small-ScaleFilaments in Crystals and Glasses [J]. Phys. Rev. Lett., 1970, 24 (11): 592-594.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.16

LabVIEW 应用于自动控制系统的内存管理

赵静, 张宁宁

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 介绍了几种 LabVIEW 编程内存优化的方法, 文中以自动控制系统为例, 介绍了在进行自动控制系统编程时所要注意的几个方面。此外, 本文还介绍了几个有用的内存检查工具。很好地应用这些方法, 能够提高程序的运行效率, 便于程序的内存管理。

关键词: 动态调用; 移位寄存器; 同址操作; 全局变量; 内存管理

中图分类号: TP31

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0062-04

LabVIEW Used in the Automatic Control System Memory Management

ZHAO Jing, ZHANG Ningning

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: This paper describes several methods about LabVIEW programming memory optimization. Based on the automatic control system, introduction is given on several aspects in programming the automatic control system; dynamic invocation VI; mandatory use of type conversion; memory leak prevention; array memory allocation; using global variables and so on. In addition, the paper describes several useful memory checkers. These methods can improve the operating efficiency of the program and make the program's memory management easier.

Key words: dynamic invocation; shift register; site operator; global variable; memory management

0 引言

在构建自动化控制系统时, 计算机软件编程是使得自动控制系统在无人参与情况下按照预期程序进行工作的关键所在。在预定程序的实现中, 软件编程不仅要实现所需的任务要求, 而且在运行效率、差错管理、系统维护等方面要付出更多的精力。由于无人参与, 某些想象不到的小错误可能会引起软件的崩溃, 进而严重威胁整个控制系统。

随着自动控制系统的不断扩展, 所需要实现的功能越来越多, 系统越来越庞大, 软件编程越来越复杂, 然而计算机的内存资源是有限的, 内存管理的目的就是如何高效、快速的为任务分配内存资源, 并且在适当的时候释放和回收资源, 内存管理技术在编程中越来越受到重视。一个内存管理好的程序不仅可以提高工作效率, 而且可以使系统更为稳定的运行, 内存管理不好可能导致内存泄露, 甚至内存耗尽而导致系统崩溃。

本文基于 LabVIEW 编程语言来介绍内存管理, 通过汇总 LabVIEW 的一些内存管理技术以及一些编程技巧, 以帮助 LabVIEW 编程者更好的实现自动控制系统的软件编程。

1 自动控制系统的组成

自动控制系统一般包括控制器、被控对象以及执行机构。控制器即计算机及其内置板卡; 被控对象即终端设备; 执行机构即实现基本控制任务、数据采集任务等的硬件结构, 如电机、电磁阀、数据采集仪等。图 1 是一个简单的自动控制系统的基本构架。

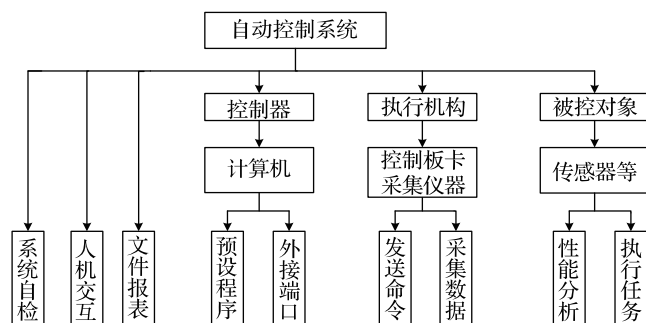


图 1 自动控制系统框图

收稿日期: 2014-02-19; 收修改稿日期: 2014-03-12

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目 (20131394)

作者简介: 赵静 (1982-), 女, 工程师, 硕士, 从事力学计量方面的科研工作。

系统中的控制部分往往需要用到计算机的各种硬件资源口：串口、网口、GPIB 口等，或者需要多功能采集卡的多功能通道来进行控制，这些系统资源端口在进行软件编程时要注意及时的分配和释放，如果释放不当，会导致资源口的无效占用，可能导致再次使用时打开失败。

系统本身具有自检功能，这是在整个程序控制中首先要进行的工作，之后又不再需要进行频繁操作，这就涉及到了系统资源的合理分配问题，如何使不常用的功能最少的占用内存资源，并能更好的提高运行效率。

在某些复杂系统中，数据量很大，占用的内存资源也会很大，如何在编程中注意内存资源的管理是提高数据处理量、提高运行效率的关键。

此外，系统还包括了实时采集数据、人机控制、报表操作等多个功能，合理的内存管理机制可以提高计算机多任务处理中的内存利用率，保证系统运行的稳定性和提高系统的运行效率。

2 自动控制系统编程中内存优化管理技巧

2.1 内存检查工具

2.1.1 内存使用的查看工具

在 VI 属性面板中的“内存使用”工具是用来查看 VI 内存占用情况的。它显示了一个 VI 内存占用所包含的四个主要部分：前面板、框图、代码和数据，以及四个部分的总和。通过这个工具，我们可以方便的查看 VI 所占用的内存，更有针对性的进行优化。

2.1.2 查看数据的内存备份

通过本工具可以方便的找到产生内存拷贝的数据节点，更便于进行程序的优化设计，对某些不必要的内存拷贝，要尽量避免。此外，工具选项下的性能分析有几个查看工具，灵活运用这些工具可以更方便的进行内存管理。

2.2 内存管理的优化

当打开一个主 VI 时，主 VI 连同它所有子 VI 的代码和数据段都会被调入内存，但未打开的前面板和框图并不会被调入内存，只有当主动查看 VI 的前面板或框图时，才会被调用。基于 LabVIEW 的这种内存管理特性，介绍几个优化 LabVIEW 程序的内存管理方法。

2.2.1 子 VI 的使用

一个复杂的自动控制系统的程序往往需要实现多个功能，将每个功能模块用单独子 VI 实现，虽然会增加额外的前面板和框图空间，但并不增加额外的代码

和数据空间，因此也不会占用额外的内存资源。使用子 VI 还可以方便 LabVIEW 在结束子 VI 运行时及时回收内存资源，更进一步改善了内存的使用效率。

2.2.2 动态调用子 VI

自动控制系统中有些功能在程序运行过程中只需要执行一次，例如：系统的自检功能；有些功能在整个程序运行中需要不断调用，例如：设备控制部分和数据采集部分。不常用的自检功能采用动态调用 VI 方式，即只有在调用时该子 VI 时才加载到内存中，运行完后在内存中清除此 VI；对常用功能采用普通调用方式，即系统在运行程序时就将此 VI 加载到内存中，只有退出主程序时，该 VI 才从内存中清除。动态调用程序框图如图 2 所示。

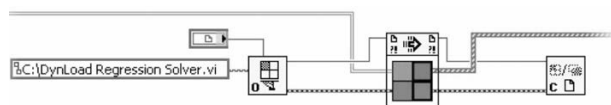


图 2 动态调用 VI 程序图

合理利用两种调用方式，可以提高内存利用率，避免不常用 VI 长期占用内存空间。

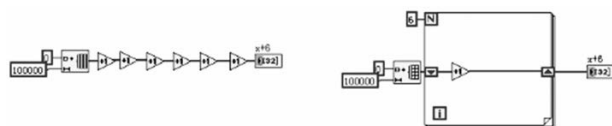
2.2.3 数据备份及缓存重用

自动控制系统中的数据处理部分，往往要涉及到大量的数据运算，有时要求把采集到的数据显示成波形，LabVIEW 程序主要是数据流驱动型的。数据传递到不同节点时往往需要复制一个副本。当对大的数组进行运算时，内存消耗很大，就是因为程序生成了过多的副本。

有些 LabVIEW 节点可以缓存重用，合理利用这些节点可以有效的提高内存使用率，减少备份。

1) 移位寄存器的使用

移位寄存器是内存优化的一个重要节点，其在循环结构的两端是强制使用同一块内存的。图 3 是对实现同一功能的两种 LabVIEW 节点的编程比较。



(a)普通方式累加

(b)使用移位寄存器进行数据累加

图 3 移位寄存器节点比较

经过内存查看工具发现第一种方式大概占用了 3.4 M 的内存空间，第二种方式仅占用了 1.2 M 的内存空间。

2) 元素同址操作

元素同址节点是另外一种强制数据缓存重用内存的一种方式。该节点用于数组的索引、替换,簇的绑定和解除以及任意元素的缓存重用,可以使更新数据或簇中元素时,不进行数据备份。图 4 是同址操作结构的程序框图。

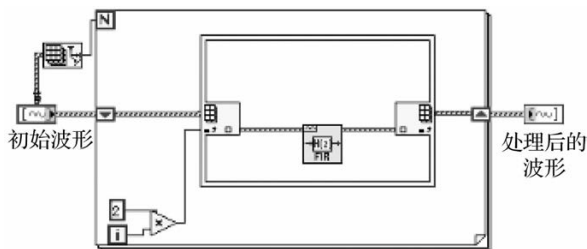


图 4 元素同址节点应用

2.2.4 全局变量和局部变量的应用

在自动控制系统的人机交互编程中往往会用到大量的界面操作,针对同一控件的读写操作往往出现在程序的不同位置。这时就会用到界面元素的属性特点或者使用局部变量来实现操作。另外,在数据处理的编程部分中,有些复杂的算法往往需要顺序结构多步实现,这时也会用到局部变量来进行参数的传递。图 5 是两种编程方式的比较。

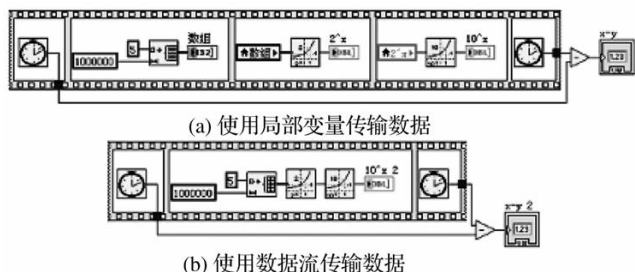


图 5 局部变量使用比较

经过测试发现,第一种方式的运行时间是 191 ms,占用内存 42.2 M;第二种方式的运行时间是 159 ms,占用内存 9.0 M。

局部变量和全局变量都会涉及到数据的备份,对某些大型数组的操作会导致内存的大量占用,可以利用以下方式避免局部变量的应用。

错误簇的方式不仅能使数据的传输保持一定的顺序,而且可以避免局部变量的使用。错误簇的例子如图 6 所示。

全局变量除了有内存备份的弊病之外,还存在竞争的问题。在程序的任何地方都可以随意更改全局变量的值,容易造成其值被莫名其妙更改,且不利于程序的调试。全局变量在编程中可以通过使用队列或者通告、事件结构等方式来尽量避免。

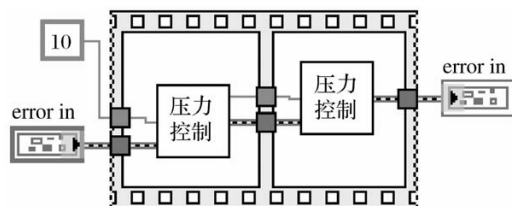


图 6 错误簇的妙用

2.2.5 防止内存泄露

在控制系统的设备控制部分和数据采集部分以及文件 I/O 部分,会经常用到设备端口的配置、采集卡任务的创建以及文件引用的创建。如果忘记关闭这些引用,就会导致内存泄露,由于内存泄露是动态产生的,我们无法通过 VI 属性面板来查看,但可以通过 Windows 自带的任务管理工具来查看。也可以使用 LabVIEW 的 Profile (Tools >> Advanced >> Profile VIs) 工具来查看某个 VI 运行时内存的分配情况。

图 7 是控制仪器和文件打开和关闭引用的例子。

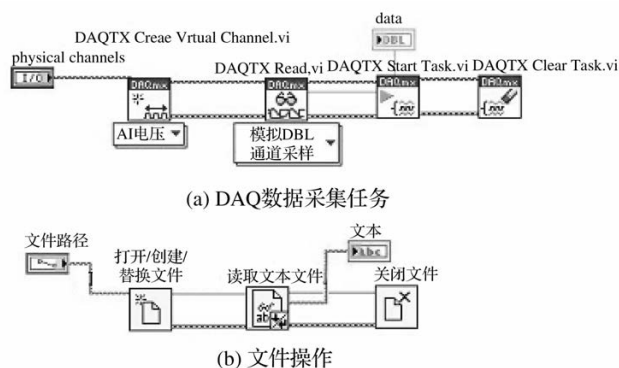


图 7 防止内存泄露的程序框图

2.2.6 减少数据备份

尽量使用占用资源较小的数据类型,例如使用 16 位整型数据,而不是双精度浮点数;尽量要在循环内进行大量数据的运算操作;合理利用内联 VI。

3 实例分析

以一套传感器的压力温度性能检测系统为例,对内存管理进行实例分析。本系统的基本组成如图 9 所示。

该系统是用于检测传感器在不同温度、不同压力情况下的输出性能。主要实现的功能在图 10 中列出。

整个程序采用事件驱动机制,将事件响应节点放在顺序框图中,第一步是对硬件各种引用的打开操作,并进行差错管理,一旦有错误就关闭引用,以避免出现错误时导致引用无法关闭而引起内存泄露。所有与

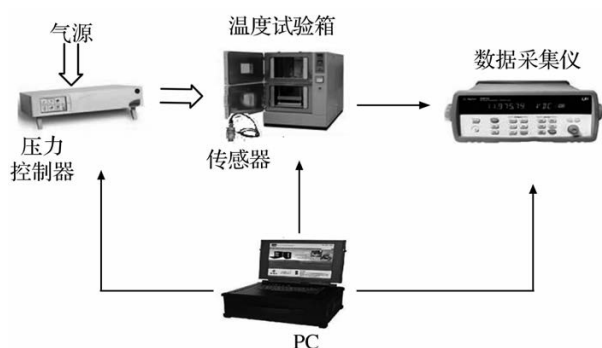


图9 压力温度试验系统

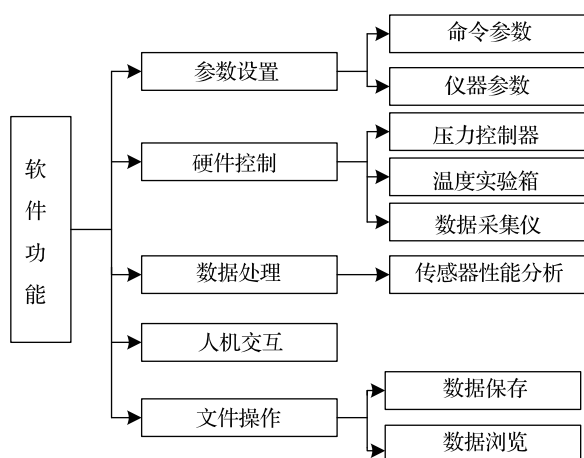


图10 软件功能框图

主要功能无关的界面操作均在此步中实现，以避免在进行主要功能时影响运行效率；顺序的第二部分是主要功能的实现，此部分全局变量主要用于存储数值常量包括一些硬件的命令字符串，在自动控制循环中应用移位寄存器来实现数据的传输，例如压力控制部分，需要循环得到实际压力值，并通过平均值判断是否到达指定标准值，此时应用移位寄存器而不是直接的数组累加方式来实现压力值的平均值求取，温度控制也类似；为了得到传感器的性能分析，需要对采集到的大量数据进行数学计算，这时尽量应用错误簇取代局部变量的应用来实现计算的先后顺序，且在数据运算时尽量保持运算中数值类型的一致性；顺序的最后一步是对各种引用的正常关闭，以及文件的操作、界面元素的恢复等。

整个程序本着优化内存管理的思路，实现了要求的所有功能。

参考文献

- [1] 李周华, 严毅. 软件设计中的性能优化与内存管理 [C] // 广西计算机学会——2004 年学术年会论文集. 2004.
- [2] Jeffrey Richter. Windows 核心编程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] 魏海涛, 姜昱明, 李建武, 等. 内存管理机制的高效实现研究 [J]. 计算机工程与设计, 2009 (16): 3708-3712.

(上接第 14 页)

参考文献

- [1] Madhavi K Y, Sumithradevi K A, Krishna M, et al. Analysis of Square and Circular diaphragms for a MEMS pressure sensor using a Data Mining tool [C] // Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2011 International Conference on. Jammu, India: IEEE, 2011: 258-261.
- [2] 樊尚春, 刘广玉. 新型传感技术及应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [3] Hassanpour P, Cleghorn W L, Esmailzadeh E, et al. Modeling and analysis of MEMS-based resonant sensor actuated by bent beam thermal actuator [J/OL]. [2014-02-21]. <http://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.64530>.
- [4] Harada K, Ikeda K, Kuwayama H, et al. Various applications of resonant pressure sensor chip based on 3-D micromachining [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1999, 73 (3): 261-266.
- [5] Xing Weiwei, Du Yan, Fan Shangchun. The theoretical model and simulation of resonant sensors [C] // Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2011 Third International Conference on. Shanghai: IEEE, 2011, 3: 982-985.
- [6] 樊尚春, 刘广玉. 硅谐振梁式压力传感器模拟计算 [J]. 仪器仪表学报, 1999, 20 (1): 37-40.
- [7] 李庆丰, 樊尚春. 谐振式硅微结构传感器综合测试分析仪 [J]. 仪表技术与传感器, 2009, B11: 244-245, 251.
- [8] Herrera May A L, Aguilera Cort E S L A, Garc I A-Ram I Rez P J, et al. Modeling of the intrinsic stress effect on the resonant frequency of NEMS resonators integrated by beams with variable cross-section [J]. Microsystem Technologies, 2010, 16: 1-8.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.17

基于 LabVIEW 的相位式激光测距系统的软件设计与实现

蔡薇¹, 李昆²

(1. 中航发动机有限责任公司, 北京 100028; 2. 中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 针对传统应用 CPLD, FPGA 或 ARM 等嵌入式处理器的相位式激光测距系统, 本文运用美国 NI 公司推出的“图形化”程序开发环境 (LabVIEW), 设计实现了基于 LabVIEW 的相位式激光测距系统的软件程序, 用于对被测目标距离测量时的程序控制和数据处理。文章简述了相位式测距的基本原理及 LabVIEW 功能与实现, 就相位式激光测距系统的程序控制和数据处理部分做了详细阐述, 并给出了 LabVIEW 数据处理部分的相关测量仿真实验结果, 为应用 LabVIEW 完成相位式激光测距的数据处理提供了一个可行的方案和参考。

关键词: 激光测距; LabVIEW; 相位测量

中图分类号: TP311.52; TB92

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0066-05

Software Design and Implementation of Phase Laser Ranging System Based on LabVIEW

CAI Wei¹, LI Kun²

(1. Engine Limited Liability Company of AVIC, Beijing 100028, China;

2. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: phase laser ranging system based on the traditional application of CPLD, FPGA, ARM or other embedded processors, we design and implement the software of the phase laser distance measuring system, for controlling processes and processing data in the target distance or length measurement. The software was written in the “graphical” programming environment (LabVIEW) which was launched by National Instrument company. This paper briefly introduces the basic principles of the phase distance measurement and implementation of LabVIEW function, the system control and data processing of the phase laser distance measuring system is introduced in detail, and the relevant measurement simulation and experimental results of the LabVIEW data processing part are given, providing a feasible scheme and reference dataprocessing phase laser ranging for LabVIEW application.

Key words: laser ranging; LabVIEW; phase measure

0 引言

无论是航空、航天、兵器等国防军工领域, 还是大地、工程测量等民用领域, 对长度和距离的测量都是必不可少的。工业中常见的是激光测距法。激光测距法按测量原理的不同, 分为相位式测距法和脉冲式测距法两种^[1]。较脉冲式测距法, 在小于 1 km 的测量

范围内, 相位式测距法有着更出色的测量效果, 工程应用中也能满足大部分测量要求。

传统的相位式激光测距系统, 多采用 CPLD, FPGA 或 ARM 等嵌入式处理器配合相应的开发语言 (如 Verilog HDL, VHDL, C, C++) 完成程序控制和数据处理, 但设计中往往有硬件电路复杂、工作量大等问题。

基于 LabVIEW 的相位式激光测距系统, 将相关嵌入式控制器和硬件电路虚拟化, 不仅可以灵活定制成相位式激光测距系统仪器化的操作界面, 大大简化测量系统的硬件电路结构, 节约研制过程成本, 更是能缩小项目开发周期, 提高研发效率。

收稿日期: 2014-04-03; 收修改稿日期: 2014-05-12

基金项目: 国家“十二五”民用飞机专项科研项目 (MJJ201206)

作者简介: 蔡薇 (1981-), 女, 工程师, 硕士, 从事技术管理工作。

1 相位测距法基本原理

相位测距法是一种利用被调制光信号在发射端与接收端间的相位差关系来定量分析出被测距离量的测量方法。具体计算公式^[2]为

$$L = \frac{c \cdot t}{2} = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta\varphi}{2\pi f} = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad (1)$$

式中: c 为光速; t 为调制光在被测距离间往返时间; $\Delta\varphi$ 为发射端与接收端间的相位差; f 为调制激光频率; λ 为调制激光的波长。

相位式激光测距示意图如图 1 所示, A 为调制光的发射端, B 为探测单元的接收端。设发射光信号在 A 端的相位为 φ_A , 接收光在 B 端的相位为 φ_B , 则相位差 $\Delta\varphi = \varphi_B - \varphi_A$ 。 $\Delta\varphi$ 又可以表示为^[3]

$$\Delta\varphi = N_1 \cdot 2\pi + \Delta\varphi_1 = 2\pi(N_1 + \Delta N_1) \quad (2)$$

式中: N_1 为相位差中包含的整数倍; $\Delta\varphi_1$ 为非整周期相位的尾数; $\Delta N_1 = \Delta\varphi_1 / 2\pi$ 。

相位式激光测距可认为是用长度为 λ 的激光波长去测量距离 L 。 ΔN_1 可由测量数据计算而来, 但并不是一个定值, 计算中常有多解, 因此实际应用中采取用一组 (两个或者两个以上) 调制频率, 高频调制频率用来保证测量距离的精度, 低频调制频率用来保证测量距离的范围, 从而得到准确的测量值^[4]。

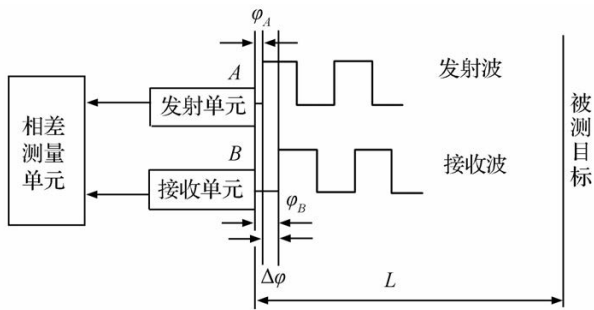


图 1 相位式激光测距示意图

2 基于 FPGA 的相位式测距系统的传统设计方案

基于 FPGA 的传统相位式激光测距系统结构如图 2 所示, DDS 在 FPGA 的控制下产生主振信号和本振信号, 从而控制激光发射单元发射出特定波长的连续光波信号, 接收单元通过光电转换系统接收携带有距离信息的信号, 经 ADC 变换后进入 FPGA。

两路接收回波信号进入 FPGA 后, 先经 FIR 滤波器滤波, 然后分别与本振信号 A 和本振信号 B 进行混频处理, 再加上两路主振信号与本振信号混频, 共四

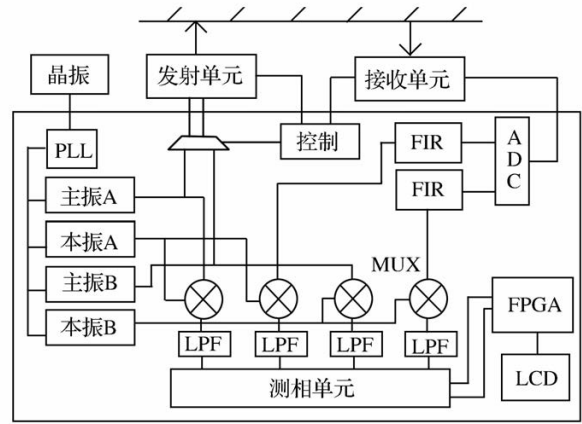


图 2 基于 FPGA 的相位式激光测距系统示意图

路混频信号, 四路混频信号经低通滤波器滤波后, 滤去高频信号, 剩下的低频差频信号进入差频测相单元, 最终结果送入 FPGA, FPGA 将处理数据传输至 LCD 显示。

传统相位式激光测距系统工作频率高, 增益大, 易自激和受干扰, 尤其复杂的硬件所带来的各类噪声成为限制测距精度和稳定性的主要原因。

3 基于 LabVIEW 的相位式测距系统的设计方案

3.1 系统总体结构设计

利用 LabVIEW 易于开发和强大的数据处理能力, 本测量系统采用图形化语言编写控制程序 and 数据处理程序, 基于 LabVIEW 的相位式激光测距系统的总体结构设计方案如图 3 所示。

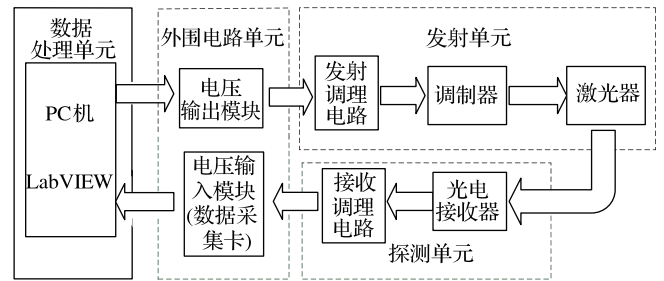


图 3 基于 LabVIEW 的相位式激光测距系统示意图

该测距系统主要由发射单元、探测单元、外围电路单元和数据处理单元 4 部分组成。其中, 发射单元、探测单元及其光学元件共同组成了光学测量头^[5]; 外围电路单元主要是由 LabVIEW 程序控制的电压输出模块和电压输入模块组成。发射单元在 LabVIEW 程序控制下, 激光发光管发出连续光, 经过距离 $2L$ 后, 光信号进入探测单元, 经过信号调理电路后, 由数据采集

卡对检测信号采集,送入 PC 机,由 LabVIEW 软件进行差频测相,从而将携带有被测目标距离信息的信号计算出来,并将测量数据实时显示,总体程序流程图如图 4 所示。

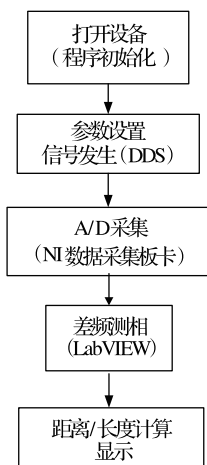


图 4 总体程序流程图

3.2 系统软件的实现

基于 LabVIEW 的相位式激光测距系统,是将相关嵌入式控制器和硬件电路虚拟化,用灵活可定制的软件来取代硬件的自动化综合应用系统。整个系统软件主要分为程序用户登录程序、测距系统应用程序和数据库管理程序三部分。

1) 程序用户登录程序

程序用户登录界面作为程序的原始入口,主要是方便管理员对操作人员的监督和管理。

2) 测距系统应用程序

测距系统的应用程序是系统的核心部分,主要实现对频率信号产生单元的控制和完成对原始信号的差频测相处理,界面及 LabVIEW 程序框图分别如图 5、图 6 所示。



图 5 测距系统应用界面

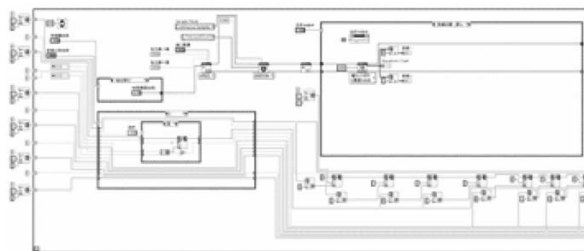


图 6 测距系统应用界面 LabVIEW 程序框图

电压输出模块在 LabVIEW 频率信号产生程序控制下,产生高精度方波主振信号,用于光调制。在相位式激光测距中,通过比较发射端的初始信号与接收端的反馈信号,取得两者间的相位差信息,然后用高频填充脉冲对相位差信号进行计数,最后通过计算脉冲数得到准确的相位差信息。设调制光频率为 f , 高频填充脉冲频率为 f_c , 假设一个周期内的计数脉冲值为 M , 则相位差为: $\Delta\varphi = 2\pi Mf/f_c$ 。实际应用中,通常采用多个周期计数求平均的方法,用来减小偶然误差,提高鉴相精度^[6]。差频测相原理如图 7 所示,若 N 个周期的计数脉冲值为 M' , 则 $\Delta\varphi = 2\pi M'f/(Nf)_c$ 。

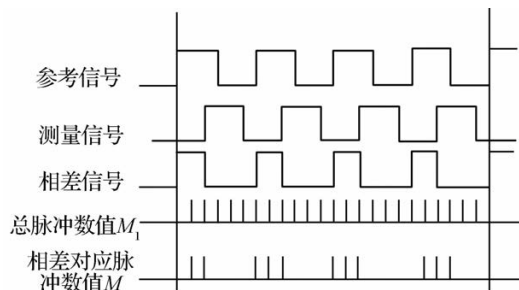


图 7 差频测相原理图

差频测相单元是相位式激光测距系统数据处理的关键部分,整个数据由 LabVIEW 程序完成,差频测相单元组成框图如图 8 所示。

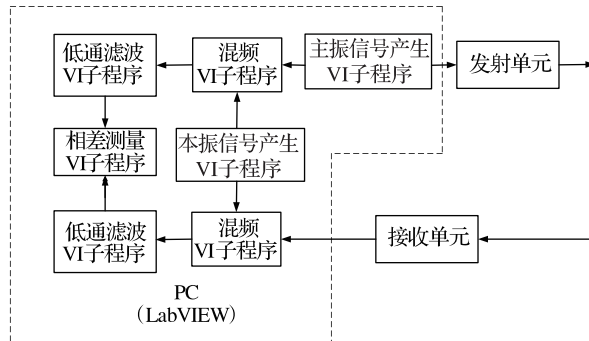


图 8 差频测相单元组成框图

3) 数据库管理程序

数据库作为大数据时代的必须组成部分，现已广泛应用于各类工程应用中。本数据库管理界面借助 LabVIEW 数据库链接工具包 (Database Connectivity toolkit) 不仅可以实现登录、用户权限管理，还增添有数据查询模块、数据输出模块和数据备份功能，其结构框图如图 9 所示。

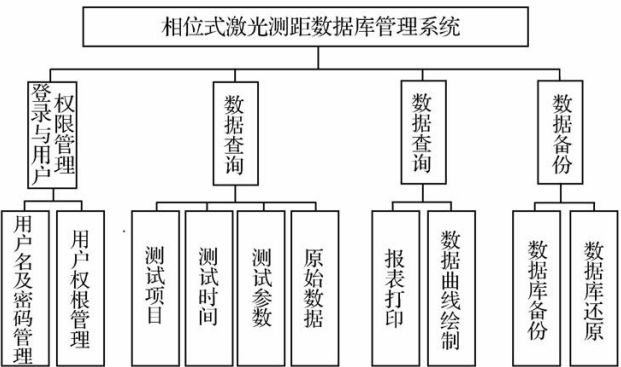


图 9 数据库管理系统框图

4 实验仿真结果与分析

在理想状态下，整个系统的测距分辨力主要由调制激光频率、混频输出频率和数字测相过程的高频填充频率决定。其估算公式^[6]为

$$\Delta = \frac{1}{2} \times \frac{c}{f_s} \times \frac{f_1}{f_p} \quad (3)$$

式中： Δ 为测距分辨力； c 为光速； f_s 为激光发射波调制频率（主振频率）； f_1 为混频信号频率； f_p 为填充的高频脉冲（测相脉冲）频率。由公式（3）可得激光调制频率与测距系统理论分辨力的关系，表 1 中给出了两种激光调制频率对应的测距分辨力。

表 1 激光调制频率与系统理论分辨力

激光调制 频率/ MHz	混频 /kHz	高频填充 频率/MHz	测距分辨 力/ mm
40	10	10	3. 75
0. 04	10	10	3750

本仿真实验中，主振频率为 40 MHz，本振频率为 40. 04 MHz，根据公式（1）可得相应的测距模糊距离（可测量距离最大值）为 3. 75 m；用于测相的差频信号频率为 10 kHz，高频填充测相脉冲频率为 10 MHz，由表 1 可知，本实验系统在理想条件下测量分辨力为

3. 75 mm。

实际应用中，由于电子元器件特性限制、各类噪声影响以及现实环境因素的干扰，使得应用效果不可能达到理想精度。为验证本系统的控制程序和数据处理功能，本仿真实验选取了 4 组不同相位差，仿真实验软件界面如图 10 所示，仿真实验数据表如表 2 所示。

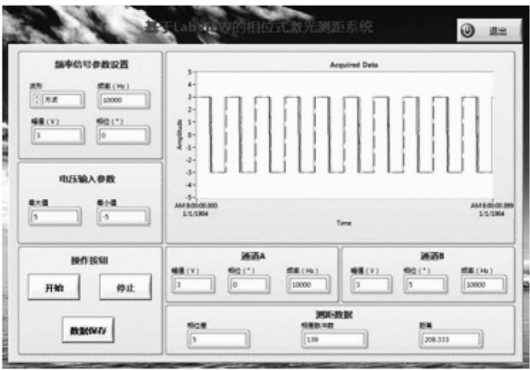


图 10 相位式激光测距系统仿真实验界面

表 2 仿真实验数据表

相位差 / (°)	理论计算数据		仿真实验数据	
	脉冲数	距离/m	脉冲数	距离/m
5	14	0. 05208	13	0. 04875
50	139	0. 52083	138	0. 51750
150	417	1. 56250	416	1. 56000
270	750	2. 81250	750	2. 81250

根据仿真实验对比数据可知，基于 LabVIEW 的相位式激光测距系统不仅可以独立有效的执行信号处理和解调的全部功能，同时测量也非常精确、可靠。

5 结论

本文依据相位式激光测距原理，运用 LabVIEW 软件编写控制和数据处理程序，完成了相位式激光测距的仿真实验，并且能够有效地解决传统相位式激光测距系统的硬件电路复杂、工作量大的问题。

与开发复杂的信号处理程序相比，LabVIEW 软件本身有多种专用信号处理函数模块，灵活调用应用函数模块，使得开发更加简便、高效。准确、直观、便捷的显示和操控界面，可大大降低测试人员的工作量和业务难度。

本文所论述的基于 LabVIEW 的相位式激光测距系统是一个初步方案，为提高系统的性能，在 LabVIEW

程序优化和测试数据误差分析等方面还需做进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 王秀芳, 王江, 杨向东, 等. 相位激光测距技术研究概述 [J]. 激光杂志, 2006, 27 (2): 4-5.
- [2] 施金钊, 黄元庆. 相位式半导体激光测距关键技术的研究 [D]. 厦门: 厦门大学. 2008.
- [3] Poujouly S, Joumet B, Miller D. Laser range finder based on-fully digital phase-shift measurement [C] // Proceedings of

the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. [s. l.]: 1999, 3: 1773-1776.

- [4] 李中方, 李新碗, 杨潘, 等. 相位式光纤测量电路系统的设计与实现 [J]. 电子技术, 2011 (2): 1-3.
- [5] 胥俊丞, 曾晓东. 新型相位激光测距仪的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [6] 张志勇, 张靖等. 一种快速、高精度激光相位测距方法的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26 (8): 51-52.

欢迎订阅 《化学分析计量》

邮发代号 24-138

《化学分析计量》, 国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物, 双月刊, 大 16 开本, 单月 20 日出版。国际刊号: ISSN 1008-6145, 国内刊号: CN37-1315/O6。《化学分析计量》是中国科技核心期刊、美国《化学文摘》(CA) 千种表收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊, 中国石油和化工行业优秀期刊、中国兵器工业优秀期刊、山东省优秀期刊。主要栏目有分析测试、计量管理、不确定度、标准物质、仪器设备、市场动态、简讯、企业风采等。2011 年单价 15 元, 全年 90 元。您可通过邮局或银行汇款向《化学分析计量》杂志社办理订阅手续, 欲订阅过刊或合订本、合订本光盘的读者直接向杂志社订阅。

邮局汇款

收款单位: 山东省济南市 108 信箱杂志社

邮编: 250031 传真: (0531) 85878057

电话: (0531) 85878132, 85878278

E-mail: anameter@126.com; cam@cam1992.com

银行汇款

开户行: 济南市工商银行经十一路支行

户名: 中国兵器工业集团第五三研究所

帐号: 1602001229014425546

网址: www.cam1992.com

《化学分析计量》2014 年第 3 期目次

标准物质

4, 9-脱水河豚毒素国家标准样品的研制

烟用接装纸质控样品的制备与应用

分析测试

芎芩汤活血有效部位给药大鼠粪、尿排泄总体规律的 HPLC 指纹图谱

波长色散 X 射线荧光光谱无标分析法检测树脂中的铅

姜黄素-邻二氮菲-镍配合物修饰电极的制备及其对葡萄糖的催化氧化

惰气熔融-热导法测定钕铁硼永磁材料中的氢

固相萃取-液相色谱法测定方便面中苯并芘

光化学柱后衍生-高效液相色谱法测定婴幼儿营养米粉中的黄曲霉毒素 B1

电感耦合等离子体原子发射光谱法测定电镀污泥浸出液中的重金属

冷原子吸收光谱法测定塑料玩具中可溶性镉

GC-ICP-MS 法测定丙烯中的痕量砷化氢

毛细管气相色谱法测定眼科手术粘弹剂中乳酸含量

基于子空间夹角判据监测阿司匹林合成体系中的水杨酸和阿司匹林

高效液相色谱法测定生活饮用水中的苯并 [a] 芘

动态超声辅助萃取与 HPLC 联用测定淫羊藿中黄酮类化合物

离子色谱法测定果汁中乳酸、富马酸、柠檬酸的含量

HPLC 法同时测定黄酒中 4 种非法食品添加剂

泡沫塑料富集-石墨炉原子吸收光谱法测定贝类水产品中痕量铊

原子吸收分光光度法空心阴极灯一灯多用探讨

制剂药品中盐酸雷尼替丁含量测定方法的优化

紫外分光光度法快速测定原料油中芳香烃的含量

微乳液介质-PAR 显色体系光度法测定油中的 Co²⁺

硝酸铅滴定法测定延期药中氧化铜

计量技术

气相分子吸收光谱仪的计量校准方法

正确使用标准物质/标准样品

实验室管理

奶粉中蛋白质检测实验室间比对评估

环境监测实验室废水的处理及污染防治

空白批内标准偏差和方法检出限的计算

仪器设备

紫外荧光硫分析仪用燃烧管的结构改进研究

综述

N, N-二甲基甲酰胺及其降解产物分析方法研究进展

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.18

基于 PPC4E 数字式压力控制器的压力仪表自动检定/校准技术研究

郑金娟, 郭勇冠

(中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089)

摘要: 基于 PPC4E 数字式压力控制器, 利用 LabVIEW 软件开发平台, 实现压力仪表自动检定/校准, 并通过实例进行了验证。本方案实现了压力仪表自动检定/校准、证书自动生成及记录自动创建等功能, 极大的提高了压力仪表的检定/校准效率和测量准确度, 保证了飞行试验中压力测量数据的准确可靠。

关键词: 压力仪表; LabVIEW; 自动检定/校准

中图分类号: TB93; TP31

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0071-03

Pressure Meter Automatic Verification / Calibration Technology on Base of PPC4E Digital Pressure Controllers

ZHENG Jinjuan, GUO Yongguan

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: An automatic measurement method for pressure meter verification / calibration is developed on base of the PPC4E digital pressure controller. It has been proved by the experiment. The results show that verification / calibration of the pressure meter can be completed automatically, and the verification certificates and the original records can be generated automatically, which greatly improve the measurement accuracy and efficiency of the measuring data of pressure in flight test.

Key words: pressure meter; LabVIEW; automatic verification / calibration

0 引言

压力是工业生产中的重要参数, 压力检测设备被广泛应用于航空工业的各类控制及测试系统。尤其近几年我国航空工业高速发展, 型号试飞任务繁重, 对压力参数的计量工作提出了更高的要求。计量工作必须保证整个飞行试验过程中参数量值的统一性、测试数据的准确性及各类仪器设备的安全性、可靠性。因此, 迫切需要在检定/校准工作中减少人为因素的影响, 提高计量工作的准确度和效率。

1 实验室用 PPC4E 简介

PPC4E 是美国 FLUKE 公司推出的一款数字式压力控制器, 旨在实现从校准实验室到制造业中的高性能通用气体压力校准。作为压力标准器, 能够实现压力

的全自动控制, 其融合了最佳特性、测量技术和来自 DHI 部门的专利 PPC 压力控制技术, 可提供极为广泛的压力量程覆盖范围, 实现绝压、表压和双向表压模式的任意切换, 其提供的 $\pm 0.02\%$ 不确定度水平适用于最常见的计量检定/校准工作。同时, PPC4E 配置的 RS-232 及 IEEE-488.2 远程接口能够方便的实现与计算机的通讯。

结合日常计量工作以及实验室现有设备, 本文主要介绍了实验室用 0~7 MPa PPC4E 数字式压力标准装置在计量中的应用及其基于 LabVIEW 平台的自动化计量技术。PPC4E 数字式压力标准装置主要由氮气瓶、真空泵、PPC4E 控制器、油气分离装置和被检压力仪表接口构成, 其结构图如图 1 所示。油气分离装置能够隔离被检设备带来的油污染, 防止 PPC4E 装置及其连接管路受到污染, 三个被检压力仪表接口分别配有不同尺寸的转接口, 确保该装置可以连接不同类型的压力仪表。

在手动计量检定压力仪表时, 通过 PPC4E 控制器的面板选定量程、单位和压力目标值, 等待压力达到

收稿日期: 2014-03-13

作者简介: 郑金娟 (1983-) 女, 助理工程师, 从事计量检测技术研究。

目标值后手动记录被检仪表和标准器值,如此单点设定,单点检定。对于较多检定点时,每一次都需要重新设定、等待并记录,因此采用这种手动方式比较费时费力,型号试飞任务繁重时很难提供及时有效的保障。而如果能够利用 LabVIEW 软件编程实现自动循环分点检定/校准,自动采集,对于不能实现远程控制的仪表可以手动输入数据,并且自动对数据进行处理,生成相应的记录和报告,将会极大的提高科研试飞仪表检定/校准的保障能力和效率。

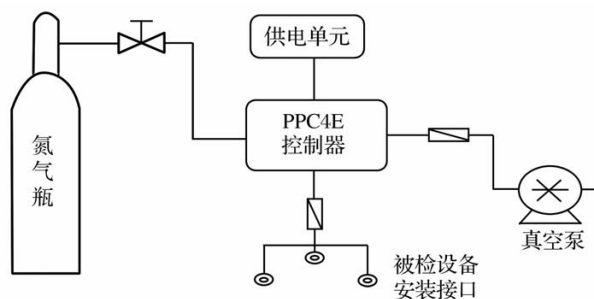


图1 PPC4E 标准装置结构图

2 基于 PPC4E 实现自动检定/校准

2.1 系统组成

依据 PPC4E 压力标准装置自身特性对其进行远程控制,实现自动检定/校准。其系统主要由 PPC4E 标准装置、数据采集单元、计算机、打印机、以及被检压力仪表组成,采用串口通讯保证准确快速的数据交换。改造方案框图如图2所示。

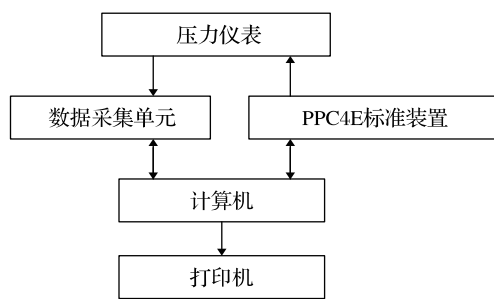


图2 改造方案框图

2.2 工作原理

安装前必须对被检仪表进行检查,包括外观、铭牌以确定产品的名称、规格型号、准确度等级、测量范围以及额定工作压力和输出信号等技术指标。同时,用改变输入压力的方法对输出信号上下限值进行调整,保证与理论输出上下限值保持一致,以压力传感器或

变送器为例,一般是通过调节“零点”和“满量程”来实现。最后还要对实验室的温湿度进行检查以确定是否满足实验环境要求。

被检仪表如果是传感器或者变送器,安装完成后必须进行至少 15 min 的通电预热,这时可以将被检仪表的基本信息输入 LabVIEW 测试软件中,然后在程序控制下,压力控制器从下限开始等间隔加压,待压力达到某一设定值时持续稳定 5 s,压力控制器发出压力到限信号并传送至计算机,计算机测试软件自动进行数据采集、记录后给压力控制器发出指令,开始下一个校准点的测试。当压力值达到设定的上限之后,压力控制器在计算机的控制下,LabVIEW 软件程序开始反行程逐点测量,直到回到下限值完成一个循环。如此进行三个循环,测试完成。计算机通过 LabVIEW 软件对数据进行处理之后得出检定/校准结果,实现自动化检定/校准。

2.3 程序设计

该自动检定/校准程序是以 NI 公司的 LabVIEW 为软件开发平台,根据 PPC4E 压力标准装置基本原理及其使用说明书,依照规程 JJG 49-2013, JJG 52-2013, JJG 927-1997, JJG 860-1994 及 JJG 882-2004 编制自动检定/校准程序。

该程序主要由初始化模块、压力控制模块、数据采集模块以及数据处理模块构成,其程序流程图如图3所示。

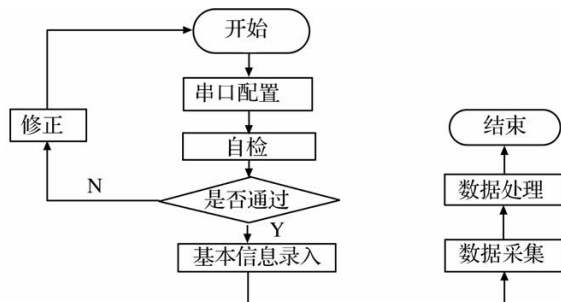


图3 程序流程图

1) 初始化模块

该模块主要用于在系统开始运行时进行串口配置,并对该软件进行自检。同时提示用户输入待校准设备的名称、型号规格、生产厂家、出厂编号、量程、准确度、校准日期和环境温湿度以及客户名称。并且根据准确度要求设定校准点个数,根据量程设定测量范围的上下限并选择校准单位。初始化界面如图4所示。



图 4 初始化界面

2) 压力控制模块

主要是根据 FLUKE 公司提供的远程控制代码通过 RS232 访问 PPC4E，根据测试软件设定的点数和压力值，实现标准装置的正行程自动加压和反行程自动卸压，为自动校准系统提供可靠、稳定的压力值。

3) 数据采集模块

该模块主要是通过数据采集卡采集校准过程中仪表所产生的电流信号、电压信号以及 RS232 信号。数据采集界面如图 5 所示。

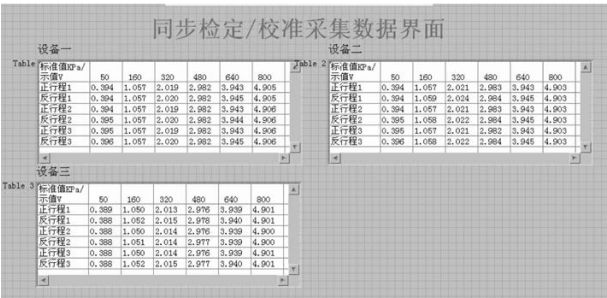


图 5 数据采集界面

4) 数据处理模块

在该模块中嵌入了数据处理方法，计算机根据输入的被校准设备的基本信息自动计算出各校准点的理论输出值，并与采集到的各检定点的实际输出值进行比较，依据检定规程完成示值误差、回程误差、误差允许值等的自动计算，同时显示检定结果并自动生成原始记录、证书或检定结果通知书。

5) 校准费计算和参数登记模块

该模块作用主要是为了及时统计校准费用，同时建立检定/校准数据库，便于以后查找某压力仪表的型号参数和校准日期。

3 检定/校准实例

本文以西安某公司生产的压力传感器为例说明。此压力传感器型号为 GY-12H，测量范围为 0 ~ 800

kPa，准确度等级为 0.2 级，编号为 2011006，依据 JJG 860-1994 压力传感器（静态）检定规程，系统自动选择 6 个检定点进行实验，检定结果如表 1 所示。

表 1 压力传感器校准结果

标准/kPa	示值/V					
	正行程 1	反行程 1	正行程 2	反行程 2	正行程 3	反行程 3
50	0.389	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388
160	1.050	1.052	1.050	1.051	1.050	1.052
320	2.013	2.015	2.014	2.014	2.014	2.015
480	2.976	2.978	2.976	2.977	2.976	2.977
640	3.939	3.940	3.939	3.939	3.939	3.940
800	4.901	4.901	4.900	4.900	4.901	4.901

根据采集卡采集到的传感器输出数据，系统自动进行数据处理得出检定/校准曲线，便于工作人员快速准确地了解传感器的特性。数据处理结果如表 2 所示。

表 2 数据处理结果

参数	结果
工作直线方程	$Y = a + bx, a = 0.0881, b = 0.006$
满量程输出值	$y_{FS} = y_m - y_i = 4.5126 V$
重复性误差	$s = 0.0005 V, \xi_s = 0.03\%$
回程误差	$ \Delta y_h _{\max} = 0.0017 V, \xi_h = 0.04\%$
线性误差	$ \Delta y_l _{\max} = 0.0009 V, \xi_h = \pm 0.02\%$
系统误差	$ \Delta y_{lh} _{\max} = 0.0012 V, \xi_h = 0.03\%$
基本误差	$A = \pm 0.06\%$

系统对采集到的数据与计算出的理论输出值进行比对后，依据检定规程得出结论：本传感器准确度为 0.2 级。

4 结束语

基于 PPC4E 数字式压力控制器实现压力仪表自动检定/校准的方案，突破了传统手动检定/校准时需要手工记录测试数据、人工计算、操作繁琐且效率低下的工作模式，同时杜绝了人为因素对压力计量检定/校准工作可能带来的错判、漏判等影响。本方案自动化程度较高，符合现代化管理的需求，同时具有以下优点：

1) 适应了仪器仪表行业的快速发展。随着现代仪器仪表行业的发展，更多的测量仪器向数字化方向发展（下转第 79 页）

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.19

9016 型电子压力扫描阀自动化检定系统

涂斌

(北京动力机械研究所, 北京 100074)

摘 要: 介绍了 9016 型电子压力扫描阀自动化检定系统的组成、功能、实现方法以及软件系统的结构和设计思路。该检定系统是基于 Visual Basic 6.0 编写, 并通过 GPIB 卡和网卡实现仪器之间的通信, 自动完成数据采集、数据处理及生成记录和证书。该检定系统实用、高效、稳定。

关键词: 9016 电子压力扫描阀; 自动检定; Visual Basic 6.0; GPIB 卡

中图分类号: TP23; TB93

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0074-03

Automatic Test System of Model 9016 Ethernet Intelligent Pressure Scanner

TU Bin

(Beijing Power Machinery Research Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: The automatic testing system of the Model 9016 Ethernet Intelligent Pressure Scanner is introduced. The component, function, realization of the automatic system and the structure and design thought of the software system are also introduced. The software of the automatic system was written in Visual Basic 6.0. And the software communicates with the instruments via GPIB interface and Local Area Network. The automatic testing system can handle the data and build up the document voluntarily. The testing system is practical, efficient and reliable.

Key words: Model 9016 Ethernet Intelligent Pressure Scanner; automatic test; Visual Basic 6.0; GPIB interface

0 引言

9016 型电子压力扫描阀有 16 个压力通道, 集成了 16 个压力传感器, 能够对多通道的压力同时进行测量, 这使得 9016 型电子压力扫描阀被越来越多地应用于发动机试验, 也给计量检定提出了更高的要求。以往对 9016 型电子压力扫描阀的检定都是人工手动, 因为压力通道多, 数据量大, 不但工作强度大, 效率低, 且容易造成人为误差。基于上述原因, 开发研制一套 9016 型电子压力扫描阀自动检定系统, 利用计算机对设备进行控制, 自动检定并采集数据, 进行数据处理, 打印检定证书和记录, 实现自动检定的功能。

1 硬件组成和工作概述

9016 型电子压力扫描阀自动检定系统的硬件由计算机、PCS-400 数字压力计和 90DB 数据集汇器三部分组成, 附加设备有惠普 GPIB 卡、网卡、气源 (氮气气瓶)、打印机和专用电缆等, 如图 1 所示。计算机和

PCS-400 型数字式压力计通过 GPIB 卡进行通讯, 运用远程指令对 PCS-400 型数字式压力计进行控制。同时计算机和 90DB 数据集汇器通过网卡、网线连接, 90DB 数据集汇器再通过专用电缆与 9016 型电子压力扫描阀连接; 计算机通过 90DB 数据集汇器把相应的指令发送到 9016 型电子压力扫描阀 (例如推阀指令), 同时 9016 型电子压力扫描阀检定数据通过 90DB 数据集汇器发送给计算机; 最后计算机再对检定数据做自动处理, 生成检定记录和证书, 完成自动检定。

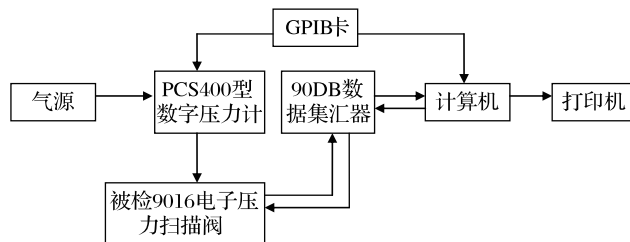


图 1 9016 型电子压力扫描阀自动化检定系统原理图

2 软件设计

9016 型电子压力扫描阀自动检定系统采用 Visual Basic 6.0 进行设计开发。其中, 90DB 数据集汇器和计

收稿日期: 2014-01-27

作者简介: 涂斌 (1982-), 男, 工程师, 从事压力计量检定工作。

算机通过网卡和网线进行通讯,可以引入 Visual Basic 6.0 中的部件 Microsoft Winsock control 6.0,运用 TCP/IP 通讯协议对其编程,以实现两者数据通讯,完成数据采集。PCS-400 型数字式压力计和计算机是通过 GPIB 卡进行通讯,通过查阅 PCS-400 型数字式压力计使用说明书给出的指令表,按照相应的通讯语言和通讯地址对其进行编程,通过程序控制 PCS-400 自动输出标准压力。

Visual Basic 6.0 采用的是可视化面向对象编程,拥有很多通用控件,可以很方便的通过 GPIB 接口对仪器进行控制。同时具有文本化编程软件的强大功能。本程序中通过引用 Microsoft Word 11.0 Object Library,然后用 Word 制作证书和记录的模板,再应用书签功能把数据加载到模板中,最终生成证书和记录。

2.1 软件的流程

9016 型电子压力扫描阀有 16 个压力通道,也就是 16 个压力传感器。另外它还有一个名称为 Supply 的阀门控制口,通过它来控制扫描阀的状态为运行和校准。当给这个控制口施加 0.7 MPa 左右压力时(一般不要超过 1 MPa)阀门控制有效。(在我们检定时扫描阀都是处于校准位置的。)这时只要把标准压力加到扫描阀的 cal 校准口,就给 16 个通道都加上了同样大小的压力。从而对 16 个压力通道同时检定。对于需要校准零点和满度值的扫描阀,也是在校准状态时完成的。

在检定过程中,计算机控制 PCS-400 型数字式压力计给 9016 型电子压力扫描阀施加标准压力。数字压力计判定压力是否稳定,如果超过等待时间,压力仍不稳定,计算机就会提示检定员进行气密性检查;压力稳定后数字压力计会把命令反馈给计算机。扫描阀各个通道的采集数据在不断的通过专用电缆传送到 90DB,当收到压力稳定的信号后,计算机就把 90DB 中采集到的的数据进行分析并记录,然后再进行下一个校准点的检定。以上整个过程的顺序问题通过时间控件来很好的解决。图 2 是软件的流程图。

2.2 软件的特性

1) 软件界面清晰,容易操作

软件的主界面如图 3。研制这套自动化检定系统的目的就是为了提高工作效率,减小劳动强度,所以软件的设计思想就是要简单明了、容易操作、人机交互性强。对检定中需要录入的信息,都有默认上一次的功能,可以减少重复输入。在检定的过程中还有相应的提示。

2) 自动处理数据,并出具证书和记录

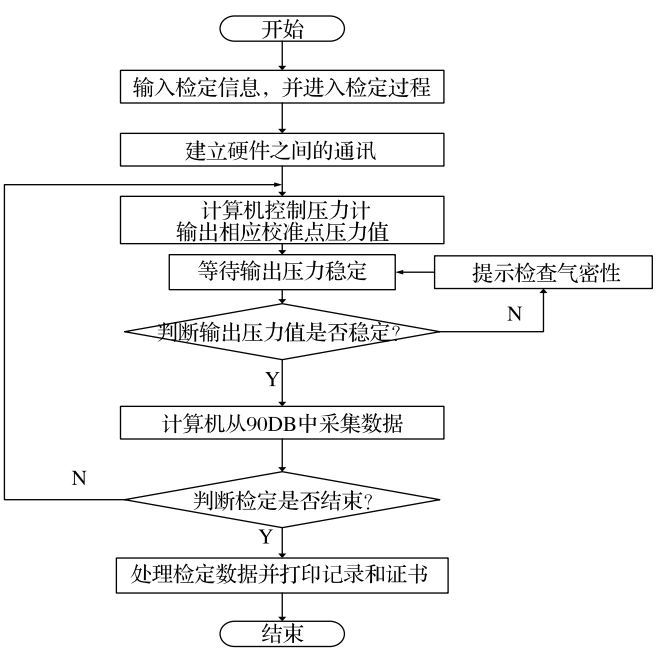


图 2 9016 电子压力扫描阀检定软件流程图

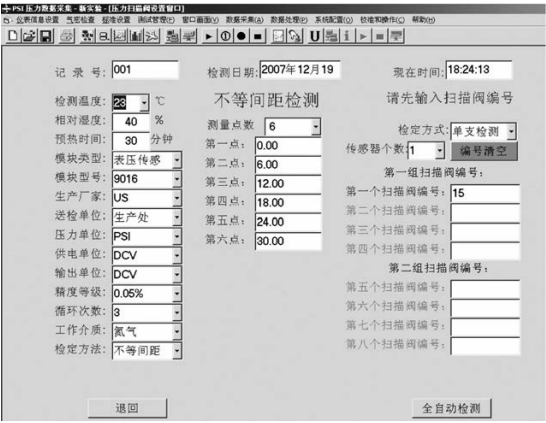


图 3 9016 电子压力扫描阀检定软件主界面

9016 型电子压力扫描阀由 16 个通道组成,可同时采集 16 个传感器的数据,数据处理量较大。如果人工去计算的话,非常耗费时间。通过编程,把传感器的处理方法和用到的公式写到程序里面,通过软件来处理数据,大大提高了工作效率。按照实验室的要求,编制了证书和记录的模板,数据处理完毕后,自动生成证书和记录。

3) 维护性强,便于升级

软件现在配备的数字压力计是 PCS-400,量程范围 0 ~ 3.5 MPa/0 ~ 500 psi,准确度等级 0.01 级,可对满量程为 30 ~ 500 psi 的 9016 电子压力扫描阀进行检定,但覆盖不了所有扫描阀的量程。另外 9016 电子压力扫描阀的更高级产品 9116 电子压力扫描阀也已经出

现。为此，程序采用了大量的模块化设计，结构清晰易懂，人机交互性强，方便了日后的维护和升级。

3 程序使用中需注意的问题

9016 电子压力扫描阀与 90DB 数据集汇器通过专用电缆连接，90DB 数据集汇器与计算机是通过网线连接网卡通讯的。每一个 9016 电子压力扫描阀都有一个 ip 地址。在进行检定的时候，要注意将计算机的 ip 地址改成和扫描阀的 ip 地址相同的域。例如扫描阀的地址为 200.200.23.16，可以将计算机的 ip 地址改为 200.200.23.3。这样两者才能进行通讯。

4 实验验证

该自动化检定系统完成以后，针对系统的各项功能进行了实验验证，其结论为：

- 1) 实现了对 PCS-400 数字压力计的实时控制，在连接气源以后，由软件控制输出并保持标准压力。
- 2) 准确采集 9016 电子压力扫描阀的数据。用该自动检定系统与 9016 电子压力扫描阀厂家自带的软件同时采集编号为 1496C 压力扫描阀第一通道的输出压力值，得到的数据保持一致，如表 1（因使用的 9016 电子压力扫描阀由国外进口，故采集的数据使用英制单位）。
- 3) 数据处理功能。表 1 中的采集数据通过软件处理得到的结果，与人工计算的结果保持一致。

5 结束语

通过以上实验验证，该 9016 型电子压力扫描阀自

表 1 验证数据

压力测试点/psi	厂家自带软件采集数据/psi	自动检定系统采集数据/psi	相对误差软件处理结果/%	相对误差人工计算结果/%
0.0000	0.0123	0.0123	0.006	0.006
40.0000	40.0872	40.0872	0.044	0.044
80.0000	80.0678	80.0678	0.034	0.034
120.000	120.0553	120.0553	0.028	0.028
160.000	160.0482	160.0482	0.024	0.024
200.000	200.0334	200.0334	0.018	0.018

动化检定系统能够准确可靠地采集检定数据，并进行数据处理和打印证书，实现了对 9016 电子压力扫描阀的自动检定，有效地提高了检定效率。软件设计采用了 Visual Basic 6.0 可视化面向对象编程，运行稳定，维护方便。它的开发经验也可以为其他的自动化检定系统研制提供参考。

参 考 文 献

[1] 张宏林. Visual Basic 6.0 程序设计与开发技术大全 [M]. 北京：人民邮电出版社，2004.

[2] 黄振轩，宋卫海，林立松. VB 程序设计与数据库 [M]. 济南：山东科学技术出版社，2007.

[3] 肖新峰. TCP/IP 协议与网络管理标准教程 [M]. 北京：清华大学出版社，2007.

[4] Pressure Systems, Inc. PSI9016 以太网智能压力扫描阀用户手册 [Z].

[5] 标准气体压力源（PCS-400）使用说明书 [Z].



总装与国家质检总局签署《军民融合计量战略合作框架协议》

总装备部与国家质检总局近日在京签署《军民融合计量战略合作框架协议》，这标志着军队与地方正式建立计量战略合作关系。

根据协议，军地双方将按照需求牵引、统筹衔接、资源共享、共同推进的原则，把军事计量技术保障融入国家计量体系，加强建设规划统筹衔接，联合开展计量科研攻关，完善军事计量量传溯源体系，加强计量人才联合培养交流，制定军民协调的技术规范体系，努力形成全要素、全领域、高效益的计量军民融合深度发展格局。

据了解，我国共有 3000 多个计量技术机构，在三峡工程、卫星导航、西气东输、南水北调重大工程建设，以及医学、生物安全、新材料、环境保护、节能减排等国计民生领域，提供了重要的技术支撑和服务保障。

摘自“中国计量测控网”

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.20

谈谈航空企业计量管理工作应注意的几个问题

张啸南

(新乡航空工业(集团)有限公司 质量保证部, 河南 新乡 453049)

摘 要: 按照国防计量法律、法规和 GJB9001B-2009、Q/AVIC 09001-2012 质量管理体系相关要求, 结合质量体系审核中计量管理工作容易出现的问题, 提出了航空企业计量管理工作应注意的几个问题, 阐述了开展这些计量管理工作的思路和方法。

关键词: 航空企业; 计量管理; 计量确认

中图分类号: TB9

文献标识码: C

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0077-03

Discussion on Some Issues in Metrological Management of Aviation Enterprises

ZHANG Xiaonan

(Xinxiang Aviation Industry (Group) Co., Ltd, Xinxiang 453049, China)

Abstract: Some issues are proposed for attention in the metrological management of aviation enterprises, and the ideas and methods of the metrological management are elaborated according to the relevant requirements of national defense metrological laws, regulations, GJB9001B-2009, and the quality management system of Q/AVIC 09001-2012, with the consideration of some problems in the metrological management in quality system audits.

Key words: aviation enterprise; metrological management; metrological confirmation.

0 引言

随着航空工业产品质量和可靠性要求的不断提高, 航空企业计量管理工作在产品研制过程中发挥着越来越重要的作用, 计量管理工作与产品研制的关系越来越紧密。

产品技术参数的量值是否准确可靠是产品质量保证的基础和前提, 航空企业计量管理工作应围绕保证产品技术参数量值准确可靠这条主线, 依据国防计量法律、法规和 GJB9001B-2009、Q/AVIC 09001-2012 质量体系管理相关条款, 在做好计量器具管理的同时, 还应特别注意处理好在计量管理方面的几个问题。

1 计量器具偏离校准状态的处理

计量器具在使用过程中由于各种原因导致示值超差、不准确, 偏离了使用前合格的校准状态, 有可能导致生产、试验、检验人员对产品测量结果的误判, 造成产品质量隐患。如何对偏离校准状态的计量器具

进行管理并对其出具的数据、结论进行追溯评价, 及时采取措施, 消除产品质量隐患, 是航空企业计量管理工作的一个难点, 也是一个重点。

国军标 GJB9001B-2009《质量管理体系要求》7.6 条款中明确要求: “当发现设备不符合要求时, 组织应对以往测量结果的有效性进行评价和记录。组织应对该设备和任何受影响的产品采取适当的措施。校准和检定验证结果的记录应予保持”。为此, 航空企业计量部门应根据本单位生产科研的实际状况, 制定切实可行的偏离校准状态追溯管理制度。计量追溯评定一般的工作流程图如图 1 所示。

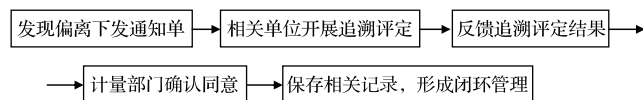


图1 工作流程图

由于追溯评定工作涉及面广、工作量大、难度大, 为避免做无效的工作, 在追溯评定时应遵循以下原则:

1) 当确认偏离校准状态的计量器具所出具的数据和结论在下一检验工序中已使用其它合格的计量器具进行了重新测量和检验, 且结论合格时, 停止追溯评

收稿日期: 2014-02-27

作者简介: 张啸南 (1971-), 男, 工程师, 从事计量管理工作。

定工作。

2) 当计量器具出具的数据和结论作为产品检验依据时, 应分析其对检验结论正确性的影响程度。

①当数据和结论不影响产品质量特性和功能时, 停止追溯; ②当数据和结论可能影响到产品预期的质量特性和功能时, 须对未装配或未出厂的产品全部进行重新检验和试验; ③经复验, 当未出厂的产品确认为合格产品时, 使用单位应对厂外产品在检测数据分析的基础上确定是否“召回”, 是否进行追溯复验工作; ④经复验, 当未出厂的产品确认为不合格产品、已经影响到产品预期的质量特性和功能时, 应按企业有关规定, 按照不合格品的处理程序进行处理, 厂外产品应立即全部召回, 并采取措施, 进行产品追溯复验工作, 直至对产品质量特性作出正确的结论为止。

3) 对偏离校准状态的测量设备出具的数据和结论追溯评定完毕后, 相关责任单位应将评定、追溯情况反馈给计量管理部门进行确认, 使其形成闭环管理, 相关的追溯评定通知、文件、记录应在计量部门保存。

2 对外委计量技术机构资格和计量器具进行确认

2.1 对外委计量技术机构资格进行确认

对于本单位计量技术机构不能开展检定或校准的计量器具, 需要委托外单位计量技术机构进行检定或校准, 计量管理部门对这些外委计量技术机构应进行资格确认。开展外委计量技术机构资格确认工作时应注意以下事项:

1) 因为生产军工产品, 在选择外委计量技术机构时, 应首先选择有资质的国防军工系统的计量技术机构。

2) 计量部门应收集整理各计量技术机构资质证书复印件, 建立外委计量机构档案。机构资质重点核查内容: 一是该计量技术机构经国家/国防行政许可的有效期限或国家认可校准实验室的有效期限; 二是该计量技术机构能力范围是否能够满足送检计量器具的溯源要求。

3) 若把计量器具外送检工作列为外包业务, 计量部门则应建立外委计量技术机构合格名单, 并经本单位军代表(顾客代表)审核同意。

4) 计量部门应建立外委计量技术机构台帐, 注明详细信息, 并对资质的有效期实行动态管理。

2.2 对外委检定或校准的计量器具进行确认

按照中国航空工业集团公司 Q/AVIC09001-2012

《质量管理体系要求》, 对外委检定或校准的计量器具, 计量部门应制定相关的管理规定, 对这些计量器具投入使用前须进行计量确认, 确认其是否满足使用要求。确认的具体内容应注意以下几个方面:

1) 由于校准机构一般不给出校准周期和合格与否的结论, 对于校准证书中没有“建议下次校准时间”的计量器具, 计量部门应和使用单位沟通协商, 根据该计量器具实际使用频率等情况, 确定一个合理的校准周期。同样, 对外委检定合格的计量器具也应根据实际情况确定一个合理的检定周期。

2) 根据检定结论或校准证书出具的测量不确定度数据, 结合该计量器具在工艺流程中的具体作用和使用要求, 按照测试不确定度比至少 1:4 的原则, 计量部门和使用单位应共同确认该计量器具是否能够满足生产检测要求, 并给出意见和结论。

3) 经确认满足使用要求的计量器具, 应按照合格计量器具进行入账和标识; 对经确认不能满足使用要求的计量器具, 应按照降级或报废规定处理。

4) 相关的确认评定记录由计量部门保存。

3 生产和检验共用计量器具的管理

国军标 GJB 9001B-2009《质量管理体系要求》中 7.6 条款明确要求: “生产和检验共用的设备用作检验前, 应加以校准或校验并作好记录, 以证明其能用于产品的接收”。为此, 对生产和检验共用计量器具的管理, 要注意以下三个方面:

1) 要由生产单位和检验部门建立好生产和检验共用计量器具台帐(还应包括工装和试验设备), 并在计量部门备案;

2) 可以在这些计量器具的合格证书上加盖“生产和检验共用”红章予以标识, 便于使用者识别;

3) 检验人员使用这些计量器具进行产品检验之前, 应进行重新校准或校验, 要做好相关记录并保存。

对这些计量器具校准或校验的方式和内容, 可灵活应用, 根据本单位实际工作情况, 制定切实可行的校准内容和规定。检验部门和计量部门可达成一致意见, 只针对所用测量点的量值进行校准或校验即可, 无需进行全项目、全量程校准或校验。

4 测量软件管理

国军标 GJB 9001B-2009《质量管理体系要求》中 7.6 条款要求: “当计算机软件用于规定要求的监视和测量时, 应确认其满足预期用途的能力。确认应在初

次使用前进行，并在必要时予以重新确认。”为此，开展测量软件管理应注意以下几个方面：

1) 测量软件在投入使用前须进行首次确认, 应由测试设备的主管单位、使用单位、计量部门共同对该设备计量测试软件进行确认;

2) 测量软件无需定期确认, 但当测量软件在升级或测量功能发生更改时, 以及相关运行配置的电脑主要配件更换后须对其有效性再次重新进行确认;

3) 测量软件的确认可以采取和测试设备检定/校准同时进行的方法, 测量软件若各项功能正常, 运行流畅、稳定, 且软件在全量程范围内显示的示值和计量校准装置复现的示值具有同步性、一致性时, 则确认该软件满足要求;

4) 测量软件确认也可以采取通过样件试加工验证和比对的方法进行确认,并须经使用单位领导和计量部门批准后实施。

5 专用测试设备计量管理

专用测试设备，也就是过去常说的“非标测试设备”，它所出具的测试数据是判定产品质量是否满足预期性能技术指标要求的最终环节。近年来，国防科技工业和中航工业对加强专用测试设备计量管理非常重视。2002年10月国防科工委颁布了《国防科技工业专用测试设备计量管理办法》，中航工业 AVIC 09001-2012 质量管理体系也明确要求专用测试设备管理要纳入计量管理范畴。为此，计量部门开展专用测试设备管理时应注意以下几点：

1) 计量管理部门和设备管理部门要明确各自职责

范围。设备管理部门应负责设备功能完好性管理，计量部门应负责设备测试系统准确性管理。只有设备的完好性、准确性都合格时，设备才能投入使用；

2) 对设备标识的管理,各单位应根据本单位实际情况制定相关管理规定,可以采取分别粘贴标识的办法,也可以采取粘贴唯一标识的办法;

3) 计量部门应参与专用测试设备研制,提前做好校准设备配备和预留校准接口等方面的工作,为下一步开展现场校准工作做好准备;

4) 专用测试设备的校准规范一般由研制单位或使用单位的计量部门负责编制, 经评审后实施。

6 结束语

当前航空企业计量管理工作的重点已经由对计量器具的周期检定管理逐步转移至对产品研制全过程的计量保证管理。本文结合国防计量法律、法规和质量管理体系的有关要求,就航空企业计量管理工作应注意的几个问题做了论述,为航空企业计量管理人员更好地开展计量管理工作提供了解决的方法和思路。

参考文献

- [1] 中国人民解放军总装备部. GJB 9001B-2009 质量管理体系要求 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2010.
- [2] 国防科学技术工业委员会. 国防科技工业专用测试设备计量管理办法 [S]. 北京: 国防科工委军标出版社发行部, 2002.
- [3] 中国航空工业集团公司. Q/AVIC 09001-2012 质量管理体系要求 [S]. 2012.

(上接第 73 页)

展,很多仪表具备通讯功能,为自动化检定/校准创造了条件;

2) 实现数据的自动采集处理, 减少了人为因素影响, 提高了工作效率。利用数据采集卡采集数据, 减少了人工记录带来错误的隐患, 从而很大程度提高了检定数据的可靠性。该方案满足无纸办公的需求, 有效缩短了检定/校准时间, 工作效率明显提升;

3) 操作方便, 容易维护, 扩展性强。本方案继承了 LabVIEW 平台的优点, 即操作方便易维护。同时, 该方案采用了模块化的程序设计, 为未来系统升级和扩展留下了充裕的空间。

总之,对实验室 PPC4E 数字式压力标准装置进行自动化改造以后,极大提高了计量工作的质量和效率,

保障了科研试飞各项试验的顺利完成,同时确保了飞行试验过程中参数量值的统一性、测试数据的准确性及各类仪器设备的安全性、可靠性。

参考文献

- [1] 国家技术监督局. JJG 860-1994 压力传感器 (静态) 检定规程 [S]. 北京: 中国计量出版社, 1994.
- [2] 杜水友. 压力测量技术及仪表 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 美国 FLUKE 公司. PPC4E 使用说明书 [S].
- [4] Robert H. Bishop. LabVIEW 7 实用教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [5] 顾凯. 压力传感器的数据采集与分析系统 [J]. 工业计量, 2010, 20 (4): 33-34.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.21

关于铂电阻温度传感器修正方法的探讨

吕伟, 谢静, 高颖

(中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089)

摘要: 提出了一种采用分段标定温度上下限来较大地提高铂电阻测量准确度的方法, 以满足检定人员高准确度测温的实际需求。经验证, 此方法具有一定的可行性与可操作性。

关键词: 铂电阻; Pt100; 测温特性

中图分类号: TB942

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0080-03

1 问题的提出

目前, 我单位温度测量中最常用的温度传感器是分度号为 Pt100 的工业铂热电阻 (以下简称铂电阻), 而在实际应用中, 用户使用周检合格的铂电阻时, 大多直接采用查分度表的方法得出温度值, 这远远不能满足高准确度测温对铂电阻测量准确度的要求, 实际上每支铂电阻温度传感器的 R_0 值和 A, B, C 系数是不相同的。用户可以根据计量机构出具的检定或校准证书中的数据 R_0 , 经过计算可以对其在各个温度点进行修正, 但前提是铂电阻必须要满足相应的允差等级要求, 这样在实际的测试中就会相对提高铂电阻的测试准确度, 但也仍会带来一定的偏差, 尤其是对于一些更高准确度的测温。本文提出第三种修正方法, 找出每支铂电阻的 R_0 值和 A, B, C 系数, 再通过软件算出每一温度点的电阻值, 从而提高铂电阻测量准确度。

2 铂电阻的测温特性及常温检定分析

铂电阻属于强检项目, 只有当检定或校准结果符合相应的允差等级要求时, 才能作为合格的计量器具使用。目前铂电阻的常规检定所依据的检定规程为 JJG 229-2010《工业铂、铜热电阻检定规程》, 对于铂电阻的允差等级分为 AA, A, B, C 级以及特殊的允差等级, 其中, A 级铂电阻的允差值为 $\pm (0.150 + 0.002 |t|)$ °C, 较为常见的 B 级铂电阻的允差值为 $\pm (0.30 + 0.005 |t|)$ °C, C 级铂电阻的允差值为 $\pm (0.6 + 0.010 |t|)$ °C。一般情况下只检定 0 °C 和 100 °C 两个温度点

的电阻 R_0 和 R_{100} , 当这两个参数符合要求时, 再根据这两个温度点的电阻值计算出电阻温度系数值 α 和在 0 °C 的偏差 Δt_0 , 由 Δt_0 计算出 $\Delta \alpha$ 的允许范围。最后根据 R_0, R_{100} 和 $\Delta \alpha$ 三个参数值来判断该铂电阻是否满足相应允差等级的要求。

由 JJG 229-2010《工业铂、铜热电阻》, 可以得到工业铂热电阻电阻值与温度之间的函数关系

-200 ~ 0 °C:

$$R_t = R_0 [1 + At^2 + Bt^2 + C(t-100)t^3]$$

0 ~ 850 °C:

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2)$$

式中: R_t 为铂电阻在温度 t 时的电阻值, Ω ; t 为温度点, °C; A, B, C 为系数。

当 R_0 为标称电阻值 100 Ω 时, 可将上述函数关系制成 Pt100 铂电阻 ($\alpha = 3.851 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) 的温度/电阻关系表 (分度表), 如果对于一支检定合格的 Pt100 铂电阻, 使用中认为合格而直接查分度表 (这种使用方法误差较大), 或者是根据检定数据 R_0 和上述的 A, B (或 C , 负温情况下使用) 系数计算出所需温度值 (此时也只是消除了 R_0 的影响), 这样在使用中都会降低铂电阻的准确度, 尤其是对于一些较为精密的温度测量。而每一支铂电阻都有自己的测温特性, 检定规程中给出的 R_0 值和系数 A, B, C 是针对大多数铂电阻的, 因此若要提高铂电阻的测试准确度必须对铂电阻在特定温度点进行标定, 根据标定的温度点计算出不同温度范围所对应的系数值。

根据 JJG 229-2010《工业铂、铜热电阻》中给出的电阻值与温度之间的函数式可知: 若要提高测试准确度, 就要把正温段和负温段分开考虑, 即除了在 0 °C 时必须首先标定外, 在正温段需要确定两个系数 A, B , 负温段需要确定三个系数 A, B, C , 这样对于正温

收稿日期: 2014-03-28

作者简介: 吕伟 (1975-), 女, 河南漯河人, 工程师, 主要从事温度计量检测与研究。

段至少需要标定两个温度点，负温段至少需要标定三个温度点，这样可以组成相应的方程组，通过解方程组进一步解决问题。

现以正温段为例，假若标定了两个点 t_1 和 t_2 （最好是正温段的上下限），测出的实际电阻值为 R_1 和 R_2 ，则得到一组二元一次方程组：

$$R_1 = R_0 (1 + At_1 + Bt_1^2)$$

$$R_2 = R_0 (1 + At_2 + Bt_2^2)$$

解此方程组得：

$$A = \frac{-R_0 t_1^2 + R_0 t_2^2 - R_1 t_2^2 + R_2 t_1^2}{R_0 t_1 t_2 (t_1 - t_2)}$$

$$B = \frac{R_0 t_1 - R_0 t_2 - R_2 t_1 + R_1 t_2}{R_0 t_1 t_2 (t_1 - t_2)}$$

这样便可求出在正温区被标定铂电阻新的系数 A ， B ，然后根据新的系数利用正温段的电阻值与温度的关系式可以求出 t_1 与 t_2 之间的任一温度点的电阻值，从而得到准确的温度值。同样根据上述方法可以求出负温段铂电阻对应的系数（通过解三元一次方程组得到新的系数 A' ， B' ， C' ），这里不再赘述。

3 一种提高铂电阻测量准确度的修正方法

3.1 分段标定温度上下限法、实验数据及数据处理

选一支稳定合格的 B 级铂电阻作样品，依据 JJG 229-2010《工业铂、铜热电阻检定规程》在 0℃ 进行标定后在正温段选取 10℃ 和 120℃ 两点进行标定，在负温段选取 -80℃，-40℃ 和 -10℃ 三点进行标定，根据实验数据组成两个方程组利用 EXCEL 计算处理得到系数 A ， B ， C ，这里称为分段标定温度上下限法。具体数据见表 1。

表 1 分段标定上下限法数据

标定点/℃	R_t/Ω	$A/^\circ\text{C}^{-1}$	$B/^\circ\text{C}^{-2}$	$C/^\circ\text{C}^{-4}$
0	99.9068	3.918518×10^{-3}	-6.772221×10^{-7}	/
10	103.8149			
120	145.9109			
-10	95.9936	3.907066×10^{-3}	-9.813695×10^{-7}	2.648690×10^{-12}
-40	84.1386			
-80	68.0763			

根据表 1 数据 A ， B ， C 和工业铂热电阻电阻值与温度之间的函数关系式可以得出这支铂电阻在 -80 ~ 10℃，10 ~ 120℃ 范围内任意一点的电阻值，这里录用正、负温段间隔为 10℃ 的数据，见表 2。

表 2 铂电阻间隔 10℃ 的电阻值

温度/℃	电阻值/Ω	温度/℃	电阻值/Ω	温度/℃	电阻值/Ω
-80	68.0763	-10	95.9936	60	123.1658
-70	72.1178	0	99.9068	70	126.9898
-60	76.1424	10	103.8149	80	130.8014
-50	80.1495	20	107.7159	90	134.5996
-40	84.1386	30	111.5844	100	138.3778
-30	88.1092	40	115.4505	110	142.1428
-20	92.0610	50	119.3432	120	145.9109

3.2 比对验证、分析和探讨

采用三种不同的方法进行上表电阻值的比对验证。实际上，由于每一支铂电阻都有自己的温度特性，最好的方法是逐点进行标定，但操作性不强且不符合工作实际，为了便于验证数据的一致性，每间隔 10℃ 进行温度电阻值的标定。三种方法处理后的数据见表 3。

表 3 处理后的数据

温度/℃	R_t/Ω		
	普通分度表法	0℃ 电阻值修正法	实验标定法
-80	68.33	68.2618	68.0763
-70	72.33	72.2671	72.0986
-60	76.33	76.2567	76.0955
-50	80.31	80.2314	80.1589
-40	84.27	84.1921	84.1386
-30	88.22	88.1394	88.1073
-20	92.16	92.0740	92.0549
-10	96.09	95.9963	95.9936
0	100.00	99.9068	99.9068
10	103.90	103.8057	103.8149
20	107.79	107.6930	107.7159
30	111.67	111.5688	111.5844
40	115.54	115.4331	115.4505
50	119.40	119.2858	119.3432
60	123.24	123.1270	123.1658
70	127.08	126.9971	126.9898
80	130.90	130.7748	130.8014
90	134.71	134.5814	134.5996
100	138.51	138.3764	138.3778
110	142.29	142.1599	142.1428
120	146.07	145.9319	145.9109

比较表 2 和表 3，同一温度下电阻值数据基本一致。

为了说明和体现铂电阻实际情况的实验标定法的接近程度，将普通分度表法、0℃电阻值修正法、分段标定温度上下限法所得数据分别与实验标定法在各温度点对应电阻值进行比对，结果见表 4。

表 4 各温度点对应电阻值比对

温度 /℃	普通分度表法与 实验标定法比较		0℃电阻值修正法 与实验标定法比较		分段标定温度上下限 法与实验标定法比较	
	电阻 差值/Ω	换算成 温度值/℃	电阻 差值/Ω	换算成 温度值/℃	电阻 差值/Ω	换算成 温度值/℃
-80	0.2537	0.62	0.1855	0.50	0.0000	0.00
-70	0.2314	0.58	0.1685	0.46	0.0192	0.05
-60	0.2345	0.59	0.1612	0.40	0.0469	0.12
-50	0.1511	0.38	0.0725	0.18	0.0094	0.02
-40	0.1314	0.33	0.0535	0.13	0.0000	0.00
-30	0.1127	0.29	0.0321	0.08	0.0019	0.00
-20	0.1051	0.27	0.0191	0.05	0.0061	0.02
-10	0.0964	0.24	0.0027	0.01	0.0000	0.00
0	0.0932	0.24	0.0000	0.00	0.0000	0.00
10	0.0851	0.22	0.0092	0.02	0.0000	0.00
20	0.0741	0.19	0.0229	0.06	0.0064	0.02
30	0.0856	0.22	0.0156	0.04	0.0061	0.02
40	0.0895	0.23	0.0174	0.04	0.0075	0.02
50	0.0568	0.15	0.0574	0.15	0.0312	0.08
60	0.0742	0.19	0.0388	0.10	0.0134	0.03
70	0.0902	0.24	0.0331	0.09	0.0105	0.03
80	0.0986	0.26	0.0266	0.07	0.0087	0.02
90	0.1104	0.29	0.0182	0.05	0.0070	0.02
100	0.1322	0.35	0.0014	0.00	0.0011	0.00
110	0.1472	0.39	0.0171	0.05	0.0088	0.02
120	0.1591	0.43	0.0210	0.06	0.0000	0.00

图 1 更加直观地说明了三种修正方法与实验标定法的接近程度。

通过表 4 比较三种方法与实验标定法的比对数据（换算成温度的差值），例如在 -60℃ 时按照三种方法的顺序，温度差值分别为 0.59℃，0.40℃ 和 0.12℃。通过图 1 明显可以看出分段标定温度上下限法的数据最接近试验标定法。显然采用普通分度表法偏差相对大一些，对于温度测量要求不高的较为适用；采用 0℃ 电阻值修正法准确度有了较大提高但也具有一定的偏

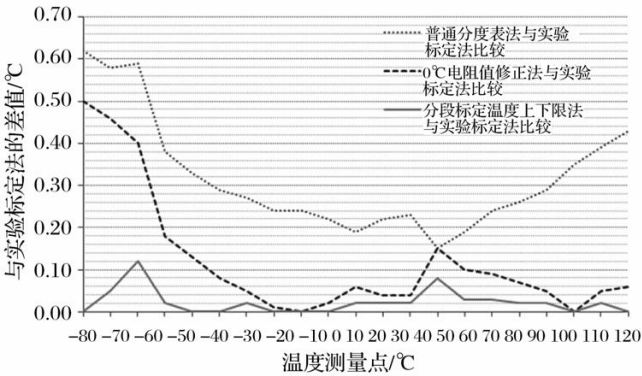


图 1 三种修正方法与实验标定法的比较曲线

差；采用分段标定温度上下限法偏差最小，而且操作性强，既缩短了校准过程又能较大提高铂电阻的测量准确度。

4 结束语

本文针对目前实际使用较多的 B 级 Pt100 铂电阻温度传感器在校准和使用中的情况，结合实际工作经验，通过大量的试验数据以及对三种修正方法的比对，得出通过分段标定温度上下限法可以较大地提高电阻测量的准确度的结论。在不增加测量设备的前提下，校准铂电阻温度传感器时在正温或负温段仅仅增加 2 到 3 个温度点，便可以得到某个测温范围内任意温度点较高准确度的温度值。因此随着使用者对温度测量准确度要求的提高，除了选购较高准确度等级的铂电阻温度传感器外，也可以采用本文所提供的修正方法，将通过新计算的 R_0 和 A, B, C 系数输入到温度显示仪表中，准确度较以往将有较大地提高。

参 考 文 献

[1] 廖理. 热学计量 [M]. 北京：原子能出版社，2002.
[2] 国家质量技术监督局. JJG229-2010 工业铂、铜热电阻检定规程 [S]. 北京：中国计量出版社，2010.

订阅本刊可通过邮局或直接与编辑部联系。
邮发代号：80-441。全年定价 60 元。
欢迎订阅！
本刊优先刊登受各类基金资助产出的论文。
欢迎赐稿！
欢迎发布技术和产品信息！

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.22

军用实验室核查工作探讨

侯兴勃

(中国人民解放军 92493 部队 89 分队, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘 要: 通过分析国军标 GJB2725A-2001《测试实验室和校准实验室通用要求》中有关“核查”条文的含义, 提出了针对不同的核查对象在实验室质量体系文件中应做出的规定, 归纳了几种核查方法和判定原则, 并就核查中存在的问题和对策进行了探讨。

关键词: 实验室; 核查; GJB2725A-2001; 质量体系

中图分类号: TB9

文献标识码: C

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0083-03

0 引言

GJB2725A-2001《测试实验室和校准实验室通用要求》对军用实验室的核查工作提出了要求^[1]。在条文 5.5.10、条文 5.6.3.3、条文 5.9 中分别就“设备周期内的核查”、“测量标准周期内的核查”、“测试、校准或检定结果的核查”等内容给出了核查要求。三种核查要求, 含义不同, 既有区别又有联系, 实验室应对上述三种要求, 在质量体系文件中做出不同的规定, 并采用相应的核查方法开展核查工作。

1 三种核查要求的区别与联系

1.1 周期内核查的目的和原则

周期内核查的目的, 在于及时发现测量仪器或测量标准出现量值不满足要求的状况, 有利于缩短失准后对之前测量结果产生影响的追溯时间。当发现测量设备或标准出现不能允许的偏移时, 实验室可采取必要的措施, 尽可能地减少和降低这种状况造成的影响, 以便有效维护委托方的利益和实验室的信誉^[2]。

核查的原则, 是应针对主要参数或某些不稳定的参数、范围和测量点进行核查, 不是再检定或校准^[3]。

1.2 测量设备周期内核查

测量设备的周期内核查是指在两次周期校准或检定之间对测量设备的校准状态进行的检查。也就是说, 实验室除了按照周检校准计划对测量设备进行检定或校准外, 还要使用适当的方法保证在周期内的测量设备始终处于检定或校准状态, 即确认上次校准时的计

量特性未发生变化。

对 GJB2725A-2001 条文 5.5.10 关于设备周期内的核查要求应从以下 2 个方面理解: 一是设备周期内核查的目的, 是要保持或掌握被核查设备在两次校准期间的校准状态(技术状态)是否满足要求;二是要采用实验室制定的经过评审的核查方法进行核查。这里的设备是指实验室用到的所有有校准、检定和测试要求的各种测试设备(不考虑测量标准)。设备周期内核查的必要性是由实验室利用该设备开展的工作来确定的, 并非所有的测量设备都需要核查, 实验室可以在质量体系文件中, 对需要做期间核查的设备单独做出规定, 明确需要核查的测量设备, 制定具体核查方法, 对制定的核查方法要进行评审, 通过后方可使用。一般应对下列情况的设备进行周期内核查^[4]:

- 1) 开展外场检定、校准或测试的设备;
- 2) 重要检测设备的校准、测试前和结束后;
- 3) 使用频率较大的设备;
- 4) 对测量结果有怀疑时;
- 5) 负责测量设备的人员发生变动的时候;
- 6) 测量设备技术指标处于合格的临界状态;
- 7) 测量设备存放地点和使用环境发生较大变化时。

1.3 测量标准周期内的核查

在 GJB2725A-2001 条文 5.6.3.3 中, 给出了测量标准周期内的核查要求。本条文主要明确了 4 个方面内容: 一是实验室要对需要进行核查的测量标准做出规定;二是要制定具体的核查方法;三是核查方法要经过评审和批准;四是核查要有计划地进行。

是否需要测量标准进行周期内的核查, 应该依据实验室及其测量标准的实际情况来确定。实际工作

收稿日期: 2014-05-28; 收修改稿日期: 2014-06-04

作者简介: 侯兴勃(1967-), 男, 辽宁葫芦岛人, 高级工程师硕士, 主要从事无线电、力学计量等方面研究。

中,对于需要送上级计量技术机构检定的参考标准,考虑到运输环节可能造成的影响,一般都在质量体系文件中做出对参考测量标准进行周期内核查的规定,制定核查方法,编制核查计划,明确核查的时机与频次要求等。

1.4 测试、校准或检定结果的核查

在 GJB2725A-2001 条文 5.9 中,“测试、校准或检定结果的质量保证”是对测量结果的核查要求。可以做如下理解:测量结果的核查是实验室质量控制的重要手段。校准和测试试验室的“产品”就是校准和测试结果,实验室必须对这一产品的质量进行控制,除了需要对使用的测量标准(测量设备)状态进行控制外,还必须对测量结果有直接的质量保证措施——测量结果的核查。在 5.9 中,对于核查数据的记录和分析方式也提出了要求,要便于看出变化趋势,同时建议,当条件具备时,采用统计学方法对结果进行分析。国军标中推荐了 5 种方法。

按照该条文的规定,实验室必须制定核查测试、校准或检定结果有效性的质量控制程序,将其作为程序文件之一。实际工作中,可以把关于核查的规定、核查方法的评审要求和评审程序制定为程序文件,而把具体的核查方法以作业文件形式体现。

2 核查的方法及判定原则^[5]

2.1 测量标准或测量设备周期内的核查方法及判定

实验室日常进行的测量标准和测量设备周期内的核查通常采用以下三种方式进行。

1) 用有证标准物质或有校准值的核查标准进行核查

选择有证标准物质或经上级测量标准校准的测量设备作为核查标准,对测量标准或测量设备的校准状态进行核查时,核查标准应具有接近或优于被核查测量标准或测量设备的准确度。

每次核查时,用被核查测量标准对核查标准进行一组重复测量,计算测量值的平均值为 $\bar{x}_j$,当满足式(1)时可判断测量标准的校准状态受控,否则为失控。

$$|\bar{x}_j - A_s| \leq \sqrt{U_x^2 + U_A^2} \quad (1)$$

式中: $\bar{x}_j$ 为某次核查测量值的平均值; U_x 为 $\bar{x}_j$ 的扩展不确定度; A_s 为核查标准的值; U_A 为 A_s 的扩展不确定度; U_x 与 U_A 具有相同的包含因子。

如果需要长期观察周期内 $\bar{x}_j$ 值的变化,可绘制控制图观察平均值的变化趋势。

当核查标准与被核查标准的不确定度比不大于四

比一,且测量重复性及其他因素引入的测量不确定度可忽略时,若满足公式(2),则可判断测量标准校准状态受控,否则为失控。

$$|\bar{x}_j - A_s| \leq |\Delta| \quad (2)$$

式中: Δ 为被核查测量标准的最大允许误差。

2) 两台相同准确度等级的测量设备比对

当有两台相同准确度等级或技术指标相同的被核查测量设备时,可采用两台测量设备测量同一个分辨力足够的被测件,分别进行相同次数的重复性测量,计算各自测量值的平均值 $\bar{x}_1$, $\bar{x}_2$ 及其扩展不确定度 U_1 和 U_2 (U_1 和 U_2 具有相同的包含因子)。当两个测量值的差值满足公式(3)时,可判断为被核查测量标准校准状态没有发生明显变化。

$$|\bar{x}_1 - \bar{x}_2| \leq \sqrt{U_1 + U_2} \quad (3)$$

3) 多台相同准确度等级的测量设备比对

当有多台相同准确度等级或技术指标相同的被核查测量设备时,用各台测量设备测量同一个分辨力足够的被测件,参加比对的测量设备给出的测量结果的扩展不确定度基本相同,且包含因子形同的前提下,满足公式(4)时,可判断为被核查测量设备校准状态未发生变化。

$$|x_k - \bar{x}_q| \leq \sqrt{\frac{q-1}{q}} U_q \quad (4)$$

式中: x_k 为第 k 台被核查测量设备给出的测量值; $\bar{x}_q$ 为所有参与比对的测量标准给出测量值的平均值; q 为参加比对的测量标准数量; U_q 为被核查测量标准给出的测量结果的扩展不确定度。

2.2 测量结果的核查方法及判定

测量结果的核查是指对校准、检定和测量结果进行核查,验证测量结果的有效性和可信度。除按规定的时间核查外,核查的时机通常是:①当对测量结果表示怀疑时;②验证人员发生变动时;③无论何种原因需要对测量结果的可信度进行核实时。

测量结果的核查方法通常采用以下四种方法进行:

1) 用相同的方法进行重复性测试

对以往的测量结果表示怀疑时,或者当测量标准被带到远离实验室的场所测试返回后需要核查时,可以采用在与原来相同的测量条件下,以相同的方法对同一被测件进行再次重复测试,以核查测量结果。

当测量值之差的绝对值满足公式(5)时,判定测量结果具有计量兼容性。

$$|y - y_0| \leq \sqrt{2U_{y_0}} \quad (5)$$

式中: y 为本次核查测量结果的值; y_0 为原先测量的值; U_{y_0} 为 y_0 的扩展不确定度。

2) 用不同的方法进行重复性测试

可以在与原来相同的测量条件下, 采用不同方法对同一被测件进行重复测量, 两个测量结果之差的绝对值满足 (6) 式时, 判定测量结果是计量兼容的。

$$|y_1 - y_2| \leq \sqrt{U_{y_1}^2 + U_{y_2}^2} \quad (6)$$

式中: y_1 为第一种方法的测量结果; y_2 为第二种方法的测量结果; U_{y_1} 为 y_1 的扩展不确定度; U_{y_2} 为 y_2 的扩展不确定度; U_{y_1} 与 U_{y_2} 具有相同的包含因子。

3) 用保留的被测件进行再校准再测试

用保留的被测件进行再校准或再检测核查时, 保留的被测件应具有较好的稳定性, 必要时应具有较好的分辨力, 使用及存储环境较好, 使用的频度较低。具体核查过程为: 当核查测量设备经校准/检定返回实验室后, 立即对被测件进行第一组测量, 测量 n 次取平均值作为参考值 y_{ref} , 并分析和评定其测量不确定度 $U_{y_{\text{ref}}}$, 其不确定度分量至少包括测量设备引入的测量不确定度和重复性引入的不确定度。通常, 每次核查测量值的不确定度与参考值的不确定度基本一致。

每次核查时, 用测量标准对被保留的被测件进行一组重复测量, 测量次数与获得 y_s 的测量次数相同, 计算测量值的平均值为 y , 当测量值满足公式 (7) 时, 测量标准的校准状态没有显著变化。

$$|y - y_s| \leq \sqrt{2}U_{y_{\text{ref}}} \quad (7)$$

式中: y 为本次核查的测量结果的值; y_s 为核查参考值; $U_{y_{\text{ref}}}$ 为 y_{ref} 的扩展不确定度。

当测量值不满足 (7) 式时, 适当增加核查次数, 证明其不是偶然现象时, 排除保留的被测件本身因素, 则表明测量标准校准状态发生明显变化。

当被核查仪器重新检定或校准, 尤其经调整后, 应重新确定参考值。采用本核查方法时, 若被测件稳定性太差或分辨力太低时, 有可能起不到核查测量设备校准状态的作用。

4) 比较被测件不同测量结果的相关性

某些被测件的几个计量特性间具有理论上的相关性, 通过一个特性测量结果可以推断出另一个特性测量结果的可信度, 可利用这种相关性来核查和分析测量结果的正确性。

3 核查中的问题与对策

具体的核查工作中, 对测量标准外的测量设备的

核查其实对各实验室不是难题, 因为这些测量设备一般都是本实验室参考标准的检定对象, 只需根据需要明确核查参数、范围等即可, 需要指出的是, 核查不是增加检定次数。

测量标准周期内的核查的难点在于实验室参考标准的核查, 尤其对基层计量技术机构更是如此。因为受经费限制, 一般的实验室没有两台以上同准确度等级的测量设备或测量标准, 也不具备满足要求、稳定性好、分辨力足够的被测件, 所以, 尽管理解核查的要求, 但是达不到核查的效果。

建议: 一是在同等级的计量技术机构之间, 对同等级的测量标准采用多台比对方法进行核查; 二是在一定范围内, 由计量主管部门组织, 建立待核查的某一类测量标准的核查标准, 指定某一实验室作为组织实验室, 采用技术能力比对的方式, 对参加实验室的同类测量标准用核查标准进行核查。

GJB2725A-2001 中未提到测量过程的核查, 本文建议等级较高、规模较大的计量技术机构, 对一些准确度高的测量标准采用文献 [6] 中推荐的方法进行核查。

4 结 论

军用实验室的核查工作, 包括测量设备、测量标准和测量结果核查三方面内容, 是实验室进行质量控制的重要手段, 必须引起实验室相关人员和部门、实验室主管部门的高度重视。本文从国军标 GJB2725A-2001 中相关条文出发, 明确了三种核查要求的区别与联系, 针对三种核查要求提出了具体的核查方法和判据, 对核查过程中存在的问题提出了具体的解决办法。

参 考 文 献

- [1] 总装备部. GJB2725A-2001 测试实验室和校准实验室通用要求 [S]. 北京: 总装军标出版发行部, 2001.
- [2] 张键. 计量设备常规期间核查探讨 [J]. 江苏电机工程, 2010, 29 (5): 47-49.
- [3] 总装备部. GJB2749A-2009 军事计量测量标准建立与保持通用要求 [S]. 北京: 总装军标出版发行部, 2009.
- [4] 范红兵, 张洁, 徐向荣. 期间核查在工程检测实验室中的应用 [J]. 实验室研究与探索, 2010, 31 (7): 407-409.
- [5] 陈振林. 海军常用测量标准建立与保持 [R]. 烟台: 海军航空工程学院, 2014.
- [6] 杨在富, 吴新文, 叶德培. 测量过程统计控制 [J]. 计量技术, 2010 (11): 22-25.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.23

影响压力测量审核结果的因素分析

张贤

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 对压力测量审核实际工作中影响评判结果的几个典型因素进行了详细分析, 给出了解决问题的合理化建议, 有助于提高实验室校准结果的准确性, 保证测量审核评判结果的合理有效。

关键词: 测量审核; 折算质量; 高度差; 修约区间

中图分类号: TB935

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0086-02

0 引言

测量审核是将一个性能稳定且具有参考值的样品寄送给实验室, 将实验室校准结果与参考值进行比较, 从而判断该实验室的校准结果是否为满意结果, 要想得到一个客观准确的校准结果, 实验室的标准装置性能是否良好, 校准方法是否正确, 影响量分析的是否全面, 数据处理是否合理都会对校准结果产生影响, 以下从几个常见的压力测量审核问题进行分析总结, 提出一些有针对性的解决方法。

1 专用砝码质量超差问题

选用活塞式压力计作为标准器进行测量审核, 有些实验室的测量结果误差呈线性趋势变化, 原因主要是专用砝码存在以下几个问题:

1) 有的实验室只送检活塞, 不对活塞的配套专用砝码进行量值溯源。

2) 有的实验室虽然送检专用砝码, 得到了实际的砝码质量值, 但由于砝码本身没有调整腔 (一些国外活塞), 上级计量机构无法对砝码质量值进行调整, 只出具了校准证书, 申请实验室没有对校准证书确认是否满足使用要求, 误认为计量没有问题了。

3) 有些实验室使用双活塞式压力计, 共有一套专用砝码, 专用砝码质量允差无法兼顾到两个活塞, 造成输出值有问题。

4) 没有区分折算质量和真空质量, 质量专业按照砝码检定规程一般给出折算质量。折算质量的定义^[1]:

一物体在约定温度和约定密度的空气中, 与一约定密度的标准器达到平衡, 则标准器的质量即为该物体的折算质量。约定温度 t_r 为 20℃, 约定的空气密度 ρ_0 为 1.2 kg/cm³, 砝码折算质量的约定密度为 ρ_{ref} 为 8000 kg/cm³; 压力专业按照活塞式压力计检定规程给出的是真空质量, 两者之间存在差距, 砝码的真空质量值与折算质量值的换算关系为

$$m_{\text{真空}} = m_{\text{折算}} \times \frac{0.99985}{1 - \frac{\rho_{\text{空气}}}{\rho_{\text{砝码}}}} \quad (1)$$

假设空气密度变化不大, 均采用标准空气密度 ρ_0 , 折算质量值为 1 kg, 计算不同的砝码材料真空质量值和折算质量偏离值见表 1。

表 1 不同的砝码材料真空质量值和折算质量值偏离值

参数	砝码材料		
	不锈钢	碳化钨	铝
砝码密度值 /kg · m ⁻³	7800	14000	2700
折算质量值/kg	1	1	1
真空质量值/kg	1.0000038	0.9999357	1.0002946
质量偏离值/kg	0.0000038	0.0000643	0.0002946
相对影响量/%	0.00038	0.0064	0.029

由以上数据可以看出, 砝码的折算质量值, 已不再是该砝码的真空质量值, 两者之间存在着一个偏离量值。偏离量值的大小, 取决于该砝码的实际密度与统一约定密度之间的差。差值越大, 偏离量值也越大, 在砝码不是不锈钢的情况下 (砝码密度偏离 8000 kg/m³ 越大), 真空质量值和折算质量值的偏差越大, 所以

收稿日期: 2014-04-28; 收修改稿日期: 2014-05-13

作者简介: 张贤 (1980-), 女, 工程师, 主要从事压力计量技术工作。

实际工作中一定要将折算质量值换算为真空质量值再进行比较才有意义。

针对以上 4 种问题, 解决办法如下:

1) 活塞式压力计作为标准时, 专用砝码作为主要设备必须溯源, 有砝码计量能力的单位可以自己计量, 但要有证书。

2) 砝码计量后, 将得到砝码折算质量值, 通过公式换算为真空质量值, 将此值与活塞式压力计证书里给出的砝码真空质量值进行比较, 看是否在质量允差内, 要进行确认, 不满足要调整砝码。我所对于计算值与实际值不一致的情况, 一般活塞证书出具校准证书。

3) 针对砝码不可调整或双活塞压力计共用一套砝码情况, 首先要确认, 如不满足要求, 应采取措施: ①利用计算软件进行修正 (工作量比较大, 且不易控制); ②调整砝码在允差内; ③双活塞时, 最好另加工一套砝码。

4) 由计算公式将质量专业给出的折算质量值换算为真空质量值, 再与压力专业给出的真空质量值进行比较, 由质量差值调整砝码或进行修正。

2 “反校法” 存在问题

一些单位用数字压力计做标准时采用的“反校法”, 该方法在计量技术 2002No2 有一篇精密压力仪表仪器半自动化检定系统的文章中详细介绍, 即通过手动操作压力校验器, 将被检压力表的指针固定在整数检定点, 这时读取标准数字压力计的示值, 通过公式被检表读数 = 2 × 检定点实际值 - 标准数字表读数反算出被检精密压力表数值。这种检定方法不符合 JJG 49-2013 弹性元件式精密压力表和真空表检定规程^[2]中对检定条件的要求, 表 2 列举了使用规程检定方法和反校法检定同一块精密压力表得到的对比数据。

表 2 规程检定方法和反校法检定

精密压力表数据对比

MPa

检定点	规程检定方法		反校法检定方法	
	被检表 读数	标准数字表 读数	公式反算出 被检表读数	
10.00	10.00	10.025	9.98	
20.00	20.00	20.033	19.97	
30.00	30.00	30.031	29.97	
40.00	39.95	40.125	39.88	
50.00	49.90	50.182	49.82	
60.00	59.85	60.225	59.78	

由表 2 可以看出, 两种方法得到的数据有差异, 经过分析使用反校法存在以下问题:

1) 读取标准示值时, 示值往往不稳定, 这是由于系统内压力没有稳定造成的, 被检指针表分辨力低, 反映不出系统压力实际情况, 因此误差将不可控。

2) 数据处理即使采用反算法也不合适, 数据是按标准的分辨力读取的, 不符合规程要求, 另外不确定度分析时, 引用标准的分辨力作为分量显然也不合理。

3 “高度差” 存在问题

在压力测量审核中, 无论使用气体和液体, 高度差对测量结果都有或大或小的影响。下面我们就分析一下如何考虑高度差问题。

1) 气柱高度差的计算公式

根据气体密度与压力值之间呈正比关系, 在绝压测量模式表压测量模式时, 可分别用公式 (2)、公式 (3) 表示。

$$\rho = p / 0.1 \cdot 1.2 \tag{2}$$

$$\rho = (0.1 + p) / 0.1 \cdot 1.2 \tag{3}$$

式中: ρ 为气体密度, kg/m^3 ; p 为压力值, MPa。

假设高度差为 5 cm, 根据公式 $P = \rho gh$ 计算在表压测量模式时不同的压力点气柱高度差产生的压力误差影响量见表 3。其中: ρ 为检定时使用介质的密度 (随压力变化的气体密度值); g 为检定地点的重力加速度 (北京为 $9.8015 \text{ m}/\text{s}^2$)。

表 3 表压测量模式时不同压力点气柱高度差产生的压力误差影响量

压力值 /MPa	气体密度值 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	5 cm 气柱高度 差修正值/Pa	5 cm 气柱高度 差相对影响量
0.005	1.26	0.62	1.23×10^{-4}
0.05	1.8	2.88	1.76×10^{-5}
0.5	7.2	3.53	7.06×10^{-6}
1	13.2	6.47	6.47×10^{-6}
2	25.2	12.35	6.17×10^{-6}
5	61.2	30.00	6.00×10^{-6}

由表 3 可以看出, 压力值小于 1 MPa 时, 气柱高度差的影响比较大, 所以在校准准确度等级优于 0.05 级的仪器时需要进行高度差的修正; 压力值大于 1 MPa 时, 气柱高度差的影响较小, 此时可以不进行高度差修正。

2) 液柱高度差

假设液柱高度差为 5 cm, 高度测量误差为 $\pm 0.5 \text{ cm}$,
(下转第 90 页)

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.03.24

直流电阻箱误差对检定二次仪表的影响

詹喻威, 李瑞泉

(中航工业北京航空材料研究院 计量中心, 北京 100095)

摘 要: 直流电阻箱作为温度二次仪表的检定标准, 与其作为电学标准的要求有所不同。本文以某次直流电阻箱的检定数据为例, 通过分析其误差给出了直流电阻箱能否成为二次仪表检定标准的评估方法。所介绍的方法也可作为用电阻箱建标时的评估方法。

关键词: 电阻箱; 二次仪表; 失效评估

中图分类号: TB942

文献标识码: B

文章编号: 1674-5795 (2014) 03-0088-03

1 问题的提出

直流电阻箱作为温度二次仪表的检定标准, 主要用于检定输入类型为 Pt100 的温度二次仪表, 用电阻箱模拟热电阻, 并作为被检表的输入值, 根据二次仪表的显示值与标准值的差来判定被检表是否合格^[1], 根据 JJG 617-1996《数字温度指示调节仪的检定规程》对检定标准器的要求, 直流电阻箱要求误差小于被检仪表允差的 0.2 倍。

通常认为直流电阻箱作为二次仪表的检定标准, 只要检定合格, 就能满足检定二次仪表的要求; 如果电阻箱检定不合格, 就不能用于检定二次仪表。实际工作中发现, 情况并非如此。

直流电阻箱能否作为二次仪表的检定标准, 并不在于其是否检定合格。如果检定合格, 但误差大于 JJG 617-1996 检定规程要求, 也不能用作检定标准使用; 相反, 即使检定不合格, 其误差小于规程要求, 经评估后仍可使用。本文就直流电阻箱与二次仪表之间的转换关系进行讨论, 并就其能否作为二次仪表检定标准给出了评估方法。

2 分析与讨论

作者单位输入类型为热电阻的被检表, 精度等级最高为 0.2 级, 量程范围为 0~300℃, 分辨力为 0.1

℃^[2], 该温控器的最大允许误差为 $300\text{℃} \times 0.2\% + 0.1\text{℃} = 0.7\text{℃}$, 换算成电阻值为 $0.7\text{℃} \times 0.35\text{Ω/℃} = 0.25\text{Ω}$ 。因作为标准的直流电阻箱要求误差小于被检仪表允差的 0.2 倍, 所以电阻箱最大误差应小于 $0.25\text{Ω} \times 0.2 = 0.05\text{Ω}$, 也就是说电阻箱的最大误差在 $\pm 0.05\text{Ω}$ 范围内, 否则就不能作为检定标准使用。

以 ZX25a 型直流电阻箱为例进行讨论。该型电阻箱为 0.02 级, 因其具有接触电阻小、寿命长、精度高和稳定性好等优点, 是检定二次仪表首选标准, 该表阻值调整范围: $0.01 \sim 11111.10\text{Ω}$ ^[3], 各盘的精度等级如表 1 所示。

表 1 电阻箱各盘的精度等级

测量盘	×1000	×100	×10	×1	×0.1	×0.01
精度等级	±0.02%	±0.02%	±0.05%	±0.2%	±1%	±5%

电阻箱某盘某档的最大允许误差 = 测量盘 × 档位数 × 精度等级, 由此公式可得, ×100 盘 3 档的允许误差为 0.06Ω 。作为二次仪表的检定标准, 其误差应小于 0.05Ω 。如果 ×100 盘 3 档的误差恰在两者之间, 即 $0.05\text{Ω} \leq \times 100\text{ 盘 3 档误差} \leq 0.06\text{Ω}$, 则电阻箱在该档合格, 并且当电阻箱在其他档位都合格的话, 该电阻箱可判为合格。在这种情况下, 由于其误差不小于 0.05Ω , 因此检定合格的电阻箱将不能作为二次仪表的检定标准。

相反, 检定不合格的电阻箱有时也能满足作为二次仪表检定标准的要求, 以 ZX25a 型电阻箱某次检定不合格的情况做分析。检定数据如表 2 所示。

收稿日期: 2013-12-20; 收修改稿日期: 2014-01-20

作者简介: 詹喻威 (1974-), 男, 工程师, 从事热工计量测试技术研究。

表 2 电阻箱盘的检定数据 Ω

测量盘	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
×100	100.001	200.003	300.000	399.999	500.009	600.007	700.007	800.011	900.017	1000.02
×10	10.0002	19.9998	29.9995	39.9989	49.9988	59.9994	69.9985	79.9980	89.9979	99.999
×1	0.9990	1.9993	2.9989	3.9996	5.0001	5.9997	6.9997	7.9999	8.9996	10.000
×0.1	0.1001	0.2002	0.3001	0.4002	0.5002	0.6002	0.7003	0.8002	0.9003	1.0004
×0.01	0.0189	0.0243	0.0341	0.0429	0.0585	0.0657	0.0784	0.0841	0.0969	0.1077

根据以上数据并对比各盘的允许误差范围, 可得出表 3 的结论, 该电阻箱在 ×0.01 盘各档示值误差均超出允许误差范围, 判为检定不合格, 因此该电阻箱不能用于电阻测量^[4], 但由下文评估方法可以看到, 电阻箱仍可以作为二次仪表的检定标准。

表 3 电阻箱末盘检定结果 Ω

阻值	允许误差	检定误差	结论
0.01	±0.005	0.0089	F
0.02	±0.0010	0.0043	F
0.03	±0.0015	0.0041	F
0.04	±0.0020	0.0029	F
0.05	±0.0025	0.0085	F
0.06	±0.0030	0.0057	F
0.07	±0.0035	0.0084	F
0.8	±0.0040	0.0041	F
0.09	±0.0045	0.0069	F
0.10	±0.0050	0.0077	F

3 评估方法

利用表 2 给出的检定数据, 可对直流电阻箱能否作为二次仪表的检定标准进行评估, 本文给出了两种评估方法。

3.1 最小分辨力评估法

依据 JJG 617-1996 检定规程的要求, 电阻箱的误差小于被检仪表最大允许误差的 0.2 倍。因最小分辨力必定远小于最大允许误差, 如果测量误差小于最小分辨力的 0.2 倍, 则该误差小于被检表最大允许误差的 0.2 倍, 满足使用要求。所以根据检定数据, 确定测量盘引入的误差小于最小分辨力的 0.2 倍, 就可以判断该电阻箱符合检定二次仪表的要求, 可作为检定标准使用; 反之, 该方法失效。

一般而言, 对于精度较高的二次仪表, 其最小分辨力为 0.1℃, $0.1^{\circ}\text{C} \times 0.2 = 0.02^{\circ}\text{C}$, 换算成电阻, 1°C 相当于 0.35 Ω, 因此 $0.02^{\circ}\text{C} \times 0.35 \Omega/^{\circ}\text{C} = 0.007 \Omega$, 因此, 如果电阻箱最小盘的误差在 ±0.007 Ω 范围内, 就满足该要求。

根据检定数据: ×0.01 盘最大误差为 0.0089 Ω, 大于 0.007 Ω 的要求, 因此用最小分辨力方法尚不能确定该电阻箱能否作为二次仪表的检定标准。

3.2 最大允差评估法

上面已计算过, 如果电阻箱的最大误差在 ±0.05 Ω 范围内, 该电阻箱可以作为检定标准使用, 反之, 则不能作为检定标准。计算电阻箱的最大误差有几种不同的方法可供选择。

1) 找出误差最大值, 并送检测出实际误差的方法
找出各档 (因 Pt100 分度表的值最大仅为 313 Ω, ×100 盘只用 1~3 档, ×1000 盘不用, 不予考虑) 误差最大的点, 以表 2 检定数据为例, ×100 盘第 2 档点为误差最大的点, 误差是 0.003 Ω; ×10 盘为第 1 点 0.0002 Ω, ×1 盘为第 5 点 0.0001 Ω; ×0.1 盘为第 7, 9 点 0.0003 Ω; ×0.01 盘为第 1 点 0.0089 Ω。因此 215.71 Ω 和 215.91 Ω 这两个阻值的误差最大, 有条件的话, 可以把电阻箱再次送检, 核实电阻箱这两个电阻值的实际误差, 如实际误差小于 0.05 Ω, 则说明该电阻箱的最大误差小于 JJG 617-1996 检定规程的要求, 可以作为检定标准使用, 反之, 则不能使用。

2) 各档最大误差累加的方法
由于再次送检将无谓地增加费用并占用时间, 可以利用现有的数据进行粗算, 即将 215.71 Ω 和 215.91 Ω 两值, 用证书给出各点的误差进行相加, 因证书给出的误差经过修约, 因此误差应该是偏大的, 如果相加后的误差仍满足要求, 那么就说明该电阻箱可以使用, 如不满足仍须按上一种方法确认是否可用。误差相加后为 (0.003 + 0.0002 + 0.0001 + 0.0003 +

0.0089) Ω = 0.0125 Ω, 远小于 0.05 Ω 的要求, 因此可判断该电阻箱可作为检定标准使用。

3) 粗略计算方法

我们知道, 电阻箱不合格的原因为各盘在使用中由于磨损致使接触电阻不断增大, 而最小盘的使用频率最高, 磨损也最大, 从理论上讲, 最小盘给出的阻值的误差应该最大, 因此可以用最小盘误差的 5 倍来计算最大误差, 为 $0.0089\ \Omega \times 5 = 0.0445\ \Omega$, 也小于 0.05 Ω, 因此也能判断电阻箱可以作为检定标准使用。

从以上评估可以看出, 后两个评估方法均可判断电阻箱在末盘超差的情况下, 电阻箱仍满足作为二次仪表的检定标准的要求, 也即电阻箱检定不合格, 但其仍然可以作为二次仪表的检定标准。

(上转第 87 页)

检定使用介质为癸二酸 (密度值 $916\ \text{kg/m}^3$), 计算在不同的压力点液柱高度差产生的压力误差影响量见表 4。

表 4 不同压力点液柱高度差产生的压力误差影响量

压力值/MPa	5 cm 液注高度差 相对影响量/%	0.5 cm 液注高度 差相对影响量/%
0.05	0.9	0.09
0.1	0.4	0.04
0.5	0.09	0.009
1	0.04	0.004
2	0.02	0.002
6	0.007	0.0007

由表 4 可以看出, 压力值小于 2 MPa 时, 即使对液柱高度差进行了修正, 但由于高度差测量不准代入的影响量也是非常大的, 所以建议检定准确度等级优于 0.05 级的仪器时, 应采用气体作为工作介质, 避免高度差对校准结果产生过大的影响; 压力值小于 6 MPa 时, 应考虑液柱高度差对测量结果带来的影响。

4 平均值修约与不确定度关系问题

测量审核中是以多次重复测量的平均值作为校准结果, 如何对平均值进行数据修约, 使其保留适当的有效数据, 这点对评判结果很重要。例如一台 0.1 级测量范围为 0 ~ 25 MPa 的数字压力计, 在 20 MPa 点进行了 6 次重复测量, 测量数据为 19.995, 19.995, 20.000, 19.995, 20.000, 20.000 MPa, 测量结果的

4 结论

通过本文的讨论可以看出, 电阻箱作为二次仪表检定标准, 其检定结果并不能说明是否可用, 必须经过评估方可确定是否符合二次仪表检定标准的要求。

参 考 文 献

[1] 国家技术监督局. JJG 617-1996 数字温度指示调节仪的检定规程 [S]. 北京: 中国计量出版社, 1996.
[2] 日本岛电公司. SR93 温控仪使用说明书 [Z].
[3] 上海电工仪表厂. ZX25a 型直流电阻箱使用说明书 [Z].
[4] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 982-2003 直流电阻箱检定规程 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2003.

扩展不确定度为 0.0063 MPa, 正确的平均值应该修约为多少, 有的认为多保留一位安全数字应该是 19.9975 MPa, 其实测量结果的修约与不确定度有很大的关系, 我们应该根据不确定度对测量结果进行修约, 修约原则^[3]为: U 的第一个有效数字为 1, 2 时, U 取两位有效数字; 第一位有效数字为 3 或 3 以上时, U 只取一位有效数字, 对舍弃数据按照 1/3 原则进行取舍; 测量结果的修约区间应等于 U 的修约区间。

根据修约原则 0.0063 的第一位有效数字大于 3, 所以 U 只保留 1 位数字, 对第 2 位数字按照 1/3 原则进行修约, 得到 0.0063 $\xrightarrow{\text{保留 1 位有效数字}}$ 0.006, 再按照不确定度的修约区间对测量结果进行修约, 得到 19.9975 $\xrightarrow{\text{修约区间 } 0.001}$ 19.998。

5 结束语

通过对以上问题的梳理和分析, 提示我们在进行压力测量审核工作中, 一定要认真分析实际工作情况, 消除类似砝码质量超差及高度差等影响因素, 确保标准器量值传递正确, 被检器校准结果修正合理, 只有这样, 最终才能得到客观合理的能反映实验室能力水平的结果。

参 考 文 献

[1] 国防科工委科技与质量司. 力学计量 [M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
[2] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 49-2013 弹性元件式精密压力表和真空表检定规程. 北京: 中国质检出版社, 2013.
[3] 国防科工委科技与质量司. 计量技术基础 [M]. 北京: 原子能出版社, 2002.

第十四届全国压力计量与测试技术学术交流会征文通知

为了加强国内计量技术机构、高等院校、科研院所和有关仪器制造企业的技术交流,促进压力计量与测试技术的发展,中国计量测试学会压力计量专业委员会拟于2014年9月召开“第十四届全国压力计量与测试技术学术交流会”。本次会议向国内外相关领域的科研、教学及生产工作者广泛征集论文,由会议组委会聘请专家负责论文的审阅工作。审查通过的论文将在中文核心期刊《计测技术》上以增刊形式出版。

本次会议由中国计量测试学会压力计量专业委员会主办,会议时间及地点另行通知。

本届大会组委会指定《计测技术》杂志及中国计量测控网(www.jlck.cn)作为本届大会的合作媒体,承担本届会议论文出版、企业宣传及网络推广方面的工作。

一、征文内容

1. 压力计量测试技术发展现状和趋势;
2. 压力计量测试新技术、新理论、新方法;
3. 压力计量标准装置研究、压力量值溯源与传递技术、压力现场与在线校准技术;
4. 新型压力仪表及其在线工业测量仪器、新型压力敏感器件及工艺装备、新型压力传感器技术;
5. 动态压力测量与信号恢复技术、特殊及极端条件下压力测量技术、流场测量与显示技术、压力测量不确定度评定与误差分析;
6. 武器装备试验压力测试技术;
7. 电力、石油石化、气象、汽车、材料、医疗等领域压力计量测试技术;
8. 航空、航天、兵器、船舶、核工业、电子等领域压力计量测试技术;
9. 其他与压力测量与控制相关的研究成果。

二、征文要求

1. 符合征文内容的学术论文、研究报告,未在国内外公开发行的刊物上发表过。
2. 全文尽量不超过8000字(包括图表)。正文前请附不少于200字的中文摘要、关键词;文题下方写明作者姓名、单位名称和邮政编码,在文后注明第一作者出生年、性别、职称和学历(硕士及以上)、所从事的工作或研究方向。
3. 作者文责自负,涉及保密部分,要求自行解密处理,论文保密审查由作者本人及单位负责。
4. 建议用Word软件进行编排处理,版芯设计为A4尺寸,双栏排;文中物理量用斜体,矢量及矩阵符号用黑斜体,单位符号和词头用正体;图、表、照片要精选,三者宽度尽量不超过8.5 cm;参考文献引用应包括主要作者、文献名、出版地、出版者、出版年,如果是期刊文章,应注明刊名,年卷(期)号、起止页码。具体参考格式如下:

[1] 吴今培. 智能故障诊断与专家系统[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[2] 武云. 数据采集系统中的触发设计[J]. 计算机测量与控制, 2004, 12(4): 6-9.

5. 提交的论文, 请作者自留底稿, 来稿一律不退。来稿请附上详细通信地址(含邮编)及手机号码。

6. 论文提交截止日期: 2014年6月30日。论文请以附件形式发送电子邮件至《计测技术》编辑部邮箱 yali304@126.com, 注明压力会议投稿。

7. 2014年7月20日以前通知作者文章是否被录用。论文录用后, 将向作者发送电子版录用通知, 每篇论文(不超过4页, 8000字)收取版面费1000元, 超过4页每页增收300元。

三、组委会联系人

其他未尽事宜请与组委会联系, 联系方式如下:

1. 李程 通讯地址: 北京市海淀区温泉镇航空三〇四所力学研究室, 邮编: 100095

电话: 010-62457141 E-mail: licheng@cimm.com.cn

2. 悦进 通讯地址: 北京市北三环东路18号中国计量科学研究院热工所, 邮编: 100013

电话: 010-64525116 E-mail: yuej@nim.ac.cn

中国计量测试学会压力计量专业委员会

第十五届中国湿度与水分学术交流会 会议及征集论文通知

一、会议宗旨

由中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所、《计测技术》杂志社和中国计量测控网联合举办第十五届中国湿度与水分学术交流会。本次会议宗旨是促进我国湿度与水分科学技术的发展；促进湿度与水分科学技术与经济的结合；提高湿度与水分计量与测试技术水平，为我国湿度与水分行业和领域工作者提供一个交流平台。

本届会议将开展学术交流并展示湿度、温度、水分和气湿敏测试仪器方面的最新产品。报告最新技术成果，就有关湿度和水分方面的检定规程和校准规范进行宣讲。

欢迎各有关单位和个人撰写论文、交流产品信息。欢迎各方面的人士光临会议。

二、会议组织

主办单位：中国仪器仪表学会湿度与水分专业委员会

承办单位：中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所

协办单位：《计测技术》杂志社，中国计量测控网

三、时间地点

拟定会议召开时间、地点：2014 年 9 月 17 日 ~ 19 日重庆；会务费：1200 元/人

四、会议内容

1. 大会报告：由国内业内专家对湿度、温度、水分、传感器和气湿敏等相关领域的技术进展及市场趋势做综述性的专题报告。

2. 技术交流：湿度、温度、水分、传感器和气湿敏传感技术进行交流。

3. 规程宣贯：由标准起草人、标准考核员就有关湿度与水分专业检定规程和校准规范进行宣讲、技术培训。

4. 产品展示：大会主会场设置新产品展览展示台。

5. 表彰活动：评选优秀论文，并对入选的优秀论文颁发 < 优秀论文证书 >。

6. 学会活动：召开湿度与水分专业委员会十五届第一次全体委员会议。

五、会议技术交流

1. 本次学术交流会主要就以下几方面征文。

湿度、温度、水分和气湿敏传感技术；新方法、新原理的研究；标准仪器、校准测试方法的研究；仪器应用研究和对仪器的改进；测量结果的误差分析；国际湿度、水分和气湿敏传感技术新方法、新原理、新标准的最新进展。

2. 论文要求

1) 符合会议内容的学术论文、研究报告等均在应征之列，已在公开发行的刊物上发表的论文不再征集。

2) 来稿用 word 排版，图片、公式清晰规范，符合一般投稿要求，全文一般不超过 8000 字。正文前请附中文摘要、关键词；文题下方写明作者姓名、单位名称和邮政编码，在首页下方注明第一作者出生年、性别、职称和学历（硕士及以上）、所从事的工作或研究方向。

3) 涉及秘密事项的，请作者与所在单位保密部门解密处置，文责自负。

4) 会议论文由中文核心期刊《计测技术》以增刊形式出版。2014 年 7 月 30 日前通知作者文章是否被录用，对录用论文的作者发送电子版录用通知，每篇论文（不超过 4 页，8000 字）收取版面费 1000 元，超过 4 页每页增收 300 元。

请将论文发至组委会专设邮箱：chinashidu2014@163.com

会议论文截稿日期为 2014 年 7 月 17 日。

有关会议事项我们将及时在中国湿度网（www.chinashidu.com.cn）和中国计量测控网（www.jlck.cn）网站上及时公布。

六、联系方式

会议筹备组联系电话

冯燕 010-62457145 手机：15001281300 邮箱 chinashidu2014@163.com

中国仪器仪表学会分析仪器学会
湿度与水分专业委员会