

計測技術

第36卷

3
2016

METROLOGY & MEASUREMENT TECHNOLOGY

第36卷



6270A

模块式压力控制器/校准器

您可使用一台仪器来校准宽范围的压力计和传感器

6270A 的压力量程覆盖从低差压到20 MPa (3000 psi), 完全满足绝大多数压力计和传感器需求。两种准确度等级可选, 0.02% 满量程或0.01% 读数, 使您既能满足准确度要求, 又不超出预算限制。

得益于模块式设计, 6270A 非常灵活, 能够在同一主机中安装不同准确度等级的模块。对于要求高准确度的压力范围, 您可购买高准确度水平的模块; 对于其他压力范围, 则可以购买准确度稍低、更经济的模块。



福禄克公司计量校准部

官方网址: cn.flukecal.com
客服热线: 400-810-3435
有关产品说明及技术指标以英文资料为准。
如有更改, 恕不另行通知。

© 2016 Fluke Corporation.
03/2016



Fluke Calibration. Precision, performance, confidence.™

Electrical | RF | Temperature | Pressure | Flow | Software

FLUKE

Calibration

計測技術

JI CE JISHU

1958年创刊 双月刊

2016年第36卷第3期(总第218期)

2016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

烟气在线监测系统现状及思考

常颖 刘文敬 王振国 韩瑞国 (1)

理论与实践

视觉测量中动态编码点的设计与检测

李晓东 刘巍 杨帆 张洋 高鹏 贾振元 (5)

基于USMN的大型操纵性水池基础轨道空间位置测量方法研究

周闻青 冷建兴 叶欣 卢歆 (10)

一种红外被动定位方法的工程实现

祁蒙 邱朝阳 (14)

新技术新仪器

一种新型带有自标定的数字准直瞄准测量系统

高廷 孙安斌 马骊群 甘晓川 曹铁泽 王继虎 (18)

电动汽车能量管理单元电路板自动测试系统

刘奕任 齐铂金 郑敏信 (22)

船舶装备安装基准相对姿态测量系统研究

王爱军 何小妹 李昆 王一璋 (28)

一种光电编码器检测装置的研制与应用

黄春华 (31)

基于F-P滤波器的高速驱动电路设计与仿真

孙义斌 盛楠 (34)

计量、测试与校准

保偏光纤截止波长测量技术研究

全治科 高业胜 张洪喜 (39)

高静压差压校准方法分析比较

李群 李鑫武 (44)

ARINC825总线校准方法研究

肖彬 王文健 王德玲 王建强 (48)

利用计算机视觉系统,实现指针表和无接口数字表的

自动化检定 章晓明 (51)

经验与体会

表面温度动态校准中导热平板对时间常数测试影响分析

赵楠 吕国义 王莉 刘丹英 (55)

摆式加速度计零位偏离故障分析

张朋好 姜程 崔奇 杨国军 胡慧颖 (58)

扭簧比较仪的调修技术

戴庆生 李凌梅 赵华一 杨婧孜 (61)

改造CTJ07型光学经纬仪测试台

陈祖南 (63)

基于VBA的千分尺证书记录系统

郑发路 袁洪 李在峥 杨明君 (65)

水三相点瓶自动冻制保存装置复现性研究

陈炜 杨新圆 (68)

民机工业计量测试技术规范研究与体系建设思考

胡帅 张学涛 代洁 樊哲 (71)

动态与信息

“世界计量日”宣传活动在清华大学举办(43) 福禄克红外热像仪告诉您如何控制3D打印工艺(54) 约克仪器南京办事处成立(57) 新书《聚焦超级核能

锁定核辐射及其计量(60) 《化学分析计量》2016年第3期目次(74)

Main Contents

Survey and Review

- (1) Present Situation and Thoughts of On-line Flue Gas Monitoring Systems
..... CHANG Ying, LIU Wenjing, WANG Zhenguo, HAN Ruiguo

Theory and Practice

- (5) Design and Recognition of Dynamic Encoded Targets for Vision Measurement
..... LI Xiaodong, LIU Wei, YANG Fan, ZHANG Yang, GAO Peng, JIA Zhenyuan
- (10) A Measurement Method of Maneuvering Tank Rotary Bridge Based on USMN
..... ZHOU Wenqing, LENG Jianxing, YE Xin, LU Xin
- (14) The Realization of an IR Passive Positioning Method in Engineering
..... QI Meng, QIU Chaoyang

New Technology and Instrument

- (18) A Novel Digital Collimation Telescope with Self-calibration
... GAO Ting, SUN Anbin, MA Liqun, GAN Xiaochuan, CAO Tieze, WANG Jihu
- (22) Printed Circuit Board Assembly (PCBA) Automatic Test System for Energy Management Unit of Electric Vehicles LIU Yiren, QI Bojin, ZHENG Minxin
- (28) Study on Relative Attitude Measurement System for Ship-equipment Installation Reference WANG Aijun, HE Xiaomei, LI Kun, WANG Yizhang
- (31) A Design and Application of Photoelectric Encoder HUANG Chunhua
- (34) Design and Simulation of High-speed Driving Circuit for a F-P Filter
..... SUN Yibin, SHENG Nan

Metrology, Measurement and Calibration

- (39) Investigation on the Cutoff-wavelength Measurement of the Polarization-maintaining Optical Fiber QUAN Zhike, GAO Yesheng, ZHANG Hongxi
- (44) Analysis of Calibration Method for Differential Pressure at High Static Pressure
..... LI Qun, LI Xinwu
- (48) Research on Calibration Method for ARINC825 Bus
..... XIAO Bin, WANG Wenjian, WANG Deling, WANG Jianqiang
- (51) Automatic Verification of the Pointer Meter and no Interface Digital Meter Using Computer Vision System ZHANG Xiaoming

Experience and Learning

- (55) Analysis of Influence of Thermal Conductive Plate on Time Constant During Dynamic Surface Temperature Calibration
..... ZHAO Nan, LYU Guoyi, WANG Li, LIU Danying
- (58) Fault Analysis on Crossover Position Deviation for the Pendulous Accelerometers
..... ZHANG Penghao, JIANG Cheng, CUI Qi, YANG Guojun, HU Huiying
- (61) The Repair Method of Microcaters
..... DAI Qingsheng, LI Lingmei, ZHAO Huayi, YANG Jingzi
- (63) Modification of CTJ07 Optical Theodolite Test Bench CHEN Zunan
- (65) The Micrometer Calibrating Certificate Recording System Based on VBA
..... ZHENG Falu, YUAN Hong, LI Zaizheng, YANG Mingjun
- (68) Study of Reproducibility of Automatic Freezing and Saving Device in the Water Triple Point Cell CHEN Wei, YANG Xinyuan
- (71) Thoughts about Research and System Construction of Technique Standard of Metrology and Measurement in Civil Aircraft Industry
..... HU Shuai, ZHANG Xuetao, DAI Jie, FAN Zhe

METROLOGY & MEASUREMENT TECHNOLOGY

(Bimonthly)

Vol.36 No.3 2016 (Total No.218)

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 Weihu 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.1674-5795.2016.03.01

烟气在线监测系统现状及思考

常颖, 刘文敬, 王振国, 韩瑞国

(天津市计量监督检测科学研究院, 天津 300192)

摘要: 固定污染源排放的烟气会对环境造成污染, 对其进行科学监测至关重要。本文介绍了现有的烟气在线监测系统, 包括空气质量自动监测系统、烟气排放连续监测系统、差分光学吸收光谱法在线连续监测系统、物联网下无线传感器网络技术在线监测系统等, 介绍了每个系统的组成、技术特点、监测方法、实际应用和发展方向, 并从量值溯源和远程校准两个方面对烟气在线监测系统与计量系统的关系进行了阐述。

关键词: 烟气; 在线监测技术; 计量; 固定污染源

中图分类号: TB99

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 03-0001-04

Present Situation and Thoughts of On-line Flue Gas Monitoring Systems

CHANG Ying, LIU Wenjing, WANG Zhenguo, HAN Ruiguo

(Tianjin Institute of Metrological Supervision Testing, Tianjin 300192, China)

Abstract: The flue gas emitted from stationary pollution sources has greatly increased pollution to the environment, and it is very important to scientifically monitor the flue gas. In the paper, the authors introduce the status of the on-line flue gas monitoring systems, including automatic air quality monitoring system (AQMS), continuous emission monitoring system (CEMS) based on differential optical absorption spectroscopy (DOAS), on-line wireless sensor network monitoring system under the internet of thing. The structure of every on-line flue gas monitoring system, technical specification, practical applications and development direction have been described. And the relationship between the on-line gas monitoring systems and metrological systems is discussed in this paper.

Key words: flue gas; on-line monitoring technology; metrology; fixed pollution source

0 引言

固定污染源是指排放污染物的固定设施, 火电厂、冶金厂和水泥厂是主要的固定污染源企业。固定污染源排放的污染物主要是二氧化硫 (SO_2)、氮氧化物 (NO_x) 和总悬浮颗粒物 (TSP), 这些污染物排入大气, 会造成光化学污染、酸雨等环境污染, 危害人体健康。

随着我国国民经济的迅猛发展, 环境污染已成为一个十分突出的问题, 频发的雾霾天气也使得治理和控制烟气中的有毒有害气体和颗粒物十分必要。烟气排放组分的复杂性和工业现场环境的恶劣性给烟气排放的监测带来极大的困难, 尤其是气态污染物含量的准确测量尤为突出。

我国工业烟气排放监测采用常规的方法, 一般是用烟气专用采样头深入烟道内进行样品的采集, 在实

验室中对采集的样品进行分析测定, 从而测出烟气中污染物的含量。烟气分析方法主要有奥式气体分析仪器法、色谱分析法、红外分析法等。奥式气体分析仪器法是利用不同溶液来吸收气体样品中的不同污染物组分, 从而达到定性定量测量的目的, 该仪器结构简单, 购买成本小但运行成本高, 试剂和人员对分析结果的准确度有很大的影响; 色谱分析法利用色谱柱将烟气样品中的污染物逐一分离, 根据色谱图进行面积归一化计算出各组分的含量, 分析精确度非常高, 但由于色谱柱特别容易阻塞, 对样品质量的要求也特别高; 红外分析法利用物质对不同波长红外线辐射的特征吸收来测定气体的浓度, 可以测定复杂气体组分的样品。目前的烟气分析仪不能提供长期、实时、系统的测试数据, 因而需要更加方便的在线监测方法来准确测定烟气中的污染物。

1 烟气在线监测系统

随着科学技术和网络技术的不断进步, 目前固定

收稿日期: 2016-02-26; 修回日期: 2015-03-15

作者简介: 常颖 (1986-), 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事环境与能源计量的研究。

污染源污染气体在线监测系统主要有空气质量自动监测系统 (AQMS)、烟气排放连续监测系统 (CEMS)、差分光学吸收光谱 (DOAS) 法在线连续监测系统、物联网下无线传感器网络技术在线监测系统等, 烟气在线监测系统的广泛应用和不断完善, 对于烟气在线监测技术的发展有着很大的促进作用。

1.1 空气质量自动监测系统 (AQMS)

空气质量自动监测系统 (Air Quality Monitoring System, 简称 AQMS) 需要在重点监控区域设置子监测点, 进行连续的空气质量管理, 定期与总站进行通讯和数据传输, 形成一个对该区域空气质量进行采样和测定的完整网络。自 1983 年北京市从美国 TE 公司引进 AQMS, 目前在内地约有 200 多个 AQMS 在运转。

AQMS 的组成主要有采样系统、监测仪器、校准设备、数据处理设备、通信设备和支持设备等, AQMS 的技术发展经历了以化学分析原理为基础的湿法 (上世纪 50 年代~90 年代) 到以物理光学原理为基础的干法 (上世纪 60 年代~现在) 到以差分吸收光谱为主的光谱技术法 (上世纪 80 年代~现在)。

湿法监测仪器的传感器采用库伦池, 基本原理是化学法和电化学法, 需要使用大量的溶液和试剂, 数据的准确性取决于试剂和人员操作, 因此逐渐被干法监测仪器所取代; 干法监测仪器的基本原理是物理法和物理化学气相法, 干法监测仪器在检出限、漂移、线性、重复性、精度等各项性能指标均优于湿法监测仪器, 且维护和修理更加方便, 数据受人员操作影响小; 差分吸收光谱为主的光谱技术将在 1.3 中进行详述, 区别于光谱技术, 湿法监测仪器和干法监测仪器被称为传统仪器。

近年来, 出现了新的监测仪器技术——大气探测激光雷达系统及技术。大气探测激光雷达系统主要由激光发射系统、望远镜接收系统和信号检测系统等组成, 具有易于接触探测点、探测范围广、探测隐蔽性强、可实现大范围实时探测等优点。差分吸收激光雷达 (Differential Absorption Lidar, 简称 DIAL) 技术即是一种大气探测激光雷达技术, 该技术可以测量城市上空的 NO_x , SO_2 , O_3 , CH_4 等气体组分的三维立体分布, 波长范围 1.59~1.64 μm , 测量光程可达几十公里, 可监测烟气的非法偷排, 但由于价格昂贵, 污染物的最低检测限也不太理想, 目前还在研究阶段。

AQMS 在运行中需要对监测子站进行优化设计, 组成“监测仪器—数据通信—计算机”网络, 可以迅速收集和处理监测数据, 得到区域污染现状和污染变

化规律, 供监测部门和研究人员使用。

1.2 烟气排放连续监测系统 (CEMS)

烟气排放连续监测系统又称固体污染源烟气排放连续监测系统 (Continuous Emissions Monitoring System, 简称 CEMS), 用于连续自动监测固定污染源的污染物排放浓度, 适用于火电厂等连续废气排放量的监测, 将仪器安装在固定污染源上, 可实时在线监测二氧化硫 (SO_2)、氮氧化物 (NO_x)、颗粒物的排放浓度和排放量, 同时将监测的数据实时传送到环保监控中心。该系统需参照执行国家环境保护总局制定的 HJ/T 75-2007《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》和 HJ/T 76-2007《固定污染源烟气排放连续监测系统技术要求及检测方法》。CEMS 自上世纪 80 年代开始在我国大型火电厂安装使用, 目前全国已安装了 2 万多套。

CEMS 按照取样方法^[1]可分为三种: 稀释法 CEMS、直接抽取法 CEMS 和原位直接测量法 CEMS。其中稀释法需要使用干净干燥的空气进行稀释取样, 稀释探头是保障测量准确性的关键配件; 直接抽取法不需要稀释空气, 但前端需要带过滤器, 样气从烟道经过过滤器抽到分析仪器进行分析; 原位直接测量法是将监测仪器直接安装在烟道内对烟气进行测量, 不需要将样气从烟道中抽出。

针对不同污染物, CEMS 的分析测量方法更加多样。 SO_2 测量方法有紫外荧光法、非色散红外法 (Non-dispersive Infrared, 简称 NDIR 法)、紫外吸收法; NO_x 测量方法有不分光红外法、化学发光法 (Chemiluminescent Detector, 简称 CLD 法)、脉冲荧光法; 粉尘测量方法有激光散射法、 β 射线法、激光后散射法。

其中, 紫外荧光法测量 SO_2 是指烟气在 190~230 nm 紫外光下, SO_2 分子受激发生成激发态, 再由激发态返回基态时发出荧光, 测量荧光强度即可得到 SO_2 气体浓度, 此方法灵敏度高, 可检测到 10^{-12} 级别的低浓度气体, 适用于稀释法 CEMS; NDIR 法利用气体对红外线光谱能量的吸收在波长上具有选择性对气体进行定性定量测量, 具有很好的性价比, 可同时测定多种组分气体, 适用于直接抽取法 CEMS; CLD 法是烟气中的 NO 或者利用铂催化技术由 NO_2 转化的 NO 与臭氧发生反应, 发光强度与气体浓度成正比, 适用于稀释法 CEMS。

目前, CEMS 分析测量方法的发展方向主要有傅立叶红外监测法和线状光谱技术 (又称可调谐二极管激光分析技术)^[2], 傅立叶红外监测法是一种全谱分析技术, 利用红外光谱的吸收信息可以确定分子的化学成

分,达到准确的定性和定量分析,设定参数后不仅可以连续自动地进行 SO_2 和 NO_x 的监测,还可以监测出复杂烟气中其他化学组分的含量;可调谐二极管激光分析技术是一种新的痕量气体分析方法,它的线状光谱谱宽窄到 10^{-2}nm 数量级,可以有效地排除其他气体组分干扰。

CEMS 一般由气体分析仪,粉尘分析仪,温度、压力、流速监测仪,样气采集系统,样气预处理系统,保护反吹系统,自动标定系统,系统控制与数据采集系统等部分组成^[3]。随着计算机通信技术的发展,通用分组无线服务技术 (General Packet Radio Service, 简称 GPRS)、ADSL 宽带网络也相继应用在 CEMS 上,该系统实现了实时、远程、大数据量的数据采集和传输等功能,具有适应性强、安装方便、性能稳定等特点。

1.3 差分光学吸收光谱 (DOAS) 法在线连续监测系统

随着现代光谱测量技术的发展,不同于湿法和干法传统监测方法,由于光谱技术的探测灵敏度高,可达 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ 级,分子光谱具有“指纹”特征,该技术在大气污染气体监测中得到日益广泛的应用,非常适合大范围的在线监测,相比于传统监测方法的费用和耗时都低很多。

差分光学吸收光谱 (Differential Optical Absorption Spectroscopy, 简称 DOAS) 是一种光谱监测技术,最早该技术用于研究大气层中的痕量气体成分 (如甲烷、臭氧等),可通过长光程吸收低浓度气体成分,达到准确测量的目的。DOAS 是被瑞典 OPSIS 公司于上世纪 80 年代作为商品推向市场的,用于环境空气监测和污染源监测。DOAS 遵循的理论基础是 Lambert-Beer 定律,该技术就本质来说是基于分子对光辐射的吸收,通过分析某一波段的吸收光谱来鉴别气体成分,并根据吸收强度来确定气体含量,进一步推演出微量气体的浓度。近年来国际出现了很多基于 DOAS 的新技术,例如 MAXDOAS, Tomographic DOAS 和 LP-DOAS^[4-6] 等。在烟气在线监测系统中,可测量 200 ~ 250 nm 附近的吸收光谱,来定性定量烟气中 SO_2 , NO , NO_2 和 NH_3 等有害气体组分,还可以用 DOAS 方法反演出上述气体的浓度^[7],消除烟气中烟尘、水汽等其他组分的影响。

DOAS 技术可以实现一台仪器多种痕量物质的高敏度实时测量,原则上从紫外到近红外波长区的任何一种光吸收物质都可以被探测到,使用时不需要用常规

气体校准,采用非接触测量的光谱技术校准,避免了测量对象的化学变化、采样器壁的吸收损失等误差源的影响^[8]。DOAS 技术已经在烟气排放监测领域得到广泛的应用,和其他传统光学监测方法相比,可同时监测多种成分,漂移小,污染物浓度在其量程范围内线性好,平时的维护和保养也相对简单。

1.4 物联网下无线传感器网络技术在线监测系统

无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, 简称 WSN) 是由安装在监测区域的大量廉价传感器节点组成,传感器可以经过无线方式通信,因此 WSN 网络设计灵活,设备的位置可以随时变化,并能实现 WSN 跟互联网进行有线或者无线方式的连接。相比于传统的有线网络在线监测,WSN 具有安装、维护、管理方便,系统可随时扩展的优点。

物联网 (Internet of Things, 简称 IOT) 的概念是 Auto-ID 实验室于 1999 年提出的,将微小的识别装置放置在书、鞋、汽车等物体上,就可以知道物体的位置、状态等信息,实现智能化的管理,Auto-ID 实验室关于物联网的概念是以无线传感器网络和射频识别技术为支撑技术的。

物联网通过无线传感器网络技术、射频识别技术、纳米技术、智能嵌入技术、全球定位系统技术与互联网连接,可以实现智能化定位和监控。无线传感器网络技术下物联网在线监测系统无需人为操作,信息可以自处理,应用范围广泛,实现人类社会与物理系统的整合^[9]。

烟气在线监测系统由于地理范围广泛而分散,包含的信息量和数据量也更加巨大,需要由无线传感器网络技术组成一个物联网,通过传感器节点等感知设备获取监测仪器上的各种信息,如烟气浓度、烟尘浓度、温湿度、排气量等,并接入互连网络实时传送到监测部门。

2 烟气在线监测系统与计量系统的关系

2.1 烟气在线监测系统的量值溯源

目前烟气在线监测系统主要依据烟气分析仪检定规程^[10]在示值误差、重复性和稳定性等方面进行检定或校准,烟气浓度的基标准溯源到质量,通过称重法来实现气体浓度的定标,同时利用气瓶来实现各个仪器间的校准和量值的传递,该检定/校准方法对烟气在线监测系统的量值准确统一发挥了极其重要的作用。但这必然会带来以下几个问题:一是气瓶内的标准气体会受到气瓶内吸附的其他杂质气体的影响,而且带

来航空运输的难度；二是随着气瓶使用压力的降低，气瓶内气体的成分会发生改变，而且这个改变是不可控制的；三是称重法在获得 $10^{-6} \sim 10^{-12}$ 级别浓度的气体时所能达到的极限浓度和不确定度比较大。这些问题势必会导致测量烟气浓度的色谱或光谱仪器的量值不一致性，而光腔衰荡吸收光谱法（Cavity Ring-Dawn Spectroscopy, 简称 CRDS）是目前国际上公认的痕量气体成分准确测量的方案，可用于多种气体分子光谱的测量，利用 CRDS 技术测量空气污染物中 NO_2 的浓度低于 10^{-9} 量级^[11]；利用 CRDS 技术探测 CO_2 ，在实验室条件下能够检测 10^{-9} 甚至低于 10^{-9} 量级的气体浓度^[12]。2002 年以来，Tiger 推出了 MTO-1000, Laser-Trace 等系列产品，可检测 CH_4 , O_2 , NH_3 , C_2H_2 等气体，CRDS 在痕量气体检测方面的应用会越来越广泛^[13]。

不同于气瓶的称重法溯源到质量标准，CRDS 可以溯源到化学标准，反映单个分子的能级跃迁，最终决定目标气体浓度是空腔的衰荡时间和充满目标气体的衰荡时间之差，它的信噪比和灵敏度均比传统方法高 3~4 个数量级，见表 1。

表 1 直接吸收光谱与光腔衰荡光谱参数对比表

方法	光程/m	灵敏度	信噪比
直接吸收光谱	1	10^{-6}	1000 :1
光腔衰荡光谱	10 000	10^{-13}	1800 000 :1

化学计量的准确性来源于纯品，最好可达 7 个 9 至 10 个 9，是理想的新一代气体计量基标准，把气体成分溯源到分子的吸收谱线上，可以利用纯品的分子结构的吸收谱线信息来获得浓度信息，从而对标准气体进行准确定值，同时用标准气体来现场校准各种测量烟气浓度的仪器。目前国际上已经研发出基于稳频的快速扫描光腔衰荡光谱法（Frequency Stabilized CRDS, 简称 FARS-CRDS），FARS-CRDS 比 CRDS 的测量时间由原来的 100 s 缩短到 0.01 s，信噪比也由原来的 $10^4 :1$ 提高到了 $10^5 :1$ 。随着 CRDS 技术的不断发展，可以用该技术来进行烟气在线监测系统的化学计量溯源，对标准气瓶中的标准气体进行准确定值，使得用标准气体校准的在线烟气监测系统的相对不确定度更小，监测部门获得的监测数据更加准确。

2.2 烟气在线监测系统的远程校准

远程校准包括传统计量的几个要素：高等级计量标准、被校仪器、检定规程或校准规范、数据采集与数据处理，远程校准可借助网络传输技术由位于其他

地方的有关人员进行实时、异地、远程操作，按授权的不同，远程操作可以包括校准参数的设定、现场传感器信号的获取、数据处理及不确定度分析等^[14]。随着物联网信息技术的不断发展，远程校准^[15]可以更好地借助网络或其他通讯手段控制被校准仪器、传输标准信号和校准数据，可应用于烟气在线监测系统的校准。

首先将标准气体送到现场，经过远程培训的现场工作人员可以通过网络视频与计量站的专业人员进行沟通，通过物联网和互联网可以直接把数据传回计量站；当遇到技术问题时计量站可组织专家通过网络视频进行会诊，还可以直接得到仪器生产厂商的技术支持；温湿度环境数据也可以在物联网上监控，计量站根据监测数值修正自己的计量标准^[16]。

物联网下无线传感器网络技术在线监测系统的实现可以进一步促进远程校准的发展，实现计量机构数据与客户数据的远程或实时共享，避免了以往计量工作人员现场计量或送检计量的人为和环境误差，提高了计量工作的质量和效率。另外，远程校准自动化系统还可以对被校准仪器的异常状况进行实时监控与分析，及时发出报警信息，使得计量工作更加快捷有效。

3 结束语

近年来，随着网络化和智能化水平的不断提高，烟气在线监测技术也在不断发展进步。新技术新方法的不断出现，需要计量机构对现有理论、方法和规程规范等进行全面的系统研究，对计量基标准、计量标准设备、测量不确定度、结果报告等进行系统性完善和更新，以保证被校准仪器和监测数据的准确性和有效性，加快政府对烟气排放的监控进程。

参 考 文 献

- [1] 郜武. 烟气连续监测系统 (CMES) 技术及应用 [J]. 中国仪器仪表, 2009, 1 (1): 43-47.
- [2] 杨凯, 周刚, 王强, 等. 烟尘烟气连续自动监测系统技术现状和发展趋势 [J]. 中国环境监测, 2010, 26 (5): 119-121.
- [3] 胡春华, 郑玲哲. SO_x 、 NO_x 测定技术的最新进展 [J]. 环境科学与技术, 1999 (2): 46-48.
- [4] PLATT U. Mini MAX-DOAS-an introduction [R]. Bremen: Institute of Environmental Physics University of Heidelberg, 2006.
- [5] 刘文清. 环境污染光学遥测技术与仪器进展 [R]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2005.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.02

视觉测量中动态编码点的设计与检测

李晓东, 刘巍, 杨帆, 张洋, 高鹏, 贾振元

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对机器视觉动态测量中编码点的使用需求, 提出了一种基于频率编码的动态编码点。在测量过程中, 动态编码点按照固定的频率闪烁, 将编码点的闪烁频率作为编码信息。动态编码点由静态定位区与动态编码区组成, 其中, 静态定位区用于对动态编码点特征圆的识别与定位, 编码点的编码信息储存在动态编码区中。根据动态编码点的结构, 设计了编码点的检测与解码算法, 实现了动态编码点的快速检测。编码点提取实验结果表明, 动态编码点编码方案简便稳定, 便于布置, 易于检测和识别, 满足设计要求。

关键词: 机器视觉; 动态测量; 编码点; 图像处理; 特征提取

中图分类号: TB853.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 03-0005-05

Design and Recognition of Dynamic Encoded Targets for Vision Measurement

LI Xiaodong, LIU Wei, YANG Fan, ZHANG Yang, GAO Peng, JIA Zhenyuan

(College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A dynamic encoded target based on stroboscopic information is proposed for meeting the demand of coded targets in the dynamic measurement of machine vision. The dynamic encoded targets flicker according to the fixed frequency in the measurement. The flicker frequency of targets are used to encode information. The dynamic encoded targets consist of static location features and dynamic coding features. The static location features is used to recognize the position of dynamic encoded targets. The coded information is stored in the dynamic coded features. The detection and decoding algorithm of dynamic encoded targets are designed based on the dynamic coding structure to realize rapid recognition of targets. The experimental results of the extraction of dynamic encoded targets show that the proposed targets with dynamic coding information can be steadily extracted and they are easy to arrange and identify. Thus, the dynamic encoded targets can satisfy the requirements of dynamic visual measurement.

Key words: machine vision; dynamic measurement; encoded targets; image processing; feature extraction

0 引言

在双目立体视觉测量中, 为实现被测特征从二维图像平面到三维空间的快速重建, 需要利用编码点来匹配两台相机采集到的图像, 建立同一特征在左右两幅图像中的对应关系^[1-2]。此外, 针对一些尺寸较大的零件, 需要通过多视数据拼接的方法来实现整体测量, 在多视数据拼接的过程中, 利用编码点的自动检测和

匹配, 可以方便快速地建立局部坐标系与全局坐标系的坐标转换关系^[3-4]。因此, 编码点在视觉测量中应用广泛, 在特征的自动化快速匹配与重建中起到了至关重要的作用。目前常用的编码点主要为二维平面编码点, 平面编码点可直接粘贴于被测物体的表面, 在测量时, 利用相机采集编码点上特征的形状和位置, 对照编码表获取特征不同的排列方式所代表的信息, 实现对编码点的识别。

近年来, 随着对机器视觉法测量速度与测量精度的要求不断提高, 基于双目视觉的动态扫描测量法应用越来越广泛^[5-6]。测量过程中, 利用具有高速采集功能的工业相机, 拍摄投射在被测零件表面的扫描光条等特征, 通过匹配重建, 实现对零件的快速高精度三维测量^[7]。在动态测量中, 同样需要用到编码标记点^[8], 然而, 目前常用的平面编码点存在以下问题: 首先, 由于普通编码点采用粘贴的布置方式, 每次测量前都需要繁

收稿日期: 2016-04-01; 修回日期: 2016-04-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2014CB046504); 国家自然科学基金资助项目 (51227004); 国家自然科学基金资助项目 (51375075)

作者简介: 李晓东 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大视场测量技术, 数据拼接及图像处理; 刘巍 (1979-), 男, 内蒙古赤峰人, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要研究方向为精密测量、精密控制、微执行器、微机器人等。

琐的布点过程,降低了测量效率;其次,由于平面编码点采用回光材料制作,需要均匀的补光才能得到较好的采集效果,动态测量过程中,相机采集帧频高,若补光不均匀或曝光时间较短,会产生明暗不均的情况,解码效果不理想,易造成误匹配;最后,由于普通平面编码点本身存在制造误差,若被测物表面不平整,编码点粘贴后产生变形,增大测量误差。

针对二维平面编码点在视觉动态测量中存在的问题,根据编码点的设计需求,本文在普通圆形标记点的基础上,增加时间维度的信息,提出了一种基于频率编码的动态编码点,对编码点的结构进行设计,并对动态编码点的检测与识别方法进行了研究,通过实验,验证了动态编码方案的可行性。

1 动态编码点的设计

在进行编码点设计时,需要考虑两方面的内容:首先,编码点应易于定位和识别,在采集到的图像中,可以将编码点快速地从背景中分离出来。为此,需要对编码点的形状和布置方式进行选择。为保证编码点能够更好地适应零件表面并与测量背景具备较高的对比度,本文选择圆形特征点作为编码点的提取特征,并利用投影仪投影的布点方式。在投影区域内,将编码点设置为白色,背景部分设置为黑色。通过投影编码点,可以保证编码点的灰度值在左右两个相机中都比较均匀,提高识别精度。此外,圆形特征在图像中易于识别,圆形标记点本身的形状信息也可为后续图像处理提供约束。

其次,编码点需要携带固定不变的编码信息。根据动态测量的原理,对圆形特征点在时间维度上进行结构设计,动态编码点的结构如图1所示。动态编码点的结构分为两部分,分别为静态定位区和动态编码区。在静态定位区,编码点保持常亮的状态,即投影出的圆形特征点区域为白色,以便于视觉测量系统对所有编码点的位置进行定位。定位结束后,动态编码点进入动态编码区,编码点开始按照一定的频率 f_f 闪烁,即圆形特征点在白色与黑色之间循环变化,输出编码信息。

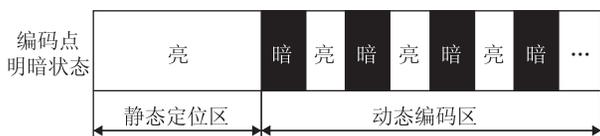


图1 动态编码点结构

在双目视觉动态测量中,双目相机是以高帧频进行连续采集的。为保证动态编码点提取的稳定性,在设计动态编码点时,必须结合双目相机的动态采集能力。动态采集过程中,相机的触发过程如图2所示。目前,工业相机的触发方式大多数为脉冲信号上升沿触发,设相机采集帧频为 f_c ,单帧图像采集周期为 T_c ,相机曝光时间为 T_e ,总测量时间为 T_m 。

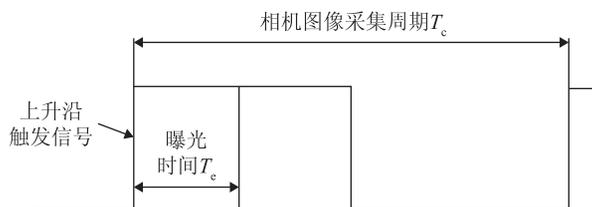


图2 工业相机触发过程

根据上述相机的触发过程和动态采集特性,基于采样定理,圆形动态编码点的闪烁频率 f_f 需满足:

$$f_f = \left\{ f \mid \frac{1}{T_m} < f < f_c, \frac{f_c}{f} \in N \right\} \quad (1)$$

在测量过程中,使用相机连续采集圆形编码点,得到图像序列。当图像中编码点亮时,设圆点灰度值为 g_1 ,将图像的编号用二进制数1表示;当编码点暗时,设灰度值为 g_0 ,将图像的编号用二进制数0表示。根据图像中编码点的明暗状态,将图像序列转化为一个二进制数的数列。由于编码点是按照固定的频率闪烁的,因此该二进制数序列为循环数列,设该数列为 $\{a_n\}$,即存在常数 K ,使得

$$a_{n+K} = a_n, n \in N \quad (2)$$

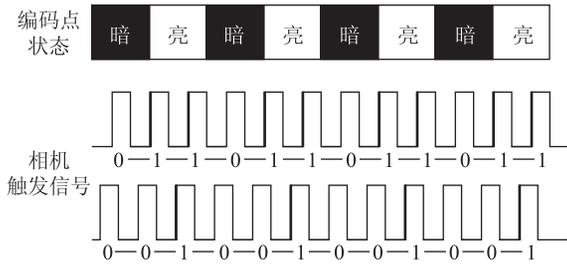
使式(2)成立的最小自然数 K 为数列 $\{a_n\}$ 的循环周期, K 可由式(3)求得,有

$$K = \frac{T_f}{T_c} = \frac{f_c}{f_f} \quad (3)$$

式中: T_f 为编码点闪烁的周期。

在视场内布置闪烁频率不同的动态编码点,则每个编码点均对应各自的循环周期。通过图像处理,计算每个编码点的循环周期 K_n ,根据 K_n 即可实现编码点的匹配,因此,可将 K_n 作为第 n 个编码点的编码值。针对采集帧频 $f_c = 10$ Hz的双目采集系统,图3给出编码值 $K = 3$ 的编码点的编码方案示例。

在该编码方案中,编码点闪烁周期 $T_f = 0.3$ s,相机单帧图像采集周期 $T_c = 0.1$ s。采用该编码方案,由于相机触发脉冲信号与编码点编码区起始位置的相对

图3 编码点编码方案 ($K=3$)

关系不固定，因此通过图像采集和图像处理后，同一个编码点可能对应两种不同的二进制数列，分别为 $\{011011011011\cdots\}$ 和 $\{001001001001\cdots\}$ 。虽然二进制数列不同，但是这两个二进制数列的循环周期 K 均为 3，即两个二进制数列对应着同一个编码点，该编码点的编码值为“3”。因此，相机触发信号与编码点闪烁周期之间的关系并不影响编码点与编码方案对应关系的唯一性，不会产生误匹配的情况。

在动态测量过程中，利用双目视觉测量系统采集动态编码点，通过求解编码点所对应的循环周期，实现编码点的识别，从而实现同名编码点的自动匹配。

2 动态编码点的检测

为实现动态编码点的采集，搭建双目视觉动态采集系统如图 4 所示。系统采用投影仪 (EPSON EB-C301MS, 亮度 3000 lm) 投影动态编码点，并利用两台工业相机 (VC-12MC-M, 分辨率 3072×4096 , 最高帧频 60 Hz) 获取编码点图像序列。

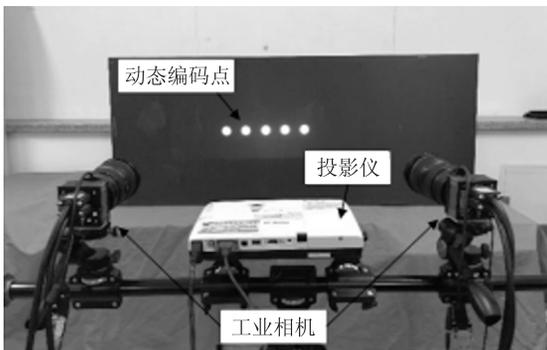


图4 双目视觉动态采集系统

在测量过程中，利用相机图像采集卡向双目相机发出连续触发脉冲，使两台工业相机以相同的帧频对动态编码点进行连续采集。

采集结束后，左右相机分别得到一个包含动态编码点的图像序列。利用 Matlab 对图像序列进行处理，实现编码点的检测识别，动态编码点检测流程如图 5

所示。编码点检测时，首先对采集得到的图像进行预处理，滤除图像的噪声，将动态编码点从背景中分离出来，然后通过特征识别算法，对两相机拍摄得到的编码点进行定位，得到编码点中心的图像坐标。最后，通过解码，获得编码点的编码值，根据编码值实现编码点的自动匹配。

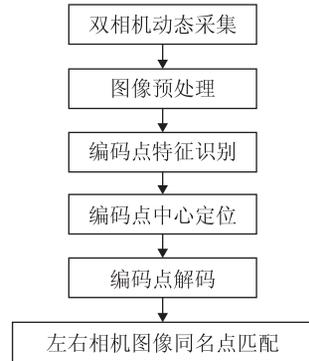


图5 动态编码点检测流程

2.1 图像预处理

视觉测量的任务之一就是识别图像中包含某些特征的区域。在相机采集到的图像中，包含了丰富的信息，然而其中有些信息是测量任务不关心的背景信息，甚至还存在一些由于电子干扰而导致的图像噪声。为保证编码点的特征能够被识别出来，需要在提取编码点之前对采集到的图像进行一定的预处理：首先对原始图像进行滤波，获得高质量的图像；然后，选取合适的阈值，对图像进行二值化处理；利用二值化后的图像，对已滤波的图像上无用特征的轮廓进行提取并进行分割，将背景区域滤除，只保留感兴趣的区域。

2.2 动态编码点的识别定位

由于在测量过程中，背景中存在一些亮度较高的无关特征，仅仅通过图像预处理无法将这些杂散点滤除掉，因此需要基于编码点特征圆的特征，对图像进行处理，滤除非目标信息，从而保证编码点的精确提取。根据特征圆的形状信息和灰度信息，分别采用面积准则、圆形度准则和灰度均匀准则对编码点进行识别。

1) 面积准则

由于投影在物体表面的编码点特征圆在被测物体表面所占的像素数可以提前标定，因此可以利用编码点的面积作为约束，对图像进行处理，将面积不符合要求的特征区域剔除。面积准则为

$$N_p > N_l \quad (4)$$

式中： N_p 为特征区域所占像素数； N_l 为面积阈值，可在测量前对编码点特征圆进行标定得出。

2) 圆度准则

由于动态编码点采用的是圆形特征点,因此,在采集到的图像中,编码点应满足圆度准则:

$$e = \frac{4\pi S}{l^2} > e_t \quad (5)$$

式中: e 为特征区域的圆度; e_t 为圆度的阈值; S 为连通区域的面积; l 为连通区域的轮廓周长。圆度 e 的值在 0 到 1 的范围内,对于正圆, $e=1$ 。若目标区域越接近正圆,则其圆度值越接近 1。选取合适的阈值 e_t , 可以实现对编码点特征圆的筛选。

3) 灰度均匀性准则

由于编码点特征圆是由投影仪投影产生的,其所在区域的灰度值分布相对非编码点区域要更加均匀,因此采用灰度均匀性准则对图像中的所有连通区域进行判断。灰度判据可表示为

$$D_g = \frac{1}{n} \sum_{(i,j) \in S} (g(x_i, y_j) - \bar{g})^2 < D_t \quad (6)$$

式中: D_g 为目标区域的灰度方差; $g(x_i, y_j)$ 为像素坐标 (x_i, y_j) 处的灰度值; \bar{g} 为目标灰度值的平均值; D_t 为灰度阈值。

通过编码点识别,可以有效滤除非目标连通区域,最终得到图像中编码点所在的连通区域,然后采用灰度重心法对编码点的中心进行准确的定位,得到编码点中心坐标:

$$x_c = \frac{\sum_{i=0}^u \sum_{j=0}^v x_i g(x_i, y_j)}{\sum_{i=0}^u \sum_{j=0}^v g(x_i, y_j)}, y_c = \frac{\sum_{i=0}^u \sum_{j=0}^v y_j g(x_i, y_j)}{\sum_{i=0}^u \sum_{j=0}^v g(x_i, y_j)} \quad (7)$$

2.3 动态编码点的解码

得到编码点特征圆的中心 (x_c, y_c) 后,即可对编码点进行解码。根据图 1 可知,编码点由静态定位区和动态编码区组成的。因此,先要对动态编码起始位置进行准确判断。由于编码点从静态定位区过渡到动态编码区时,编码点特征圆的灰度会发生明显的变化,因此,可以将图像序列前后两帧图像中特征圆的灰度差作为编码起始位置的判断依据。为简化图像处理过程,提高图像处理速度,可以直接用特征圆圆心 (x_c, y_c) 所在像素格的灰度值代替特征圆的灰度值,灰度差判据可表示为

$$g_n(x_c, y_c) - g_{n-1}(x_c, y_c) \geq g_t \quad (8)$$

式中: $g_n(x_c, y_c)$, $g_{n-1}(x_c, y_c)$ 分别为图像序列第 n 张和第 $n-1$ 张图片中特征圆圆心 (x_c, y_c) 所在像素格

的灰度值; g_t 为灰度阈值。

图像采集过程中,由于存在环境光,图像背景的灰度值并不为 0,因此, g_t 的取值并不是固定的,而是跟周围环境亮度有关,可以通过在采集编码点前对背景的灰度值进行测量来选取合适的 g_t 。

得到编码起始位置后,即可对后续的编码区进行解码。在进行编码点特征圆灰度判断时,同样是采用编码点中心的灰度值代表其整体灰度,根据第一章可知,编码点亮时的灰度值为 g_1 , 编码点暗时的灰度值 $g_0 = g_t$ 。对编码图像序列内每帧图像中编码点中心的灰度进行判断,得到循环数列 $\{a_n\}$, 数列中的每一项满足:

$$\begin{cases} a_i = 0, & g_i - g_0 < |\sigma| \\ a_i = 1, & g_i - g_1 < |\sigma| \end{cases} (i \in N) \quad (9)$$

式中: σ 为保证算法稳定性所采用的误差项。当图像灰度值受环境光的影响产生微小变化时,不会影响到图像序列灰度值的判断。

数列 $\{a_n\}$ 的循环数 K 即为所采集到的动态编码点的编码值。

3 动态编码点提取实验

实验过程中,设置工业相机的帧频 $f_c = 10$ Hz, 单次采集周期 $T_c = 0.1$ s, 曝光时间 $T_e = 20$ ms, 投影编码点的位置如图 4 中所示,从左至右五个动态编码点的频闪周期分别为 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8 s, 对应的编码值 K_n 分别为 2, 3, 4, 6, 8。

利用两台工业相机分别对动态编码点进行连续动态采集,获得编码点的图像序列,选取左相机采集到的连续六帧图像如图 6 所示。根据第 2 章中提出的编码点识别与检测方法,对动态编码点进行检测,分别得到左右相机拍摄到的编码点阵的定位与解码结果如表 1 和表 2 所示。

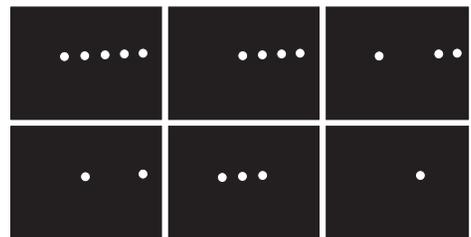


图 6 编码点图像序列

由表 1 和表 2 编码点的提取结果可以看出,所有编码点均可以准确地定位并识别,编码点的编码值与其理论设计值完全相符,编码点识别率为 100%。

表1 左相机采集到的动态编码点

序号	编码点中心坐标	编码数列	K
1	(1182.19, 1060.70)	{1,0,1,0,1,0...}	2
2	(1621.17, 1065.09)	{1,1,0,1,1,0...}	3
3	(2055.77, 1069.45)	{1,1,0,0,1,1,0,0...}	4
4	(2453.56, 1073.67)	{1,1,1,0,0,0,1,1,1,0,0,0...}	6
5	(2837.32, 1077.52)	{1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0...}	8

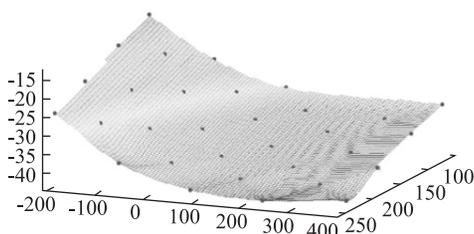
表2 右相机采集到的动态编码点

序号	编码点中心坐标	编码数列	K
1	(1732.84, 1021.20)	{1,0,1,0,1,0...}	2
2	(2128.72, 1006.92)	{1,1,0,1,1,0...}	3
3	(2554.11, 991.65)	{1,1,0,0,1,1,0,0...}	4
4	(2980.84, 976.63)	{1,1,1,0,0,0,1,1,1,0,0,0...}	6
5	(3428.09, 960.42)	{1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0...}	8

为进一步验证动态编码点的可靠性,利用双目动态测量系统对投影有动态编码点的航空复材零件进行三维重建。测量过程中,将动态编码点投影到零件表面,通过左右相机分别获取动态编码点的图像序列并对编码点解码,根据码值自动匹配左右相机采集到的编码点,从而实现动态编码点的高精度三维重建,利用重建出的测量点完成航空复材零件三维自由曲面的拟合,重建结果如图7所示。



(a) 零件表面的动态编码点



(b) 三维自由曲面拟合示意图

图7 基于动态编码点的航空复材零件三维重建

从图7中可以看出,零件表面32个动态编码点均实现了准确的自动匹配,并实现了点的自动三维重建。

针对曲率变化较小的零件,利用本文提出的动态编码点,可以实现编码点的快速精确匹配与三维重建。然而,当被测零件曲率变化较大时,投影点在零件表面会发生严重的变形,编码点的中心在左右相机采集到的图像中存在差别,影响编码点的三维重建精度。因此,本文所提出的动态编码点目前主要应用于曲率变化不大的零件测量,后续将进一步对编码点中心的提取方法进行优化,以增强动态编码点的适应性。

4 结论

根据工业相机连续采集的原理,本文设计了一种基于频率编码的动态编码点,并提出了动态编码点的识别与检测方法。动态编码点采用投影的方式进行布置,布置方法简单,并保证了编码点在连续采集过程中的高对比度与高可靠性。通过编码点识别实验与航空复材零件三维重建实验,验证了本文所提出的动态编码点的稳定性,识别率达到100%。此外,本文所提出的动态编码点易于定位,提取过程快捷,检测结果准确,满足了视觉动态测量中编码点的使用要求,为双目视觉动态测量中的快速匹配与大视场拼接提供了有力的保障。

参考文献

- [1] 宋丽梅,陈昌曼,陈卓,等.环状编码标记点的检测与识别[J].光学精密工程,2013(12):3239-3247.
- [2] 解则晓,高翔,朱瑞新.环状编码标记点的高效提取与鲁棒识别算法[J].光电子·激光,2015(03):559-566.
- [3] 戴相龙.三维非接触式测量中编码标志的研究与应用[D].西安:西安电子科技大学,2014.
- [4] 苏新勇.数字近景工业摄影测量中编码标志点识别与检测技术的研究[D].济南:山东理工大学,2014.
- [5] 周森,郭永彩,高潮.基于激光扫描的大尺寸圆锥体几何测量系统[J].中国激光,2014(5):217-226.
- [6] 董明利,许晓臣,王君,等.大尺寸动态视觉测量系统的并行加速[J].光学精密工程,2015(10):2909-2918.
- [7] ZHANG Yang, LIU Wei, LI Xiaodong, et al. Accuracy improvement in laser stripe extraction for large-scale triangulation scanning measurement system[J]. Optical Engineering, 2015, 54(10).
- [8] 刘建伟,梁晋,梁新合,等.大尺寸工业视觉测量系统[J].光学精密工程,2010,18(1):126-134.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.03

基于 USMN 的大型操纵性水池基础轨道空间位置测量方法研究

周闻青¹, 冷建兴², 叶欣¹, 卢歆¹

(1. 浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州 310039; 2. 浙江大学海洋学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 在进行大型工程测量时, 单台、单站测量仪器通常不能完成全部的测量任务, 需要使用多站或多台仪器在不同的位置实施测量。本文介绍了一种基于统一空间测量网络 (Unified Spatial Metrology Network, USMN) 的测量方法, 该方法对多台多站的测量数据的处理, 相比传统的拟合拼接法不会引入较大的累积误差。基于 USMN 的测量方法通过重新分配拟合要素的权重, 来降低多次拼接引入的累积误差, 提高多站测量方法的精度, 为大型工程测量精度的提高提供了有效的方法。通过对两种方法的多站数据拼接并观测末站数据和首站数据的闭环性及拟合圆的径向跳动, 显著地观察到本文介绍的方法闭环性更好, 拟合的圆径向跳动更小, 相较传统方法更加接近测量的真实情况。

关键词: 大型操纵性水池; 统一空间测量网络; 测量方法; 偏差; 回转轨道预埋件

中图分类号: TB22; TB92; TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2016) 03-0010-04

A Measurement Method of Maneuvering Tank Rotary Bridge Based on USMN

ZHOU Wenqing¹, LENG Jianxing², YE Xin¹, LU Xin¹

(1. Zhejiang Province Institute of Metrology, Hangzhou 310039, China; 2. College of Ocean, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: This article introduces a measuring method based on Unified Spatial Metrology Network (USMN). In large-scale engineering measurement, one instrument in one position cannot fulfill the task. Moving instrument to different positions or more than one instrument is needed. Instead of accumulating error by Best-fit in traditional way, the USMN can reduce the cumulative error by redistributing the weights of fitting elements. Therefore it increases the accuracy of multi-station measurement method, and provides an effective means in large scale engineering measurement. By comparing and observing the close degree of end-to-end and changes in radial direction of two methods, the USMN has been found closer to real situation than the traditional one.

Key words: maneuverin tank; USMN; measurement method; error; embedded parts

0 引言

大型操纵性水池^[1]是用于测试水下航行器回转与控制性能的综合性设施, 在船舶操纵性能的设计与研究方面, 为船舶和 underwater 航行器提供全方位的操纵性能试验验证条件^[2], 具有不可替代的功能。作为操纵性水池回转测量桥运动过程中起固定与支撑作用的中央岛和回转桥承压回转轨道 (简称回转轨道), 担负着整个测量系统的固定支点和回转承压支撑, 中央岛与回转轨道的同轴度, 将对后续的回转测量系统的稳定性、

可靠性和灵敏度有极大影响, 是施工过程控制的关键。为确保操纵性水池中央岛与回转轨道的同心同轴, 在操纵性水池的基础结构设计及施工工艺设计过程中, 已经采取了各种定位措施, 以尽可能确保操纵性水池的中央岛和回转轨道具有较高的同轴度, 其中对中央岛和回转轨道的预埋件采用模板定位法加以初始定位, 使得中央岛和回转轨道部位的预埋件尽可能满足设计的初始定位要求。但由于整个操纵性水池总体建筑结构的庞大 (直径达 45 m), 施工过程受施工条件、环境温度等因素影响, 实际安装施工达到的定位精度与设计精度存在误差, 为尽可能在后续设备安装调试过程中修正、补偿前期施工的定位误差, 需要对操纵性水池基础完工状态进行精确测量, 确定中央岛和回转

收稿日期: 2016-03-29; 修回日期: 2016-04-12

作者简介: 周闻青 (1965-), 女, 高级工程师, 主要从事长度矢量测量方法研究。

轨道预埋件的形状位置误差,为后续安装施工修正、补偿提供信息。

面对如此庞大的测量对象,选择使用激光跟踪仪作为标准测量仪器^[3]。激光跟踪仪是一种高精度、便携式的大型空间三维坐标测量系统,测量速度快、范围大,测量精度高,被称为可移动的三坐标测量机,适用于大尺寸、高精度的工业测量。

本次测量对象的直径 45 m、深度 6 m,中央岛直径 3 m,需要测量基础轨道预埋件的空间位置度及轨道与中央岛的同心度。现场不易将仪器架设在中央岛上,只能放置在水池边,这样在一站上测量出所有的测量点会因为测量距离翻倍引入较大的测量不确定度,测量结果不便于后续的使用。因此考虑将仪器分别放置在水池均匀分布的四个不同位置对轨道预埋件空间位置进行多站测量,这种多站测量方法各测量点与仪器的距离带来的不确定度较小,但是需要将多站的测量数据进行拟合拼接。传统的最小二乘拟合算法^[4]经过多次拟合会引入较大的累积误差,本文采用 USMN 统一空间测量网络的方法,根据测量公共点的不确定度,分配各个公共点的拟合权重,将多次转站拟合所造成的累积误差降低。该方法既降低了由于测量距离引入的不确定度,又降低了多次拼接带来的累积误差。

1 USMN 及模型匹配的基本原理

1.1 USMN 的原理

USMN 是一种先进的数据分析工具^[5],它可以通过多台仪器或一台仪器多个测量位置的公共点,将这些不同位置上的测量仪器统一在同一空间测量网络内。相对于其他的数据分析工具,它有以下几个方面的优势:

- 1) 同时解决了多站测量的网络;
- 2) 智能使用了测量信息;
- 3) 产生公共点的理想网络;
- 4) 为所有被测量提供不确定度;
- 5) 可以被用来表征测量系统的性能;
- 6) 同时通过数字化和图形化提供测量结果。

USMN 采用智能加权平差进行处理,为每个拟合元素分配权重,进行分配权重时,不确定度较大的公共点或要素分配到的权重较小,在拟合结果中,这些权重较小的点拟合效果会比较差,反之亦然。传统的最小二乘法是一种所有测量点权重相同的拟合方式,是加权平差法的一种特殊形式。

因此,确定各站之间各公共点转换方程的权重值

成为加权平差法的关键所在。

以两站激光跟踪仪为例,由于激光跟踪仪的测距精度高于测角精度,用不确定度点云来表示测量点的误差分布,则有如图 1 所示的针对一点不同站仪器测量结果存在的可能差异。

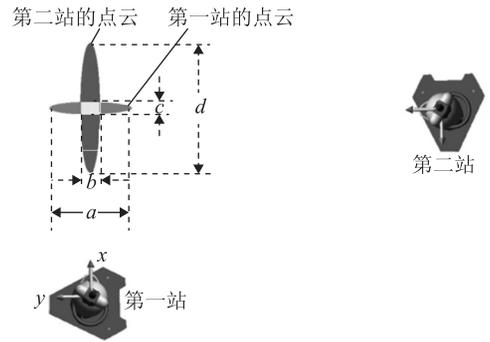


图 1 转站公共点示意图

如图 1 所示的两站跟踪仪对同一测量点 p 实施测量,距目标较近的第一站测量点形成一个较小的绿色点云,其长轴长度为 a ,短轴长度为 c ,距目标较远的第二站形成一个较大的红色点云,其长轴长度为 d ,短轴长度为 b 。设点 p 在第一站测得的点坐标为 $p_1(x_1, y_1, z_1)$,在第二站测得的点坐标为 $p_2(x_2, y_2, z_2)$ 。加权平差法通过云图赋予转站过程中每个转站方程不同的权重。一种典型的权重分配方式见公式 (1)。

$$\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{(a^2+b^2)}} x_i = \frac{1}{\sqrt{(a^2+b^2)}} f_1(x_2, y_2, z_2, \alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z) \\ \frac{1}{\sqrt{(c^2+d^2)}} y_i = \frac{1}{\sqrt{(c^2+d^2)}} f_2(x_2, y_2, z_2, \alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z) \\ w_z z_i = w_z f_3(x_2, y_2, z_2, \alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z) \end{cases} \quad (1)$$

式中: (α, β, γ) 为对应三轴的旋转角度; $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 为对应三轴的相对平移量; f_1, f_2, f_3 为对应三轴三个转站映射函数; w_z 为 z 方向上的权重。

多个点形成多个 (1) 式,对其进行拟合,完成拟合权重的重新分配。根据每个测量点坐标方向上的不确定度,在拟合结束时,可以给出一个新的 USMN 测量点 $p_{USMN} \circ p_{USMN}$ 根据各个拟合点空间位置以及其不确定度的比例接近真实位置。

这种 USMN 加权平差的拟合方式得到的结果相比最佳拟合法更加显著地接近真实情况。它与最佳拟合法的区别是最佳拟合法可能在经过多站转站时,因为 A 站中一些不确定度较大的点将误差累加到 B 站,同样 B 站也会将之前的累积误差都转移到 C 站,这样的

累加最直观的体现就是在测量较大的圆周时经过多次转站，末站和第一站的相同测量点之间闭环性较差，而 USMN 就能取得较好的闭环效果，更加接近真实的情况，这将在本文的后面通过数据验证。

2 USMN 实验分析

本次测量的操纵性水池模型如图 2 所示。

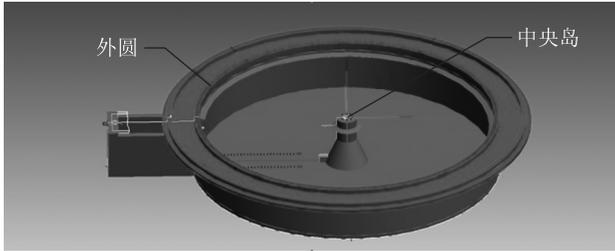


图 2 测量模型

由于现场测量条件的限制，只能将仪器架设在水池外围，通过四站测量，如图 3 所示四种颜色为 SA 软件中的四站测得的未做拼接外圆的测量结果，测量结果的分散程度表示测量点的不确定度，可以清晰地看到，距离仪器近的部位不确定度较小，距离仪器远的点不确定度较大。

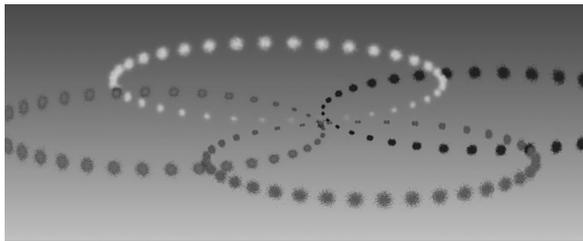


图 3 未拟合的点云图

分别对四站数据进行处理，剔除距离仪器较远的点，将处理后的四站数据，分别使用传统的最小二乘法（最佳拟合转化）和 USMN 算法进行拟合。拟合结果的公共点偏差及均方根 RMS 如表 1 所示。

表 1 拟合公共点偏差及 RMS

操作方式	参与站	参数值/mm	
		最大偏差	RMS
最小二乘拟合	1, 2	0.073	0.042
	2, 3	0.088	0.041
	3, 4	0.098	0.056
USMN	1, 2, 3, 4	0.094	0.017

定的误差，而对于最小二乘拟合而言，USMN 算法全局拟合变量的 RMS 只有 0.017 mm，最大拟合偏差为 0.094 mm，从拟合的公共点偏差量来看 USMN 取得了较好的效果。

通过第一站与第四站的公共点差值可分析闭环性。如表 2 所示，其中最佳拟合差值代表最小二乘拟合处理后第四站和第一站公共点的差值；USMN 差值代表 USMN 处理后第四站和第一站公共点的差值；USMN 权重点的差值代表 USMN 处理后按照权重重新分配的点与第一站点的差值。

表 2 多站转站不同分析结果比较 mm

点序号	最佳拟合差值	USMN 差值	USMN 权重点的差值
120	-0.041	0.014	0.000
121	-0.091	0.064	0.001
130	-0.023	-0.009	-0.001
131	0.028	-0.059	-0.001
140	-0.050	0.014	0.002
141	-0.021	-0.015	-0.001
150	-0.020	-0.020	-0.008
151	-0.035	-0.005	-0.007
160	-0.080	0.037	0.017
161	-0.077	0.034	0.015
170	-0.041	-0.006	-0.001
171	-0.054	0.008	0.007
180	-0.027	-0.023	-0.018
181	-0.057	0.008	0.006
190	-0.102	0.050	0.046
191	-0.058	0.006	0.006
200	-0.018	-0.036	-0.035
201	-0.086	0.032	0.031
210	-0.059	0.004	0.004
211	-0.046	-0.009	-0.008
120	-0.041	0.014	0.000
RMS	0.057	0.029	0.017

从拟合结果闭环性来看：因为末站和首站的公共点距离末站仪器和首站仪器距离相近而且较小，因而这些公共点在不同的站位下距离越近，说明这种拟合方式越接近真实情况，显然最小二乘拟合在经过多次

转站之后有可能造成转站误差的累加, 导致经过一圈的拟合之后初始站和末尾站中相同的点产生较大偏差, 而 USMN 可以较好地解决了这个问题。从而降低多次转站造成的拼接误差。

为了更加充分地验证 USMN 更加能体现被测件位置的真实情况, 通过以下操作方式来证明这一点。

1) 使用测量模型中的基础预埋件坐标作为被测件的“真值”, 测量模型作为被测件。

2) 将坐标系(等效于仪器)分别移动到 0° , 90° , 180° , 270° 四个位置, 分别对近处的预埋件点进行“模拟测量”, 作为“四个站”的数据。

3) 根据跟踪仪的测距测角精度, 模拟计算每个测量点在当前坐标系下的坐标和不确定度, 构造不确定点云, 并且在点云中, 按照正态分布的概率随机取出一个“测量点”, 分别对“四个站”的数据模拟测量, 得到 4 个站的“模拟测量的结果”。

4) 将这“四个站”的数据按照上文的方式, 分别使用最小二乘拟合和 USMN 方式处理, 将“模拟测量的结果”与“真值比较”分析。

模拟测量的结果如表 3 所示。

表 3 模拟测量结果

操作方式		项目	值/mm
最小二乘拟合转站	实验 A: 转站后所有点拟合圆	半径的平均偏差	0.061
		偏差的 RMS	0.079
	实验 B: 去除公共点中距离仪器较远点拟合圆	半径的平均偏差	0.056
		偏差的 RMS	0.042
USMN 方式转站	实验 C: 转站后所有点拟合圆	半径的平均偏差	0.057
		偏差的 RMS	0.075
	实验 D: 去除公共点中距离仪器较远点拟合圆	半径的平均偏差	0.044
		偏差的 RMS	0.034
实验 E: 公共点使用 USMN 权重点后拟合圆	半径的平均偏差	0.028	
	偏差的 RMS	0.033	

由于在“模拟测量”的实验中, 模拟测量的测量对象使用的是模型中一个完美的圆, 因此, 转站测量的结果中, 经过处理的数据半径的径向跳动越小, 说明拟合结果越接近真实情况。即在拟合圆的过程中半径的平均偏差越小、偏差的 RMS 越小, 说明该转站效果越好。

实验 A 与实验 C 比较, 数据结果较大而且相差不多, 这个较大的偏差与 RMS 有可能由于测量点相较仪器较远而引起的测量不准, 也有可能是由拼接误差带入的。

实验 B 和 D 相较于实验 A 和 C, 去除了离仪器较远的点, 可以明显看到 USMN 拟合结果的偏差和 RMS 都比最小二乘拟合的结果小, 说明 USMN 更加接近真实情况。

再由经过 USMN 重新分配权重点拟合的实验 E 与实验 D 相比, 又稍稍减小了平均偏差和 RMS, 但数据已经十分接近, 说明了 USMN 重新分配权重的点起到了一定效果, 并且距离仪器近的点权重较大, 距离仪器远的点权重较小, 符合第 1 章所介绍的理论。再次从理论上验证了 USMN 统一空间测量网络方式的实时有效。

3 结论

在大型工程测量时, 往往一台测量仪器在一站不能完成全部的测量任务, 需要移动测量仪器在多站或多台仪器在不同的位置实施测量, 后续数据处理及传统测量数据的拟合拼接会引入较大的累积误差, 本文介绍的基于 USMN 统一空间测量网络的测量方法, 通过重新分配拟合要素的权重, 降低多次拼接引入的累积误差, 提高了多站测量方法的精度, 经 USMN 处理得到的数据更加接近真实情况, 为大型工程测量精度的提高提供了有效的方法。

参考文献

- [1] 张心光. 基于船舶操纵性实验分析的辨识建模研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [2] 罗伟林. 基于支持向量机方法的船舶操纵运动建模研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1242-2010 激光跟踪三维坐标测量系统校准规范 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2010.
- [4] 刘建新, 马强, 杨再华. 激光跟踪测量系统及其在航天器研制中的应用 [J]. 航天器环境工程, 2008, 25 (3): 286-290.
- [5] 张于. 基于同一空间测量网络的大尺寸测量方法 [J]. 航天器环境工程, 2011, 28 (3): 277-281.
- [6] 马骊群, 曹铁泽, 王继虎, 等. 大尺寸坐标测量技术在大型部件装配应用中的若干问题 [J]. 计测技术, 2013, 33 (2): 7-11.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.04

一种红外被动定位方法的工程实现

祁蒙¹, 邱朝阳²

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015; 2. 中航工业雷华电子技术研究所, 江苏 无锡 214063)

摘要: 被动定位可分为单站被动定位和多站被动定位两种类型。本文在简要分析各种被动定位技术的基础上, 提出一种将双目立体视觉和运动立体视觉相结合的单站红外被动定位方法。设计了实验样机, 将该被动定位算法进行了工程实现。实验结果表明, 单站红外被动定位方法不仅具有 $\pm 10\%$ 的被动定位精度, 而且可以同时多个目标进行被动定位。

关键词: 红外被动定位; 单站定位; 双目视觉; 运动视觉

中图分类号: TB22; TN219 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2016) 03-0014-04

The Realization of an IR Passive Positioning Method in Engineering

QI Meng¹, QIU Chaoyang²

(1. North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China;

2. AVIC Leihua Electronic Technology Research Institute, Wuxi 214063, China)

Abstract: There are two types of passive positioning: single-station passive positioning and multi-station passive positioning. Based on the analysis of several methods of passive positioning, a new method combining binocular vision and motion vision is proposed, which belongs to the single-station passive positioning. Relevant equipment is designed and the distance calculation algorithm is realized in engineering. It is proved that this equipment can realize the real-time passive positioning of multiple flying targets in air. The accuracy of this method is approximately $\pm 10\%$ of the target distance.

Key words: IR passive positioning, single-station positioning, binocular vision, motion vision

0 引言

目标的定位可分为主动定位和被动定位两种类型。传统的主动定位一般采用雷达或者激光的方式, 虽然定位距离远, 但由于要主动发射大功率雷达脉冲或者激光脉冲, 所以非常容易暴露自身, 并且, 无论是雷达定位还是激光定位, 设备都较为复杂, 不符合未来武器装备小型、轻量、便携的发展趋势。面对电磁隐身技术的制约和挑战, 被动定位技术已成为现代战争中目标定位的另一个重要发展方向^[1-4], 它具有搜索跟踪单目标和多目标的能力, 并且不易被敌方发现和摧毁。

被动定位可分为单站被动定位和多站被动定位。单站被动定位是使用一个平台对目标进行被动定位, 多站被动定位是使用多个平台同时对目标进行定位。本文主要研究的是单站被动定位。红外被动定位是最

主要的单站被动定位方式之一, 它在军事应用上具有隐蔽性好、角度定位精度高、具有一定反隐身能力等优点, 所以受到广泛的关注。

红外被动定位包括角度定位和距离定位两方面。对于红外系统, 角度定位技术相对成熟, 而距离定位技术实现难度很大, 是一个亟待解决的技术上和工程上的难题。距离定位是本文要讨论的重点。

本文提出了一种将运动立体视觉和双目立体视觉相结合的单站红外被动定位方法, 并给出了工程实现结果。该方法可以实现对空中多个目标角度和距离的实时测量, 从而为攻击性武器的研制提供有效参数。

1 被动定位技术的分析

被动定位技术由于具有上述优势, 一直受到广泛的关注, 其中的一些技术已经应用到某些武器装备中, 在实战中发挥出了重要作用。经过国内外几十年研究, 涌现出了十几种被动定位方法^[5-14], 以下介绍的是几种常用的可工程实现的被动定位方法。

收稿日期: 2016-03-10; 修回日期: 2016-04-08

作者简介: 祁蒙 (1977-), 男, 北京人, 高级工程师, 主要从事红外系统及技术研究。

1.1 双站交叉定位法

双站交叉定位的基本原理如图 1 所示。空间目标 M 在水平面投影为 M' ；两个测量站 O_1, O_2 之间的距离为 L 。分别从测量站 O_1 和 O_2 对目标进行角度定位：角度测量值分别为方位角 α_1 ，俯仰角 β_1 ，方位角 α_2 ，俯仰角 β_2 。根据公式 (1) 可计算出测量站到目标的距离 R_1 和 R_2 。

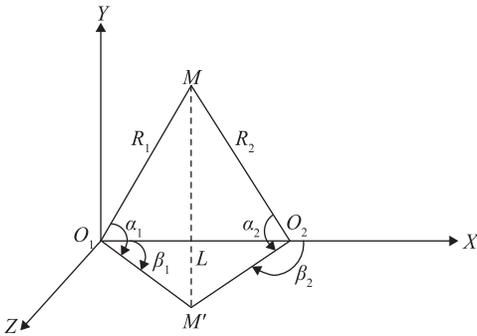


图 1 双站交叉定位法的基本原理

$$R_1 = \frac{L \sin \alpha_2}{\cos \beta_1 \sin(\alpha_2 - \alpha_1)}, R_2 = \frac{L \sin \alpha_1}{\cos \beta_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (1)$$

从公式 (1) 可看出，距离定位计算误差与测量站之间的距离长短，方位角、俯仰角的测量值都有关。测量站之间的距离越大，方位角、俯仰角越小，角度定位误差越小，距离定位精度越高。这就要求目标尽量出现在基线的垂直方向上，以减小误差。所以说这种简单的双站交叉定位法在实际运用中会受到很多的限制，定位误差也较大。

1.2 目标辐射强度法

目标辐射强度法定位的基本原理如图 2 所示。假设一个具有恒定辐射强度的点源在空中做匀速直线运动，测量站对其进行能量探测。可探测到目标的辐射照度 E 与目标的距离 R 之间关系为公式 (2)。其中， J 为目标的辐射强度， τ_0 为单位距离上的大气透过率。

$$E = \tau_0^R J / R^2 \quad (2)$$

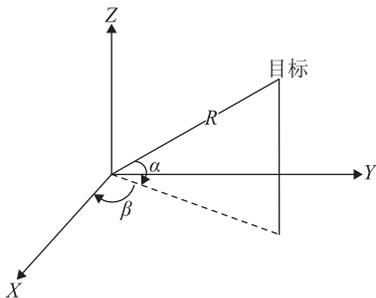


图 2 目标辐射强度法的基本原理

1.3 运动立体视觉法

运动立体视觉法定位的基本原理如图 3 所示。假设测量站采用的是某种光电探测器，测量站与目标之间的距离不同，目标所成像点到光电探测器像面中心的距离 u 也会不同。测量站与目标之间的距离 R 与光电探测器沿光轴方向的运动位移 b_m 以及 u 之间的关系为公式 (3)。

$$R = b_m u_1 / (u_2 - u_1) \quad (3)$$

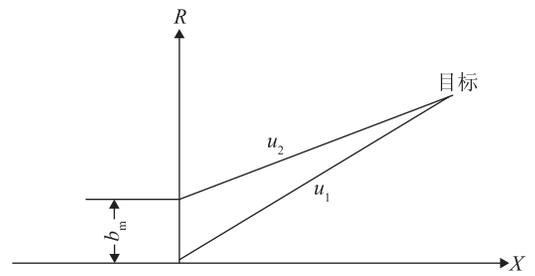


图 3 运动立体视觉法的基本原理

1.4 双目立体视觉法

双目立体视觉法定位的基本原理如图 4 所示。其中， M 为目标，假设单个测量站采用两套光学系统对目标进行定位，两套光学系统光轴之间的距离为 b ，光学系统焦距为 f 。假设目标在两套光学系统中所成像点距各自成像面中心的距离为 X_1 和 X_2 ，那么根据公式 (4) 可计算测量站到目标的距离 R 。

$$R = bf / (X_1 - X_2) \quad (4)$$

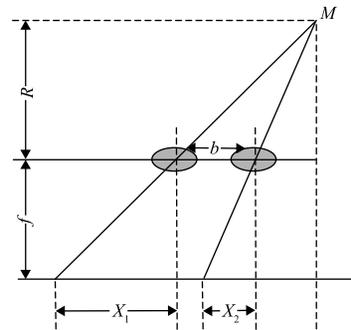


图 4 双目立体视觉法的基本原理

2 单站红外被动定位技术的工程实现

根据目标辐射强度法，可得到单站红外被动定位的计算公式为

$$SNR = JC\tau / R^2 \quad (5)$$

式中： SNR 为目标信噪比； C 为红外探测器固有参数； τ 为大气透过率。 τ 是距离 R 的函数，设

$$\tau = f(P, R) \quad (6)$$

式中： P 是大气透过率模型参数。对于公式 (5)， SNR 可测量，如果大气透过率模型参数 P 、红外探测器固有参数 C 以及目标辐射强度 J 已知，由公式 (5) 就可求解目标距离 R 。

单站的红外被动定位，一直存在着一个问题，就是定位距离方程解的不唯一性。即存在以下可能：

$$SNR = J_1 C f(P, R_1) / R_1^2 = J_2 C f(P, R_2) / R_2^2 = \dots \quad (7)$$

直观的理解就是，可能存在一个较远的、辐射强度较大的目标和一个较近的、辐射强度较小的目标，两者的红外辐射能量经过大气传输后到达探测器的能量是一样的，此时无法区别两个目标。在工程上需要结合其它方法进行解决。

2.1 迎头飞行目标的解算方法

假定在两个位置（目标到被测站的距离分别为 R_1, R_2 ）处目标的飞行高度基本保持不变，红外探测器垂直方向的像元数为 512，定义成像中心坐标为 (u, v) 。由运动立体视觉的成像原理可知： $R_1/R_2 = (v_2 - 512/2) / (v_1 - 512/2)$ ，联立公式 (5)，可以解算出目标的距离 R_1 和 R_2 。

2.2 切向侧飞目标的解算方法

在目标的飞行过程中，由于 R_1, R_2 基本相同，利用公式 (5) 无法进行定位距离解算。定义目标的水平速度和水平尺寸之比这样一个参数，根据该参数可以对战斗机、巡航导弹、直升机、民航飞机目标进行区分，进而根据目标红外图像灰度和大气传输特性定位目标距离。大量的工程试验证明，该方法可以很容易地区分出战斗机和民航机，但在区分巡航导弹和直升机方面有可能会出现偏差（见表 1），需要引入双目立体视觉方法进行进一步的确认。

表 1 不同目标的水平速度和水平尺寸之比

参数	飞行目标			
	战斗机	巡航导弹	直升机	民航机
水平速度和水平尺寸之比	约 30	约 50	约 20	约 5

2.3 实验样机的搭建

将运动立体视觉和双目立体视觉相结合的单站红外被动定位方法实验样机如图 5 所示。转台为一个二维的转台，可实现水平 360° 、俯仰 $-10^\circ \sim 80^\circ$ 的空域搜索，左右为两台参数相同的中波 640×512 红外整机。实验之前需要获取实验现场的中波红外大气传输参数。

对于空中战术目标（战斗机、巡航导弹、直升机、民航飞机），假定在距离的测量过程中目标辐射和大气

传输特性不变，可采用 2.1 和 2.2 的方法进行被动定位。如果这两种方法失效，也可采取双目立体视觉的方法进行被动定位，但定位精度会随着目标距离的增大而增大。

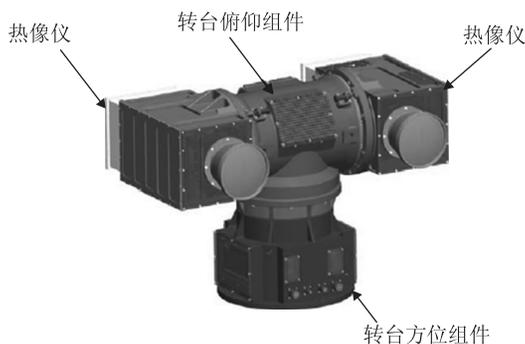


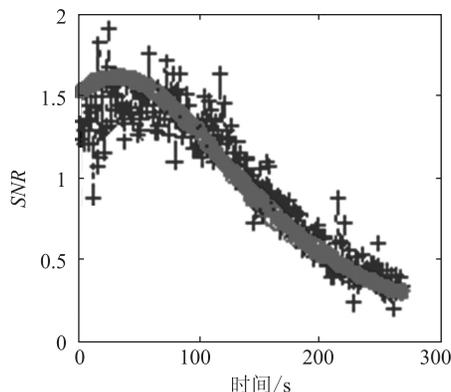
图 5 实验样机

2.4 实验结果

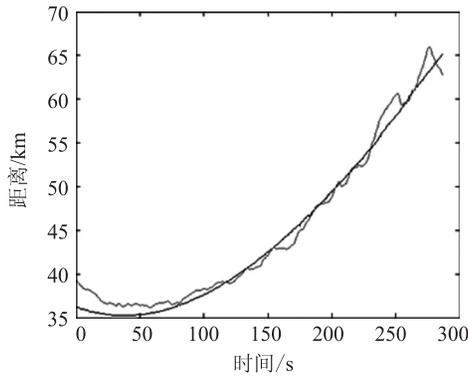
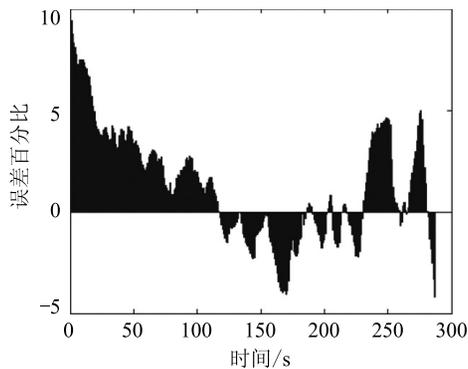
实验样机的初步实验结果如图 6 所示。图 6 (a) 是目标红外图像，图 6 (b) 是目标 SNR 随时间的变化关系，根据图 6 (b) 曲线拟合的函数关系，得出图 6 (c) 中目标距离变化曲线，对目标定位距离和目标实际距离进行误差统计，如图 6 (d) 所示，误差大都在距离的 $\pm 10\%$ 以内。



(a) 目标的红外图像



(b) 信噪比 SNR 与时间的变化关系

(c) 距离 R 与时间的变化关系

(d) 距离误差与时间的变化关系

图6 单站红外被动定位的实验结果和误差分析

3 结束语

被动定位由于拥有主动定位无法比拟的隐蔽性强、反隐身等优势特征, 已经成为装备发展的又一方向。但是实践证明, 很多被动定位方法如离焦高频振动法、计时法、光流法、双波段比值法等^[15-18], 虽然存在理论计算公式, 但在工程上几乎无法实现, 这需要设计人员引起注意。

在众多可工程化的被动定位方法中, 单站红外被动定位具有突出的技术优点: 体积小, 成本低, 定位距离远, 能够实时多目标定位, 智能化程度高, 容易和其它设备配合使用等^[19-20]。缺点是受目前光电前端指向精度和大气传输模型准确性的影响, 定位精度较低, 需要在工程实践中进行进一步的改善。

参考文献

[1] Dennis J G. Passive ranging technique for infrared search and track (IRST) systems; United States, 5282013 [P]. 1994-01-25.

[2] de Visser M, Schwering P B W, de Groot J F, et al. Passive ranging using an infrared search and track sensor [J]. Optical Engineering, 2006, 45 (2): 409-411.

[3] Michael R. Hawks. Passive Ranging Using Atmospheric Oxygen Absorption Spectra [M]. Maxwell, United States: Air University, 2006.

[4] Joel R Anderson. Monocular Passive Ranging by an Optical system with band pass filtering [M]. Maxwell, United States: Air University, 2010.

[5] 冯国强, 邹强, 李伟仁. 单站双波段红外被动测距算法研究 [J]. 红外技术, 2005, 27 (4): 295-298.

[6] 付小宁, 赵赓, 刘上乾. 基于对比度双波段被动红外测距 [J]. 激光与红外, 2007, 37 (6): 517-519.

[7] 李恩科, 殷世民, 刘上乾, 等. 一种新的机动平台红外单站被动定位算法 [J]. 西安电子科技大学学报 (自然科学版), 2006, 33 (3): 408-410.

[8] 赵勋杰, 高雅允. 光电被动测距技术 [J]. 光学技术, 2003, 29 (6): 652-656.

[9] 赵勋杰, 李成金. 双目立体实时测距系统的关键技术研究 [J]. 激光与红外, 2006, 36 (9): 874-877.

[10] 杨德贵, 黎湘, 肖顺平. 基于单站双波段红外图像的面目标被动测距研究 [J]. 信号处理, 2010, 26 (5): 714-718.

[11] 路远, 凌永顺, 吴汉平. 目标的红外被动测距研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23 (1): 77-80.

[12] 路远, 时家明, 凌永顺. 红外被动定位研究 [J]. 红外与激光工程, 2001, 30 (6): 405-409.

[13] 王春雷, 杨日杰. 基于正交多站测角的机载红外定位技术研究 [J]. 激光与红外, 2007, 37 (11): 1184-1187.

[14] 樊民革, 赵剡, 孙夏川. 基于面积的弹载红外成像被动测距 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38 (3): 391-396.

[15] 孙晓刚, 李云红. 红外热像仪测温技术发展综述 [J]. 激光与红外, 2008, 38 (2): 101-104.

[16] 孙志远, 李孟华, 乔彦峰. BP神经网络在比色法测温系统标定中的应用 [J]. 激光与红外, 2007, 37 (12): 1274-1277.

[17] 王学伟, 王春歆, 张玉叶. 点目标图像信噪比计算方法 [J]. 电光与控制, 2010, 17 (1): 18-21.

[18] 陈维真, 张春华, 周晓东. 空间目标的光度特性及其成像信噪比研究 [J]. 红外技术, 2007, 29 (12): 716-719.

[19] 殷祖焘, 肖恒兵, 翟广宁. 红外热像仪作用距离现场检测装置的研究 [J]. 计测技术, 2007, 27 (3): 22-25.

[20] 王曦. 基于图像数据链的目标被动测距技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.05

一种新型带有自标定的数字准直瞄准测量系统

高廷, 孙安斌, 马骊群, 甘晓川, 曹铁泽, 王继虎
(中航工业北京长城计量测试技术研究所 大尺寸实验室, 北京 100095)

摘要: 设计了一种新型带有自标定的数字准直瞄准测量系统。系统采用测微准直望远镜与 CCD 视觉系统相结合的方式, 将测微准直望远镜的目视测量视场转换成数字测量视场, 进而实现在整个数字视场范围内取样测量。通过对 CCD 相机的角度当量和位移当量进行标定, 可直接计算出线位移和角位移, 实现了数字化测量。通过实验验证, 该系统的定位测量不确定度优于激光跟踪仪, 定向测量不确定度优于经纬仪, 可用于工业大尺寸测量。

关键词: 准直瞄准; 定位测量; 定向测量; 自标定; 大尺寸

中图分类号: TB92; TH741.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2016) 03-0018-04

A Novel Digital Collimation Telescope with Self-calibration

GAO Ting, SUN Anbin, MA Liqun, GAN Xiaochuan, CAO Tieve, WANG Jihu
(Large-scale Laboratory, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: A novel digital collimation telescope with self-calibration is presented. By combining micrometric collimation telescope with CCD camera which is used to collect the visual field of the micrometric collimation telescope instead of eyes, it realizes measurement in the whole digital visual field. Through the calibration of the CCD camera's angular equivalent and position equivalent, the positions and angles can be calculated directly. The experimental results show that the position uncertainty of the system is superior to a laser tracker; the angular uncertainty of the system is superior to a theodolite. Therefore, the digital collimation telescope can be used for industrial large-scale measurement.

Key words: collimation telescope; position-measurement; angular-measurement; self-calibration; large-scale

0 引言

测微准直望远镜是一种精密校准工具, 广泛应用于航空、造船、机床、化工等工程, 用于在大型工程中建立测量基准线^[1]。与其它测量系统相比, 测微准直望远镜可同时进行位置和姿态的测量, 且具有测量精度高的特点。但传统的测微准直望远镜都是依靠人眼从仪器的目镜中观察角度或位移分划板, 根据测微鼓轮的刻度读取测量结果, 长时间操作不仅容易造成测量人员眼睛疲劳, 还会增大瞄准读数误差^[2-3], 这使得测微准直望远镜的实际测量误差远大于本体误差^[4]。

为提高准直望远镜的实际测量精度需要对测微准直望远镜进行数字化改造, 即用电子瞄准代替人眼瞄准。目前已有的准直望远镜电子瞄准方案是采用二次

成像光学技术与数字图像显示技术相结合, 对准直望远镜的瞄准目镜进行改造, 设计新型的电子目镜^[5-6], 由电子目镜实时拍摄高清晰测量图片, 经过图像显示及处理软件将瞄准图像经由电子屏幕显示出来。但这种电子目镜只能获取电子影像, 无法通过影像实现数字化测量, 读取测量目标的数据仍然依靠测微鼓轮。造成这种现象的主要原因是没有实现图像像素当量的标定问题。

为实现测微准直望远镜的图像化显示及数字化测量, 本文设计了一种带有自标定功能的数字准直瞄准测量系统, 该系统将准直望远镜与 CCD 视觉系统相结合, 用 CCD 相机代替人眼采集测量图像, 同时增加了像素当量标定系统。通过对获取的准直像和定位像进行标定, 可直接计算出线位移和角位移, 实现了数字化测量。通过数字化测量大大提高了准直望远镜的实际测量精度, 且能够连续读数, 使观测更方便、更准确。

收稿日期: 2016-04-11; 修回日期: 2016-04-22

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目 (J052012B006)

作者简介: 高廷 (1988-), 女, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为自动控制、图像处理; 马骊群 (1965-), 女, 研究员, 博士, 研究方向为几何量测试与校准技术。

1 测量系统组成

本文设计的带有自标定的数字准直瞄准测量系统由测微准直望远镜、CCD 相机、精密位移台、精密转台和平面瞄准镜组成，如图 1 所示。其中，测微准直望远镜用于准直定向测量和瞄准定位测量；CCD 相机通过特制的 CCD 套筒固定在望远镜的目镜上，用于获取望远镜测量的准直像和定位像并进行图像处理；精密转台可以准确调整准直望远镜的瞄准方向，通过转台给出的标准角度值可对 CCD 数字图像的角度当量进行标定；精密位移台用于承载并驱动测微准直望远镜及精密转台沿位移台的导轨移动，直线导轨两侧安装的双光栅尺能够对 CCD 位移当量进行标定，同时还能够消除因直线度引入的望远镜瞄准线产生偏摆的影响；平面瞄准镜为工作目标，是带有十字叉丝标记的平面镜，通过十字叉丝确定准直望远镜所瞄准目标的具体位置。

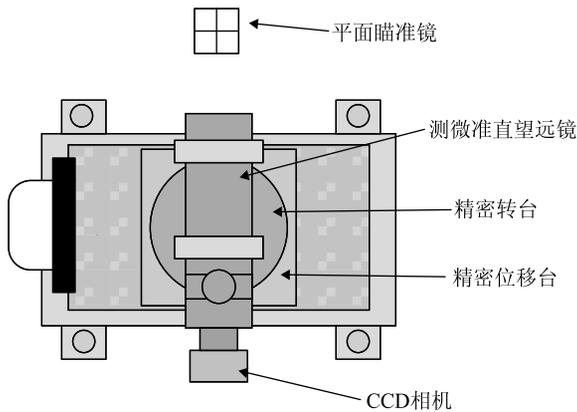


图 1 系统结构示意图

2 CCD 相机像素当量标定

实现测微准直望远镜的数字测量的核心技术就是对 CCD 相机的像素进行当量标定。对相机的像素当量标定就是要建立 CCD 相机采集到的测量视场图像上的像素数与所对应的线位移或角位移之间的对应关系。

CCD 相机像素的当量值与瞄准目标到 CCD 成像面的距离有关，当目标距离改变时，像素的当量值也发生改变，这就要求每次调焦后均需要对 CCD 进行像素当量标定。

通常，原始图像坐标系 (OUV) 定义如图 2 所示，横轴为 U 轴，纵轴为 V 轴，坐标系的原点 O 位于图像的左上角。为了与准直望远镜的中心视场坐标系相对

应，建立 CCD 准直瞄准图像坐标系 ($O'XY$)，其定义如下：横轴为 X 轴，纵轴为 Y 轴，CCD 视场的中心为坐标系的原点 O' (见图 3)。设原始图像像素大小为 (U_{max}, V_{max})，则 CCD 准直瞄准图像坐标系原点位于原始图像坐标系下点 ($U_{max}/2, V_{max}/2$) 位置处。

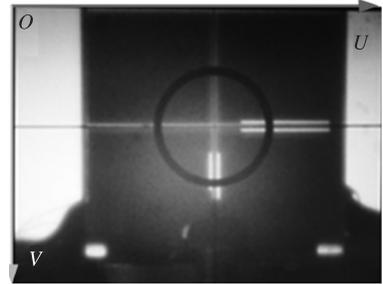


图 2 原始图像坐标系的定义

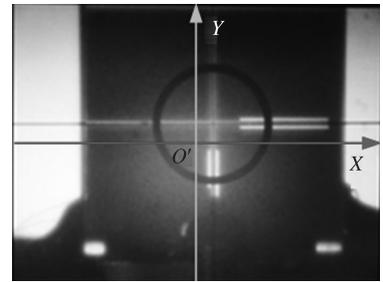


图 3 CCD 准直图像坐标系的定义

为了准确计算出 CCD 的像素当量，首先需要确定 CCD 的像素感应当量及所显示图像的缩放比。

已知 CCD 的感应区尺寸为宽 \times 高 = W (mm) \times H (mm)，对应的像元数量为 U (pixel) \times V (pixel)，则 CCD 宽度方向上的像素感应当量为 $P_x = W/U$ (mm/pixel)；高度方向上的像素感应当量为 $P_y = H/V$ (mm/pixel)；定义 P_{xy} 为 CCD 的宽高像素感应比，则 $P_{xy} = P_x/P_y$ 。

所显示图像的缩放比 λ 是指测量原始图像尺寸与屏幕前端显示图像尺寸之间的对应关系。如原始图像与显示图像的像素大小不相同需计算图像的缩放比。为了保证图像不变形，显示图像的横向 (X) 和纵向 (Y) 缩放比应相等，即将显示图像按原始图像自身比例进行缩放。显示图像的缩放比 λ 计算方式如下：

设测量原始图像的像素大小为 (U_1, V_1)、前端显示图像的像素大小为 (U_2, V_2)，计算出像素缩放比 $\lambda = \min (U_1/U_2, V_1/V_2)$ 。

测量点在原始图像坐标系下的像素坐标 (U, V) 与在 CCD 准直瞄准图像坐标系下的像素坐标 (X, Y)

之间的对应关系为

$$X = \lambda (U - U_2/2)$$

$$Y = \lambda (V_2/2 - V)$$

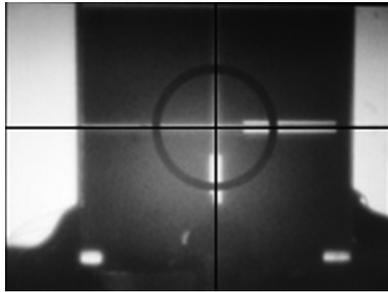
2.1 CCD 位移当量标定

CCD 位移当量标定方法为将准直望远镜调焦至精密平面镜的“十字”标记线上(对中状态,见图4),记录当前对中图像中十字线中心的像素位置 X_1 、位移台位置 L_1 ;左右移动精密位移台一定距离并记录对中图像位置 (X_2, L_2) 和 (X_3, L_3) ,则 X 方向的位移当量 L_X 计算公式为

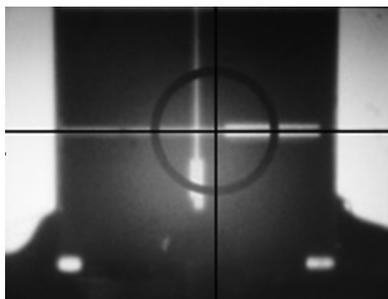
$$L_X = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{L_2 - L_1}{X_2 - X_1} + \frac{L_3 - L_1}{X_3 - X_1} \right)$$

根据 L_X 可直接计算出 L_Y , 有

$$L_Y = \frac{L_X}{P_{XY}}$$



(a) 对中像初始位置



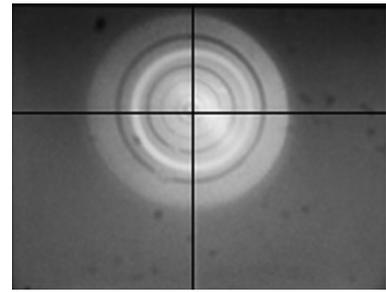
(b) 对中像偏移位置

图4 对中像位置

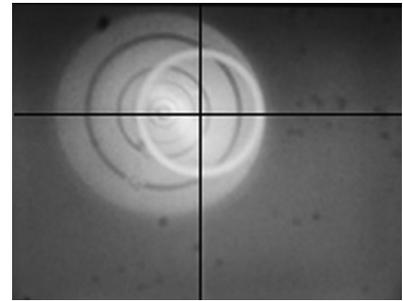
2.2 CCD 角度当量标定

CCD 角度当量标定方法为将望远镜准直调焦至望远镜的“同心环”准直像上(准直状态,见图5),记录当前准直图像中同心环中心的像素位置 X_1 、转台角度 R_1 ;左右移动转台一定角度并记录准直图像位置 (X_2, R_2) 和 (X_3, R_3) ,则角度当量 R_X 计算公式为

$$R_X = \frac{1}{2} \left(\frac{R_2 - R_1}{X_2 - X_1} + \frac{R_3 - R_1}{X_3 - X_1} \right)$$



(a) 准直像初始位置



(b) 准直像偏移位置

图5 准直像位置

同理,根据 R_X 可直接计算出 R_Y , 有

$$R_Y = \frac{R_X}{P_{XY}}$$

3 CCD 位移及角度当量标定实验

将瞄准目标安置在距离望远镜 5 m 远的位置上,对所获取的位置测量图像和准直测量图像进行当量标定,标定结果见表1、表2。

从表1、表2的标准偏差可以看出,位移的当量标定误差为 $\pm 0.1 \mu\text{m}$,角度的当量标定误差为 $\pm 0.00001^\circ$ ($0.036''$)。

表1 位移当量标定

序号	标准位移/mm	图像像素	位移当量/mm
1	2.5	198	0.0126
2	5.0	399	0.0125
3	7.5	601	0.0125
4	-2.5	-201	0.0124
5	-5.0	-403	0.0124
6	-7.5	-602	0.0125
平均值/mm			0.0125
标准偏差/mm			0.0001

表2 角度当量标定

序号	标准角度/(°)	图像像素	角度当量/(°)
1	0.025	112	0.00022
2	0.050	210	0.00024
3	0.075	320	0.00023
4	-0.025	-105	0.00024
5	-0.050	-221	0.00023
6	-0.075	-335	0.00022
平均值/(°)			0.00023
标准偏差/(°)			0.00001

4 测量系统不确定度分析

由于增加了电子目镜并对数字图像进行了像素当量标定,因此准直望远镜实际测量时引入的不确定度除了望远镜的本体测量不确定度外,主要不确定度来源是准直望远镜的瞄准误差。通常图像的分辨力以像素为单位,则瞄准误差可近似设定为1个像素,由此瞄准误差可以用像素当量来估计。

4.1 定位测量不确定度估计

定位测量不确定度主要来源于准直望远镜瞄准误差、位移台定位误差、位移台直线度误差、望远镜本体误差。假设目标位于望远镜的前方近5m的位置,则有:

1) 定位瞄准误差引入的不确定度

根据表1的标定结果知5m左右位置的位移当量为0.0125mm,取均匀分布,由此可估计5m以内瞄准误差引入的不确定度分量

$$u_1 = 0.0125 \text{ mm} / \sqrt{3} \approx 0.0073 \text{ mm}$$

2) 位移台定位误差引入的不确定度

该项误差由所选用的标准位移台所决定,该误差通常由生产厂家给出,是指用该位移台进行长度测量时的定位误差。根据位移台的检定结果,其定位误差为0.001mm。取均匀分布,由此引入的测量不确定度分量

$$u_2 = 0.001 \text{ mm} / \sqrt{3} \approx 0.0006 \text{ mm}$$

3) 位移台直线度误差引入的不确定度

当用望远镜瞄准远方目标时,确定瞄准位置的主要不确定度来源于位移导轨的直线度。如图6所示,系统采用双光栅尺测量的方案,位移导轨的宽度为200mm,根据双光栅的输出可调整测量系统位移导轨

的直线度不超过1μm。则 $\tan\alpha = 1 \times 10^{-3} / 200 = 5 \times 10^{-3}$,取均匀分布,由此引入的测量不确定度分量

$$u_3 = 5 \times 10^{-3} L / \sqrt{3} \approx 2.9 \times 10^{-3} L$$

式中:L为望远镜的瞄准距离,mm。

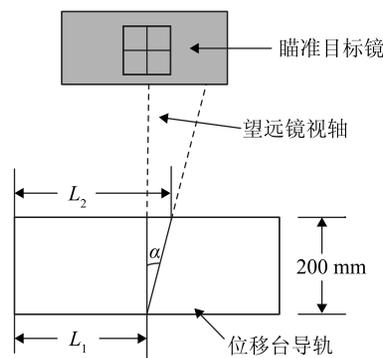


图6 位移台直线度误差

4) 望远镜本体定位测量误差引入的不确定度

望远镜本体在5m内的定位测量引入的不确定度为0.025mm,取均匀分布,则本体引入的不确定度分量为

$$u_4 = 0.025 \text{ mm} / \sqrt{3} \approx 0.015 \text{ mm}$$

则合成标准不确定度

$$\begin{aligned} u_c &= \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \\ &\leq \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_4^2} + u_3 \\ &= 0.017 \text{ mm} + 2.9 \times 10^{-3} L \end{aligned}$$

扩展不确定度

$$U = 0.034 \text{ mm} + 5.8 \times 10^{-3} L \quad (k=2)$$

4.2 定向测量不确定度估计

定向测量不确定度主要来源于准直瞄准误差、转台本身的测角误差、转台偏心补偿误差以及望远镜本体测量误差。

1) 定向瞄准误差引入的不确定度

根据表2的标定结果知5m左右位置的角度当量为0.00023°≈0.83",取均匀分布,由此可估计5m以内准直瞄准误差引入的不确定度均小于

$$u_1 = 0.83'' / \sqrt{3} \approx 0.48''$$

2) 转台测角误差引入的不确定度

该项误差由所选用的标准转台所决定,该误差通常由生产厂家给出,是指用该转台进行角度测量时的测角误差。根据转台的检定结果,其测角误差为1.0"。取均匀分布,由此引入的测量不确定度分量

$$u_2 = 1.0'' / \sqrt{3} \approx 0.58''$$

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.06

电动汽车能量管理单元电路板自动测试系统

刘奕任, 齐铂金, 郑敏信

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: 针对电动汽车能量管理单元其电路板测试繁杂的问题, 研究设计一种自动测试系统。采用 **Frescale MC9S12** 系列 MCU 作为主控芯片, 通过 CAN 总线实现上位机、下位机、被测板之间的数据传输。系统实现了对能量管理单元 4 种板件及整机的 6 类不同测试。上位机软件可对测试项目进行高度灵活地配置, 实时显示测试结果, 保存至数据库, 并生成 Word 报表。经前期测试, 对于同一种板件的全功能测试可在 1 min 内完成, 单个通道的绝对误差可小于 0.05 V, 并且其故障检出率可达到 100%。

关键词: 能量管理单元; 自动化测试; CAN 总线; 系统框架; 软件架构

中图分类号: TB22; TP274.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2016) 03-0022-06

Printed Circuit Board Assembly (PCBA) Automatic Test System for Energy Management Unit of Electric Vehicles

LIU Yiren, QI Bojin, ZHENG Minxin

(School of Mechanical Engineer and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To solve the problem of Energy Management Unit (EMU) of electric vehicles, we develop an automatic test system. MCU of **Frescale MC9S12** series is used as master chip. Upper computer, lower computer and unit to be tested are connected with CAN. 6 different tests of unit and its 4 types of PCBA can be tested by automatic test system. The test items can be configured highly flexible. Upper computer software shows the test results in real time, saves the data to the database and creates the Word table. After the early testing, all tests of one kind of PCBA can be finished in 1 minute. The absolute error of the automatic test system is less than 0.05V, and its fault detection rate is 100%.

Key words: energy management unit; automatic test; CAN; system framework; software architecture

0 引言

电动汽车能量管理单元主要实现对其电池组电压、温度等参数的监控, 同时根据各个单节电池状态进行输出功率分配与管理, 从而实现电动汽车性能的有效提高^[1]。目前, 生产能量管理单元的一些企业依然采用人工检测的方法^[2], 其低下的检测效率远远无法满足企业自身对生产效率的要求。本文针对某型号电动汽车能量管理单元及其电路板的测试需求进行分析, 基于 **FrescaleMC9SEP100MAL** 单片机, 通过 CAN 总线与被测试电路板及工控机通信, 实现对电动汽车能量管理单元的高精度测试与老炼测试, 有效提高了检测效率^[3]。

收稿日期: 2016-04-18; 修回日期: 2016-04-26

作者简介: 刘奕任 (1991-), 男, 宁夏中卫人, 硕士研究生, 主要研究方向为自动化测试系统; 齐铂金 (1963-), 男, 湖南湘潭人, 教授, 博士, 主要研究方向: 先进逆变电源技术与成套装备。

1 系统总体框架设计

1.1 测试需求分析

电动汽车能量管理单元主要由功率板、控制板、综合板组成。故测试系统需分别对功率板、控制板、综合板以及装配后的组合板与整机进行测试。对于同种板件, 需实现四块板件的同步测试。对于单个板件, 系统需测试短路、输出电压、I/O 输入、I/O 输出、DA 输出、AD 输入 6 种测试项目, 其整机还要进行老炼测试。其中短路测试主要检查被测试板件供各供电端口间是否存在短路现象。对于向其他板件供电的板件需检测输出电压, 从而保证当其装配后可正常为其他板件供电。由于能量管理单元与电动汽车其他模块间有双向数字信号, 与模拟信号的交换, 所以需对其进行 I/O 输入、I/O 输出、DA 输出、AD 输入测试。

1.2 系统构成

本系统主要用于能量管理单元电路板的测试, 可以模拟供电正常 (24 V)、供电欠压 (20 V)、供电过

压 (30 V) 三种工作电压下的测试。如图 1 所示, 系统主要由工控机, 基于 FrescaleMC9SEP100MAL 单片机的主控电路, 配电箱, 通道选择及信号输出模块, 信号采样模块等几个部分组成。工控机通过 CAN 总线向主控电路发送测试配置信息、测试命令, 主控电路接收到配置信息后控制配电箱向待测试电路板输入指定工作电压, 控制信号输出模块向待测试电路板输入激励信号。激励信号经由待测试电路板后由信号采样模块采集响应信号或待测试电路板由 CAN 总线向主控电路板发送测试结果完成测试^[4]。

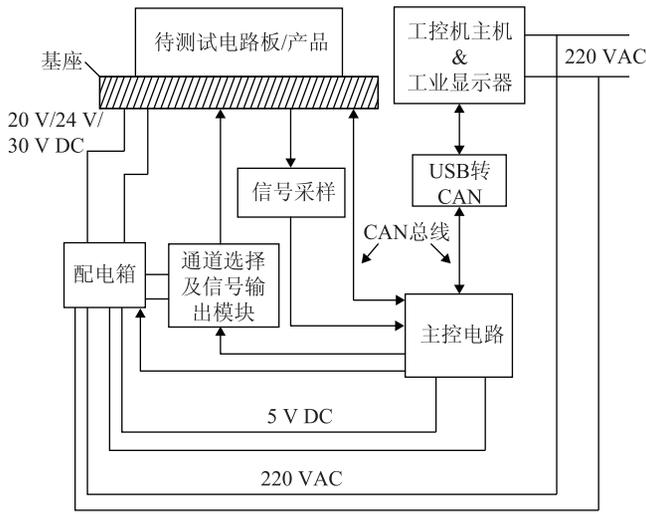


图 1 自动测试系统总体结构图

1.3 系统测试原理

测试系统需实现能量管理单元中 4 类板件的测试, 以及最后的整机性能测试与老炼测试, 每类板件均需完成短路、输出电压、I/O 输出、I/O 输入、DA 输出、AD 输入 6 种测试项目, 每种测试项目都有多达几十个测试通道, 此外系统还需实现四块同类板件同步测试, 其测试种类繁多, 测试通道多, 需合理设计其测试原理, 从而实现高效的测试。六种测试项目的测试原理总体可分为三类, 图 2 给出了三类测试方式的原理框图。

方式一, 信号输出模块同时向待测试的四个板件输出激励信号, 当前待测试模块使能, 其多路选择器开启指定通道, 激励信号经测试通道后生成响应信号, 经数据选择器后传向采样电路并生成采样信号, 主控板单片机对采样信号采样, 通过 CAN 总线发送到上位机, 如图 2 中模块 A 所示。其中功率板、综合板的所有测试项目均采用了此方式。

方式二: 主控板 MCU 通过 CAN 总线向被测板 MCU 发出测试信息, 被测板接收到测试信息后输出指

定激励信号, 激励信号经测试通道后生成响应信号, 由数据选择器选择并传向采样电路生成采样信号, 主控板 MCU 对采样信号采样, 如图 2 中模块 B 所示。其中控制板、综合板、整机的 I/O 输出、DA 输出测试均采用了此方式。

方式三, 信号输出模块产生激励信号, 经多路选择器分配后发送至测试通道, 测试通道响应激励信号, 其产生的响应信号传向被测板 MCU, 被测板 MCU 对其采样, 然后通过 CAN 总线向主控板 MCU 发送采样结果, 如图 2 中模块 C 所示。其中控制板、综合板、整机的 I/O 输入、AD 输入测试均采用了此方式。

测试过程中, 主控板 MCU 负责控制信号输出模块输出电压, 同时控制多路选择器、数据选择器按时序要求选择测试通道, 从而实现整个测试系统的协同高效工作。

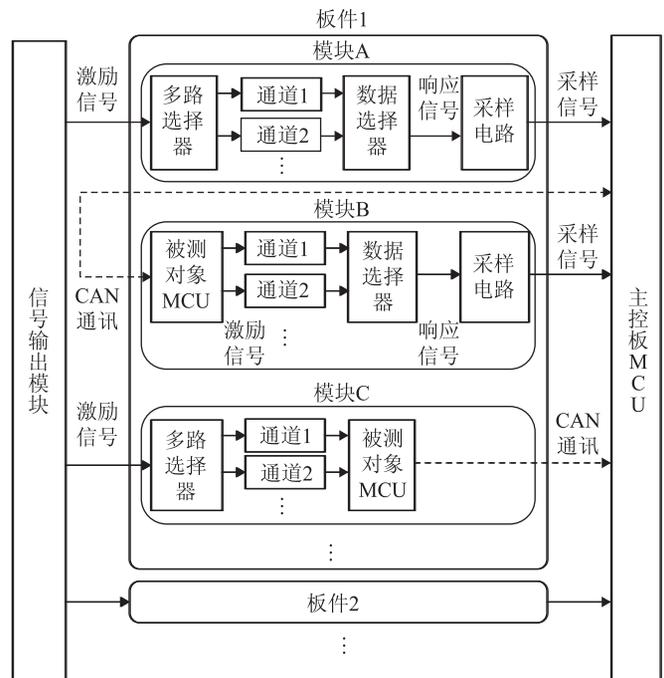


图 2 测试原理框图

2 系统硬件设计

2.1 信号输出模块

如图 3 所示为系统的激励信号输出模块, 主要由串行输入数模转换器 U_1 与高输出驱动运放 U_2 组成。 U_1 的输出电压 V_{out} 输出范围是 0 V 到其供电电压 V_{DD} 。 V_{out} 经电阻 R_3 后接至高输出驱动运放 U_2 的正相输入端, 此处运放 U_2 为同相比例运算电路, 工作在线性放大区, 其差分输入内阻达数百兆欧, R_3 电阻阻值通常为

几千欧,故其压降可以忽略不计,电阻 R_4 的阻值选择 0Ω ,则激励信号输出电压 V_{DaOut} 为

$$V_{DaOut} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{out} \quad (1)$$

激励信号输出模块最后产生的激励电压范围为 0 到 $\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{DD}$ 之间。

当串行输入数模转换器 U_1 选择 12 位精度的数模转换器时,输出分辨率为 0.024%。电压转换速率通常可达 $1 \text{ V}/\mu\text{s}$,完全可保证激励信号的高精度高速率输出,实现高速测试的目的。

高输出驱动运放 U_2 的作用不仅在于构成同相比例运算电路扩大激励信号的电压范围,还有效提高了激励信号的带载能力,其最高输出电流通常远大于串行输入数模转换器 U_1 的输出电流,这样可以有效保证大功率测试板件的正常测试^[5]。

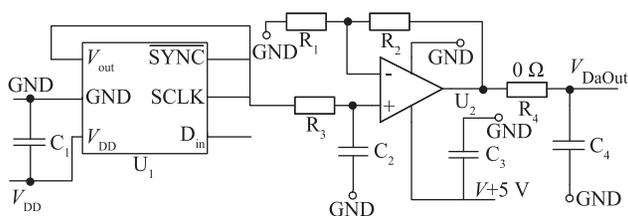


图3 激励信号输出电路原理图

2.2 采样电路

系统采样电路原理如图4所示,其不同模块的结构与元器件选型稍有不同,但其设计思路基本一致。

经测试通道与数据选择器后的响应信号 V_{test} 接入电阻 R_1 的一端,图4中运放 U_1 差分输入内阻远大于 R_2 的值,故输入运放正相输入端电压可视为 V_{test} 在 R_1 与 R_2 串联电路上的分压所得。运放 U_1 被设计为电压跟随器,其输出电压等于正向输入电压,输出电压经 R_4 后直接输入主控板 MCU 的 A/D 采样端口。 R_4 的阻值通常选择在 500Ω 左右,远小于主控板 MCU A/D 采样端口的内阻,故压降可忽略不计,则可计算 MCU A/D 采样端口采样电压 V_{AD} 为

$$V_{AD} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{test} \quad (2)$$

当主控板 MCU A/D 采样端口获得 V_{AD} 的数值后,则可推算出响应信号电压 V_{test} 为

$$V_{test} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_{AD} \quad (3)$$

图4中二极管 D_1 与 D_2 分别起到限制主控板 MCU

A/D 采样端口采样电压的上限与下限的作用。当 V_{AD} 大于 5 V 时, D_1 导通, V_{AD} 电压被拉回 5 V ; 当 V_{AD} 小于 0 V 时, D_2 导通, V_{AD} 电压被拉回 0 V ,从而有效保护了主控板 MCU 的 A/D 采样模块。

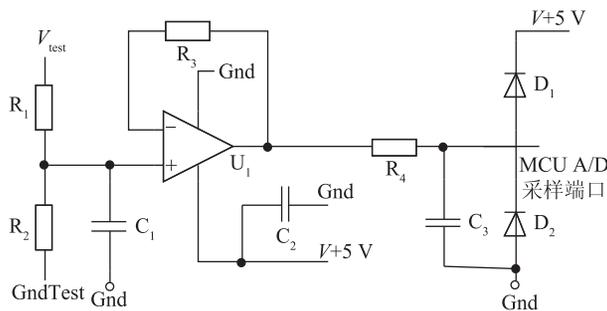


图4 采样电路原理图

3 系统软件设计

3.1 系统软件设计需求

根据系统总体框架与具体硬件的设计,以及系统软件总体需实现的测试逻辑与时序、数据采集、数据处理等功能,系统软件总共可由上位机软件、下位机主控板程序、被测板程序三部分组成。上位机软件主要实现对测试任务的配置,测试数据的接收、判断、显示等功能;下位机主控板程序主要实现激励信号的产生与响应信号的采样,并将测试数据并返回给上位机;被测板程序主要功能为响应测试信号并产生相应反馈信号,从而协助实现检测被测板相关通道。系统软件三部分相互独立,通过 CAN 实现通讯。

3.2 上位机软件

如图5所示,上位机软件由人机交互层、功能模块层、数据层以及驱动层组成。各层之间相互独立,通过相应接口函数实现层与层之间的功能连接与数据传递。对于没有接口函数对接的层,需通过中间层间接进行对接。如人机交互层无法直接与数据层和驱动层进行交互,需通过功能层作为中间层才能进行交互。

人机交互层主要由多个操作界面组成,实现对测试板件种类的选择、测试资源的配置以及测试信息的显示。对于测试资源配置界面,可实现对测试资源高度自由化配置。对于板件测试界面,其显示同时测试的4块板件的具体测试信息,可在线实时显示由下位机主控板 MCU 上传的测试数据。

功能层中各模块起到支撑测试系统上位机软件应用与逻辑功能的作用,其核心模块分别为测试数据处

理模块；配置文件管理模块，老炼时序管理模块，Word 报表生成模块。测试数据处理模块将下位机传来的数据解包，然后传输至人机交互层板件测试界面以供实时显示；配置文件管理模块主要实现对生成与提取配置文件的作用；老炼时序管理模块实现压力老炼测试时对各类型测试时间的配置与监控；Word 报表生成模块作用是抽取配置文件与测试数据处理模块进行解包后的数据，并根据模板生成用户最终所需要的 Word 测试报表。

数据层主要由用户账号数据库、测试数据库以及配置文件组成。其在本机磁盘中存储系统的用户信息，测试记录以及测试配置等重要数据。驱动层各驱动模块为功能层模块实现具体功能提供了底层驱动，其主要由第三方动态链接库组成。

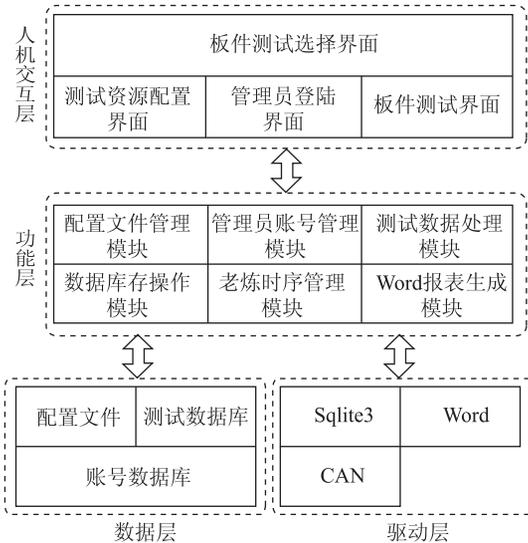


图5 上位机软件架构图

上位机软件的测试流程图如图 6 所示。进入上位机测试软件后首先选择待测试的板件类型，然后判断是否有配置文件，若没有，则需进入配置文件所在界面，对所需测试功能及其通道进行选择，选择完成后生成配置文件并进行保存。完成配置后，将其配置文件载入上位机测试软件，选择测试板件序号，其最多可同时进行四块板件的测试。接下来选择测试模式，测试模式分为自动测试与单步测试，单步测试又可选择短路、输出电压、I/O 输入、I/O 输出、DA 输出、AD 输入 6 种不同种类的测试。在压力老炼测试时还需对老炼时长与老炼周期进行配置。

完成以上所有设置后点击开始按钮，上位机向下位机发送之前所配置的测试信息，收到下位机返回的确认信息后发送开始测试命令。上位机 CAN 模块时刻

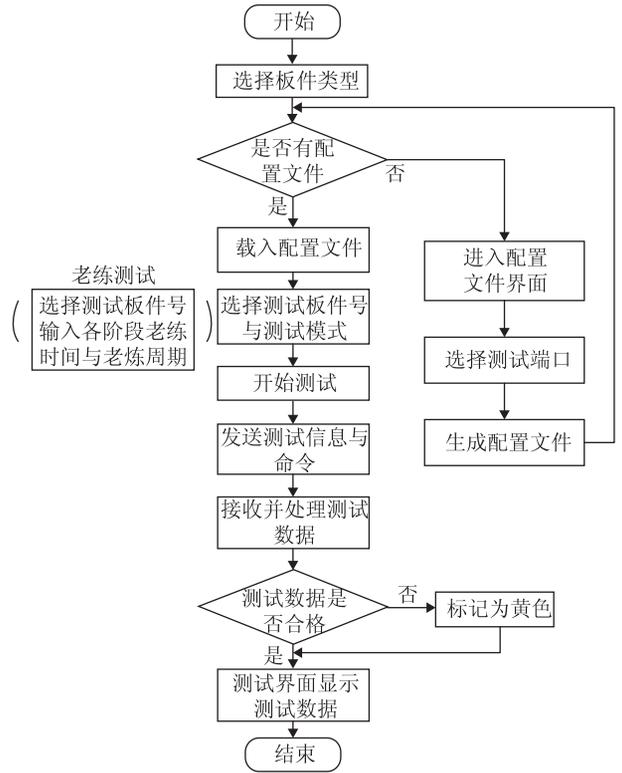


图6 上位机软件测试流程图

监听返回信息，当接收到下位机传来的测试数据后，判断测试数据的种类，对测试数据进行解包。最后上位机测试界面显示解析后的数据，并对存在问题的数据进行标记，提醒操作人员注意待测试板件存在问题。如图 7 所示，对于还未返回测试数据以及测试合格的测试项目，其表格中所在行颜色显示为蓝色（图 7 中为颜色较浅的表格），对于存在问题的测试项目系统将将其标记为黄色（图 7 中为颜色较深的表格）。



图7 上位机软件板件测试界面

3.3 下位机测试软件

下位机软件主要实现测试逻辑与测试时序的功能，与此同时还需能够通过 CAN 总线接收与发送测试命令，向上位机发送测试数据。图 8 是下位机软件的测试流程图。软件初始化后，CAN 功能处于监听状态，当接收到测试命令后进入中断，判断是否自动测试。若是自动测试，则按图 8 中顺序依次完成全部测试；若不是，则再具体判断为何种测试，并执行其测试任务。当测试任务完成后，退出中断，系统 CAN 功能再次进入监听状态。

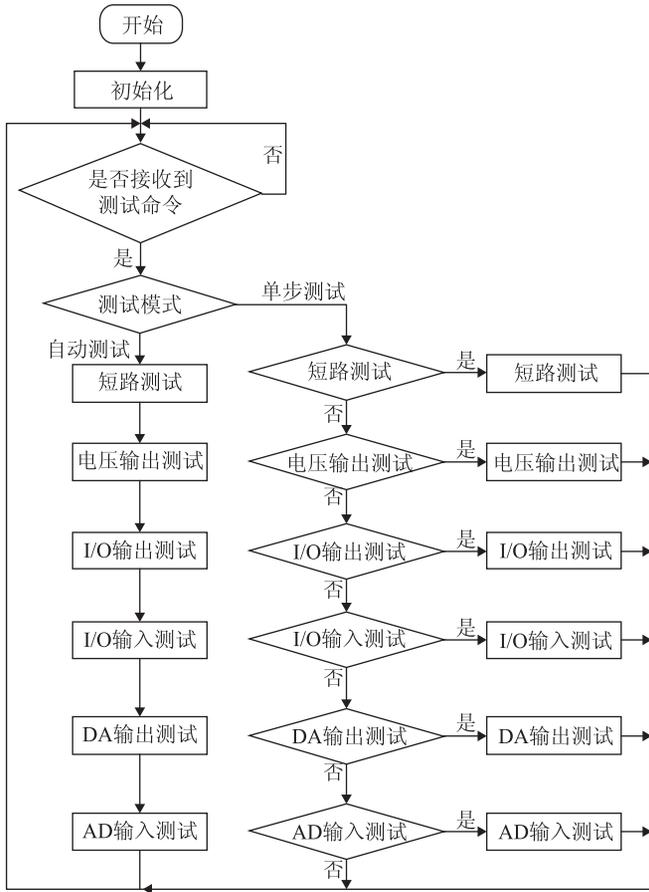


图 8 下位机软件测试流程图

对于每种测试其具体的测试流程如图 9 所示。首先判断是否测试被测板件的信号产生功能，如果是，则通过 CAN 总线向被测试板件发出测试信息，然后主控板 MCU 的 A/D 采样模块开启，进行连续采样并求其平均值；若不是，则控制信号输出模块产生激励信号，然后根据是否测试被测板信号采样功能来决定接收 CAN 总线传来的信号还是开启 A/D 采样模块采样。最后，主控板 MCU 将其接收到的数据打包成指定格式后通过 CAN 总线返回给上位机，完成本测试。

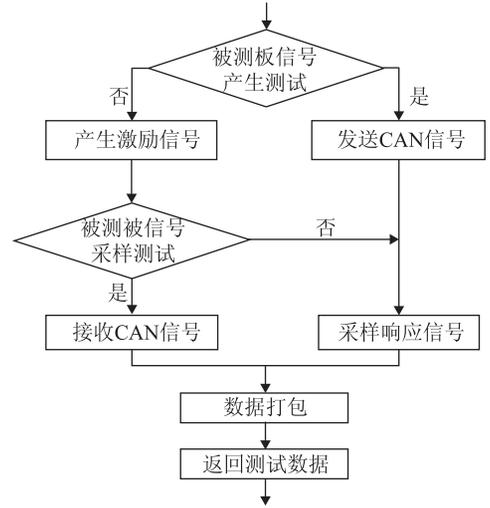


图 9 各测试具体测试流程

4 测试结果

采用同一块被测板分别对系统同种板件的四个测试插口进行测试。现选取综合板中 I/O 输出、I/O 输入、DA 输出、AD 输入四种测试，如表 1 所示。表 1 中每种测试选取其中一个通道的测试值作为比较，测试 1, 2, 3, 4 分别对应系统综合板测试的四个插口对同一块被测板进行测试后的测试结果，人工测试指使用万用表对被测板测试的结果。现将人工测试数据视为标准数据，则 I/O 输出最大绝对误差为 0.04 V，I/O 输入最大绝对误差为 0.02 V，DA 输出最大绝对误差 0.014 V，AD 输入最大绝对误差为 0.007 V，四种测试绝对误差均小于 0.05 V。并且，在完成的四种板件及整机的测试中，经初步统计故障检出率可达到 100%。

表 1 系统综合板测试结果 V

项目	测试 1	测试 2	测试 3	测试 4	人工测试
I/O 输出	13.27	13.31	13.27	13.24	13.28
I/O 输入	4.77	4.76	4.77	4.76	4.78
DA 输出	2.659	2.664	2.662	2.652	2.65
AD 输入	2.738	2.745	2.740	2.733	2.74

表 2 给出了能量管理单元所有种类板件及整机的自动测试与人工测试时间。对于自动测试，均可在 1 min 内完成，且测试系统可实现对 4 块同种板件的同步测试，并一键生成最终所需的测试报表。对于人工测试，最快的功率板也需至少 5 min，对于其他板件，需要更长的时间，且测试完毕后还需对测试数据进行整理，并制作测试报表，花费时间远远大于自动测试。

表2 自动测试与人工测试时间

测试板件	自动测试/s	人工测试/min
功率板	20	5
控制板	47	22
综合板	44	20
组合板	35	16
整机	35	15

能量管理单元自动测试系统的另一大优势还体现在老练测试的自动化上,传统人工老练测试需测试人员在每个老练周期对产品进行测试,整个老练时间往往几十小时甚至上百小时,对测试人员的精力与体能消耗巨大。测试系统则可自动化地完成老练测试,如图10所示,为能量管理单元I/O输出某通道的老练测试曲线,测试系统老练测试共设置8个周期,每周期共10h,其中通电9h,断电1h,在通电第4.5h时对被测产品进行测试。老练测试的前两个周期模拟供电欠压(20V),中间四个周期模拟供电正常(24V),最后两个周期模拟供电过压(30V)。

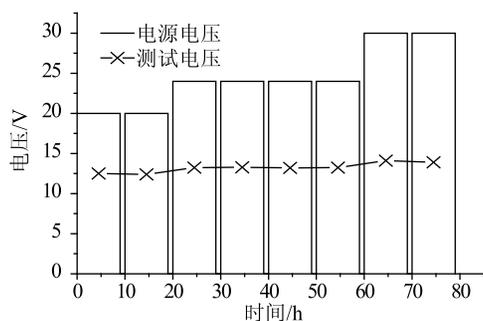


图10 能量管理单元 I/O 输出老练测试曲线

(上接第4页)

[6] PLATT U, PERNER D, PATZ H. Simultaneous measurement of atmospheric CH_2O_2 and NO_2 by differential optical absorption [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84 (10): 6329-6335.

[7] 郑朝晖, 刘文清, 宋炳超, 等. 差分光学吸收光谱(DOAS)技术在烟气监测中的应用研究 [J]. *量子电子学报*, 2001, 12 (18): 65-69.

[8] 崔厚欣, 齐汝宾, 张文军, 等. 差分吸收光谱法大气环境质量在线连续监测系统的设计 [J]. *分析仪器*, 2008 (1): 7-11.

[9] 宫红彩, 韩庆玉, 刘影, 等. 浅析无线传感器网络技术物联网中的应用 [J]. *企业技术开发*, 2012, 31 (8): 25-26.

[10] 国家质量监督检验检疫总局. JJG968-2002 烟气分析仪检定规程 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2002.

5 结论

本文阐述了电动汽车能量管理单元电路板自动测试系统的设计与开发,对其系统架构、检测原理、设计思路进行了重点论述。该系统可实现4种不同类型板件及整机的自动化测试,可同时对四块同种板件同步进行测试。此外该系统测试精度高,速度快,激励信号输出分辨力为0.024%,激励信号电压转换速率可达 $1\text{ V}/\mu\text{s}$ 。

经过前期试验,对于各类板件及整机测试时间可控制在1min以内,其故障检出率可达到100%,不仅在速度上远胜于传统人工测试,可靠性方面也优于人工。

参考文献

[1] 王莹. PCBA自动测试平台研究与软件系统设计 [D]. 成都: 成都理工大学, 2014.

[2] 朱夏川. 基于虚拟仪器的电路板测试系统的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.

[3] 吴震海. 大功率电机驱动器测试工装 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.

[4] Zhang Y, Qiao B, Chen L G. Design and Implementation of the Fuze Circuit Board Tester [C] //International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications. Amsterdam, Netherlands: Atlantis Press, 2015.

[5] Moreira J, Barnes H, Poisson V. PCB via field with embedded pitch transformation for ATE pogo pin blocks [C] //Signal and Power Integrity (SPI), 2015 IEEE 19th Workshop on. Berlin, Germany: IEEE, 2015: 1-4.

[11] Bisson S E, Kulp T J, Levi O, et al. A broadly tunable high resolution IR cavity ring-down spectrometer based on difference frequency generation in orientation-patterned GaAs [J]. *SPIE*, 2004, 5337: 112-116.

[12] 裘世鑫, 高晓明, 崔芬萍, 等. CO_2 的腔增强吸收与高灵敏吸收光谱研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, 25 (12): 1908-1911.

[13] 阎文斌. 微量气体定量分析的新方法: 光腔衰荡光谱 [J]. *低温与特气*, 2007, 2 (25): 35-38.

[14] 戈伟群. 走进网络化校准—远程校准技术初探(之一) [J]. *计算机应用研究*, 2002, 19 (9): 23-26.

[15] 中国合格评定国家认可委员会. CNAS-CL25: 2014 检测和校准实验室能力认可准则在校准领域的应用说明 [S]. 北京: [出版者不详], 2014.

[16] 陈伟. 远程计量校准技术研究 [J]. *计测技术*, 2007, 27 (S1): 25-27.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.07

船舶装备安装基准相对姿态测量系统研究

王爱军, 何小妹, 李昆, 王一璋

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍一种船舶装备安装基准相对姿态测量系统, 阐述了系统的各部分组成。对测量系统进行了精度测试, 并进行了数据补偿, 对补偿前后测试精度的比对结果表明, 经补偿后系统具有良好的测试精度。测量系统能够实时测量两个运动平台的相对姿态, 上位机软件具有实时显示、实时监控、测量数据自动存储功能。

关键词: 船舶装备; 基准; 相对姿态; 测量系统

中图分类号: TB922; TH712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2016) 03-0028-03

Study on Relative Attitude Measurement System for Ship-equipment Installation Reference

WANG Aijun, HE Xiaomei, LI Kun, WANG Yizhang

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

Abstract: A relative attitude measurement system for warship weapons reference is introduced in this paper, the composition of the system is described. The measurement system is precisely tested, and data compensation is made. The test accuracy, after compensation, is better than before. The measurement system can measure the relative attitude of the two platforms in real time, and the PC software has the function of real-time displaying, monitoring and automatic saving of measurement data.

Key words: ship-equipment; reference; relative attitude; measurement system

0 引言

船舶装备(精密电子装备、雷达天线等导航装备、火控装备等)安装基准相对姿态定义为其相对于船舶测量参考水平基准在船舶艏艉方向的横倾角和肋骨方向的纵倾角。船舶装备在安装时需保证装备安装基准相对于船舶测量参考水平基准的横倾角和纵倾角在合理的范围,但随着时间和环境的变化,由于磨损、振动、颠簸、船体的局部变形等原因都将引起装备安装基准相对姿态改变,造成和船体测量参考水平基准相对姿态间的失调,从而影响装备精度和使用效果,降低装备效能的发挥。因此有必要对两个基准的相对姿态进行测量与实时监控,一旦超出允许范围,应及时进行修正。

船舶装备安装基准通常安装在船体的最上层甲板上,而船舶测量参考水平基准则位于船体的最下层甲

板中心处,两者之间受到多层甲板、楼梯、房屋等障碍物的隔断。目前测量方式基本上采用电子水平仪进行差分测量,存在的问题是:只能在船舶停泊时进行测量,测量范围小,静止状态下测量,测量距离短等。船舶在海上航行中,船体的摇摆角会超出水平仪量程使得水平仪无法进行测量与监测,因此,亟需一种专用测量系统进行准确测量^[1-3]。

1 测量系统总体设计

测量系统由两路双轴正交测角装置、一套数据收发终端和上位机及测量软件组成,见图1。两路双轴正交测角装置分别安装于船舶装备安装基准和船舶测量参考水平基准,负责采集两个基准在船舶艏艉方向和肋骨方向的角度信息。数据收发终端接收两路测角装置采集的角度信息,与测角装置通过RS485或无线传输通讯,收发终端接收的两路装置角度信息通过USB传输给上位机,上位机软件负责采集并计算两路测角装置在船体艏艉方向与肋骨方向的角度差值并实时显示。

收稿日期: 2016-04-21; 修回日期: 2016-04-30

基金项目: 装备技术基础科研合同项目(HK30420141JL11)

作者简介: 王爱军(1984-),男,硕士,工程师,从事几何量计量科研工作。

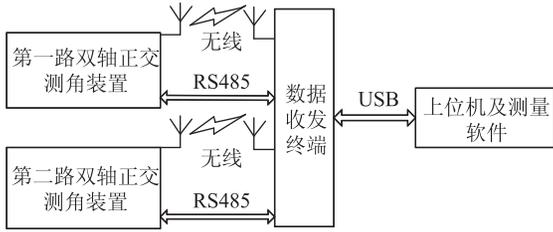


图1 测量系统组成

2 分系统设计

2.1 测角装置

测角装置是整个角度测量系统的核心，实现姿态信息采集与发送，两路测角装置结构相同，每一路测角装置均由两支单轴倾角传感器、传感器安装机构、供电模块、微处理器、RF 射频模块和 RS485 串口组成，如图 2 所示。

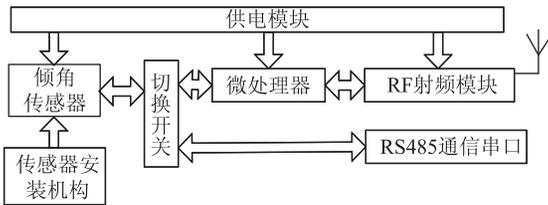


图2 测角装置结构组成

倾角传感器采用 ZEROTRONIC 单向测量传感器，可在多种环境条件下对不稳定的物体或低速移动的物体角度或倾斜度测量。选用传感器量程 $\pm 60^\circ$ 。每套传感器安装机构安装两支传感器，实现两支传感器水平正交布置，且保证两支传感器与测量底面平行。

倾角传感器角度信息通过有线数据传输和无线数据传输进行数据传送。两种模式通过设置切换开关实现功能切换，根据现场的环境及使用条件进行传输方式选择。无线数据传输要求数据传输稳定可靠，能够适应舰船舱外舱室之间有障碍物的环境下正常通信，传输距离能够满足 100 m 使用要求，且要求有极低的静态功耗和较低的工作功耗。故系统采用基于 ZigBee 协议的无线数据通信模式，系统工作频率 2.4 GHz。系统由微处理器为核心的 MCU 控制器和 RF 射频芯片组成，数据发送时，微处理器通过 SPI 总线向 RF 写入控制命令及所需发送的数据，RF 通过天线发送；接收时，微处理器通过 SPI 总线读取 RF 的工作状态，获取芯片相关信息及接收到的数据。从而实现数据的发送与接收。供电模块包含内置式密封高能锂电池为倾角传感器和整个电路提供电源。

2.2 数据收发终端

测角装置角度信息通过数据收发终端进行采集，结构组成如图 3。RF 射频模块 1 与第一路测角装置 RF 射频模块配对共同完成对第一路测角装置角度信息发送接收；RF 射频模块 2 与第二路测角装置 RF 射频模块 2 配对共同完成对第二路测角装置角度信息发送接收；微处理器负责整个无线通信系统中各个模块控制，接收传感器角度信息，向各传感器发送询问信息，设置传感器的工作方式，进行温度补偿，与上位机通信；RS485 通信串口 1、串口 2 分别连接第一路测角装置、第二路测角装置，实现在有线数据模式下数据传输；数据终端也内置了一个密封式高能锂电池，实现在没有外接电源的情况下对整个电路提供电源。

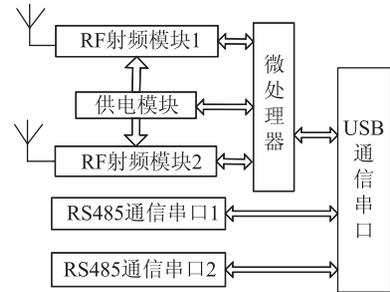


图3 数据收发终端结构组成

2.3 测量软件

测量软件实现对数据收发终端接收的数据显示、差分、存储、自动监测。包括 3 个功能模块，软件初始化设置、数据采集及计算、数据显示与存储。软件初始化设置对传感器通讯串口、波特率、记录文件保存路径等进行设置，数据采集及计算实现对两路测角装置的四路传感器数据进行采集与差分计算，软件能够实现数据手动与自动采集。手动采集时，点击软件读数按钮即可采集当前四路角度信息，并计算出 X、Y 方向上的角度差值即装备安装基准相对于船舶测量参考水平基准的相对姿态。自动采集时，依据要求设定采样周期，软件将按照设定的采样周期进行角度信息的采集，并将采集的数据保存在先前设置的 EXCEL 文件中，实现对装备安装基准相对于船舶测量参考水平基准姿态的实时监测。

3 测量系统精度测试

3.1 测试方法

为验证测量系统的测角精度，采用三轴转台对两路测角装置 X 轴和 Y 轴角度精度进行比对测量。首先将第

一路测角装置固定于三轴转台内框，旋转内框使第一路测角装置的Y轴与三轴转台中框回转轴平行，在±60°范围内，旋转转台中框，每隔10°记录测角装置X轴的角度值，重复测量三次记录测量数据，完成X轴数据采集，将转台内框旋转90°此时第一路测角装置的X轴与三轴转台中框回转轴平行，旋转转台中框，每隔10°记录测角装置Y轴的角度值，重复测量三次记录测量数据，完成Y轴数据采集。同理，将第二路测角装置安装于转台内框，按上述测量方法，完成第二路测角装置X轴、Y轴数据的采集。由记录的数据对两路测角装置测量精度与测量重复性进行分析，通过计算测量值与标称值差值，分析装置测量精度，通过计算三次测量数据之间的极差值分析装置的测量重复性。

3.2 测量精度与重复性分析

以测角装置角度偏差值为纵坐标，角度标称值为横坐标，建立坐标系，则两路测角装置三次测量的X轴、Y轴角度偏差曲线如图4、图5所示。

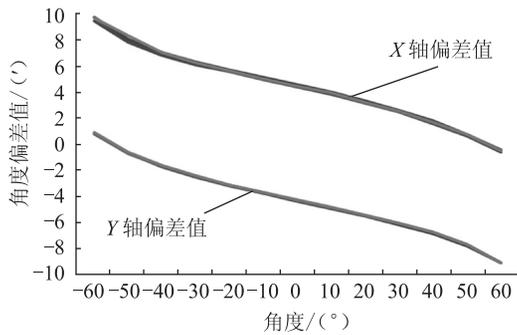


图4 第一路测角装置三次测量X轴Y轴角度偏差曲线

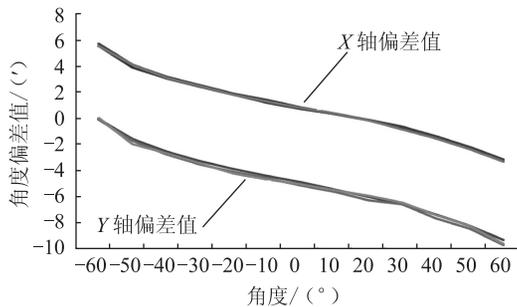


图5 第二路测角装置三次测量X轴Y轴角度偏差曲线

由图4、图5可知，第一路测角装置与第二路测角装置X轴、Y轴角度偏差值基本呈线性变化。第一路测角装置在-60°时X轴角度偏差有最大值9.6′，在60°时Y轴角度偏差有最小值-9.6′；第二路测角装置在-60°时X轴角度偏差有最大值6′，在60°时Y轴角度偏差值有最小值-9.6′。此外，由图4、图5可知，两路测角装置

三次测量偏差曲线基本重合，说明测角装置具有良好的重复性。第一路测角装置X轴角度偏差三次测量最大最小值之差为0.3′，Y轴三次测量最大最小值之差为0.12′，第二路测角装置X轴三次测量最大最小值之差为0.18′，Y轴三次测量最大最小值之差为0.3′，故两套测角装置角度偏差的测量重复性均在0.3′内。

3.3 数据补偿与精度验证

由上分析可知，测角装置偏差基本呈线性变化且具有良好的重复性，可对测量系统进行数据补偿。方法是对三次测量数据取平均值，并计算平均值与标称值的偏差。以标称值为横坐标，求得的偏差值为纵坐标，建立坐标系，对偏差值进行线性最小二乘拟合，求得第一路测角装置与第二路测角装置X轴、Y轴拟合曲线，求得的曲线作为补偿曲线，进行实时补偿。

为验证数据补偿精度，补偿后对装置进行测试验证，并与未补偿前数据进行比对，如图6、图7所示，数据补偿后，偏差值远小于未进行补偿前偏差值，且各条曲线呈线性变化，说明该补偿是合理的。第一路测角装置在60°时X轴角度偏差最大，偏差值为0.8′，在60°时Y轴角度偏差也最大，偏差值为1.2′；第二路测角装置在60°时X轴角度偏差最大，偏差值为0.72′，在60°时Y轴角度偏差也最大，偏差值为1.2′。

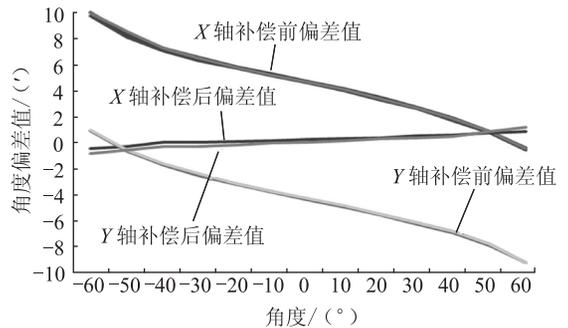


图6 第一路测角装置X轴Y轴补偿前后数据比对

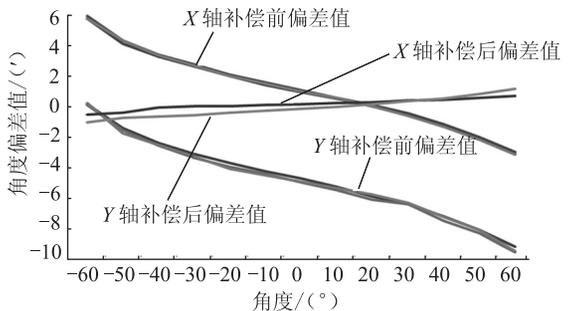


图7 第二路测角装置X轴Y轴补偿前后数据比对

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.08

一种光电编码器检测装置的研制与应用

黄春华

(湖南华南光电(集团)有限责任公司, 湖南常德 415000)

摘要: 针对光电编码器检测中存在的问题研制出了相应的检测装置, 并阐述了检测方法。该检测装置的特点在于: 体积小, 操作方便, 检测快捷, 检测结果数码管显示。检测装置能完成所有的检测项目, 能够达到光电编码器快速、全面、精确检测的要求。

关键词: 光电编码器; 检测装置; 检测方法

中图分类号: TN762.07; TB97

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 03-0031-03

A Design and Application of Photoelectric Encoder

HUANG Chunhua

(Hunan Huanan Optoelectronic (Group) Co., Ltd, Changde 415000, China)

Abstract: In view of the problems existing in the testing of photoelectric encoder, a corresponding detection device is developed, and the test methods are expounded. The advantages of the detection are: small volume, convenient operation, fast testing and digital tube display of the results. All the testing items can be done, therefore, the requirements for the rapid, comprehensive and accurate photoelectric encoder testing can be achieved.

Key words: photoelectric encoder; detection device; detection method

0 引言

光电编码器是一种特殊形式的光电耦合器件, 它通过光电转换将传送在连接器上的位移量转换成脉冲或数字量, 绝对式光电编码器可以直接输出数字量^[1]。光电编码器的分辨力通常是以编码器轴转 360°产生的输出信号基本周期数表示, 即脉冲数/转。分辨力的高低只与码盘上刻的缝隙多少有关。光电编码器的精度是指在所选定的分辨力范围内, 任一脉冲与另一脉冲位置的相对性。精度常用度、分、秒或密位(一个圆周 360°等于 6000 密位, 一密位等于 0.06°)表示。影响编码器精度的因素通常有码盘透光缝隙的加工质量、码盘机械旋转部件的制造精度等。编码器的检测主要是对其精度进行检测^[2]。

目前, 检测光电编码器通常是在大型装配镗床转台上对其进行分段、分点检测, 不仅检测时间长, 可靠性和准确性也较低。根据用户的要求, 光电编码器

参数的检测过程要求快速、准确和可靠, 传统的利用镗床转台进行检测的方法已经不能满足光电编码器的检测要求。主要存在着以下缺点和不足:

- 1) 检测精度低, 重复检测误差在 0.8 至 0.9 密位, 难以保证光电编码器的检测准确度。
- 2) 镗床检测设备体积大、重量重, 检测调整时间长, 操作不灵活, 不便于快速检测。
- 3) 采用分段、分点测量的方法, 使得部分检测项目(如连续性)不能够检测。

1 检测装置结构设计与工作原理

光电编码器检测装置由编码器固定装置和编码器显示装置两大部分组成。

1.1 编码器固定装置

编码器固定装置由精密光学转台 1、精密光学转台锁紧机构 2、连接芯轴 3、芯轴紧固螺圈 4、三头夹具 5、精密光学转台手柄 6、连接螺钉 8、连接螺杆 10、压紧钢圈螺杆 11、被测光电编码器 12、光电编码器压紧钢圈 13 和光电编码器紧固架体 14 组成, 如图 1 所示。

收稿日期: 2015-11-18; 修回日期: 2016-02-04

作者简介: 黄春华 (1969-), 女, 工程师, 主要从事电器检测技术工作。

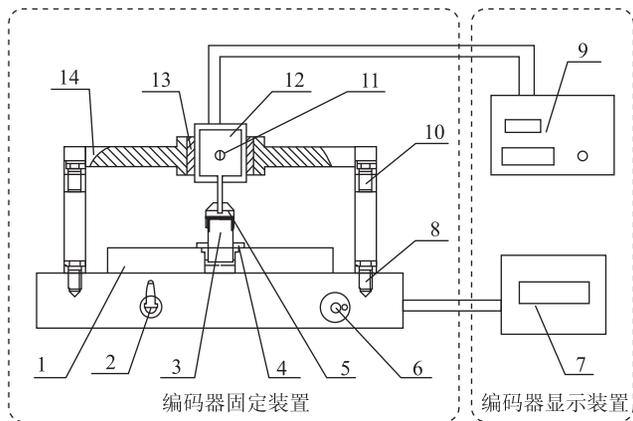


图1 编码器检测装置图

1.2 显示装置

显示装置由角度标准和被检对象数显系统组成，见图1中序号7和9。

1.2.1 被检对象数显系统组成及设计原理

被检对象数显系统主要由电气控制电路板和数显板组成；电气控制电路板以单片机为核心，单片机不断读取光电编码器测得的角度，计算出密位，数显板显示密位值，如图2所示。

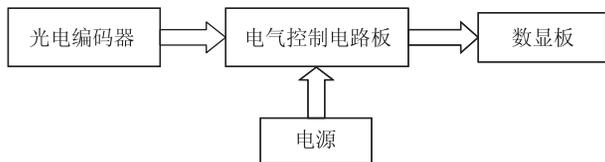


图2 电气控制电路板原理框图

1) 电气控制电路板硬件设计

单片机 I/O 口资源分配：P0 和 P2 口分配给光电编码器，P1 口分配给显示驱动。为提高单片机的可靠性，采用 uP 监控电路来增加单片机的稳定性和抗干扰能力（采用能够监控电源电压、电池故障、微处理器工作状态的 CMOS 电路，将所用到的多项功能集成到一小芯片内。和用分立元件或单一功能芯片组合的电路比较，这种设计减少了复杂的电路和元器件的数量，大大提高了系统可靠性和精确度^[3]）。

显示驱动电路：使用平均功率不超过 1W 的 8 位共阴极 LED 数码管，并选用串行 LED 显示驱动器^[4]。

电源模块：使用铝外壳且内部散热好的表面贴装元件，它具有内置输入及输出滤波器，减少了输入电磁干扰和输出纹波，从而降低了对系统的干扰^[5]。

2) 数显板硬件设计

数显板主要是由 7 个数码管组成，驱动由显示驱

动电路提供。

3) 软件设计说明

电气控制电路板测角度和求密位的软件采用 C 语言进行编程。

数据处理以二进制数据为基准，用公式（1）求密位，由公式（2）求角度。

$$M = (3375/18432) \times B \quad (1)$$

$$A = (10125/256) \times B \quad (2)$$

式中：A 表示角度，(°)；M 表示角度的密位值；B 表示二进制数据。

负角度处理依据为：当顺时针方向转动转台时，角度为负。由于二进制数据为 15 bit，所以正角度范围为 0~16383（对应正角度 0°~179°59'59"），负角度范围为 -1~-16384（对应负角度 -1°~-180°），由负角度处理方法可判别 B 是否小于 0。

1.2.2 角度标准组成及设计原理

感应同步器数显系统由感应同步器和数显表组成，它是一种传感器，其工作原理是利用电磁原理将角位移转换成电信号，当定子和转子相对转动时输出的激磁信号分别对转子两相绕组激磁，在定子上的感应电动势经过前置放大器放大，A/D 转换成位移脉冲，通过感应同步器数显表显示出相对位移。感应同步器数显系统组成如图 3 所示。

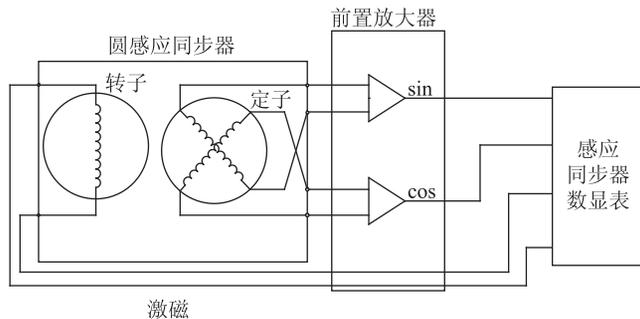


图3 感应同步器数显系统组成

感应同步器数显系统的功能：系统自检、清零、预置数、绝对与相对坐标转换、度与度、分、秒显示方式转换（10 进制/60 进制转换显示）。

感应同步器为 720 极圆感应同步器，它是由 1 个转子和 1 个定子产生激磁信号，经过前置放大器后由感应同步器数显表显示出来。数显表显示窗由 8 个相同的高亮度 LED 数码管组成，此装置的分辨力为 0.1"。

软件通讯设置：波特率为 115200 bit/s，8 位数据位，1 位停止位。

2 光电编码器检测方法

1) 将被检编码器装在外壳紧固架体上, 通过压紧钢圈与锁紧钢圈螺杆锁紧外壳; 旋转三头夹具使其夹紧旋转轴, 匀速转动精密光学转台手柄使编码器旋转轴和外壳在转动时不发生偏转, 则装夹完成; 反之, 则需再次调整。

2) 将被检编码器的输出线连接被检对象数显系统, 接通精密光学转台、被检编码器与被检对象数显系统的电源, 匀速转动精密光学转台手柄先使被检对象数显系统读数归零, 然后再把角度标准读数清零。

3) 解锁精密光学转台, 按照被测编码器技术要求的角度点匀速转动转台手柄, 记录此时角度标准第 i 个角度点 α_i 读数, 此时角度精度检测仪的读数 β_i , 则被检编码器的第 i 个测角绝对误差 $\delta_i = \alpha_i - \beta_i$ 。将 δ_i 与被检编码器的技术要求 θ_i 比较, 若 $\delta_i < \theta_i$, $i = 1, 2, 3, \dots$, 则表明被检编码器符合要求, 反之, 则不符合要求。

3 检测装置的精度测试

采用 23 面棱体和光电自准直仪配合, 对检测装置进行了三次重复测试, 检测装置误差角度示值为 $43.11''$ (0.2 密位), 装置重复性为 $2.68''$ (0.012 密位)

某型号的绝对式光电编码器入厂精度检测要求为 $\leq \pm 1$ 密位, 利用本装置对编号为 140106 的编码器连续进行 3 次检测, 可以计算出光电编码器误差和 3 次重复检测的最大差值, 其检测记录如表 1 所示。由表 1 可以看出, 检测精度也远远高于镗床检测, 所以本检测装置完全能够满足检测需要。

另外, 对该编码器用本装置和镗床转台进行了比对测试, 对比结果表明, 本装置操作方便, 检测时间为镗床转台的 $1/3$, 检测时间大大缩短, 检测效率非常高。

4 结束语

本装置弥补了传统光电编码器检测装置及检测方法的不足, 实现了光电编码器的自动检测, 通过对已投入使用的几百个编码器的检测结果进行分析以及出厂后产品的反馈情况来看, 检测结果能正确反映被检光电编码器的测角精度, 即该光电编码器检测装置和

表 1 光电编码器检测装置测试结果 密位

转动角度	测试结果			三次重复检测 最大差值 (最大值-最小值)
	第一次 测试	第二次 测试	第三次 测试	
0.0	0	0	0	0
100	100.1	100.2	100.3	0.2
200	200.2	200.3	200.1	0.2
300	300.2	300.3	300.1	0.2
400	400.1	400.2	400.3	0.2
500	500.2	500.3	500.1	0.2
600	600.2	599.9	600.1	0.3
700	700.1	700.3	700.2	0.2
800	800.2	800.1	800.3	0.2
900	900.3	900.3	900.3	0
1000	1000.2	999.9	1000.1	0.3
1100	1100.1	1100.2	1100.3	0.2
1200	1200.2	1200.3	1200.1	0.2
1300	1300.3	1300.2	1300.2	0.1
1333.3	1333.3	1333.1	1333.3	0.2
误差		0.3		0.3

检测方法能够满足众多类型 (目前已经实施了三种类型) 光电编码器的检测质量和可靠性需求。

参考文献

- [1] 胡宗政. 脉冲编码器在数控机床中的典型应用 [J]. 机电产品开发与创新, 2012 (6): 163-165.
- [2] 天津森特奈电子. 增量式光电编码器分辨率与精度 [Z]. 2014.
- [3] 薛菲, 方彦军. MAX705 在 PROFIBUS-DP 从站数据采集系统中的应用 [J]. 微计算机信息, 2004, 20 (8): 56-57.
- [4] 林敏, 于忠得. AT89C2051 单片机串行口扩展的 LED 显示接口电路 [J]. 计量技术, 2002 (8): 28-29.
- [5] 舒浙伟, 郭康贤, 彭超. DC/DC 电源模块散热器的设计及热分析 [J]. 电子产品世界, 2012, 19 (1): 55-57.



计量测控微信

微信号: cnjlck
微信名称: 计量测控

计量测控微信公众平台由计测传媒亲情打造, 隶属中航工业北京长城计量测试技术研究所 (航空304所), 为广大粉丝推送最热、最新的计量资讯, 提供各种计量检测类信息咨询服务, 教学视频等。

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.09

基于 F-P 滤波器的高速驱动电路设计与仿真

孙义斌, 盛楠

(中航工业北京长城计量测试技术研究所 光纤传感技术中心, 北京 100095)

摘要: 法布里-珀罗 (F-P) 滤波器是基于 F-P 原理解调仪表中的核心器件。F-P 滤波器在高速驱动情况下会出现非线性和振铃现象, 从而影响使用。本文提出了采用 OPA552 芯片与三极管的方案进行电路设计, 通过电路仿真实验可以验证, 此设计方案解决了高速驱动情况下产生的问题。

关键词: F-P 滤波器; 高速驱动电路; 设计; 电路仿真; OPA552 芯片; 三极管

中图分类号: TB21; TN713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2016) 03-0034-05

Design and Simulation of High-speed Driving Circuit for a F-P Filter

SUN Yibin, SHENG Nan

(Optical Fiber Sensor Technology Center, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Fiber grating technique has gained more and more application in various fields as its rapid development. An F-P filter is the core component of a fiber interrogator based on F-P technique. There will be non-linear and ringing phenomena in the high-speed driving circuit for the F-P filter. This paper presents one scheme to the circuit design based on OPA552 and audions. Through the circuit simulation and experimental verification, this design scheme can solve the problems in the high-speed driving conditions.

Key words: F-P filter; high-speed driving circuit; design; circuit simulation; OPA552; audions

0 引言

近年来, 光纤传感及解调技术的应用范围越来越广, 凭借其独特的技术特点, 已逐步成为计量测试领域的重要组成部分。光纤光栅传感系统关键技术是通过解调仪表解调波长信号从而反映出被测量的变化情况。随着应用领域的不断拓展, 对解调仪表的各项指标提出了更高的要求, 例如提高仪表的信号扫描频率。目前比较成熟的解调技术大多基于 F-P 滤波器, 在这种基于 F-P 原理的仪表中, 滤波器的工作频率将直接影响仪表的信号扫描频率。

F-P 滤波器的基本结构是由一对平行的高反射镜以及高反射镜之间的法珀腔构成。光纤 F-P 可调滤波器 (FFP) 是基于全光纤 F-P 标准具技术的特殊的可调谐滤波器, 它允许波长与 F-P 腔长度有倍数关系的光通过, 而其他波长的光按照爱里函数衰减。全光纤 F-P 可调谐滤波器特性非常接近爱里函数, 得到的结果也非常接近理论的数学模型, 再加上其低损耗、大动态

范围、高隔离度及高精度功率和波长测量等特点, 使其在光学性能监测及光纤传感器和光纤解调仪表领域有着很广泛的应用。

在基于 F-P 原理的高速光纤光栅解调仪表的研制过程中, 根据不同的应用环境, 需要提高核心器件 F-P 滤波器的扫描频率, 在特殊情况下甚至需要其扫描频率达到 2 kHz 甚至更高。F-P 的三角波驱动电路在低频情况下运行良好, 本文旨在设计高速驱动电路, 即需要 F-P 驱动电路在高频环境下高质量运行, 而高频环境下, 一般的驱动电路无法正常的工作于 F-P 滤波器。本文通过 Pspice 电路仿真软件对高频驱动信号进行仿真实验分析, 针对 F-P 滤波器驱动电路的稳定性设计进行研究, 并提出可行的电路设计方案。

1 高频 F-P 滤波器驱动电路存在的问题及设计方案

F-P 滤波器做为典型的容性负载, 随着频率的增大, 驱动 F-P 滤波器的三角波电压信号会产生畸变, 非线性度加大。简单起见, 可将放大器看成是一个振荡器, 每个运放都有一个内部输出电阻, 当它与容性负载相接时, 在运放的传递函数上会产生一个附加的极

收稿日期: 2016-01-19; 修回日期: 2016-03-22

作者简介: 孙义斌 (1984-), 男, 工程师, 工程硕士, 从事光纤光栅解调仪表方面的研究。

点。当开环增益和反馈衰减之和大于 1 时，电路便会出现不稳定。同样，如果某一工作频率低于闭环带宽，在这个频率下运放会出现振荡。通常，当相位裕度小于 45° 时，便会导致产生阶跃响应中的过冲或“振铃”现象，使得电路很不稳定^[1]。

在经过特殊处理的情况下，用普通的放大电路驱动 F-P 滤波器。在信号采集端加入标准具信号及 FBG 传感器信号，形成完整的解调仪表信号采集系统。

首先，由函数发生器 HP33250 产生三角波信号驱动 F-P 滤波器工作，实际使用中发现随着频率增大，三角波产生畸变，非线性度加大。在不同频率下三角波的变化如图 1 所示。

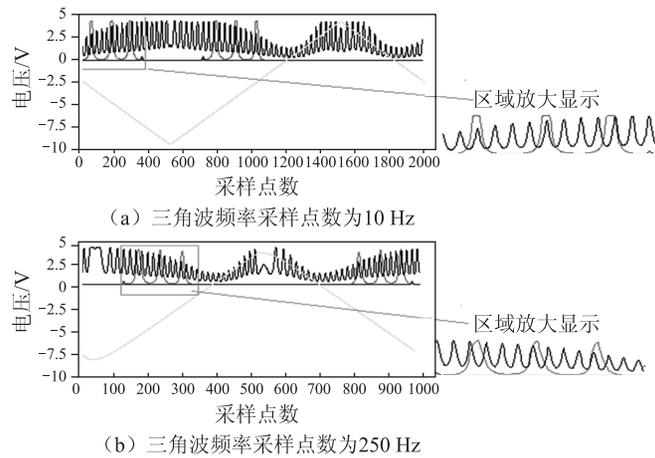


图 1 不同频率下三角波信号的变化示意图

基于 F-P 原理的解调仪表其数据处理常采用差值计算的方法，而差值计算的条件要求驱动电压呈线性，当实际工作于非线性时，计算结果会存在误差。

其次，在 Pspice 上进行仿真。F-P 滤波器的等效电容约为 3 μF，在一般的放大电路中直接加入该等效电容进行仿真，驱动电压直接采用三角波分量正弦波信号，其仿真模型如图 2 所示。

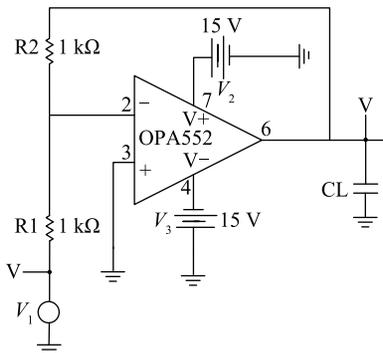


图 2 F-P 腔驱动电路仿真图

该电路设置增益为 1， V_1 的电压幅值为 1 V，偏置为 0 V。不同频率下仿真结果如图 3 所示，由此发现，驱动容性负载时，在频率较高情况下，输出信号的确会产生振荡。

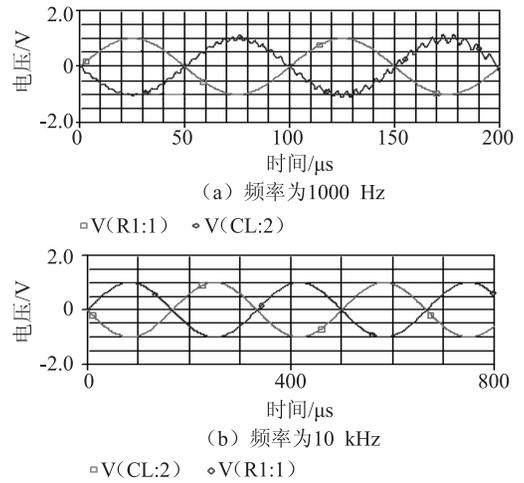


图 3 不同频率下仿真结果

为提高光纤光栅解调信号的准确度，必须产生一个线性度良好的三角波信号来驱动 F-P 滤波器。由于三角波由多个正弦分量组成，想要得到线性度良好的三角波，则要求驱动信号高频响应的截止频率至少达到三角波频率的 5 倍以上，压电陶瓷的极间电容值约为 3 μF，若驱动信号输出阻抗为 50 Ω，则由 $f = 1 / (2\pi RC)$ 算得其高频截止频率只能达到 1 kHz，使扫描频率只能达到 200 Hz。因此，要提高解调速度，必须大大降低驱动信号的输出阻抗^[2]。

高频情况下存在振荡的这种问题，属于驱动容性负载较为典型的情况。

本实验电路采用内环增益方法和噪声增益方法相结合的技术手段解决容性负载驱动稳定性问题，采用的芯片是 OPA552，OPA552 芯片连接示意图如图 4 所示。图 4 中， R_g 、 R_f 、 C_s 、 C_f 为相应的电阻和电容。

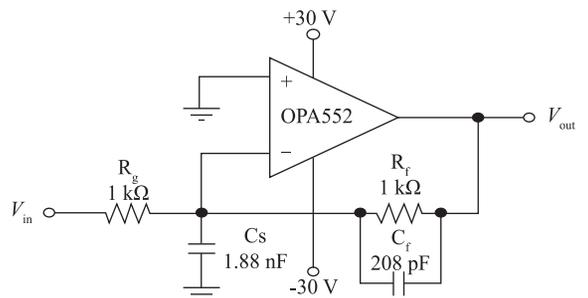


图 4 OPA552 芯片连接示意图

OPA552 芯片一般应用于增益大于 5 的情况，如果

采用外部电路补偿技术, 则可以实现低增益的高速转换功能, 使 OPA552 电路在低频情况下保持低噪声特性。在实际应用中, OPA552 一般会产生高频噪声, 外部电路补偿技术可以使环路增益保持良好的稳定性, 获得容易控制的二阶低通滤波器的频率响应效果, 适合驱动容性负载。

考虑到噪声增益, 低频噪声增益 NG_1 由电阻比确定, 高频噪声增益 NG_2 由电容比确定, 电容值确定了传输频带和低频噪声增益。如果高频噪声增益 $NG_2 = 1 + C_s/C_f$ 设置值大于最小稳定值 $1/R_f C_f$, 电路可以获得良好的二阶低通特性。

在选择电容 C_s 和 C_f 时, 首先要使高频噪声增益 $NG_2 = 1 + C_s/C_f$ 设置值大于 $1/R_f C_f$, 一般选择为 10, 使得

$$NG_2 = 1 + C_s/C_f = 10 \quad (1)$$

其次, 运放电路信号增益为 -1, 使得低频噪声增益

$$NG_1 = 1 + R_f/R_g = 2 \quad (2)$$

由此可知增益带宽积 (Gain Bandwidth Product, GBP) 为 12 MHz, 电路的截止频率为 956 kHz。如果不在电路中配置合适的电容 C_s 和 C_f , OPA552 电路就会产生振荡现象^[3]。

2 F-P 腔驱动电路仿真分析

2.1 运用芯片在 Pspice 上进行电路仿真实验

结合上述结果, 在 Pspice 电路仿真软件上进行电路仿真实验。一方面, DAC 给出的三角波信号经 I-V 转换后, 进入电压跟随电路, 输出电流得到提高 (三角波频率设置为 2 kHz, 电压幅值为 1 V); 另一方面, 直流电压经运放加入到扫描波中, 作为扫描波的可调直流偏置。整合后, 其电路仿真图如图 5。

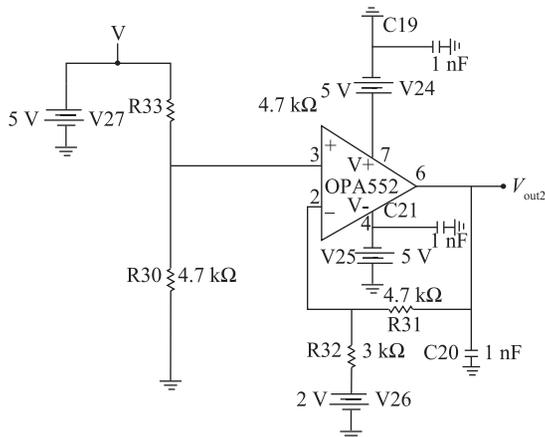
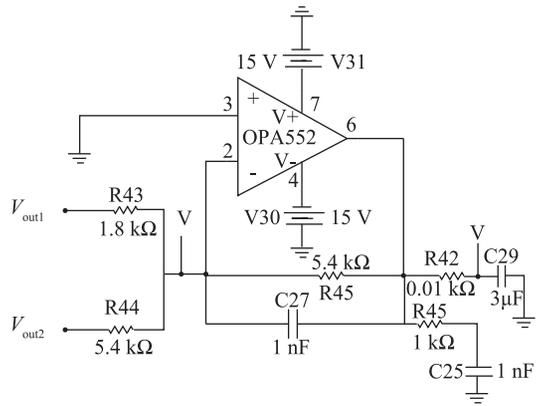
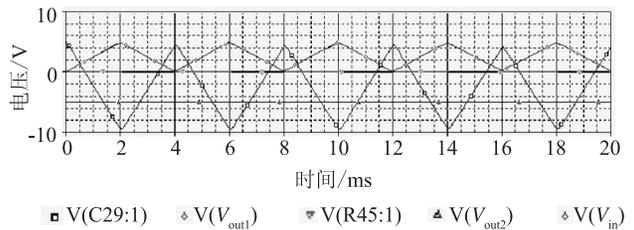


图 5 带有直流偏置的电压跟随电路模型

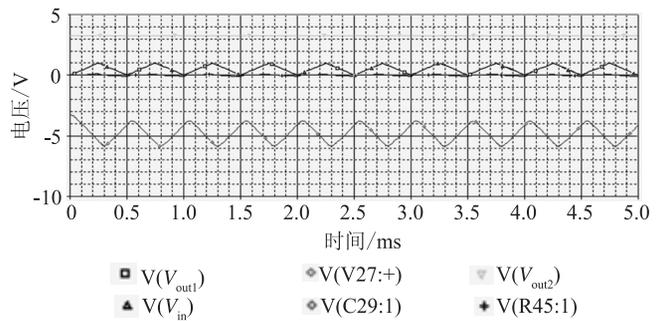
前两部分中的输出还需经过一个高压放大电路, 来提高输出电流、输出电压以达到 F-P 腔驱动信号的要求。设置不同的三角波频率来进行仿真, 电路模型如图 6 (a), 不同三角波频率下仿真结果如图 6 (b) 和图 6 (c)。



(a) 放大电路模型



(b) 三角波频率为 250 Hz



(c) 三角波频率为 2 kHz

图 6 放大电路模型及不同频率三角波下仿真结果

从仿真结果上可以看出, 三角波频率在 250 Hz 时已经比先前的仿真结果有了明显改进, 三角波的非线性及驱动容性负载产生的振荡现象都得到了解决。但本文要求驱动 F-P 腔的三角波信号频率达到 2 kHz, 这就要求高频截止频率至少达到 10 kHz, 由于 OPA552 的开环输出阻抗约为 18 Ω, 由 $f = 1/(2\pi RC)$ 算得截止频率仅为 2.94 kHz, 并没有达到要求。从三角波频率为 2 kHz 的仿真结果中可以看到, 由于采用了 OPA552 芯片作为放大电路, 并在电路连接中考虑到容

性负载问题，在此频率下已经可以消除振荡等非稳定性问题，但三角波非线性问题并没有得到根本解决^[4]。

2.2 利用三极管消除三角波非线性

为解决 2 kHz 频率下三角波非线性问题，可以通过在输出端接入三极管的做法实现，如图 7 所示，在输出端以一定的方式接入三极管，可以增大输出电流，从而增大驱动负载的能力^[5]。

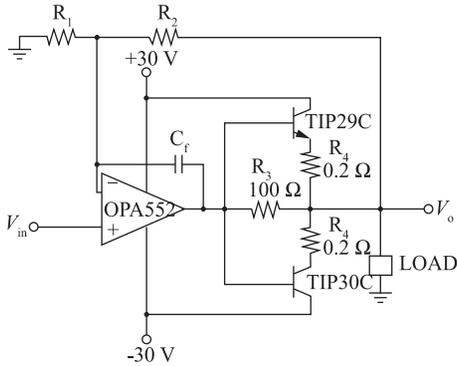


图 7 三极管增大输出电流接法

按照图 7 修改电路连接方式，在 OPA552 芯片输出端接入 TIP29C 和 TIP30C 两个三极管，改变电路反馈的连接形式，并在 Pspice 上进行仿真，仿真电路图及仿真结果如图 8 和图 9。

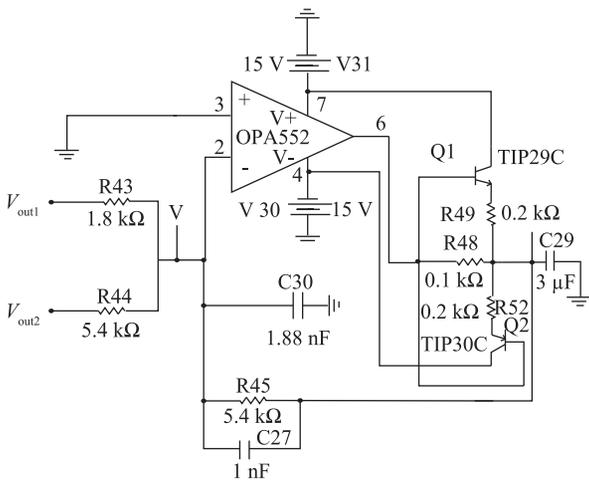


图 8 接入三极管后仿真电路图

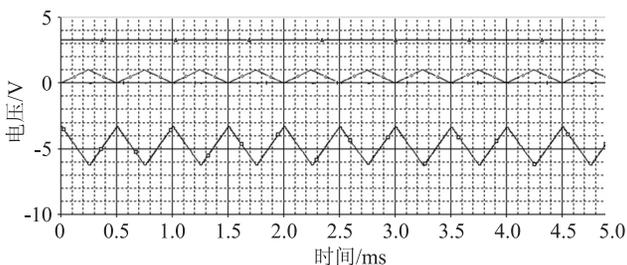


图 9 仿真结果

图 9 是在三角波频率为 2 kHz 时的仿真结果图，其最下部的三角波曲线即为 F-P 腔的驱动信号曲线。从图 9 中曲线可以看出，三角波非线性问题已经解决。在 OPA552 输出端以适当的方式接入三极管后，整个电路的输出电流得到增大，驱动负载的能力也得到提高，从而消除了三角波在这个频率下出现非线性的情况。

3 实验验证

根据前文的仿真结果，设计电路结构，如图 10 所示。

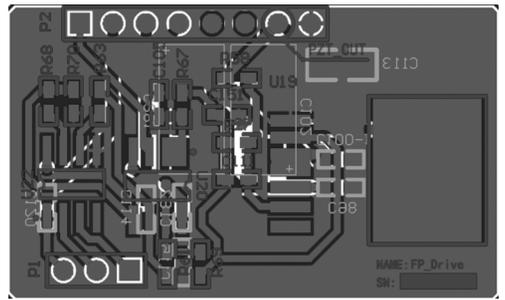


图 10 电路 PCB 图

为了形成完整的解调仪表采集系统，信号采集端加入标准具和 FBG 传感器信号，通过光电转换在示波器上进行采集。250 Hz 频率下，三角波驱动电压的实际效果如图 11 所示。此波形与图 1 (b) 中 250 Hz 频率下采集到的三角波驱动信号对比已有明显的改善，线性度良好。

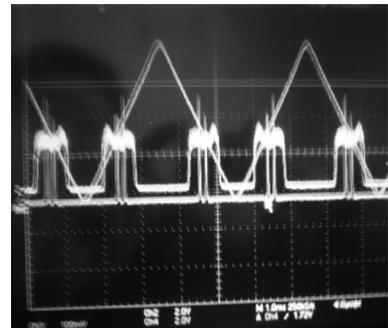


图 11 三角波、标准具及 FBG 传感器信号

从图 9 中看出，在一个三角波的下降沿或上升沿过程中，均会采集到一组标准具信号和一个 FBG 传感器信号。从采集结果来看，标准具和 FBG 传感器信号均正常。

由于实际电路结构旨在用于光纤光栅解调仪表中做为 F-P 腔的驱动，而 F-P 腔原理的解调仪表产品扫

描频率使用需求目前最高为 250 Hz, F-P 滤波器为国外进口, 价格昂贵, 其极限扫面频率一般为 1~2 kHz, 在较高频率下使用易损坏, 所以实际验证实验以仪表产品为例, 只做了 250 Hz 频率下信号采集。

理论上, 依照仿真设计, 改进后的电路结构在驱动 F-P 腔滤波器时, 工作在 2 kHz 高频情况下, 三角波驱动电压的非线性等问题均可解决。

4 结束语

本文主要从电路部分分析研究了 F-P 滤波器做为容性负载带来的典型问题, 并详细介绍了如何解决在高频情况下驱动 F-P 腔所出现的振铃以及三角波非线性问题。电路设计中选用了 OPA552 芯片及接入三极管的方法, 采取适当的连接方式, 消除了 2 kHz 频率

下系统存在的以上问题。

参 考 文 献

- [1] 吕超, 焦斌亮. 运算放大器容性负载驱动问题及其解决方法 [J]. 电子技术, 2008, 45 (2): 77-80.
- [2] 电子开发网综合技术. 运算放大器应用设计的几个技巧 [EB/OL]. [2015-12-12]. www.dzxf.cn, 2007.
- [3] Varadan V K, Varadan V V. Wireless Electro-optic Switching Network for Optical Fiber Sensor Array Using MEMS-IDT Devices [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1999, 22: 131-135.
- [4] 孙传友, 孙晓斌, 汉泽西, 等. 测控系统原理与设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002: 5-17.
- [5] 肖忠祥. 数据采集原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2003: 52-53.



(上接第 30 页)

3.4 测角装置性能比对

上述对两套测角装置测角精度分别进行了分析, 理论上若两套测角装置结构完全相同且在转台上安装位置完全一致, 则对任意位置的测量结果应一致, 但由于传感器自身误差, 测角装置误差、测角装置在转台上安装引起的安装误差的存在, 两套测角装置对同一位置的测量结果不一致, 图 8、图 9 给出了两套测角装置在转台同一安装位置下不同 X 轴、Y 轴测量值与标称值差值的变化曲线, 图中两条曲线变化趋势趋于一致, 呈现同时增大同时减小。在 -40°, 30°, 40°, 50°, 60°位置点两路测角装置测得的 X 轴数据差异值最大, 为 0.12'; 在 -40°测量角度时, Y 轴数据差异值最大, 为 0.24'。产生不一致原因即为上述分析的各种误差影响的结果。

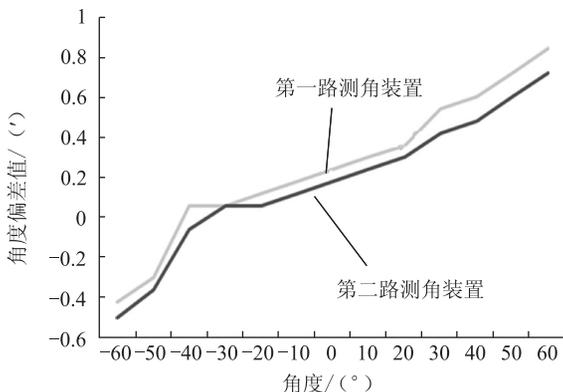


图 8 两套测角装置 X 轴测试数据偏差曲线

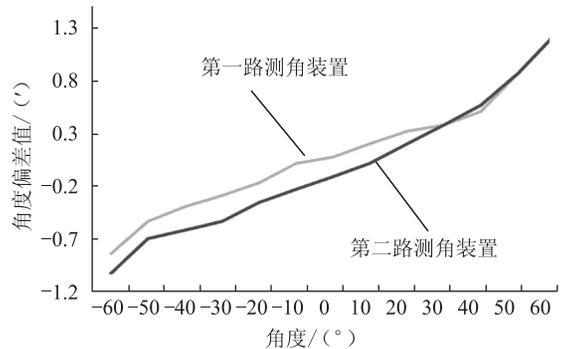


图 9 两套测角装置 Y 轴测试数据偏差曲线

4 结论

研制的船舶装备安装基准相对姿态测量系统测角范围为±60°, 最大测角误差为 1.2', 具有安装简单、使用方便、测量效率高等优点。其既可以满足船舶电子装备、雷达天线导航装备、火控装备安装基准在船舶甲板安装过程中的姿态测试需要, 也可用于船舶装备使用过程中基准相对姿态的周期校准和长期稳定性监测。

参 考 文 献

- [1] 施建荣, 施诗, 张燕论. 舰船装备倾斜和摇摆环境适应性与试验 [J]. 装备环境工程, 2011 (8): 41-44.
- [2] 程树昌, 杨绍清. 舰载武器系统水平度检测与校正新方法模型 [J]. 火力与指挥控制, 1996, 21 (3): 73-76.
- [3] 丁德勇, 康邴, 王五成. 水面舰艇电子装备基座水平度的检验与修正 [J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2004, 26 (6): 70-73, 83.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.10

保偏光纤截止波长测量技术研究

全治科, 高业胜, 张洪喜

(中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

摘要: 研究了保偏光纤截止波长的测量技术, 给出了保偏光纤截止波长测量的实现方法, 建立了测量装置, 实现了不同类型保偏光纤快慢轴截止波长的分别测量, 通过实验验证, 对影响保偏光纤截止波长测量结果的主要因素进行了分析。研究建立的测量系统, 对保偏光纤科研生产厂家开展相关测试具有一定的参考意义。

关键词: 保偏光纤; 截止波长; 测量

中图分类号: TB96; TH741 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2016) 03-0039-05

Investigation on the Cutoff-wavelength Measurement of the Polarization-maintaining Optical Fiber

QUAN Zhike, GAO Yesheng, ZHANG Hongxi

(The 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China)

Abstract: The cutoff-wavelength measuring methods of polarization-maintaining optical fiber (PMOF) has been investigated and the implement method has been presented. The established the cutoff-wavelength measuring device for the PMOF has realized the measurements of the fast- and slow-axis cutoff wavelength for some kinds of PMOF, respectively. By the validation experiment, The principle factors which influence the cutoff-wavelength measuring results have been analyzed. The built measuring system has certain significance on the relevant tests operated by those who study and manufacture the PMOF.

Key words: polarization-maintaining optical fiber; cutoff-wavelength; measurement

0 引言

保偏光纤是一种特殊的单模光纤, 作为研制光纤传感器的主要材料, 在光纤陀螺、光纤水听器传感器和 DWDM, EDFA 等光纤通信系统中广泛应用。以保偏光纤为核心器件制作的光纤传感器在导航、制导、瞄准稳定、卫星定位、人工智能、天文探测、矿藏勘探、开采、大地测绘、地震预报、海洋调查、救生、海底电缆等方面已得到普遍应用^[1-2]。目前, 国内从事保偏光纤科研生产的企事业单位有十余家之多, 随着中高精度光纤传感器研制生产技术的进一步发展, 保偏光纤性能参数测量和评估的需求越来越迫切, 保偏光纤的主要技术参数如串音、拍长, 国内已经具备了测量能力, 而在截止波长测量上, 还没有真正适用于保偏光纤的测量方法和技术, 保偏光纤科研、生产厂

家一般是采用单模光纤截止波长测量系统进行测量^[3], 没有考虑保偏光纤快慢轴截止波长的分别测量, 其测量手段不完善, 测量不确定度大, 抑制了保偏光纤研制、生产水平的进一步提升。

1 测量技术方案的比较与选择

1.1 光纤截止波长的物理意义

截止波长是单模光纤的本征参量和基本参数, 它是确保光纤单模传输的光波长范围, 当截止波长小于工作波长时, 才能保证光在该光纤中的单模传输。保偏光纤截止波长的物理意义基本与单模光纤一致, 只不过这时的截止波长是指保偏光纤偏振轴的截止波长。

光纤中光纤的归一化频率 ν 与传导模的数目有如下关系:

$$\nu = \frac{2\pi n_1 a}{\lambda} \sqrt{2\Delta} \quad (1)$$

式中: n_1 为纤芯折射率; a 为纤芯半径, μm ; Δ 为相对折射率, $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / (2n_1^2)$; n_2 为包层折射率; λ 为光在真空中的波长, μm 。

收稿日期: 2016-04-08; 修回日期: 2016-05-16

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目 (J312011A002)

作者简介: 全治科 (1980-), 男, 工程师, 从事光电子计量技术研究工作。

根据阶跃光纤折射率分布及弱导近似理论,最低阶模为基模即 LP_{01} (HE_{11}) 模,次低阶模为 LP_{11} 模。随着 ν 减小,高阶模依次截止,光纤中传导模的数目也相应减少,当 ν 减小到使次低阶模 LP_{11} 模也不能传输时,光纤中只能传输 LP_{01} 模了。这时对应的归一化频率 ν_c 为

$$\nu_c = \frac{2\pi n_1 a}{\lambda_{ct}} \sqrt{2\Delta} \quad (2)$$

式中: ν_c 为归一化的截止频率; λ_{ct} 为截止波长,它表示次低阶模得以传输的最大波长。而基模可以在任何波长传播,因此,当 $\lambda > \lambda_{ct}$ 时,即当光纤的工作波长大于截止波长时,光纤才处于单模工作状态^[4-5]。

1.2 几种常见的光纤截止波长测量方法

保偏光纤是一种特殊的单模光纤,且与普通单模光纤具有良好的兼容性,在截止波长的测量方法上,可以结合其自身的特点,选用合适的单模光纤的截止波长测量方法。

1.2.1 偏振法

基模 LP_{01} 在一般的介质光波导中由正交方向基本上是线性偏振的两个模组成,其中一个模不受应力和弯曲或非理想的纤芯几何形状的制约^[6]。对于理想的光纤来说,在近似弱传输的有效范围内,不是线性偏振的高次模 TE_{01} , TM_{01} , HE_{21} 可以简并,形成一个线性偏振的 LP_{11} 模,这种简并不稳定,当对光纤施加适当的微扰时,这种简并现象就会被消除,特别在光纤截止波长附近更是如此^[6]。基于这个原理,将被测光纤固定于 V 形槽中,通过产生应力来增强基模的偏振方向性,防止高次模以线性偏振的简并模态结构形式传输。测量原理如图 1 所示,在被测光纤中对每个波长都能激励起一个线性偏振光,通过一次光谱扫描测量出偏振度 α 和波长 λ 的关系曲线,以此来确定被测光纤的截止波长。

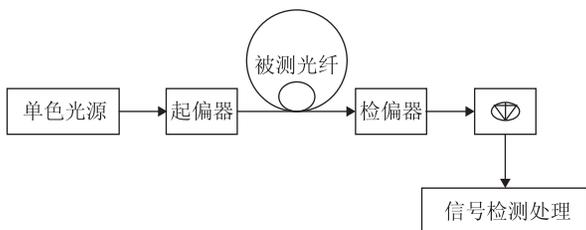


图1 偏振法测量单模光纤截止波长原理图

偏振度的计算公式为

$$\alpha = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3)$$

式中: I_{\max} 和 I_{\min} 为每一个波长下对应检偏器两个正交位置测出的最大和最小光强度。

设 P_0 为基模 LP_{01} 传输的光功率, P_1 为不完全偏振的 LP_{11} 模的光功率,因为 LP_{01} 模是偏振的,对 I_{\max} 的影响很大,对 I_{\min} 的影响很小,而 LP_{11} 对输出功率影响很大,即

$$\begin{aligned} I_{\max} &= K(P_0 + P_1/2) \\ I_{\min} &= KP_1/2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: K 为常数。

在连续调整检偏器的情况下,测出每个波长下输出光功率对应的光强最大值 I_{\max} 和最小值 I_{\min} ,由公式(3)计算每个波长下的偏振度,利用波长与偏振度的关系曲线来确定被测光纤的截止波长。

该测量方法要求探测器响应的线性度要高,而且在公式推导过程中使用了一些实际测量过程中很难完全满足的假设条件,这就必然导致了测量准确度不高,其次其系统操作也比较复杂麻烦。

1.2.2 传输功率法

传输功率法是国际上推荐的测量单模光纤截止波长的基本方法。当光源发出的光注入到光纤后,就有可能在光纤中激励起除 LP_{01} 模以外的高阶模,如 LP_{11} 模。 LP_{11} 和 LP_{01} 在光纤中的传输不仅受到吸收和散射的影响,还要受到弯曲等因素的影响,产生一定的衰减。一般情况下,基模和高阶模受影响的程度不同,高阶模更易受到影响而产生明显的衰减,理论截止波长一旦高于工作波长时,高阶模就会急剧衰减。传输功率法基于这个原理进行截止波长的确定和测量,原理如图 2 所示。

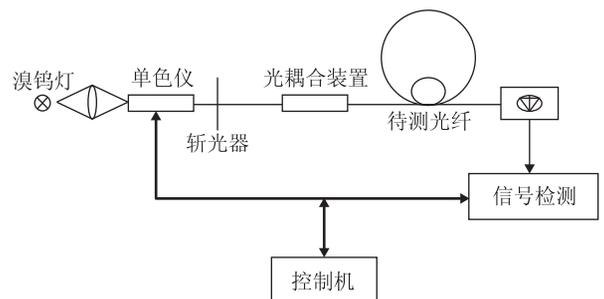


图2 传输功率法测量单模光纤截止波长原理图

以宽带光源卤灯为光源,发出的光经单色仪后通过耦合装置进入光纤,两者共同组成波长可调谐光源,通过斩光器对光束进行调制,提高光信号的信噪比。其中光源波长在所要求的范围内连续可调,光源的功率稳定性和波长稳定性应满足测试的要求。

信号检测仪的光谱响应与光源的光谱特性一致，可采用光功率计，在信号比较小的情况下，也可采用锁相放大器进行信号采集。探测器须具有良好线性的光敏面，且能采集来自光纤的全部光功率。

采用大圈、小圈两次测量功率比值确定截止波长，可克服光源输出光谱特性的影响，提高测量准确度，这种测量方法只需从大弯到小弯改变一次光纤状态；在整个测量过程中，只需进行一次空间光与光纤光的耦合工作，不需要多次注入，这样一方面减小了外界杂散光的影响，另一方面也改善了在测量过程中光纤等状态变化引起的测量不确定度的影响。

1.2.3 测量方法比较

两种不同的测量方法各具有不同的特点，具体描述见表 1 所示。

表 1 两种光纤截止波长测量方法比较

测量方法	优点	缺点
偏振法	适合于研究光纤中传输光偏振态与截止波长的关系。	对探测器线性度要求高，测量准确度低，系统操作繁琐。
传输功率法	国际上推荐采用的基准测量方法，测量精度较高。	对激励用光源输出功率稳定度要求较高。

通过对两种方法进行综合比较，可以看出，无论是测量精度或是方法的可操作性，传输功率法都具有较大的技术优势。

2 测量系统组成

基于传输功率法，我们建立了保偏光纤截止波长测量系统。实现该系统的主要技术难点是 600 ~ 1600 nm 范围内可变波长单色偏振光的产生和测量过程中光源输出的偏振光与被测保偏光纤某轴的对轴耦合，解决方案如下：自行研制了可变波长单色偏振光源，用于提供激励光源；采用保偏光纤熔接机、自制法兰盘及保偏光纤跳线组成保偏光纤对轴系统，实现了测量光路沿被测保偏光纤的两个轴的分别耦合；采用自编软件，实现对可变波长单色偏振光源及光功率接收设备的控制，用于记录测量数据并进行计算机处理，实现系统的自动测量。测量系统组成如图 3 所示。

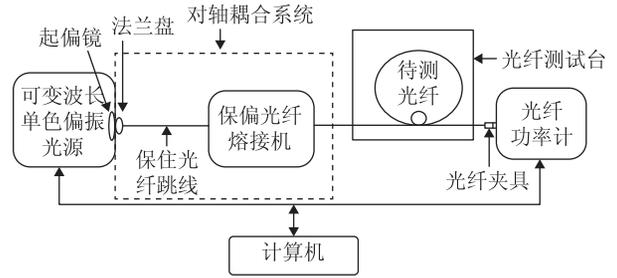


图 3 保偏光纤截止波长测量系统组成框图

可变波长单色偏振光源输出的光经对轴耦合系统注入待测光纤，光纤在直径 280 mm 的大圈放置状态下，有可能在光纤中激励起除 LP_{01} 模之外的高阶模，如 LP_{11} 模，高阶模传输的功率对弯曲十分敏感，而 LP_{01} 模所运载的光功率对弯曲不敏感，在直径 60 mm 的小圈状态下，截止波长附近几乎无高阶模传输，因此从不同弯曲状态下光纤功率随波长的变化得出截止波长。该测量系统可以通过保偏光纤对轴耦合系统，实现保偏光纤快慢轴的分别对轴，从而实现被测保偏光纤快慢轴截止波长的分别测量。

具体测量步骤如下：

- 1) 选择合适的一端为 FC/PC 接头的带尾纤的保偏光纤跳线，通过保偏光纤熔接机，与被测保偏光纤进行对轴熔接，处理好被测保偏光纤的另一端面后用光纤连接器连接；
- 2) 带尾纤的保偏光纤跳线接至可变波长单色偏振光源，被测保偏光纤绕成直径为 280 mm 的大圈后，将光纤连接器的一头接至功率接收装置；
- 3) 设置系统软件的测试参数后，由计算机采集自可变波长单色偏振光源输出的光通过被测光纤的功率谱；
- 4) 被测保偏光纤绕成直径为 60 mm 的小圈后，重复步骤 3) 采集功率谱；
- 5) 系统软件对两次采集的功率谱进行分析，根据被测光纤的弯曲衰减函数曲线，求出被测保偏光纤在某一轴的截止波长；
- 6) 通过对轴耦合系统对被测保偏光纤另一轴对轴，同样步骤完成被测保偏光纤另一轴的截止波长测量。

3 保偏光纤截止波长测量实验

系统研制完成后，进行了大量实验，测量了各类保偏光纤的截止波长。表 1 所附的测量数据，包括了熊猫和领结型保偏光纤，光纤芯径包括 80 μm 和

125 μm ，既有成品的保偏光纤跳线，也有保偏光纤裸光纤，因保偏光纤生产厂家目前只提供慢轴截止波长的数值，经与该系统测量值进行比较，测量结果吻合。

表2 各种保偏光纤截止波长测量结果

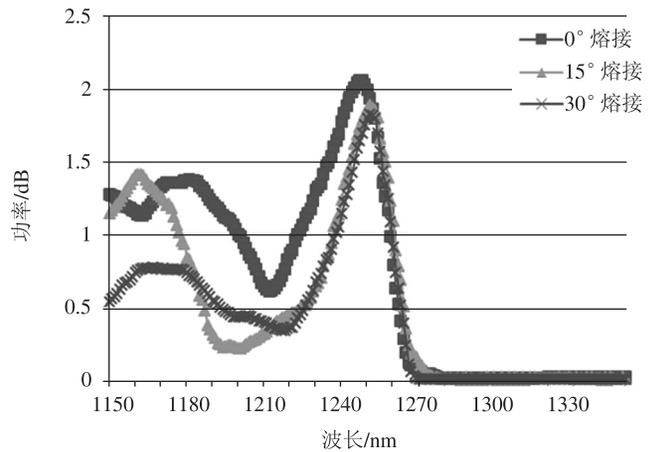
保偏光纤类型	λ_{ct} 慢轴 测量结果/nm	λ_{ct} 快轴 测量结果/nm	λ_{ct} 慢轴 参考值/nm
1310 nm 熊猫跳线	1194	1110	1200
1550 nm 熊猫跳线	1358	1268	1365
1550 nm 领结跳线	1519	1358	1520
1310 nm 熊猫裸光纤	1146	1089	1139
850 nm 熊猫裸光纤	722	668	720

4 测量结果影响因素的分析

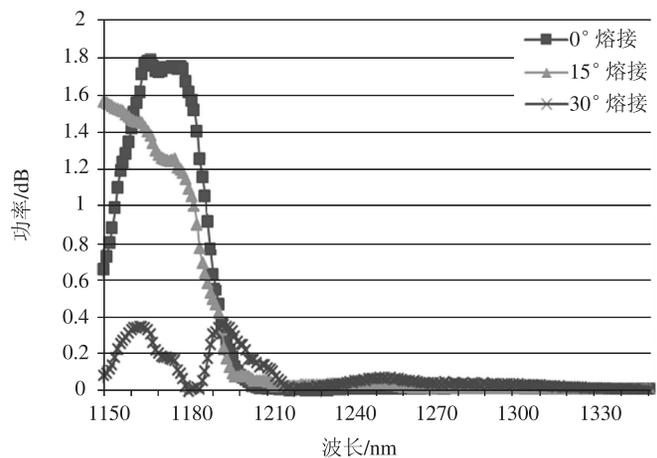
鉴于保偏光纤的特殊结构，本文对测量过程中涉及到的主要因素，包括光源的偏振态、光纤夹具的选择等对保偏光纤截止波长测量结果的影响进行了实验分析验证。

4.1 光偏振态、耦合注入对截止波长测量的影响

保偏光纤截止波长测量中，对轴耦合系统主要采用了保偏光纤熔接机的自动对轴模式，其对轴完成后光的偏振状态以及偏振态引起的光耦合的理想与否，是否会对被测保偏光纤截止波长的测量产生影响、产生什么样的影响并不清楚。利用对轴耦合系统分别对被测保偏光纤进行正常对轴、特征轴偏转 15° 对轴、特征轴偏转 30° 对轴三种情况进行了截止波长测量，测量结果如图4所示。实验结果表明，三种情况下，测量得到的快慢轴的截止波长数据相差非常小（测量数值的差异在5 nm之内），当特征轴偏转 30° 以上时，由于此时被测保偏光纤快慢轴的消光比进一步减小，耦合进被测保偏光纤的光同时分布在两个特征轴上，且功率大小差异不大，因此测量得到的弯曲损耗曲线不能反映出正确的测量结果。由此说明：基于保偏光纤的特殊结构，当对轴耦合偏离的角度比较小，一般不超过 15° 时，能保证被测保偏光纤快慢轴上的消光比足够大时，由此引起的光偏振态、耦合注入的变化并不影响截止波长的测量结果。



(a) 不同对轴角度下慢轴情况



(b) 不同对轴角度下快轴情况

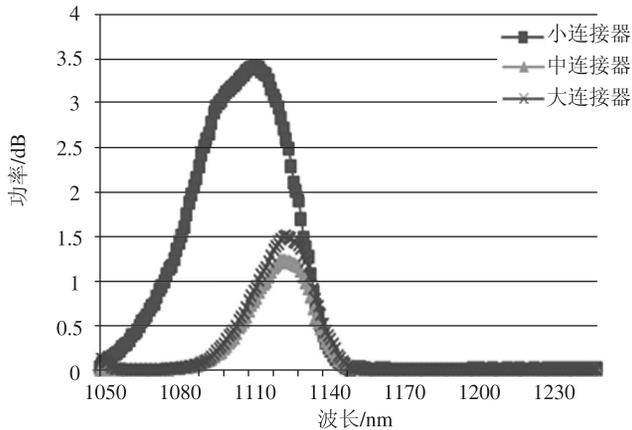
图4 不同对轴角度下截止波长测量曲线

图4中，正常对轴和 15° 对轴时，测得被测保偏光纤的慢轴截止波长分别为1266 nm和1270 nm，快轴截止波长为1197 nm和1196 nm； 30° 对轴时，慢轴截止波长为1265 nm，快轴截止波长无法测得。因此，一般情况下，当对轴耦合角度不大时，系统测得的截止波长的结果的差异并不大，当对轴角度增大至 30° 及以上时，光耦合轴上的功率损失较大，就会导致某个轴的截止波长无法正常测得。

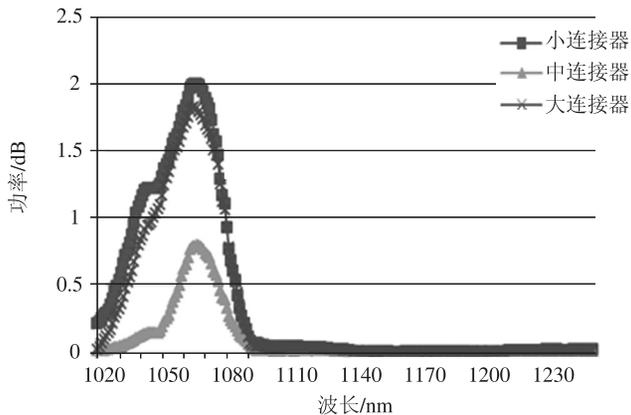
4.2 光纤连接器对截止波长测量的影响

由于保偏光纤是通过应力产生双折射的，所以保偏光纤传输光的偏振态对外界的应力比较敏感^[5]，在进行截止波长测量时不可避免地要使用光纤活动连接器等，这样就会对保偏光纤施加一定的应力，影响光传输的状态，从而可能对截止波长的测量产生影响。系统设计的对轴耦合系统，只涉及在被测保偏光纤的光输出端采用光纤活动连接器进行裸光纤的加持，将外界应力对测量结果的影响降到了最低程度，为了验

证这种夹持产生的应力对保偏光纤截止波长测量结果的影响,分别采用 NEWPORT、国内其他厂家及自行设计的三种光纤活动连接器(分别对应大、中、小),对被测光纤进行了截止波长测量,鉴于光纤连接器的应力比较小,还采用在被测光纤某一部位施加不同应力,进行截止波长测量,测量结果如图 5 所示。



(a) 不同连接器下慢轴情况



(b) 不同连接器下快轴情况

图 5 不同连接器下截止波长测量曲线

图 5 中,采用代表施加不同应力的小连接器、中连接器和大连接器的情况下,被测保偏光纤慢轴的截止波长分别为 1146, 1145, 1148 nm, 快轴截止波长分别为 1090, 1089, 1091 nm。虽然由于应力的影响等,

导致耦合功率降低,但是测量结果的差异不大。

从实验结果来看,压力对保偏光纤截止波长的测量结果具有一定的影响,当应力较小(三只不同类型的光纤连接器)时,这种影响不明显,不足以对测量结果产生较大影响;当应力足够大时,会对测量结果产生一定影响,因此,在保偏光纤截止波长测量过程中,应尽可能的自然放置被测光纤,防止因变形产生的应力对测量结果产生影响。

5 结束语

截止波长作为单模光纤的特征参数,其测量技术值得研究,尤其是作为特种光纤广泛应用的保偏光纤的截止波长的测量。本文通过方法研究和系统研制,开展了各型保偏光纤截止波长的测量,实现了保偏光纤快慢轴截止波长的分别测量,并对影响保偏光纤截止波长测量结果的因素进行了实验验证分析。根据该测量系统的使用情况来看,虽然还存在光源功率小、对轴耦合系统设计不完善等需要进一步改进的地方,但是这种测量技术无疑能够实现保偏光纤截止波长的快速测量,可以为保偏光纤科研生产厂家在该项参数的测量上提供技术支持,促进该参数的量值统一。

参考文献

- [1] 夏天豪. 波长调制型光纤传感器及其应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [2] 马迎建, 冯丽爽, 南书志. 保偏光纤偏振特性测试系统 [J]. 电子测量技术, 2006, 29 (4): 31-32.
- [3] 毕聪志, 吴衍记. 适用于光纤陀螺的保偏光纤特性研究 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36 (增刊): 566-569.
- [4] 郑克哲, 杨照金, 项道才. 光学计量 [M]. 北京: 原子能出版社, 2002: 605-606.
- [5] 何珍宝. 光纤与光缆的截止波长 [C] //中国通讯学会 2001 光缆电缆学术年会论文集. 北京: 中国通讯学会, 2001.
- [6] 周义海. 用偏振法测量单模光纤截止波长. 光纤与电缆及其应用技术, 1986 (4): 64-67.

“世界计量日” 宣传活动在清华大学举办

2016 年 5 月 20 日,国家质检总局在清华大学举办“世界计量日”中国主题活动。国家质检总局支树平局长发表了“量值定义世界,精准改变未来”的主旨讲话。支树平局长在讲话中指出:今年世界计量日的主题为“动态世界中的计量”,这既站在了计量发展的最前沿,也闪耀着哲学智慧的光辉。计量是探索动态变化世界的钥匙。正是因为对量的认识不断深化,测量手段不断进步,测量精度不断提升,人类认识世界和改造世界的能力不

断增强,才推动了人类世界的动态发展变化。世界是动态的,对计量的需求也是动态的。

支树平局长指出:中国政府高度重视计量发展,一直不懈努力,逐步建立起科学的计量工作体系,保证了全国单位制的统一和量值的准确可靠,为世界计量发展作出重要贡献。计量应当摆在经济社会发展更加突出重要的位置,纳入国家和地区发展的总体规划,成为国家治理的重要工具,成为国家核心竞争力的重要组成部分。

(摘自中国计量测控网)

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.11

高静压差压校准方法分析比较

李群, 李鑫武

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 高静压差压测量的准确度、可靠性对于提高压力测量装置研制质量有很大影响。本文介绍了差压传感器基本原理及其校准过程中存在的主要问题, 分析比较了几种高静压差压校准方法, 重点介绍了双活塞方式差压校准及分压方式高静压差压校准方法, 并结合试验数据对高静压差压传感器静压影响进行了分析。

关键词: 差压传感器; 高静压; 静压影响

中图分类号: TB935

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 03-0044-04

Analysis of Calibration Method for Differential Pressure at High Static Pressure

LI Qun, LI Xinwu

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

Abstract: The accuracy and reliability of differential pressure at high static pressure have great influence on the development quality of pressure measuring device. This paper mainly describes fundamentals of differential pressure transducer and problems in the process of its calibration, and analyses several calibration methods for differential pressure at high static line pressures, especially introduces dual piston model and divider model. Based on experimental data, it analyses the influence of static pressure on differential pressure transducer.

Key words: differential pressure transducer; high static pressure; influence of static pressure

0 引言

差压测量是一项重要的、基础性测量技术, 随着科研生产对差压测量需求的不断增加, 对其技术要求也越来越高。研究发现一些差压测量具有一个共同的特点: 测量不是在没有压力(大气压)的状态下进行, 而是要求在高静压状态下测量差压。例如发动机系统及发动机试车台燃油流量和空气流量的测量, 均是在几兆帕至十几兆帕的静压下测得差压, 并根据差压和流量之间的换算关系, 将所测差压信号转化为流量信号。又如在航空发动机防喘系统中, 大多采用喘振差压传感器对压气机出口气流高静压与差压进行实时监测, 并由机载计算机控制产生一系列动作来防止发动机喘振的产生。

差压测量在物料的液位、容积、密度、质量及各种检漏密封性试验等方面的测量中也有广泛的应用,

尤其是受压容器的液位测量, 例如航天工业中低温推进剂储罐的液位测量, 其通过测量储罐液面处气枕压力(静压)和底部压力之差(差压), 再根据压差与液位之间的关系确定液位, 通过这种方法也可以将差压转化为容积、密度、质量等参数的测量。

高静压差压的测量多采用各种差压传感器(变送器、数字计)进行测量, 为了保证高静压差压量值的准确可靠, 需要对高静压差压传感器进行校准, 这就对高静压差压校准提出了更新更高的要求。

1 差压传感器简介

差压传感器是将一个空间用压力敏感元件(多用膜片)分割成高、低压两个腔室, 如图1所示, 当压差经由高压导管和低压导管分别导入高低压腔室时, 传感器膜片在两方压力共同作用下产生位移(或位移的趋势), 该位移量和两个腔室压力差成正比^[1], 并将位移量传导至测量元件上, 测量元件将测得的差压信号转换为与之对应的电信号传递给转换器, 经过放大等处理变为可用电信号输出。

收稿日期: 2016-03-21

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目(JSJC2013205C209)

作者简介: 李群(1984-), 女, 工程师, 从事压力计量科研工作。

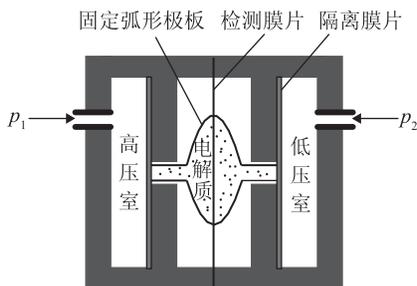


图1 差压传感器结构示意图

差压传感器发展至今已有电容式传感器、扩散硅压阻式传感器、差动电感式传感器、石英谐振式传感器和陶瓷电容式传感器等不同类型^[2]，目前应用最多的是电容式传感器和扩散硅压阻式传感器。随着技术发展，将会研制出更多新型的差压传感器用于差压测量。

2 差压传感器校准中主要问题分析

差压传感器在静压下改变输出的主要原因是取压部分的机械变形。在高静压条件下，虽然传感器铸件壳体和灌充在膜盒中的硅油变形都非常小，但是由于仪表的灵敏度太高，且两测量室不可能制造得完全对称，因此由高静压引起的变化仍然是比较显著的。这种影响主要体现在差压传感器的静压误差指标上，即差压仪表的静压变化对其差压输出的影响，该影响主要表现在零点输出和灵敏度输出变化等方面。

国外的研究机构曾对差压传感器的静压误差进行过一些科学试验和总结。例如：由Sira（英国）、TNO（挪威）和LNE（法国）历经5年对从14个主要制造厂取得的16台差压变送器样品进行了独立评估，得到的结果为：6台仪表未能满足制造厂关于静压影响的规定指标；2台仪表没有静压影响指标，在规定的静压最大值情况下，其量程的变化是其规定校准误差的4倍；13台仪表显著受到静压的影响，即静压的影响远大于仪表的校准指标^[3]。

由于差压仪表在不同静压下表现出不同的性能，且差别十分显著，所以差压仪表在高静压下的计量校准十分关键，直接关系到差压仪表的测量准确性。

3 高静压差压校准方法

高静压差压校准一直是世界性的难题。对其研究并不是十分系统和全面，再加上在计量领域内充分认识高静压差压校准技术重要性的时间比较短，所以在世界范围内高静压差压校准装置的制造和应用并不普及，差压仪表的校准方法也非常有限。

3.1 低压端通大气方式差压校准

由于差压校准设备普及率低，大多数的差压测量仪表是在低压端通大气的情况下校准，这种方法只适用于低静压差压（微差压）仪表的校准，因为其静压的影响远低于仪表的准确度指标。大多数使用差压测量仪表的场合均包含了作用在仪表高、低压两端口的一定值的静压，通过对差压仪表性能和国外试验数据的分析，由于差压仪表在静压状态下会产生输出值的静压误差，所以这种忽略静压误差的方法，只能保证静压为零的状态差压校准的准确度，无法保证实际工作状态（静压不为零，尤其是高静压状态）差压校准的准确度和可信度，因此这种方法存在很大的问题。

3.2 双通道数字压力仪表方式差压校准

双通道数字压力仪表方式差压校准方法通过将差压仪表高低压端口分别与数字压力仪表相互独立的两个通道相连，通过手动或自动控制，使高低压端口压力值达到差压仪表的静压要求，这时隔离高低压端口压力，再利用数字压力仪表其中一个压力通道在高压端控制压力，使其达到标准差压压力值，来达到校准差压仪表的目的。双通道数字压力仪表方式差压校准方法主要是通过双通道压力控制器来实现。

此方法也只适用于低静压差压仪表的校准，因为其最大的问题是数字压力仪表在满足高静压的同时，必然会降低校准差压的准确度和分辨力。另外，因为数字压力仪表的稳定性及准确度有一定限制，所以利用数字压力仪表的方法不能作为校准高静压差压仪表的常用方法使用。

3.3 双活塞方式差压校准

双活塞式高静压差压校准装置是目前准确度等级最高的高静压差压校准装置，也是目前应用最好的高静压差压标准，国外的一些实验室如韩国的KRIS、日本的NIMJ等压力校准实验室所研制的差压校准装置均选用这种方式^[4-5]。

双活塞方式高静压差压校准装置由测量活塞（包括静、差压专用砝码）、平衡活塞（包括静压砝码）以及压力控制系统和环境检测系统组成，装置组成示意图见图2。两套活塞压力计系统设计制作在一个底座上，中间用隔离装置连接起来。首先通过压力控制系统平稳对校准装置进行预加压及粗调，并采用起始静压平衡方法使两活塞在相同静压值下浮起并处于工作位置，待活塞旋转平稳后，关闭连接高低压管路两端的平衡阀，并在测量活塞上（高压端）加放需要产生差压值 Δp 的专用砝码，然后压力控制系统对高压端管

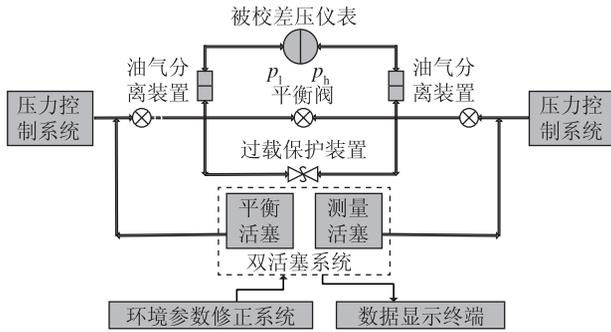


图2 双活塞方式高静压差压校准装置组成框图

路压力进行控制，使其达到预定的差压值。校准过程中差压值可根据公式(1)得出，有

$$\Delta p = \frac{\Delta m \times g}{A'} + \rho g \Delta h \quad (1)$$

式中： Δp 为标准差压值； Δm 为测量活塞上静压平衡后，所加的差压专用砝码质量； A' 为测量活塞在差压测量时的活塞有效面积，包含温度及压力形变等修正； ρ 为工作介质的密度； Δh 为测量活塞和被校差压仪表参考位置高度差。

该方法设计原理简单、易于实现，但是需要合理设计压力系统的整体布局及结构，以尽量降低由于结构原因而引起的对差压测量的影响。

3.4 分压方式高静压差压校准技术

分压方式产生高静压差压的核心是同轴三活塞设计，采用同轴三活塞大面积差压活塞的原理，利用大小面积活塞产生压力的关系，将所加压力差分为更小的差压。

我所研制的高静压差压校准装置选择分压方式产生高静压差压，其原理如图3所示，分压装置两输出端分别与与被校差压仪表高低压两端相连，通过压力控制系统加压，该压力通过分压装置施加到被校差压设

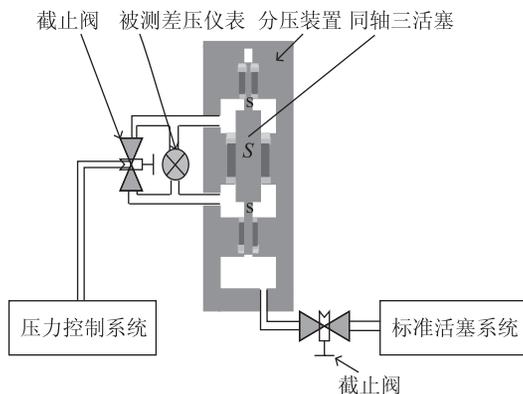


图3 利用分压方式产生高静压差压原理图

备高低压两端，当达到设定静压时，使测试口与压力控制系统断开，将分压装置下端与标准活塞连通，在标准活塞上施加所需差压砝码，并调整标准活塞使其处于工作位置，实现当前静压条件下差压的校准。

校准过程中的差压值可根据同轴三活塞面积比例计算得出。三组同轴活塞，上、下活塞面积相等，中间活塞的面积是上、下活塞的倍数，设为 M [2]。分压装置有两个腔体，腔内被导入静压后由阀门分离，要使分压装置上方腔体与下方腔体之间产生差压 Δp ，由此增加的向下的附加力为 $(S - s) \Delta p$ ，要使活塞平衡，必须在下端活塞底部增加压力 p ，使 $s \times p = (S - s) \Delta p$ ，则

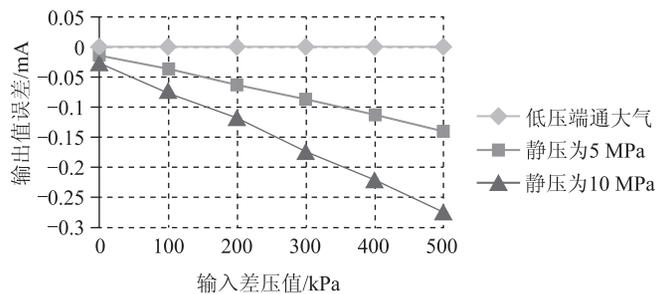
$$p = \frac{S - s}{s} \times \Delta p \quad (2)$$

因此，需要在标准活塞上加上能产生压力值 p 的砝码，来得到差压 Δp 。从公式(2)可知，分压装置能提供的差压量程由同轴三活塞大小活塞的面积比 M 确定，因此，通过合理设计活塞的面积比例，可以实现不同范围的差压测量。

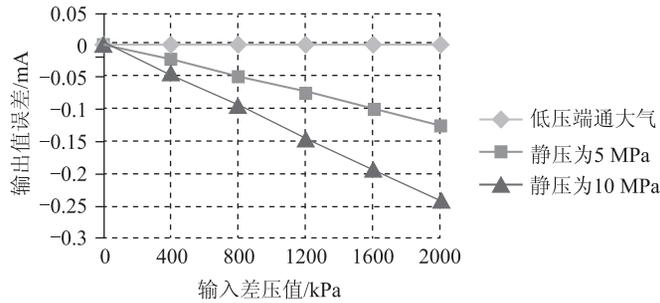
分压方式校准技术对分压装置及活塞系统的加工要求很高，三个活塞的轴心偏差要求很小，但是该方法操作简单方便，提高了质量到压力转换的分辨力，并且稳定性好，随着科技水平的发展，有很好的应用前景。

4 试验分析

基于上述分析，选择某厂家生产的差压范围为 0~500 kPa 和 0~2000 kPa，最大工作静压均为 17.3 MPa 的两台差压传感器为试验对象，采用我所研制的高静压差压校准装置作为标准器，在不同静压条件下，对差压传感器施加差压并测得其输出值，将输出值与理论输出值比较，得到三种不同静压条件下输出值误差如图4(a)、图4(b)所示。



(a) 0~500 kPa差压变送器测量结果比较



(b) 0~2000 kPa差压变送器测量结果比较

图4 静压对差压变送器输出值影响

从试验数据看出：在静压不同的条件下，相同差压点，传感器示值存在较大差别，该静压影响主要跟差压传感器的类型和结构原理有关。另外，差压值在不同静压下的影响仍需要进行大量的实验分析，以进一步确定静压对差压仪表性能的影响。

5 结语

目前，越来越多领域应用到差压测量，为保证仪表的精确测量，对差压传感器的静压影响必须予以重视。国内外对高静压差压校准技术的研究也越来越多，

主要集中在对差压传感器静压影响的研究以及高准确度静压差压活塞的研制等方面，通过对该技术与相关应用，可以改进目前校准差压仪表不科学合理的现状，提高对各类差压仪表的校准测试水平，进而为相关科研生产项目提供更有利的保障。

参考文献

- [1] 杜水友, 孙筱云, 竺惠敏. 压力测量技术及仪表 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 曹秀敏. 差压变送器的应用和发展 [J]. 山西电力技术, 2001 (2): 63-64.
- [3] 中国百科网. 静压对校验差压变送器影响程度的评估 [EB/OL]. [2013-07-23]. <http://m.chinabaike.com/t/35273/2013/0723/1321344.html>.
- [4] S. Woo, I. Choi, H. Song, B. Kim. New differential pressure standard at KRISS [C] //IMEKO TC3, TC16 and TC22 International Conference. Merida, Mexico: IMEKO, 2007.
- [5] M. Kojima, K. Saitou and T. Kobata. Study on calibration procedure for differential pressure transducers [C] //IMEKO TC3, TC16 and TC22 International Conference. Merida, Mexico: IMEKO, 2007.
- [6] 中国计量测试学会. 压力测量不确定度评定 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2006.

(上接第 21 页)

3) 偏心补偿误差引入的不确定度

该项误差是指测微准直望远镜的转动中心相对于转台的转动中心的位置偏差，在整个圆周上误差分布为正弦分布。利用测角不确定度为 1.0" 的转台进行偏心误差补偿，则偏心补偿误差可估计为

$$u_3 = 1.0''/\sqrt{2} \approx 0.71''$$

4) 望远镜本体定向测量误差引入的不确定度

依据光轴与机械轴的不平行度 3"，取均匀分布，则引入的测量不确定度

$$u_4 = 3''/\sqrt{3} \approx 1.8''$$

则合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 2.1''$$

扩展不确定度 $U = 4.2'' (k=2)$

5 结论

由测量系统的不确定度分析可以看出，本文设计的带有自标定的数字准直瞄准测量系统的定位测量不确定度可达到 $0.034 \text{ mm} + 5.8 \times 10^{-3} L (k=2)$ ，其定位测量

能力与激光跟踪仪相当；定向测量不确定度可达到 $4.2'' (k=2)$ ，其测角能力与高精度的电子经纬仪相当。这表明该系统完全满足高精度空间定位定向测量的需求，可用于风洞天平静校台的校准、发动机传动轴的轴体装配及大尺寸对测角和定位要求较高的场合。

参考文献

- [1] 中航工业陕西华燕航空仪表有限公司. CZW 测微准直望远镜操作手册 [Z]. 2011.
- [2] Martinelli P, Musazzi S, Perini U. An autocollimator based optical system for precise angular alignment control over large exploring aresa [J]. Rev. Sci. Instrum., 1994, 65 (4): 1012-1014.
- [3] 赵莹. 光学自准直比较测角仪的数字化测量技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [4] 蒋有年. 关于测微准直望远镜等光学仪器瞄准误差的探讨 [J]. 航空工艺技术, 1982 (3): 38-4.
- [5] 大连光程光电科技有限公司. CZW-D 测微准直望远镜电子目镜简介 [EB/OL]. [2016-01-18]. <http://dlguangcheng.cn.china.cn/>.
- [6] 欧同庚、陈志高, 杨博雄, 等. CCD 光电自准直仪工作原理及误差源分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27 (6): 98-100.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.12

ARINC825 总线校准方法研究

肖彬, 王文健, 王德玲, 王建强

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为解决航空 ARINC825 总线设备在高速传输模式下的校准问题, 针对总线发送与接收特性提出了校准项目及方法, 通过常用标准器将总线设备的各项参数溯源至国家基准, 达到确保总线端口参数量值统一的目的, 并且为 ARINC825 总线设备的校准提供方法依据。

关键词: ARINC825; 总线校准; 波形参数校准

中图分类号: TP336.06; TB97 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2016) 03-0048-03

Research on Calibration Method for ARINC825 Bus

XIAO Bin, WANG Wenjian, WANG Deling, WANG Jianqiang

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

Abstract: This article is to solve aviation ARINC825 bus device calibration problem in high-speed transmission mode. Aiming at the bus transmission and reception characteristics, calibration items and method are proposed. Using normal standard instruments, the parameters of the bus device are traceable to national standards in order to ensure unity of value for bus port parameters. And the method based on ARINC825 bus devices calibration is provided.

Key words: ARINC825; bus calibration; waveform parameter calibration

0 引言

随着航空电子系统的迅猛发展, 机载设备也随之飞速革新, 其中机载设备的控制与数据交互越来越受到人们关注。而航空总线技术是航空电子及控制系统的支撑技术, 使得航空总线在机载设备控制系统中的可靠性、稳定性变得尤为关键。针对目前航空 ARINC825 总线在现代飞机中应用量的不断增长, 如何准确可靠地对其进行综合校准, 已成为航空总线领域的研究热点。

本文针对航空系统中大量使用的 ARINC825 总线进行校准方法研究。目前 ARINC825 总线广泛应用在民航客机及部分军用飞机中, 机载航空电子系统的部分控制及数据传输也使用了该总线^[1]。

美国作为航空工业领军国家, 无论是总线专用芯片还是集成系统, 均有整套的测试方案与系统。但目前并未出现专用的 ARINC825 总线校准仪器。

我国在 ARINC825 总线计量校准方面比较薄弱。

由于我国对总线校准的重视程度有所差异, 因此对总线设备的校准很不规范, 给测试系统的校准带来了很大困难。因此, 急需对该类设备的计量校准做必要的研究工作。

本文参照串行数据总线及相关国际标准对 ARINC825 总线的测量要求, 提出如何利用常用标准器具对该总线发送器和接收器进行校准, 以及校准时的注意事项。

1 校准方案

ARINC825 总线设备的电气特性校准部分包括发生器特性校准和接收器特性校准, 如图 1 所示。总线校准装置由计算机系统、标准设备和校准专用接口适配器三部分组成。计算机系统作为校准装置的控制中心, 通过运行校准软件完成校准数据的显示、处理和保存等功能; 标准设备是校准装置的核心组件, 由常用的标准设备通过模块化方式组成测量系统, 根据 ARINC825 总线的特性及校准方法进行二次开发, 并以单参数溯源的方式, 将被测总线参数溯源至国家最高标准; 校准专用适配器将标准仪器接口与被测总线设备接口进行匹配, 并且配合各测试项目提供模块化的

收稿日期: 2016-04-27; 修回日期: 2016-05-04

作者简介: 肖彬 (1989-), 男, 北京海淀人, 助理工程师, 主要研究方向为航空电子计量。

测试电路及切换开关，方便标准设备与被测总线设备的信号转接。测控计算机通过程控线缆控制标准仪器的测量与输出，标准仪器通过专用测试电缆连接至校准专用适配器中，与被测 ARINC825 总线设备接口相匹配。发生器和接收器通过标准表法与标准源法进行校准。

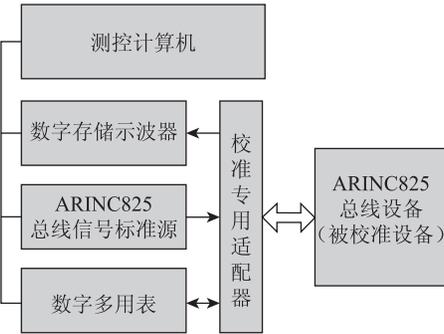


图1 ARINC825 校准方法示意图

发生器特性校准的基本方法是：由 ARINC825 总线被校准系统输出符合 ARINC825 数据总线规范的编码信号，数字存储示波器等标准设备接收到该信号后，将采集到的波形数据的各项参数通过标准器程控线缆传输到计算机处理，并判定发生器发出的数据是否符合 ARINC825 数据总线规范。

接收器特性校准的基本方法是：由 ARINC825 总线信号标准源输出符合 ARINC825 数据总线规范的（参数可调的）脉冲波形信号，总线被校准设备接收该信号后，将接收的数据信息通过配套驱动软件传输到计算机，判定被校准设备接收端是否符合 ARINC825 数据总线规范，同时连续调节幅值、频率等波形参数，得到相应测试项目的极限参数数据。

2 校准项目及方法

2.1 发生器比特速率

设置 ARINC825 总线仿真器传输速率 v_s ，使用数字存储示波器单次触发一段波形，使任意两个周期波形显示在示波器屏幕中，如图 2 所示。

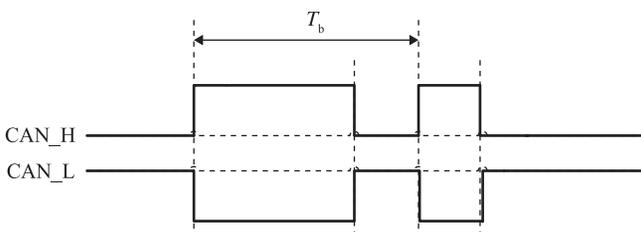


图2 比特速率测量示意图

测量其中一周期波形的周期时间 T_b ，并按公式 (1) 计算信号频率 v_b ：

$$v_b = \frac{1}{T_b} \times 10^{-3} \text{ (kHz)} \quad (1)$$

设置传输速率 v_s 与测量得到的 v_b 之间包含了 N 个比特的数据，取系数 k_N 四舍五入至整数值（即包含的 bit 数），有

$$k_N = \left[\frac{v_s}{v_b} + 0.5 \right] \quad (2)$$

将测量传输速率值转换为波形每比特传输速率 v_r （即比特速率），有

$$v_r = k_N \times v_b \text{ (kbit/s)} \quad (3)$$

2.2 发送器电平

断开终端电阻，设置 ARINC825 总线仿真器发送任意数据，使用数字存储示波器单次触发一段波形，使任意两个周期波形显示在示波器屏幕中，如图 3 所示。

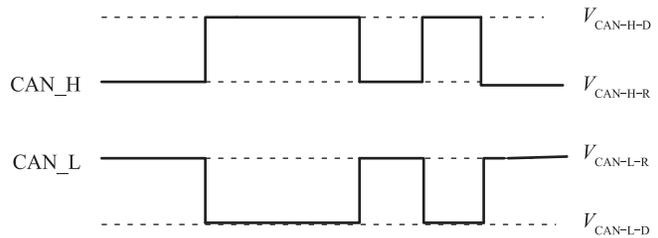


图3 电平测量示意图

分别测量波形幅度对地电压 $V_{CAN-H-D}$ ， $V_{CAN-L-D}$ ，根据公式 (4) 计算显性差分电压结果^[2]：

$$V_{diff-D} = V_{CAN-H-D} - V_{CAN-L-D} \quad (4)$$

连接终端电阻，再次触发一段波形，使任意两个周期波形显示在示波器屏幕中，如图 3 所示，分别测量波形幅度对地电压 $V_{CAN-H-R}$ ， $V_{CAN-L-R}$ ，根据公式 (5) 计算隐性差分电压结果：

$$V_{diff-R} = V_{CAN-H-R} - V_{CAN-L-R} \quad (5)$$

2.3 终端电阻

由于 ARINC825 仿真器的终端电阻安装方式不同，因此对各种不同形式的终端电阻需要不同方法测量^[3]，连接方式大致分为以下两种：

1) 外接形式终端电阻

利用数字多用表，两线测电阻方式测量终端电阻阻值。

2) 内置形式终端电阻

内置形式终端电阻通常会以开关方式控制接通或断开。

设置总线仿真器不发送数据,并按图4所示方式测量内置形式终端电阻。

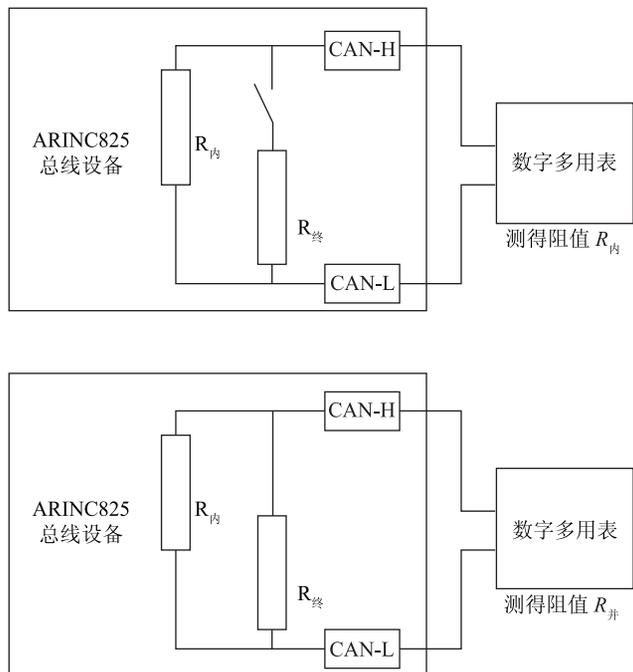


图4 终端电阻(内置)测量示意图

通过开关接通或断开终端电阻,利用数字多用表测得 $R_{内}$ 和 $R_{并}$,并按公式(6)计算终端电阻 $R_{终}$,有

$$R_{终} = \frac{R_{并} \times R_{内}}{R_{内} - R_{并}} \quad (6)$$

2.4 接收器比特速率

设置 ARINC825 总线仿真器为高速传输模式,调节 ARINC825 总线信号标准源,并设置各参数为正常参数,使总线信号标准源与仿真器可以正常通讯。

1) 设置 ARINC825 总线设备为 1 Mbit/s 高速传输模式,在信号波形其他参数不变的情况下,设置 ARINC825 总线信号标准源比特率变化范围为 985 kbit/s 至 1015 kbit/s,观察接收器能否接收并正确地识别。

2) 设置 ARINC825 总线设备为低速传输模式,在 83.3~500 kbit/s 之间选择一传输速率,在信号波形其他参数不变的情况下,设置 ARINC825 总线信号标准源的比特率变化范围为选定比特率的 98.5% 至 101.5%,观察接收器能否接收并正确地识别。

2.5 接收器电平

设置 ARINC825 总线仿真器为高速传输模式,调节 ARINC825 总线信号标准源,并设置各参数为正常

理想参数,使标准信号发生器与仿真器可以正常通讯。

1) 在信号波形其他参数正常并且不变的情况下,设置 ARINC825 总线信号标准源隐性差分电压在 -120~12 mV 内连续变化,观察接收器能否接收并正确地识别。

2) 在信号波形其他参数正常并且不变的情况下,设置 ARINC825 总线信号标准源显性差分电压在 1.2~3 V 内连续变化,观察接收器能否接收并正确地识别。

3) 在信号波形其他参数正常并且不变的情况下,设置 ARINC825 总线信号标准源偏置电压在 -1~6 V 内连续变化,观察接收器能否接收并正确地识别。

2.6 接收器输入阻抗

断开终端电阻,利用数字多用表,两线测电阻方式,分别测量 CAN-H 线对地电阻值 $R_{in,H}$, CAN-L 对地电阻值 $R_{in,L}$, CAN-H 对 CAN-L 电阻值 $R_{in,diff}$ 。

2.7 规约特性

规约特性校准主要用于检测 ARINC825 总线数据的通讯协议是否能正确完成。由于总线设备同时具有接收与发送功能,既可以作为接收器也可以作为发送器使用,因此对总线设备规约的校准也应分别进行校验。

1) 通讯能力正常性检测

将两台被校准总线设备通讯端口连接,设置通讯相关参数一致,使设备间可以正常通讯。单台被校准设备可以启用“LoopBack”模式检测。

2) 总线设备作为发送器

通过总线设备发出指令和数据,使用示波器记录并分析数据,参照设置参数及 ARINC825 协议相关标准,判断所发出命令的正确性。

3) 总线设备作为接收器

通过总线信号标准源匹配相关通讯参数,使之与被校准 ARINC825 总线设备通讯参数一致。发送波形数据,校验总线设备是否正确响应;

通过总线信号标准源将数据包中注入数据位、校验和、丢包等类型错误,验证接收器对消息流中出现已注入错误的辨别或正确处理能力。

3 试验结果

校准试验验证过程中,使用标准设备对 ARINC825 测试卡的其中一个通道进行测量,得到试验结果如表 1 所示。

(下转第 71 页)

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.13

利用计算机视觉系统，实现指针表和无接口数字表的自动化检定

章晓明

(无锡市计量检定测试中心, 江苏 无锡 214101)

摘要: 介绍了一类没有计算机输入输出接口计量仪表的自动化检定方法, 它们的代表是指针表和无接口数字表。介绍了利用计算机视觉系统来实现指针表指示图像自动识别的关键问题, 并进而通过与 GPIB 接口相连的检定系统实现标准器输出值的自动采集、结果判断、数据存储等工作, 提高了检定工作的准确度, 减少了检定员的工作强度。

关键词: 计算机视觉系统; 指针表; 无接口数字表; 自动化检定

中图分类号: TB97; TB391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2016) 03-0051-04

Automatic Verification of the Pointer Meter and no Interface Digital Meter Using Computer Vision System

ZHANG Xiaoming

(Wuxi Measurement and Test Center, Wuxi 214101, China)

Abstract: This paper introduces a kind of automatic verification method of measuring instrument with no computer input and output I/O interface. Their representative is the pointer meter and a simple digital meter. Introduced the key problem to realize the automatic recognition of meter indicator based on computer vision system, And then through GPIB interface connected to the verification system implementation standard output value of automatic acquisition、result judgment、data storage other work, improving the accuracy of the verification work, reduce work intensity of the verification.

Key words: computer vision system; pointer meter; no interface digital meter; automatic calibration

0 引言

长期以来, 指针表和无接口数字表由于没有计算机输入输出接口 (简称 I/O 接口), 无法实现自动化检定, 只能靠人工手动检定。手动检定工作单调和繁琐, 既费眼又费神, 工体效率不高, 因此, 研究没有 I/O 接口的计量仪表的自动化检定方法十分必要。实现自动化检定的核心难题是表头数据的自动化采集, 本文借助于计算机视觉系统强大的图像识别功能, 方便地实现了指针表和无接口数字表数据的自动化采集。

1 手动检定方法

根据 JJG 124-2005 《电流表、电压表、功率表及电阻表检定规程》、JJG52-2013 《弹性元件式一般压力

表、压力真空表和真空表检定规程》、JJG 315-1983 《直流数字电压表 (试行) 检定规程》等指针表和无接口数字表类计量器具检定规程, 指针类仪表要求检定具有数字刻度点的相对误差和升降变差, 通常是引用误差; 数字类表通常在全量程上均匀选取 10 个点, 测量这 10 个点的基本误差, 通常是绝对误差。

指针类仪表相对误差检定过程:

输入量为零, 调节零位, 使指针对准零刻度线。调节输入量, 缓慢地增加输入, 使被检表指针顺序地指示在每个数字刻度线上, 并记录这些点的实际值 (即标准器此时的输出值)^[1]。

增加输入到量程的上限以上, 立刻缓慢地减少输入, 使被检表指针顺序地指示在每个数字分度线上, 并记录这些点的实际值^[1]。仪表的相对误差由 (1) 式表示为

$$\gamma = \frac{X - X_0}{X_n} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X 为仪表的指示值; X_0 为被测量的实际值; X_n

收稿日期: 2015-12-28; 修回日期: 2016-01-19

作者简介: 章晓明 (1962-), 男, 江苏无锡人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为计量检定测试。

为仪表的引用值。

无接口数字表头类绝对误差检定过程：将标准源输出量设定在选定的检定点上，依照从小到大的顺序检定。读取被检表的读数和对应标准器的读数。仪表的绝对误差由(2)式表示为

$$\Delta = U_x - U_n \quad (2)$$

式中： U_x 为无接口数字表的显示值； U_n 为标准器的输出值。

2 计算机视觉概述

计算机视觉是一门研究如何使机器“看”的科学，更进一步地说，就是指用摄像头加电脑来代替人眼和人脑对被看物体进行识别、测量等工作的机器视觉，并进一步利用计算机强大的数据处理功能，使计算机对被看物体的图像处理成为更适合人眼观察或仪器更容易检测的图像。

计算机机器视觉的关键技术是图像识别。

人类图像识别的生理过程是指反映图形的光线刺激作用于人眼视网膜，并在大脑的视觉中枢形成物体形象。人们辨认出它是某种已知物体的过程即图像再认的过程，在此过程中，既要有从物体上反射出来的光线，也要有在人脑记忆中以前存在的某一物体的大脑形象，只有通过大脑已存在的形象与当前人眼看到的反映在视觉中枢的实时图像在人脑某个视觉处理区域中进行比较的无意识过程，才能实现对图像的再认。

目前，在图像识别领域主要有三种识别方法^[2]：统计模式识别法、结构模式识别法、模糊模式识别法。

3 自动化检定系统组成和工作原理

3.1 自动化检定系统组成

图1是由计算机、摄像头、工控机、被检表和程控校准源组成的自动化检定系统仪器连接和硬件结构图^[3-4]。

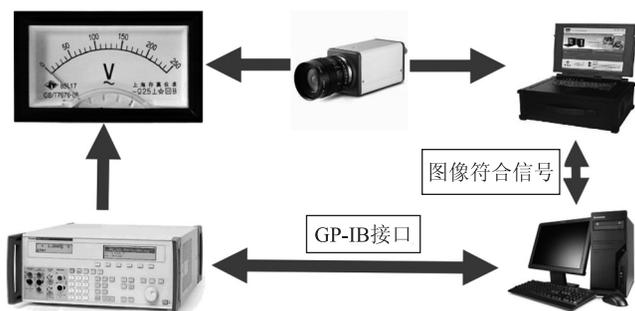


图1 自动化检定系统原理方框图

图1中，5080A标准器具有GP-IB标准IEEE488接口，能实现计算机的自动控制；其交流/直流电压的最大负荷电流为800 mA，交流/直流电压的最大负荷电压为50 V，能够校准各种模拟仪表和常用数字仪表。

工控机可存储500幅图像数据，增加存储器容量可以存储更多的图像，图像符合性验证速度小于1 s（最快小于0.07 s），摄像头实时对物体拍摄图像和数据库中图像进行符合性识别处理，并输出符合性音频和符合性继电器信号。

通过GP-IB控制卡可以实现计算机和一台或多台仪器的听、讲、控功能，并组成仪器系统，使测试和测量工作变得快捷、简便、精确和高效。

3.2 程控检定测量过程

将确定型号的被检表表头指针指示在数字刻度线处的图像存入工控机，例如量程为250 V、精度等级为2.5级的交流电压表，存入表头指针指示在50, 100, 150, 200, 250 V时的图像，作为识别的依据档案存入存储器。

依据检定规程和人工检定操作过程，在被检表装入检定夹具前，先调节机械零位，然后连接标准源电压输出端至被检表输入端，将摄像头对准被检表表头，调节焦点使图像清晰，全部准备好后启动自动检定程序。

根据检定规程，将被检表指针对准有数字的刻度线，读取此时标准源的输出值。所以标准源的输出势必要在被检表刻度线附近缓慢扫描，并实时将摄取的被检定表表头图像输入计算机，计算机对图像做分析计算，一旦被检表指针指示在要检定的数字刻度线处，计算机就会发出读取标准源输出值的指令，并将标准源此刻的输出值作为被检表在这个刻度的实际值 X_0 ，参考式(1)。不难发现计算机对图像分析计算的过程要花时间，从摄像头摄取表头指针指示在刻度线的时刻到计算机发出读取标准源输出值指令的时刻，标准源的输出已经扫描出能使指针和数字刻度线相重合时的数值，所以降低标准源输出电压扫描速度是解决这个问题。扫描速度太慢会降低检定效率，兼顾检定精度和检定速度的办法可采用“跳跃定位、误差限内缓扫式标准源输出法”。

所谓“跳跃定位误差限内缓扫式标准源输出法”就是在具有数字的刻度线附近，标准源直接输出到该数值附近，如图1中的50 V附近，很显然，标准源直接输出50 V，表头指针不一定和刻度线重合，那么究竟直接跳跃到哪个值好，经过分析，跳跃到50 V处的

绝对误差下限处,就图 1 中量程为 250 V、精度等级为 2.5 级交流电压表的引用误差,它每点的绝对误差是 6.25 V,所以标准源直接输出 43.75 V,并在此点开始缓慢上升到 56.25 V,若是在此区间没有发现指针和刻度线重合,那么表头超差,检定结束。这样就省去了两个有数字的刻度线之间中间地带值的输出扫描时间,加快了检定速度。输出扫描缓慢程度的依据是指针和刻度线重合时刻到计算机图像识别后读出标准源输出值的时间,此时的标准源输出仍在缓慢上升,上升值引起的误差不能大于被检表误差的五分之一,也就是 1.25 V。由于图像符合性验证速度小于 1 s (快的小于 0.07 s),也就是说标准源输出扫描速度为不大于 1.25 V/s,所以一个数字刻度线最大检定时间不大于 10 s,一个有 5 个数字的刻度线表头上升、下降全部检定时间最大是 100 s,2 min 不到就能检定一个表头,并且实现自动记录、自动计算误差和不确定度、自动判断是否合格等工作,又避免了人工的粗大误差,大大提高了工作效率。其它刻度线的检定情况与 50 V 线类似。

从上文分析可以看出:本检定方法是符合 JJG 124-2005《电流表、电压表、功率表及电阻表检定规程》中 6.1.2.1 条对检定装置的控制要求:检定装置引起的误差不能大于被检表精度的三分之一到五分之一。本装置的标准器 5080A 的直流电压电流精度优于 0.05%,交流电压电流精度优于 0.2%,大大小于检定 1.0 级至 2.5 级指针表的标准器控制要求。本方法引起误差的最可能之处是图像符合确认时间不能即刻读取标准源输出所引起的误差,但本文已考虑到最不利的情况,因为大多数情况下图像符合性验证速度一般小于 0.5 s,它可能引起的误差只有被检表误差的十分之一。

3.3 人机界面和程序执行过程

校准过程是计算机的自动执行过程,有一个人机对话界面,通过在界面上输入被检仪表的检定要点,如型号规格、精度等级、所有刻度值等参数,计算机根据这些参数设定输出电压、电流检定点个数及检定点数值,执行相应的检定程序,读取被检表指针和表头数字刻度线重合时的标准器输出值,得到相应检定点的检定结果。图 2 是自动检定过程示意框图。

自动检定系统人机界面如图 3 所示。当按下“开始检定”的命令键后和,计算机自动运行相应表头的检定程序,自动设置标准源的输出参数,进行检定结果数据采集,最后进行数据处理。当某点数据超差或

可疑时,可以对该点进行重测,以进一步确定测量数据的正确性。一个表头检定结束,语音提示保存数据或更换下一个被检表等工作。所有检定数据将存入数据库。

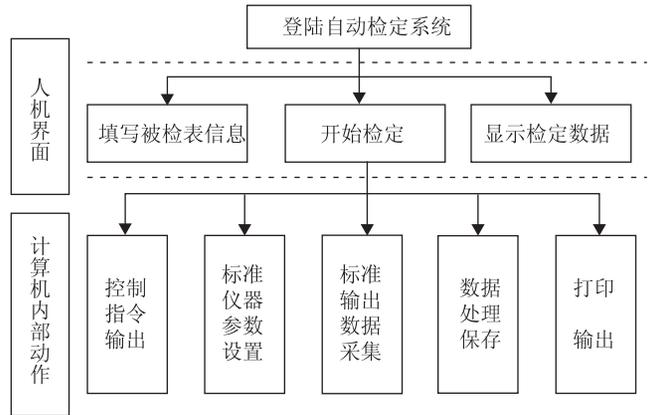


图 2 自动检定示意框图



图 3 自动检定系统人机界面

图 3 中基本信息和测量数据都和数据库的数据表相连,基本信息和指针表刻度值由人工手动在人机对话界面上输入,测量数据由计算机自动读取。在程序中建立一个求变差、最大相对误差和判定结果的通用过程,调用此通用过程计算每个刻度点的变差、最大相对误差和结果值。一个指针电压表的所有检定信息在数据库中作为一条记录,它以唯一性编号为索引。图 3 左上边的基本信息放置在数据库某个指针表的一条记录中的不同字段内,右上边的测量数据以数据类型存入数据库中某个指针表记录的不同字段内,比如刻度值,它是一条记录的一个字段,存放一个字符串,该字符串是由刻度值数组的所有元素通过 VB 语句串联而成。图 3 中测量数据显示表格是 VB 中的数据界面控件,它能以二维表的方式来显示、编辑数据表,是 VB

中最常用的编辑控件之一。检定证书以 Excel 文件形式生成, 便于页面设计和格式变换, Excel 文件的单元格数据和 VB 程序中的数据进行数据交换, 用 VB 的 split 函数将刻度值、上升值等数组字符串分解为数组元素, 填入 Excel 文件的相应单元格中, 从而生成检定证书^[5-6]。

4 结束语

指针表和无接口数字表的自动化检定解决了一大类无计算机接口仪表的检定难题, 减少了检定人员的工作量, 避免了人为误差, 缩短了检定工作时间, 提高了基层计量检定单位和计量器具生产制造企业出厂检定工作的整体效率。本文方法还可以推广到具有类似操作特点的计量器具 (如液位计、玻璃温度计等)

检定工作中。

参 考 文 献

[1] 国家质量监督检验检疫总局 . JJG 124-2005 电流表、电压表、功率表及电阻表检定规程 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2005.

[2] 张国云, 郭龙源, 吴健辉, 等 . 计算机视觉和图像识别 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[3] 蔡晓方, 王建华 . 用 VB 实现基于 VISA 标准的 GPIB 自动测试系统 [J]. 中国测试技术, 2005, 31 (2): 33-35.

[4] 陈星燎, 陈金树, 陈锋 . GPIB 接口实现及应用 [J]. 计算机应用研究, 2003 (2): 133-136.

[5] 王道义 . Visual Basic 6.0 使用详解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[6] 洪锦魁 . 精通 Visual Basic 6.0 [M]. 北京: 世界图书出版公司北京分公司, 2000.

福禄克红外热像仪告诉您如何控制 3D 打印工艺

3D 打印过程中, 由于速度、距离、材料等特性的不同, 在粉末逐层堆叠累积的过程中, 温度会出现异常, 如跳变、过高、过低、不均匀等, 造成打印后的结构件性能下降, 韧度差、弹性不够、变脆、隐纹等。使用大师之选系列热像仪在可以为金属打印过程中, 提供有效的检测方案。

1 应用案例

某大学机械制造系统工程国家重点实验室, 负责利用 3D 打印技术可快速而精确地制造出任意复杂形状的零件, 从而实现“自由制造”项目研究。3D 金属打印过程中, 以金属粉末为原料, 打印任意形状的零件, 而结构件的温度高低、温度变化趋势对金属结构件的

特性造成关键的影响, 温度控制是打印过程中重要的因素。

2 技术难点

1) 部分材料目标小。开始打印时, 目标尺寸可能较小, 如案例中, 只有 2~3 mm 而且需要看清楚材料表面的温度分布, 及温度变化过程。需要微距镜头才可以清晰看到材料表面的温度分布。同时由于加工设备的需要及加工安全需要, 拍摄距离可能需要需要较远, 则需要微距 3 的镜头。

2) 材料打印速度快。1~2 s 的时间段内, 需要走完 3 mm 的长度行程, 所以选择 60 Hz 帧频及以上帧频最佳。

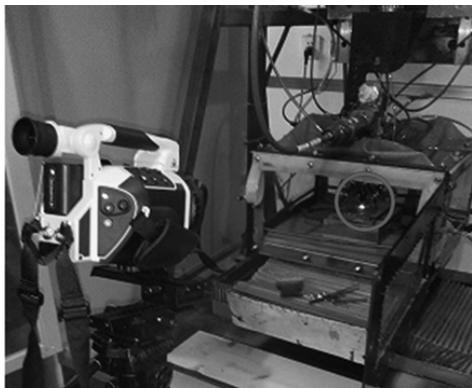
3) 温度高: 材料的温度可能在 1800 ℃, 需要选择高温选项 (60 Hz 或更高的帧频时, 需要配合在线分析软件)。

4) 需要在打印过程中实时温度监测。部分现场需要在实时打印监测表面的温度变化状态, 及温度数据, 绘制温度曲线, 确认新材料的工艺温度。

3 行业应用

珠宝、工业设计、建筑、汽车、航空航天、牙科和医疗产业等领域的高校研究院所以及研发生产单位。

(刘倩倩 供稿)



TiX1000+微距镜头 3 在离目标 90 厘米进行检测

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.14

表面温度动态校准中导热平板对时间常数测试影响分析

赵楠, 吕国义, 王莉, 刘丹英

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 针对阶跃变化表面温度装置中的表面温度传感器的数学模型进行了建模, 分析了导热平板对被测表面温度传感器时间常数的影响, 通过对不同时间常数的表面温度传感器进行数值仿真计算, 得出当被测表面温度传感器时间常数大于 20 倍导热平板时间常数时, 导热平板对被测表面温度传感器时间常数的影响可以忽略。

关键词: 表面温度传感器; 导热平板; 时间常数; 影响分析

中图分类号: TB942

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 03-0055-03

Analysis of Influence of Thermal Conductive Plate on Time Constant During Dynamic Surface Temperature Calibration

ZHAO Nan, LYU Guoyi, WANG Li, LIU Danying

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

Abstract: The mathematical model of surface temperature sensor in a step change surface temperature measuring device is established. The influence of the thermal conductive plate on the time constant of measured surface temperature sensor is analysed. through the mathematical simulation and calculation of surface temperature sensor at different time constants, it is concluded that when the time constant of thermal conductive plate is 20 times greater than that of the measured surface temperature sensor, it can be ignored that the influence of the thermal conductive plate on the time constant of measured surface temperature sensor.

Key words: surface temperature sensor; thermal conductive plate; time constant; influence analysis

0 引言

在科学研究和工程实践中, 经常采用表面温度传感器对被测物体的表面温度进行动态测量, 以确定被测区域的温度时变特性。目前已经研制出阶跃表面温度装置测量表面温度计时间常数, 但其忽略了装置中导热平板对被测表面温度传感器时间常数的影响。本文通过数值仿真分析得出阶跃变化表面温度装置中导热平板对被测表面温度传感器时间常数的影响可以忽略的条件。

1 阶跃变化表面温度装置

阶跃变化表面温度装置由主测量室、测量杯、冰

水混合物储存室、传感器、工作面等组成, 结构简图如图 1 所示。

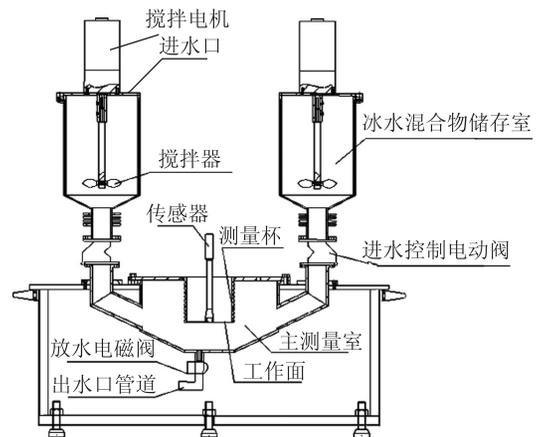


图 1 阶跃变化表面温度装置结构简图

工作时, 将被测表面温度计用支架固定在阶跃变化装置的工作面上, 通过手阀控制使冰水混合物进入

收稿日期: 2015-12-25

作者简介: 赵楠 (1985-), 女, 山东平度人, 工程师, 硕士, 从事热电偶计量工作。

储存室,从而使温度产生一个阶跃变化。数据采集系统采集被检表面温度传感器的输出信号,得到其阶跃响应数据,进行动态参数分析。

2 工作面温度传递数学模型

假设冰水混合物瞬间充满主测量室,工作面即导热平板下表面温度传到上表面的时间可以通过数值分析求得。应用非稳态导热的数值解法,由于稳定性条件要求 $1-2Fo \geq 0$, 内部节点最大取 18, 通过仿真可得, 内部节点为 9~18 时, 求得导热平板上表面温度从 20℃ 变化到 0.1℃ 时间相差 0.001 s, 为了方便计算, 取内部节点为 9, 数值解法如图 2 所示。

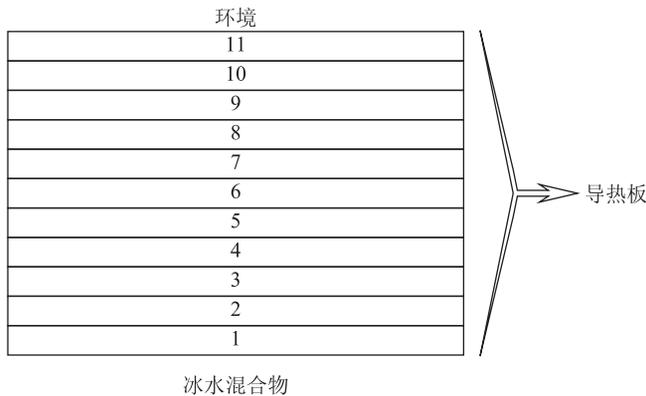


图2 导热平板非稳态导热数值解法节点示意图

内部节点为 9, 则 $n=10$ 。节点的显式差分方程为

$$\begin{cases} T_1^{k+1} = [1 - 2Fo(1 + Bi)] \times T_1^k + 2Fo(T_2^k + BiT_\infty) \\ T_i^{k+1} = Fo(T_{i-1}^k + T_{i+1}^k) + (1 - 2Fo)T_i^k \\ T_{11}^{k+1} = T_{11}^k = 273 \text{ K} \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_i^k 为第 i 个节点第 k 个时间步长时的温度, K; $i=2, 3, \dots, 10$; T_∞ 为流体温度, 即环境温度, K; Fo 为傅里叶数; Bi 为毕渥数。

$$\text{其中, } Fo = \frac{\lambda \Delta \tau}{\rho c (\Delta x)^2} = 0.132 \quad (2)$$

$$Bi = \frac{h \Delta x}{\lambda} = 1.2285 \times 10^{-6} \quad (3)$$

由于导热板采用的是紫铜, 导热板相关性能参数见表 1。

表1 导热板相关性能参数

导热系数 λ	398 W/(m·K)
导热板密度 ρ	7830 kg/m ³
导热板比热容 c	386 J/(kg·K)
导热板周围空气对流系数 h	5 W/(m·K)

导热板厚度 $\delta = 1\text{mm}$, 边界条件为初始温度 20℃, 终止温度为 0℃。

取 $\Delta x = \frac{\delta}{10} = 10^{-4} \text{ m}$, 时间步长 $\Delta \tau = 10^{-5} \text{ s}$, 利用 Matlab 计算求得导热平板上表面温度从 20℃ 变化到 0.1℃, 时间约为 0.02 s。

导热平板的数学模型可认为是一阶惯性模型, 由于其输入与输出均为温度, 且稳态终值等于输入值, 则其在时域的数学表达式实质上为单位阶跃响应公式:

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \quad (4)$$

式中: T_0 为时间常数, s。

根据公式 (4), 将归一化幅值 $y(t) = 0.995$ 和时间 $t = 0.02 \text{ s}$ 代入可得, 导热平板的时间常数约 $T_0 = 0.00381 \text{ s}$, 其阶跃响应曲线如图 3 中所示。

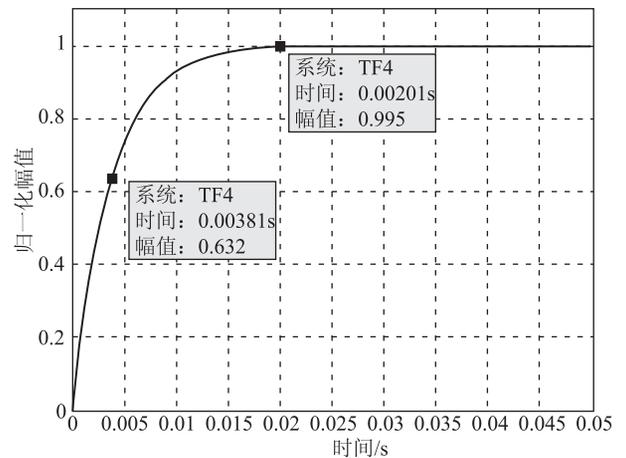


图3 导热平板单位阶跃响应曲线示意图

3 被检表面温度计的时间常数确定

被检表面温度传感器其数学模型可认为是一阶惯性模型, 其归一化的典型数学模型如公式 (5) 所示。

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \quad (5)$$

式中: T_m 为表面温度计时间常数, s。

时间常数 T_m 的计算较为复杂, 工程上常用其阶跃响应幅值的 63.2% 近似。测试时, 将热电偶测量端固定在装置导热平板的有限工作区内, 测量端初始温度为实验室温度 20℃, 测量端输入阶跃激励为冰水混合物 (0℃), 本文采用 NI-PCI-4474 数据采集器 (AD 数位为 24 位, 采集频率 10 MHz)。将数据采集器采集到的传感器数据实时准确反映到计算机软件中, 记录阶跃过程开始前直至阶跃过程完成后的全部测试数据, 得出被检表面温度传感器时间常数 T , 三次测量结果分别为 0.28, 0.22, 0.17 s, 其平均值为 0.22 s。

4 导热平板影响分析

据公式(4)和图3可知,由于导热平板的输出等于阶跃变化表面温度装置中被测表面温度传感器的输入,即被检表面温度传感器的实际输入为非理想阶跃输入,则上述被检表面温度传感器模型存在由于导热平板环节所引入的误差。为了评价导热平板对被检表面温度传感器时间常数的影响程度,对各类表面温度传感器的误差特性进行了分析。

根据几类不同型号的表面温度传感器的时间常数,分别将导热平板的一阶惯性模型代入,按工程上常用的阶跃响应幅值的63.2%近似得到各型号表面温度传感器的时间常数 T_m 及相对误差 $\Delta T/T_m$,具体如表2所示。

表2 表面温度传感器的时间常数 T_m 及相对误差 $\Delta T/T_m$

T_m/s	$\Delta T/s$	$\Delta T/T_m$
0.05	0.0039	0.078
0.08	0.0038	0.048
0.1	0.004	0.040
0.22	0.004	0.018
0.3	0.004	0.013

根据表2可知,对于阶跃变化表面温度装置,导热平板的时间常数 T_0 为已知量。当测得的被检表面温度传感器的时间常数 T_m 越接近 T_0 时,其 T_m 的测试相对误差越大;当测得的 T_m 大于20倍 T_0 时, T_m 的测试

相对误差小于5%,在工程应用中可以接受。

另一方面, T_m 越小,则表明此传感器的动态特性越好。但是,在测试这类表面温度传感器时,特别要注意导热平板对测试带来的误差。在 T_m 小于20倍 T_0 的情况下,一般需更换阶跃变化表面温度装置中导热平板的规格,使得 T_m 大于20倍 T_0 ,以保证 T_m 的测试误差在5%以内,满足各类工程应用要求。

5 结论

根据上述分析,可得出如下结论:

- 1) 通过数值仿真的方法求得导热平板的时间常数 T_0 ;
- 2) 应用表面温度测试装置可以方便地测得表面温度传感器时间常数 T_m ,并掌握每个被检表面温度传感器的动态特性;
- 3) 当测得 T_m 后,需与 T_0 进行比较,以判断测试相对误差是否满足工程应用需求,否则需改变导热平板规格重新测试。

参考文献

- [1] 廖理. 热学计量 [M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [2] 国家技术监督局. JJF1049-1995 温度传感器动态响应校准规范 [S]. 北京: 中国计量出版社, 1995.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1409-2013 表面温度计校准规范 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. JJG684-2003 表面铂热电阻检定规范 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2003.
- [5] 戴锅生. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.

约克仪器南京办事处成立

约克仪器南京办事处于2016年5月正式成立。该办事处是约克仪器在华东地区设立的第二家机构,主要围绕着工业计量校准、气体分析、环保检测、安全防护、流量物位、传感器等相关领域开展业务。针对江苏、安徽等地区市场,形成特色服务和技术产品优势,以满足江苏、安徽地区终端用户的业务发展需求。

南京办事处的成立,是约克仪器进一步发展的战略需求,更是服务当地企业和机构日益高涨的工业检测需求。南京处于我国华东地区,经济发展比较平稳。随着全国经济结构调整和产业转型步伐的不断加快,对工业检测产品需求日益增强,发展潜力巨大。约克仪器是国

内技术较为领先的工业检测设备企业,公司毗邻北京中关村园区,是一家快速发展的创新型企业,自1995年成立之日起,就专注于国内的工业计量校准、气体分析、环保检测、安全防护、流量物位、传感器等相关领域。

按照约克仪器的总体要求及部署,南京办事处将依托于北京总部的优势资源,服务南京及周边地区,为石油化工、航空航天、电力、冶金、环保、科研机构、煤矿等行业提供专业化、市场化、国际化的技术和设备支持。

(焦丹 供稿)

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.15

摆式加速度计零位偏离故障分析

张朋好¹, 姜程², 崔奇¹, 杨国军¹, 胡慧颖¹

(1. 中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 空军驻华北地区军事代表室, 北京 100013)

摘要: 针对悬丝支承摆式加速度计的输出零位偏离问题, 通过故障树图进行了机理分析和试验验证, 得出了输出零位偏离是由信号传感器对称线圈发生形变导致的结论, 并提出了纠正预防措施。

关键词: 加速度计; 零位偏离; 信号传感器; 故障树

中图分类号: TB934; TH824.4

文章标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 03-0058-03

Fault Analysis on Crossover Position Deviation for the Pendulous Accelerometers

ZHANG Penghao¹, JIANG Cheng², CUI Qi¹, YANG Guojun¹, HU Huiying¹

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2. Air Force Military Affairs Delegation of North, Beijing 100013, China)

Abstract: This paper, for the crossover position deviate fault of a certain type of pendulous accelerometer, analyses the mechanism through the fault tree diagram analysis and makes experimental verification, It has concluded that the output of crossover position deviation is resulted from the symmetrical coil deformation of signal sensor of the pendulous accelerometer, it has proposed the corrective and preventive measures in this paper.

Key words: accelerometer; crossover position deviate; signal sensors; fault tree

0 引言

本文进行零位偏离故障分析的摆式加速度计是一种悬丝支承结构的单轴摆式线加速度计, 具有体积小、功耗低、灵敏度高、过载能力大、工作温度范围宽和抗振动冲击能力强等优点, 目前广泛应用在各类惯导系统中, 主要用于测量运动载体坐标系上的线加速度, 并通过惯导系统解算出运动载体的速度和位移等导航参数, 实现精确制导和导航。

该型加速度计在惯测分组件静态标定过程的低温(-50℃) 试验时, 其中1只加速度计在加速度通道中发生输出零位偏离, 测试结果为-0.0023 g。将该加速度计拆除单独进行全温测试, 低温(-50℃) 零位为-0.00253 g, 与该加速度计交付时的低温(-50℃) 零位0.00268 g 相比发生了较大变化。后经过返厂反复测试各项静态性能指标, 数据均较稳定, 未发生零位进一步偏离的现象。

描述该型加速度计装配精度的主要参数包括输出

零位和对称度。因此, 分析输出零位偏离故障, 采取纠正预防措施, 对产品装配精度的提升具有十分重要的意义。

1 摆式加速度计组成及工作原理

摆式加速度计原理组成见图1, 主要功能模块包括信号传感器、力矩器、再平衡回路和摆组件四部分。其中信号传感器(由信号器骨架、对称的差动线圈和涡流片构成, 差动线圈胶结在骨架上, 涡流片刚性固定在摆框架上)的主要功能是将涡流片的位移转换为便于测量的电信号。装配时可以通过调整信号传感器骨架的位置来调整涡流片在差动线圈中的平衡位置, 进而调整加速度计的输出零位。

摆式加速度计的工作原理为: 加速度计通电工作后, 在没有外界加速度作用时, 涡流片在信号传感器差动线圈的中间(称为平衡位置, 对应输出为“零位”); 在被测(或输入)加速度(a)的作用下, 惯性摆(含悬丝、摆框架和摆线圈等)受力绕悬丝摆动产生惯性力矩, 带动涡流片偏离平衡位置, 涡流片的移动引起信号传感器差动电感发生变化, 并通过振荡器和放大器转变为电信号, 该电信号再经过力矩器平

收稿日期: 2016-03-25

作者简介: 张朋好(1981-), 男, 工程师, 主要从事惯性器件生产管理及其测试方法研究。

衡回路形成反馈的直流电流加到摆线圈中，摆线圈的电流与永磁体的磁场相互作用形成安培力矩反馈到惯性摆上，通过安培力矩平衡惯性力矩激励涡流片始终处于平衡位置，同时加速度计输出反馈的直流电流，与被测加速度成正比。工程上常利用采样电阻板与摆线圈串接，可得到便于测量和计算的直流电压信号。

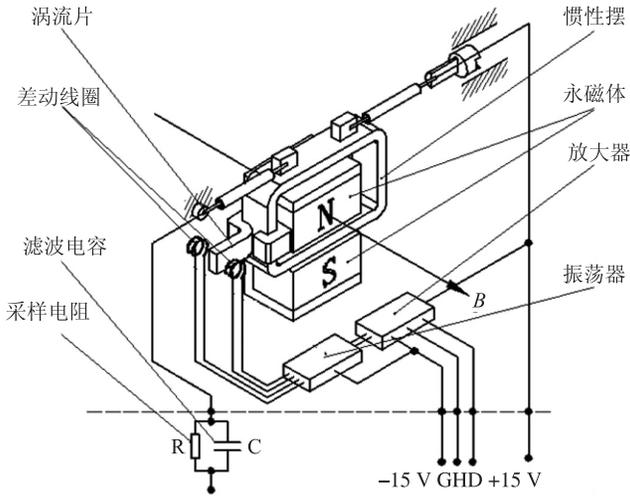


图1 悬丝支承摆式加速度计工作原理图

2 故障机理分析

根据故障归零的步骤，先后对产品进行了静态指标测试、X-射线透视、装机试验历程排查、开壳解剖和内部零组件排查等处理，结合摆式加速度计的结构组成、工作原理、同类产品使用过程中出现过的故障处理经验，对可能产生输出零位偏离的各种原因进行综合分析和定位，建立了输出零位偏离故障树，见图2。

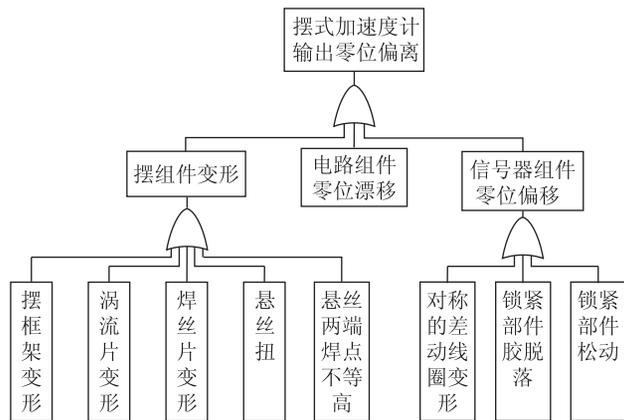


图2 摆式加速度计输出零位偏离故障树

的原因事件，依次对图2中各原因事件进行分析，用排除法定位故障原因，分析结果见表1。考虑到产品内部组成结构尺寸较小，排查中主要采用GmVnt型显微镜图像检测系统（放大倍数为40~300倍）代替生产装配用的体视显微镜（放大倍数为40倍）进行内部结构检测。

表1 原因事件分析表

序号	原因事件	分析方法和途径	分析结果
1	电路组件零位漂移	返厂复测，对比零位数据无明显变化	排除该原因
2	摆框架变形	通过在显微图像检测系统下检查，无此情况	排除该原因
3	涡流片变形	通过在显微图像检测系统下检查，无此情况	排除该原因
4	焊丝片变形	通过在显微图像检测系统下检查，无此情况	排除该原因
5	悬丝扭	通过在显微图像检测系统下检查，无此情况	排除该原因
6	悬丝焊接两端处不等高	通过在显微图像检测系统下检查，无此情况	排除该原因
7	对称的差动线圈变形	通过在显微图像检测系统下检查，发现信号传感器组件下线圈内侧有异常，进一步发现下线圈有轻微变形	导致信号传感器组件零位偏移
8	锁紧部件胶脱落	通过在显微图像检测系统下检查，无此情况	排除该原因
9	锁紧部件松动	通过在显微图像检测系统下检查，无此情况	排除该原因

经过上述排查可定位：加速度计输出零位偏离是由于信号传感器组件的下线圈发生了一定程度的形变导致信号传感器零位偏移，从而导致产品输出零位偏离。导致信号传感器对称线圈发生形变的原因可能有：①信号传感器的支承骨架发生形变，引起胶结在其上的线圈受力而发生形变；②固定线圈的胶膜发生破裂或脱落，引起线圈受力而发生形变。

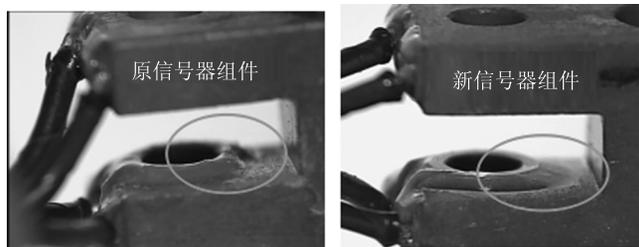
进一步检测发现，信号传感器的支承骨架未发生形变，而固定下线圈的内侧胶膜处有气泡状破裂，经分析，该气泡是由下线圈涂胶不均匀、固化时表面有残留气体形成的，局限于产品交付时的检验手段，没有及时发现，将该缺陷带入了高组装等级。在产品总装、交付、装配到惯测分组件至全弹的历程中经历了多次高低温循环试验和振动试验等可靠性增长试验后，诱气泡在应力作用下最终破裂，导致下线圈受力而发生一定形变，从而导致加速度计输出零位偏离。

由图2可知导致输出零位偏离存在9个相互独立

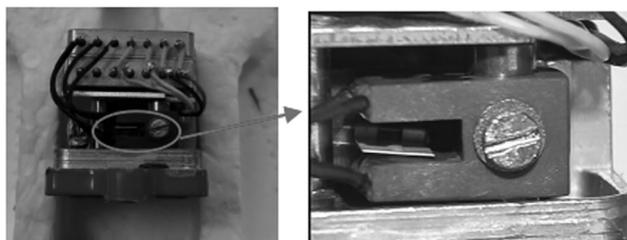
胶膜固化后形成的刚性支撑使线圈没有再发生进一步形变,所以加速度计在故障发生后的各项测试数据均较稳定。

3 故障复现试验

为了进一步验证产品输出零位偏离和信号传感器组件对称线圈形变的关系,将原故障信号传感器组件拆下,更换一只合格的信号传感器组件,见图3(对信号传感器放大100倍以上捕捉成像)。调试后重新进行重力场三温循环测试,数据满足工艺内控要求,见表2;再对合格信号器组件的下线圈进行施加外力致使其发生轻微形变,重新测试的数据又发生了较大偏离,故障复现,见表2。通过试验验证和表2的数据对比可判定前述的故障定位是准确的。



(a) 信号传感器下线圈对比



(b) 更换信号器组件

图3 更换信号传感器组件图示

表2 加速度计更换信号传感器前后
重力场下零位测试数据

温度 点/°C	原信号器 组件/g	更换新信号器组件/g		合格判据/g
		正常测试	破坏后测试	
20	-1.53×10^{-3}	3.59×10^{-4}	-2.09×10^{-3}	$-3 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3}$
-50	-2.36×10^{-3}	6.74×10^{-4}	-3.06×10^{-3}	$-5.25 \times 10^{-3} \sim 5.25 \times 10^{-3}$
65	-8.10×10^{-4}	1.88×10^{-4}	-1.19×10^{-3}	$-4.2 \times 10^{-3} \sim 4.2 \times 10^{-3}$

通过以上的故障定位、故障树原因事件分析、试验验证以及故障风险分析,可得出如下结论:

1) 信号传感器对称线圈形变导致了信号传感器的零位发生偏移;

2) 信号传感器的零位发生偏移是加速度计输出零位偏离的原因。

4 解决措施

为防止信号传感器零位偏移导致加速度计输出零位偏离的故障发生,应采取的预防措施为:加强信号传感器线圈装配过程中上、下对称线圈的限位胶结工艺控制,增强装配的质量一致性;在信号传感器组件自检和专检过程中均采用有较高放大倍数的显微图像检测系统,以避免将微小的组件缺陷带入高组装等级。

参考文献

- [1] 中国人民解放军总装备部. GJB/Z 1391-2006 故障模式、影响及危害性分析指南[S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 2006.
- [2] 国防科工委. GJB 1037A-2004 单轴摆式伺服线加速度计试验方法[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部, 2004.
- [3] 何铁春, 周世勤. 惯性导航加速度计[M]. 北京:国防工业出版社, 1983.
- [4] 张朋好. XX 加速度计输出零位偏离故障归零报告[R]. 北京:中航工业计量所, 2015.

新书《聚焦超级核能》锁定 核辐射及其计量

本刊讯:2011年3月11日,日本大地震、海啸引发的核泄漏事件吸引了全世界对核安全的关注,人们不得不再次对核能的研发和利用进行全面的思考。为了让更多的读者了解核方面的知识和发展现状,了解核辐射的来源、特点、危害和防护,作者容超凡(国防科技工业电离辐射一级计量站原副站长)历时两年编著了《聚焦超级核能》一书,现已由北京出版社出版,全国新华书店经销。此书是北京市科技协会组织编写的系列科普丛书“科学家在做什么”中的一个分册,全书共4章,其中第3章详细介绍了核辐射的准确测量问题,从核辐射测量什么、核辐射与物质的相互作用、测量所用设备、测量仪器的检定和校准、测量结果的准确表述等方面做了通俗易懂的讲解,阅读这本书,对于从事计量测试技术的科研人员定能有所收获。

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.16

扭簧比较仪的调修技术

戴庆生, 李凌梅, 赵华一, 杨婧孜

(天津市计量监督检测科学研究院, 天津 300192)

摘要: 扭簧比较仪是在机械式长度测量中一种简单有效的微位移测量工具, 应用非常广泛。本文主要介绍扭簧比较仪的几种需要调修的故障现象和对应的修理方法, 以及在调修过程中需要注意的一些事项。

关键词: 扭簧比较仪; 调修; 示值误差

中图分类号: TB921

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 03-0061-02

The Repair Method of Microcators

DAI Qingsheng, LI Lingmei, ZHAO Huayi, YANG Jingzi

(Tianjin Institute of Metrological Supervision and Testing, Tianjin 300192, China)

Abstract: The microcator is a tool to measure the micro displacement. It can be used in various fields. The article introduces the repair method of microcators and it mentions the precautions in the repair process.

Key words: microcator; repair; error

0 引言

扭簧比较仪是一种机械式长度测量仪器, 可以进行精密位移的测量或是表面形貌的测量。扭簧比较仪也是精密机加工重要的计量器具之一, 它可以安装在支座上单独使用, 亦可以与其他仪器配合使用。扭簧比较仪的一些关键部件在使用中容易出现故障或损坏, 如何依据故障现象判断故障原因并找到解决方法, 是本文要讨论的内容。

1 扭簧比较仪的结构及工作原理

扭簧片经扭转产生弹性变形, 其中间截面即在垂直于扭簧轴线的平面内转过一个与扭簧弹力成一定比例的角度。这就是扭簧的特性^[1]。利用这一特性, 可以将直线位移转变为角度位移。

扭簧比较仪正是利用扭簧的这个特性制作而成。扭簧比较仪的结构示意图如图 1 所示。当测量时, 被测工件将测量杆顶起, 使其上下移动, 内部的扭簧带会被拉伸或缩短, 引起扭簧片转动, 最终引起指针偏转, 显示读数^[2]。

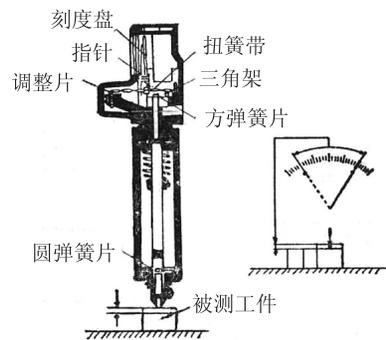


图 1 扭簧比较仪示意图

2 故障现象与调修方法

2.1 指针缺失或折断: 焊接指针

当指针缺失或折断时, 我们需要重新焊接指针。将焊好簧带的表放平, 把斜面玻璃垫块放在表的刻度盘上, 用玻璃压块将指针标记端压在斜面玻璃垫块上 (采用斜面垫块的目的是为了使指针离刻度盘保持 0.3~0.7 mm 的距离。指针离盘过高, 使眼睛的直视误差增加, 反之, 容易发生指针擦盘), 此时, 指针紧靠在扣簧带中间的无麻花节处, 用酒精灯烧红了的小烙铁, 将洋干漆丝熔化, 使指针与簧带粘接在一起^[3]。推动量杆观察指针行程是否够, 指针回转中心是否与刻度盘中心重合, 指针标志压刻度线是否在 0.3~0.8 mm 范围内, 否则, 要移动簧带左右位置或刻度盘

收稿日期: 2016-04-12; 修回日期: 2016-04-21

作者简介: 戴庆生 (1959-), 男, 高级工程师, 从事几何量计量测试工作。

上下位置,甚至要重新焊接指针,根据具体情况而定。合格后,在指针的尾部用洋干漆丝粘结一个平衡小球。合上前后表罩,把指针调到中间零位,然后将表向左、右方向摆动到水平位置,观察指针是否还在中间零位。如果不超过%格即为合格。若指针头端翘起超过%格,说明平衡球过重,可用小烙铁烤去一些,如果去除了,可将平衡球补粘一些洋干漆,然后再次观察,直到合格,方可调试示值。

2.2 指针不动:更换结构件

当指针完好,但测量时根本不发生偏转,通常是内部簧片结构件损坏,结构件中,方、圆簧片容易损坏。在更换结构件时,不仅要保持它们自身的平整,而且必须保持它们之间的平行。所有紧固螺钉都需拧紧,这样才能保证测力和径向受力符合指标的要求。当对薄壁零件测量时,测力过大,对测量精度就有一定影响。当扭簧表与被测工件表面倾斜一定角度时(如齿轮的曲线表面),径向受力的大小对测量精度影响极为明显,随着倾斜角增大,其影响也更为严重。

在更换结构零件时,必须使量杆与夹持套孔保持同心,不能与孔壁有任何接触,否则,将产生摩擦,影响示值精度。条件许可的话,用测力检查仪粗测一下测力。接下来,就可进入焊簧工序。

2.3 示值超差:调试示值

将待调试的表合上前后表罩,夹持到微动测量台上;根据示值范围,选择三块0级块规,块规的组距应为该表刻度值的正负极限,相邻两块规间距应正好等于刻度值正负极限的一半;推动块规时,观察指针在负向起始点、中间零位、正向终止点上是否超过精度指标。调试中,往往会出现下面几种情况:

2.3.1 正、负两方向示值均大或均小

若是示值对称性的大或小,说明放大比过大或过小,可上下移动调整块来改变调整片伸出部分的长短。若伸出部分的长度增大,就可减小放大比,反之,即增大放大比。然后再进一步微调示值。

2.3.2 正、负方向示值大小不一

若负向示值小于正向,说明焊接指针前的簧带绷得过松,反之,即绷得过紧。这两种情况都说明簧带的放大比处在簧带特性曲线线性段的两边缘,均需卸下指针,重新绷簧。

2.3.3 示值不稳,变化较大

反复推动块规而指针每次不落在同一点上,这是由于传动链的某些紧固处有松动。如果结构未经修理,只要拧紧一下三角架、调整块上的各紧固螺钉,即可解决。

2.3.4 示值某处有停顿性跳动

调试过程中,出现指针回转时有瞬间停顿和跳动,这是由于传动机构某处存在瞬间接触。除了清洗机构,重新调整量杆与夹持套内孔的同心度外,还得观察簧带是否与阻尼架相刮。

2.3.5 正、负示值偏差在1/2格内变化

如果只是差1/2格的微量偏差,只需拧动调整块右上角的螺钉就可;也可用移动刻度盘的方法来达到目的,但必须在保证指针标志压刻度线0.3~0.8 mm的条件下进行。如果全行程都是正差,可将刻度盘往负向微量移动,反之,可往正向微量移动;如果正极限为正差、负极限为负差,可将刻度盘向下微量移动,反之,可向上微量移动。从而使示值完全合格,然后注入适量阻尼油。

3 调修中的注意事项

经检修调试合格的扭簧表,需稳定24 h后再复检一次,方可交付使用;应规定使用期,一般以10~15天为宜。在调修过程中,有几点值得修理人员注意的地方:

1) 有的用户自制玻璃指针,不符合要求。指针的标记用糖果包装锡纸或有色玻璃纸极不合理,应用4.5~6 μm厚的铝箔来制作,而且指针标记的大小和粘结都要求十分严格,否则会影响指针的平衡和示值精度,对于0.2 μm和0.1 μm精度的扭簧表,影响更为明显。

2) 电烙铁的焊接和小烙铁的热烤,时间不宜过长,次数不宜过多,以免使簧带退火。

3) 备用扭簧带不宜久放,更要注意防潮,以免氧化、腐蚀,否则,使用时弹性会失效。

4) 调整片不宜反复调整,只能用作“大调整”,否则,往往易将已调至接近合格的示值反而越调误差越大。

5) 限位挡销改用特殊配方的铅芯,不易产生吸针现象。不能用普通铅芯或火柴棒、竹签来代替。

6) 调试用的块规须经定期检定合格,等级低的块规应计算误差值。另外,对于0.2 μm和0.1 μm的高精度扭簧表,须在恒温室内进行调试,并应注意人体体温、呼吸气流对示值精度的影响。

4 结束语

通过对扭簧表的维修,延长了其使用寿命,节约

(下转第67页)

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.17

改造 CTJ07 型光学经纬仪测试台

陈祖南

(山西北方机械制造有限公司, 山西太原 030009)

摘要: CTJ07 型光学经纬仪测试台因自身结构原因, 不能满足 JJG949-2011 《经纬仪检定装置检定规程》的要求, 故面临报废。本文就改造方案进行了分析, 详述了改造方法。改造后的 CTJ07 型光学经纬仪能够满足使用要求。

关键词: 光学经纬仪; 测试台; 改造

中图分类号: TB932; TH761.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2016) 03-0063-02

Modification of CTJ07 Optical Theodolite Test Bench

CHEN Zunan

(Shanxi Norther Machinery Manufacturing Co., LTD., Taiyuan 030009, China)

Abstract: The structure of the CTJ07 type optical theodolite test bench by its own reason cannot satisfy the requirement of JJG949-2011 "theodolite verification device verification regulation", therefore, facing scrapping. In this paper, the retrofit scheme is analyzed, and the improvement method is detailed. The modified CTJ07 type optical theodolite now can satisfy the user's requirement.

Key words: optical theodolite; test bench; modification

0 引言

CTJ07 型光学经纬仪测试台曾一度作为计量标准^[1]用于检定/校准光学经纬仪、电子经纬仪等角度类计量器具, 周视瞄准镜、直瞄镜也可在此光学经纬仪测试台上校准。

国家计量检定规程 JJG 949-2011 《经纬仪检定装置》颁布后, 该光学经纬仪测试台不符合新规程技术要求^[2], 面临报废。为发挥 CTJ07 型光学经纬仪测试台的余热, 有必要对其进行技术改造, 使其满足规程要求, 能够继续作为计量标准, 开展角度量值传递工作。

1 改造方案选择和分析

CTJ07 型光学经纬仪测试台水平方向平行光管布设结构是台面在 $\pm 90^\circ$ 范围内均匀安装 5 个平行光管, 其中 0° 位置平行光管与竖直方向共用, 符合 JJG 949-2011 对水平方向平行光管的设置要求。

CTJ07 型光学经纬仪测试台竖直方向平行光管布

设结构是本体、底座在 $\pm 30^\circ$ 范围内均匀架放 3 个平行光管, 台面安装一个平行光管 (与水平方向共用), 本体上安装一个平行光管, 底座上安装一个平行光管。按照 JJG 949-2011 竖直方向安置不得少于 5 个平行光管的要求, 竖直方向应增加两个平行光管。如果两个平行光管都增加到底座上或者在本体上、底座上各增加一个平行光管, 就需要在底座上更改平行光管安装孔位置, 存在在底座上补孔、重新钻孔、重新焊接平行光管支撑筋板等技术问题。改动底座的方案, 工艺复杂, 焊接后续热处理不宜实现, 更重要的是会影响测试台底座的刚度、影响测试台几何尺寸的稳定性。如果两个平行光管都增加到本体上, 就需要更改本体结构。本体是角钢焊接结构件, 体积小, 结构简单。重新焊接一个新本体, 工艺简单, 后续热处理也容易实现。对照 JJG 949-2011 要求, 竖直方向安置不得少于 5 个平行光管, 至少在 $-25^\circ \sim 25^\circ$ 范围内非整度整分地布设, 其并无均匀布设的要求。两个平行光管都增加到本体上的布设方案不违反 JJG 949-2011 竖直方向平行光管的布设要求。综合上述分析, 我们采用把两个平行光管都加到本体上的改造方案。这样, 改造工作就是增加两个平行光管和制作一个架放 3 个平行光管的新本体。

收稿日期: 2016-02-13; 修回日期: 2016-03-28

作者简介: 陈祖南 (1964-), 男, 高级工程师, 从事几何量计量测试技术及计量管理工作。

2 改造方案描述

将本体改造为新本体,尺寸如图1所示,图1中尺寸单位为mm,所用材料为Q235A的角钢,焊接成形。

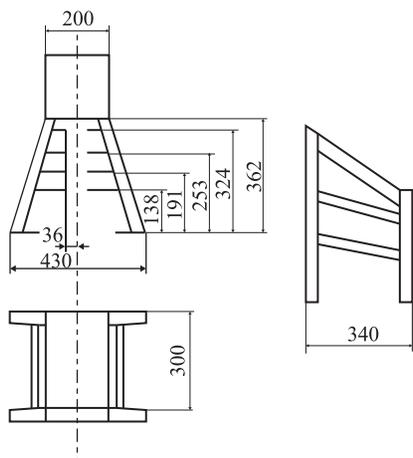


图1 本体几何尺寸示意图

为保证新本体后期无应力变形,有良好的尺寸稳定性,需对其进行去应力退火热处理^[3]:①新本体入热处理炉加热至450℃,保温3h;②新本体随炉温降至300℃;③新本体出炉,随空气自然冷却;④最后,为防锈和美观,对新本体进行喷砂、喷漆处理。

新本体中间的小横梁打孔后与M6紧固螺栓、紧固套配合,固定平行光管,并能小范围上下调整平行光管仰俯角。在新本体30°光轴夹角范围内,安装4个平行光管(含0°位置平行光管),因空间狭小,调整平行光管位置较困难,需要反复调试M6紧固螺栓上下位置及4个平行光管光轴与工作台面的夹角,最终应满足图2的要求^[4]。平行光管定位紧固后,在升降装置台上安装一台经纬仪,观察水平方向、垂直方向所有9个平行光管光轴是否均在经纬仪视场内,以验证测试台改造结果的正确性。改造完成后CTJ07型光学经纬仪主视示意图见图3。

3 改造结果

改造后的CTJ07型光学经纬仪测试台经上级部门检定,检定结果为:竖直目标定位重复性0.5",竖直平行光管位置:29°8'25.9",19°44'39.7",9°56'52",0°0'0"和-29°10'9.9",符合计量检定规程仰俯角重复性0.5"的技术要求。

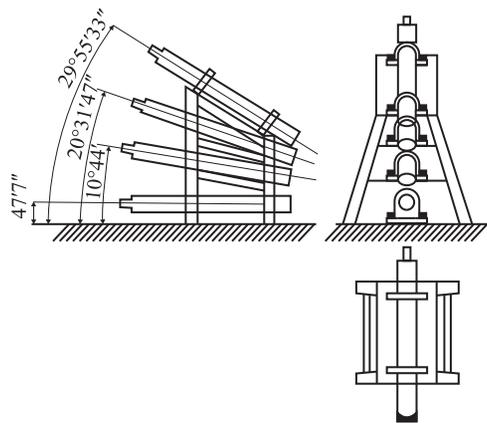


图2 平行光管与台面位置关系示意图

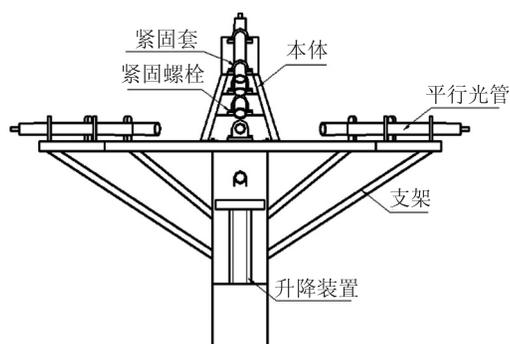


图3 改造后CTJ07型光学经纬仪测试台主视图

4 结束语

改造传统的光学经纬仪测试台以符合新规程要求是发挥设备最大性能又节约成本的好方式。本文介绍的改造方案最大化地保留了CTJ07型光学经纬仪测试台的设计结构和刚强度,不会影响测试台的示值稳定性。改造方案工艺过程简单,容易实现。从该测试台改造后的使用情况看,示值稳定,也没有改变原测试台的使用方法,且为公司节约了计量检测投入成本。该技术方案可在同类型测试台上进行推广。

参考文献

- [1] 国家国防科技工业局.JJF(军工)3-2012国防军工计量标准器具技术报告编写要求[S].北京:[出版者不详],2012.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局.JJG949-2011经纬仪检定装置检定规程[S].北京:中国计量出版社,2012.
- [3] 张艾丽,刘志斌,关伟宏.焊接件去应力退火工艺参数试验[J].汽轮机技术,2000,42(4):251-253.
- [4] 上海第三光学仪器厂.CTJ07型光学经纬仪测试台使用说明书[Z].1990.
- [5] 吴刚,陈先梅,用多齿分度台检定经纬仪竖盘测角的不确定度评定[J].中国测试技术,2005,31(5):74-75.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.18

基于 VBA 的千分尺证书记录系统

郑发路, 袁洪, 李在峥, 杨明君

(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: 介绍了一种以 VBA 作为研发平台的千分尺证书记录系统。介绍了系统的结构, 并详述了几个关键模块的设计和系统的防错功能, 千分尺证书记录系统的研发, 减轻了工作量, 降低了劳动强度, 杜绝了人为产生的偶然性失误, 提高了劳动效率。

关键词: 千分尺; 证书记录; VBA; 邮件合并; 防错设计

中图分类号: TB92; TP274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2016) 03-0065-03

The Micrometer Calibrating Certificate Recording System Based on VBA

ZHENG Falu, YUAN Hong, LI Zaizheng, YANG Mingjun

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

Abstract: This paper presents a method using VBA as a platform for research and development of micrometer calibrating certificate recording system (MCCRS). It introduces the structure of the system and details the design of several key modules and the error proofing function of the system. The research and development of the MCCRS can reduce the workload, put an end to the artificially generated accidental errors and improve the labor efficiency.

Key words: micrometer; certificate recording; VBA; mail merge; error proofing design

0 引言

千分尺在我公司的年检定任务量多达近万件次。大量的检定任务导致证书记录工作量巨大, 且记录过程中极易出错。为此, 设计开发出一种新的千分尺证书记录系统具有重要意义。

VBA 是一种基于 Excel 的自动化语言, 利用 VBA 可以实现数据的大批量准确处理, 实现数据处理的自动化, 可以极大地提高劳动者工作效率^[1]。结合我公司的实际情况, 将 VBA 应用于千分尺的证书记录自动生成方面, 取得了很好的实用效果。

1 传统千分尺证书记录生成方法

传统的千分尺检定证书依靠在电脑上逐项填写空白证书模板得到, 记录则需要将数据手工填写到空白原始记录表格中得到, 这种证书、记录的生成方式存在许多缺陷, 主要表现在以下几个方面:

1) 劳动效率低。在千分尺的检定校准过程中, 单纯的检定校准过程并不复杂, 但是之后的人工数据处理及证书、记录的生成过程非常繁琐, 存在大量的重复性劳动, 因而使得工作效率大大降低。

2) 工作强度大。千分尺的周期检定任务量非常大, 单靠人工处理数据并生成证书与记录会使得劳动强度非常大, 极易使操作人员疲惫。

3) 易产生人为失误。人工处理大量的数据会大大增加数据处理过程中出错的几率, 因而有可能会对公司的科研生产造成影响。

2 基于 VBA 的千分尺证书记录系统

2.1 系统结构及原理

本系统可以分为三部分, 如图 1 所示。第一是数据处理辅助部分, 包括量块组选择模块、单位代码模块、检定规程模块、中英文对照表模块、标准状态模块, 这几大模块包含千分尺数据处理的基本信息, 是本系统的基石。第二是数据处理及存储部分, 包括数据录入模块及数据存储模块, 这两个模块是本系统的核心模块。通过将测量数据输入到数据录入模块, VBA 会自动完成千分尺检定数据的全自动处理, 并且

收稿日期: 2016-01-29; 修回日期: 2016-02-20

作者简介: 郑发路 (1989-), 男, 山东济宁人, 助理工程师, 毕业于西北工业大学测控技术与仪器专业, 现从事几何量计量与测试工作。

将所有证书记录中需要的信息全部存储到数据存储模块中^[1]。第三是证书及原始记录生成部分，该部分利用邮件合并的办法生成千分尺原始记录及证书报告，大大提高了劳动效率。另外在系统的每个部分中都设计有相应的防错模块，以尽可能减少人为失误造成的影响。

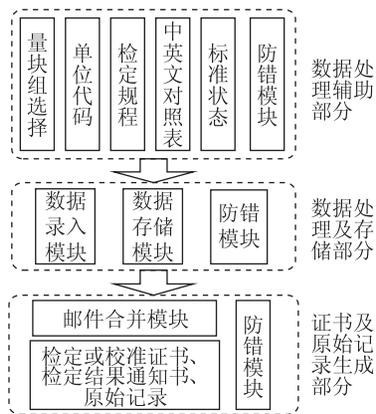


图1 系统结构框图

2.2 关键模块设计

2.2.1 量块组选择模块

量块组选择模块包含两部分内容：一是获得不同测量范围千分尺受检点的值；二是获得检定所需量块组及对零量块的修正量。该模块流程图如图2所示。

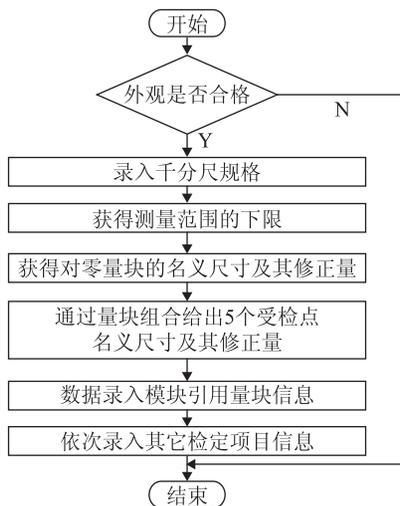


图2 量块组选择模块

其中量块修正量由专业组站定期检定后给定，该系统的操作人员只需每个周期更新一次量块修正量。系统在外观合格的情况下读取数据录入模块输入的千分尺规格，并判断测量范围下限，然后通过查询量块修正量表的方式获得对零量块的名义尺寸及其修正量和5个受检点的名义尺寸及其修正量。最后量块信息

将被数据录入模块引用。

2.2.2 检定规程模块

在检定规程模块中将千分尺检定规程中规定的计量性能要求以表格的形式分块罗列出来，包括测微螺杆的轴向串动和径向摆动、测砧与测微螺杆测量面的相对偏移、测力与示值误差等项目^[2]。该部分将在数据处理过程中被使用。

2.2.3 数据录入模块

数据录入模块是本系统开发中最为核心也最为复杂的部分，以上诸如量块组选择模块、单位代码模块、检定规程模块、中英文对照表模块、标准状态模块都在此模块中被引用，最终生成千分尺原始记录和证书所需要的所有信息并写入到数据存储模块中^[3]。

本模块包含千分尺基本信息部分、录入数据部分、年度统计部分、数据处理部分等内容。千分尺基本信息部分包含千分尺唯一识别号、客户地址、千分尺名称、规格、主标准信息、温湿度、检定人员等基本信息，某些信息的录入根据情况设计成下拉菜单的形式；录入数据部分则根据国家检定规程进行设计，包含千分尺的外观、各部分相互作用、测微螺杆的轴向串动和径向摆动等信息，检定人员只需要在此处输入检定所得到的数据即可；年度统计部分根据数据存储模块中的信息统计某一年中各个月份中各个检定类别的千分尺件数，并获得一年中检定的总件数，该部分可以根据用户需求进行相应的设计^[4]；数据处理部分则根据选择的量块并结合量块组选择模块获得量块的名义值、合成修正量、理论值、读数值、读数值与理论值的误差等信息，以进行千分尺的数据处理。数据录入模块部分界面及流程图分别如图3、图4所示。



图3 数据录入模块

2.2.4 邮件合并模块

在数据录入模块录入数据后，系统中的数据会自动进行运算，点击存储按钮则将处理后的数据储存在

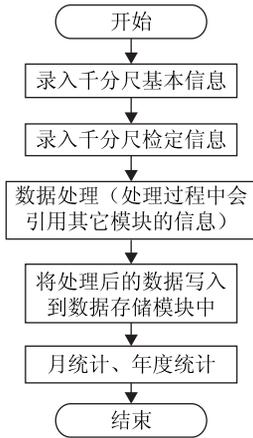


图4 数据录入模块流程图

数据存储模块。每一件千分尺的信息储存为 Excel 表格中的一行。

若要生成原始记录及证书则需使用 Word 的邮件合并功能。通过将 Excel 表格中的每一行数据在事先做好的 Word 版原始记录及证书模板中进行邮件合并，便可以很方便地生成所需的原始记录及证书。邮件合并功能的使用方法在这里就不再赘述。

2.3 防错设计

本系统在设计之初就充分考虑到系统的防错功能，以尽可能减少人为失误造成的影响。防错模块包括日期防错，重复录入防错，量块选择以及修正量防错，主标准过期提示，示值校准不确定度防错和中英文对照防错等。

防错设计主要针对记录证书中易出错的部分进行编程设计，如日期防错是通过编程的方法确保日期格式、检定日期和有效日期的准确性，重复录入防错可以防止信息重复录入到数据存储模块，主标准到期提醒防错可在主标准到期时自动提示主标准到期并将主标准到期日期以红色字体突出显示。防错模块的设计可以根据本系统的使用情况不断进行设计与完善。

3 本系统与传统方法的比较

在同等条件下测试一名工人不使用本系统和使用

本系统检定 3 把千分尺并出具相应原始记录及证书所需的时间。通过实验得出的数据如表 1 所示。

表 1 系统测试结果

序号	传统方法耗时/min	本系统方法耗时/min	时间比值
1	7.0	3.1	2.3
2	6.9	3.0	2.3
3	7.2	2.9	2.5

从表 1 可以看出，使用本系统进行千分尺检定工作将提高效率 1 倍以上。该工人检定仪器所用时间基本保持在 2 min 左右，抛开这一相同的部分不算而单独比较出具记录证书的时间，则工作效率可提高 4 倍以上。

4 结论

系统采用 Office 软件集成的 VBA 功能，并且与邮件合并功能配合使用，不仅能极大地提高工作效率，还能尽可能地减少人为失误造成的影响。由于每一把千分尺的信息都保存为 Excel 表格中的一行，这样还能利用 Excel 的强大批处理功能对检定信息进行批量管理。比如可以很方便地查找某一个千分尺的信息，能很方便地统计出某一个检定员的工作量和某一种类型千分尺的数量等。

推而广之，研制该千分尺证书原始记录系统的思路还可以应用于其他需要批量处理数据并大量生成证书及记录的工作中。因此本文所介绍的内容具有很好的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Sanna P. Visual Basic for application 5 开发使用手册 [M]. 沈刚, 译. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 21-2008 千分尺检定规程 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2008.
- [3] 韩义中. 计量信息系统在线原始记录编制及证书自动生成的功能实现 [J]. 计测技术, 2015, 35 (3): 60-62.
- [4] 董剑林. Office 软件的发展及其在工作中的应用 [J]. 中国高新技术企业, 2011 (3): 102-103.

(上接第 62 页)

了再购置标准器的经费，保证了标准器的精度。并且，通过维修过程的学习，有利于使用者了解扭簧表的内部结构，有助于更深入地理解和使用扭簧比较仪。

参 考 文 献

- [1] 陈季器, 崔学安. 扭簧比较仪的修理 [J]. 仪器制造,

1980 (6): 40.

- [2] 石强, 高振东, 杨金荣. 扭簧比较仪的应用分析 [J]. 石油仪器, 2000 (2): 33-34.

- [3] 邹义善. 扭簧式比较仪的调修方法 [J]. 工厂计量与检测, 1994 (2): 10-12.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.19

水三相点瓶自动冻制保存装置复现性研究

陈炜, 杨新圆

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍了型号为 CIMM-TH-0230 的水三相点瓶自动冻制保存装置, 对该装置进行水三相点温坪复现性研究, 并考核装置的各项指标。实验结果显示: 该装置冻制的水三相点的温坪在 48 h 内变化不大于 0.2 mK, 复现性小于 0.04 mK, 稳定性优于 0.5 mK, 不同瓶子之间复现的温度差值不大于 0.4 mK。试验数据表明该装置非常适合水三相点瓶的自动冻制、保存与复现。

关键词: 水三相点; 水三相点瓶; 温坪; 复现性

中图分类号: TB942

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 03-0068-03

Study of Reproducibility of Automatic Freezing and Saving Device in the Water Triple Point Cell

CHEN Wei, YANG Xinyuan

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

Abstract: The paper introduces an automatic freezing and saving device in the water triple point cell for CIMM-TH-0230. The reproducibility of the temperature plateau in the water triple point cell is studied with the device, and the performance of the device is evaluated. The test results show that: the change in the temperature plateau of the triple point of water with the freezing device is not more than 0.2 mK within 48 h; the reproducibility is less than 0.06 mK; the repeatability is better than 0.5 mK; the temperature differences between different cells are not more than 0.4 mK. According to the test results, the device is suitable for freezing, saving and reproducing of the water triple point cell.

Key words: triple point of water; the water triple point cell; temperature plateau; reproducibility

0 引言

水三相点既是热力学温度的唯一基准点, 也是 ITS-90 国际温标中最重要的定义固定点。水三相点是水的固、液、汽三相平衡共存时的温度, 其值为 273.16 K (0.01℃); 它是通过一个装有高纯度水 (水同位素成分相当于海水) 的密封玻璃容器——水三相点瓶内进行复现的^[1]。水三相点容器冻制通常采用的液氮法、干冰法及热管法, 这几种方法过程复杂、操作难度大。随着各类型温度传感器检定规程的修订, 水三相点值的简捷、快速复现也随之成为各级计量检定机构关注的重点, 因此, 水三相点瓶自动冻制保存装置的需求也越发紧迫。中航工业北京长城计量测试技术研究所研制的水三相点瓶自动冻制保存装置 (CIMM-TH-0230) 采用高精智能温控器和可视

化操作平台, 在较短的时间内可实现水三相点瓶的冻制、保存、复现, 极大限度提升了检定人员的工作效率。

1 水三相点瓶冻制

1.1 装置结构

该装置利用自行探索出的冻制曲线对装置工作区域进行精准控温, 从而达到对水三相点瓶的冻制、保存; 冻制过程基本模拟液氮冻制法。装置在结构方面分为恒温槽主体和控制系统两部分, 外型图和内部结构图分别见图 1 和图 2。恒温槽主体采用双桶结构, 形成混合区和工作区; 混合区是将由制冷系统产生的冷量与控制系统提供的热量在搅拌系统作用下充分混合形成恒温介质, 然后送入极少受外界干扰的工作区, 从而得到一个温度稳定均匀的工作环境。控制系统使用 I/O 控制模块将高精智能温控仪、搅拌器、制冷器与作为操作平台的嵌入式一体化触摸屏相连接, 使得水三相点复现过程更为简捷、直观。

收稿日期: 2015-12-25

作者简介: 陈炜 (1984-), 男, 河北张家口人, 工程师, 主要从事热工计量工作。



图1 装置外观图

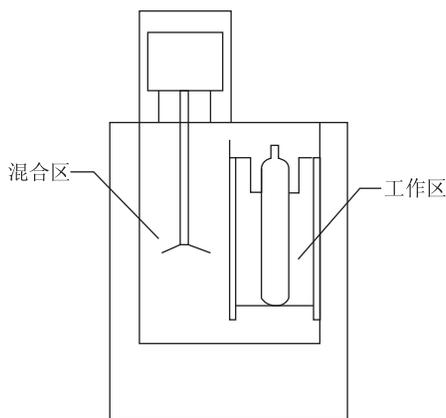


图2 装置内部结构图

1.2 冻制操作

首先将水三相点瓶缓慢放入恒温槽主体工作区内，启动设备电源，通过触摸屏依次启动“搅拌”、“模式一”与“开始冻制”键，运行冻制程序；在程序运行近2 h自动发出警报提示音后，将水三相点瓶取出轻晃瓶体，瞬时瓶内至上而下结出冰套；冰套形成后再将其放回装置内进行保存。水三相点瓶自动冻制保存装置在警报提示音响起后3 min将自动转入水三相点瓶保存程序，设置温度为0.01℃。水三相点瓶在冰套形成30 min后即可使用。触摸屏操作界面见图3。



图3 触摸屏操作界面

2 性能测试

在冻制好的水三相点瓶温度计阱内插入经过预冷的标准铂电阻温度计，当温度计达到热平衡时，用6010B测温电桥测量标准铂电阻温度计的电阻值，为消除自热效应所引入的误差，测量电流采用1 mA, $\sqrt{2}$ mA分别进行测量，每组测量30次，取后20次测量值的平均值作为一次的测量结果。

2.1 温坪复现

温坪复现是固定点水平的重要指标，当水三相点瓶内部出现双液—固界面^[2]后，把预冷过的工作基准标准铂电阻温度计插入温度计阱，并连接至6010B高精度电桥进行测量。每3 h测量一次，共测量17次，测量数据显示，CIMM-TH-0230水三相点瓶自动冻制保存装置复现的水三相点温坪在48 h内变化不大于0.2 mK，温坪复现曲线见图4。

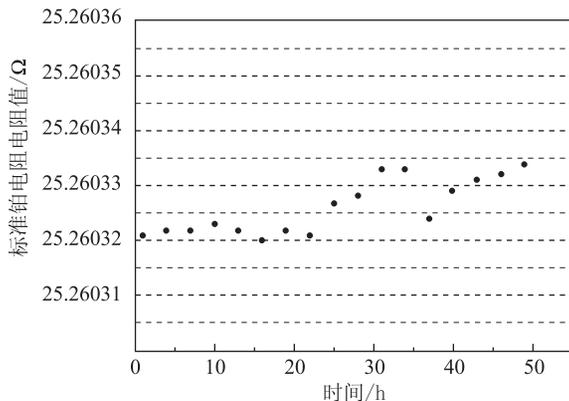


图4 水三相点温坪复现曲线

2.2 复现性及稳定性测试

在间隔半年的时间内，对同一支水三相点瓶进行了两方面的性能测试。其中，一方面选用两支一等标准铂电阻温度计（No. 10001, No. 68119）同时进行两次复现测试，每次两支铂电阻温度计分别各采6组数值，并计算标准偏差 $s(x)$ ，得出该装置复现性小于0.04 mK，实验数据见表1。另一方面，选用一支一等标准铂电阻温度计，每隔一个月对同一支水三相点瓶进行复现测试一次，每次计算实测值与参考标准水三相点瓶证书值的差值，得出该装置短期稳定性优于0.5 mK，实验数据见表2。

2.3 适用性测试

为了考验该装置对不同水三相点瓶的适用性，各选中国计量科学研究院和昆明大方自动控制科技有限公司的两支标准水三相点瓶作为实验对象，用两支一

表1 复现性实验数据

序号	第一次测试/ Ω		第二次测试/ Ω	
	10001	68119	10001	68119
1	25.233274	25.495613	25.233370	25.495595
2	25.233279	25.495616	25.233369	25.495603
3	25.233280	25.495612	25.233376	25.495597
4	25.233277	25.495614	25.233370	25.495602
5	25.233284	25.495623	25.233366	25.495597
6	25.233279	25.495619	25.233370	25.495595
$s(x)/\text{mK}$	0.03	0.04	0.03	0.03

表2 稳定性实验数据

序号	实测电阻值/ Ω	参考标准瓶电阻值/ Ω	差值/ mK
1	25.49003	25.49000	0.3
2	25.49002	25.49000	0.2
3	25.49003	25.49000	0.3
4	25.49003	25.49000	0.3
5	25.48995	25.49000	0.5
6	25.48996	25.49000	0.4

等标准铂电阻温度计 (No. 68119, No. 26536) 对四支水三相点瓶分别进行复现测试, 然后将同一支标准铂电阻温度计测得的 4 个 R_{tp} 值中的最大值与最小值作差,

选两支标准铂电阻温度计中最大差值作为该实验结果。结果显示不同瓶子之间的温度差值不大于 0.4 mK, 实验数据见表 3。

表3 适用性实验数据

标准铂电阻	参数	NIM		昆明大方	
		NIM-1-89	NIM-1-560	01	03
68119	实测值/ Ω	25.49507	25.49508	25.49505	25.49507
	温度差值/ mK	0.3			
26536	实测值/ Ω	25.26032	25.26034	25.26032	25.26030
	温度差值/ mK	0.4			

3 结束语

CIMM-TH-0230 水三相点瓶自动冻制保存装置适用于不同厂家生产的水三相点瓶, 水三相点的温坪在 48 h 内变化不大于 0.2 mK, 复现性优于 0.04 mK, 完全能够满足各类型温度检定计量器具对水三相点的测量需求。

参考文献

- [1] 国家质量技术监督局计量司. 1990 年国际温标宣贯手册 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1990.
- [2] 闫小克, 张哲, 王玉兰. 不同复现方法对熔点温度的影响 [J]. 计量技术, 2004(5): 18-20.

(上接第 50 页)

表1 试验测量结果记录表 (传输速率: 1 Mbit/s)

测试参数			下限	测量值	上限	不确定度 $U_{rel} (k=2)$
发送端	电平测试	隐性 $V_{CAN-H-R}/V$	2.00	2.41	3.00	3%
		$V_{CAN-L-R}/V$	2.00	2.42	3.00	
	显性	V_{diff-R}/mV	-500	-15.5	50	
		$V_{CAN-H-D}/V$	2.75	3.29	4.56	
		$V_{CAN-L-D}/V$	0.50	1.38	2.25	
		V_{diff-D}/V	1.50	1.92	3.00	
	比特速率 $V_r/(kbit \cdot s^{-1})$		985	1000	1015	0.1%
终端电阻 $R_{终}/\Omega$		100	117	130	1%	
接收端	电平测试		/	通过	/	/
	比特速率 $V_r/(kbit \cdot s^{-1})$		985	通过	1015	/
	输入阻抗	$R_{in-H}/k\Omega$	5	26.9	50	/
		$R_{in-L}/k\Omega$	5	26.7	50	
		$R_{diff}/k\Omega$	10	51.5	100	
规约特性		/	通过	/	/	

其中不确定度包含标准设备、适配器接口和重复性等因素, 且仅代表本次测量结果的不确定度。

4 结束语

通过试验对本文所述校准方法进行可行性评估, 从数据可以看出, 校准结果符合 ARINC825 标准要求。通过对 ARINC825 总线设备进行校准, 可以将总线数据端口的量值通过通用标准设备溯源至国家基标准, 从而确保 ARINC825 总线参数量值统一, 并且为 ARINC825 总线设备的验收、周期校准提供方法依据。

参考文献

- [1] 冯源, 豆海利. CAN 总线在航空领域应用的探讨 [J]. 航空工程进展, 2011, 2(2): 231-235.
- [2] Aeronautical Radio, INC. ARINC825 General standardization of CAN bus protocol for airborne use [Z]. 2007.
- [3] ISO11898-2 High-Speed medium access unit [S]. International Organization for Standards, 2003.

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.20

民机工业计量测试技术规范研究与体系建设思考

胡帅, 张学涛, 代洁, 樊哲

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 分析了国内外民机工业计量测试技术规范的研究现状; 在总结研究路线、研究内容及成效的同时, 分析了当前我国在规范研究方面存在的问题, 探讨了计量测试技术规范体系建设的原则; 从补充大型试验系统和非标测试设备、数字化设备、产品验收、特种和先进的计量测试技术规范角度, 提出了完善民机计量测试技术规范体系的建议。

关键词: 民机; 计量测试; 技术规范

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 03-0071-04

Thoughts about Research and System Construction of Technique Standard of Metrology and Measurement in Civil Aircraft Industry

HU Shuai, ZHANG Xuetao, DAI Jie, FAN Zhe

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

Abstract: Research status of metrology and measurement technical standard in civil aircraft industry is analyzed in this paper. By summarizing the research route, research content and effectiveness etc, we propose the issue of the metrology and measurement technical standard research in civil aircraft industry, and probe the construction principles of the technical standard system. Finally, we give some advices to improve the metrology and measurement technical standard system in civil aircraft industry, mainly by adding metrology and measurement technical standard of large test systems and non-standard test equipment, digital measurement device equipment, product acceptance test and special and advanced test.

Key words: civil aircraft; metrology and measurement; technical standard

0 引言

民机工业是国家战略性支柱产业, 是现代工业发展的集大成者。现代工业产品的数据化、模型化表达和研制生产全过程的精准量化控制对计量测试技术要求日益凸显, 计量测试技术规范作为保证民机全产业链数据一致性和全过程数据准确性的基础, 对工业技术进步发挥着越来越重要的作用。一方面, 民机工业具有国际分工、全球采购的特点。如一架波音 747 飞机的零件数量达 450 多万个, 需要世界 1500 多家大型企业以及 15000 余家中小企业共同协作生产, 这样大规模协同化生产需要统一的计量测试技术规范保证不同承制商产品数据的一致性。另一方面, 民机产品必须满足适航管理的要求, 从研制到运营各环节都需要

成熟的计量测试技术保证产品数据的准确性, 计量测试技术的成熟度集中体现在技术规范的建立、应用与执行等方面^[1]。

因此, 为提升我国民机工业自主创新保障能力、确保民机集成质量和性能安全可靠, 迫切需要从技术层面开展计量测试技术规范研究及其体系建设。

1 国内外发展现状

1.1 国外发展现状

欧美发达国家在航空工业发展过程中非常注重技术规范研究与体系建设。通过政府推动和企业竞争的双重引导, 技术规范建设通常同步甚至超前于产品研制生产活动, 保证了产品的技术领先和市场垄断。本着“产品全生命周期和配套服务均建立在测量基础上”的认知, 波音、空客、罗罗等航空企业依托各自国家的测量体系, 充分借助美国机动车工程师协会 (SAE)、法国标准化协会 (AFNOR)、欧洲航天标准

收稿日期: 2016-04-22; 修回日期: 2016-05-25

作者简介: 胡帅 (1989-), 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事民机计量测试规范研究项目管理。

化合作组织 (ECSS) 等协会和 NIST, PTB, NPL 等专业计量技术研究机构的支持, 开展了大量的计量测试技术规范研究, 并将研究成果作为核心技术纳入到产品的研制要求。

1.2 国内发展现状

国内航空工业经过几十年的发展, 已经建立了较为完整的专业技术体系, 形成了 13000 余项技术规范。在计量测试技术规范建设方面, 依托国家标准和国家军用标准体系, 建立了 1800 余项计量技术规范, 保证了通用计量器具和部分专用计量器具的量值溯源工作。

综上所述, 国内民机计量测试技术规范建设与国外先进国家相比仍存在着较大的缺口。随着民机工业的自主创新发展, 当前有必要从夯实基础、提高自主研制保障能力的角度出发, 适应民机特点加快制订急需的计量测试技术规范, 完善计量测试技术规范体系。

2 计量测试技术规范研究工作初步实践

“十二五”期间, 在民机工业主管部门的支持下, 围绕民机工程研制需求, 开展了计量测试技术规范规划研究, 依托专业技术机构和工程实践单位, 以民机研制和适航审定过程中急需的非标测试设备和大型试验系统校准及产品测试活动的技术保障为重点, 按照“分批立项、成熟一批确定一批”的原则, 先期开展了两批共计 58 项计量测试技术规范项目研究, 取得了初步的工作成果。

2.1 研究路线

计量测试技术规范的研究路线可以分为需求分析、顶层规划、规范研究与编制、成果验证与应用四个阶段。

在需求分析阶段, 通过对民机研制主机厂所进行广泛调研, 梳理民机设计、试验、生产各个环节参数量值溯源技术现状, 重点关注计量测试技术规范建设与适航审定相关要求的差距, 分析并归纳民机研制过程中对相关计量测试技术规范的需求情况。

在顶层规划阶段, 对比分析国外相关技术规范, 借鉴、发挥行业内既有的各类技术规范的参照、指导作用, 以民机研制过程中对计量测试技术规范的总需求为核心, 开展计量测试技术规范顶层规划研究, 形成技术规范建设总体框架。

在规范研究与编制阶段, 广泛吸取行业内相关专业技术人员的意见, 形成技术成熟度较高且需求迫切的研究专题; 按照需求的轻重缓急和经费安排, 组织相关单位分析技术发展现状、确定适航性要求、规范

框架要素、技术指标及试验验证内容与方法, 形成技术研究报告; 在此基础上参考相关文件要求起草计量测试技术规范初稿^[2], 并通过征求意见、专家评审等程序, 形成技术规范草案。

在成果验证与应用阶段, 选择研究对象的生产和使用单位, 组织开展技术规范草案的技术验证与工程试用工作, 验证计量测试技术规范中校准/测试方法的合理性和可行性。在获取行业单位使用反馈信息的基础上, 进一步完善技术规范并适时发布。

2.2 主要研究内容

在开展计量测试技术规范研究的过程中, 需要特别强调技术规范与工程实践活动相结合, 重点关注以下内容:

1) 关键校准/测试的技术参数确定

关键校准/测试的技术参数确定是计量测试技术规范研究的基本前提。在考察分析被校准/测试对象技术参数的基础上, 通过调研被校准/测试对象的生产使用单位, 结合民机研制中量传需求, 筛选出需要进行量值控制的关键参数, 并组织专家进行评审, 经过充分的技术论证, 最终确定关键校准/测试项目及其技术参数。

2) 校准/测试方法的确定

校准/测试方法的确定是计量测试技术规范研究的核心内容。在确定关键校准/测试的技术参数基础上, 通过调研相关民机研制单位, 结合校准/测试技术需求和既有的计量技术能力、手段, 研究提出校准/测试项目及方法, 并组织行业相关专家进行评议和充分的技术验证。

3) 试验验证及测量不确定度评定

计量测试技术规范须经过充分的试验验证才能在行业内推广使用。测量不确定度评定表征测量结果的可靠性, 是计量测试技术规范中必不可少的部分。在计量测试技术规范研究过程中, 对校准/测试方法, 多次开展技术试验验证, 获取大量试验数据。在此基础上, 按照相关技术文件要求对试验结果进行不确定度评定, 并组织专家进行确认, 以保证试验验证方法正确和不确定度评定方法合理。

4) 适航符合性研究

取得适航证件, 是民用飞机投入市场运营的基本要求, 计量测试技术规范的研究应紧密结合适航审定要求。如在《民用飞机结构水平冲击试验台校准规范研究》中, 结构水平冲击试验台进行的动态冲击载荷试验主要是参考《SAE AS 8049B 民用旋翼类/运输和

通用航空类飞机座椅的性能标准》进行的,其对试验测量系统的要求主要参考《SAE J211/1 冲击试验的仪器-1 部 电子仪器》确定的。

通过对以上内容的充分研究和初步应用实践,各项计量测试技术规范目前已为民机型号研制生产中涉及的相关非标测试设备和大型试验系统校准及产品测试工作提供了有效的技术支持,对型号工程研制发挥了重要的保证作用。如我国自主研制的大型客机采用航空电子全双工交换式以太网(AFDX)总线作为机载数据传输总线,在机载设备的研制、生产、交付验收及装机调试过程中,配备了大量AFDX测试仪,对机载设备通信终端进行产品检测或性能测试。国内一直缺失AFDX总线测试设备的校准规范,导致AFDX测试仪的验收及校准没有统一、规范的方法依据。通过研究制定《航空电子全双工交换式以太网测试仪校准规范》,提出了AFDX测试仪在10 Mbit/s和100 Mbit/s工作模式下关键参数的校准方法,保证了AFDX总线测试设备的数据准确可靠。

3 计量测试技术规范体系建设的思考

虽然在计量测试技术规范研究和应用的初步实践中取得了一定的成效,但在其体系建设中仍存在着诸多不足,主要体现在:

1) 计量测试技术规范缺口较大。“十二五”期间仅仅针对大型运输类飞机研制、生产、试验的急需,开展了部分非标测试设备和大型试验系统的计量测试技术规范研究,远远不能满足民机适航管理和产业化发展的技术规范建设需求。

2) 计量测试技术规范建设缺乏引导。参与民机研制工程的厂所普遍建立了较为成熟的企业技术规范,但因各企业分工不同,且技术基础能力不一致,导致各企业技术规范存在差异,存在计量测试结果不一致的风险。

为保证民机研制和适航取证过程有据可依、有规可循,加快先进适用的计量测试技术在我国民机工业中的规范化应用进程,提升民机产品质量,需通过计量测试技术规范体系持续建设的方式,引导和推动行业技术升级。在下一步工作中,应围绕大型客机、通用飞机、民用直升机以及其他民机产品的技术发展要求,建设并完善民机计量测试技术规范体系。

3.1 体系建设的原则

计量测试技术规范体系的建设应遵循以下原则。

1) 先进性。民机计量测试技术规范体系的构建不

能仅限于满足现阶段我国民机研制的需求,应兼顾民机研制中数字化、网络化、智能化和多参数综合的计量测试技术发展方向。

2) 系统性。应按照“系统工程”的要求来构建计量测试技术规范体系,不仅要考虑民机研制、试验、生产、计量测试保障需求,还应兼顾民机使用维护全寿命周期各个阶段的技术要求,并综合考虑干支线飞机、民用直升机、通用飞机和民用无人机等各类民机产品研制技术需求。

3) 开放性。民机计量测试技术规范体系是一个开放的技术规范体系,应积极吸收转化相关国际技术规范及供应商、转包生产企业先进的技术规范成果。

4) 协调性。计量测试技术规范体系的构建应充分考虑我国民机工业基础能力,既要充分借鉴现有成熟的航空武器装备计量技术规范,又要针对民机研制特点确定适用于民机的计量测试技术规范要求。

3.2 体系建设的内容

我国航空工业在几十年的发展过程中已经形成了航空技术规范体系框架^[3],但计量测试技术规范作为通用基础技术规范体系中的一部分仍有待细化完善。根据以上建设原则,结合民机计量测试技术规范研究工作经验,笔者认为体系建设应重点补充完善以下几方面的内容:

1) 大型试验系统和非标测试设备的计量技术规范。目前我国民机研制中相当数量的大型试验系统、非标设测试备在量值溯源上缺乏统一的技术规范及有效管理,如鸟撞试验测速过程采用的非标高速摄像设备,由于缺乏计量技术规范的支持,难以充分证明试验测试数据的准确有效性。

2) 数字化设备的计量技术规范。目前航空装备制造行业正在大力推进数字化、智能化技术升级,面对大量出现的数字化设备的现场、在线等计量技术保障需求,需要适时研究建立数字化条件下的计量技术规范。

3) 产品验收的测试技术规范。民机研制生产中具有大量的分包/转包活动,由于承制商与各分包商间的技术差异,缺乏统一的技术规范要求,往往导致产品无法顺利验收,需要按照测量一致性的要求,从建立计量测试技术规范层面协调验收过程中的测试技术活动,为产品质量提供可靠保证。

4) 特种和先进测试技术规范。民机产品对安全性、舒适性、绿色环保性等性能指标的验证与评价具有特殊的测试要求,如民机产品安全状态监测涉及的特种传感和非接触测试、极端或复杂环境条件下特种

试验测试, 以及与绿色航空发展相关的先进复合材料特种工艺测试、噪声和污染物排放先进测试等, 为提高测试技术成熟度, 及时固化测试方法并应用于民机工程研制, 满足产品适航审定要求, 亟待建立相关的测试技术规范。

4 结束语

随着《民用航空工业中长期发展规划 2013-2020》和《中国制造 2025》等重大战略的实施, 加强计量测试技术规范研究和体系建设成为强化技术基础、支撑重点工程的迫切任务。从民机工程及产业化发展需求

出发, 持续加强和完善计量测试技术规范建设, 对于推动航空技术进步、提高产品质量和效益、提升航空工业竞争力具有十分重大的意义。

参 考 文 献

[1] 张学涛, 周世锋, 田阳, 等. 浅谈民用飞机适航性与计量测试之间的关系 [J]. 计测技术, 2012, 32 (2): 51-54.

[2] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1071-2010 国家计量校准规范编写规则 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2010.

[3] 辜希, 刘启国. 关于建立我国民用飞机标准体系的几点思考 [J]. 国防技术基础, 2006 (10): 30-34.



欢迎订阅 《化学分析计量》

邮发代号 24-138

《化学分析计量》为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。2016 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。

地址: 山东省济南市 108 信箱杂志社 邮编: 250031

电话: (0531) 85878132, 85878224, 85878148

E-mail: anameter@126.com 网址: www.cam1992.com

《化学分析计量》2016 年第 3 期目次

标准物质

章鱼肉碱标准样品的研制

镍释放量标准物质的研制

分析测试

HPLC 法测定党参中烟酸和党参炔苷的含量

TBP 萃淋树脂分离 ICP-MS 测定八氧化三铀中的钍和铀

微波消解原子吸收光谱法测定鱼肉中 14 种金属元素

甲基对硫磷农药标准物质溶剂效应探讨

ICP-AES 法快速测定不锈钢食具容器中重金属的迁移量

气相色谱-质谱法检测豆制品中的二甲基黄

粉煤灰烧失量测定方法探讨

气相色谱法测定环境空气中的丙烯酸酯类

阴极溶出伏安法测定含铀废水中的痕量铀

液相色谱-串联质谱法测定蔬菜中甲硫威及其代谢物残留

微波消解-石墨炉原子吸收光谱法测定污水厂污泥和进、出水中的镉、铅

ICP-AES 法测定氮化硼中铁、钙含量

高效液相色谱法测定蔬菜中除虫脲、灭幼脲和杀铃脲残留

微波消解 ICP-MS 法测定锂离子电池石墨负极材料中 9 种痕量

元素

微波消解-石墨炉原子吸收光谱法测定鱼肉和河蚌中的重金属

快速消解分光光度法测定高氯废水中低浓度化学需氧量

ICP-OES 常见干扰类型及校正方法探讨

快速提取-超高效液相色谱法测定唇膏中 11 种酞酸酯

连续流动分析法测定水中的阴离子表面活性剂

水吸收气相色谱法测定环境空气中丙烯醇

计量技术

基于安德雷德通式的旋转黏度计校准方法研究与应用

实验室管理

质控数据在医学实验室仪器稳定性期间核查中的应用

天然气检测实验室质量控制方式探讨

国际比对钢中碳硫含量的测定

仪器设备

基于非分散紫外吸收法二氧化硫超低量程烟气分析仪的研制及其应用

基于普鲁士蓝-碳纳米管-纳米金复合材料的电化学免疫传感器的构建