

A black stealth fighter jet, likely a J-20, is shown in flight against a clear blue sky. The jet is angled upwards and to the right, with its number '2001' visible on the side. Below the jet, a tropical beach scene unfolds, featuring a row of overwater bungalows on stilts along the shoreline. The water is a vibrant blue, and the sky is filled with fluffy white clouds. The overall composition suggests a high-tech military presence in a serene tropical environment.

中国空气动力学会测控技术专委会

第六届二次学术交流会论文集

(下册)

海南省·三亚 2011年10月

中国空气动力学会测控技术专委会

第六届二次学术交流会

论文集

(下册)

海南省·三亚 2011 年 10 月

中国空气动力学会测控技术专委会

第六届二次学术交流会

主办单位：中国空气动力学会测控技术专委会

承办单位：南京航空航天大学

大会主席：郭隆德

大会副主席：施洪昌 毕志献 熊 健 张 伟 张召明 王 帆

委 员：张 然 邵绍清 马洪强 温渝昌

田于逵 刘应征 王文襄 黄 健

单希壮 罗乐平 刘 伟 王 罗

邱俊文 杨富荣 竹朝霞 张 龙

组织委员会：

主 任：张召明

副 主 任：顾蕴松 史志伟 王洪波

委 员：郑晓旭 陈鹏宇 吴德松

前 言

中国空气动力学会测控技术学术交流会，已经成功地举办了五届，每届召开五次，今年是第六届第二次交流会。目前，测控技术交流会已经成为空气动力学会下测控领域重要的行业年会。交流会的召开，为国内测控领域的专家、学者、研究生及测控系统设计人员提供了很好的交流平台。近年来，专委会的影响越来越大，参会交流的单位和论文数量逐年增加，越来越得到国内同行的重视，为我国空气动力学的发展和测控技术的提高作出了重要的贡献。

中国空气动力学会测控技术专业委员会于2011年5月在云南省腾冲市召开了六届二次全体委员会会议暨审稿会，确定于2011年10月20日在海南省三亚市召开本届学术交流会，由南京航空航天大学航空宇航学院承办。与会专家对本次会议收到的160多篇学术论文进行了认真细致的审阅并提出相应的修改意见，认为投稿的论文符合征文要求。

本次会议收到的学术论文内容广泛，主要包括了测量与控制系统设计研制、软件开发与应用、试验技术、非接触测量技术、传感器及天平设计技术、计量技术、高速列车、风洞建设等相关领域的研究和进展情况，展示了近年来测控技术的应用和取得的成果，有很多文章的研究内容是相关行业的技术前沿，具有很高的学术水平。

本次会议得到了很多单位、论文作者和参会代表的支持，在此表示感谢！

本次会议得到了实业界的积极参与和支持，在此表示感谢！

会务组的工作人员为本次会议的顺利召开和论文集的编排付出了辛勤的工作，在此表示感谢！

中国空气动力学会测控技术专委会

2011年10月

目 录

上 册

测量控制系统及软件

PXI 总线在 HG-4 风洞测控系统中的应用	谭献忠, 施洪昌, 陈少松, 等 (1)
$\Phi 3.2$ 米风洞动态试验装置控制系统实现	聂博文, 沈志洪, 刘志涛, 等 (7)
风洞地面效应试验控制系统的设计	王 晶, 张 伟, 桂 兵 (12)
Application of laser holography and PDPA technology in spray fuel particle field measurement	
.....Zhang Long, Guo Longde, Zhang Lihu, 等 (16)	
振动故障诊断技术在 $\Phi 3.2$ 米风洞长轴安装调试中的应用	刘丽萍, 梁 频 (20)
基于 ModBus 总线的 FL-8 风洞变频控制系统	贾 丹, 周志坚 (25)
0.6 米风洞进气道试验控制系统设计	陈海峰 (30)
快速切换多功能伺服电机驱动系统设计	赵衍庭, 王 玲, 马 飞 (36)
FL-9 风洞双转轴支撑控制系统研制	桂 兵, 张 伟, 王 晶 (40)
基于全集成自动化 (TIA) 的中高压气源综合自动化监控系统的设计与实现	
.....杨龙山, 张铭, 段旭松, 等 (45)	
FL-28 风洞测控系统	刘 烽, 高 川 (52)
风洞数据采集系统常见问题及解决方法	王忠君 (58)
Ethernet Powerlink 在 9400 伺服控制系统中的应用	秦凤波, 张旭超, 魏 艳 (63)
基于虚拟仪器技术的风洞压力测量系统功能实现	王 萍, 张 超, 李 玮, 等 (68)
PSP 旋转叶片压力测量控制系统	项晓杰, 张 锴 (72)
CAN 总线模型姿态角控制软件开发与实现	王丽萍 (77)
单自由度振荡运动控制系统研制	沈志洪, 孙海生, 张 钧, 等 (83)
FL-2 风洞流场控制系统设计	张 锴 (88)
引导风洞流场控制系统设计	纪 涛, 江春茂 (91)
水洞模型姿态控制系统研制	孟 巍, 高 琦, 王维强 (95)
推力转向风洞试验喷流压力控制系统设计	陈雪冬 (100)
基于 CAN 总线的模型姿态控制系统	高 琦 (104)
大型低速翼型风洞侧壁边界层控制系统研制	张传侠, 惠增宏, 柳 雯 (108)
基于 RTX 的车载实时测控系统设计	李 政 (113)

基于 PCC 的多电机同步传动控制技术研究.....罗 强 (116)

Φ0.5 米高超声速风洞新型滚转机构研制.....刘 刚; 冯 明, 张 伟 (121)

PAC 在脉冲燃烧风洞测控系统中的应用.....蒲旭阳, 胡俊逸, 曾来荣 (126)

基于 PLC 技术的风洞速压控制系统.....田 昊, 王 政, 刘晓林 (130)

一种风洞大攻角试验系统研制.....刘晓伟, 秦永明, 徐志文, 等 (135)

Φ3.2 米风洞测量系统改造.....车兵辉, 王新林 (138)

4 米×3 米风洞测控处系统改造卢翔宇, 王新林 (143)

脉冲风洞高速数据采集系统的升级改造.....谢 旭, 谷笏华 (147)

数据侦听技术在设备改造中的应用.....段丕轩, 任晓波, 梁 磊, 等 (151)

2m×2m 超声速风洞流场控制策略研究与实现.....褚卫华, 顾正华 (156)

NF-6 跨音速连续式风洞模型测力实验中的一些典型问题及对策.....刘国元, 高 超, 王 莹 (162)

热烧蚀风洞控制.....郑鲁平, 董永辉, 芮 雪, 等 (166)

基于 PXI 总线的虚拟仪器风洞数据采集系统.....杜洪亮, 李 斐 (170)

基于 Modbus 协议的 PC 机与西门子 S7-200PLC 串行通信的方法研究.....陈树权 (175)

NF-6 跨音速连续式风洞试验数据采集与实时显示系统研制.....王 莹, 高 超, 赵子杰, 等 (181)

基于 Silverlight 和 WCF 的远程风洞解决方案.....樊 昌, 王 晶, 李 玮 (186)

风速风向仪检定用回流式风洞测控系统的设计与研制陈树权 (190)

基于 PSOC 的角位移信号变送仪器的开发贲宝佳, 毛世鹏 (193)

某风洞测控处系统信息化改造.....王新林, 卢翔宇, 顾 艺, 等 (197)

Optotrak 系统在模型变形及姿态测量中的应用研究.....宋 晋, 马 军, 蒋 敏, 等 (200)

旋转天平试验装置电气控制系统.....熊建军, 姜裕标, 马 军, 等 (205)

视频基带传输中 UTP 五类线的应用研究.....陈 希, 陈 强, 侯 凯, 等 (210)

飞机蒙皮测温试验中的红外热图技术.....曹 阳, 蒋甲利, 单永正 (215)

基于 TDLAS 的气体温度和氧原子浓度测试技术研究.....欧东斌 陈连忠 董永晖, 等 (218)

FBG 在热结构应变测量中的初步应用.....陈连忠, 董永晖, 欧东斌, 等 (223)

TsAGI 利用电子束测量稀薄气体的密度分布及局部流动显示.....李 萍, 卢雨淇, 吴 超 (228)

一种新型大振幅试验滚转振动测量装置研制.....徐 明, 潘金柱, 李 勇, 等 (232)

Optotrak 系统在低速增压风洞模型机翼弹性变形测量试验的应用

.....刘 捷 蒋甲利 许相辉, 等 (237)

高速风洞进气道实验测控技术研究.....隋志才 (241)

超燃冲压发动机尾喷流组分采样分析.....伍 军, 任 虎, 谭 宇, 等 (247)

多功能风洞及 CFD 优化设计.....陈作钢, 李金成, 代 赓, 等 (252)

滑流试验系统的开发与应用.....徐龙金, 张 伟, 周志坚, 等 (259)

FL-3 风洞数据处理软件规范化设计.....伊宏伟, 王 军 (263)

风洞电磁干扰对热线风速仪的影响及解决方法研究李 刚, 危 懿 (269)

结冰风洞中冰型测量的三维重建技术研究王大伟, 温渝昌 (274)

液压控制技术在位置控制系统中的应用王 瑶 黄丽静 (279)

基于某实验设备压力调节的液压伺服系统.....李玉秋, 陈良泽, 朱艳艳 (284)

基于视觉的运动控制系统设计及其在控制课程教学中的应用.....龙志强, 梁玉峰, 李晓龙 (287)

激光跟踪技术在风洞建设中的应用.....吴运刚, 姜 春, 张 龙 (291)

形态小波域传声器阵列噪声源定位仿真研究.....李元首, 陈 宝, 樊 昌, 等 (295)

风洞试验中模型位移的视频测量.....张征宇, 孙 岩, 王水亮 (300)

数字表测量电阻的方法.....李祚亮, 刘威伟, 沈景鹏, 等 (306)

多维影像池边采集系统.....贾 渠, 高 翔, 郑鲁平, 等 (310)

池底多维影像采集系统.....高 翔, 郑鲁平, 芮 雪, 等 (314)

软件滤波法在扭矩测试台中的应用.....芮 雪, 杜军令 (320)

高速列车实车表面压力的测量技术进展与应用.....黄志祥, 陈 立, 李 明 (326)

早期轨道段失效静止轨道卫星离轨方案设计与分析.....刘景勇, 杜黎明 (331)

国外风洞试验数据分发与管理系统的设计与实现.....谭飞程 陈丽艳 (336)

PSI8400 系统准动态测试软件开发设计.....田于逵, 何 凌, 宋长友, 等 (343)

某民机风洞试验数据修正软件设计与开发.....王 军, 伊宏伟, 李 勇 (348)

分布式异构数据集成技术研究.....段 宁, 陈 希, 谭 罡, 等 (352)

设备计量信息系统构建.....何增梅 (359)

航空发动机稳定性设计体系集成平台的建设.....何琳楠 (362)

空气动力研究试验网络信息系统.....罗昌俊, 曹征银, 罗兴武, 等 (366)

基于 Web 的试验项目网络信息平台框架结构设计.....冯昕华, 周志坚, 贲宝佳 (372)

基于 B/S 模式的集成型信息网站设计与实现.....岳廷瑞, 李小艳 (376)

基于 RCM 的中低速磁浮列车维护维修策略研究.....包清政, 窦峰山, 谭庆龙 (379)

中低速磁浮列车安全措施研究.....梁玉峰 (386)

实用型磁浮列车车载供电系统可靠性建模与分析.....梁玉峰, 齐洪峰, 吴媚蕊 (391)

汽车风洞测控系统的数据管理技术.....张丽琴, 庞加斌 (397)

非定常气动力建模与动导数仿真计算研究.....马 上, 赵忠良 (403)

下 册

天平、传感器、计量技术

国外风洞天平校准技术研究进展·····	战培国, 谭飞程 (409)
螺旋桨带动力六分量应变天平的研制 ·····	薛 伟 张德久 (414)
盒式测力天平结构设计及优化·····	于 炜, 张 莹 (419)
双圆柱体试验装置及天平设计·····	李发尧 李征初 李晓华 (423)
应力集中结构风洞天平研制技术研究·····	史玉杰, 陈 竹 (428)
杆式应变天平优化设计·····	张海天, 姚 裕 (432)
翼形测力天平的研制 ·····	李 勇, 赵长辉, 李国文, 等 (438)
新型光纤传感测力技术研究·····	戴金雯, 孙良宝, 刘志伟, 等 (441)
喷流干扰试验六分量天平研制·····	谢 飞, 许晓斌, 何 超 (446)
超燃发动机大尺度推力天平研制·····	于时恩, 贺 伟, 李宏斌 (450)
通气模型内流道测力天平研制与应用·····	许晓斌, 谢 飞, 舒海峰 (455)
有限元法在小尺寸应变天平设计中的应用·····	李绪国, 杨彦广, 李志辉 (460)
电桥组桥方式对杆式天平校准系数矩阵的影响研究·····	胡国风, 陈 涛, 戴华南 (465)
高精度天平校准系统控制系统设计·····	江春茂, 纪 涛 (470)
天平体轴校准系统六自由度复位机构研制·····	李付华, 朱本华 (473)
一套高精度全自动风洞天平校准系统的研制·····	李小刚, 赵长辉, 邢汉奇, 等 (478)
高精度天平静校台数采处理系统·····	王 艳 (483)
用于天平校准架的多路线阵 CCD 采集处理板研制·····	梁 磊, 刘丽萍, 李付华, 等 (488)
10T 天平静校台检测及测试天平校准分析·····	刘喜贺, 邱俊文, 梁桂范, 等 (492)
风洞天平校准装置的技术特性和评定方法研究与探讨·····	罗天保, 沈景鹏, 黄 健, 等 (497)
风洞天平校准的计量问题与解决思路研究·····	罗天保, 沈景鹏, 黄 健, 等 (501)
风洞天平校准不确定度评定方法·····	陈 丁, 王金印 (505)
天平静态校准公式的改进探讨·····	高 贺, 马洪强 (512)
翼型测力天平校准设备与天平校准·····	白 静, 解亚军, 高 超 (518)
天平测力系统的安装调试及使用·····	刘国元, 高 超 (521)
流量计发展中的若干流体力学问题与槽道式流量计·····	明 晓 (525)
六维力传感器的支持向量机复合标定方法·····	马迎坤, 张希农, 谢石林 (533)
一种提高压力传感器测量小压力准确度的方法·····	金承信, 竹朝霞, 白 静, 等 (539)
光纤光栅传感器在风洞测试中的应用探讨·····	多 勐, 张 伟 (543)

七孔探针移动测量技术研究.....李 鹏, 刘中华, 明 晓 (548)

磁浮列车绝对定位传感器的优化设计.....张军歌, 薛 松, 陈特放 (555)

高频响高压力传感器研制.....罗义成, 王临平, 周嘉穗, 等 (561)

Φ1mm 同轴热电偶研制刘济春, 秦 峰, 孔荣宗, 等 (565)

单屏蔽总温探针在高超声速风洞的应用.....张绍武, 曹 程, 凌 岗, 等 (571)

具有视频监控功能的智能传感器研究.....蔡利民 (577)

浅论风洞试验中压力传感器的模式选用解其锋, 向素君, 王 军 (583)

Calibration of a Thermal MEMS Shear Stress Sensor Array
.....Liang Jin min, Li Jian qiang, Li Chunyan, 等 (588)

浅论压力传感器检定数据的处理方法.....解其锋 (593)

对 CTS 装置角度误差校准结果的不确定度分析.....黄 健, 黄志阳, 樊 洁, 等 (597)

试验技术与非接触测量

大攻角细长体侧向力主动控制技术研究.....顾蕴松, 陈智铭 (600)

低速空降风洞试验的关键技术.....熊 超, 惠增宏, 张彬乾 (606)

民机机头模型跨声速风洞压敏漆试验.....向星居, 董金刚, 毛 涛, 等 (613)

飞机后机身阻力测量装置研制与应用.....王 超, 林 俊, 王玉花 (619)

模型弹性变形对风洞实验气动特性测量结果的影响分析.....武 洁, 贺济洲, 叶正寅 (623)

低速翼型风洞实验与测试计量.....竹朝霞, 金承信, 惠增宏 (630)

机器视觉在尾旋试验测量技术中的应用研究.....宋 晋, 马 军, 蒋 敏, 等 (635)

飞机低速大攻角机动进气道动态特性试验测量方法研究.....罗顾灵, 张召明 (640)

短舱涡发生器的七孔探针尾流扫描.....印 帅, 顾蕴松, 程克明 (645)

翼型风洞侧壁边界层吹除控制系统与模型实验.....解亚军, 竹朝霞, 惠增宏 (651)

翼伞车载动态试验技术研究.....高春鹏, 马坤昌 (655)

膨胀管测试技术.....王 刚, 唐志共, 吕治国, 等 (660)

基于光纤传输的干涉技术风洞试验应用研究.....姚向红, 吴运刚, 谢伟明 (665)

电弧加热器试验测温干扰信号消除方法.....隆永胜 (669)

前缘材料热性能考核热流测量技术研究杨 鸿, 赵文峰, 周 玮, 等 (673)

超声速条件下煤油与水喷射的对比测量.....张力虎, 关 平, 张 龙 (678)

光流测量技术原理及研究现状.....黄 湛, 王 伟, 王宏伟 (681)

激波风洞振动对光学测量影响初步研究.....吕治国, 李国君, 姜 华, 等 (689)

脉冲型设备摩阻测量技术.....赵荣娟, 吕治国, 姜 华, 等 (693)

气动声学相位阵麦克风测量技术研究.....乔宝英 (697)

雾化喷嘴粒径特性 PDI 测试研究.....何 苗, 李小艳, 胡站伟 (702)

一种基于特征边缘提取的图像处理算法.....梁 磊，段丕轩，朱本华，等（707）

防热试验流场中高温应变测量技术的应用.....吴 东，周 玮，张松贺，等（712）

开口射流风洞中声学测量的剪切层修正.....张 雪（718）

表面热膜壁面摩阻测量技术.....耿子海，朱本华，梁 磊，等（721）

高速风洞采用油膜干涉法测量表面摩擦力技术研究.....张 威，张 然（725）

等离子体流动控制试验研究.....范兴瑞，周志坚（729）

风洞模型变形测量的投影莫尔干涉技术研究.....张 龙，杨建军，张 俊（734）

湍流流场双向全息干涉测量.....岳茂雄，张 龙，陈 勇，等（739）

基于荧光油膜的模型表面摩阻测量和流场显示技术研究.....陈 爽，杨富荣，张 龙，等（744）

表面摩擦应力油膜干涉光学测量试验技术研究.....代成果，张长丰（750）

基于热线仪的跨声速风洞气流湍流度测试技术研究.....朱 博，王如琴（755）

风浪流作用下海上风电场塔架系统的流激振动特性研究.....严根华，赵建平，胡去劣（760）

浙江大学边界层风洞建设与运行.....余世策，蒋建群，楼文娟，等（765）

建筑风洞试验数据的管理与数据库系统的建立.....孙 瑛，武 岳（771）

建筑风荷载测试系统.....贾向阳，施洪昌，王 冰（776）

国外油膜干涉测量技术应用研究综述.....毛京明，战培国（782）

油膜干涉法测量翼型表面摩擦应力的实验研究.....丁 超，史志伟（786）

高速温敏发光热图测热关键技术探讨.....周嘉穗，张扣立，江 涛，等（793）

双目立体视觉在风洞模型姿态测量中的应用.....谢明伟，祝汝松，韩 杰（797）

用红外热成像技术测力通用航空飞行器表面气动加热.....李 明，杨彦广，祝智伟，等（803）

水平风洞模拟自由飞模型姿态确定方法研究.....范利涛，江 峰，蒋娅娟（808）

国外风洞天平校准技术研究进展

战培国 谭飞程

(中国空气动力研究与发展中心 四川绵阳 621000)

摘 要：风洞天平是感应和测量作用在风洞试验模型上气动力和力矩的重要测量装置。风洞天平校准技术直接影响天平校准的效率、成本和质量，影响风洞试验数据测量的精准度。本文在简述风洞天平校准原理的基础上，归纳分析了国外风洞天平校准台的主要类型及特点；阐述了美、欧在风洞天平校准技术方面的发展理念和开展的关键技术研究。意在为国内风洞天平校准技术的创新发展提供参考。

关键词：风洞天平；天平校准；天平校准台

The Development of Wind Tunnel Balance Calibration Techniques

Zhan Peiguo Tan Feicheng

(China Aerodynamics Research and Development Center, Sichuan Mianyang 621000 ;)

Abstract: Wind tunnel balance is an important equipment in wind tunnel test for force/moment sensing and measuring. The balance calibration techniques affect the efficiency, cost and quality of balance calibration directly, and relate to the accuracy of wind tunnel test data. This paper summarizes the principle of wind tunnel balance calibration, analyzes the types and characteristics of the overseas balance calibration device, describes the developing thoughts and key technique researches for balance calibration in USA and Europe. The purpose is to provide thoughts and references for the development of our wind tunnel balance calibration techniques.

Key words: wind tunnel balance; balance calibration; balance calibration device

1 引言

风洞模型试验是航空航天飞行器研制过程中了解飞行器性能、降低飞行器研制风险和成本的重要手段之一，风洞天平则是直接感应和测量作用在模型六个自由度上气动力和力矩的高精度测量装置。风洞天平技术涉及到天平材料、结构设计分析、加工制造技术、应变传感器技术和天平校准技术等。通常，天平校准可细分为静态校准和动态校准，静态校准是依据天平校准原理，利用天平校准装置，按照一定的校准方法，建立天平测量信号与所受气动载荷关系的过程，即获取天平公式和天平其他性能参数的过程。动态校准则是在静态校准的基础上，利用标模，在风洞中进一步校验天平性能的过程。由于风洞天平静校决定着天平校准的效率和天平公式的准确性，关

系到天平未来应用中模型气动数据测量的精准度，所以，天平静校被认为是天平设计过程中最重要的环节。因此，本文所探讨的国外风洞天平校准技术是指天平静态校准技术。近年来，美、欧等发达国家在不断追求风洞试验数据精细化的过程中，天平校准技术有新的发展和进步。

2 风洞天平校准概念简述

风洞天平是一种能感应和测量试验模型上所受载荷的传感测量装置。风洞天平在结构上设计有感应特定载荷作用下产生应变的结构弹性元，如：升力元、阻力元等等。在这些结构弹性元上，粘贴有电阻应变片，并组成惠斯登电桥，每个电桥都主要针对一个自由度上的载荷，根据各电桥的电信号输出，可以计算得到作用在试验模型上

的气动力和力矩。这种风洞天平测量的基本原理产生于 20 世纪 40 年代，至今没有改变。近年来，已有光纤应变片在风洞天平上进行应用研究。

由于作用在风洞模型六个自由度上的气动载荷大小差异较大，尽管现代天平在结构设计时，利用计算机，采用了有限元分析、优化等先进设计技术，充分考虑天平各结构弹性元对其他载荷的抗干扰性，但由于天平空间尺度相对较小、结构复杂，各

结构弹性元间的载荷干扰或多或少都存在着。因此，必需通过天平校准来建立精确的天平公式，确定天平的精准度和不确定度等性能参数。

天平校准是一个设定自变量（施加的载荷），测量因变量（天平的输出响应）的过程，校准数学模型是基于一个多项式方程，其中，天平的输出响应看成是自变量的函数。例如，假定自变量个数 $k=2$ ，多项式数学方程可以写成：

$$\begin{aligned} f(x, \beta) = & \beta_0 \\ & + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \\ & + \beta_{12} x_1 x_2 \\ & + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 \\ & + \beta_{111} x_1^3 + \beta_{222} x_2^3 + \beta_{112} x_1^2 x_2 + \beta_{122} x_1 x_2^2 \\ & + \beta_{1111} x_1^4 + \cdots \\ & + \cdots \end{aligned}$$

(截距)
(线性项)
(交叉干扰项)
(二次项)
(三次项)
(四次项)
(等等)

根据 AIAA 发布的“风洞试验内式天平使用和校准推荐做法”报告，在天平校准中，该数学模型一般都取到二次项，但在有些情况下，需要增加纯三次项。例如，在美国 NASA 兰利研究中心，天平校准采用取到二次项的做法；在欧洲 ETW 风洞，天平校准则采用增加纯三次项的做法。因此，对于一个六分量天平，校准模型取到二次项就有 27 个系数需要确定，如增加纯三次项，就有 33 个系数需要确定。

天平校准及校准误差评估在一定的载荷范围内进行，通常是在天平设计的正和负满量程范围内确定校准施加的载荷，所有的这些校准载荷组合在一起，就构成了一个校准载荷表，校准载荷表的设计涉及天平校准的效率、精准度和数据分析方法等，校准载荷表及加载方法均是国外天平校准技术研究的重要内容。

3 美、欧风洞天平校准加载装置

为了给天平施加校准载荷，测量天平被校准元的信号输出，需要研发天平校准加载装置。国外天平校准加载装置主要有以下三种类型：

1) 单分量人工砝码加载天平校准台。

- 2) 六分量自动天平校准机。
- 3) 单矢量人工砝码加载天平校准台 (SVS)。

单分量人工砝码加载天平校准台是国外较早广泛采用的天平校准装置，美国 NASA 兰利研究中心自 20 世纪 40 年代开始使用这种天平校准台。该校准台主要由水平调整系统、加载头、砝码等机械部件组成。利用该装置能够进行天平各元的逐一校准（即：“OFAT”一次一个变量的方式）和多分量校验。其最大的优点是：构造简单、方法准确、校准精度高。因此，美国 NASA 兰利研究中心认为，单分量人工砝码加载天平校准台是其他类型天平校准装置比较参照的“标准”。尽管单分量人工砝码加载天平校准台优点突出，但其校准过程相当繁琐（对每个校准点，天平轴系相对参考轴系都需要进行水平调整），劳动强度大、校准周期长，校准一台天平大概需要 3 到 4 周时间。此外，近年来国外开始研究基于现代实验设计 (MDOE) 的新校准方法，该装置也无法满足新方法多分量加载校准的要求。

为了克服单分量人工砝码加载天平校准台的缺点，20 世纪 80 年代——90 年代，国外开始研发六分量自动天平校准机，现已得到广泛应用。

如：美国航空航天联盟（Aerospace Testing Alliance）的自动天平校准系统（ABCS）；德国达姆施塔特技术大学（TUD）为欧洲跨声速风洞（ETW）设计的天平校准机；英国皇家航空航天研究院（RAE）的 QinetiQ 天平校准机（BCM）等等。不同的自动天平校准机工作原理不尽相同，但总的来说，自动天平校准机是在模拟人工校准的过程。以 ETW 风洞的天平校准机为例，其工作时是将天平的测量端与参考轴系固联，这样天

平轴系和参考轴系就是同一轴系，因此，每次载荷变动不需要重新进行水平调整；天平校准机具有自动加载机，可以实施多元同时加载，对加载机只要求能够施加稳定的校准载荷，但载荷的大小不需要非常准确，因为，该天平校准机还包含一个载荷测量机，由它准确测量作用在天平上的载荷大小。自动天平校准机在数天或数小时内即可完成一台天平的校准，能够满足基于现代实验设计（MDOE）的新校准方法的要求。

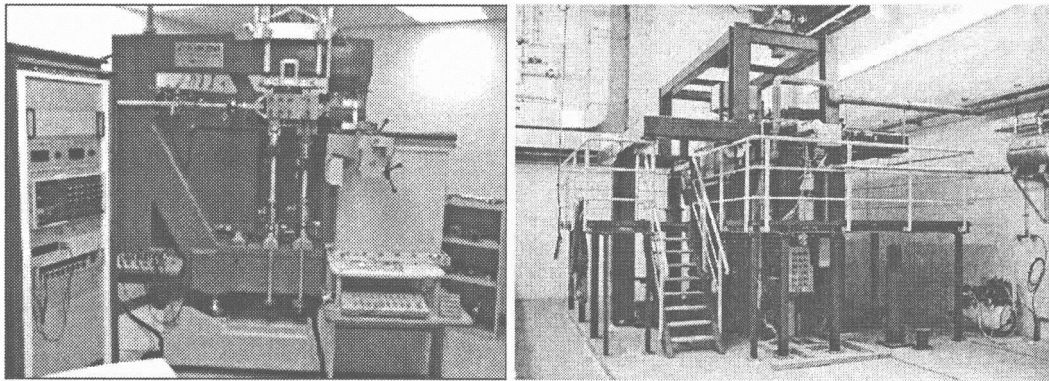


图 1 美国和欧洲的自动天平校准机

美国 NASA 兰利研究中心对以上两种天平校准装置进行过评估，认为其都存在一些缺点。单分量人工砝码加载天平校准台效率低、劳动强度大并且可能产生系统误差的环节多；自动天平校准机机械结构复杂、成本高，不利于广泛使用。此外，这两种天平校准装置的硬件系统都是基于传统的 OFAT 校准要求设计的。为了克服这些缺点，同时强调校准的品质和效率，在 21 世纪初，

NASA 发展了基于 MDOE 校准方法的单矢量人工砝码加载天平校准台。该装置的关键部件包括：一个非测量端定位系统、一个多自由度的力定位系统、一个三轴正交加速度计系统和校准砝码(图 2)。其创新点在于通过单矢量加载，就能获得天平校准轴系中所需的六个校准载荷分量。该校准装置结构简单、系统误差源少，校准精准度和效率高，成本低。

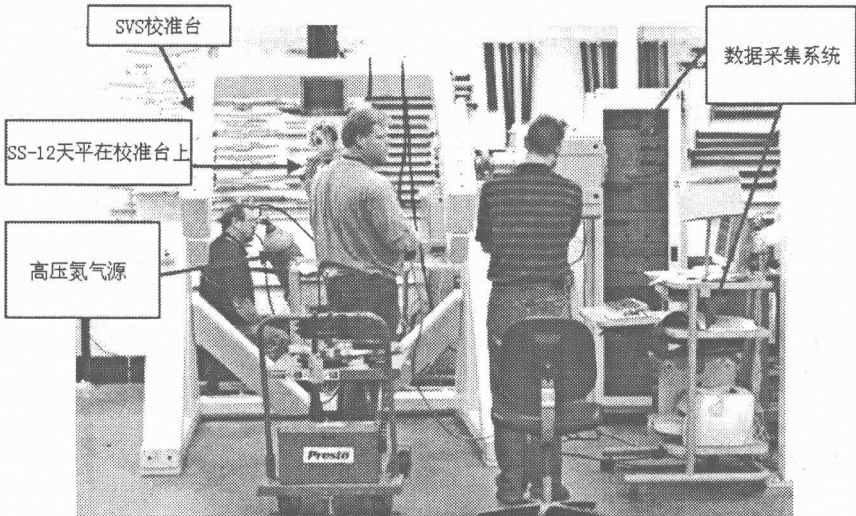


图 2 NASA 单矢量天平校准台

4 风洞天平校准技术研究

从 20 世纪 40 年代开始,风洞天平校准从使用单分量人工加载天平校准台发展到六分量自动天平校准机,逐步形成了当今风洞天平校准普遍采用的硬件装置和逻辑方法。为了满足高性能航空航天飞行器研制对风洞试验精细化提出的更高要求,随着科技的发展,国外对风洞天平校准技术已有新的认识和发展。

4.1 校准装置改进

自动天平校准机自 20 世纪 80 年代—90 年代应用以来,根据使用经验或针对存在的问题,国外进行了升级改进。如德国 TUD 大学在为欧洲跨声速风洞(ETW)设计制造的自动天平校准机基础上,2007 年,为本校风洞设备设计制造了第二代自动天平校准机。该机优化了框架的质量和刚度分布,扩展了校准载荷范围,使校准机内部结构变形最小化。同时,通过采用压力控制器和高品质数据采集系统,简化了校准机的校准载荷发生器系统。通过改进降低了自动天平校准机的制造成本。

NASA 兰利研究中心对单矢量人工砝码加载天平校准台也计划进行进一步的完善工作。如:硬件系统完善包括更高的校准载荷加载范围;自动化方面的完善包括非测量端定位、载荷点定位和校准载荷施加;为研究新校准方法,增加温度和压力干扰因素模拟手段等。

4.2 校准装置不确定度评估研究

天平校准装置中各环节的误差将传导到天平校准结果中,为此,美、欧都开展了对天平校准设备的不确定度评估分析研究工作,确定了各自拥有校准设备的误差源和不确定度。美国 NASA 兰利研究中心的研究认为:在标准的校准应用中,需要自动校准机与简化的人工校准二者相结合,这样校准将更加有效可靠。

4.3 基于 MDOE 的天平校准方法研究

MDOE 是美国 NASA 兰利研究中心为改进航空航天研究的质量和提高了生产率而倡导的一种科

学试验方法,它是实验设计、执行和分析的集成。MDOE 方法已成功运用于兰利中心的许多学科领域,其中包括风洞试验和天平校准。

美国 NASA 兰利研究中心针对其单矢量天平校准台,完成了 MDOE 方法所需的软件和技术研究,发展了二次方和三次方校准实验设计方法。通过新集成的硬件系统和 MDOE 方法应用,优化天平校准过程。

DNW(德/荷风洞联合体)仪器仪表和控制部的科研人员在六分量自动天平校准机上,开展了基于 MDOE 的天平校准方法与传统 OFAT 校准方法的对比研究。在天平校准研究中,用传统 OFAT 方法完成一台六分量天平校准,加载矩阵用了 734 个点;应用 MDOE 方法,加载矩阵点减少到 103 个点,加载按随机和有序两种方式实施。研究结果表明:传统 OFAT 校准需要的加载量是 MDOE 方法的 7 倍;从校准精度看,似乎传统的方法较好,二者差异在天平满量程的 0.01%量级,均满足天平的校准精度要求;校准点和验证点结果比较,MDOE 方法的准确度较好。该研究只是 MDOE 方法在减少校准点数量方面的一个应用例子,在天平校准中还有很多环节可以应用 MDOE 方法,这也是 DNW 后续研究和努力的方向,DNW 的目标是使 MDOE 天平校准方法成为一种成熟可靠的标准天平校准方法。

4.4 校准载荷表研究

校准载荷表的设计直接影响校准的效率和校准的精准度。因此,针对所用的校准设备,构建最有效的校准载荷表是天平校准技术研究的重要内容。近年来,DNW 仪器仪表和控制部开展了这方面的研究,对比分析了三种校准载荷表:一是 OFAT 校准载荷表,即:固定天平其他元载荷,每次只变化一个校准元,其最大的缺点就是需要的加载校准点多,校准天平各元的组合变化多;二是单矢量校准载荷表,这是美国 NASA 兰利中心使用单矢量校准台校准天平所采用的;三是设计优化校准载荷表,这是 DNW 研究的利用计算机自动生成校准载荷表,目的是使校准系数的方差

最小化和使各元载荷共线性最小化，以便获得最大的校准效率和最优的校准精准度。

4.5 其他因素影响下的天平校准方法研究

如前所述，一般天平校准方法（数学模型）都是针对载荷进行的，其他因素的影响，如温度效应，传统做法是对测量桥路进行温度补偿。近年来，NASA 兰利研究中心针对某高超声速风洞特种通气天平，开展了含有温度和压力影响天平校准方法（数学模型）的研究。为此，他们为单矢量校准台增加了给被校准天平加热和模拟通气压力的辅助装置，发展了天平校准方法（数学模型），能够对稳态温度和天平空腔中施加压力影响下的天平进行校准，该方法是天平校准技术的一个新发展。

5 结束语

综上所述，我们可以看出，国外风洞天平校准技术在硬件装置、建模方法等方面都有了新的认识和发展，新的校准技术方法已在风洞天平校准中得到应用，提高了天平校准效率和精准度，降低了校准成本。通过研究分析，我们不难看出，

在风洞天平校准台技术、MDOE 方法应用和考虑其他因素影响下的校准方法研究方面，美国 NASA 兰利研究中心都有创新发展，引领了天平校准技术发展的方向。国外风洞天平校准技术的研究和发展，为我们了解天平校准技术发展走向，拓展视野，提供了很好的借鉴作用。

参考文献

- [1] Keith C. Lynn. Thermal and Pressure Characterization of a Wind Tunnel Force Balance using the Single Vector System. AIAA2011-950
- [2] N. Ulbrich. Combined Load Diagram for a Wind Tunnel Strain-Gage Balance. AIAA2010-4203
- [3] Raymond Bergmann. An experimental comparison of different load tables for balance calibration. AIAA2010-4544
- [4] Klaus Hufnagel. The 2nd Generation Balance Calibration Machine of Darmstadt University of Technology (TUD). AIAA2007-148
- [5] P.A.Parker. A single-Vector Force Calibration Method Featuring the Modern Design of Experiments. AIAA2001-0170

螺旋桨带动力六分量应变天平的研制

薛伟 张德久

(中国空气动力研究与发展中心低速所, 绵阳 622662)

摘 要: 带动力试验需要测量电机带螺旋桨时的气动载荷, 参试天平附加载荷大, 电机会有较大的温度变化, 天平使用环境温差大。给天平研制时带来天平体积限制严格与刚性要求较高的矛盾, 和测量环境较恶劣与测量精度要求高的矛盾。本文提出了一种新型螺旋桨带动力六分量天平, 采用新的元件型式, 运用有限元分析和结构优化方法, 研制成功了用于某型带动力试验的新型天平。通过有限元分析结果和天平校准结果对比表明: 这种新型天平形式能较好地解决带动力试验队天平的安装、使用要求, 为提供可信赖试验数据提供保证。

关键词: 带动力试验 新型天平 有限元分析 结构优化

1 引言

螺旋桨飞机模型到动力风洞试验的目的是为了测量螺旋桨对全机气动特性的影响, 为飞机设计提供可靠的试验数据。螺旋桨对飞机的影响包括直接影响和间接影响。直接影响主要指螺旋桨的拉力和扭矩等所产生的影响, 这部分影响通常可以用理论计算的方法算出来。间接影响是指滑

流影响, 它是飞机升力增大, 下洗变化, 操纵性和稳定性及舵面效率都受到影响。由于飞机和螺旋桨的干扰复杂, 要给出滑流对飞机气动特性影响的可靠数据, 必须进行带螺旋桨飞机模型的风洞试验, 见图 1。此次天平研制的目的是为了开展螺旋桨飞机带动力风洞试验。

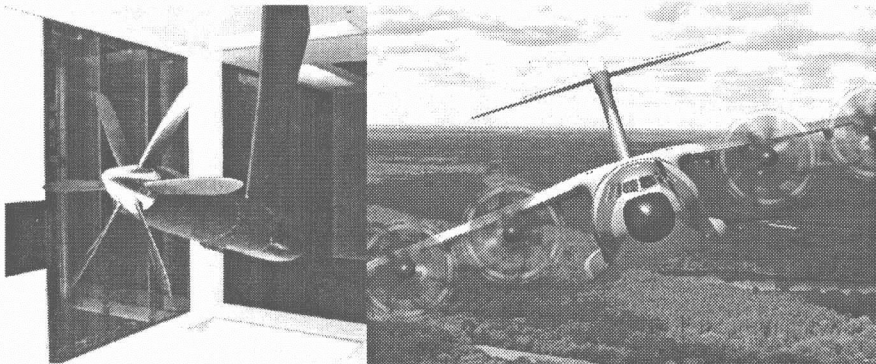


图 1 螺旋桨飞机及单体带动力试验

2 天平设计技术条件

2.1 设计载荷

2.2 外形尺寸

直径×长度: $\phi 85\text{mm} \times 85\text{mm}$ 。

2.3 精准度指标

天平校准精准度满足测力试验要求, 符合 GJB2244-94《风洞应变天平规范》相关标准要求。

表 1 天平设计载荷 单位: N, N·m

Y	X	Mz	Z	My	Mx
300	400	40	300	40	20

2.4 其它要求

天平中间设计电缆线走线空间, 天平体周围预留冷却水管进出空间。天平与电机通过螺钉直接连接, 天平与模型通过连接件连接。

3 天平设计技术难点

3.1 天平设计安装空间狭小

由于模型发动机短舱体积相对较小、电机功率较大，留给天平的空间很小。常规杆式天平方案不能满足安装空间要求，两端连接锥的配合方式也不能满足天平安装长度要求；盒式应变天平也因连接界面的原因而影响了它的通用性，同时要预留电机电缆线和冷却液管道空间使盒式结构形式运用受到局限。

3.2 试验附加载荷大，刚性要求高

电机系统工作时会产生较大的振动及保证电机系统初始安装角，要求天平具有较大的刚性。同时由于电机带螺旋桨系统和天平是串联到支撑系统或模型上的，电机、螺旋桨的附加重量和由于偏心导致的附加力矩会给天平的设计带来附加载荷。

3.3 试验环境较恶劣

带动力试验时电机会有较大的温度变化，天平使用环境温差大，会导致天平在试验过程中由于温度变化过大而产生结构应力，影响天平测试数据的可靠性。

因此要求该天平的研制要解决好两方面的矛盾：一是天平体积限制严格与刚性要求较高的矛盾，二是测量环境（主要是考虑到电机热量可能

外传和电机/螺旋桨可能产生较强的振动）较恶劣与测量精度要求高的矛盾。

4 天平设计

4.1 天平设计方案

为解决上述矛盾采取的主要措施是：一是采用整体结构天平，解决了小尺寸空间布局天平结构型式，消除了由机械装配间隙和应力带来的天平性能长期稳定性不足问题；二是对称布局测量元件形式，减小和消除温度变化带来的结构应力对天平信号的影响；三是创新设计天平形式，解决小尺寸空间布局六分量和满足试验特殊要求。

天平设计为四柱梁与两端固定梁组合结构形式。四柱梁测量 Y 向和 Z 向载荷和滚转力矩载荷，两端固定梁测量 X 向载荷、俯仰力矩和偏航力矩载荷。两端固定应变梁设计采用等强度梁形式，能有效避免应力集中和应力变化梯度过大的问题，便于应变计粘贴和测量。采用柱销定位、端面螺钉连接，确保安装准确可靠。天平结构如图 2 所示。天平中部设计直径 23mm 通孔，安装导线套管，方便电机动力线缆走线，天平预留电机冷却水管通行开槽两处，天平体中间设计预留信号线走线槽，中部安装保护罩保护应变计、测量元件及导线安全。

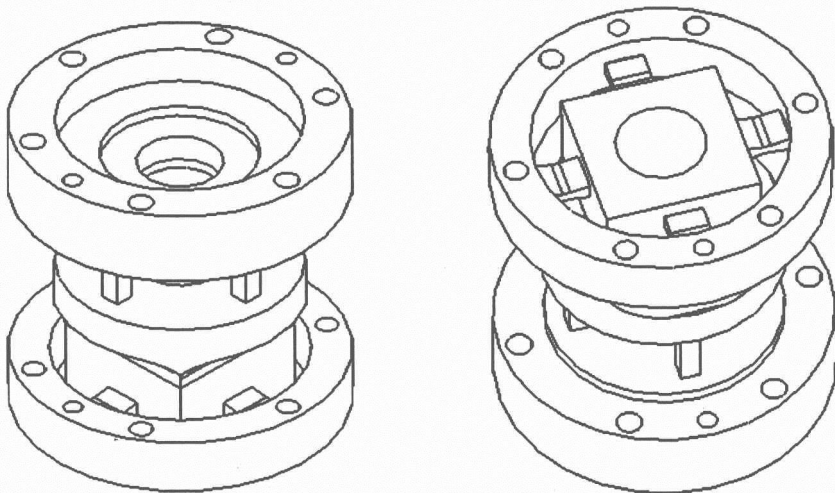


图 2 天平结构简图