

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.05.09

全自动风洞天平校准台测控系统的设计与研究

杜云龙¹, 陈超¹, 苗磊²

(1. 郑州机械研究所, 河南 郑州 450052; 2. 中国空气动力研究与发展中心校准测试实验室, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为提高风洞天平校准的自动化程度, 设计了一套基于伺服电动缸加载的全自动天平校准台测控系统。该系统用电动缸加载取代传统的砝码加载, 具有大载荷、高准确度、自动加载、自动复位的功能。经过测试, 该系统可以对风洞天平进行高效率、高准确度的校准。

关键词: 天平校准; 自动加载; 高准确度; 控制方法

中图分类号: TB93; TH82

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)05-0040-4

Design and Research on Controlling System for Balance Calibration

DU Yunlong¹, CHEN Chao¹, MIAO Lei²

(1. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450052, China;

2. CARDC Calibration and Testing Laboratory, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to enhance the automatic level for wind tunnel balance calibration, a set of measuring and controlling system based on loading by electric cylinder is designed. The system is loaded by electric cylinder instead of poise, and has functions of large loading scale, high precision, automatic loading, and automatic resetting. It is proved by test that the system can calibrate wind tunnel balance more effectively and precisely.

Key words: balance calibration; automatic loading; high precision; control method

0 引言

在风洞试验中, 风洞天平对作用在模型上的气动载荷测量结果的不确定度取决于天平本身的测量不确定度, 而天平本身的测量不确定度则取决于天平校准系统的性能^[1]。因此, 国内外的空气动力试验都十分重视风洞天平校准设备的研制工作^[2]。近年来, 研制工作的重点是实现风洞天平校准的大载荷、高准确度和自动化。

全自动天平校准台是一座六自由度全自动体轴系天平校准系统, 整个校准系统由主体支撑架、六自由度自动复位机构、天平变形测量装置、天平校准自动施力机构、天平校准加载头设备、数据采集六部分组成。

本文对该校准系统中六自由度自动复位机构、天平变形测量装置、自动施力机构的总体技术要求和关键技术环节进行了研究, 并实现最终的自动加载控制和自动复位控制。

1 系统组成

1.1 天平校准台构成

被校天平通过刚性支杆安装在六自由度复位机构上, 加载头安装在被校天平的模型端, 加载系统通过加载头对被校天平施加校准载荷^[3]。在校准载荷作用下, 加载头产生空间位置变化, 安装在加载头正前方的天平变形测量装置将加载头的空间位置采集到控制系统中。六自由度复位机构根据采集到的加载头的空间位置变化做出相应调整, 使加载头恢复到加载前的初始位置。天平加载和复位完成以后, 数据采集系统对天平信号进行采集和记录, 即完成一次载荷改变的体轴系加载校准过程。系统构成见图 1。

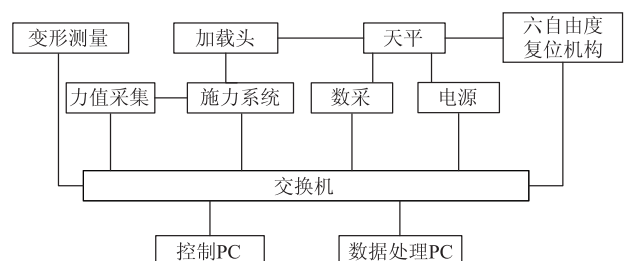


图 1 系统构成图

收稿日期: 2015-06-07

作者简介: 杜云龙(1981-), 男, 河南郑州人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事非标测控系统的设计研究工作。

1.2 天平变形测量装置

变形测量装置由六个激光位移传感器组成,为非接触式测量^[4]。激光位移传感器的测量距离及精度见表1。激光位移传感器的分布位置如图2所示,其中传感器X1, X2, X3用来测量加载头水平X方向位移变化, Y1, Y2用来测量铅垂Y方向位移变化, Z1用来测量侧向位移变化,通过激光位移传感器的组合构成六自由度空间位移测量系统^[5]。

表1 激光位移传感器数据

范围/mm	近距/mm	中心距/mm	误差/ μm	刷新速度/kHz
20	40	50	1	2, 5

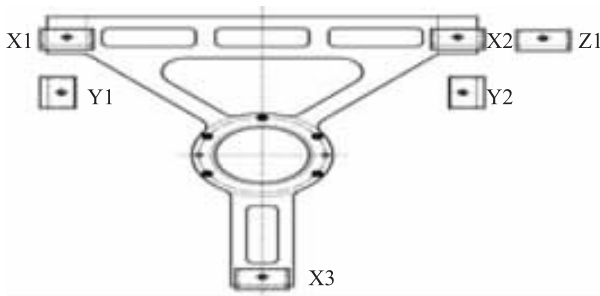


图2 天平变形测量装置

1.3 六自由度复位机构

六自由度复位机构共由六套交流伺服装置和限位保护电路组成,对应完成六个自由度(即 α , β , γ , X, Y, Z轴)复位调整机构的精确定位驱动^[6]。伺服驱动器标配EatherCAT接口模块,控制电路接口简单,伺服性能好,驱动平稳且响应快,伺服电机位置编码器具有24位绝对值计数和高分辨力的特点,因此可以达到复位速度快,准确度高的设计要求^[7]。

1.4 自动施力机构

自动施力机构共由八套交流伺服电动缸驱动装置和限位保护电路、测力传感器电路组成,用来实现X向、Z向和Y向的力及力矩的加载。

伺服电动缸通过弹簧加载器进行施力加载,为了实现力值的精确控制,驱动电机选用交流伺服电机,每套施力装置上配有一套高精度拉力传感器,用来测量施力力值的大小并反馈给电机控制器,控制伺服电机使加载力值逼近设定力值。

测控系统原理结构图见图3。

2 控制方案

2.1 六自由度复位方案

六自由度复位机构由三个线位移复位机构和三个

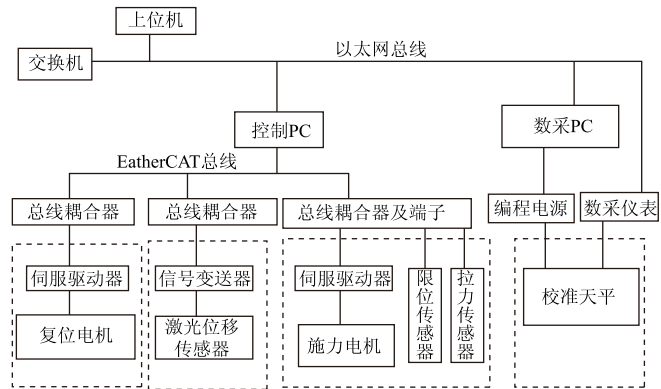


图3 测控系统原理图

角位移复位机构及天平变形测量装置组成。

天平校准台基础安装时,将加载头的初始位置标记到激光位移传感器中,作为激光位移传感器的测量零点。在天平校准过程中,由于天平受力产生形变,对应的激光位移传感器将位移变化量采集并上传到控制计算机中,计算机计算出加载头在各个方向产生的位移变化量,计算如下

$$X = 0.5(X_1 + X_2)$$

$$Y = 0.5(Y_1 + Y_2)$$

$$Z = Z_1$$

$$\alpha = \arctan((0.5(X_1 + X_2) - X_3)/L_1)$$

$$\beta = \arctan((X_2 - X_1)/L_1)$$

$$\gamma = \arctan((Y_2 - Y_1)/L_2)$$

式中: $X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_2, Z_1$ 为激光位移传感器的测量数据; L_1 为传感器X1, X2安装位置水平方向的间距; L_2 为传感器Y1, Y2安装位置水平方向的间距。

将得到的位移数据通过控制计算机赋值到复位机构伺服电机中,伺服电机分别向相应方向运动,对加载头的空间位置做出调整。在调整过程中,激光位移传感器实时采集加载头当前的位置数据,直到与之前保存的初始位置值(即测量零点)的差值在误差允许范围内,则复位结束。

2.2 自动施力控制方案

自动施力机构由伺服电动缸产生拉力,经过弹簧、拉力传感器、弹性铰接头、再通过滑轮换向,在较远的距离将力施加到加载头上。由于电动缸很小位移就会产生较大的拉力变化,灵敏度不高,因此采用弹簧调节,弹簧刚度较小,可以在较大的行程下调整加载力,提高施力的灵敏度。

施力加载时,伺服电动缸按设定速度运行,产生拉力,由拉力传感器将拉力值采集到控制计算机中,与设定拉力值进行比较,控制伺服电动缸做出调整,

按一定的控制算法逐步逼近设定力值，最终完成加载。

选用高准确度的伺服电机，电机的定位分辨力可以达到微米级，通过弹簧产生的拉力最小可以精确到克，在大载荷的校准情况下，可以实现快速精确的加载，替代传统的砝码加载需要人工搬运带来的不便，并且可以极大的提高校准系统的量程。

3 关键技术与分析

测控系统的关键技术在于电动缸施力的精确加载，以及加载头的精确复位。升力的加载复位过程，如图4所示。

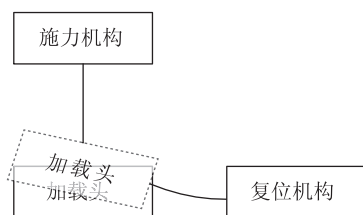


图4 升力加载复位示意图

施力机构伺服电机运行，施加连续载荷，天平产生变形，加载头空间位置发生变化，天平变形测量装置将加载头的空间位置变化数据发送到控制计算机中，计算机按设定程序计算调整数据并控制复位机构伺服电机进行复位。由于施力机构和复位机构同时作用到加载头上，因此在施力过程中，复位必然会导致加载力值的不规则变化，甚至引起振荡，不能收敛，如果加载完成后进行复位，则会导致加载力值不准确，达不到校准天平的力值准确度。可见在该系统中，力值加载与加载头复位之间存在矛盾关系。

在理想状况下，假设力值加载速度很慢，则天平的变形非常缓慢，而加载头的复位速度非常快，可以认为在加载过程中，天平一直处于复位状态，直到力值加载完成。因此，要解决好力值加载与加载头复位之间存在的矛盾关系，需要协调力值加载与加载头复位的运行速度，保证在力值加载的过程中，加载头产生尽量小的变形。据此设计了一套控制算法，其流程图如图5所示。

启动加载后，先判断当前力值（拉力传感器反馈值）与设定力值的差值，如果当前力值小于设定力值的95%，启动快速加载、快速复位模式。在快速加载、快速复位模式下，施力机构和复位机构同时运行，如果加载头位移差值大于复位限定值，则先停止当前的加载任务，单独进行复位，复位结束后继续保持快速

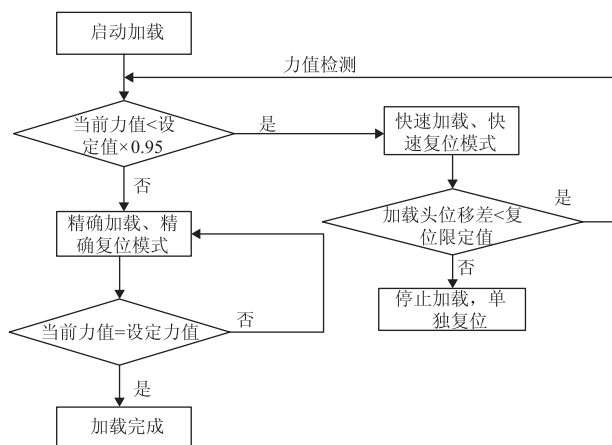


图5 加载复位流程图

加载状态，直到当前力值达到设定力值的95%。在快速加载模式下，施力机构速度最快可以达到2 kg/s，在每次加载100 kg的情况下，可以在1 min以内完成力值95%的加载量。

当前力值达到设定力值的95%之后，进入精确加载、精确复位模式。在此模式下，尽可能的减小施力机构和复位机构运行的加速度，以减少机构加减速对系统带来的冲击。重新设置施力机构和复位机构的运行速度，速度的计算公式为 $v_1 = v_0 \cdot \Delta F / F$ ，其中， v_1 为当前速度计算值， v_0 为快速模式运行速度， ΔF 为力值差值， F 为设定力值。从速度计算式可见，当前力值与设定力值的逼近过程中，随着力值差值不断减小，则机构运行速度不断减小。施力机构施加载荷的速度最小可以达到5 g/s，复位机构速度最小可以达到1 $\mu\text{m/s}$ ，在每次加载100 kg的情况下，力值相对误差小于0.005%。复位机构优先于施力机构运行，保证施力的过程中，加载头一直处于复位状态，直到当前力值在误差允许范围内达到设定力值，则一次加载完成。

该系统已研制成功，并在某风洞投入使用。其中， v_0 是在系统调试过程中通过不断的加载复位优化获得。针对不同的力值量级， v_0 做出相应调整，即可实现力值的快速、精确加载以及加载头的平稳复位。

4 结论

本文概述了一套基于伺服电动缸加载的全自动天平校准台的测控系统，该系统是天平校准台中最重要的部分，也在整个天平校准系统中起到关键的作用。电动缸加载取代了传统的砝码加载，可以使加载载荷排布更为合理，加载项更多元化，从而获得更为精确的天平力值计算公式；另外，自动化的加载和复位可以大大减少人工的参与，有利于获得更精准的天平计算数据。该系统

的成功预示着天平校准将向一个自动化程度更高、校准载荷更大及校准数据更准确的方向发展^[8]。

参 考 文 献

[1] 王朝安. 一个全自动的风洞天平校准系统[J]. 流体力学与实验测量, 1998, 12(1): 93-95.
 [2] 贺德馨. 风洞天平[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
 [3] 李珺. 六分量风洞天平校准系统的设计[D]. 成都: 四川大学, 2003.
 [4] 李珺, 姚进, 任违. 天平校准系统中位置姿态非接触式测

量与计算方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003, 5(3): 90-92.
 [5] 孙长库, 周富强. 六自由度测试系统[J]. 仪器仪表学报, 1998, 8(4): 362-365.
 [6] 蒋博. 风洞天平校准架自动复位测控系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
 [7] 吴薇. 天平校准架复位控制系统设计[J]. 中国科技信息, 2013(9): 100-102.
 [8] 罗天保, 王作全, 沈景鹏, 等. 基于过程控制的风洞天平校准技术研究[J]. 中国测试, 2012, 7(4): 29-31.

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、华东地区优秀期刊。2015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, 85878148, 85878224
 E-mail: anameter@126.com 网址: www.cam1992.com

《化学分析计量》2015年第5期目次

标准物质

N-乙酰基神经氨酸标准物质的研制

总α放射性标准源的制备

分析测试

反应池-两步同位素稀释质谱法测定血清总钙

HPLC法分离工业品辛基二茂铁

高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用法测定海水中的烷基汞

电感耦合等离子体质谱法测定碳化硼中的硼同位素丰度

手工内磁选-重铬酸钾滴定法测定铜磁铁矿中磁性铁含量

尿素包合法分离分析月见草油的脂肪酸组成包含参数的优化

正交试验优化石墨炉原子吸收光谱法测定海水中的总铬

三价铬对COD测定中Cl-干扰的抑制...

ε型六硝基六氮杂伍兹烷的结构确证

ICP-OES法测定绿茶中7种重金属元素的溶出量

固相萃取-气相色谱法测定甘草中的六六六、滴滴涕含量

电热消解-电感耦合等离子体质谱法测定动物性食品中16种稀土元素

石墨消解石墨炉原子吸收光谱法测定地沟油中的镍、铅

蒸发光散射高效液相色谱法测定黄芪饮片中的黄芪甲苷含量

SERS纳米银基底制备及其在汽油中噻吩硫测定中的应用

毛细管气相色谱法同时检测工作场所空气中三氯乙烯和四氯乙烯

液相色谱-质谱法测定血清中左乙拉西坦含量

GC-MS-MS法测定洗发水和沐浴露中二噁烷

ICP-AES法测定黄瓜中的8种元素

计量管理

环境监测理化分析设备的期间核查

气相色谱仪性能验证方法的建立及应用

用质量控制图监控饮用水高锰酸盐指数检测质量

仪器设备

磷酸根分析仪校准方法

气相色谱-质谱联用仪校准常见问题及解决方法

Hydra II C测汞仪的日常维护及故障排除

发射光谱仪检定规程中存在问题的探讨

综述

液相色谱-质谱联用技术在水产品兽药残留检测中的应用