

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108990

热力耦合作用下的风洞应变天平校准技术

苗 磊, 马 涛, 徐志伟, 谢 斌, 周米文

(中国空气动力研究与发展中心高速空气动力研究所 绵阳 621000)

摘 要:为研究温度对风洞应变天平测量的影响,以热力耦合作用下的天平校准技术为着力点,通过响应面实验设计方法确立热力耦合加载矩阵,基于六自由度校准系统及构建的温度环境对一台六分量风洞应变天平实施热力耦合加载,采用多元回归方法建立了包含温度、力、力矩参数的天平公式,最后利用验证载荷检验天平公式的准确性,检验结果显示:温度及力/力矩载荷作用下,天平各分量的综合加载误差优于 0.3%;天平公式能准确表征天平在热力耦合作用下的综合性能。研究表明,热力耦合作用下的风洞应变天平校准技术能够用于评定及修正温度对天平测量的影响。

关键词:风洞应变天平;热力耦合;校准;响应面实验设计方法;多元回归方法

中图分类号: TH-3 TN06 V211.74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

The calibration technology of wind tunnel strain-gage balance under the action of thermo-mechanical coupling

Miao Lei, Ma Tao, Xu Zhiwei, Xie Bin, Zhou Miwen

(High Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract:To study the influence of temperature on the measurement of wind tunnel strain-gage balance, the calibration technology under the action of thermo-mechanical coupling is taken as the focus of the research. The thermo-mechanical coupling loading matrix is established through the response surface experimental design method. The thermo-mechanical coupling loading is implemented on a six components wind tunnel strain-gage balance based on the six-degree of freedom calibration system and the constructed temperature environment. The balance formula including temperature, force and moment parameters is established by the multivariate regression method. Finally, the verification load is used to test the accuracy of the balance formula. Results show that the comprehensive loading error of each component of the balance is better than 0.3% under the action of temperature, force and moment load. The balance formula can accurately characterize the comprehensive performance of the balance under the action of thermo-mechanical coupling. Results show that the calibration technology of wind tunnel strain-gage balance under the action of thermo-mechanical coupling can be used to evaluate and correct the influence of temperature on balance measurement.

Keywords:wind tunnel strain-gage balance; thermo-mechanical coupling; calibration; response surface experimental design method; multivariate regression method

0 引 言

风洞天平是直接测量作用于试验模型上气动载荷的高精度测量装置。为准确表征风洞天平性能,通常对其进行静态校准以获取工作公式。天平静态校准是指利用校准装置按照一定的校准方法建立天平各分量输出电信号(因变量)与施加载荷(自变量)间相对关系的过程。一台常规六分量风洞天平静态校准的自变量包括 3 个力

载荷以及 3 个力矩载荷,因变量是天平的 6 个惠斯通电桥输出信号值。为获取表征天平(或力传感器)性能的准确公式,国内外学者从校准方法、校准不确定度评估、校准与使用一致性等多个方面开展了研究。

刘志勇等^[1]基于六自由度校准系统运用拉丁超立方设计方法构建天平加载矩阵同时采用 Kriging 代模型作为天平公式,与传统的一次一因素(one factor at a time, OFAT)方法相比,两者的校准结果相当但新方法的加载点数更少。车兵辉等^[2]应用回归算法和典型的 3 层前馈

(back propagation, BP)神经网络算法对六分量天平的校准数据进行分析,得出神经网络算法可将拟合精度平均提高67%的结论。苗磊等^[3]研究了风洞天平静态校准与使用状态一致性问题,通过有限元分析与实验证明了风洞天平静态校准与使用状态不一致将导致天平公式中的干扰系数发生改变。刘春风等^[4]建立了一套完整的天平校准不确定度评估流程,以BCS-100天平校准系统为例验证了评估方法的准确性。罗天保等^[5]在风洞天平校准中应用过程控制方法确保了校准过程受控,提高了校准数据质量和工作效率。战培国^[6]研究了美国航空航天协会AIAA的《风洞试验内式应变天平校准和使用》,阐述了该天平校准标准对我国天平技术发展的启示,为国内风洞天平技术的创新发展提供参考。姚建涛等^[7]建立了超静定六维力传感器的静态测量模型,提出了静态标定方法,为超静定结构的六维力传感器标定研究奠定了理论和实验基础。蔡大军等^[8]利用最小二乘法和BP神经网络算法对一台六维力传感器的加载实验数据进行分析,结果表明BP神经网络算法明显优于最小二乘法,最后通过数据随机分组测试了研究结果的正确性。

美国航空航天协会AIAA^[9]从天平校准载荷表设计、加载装置重量修正及校准数据处理等多个方面开展了深入研究。Keith等^[10]在天平校准研究中采用51项多项式模型对1台五分量天平的校准数据进行分析处理,校准数据包含了温度和压力的影响。Ulbrich等^[11]开发了天平校准数据分析软件,可对天平的每个分量建立含不同阶次的多项式模型。Richard等^[12]比较了天平校准模型的两种建立方法。Carrie等^[13]介绍了采用试验设计方法进行天平校准的情况。Philipsen等^[14]基于校准设备对应变天平的校准程序进行了比较研究。

综上所述,在风洞天平校准技术研究方面,国内学者还未将温度作为影响因子纳入研究范畴,国外在该领域的研究已取得一定进展,但局限于五分量天平。为研究温度对天平测量的影响以及热力耦合作用下的天平性能,本文以一台应变计温度性能匹配良好的六分量风洞应变天平为对象,开展温度与载荷耦合作用下的风洞应变天平校准技术研究。文中详细介绍了温度载荷与校准载荷表的实现、校准数据分析及校准结果验证。

1 理论分析

温度是风洞试验的一个重要参数,在压、跨声速风洞试验中,温度对天平测量数据的影响较小可以忽略,但在马赫数较高的超声速风洞试验及高低温、连续式风洞试验中,温度对天平测量数据的影响较大不可忽略。解决

温度对天平测量数据影响的通常做法是温度补偿^[15-17],将天平沉浸式放置于实验箱后,对实验箱中的空气进行加热或冷却以达到间接控制天平体温度的目的,观察天平各分量电桥信号随温度变化的规律,对试验温度范围内某分量的电桥信号变化值与对应分量量程载荷作用下的电桥信号输出值之比大于0.3%的开展补偿,在惠斯通电桥中串联对温度敏感的电阻,通过调整电阻的串联位置及阻值大小来减小温度对天平测量的影响。该方法能否解决温度对天平测量的影响需要进一步讨论,首先,温度导致天平电桥输出信号改变有两种原因:1)惠斯通电桥自身对温度较为敏感,容易随温度变化产生输出信号;2)天平体各部分温度分布不均使结构产生不一致的变形,打破原惠斯通电桥平衡后产生输出信号。温度实验箱中的天平表现出的温度特性是两者共同作用的结果。目前使用的应变计都具有一定的温度自补偿能力,且通过应变计温度性能匹配技术能大幅降低惠斯通电桥自身的温度效应影响,因此温度导致的天平输出信号主要由第2种原因引起。天平体各部分的温度分布规律与其受热过程密不可分,温度实验箱提供的均匀温度场使天平体与周围空气通过强制对流的受热方式与试验过程中天平体的受热方式存在较大差异,这将严重影响温度补偿效果。其次,温度与气动载荷的耦合作用对天平测量数据的影响无法通过温度补偿解决。

1.1 天平校准温度的确定

天平校准状态与其使用状态应最大程度保持一致,如何确定试验中天平体上的温度以及温度分布规律以用于天平校准成为天平校准前需要解决的首要问题。方式1是直接测量,在天平体的关键位置布置温度传感器适时测量试验过程中天平体的温度值;方式2是数值计算,通过计算软件获得天平体的温度值。通过方式1获取天平体温度及分布规律再用于天平带温度校准的成本较高,但获得的温度值及分布规律较为准确;通过方式2获取天平体温度及分布规律再用于天平带温度校准的成本较低,获得的温度分布规律较为准确,但温度不够准确。对于温度作用下的天平校准而言,天平体上温度分布规律的准确性更加重要,它影响天平结构的变形方式,这是温度对天平测量产生影响的根本原因,本研究侧重于探索一种热力耦合作用下的天平静态校准方法,因此将数值计算获得的天平体温度及温度分布规律作为天平校准的温度输入值,对计算所得温度值的准确性不作关注。表1所示为某模型系统数值计算条件,图1所示为模型及其支撑系统表面的温度场计算结果,从图中可以看出:模型头部和天平支撑系统表面的温度最高;沿模型轴向方向,天平支撑系统同一截面的表面温度基本一致。数值计算的温度场结果将用于指导热力耦合作用下天平校准的温度场构建。

表1 数值计算条件

Table 1 The condition of fluid calculation

总压/kPa	总温/K	速度/(m·s ⁻¹)
180	300	517

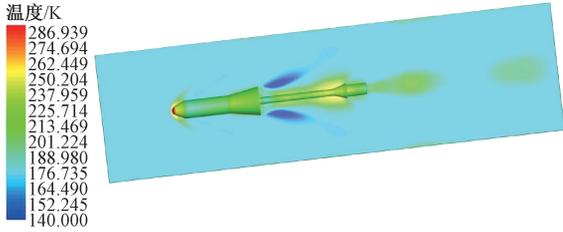


图1 流体计算结果

Fig. 1 Fluid calculation results

风洞试验产生的热量主要以热传导、热对流和热辐射方式在试验模型、天平 and 天平支撑系统之间传递。气流将试验模型、天平支撑系统加热或冷却,同时能量以热传导及热辐射方式从试验模型传递至天平体,以热传导方式从支撑系统传递至天平体。高温风洞试验中,为降低温度对天平测量的影响,通常在天平体与试验模型之间增加隔热装置用以减小热量以辐射方式从模型内表面传递到天平体上,同时减小热量通过模型与天平间的连接锥面进行热传导,这类试验中,天平体上不同位置温度差异的产生主要与支撑系统一端有较大热量输入有关。热力耦合作用下的天平校准温度通过模拟天平在高温风洞中的试验状态确定,即通过构建热量从天平支撑系统一端热传导至天平体的温度场来实现。

1.2 热力耦合作用下的天平校准原理

热力耦合作用下的天平校准与常规天平校准的相同之处是:对天平某单独分量或多个分量施加标准载荷,同时采集天平各分量电桥输出信号,最后通过数据处理方法获得自变量(载荷)与因变量(电信号)之间的关系公式。不同之处在于:热力耦合作用下的天平校准增加了温度这一自变量,且温度对天平的测量准确度存在影响。因此,热力耦合作用下的天平校准原理可概括为:通过一定方法构造与天平实际使用状态基本一致的温度环境,利用校准系统对被校准天平实施加载并采集天平各分量电桥输出信号,最后通过数学方法处理所得数据获得表征天平性能的工作公式。

1.3 热力耦合作用下的天平加载矩阵设计

加载矩阵设计在天平校准过程中发挥重要作用。科学、优化的加载矩阵设计能缩短校准周期并能减小公式拟合偏差。热力耦合作用下的风洞应变天平加载矩阵包括3个力载荷、3个力矩载荷以及1个温度载荷。相对与力/力矩载荷而言,在一定时间内将温度保持在某一恒定

值往往需要付出昂贵代价,因此,加载矩阵设计的重点是解决效率与质量问题,也就是通过较小的样本数量产生高质量的天平工作公式。

一台六分量天平按 OFAT 方法产生的加载矩阵通常包含大约 400 个数据点,当增加温度参数作为天平校准的自变量时,校准输入量由 6 维变为 7 维,加载矩阵中的样本点数将大幅增加。校准过程中,要使天平体温度长时间保持在某一恒定值其难度更大。因此,OFAT 方法不适用于热力耦合作用下的天平校准。常用的全因子设计^[18]要求所有因子全部水平的所有组合都至少进行一次实验,它能够估计所有的主效应和交互效应,但同样存在加载矩阵规模大的困难。响应面实验设计^[19-20]的中心复合设计(central composite design, CCD)、Box-Behnken 设计(Box-Behnken design, BBD)方法已被成功应用于不含温度的天平校准并取得了较好效果,这两种方法的特点是校准矩阵规模小,如图 2 所示 CCD 设计过程中其轴向会超出原定水平,如图 3 所示 BBD 方法的所有加载点都在原定水平内,BBD 方法产生的校准点数更少,但两种方法拟合的模型精度相当。结合校准过程中长时间保持温度恒定的难度较大这个实际情况,本研究采用 BBD 方法设计热力耦合作用下的天平加载矩阵。

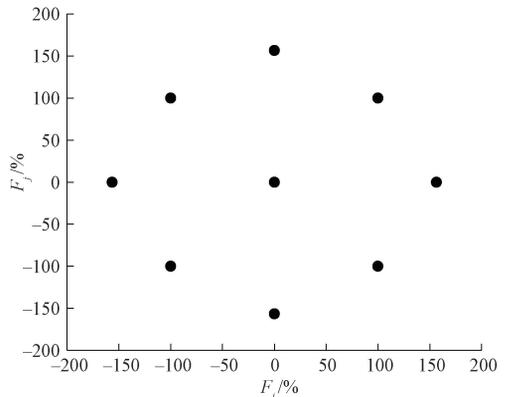


图2 CCD 散点图

Fig. 2 CCD scatter diagram

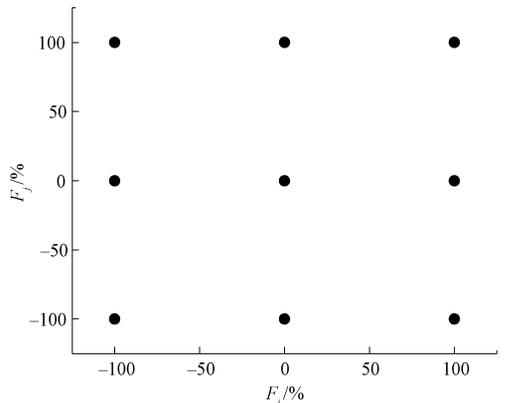


图3 BBD 散点图

Fig. 3 BBD scatter diagram

2 实验

2.1 实验条件

1) 天平及测温装置

热力耦合作用下的天平校准技术研究采用一台典型六分量(含3个力和3个力矩)风洞应变天平如图4所示,表2所示为该天平的设计载荷及最大输出电压。研究实施过程中,采用热电阻(PT100)测量天平体温度,图5所示为热电阻在天平上的敷设位置。

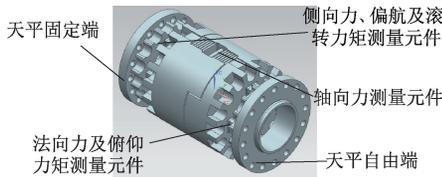


图4 天平三维结构

Fig. 4 3D structure of balance

表2 天平基本信息

Table 2 Basic information of balance

基本信息	Y	Mz	X	Mx	Z	My
设计载荷(N, N·m)	600	90	800	60	600	72
最大输出(mV/V)	0.67	1.87	0.31	0.28	0.68	1.39

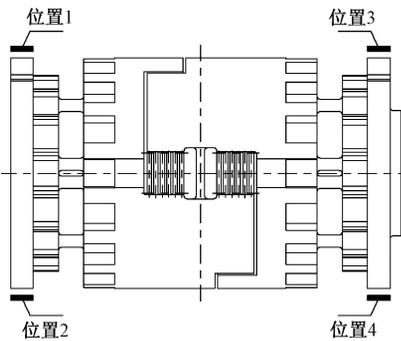


图5 热电阻的布置

Fig. 5 Layout of thermal resistance

2) 校准装置

校准装置用于被校准的天平的安装、标准载荷的施加、校准过程中天平姿态的检测及调整。如图6所示,本研究采用的校准装置具有六自由度运动及复位功能,能同时对被校准天平的6个分量施加标准载荷(M1级砝码)。



图6 校准装置

Fig. 6 Calibration device

2.2 实验方法

1) 天平校准温度的实现

为构建天平支撑装置表面温度场,在其表面敷设PI电热膜加热天平支撑装置局部表面如图7所示,产生的热量以热传导方式转移至天平体。采用图5中4个PT100热电阻测量天平体上不同位置处的温度值,以位置1、3两处温度差值作为热力耦合作用下天平校准的温度输入。天平体及天平支撑装置的初始温度均为23℃,位置1、3两处的温度差值为0,热量不断从PI电热膜处传导至天平体,位置1、3处的温度差值逐步增加,设定温度差值上限为40℃。图8所示为电热膜加热作用下天平体位置1~4处的温度变化。

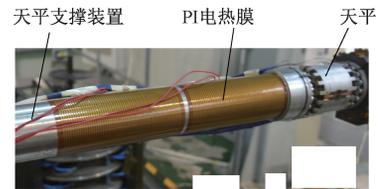


图7 电热膜的布置

Fig. 7 Layout of electro thermal membrane

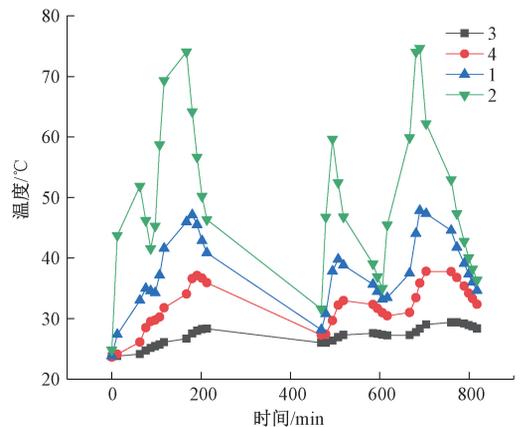


图8 天平体不同位置的温度变化

Fig. 8 Temperature changes at different positions of the balance body

2) 热力耦合作用下的天平加载矩阵设计

被校准天平的输入参数(自变量)信息如表3所示。依据BBD方法产生的加载矩阵包含78个加载点,含中心点11个。图9是被校准天平Y/Z分量的校准载荷散点图。

表 3 天平自变量信息

Table 3 Independent variable information of balance

力/N			力矩/(N·m)			温度/℃
Y	Z	X	Mz	Mx	My	T
±600	±600	0~8 000	±90	±60	±72	0~40

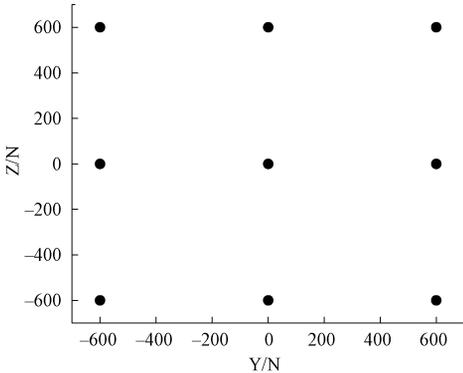


图 9 校准载荷散点图

Fig. 9 Scatter diagram of the calibration load

3) 热力耦合作用下天平校准数据分析

(1) 校准模型

天平校准研究中通常采用回归模型,对于常规六分量天平来讲二阶回归模型(如式(1)所示)已足够表征其性能。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^6 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=i+1}^6 \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^6 \beta_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

其中, y 表示天平的第 i 个因变量, x_i 表示天平的第 i 个自变量, β 表示采用最小二乘法获得的天平校准系数。

基于温度对天平输出以及温度与载荷及载荷平方项的交互作用对天平输出的线性影响,在式(1)基础上增加温度影响量形成表征天平性能回归模型如式(2)所示。

$$Y = \beta_r T + \sum_{i=1}^6 \beta_i F_i + \sum_{i=1}^6 \beta_{ii} F_i^2 + \sum_{i=1}^6 \beta_i^T T F_i + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=i+1}^6 \beta_{ij} F_i F_j + \sum_{i=1}^6 \beta_{ii}^T T F_i^2 \quad (2)$$

其中, Y 表示天平的第 i 个因变量, T 表示天平体前后温度差, F_i 表示天平的第 i 个自变量, β 表示天平校准系数。式(2)可以表示为矩阵形式:

$$Y_1 = \mathbf{X} \mathbf{B} \quad (3)$$

其中, Y_1 表示天平校准矩阵中所有载荷点对应的电信号输出值, \mathbf{X} 表示校准矩阵, \mathbf{B} 表示校准系数矩阵。

校准模型确定后,对校准数据质量进行判断,包括:数据独立性、数据多重共线性、数据异常值、数据残差分布,上述判断内容基于统计产品与服务解决方案(statistical product and service solutions, SPSS)软件开展。其中,数据独立性判断通过 SPSS 软件输出结果模型汇总表中的 Durbin-Watson 检验完成,其值越接近 2 说明数据的独立性越好,表 4 所示为天平 Y 分量数据检验结果。数据多重共线性诊断用方差膨胀因子^[21-22](variance inflation factor, VIF)值衡量,如果该值大于 10 说明数据存在多重共线性,表 5 所示为 Y 分量校准数据的 VIF 值。数据异常值判断通过标准化残差、学生化删除残差、强杠杆点和强影响点判定,当标准化残差和学生化删除残差处于区间 $[-3, 3]$, 杠杆值小于 0.2, 强影响点(cook 距离)小于 1 时,数据不存在异常值。图 10~13 分别为 Y 分量数据标准化残差、学生化删除残差、杠杆值和 cook 距离。图 14 所示为 Y 分量数据的正态曲线柱状图,图中均值 2.33×10^{-14} 非常小接近 0, 标准偏差 0.919 接近 1, 图 15 所示为 Y 分量数据标准化残差 Q-Q 图,各数据点近对角线分布。天平各分量数据的判断结果表明,热力耦合作用下的天平校准数据能够用于多元回归分析。

表 4 Y 分量数据 Durbin-Watson 检验结果

Table 4 The check results of Durbin-Watson for Y-component data

R	R ²	调整 R ²	标准估计的 误差	更改统计量					Durbin-Watson
				R ² 更改	F 更改	df1	df2	Sig. F 更改	
1.00	1.00	1.00	0.006 09	0	5.922	1	65	0.018	1.676

(2) 校准模型检验

校准模型回归系数可通过式(3)反推获得。获得回归系数矩阵后,需对回归系数的拟合度、回归方程的显著性及回归系数的显著性进行检验,以获得最优回归系数矩阵。在多元回归中,样本决定系数 R^2 定义为:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (4)$$

其中,总离差平方和^[23](sum of squares for total

deviations, SST), 回归平方和(sum of Squares for Regression, SSR), 残差平方和(sum of squares for errors, SSE)。

样本决定系数 R^2 取值在 $[0, 1]$ 区间内, R^2 越接近 1, 表明回归拟合的效果越好; R^2 越接近 0, 表明回归拟合的效果越差。表 6 所示为 Y 分量回归系数的拟合度。

表5 Y分量数据方差膨胀因子值

Table 5 The VIF values for Y-component data

分量	方差膨胀因子	分量	方差膨胀因子	分量	方差膨胀因子	分量	方差膨胀因子	分量	方差膨胀因子
Y	1.001	Y·Mz	1.006	Mz·Z	1.000	Mx·My	1.081	Z·T	1.550
Mz	1.000	Y·X	4.000	Mz·My	1.000	Z·Z	1.002	My·T	1.425
X	1.015	Y·Mx	1.004	X·X	6.807	Z·My	1.000	Y ² ·T	1.110
Mx	1.132	Y·Z	1.001	X·Mx	4.000	My·My	1.004	Mz ² ·T	1.492
Z	1.004	Y·My	1.000	X·Z	4.000	Y·T	1.376	X ² ·T	1.073
My	1.000	Mz·Mz	1.009	X·My	2.623	Mz·T	1.312	Mx ² ·T	1.123
T	1.115	Mz·X	4.000	Mx·Mx	1.001	X·T	1.077	Z ² ·T	1.369
Y·Y	1.373	Mz·Mx	1.000	Mx·Z	1.009	Mx·T	1.199	My ² ·T	1.213

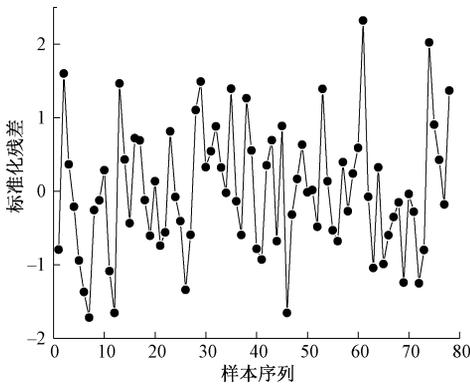


图10 Y分量数据标准化残差

Fig. 10 Standardized residual of Y-component data

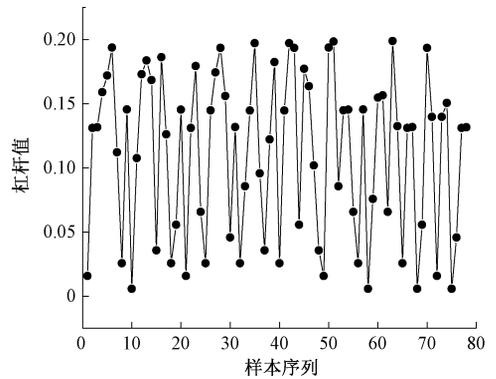


图12 Y分量数据杠杆值

Fig. 12 Leverage value of Y-component data

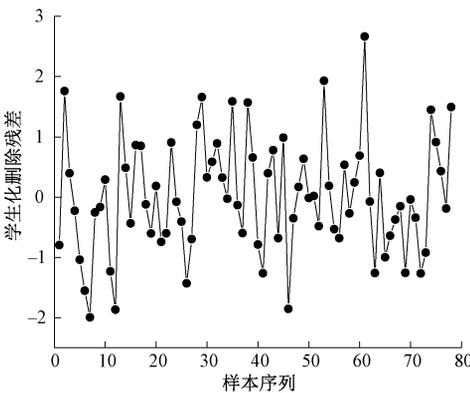


图11 Y分量数据学生化删除残差

Fig. 11 Studentized deleted residual of Y-component data

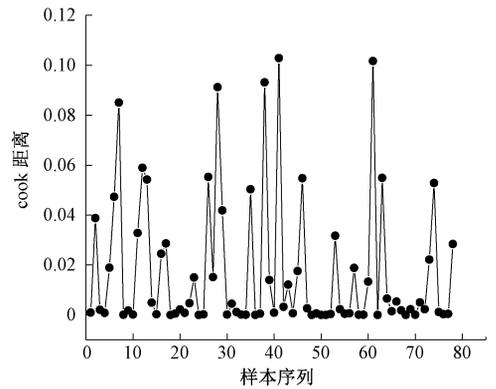


图13 Y分量数据 cook 距离

Fig. 13 Cook value of Y-component data

表6 系数拟合度

Table 6 The coefficient fit

R	R ²	调整 R ²	更改统计量		
			df1	df2	Sig. F 更改
1	1	1	1	65	0.018

回归方程显著性检验(F 检验)方法如下:

原假设 $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$, 统计量为:

$$F = \frac{SSR/k}{SSE/(n - k - 1)} \sim F_{\alpha}(k, n - k - 1) \quad (5)$$

其中, n 表示样本数量, k 表示变量的数量。

在正态假设下, 当 $F > F_{\alpha}(k, n - k - 1)$ 时, 拒绝原假设 H_0 , 认为在显著性水平 α 下, 因变量 (y) 与自变量

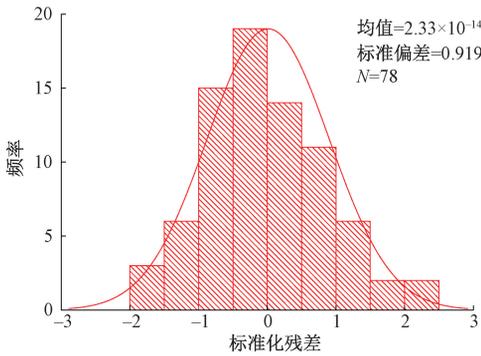


图 14 Y 分量数据标准化残差正态直方图

Fig. 14 Normal histogram of standardized residual for Y-component data

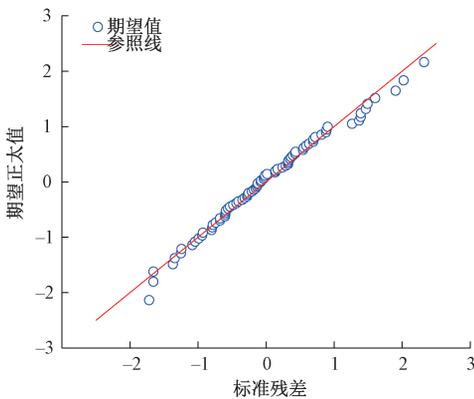


图 15 Y 分量数据标准化残差 Q-Q 图

Fig. 15 Q-Q diagram of standardized residual for Y-component data

(x_1, x_2, \dots, x_k) 有显著的线性关系, 即回归方程是显著的。反之, 当 $F \leq F_{\alpha}(k, n-k-1)$ 时, 则认为回归方程不显著。表 7 所示为 Y 分量回归方程的 F 值及显著性 (Sig.)。

表 7 方程显著性

Table 7 The significance of equation

名称	平方和	df	均方	F	Sig.
回归	625.331	12	52.111	1 405 671	0
残差	0.002	65	0		
总计	625.333	77			

回归方程显著并不意味着每个自变量对因变量的影响都显著, 需要从回归方程中剔除次要变量, 重新建立更为简单的回归方程, 所以需要每个自变量进行显著性检验。检验方法如下:

原假设 $H_0: \beta_i = 0, i = 1, 2, \dots, k$, 统计量为:

$$t_i = \frac{\hat{\beta}_i}{\sqrt{c_{ii}} \cdot \hat{\sigma}} \sim t(n - k - 1) \quad (6)$$

其中, n 表示样本数量, k 表示变量的数量。

当 $|t| \geq t_{\alpha/2}(n - k - 1)$ 时, 拒绝原假设 H_0 , 认为 β_i 显著不为 0, 自变量 (x_i) 对因变量 (y) 的线性效果显著。反之, 当 $|t| < t_{\alpha/2}(n - k - 1)$ 时, 则认为自变量 (x_i) 对因变量 (y) 的线性效果不显著。表 8 所示为剔除不显著系数后 Y 分量回归方程系数。

热力耦合作用下的最终天平校准模型确定后, 用一种迭代方法^[9] 计算风洞试验中或者加载检验点的力和力矩值。计算公式如式 (7) 所示, 其中 ΔT 表示天平体前后温度差的变化量, Δy 表示惠斯通电桥信号变化值, T_1 和 T_2 分别是单位矩阵。

$$[F]_{6 \times 1} = ([C_1]_{6 \times 6}^{-1})^T ([\Delta y - \beta_T(\Delta T)]_{6 \times 1} - [C_2]_{6 \times 21} [H]_{21 \times 1}) \quad (7)$$

$$[H]_{21 \times 1} = [Y^2 \quad YMz \quad YX \quad YMx \quad YZ \quad YMy \quad Mz^2 \quad MzX \quad MzMx \quad MzZ \quad MzM_y \quad X^2 \quad XMx \quad XZ \quad XM_y \quad Mx^2 \quad MxZ \quad MxM_y \quad Z^2 \quad ZM_y \quad M_y^2]^T \quad (8)$$

$$[F]_{6 \times 1} = [Y \quad M_z \quad X \quad M_x \quad Z \quad M_y]^T \quad (9)$$

$$C_1 = [\beta_i] + \Delta T[\beta_i^T] \quad (10)$$

$$C_2 = ([\beta_{ii}] + \Delta T[\beta_{ii}^T])_{6 \times 6}^T T_1 + ([\beta_{ij}]_{15 \times 6})^T T_2 \quad (11)$$

4) 实验结果分析

回归分析完成后获得最优回归系数矩阵。对被校准天平施加不同于加载矩阵中的温度及力/力矩载荷, 检验回归系数矩阵的正确性。根据式 (7) 可以计算出施加于被校准天平的载荷值 (calculated loads, CL), 将各施加载荷 (applied loads, AL) 与对应的计算载荷求差获得残差 (residual, R) 为:

$$R_i = AL_i - CL_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

残差归一化值 (%) 为:

$$R_i(\%) = (AL_i - CL_i) / FS, i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

图 16、17 分别为天平 Y 分量和 M_z 在检验载荷作用下的计算值与各点对应的归一化残差。

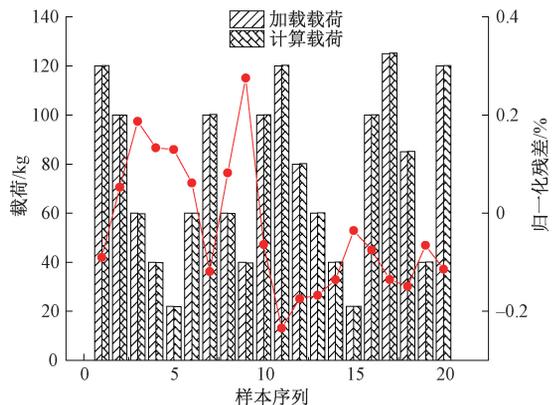


图 16 Y 分量计算结果对比

Fig. 16 Comparison of Y-component calculation results

表8 方程系数
Table 8 The coefficients of equation

名称	非标准化系数		<i>t</i>	Sig.	共线性统计量	
	B	标准误差			容差	方差膨胀因子
(常量)	0.002	0.002	1.394	0.168		
Y	0.084 572	0	4 080.740	0	0.999	1.001
M _Z	-0.060 841	0	-440.472	0	1.000	1.000
M _X	-0.010 761	0	-48.827	0	0.883	1.132
Z	-0.001 049	0	-49.591	0	0.958	1.044
M _Y	0.002 071	0	12.003	0	1.000	1.000
X	3.453 241×10 ⁻⁴	0	11.034	0	0.986	1.015
M _X ·T	-6.706 359×10 ⁻⁴	0	-4.316	0	0.834	1.199
M _Z ·M _Y	-1.364 930×10 ⁻⁴	0	-4.109	0	1.000	1.000
Y·M _Z	-1.110 816×10 ⁻⁵	0	-2.779	0.007	0.994	1.006
Z·M _Y	1.347 685×10 ⁻⁵	0	2.705	0.009	1.000	1.000
M _X ·M _X	-1.068 570×10 ⁻⁴	0	-2.574	0.012	0.999	1.001
M _Z ·Z	-6.859 722×10 ⁻⁶	0	-2.434	0.018	1.000	1.000

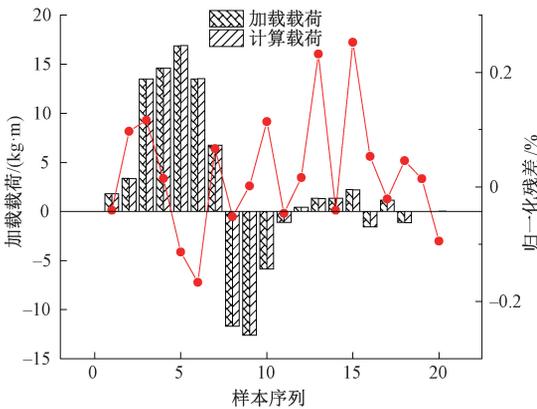


图17 M_Z分量计算结果对比

Fig. 17 Comparison of M_Z-component calculation results

热力耦合作用下的天平校准综合加载误差评定按式(14)计算,天平各分量的综合加载误差如表9所示。结果表明,天平的综合加载误差均达到“GJB2244A-2011风洞应变天平规范”中天平静态校准的合格指标,含温度、力、力矩参数的天平工作公式准确可靠。

$$W_{zi} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (F_{ij} - P_{ij})^2}{m-1}}}{P_{i \max}} \times 100\%, \quad i = 1, 2, \dots, 6; j = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

其中, P_{ij} 表示天平第*i*分量第*j*点综合加载施加载荷值, F_{ij} 表示天平第*i*分量第*j*点综合加载检验载荷的计算值,由式(7)计算所得,*j*表示天平各分量施加载荷组数, $P_{i \max}$ 表示天平各分量最大加载载荷。

表9 综合加载误差

Table 9 The comprehensive loading error %						
	Y	M _Z	X	M _X	Z	M _Y
综合加载误差	0.17	0.11	0.14	0.16	0.21	0.18

3 结 论

本文提出了一种热力耦合作用下的天平校准新方法,通过在天平校准支杆上敷设PI电热膜构建校准温度环境,按照响应面实验设计方法构建热力耦合作用下的天平加载矩阵,采用多元回归方法建立了含温度、力、力矩参数的天平工作公式,最后利用20组验证载荷检验了天平工作公式的准确性。通过本研究可得到如下结论:

- 1) 热力耦合作用下,天平各分量的综合加载误差均优于0.3%,达到GJB2244A-2011规定的合格指标,含温度、力、力矩参数的天平工作公式准确可靠;
- 2) 天平公式中的各项系数体现了温度、力、力矩载荷与天平各分量输出电信号之间的相对关系,也体现了相对关系的强弱性;
- 3) 天平公式可用于判断温度对天平测量影响的大小也可用于修正温度对天平测量影响;
- 4) 以天平校准技术为着力点研究温度对风洞应变天平测量的影响是一种较为新颖的方式,也是一种可行、可靠的方式;
- 5) 本研究可为其它类型风洞天平的热力耦合性能测

试及校准提供一定参考。

参考文献

- [1] 刘志勇,苗磊,陶洋,等. 基于 Kriging 模型的风洞应变天平静态校准方法[J]. 航空学报, 2016, 37(12): 3685-3691.
- LIU ZH Y, MIAO L, TAO Y, et al. A static calibration method of wind tunnel strain-gage balance based on Kriging model [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37 (12):3685-3691.
- [2] 车兵辉,尹欣繁,彭先敏,等. 基于 BP 神经网络的天平校准数据处理方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2020,28(10):165-169.
- CHE B H, YIN X F, PENG X M, et al. Research on data processing method of balance calibration based on BP neural network [J]. Computer Measurement & Control, 2020,28(10):165-169.
- [3] 苗磊,李建强,李耀华,等. 风洞天平静态校准与使用状态一致性研究[J]. 中国测试, 2020, 46(8): 158-164.
- MIAO L, LI J Q, LI Y H, et al. Study on consistency between static calibration and service state of wind tunnel balance[J]. China Measurement & Test, 2020,46(8): 158-164.
- [4] 刘春风,熊琳,刘家骅,等. 天平校准不确定度的一种评估方法[J]. 实验流体力学,2016,30(2):84-90.
- LIU CH F, XIONG L, LIU J H, et al. A method to estimate the balance calibration uncertainty[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2016,30(2):84-90.
- [5] 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,2012,38(4):29-31.
- LUO T B, WANG Z Q, SHEN J P, et al. Study on calibration technology for wind tunnel balance based on statistic process control[J]. China Measurement & Test, 2012,38(4):29-31.
- [6] 战培国. AIAA 风洞天平校准标准研究[J]. 航空科学技术,2012,135(3):24-26.
- ZHAN P G. Study on wind tunnel balance calibration standard of AIAA [J]. Aeronautical Science & Technology, 2012,135(3):24-26.
- [7] 姚建涛,李立建,许允斗,等. 超静定六维力传感器静定测量模型及标定方法[J]. 仪器仪表学报,2013, 34(9):1927-1933.
- YAO J T, LI L J, XU Y D, et al. Statically determinate measurement model and calibration method of statically indeterminate six-axis force sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013,34(9):1927-1933.
- [8] 蔡大军,姚建涛,李颖康,等. 重载并联六维力传感器及静态标定[J]. 计量学报,2021,42(8):1026-1033.
- CAI D J, YAO J T, LI Y K, et al. Parallel six-axis force sensor with heavy-load capacity and static calibration[J]. ACTA Metrological Sinica, 2021,42(8):1026-1033.
- [9] AIAA. Calibration and use of internal strain gage balances with application to wind tunnel testing [S]. AIAA-R-091A-2020,2020.
- [10] KEITH C L, SEAN A C, THOMAS H J, et al. Thermal and pressure characterization of a wind tunnel force balance using the single vector system[C]. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando: AIAA, 2011.
- [11] ULBRICH N, VOLDEN T. Development of a new software tool for balance calibration [C]. 25th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. San Francisco: AIAA, 2006.
- [12] RICHARD D, NORBERT U. A comparison of two balance calibration model building methods [C]. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reno: AIAA, 2007.
- [13] REINHOLTZ C, YODER D, LANDMAN D, et al. A design of experiments approach applied to wind tunnel balance calibration at arnold engineering development complex[C]. 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Texas: AIAA, 2013.
- [14] PHILIPSEN I, ZHAI J. Comparative study of strain-gauge balance calibration procedures using the balance calibration machine[C]. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reno: AIAA, 2007.
- [15] 黄强,滕召胜,唐享,等. 电子分析天平温度漂移补偿算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1987-1995.
- HUANG Q, TENG ZH S, TANG X, et al. Research on the temperature drift compensation algorithm for electronic analytical balance [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015,36(9):1987-1995.
- [16] 闵夫,杨彦广,戴金雯,等. 光纤珐珀应变计应力温度影响实验分析[J]. 仪器技术与传感器,2019,1(7): 26-28.
- MIN F, YANG Y G, DAI J M, et al. Experiment analysis of strain and temperature influence on fiber optic Fabry-Perot strain gage[J]. Instrument Technique and

- sensor, 2019,1(7):26-28.
- [17] 贺德馨. 风洞天平[M]. 北京:国防工业出版社, 2001. 5.
HE D X, Wind tunnel balance [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. 5.
- [18] 夏光明,王瑞,张建勋,等. 基于全因子实验设计的椎板铣削温度分析与建模[J]. 仪器仪表学报,2021, 42(7):135-144.
XIA G M, WANG R, ZHANG J X, et al. Analysis and modeling of lamina milling temperature based on full factorial experimental design [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(7):135-144.
- [19] 石松宁,王大志. 基于RSM-AGA的永磁驱动器周向开槽的参数优化设计[J]. 仪器仪表学报,2015,36(3): 601-607.
SHI S N, WANG D ZH. Parameter optimization of circumferential grooves on the permanent magnet drive based on the response surface methodology and the adaptive genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015,36(3):601-607.
- [20] RICHARD D, IWAN P. Stepwise regression analysis of MDOE balance calibration data acquired at DNW[C]. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 2007.
- [21] MONTGOMERY D C, PECK E A, VINING G G. Introduction to linear regression analysis (4th Ed)[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 2006. 2.
- [22] ULBRICH N. Regression model optimization for the analysis of experimental data[C]. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and

Aerospace Exposition. Orlando: AIAA, 2009.

- [23] 何晓群,刘文卿. 应用回归分析(第三版)[M]. 北京:中国人民大学出版社, 2011. 9.

HE X Q, LIU W Q. Applied Regression Analysis (3rd Ed) [M]. Beijing: Chinese University Press, 2011. 09.

作者简介



苗磊, 2006年于重庆大学获得学士学位, 2018年于四川大学获得硕士学位, 现为中国空气动力研究与发展中心高级工程师, 主要研究方向为风洞应变天平研制与应用。
E-mail: niuandmiao@vip.sina.com

Miao Lei received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2006, and received his M. Sc. degree from Sichuan University in 2018. He is currently a senior engineer at China Aerodynamics Research and Development Center. His main research interests include wind tunnel strain gauge balance research and application.



谢斌(通信作者), 1997年于长春理工大学获得学士学位, 2005年于四川大学获得硕士学位, 现为中国空气动力研究与发展中心高级工程师, 主要研究方向为风洞应变天平研制与应用。

E-mail: 13980128576@163.com

Xie Bin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 1997, and received his M. Sc. degree from Sichuan University in 2005. He is currently a senior engineer at China Aerodynamics Research and Development Center. His main research interests include wind tunnel strain gauge balance research and application.