

国外风洞天平校准技术研究进展

Development of Wind Tunnel Balance Calibration Techniques

战培国 / 中国空气动力研究与发展中心

摘要: 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。

关键词: 风洞天平; 天平校准; 天平校准台

Keywords: wind tunnel balance; balance calibration; balance calibration device

0 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。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, 美国和欧洲的一些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。

1 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。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别较大, 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或多或少都存在着干扰。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2, 多项式数学方程可以写成:

$$\begin{aligned}
 f(x, \beta) &= \beta_0 && \text{(截距)} \\
 &+ \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 && \text{(线性项)} \\
 &+ \beta_{12} x_1 x_2 && \text{(交叉干扰项)} \\
 &+ \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 && \text{(二次项)} \\
 &+ \beta_{111} x_1^3 + \beta_{222} x_2^3 && \text{(三次项)} \\
 &+ \beta_{112} x_1^2 x_2 + \beta_{122} x_1 x_2^2 && \text{(四次项)} \\
 &+ \beta_{1111} x_1 + \Lambda^4 && \text{(等)} \\
 &+ \Lambda
 \end{aligned}$$

根据AIAA发布的“风洞试验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。

2 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：单分量人工砝码加载天平校准台、六分量自动天平校准机和单矢量人工砝码加载天平校准台(SVS)等三种类型。

单分量人工砝码加载天平校准台是国外较早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，劳动强度大、校准周期长，校准一台天平大概需要3~4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80~90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。

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，不利于大量装备。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，NASA于21世纪初发展了基于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1)。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。

3 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。

3.1 校准装置改进

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，于2007年为该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做进一步的完善工作。例如，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



图1 NASA单矢量天平校准台

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。

3.2 校准装置不确定度评估

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。

3.3 基于MDOE的天平校准方法

MDOE是美国NASA兰利研究中心为改进航空航天研究的质量和um提高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，发展了二阶和三阶校准实验设计方法。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。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。

3.4 校准载荷表

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。

3.5 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，如针对温度效应，传统做法是对测量桥路进行温度补偿。近年来，NASA兰利研究中心针对其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。

4 结束语

综上所述，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。

AST

参考文献

- [1] Lynn K C. Thermal and pressure characterization of a wind tunnel force balance using the single vector system[R]. AIAA2011-950.
- [2] Ulbrich U. Combined load diagram for a wind tunnel strain-gage balance[R]. AIAA2010-4203.
- [3] Bergmann R. An experimental comparison of different load tables for balance calibration[R]. AIAA2010-4544.
- [4] Klaus H. The 2nd generation balance calibration machine of darmstadt university of technology (TUD)[R]. AIAA2007-148.
- [5] Parker P A. A single-vector force calibration method featuring the modern design of experiments[R]. AIAA2001-0170.