AIAA风洞天平校准标准研究

Study on Wind Tunnel Balance Calibration Standard of AIAA

战培国／中国空气动力研究与发展中心

摘　要：简述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》推荐标准制订的目的、过程和主要涵盖的内容；分析了该标准所反映出的国外风洞天平校准技术发展的特点；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。

关键词：　风洞天平；天平校准；标准

Keywords：wind tunnel balance；balance calibration；standard

0 引 言

风洞试验是地面模拟航空航天飞行器空气动力特性的主要手段之一，风洞天平（图1）是测量风洞试验中作用在模型上气动载荷的主要测量设备。由于飞行器模型风洞试验的特殊性和复杂性，以及不同种类试验测量要求差异大，导致风洞天平成为一种特殊的、非标准的力/力矩测量设备。天平的校准是非常重要的一环，它直接关系到天平在以后风洞试验使用中的测量精准度。

随着飞行器研制国际合作和精细化要求的增强，有必要对风洞试验领域天平校准的主要方法和实践进行归纳和总结，形成指导风洞天平校准的标准。因此，在美国阿诺德工程发展中心（AEDC）、国家航空航天局（NASA）兰利研究中心和波音公司的倡议下，美国航空航天协会（AIAA）地面试验技术委员会（GTTC）成立了内式天平技术工作组（IBTWG），历时六年，经过大量工作，AIAA标准执行委员会（SEC）于2003年9月颁布了《风洞试验内式应变天平校准和使用》标准（AIAA R−091−2003）（以下简称：AIAA天平校准标准或标准），用于指导行业内天平的校准工作。

1 AIAA天平校准标准概述

AIAA积极致力于航空航天领域中标准的制订，协会下设26个专业领域的标准委员会。负责天平校准标准制订的地面试验技术委员会就是其中之一。AIAA标准的文件形式有4类：标准（S）、指南（G）、推荐（R）、专项（SP）。《风洞试验内式应变天平校准和使用》（AIAA R−091−2003）则属于“推荐”类，即该标准的内容不带有强制性，其中的许多条款指出了天平校准行业内的主要做法，分析了优点和缺点，给出推荐的做法及理由。“推荐”类标准的学术和技术探讨性很强。

1.1 AIAA天平校准标准制订的参与者

AIAA天平校准标准工作组由美国AEDC、NASA兰利研究中心和波音商业飞机公司发起，挂靠在AIAA地面试验技术委员会名下（该标准完成后取消），成员主要集中在美国和加拿大（北美），在标准制订的过程中，欧洲的一些风洞试验组织期望能够参与其中，但考虑到工作组内成员已经比较多，在许多问题上达成一致比较困难，成员太多也会影响工作的进度。因此，AIAA天平校准标准工作组没有吸收欧洲风洞试验组织参加，但表示愿意支持欧洲开展类似的工作，在条件成熟时，可以共同探讨和交流。

参与、支持和领导AIAA地面试验技术委员会内式天平技术工作组的北美主要组织包括：NASA兰利研究中心/格林研究中心/艾姆斯研究中心、AEDC、波音公司、斯维尔德鲁普技术公司、洛克希德•马丁公司、诺斯罗普•格鲁门公司、航空航天研究所等。

内式天平技术工作组的主要工作目标是：

1）为各成员提供一个共享内式应变天平成熟技术、方法和能力信息的平台；

2）推荐一个能为各成员风洞试验设备使用的天平校准矩阵；

3）为满足某个特定风洞试验的目

标，建立用于选择天平类型和必需校准内容的总指导原则；

4）发展一个与已有不确定度标准（AGARD AR−304和AIAA S−071A−1999）相符合的天平校准不确定度推荐方法；

5）发展能为工作组各成员接受的计及自重调整的方法（包括校准中和试验中）；

6）研究用于内式天平设计、辅助装置和校准的方法；

7）建立和发布一个内式应变天平方法的推荐做法文件，包括天平温度效应修正方法。

1.2 AIAA天平校准标准的内容简介

AIAA天平校准标准共分五章20小节，详细介绍了风洞试验最常用的内式应变天平的标准范围、制订目的、基本概念、校准方法、校准矩阵和校准报告内容等。

在基本概念一章中，AIAA根据机械结构、组桥方式和校准矩阵不同将内式应变天平分为三类。

1）力型天平

它的测量载荷分量包括5个力和1个力矩（NF1,NF2,SF1,SF2,AF,RM），由它们最终合成所需测量的模型上的3个力和3个力矩。

2）力矩型天平

它的测量载荷分量包括5个力矩和1个力（PM1,PM2,YM1,YM2,RM,AF），最终合成所需测量的模型上的3个力和3个力矩。

3）直接读数型天平

图1 内式应变天平

它的测量载荷直接就是模型上的3个力和3个力矩（NF,AF,SF,PM, YM, RM）。

在天平校准一章中，介绍了校准矩阵的确定方法、载荷计算方法、校准结果应用到试验环境和校准频率等问题，给出了一个3分量天平的校准样例。对天平校准数学模型，标准给出了业界常用的包括27项校准系数和33项校准系数的数学模型。但是，考虑到测量元应变“±”符号对校准系数及校准精度的影响，标准推荐的天平校准数学模型是对所有校准系数考虑了载荷“±”符号影响的数学模型，这样，对于一个6分量天平，校准矩阵扩大为（6×96）。但标准指出，在实际应用中，针对具体某一天平的情况，校准矩阵或许并不包含公式中的所有项，只有那些校准中直接对应施加载荷的项应当被包含，因此，应用时根据具体情况进行简化。

在天平校准报告一章中，规范了天平校准报告应涵盖的内容，并强调这对天平的正确使用非常重要，标准给出了天平校准报告的样例。

AIAA天平校准标准还指出了尚有一些涉及校准问题而没有完成的工作，如温度和迟滞性效应问题，需要什么样的校准载荷来产生期望的校准矩阵，以及校准矩阵与校准精度的关系等。

2 AIAA天平校准标准中的技术特点

AIAA天平校准标准折射出了以美国为代表的北美天平技术的某些新发展，反映了天平技术未来可能的发展方向。

2.1现代实验设计理论的应用

AIAA天平校准标准阐述了现代实验设计（MDOE）理论在天平校准中的应用。MDOE方法主要包括形式实验设计、进行实验和实验分析等三个过程，其保证质量的三个基本原理是：随机、分块、重复。

目前，常规天平校准表采用的是一次对一个变量以一定的增量间隔来加载，在这个过程中，其他变量为零或保持不变。这种方法被称为一次一个参数方法（OFAT）。该设计表中的加载点的顺序确定是基于加载系统的效率和特定数据分析算法。这种典型的校准载荷设计确定一个二次天平数学模型大约需要包含1000个点。

现代实验设计（MDOE）方法与OFAT方法采集大量数据点的做法不同，它只采集满足设计量化需要的充足数据，即最少数据，达到高效确定实验设计的基本目的。从136点确定的二次天平数学模型表明，使用该技术效率高且标准偏差更低。

该标准认为，现代实验设计（MDOE）技术的应用将对天平校准过程产生重要影响，它用系统的方法来研究，以获得更好的天平数学模型，从而提高风洞试验中天平测量的精准度。

2.2 神经网络理论的应用

人工神经网络技术（ANN）是一个由大量简单的处理单元组成的高度复杂的大规模非线性自适应系统。它采用并行处理，通常由输入层、隐藏层和输出层组成人工神经网络的结构模型，通过对网络系统进行多目标学习/训练，使该系统具有智能求解某些问题的能力。

目前传统天平校准采用的方法是用一个多项式数学模型并通过校准数据的回归分析来确定其中的系数。按神经网络理论，天平校准可以采用另一种数学模型，即神经网络数学模

型，天平桥路的输出被输入神经网络模型，神经网络的输出就是所期望获得的力和力矩。

人工神经网络技术在风洞天平技术上的应用研究，使天平结构设计、加工简单化，使应变片粘贴位置精度要求降低，使天平抗干扰和容错能力提高。该技术利用计算机对天平在校准阶段进行大量的学习/训练，从而简化了天平在其他阶段（设计、加工、使用）的要求，使天平向智能化方向发展，该技术目前正处在发展研究阶段。

3 AIAA天平校准标准的启示

天平是测量作用在风洞试验模型上气动载荷的特殊精密仪器设备。其特殊性在于：与一般的力传感器测量仪器仪表不同，为了保证测量精准度，天平需要针对风洞试验模型测量要求进行差异化设计；另外，与通用精密测量仪器不同，天平并没有一个国际或国家权威机构来标定计量它。长期以来，在风洞试验领域，天平的设计、加工、校准和应用一般都是由风洞试验机构按各自的经验和习惯进行。从美国AIAA协会《风洞试验内式应变天平校准和使用》标准的制订和颁布，可以得到以下几点启示：

1）天平是一种特殊的精密测量设备，似乎难以用一种公认的标准来规范。风洞天平的应用至少有80年的历史了，直到2004年，AIAA才协调北美有关天平使用机构，历时6年完成了《风洞试验内式应变天平校准和使用》标准（推荐类），足以反映风洞天平的特殊性和复杂性，天平技术的创新发展仍有很大的空间。

2）天平校准是天平研制过程的最重要环节，校准装置和方法对天平校准效率和未来使用测量精准度有重要影响。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。三种校准装置目前都有应用，传统的OFAT校准方法仍占主导地位，但新的校准方法和理论已对目前广泛采用的传统方法形成冲击。

3）现代实验设计（MDOE）天平校准方法将大大提高天平校准精准度和效率。从1997年开始，现代实验设计（MDOE）理论被美国NASA 引入风洞试验领域，正改变着传统风洞试验看重于大量获得试验数据的理念和做法，从某种意义上看，它是“低碳”、“科学发展”在风洞试验领域的体现，迎合了当今世界各行各业发展的潮流。采用现代实验设计方法校准天平的研究，欧美已有越来越多的文献报道。

4）人工神经网络技术对传统天平应变片组桥和校准理论产生了重大冲击。目前广泛使用的天平是用应变片组成惠斯登电桥、通过校准获得的数学模型将感应的应变转换为测量载荷的一种精密测力设备，在风洞试验的恶劣环境中，如果一个应变片损坏，则天平需要重新贴片校准，天平抗干扰和容错能力较差。而采用人工神经网络技术设计的天平将能克服这些弊端。

5）加强天平技术理论研究是提高天平精细化和应用水平的基础，也是风洞试验精细化的重要基础。天平技术涉及材料、传感、信号处理、光电、数学等学科，这些科学领域的技术进步都可能对天平技术的发展带来重要的影响，国外光纤、人工神经网络、现代实验设计等在天平领域的应用研究都说明了这一点。只有加强天平技术理论研究，才能为天平的型号应用研究提供坚实的基础。

4 结束语

综上所述，风洞天平校准是一个复杂的过程，各国都有其传统的经验和习惯的做法，AIAA颁布的《风洞试验内式应变天平校准和使用》标准属于推荐级。从中可以了解到，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。 AST

参考文献

[1] AIAA.Calibration and use of internal strain gage balances with application to wind tunnel testing[R]. AIAA R−091−2003.

[2] Lynn K C. Thermal and pressure characterization of a wind tunnel force balance using the single vector system[R]. AIAA 2011−950.

[3] Ulbrich N. Combined load diagram for a wind tunnel strain:gage balance[R]. AIAA 2010−4203.

[4] Bergmann R. An experimental comparison of different load tables for balance calibration[R].AIAA 2010−4544.

[5] Hufnagel K. The 2nd generation balance calibration machine of Darmstadt University of Technology (TUD)[R]. AIAA 2007−148.

[6] Parker P A. A single−vector force calibration method featuring the modern design of experiments[R]. AIAA 2001−0170.