

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.04.09

复杂环境下传感器性能校准的现状与发展趋势

施春英, 李程

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 对比国内外开展的航空领域内传感器性能校准方法的研究现状, 结合我国航空技术的发展方向, 阐述复杂环境下对传感器性能进行校准的必要性, 并着重分析未来传感器校准的发展目标。

关键词: 传感器; 复杂环境; 校准; 发展趋势

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)04-0073-07

Current Situation and Development Trend of Sensor Performance Calibration in Complex Environments

SHI Chunying, LI Cheng

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Comparing the current research status of calibration methods of sensor performance in the field of aviation in China and abroad, and combining with the development direction of Chinese aviation technology; This paper expounds the necessity of calibration of the sensor performance under complex environment is expounded, and analyzes the development goal of future sensor calibration is emphatically.

Key words: sensor; complex environment; calibration; development trend

0 引言

传感器被大量应用在飞机的关键部位、机载设备系统以及各类地面和飞行试验中。传感器的敏感参数在飞机和发动机的自动控制、性能试验等方面起着至关重要的作用, 直接影响飞机工作的安全性、航空产品地面试验和飞行试验结果的准确性及可靠性^[1]。

随着新结构、新工艺、新材料的广泛应用, 航空飞行器产品逐步迈向高空、高速、高温领域, 航空技术呈现出新的发展趋势。同时, 时代潮流对飞机的飞行性能、自动化程度等要求也在不断提高。现有的传感器技术已无法满足航空工业领域日益增长的需求, 如何对传感器的性能进行全面正确的评价成为计量领域的重点关注对象。

现有的国家、军用及行业校准规范和标准虽然满足了传感器大部分参数的计量、校准要求, 但是仅仅局限在实验室条件以及简单环境条件下传感器性能的计量校准, 几乎没有只面向于传感器, 并且在复杂环境条件下的校准规范。这意味着以目前的传感器性能校准水平尚无准确方法判断传感器在复杂环境下的性能指标是否满足使用要求。当传感器在复杂工况下的测量数据不准确时, 可能会导致飞机存在潜在的风险,

严重的甚至可能导致飞机无法安全飞行。

本文基于国内外已开展的复杂环境下传感器性能测试的原理和校准方法的研究, 对未来我国传感器在复杂环境下的性能校准方法的研究提出了一个可能的发展方向。

1 国外研究现状

传感技术作为信息技术的三大支柱之一, 广泛应用于诸多领域, 在全世界多个国家得到迅速发展, 尤其以美、日、德、俄四个国家领先, 例如, 航空领域广泛应用的 MEMS 压力传感器大多来源于美国 Kulite 公司和 AST 公司; 美国 Lockheed Martin 公司、Luna 检测公司和 Luna 能源公司联合研制的光纤分布式应变传感系统被用于实时在线监测飞机应变; 检测发动机舱及氢燃料站氢气泄露的电化学式氢过程传感器主要由美国 Applied Sensor 公司研制。国外传感器技术相比我国更为先进的原因不仅在于设计理念和生产工艺的先进性, 还在于拥有先进的传感器校准及测试技术作为技术支持。

飞行器上的结构力测试在新飞机的认证上起着决定性的作用。目前用于应变传感器校准的测试装置造

价昂贵、结构过于复杂、制造过程需要耗费大量的时间。为此, Marcus^[2]开发了一种面向飞行器结构载荷的传感器校准程序。该校准程序是在地面稳定条件下,将应变仪或光纤采集到的已知点载荷的响应,通过最小二乘曲线拟合算法导出载荷方程的参数,并通过传感器提供的结构载荷的局部信息确定传感器之间的关系,从而计算出相对于每一个飞机方向的参照条件的结构载荷,得到飞行期间所经历的最全面的载荷谱,从而实现飞行载荷的实时监测和验证。该传感器校准程序通过开展 DLRDiscus-2C 飞机结构载荷的现场校准(如图 1 所示)进行验证。结果表明:传感器校准程序应用简单,适用对象从基本的飞机到复杂的现代大型运输飞机实现了全覆盖。



图 1 现场校准的各向结构载荷

飞机的三维风矢量通过地面速度与真实空气速度矢量之间的差值计算得到,这两种速度的任何误差都会直接影响风速值的计算。空气速度矢量的大小由静态和动态压力计算得到,方向由攻角和侧滑角定义,其大小和方向均容易受到飞行器本身的压缩等行为影响从而出现失真。Mallaun^[3]提出了一种用来测量大气边界层传感器系统的风速测量的理论校准方法。其校准思路是根据实际飞行状态,以 Rosemount 模型为基础建立三维风矢量校准计算模型,以“静态校准”的方式,即稳定飞行条件来导出有关参量的校正函数;当误差显著时,采用“动态校准”的方式,即变化飞行条件来量化和修正动态校准-依赖关系,从而实现在飞行状态下对传感器的空气速度矢量等有关参数及其测量不确定度的修正。通过 Cessna Grand Caravan 208B 上的气象传感器的试验验证,证实利用该理论校准方法确实可以提高传感器系统对大气边界层的高频测试的准确度。

确定测量物体相对于水平面和北向的旋转是航空导航中的一个关键任务。传统的传感器校准方法是离线模式下在校准期间通过测量获得有关参数。Dušan Neme^[4]以三轴陀螺仪(测角速度)、三轴加速度计(测量包括重

力在内的局部系统的加速度)和三轴磁力仪(测量地球磁场感应)的融合为例,提出了一种基于实时处理所有变量的均方误差估计的自适应异构融合算法,并基于此算法建立了一种基于机器学习的实时校准方法,如图 2 所示。该校准方法运行时以在线模式工作,可以实现在工作环境中对传感器的热漂移进行补偿,而不需要在实验室中进行重新校准。结合传感器的仿真模型和真实的 MEMS 传感器的对比结果,证实该自适应融合校准算法可以自动识别运动状态是否连续稳定,具有更好的动态性,且参数更容易直接测量。通过调整,该校准算法还可应用于其他传感器融合的场景(例如:GNSS 系统-绝对速度位置传感器与加速度计的组合;脉冲体积传感器和流量传感器的组合等)。

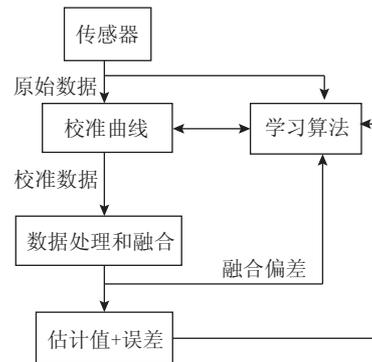


图 2 传感器数据处理和融合背景下的实时校准方案

目前,国外普遍采用理论分析为主、试验辅助验证的方法开展传感器校准方法的研究工作,且更注重理论研究。已有的研究表明:该模式除了可以避免大量财力的损耗,还可以极大地提高传感器在实际工作环境下的测量准确度,同时可利用计算机实现传感器性能校准的智能化及自动化^[5-6]。

2 国内研究现状

迄今为止,国内针对复杂环境下传感器性能的校准还没有相关的标准,就如何全面开展传感器性能校准的研究相对不成熟。现有的研究主要集中于复杂环境下新型传感器的研制以及复杂环境下传感器的校准方法。

2.1 复杂环境下的新型传感器研制

一架现代飞机大致可以分为发动机系统、航电系统、机电系统、飞控系统、液压系统和环控系统。每一个系统所装载的传感器都涉及多种不同的参数,如压力、温度、湿度、加速度、流量等。不同的飞机系

统所处系统环境条件不同,导致同一物理参数传感器的技术指标要求根据应用的飞机系统差异巨大。如何根据飞机各部位的实际使用环境要求,研制具有针对性的传感器,是当前航空传感器技术的一个重点研究方向。

在发动机试验过程中,普遍采用 Gardon 式圆箔热流传感器进行热流密度的测试工作。北京环境强度研究所^[7]根据该传感器的实际工作环境,即其所处的冲击和高温环境条件,通过在内部增加缓冲材料来改进传感器的安装方式。经过试验验证,改造优化后的传感器的减振抗冲和耐高温性能得到了明显增强。然而,在开展性能验证试验时,没有选择采用冲击、高温复杂条件下的性能检测方法,而是沿用了现有的性能检测手段,即分别利用振动台、空气炮试验装置以及自主研发的耐温试验装置对优化后的传感器的减振抗冲击及耐高温性能分别进行了验证试验。

航空领域的许多重要工艺需要在高温、高压、高腐蚀性环境中才能实施。辽宁石油化工大学何晨光等人^[8]早在 2005 年通过制备新型陶瓷材料提高了传感器的工作寿命以及测温准确度,并且通过研制三种高温无机粘合密封剂成功解决了因密封失效产生的一系列问题,有效提高了传感器对温度和压力骤变的适应能力,同时通过自主设计研制的温度传感器双重抗压防爆结构,保证了传感器在高温高压环境下整体机械结构的可靠性,在一定程度上解决了生产耐高温、耐高压、耐腐蚀温度传感器的三大技术关键问题。结合这三项新技术,何晨光等人成功研制出了三种适用于高温、高压、高腐蚀的复杂环境中的专业型号温度传感器,目前分别应用于石化、航天和核能等领域。

当前,国内应对复杂使用环境下的新型传感器的研制工作的普遍模式是:基于已有的成熟传感器型号,通过对其材料或结构进行优化,提高传感器的技术指标与工作环境的匹配度。就目前而言,此种模式可以节约大量的研制成本,并根据社会需求灵活地选择优化方式及方向,其优化成果具有一定的预见性。然而,随着飞机飞行性能和飞行任务复杂程度的不断提高,仅凭优化的手段无法满足飞机发展的需求,研制新一代先进的传感器迫在眉睫。

2.2 复杂环境下传感器的校准方法

2.2.1 单参数环境下的校准

国内已开展的传感器的性能校准研究绝大多数建

立在传感器的敏感参数(单参数)环境基础上。

西安航天计量测试研究所的张建斌、史玮强^[9]针对航天液体发动机试验中所使用的低温压力传感器,根据其真实工况下所暴露出来的校准问题,设计研制了一套低温工作环境装置。该装置可以实现超大温度范围、温度可控且温区连续的低温环境,并可同时对多个低温压力传感器进行校准。

航空工业 304 所董雪明等人^[10]为了解决加速度计的温度系数校准问题,基于精密离心机,结合半导体制冷技术,设计研制了一套高低温环境下的大 g 值加速度计温度系数校准装置,如图 3 所示。其中,温控试验箱可创造低温和高温两种环境条件,温度范围分别为 $-60 \sim 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $20 \sim 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$,并具有相当均匀度和波动度的大范围温度场;精密离心机主要提供大于 $1 g$ 的标准加速度。利用此校准装置,可以创造多种加速度与温度的耦合场,从而实现加速度计在不同 g 值下温度系数的校准。

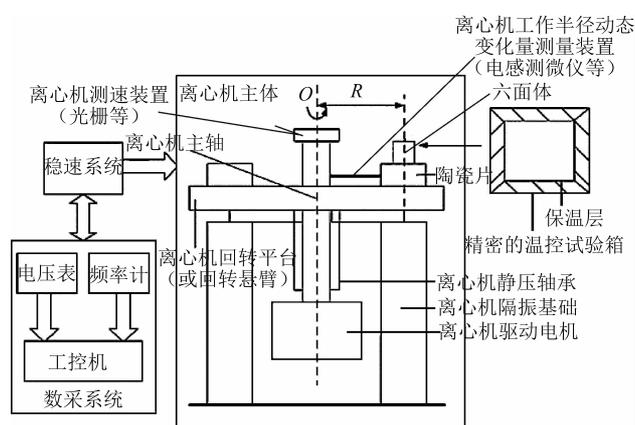


图3 大 g 值条件下加速度计温度系数校准装置结构示意图

航空工业 304 所赵俭等人^[11]利用热校准风洞对高温气流温度传感器进行校准工作,通过在温度气流环境下测试航空发动机、燃气轮机等部件中的不同类型温度传感器的测温偏差,分析其关键的影响参数的影响机理,最终得到温度传感器的测温偏差的影响规律,从而有效提高高温气流温度的测量准确性。

目前,单参数环境条件下的传感器校准方法尚未完全覆盖各型传感器的全部参数,也很少考虑复杂环境下可能会导致传感器性能的弱化或者结构失效的其他环境因素。这意味着当前传感器性能的校准数据与实际传感器的测试数据之间存在一定的偏离,偏离严重时甚至可能出现校准无效的情况。

2.2.2 现场校准

随着航空技术的不断发展，传感器的工作环境愈发复杂，对传感器性能的要求也愈发严苛。基于实验室环境的检定和校准方法无法完全保证传感器测试数据在实际使用环境下的可靠性。为此，开展复杂环境下的传感器性能校准，对于提高传感器的测量准确度有着十分重要的意义。

例如：为了保证火炮系统的冲击振动计量和测试分析的能力，满足新型火炮研制技术的要求，航空工业 304 所^[12]采用激光干涉法，将冲击响应谱测量仪校准和加速度计频响特性校准融合为一体，并基于虚拟仪器的构建方法，编写了一套适用于复杂环境的现场校准以及动态参数校准的冲击综合自动校准系统，可在确定加速度传递函数的同时进行冲击响应谱分析，综合实现两种校准功能，大幅地提高了航空领域冲击振动的测量与校准能力。

线位移传感器的线性度作为传感器的关键特性，多在实验室环境下进行校准。然而实验室校准不仅忽略了基准垂直度误差和移动轴线平行度误差对线性度的影响，还因为反复拆卸传感器可能造成传感器的敏感元件损坏。为此，成都飞机工业(集团)有限责任公司的杨明君和龚伟^[13]利用现场已有的条件，根据精加工台的现场环境，设计制作了可隔空直接接触测量的特殊工装，根据系统精度选择合适的量块作为校准标准，最终建立了一套适用于精加工台定位水平测量系统的现场校准系统，如图 4 所示。参照 JJF 1305 - 2011 的要求对其进行误差和重复性分析，对比现场校准结果和实验室结果，证实该现场校准系统具有较高的校准精度，同时可降低传感器精度的二次损伤，非常适用于现场静态校准。

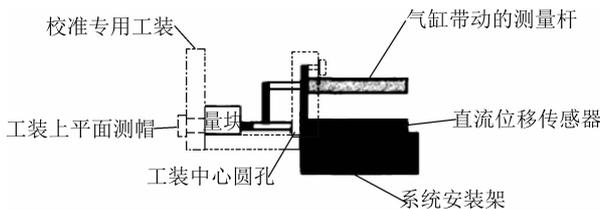


图 4 精加工台定位水平测量系统校准系统示意图

2.2.3 多参数环境下的校准

现场校准虽然可以最大程度地还原传感器的实际工作环境，但由于测试成本较高、测试方法复杂等不

利因素，导致现场校准的发展大大受限。研制传感器的实验室多参数模拟环境是目前研究的另一重要手段，如 GJB 150.24A^[14]中所提到的温度、湿度、振动和高度四种环境影响因素的多种组合模式。

蓝宝石单晶光纤温度传感器作为航空领域瞬态高温测试的重要手段，其抗冲击性能是传感器设计研制环节中必须考虑的一个指标。中北大学李园等人^[15]为了测试温度传感器的抗冲击压力性能，设计了一种高温压力测试校准装置，如图 5 所示。该装置利用锤击活塞对传感器探头施加瞬态压力，同时利用激光器作为瞬态高温激励源对传感器感温探头进行加热，有效模拟了温度传感器抗冲击性能的校准环境，即高温和冲击压力的复合环境。

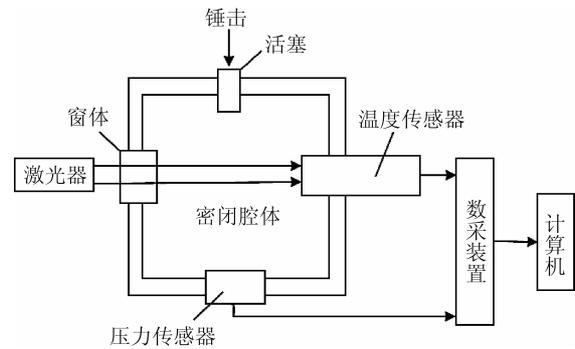


图 5 温度传感器压力校准装置示意图

航天航空领域的测试环境通常较为恶劣，高温光纤微压力传感器因其测量精度高、性能稳定等优点，常用于测量微小压力。为满足此类传感器的校准需求，航天科技集团公司四院四十四所^[16]通过分析 F-P 高温光纤微压力传感器的测量结构和校准原理，在实验室模拟了传感器的实际工作环境，设计研发了一套可靠稳定的高温微压力传感器校准系统，如图 6 所示。高低温真空试验装置中的载荷室可模拟高温微压力传感器后端的工况环境，环境室可模拟高温微压力传感器前端所处的外界环境，如微小压力、高温、近真空等，如图 7 所示。压力控制系统可同时控制载荷室和环境室的高真空状态，并能精确调节载荷室的内环境压力；利用加热载荷室四周的镍铬加热板的方式，成功模拟了载荷室的压力与高温复合的复杂环境，从而实现在高温和微小压力的复杂环境下传感器的性能校准。

中国飞行器的快速发展对低温环境下压力参数的测量要求日益严苛，尤其是液氢温区环境下的压力测量。北京航天试验技术研究所胡立荣等人^[17]早在 2013

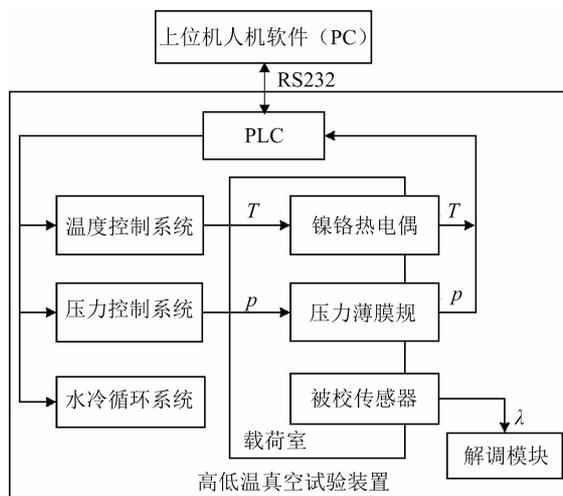


图6 高温微压力传感器校准系统示意图

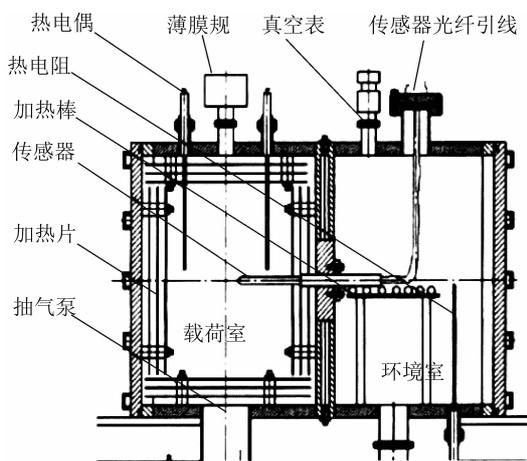


图7 高温微压力传感器校准系统腔室结构示意图

为双参数环境条件。

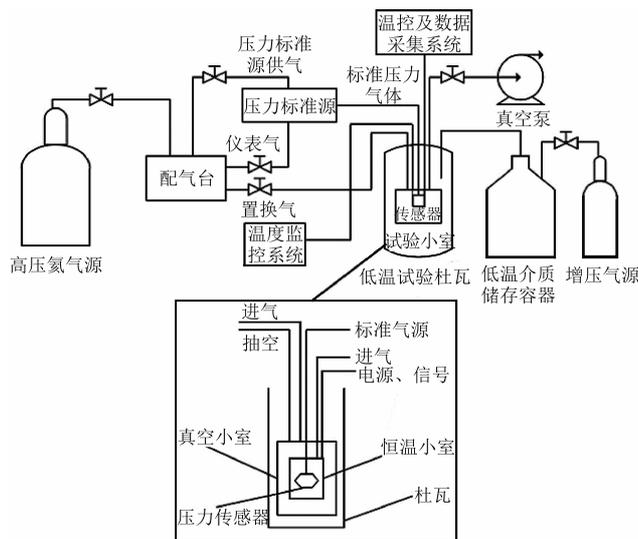


图8 低温压力传感器实验室校准装置原理图

3 发展趋势

21 世纪是一个信息爆炸、以技术为核心的时代，为了适应这一时代潮流，传感器作为获取信息的第一手段，在技术装备发展上扮演着至关重要的角色。随着自动化生产程度的不断提高以及新型材料的广泛应用，MEMS 传感器、光纤传感器、无线传感器网络、声和超声传感器、图像传感器等新型传感器的市场需求不断扩大，未来传感器逐步向微型化、智能化、系统化及网络化的方向发展。为了满足传感器产品的全寿命周期使用要求，直接判断传感器质量和性能的校准技术的发展至关重要。

我国传感器产业的一大特点在于传感器的品种基本涵盖了长、热、力、光、磁、声等各个领域，几乎与国外研制领域相当，但传感器整体的技术水平和测试及校准技术水平与国外发达国家相比仍处于落后地位。从长远角度考虑，传感器技术水平的落后会导致国内的测试及校准技术发展滞后；同时，缺乏相应的测试及校准手段会反过来阻碍先进传感器技术的发展。结合国内外目前开展的传感器性能校准的研究，未来在航空领域，我国传感器的性能校准发展主要分为以下几个方向：

1) 复杂环境条件下校准方法的标准化、数据化

在传感器校准方法的发展中，标准化是首要考虑的，它是组织传感器生产的必要条件，缺少标准就无法普适。在航空领域，建立复杂环境下的传感器性能

年就摒弃了传统低温环境下的压力传感器校准方法，利用氦气压力标准源供气，在实验室模拟了传感器的实际使用温度，实现在恒温试验小室中压力的调节及保压；同时采用液氮和液氢低温介质作为冷源，实现试验小室的换热平衡，最终形成了一套适用于低温压力传感器，温度范围为 20 ~ 200 K，低压试验工位为 0 ~ 21 MPa、高压试验工位为 21 ~ 40 MPa 的实验室校准装置，如图 8 所示，大大提高了低温压力测量数据的可靠性、准确性和溯源性。

为提高传感器测试结果的准确性，更新现有的校准方法、开展现场校准和研制多参数环境校准方法是国内普遍采用的三种思路。实践证明，这几种思路均具有较强的可操作性，并且已经取得了一定的成果。其中，多参数环境校准方法的研制工作主要研究对象

校准规范,首要工作目标就是整理、分析、总结不同飞机系统、不同部位、每一物理参数传感器的典型工作环境,以现有的常规性能校准规范为基础,建立面向传感器的单参数环境条件模型,并由单参数环境条件模型逐步发展至双参数以及多参数的复杂环境条件模型,最终形成完整的适用于传感器性能校准的环境条件规范。

对于飞机而言,数据化是指将飞机系统中的每一种环境参数量化后,建立对应的环境条件子集合,各个子集合可以执行单一调用和嵌套组合调用两种模式,最终形成一套全面的、系统的、适用于传感器性能校准的标准环境条件模型数据库。标准环境条件模型数据库的建立不仅可以直观有效地为不同机型上的任一型传感器提供更接近实际工作环境的校准环境条件,同时可以根据未来传感器工作环境的变化灵活地做出修正,为新型传感器的研制提供技术参考。

2) 传感器技术指标的完整化、规范化

我国航空用传感器的生产厂商众多、生产质量参差不齐,同一物理参数的传感器的技术指标条目简单,无法为飞机设计人员提供可靠的技术支持。传感器技术指标的完整化是指根据传感器的实际工作使用环境,包括传感器的敏感环境参数在内,分析可能影响传感器性能的综合环境因素,确立传感器的研制和性能校准过程中所需的全部技术参数。

规范化是指根据传感器性能校准的全部技术参数,为每一个技术参数建立对应的技术规范,重点规范传感器敏感参数的各项技术指标,主要规范其他环境影响下传感器的性能变化量。传感器技术指标的完整化、规范化,可以有效评估不同环境因素对传感器性能变化的影响量,从而提高传感器在复杂环境下测试数据的可靠性。

3) 校准方法的综合化、智能化

为响应未来航空领域传感器测试技术智能化、网络化的发展趋势,以常规的校准方法为基本框架,结合标准环境条件模型和传感器技术指标规范,采用新的原理和构思,利用新的材料和加工方法,设计研制不同物理参数的传感器在不同环境条件下适用的性能校准装置,并建立与之适应的校准规范。

当校准装置的研制难度较大或研制成本较高时,采用以机器学习为主、试验验证为辅的手段,建立传感器的实际工作环境仿真模型,模拟传感器在对应环

境条件下的校准过程,经试验验证后,形成完善的在线校准程序,执行实时校准、自动测试、自动补偿的功能,从而实现传感器校准方法的智能化。

4 结束语

近年来,我国的传感器技术虽然得到了大幅度的发展,但与国外相比,仍存在明显差距,多种先进的传感器技术被国外限制出口。本文以复杂环境下传感器的性能校准的需求为出发点,对国内外在传感器性能校准上的研究成果进行了分类总结,并结合我国航空工业的发展趋势,提出了未来传感器性能校准的发展方向,为保证我国传感器技术的发展提供有效的技术保障。

参考文献

- [1] 航空测试技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [2] Marcus V. Sensor Calibration for Calculation of Loads on a Flexible Aircraft [C]//International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, 2015.
- [3] Mallaun C, Giez A, Baumann R. Calibration of 3 - D Wind Measurements on a Single Engine Research Aircraft[J]. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 2015, 8(2): 1731 - 1785.
- [4] Dušan N, Aleš J, Marian H, et al. Intelligent Real-time MEMS Sensor Fusion and Calibration[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(19): 7150 - 7160.
- [5] 王玉芳. 航空发动机压力计量测试的发展趋势[J]. 计测技术, 2012, 32(S1): 23 - 25.
- [6] 张宝珍, 王萍. 国外先进测试与传感器技术发展动态[J]. 航空科学技术, 2012(1): 13 - 15.
- [7] 魏元, 王新, 徐岱. Gardon 式圆箔热流传感器减振抗冲击和耐高温性能优化[J]. 计测技术, 2012, 32(6): 46 - 49.
- [8] 何晨光, 李明辉, 王军枫, 等. 高温、高压、腐蚀环境中温度传感器的研制[J]. 材料与焊接, 2005, 26(4): 10 - 12.
- [9] 张建斌, 史玮强. 用于低温压力传感器校准的低温工作环境的研制[J]. 计量技术, 2016(7): 51 - 54.
- [10] 董雪明, 田阳, 马博禹, 等. 大 g 值条件下加速度计温度系数校准装置研制[J]. 计测技术, 2009, 29(6): 32 - 35.
- [11] 赵俭, 荆卓寅, 李亚晋. 高温气流温度传感器测温偏差关键影响因素分析[J]. 航空发动机, 2017, 43(3): 78 - 82.
- [12] 陈璐. 冲击综合自动校准系统的虚拟仪器软件实现[J]. 计测技术, 2013, 33(S1): 29 - 33.
- [13] 杨明君, 龚伟. 线位移传感器的现场校准[J]. 计量、测试与校准, 2013, 33(5): 60 - 62.

- [14] GJB 150. 24A - 2009 军用装备实验室环境试验方法第 24 部分: 温度 - 湿度 - 振动 - 高度试验[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2009.
- [15] 李园, 郝晓剑, 周汉昌. 蓝宝石光纤高温传感器抗冲击性能的测试研究[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(2): 330 - 332.
- [16] 王梦楠, 袁玉华, 曲继和. 高温微压力传感器校准实验系统的研究[J]. 测控技术, 2014, 33(11): 146 - 149.
- [17] 胡立荣, 王东方, 兰玉岐. 低温压力传感器校准系统研制与应用[J]. 低温工程, 2013(4): 60 - 64.

基金项目: 航空科学基金(2018ZD44008)

作者简介



施春英(1991 -), 女, 助理工程师, 硕士, 研究领域主要包括材料动态力学行为和设计、冲击校准与测试技术。

2017年毕业于中国科学技术大学近代力学系, 同年到航空工业北京长城计量测试技术研究所工作至今。



李程(1972 -), 男, 研究员, 硕士, 研究领域主要包括动态压力校准与测试技术、动态信号数据采集及处理、激光干涉的应用技术。

1996年毕业于沈阳航空工业学院机械设计与制造专业, 同年到航空工业北京长城计量测试技术研究所工作至今, 2006年北京航空航天大学控制工程专业工程硕士毕业。主持承担了“九五”、“十五”、“十一五”、“十二五”期间的多项科研课题以及我国载人航天首次空间交会对接地面综合试验中的六维力校准的难题。获得国防科技技术二等奖一项、三等奖一项, 2012年上海市科技进步一等奖, 集团科技技术一等奖三项、三等奖二项, 三次荣立集团公司个人三等功。授权发明专利5项, 发表学术论文10余篇。