

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.01

动态计量技术发展中的几个关键问题

杨军, 张力, 李新良

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 经过几十年的发展, 动态计量技术已经初见成效。但由于工程动态测量的复杂性, 现有计量技术在理论框架、计量特性表征、工程测量应用等方面表现出其局限性, 其未来发展方向是一个值得研究探讨的问题。针对面向工程应用的高精度动态测量需求, 本文从动态测量全技术链的角度对动态计量技术进行全面审视, 结合国内外相关研究情况, 探讨分析了定义与范围、量值复现与溯源、校准方法、测量中的应用方法等几个关键问题, 从研究分析思维方式、技术方法创新要求、深层次开放合作等方面给出建议, 以期为未来发展方向提供一些借鉴。

关键词: 动态校准; 工程测量; 可溯源性; 校准方法; 发展方向

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0008-14

Several Primary Problems in the Development of Dynamic Metrology

YANG Jun, ZHANG Li, LI Xinliang

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

Abstract: Dynamic metrology has achieved initial effects after decades of development. However, due to the complexity of engineering dynamic measurement, existing metrology technology shows its limitations in terms of theoretical framework, characterization of metrological characteristics, and application in engineering measurement, and its future development direction is a problem worthy of study and discussion. Aiming at the high-precision dynamic measurement requirements for engineering applications, dynamic metrology technology is comprehensively reviewed from the perspective of the entire dynamic measurement technology chain, and several primary problems are discussed and analyzed combining domestic and foreign relevant researches. The problems include definition and scope, value reproduction and traceability, calibration method, and application method in measurement domestic and foreign. Suggestions are given from the aspects of thinking mode of research and analysis, requirements of technology and method innovation, and deep-level cooperation. These analyses are expected to provide some reference for the future development direction of dynamic metrology.

Key words: dynamic calibration; engineering measurement; traceability; calibration method; development direction

0 引言

从冲击动力学测量中最初出现“dynamic measurement”这一名词, 到二十世纪六七十年代开始与静态计量相区别的动态计量技术开始发展, 到上世纪末, 由于国防工业上的需求推动, 美国与前苏联(俄罗斯)在该技术领域一直处在发展的最前端, 研制了各种实验室标准和专用装置, 组织了多次全国性或国际性动态计量学术会议, 重点解决动态计量有无问题。从二十世纪九十年代开始, 欧洲各国开始重视动态计量, 在EURAMET(欧洲国家计量机构协会)的平台下, 借助于国防、汽车等工业需求的推动, 以解决测量溯源问题为主要特征, 技术发展比较迅速, 成为国际动态计量技术研究的热点区域。

随着我国高端军民装备的自主研发力度持续加强, 为满足工业领域提出的参数更全、范围更宽、准确度更高的动态测量需求, 不仅是先进的动态测量传感器与仪器发展得到广泛重视, 为仪器与测量数据质量提供保障的动态计量技术也受到国防工业系统与国家质检系统的极大重视, 成为计量技术研究的热点, 研制了大量计量标准设备。但在以实验室计量标准为主体、参照静态计量模式的现有动态计量技术体系在解决实际工程高精度动态测量问题时遇到了难以克服的障碍, 无法适用动态测量的复杂性。我国动态计量技术表面繁荣之下正面临如何有效高效发展的问题, 遇到理论框架制约、技术手段有限、应用导向不明等困扰。为了更好的为我国工业发展服务, 我国动态计量技术未来发展方向问题亟待解决。

本文将以力学、热学量动态测量为例对实际工程中的动态测量的复杂性进行分析,结合国际行业发展相关情况与一些典型计量案例,试图从动态测量全系统与全技术链的角度对动态计量问题进行讨论分析,梳理定义与范围、量值复现与溯源、校准方法、测量应用方法等几个关键问题,以期为推进动态计量技术发展、提升动态计量工程价值提供一些借鉴。

1 技术发展背景

1.1 动态测量需求

工业装备在研制试验、使用与维护中需要进行大量的动态参数测量。

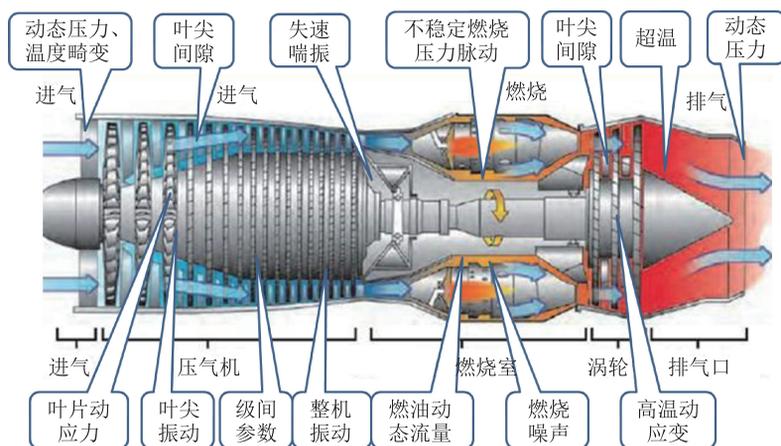


图1 航空发动机试验中的动态测量

2) 装备关键性能提升与评价

装备高精度反馈控制、高效毁伤效能评价、动力系统性能评价等都离不开各种动态参数的高精度测量,如:疲劳试验往复力、数字化加工切削力、机器人关节多分量动态力都是设备运行中关键的反馈控制参数;爆炸试验中爆炸冲击波超压测试是毁伤与防护效能评价的最重要手段。

在民生领域,同样面临各种动态测量需求,如在人体健康的检测监控中就存在血压、呼吸压、心脑电、运动关节力、足底压力等动态参数;建筑的抗风抗震能力评价试验中需要进行脉动风压、动态力、振动等测量。

随着我国高端装备研制从仿制为主转向以自主创新为主,航空航天、高铁等先进新型军民装备的研制需要自主设计分析和越来越多的试验验证,装备智能化发展也对运行中的反馈控制提出更高要求。在这些试验与运行控制中,需要进行大量关键参数的动态测量,这些参数往往比静态参数更能反映事物的本质与

1) 装备可靠性试验与监控

由于目前军民装备设施静强度、静力学设计与试验均比较成熟,装备可靠性问题大部分来源于动载荷,如车辆运行中动疲劳导致的传动轴断裂,需要进行动态参数监测测量;汽车等各种抗冲击试验、吸能试验也需要进行动态参数测量;在桥梁、武器装备等结构损伤监控中,一些参数的瞬态变化特征是诊断的重要依据。

典型的是航空发动机试验,测试参数70%以上是动态的,如图所1示,覆盖从进气道、压气机、燃烧室、涡轮一直到排气口,涉及的动态参数有动态压力、动态温度等流体参数,也有振动、动态应变等结构参数。

细节,因此越来越受到重视。其中包括:

1) 一些以前试验中不需要测的动态参数,新装备、新设计以及对性能的深入研究分析需要进行测量,如高铁车钩碰撞瞬态载荷等;

2) 一些动态参数在新装备及改进装备试验中测量范围要求更宽,如动态压力测量需求从中频中低压扩展到真空微小动态压力以及高频脉动压力测量;

3) 还有大量以前进行了测量的动态参数,当时对准确度要求不高,现在由于自主研制过程中分析的需要,数据准确性明显提高,如各种装备结构振动监测等;

4) 机载车载设备检测的大多是静态参数,但现在越来越多的动态参数用于装备运行监测或控制,如装备状态监测动态应变等。

可见动态测量是装备自主研制精细化过程数据的越来越重要的来源。

1.2 国内外技术发展态势

动态计量是高精度动态测量的必然要求,其发展

伴随动态测量要求与技术进步主要有以下几个阶段：

1) 从十八世纪欧洲针对工程试验开始提出动态测量要求，一直只是局限在工程测试的范围，没有计量行为的实施；

2) 上世纪六十年代以来，动态校准技术得以发展，以保障传感器/仪器动态测量的可靠性，以解决动态校准有无问题为主要目标，研究重点是如何设计各种动态激励源以复现所需的动态量值；

3) 上世纪八九十年代以来，在计量标准上各动态量值如何溯源到基本量以保证量值统一可靠成为研究重点之一，以振动冲击等运动参数为代表的机械量正逐步解决量值溯源问题，动态计量标准设备得到极大的丰富。

本世纪以来，动态测量中的计量问题进一步受到社会的重视。如2016年国际计量日主题为“动态世界中的计量”；航空工业北京长城计量测试技术研究所(航空工业计量所)提出的“面向工程应用的高精度动态测量”入选2018年中国科协60个重大前沿技术与工程难题之一，其提出的核心问题就是如何基于动态计量对动态测量数据进行补充修正与可靠评价^[1]。

欧洲相关国家计量机构对质量引出量(动态压力、动态力、动态扭矩)、三轴振动、多分量力的可溯源动态标准进行了大量研究，走在世界的最前沿。他们还特别重视动态计量方法的研究，联合传感器生产商和使用单位以EUROMET(欧洲计量联合组织)为平台进行了大量校准建模方法与动态测量不确定度分析方法研究。从2006年开始至今，EUROMET还主办了11届“Workshop on The Analysis of Dynamic Measurements”^[2-4]，向欧洲为主的全世界动态计量技术研究工作者提供了一个非常好的交流平台。欧洲在相关研究中非常重视与工业的结合和工程应用。如正在实施中的EMPIR项目18SIB08 ComTraForce“Comprehensive traceability for force metrology services”^[5]中试图通过静态力与动态力的校准以及现场的建模解决力试验机的量值溯源问题。

我国动态计量技术研究一直以航空工业计量所为代表的军工计量技术机构为主，在相关渠道的支持下研制了大量动态计量标准装置，部分装置设置达到国际领先水平。近年来随着民用装备的发展需求日益显著，在国家相关规划与项目渠道中，国家及地方相关计量研究机构明显加大了动态计量技术研究力度。航空工业计量所从2002年开始与德国联邦物理研究院PTB联合主办了6次动态计量技术双边研讨会，并于

2019年在北京成功举办了第一届动态测量技术国际研讨会。但这些研究中绝大部分都是关于计量标准研制的，即使有少量与应用对象结合的研究，也大多是简单的便携式现场校准。

从国内外相关技术发展的对比来看，核心区别在于“测量/计量”。欧洲的动态计量技术研究围绕的是“动态测量”，服务更广泛的对象而不单是仪器，目标是工程测量的量值及其不确定度；而我国的相关研究是在参照静态计量的传统框架内，长期局限在参数的量值和仪器特性的计量。欧洲的动态计量技术研究是硬件(装置)与软件(方法)并重，特别重视与应用对象的结合；而我国的相关研究更重视硬件研制，方法研究比较少，与应用对象的结合非常少。这样造成的结果就是：我国动态计量实践工作的结果输出往往只是一纸证书(检定或校准证书)，而真正对工程测量数据质量提升提供有效支撑的非常少。

因此，为满足我国工业装备快速发展的需求，动态计量技术发展方向需要进一步审视，发展路径需要进行一定调整优化。这就要求对动态计量相关的一些基本问题和关键问题进行分析，以支撑动态计量技术的健康高效发展。

2 关键问题分析

2.1 基于技术链的问题分析

为了明晰动态计量技术具有什么样的基础问题与关键问题，需要从动态测量的全技术链结合动态测量的特性进行解析。

首要的一个基本问题是“动态计量的定义与范围”。定义与范围关系到“是什么”、“干什么”，是整个方向研究的基础，但行业一直没有形成广泛共识。

高精度工程动态测量实现的过程简化描述可包括动态测量仪器、动态校准、动态测试应用等三个重要过程，如图2所示。在整个过程中与计量相关的关键问题包括动态量值复现与测量溯源、动态校准方法与应用方法。

动态量值复现是动态校准实施的基础，对于不同于静态校准的更加复杂的动态校准，需要考虑校准复现的对象是什么、采取什么样的技术手段去实现满足要求的激励源。

计量要求复现的量值准确可靠统一，可溯源。但对于变化的参量，传统的静态测量溯源方法是否还可用？能否有新的技术手段来解决高动态参量计量标准溯源问题？

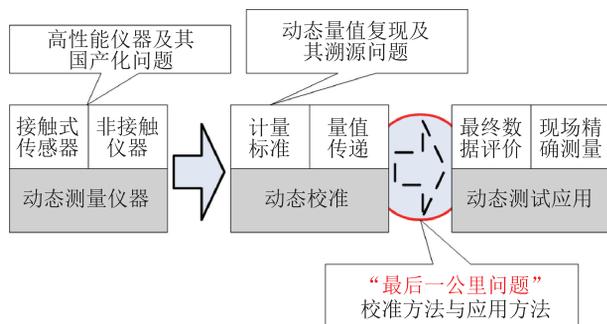


图2 典型的高精度工程动态测量实现过程

现有的动态校准方法得到的校准结果能否真实的完整的表征传感器系统/仪器在工程现场的计量特性? 计量保障的对象是传感器/仪器还是工程测量数据? 表征的方式与指标是否合理? 是否可用? 能否支撑传统的传递标准进行量值的层级往下传递?

动态计量的目的只是合格性评价还是支撑高精度动态测量? 面向高精度动态测量, 动态校准的结果与数据如何用于提升测量精度对结果进行合理的测量不确定度评价?

以上问题有些是动态测量面临的个性问题, 如动态量值复现、动态测量溯源; 有些是工程应用中的问题, 具有综合性, 不仅仅是动态计量面临这样的问题, 如校准方法、应用方法。下面将对这些关键问题进行详细讨论分析。

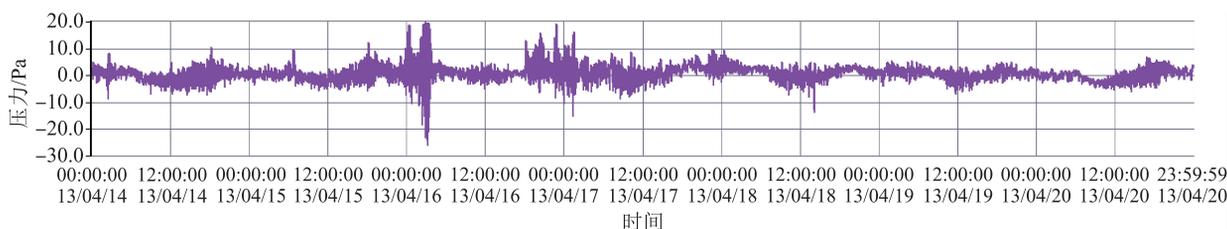
2.2 动态计量定义与范围问题

讨论动态计量的定义之前需要对动态测量的定义进行设定。但行业内对动态测量的定义有不同的理解。“动态测量就是测量随时间变化的量”或类似的表示是传统的定义, 也被大多国内外教程文献尤其是国内计量行业所采用。但随着技术的发展和人们对实践案例的进一步认识, 对动态测量的定义有了不一样的变化, 如:

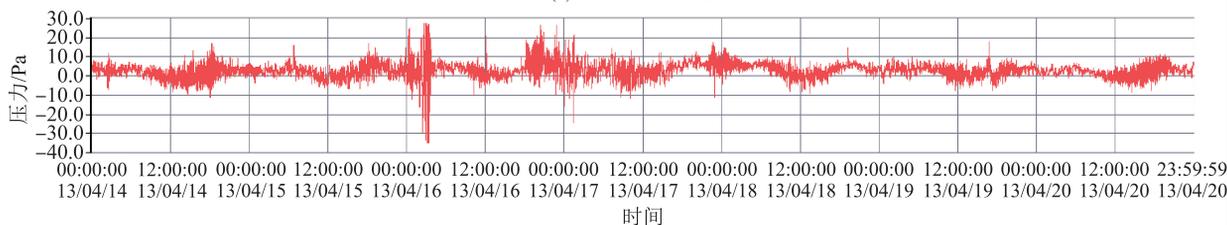
1) Rolls-Royce 公司在相关报告中提出: “We treat measurements as “dynamic”, when the rate of change of the quantity value impacts the Metrology. Therefore, a measurement system with infinite bandwidth, which faithfully reproduces amplitude and phase of the parameter, is not dynamic! However, a system, measuring changes occurring over several hours may be dynamic, if it’s bandwidth is insufficient for the task”^[6]。

2) NPL 的 T J Esward 等人提出“Dynamic measurement, where physical quantity being measured varies with time and where this variation may have significant effect on the measurement result and the associated uncertainty.”^[7]

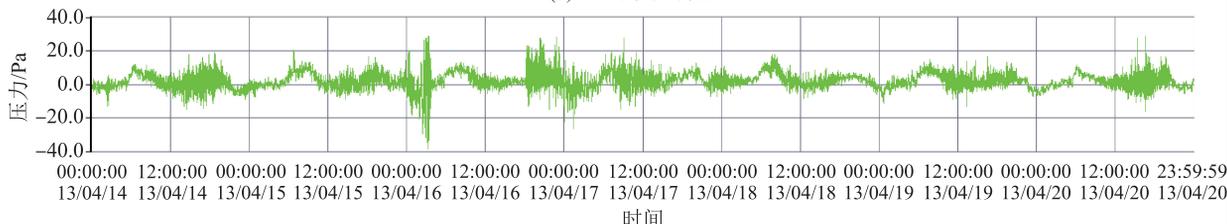
这两种定义有类似之处, 均在传统定义的基础上增加了类似的约束, 即量值的变化要对测量结果产生影响, 否则不能称作动态测量。这种约束是非常有价值的。比如对于大气压测量, 如图3所示。大气压力



(a) 219号次声传感器



(b) 227号次声传感器



(c) 239号次声传感器

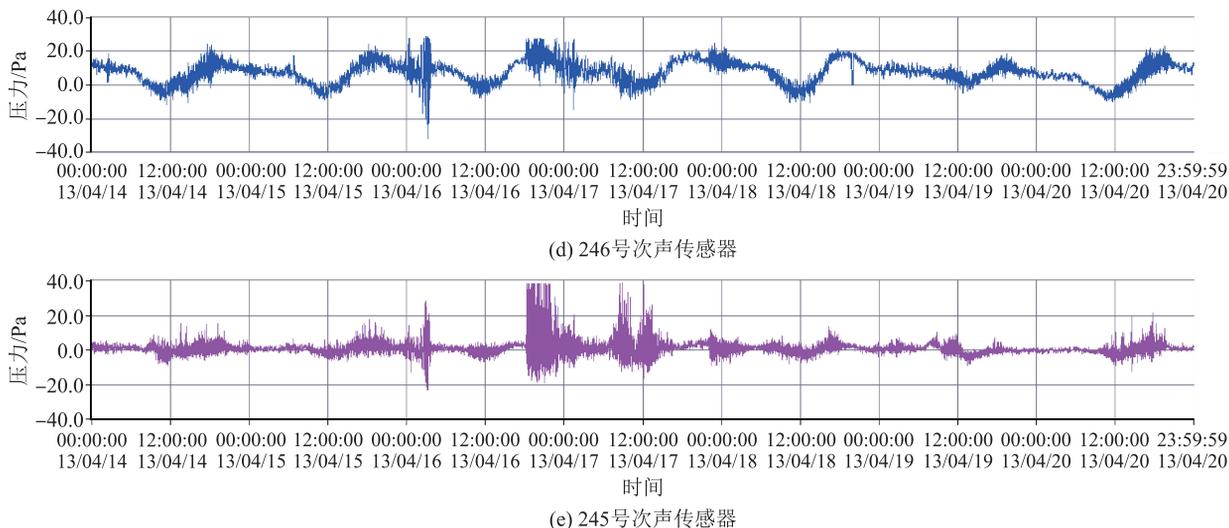


图3 不同次声传感器测到的次声与大气压昼夜变化

在昼夜之间产生明显的往复变化，这种变化非常缓慢，对于一般的大气压力计而言，大气压的昼夜往复变化测量不能称之为动态测量，但对大气压上叠加的次声信号的测量会存在很大的误差，是典型的动态测量^[8]。而对于部分专用的不能进行静态测量的次声传感器而言，大气压的昼夜往复变化测量又是一种动态测量，存在显著的测量误差。

但这两种定义尤其是 Rolls-Royce 公司的定义也具有其局限性，如它们把动态局限在随时间变化，量值随空间或其它量变化时，测量方法及影响也有显著的动态测量特征。由于随时间变化的动态量测量更具有普遍性，本文将以随时间变化的动态量测量为讨论分析对象。另外，它们把动态测量局限在被测量自身发生变化，不能覆盖工程实践中存在不少的动态方法测量静态量的情况。如构件的转动惯量测量常采用谐振法，在测量过程中，被测量是不变的，但采用的方法以及相应的数据处理方法均具有显著的动态特征，并将影响到结果和不确定度。再如太空中宇航员质量测量^[9-10]，由于缺少重力，谐振法与加速度法是太空中宇航员质量测量的两种典型方法，如图4所示，但它们的测量处理方法和不确定度来源等具有显著的动态特征。

同时，在工程实际中，由于自身或噪声等原因，很多被测量存在周期性动态变化，但测量目的可能只是获取平均值/稳定值，大部分情况下只考虑静态测量，但在部分特殊情况下可能产生额外的误差，如图5所示，由于采集等环节造成的信号截取，对平均值测量引入不确定性。这时不仅需要查找其原因，还需要

考虑滤波甚至机械滤波等手段，成为一个复杂的动态测量问题。

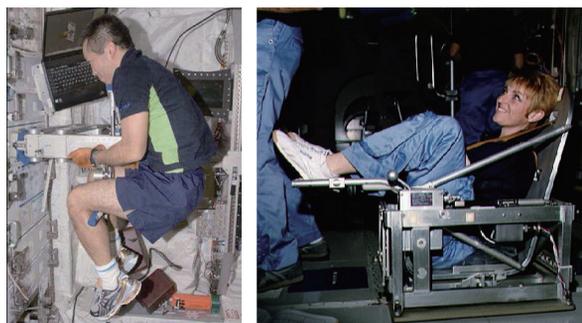


图4 两种典型的太空中宇航员质量测量现场

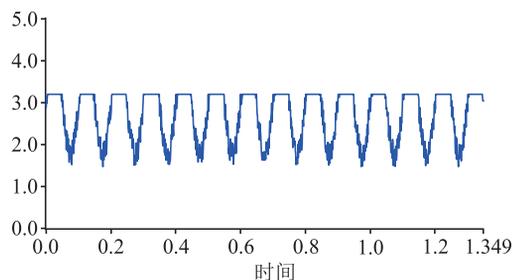


图5 存在周期性变化和信号截断的平均值测量问题

可见影响动态测量结果及其不确定度的不仅有其使用的传感器系统/仪器，还有被测的对象信号、测量目的、测量方法、测量不确定度要求等。

同时动态测量具有显著的因果性特点，即测量结果不仅取决于当前测量值，还受过去测量值(或)及其/或其导数值(速度值或梯度值)显著影响。这是与静态测量本质性的一个区别。

基于以上讨论，对动态测量定义做以下描述：“动态测量，即被测量或其关联量存在变化，而且这种变化可能对测量结果及其不确定度产生显著影响。”

而对于动态计量，NPL 的 T J Esward 等对其技术内容进行如下描述^[7]：

- 1) Dynamic calibration methods for various quantities and measuring systems—校准
- 2) Methods for transferring results of dynamic calibrations to measurements of interest —传递
- 3) System analysis of complex measurements —分析
- 4) Optimization of measuring systems —优化
- 5) Dynamic correction of time-dependent measurements —修正
- 6) Evaluation of time-dependent measurement uncertainty —评估

可见其认为的动态计量覆盖的范围是非常广的，动态计量的最终目的是通过优化与修正提高动态测量准确性并进行评估。国内通常进行动态计量技术研究所主要涉及其中前两项。从服务工业技术发展需求角度出发，这样的描述显然更加全面合理，值得我国相关技术研究及规划工作借鉴。

2.3 动态校准表征方法问题

静态校准方法比较成熟统一，对于主要的线性系统，通过校准得到传感器系统/仪器的线性测量方程以及非线性、迟滞等表征系统计量性能的指标，校准的结果也很方便地用于测量数据的校正和不确定评价。但动态校准方法还远不够成熟，表 1 显示了现在动态校准的主流方法得到的结果及其应用，可见其有限的应用是基于静态测量的框架，部分动态指标只用于合格性评价，这也是现在很多的动态校准工作作用只停留在证书上的原因之一。

表 1 现在主流动态校准方法

方法	校准结果	应用
阶跃	幅值灵敏度	很少使用
	上升时间/时间常数	定性评价合格性
	谐振频率	定性评价合格性
正弦	离散有限点幅频特性与相频特性	参考频率幅值灵敏度用于测量，其它用于误差评估
脉冲	幅值灵敏度	准静态

但工程动态测量非常复杂，如何真实完整的表征工程现场动态测量的性能并能有效的用于测量数

据的质量提升和评价是一个必须面对的问题，面向工程应用的高精度动态测量需要动态校准方法的重改进。

典型的动态测量信息流如图 6 所示，除了一般意义上的传感器系统(传感器 + 放大器/调理器)，还包括现场结构等对被测物理信号的传递、电信号的采集与分析等。一般动态校准主要针对传感器系统尤其是传感器，但各个环节都可能影响动态测量数据质量，甚至在某些测量场景中，传感器系统都不是主要影响因素。下面依据信息流来讨论动态测量的复杂性以及对动态校准方法的特殊要求。

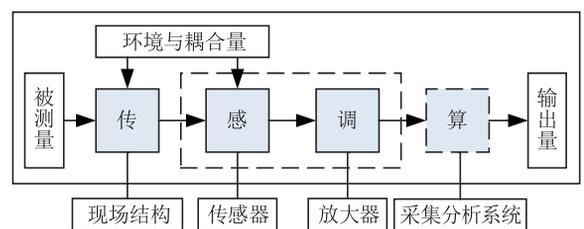


图 6 典型动态测量信息流

1) 被测对象非常复杂

动态量可能叠加在非常宽范围的静态量之上，动态时域波形和频域成分非常复杂，被测动态量所依附的介质、材料或结构各种各样。

2) 测量环境非常复杂

装备试验中被测介质或结构材料以及测量仪器常处在非常复杂的环境中，如高温高压气流环境在各种发动机试验中非常常见，这些复杂的力、声、热、光和电磁环境可能是稳定的也可能是动态变化的，都会对动态测量结果造成影响。

3) 测量仪器特性非常复杂

传感器系统/仪器单输入低阶线性系统的简化对于高精度测量已经不能满足要求，环境量、干扰量以及多分量参量的耦合使测量系统往往成为多输入系统，如压力受感部、温度传感器、流量计、结构力/矩载荷测量系统、电离室型剂量计等，测量过程同时伴随着一些复杂的物理化学过程，动态响应问题与多输入问题交叉，传感器系统的响应非常复杂。如图 7 所示，某型压阻式压力传感器经过激波管校准，分析得到的固有频率与阻尼比系数随压力存在一定的变化^[11-12]。

4) 测量现场非常复杂

测量系统与现场对象与机构等的组合可能使实际动态特性明显改变，同时受限于现场安装情况或试验分析需要，部分测量位置上难以进行传感器的有效布

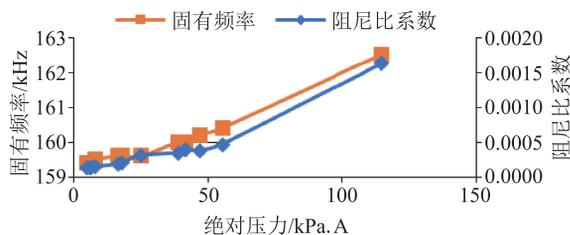


图7 某型压阻式压力传感器激波管校准分析结果

置,通过其他测点的分析方法会受传递路径和现场实际干扰等因素的影响,导致实际测量结果不能准确反映被测位置上的动态变化情况。整体来说,动态压力与动态力/扭矩的计量要比振动冲击加速度更加困难,因为动态压力与动态力/扭矩测量受到传递路径或现场结构严重影响。如图8所示,压力受感部中的引压管腔往往成为制约动态性能的主要因素^[13-14]。

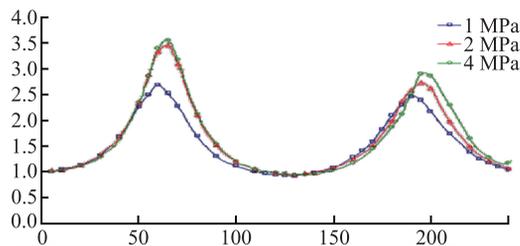


图8 某引压管腔在不同平均压力下的幅频特性

可见,面对以上动态测量复杂性,表1所示的校准方法是无法满足工程需要的,主要表现在以下几个方面:

- 1) 校准量值复现有限性与工程测试状态多样性之间的矛盾;
- 2) 定性评价现状与定量分析需要之间的矛盾;
- 3) 离散校准数据与动态修正数学模型需求之间的矛盾。

针对以上问题,研究人员一直在试图对校准数据与结果通过模型来描述,尤其是近年来以PTB为代表的欧洲计量机构,进行了大量理论分析工作和针对具体参数传感器的试验研究工作。这些工作包括:

- 1) 基于单输入线性时不变系统(LTI)的理论和参数建模的方法^[15-21],这些方法中既有纯数据建模的方法,也有模型参数辨识的方法;
- 2) 基于参数辨识的振动冲击加速度计和压力传感器校准建模^[22-25],这些研究中通常把加速度计和压力传感器简化为单自由度二阶系统;
- 3) 力/扭矩动态校准装置系统建模与传感器模型本构^[26-30],研究中通常把传感器简化为质量弹簧系统,

而且把装置与传感器一起进行多体动力学分析;

4) 以疲劳试验机为代表的力/扭矩动态测量模型重构与惯性力/矩修正^[31,5]。

如PTB为了实现对扭矩传感器的动态模型本构,除了研制了正弦扭矩校准装置,还构建了转动惯量试验测试系统、扭转刚度试验测试系统、旋转阻尼试验测试系统等^[30],如图9所示。

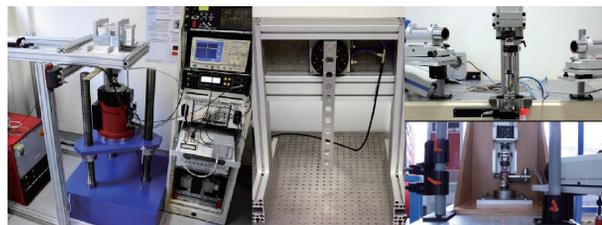


图9 PTB用于扭矩传感器动态建模的标准与装置

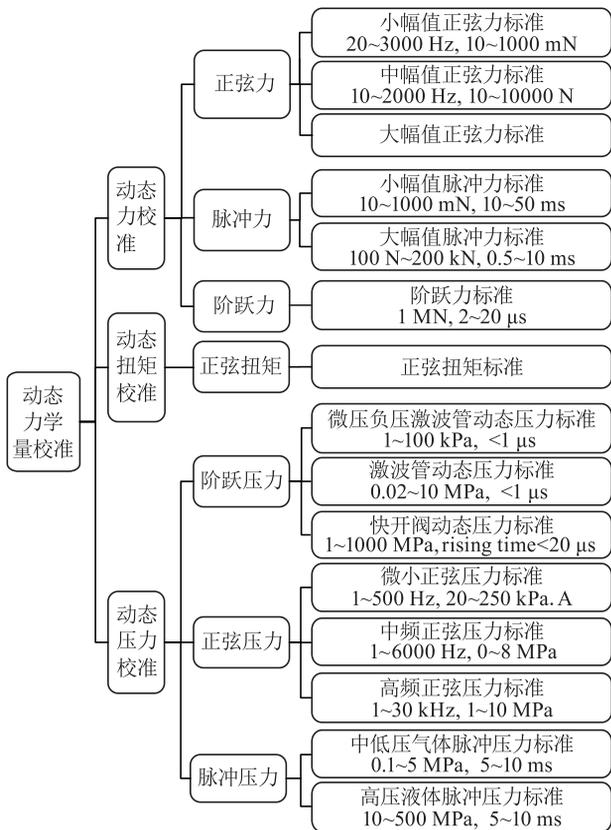
基于模型的动态校准是技术发展的趋势和应用的必然要求^[32]。通过实验室校准实现传感器或仪器的测量模型本构,再根据工程现场状况重构测量模型,是一种比较可行的技术路径,尤其对于动态力/矩等结构参数。但对于压力、温度、流量、湿度等动态测量主流传感器系统,多输入特性影响更加显著,非线性/时变性等特性也可能有一定影响,因此需要进一步完善现有单输入线性时不变系统的理论框架,构建多输入系统以更加真实完整的表征现场动态测量系统。

2.4 动态校准量值复现与溯源问题

用于量值复现的动态激励源是动态校准实施的基本要求,但随时间变化使动态量值至少增加一个维度,这就决定了其复现普遍比静态量值复现更加困难,尤其是可控性差。

经过几十年的发展,研究人员研制了大量动态激励源,力学、热学量中有线振动冲击、角振动冲击、动态力/矩/压力/流量、动态温度/湿度、动态应变等。这些激励源主要涉及正弦、脉冲、阶跃三种波形,也有少量随机、方波等特殊波形^[33-34]。图10所示是航空工业计量所已经研制和正在研制的动态压力/力/扭矩标准装置,另外还有各种专用动态校准设备^[35-37],在动态压力与动态力两个参数,航空工业计量所复现的量值范围已经是世界上最全面的。

但在动态激励源设计的侧重方向上,工程实践中存在一种误区。部分研究人员认为动态校准应该尽可能复现工程测量对象的特征,这种观点在可实现性与可应用性方面存在以下问题:



- 1) 正如前文所述，工程动态测量的对象具有多样多变性，要复现其特征往往是非常困难的；
- 2) 复现的复杂的波形标准值的确定，即可溯源测量更加困难；
- 3) 复现有限状态的被测量值进行动态校准，其结果的可代表性需要质疑。

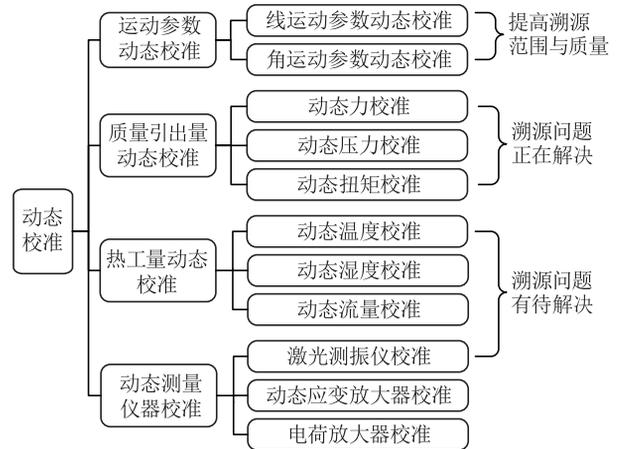
因此，动态激励源设计的一个重要方向是提高标准波形的可控性，从而有利于降低计量标准的不确定度和用于动态建模，对于复杂系统建模需要考虑基于机理分析的典型状态复现。

动态测量溯源问题在广义上是动态测量全技术环节的溯源问题，因此包含本文中涉及的所有技术环节。在这里指狭义的原级计量标准中的量值测量溯源问题，这是最终测量数据溯源的基础。

但动态计量标准的测量溯源问题同复现问题一样，与静态计量标准有着极大的差异，静态计量标准溯源采用的很多原理方法在动态计量中不再可用，如静态力所常用的静重式与杠杆式力标准机、静态压力所采用的静水压法、温度所采用的共晶点法等。

近三十年来国内外许多著名计量技术机构对动态计量标准的测量溯源问题进行了大量研究，尤其是运

动参数与质量引出力学量的动态校准。但由于技术难度与工业需要紧迫性的差异，在主要的力学、热学动态量中，不同类型的参量的溯源技术发展程度有非常大的差异，如图 11 所示。



随着激光干涉技术的发展，线振动冲击的原级标准发展迅速并得到广泛应用，角振动冲击也得到一定发展^[38-39]。

而采用激光干涉测量线加速度或角加速度，通过惯性力/力矩进行溯源成为动态力/扭矩原级标准的主要溯源方法^[40-47]。但动态情况下，惯性力/力矩计算中质量/转动惯量体的加速度/角加速度分布问题成为限制动态力/扭矩标准量程上限和频率上限的关键因素^[48-50]。新的打破现有原理框架的测量溯源方法有待探索。

动态压力测量在工程上应用非常广泛，计量标准研制受到重视，国内外研究的动态压力标准测量溯源方法类型非常多样，既有基于压力宏观定义的方法，也有基于气体/液体状态方法的方法，还有基于流体折射率、吸收光谱特性的全新方法^[51-61]，如表 2 所示。这些方法各自在一定范围内对动态压力测量溯源问题提供了解决方案，但由于流体压力参数的复杂性(如标准装置中的流固耦合、流热耦合等)，各种方法都存在一定局限性和待解决的关键问题^[62-63]，结合量值复现的技术手段优化，对现有方法进行精细化分析研究，以减小不确定度和扩展范围，是动态压力标准的测量溯源问题研究的一个重要方向。

而基于量子原理的动态力/压力可溯源测量方法开始被 NIST, PTB 等领先计量机构所关注，但相关研究还没有成果报道。

表2 国内外研究的动态压力标准测量溯源方法

测量方法	应用对象	溯源	研究机构	分类
F/S法	液体脉冲压力	基本量	芬兰计量院、航空工业计量所	宏观定义
静水压法	液体正弦压力	基本量	巴西利亚大学	
气体状态方程	次声、微小正弦	静压	英国计量院、航空工业计量所	状态方程
激波理论	气体阶跃压力幅值	静压	英国/法国计量院、航空工业计量所	
流体状态方程	液体阶跃压力	静压	韩国计量院	
气体折射率	正弦、方波压力、阶跃真空	基本量/静压	美国/日本/意大利计量院、航空工业计量所	流体物理属性
液体折射率	液体脉冲、正弦压力	静压	俄罗斯/德国计量院、航空工业计量所	
分子吸收光谱	气体阶跃压力	静压	美国计量院、航空工业计量所	

在振动冲击、动态力/扭矩/压力等力学量现有或在研的主流动态校准溯源方法中,激光干涉测量往往承担重要的角色,这时激光干涉测量如何溯源、计量性能如何评价非常关键,只针对电调制部分的电校准和针对系统的光调制模拟校准受到关注^[64]。

由于振动冲击、动态力/扭矩/压力等传感器常需要配合应变放大器、电荷放大器等适配器仪器使用,校准溯源工作需要考虑对这些放大器的影响,其校准研究工作也一直有相应的开展,阻抗匹配是校准中必须注意的问题^[65-68]。

动态温度/湿度/流量等热工参数计量标准的溯源问题更加困难,现在研究工作的目标主要还是动态量值复现,还没有成熟可行的测量溯源解决方案,其问题的解决可能也需要借助光学非接触手段或全新的测量原理。

2.5 动态计量工程应用方法问题

实现高精度动态测量不能仅仅满足于实验室对传感器系统/仪器有限指标的评价,而是对动态测量结果进行校正和评价。静态计量得到的线性方程可以非常直接的用于测量校正,更复杂的非线性方程也可以通过插值的方法方便的用于测量,而动态校准结果却很难这样直接用于工程测量。动态校准结果用于工程测量提高测量精度是一种典型逆运算,如图12所示,有时被称为动态测量信号恢复、动态补偿或动态修正等。

典型的动态校准建模过程是已知输入输出得到测量系统模型,而动态测量信号恢复/补偿修正的过程就是已知输出和测量系统模型反算输入。

动态测量补偿修正与动态校准建模一样,很长时间以来就是部分研究人员追求的目标^[69-72],其中补偿滤波器是研究最多的方法,并从传统补偿滤波器发展到人工智能算法,从时域、频域补偿到复合域补偿。

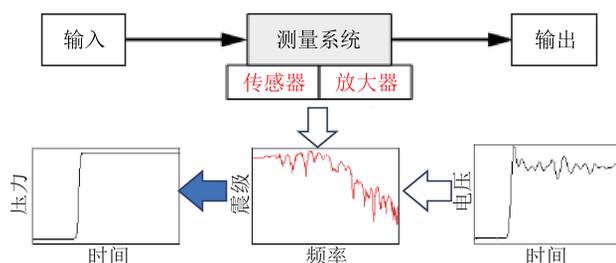


图12 动态测量信号恢复基本原理示意图

特别是本世纪以来,欧洲的计量技术机构进行了大量研究,包括:

1)综合数字滤波器用于动态信号离线修正,可应用于所有线性时不变系统^[17-18]。

2)针对线性时不变系统研究了补偿滤波器的设计方法,并能用于在线修正,但滤波器结构更为复杂^[19-20]。

3)动态测量分析中,针对线性时不变系统的各种数字反卷积算法,包括最小相位全通分解法、基于精确逆滤波器的异步时间反演算法、无限冲激稳定响应法、基于频域最小二乘拟合的有限冲击响应逆滤波器等,并比较分析了它们各自适合的分析对象^[21]。

但从这些研究情况来看,动态测量补偿修正是一项非常难的工作:

1)补偿修正算法在工程测量应用中的生存性必须提高,反卷积运算时造成的新发动态误差问题非常突出,其内在原因可能包括动态校准构建模型的可靠性、完整性不足,算法抗干扰能力不足;

2)在线补偿修正算法的设计更加困难,补偿修正后的数据更容易发散;

3)全频带全范围的补偿修正难以实现,研究工作应该有限目标和有限对象。

除了动态补偿修正共性方法外,具体对象物理机理分析与数学方法相结合的应用研究也应该是研究的重点,如PTB等针对疲劳试验机的循环力修正方法研究;NPL针对小卫星轨道修正中的推力精确控制问题研究微小动态推力测量建模和反卷积补偿^[73],图13显示了其频率域补偿仿真效果,有效扩展测量频带上限。

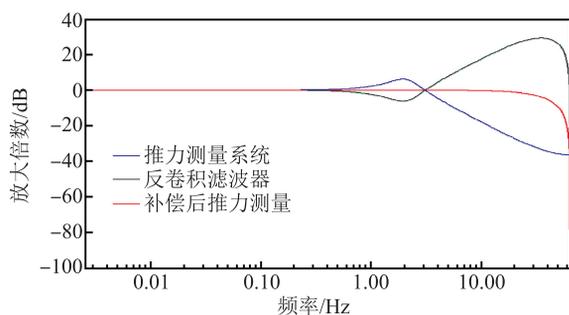


图13 NPL伽利略卫星推力测量反卷积补偿示意图

而对动态测量数据的测量不确定度评价是动态计量工程应用的另一个重要工作,更是贯通全技术链的一个工作,需要从计量标准、测量模型到工程测量数据全过程进行分析。

动态测量不确定度评价工作在国内一直没有受到重视,往往止步于计量标准的测量不确定度的评价^[74-75],或者到模型参数的不确定度^[76-77]。而欧洲计量技术机构对相关工作非常重视,蒙特卡洛法是研究的重点,近年来开展的研究工作包括:

1)从延迟误差、响应误差极限、渐进效应、频带效应、谱分布函数几个方面讨论动态测量误差的范围问题,给出估计模型和过程方法,定义了动态测量系统模型估计误差,由激励信号的误差经过动态测量模型传播等动态不确定度的扩散传播规律^[78-80]。

2)动态测量中如何有效运用蒙特卡洛方法,包括系统传递函数、系统误差函数、输入概率分布密度函数、不确定度传播关系、不确定度合成等^[81-82]。

3)把蒙特卡洛方法成功应用于动态测量分析实践中。如丰富和发展了紧固件给振动加速度校准带来的不确定度的估计理论与实践,把蒙特卡洛方法应用于锁定放大器的动态测量分析^[83]。

4)重视软课题的研究和应用推广,强调通过制定标准和软件来加强动态测量最终用户对动态校准的理解,从而推广动态校准及其应用^[84]。

动态测量不确定度评定是一个系统性全局性工作,蒙特卡洛等方法是一些复杂测量分析的必要工具,但

其有效应用的基础还是对测量机理、过程的充分认识和必要的基础数据,这方面还有相当多的研究工作有待开展。

在针对具体动态测量问题时,以上几个关键问题是相辅相成的。对定义与范围的合理判断是需要进行什么样的校准和怎么样的应用的前提;校准方法是标准量值复现的依据,复现动态波形的质量和测量溯源的精度又将严重影响校准方法实施的可行性与结果的可靠性;动态计量应用方法的实施离不开以上所有环节的支撑。

3 发展建议

综上所述,相比于传统的静态计量,动态计量面临的是新的对象和新的问题。为了有效保障支撑最终工程动态测量,动态计量技术发展研究需要思维模式创新、技术方法创新以及方式途径创新。

3.1 动态测量思维

从前面的动态测量定义讨论可知,工程测量很多是复合测量,一些静态测量中隐藏动态测量的问题,一些表面是动态测量的问题可能采用静态的方法就能满足工程的要求。总之,工程实践中很少存在纯粹的静态测量,以解决工程实际问题为目标,计量与测试相关人员都需要具备动态测量思维:

1)从事动态计量技术研究与实践的技术人员需要避免静态计量思维固化,这种思维固化的不利影响不仅会体现在计量标准研制上,也会体现到校准方法研究、校准实践数据分析处理各环节。静态计量是动态计量的基础和依据,但不能成为动态计量的禁锢,两者在技术研究上可以互相借鉴支撑,在应用实施上应该互相融合利用;

2)从事综合计量保障的技术人员需要具备动态测量的基本知识和思维方式,把静、动态计量的技术手段综合利用起来,把静动态计量的方法结合起来;

3)从事工程测试的技术人员也需要具备动态测量的基本知识和思维方式,并对动态计量的技术手段与方法有一定的了解,在测试系统选配、计量保障、现场改装、参数设置、数据分析等环节都需要考虑静动态复合的复杂情况。

3.2 技术方法创新

由于动态计量在理论框架、技术要求、应用对象等各方面的特殊性,技术人员需要全方位加强技术与方法的创新,以推动技术的发展与应用:

1)从动力学等物理机理出发进一步完善优化动态

测量理论体系,逐步形成多输入、非线性动态测量理论模型;

2)需求从测量原理上进行创新,以解决动态计量标准溯源问题;

3)实现工程实践中的高精度动态测量,需要从测量手段与测量方法两个方面共同推进,测量方法的优化创新需要更加深入的结合动态计量;

4)不管是校准建模、补偿修正还是测量不确定度评估,都离不开先进数学手段的应用,人工智能、数字孪生等给解决工程动态测量问题的全技术链研究提供了新的手段和机会。

3.3 系统分析思维

不管是工程现场动态测量问题还是实验室动态校准问题,设计、分析过程中都必须具备系统思维:

1)校准装置的设计、校准过程的实施与分析都需要把被校对象与装置综合进行系统考虑,因为动态信号的传递与转换中被校对象与校准装置往往互相耦合影响,尤其是动态力/扭矩以及流体动态参数;

2)动态计量的目的不只是评定传感器或仪器典型性能指标是否达到要求,更是为了保证最终测量数据的质量,保证的是全测量系统与全测量过程;

3)对于工程测量现场的建模、修正等工作,更需要对传感器系统/仪器与被测结构/对象进行综合系统考虑;

4)动态测量不确定度的可靠评价必须从全测量链展开,传感器系统/仪器计量性能的实验室评价只是影响最终结果不确定度的一个环节,甚至可能不是最重要环节。

3.4 广泛开放合作

对动态计量技术全方位创新、全系统研究,单由计量技术机构是无法完成的,需要广泛的开放合作:

1)新的动态理论框架与先进动态计量方法研究需要传感器/仪器厂商的直接参与以及科研院所的深度支撑;

2)动态计量的有效实施以及数据可靠分析需要应用单位与计量技术机构共同完成;

3)动态计量方法的推广应用以及相关标准规划的形成,离不开各相关机构的共同参与;

4)在欧洲 EUROMET 平台上,动态计量相关研究项目一直贯彻着计量技术机构与传感器/仪器厂商、高等院所、应用单位的多层次合作^[85-87],具有很好的参考价值;

5)由于历史的原因和利益分配等方面的问题,我

国的计量从管理与技术两方面都没有很好的融入产业链,计量往往承担着需要都不重要的角色,不同类型机构之间在动态计量技术研究合作方面往往是浅层次的,急需从机制、平台等方面全面推进研究合作。

4 总结与展望

动态计量技术经过几十年的发展,在技术与方法各方面形成大量的积累,顺应工业发展需求,更加受到行业的重视。但定义与范围、量值复现与溯源、校准方法、测量中的应用方法等几个相互关联的关键问题正严重制约着我国动态计量技术有效发展和工程应用。研究分析思维方式急需突破,关键技术与方法需要进一步创新,更深层次的开放合作有待加强。

紧迫的装备发展需求、可靠的多源渠道支持、丰富的工业应用场景是我国动态计量技术实现跨越式发展的机会。以工程应用为目标导向,以测量模型为基石,以测量不确定度为骨架,完善动态计量技术体系框架;打破传统静态计量在理论框架、思维方式、技术方法上的约束,充分结合动力学理论、量子等先进测量技术、人工智能等先进数学方法的最新发展,突破动态计量技术瓶颈。最终支撑工程现场精细化测量数据获取、工业装备高质量发展、制造强国战略纵深实施。

参考文献

- [1] 杨军. 面向工程应用的高精度动态测量[J]. 高科技与产业化, 2018(12): 32.
- [2] [DB/OL]. <http://www.french-metrology.com/publications/6th-workshop-dynamic-measurements/conference-workshop-2011.asp>.
- [3] [DB/OL]. <http://www.french-metrology.com/workshop/dynamic-measurement-workshop.asp>.
- [4] [DB/OL]. <https://www.inrim.it/ADM2014/>.
- [5] [DB/OL]. <https://www.ptb.de/empir2019/comtraforce/project/>.
- [6] Ruhm K H. Dynamic or Nondynamic-This is the Question[R]. 8th Workshop on Analysis of Dynamic Measurements. INRIM, Torino, 2014.
- [7] Esward T J, Elster C, Hessling J P. Analysis of Dynamic Measurements: New Challenges Require New Solutions[C]//XIX IMEKO World Congress. Lisbon, 2009.
- [8] Huang R, Zhang L, Yang J. Atmospheric infrasonic monitoring and analyzing of the infrasonic events before the 2015 nepel earthquake[C]//International conference on material, machanical and manufacturing engineering 2015. Guang zhou, 2015;

- 1355 – 1359.
- [9] Yan H, Luming L I, Chunhua H U, et al. Astronaut mass measurement using linear acceleration method and the effect of body non-rigidity[J]. *Science China*, 2011, 54(4): 777 – 782.
- [10] Fujii Y, Takita A, Wakata K, et al. Instrument for Measuring Body Mass of Astronaut[C]//2011 International Conference on Instrumentation, Communication, Information Technology and Biomedical Engineering. Bandung, 2011.
- [11] 杨军, 李程, 王维, 等. 双腔负压法用于激波管动态压力校准[J]. *计量学报*, 2012, 33(3): 240 – 243.
- [12] 李博, 黄楠, 杨军, 等. 介质与静压对激波管校准压阻式绝压传感器动态特性的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(5): 103 – 111.
- [13] 杨军, 樊尚春, 李程. 介质与压力对测压管道动态特性影响分析[C]//第十三届全国敏感元件与传感器学术会议. 太原, 2014: 625 – 629.
- [14] 李博, 张鹤宇, 杨军. 不同环境因素对引压管腔动态特性影响[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(10): 2159 – 2165.
- [15] Esward T J, Elster C, Hessling J P. Analysis of dynamic measurements: New challenges require new solutions[J]. *Proceedings of XIX Imeko World Congress*, 2009, 76(12): 2307 – 2310.
- [16] Hessling J P. Dynamic metrology—an approach to dynamic evaluation of linear time-invariant measurement systems[J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(8): 084008.
- [17] Hessling, J P. A novel method of dynamic correction in the time domain [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(7): 075101.
- [18] Elster C, Link A. Uncertainty evaluation for dynamic measurements modelled by a linear time-invariant system[J]. *Metrologia*, 2008, 45(4): 464 – 473.
- [19] Elster C, Link A. Analysis of dynamic measurements: compensation of dynamic error and evaluation of uncertainty[C]. *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing-ENS Cachan*, Paris, France, 2008.
- [20] Eichstädt S, Elster C, Esward T J, et al. Deconvolution filters for the analysis of dynamic measurement processes: a tutorial[J]. *Metrologia*, 2010, 47(5): 522 – 533.
- [21] Malengo A, F Pennecci. A weighted total least-squares algorithm for any fitting model with correlated variables[J]. *Metrologia*, 2013, 50(6): 654 – 662.
- [22] Link A, Täubner A, Wabinski W, et al. Calibration of accelerometers: determination of amplitude and phase response upon shock excitation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(7): 1888 – 1894.
- [23] Link A, Täubner A, Wabinski W, et al. Modelling accelerometers for transient signals using calibration measurements upon sinusoidal excitation[J]. *Measurement*, 2007, 40: 928 – 935.
- [24] Bruns T, Link A, Schmähling F, et al. Calibration of accelerometers using parameter identification—targeting a versatile new standard[C]//XIX IMEKO World Congress, Lisbon, 2009.
- [25] Matthews C, Pennecci F, Eichst? dt S, et al. Mathematical modelling to support traceable dynamic calibration of pressure sensors[J]. *Metrologia*, 2014, 51(3): 326 – 338.
- [26] Kobusch M, Link A, Buss A, et al. Comparison of Shock and Sine Force Calibration Methods [C]//XXIMEKO World Congress. Busan, 2012.
- [27] Coquelin L, Fischer N, Obaton A F. Parameter identification for dynamic calibration of force transducers using chirp excitations and assessment of the associated uncertainty [C]//8th International Workshop: Analysis of Dynamic Measurements, 2014.
- [28] Kobusch M. Investigation for the model-based dynamic calibration of force transducers by using shock forces[C]//IMEKO, South Africa, 2014.
- [29] Klaus L, Bruns T, Kobusch M. Determination of model parameters for a dynamic torque calibration device[C]//XXIMEKO World Congress, Busan, 2012.
- [30] Klaus L, Kobusch M, Bruns T. A Model-Based Approach for the Dynamic Calibration of Torque Transducers [C]//IMAC Conference and Exposition on Structural Dynamics. Springer, 2015: 61 – 71.
- [31] Kümme R. The dynamic calibration of force transducers by the comparison method[C]//14th IMEKO World Congress, Tampere, 1997, 3: 114 – 119.
- [32] Kobusch M, Bruns T, Franke E. Challenges in Practical Dynamic Calibration[C]//AMCTM, 2008.
- [33] Hjelmgren J. Dynamic Measurement of pressure—A Literature Survey[R]. SP REPORT, Bor? s, 2002: 34.
- [34] Hjelmgren J. Dynamic Measurement of force—A Literature Survey[R] SP REPORT, Borås, 2002: 27.
- [35] 李程, 杨军, 张炳毅. 基于差动式活塞原理的正弦压力发生器[J]. *计测技术*, 2014, 34(S1): 17 – 19.
- [36] 杨军, 范静, 李程. 非线性电感式压差传感器动态校准[J]. *计测技术*, 2011, 31(5): 15 – 18.
- [37] 李博, 杨军, 石玉松, 等. 不同校准装置对引压管腔动态特性校准[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(12): 2559 – 2568.
- [38] Täubner A, Martens H. Measurement of angular accelerations, angular velocities and rotation angles by grating interferometry [J]. *Measurement*, 1998, 24(1): 21 – 32.
- [39] Zhang L, Peng J. Primary Acceleration Calibration by Heterodyne Laser Interferometer and PXI Instrument[J]. *Sixth International Conference on Vibration Measurements by Laser Tech-*

- niques: Advances and Applications, 2004, 5503: 588 – 597.
- [40] Schlegel C, Kieckenap G, Glöckner B, et al. Traceable periodic force calibration[J]. Metrologia, 2012, 49(3): 224 – 235.
- [41] Medina N M, Robles J L, Oliva J V. Realization of sinusoidal forces at cem [C]//IMEKO 22nd TC3, 12th TC5 and 3rd TC22 International Conferences, Cape Town, 2014.
- [42] Medina N, Vicente J D. Force Sensor Characterization Under Sinusoidal Excitations[J]. Sensors, 2014, 14(10): 18454 – 18473.
- [43] Bruns T, Kobusch M. The New Impact Force Machine at PTB [C]//Proceedings of the XVII IMEKO World Congress, Dubrovnik, 2003: 263 – 267.
- [44] Zhang L, Kümme R. Investigation of interferometric methods for dynamic force measurement [C]//XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium June 22 – 27, 2003, Dubrovnik, Croatia, 2003.
- [45] Zhang L, Kume R, Täubner A, et al. Comparison of the laser interferometric system of dynamic force measurement with the PTB acceleration standard [C]//Sixth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques; Advances and Applications, Proceedings of SPIE, 2004, 5503: 20 – 29.
- [46] Yang J, Cao Y, Yin X, et al. Impulse force calibration with dropped mass and laser vibrometer [C]//IMEKO 23rd TC3, 13th TC5 and 4th TC22. May 30 – June 01, 2017, Helsinki, Finland, 2017.
- [47] Bruns T. Sinusoidal Torque Calibration: A Design for Traceability in Dynamic Torque Calibration [C]//XVII IMEKO world congress, Dubrovnik, Croatia, 2003.
- [48] Schlegel C, Kieckenap G, Kümme R. Application of a scanning vibrometer for the periodic calibration of force transducers [C]//XX IMEKO World Congress Metrology for Green Growth, Busan, 2012.
- [49] 王宇, 张力, 洪宝林, 等. 正弦力校准中降低质量块振动响应不均匀影响的设计方案[J]. 振动与冲击, 2010, 29(7): 228 – 231.
- [50] 尹肖, 张力, 王宇, 等. 动态力校准中力传感器端部等效质量测量方法研究[J]. 计测技术, 2014, 34(06): 50 – 53.
- [51] 杨军, 张力, 樊尚春. 可溯源动态压力校准方法[J]. 计测技术, 2014, 34(S1): 7 – 12.
- [52] Yang J, Zhang L. Traceable dynamic pressure measurement based on macro definition or micro interpretation [C]//5th IMEKO TC16 International Conference, in Conjunction with the 6th CCM International Conference on Pressure and Vacuum Metrology, P and V 2017, May 8 – 10, 2017, Pereira, Colombia, 2017.
- [53] Matthews C, Downes S, Esward T, et al. Lattice Boltzmann method applied to non-ideal diaphragm opening in shock tubes [C]//7th Workshop on Analysis of Dynamic Measurements, LNE Paris, 2012.
- [54] Damion J P. Dynamic calibration of pressure sensors[R]. LNE REPORT, 2007
- [55] Sarraf C, Damion J P. A Method for Dynamic Calibration of Pressure Transducers [C]//7th Workshop on Analysis of Dynamic Measurements, LNE Paris, 2012.
- [56] Lakka A, Saxholm S. Drop-weight system for dynamic pressure calibration [C]//7th Workshop on Analysis of Dynamic Measurements, LNE Paris, 2012.
- [57] Bruns T, Franke E, Kobusch M. Linking dynamic pressure to static pressure by laser interferometry[J]. Metrologia, 2013, 50(6): 580 – 585.
- [58] 张力, 李程, 薛景峰. 激光干涉仪用于动态压力校准 [C]//中国兵工学会第10届测试技术研讨会. 太原: 华北工学院出版部, 2000: 693 – 696.
- [59] Yang J, Li C, Wang W. Micro Dynamic Pressure Calibration with Frequency Method [C]//Proceedings of 10th international conference on electronic measurement & instruments. Chengdu: IEEE PRESS, 2011, 4: 364 – 368.
- [60] 杨军, 史博, 樊尚春, 等. 基于激光干涉测量的液体高脉冲压力校准[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(3): 572 – 578.
- [61] 李博, 杨军, 黄楠, 等. 基于激光干涉测量的高频液体正弦压力校准[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(5): 216 – 222.
- [62] Yang J, Fan S, Li B, et al. Dynamic modeling of liquid impulse pressure generator for calibration of pressure sensors[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2018, 279: 120 – 131.
- [63] 薛斌, 杨军, 李博. 高频正弦压力发生装置的非理想因素影响分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(3): 179 – 185.
- [64] Blume F, Täubner A, Göbel U, et al. Primary phase calibration of laser-vibrometers with a single laser source[J]. Metrologia, 2009, 46(5): 489 – 495.
- [65] Bartoli C, Beug M F, Bruns T. State of progress of dynamic calibration of force, torque and pressure sensors including conditioners [C]//EMRP IND, 2009.
- [66] Klaus L, Bruns T, Volkens H. Calibration of bridge-, charge- and voltage amplifiers for dynamic measurement applications [J]. Metrologia, 2015, 52(1): 72 – 81.
- [67] Volkens H, Bruns T. The influence of source impedance on charge amplifiers[J]. Acta IMEKO, 2013, 2(2): 56 – 60.
- [68] Klaus L. Static and dynamic bridge amplifier calibration according to ISO 4965 – 2[J]. ACTA IMEKO, 2020, 9(5): 200.
- [69] 秦存民, 杨永军, 赵俭, 等. 单屏蔽式温度传感器动态建模及补偿技术研究[J]. 计测技术, 2008, 28(6): 20 – 22.
- [70] Li X, Zhang L, Yang S M. Modeling of Dynamic Pressure Measurement System and Signal Reconstruction by Deconvolution [C]//International Symposium on Pressure and Vacuum

- (ISPV2003). september 22 – 24, 2003, IMEKO TC16, Beijing: Acta metrologica sinica press, 2003: 132 – 135.
- [71] Yang J, Wang Y, Li C. Dynamic Modeling of Pressure Pipelines and Signal Reconstruction [C]//The First International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC2011). October 21 – 23, 2011. Beijing, 2011: 78 – 81
- [72] Zhang Z, Zu J, Du H, et al. Correction of Dynamic Error Result From Measurement System Limitations [J]. Journal of measurement Science and Instrumentation, 2010, 1(4): 307 – 311.
- [73] Esward T, Matthews C, Hughes B. System identification and uncertainty evaluation for dynamic force measurements at the micronewton level for space satellite applications [C]// Workshop on Analysis of Dynamic Measurements, Paris, 2012.
- [74] 刘晶. 激波管动态压力校准装置测量结果不确定度分析 [C]//压力计量服务和测试技术研讨会. 北京: 中国计量测试学会, 2003: 33 – 38.
- [75] 袁俊先, 蔡菁. 基于正弦压力校准装置的压力传感器不确定度评定 [C] //2013 年全国几何量、力学专业计量测试技术交流会. 2013: 190 – 192.
- [76] 王志超, 张志杰, 赵晨阳. 压力传感器的模型不确定度研究 [J]. 测试技术学报, 2020, 34(1): 54 – 60.
- [77] 姚贞建, 王中宇, 王辰辰, 等. 压力传感器动态特性参数不确定度评定 [J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(8): 1672 – 1681.
- [78] Hessling J P. A novel method of estimating dynamic measurement errors [J]. Measurement Science & Technology, 2006, 17(10): 2740-2750.
- [79] Hessling J P. A novel method of evaluating dynamic measurement uncertainty utilizing digital filters [J]. Measurement Science & Technology, 2009, 20(5): 055106.
- [80] Hessling J P. Propagation of dynamic measurement uncertainty [J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22: 105105.
- [81] Eichstädt S, Link A, Harris P, et al. Efficient implementation of a Monte Carlo method for uncertainty evaluation in dynamic measurements [J]. Metrologia, 2012, 49: 401 – 410.
- [82] Klaus, Leonard, Eichstaedt, et al. Monte-Carlo-based uncertainty propagation with hierarchical models—a case study in dynamic torque [J]. Metrologia, 2018, 55(2): 70 – 85.
- [83] Clarkson P, Esward T J, Harris P M, et al. A software simulation tool to evaluate the uncertainties for a lock-in amplifier [C]// AMCTM 2008, Paris, 2008.
- [84] Standards and software to maximise end user uptake of NMI calibrations of dynamic force, torque and pressure sensors [DB/OL]. [2021 – 04 – 15]. http://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?eurametCtcp_project_show%5Bproject%5D=1339.
- [85] Development of methods for the evaluation of uncertainty in dynamic measurements [DB/OL]. [2021 – 04 – 15]. http://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?eurametCtcp_project_show%5Bproject%5D=843.
- [86] Dynamic pressure measurement in liquid and gas [DB/OL]. [2021 – 04 – 15]. http://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?eurametCtcp_project_show%5Bproject%5D=85.
- [87] European metrology research [DB/OL]. [2021 – 04 – 15]. <http://www.ptb.de/emrp/ind09-home.html>.

收稿日期: 2021 – 04 – 25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775526)

作者简介



杨军(1979 –), 研究员, 博士, 北京长城计量测试技术研究所(航空 304 所)飞行载荷谱测试研究中心主任, 曾担任全国气象专用计量器具计量技术委员会压力分委会委员, 中国仪器仪表学会传感器分会理事, 北京振动工程学会理事。先后从事动态压力测试校准、动态力测试校准、动态测量理论方法、次声监测与应用、载荷实测与应用等研究工作, 主持国家技术基础、国家自然科学基金等科研项目 10 余项。曾获国家科技进步一等奖与二等奖各 1 项。



李新良(1972 –), 研究员, 北京长城计量测试技术研究所(航空 304 所)重点实验室主任, 曾担任中国航空学会计量技术专业委员会总干事、全国机械振动、冲击与状态监测标准化技术委员会三分技术委员会委员, 目前任全国振动冲击转速计量技术委员会秘书长、全国地震专用计量测试技术委员会委员、全国智能网联汽车专用计量测试技术委员会委员。先后从事冲击振动计量、动力学量测量、发动机测试校准以及计量基础共性技术研究工作, 在动态线加速度、角加速度等动力学量计量溯源领域开展创新性工作研究。