

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.16

# 关于传感器动态校准技术研究的探讨

周宁

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 动态校准技术的难点在于非电量传感器的动态校准,“静标动用”的方法在一定条件下是合理的;温度传感器的动态校准面临着比压力传感器更多有待研究的问题。对动态校准技术的研究,扩展和提升了计量概念的理解和认知。对于被校系统的特性分析已超越基于溯源的测量,将成为计量学首要的研究内容。动态校准技术的研究与发展应当给予更加充分的关注和投入。

**关键词:** 动态校准; 动态特性; 非电量传感器; 线性系统

**中图分类号:** TB9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2021)02-0119-05

## Discussion on the Research of Dynamic Calibration Technology for Transducers

ZHOU Ning

(Changcheng Institute of Metrology &amp; measurement, Beijing 100095, China)

**Abstract:** The difficult point of dynamic calibration technology is the dynamic calibration method for non-electricity transducers. It is reasonable with some premise that results from the static calibration are used to the dynamic one. The dynamic calibration of thermo-transducer is facing more problems than the dynamic calibration of pressure transducers. The realization and understand of the metrology concept is promoted and developed by the research on dynamic calibration technology. The analysis on the characteristics of calibrated object is more important than the measurement based on traceability and will become the primary research content of metrology. The research and development of dynamic calibration technology should be given more attention and investment.

**Key words:** dynamic calibration; dynamic characteristics; non-electricity transducers; linear system

## 0 引言

动态校准技术,特别是应用于任意连续信号测量的传感器动态校准技术,一直是国内外计量测试行业关注和发展的重点。2016年世界计量日的主题确定为“动态世界中的计量”(Measurement in a Dynamic World)。2018年5月27日,中国科协在第20届中国科协年会闭幕式上发布了2018年60个重大科学问题和工程技术难题,由航空工业计量所/国防计量一中心/计量与校准重点实验室长热力分室提出的、经由中国航空学会报送的“面向工程应用的高精度动态测量”,被列为我国空天科技技术领域工程技术难题之一。这些都说明,动态校准与测试技术正在成为国内外工程界所关注的重点,其相应的理论探索、工程实践和设备研发也应当成为计量测试行业科研规划和创新发展的重点。

## 1 动态校准技术的基本问题

动态信号一般指幅值随时间变化的信号;静态信

号指幅值不随时间变化信号,也可以视为动态信号的特例。动态是绝大多数被研究物理量基本的、普遍的存在方式。动态校准(Dynamic Calibration),又称动态量校准,指确定计量器具动态性能的校准<sup>[1]</sup>。动态校准技术是指定量确定被校器具对于动态信号的测量行为特征的技术。基础性科学以及技术科学所研究的复杂过程、极端过程、瞬态过程,都需要通过对动态信号量值及其变化的测量,来了解状态的变化过程和变化规律。因此,动态校准技术一直是准确认识和细致研究客观物理对象首要的、不可或缺的一环,也是国际计量科学界长期探索的重要问题。

典型测试系统的信息流按功能划分如图1(a)所示,从非电被测量形态的变化角度描述如图1(b)所示。

对于测量动态信号的测试系统,其每一组成部分的动态特性均对全系统的动态性能产生影响,例如:数字量传输与处理子系统——必须满足系统实时性要求;A/D变换器——变换速率必须满足系统采样率要求;电信号放大器——本征带宽必须大于输入信号的带宽。

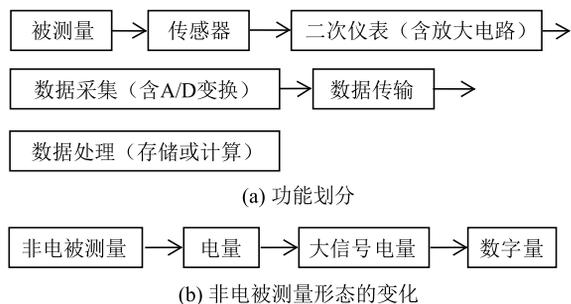


图1 典型测试系统的信息流

以上示例处理的都是数字量或模拟量电信号，技术成熟。比较难处理的是被测量→电量，也就是非电模拟量传感器动态特性的确定与应用。因为在非电量转换为电量信号的过程中，转换系数受到动态信号频率组分变化的影响，输出波形相对输入波形产生畸变，不仅测量准确度下降，而且动态误差的定义和描述都变得十分困难。由此可见，非电量传感器(以下简称传感器)动态特性已成为制约整个测试系统动态特性的瓶颈与关键所在<sup>[2]</sup>。而这些传感器恰恰广泛应用于国防科技工业各领域的试验过程测试中，直接关系到对复杂过程内部运动状态和机理的判断、认识和分析。所以传感器的动态校准问题不解决，就无法实现对各种复杂物理过程及其变化规律的认知与掌握，这已成为长期困扰重大装备发展的瓶颈性问题。因此，通过对动态校准技术的研究，客观地认识、描述和掌握传感器的动态测量行为特征及其确定方法，将显著地、系统性地、全面地提升我国国防科技工业试验过程的动态测试水平，同时这也是国防计量科研部门、研究所义不容辞的责任和使命。

## 2 非电量传感器动态校准技术的基本问题

目前，非电量计量校准所采用的技术，基本上是非静态校准技术。但许多传感器都有动态应用要求，比如温度、流量、压力、力、冲击、振动、角运动量等传感器，这就需要研究如何对这些传感器进行动态校准的问题。静态计量校准的基本方法是针对输出(响应)曲线上的某一点，参照标准输入值，给出不确定度(误差区间+置信概率)。它代表了被校传感器的静态误差特性，供使用者在实际使用时进行误差修正。同理，动态计量校准也应当对输出(响应)曲线上的任一点给出不确定度(误差区间+置信概率)，作为被校传感器的动态误差，供使用者在实际使用时进行误差修正。但实际上这似乎是不可能的，因为传感器的动态

输出特性曲线对应着无数点，而每一点的数值不仅与输入值有关，同时与该点的频率特性因素有关，所以无法像静态校准那样，用有限个点的不确定度来直接代表整个有效量程内的不确定度。也就是说，从满足普适性要求的角度来说，传感器的动态误差是抽象的，无法具体描述，也就没有统一的具体定义。

重要的问题是：使用者如何掌握传感器的动态误差，以便对动态测试结果进行修正？这是计量科学和技术部门应当研究和回答的基本问题。这个问题不解决，就无法对绝大多数复杂过程进行测量和研究。

目前，解决这个问题的主要途径有两类：

第一类，降低传感器动态误差定义的完备性。也就是只关注传感器在某种限定条件下的动态特性。例如，对于冲击传感器，只关注其最大幅值；对于振动传感器，只关注其对特定正弦激励的响应，等等。这是目前比较常见的做法，已经有了较成熟的规范体系。

第二类，对于压力、温度、流量等测量连续任意信号的传感器，现在通常的所谓动态校准方式，是给出阶跃响应的上升时间 $T_s$ ，它能够定性地表示工作带宽， $T_s$ 越小，工作频带越宽。以最典型的压力传感器为例，除了 $T_s$ 之外，还可以通过扫频的方法，得到被校传感器的幅频函数、相频函数和谐振频率等特性。

尽管上升时间 $T_s$ 、幅频函数 $F(f)$ 、相频函数 $\Phi(f)$ 和谐振频率 $F_r$ ，大大丰富了被校传感器动态特性的描述内容，但仍然没有满足客户的基本校准要求，即：如何利用校准结果对传感器的实际测量数据进行修正？目前流行的做法是，在工作频带内以静态校准结果作为动态校准的不确定度，提供给用户作为校准结果，也就是饱受争议的所谓“静标动用”方法。

## 3 “静标动用”方法的合理性简述

用静态标定的误差去代表动态标定的误差，听上去似乎有些不严谨，这就需要通过理论分析去得出客观的结论。根据线性系统理论，对于一个线性系统来说，如果同时满足公式(1)、公式(2)两个条件，则该线性系统就具有群时延传输特性，如图2所示。

①幅频函数 $F(f)$ 工作频带是平直的，即

$$F(f) = A \quad (1)$$

②相频函数 $\Phi(f)$ 与频率成正比，即

$$\Phi(f) = Bf \quad (2)$$

其中， $A$ 、 $B$ 均为常数，且 $A > 0$ ， $B > 0$ ； $f$ 为各频率分量的频率。

所谓“群时延”是指信号在经过系统传输过程中，

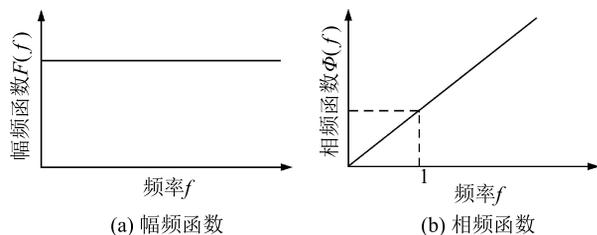


图2 群时延系统的幅频函数和相频函数

其频谱中各频率分量的幅值以及在频谱中的相对位置保持不变,各频率分量的能量以相同的延迟出现在系统输出端,这样在系统输出端重组的时域信号与输入端完全相同,也就是可以实现信号在时域中的无畸变传输,但同时会产生一个时域上的延迟  $B$ ,如图3所示<sup>[3]</sup>。在这种条件下,无论是静态信号还是动态信号,通过系统传输时都不会发生畸变,静态误差特性与动态误差特性相同,因此,“静标动用”在符合“群时延”的条件下,理论上是合理的。需要注意的是,以往“静标动用”的条件仅强调符合公式(1),而从上面的分析可知,还必须同时满足公式(2),才能使系统具有群时延特性,进而实现“静校动用”。

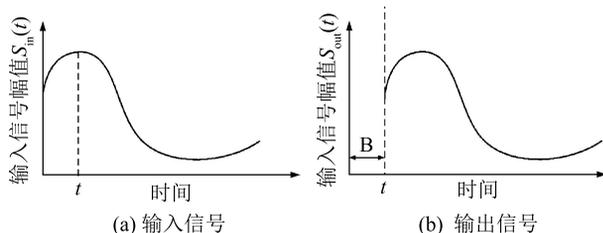


图3 群时延传输系统的时域特性

不严格满足公式(1)和公式(2)时,将会带来哪些误差?如何评价这些误差?则是计量科学工作者应当研究的。研究的结果,或对静态指标进行修正,或拟定传感器不合格判据。

以上简要说明了对于具有群时延特性的传感器,在其工作频带内,可以直接采用静态校准结果来表征其动态误差特性。实际上,目前只有压力等少数传感器能够通过扫频方法来获得常用频带内的幅频特性和相频特性,因此,以压力传感器作为典型来研究传感器的动态校准理论和方法是比较方便的。“静标动用”在一定条件下是合理的,也是目前对于测量连续信号的压力传感器,目前能够给出动态时域校准结果的唯一方法。需要注意的是,对于闭环控制应用场合的反馈应用来说,输出信号相对于输入信号的相位差就是一个不可忽视的问题。需要研究如何在反馈控制环路中消除相位差的影响以及相应的计量校准方法。

以上只是压力传感器动态校准技术的内容,它把计量校准限定在“线性系统、恒定的幅频特性、与频率呈线性的相频特性”等特定的理想条件之下,只是为了说明动态校准原理。在实际操作中,一定会有许多并不理想的条件,在研究和编制校准方法标准时,需要认真考虑。这些问题也应当成为动态校准技术科研项目的主要内容之一。

另一个需要探讨的问题与动态校准的标准源有关。若想获得一个测量系统的幅频函数和相频函数,扫频测量是最直接可靠的方法。但对于许多传感器来讲,一个标准的扫频信号源很难实现,比如温度、流量、转矩等等。最常用和有效的方法或许是利用冲激脉冲或阶跃信号激励产生的响应,通过数学变换方法得到被校传感器的幅频函数和相频函数。但由于实际产生的冲激脉冲或阶跃信号都不可能是理想化的,这种间接变换法所带来的附加误差必须在动态校准的标准性文件中加以充分说明和规范。

#### 4 关于温度传感器的动态校准技术

压力传感器只是需要进行动态校准的传感器之一,其它种类的传感器应当根据具体的需求开展相应的动态校准技术研究工作。比如广泛应用的温度传感器,其动态校准技术就具有自身的特点。首先,研制符合要求的温度扫频标准信号源是一个难度极大的问题,而由机械装置产生的温度阶跃激励,其上升时间明显偏大。利用激光作为标准的温度冲激激励,是一个值得探索的思路。另外,如果把被校传感器在校准过程中所接收到的热功率称之为传导热功率,则被校传感器的动态响应与传导热功率密切相关。这意味着不同的传导热功率,会激发出不同的动态响应,而传导热功率与热激励标准源的工作原理、工作方式、热物理场结构以及热交换方式等多种因素密切相关。这就需要研究制订温度传感器动态特性计量校准的标准方法(含传导热功率的评价与测量等)并建立此标准内容与实际使用条件的等效换算路径。

由于温度测量的特点,使得研究利用冲激和阶跃响应解算获得幅频函数和相频函数并明确其理论误差变得格外重要和迫切。因为只有这样才能够判定符合群时延条件,即公式(1)、公式(2)的工作频带范围,从而借助静态温度校准结果,给出工作带宽范围内的动态温度测量不确定度。

以上表明,温度传感器的动态校准面临着比压力传感器更多有待研究的内容。

## 5 进一步加强传感器动态校准技术研究

先进的计量校准技术与其它技术不同：首先，在任何条件下都不可能通过国际采购的途径获得。国际航空强国可以出售先进的航空装备，但决不允许别人接近(更不要说了解)它的工程计量体系，这才是核心机密。在现如今复杂多变的国际大环境下，先进的计量技术更是只能靠自己努力，自主创新。其次，计量科学与技术是一门独立的学科，具有自身独特的发展规律，它的发展应当适当超前于其应用的显性需求，而不能仅仅满足于跟在用户需求的足迹后面亦步亦趋，要主动为之。这样才能为各项装备型号工程提供及时的、足够的技术支撑，才能在国际计量科学领域通过自主创新占有一席之地。鉴于以上两点，计量科研骨干力量的各专业研究实体，应当认真梳理科学发展思路 and 用户需求趋势，制订合理有效的发展战略目标，明确实施路径，勇敢地肩负起时代赋予的计量科学发展的历史责任。

### 5.1 应关注计量校准技术的特点

动态校准技术是传感器的一项十分重要的性能评价技术。没有完备的动态校准技术，就没有成熟可靠的动态测试技术，两者相互依赖、相互融合，但在功能、目标和手段上具有明显的区别。以往成熟的静态校准技术奠定了良好的计量技术基础，但已明显不能满足用户对于动态过程的测量需求，不能适应我国各型装备自主创新的大环境要求。虽然近十几年来，从事计量测试的广大科技人员在传感器动态校准方面做了大量的探索和科研工作，也取得了一大批实用性较强的科研成果，但总体来看，传感器动态校准无论是科学理论探索、技术规范制订还是新型动态标准源的研制等方面，依然存在战略构思不足、成果系统性不够，技术体系不完整等短板，与实际需求相差明显。加强传感器动态校准技术研究的另一项重要意义在于，我国无论是国防装备体系还是国民经济制造业，都面临着由机械化、自动化向信息化、智能化转型的重大挑战，而自动化、信息化、智能化，其实现都是建立在传感器的卓越性能以及人们对传感器各种特性能够熟悉掌握的基础之上的。毫无疑问，传感器的动态特性正是系统工程师们需要熟悉掌握的重要知识之一，所以传感器的动态校准技术也就成为人们认识、了解与掌握传感器动态特性的唯一途径。

从这个角度以及本文前述的分析，有必要对“计量”一词的含义做更加深入、全面的探讨。之前人们的

概念中，计量的本质就是建立在溯源基础上更加精准的测量。这种理解没有问题，但简单地把“计量等同于测量”，这种基于静态的概念是不全面的，尤其是动态校准技术的发展和理念的扩张，大大超出了“计量等同于测量”的涵盖范围<sup>[4]</sup>。结合传感器动态校准技术的分析，应当把计量工作的本质进一步扩展为：在溯源基础上，定量确定被校器具的测量行为特征参数。因为在传感器动态校准过程中，需要解决的已经不仅仅是如何测量的问题，而是如何客观地认识、表述、分析被校传感器对于动态信号的转换规律并以若干代表性参数(工作带宽、动态测量不确定度、谐振频率等)进行表征。理所当然，这种概念的扩展也涵盖了对静态校准技术本质的描述，静态校准可以视为动态校准的一种特例，最明显的区别在于：对动态校准来说，首先要对传感器的动态测量特性开展系统性的分析。对于“被校系统的响应特性分析”已经超越“基于溯源的测量”，成为计量学首要的研究内容。应当指出，动态特性仅仅是传感器各种基本特性中的一种，只有根据使用的要求，将各种相关特性(例如：环境、可靠性)的测量行为特征逐一定量确定之后，被校器具的应用才能够得心应手<sup>[5]</sup>。这种对于计量概念的扩展和提升，绝不仅仅是简单的文字修改，更主要的是，对于计量校准本质的深入理解有助于人们开拓视野，能够站在更高的角度去认识和谋划计量科学与技术的发展战略，更加有力地发挥基础科学对工程技术的引领和推动作用。

### 5.2 动态计量校准技术亟待解决的问题

上述内容表明，传感器动态校准技术的发展是大势所趋，同时也面临着许多待解决的科学或技术问题，大致梳理后罗列如下：

1) 现有的传感器动态校准技术是建立在线性系统群时延特性理论基础之上的，作为线性系统理论的应用，同质信号的传输与异质信号的传输(传感器变换)是否存在着特性差异？是否还有其它的理论可以解决传感器动态校准问题？这需要进行理论探索和实验验证。

2) 对于线性系统的非线性渐变部分如何定义、补偿和处理，需要研究制订统一的标准来规范。

3) 对于非线性传感器如何进行动态校准？

4) 理想的冲激激励和阶跃激励标准源在客观物理世界是不存在的，由于标准源误差导致的被校传感器冲激响应或阶跃响应的误差，与由其数学转换形成的幅频函数和相频函数的误差两者之间的关系是怎样的？解决这个问题有助于对应用冲激或阶跃标准源的动态校准过程的误差进行全面准确的评估，从而大大扩展

动态校准技术的应用范围。

5)采用“静校动用”方法时,需要首先验证被校传感器是否同时满足公式(1)和公式(2),这点应当以校准规范形式固化下来。

6)温度传感器动态校准时的传导热功率如何测量、评价以及进行标准化控制,是完善温度传感器动态校准技术的基础。

7)对于动态测试技术来讲,一个带有普遍性的实际问题是,在固、液态介质中测量冲击型压力传感器,其对测量对象的敏感度与抗冲击强度之间的矛盾问题。

总地来讲,对于连续任意非电量传感器的动态校准技术,依然处于发展的初始阶段,表现为

1)检定规程或校准规范数量少,技术体系不完善,目前许多校准活动是按照双方的技术协议开展,技术成熟度和标准化程度不高;

2)动态校准业务不活跃,表面上用户需求似乎不强,实际上反映了用户对动态校准意义认识模糊,计量界也未能做出有影响力的推动措施,使得最终用户对这项技术没有信心,现实中动态测试的不确定度往往靠推断和估计。众所周知,传感器不经过规范的校准,其测试结果是无效的,在某种情形下具有很大风险;

3)动态校准技术的学术交流活动开展得比较少,反映了对该领域基本的科学问题的思考以及工程实践问题的探索不够活跃。

## 6 结束语

一项没有得到普遍应用、没有经受过大量工程实践考验的计量校准技术,不能称得上是成熟技术,不能提供合乎用户要求的商品化的服务,无法形成对社会生产力发展的有力支撑,无法将先进的计量校准技术服务转化为获取社会回报的有力工具,也许会导致先进的技术发展停滞或趋于夭折。所以,应当从用户的需求出发,抓住机遇,大力加强传感器动态校准技术的研究和成果应用,尽快建立成熟、完备的技术体系,“加快科研成果从样品到产品再到商品的转化”<sup>[6]</sup>。

实际上,用户需求的呼声是很高的。2020年11月初,中国航空学会计量分会、动态测试与校准航空科技重点实验室和《计测技术》杂志,在宁夏银川市成功举办了“动态校准与测试技术交流研讨会”,会议代表来自高校、航空工业、中国航发、中国商飞、航天、兵器、船舶、核工业、中电科、部队及地方的计量与测试用户约160多人,围绕着传感器动态校准和动态

测试技术的科研与应用,开展了十分热烈的讨论。与会代表的共同感觉,就是要大力加强和推动我国传感器动态校准技术的发展,完善相关的理论和技术体系,为应对即将到来的动态测试技术全面展开应用的需求形势,做好充分的理论、技术和设施准备。

动态测试技术是认知、分析复杂物理过程的基本手段,而动态校准技术是动态测试技术的基础。两者相互联系、互为依托,又分工明确、目标不同。动态校准技术除了通过自主创新,没有其它获取途径。目前,我国在动态校准技术的理论、技术和高水平设备等各方面与未来的需求相比,还有明显的差距,尤其是技术体系的完善和标准体系的建立方面还有很大的发展空间。这一点应当在研究制订和实施“十四五”计量科技相关发展规划时,给予充分的关注和投入。

## 参考文献

- [1] 国防科技名词大典综合卷编委会. 国防科技名词大典(综合)[M]. 北京: 航空工业出版社, 兵器工业出版社, 原子能出版社, 2002.
- [2] 祖静, 马铁华, 裴东兴, 等. 新概念动态测试[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [3] 管致中, 沙玉钧, 夏恭恪. 电路、信号与系统[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
- [4] 梁志国, 张大治, 吕华溢. 动态校准, 动态测试与动态测量的辨析[J]. 计测技术, 2017, 37(1): 30-34.
- [5] 周宁, 鲁敏. 面向工作条件的传感器校准[J]. 计测技术, 2018, 38(4): 6-9.
- [6] 习近平谈治国理政第三卷[M]. 北京: 外文出版社, 2020.

收稿日期: 2021-01-03

## 作者简介



周宁(1961-),男,研究员,博士,中国航空学会计量分会副主任委员,中国空气动力学学会测控专业委员会委员。1983年,本科毕业于天津大学电子工程系,1989年,硕士研究生毕业于中国航空研究院飞行器仪表与测试专业,2014年,博士研究生毕业于北京航空航天大学经济管理学院。1983-1999年,在原航空航天部634所从事数据采集系统的研制工作,曾获航空航天部青年优秀科技论文一等奖2次、三等奖1次,并编制了行业标准(HB6489-91)。1999-2016年,先后在中国航空工业第二集团公司、中国航空工业集团公司基础技术研究院从事科研管理工作;2016年,任航空工业北京长城计量测试研究所专务。