

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.04.02

# 面向工作条件的传感器校准

周宁<sup>1</sup>, 鲁敏<sup>2</sup>

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;

2. 航天科技集团北京遥测技术研究所, 北京 100076)

**摘要:** 面向工作条件的传感器校准, 主要需考虑输入信号的频率、本征参数的变化以及工作环境的影响, 它们可以用一个统一的公式来表述。其中, 传感器的动态校准是最为复杂和关键的因素, 而传感器时域动态误差的定义和表述是实现动态校准的关键。

**关键词:** 传感器测试; 面向工作条件; 动态校准; 可溯源性

**中图分类号:** TB9; TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2018)04-0006-04

## Working Condition - oriented Calibration of Transducers

ZHOU Ning<sup>1</sup>, LU Min<sup>2</sup>

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

**Abstract:** There are three key factors for working condition - oriented calibration of transducers. These are the frequency of input, the change of the nature parameters of transducers, and the effects of the working environment. The three factors can be presented in one formula. Among them, dynamic calibration of transducers is the most critical and complicated while the definition and expression of the dynamic error in time - domain are the keys.

**Key words:** transducer test; working condition - oriented; dynamic calibration; traceability

### 1 传感器测试的基本问题

随着科技水平的大幅提高, 我国科学及工业装备的研发模式已经从跟踪仿制全面转向自主创新, 随之而来的是装备研发过程中大量的、各种各样的系统性试验。为了通过这些试验了解复杂物理过程中相关参数的变化机理与规律, 测试技术是关键的方法手段。如何测取这些试验参数以及如何确定测取信息的准确性是所有开展复杂系统试验技术人员所面临的共同问题, 同时也是每项试验的设计与准备工作必须回答的基本问题。

测试(testing)是在试验、验证过程中测量和获取被测对象信息的活动。测试是试验的主要组成部分, 不进行任何测试的试验是毫无意义的<sup>[1]</sup>。

目前, 电信号是最便于精确获取、存储、计算分析和输出的信息形式, 而在装备研发试验过程中, 大多数被测量是非电量, 例如温度、压力、力矩、加速度、流量等等, 这就需要使用各种传感器将非电量转换成电信号, 再进行测量和处理。担负着将被测物理量转换为相应电信号功能的传感器种类繁多、原理各

异、工作条件复杂, 其转换特性往往成为决定测试系统水平的关键, 这一点已有共识。所谓传感器的转换特性, 主要是指传感器输出电信号相对于被测物理量之间的对应关系, 也可以称之为传感器的变换特性(或响应特性)。设传感器变换特性为  $H$ , 被测信号为  $S_i$  (一般为非电量), 传感器输出信号为  $S_o$ , 则有

$$S_o(t) = F\{H(T_1, T_2, T_3, \dots, T_n), S_i(t)\} \quad (1)$$

即, 传感器的输出信号  $S_o(t)$  是其变换特性  $H(T_1, T_2, T_3, \dots, T_n)$  和输入(激励)信号  $S_i(t)$  的函数( $F$ )。其中,  $T_j(j=1, 2, 3, \dots, n)$ , 代表传感器变换特性的( $n$ 个)影响因子。

这种关系用功能框图来描述, 如图 1 所示。

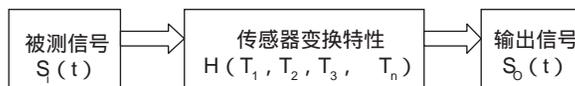


图 1 传感器测试系统功能示意图

式(1)代表了所有传感器测试系统的基本原理。图 1 描述了实际测试过程中被测信息的单向流动过程。然而, 测试工作者追求目标的过程却是反向的, 即要通

过传感器的输出(电量)信号和变换特性反推出输入(非电量被测)信号,这里必须依次回答与解决3个问题:①传感器变换特性( $H$ )是什么样的;②如何通过输出(电量)信号和变换特性反推出被测(非电量)信号(即得到最终测量值);③反推出的被测(非电量)信号与真实被测信号的误差是多少。

只有回答了上述第2和第3个问题,测试结果才是完备的,而解决第1个问题是回答后2个问题的基本条件。这3个传感器系统测量技术中的基本问题,在以往常规的、静态的测试条件和要求范围内,似乎已经得到了完美的解决,然而对于复杂的大型系统性试验,这些问题的探索才刚刚开始。

## 2 面向工作条件的传感器校准技术

校准(calibration):在规定条件下,为确定测量系统所指示的量值与对应的测量标准所复现的量值之间关系的一组操作<sup>[1]</sup>。

基于传感器的测量系统,一般由传感器、信号调理器、数据采集器、信息传输装置和计算机系统组成,每个组成部分均对测试系统的测量特性产生影响。其中,影响贡献最大的就是传感器的变换特性,其它部分由于是对于纯电量信号和数字量信号进行传输、放大、采样、变换,产生误差的原理和作用相对较为明确和简单,在这里不作讨论。

对于传感器在实验室条件下进行静态校准是常规计量工作的主要内容,技术标准比较完备,对于环境因素和被测参数相对稳定简单的工业过程和试验过程是能够满足要求的。然而,对于环境因素和被测参数特性较为复杂的试验过程来说,这种校准结果无法满足测试要求,主要原因是传感器的实际工作条件与实验室静态校准的差距太大,主要体现在以下3个方面:①激励(输入信号)由静态(0频)向动态(非0频率)延伸;②传感器的本征参数在现场安装之后随着工作状态的变化而发生了变化;③传感器的使用受环境因素影响明显(如温度、湿度、压力、振动、电磁场等)。

上述这些差距,使得传感器在实验室静态校准的结果无法准确反映其实际的测量特性。目前存在大量的所谓“静标动用”的现象<sup>[2]</sup>,即传感器在试验前进行实验室静态标定,然后试验中用于对动态信号的测试,实质上存在着很大的数据风险,在理论上可以认为是未经过校准。因此,只有在模仿实际工作条件的前提下,对传感器的校准才具有实用意义。

随着我国制造业整体水平的提高,复杂的系统试验越来越多,所使用的传感器校准技术水平与这些试验测试要求的矛盾将会愈加明显,特别是如果出现下列情况时:①试验明确要求附有不确定度范围的测试数据可溯源;②测试数据作为关键临界参数,要求具有高精度度;③测试数据拟作为反馈控制参数使用。

上述现象的存在,要求计量测试行业将传感器校准技术,从实验室静态校准逐步提升拓展到面向工作条件的校准,即考虑了传感器激励特性、本征特性和环境特性的校准技术,并能够定量给出各种特性单独或综合条件下的误差特性,这对于现行的传感器校准技术提出了非常高的要求。但这个问题不解决,我国日益增多的复杂系统试验将会面临宝贵的试验数据无法溯源的严重而尴尬的局面,应当引起相关主管部门、计量测试专业单位以及试验单位计量部门的高度重视。

在式(1)中,若设置如下: $T_1$ 为输入信号(激励)频率; $T_2$ 为本征参数变化因子(简称本征因子); $T_3$ 为环境影响因子。则有

$$S_o(t) = F\{H(T_1, T_2, T_3), S_i(t)\} \quad (2)$$

式(2)一般性地表述了综合考虑传感器激励特性、本征特性和环境特性条件下的传输关系。其中,当 $T_1 = T_2 = T_3 = 0$ ,即不考虑传感器本征因子和环境因子影响且激励频率为0的条件下,则有

$$H(T_1, T_2, T_3) = k(\text{常数}) \quad (3)$$

$$S_o(t) = F\{k, S_i(t)\} \quad (4)$$

式(4)表述了实验室条件下静态校准传感器的一般性传输关系。可见,常规的传感器实验室静态校准只是其面向工作条件校准的一种特例。

式(2)代表了考虑一般工作条件影响的传感器传输特性,在对其进行校准的过程中,传感器变换特性 $H(T_1, T_2, T_3)$ 起到了重要的作用。若要取得本章开始提及的“校准”定义中“对应的测量标准所复现的量值”,就必须首先掌握传感器的(单项或多项综合)变换特性 $H$ ,再结合标准输入,方能获得“测量标准所复现的量值”。这个“标准输入”是广义的,不单指传感器的激励源,而且还可以指代标准的本征参数和环境参数。所以,传感器面向工作条件的校准技术,在完成“确定……量值之间关系的一组操作”之前,需要做大量的理论研究和工程验证工作,来确定被校传感器的变换特性 $H$ 以及研建相应的标准广义输入源。这与传统的实验室静态校准相比较,已远远不是进行“一组操作”那么简单,其工作量将呈指数级增长。简言之,传感器“校准”工作的重心将不可避免地“从一组操

作”，转为“确定传感器变换特性  $H$ ”以及“研建标准输入源”这2项工作。不难想象，这是一项十分艰巨和持久的、极具科学性的工程研究和开发工作，也是我国计量测试科研工作者们义不容辞的职责所在和紧要任务。

### 3 发展面向工作条件的传感器校准技术任重而道远

如前所述，式(2)表述了综合考虑传感器各种使用条件因素影响下的传输关系，但是要真正实现这样的综合性校准，还有许多科研工作要做，还有很长的路要走。一般采取先解决单项因素的影响特性，再研究多项因素综合影响特性的方法和技术路径。其中，环境因子和本征因子的影响作用，如果不考虑动态效应的话，均可以分别借助现有的工程技术，通过大量的试验验证过程来寻求和确定其相应的规律，再附加到静态校准特性中，作为补偿和修正。

而对于传感器在高频激励作用下的行为规律(通常称之为传感器的动态特性)，也就是式(2)中的  $H(T_1)$  的研究，却相对比较复杂。目前采用较多的所谓动态校准方法，是借助阶跃激励信号，获得传感器响应的上升时间  $T_r$ ，根据  $T_r$  的大小来定性地判断传感器是否满足动态测量要求。其依据是：只要  $T_r$  足够小，就意味着被校传感器工作频带足够宽，静态标定的指标就可以直接用于工作频带内所测得的数据。在没有明确而完备的动态校准规范时，采用这种方法从实用角度来说是不不得已而为之，从理论上讲，这种方法存在着2个明显的缺陷：首先，传感器幅频特性曲线是否是平直的且与静态(0频)输出的幅值相等是需要验证的；其次，传感器的相频特性与频率是否呈线性关系也是需要验证的。如果答案是否定的，势必产生输出信号的波形畸变，这将带来测量值的误差，这个误差如何估计，也是需要研究的。严格来说，这种方法没有定量地确定被校传感器示值与标准复现值之间的关系，特别是无法得到被校传感器在工作频带内的误差特性，在实际测试中，传感器的使用者就无法得到具有计量意义的、可溯源的试验过程测试参数。

按照本文第2节提及的“校准”定义，一个完备的传感器动态校准技术体系应当至少包括以下基本的构成要素：①校准规范；②传感器的动态变换特性；③标准源。从真正实现传感器动态校准的要求来说，目前，国内外对上述3个要素的研究，依然处于起步或尚待起步的阶段。

首先，对传感器动态特性的误差定义和表述问题，虽然一些从事动态测试技术研究的科研人员，分别从各自的角度开展了探索和研究工作，取得了进展<sup>[3]</sup>，但对应用于计量校准的传感器动态误差的定义，尚没有统一明确的答案，也就谈不上标准规范的制订。在静态条件下，只要把标准信号的实际输出与理论输出进行比较，就可以确定误差；但在动态条件下，传感器的实际输出取决于其幅频特性、相频特性与输入信号频率特性的相互作用。目前尚不能确定某个或某些(有限)个标准信号能够完备地表征传感器的时域动态误差特性。没有标准信号，就得不到具有普适意义的校准结果。所以尽管在理论上，传感器动态特性的误差是客观存在的，但从“校准”的角度来说，动态误差如何定义和表述，是动态校准技术面临的首要问题。可能的解决途径之一是降低“完备性”的要求，即选择用户最关注的某些参数进行校准，例如冲击传感器，只对其幅值进行校准；或者选择对于用户所关注的被测信号最具代表性的波形，作为标准信号进行动态校准。这项工作需要计量科技工作者和传感器使用者长期共同努力，深入实践研究，为传感器动态特性的误差定义和表述问题寻找切实可行的答案。

其次，传感器的动态变换特性( $H$ )的获取和掌握比较困难，正在研究和探索之中。传感器的动态变换特性，一般是指被校传感器在特定工作频带内对于非0频激励的电学响应规律。相对而言，传感器的静态变换特性通常是一个常数。理论上，只要掌握了传感器的动态变换特性并拥有与其相关的标准激励源，就可以得到工作频带内的标准复现值，再与实测值比较，按照校准规范就能够给出被校传感器在工作频带内的测量不确定度，从而完成动态校准的全过程。既然是讨论传感器的频域特性，首先自然想到的是应用系统分析理论，也就是通过扫频输入(频域)或单位冲激响应、单位阶跃响应(时域)的方法，得到被校传感器的幅频和相频特性  $H(j\omega)$ <sup>[4]</sup>，这就是传感器在频域内的动态变换特性。但遗憾的是，无论是基于频域还是时域的方法，都不同程度地受到了标准激励源水平的限制。另一种技术途径是采用仿真建模方法来局部或近似地模拟被校传感器的动态行为特征，逐步建立各种仿真模型的理论和方法，这也是国际计量界流行的研究领域。对于一个理想的传感器动态特性数学模型，当赋予其被校传感器的特征参数之后，即可以方便地通过数字仿真得到传感器的标准复现值，消除了研制特殊物理标准激励源的技术障碍。实现这一点的关键，

除了建模本身之外,还必须建立完备而实用的对于仿真模型特性与传感器物理机理符合性的评价方法和规范,这是需要做大量的理论研究和验证试验工作的。尽管如此,由于仿真建模技术相对成熟,又可以借助日新月异的计算机科学和数值计算技术,通过仿真建模方法来掌握和表征传感器的动态变换特性,也许是在目前及可预见的将来最可行的途径。这种方法的关键的是如何评价仿真模型与实际传感器在响应行为上的相似度,也就是模型误差的评价方法。

第三,对标准(激励)信号源的研建工作,正处于缓慢而不断推进过程中。由于标准源的研建涉及大量材料及设备的物理极限问题,其难度是显而易见的,这里就不再赘述。

总之,开展传感器动态校准技术研究的最终目的,是实现传感器动态测量特性参数的可溯源<sup>[5]</sup>。传感器动态校准技术研究不仅仅体现计量科学的突破性进步,更是满足以国防科技工业为代表的各类复杂科学试验过程测试要求的关键,同时也是一项非常艰巨、必须集聚众多专业计量科技工作者、传感器使用者和制造商智慧的科学工程。

## 4 小结

传感器测试是所有复杂系统试验的基础,传感器校准必须面向实际工作条件,并考虑各种可能影响其测试性能的内外在因素,这样才能最大程度地保证传感器测试数据的精准和可溯源性。传感器动态校准技术的发展是一项紧迫的、艰巨的集智型计量科学工程。

### 参 考 文 献

[1] 汪亚卫. 国防科技名词大典——综合(精)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.

- [2] 叶声华, 曲兴华, 殷纯永, 等. 现代制造质量的关键测量技术基础[J]. 计量学报, 2000, 21(2): 95-99.
- [3] 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.
- [4] 管致中, 沙玉钧, 夏恭格. 电路、信号与系统[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
- [5] 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.

收稿日期: 2018-06-08

### 作者简介



周宁(1961-), 男, 博士, 研究员, 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。



鲁敏(1965-), 女, 高级工程师, 硕士, 全国振标委三分会专业委员。1986年, 本科毕业于天津大学自动化系, 1989年, 硕士毕业于航天科技集团北京遥测技术研究所。多年来从事振动冲击传感器设计和校准工作, 所设计的产品广泛应用于运载火箭及武器型号上振动冲击测量, 曾参与1

个国际标准和3个国家标准的编写, 拥有5个发明和实用新型专利, 多次获得部级科技技术进步二等奖和三等奖。