

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.02.01

专用测试系统计量校准问题讨论

梁志国, 吕华溢, 张大治

(中航工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095)

摘要: 针对计量行业的难点问题之一“专用测试仪器系统”的计量校准问题进行了系统性讨论。首先, 从其定义出发, 结合其技术目标的特殊性特点, 分析了专用测试系统的技术特征。其次, 针对其校准中存在的歧义, 如综合校准的含义、系统校准的含义等进行了辨析讨论, 对于现场校准的三种基本模式特征进行了系统性区分和讨论。最后, 针对其计量校准规范的制订难度, 提出了制订单参量通用校准规范的方式予以组合使用解决方案, 以及具体实现综合性校准和系统性校准的具体步骤。

关键词: 计量学; 专用测试系统; 校准; 溯源

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)02-0001-05

Discussion on Calibration of Test Systems

LIANG Zhiguo, LYU Huayi, ZHANG Dazhi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology & Calibration,
Changcheng Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: A discussion on the problems of calibration of test systems is presented. First, beginning from the definition of the test system and combining the specialties of the target of test systems, the features of test systems is analyzed. Then, aiming at the ambiguity on the calibration of test systems, such as synthetic calibration and system calibration, some definitions are discussed in detail. The characteristics of three basic calibration modes are identified and analyzed. Finally, to the difficulties on drawing calibration specifications of test systems, one scheme is taken out, which is the combination of different single parameter calibration specifications. And both the steps and process for synthetic calibration or system calibration are presented.

Key words: metrology; test system; calibration; traceability

0 引言

在计量测试行业, 大型专用测试设备或系统的计量校准问题一直是一个难点。多年以来, 不断有人试图尝试该类问题的解决方法^[1-9], 但是, 由于太过复杂多样, 一直未能有令人满意的结果。本文后续内容, 将主要讨论该类问题, 并尝试讨论其中的难点以及解决问题的途径。

1 定义问题

专用测试系统是一个非常宽泛的概念, 并无统一定义。长期以来, 人们对专用测试设备与系统的界定、解释一直众说纷纭。有的解释为专门用于某一型号产

品研制过程的测试设备; 有的称之为非标测试设备等。这些解释都反映了专用测试设备的一个侧面, 不够全面。经过人们在实际中的不断认识、理解, 逐步对专用测试设备与系统有了基本的共识。

所谓专用测试设备, 是指在产品的科研、生产和服务过程中, 用于产品的质量控制、性能评定、功能验证, 保证产品符合技术指标和性能要求, 而专门研制或配置的非通用测量设备。其专用性主要体现在两个方面: 其一指设备的功能、性能、量值及其量程范围完全受专用测试设备所测量试验的产品对象需求而确定; 其二是指专用测试设备拥有被测产品工作所需要的交联握手信号, 并能够按照被测产品所需的时序条件和逻辑状态提供激励、响应与数据信息输出。

专用测试系统通常是指为某种复杂且重复性的专门功能任务特别设计制造的仪器设备、装置或设施。服务对象一般涉及比较重要的某一专门的仪器设备或

收稿日期: 2016-12-12; **修回日期:** 2017-03-20

作者简介: 梁志国(1962-), 男, 黑龙江省巴彦县人, 研究员, 工学博士, 主要研究方向为数字化测量与校准, 模式识别, 动态校准, 精确测量。

武器装备,主要完成其重要性能指标或总体参数的测量、测试、诊断,使其在使用中一直保持要求的技术状态。小到某一仪器的试验器、试验系统,大到某一装备的试验台、试车台、试验设施等,均可以属于专用测试系统的范畴。例如,航空行业中的高度表校验器、雷达试验器、自动驾驶仪试验器,飞行控制系统试验台、铁鸟试验台、环境控制系统试验台、发动机试车台、飞行器全机疲劳强度试验台、风洞等等,都是符合通常定义和理念的专用测试系统。

2 目的与目标

专用测试系统之所以被研制和建造,其主要原因有三个:一是在某些场合需要高效、自动完成某些固定的、重复性的复杂任务;二是对被测产品和试验对象进行系统性的综合评价,包括功能、性能和质量,以便获得直接的总体测试结果;三是在完成该类任务时,最大限度地降低对人员的技术要求和工作强度,降低出错概率。

若不使用专用测试系统,完成某些庞大复杂的技术任务,通常需要熟练的技术专家进行大量细微繁琐的重复性工作,将消耗大量时间和精力。并且,仍然需要熟练的技术专家结合经验和进行结果的总体综合判定。使用专用测试系统后,会将复杂繁琐的技术流程固定化、程序化、自动化,仅需要少量普通工作人员即可操作完成,获得与技术专家同样的工程效果。

另外,一些本身就耗时费力的大型试验,如飞机全机疲劳试验,全程可能需要连续几个月日夜兼程、昼夜不舍地工作才能完成一次试验,没有专用测试设备与设施,是无法顺利完成的。

3 技术特征

专用测试设备与系统并不仅仅是测量设备与系统。国家军用标准在提到它们时,按照实际的功能特征,使用了测试、测量、诊断三个种类加以细分和界定^[10]。

通常情况下,它们是含有多通道、多量程、多物理量、多状态、多模式并行工作的试验系统。因此,其具有测量信号的种类众多,信号的时序状态、逻辑状态及交联耦合关系复杂。由此,专用测试设备与系统完整的全面校准除了包括通常意义上的信号源校准和测量仪器的校准外,还应包括:①测量传感器的校准,以保证测量数据的准确性;②各个输入、输出通道自身的校准,以及各个通道间相互串扰和干扰的校准,以保证测量通道的准确性;③数据传输总线的校

准,以保证数据传输的正确性;④不同关联通道间组合逻辑与时序逻辑及延迟时间的校准,以保证复杂试验的交联中,指令流和数据流的适时性与正确性;⑤供配电系统影响的校准及环境条件影响的校准,以保证试验环境条件对测试结果无灾害性影响。

在上述这些方面,专用测试系统与通用计量器具有较大区别。

通用计量器具往往仅有一个单一功能、单一物理量值在工作。即使是有多种功能和性能的仪器设备,如数字多用表、多功能校准器等,通常并不能多种功能同时并行工作。当然,个别例外,如三相电能/功率校准器需要同时输出三个通道的电压与电流,并对它们之间的相位有明确的定量要求;视频信号分析仪需要同时输出红、绿、蓝三种基色信号,通过三基色幅度比的变化合成其它颜色;这些应用属于少数个案。

那些仅仅包含测量功能的专用测试系统,属于“测量”类仪器设备系统,只能用于测量、记录、显示被测对象的本征输出量值或状态。

那些包含信号源的专用测试系统,用于获取被测对象的激励响应特性或状态,属于“测试”类仪器设备系统。它们可以仅仅包含信号激励源,或者同时包含激励源以及用于测量获取被测对象激励响应特性的测量功能部分,还可包括用于控制、调整、实现各种不同测试条件的同步信号、握手信号、状态监控与指示信号、延迟环节等部分。

“诊断”类专用测试系统技术本质也是属于上述两类系统中的一类,有所不同的是,它们在完成预计的测试、测量任务目标后,同时包含着被测对象的量值或状态是否符合预期目标和要求的逻辑判据。经过其完整的试验流程后,全部状态以及参数量值符合预期要求的被测对象,将被判定为诊断通过或符合要求误差界限。否则,将显示诊断故障,或者某些状态参量范围越过误差界限,激发异常告警。

大型专用试验台与试验设施,往往兼具测量、测试、诊断等多种功能状态,可以执行不同种类的技术活动流程。

4 计量与校准

专用测试设备与系统的计量校准已有众多先期研究工作,并有众多文献讨论该类问题。观点异彩纷呈,思想各有特点。目前,有较多共识的观点包括要进行系统性、现场、原位、甚至是在线校准,并适时引出了可计量性问题、规程规范问题等一系列基本问题。

其中, 仍然未能达成共识的问题是“专用测试设备的系统校准和综合校准”, 何为系统校准? 何为综合校准? 它与非系统校准以及非综合校准有何本质区别? 不同人的观点和理解, 通常有较大不同。

4.1 系统校准问题

系统校准与综合校准的内涵似乎有些相似, 又因为两种提法, 而各有不同。

“系统校准”通常的含义是将被校对象作为一个整体考虑而进行的校准。不能将其拆解、割裂后进行校准。

“全面校准”也可以称其为最彻底的校准, 应该是在被校系统各种可能的工作状态下均被执行的校准, 以便定量描述被校系统的全部计量特性和量值特征。这是一种最彻底、最无争议的全参数、全特性、全范围、全方位、全条件的校准, 因而工作量也是巨大和高昂的。特别是对于含有众多不同通道的组合逻辑与时序状态时, 工作量将极为巨大。随着系统复杂程度的提高, 计量校准的时间成本和人力成本将指数规律上升。

关于“综合校准”, 可以认为是在综合彻底地分析和研究了全面校准的组合状况后, 将最为恶劣的组合状态提取出来, 形成综合校准状态方案, 并在这些状态下进行计量校准的一种校准方式, 从而达到以较少的工作量和经济成本达到完成系统校准的目的, 并且不留任何技术隐患。综合校准不应理解为简单的技术参量的堆积和罗列, 而应是不同条件维度下技术特征的综合体现。

经过全面校准或综合性校准后, 同一通道的物理量值在不同技术状态下的共同边界指标和参量, 才是该通道“系统校准”的指标结果; 同类通道量值在不同技术状态下的共同边界指标和参量, 才是该类通道“系统校准”的指标结果; “系统校准”应该是“综合校准”后给出的综合性公共结果。

对于体积较小的单一参量功能的单机、单台类专用测试仪器系统而言, 系统校准目前存在的共识是: 应该在完整的全系统处于工作方式的前提下, 实施其各个性能指标和量值参数的计量校准, 不应将其不同组成部分分拆成不同的功能模块分别执行校准, 模块的量值参数校准结果不能等同于系统校准结果。

对于体积庞大、功能复杂、积木组合式复杂专用测试系统而言, 除了要求校准时各个功能模块各就各位、各司其职以外, “系统性”与“综合性”还能体现在哪里? 是否属于各个功能模块在这些状态下参数量值性能的简单堆积? 它们与“非系统校准”或“非综合校

准”模式又有哪些本质区别? 这些问题一直未被认真研究与思考。

称其为专用测试系统, 而非通用测试系统, 主要源于其所测试和诊断的目标对象是具体而明确的, 以及与被测对象相关联的交联握手信号。而通用测试系统被测对象并不是那么明确和具体, 因而一些复杂而特别的特征要求无法定量体现和落实。

既然专用测试系统的被测对象目标是明确而具体的, 则有关其对象的特征描述就可以清晰、明确和具体化。目前绝大多数专用测试系统在这方面的阐述不够全面和清晰, 即使偶有阐述, 也远远达不到系统性和全面性的要求。

实际上, 针对专用测试系统的测试对象而言, 众多输入、输出通道的量值准确度和溯源性尽管非常重要, 但在很多情况下, 不同通道间量值状态之间的组合逻辑关系以及时序关系是更加重要的技术特征。它们不仅体现了不同通道量值状态的逻辑关系和时序关系, 也同时揭示了系统内部的因果关系, 造就了系统内部各个结构部分之间干扰与抗干扰的状态特性。

专用测试系统的系统性与综合性应主要体现在全体输入、输出通道间的组合逻辑关系及时序关系上, 应给出明确而具体的组合逻辑要求及时序同步要求。并且, 在这些不同的技术状态下均应进行计量校准, 以充分体现专用测试仪器系统技术特征表述的全面性, 以及专用测试系统计量校准综合性与系统性的内涵。如果未能实施全面校准或综合校准, 应该明确校准结果是在哪些组合逻辑与时序条件下获得的。

这些理念和技术态势, 已经能够从仪器类计算机总线的不断改进和发展中看出端倪。例如 VXI 总线和 PXI 总线的不断更新与发展, 在最初的将数字信号与模拟信号之间的互相干扰降到最低的电气特性设计完成后, 其后续的改进包括不断提升总线的数据传输速率、增强总线模块的电源功率, 以及冷却、散热能力等, 都是围绕增加触发同步信号、同步时钟信号等方面进行的。由此可见, 业界不断提升对各个功能模块之间的组合逻辑与时序逻辑关系的意义和价值的认识, 模块之间的组合逻辑与时序逻辑逐渐成为复杂系统非常重要的一个方面。

由于“系统性参量”是在全部输入、输出通道实际要求的组合逻辑与时序条件下原位工作获得的, 充分体现和揭示了专用测试系统的系统性(全部模块与通道共同工作)与综合性(不同的通道逻辑状态下), 由此可见系统指标与构建系统的各个功能模块指标技术含

义的本质不同。

对于某一个系统内的具体模块或通道而言,专用测试系统的系统指标可能仅仅是模块量程的一小部分,甚至仅仅是几个离散量值点,其校准仅仅需要在系统需要的范围内进行即可。但是,它们的实际校准必须要在专用测试系统内各个物理量值变化及状态切换符合规定的组合逻辑及时序要求下进行,不仅仅有明确的信号(信息)流动的信流图,而且有明确的状态变化流动的衍变图以及时序状态流动变化图。

在这些状态下反映多功能模块的相互干扰、串扰,环境适应性,电磁兼容性以及系统的光、机、电兼容性。以此全面系统地揭示专用测试系统校准的综合性、系统性特质。

由此可见,全面校准的成本极为高昂,综合校准是通常比较理想的校准模式,由此获得系统性校准结果是工程上的较佳选择。

4.2 现场校准问题

通常,现场校准主要是解决庞大的专用测试系统拆装搬移困难,不宜送到校准实验室进行计量校准的问题。依性质不同,可进一步细分为现场离线校准(也称为现场校准)、原位校准和在线校准三种情况。

“在线校准”是最高等级的现场校准方式,它通常指被校准的专用测试系统处于与被测对象直接互联的实际工作状态或仿真实际工作状态下的一种校准模式。它不仅是在真实的现场环境条件下,而且使得实际负载效应及干扰均如实体现在校准内涵当中。在专用测试系统中,各个输入、输出通道因为与测试对象互动而需要的组合逻辑状态及时序条件状态,均由专用测试系统及测试对象之间的互动提供,使得现场校准最真实地逼近实际工作状况,校准结果具有最高的参考性、实用性和说服力。其前提是在线校准的专用测试系统需要具有可计量性,以确保在仿真(或实际)工作状态下校准信号的加载和响应信号的获取。并且,要求专用测试系统相应部件的输入、输出量值及影响条件具有可控性及可观性。

“原位校准”是指在实际现场环境下,专用测试系统处于不与被测对象互联的原位非工作状态下进行计量校准的一种校准方式。其特点是此时被校专用测试系统不处于实际工作状态,而是处于校准状态。因而其真实的测量负载所带来的影响未能完整在校准中体现,而当其各个输入、输出通道之间需要工作在确定的组合逻辑或时序逻辑状态时,需要额外构建和提供,从而增加了校准难度和工作的复杂性。其优点是原位

校准无需对专用测试设备进行拆卸,节省了校准时间,减少了校准工作的环节,并能部分体现实际现场工作环境带来的影响。

“现场离线校准”通常也被称为“现场校准”,一般是指在专用测试系统不具备可计量性的情况下,将其从实际工作的位置上拆卸下来部分(或全部)被校部件,在工作现场环境下进行计量校准的一种操作。它主要是解决在原位基础上激励信号无法方便加载或相应信号不能方便输出等问题。由于其状态已经不能与实际工作状态相同,既增加了额外的工作量与复杂性,也会浪费相应的拆装时间,使校准的意义打了很大折扣,并且拆装校准可能导致原本工作正常的专用测试系统的损坏和异常。其优点是在实际工作现场环境下的校准,比实验室环境下更接近实际,无需远途送检即可实现量值溯源。

可见,现场在线校准是理想的技术状态,也是未来构建专用测试系统的基本原则与愿景,在实在有困难的情况下,实现原位离线校准也是人们可以追求的目标之一,其它状态应予以避免。

5 法规建设问题

由于我国现行的计量法只涉及到计量器具,而未涉及到一般产品,涉及到产品的通常适用于产品质量法,因而未被明确归结为计量器具的但以量值服务为目的的一些系统、装置、设施等的质量一直属于一个模糊地带,似乎两个法都有涉及,但又都不够明确。很大一部分专用测试系统恰好处于该模糊地带。

即使将专用测试系统归结为计量器具,仍然存在一些特殊问题,导致其很难进行计量校准,其中,就包括规程、规范的建设问题。原因是:①用于计量溯源依据的计量检定规程或计量校准规范,均需要在对被校对象进行系统而深入的研究后才能制订出来。而专用测试仪器系统,由于其测试目标专一,导致应用面相对较窄,但技术要求则非常复杂,使得对其进行计量校准研究的难度较大,且较难产生市场回报,致使关于该类系统的计量校准研究严重滞后。即使有了明确的研究成果,也由于其与专用测试仪器系统的具体型号相关性过于紧密,推广应用价值不高,因而很难被制订成具有普适性的计量校准规范,从而阻碍了专用测试仪器系统校准规范的产生和发展。②专用测试仪器系统是以工作对象特性的测量、测试、诊断为目标而设计研制的,因而,其中的大型系统的输入、输出通道众多,涉及的物理量多且杂。对制订其计量

检定规程和计量校准规范人员的专业技术要求极高。而一些大型综合类专用测试系统又往往是系统应用工程师以系统集成方式,利用 ATE/ATS 方式构建的组合式系统,并非专业厂商生产研制的成熟专业产品。由此往往导致这些系统缺乏全面细致的性能指标描述,更加难以制订出良好适合的计量校准规范。③在已有的被制订出的计量校准规范中,人们也往往只注意到专用测试系统所组成的功能模块性能指标的简单罗列,当各个不同通道并行工作时,不同的组合逻辑状态和时序状态的清晰阐述缺乏,因而其性能指标的综合性、系统性往往未能全面体现。

为了破解上述困局,在计量行业内需要开展和推进的工作有:①大力开展可计量性研究,以对专用测试系统的可计量性进行定量评价。不具备可计量性的系统与设备将无法进行计量校准,当然,也无从谈起规程、规范的制订。②大力推进单一物理量值单参数计量校准规范的系统研究工作,并适时制订出以单一量值参量为特征的计量校准规范,供多物理量、多参数、多通道为特征的大型专用测试仪器系统计量校准规范制订时参考和借鉴。以电压信号为例,按幅度特征划分,可以有纳伏电压、微伏电压、毫伏电压、伏级电压、高压、超高压、特高压等不同量程;按频率划分,可以有直流电压、交流超低频电压、交流低频电压、交流中频电压、交流高频电压、射频电压、微波电压、毫米波电压、亚毫米波电压、太赫兹电压等等频段;按波形特征分类,可以有直流电压、正弦电压、三角波电压、锯齿波电压、方波电压、脉冲波电压、阶梯波电压、心率波电压、调幅电压、调频电压、调相电压、脉冲调制波形、视频信号波形、矢量信号波形等等不同的波形方式类别。不同的量程范围、不同的频段范围,所使用的仪器设备、原理、技术方案都有所不同,各有其鲜明的技术特征,尚不存在有某种仪器设备的能力可以跨越多种量程范围或频段。这样的以量值、频率、波形为特征的校准规范一旦制订完成,其它涉及到其范围内计量校准的专用测试系统校准规范制订时可以直接参考和借鉴,甚至直接引用,从而降低了专用测试系统校准规范制订难度,且更加有利于复杂系统性能指标参量的定义统一与计量校准方法统一及计量校准结果的一致性。③大力推进各种专用测试系统的计量校准研究。尤其是大型专用测试系统,其不同通道、不同物理量的各种组合逻辑状态、各种时序状态下计量性能的综合研究,针对其抗干扰性、环境适应性、电磁兼容性、光机电兼容性、可计

量性等,均应进行定量评价,可为其计量校准规范的制订提供技术依据。④大力推进各种工业产品性能指标的计量校准研究,将计量法所描述的量值传递链直接延展到产品,真正提升计量测试为产品质量保驾护航的能力与效力。并为以复杂产品的性能测量、测试、诊断为目的的专用测试系统的研制提供技术支持。

6 结束语

综上所述,专用测试系统的计量校准与普通的计量器具的校准有较大不同,有其天然的复杂性与特殊性。在着眼于解决这类问题时,要特别围绕其特点,着重体现其综合性与系统性的含义。体现其不同通道间的组合逻辑与时序的不同所造成的不同影响与额外要求,其校准规范也要同时体现该方面的特质,不能仅仅成为各个组成功能模块的技术参数与指标的简单堆砌。针对大型复杂专用测试系统的建造,应着眼于其各种状态变量的可控性与可观性,由此延伸到可计量性。

希望通过此一家之言,引起同行在大型专用测试仪器与系统的研制和计量校准时,以及其计量检定规程或计量校准规范的制订时,足够重视该方面的不同问题的解决方式。

参 考 文 献

- [1] 纪明霞,陈世夏.机载 ATS 闭环计量保障模式探讨[J].计测技术,2011,31(4):49-51.
- [2] 高占宝,梁旭,李行善.ATE 系统校准技术研究[J].电子测量与仪器学报,2005,19(2):1-5.
- [3] 范静,王光发,荆卓寅,等.涡扇发动机试车台推力测量与校准技术概述[J].计测技术,2012,32(5):1-4.
- [4] 闫道广,李东.专测设备的校准与管理[J].计测技术,2009,29(1):45-48.
- [5] 赵自文.专用测试设备的计量保障工作探讨[J].计量与测试技术,2007,34(7):11-12.
- [6] 朱占勇.专用测试设备的管理[J].中国计量,2004,(4):17-19.
- [7] 金炜.专用测试校准技术探讨[J].计测技术,2006,26(6):35-37.
- [8] 梁志国,张大鹏,武腾飞.21 世纪航空工业对计量测试技术的需求分析[J].计测技术,2012,32(3):1-7.
- [9] 梁志国,曹英杰,孙璟宇,等.飞机地面测试试验系统综合校准述评[J].航空计测技术,2001,21(5):7-9.
- [10] 中国人民解放军总装备部.GJB 5109-2004 装备计量保障通用要求检测和校准[S].北京:中国标准出版社,2004.