

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.06.07

航空机电产品地面试验器压力测量系统可计量性问题及改进建议

肖智峰, 朱顺平, 王晓宇

(南京机电液压工程研究中心, 江苏 南京 211102)

摘要: 通过对航空机电液压、环控、燃油等专业产品地面试验器的压力测量系统进行调查, 发现了其存在的可计量性问题, 本文将航空机电产品地面试验器压力测量系统的可计量性问题分为技术指标不合理、测量仪表选择不合理、管路及设计不合理、试验器布局不合理四个方面, 逐一进行介绍, 最后为改进航空机电产品地面试验器压力测量系统可计量性提出了可行性建议。

关键词: 地面试验器; 压力测量系统; 可计量性; 航空机电产品

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1974-5795(2020)06-0036-04

Metrology Problems and Improvement Suggestions of Pressure Measurement System of Aviation Electromechanical Product Ground Tester

XIAO Zhifeng, ZHU Shunping, WANG Xiaoyu

(Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing 211102, China)

Abstract: Through the investigation of the pressure measurement system of the ground tester of the aviation electromechanical hydraulic, environmental control, fuel oil and other professional products, the existing problems of the measurability are found. In this paper, the measurability problems of the pressure measurement system of the ground tester of the aviation electromechanical products are divided into unreasonable technical indicators, unreasonable selection of measuring instruments, unreasonable pipeline design and unreasonable layout of the tester. Four aspects are introduced in detail one by one. Finally, three suggestions are put forward to improve the measurability of the pressure measurement system of the ground tester of the aviation electromechanical products.

Key words: ground tester; pressure measurement system; measurability; aviation electromechanical products

0 引言

可计量性(Measurability)是“装备各测量(测试)设备所具有的反映其量值准确、数据可靠和计量便利程度的一种设计特性”^[1],是装备实施计量过程的一种能力,即装备能够通过预定的技术手段,实现标准量值的传递,确保装备测量功能的正确、准确^[2],是装备的一种固有属性。随着航空产品及其配套设备的技术指标要求越来越高,计量保障的需求也在不断提升,可计量性研究工作也受到越来越多的关注,已经有专家提出:在装备全寿命周期,尤其是在设计研制阶段,仅考虑“五性”(可靠性、维修性、保障性、测试性、安全性)是不够的,应该以可计量性作为其补充^[3]。

压力测量系统是压力参数测量的重要手段,在航空机电产品地面试验器上的应用极为普遍,对压力测

量系统进行可计量性研究是航空机电产品计量保障工作重要内容之一。

压力测量系统一般由压力变送器、数据采集器、信号处理系统和显示终端构成^[4],其中压力变送器(或压力传感器)为测量单元,按照一定的规律将压力信号转换为电信号^[5],其余部分为显示单元。压力测量系统具有测量范围宽,准确度高^[6],输出信号标准,传输距离远,采集、处理、存储、读取方便等特点,在航空机电产品地面试验器上的应用极为普遍。

通过对航空机电专业产品(包括液压、环控、燃油、二动力等)的地面试验器(以下简称试验器)的压力测量系统进行调查,发现其存在各种可计量性问题,不仅会对压力测量系统的日常计量工作产生影响,还会给航空机电产品试验结果的准确性和可靠性带来不利影响。

1 试验器压力测量系统可计量性的含义

试验器压力测量系统的可计量性主要有两方面的含义：①表征标准量值能够通过试验器准确可靠的传递给产品的能力：主要表现在试验器压力测量系统的测量结果的准确性和可靠性方面，试验器测量原理、测量过程、测量状态无额外的误差引入，测量结果与产品的实际值一致，涉及到压力测量系统技术指标的确定和测量仪表的选择等；②用于表征试验器压力测量系统计量过程的操作难度和便捷程度：主要表现在对压力测量系统开展计量工作的可达性与便捷性方面，即对试验器压力测量系统的压力量值可准确溯源，对其进行校准时，有便于校准用的电气和机械接口、足够的操作空间、统一的信号类型，拆装(必要时)方便、快捷，涉及到试验器的布局、电气、测量管路设计等。

2 可计量性问题

当前大量试验器都是根据航空机电产品的特殊要求而专门设计制造的，而国内对试验器压力测量系统的可计量性设计还处于探索阶段，无指导性文件，计量部门的介入明显滞后，试验器的制造商缺乏计量方面的技术支持和规范性的指导，使其在设计和制造过程中极少考虑压力测量系统的可计量性问题，导致试验器可计量性较差，给试验器的使用和后续计量工作带来了很大困难。通过调查发现，当前试验器在可计量性方面主要存在技术指标、测量仪表的选择、管路设计、试验器布局四个方面的不合理问题。

2.1 技术指标不合理

试验器压力测量系统技术指标不合理，主要表现在以下两个方面：

1) 准确度要求过高

例如：某产品技术文件上给出的产品技术指标要求为：出口压力 (18 ± 1) MPa；试验器压力测量系统的技术指标：出口的测量范围为 $0 \sim 25$ MPa，准确度等级0.2级。通过计算可得到所选择的压力测量系统的最大允许误差为

$$\Delta P_1 = 25 \times 0.2\% = 0.05 \text{ (MPa)} \quad (1)$$

被测参数的最大允许误差与测量设备的最大允许误差之比为20:1，远大于3:1的量传比要求^[7]。

片面追求高准确度带来的问题增加了试验器的制造成本，提高试验器的设计制造难度，还会增大后续校准工作的难度和成本；同时，准确度等级越高的压力测量系统，对工作环境 and 工况条件的要求也越苛刻，

若使用不当极易出现超差的情况。

2) 压力传感器与压力测量系统的准确度等级

例如：某试验器上一套压力测量系统的技术指标确定过程如下：压力传感器测量范围 $0 \sim 300$ kPa，准确度等级为0.2级；二次仪表测量范围 $0 \sim 300$ kPa，最大允许误差为 $\pm 0.2\%$ ；则压力测量系统的技术指标为测量范围 $0 \sim 300$ kPa，准确度等级为0.2级。

压力测量系统是由压力测量单元和显示单元组成，其最大允许误差是由两个单元共同产生的，需计算合成才能得到其最大允许误差，而不是直接引用压力传感器或二次仪表的出厂准确度等级或允许误差。

通过计算得到压力传感器与二次仪表的允许误差均为 ± 0.6 kPa，压力测量系统的允许误差应该按照如下公式进行计算合成^[8]：

$$\sqrt{0.6^2 + 0.6^2} = 0.85 \text{ (kPa)} \quad (2)$$

计算得到该压力测量系统的最大允许误差为 ± 0.85 kPa，折算后引用误差为 $\pm 0.28\%$ ，符合0.5级技术指标要求，故该压力测量系统实际的准确度等级为0.5级，而不是0.2级。

2.2 压力测量系统选择不合理

当前试验器在压力测量系统的选择上主要存在以下问题：

1) 测量范围不匹配

例如：某试验器，在验收时计量人员发现，其设计规范要求入口压力为120 kPa时，允许误差为 $\pm 4\%$ ，而试验器选择的压力测量系统测量范围为400 kPa，准确度等级为0.5级(即最大允许误差为 $\pm 0.5\%$ FS)，从准确度等级上判断，其量传比为

$$\frac{4\%}{0.5\%} = 8 > 3 \quad (3)$$

通过计算可以满足入口压力测量要求，但将两者的允许误差换算为绝对误差后，则会发现两者并不满足量传比要求。

产品“入口压力”的绝对最大允许误差为

$$\Delta P = 120 \times 4\% = 4.8 \text{ (kPa)} \quad (4)$$

压力测量系统在120 kPa处的绝对最大允许误差为

$$\Delta P' = 400 \times 0.5\% = 2 \text{ (kPa)} \quad (5)$$

两者的允许误差的实际比值为

$$\frac{4.8}{2} = 2.4 < 3 \quad (6)$$

故该压力测量系统并不能满足该产品入口压力的测量要求。

在对压力测量系统和被测压力参数进行误差比较

时,不能使用相对误差或引用误差进行比较(尤其是两者的测量范围不相同时),应该将相对误差或引用误差转换为绝对误差进行比较。

2) 介质温度与压力测量单元额定工作温度差异大

航空机电产品在进行性能试验时,往往需要对试验介质进行升、降温处理,以模拟产品实际工作状态下的介质温度状况,在极限条件下,介质最高温度超过 300 ℃,而常规的压力传感器的额定工作温度最高仅为 60 ℃左右,高温压力传感器的额定工作温度最高也仅为 180 ~ 200 ℃,超温使用不仅无法保证测量的准确度,还会影响压力测量系统本身的使用寿命。

3) 静态压力测量系统用于测量动态压力

使用肉眼读取压力值的常规的压力测量系统,其压力测量单元是压阻式压力传感器,采样频率一般为 1 kHz 左右,而二次表的显示频率为 0.5 ~ 10 Hz 不等,压力测量系统整体的采样频率为 0.5 ~ 10 Hz,只能用于测量静态(稳态)压力或波动幅度小、频率低的准静态压力,不能用于测量动态压力。

部分航空机电产品在进行性能试验时,产品的压力为非稳态压力,其波动频率和幅度均超过了常规压力测量系统的测量能力。如果仍然使用常规压力测量系统进行测量,其测量结果是不可靠的,应该使用动态压力测量系统进行测量。

2.3 测量管路、接头设计不合理

试验器测量结果的准确性和可靠性不仅与压力测量系统直接相关,与测量管路也有很大关系。存在压力测量系统选取正确,而试验器管路设计的不合理,造成测量结果不准确的现象。测量管路设计不合理主要表现在:

1) 测量管路过长造成管腔效应,使信号失真,被测压力通过测压管路与压力传感器相连通,由于传压管腔的存在,传感器测量压力与真实压力之间会出现负值的偏差和滞后,称为管腔效应^[9]。对于试验介质为气体的试验器,测量管路过长,会造成测量容腔增大,使得管腔效应更为明显,在被测压力存在波动时,压力信号失真较为严重,这对准确测得被测压力是存在不利影响的。

2) 忽略了液柱差对测量结果的影响

根据相关要求,对于试验介质为液体(如燃油、红油、蓝油等)的试验器,有高度差引起的附加误差应不大于被测设备最大允许误差的十分之一^[10]。而实际使用过程中,液柱差容易被忽略。如图 1 所示,为某试验器测压管路的设计情况,压力传感器测压点与产品

需要测量的压力输出点高度相差 25 cm 左右,由液柱差引入的误差约为 -2 kPa,而产品输出压力的最大允许误差为 ± 4 kPa,使得由压力仪表安装位置引入的测量误差高达允许误差的 50%,这种状态下极易造成对产品实际性能的误判。

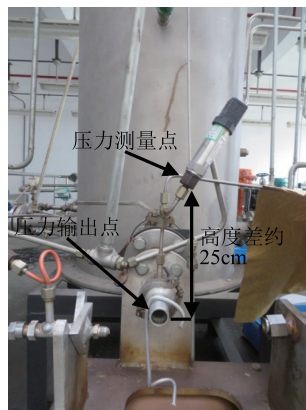


图 1 液柱差的影响

3) 接口类型、尺寸多种多样

从事航空产品研制工作的企事业单位,其配备的各型试验器由不同制造商设计、制造完成,制造商不同设计制造经验、相关组件和计量器具的购置渠道都不同,由于各型试验器的压力测量系统来自不同的生产厂,造成试验器接口形式多种多样,设置和调校方式各不相同。这些虽不会直接影响压力仪表的测量结果,但增加了校准工作的难度,影响试验器校准的便捷性,甚至出现无法开展交战工作的尴尬局面^[11]。

2.4 试验器布局不合理

评价试验器可计量性的一个重要指标,就是试验器进行现场系统校准时的方便、快捷程度。由于计量部门没能介入到试验器的设计、制造过程,使得当前国内大部分试验器的设计和制造商,忽略了对试验器压力测量系统开展现场系统校准工作时的便捷性进行评估,主要表现为:

1) 测量点的布置不合理

例如,部分试验器的压力传感器安装在油箱底面或油路的低端,且测压管路上无调节阀门,对该压力传感器进行校准时,需要将油箱中的油料全部排尽,大大增加了试验器校准的耗时;又如,部分试验器将压力传感器安装位置较高,超过 2.5 m,周围却没有可供拆卸操作的平台、台阶等,进行试验器校准时,拆装极为困难,还存在安全风险。

2) 操作空间狭小

部分试验器存在压力传感器安装位置不合理,操

作空间狭小的问题,给试验器的校准带来很大困难,如管路纵横,操作工具无法施展;空间狭窄,操作人员和校准设备无法抵达等。

3 可计量性改进建议

为保证试验器压力参数测量结果的准确可靠和校准工作的便捷开展,建议采取以下措施,提高试验器的可计量性水平。

1) 对设计制造人员进行培训和宣贯

在上述可计量性问题中,一部分是由试验器设计、制造人员缺乏对计量相关知识的了解造成的,如“技术指标不合理”、“测量范围与被测压力值不匹配”、“液柱差对测量结果的影响”和“试验器布局”的问题等。因此,计量部门应该对试验器设计、制造人员进行相关知识的培训、宣贯。使设计制造人员能够区分产品压力参数技术指标的不同要求,并掌握最大允许误差的计算方法,从而正确选择压力测量系统;掌握液柱差影响程度的判断方法等,并将这些知识应用到试验器的设计、制造中。

2) 对部分试验器进行可计量性改造

部分试验器的计量可达性、便捷性、测量结果准确性存在的问题,应对试验器进行结构、管路改造或采取其他方式,以方便开展现场系统校准工作;对压力测量系统测量范围与被测压力值不匹配情况较为严重的试验器,应增加压力测量系统的配置;试验介质温度与压力传感器额定工作温度范围差异较大的,更换高温压力传感器或采取适当措施降低与压力传感器相接触的介质温度;对接口类型、尺寸多种多样的,应进行规范、统一等。

3) 编制可计量性设计指南,进行可计量性评价

要从根本上解决试验器可计量性差的问题,计量部门必须更早的介入试验器的设计、制造过程,制定相关的规范性文件,如可计量性设计指南、试验器可计量性评价标准等,对试验器设计、制造和验收进行指导,明确可计量性的要求,指出在试验器设计、制造和验收过程中需要重点关注的事项,并对试验器进行可计量性评价,保证可计量性的要求能落到实处。

4 结论

将航空机电产品地面试验器压力测量系统的可计量性问题从技术指标不合理、测量仪表的选择不合理、

管路设计不合理、试验器布局不合理四个方面进行分析,并建议通过对试验器设计及制造人员进行培训、宣贯,对部分试验器进行可计量性改造等手段解决当前试验器存在的可计量性问题,同时指出,只有制定可计量性设计指南,试验器可计量性评价标准等相关的规范性文件,并推广落实,才能从根本上改善试验器可计量性差的状况。

参考文献

- [1] 汪静. 军用 ATS 可计量性关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010.
- [2] 董锁利. 论装备可计量性设计专业化的必然性[J]. 计量信息化与管理, 2013(01): 38-40.
- [3] 汪静, 欧阳红军, 蒋薇. ATE 可计量性信息流建模与分析研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2503-2508.
- [4] 孙俊峰, 续艳, 刘军. 现场压力变送器校准方法比较[J]. 中国计量, 2012, 33(7): 98-100.
- [5] 田晓兵. 压力测量系统的现场校准技术[J]. 电子测试, 2019(06): 39-41.
- [6] 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.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 860-2015 压力传感器(静态)检定规程[S]. 北京:中国质检出版社, 2015.
- [8] 全卫国. 计量测试技术[M]. 北京:中国计量出版社, 2006.
- [9] 王维, 唐磊, 王棋. 压力测试管道管腔效应研究[J]. 计测技术, 2012, 32(S1): 81-86.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 882-2019 压力变送器检定规程[S]. 2019.
- [11] 王同宾. 压力计量常用连接方式比较[J]. 品牌与标准化, 2016(9): 77-78.
- [12] 周自力, 李太景, 于娅楠, 等. 计量性及量性设计[J]. 计测技术, 2018, 38(5): 4-7.

收稿日期: 2020-09-17; 修回日期: 2020-11-04

基金项目: 工信部国家重大科研专项(MJZ-2016-J-99)

作者简介

肖智峰(1986-), 男, 高级工程师, 硕士, 从事力学计量工作, 研究方向为压力与流量的校准与测试。

