

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.01.10

多功能压力综合校准装置研究

薛战军, 宫政, 于晨, 李志新

(航空工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089)

摘要: 为了解决飞机地面试验中压力测量设备需校准的数量多、量程分散、介质种类特殊且繁多等问题, 对压力测量设备校准原理及方式进行理论分析, 设计一种集成了多通道、多量程范围、多介质于一体的压力综合校准装置, 该装置具有全自动控制、数据采集及处理功能。经过多个飞机型号研制过程的应用验证, 该装置设计合理, 切实解决了飞机地面试验压力测量设备的校准需求, 提高了校准效率, 取得了较好的应用效果。

关键词: 计量; 压力; 校准; 多功能

中图分类号: TB935; V241; TH71 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 01-0100-07

Research on a multifunctional pressure calibration device

XUE Zhanjun, GONG Zheng, YU Chen, LI Zhixin

(The First Aircraft Institute of AVIC, Xi'an 710089, China)

Abstract: In order to solve the problems of a large number of pressure measurement equipment that needs to be calibrated, the scattered range, and the special and diverse kinds of media in the aircraft ground tests, this paper makes a theoretical analysis on the calibration principle and method of pressure measurement equipment, and designs an integrated pressure calibration device with multi-channel, multi-range and multi-media. The system has the functions of automatic control, acquisition and data processing. The calibration requirement of pressure measurement equipment for aircraft ground test has been practically solved, the calibration efficiency has been improved, and the application effect has been achieved.

Key words: measurement; pressure; calibration; multifunction

0 引言

飞机研制试验中的环控系统、燃油系统、液压系统中所用到的压力测量设备因使用时的介质、测量范围、环境等不同, 对其校准时所采用的校准设备也不同。环控系统试验主要测量发动机引气压力、座舱/货仓的调节压力等, 在压力测量过程中使用气体介质, 测量范围有0~0.5、0~1、0~2 MPa等, 准确度等级主要为0.1级, 对其校准所使用的计量标准器主要介质为气体介质(空气或氮

气)。燃油系统试验主要测量油箱油量压力、管路脉动压力、惰性气体压力、供油泵输入输出压力等, 在压力测量过程中使用的介质主要为气体介质和液体介质(航空煤油、航空汽油等), 测量范围有0~0.5、0~1.7、0~6 MPa等, 准确度等级主要为0.2级, 所以对其校准所使用的计量标准器主要介质为气体介质(空气或氮气)和普通液体介质(变压器油)。在液压系统试验中主要测量作动器压力、起落架收放压力、操作杆推动压力及各种液压连接件压力等。在压力测量过程中使用的

收稿日期: 2023-11-20; 修回日期: 2023-11-29

引用格式: 薛战军, 宫政, 于晨, 等. 多功能压力综合校准装置设计[J]. 计测技术, 2024, 44(1): 100-106.

Citation: XUE Z J, GONG Z, YU C, et al. Design of a multifunctional pressure calibration device[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(1):100-106.



介质主要为液压油,在军机研制中使用的液压油介质主要为红油,在民机研制中使用的液压油介质有红油和紫油(阻燃磷酸酯液压油),其中紫油具有极强的腐蚀性,测量范围有0~2、0~10、0~35、0~60 MPa等,准确度等级主要为0.2级,对其校准所使用的计量标准器主要介质应该分别采用普通液体介质(癸二酸酯)和腐蚀性介质(阻燃磷酸酯),其腐蚀性介质的管路必须采用抗腐蚀性材质。

通常情况下对压力测量设备的校准都是单独的用气体或液体介质校准装置,每台校准装置使用的介质是固定的,而且不同量程段需要不同的校准装置^[1-2]。

所以,若按照介质、测量范围等区分配置压力校准装置,则需要数量较多的校准装置,致使成本较高。因此,需要设计能够实现多介质、多量程、多通道的全自动多功能压力校准装置,以达到满足实际校准需求且提高效率、解决腐蚀性介质的压力测量设备无法溯源等问题。

1 总体设计方案

本装置的设计目的为满足各类压力表、压力变送器、压力传感器等压力测量仪表的检定、校准工作。采用一个造压装置通过气液隔离及压力放大装置分别按照气体、普通液体、腐蚀性液体等不同介质进行校准,集成了多介质压力输出、多量程压力控制调节、多通道信号测量、电源输出、数据处理、报告生产等功能。

装置无需外接气瓶、可自行加压至气压6 MPa,液压60 MPa,并可分别提供气体、普通液体(癸二酸酯或变压汽油)、腐蚀性液体(阻燃磷酸酯,俗称紫油)介质的测试通道。每类型的介质通道可同时校准5台同类型压力测量设备且每个通道独立工作。在校准压力变送器和压力传感器时,可分别提供满足压力测量设备运行时的激励电压源和测量其输出的电流或电压。

本装置对于校准的原始数据能够自动分析判断是否合格,能够自动生成检定或校准证书,并保存被校测量设备信息及本次校准的数据,便于后期查询和管理^[3]。

对于腐蚀性介质的管路采用特殊材料进行设

计、确保其密封性且能够保障长期使用而不会因介质腐蚀造成系统压力泄露。因阻燃磷酸酯液压油有极强的腐蚀性,其管路采用防腐蚀设计的不锈钢管、密封圈采用三元乙丙橡胶材质的防阻燃磷酸酯腐蚀的有机合成材料(和飞机上采用同种材质)。磷酸酯液压油介质在安装拆卸过程中难免会在平台上造成渗漏,长时间会挥发到空气中,对操作人员形成危害,本系统对此设计了通风系统,安装在磷酸酯液压油介质通道口,采用吸气方式将挥发的有害气体通过排烟管路排出室外,保证操作环境安全。

2 装置原理及组成

2.1 装置原理

本装置采用一套电动气压源产生初始压力,经过气体压力控制器进行控制,当系统预设压力值小于气压控制器的预设压力值时,直接由气压控制器进行控制,分别按照普通气体、普通液体、腐蚀性液体三种介质管路进行控制,各管路均由电磁阀进行关闭控制,其中驱动液体介质时采用气液分离器进行,即通过气压控制器输出标准的气压值,气体经过液压隔离器驱动液体介质油缸施加给被测设备压力。当系统预设压力值大于气压控制器预设压力值时,先由气压控制器提供初始压力,然后经过液压控制器进行增压放大驱动液体介质油缸施加给被测设备放大后的液体压力,其中在液压控制器与被测设备连接端安装标准的液压标准模块进行放大后的压力值的反馈测量以达到控制的准确性。

后端采用一套电源设备为被测压力测量设备提供激励电源,采用一套数采模块(万用表及多路切换开关)进行多个压力测试设备输出值的采集测量。整套系统采用上位机软件控制,能够实现全自动操作、数据自动采集、处理,最终生成测试报告^[4-5]。装置的系统原理结构图如图1所示,装置电器系统设计原理图如图2所示。

2.2 装置组成

本装置由7个部分组成:上位机模块、电动压力源模块、压力控制器模块(气压和液压)、PLC开关控制器和电磁截止阀系统、油缸模块、电测(直流电源和数字多用表)模块和综合测试台模块。

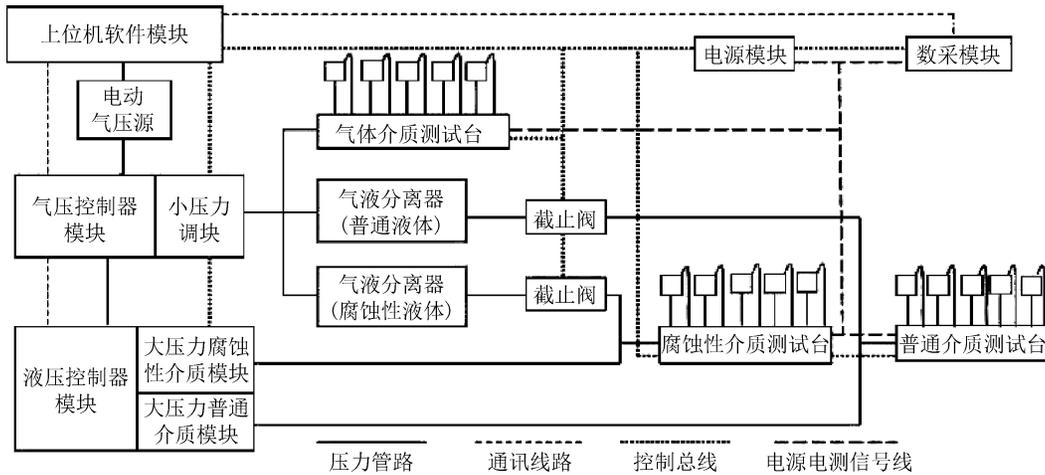
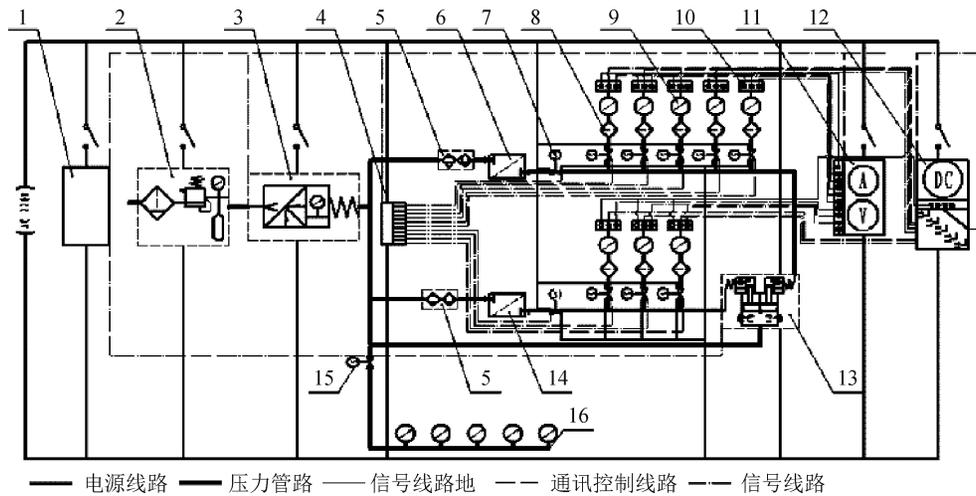


图1 系统原理结构图

Fig.1 Schematic diagram of the system



注：1-上位机；2-电动压力源；3-气压压力控制器；4-PLC开关控制器；5-气液隔离过滤器；6-密封油缸(液压油)；7-电磁截止阀；8-过滤器；9-被检表接口；10-电信号接线端子；11-万用表；12-直流电源；13-液压控制器；14-航空紫油密封油缸；15-气压测试截止阀；16-气压被检表接口。

图2 电气系统设计原理图

Fig.2 Schematic diagram of electrical system design

2.2.1 上位机模块

通过通讯控制总线与压力控制器(气压和液压)、PLC开关控制器、电测模块和综合测试台通讯。对上述设备进行控制和数据采集。

2.2.2 电动压力源模块

电动压力源可产生0~7 MPa的气源，压缩气经过滤、除油、干燥等处理后输出，输出值可以根据需要调节。

2.2.3 压力控制器模块

压力调节设备在测试过程中调节压力：当装置设置的输出压力不大于6 MPa时，压力标准选用气压控制器内置的压力传感器作为压力标准，由

气压压力控制器实现对压力的调节和控制，实现小于0.003% F.S的压力波动，满足测试需要。当装置设置的输出压力大于6 MPa时，压力标准选用液压控制器内置的压力传感器。本装置采用了双介质，在每个介质后端都内置了1支压力传感器作为该介质的标准器，在控制压力时作为标准使用，2个传感器介质完全独立，形成两路独立测试通道。在液压控制器执行控压操作时，储油缸处的截止阀自动关闭，测试系统同气压测试端隔离，液压控制器采用内置的传感器作为反馈标准，通过电机驱动柱塞泵增压的方式进行增压，实现液压测试端的压力控制小于0.005%F.S的压力波动^[6]。

2.2.4 PLC 开关控制器和电磁截止阀系统

本装置采用了气压介质、癸二酸酯和航空紫油三种介质，气压直接用压力控制器输出，提供 0~6 MPa 的测试压力、独立于系统的测试台，测试台设有 5 个测试口。

2 种液压介质分别存储在不同的储液缸内，2 个油缸都和气压控制器相连。2 种介质采用了 2 套完全独立的测试系统，分别提供了 5 个测试口，每个出口都带有 1 个电磁截止阀，可随时打开和关断该出口。在不同介质和不同压力值测试时通过开关控制器，软件可以关闭某些截止阀，实现有针对性的压力控制。

2.2.5 液压油缸模块

液压油为 2 种独立的介质：癸二酸酯和航空紫油，储油缸和气压控制器联通，中间由气体隔离干燥器隔离。2 个独立的测试系统连接的中间，各安装了 1 个电磁截止阀，可用于介质选择。油缸采用密封结构，耐压超过 10 MPa，立式结构下端储油，顶端有气体接口，气体通过过滤、干燥等与控制器相连。压力传输中间无隔离压差。

2.2.6 电测模块

电测模块分为电源模块和数采模块，由直流电源和数字多用表组成，直流电源和数字多用表

可向 15 个输出口分别提供测试端口，每个输出口都安装有电测端子，被检仪表无需将电测线缆输送到数字多用表和直流电源处，直接连接在输出口的测试端子即可。数字多用表可自动对多个输出口进行扫描测试，无需人工切换^[7]。

2.2.7 综合测试台模块

综合测试台分为气体、癸二酸酯和航空紫油 3 个独立的测试区域，分别提供 5 个测试输出口，每个输出口均带有 1 个电磁截止阀，可随时打开和关断该输出口，输出口采用标准快拆接头（内螺纹 M20 × 1.5），每个输出口都对应安装有电测端子^[8]。

3 装置设计

3.1 压力控制系统设计

压力控制器采用多通路高速开关阀做为调节压力的器件，前端采用高压气压源作为压力来源，通过内置的高精度压力传感器做为标准反馈，形成控制闭环。处理器通过测得的当前压力值与目标压力做对比，计算出开关阀的动作频率，计算采用 PID 控制方式，得出控制参数后由开关阀进行动作控制，闭环循环控制，实现高速、高精度的压力控制。压力控制单元原理图如 3 所示。

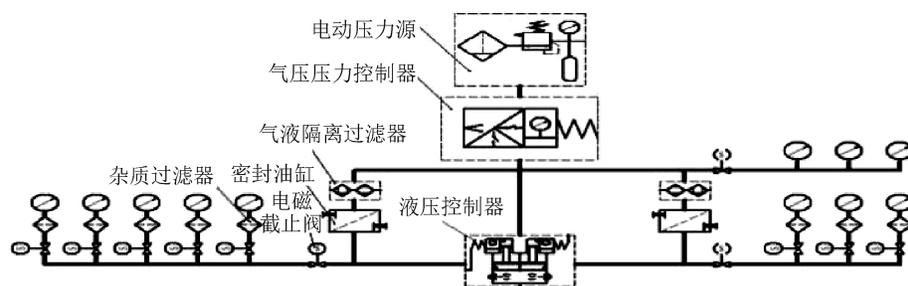


图3 压力控制单元原理图

Fig.3 Principle diagram of pressure control unit

3.1.1 气体介质控压

本装置设计主要采用气压控制器进行气体介质控制（原理图如图 4 所示），其控制量程范围为 0~6 MPa，准确度为 0.02 级。气压控制器提供聚结物过滤器、截断和排放阀等，视具体应用而定。操作人员可在三种设定方法中选择任意一种：
①直接通过触摸屏上的键盘输入压力值（设定点）；
②通过定义固定压力步进值或量程值的百分比，

来定义达到所需压力值的步骤；
③测试序列由用户定义，可编程。

气体介质控制流程：首先电动压力源输出 7 MPa 压力源；接着气压控制器压力置零；然后气压测试介质阀打开；最后经过气压控制器调压后输出给安装的被检表（其他截止阀关闭）^[9-10]。

3.1.2 癸二酸酯介质控压

本装置中设计的液体介质控压主要采用液压

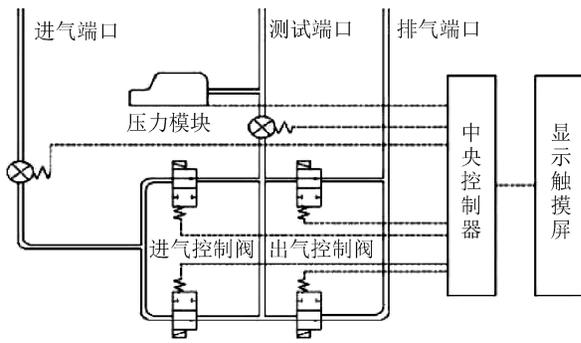


图4 气压控制器原理图

Fig.4 Schematic diagram of air pressure controller

控制器进行控制，其量程范围为0~60 MPa，准确度为0.02级，分为两个独立的介质模块，一个是癸二酸酯介质的通道，一个是阻燃磷酸酯介质的通道，两个通道完全独立。

液压控制器由中央处理器、油缸(油杯)、阀控、液压增压器(增压柱塞缸)、内置压力传感器(压力模块)组成，如图5所示。其采用气压预压，伺服电机驱动，硬质合金活塞密封，内置压力传感器作为标准反馈，与中央处理器、阀控模块、油缸、柱塞增压泵共同组成闭环系统^[1]。处理器得到控压指令后，首先判断压力范围，小于6 MPa，处理器控制阀控系统自动切换到气压控制器控制部分，液压增压泵保持不动作；大于6 MPa的测试点，处理器控制阀控系统进行预压，当内置传感器测得压力大于6 MPa后，截止阀关闭、伺服控制部分动作，由伺服电机带动增压柱塞进行增压、控制算法采用专家型PID算法，分段进行，多参数控制，实现高速、稳定控压。在执行控压命令时，处理器通过压力传感器获得当前压力，由液压增压器中的伺服电机带动增压柱塞运动，实现压力的升降控制^[12]。在预压、增压、稳压不同阶段采用不同PID参数对压力的精确控制，实现快速预压、高速增压、精确稳压。

首先电动压力源输出7 MPa压力源，然后气压控制器压力置零，接着癸二酸酯储油缸介质阀打开，之后输出口截止阀打开，最后输出给安装的被检表(其他截止阀关闭)。

在增加过程中，若预设压力值不大于6 MPa，则由气压控制器直接调压输出给被检测试端；如果预设压力值大于6 MPa，则先由气压控制器预压至6 MPa，然后癸二酸酯储油缸介质阀关闭，之后

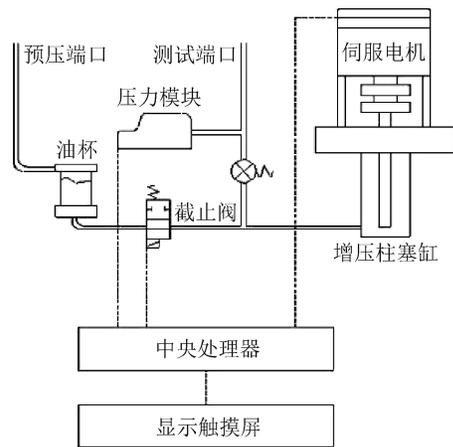


图5 液压控制原理图

Fig.5 Schematic diagram of hydraulic control

气压控制器置零，然后由液压控制器调压，最后输出给被检设备进行测试。

3.1.3 航空紫油介质控压

紫色油介质控制和癸二酸酯介质控压采用同一个液压控制器进行控制，只不过选用不同的控制管道，其控制原理相同。

3.1.4 电动气压压力源

本装置的气压源采用电动气压压力源提供(无需外接气瓶)，内置电动压力泵，可产生0~7 MPa的压力气源，压缩气体经过颗粒过滤、除油、干燥等处理后，储存在压力源内置7 L高压气容内，压力输出采用优质校验器稳压，确保输出压力清洁、稳定。内置压力控制程序可自动调节压缩机启动，使压力源保持在固定的压力输出值以上^[13]，输出值可以根据需要进行调节。

3.2 信号控制及综合测试模块设计

3.2.1 综合测试单元设计

综合测试单元原理图如图6所示，直流电源提供给被测压力测量设备激励源，通过上位机控制

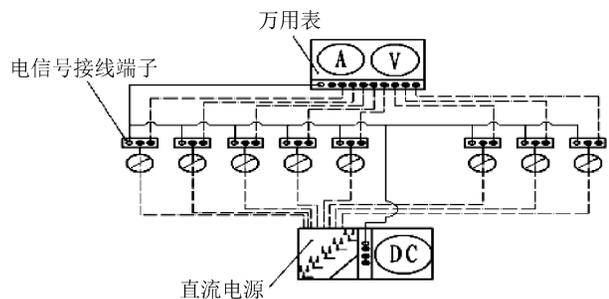


图6 综合测试单元原理图

Fig.6 Schematic diagram of integrated test unit

电源的输出电压和电流大小,其中电压采用输出端并联设置,电流采用输出端串联设置,以满足压力测量设备正常工作。测量端采用多路端子切换的方式,分别由上位机控制数字多用表进行电压、电流采集^[14-15]。

3.2.2 信号控制单元设计

装置信号控制系统主要对上位机、液压控制器、气压控制器、电磁控制板、万用表、电源等的控制,其原理图如图7所示。仪表连接台分为气体介质、癸二酸酯介质和紫油介质三个独立的系统,其中癸二酸酯部分由1个密封油缸、总电磁截止阀、电磁控制板,5个带有过滤装置的输出口、每个输出口压力前段的电磁截止阀和仪表工位的电测接线端子组成。

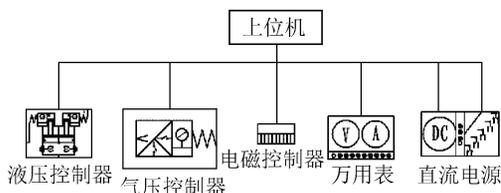


图7 信号控制系统原理图

Fig.7 Schematic diagram of signal control system

航空紫油部分由1个密封油缸、总电磁截止阀、5个带有过滤装置的输出口、每个输出口压力前段的电磁截止阀和仪表工位的电测接线端子组成。该部分压力管路和阀门接液部分均采用耐紫油腐蚀的不锈钢材料组成。

油缸作为储液装置,存储加压使用的液体介质,在增压过程中,小于6 MPa时气体控制器通过储液油缸将加压介质压缩进测试管路,使压力控制器的输出压力能无损输出至输出口。

在大于6 MPa的测试时,系统自动关闭储液缸总电磁阀,系统通过液体控制器进行增压,整个控压过程中高低压通过电磁截止阀隔离。

通大气状态由气压控制器内部的泄压阀执行,当控制器在0点下,整个系统通过储液缸和气压控制器的气路与大气联通,使测试管路中的介质回流到油缸内,故油缸是完全密封的状态,无油液污染问题。

每个输出口都配置1个电磁介质阀,此电磁介质阀与控压管路连接。在测试过程中,若发现某一输出口仪表故障无法继续进行测试时,可通过

上位机软件,对该输出口进行关闭,关闭后其他输出口可继续进行测试工作。

每个输出口都配置5路接线端子,接线端子与数字多用表和直流电源连接,在仪表进行测试时,电测导线无需远传至万用表和直流电源处。可直接与输出口处的端子连接,该端子可与鳄鱼夹、裸线和橡胶端子连接,轻松方便,端子在平台内部与数字多用表扫描器进行连接,并完成测试。

4 装置溯源方案

根据本装置的硬件组成,可以分别采用分布式离位校准或整体综合校准两种溯源方式。

4.1 分布式离位校准

根据本装置的硬件组成,气压控制器、液压控制器、数字多用表、直流电源等4部分对整套装置的技术参数起到决定性的作用,故可分别将该4部分单元按照JJG 1107-2015《自动标准压力发生器》、JJF 1587-2016《数字多用表校准规范》、JJF 1597-2016《直流稳定电源校准规范》等采用更高等级的计量装置进行独立校准。

4.2 整体综合校准

按照本装置的综合设计指标,可采用比对法,采用标准压力传感器或模块对其进行整体校准,校准时只需将符合要求的标准压力传感器或标准压力模块安装在被校准端口,由系统控制输出的压力和标准压力传感器采集的压力进行比对,计算出误差及偏置量即可。

通过验证,该多功能压力校准装置采用分布式离位校准或整体综合校准两种溯源方式均可实现有效溯源。

5 总结

设计了多功能压力校准装置,具有多介质、多量程段、多通道自动校准的功能。能够实现3种介质的压力测量设备的校准,分别为普通气体介质、普通液体介质、腐蚀性液体介质;且每种介质能够同时校准5台被校测量设备;量程范围为高、低两个量程段。可根据需求随意设置,实现一台压力校准装置进行多类型被校压力测量设备的全自动校准,提高了校准效率,降低了用户成本,具有一定的社会和经济价值。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. 压力传感器(静态)检定规程. JJG 860-2015[S]. 北京: 中国质检出版社, 2015. General Administration of Quality Supervision. Inspection and quarantine. verification regulation for pressure sensors (static): JJG 860-2015[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2015. (in Chinese)
- [2] 国家市场监督管理总局. 压力变送器(静态)检定规程. JJG 882-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019. The State Administration of Market Supervision. Verification procedure for pressure transmitters (static). JJG 882-2019[S]. Beijing: China Standards Press, 2019. (in Chinese)
- [3] 韦俊辉, 蔡晋辉, 汤建斌. 压力变送器综合性能测试系统[J]. 自动化与仪表, 2012. WEI J H, CAI J H, TANG J B. Pressure transmitter integrated performance test system [J]. Automation and Instrumentation, 2012. (in Chinese)
- [4] 杨洪胜, 姚进, 杨振华. 多通道压力传感器自动校准系统研制[J]. 中国科技信息, 2010. YANG H S, YAO J, YANG Z H. Development of automatic calibration system for multi-channel pressure sensor [J]. China Science and Technology Information, 2010. (in Chinese)
- [5] 何帆. 多路压力传感器自动校准系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2012. HE F. Design and implementation of automatic calibration system for multi-channel pressure sensors[D]. Chengdu: University of Electronic Technology, 2012. (in Chinese)
- [6] 王宝君, 刘欣菊, 刘宝琦. 压力校准技术及应用介绍[J]. 计测技术, 2008, 28(3). WANG B J, LIU X J, LIU B Q. Introduction to pressure calibration techniques and applications [J]. Metrology & Measurement Technology, 2008, 28(3). (in Chinese)
- [7] 马翠英, 刘峰. 高精度全自动压力校准系统[J]. 上海计量测试, 2018, 45(A01): 46-47, 50. MA C Y, LIU F. High precision automatic pressure calibration system [J]. Shanghai Metrology Test, 2018, 45 (A01): 46-47, 50. (in Chinese)
- [8] 任树祥, 罗朝利, 张立海, 等. 多功能压力计量标准器的研制[J]. 中国计量, 2005, (4). REN S X, LUO C L, ZHANG L H, et al. Development of multifunctional pressure measurement standard [J]. China Metrology. Issue, 2005, (4). (in Chinese)
- [9] 张琦, 胡湘宁, 杨水旺. 多通道压力传感器校准系统研制[J]. 计测技术, 2007, 226(S1). ZHANG Q, HU X N, YANG S W. Development of multi-channel pressure sensor calibration system [J]. Metrology & Measuring Technology, 2007, 226(S1). (in Chinese)
- [10] 薛战军, 卞学红, 杜玲玲, 等. 多通道压力传感器综合检测系统设计[J]. 计测技术, 2013, 33(6): 40-43, 75. XUE Z J, BIAN X H, DU L L, et al. Design of multi-channel pressure sensor integrated detection system [J]. Metrology & Measuring Technology, 2013, 33(6): 40-43, 75. (in Chinese)
- [11] 饶建华, 蔡诗龙, 肖陶康, 等. 低压伺服源控超高压液压增压装置设计[J]. 制造业自动化, 2016, 38(9). RAO J H, CAI S L, XIAO T K, et al. Design of ultra-high pressure hydraulic booster controlled by low pressure servo source [J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(9). (in Chinese)
- [12] 翟博, 李星野. 基于误差修正模型的自适应递推滤波算法[J]. 火力与指挥控制, 2012, 207(6). ZHAI B, LI X Y. Adaptive recursive filtering algorithm based on error correction model [J]. Firepower and Command and Control, 2012, 207(6). (in Chinese)
- [13] 秦亭亭, 洪扁, 马力, 等. 一种多通道压力变送器的校准台[J]. 上海计量测试, 2019, 275(4). QIN T T, HONG B, MA L, et al. A calibration stand for multi-channel pressure transmitters [J]. Shanghai Metrology Test, 2019, 275(4). (in Chinese)
- [14] 周元华, 马卫国. 多通道压力数据采集与分析系统设计[J]. 机床与液压, 2011, 284(2). ZHOU Y H, MA W G. Design of multi-channel pressure data acquisition and analysis system [J]. Machine Tools and Hydraulics, 2011, 284(2). (in Chinese)
- [15] 赵佳龙, 岳宏, 夏航, 等. 基于LabVIEW的多通道压力传感器实时动态检测系统设计[J]. 传感器与微系统, 2022, 365(7). ZHAO J L, YUE H, XIA H, et al. Design of real-time dynamic detection system for multi-channel pressure sensor based on LabVIEW [J]. Sensors and Microsystems, 2022, 365(7). (in Chinese)

(本文编辑: 田艳玲)



第一作者: 薛战军(1985—), 男, 高级工程师, 于航空工业第一飞机设计研究院从事航空计量技术研究。