

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.06.11

试飞测试系统压力参数在线校准方法与装置

李绍阔¹, 冯仁剑^{1*}, 李卢丹², 张玉琴²

(1.精密光机电一体化技术教育部重点实验室(北京航空航天大学), 北京 100191;

2.中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089)

摘 要: 当前试飞测试系统压力参数的校准主要采取拆卸后在实验室校准的方式, 存在校准时间长, 多次拆装容易造成接口损坏的问题。为了解决这个问题, 研究一种压力参数的在线校准方法, 实现了真实工况下的原位比对校准。通过实验获得了标准压力传感器在温度复合情况下的量值特性规律, 构建了温度补偿模型, 实现了标准压力值的准确获取。研制了由三个不同量程标准压力传感器、环境温度湿度和大气压传感器以及在线校准软件等组成的校准装置, 通过初步实验验证了校准方法和装置的合理性。该方法可以作为实验室校准的有效补充, 降低校准的人力和时间成本, 提高飞行试验的效率。

关键词: 试飞测试; 压力在线校准; 温度补偿; 校准装置; 校准软件

中图分类号: TB935

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2022)06-0075-08

A field calibration method and device for pressure parameters of flight test system

LI Shaokuo¹, FENG Renjian^{1*}, LI Ludan², ZHANG Yuqin²

(1. Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology(Beihang University), Ministry of Education, Beijing 100191, China; 2. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: The current calibration method of pressure parameters of a flight test system is laboratory calibration, which is time-consuming and has the problem that multiple dismounting operations may damage the sensor's interface. In this paper, a field calibration method of pressure parameters is studied, and the in-situ comparison calibration is realized under real working conditions. The characteristic of the magnitude of the standard pressure sensor under the condition of temperature compounding is obtained through experiments, and the temperature compensation model is constructed to realize the accurate acquisition of the standard pressure value. A calibration device consisting of three standard pressure sensors with different ranges, ambient temperature, humidity and atmospheric pressure sensors, and field calibration software was developed. The rationality of the calibration method and device was verified through preliminary experiments. This method can be used as an effective supplement to laboratory calibration, reducing the labor and time cost of calibration and improving the efficiency of flight tests.

Key words: flight test; pressure field calibration; temperature compensation; calibration device; calibration software

0 引言

压力参数是试验机的常规必测参数, 试验机的燃油系统、液压系统以及环控系统都需要进行

大量的压力参数测试^[1]。试飞测试系统是完成压力参数测试的配套设备, 包括传感器、信号调节器、数据采集器和数据记录器^[2]。为确保压力测试数据的准确可靠, 实现被测参数量值的溯源,

收稿日期: 2022-08-22; 修回日期: 2022-09-27

基金项目: 民用飞机专项科研项目(MJZ-2018-J-106)

引用格式: 李绍阔, 冯仁剑, 李卢丹, 等. 试飞测试系统压力参数在线校准方法与装置[J]. 计测技术, 2022, 42(6): 75-82.

Citation: LI S K, FENG R J, LI L D, et al. A field calibration method and device for pressure parameters of flight test system[J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(6): 75-82.



需定期对测试系统进行校准。当前的校准方法为实验室校准。实验室校准技术较为成熟,但需将测试系统拆卸,存在易损坏设备接口和不能反映测试系统工作环境等问题,而在线校准适用于被校准设备不宜拆装的情况。但目前国内还没有建立适合于民机试飞测试系统压力参数在线校准的方法及规范,因此研究测试系统压力参数在线校准方法具有重要意义。

校准环境由实验室移到了现场,在线校准过程中需充分考虑温湿度和大气压等环境因素对校准结果的影响^[3]。国内外已有诸多研究人员对在线校准技术进行研究。杨懿和陈文丽^[4]等人研究了一种液体火箭发动机稳态压力测量系统在线校准方法,通过三次样条插值法对压力传感器进行温度补偿,降低了环境温度对传感器的影响。赵静和李鑫武^[5]开展了压力仪表在线校准环境影响因素试验研究,分析了不同环境温湿度对压力表和数字压力计的影响,为压力在线校准的数据补偿提供了依据和参考。Yeung H和Lane BM^[6]等人于2020年首次提出了用于传感器网络仿真的框架,从而能够对多种具有可重复性和可扩展性的在线校准策略进行系统的比较。Yoon S^[7]针对空气处理单元中传感器在线校准的局限性,结合自动编码器和贝叶斯推理,提出了一种改进的传感器在线校准方法,使用三步策略构造自动编码器输入变量,并采用新的距离函数,达到了良好的校准效果。

基于上述理论研究,本文提出了一种试飞测试系统压力参数的在线校准方法,构建了标准压力传感器在温度复合下的温度补偿模型,并研制了在线校准装置,通过初步试验验证了校准方法的合理性。研究结果对降低校准的人力和时间成本,提高飞行试验效率具有重要意义。

1 压力参数在线校准

1.1 压力参数在线校准方法

在线校准根据工作方式可分为接入式校准和非接入式校准^[8]。本方法采用接入式校准,通过接入更高精度的标准压力传感器,进行比对校准。

试验机上各种管路纵横交错,压力源输出压力通过各种开关阀体达到各自系统进行各自相应

的动作。当需要进行校准时,将标准压力传感器安装于事先预留的待测压力的压力支路,利用飞机管路介质产生的压力作为压力源,通过记录标准压力传感器的输出,比对被校准测试系统压力的输出,达到在线校准的目的。

1.2 压力参数在线校准技术指标

测试系统测量的压力参数具有数量大、量程范围宽(从0~50 MPa不等)的特点。为满足测试系统不同压力参数的校准需求,需对校准范围进行量程分段。通过对压力参数进行统计分析,最终将标准压力传感器的量程范围分为三种,见表1所示。

表1 标准压力传感器的技术指标

Tab.1 Specifications of standard pressure sensors

量程/MPa	不确定度 $U(k=2)/\%$
0 ~ 0.5	0.05
0 ~ 5	0.07
0 ~ 50	0.10

1.3 压力参数在线校准方案

试验机上压力参数经过信号调节器和数据采集器获得,再通过网络传输或保存在测试系统的数据记录器。校准时,试验机正常工作提供压力源,校准管理计算机通过以太网方式或脉冲编码调制(PCM)方式与测试系统通信获取被校准压力测试单元的压力测量值,同时通过压力校准装置获取压力标准值以及环境温湿度和大气压,最后通过对压力标准值和测量值分析处理,得出被校准压力测试单元的校准精度并生成校准报告。压力参数在线校准示意图如图1所示。

2 标准压力传感器

根据压力参数在线校准技术指标,选择标准压力传感器。0~0.5 MPa和0~5 MPa量程的传感器为数字输出型,0~50 MPa量程的传感器为模拟电流输出型。校准现场为宽温环境,为保障校准工作的顺利进行,传感器需能够在0~50℃的环境正常工作。数字输出型传感器采用数字化误差补偿技术已实现传感器的线性、零点、温漂、蠕变等性能参数的综合补偿;而该模拟电流输出型传感器为硅压阻型传感器,其输出受温湿度和电源

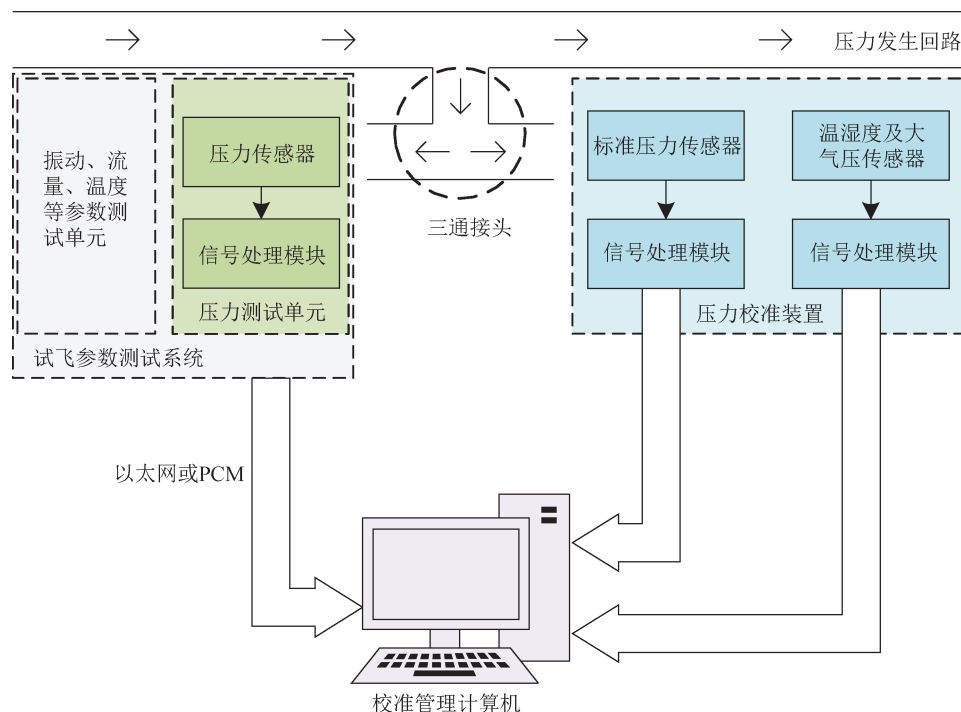


图1 压力参数在线校准示意图

Fig.1 Schematic diagram of field calibration of pressure parameters

波动等因素的影响，其中温度是主要的影响因素^[9]。因此需要通过实验获得该传感器在温度复合情况下的量值特性规律，构建温度补偿模型。

目前常用的温度补偿方法主要分为硬件补偿和软件补偿。硬件补偿通过优化测量电路的温度敏感特性实现，存在补偿方法复杂，通用性较弱等缺点，不能满足工程应用要求^[10]。软件补偿通过构建温度复合下待测压力与传感器输出的函数关系实现，主要分为人工智能和数值计算两类^[11]。试飞测试系统压力参数校准现场环境温度动态变化，要求温度补偿模型具有低复杂度、高补偿速度的特点。基于人工智能的补偿方法对样本规模与样本质量要求较高，且补偿效果正比于模型复杂度，不利于在线补偿；而数值计算的方法具有对建模数据要求不高、补偿速度快的特点，易于实现在线补偿^[12-14]。本文提出了一种在全温区进行数据采集的基础上，采用最小二乘拟合原理和线性插值原理构建温度补偿模型的方法。

压阻式压力传感器的温度漂移主要由热零点漂移、热灵敏度改变和热迟滞效应造成^[15]。通过测试，0~50 MPa量程压力传感器的输出和温度呈一一对应的关系，即传感器的热重复性较好，可以忽

略热迟滞效应带来的测量误差。通过数字补偿方式，实现传感器的热零点和热灵敏度误差补偿。

使用标准压力发生器在0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 °C下对0~50 MPa量程传感器进行加压测试，得到不同温度下传感器测量值与标准值呈线性关系。在0 °C的关系曲线如图2所示。

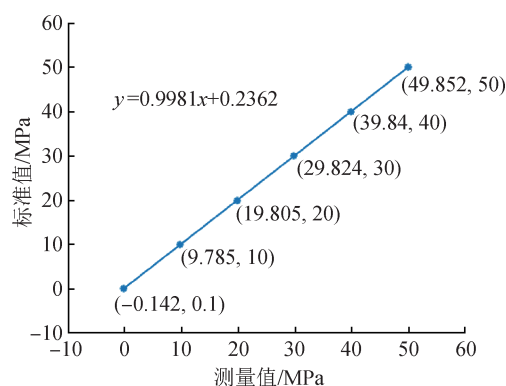


图2 温度0 °C测量值与标准值的关系

Fig.2 Relationship between measured value and standard value at 0 °C

传感器的输出电流经过采样电阻转换为电压信号，校准软件获取电压值后通过压力-电压关系式转换为压力值。其转换关系为

$$P_m = 12.6443 \times U - 12.5601 \quad (1)$$

式中: P_m 为测量压力值, MPa; U 为电压值, V。

对不同温度下的测量值与标准值进行最小二乘拟合, 得到测量值与标准值的关系式, 并由此得到不同温度下修正后的压力-电压关系式。不同温度下, 关系式的斜率和截距如图3所示。

传感器的温度补偿通过软件实现, 补偿方式为: ①软件启动时自动加载 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 °C 下传感器的压力-电压关系式的斜率和截距数据, 读取校准装置中温度传感器的测量值 T ; ②根据测量值 T , 通过线性插值的方式计算该温度下传感器压力-电压关系式的斜率 a 和截距 b ; ③获取输出电压值 U , 根据关系公式, 将电压值转换为压力值。

3 压力参数在线校准装置

3.1 校准装置结构设计

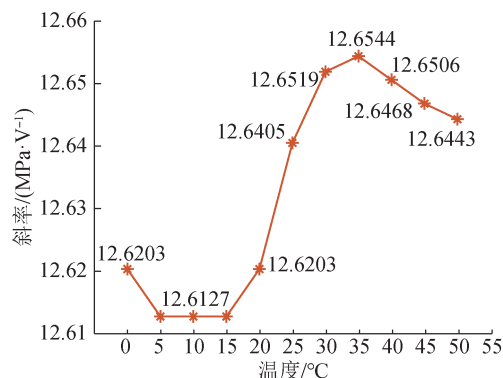
根据压力参数校准需求, 温湿度和大气压传感器用于获取校准现场的环境信息, 并最终记入校准报告。同时校准软件根据温度测量值对 0~50 MPa 量程的标准传感器进行温度补偿。对校准装置进行结构设计, 其结构示意图如图4所示。各传感器的数据传输方式见表2所示。

校准装置实物图及内部连接图如图5所示。

3.2 校准装置不确定度分析

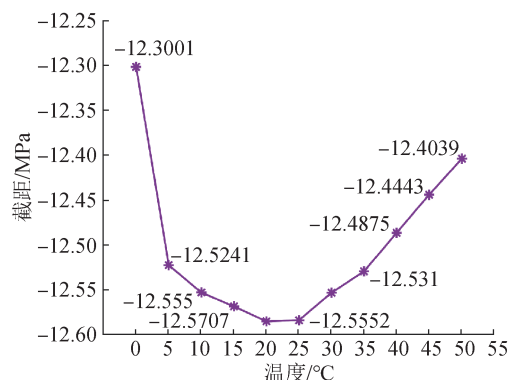
3.2.1 数字输出型传感器的不确定度评定

0~0.5 MPa 和 0~5 MPa 量程传感器的最大允许误差分别为 ± 0.1 kPa 和 ± 1 kPa, 且都服从均匀分布, 传感器的标准不确定度为



(a) 斜率随温度的变化曲线

(a) Variation of slope with temperature



(b) 截距随温度的变化曲线

(b) Variation of intercept with temperature

图3 斜率和截距随温度的变化曲线

Fig.3 Variations of slope and intercept with temperature

$$u_{c1} = \frac{MPEV}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

式中: u_{c1} 为传感器的标准不确定度, kPa; $MPEV$ 为传感器的最大允许误差绝对值, kPa。由此得到, 0~0.5 MPa 量程传感器的不确定度为 0.071 kPa, 0~5 MPa 量程传感器的不确定度为 0.71 kPa。

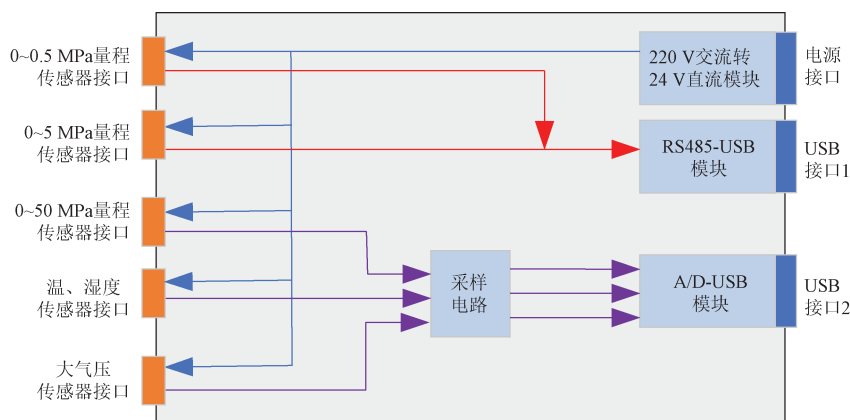


图4 校准装置结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the structure of calibration device

表2 传感器的数据传输方式

Tab.2 Data transmission method of sensor

传感器类型	输出形式	数据传输方式
DPS8000 500 kPa	数字输出	RS485-USB
DPS8000 5 MPa	数字输出	RS485-USB
UNIK5000 50 MPa	模拟电流输出	采样电路, A/D-USB
HT160 温湿度	模拟电流输出	采样电路, A/D-USB
JXBS-3001 大气压	模拟电流输出	采样电路, A/D-USB

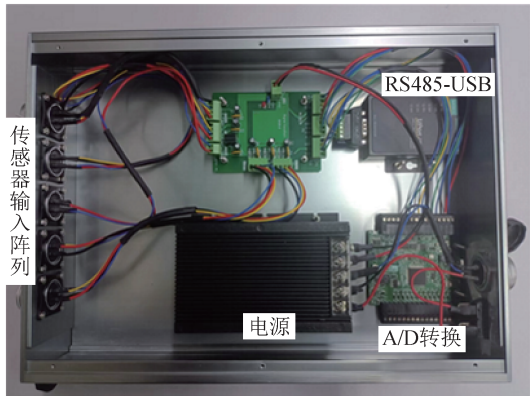
(a) 实物图
(a) Physical picture(b) 内部连接图
(b) Internal connection diagram

图5 校准装置实物图及内部连接图

Fig.5 Physical drawing and internal connection diagram of calibration device

3.2.2 模拟输出型传感器的不确定度评定

0 ~ 50 MPa 量程的传感器为电流输出型。传感器的输出电流经过采样电阻转化为电压信号, 经过 A/D 采集电路转换为数字信号, 再经由 A/D-USB 模块传输。中间的转化步骤引入了新的不确定度分量, 不确定度分量包括传感器的不确定度, 采样电阻的不确定度和 A/D 采集电路的不确定度。

1) 传感器引入的不确定度分量

传感器的最大允许误差为 $\sigma_s = \pm 20$ kPa, 且服从均匀分布, 传感器的不确定度为

$$u_{cs} = \frac{|\sigma_s|}{\sqrt{3}} = 14.144 \text{ kPa} \quad (3)$$

2) 采样电阻引入的不确定度分量

电路中采样电阻由两个贴片电阻并联组成。贴片电阻为高精度电阻, 电阻型号为 CAST RJ 711 - 0.25 W, 电阻的温度特性为 $1 \times 10^{-5} \Omega/\text{K}$, 年稳定性 $\leq 0.005\%$ 。贴片电阻的误差为

$$\sigma_r = (T_c - T_b) \cdot C_r \quad (4)$$

式中: σ_r 为贴片电阻的误差, Ω ; T_c 为实际环境温度, K; T_b 为贴片电阻的标准环境温度, 298.15 K; C_r 为贴片电阻的温度特性。

在 0 ~ 50 °C 环境下, 采样电阻的最大允许误差为 $\sigma_R = \pm 1.25 \times 10^{-4} \Omega$, 且服从均匀分布, 采样电阻的不确定度为

$$u_{cR} = \frac{|\sigma_R|}{\sqrt{3}} = 8.84 \times 10^{-5} \Omega \quad (5)$$

3) A/D 采集引入的不确定度分量

校准装置使用的 A/D 采集卡为 NI USB - 6002 系列数据采集设备, 依据使用手册中的数据, A/D 采集的误差为 $\sigma_{AD} = \pm 0.31 \text{ mV}$, 且服从均匀分布, A/D 采集的不确定度为

$$u_{cAD} = \frac{|\sigma_{AD}|}{\sqrt{3}} = 0.22 \text{ mV} \quad (6)$$

4) 合成不确定度

传感器在正常工作范围内其电流值和压力值呈线性关系。量程为 50 MPa, 电气输出量程为 16 mA, 测量输出量的灵敏系数 $c_I = 0.32 \text{ mA/MPa}$ 。压力-电流转换关系为

$$F = \frac{1}{c_I} \cdot I \pm \sigma_s \quad (7)$$

式中: F 为压力值, MPa; I 为传感器输出电流, mA; σ_s 为传感器测量误差, MPa。

传感器的合成不确定度为

$$u_{cF} = \sqrt{\left(\frac{1}{c_I} \cdot u_{cI}\right)^2 + (u_{cs})^2} \quad (8)$$

式中: u_{cF} 为传感器的合成不确定度, MPa; u_{cI} 为输出电流的不确定度, mA; u_{cs} 为传感器的不确定度, MPa。

电路中电流-电压关系式为

$$I = \frac{U}{R} \quad (9)$$

输出电流的不确定度为

$$u_{cI} = \sqrt{\left(\frac{1}{R} \cdot u_{cAD}\right)^2 + \left(\frac{U}{R^2} \cdot u_{cR}\right)^2} \quad (10)$$

式中： R 为采样电阻阻值，取 $278.59\ \Omega$ ； U 为电压值，mV。

结合式(8)和(10)可得传感器的合成不确

定度的最大值约为 $14.547\ \text{kPa}$ 。

4 在线校准软件

压力参数在线校准软件基于QT设计完成，主要用于采集在线校准装置的测量数据和被校准压力测试系统的测量数据，并对数据进行处理最终生成校准报告。压力参数在线校准软件的流程如图6所示。

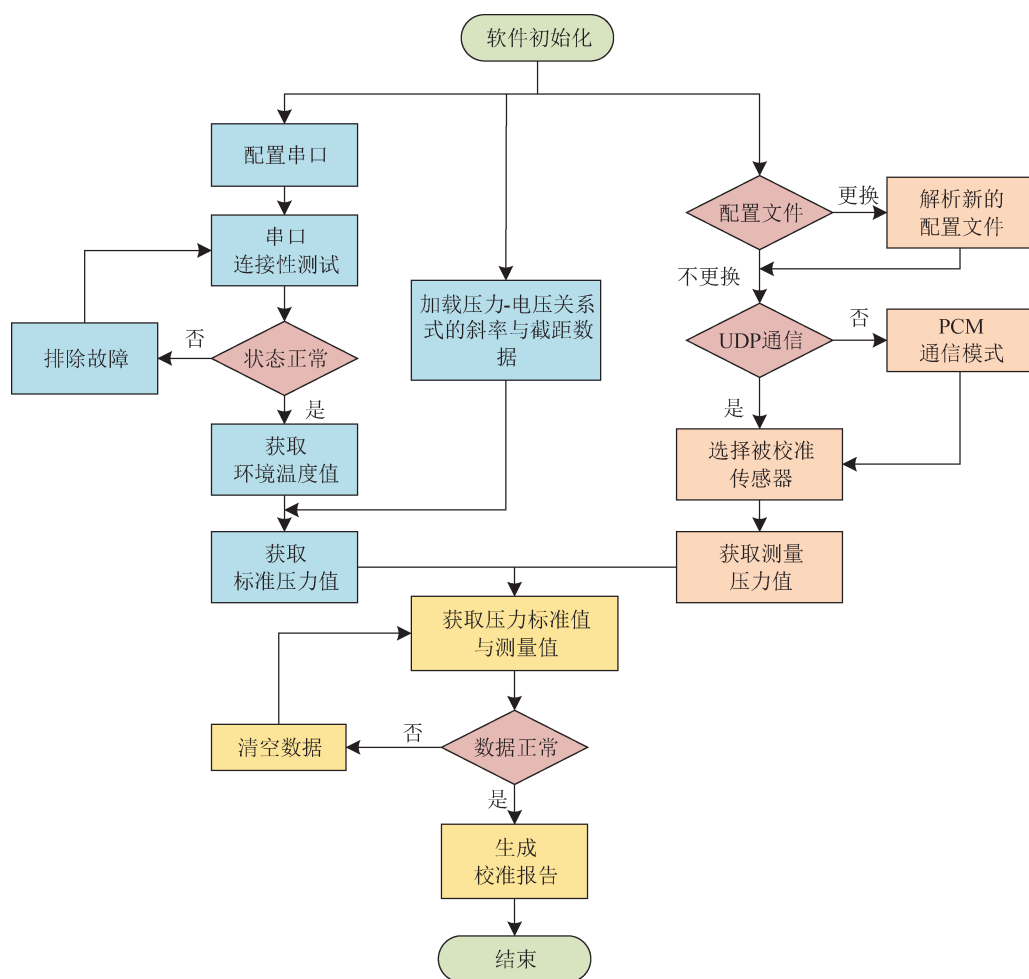


图6 在线校准软件的流程图

Fig.6 Flow chart of field calibration software

在线软件的主要功能为：

1) 解析并保存试飞测试系统配置信息

试飞测试系统的配置文件为XidML格式，文件内容包括测试系统的IP地址和端口号等通信所需信息。初次使用校准软件时选择需要解析的XidML配置文件，程序自动对该配置文件进行解析，并将解析的信息显示到程序UI界面，同时将解析的全部

信息保存到SQLITE数据库，待下次打开软件时自动从数据库加载配置信息，无需再次解析。

2) 采集校准装置中各传感器的测量数据

在线校准软件通过定期对 $0 \sim 0.5\ \text{MPa}$ 量程传感器和 $0 \sim 5\ \text{MPa}$ 量程传感器发送串口指令，接收两个传感器的测量数据。 $0 \sim 50\ \text{MPa}$ 量程传感器、温湿度传感器和大气压力传感器的输出为模拟信

号,通过采样电路与A/D-USB模块将模拟信号转换为数字信号并传输至在线校准软件。在线校准软件在程序界面实时显示校准装置各传感器的测量数据。

3) 获取被校准压力测试单元的测量数据

被校准压力测试系统的测量数据通过以太网或PCM形式传输至在线校准软件。在线校准软件对来自被校准压力测试系统的测量值进行解析,转换为十进制的数据,并实时显示在程序主界面。

4) 生成校准报告

在线校准软件同时获取校准装置中各传感器的测量数据和被校准压力测试系统的测量数据,并以固定格式显示到程序界面,待获取数据完成后,即可选择生成校准报告功能,程序会自动将校准数据保存到指定的Excel表格中,生成校准报告。

5 实验验证

使用范围-100~100 kPa至0~10 MPa,准确度等级0.01级和范围1~60 MPa,准确度等级0.005级的标准压力发生器对在线校准装置进行校准,其校准过程为:①将校准装置置于20℃环境中,静置2 h;②使用标准压力发生器对校准装置的压力传感器均匀加压至传感器量程上限,然后再均匀减压至量程下限,并记录校准数据;③借助温控箱将校准装置分别置于0℃和50℃环境中,重复步骤②。校准结果见表3所示。

表3 标准压力传感器校准结果

Tab.3 Calibration results of standard pressure sensor

温度/℃	量程/MPa	不确定度 $U(k=2)$ /kPa
0	0~0.5	0.032
	0~5	0.400
	0~50	15.000
20	0~0.5	0.020
	0~5	0.300
	0~50	16.000
50	0~0.5	0.031
	0~5	0.400
	0~50	12.000

由表3可知,0~0.5 MPa,0~5 MPa和0~50 MPa量程的标准压力传感器,在0,20,50℃下的不确定度的最大值分别为0.032,0.4,16 kPa,全部达到了预期技术指标,所设计的校准装置准确可靠。

6 结论

针对试验机压力参数众多且量程范围不一的问题,提出了分段校准的方法,选取三个不同量程和不确定度的传感器作为标准传感器。针对校准现场环境温度动态变化,0~50 MPa量程标准传感器存在温度漂移的问题,通过实验获得了标准传感器在不同温度的压力-电压关系模型,并通过在线校准软件实现了实时温度补偿。最后通过校准验证了在线校准装置的可靠性。该在线校准方法能够有效降低校准周期,为提高飞行试验的效率奠定了基础。

参考文献

- [1] 张建斌,张周焕. 发动机试验测量系统现场校准技术研究[J]. 计测技术, 2016, 36 (S1): 285-288.
ZHANG J B, ZHANG Z H. Field calibration technology research of engine test and measurement systems[J]. Metrology and measurement technology, 2016, 36(S1): 285-288. (in Chinese)
- [2] 刘明,马亚平,李宏. 智能化机载测试系统关键技术综述[J]. 中国测试, 2018, 44 (7): 99-104.
LIU M, MA Y P, LI H. Summary of key technologies of intelligent airborne test system [J]. China measurement and test, 2018, 44(7): 99-104. (in Chinese)
- [3] 田晓兵. 压力测量系统的现场校准技术[J]. 电子测试, 2019 (6): 39-41.
TIAN X B. The field calibration technology of the pressure measuring system [J]. Electronic test, 2019(6): 39-41. (in Chinese)
- [4] 杨懿,陈文丽,贾志杰,等. 降低发动机试验稳态压力测量不确定度方法研究[J]. 计测技术, 2020, 40 (5): 15-21.
YANG Y, CHEN W L, JIA Z J, et al. Improvement of steady state pressure measurement method for engine test [J]. Metrology and measurement technology, 2020, 40 (5): 15-21. (in Chinese)
- [5] 赵静,李鑫武. 压力仪表现场校准环境影响因素试验研究[J]. 计测技术, 2016, 36 (2): 38-41.

- ZHAO J, LI X W. Verification of environmental adaptability of pressure meters[J]. Metrology and measurement technology, 2016, 36(2): 38–41. (in Chinese)
- [6] YEUNG H, LANE B M, DONMEZ M A, et al. In-situ calibration of laser/galvo scanning system using dimensional reference artefacts [J]. CIRP Annals, 2020, 69 (1): 441–444.
- [7] YOON S. In-situ sensor calibration in an operational air-handling unit coupling autoencoder and Bayesian inference [J]. Energy and buildings, 2020, 221: 110026.
- [8] 王晓明. 压力仪表在线校准方法研究 [J]. 计量与测试技术, 2015, 42 (8): 13–15.
- WANG X M. Pressure meter calibration method study [J]. Metrology and measurement technique, 2015, 42 (8): 13–15. (in Chinese)
- [9] 田青林, 陈红亮, 陈洪敏, 等. 一种压阻式压力传感器全温区温度补偿方法[J]. 中国测试, 2021, 47 (1): 49–53.
- TIAN Q L, CHEN H L, CHEN H M, et al. A full-temperature-range temperature compensation method for piezoresistive pressure sensor [J]. China measurement and test, 2021, 47(1): 49–53. (in Chinese)
- [10] 李冀, 胡国清, 周永宏, 等. 一种压阻式压力传感器的温度补偿方法[J]. 仪表技术与传感器, 2018 (6): 1–4, 10.
- LI J, HU G Q, ZHOU Y H, et al. Temperature compensation method for piezo-resistive pressure sensor [J]. Instrument technique and sensor, 2018(6): 1–4, 10. (in Chinese)
- [11] 张艳华, 陈玉玲, 赵爽, 等. 压阻式压力传感器温度补偿技术的研究及应用[J]. 电子测量技术, 2017, 40 (5): 138–142, 153.
- ZHANG Y H, CHEN Y L, ZHAO S, et al. Research on method of temperature compensation for piezoresistive pressure sensor [J]. Electronic measurement technology, 2017, 40(5): 138–142, 153. (in Chinese)
- [12] 刘贺, 李淮江. 基于BP神经网络的压力传感器温度补偿方法研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33 (5): 688–692, 732.
- LIU H, LI H J. Research on temperature compensation method of pressure sensor based on BP neural network [J]. Chinese journal of sensors and actuators, 2020, 33 (5): 668–692, 732. (in Chinese)
- [13] 闫文吉, 陈红亮, 陈洪敏, 等. 硅压阻式压力传感器测量误差在线补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41 (6): 59–65.
- YAN W J, CHEN H L, CHEN H M, et al. Research on on-line compensation method for the measurement error of silicon piezoresistive pressure sensor [J]. Chinese journal of scientific instrument, 2020, 41(6): 59–65. (in Chinese)
- [14] 庞芳, 张海丰, 葛洪亮, 等. 曲面拟合算法在硅压阻式压力传感器温度特性研究中的应用[J]. 佳木斯大学学报 (自然科学版), 2017, 35 (1): 100–102.
- PANG F, ZHANG H F, GE H L, et al. Application of the curved surface fitting method in the study on the temperature characteristic of silicon piezoresistive pressure sensor [J]. Journal of Jiamusi University (Natural science edition), 2017, 35(1): 100–102. (in Chinese)
- [15] 贺红林, 许佳豪, 周战洪, 等. 压阻式压力传感器温度误差的插值补偿方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35 (12): 1–7.
- HE H L, XU J H, ZHOU Z H, et al. Research on interpolation compensation method for temperature error of piezo-resistive pressure sensor [J]. Journal of electronic measurement and instrumentation, 2021, 35 (12): 1–7. (in Chinese)

(本文编辑: 朱俊真)

第一作者: 李绍阔 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为测试计量技术。



通讯作者: 冯仁剑 (1976—), 男, 教授, 主要研究方向为动态测试及校准。1997、2000和2004年在西安交通大学先后获得学士、硕士和博士学位, 现就职于北航仪器科学与光电工程学院, 全国惯性技术计量技术委员会委员。主持完成2项国家自然科学基金面上项目、1项国家“863计划”项目、1项北京市自然科学基金项目以及30余项科研院所和企业委托项目。已发表SCI检索论文44篇, 授权中国发明专利18项。

