

基于铂电阻的机载测温系统校准方法改进

李铁林, 黄 杨, 丁腾欢

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要: 为了解决机载铂电阻测温系统机上校准工作量大、实施难等问题, 根据机载铂电阻测温原理和校准方法, 分析了对于单个测温通道在实验室与机载环境下测量结果之间的差异, 提出了一种对实验室校准曲线进行修正而替代机上校准曲线的方法, 并通过实验对该方法进行验证; 设计了根据机载测试系统的数据文件、系统配置文件, 批量修正实验室校准曲线的软件; 任意选择的 8 个参数进行工程验证, 采用原方法和本文方法进行校准得到的两组校准曲线, 分别对测试数据进行处理, 得到测量结果的最大偏差与量程比不超过 0.27%, 证明修正后实验室校准曲线与机上校准曲线基本一致, 可以用作数据处理; 结果证明, 改进后校准方法方便、高效, 校准结果满足机载测试要求, 为机载参数校准提供了新思路。

关键词: 机载测试; 铂电阻; 校准; 改进方法

Improved Method for Calibration of Platinum Resistor—based Airborne Temperature Acquisition System

Li Tielin, Huang Yang, Ding Tenghuan

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: In airborne situation, the calibration of platinum resistor—based airborne temperature acquisition system is of big amount of labor, and hard to operate. Based on the measuring and calibration theory of the platinum resistor—based airborne temperature acquisition system, this paper analyzes the comparison of the calibration of one single test channel between in airborne and in lab. To replace the calibration curve obtained in airborne, a correction method of the calibration curve obtained in lab is given. And the experiment to verify is conducted. The software which is to correct the calibration curves in lab which depends on the data file and configuration file of the test system is designed. The data of 8 random engineering parameters are processed with the traditional and the correction calibration curves. The maximum error between the two results is no more than 0.27% to the measuring range. It is proved that the new calibration method is more convenient and more effective, which can meet the demands of the flight test. And this provides a new method to calibrate parameters in airborne.

Keywords: airborne test; platinum resistor; calibration; improved method

0 引言

机载测试是飞行试验数据的主要来源, 其中温度类参数是机载测试的重要研究对象, 对飞机鉴定具有重要意义。Pt100 铂电阻具有测量范围大, 稳定性好, 重复性好以及耐氧化等特点, 常被用来作为 $-200 \sim 850 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围的国际标准温度计^[1-3], 因此, 在飞行试验温度测试中, 选用分度特性符合 IEC751—1995 标准的铂电阻传感器, 测量温度范围包含在 $-55 \sim 650 \text{ }^\circ\text{C}$ 内的环控、液压及燃油系统温度参数。

根据机载铂电阻测温原理以及测量精度要求, 试验机完成测试改装后, 测试人员需要在机载环境下对每一路测温通道进行校准, 随着大型、新型飞机试飞的密集开展, 对校准工作提出新的挑战: 1) 工作量大, 温度参数分布在机身各处且数以千计; 2) 实施不便, 且至少需要两人配合; 3) 周期紧张, 型号进度要求试验机测试改装在飞机总装时穿插进行, 可利用的有效时间非常有限。目前, 上述问题愈加突出, 迫切的需要更加方便、高效的校准方法。

1 机载铂电阻测温原理及校准简述

1.1 机载铂电阻测温的原理简述

机载铂电阻测温原理采用三线制单恒流源法, 如图 1 所示, R_t 为铂电阻值, r 为连接阻值, I_0 为恒定电流大小。由图中可得基本关系式 (1)、(2)、(3), 若认为连接电阻 $r_1 = r_2 = r_3$, 可得式 (4):

$$V_3 = V_2 + I_0(r_2 + R_t) \quad (1)$$

$$V_1 = V_2 + I_0(r_2 + R_t + r_1) \quad (2)$$

$$2V_3 - V_1 = V_2 + I_0 R_t + I_0 r_2 - I_0 r_1 \quad (3)$$

$$2V_3 - V_1 = V_2 + I_0 R_t \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 若已知 V_2 、 I_0 , 通过测量 $2tV_3$ 、 tV_1 (t 为常数) 之间的电压差值计算出 R_t , 进而获得被测点温度值。图 2 中所示机载铂电阻测温原理示意图, 其中 $V_2 = 0$ 、 I_0 已知且可控, 对 V_1 进行二分之一衰减, 将 $(V_3 - 0.5 V_1)$ 经过信号放大、滤波、A/D 转换、数字滤波后输出测量结果, 习惯称其为码值, 记作 N , 采用 16 位 A/D 转换芯片 N 的范围为 $0 \sim 65\ 535$ 。为了提高测量分辨率, 测试系统硬件程序可根据测量范围、 I_0 大小来调节信号放大倍数 k 、偏置电压 V_b , 以满足如式 (5)、(6) 中所示关系, 其中 V_{ref} 为 A/D 转换芯片参考电压, R_{L} 、 R_{H} 分别为最小、最大被测温度对应的铂电阻值。式 (7) 所示为 N 与 R_t 的关系, 其中 $K = 65\ 535 \frac{kI_0}{2V_{ref}}$ 、 $b =$

收稿日期: 2015-10-27; 修回日期: 2015-11-26。

作者简介: 李铁林 (1987—), 男, 陕西富平人, 硕士, 工程师, 主要从事机载测试技术研究。

- 65 535 $\frac{V_b}{2V_{ref}}$, δ 为测量误差。

$$kI_0 R_{iL} - V_b \approx 0, \quad kI_0 R_{iL} \geq V_b \quad (5)$$

$$kI_0 R_{iH} - V_b \approx V_{ref}, \quad kI_0 R_{iH} - V_b \leq V_{ref} \quad (6)$$

$$N = KR_i + b + \delta \quad (7)$$

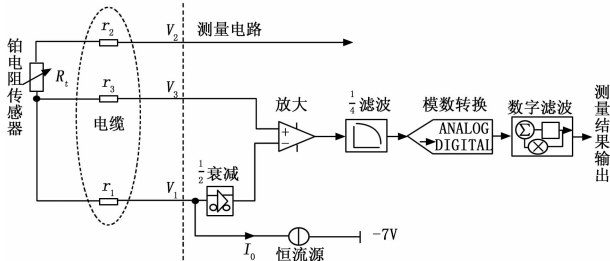


图 1 机载铂电阻测温原理

1.2 机载铂电阻测温校准简述

机载环境下测温通校准工作方式如图 2 所示，按照试飞测试参数校准标准，在测量范围内较均匀地选取 $m(m \geq 7)$ 个校准点，使用 PT100 铂电阻值校准箱模拟校准温度对应的电阻值，接入测试通道并记录测量结果，每个参数要求有效测量不少于 4 次；其次，计算各校准点测量结果的平均值，使用最小二乘法利用各平均值拟合校准曲线^[4-6]。

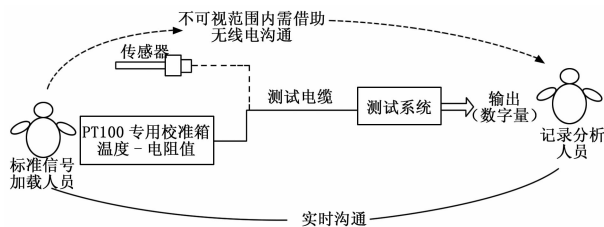


图 2 机载铂电阻测温校准工作方式

按照式 (7) 可根据 N 计算出 R_i 值，由工业铂电阻分度表

表 1 飞机上校准数据

| 序号 | 10℃ | 20℃ | 40℃ | 50℃ | 70℃ | 80℃ | 90℃ | 100℃ |
|---------------------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 第 1 次 | 6 296 | 12 806 | 25 866 | 32 485 | 45 643 | 52 142 | 58 685 | 65 227 |
| 第 2 次 | 6 279 | 12 850 | 25 856 | 32 476 | 45 649 | 52 156 | 58 694 | 65 255 |
| 第 3 次 | 6 303 | 12 868 | 25 882 | 32 504 | 45 652 | 52 153 | 58 690 | 65 244 |
| 第 4 次 | 6 299 | 12 869 | 25 882 | 32 502 | 45 650 | 52 155 | 58 693 | 65 248 |
| 第 5 次 | 6 304 | 12 872 | 25 881 | 32 498 | 45 649 | 52 151 | 58 681 | 65 238 |
| 平均值 - $\overline{N_{1x}}$ | 6 296.2 | 12 853.0 | 25 873.4 | 32 493.0 | 45 648.6 | 52 151.4 | 58 688.6 | 65 242.4 |

表 2 实验室校准数据

| 序号 | 10℃ | 20℃ | 40℃ | 50℃ | 70℃ | 80℃ | 90℃ | 100℃ |
|---------------------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 第 1 次 | 6 484 | 13 047 | 26 062 | 32 688 | 45 827 | 52 345 | 58 871 | 65 428 |
| 第 2 次 | 6 490 | 13 049 | 26 062 | 32 689 | 45 828 | 52 346 | 58 871 | 65 429 |
| 第 3 次 | 6 506 | 13 071 | 26 081 | 32 707 | 45 851 | 52 364 | 58 896 | 65 449 |
| 第 4 次 | 6 502 | 13 068 | 26 076 | 32 703 | 45 847 | 52 362 | 58 891 | 65 447 |
| 第 5 次 | 6 503 | 13 068 | 26 079 | 32 704 | 45 844 | 52 362 | 58 891 | 65 445 |
| 平均值 - $\overline{N_{2x}}$ | 6 497.0 | 13 060.6 | 26 072.0 | 32 698.2 | 45 839.4 | 52 355.8 | 58 884.0 | 65 439.6 |

表 3 两次校准数据对比

| 内容 | 10℃ | 20℃ | 40℃ | 50℃ | 70℃ | 80℃ | 90℃ | 100℃ |
|----------------------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| $N_{2x} - N_{1x}$ | 200.8 | 207.6 | 198.6 | 205.2 | 190.8 | 204.4 | 195.4 | 197.2 |
| 统计 $N_{2x} - N_{1x}$ | 平均值 | 200 | 相对最大偏差 | 4.6% | 相对平均偏差 | 2.25% | | |

插值或由电阻-温度特性直接计算可得到温度值^[6]，但是工程中无法满足 $r_1 = r_2 = r_3$ ，式 (7) 不成立，我们采用校准的方法建立码值和温度的关系。校准过程如上文所述，具有以下优点：1) 校准以一定周期重复，温度参数 1 年校准一次，可避免由于长期工作导致测试系统各特性改变对测试结果的影响^[4]；2) 可消除各个环节引入的系统误差，例如 $r_1 \neq r_2 \neq r_3$ ；3) 利用校准曲线处理数据更方便。由式 (2)、(7) 可得式 (8)，其中 $B = K(r_2 - r_1) + b$ ，可见 N 与 R_i 仍为线性关系，由于电阻-温度特性是非线性，应将校准曲线拟合为多项式^[6]，但是为了便于数据处理，试飞测试中将校准曲线拟合为一条直线，对于精度要求较高的参数采取分段校准，以多条直线分段逼近实际曲线以满足精度要求。

$$N = KR_i + B + \delta \quad (8)$$

2 机载铂电阻测温校准方法改进

2.1 机载铂电阻测温实验室校准与修正

对于某个测温通道在同一被测点，实验室、机上测量的码值之差为 N' ，如式 (9) 所示，其中 $M = K(r_{21} - r_{11} - r_{22} + r_{12})$ ， r_{21} 、 r_{11} 和 r_{22} 、 r_{12} 分别为在实验室和飞机上 2 号、1 号导线的电阻； δ_1 、 δ_2 分别为实验室、机上测量的随机误差，按照误差叠加原理 $\delta' = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}$ ，可以看出，实验室与机上测量结果的差值为一个确定值。基于此，对于某个参数，在实验室进行校准后设法获得 N' 或 M ，并根据其值修正实验室校准曲线，得到结果可作为飞机上校准曲线使用。

$$N' = M + \delta' \quad (9)$$

对上述假设进行验证，选择一个被测温度范围 10-95℃ 的参数进行验证，设置测试系统测温范围 0-100℃，设置 I_0 为 1.6 mA，选取 10、20、40、50、70、80、90、100℃ 共 8 个校准点，使用同一校准箱进行校准，表 1、表 2 所示为校准数据，表 3 所示两次校准的对比结果，可见在机载测温系统中式 9 成立。

表 4 两种校准方法结果对比

| 参数序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------|---------|-------|----------|---------|----------|----------|----------|---------|
| 斜率(本文方法) | 328.3 | 544.8 | 125.1 | 626.2 | 815.9 | 408.8 | 211.2 | 485.4 |
| 斜率(原方法) | 328.3 | 544.9 | 125.3 | 626.1 | 816.1 | 408.5 | 211.5 | 485.6 |
| 零位(本文方法) | -230.75 | 162.8 | 2 654.34 | -196.72 | 4 401.58 | 4 287.43 | 2 134.72 | -117.45 |
| 零位(原方法) | -260.5 | 93.65 | 2 724.51 | -241.32 | 4 337.4 | 4 425.1 | 2 219.9 | -210.8 |
| 测温范围/°C | 0~200 | 0~120 | -20~500 | 0~105 | -5~75 | -10~150 | -10~300 | 0~135 |
| 测量最大偏差/°C | 0.09 | 0.13 | 1.35 | 0.09 | 0.08 | 0.34 | 0.83 | 0.14 |
| 最大偏差与量程比/% | 0.05 | 0.11 | 0.26 | 0.09 | 0.10 | 0.22 | 0.27 | 0.10 |

计算两次校准的校准曲线如图 3 所示, 可见实验室校准曲线平移 204.65 个码值即为机上校准曲线, 结合式 (9) 与表 3 可得一种新的铂电阻测温校准方法: 对某温度参数进行实验室校准, 任意选择一个校准点作为校准修正点, 测试系统改装完成后, 在机上对该点测量一组数据并求得平均值, 按该点两次测量平均值之差修正实验室校准曲线后可作为机上校准曲线。按表 3 中 $N_{2x} - N_{1x}$ 进行修正, 得到的一组新校准曲线与机上校准结果最大相差 13.85 个码值, 换算成温度为 0.02°C, 在环控、液压及燃油系统温度测量时可忽略, 说明该方法满足机载测试要求。

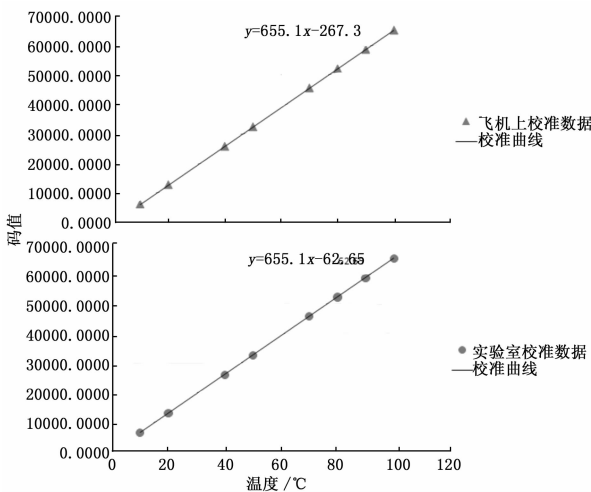


图 3 校准曲线对比图

2.2 校准曲线批量修正软件设计

实验室校准便于实施、工作效率高, 但需按图 2 方法在飞机上测量一个修正点, 影响工作效率的提升, 因此设计软件批量修正校准曲线。软件结构如图 4 所示, 由测试数据处理、校准曲线处理、修正量计算三部分组成: 1) 测试数据处理的对象是机载测试系统采集、记录的数据, 包含所有温度参数, 在测试系统工作时接入校准箱并保持 1~2 秒, 使测试数据中存在一组修正点测量值, 处理结果是以参数名为列、采集时间为行的二维矩阵, 矩阵中的一个点表示某参数在某时刻的码值, 称作数据点; 2) 校准曲线以 Excel 格式存储, 校准曲线处理部分批量获取校准曲线文件中的一些信息, 例如参数名、各校准点平均码值、校准曲线的斜率及零位, 并且创建一个 Excel 文件用以批量存储修正后的校准曲线, 包括参数名、校准曲线的斜率、零位^[7]; 修正量计算是根据修正点在实验室、机上测量结果计算出修正量, 程序流程如图 5 所示。强调两点: 1) 测试系统在未连接传感器或校准箱时测量结果为 0 或 65535,

地面连接传感器时测量结果一般为环境温度, 为了保证程序有效执行修正点选取尽量远离当前环境温度; 2) 程序执行时先批量获取校准曲线信息, 然后为每一个参数人工选择一个修正点, 飞机上测量修正点要严格等同于在软件上的选择的点。

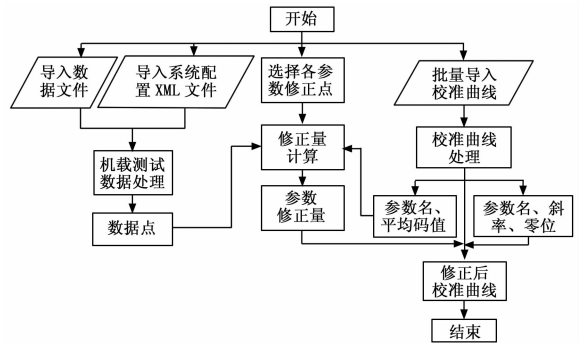


图 4 软件结构图

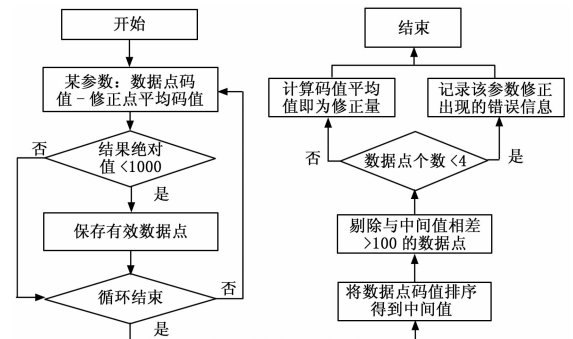


图 5 修正量计算程序流程图

综合以上, 本文给出一种机载铂电阻测温实验室校准方法: 第一、在实验室对各测试通道进行校准, 拟合出校准曲线; 第二、使用软件根据机载测试数据批量修正校准曲线。

3 工程验证

在某试验机上随机选取分布在油箱、起落架液压、燃油泵的 8 个参数, 分别采用本文方法、原方法进行校准, 表 4 所示为两种方法分别得到的校准曲线对比, 可以看出同一参数的两条校准曲线基本重合, 分别采用两条校准曲线处理数据得到结果的最大偏差与量程比不超过 0.27%, 满足测试要求。

4 结论

本文基于理论分析与实验, 给出了一种新的机载铂电阻测

(下转第 25 页)