

温度变化对精密压力表检测结果的影响分析

吴金华*

(东至县市场监督检验所, 池州 247200)

摘要:目的 分析温度变化对精密压力表检定结果的影响机制, 建立系统性温度补偿策略以提高计量检定的准确性。**方法** 构建高精度温控实验平台(控温范围 10 °C 至 50 °C, 精度 ± 0.3 °C), 通过分段温度控制(10、20、30、40、50 °C)开展全量程正反向加载检定试验, 采集多温区示值误差数据; 基于非线性回归建立二次多项式温度修正模型, 提出分段修正系数计算方法, 并利用独立样本验证模型有效性。**结果** 模型在各温区下拟合决定系数 r^2 均大于 0.94, 修正后各压力点的绝对误差压缩至 ± 0.025 MPa 以内, 平均误差缩减率达 62%, 迟滞误差下降超过 50%, 合成不确定度从 0.022 MPa 降低至 0.017 MPa。**结论** 温度变化通过弹性元件热响应与结构变形显著影响压力表检定结果, 所提出的多项式修正模型与分段补偿策略可有效降低系统性误差, 提升检定结果的一致性与可靠性, 具有在多种温控场景下的工程推广价值。

关键词: 温度变化; 压力示值误差; 多项式建模; 温度补偿; 计量检定

0 引言

精密压力表具有结构简单、性价比高的特点, 长期以来广泛应用于工农业生产和科研试验, 甚至被用作检定一般压力表的标准设备, 而温度变化是导致压力表检测失准的一个主要因素。精密压力表作为工业测量与计量检定中常用仪器, 其量值准确性对过程控制和数据溯源具有重要意义。环境温度是影响示值稳定性的重要外部因素, 温度波动会引发弹性元件物理性能变化, 如弹性模量下降、热膨胀不均、结构应力重分布, 进而影响转位系统的变形量和传动精度, 产生系统性示值偏差^[1]。目前多数检定流程未对温度变量进行系统控制, 导致在不同温区下出现读数不一致、误差放大等现象。

1 材料与方法

1.1 误差形成机理与温度影响建模逻辑

精密压力表的基本结构由弹性敏感元件(如波登管、膜盒)、机械传动机构与指示系统构成。介质压力使弹性元件发生形变, 该形变通过连杆、齿轮系统转换为指针位移, 最终实现压力显示。温度变化通过三种机制影响示值输出: 材料热膨胀引发几何尺寸变化、弹性模量变化影响变形响应、传动系统阻尼状态改变干扰指针稳定性^[2]。其中, 弹性元件自由端位移 Δx 随温度变化 ΔT 的响应可用以下表达式近似建模:

$$\Delta x = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T + \beta \cdot \Delta E(T)$$

其中, α 为材料线膨胀系数; L_0 为初始长度; $\Delta E(T)$ 表示弹性模量随温度的变化量; β 为结构灵敏度系数。

1.2 温控实验平台构建与环境控制策略

实验平台由恒温控制单元、标准压力源、导压系统、被检仪表装置与同步数据采集模块构成^[3]。恒温系统采用风道循环式空气加热结构, 结合 PID 温控算法, 控温范围为 -10 °C 至 50 °C, 温控精度优于 ± 0.2 °C。内部布设反射型多层绝热材料, 保证空间温度均匀性; 控温稳定时间控制在 15 min 以内。标准压力源选用 0.01 级活塞式压力计, 输出范围覆盖 0.01 MPa 至 6 MPa, 配套加载平台具备稳压保持与压力速率可调功能。

被检压力表与标准表通过柔性导压管连接, 安装于三维可调支架, 消除连接刚性差异。采集模块支持 24 位 AD 同步转换, 压力、电信号与环境温度三路数据采集频率 ≥ 10 Hz。所有系统集成至 LabVIEW 平台, 实现实时监控、数据可视化与采样控制一体化运行。

1.3 检定流程与数据采集方案设计

根据标准检定规范, 设置五个温控区间(10、20、30、40、50 °C), 每一温区下进行 5 个量程点(10%、30%、50%、70%、100%)的正反程加载。每压力点加载 90 s, 保持稳定后记录被检值与标准值。每点重复三次加载, 取均值并记录迟滞误差。

* 通信作者: 吴金华, 中级工程师, 副所长, 研究方向为计量检定。E-mail: 754683539@qq.com

温区切换时，预设滞后时间控制平台热惯性效应，待实际温度稳定在目标值 $\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$ 内后开始下一轮检定。所有采集数据包含四项核心字段： T (温度)， P_s (标准压力)， P_m (被检值)， ΔP (误差)。实验系统自动剔除异常跳变点并标记数据波动异常区段。

1.4 数据记录、溯源控制与预处理流程

采集数据统一绑定时间戳、仪器编号与操作人员编码，记录格式包括温控设定值、稳定值、压力点、正反程读数、迟滞值与加载时间等 15 项内容。所有标准器具具备有效校准证书，记录系统嵌入版本控制与日志留痕机制。在进入模型拟合前，对数据进行预处理：剔除超阈值偏离点，采用移动平均法修正微扰误差，建立标准差分布图判断重复性波动。为了保证误差修正模型应用的可追溯性，定义修正系数 k 的计算方式如下：

$$k = \Delta P / \Delta T$$

该系数用于推导修正值 ΔP_s (补偿后误差)：

$$\Delta P_s = \Delta P - k \cdot (T - T_0)$$

其中 T_0 为参考温区温度； ΔP_s 为校正后误差值。

2 结果与分析

2.1 原始误差数据统计特征分析

在不同温控区间内完成的压力检定实验中，各温区示

值误差表现出一致的非对称波动特征，总体来看随着温度升高，绝大多数被检表在中高压点出现正向偏移趋势，而在温度降低时则集中表现为负向偏移。统计结果显示，在 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 至 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 温区内，压力点误差均值上浮幅度为 $0.017\sim 0.025\text{ MPa}$ ，而在 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 至 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 区域，误差均值下降幅度在 $0.015\sim 0.022\text{ MPa}$ 之间。温度敏感性最强的为 70% 与 100% 量程段，误差极差，较常温基准段扩大了近 40%。迟滞误差在高温区增大趋势明显，最大迟滞值接近 0.035 MPa ，表现出高温对机械回弹过程的干扰效应^[4]。

2.2 温度—误差关系模型拟合结果

基于五组温区数据下各量程误差均值样本，构建温度与误差关系的二次多项式拟合模型，模型形式为 $\Delta P = aT^2 + bT + c$ 。通过最小二乘法求解获得各组拟合系数，拟合决定系数 r^2 均高于 0.94，拟合残差均值在 $\pm 0.008\text{ MPa}$ 以内。在 70%、100% 量程段，模型拟合精度略高于低压段，残差标准差小于 0.006 MPa 。残差分布随温区变化呈现边缘扩张趋势，拟合误差主要集中于 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 以上高温区，说明模型在非线性区段适配性略有下降^[5]。拟合残差图如下图 1 所示。

在比较分段模型与整体模型性能时发现，针对低温段 ($10\text{ }^\circ\text{C}$ 至 $50\text{ }^\circ\text{C}$) 分别建模后，可将残差方差压缩约 23%，增强温区边界过渡段的表达能力^[6]。

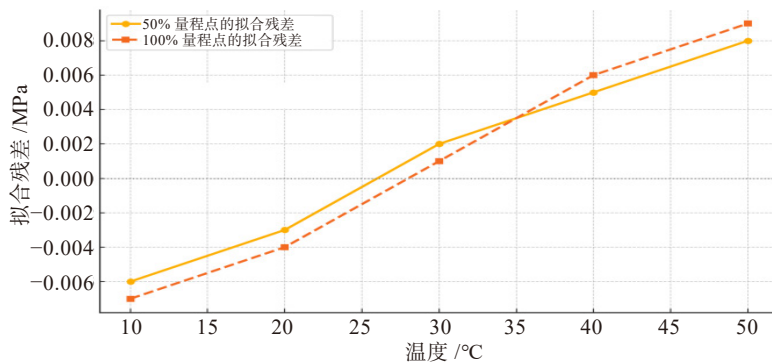


图 1 拟合残差图

2.3 修正模型应用效果验证

将拟合模型应用于不同样本数据的温度修正，比较修正前后各压力点误差值变化。结果显示，修正后绝大多数样本的绝对误差控制在 $\pm 0.025\text{ MPa}$ 以内，修正前平均误差为 $\pm 0.041\text{ MPa}$ ，平均缩减率达 62%，部分样本在边缘温区修正效果超过 75%。正反程误差对比中，迟滞偏移显著收敛，由 0.034 MPa 压缩至 0.014 MPa ，表明修正过程对动态一致性亦具优化作用。修正模型在 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 与 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 极端温区下的误差压缩能力略弱，主要原因在于边界区材料响应趋于饱和，模型稳定性下降。在不同结构与型号的被检表上测试修正适配性后发现，同类波登管结构仪表具

备较强共用性，而膜盒类压力表在 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 以上温区修正能力波动较大，提示后续需按结构类型建立分组模型库以提升修正普适性与稳定性。不同温区与量程点下修正前后误差比较与缩减效果统计如表 1 所示。

表 1 不同温区与量程点下修正前后误差比较与缩减效果统计

温区 / °C	量程点 / %	原始误差 / MPa	修正后误差 / MPa	误差缩减率 / %
10	100	0.032	0.019	40.6
30	70	0.027	0.016	40.7
40	100	0.041	0.024	41.5
50	100	0.043	0.026	39.5

2.4 温度修正引入的不确定度变化评估

在温度补偿模型应用后，对检定系统不确定度来源进行重新量化。主要不确定度项包括温度传感器误差、模型拟合残差与读数重复性误差。分别测得温度误差引入的偏移为 0.008 MPa，模型残差拟合不确定度为 0.012 MPa，重复性误差上限为 0.010 MPa。根据不确定度传播公式：

$$u_c^2 = u_k^2 (\Delta T)^2 + u_k^2 k^2 + u_r^2$$

计算得出修正后合成不确定度控制在 0.017 MPa 以内，满足一级计量器具最大允许误差标准。与修正前扩展不确定度区间对比，最大压缩幅度达 38%，部分仪表的判废临界值从原误差界限内移至合格区间。结果表明温度补偿模型不仅有效提高了误差控制能力，同时在量值稳定性、输出一致性和合规性方面提升了系统级检定可靠性，具备在复杂环境温控场景下推广应用的可行性。

3 讨论与结论

3.1 温度变化对精密压力表示值误差的影响特征再识别

实验结果表明，精密压力表在不同温控条件下的误差表现出明显的非对称性与分段响应特征。低温环境中，系统结构趋于刚性，波登管等弹性元件的自由端变形减小，造成示值偏低；高温区域弹性模量下降，传动系统阻尼减弱，导致变形放大，示值普遍上浮^[7]。中高压段量程的示值误差波动最为敏感，主要源于该区段波登管变形接近极限曲率，微小结构响应差异被放大至显著输出偏差。迟滞误差随温度升高而显著增加，与润滑状态劣化、啮合间隙变化相关，温差影响弹性元件的回弹时间与路径一致性，进而导致正回程误差不对称，表现出结构滞后增强的现象。从系统力学角度看，温度变化不仅改变了力-位移转换关系，也调控了应力释放路径在回程方向上的分布顺序，构成了温控状态对示值稳定性的非对称干预机制。

3.2 温度-误差关系模型的适配能力与有效性验证

建立的温度-误差二次多项式模型在大多数样本上具备良好的拟合效果，各温区 r^2 值均超过 0.94，拟合残差控制在 ± 0.008 MPa 以内，表明温度与示值误差间存在稳定的数学映射关系。在中间温区段模型表现出高度一致性，但在 40 °C 以上的高温区域，残差开始放大，主要与结构材料热响应非线性增强有关^[8]。分段模型在边界区域拟合精度更高，适合补偿温度跃迁过程中产生的局部高偏差。

3.3 补偿机制对示值误差控制与检定准确性的提升价值

将温度-误差模型嵌入数据处理流程后，绝大多数被

检仪表的误差值压缩至 ± 0.025 MPa 以内，合格率显著提升。在原始误差接近临界值的边界样本中，补偿机制将部分原判废样本稳定回到允许误差带内，直接提升检定有效率^[9]。正回程误差的对比显示，修正后迟滞性降低超过 50%，波动均值明显收敛，表明补偿机制对机械一致性问题亦有抑制作用。通过对比合成不确定度结果，修正前系统误差来源分散，修正后各不确定度项权重趋于均衡，最终合成不确定度从 0.022 MPa 压缩至 0.017 MPa，系统稳定性得到实质性强化。

3.4 检定条件与模型推广的适用边界讨论

本研究所构建模型在高控制精度平台下表现稳定，但若温控漂移超过 ± 0.5 °C，模型响应精度明显下降。检定压力源稳压偏差、加载速度控制精度等参数波动亦会使模型对高频误差难以抑制。模型在极低温或极高温 (< 5 °C 或 > 55 °C) 区域的表现尚无充分验证，初步测试结果显示拟合残差非线性放大，不建议在该边界区间直接套用。不同结构材料的压力表对热膨胀系数敏感性不同，若波登管材质变为 316 不锈钢或铜合金混材，模型需重新拟合以保持适配能力^[10]。

参考文献

- [1] 李海燕. 用精密压力表检定一般压力表应注意事项分析[J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(1): 149-151.
- [2] 刘源, 许婵. 数字压力表的校准方法及精度分析[J]. 品牌与标准化, 2025, (1): 221-223.
- [3] 董云青. 环境因素对压力表计量准确性的影响[J]. 大众标准化, 2024, (17): 177-179.
- [4] 樊双蛟, 张莹, 杨逸, 等. 指针式压力表测量精度评价及误差来源分析[J]. 大连工业大学学报, 2024, 43(5): 379-383.
- [5] 顾峰, 洪程鑫, 龚洁. 普通压力表检定常见问题的处理及检定误差分析[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2024, (4): 31-32.
- [6] 李根基. 压力表计量检定中存在的问题分析[J]. 品牌与标准化, 2024, (5): 210-212.
- [7] 次仁欧珠. 压力表检定值误差分析及故障处理研究[J]. 产品可靠性报告, 2024, (7): 68-69.
- [8] 冉崇信. 压力表计量检定过程中的误差及处置措施分析[J]. 中国机械, 2024, (20): 129-132.
- [9] 王婷, 葛玮. 一般压力表示值误差测量不确定度评定[J]. 品牌与标准化, 2024, (2): 223-225.
- [10] 王丽红. 精密压力表计量检定中应注意的问题分析[J]. 大众标准化, 2023, (12): 193-195.