

瞬态温度激励信号发生装置的气源系统设计

查 涛¹, 金 冉¹, 朱 亮², 张 军¹, 刘国富¹

(1. 贵州航天计量测试技术研究所, 贵州 贵阳 550000; 2. 贵州师范大学, 贵州 贵阳 550000)

摘要:基于气体介质与激波原理的热电偶时间常数校准装置是一种用于热电偶动态特性标定的新型设备。为确保其所生成的瞬态温度激励信号具有足够的稳态持续时间, 针对气源系统各组成部分开展了设计计算与实验验证。研究结果表明, 所设计的气源系统能提供稳定时间超过 63s 的稳压、稳流高温气流, 能有效保障瞬态温度激励信号稳态区间的持续时间与稳定性, 满足热电偶高精度动态测温标定的应用需求。

关键词:气源系统; 热电偶; 动态激励; 校准装置

中图分类号: TB924; TH4

文章编号: 1000-0682(2026)02-0035-04

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.02.007

Design of the gas supply system for a generator of transient step-temperature excitation signals for calibration

ZHA Tao¹, JIN Ran¹, ZHU Liang², ZHANG Jun¹, LIU Guofu¹

(1. Guizhou Aerospace Institute of Measuring and Testing Technology, Guizhou Guiyang 550000, China;

2. Guizhou Normal University, Guizhou Guiyang 550000, China)

Abstract: A thermocouple time constant calibration device based on gas medium and shock wave principles is a new type of equipment used for calibrating the dynamic characteristics of thermocouples. To ensure that the generated transient temperature excitation signal exhibits a sufficiently long steady-state duration, this paper conducts design calculations and experimental verification for each component of the gas supply system. The results show that the designed gas supply system can provide high-temperature gas with stable pressure and flow for more than 63 seconds, effectively ensuring the duration and stability of the steady-state interval of the transient temperature excitation signal, and meeting the application requirements for high-precision dynamic temperature measurement calibration of thermocouples.

Keywords: gas supply system; thermocouple; step excitation; calibration device

0 引言

高精度动态温度测量是航空发动机燃烧室、爆炸燃烧等^[1-4]极端环境下进行状态监测与安全评估的关键技术。热电偶具有结构简单、快响应等特点, 被广泛应用于此类瞬态温度测量中, 其动态响应特性(通常用时间常数表征)的准确性直接决定了测量结果的可靠性。

目前, 国内外校准热电偶时间常数的方法主要包括激波管法、激光阶跃加热法等^[5-9], 现有方法各具优势。对于气体测量传感器, 基于气体介质的方法适用性强、成本低且结构简单^[5], 其核心气源系统的稳定性与可控性, 是决定激励信号质量、进而影响校准精度的首要因素。

在瞬态温度激励源^[10]校准热电偶过程中, 若阶跃信号平台稳定段时间过短, 温度场参数尚未达到稳态便发生衰减或畸变, 会导致响应时间较长的传感器无法完成完整响应, 导致校准结果偏离理论值, 无法准确分析出传感器的动态特性; 此外, 由于平台稳定时间短而导致的传感器响应的不一致性, 可能

收稿日期: 2025-11-03

基金项目: 国家“十四五”计量技术基础项目(JSJL2022601A001)

第一作者: 查涛(1999—), 男, 汉族, 贵州纳雍人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为动态测试技术研究。

会在不同校准批次之间出现较大的数据偏差,这种不可靠性会增加校准的不确定性,影响结论的科学性和工程应用的可行性。

为解决上述问题,该文旨在设计并验证一种用于瞬态温度激励发生装置的高性能气源系统。该系统的核心目标是向瞬态温度激励发生装置稳定提供稳压、稳流的高温气流,以确保其生成的动态温度激励信号具有足够长的稳态时间,满足校准需求。

该文介绍了瞬态温度激励信号发生装置,并完成了气源系统的设计计算,继而通过实验方法对其输出气流的压力、流量与温度稳定性进行了测试验证。

1 瞬态温度激励信号发生装置

瞬态温度激励信号发生装置是一种用于热电偶时间常数校准的阶跃温度发生装置。该装置主要由气源系统、高压室、低压室以及膜片组成,如图 1 所示。气源系统为整个校准装置提供稳定压力、稳定流量的高温气体,为温度激励提供稳定介质;高压室用于混合、存储高温、高压气体。当高压室与低压室内气体压力差满足要求时,膜片破裂,高压室内高温高压气体快速填充至低压室内,形成温度场阶跃变化,产生瞬时阶跃信号,用于热电偶时间常数的校准。

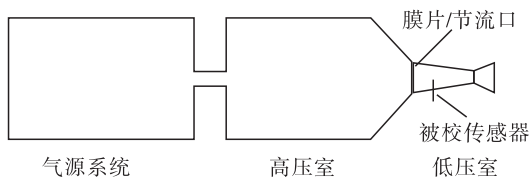


图 1 瞬态温度激励信号发生装置结构图

2 气源系统设计

2.1 设计输入

为实现瞬态温度激励信号发生装置的信号稳定输出,该文重点对其气源系统进行设计。该系统旨在向高压室输送满足特定要求的气流,确保高压室内气体压力场与温度场维持稳定,从而能够持续为低压室提供稳压、稳流的高温气体,有效延长输出温度场的稳定时间。

表 1 为瞬态温度激励信号发生装置高压室与低压室的主要设计参数,表 2 表示仿真结果参数,当低压室温度场达到稳定时,气体流速与气体压力参数,以仿真结果为输入,对气源系统开展设计

计算。

表 1 高、低压室主要参数表

序号	参数	数值
1	破膜压力 P/MPa	0.5
2	高压室气出口半径 r_1/mm	10

表 2 仿真稳定时低压室气体参数

序号	参数	数值
1	流速 $v_1/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	200
2	压力 P_1/MPa	0.42
3	温度 T_1/K	473.15

根据气体密度计算公式:

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{T_0 P_1}{T_1 P_0} \quad (1)$$

式中: ρ_1 为温度 T_1 、压力 P_1 条件下气体密度; ρ_0 为温度 T_0 、压力 P_0 条件下气体密度。取 $T_0 = 273.15 \text{ K}$ 、 $P_0 = 0.101 \text{ MPa}$ 、 $\rho_0 = 1.293 \text{ kg/m}^3$ 、 $T_1 = 473.15 \text{ K}$, 计算得出低压室稳定时气流密度 $\rho_1 = 3.10 \text{ kg/m}^3$ 。

高压室气体出口处安装了孔板作为节流装置,根据公式(2)计算高压室气出口处气体质量流量。

$$q_{m1} = CA\varepsilon\sqrt{2\Delta P\rho_1/(1-\beta^4)} \quad (2)$$

式中: C 为节流孔的流出系数; A 为节流孔面积; ε 为气体膨胀系数; $\Delta P = (P - P_1)$ 为高压室与低压室内气体压力差; ρ_1 为气体密度; β 为面积系数。

表 3 计算参数

序号	参数	数值
1	流出系数 C	0.601 7
2	节流孔面积 A/mm^2	314.2
3	气体膨胀系数 ε	0.947
4	面积系数 β	0.43

将表 3 参数带入式(2),计算得出气流质量流量。为保证高压室内气流质量流量维持稳定,高压室入口处输入气体质量流量(气源系统输出气体质量流量)应为 0.13 kg/s 。

综上所述,针对表 2 所示仿真结果,对应气源系统设计应满足表 4 中条件。

表 4 气源系统设计输入参数

序号	参数	数值
1	输出气体质量流量/ $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	0.13
2	输出气体温度/ $^{\circ}\text{C}$	200
3	输出气体压力/ MPa	0.5

2.2 设计分析

气源系统工作过程可分为三个部分:压力处理阶段、流量控制阶段、温度处理阶段。

2.2.1 压力处理阶段

压力处理阶段通过储气罐、气动球阀、自力式压力阀以及缓冲气瓶完成。

储气罐用于存储高压不稳定气体,为后续所有实验环节提供初始气体和压力能量,通常与空气压缩机和气体增压泵联合使用。根据安全要求、系统可持续供气时间以及安装尺寸限制等因素,确定其容量、罐体厚度、初始压力等关键参数。其中,储气罐可持续供气时间计算公式为:

$$t = \frac{(\rho_s - \rho_e) V}{q_{m1}} \quad (3)$$

式中: ρ_s, ρ_e 是储气罐排气开始、结束时气体压力 P_s, P_e 下的气体密度,可通过公式(1)计算得到; V 为储气罐容量, q_{m1} 为气体质量流量。当储气罐气体温度 $t_0 = 10^\circ\text{C}$, $P_s = 2.4\text{ MPa}$, $P_e = 0.5\text{ MPa}$, $V = 0.7\text{ m}^3$ 时,储气罐可持续供气时间约为 126 s。

气动球阀主要用于两个方面,一是用作气源系统的总开关,通过控制系统实现对高压室供气的启停操作;二是用作安全阀,当出现紧急情况,紧急关闭气动球阀可迅速切断气源,避免人员、设备损伤。

自力式压力阀与缓冲气瓶是压力处理阶段实现压力稳定的核心部件。自力式压力阀通过管道自身介质压力来控制输出,将来自储气罐的高压气体压力调节为一个预设的、相对稳定的气体压力,降低管道内气体压力与压力波动程度。缓冲气瓶可吸收阀门动作或压力变化引起的气流脉动,进一步提升压力稳定性。

2.2.2 流量控制阶段

流量控制阶段由自力式流量控制阀与流量计完成。

自力式流量控制阀通过内部孔板、阀芯、膜片等感知流经的气体流量,通过流体自身的能量驱动其阀门开合程度,确保无论阀前压力如何微小变化或阀后压力有何需求,最终输出的气体流量始终保持为预设的恒定值,实现稳流。

流量计用于实时测量和显示实际通过的气体流量,测量数据可传输至系统控制部分作为闭环反馈参数,对自力式流量控制阀的设定值进行初始校准和精度验证。

2.2.3 温度处理阶段

温度处理阶段通过压缩空气管道加热器实现,并在加热器末端(或高压室内)安装温度传感器,用于对气体温度参数的实时监测。压缩空气管道加热器在实际应用中可视为定压加热过程,其核心是保持系统压力相对稳定的条件下,通过外部热源对压缩空气进行加热。为了避免高温气体损坏精密阀门的密封件和内部零件,同时避免能量损耗,加热器放于气源系统末端。

设计时,需计算加热器功率。工作过程中,加热器将压缩空气从常温 $t_0 = 10^\circ\text{C}$ 加热到 $t_2 = 200^\circ\text{C}$,可根据加热过程中空气带走的热量来计算加热器功率。根据公式:

$$Q_p = C_p q_m (t_2 - t_0) \quad (4)$$

式中:气体等压比热容 $C_p = 1005\text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; 气体质量流量 $q_{m2} = 0.13\text{ kg/s}$,可计算出具有一定质量流量的气体所带走的热量 $Q_p = 25\ 014.45\text{ J}$ 。根据功率计算公式:

$$N = Q_p \eta / 1000 \quad (5)$$

式中:功率损耗系数 $\eta = 1.18$,可计算出加热器所需功率 $N = 29.52\text{ kW}$ 。

2.3 设计结果

根据 2.2 节设计分析,气源系统由储气罐、气动球阀、自力式压力阀、缓冲气瓶、自力式流量控制阀、流量计以及压缩空气管道加热器组成,如图 2。

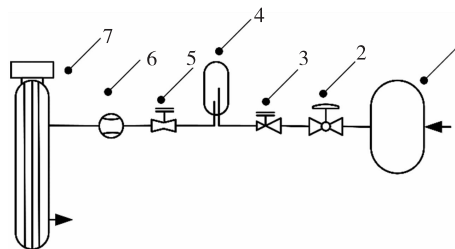


图 2 气源系统组成图

实验过程中,气体通过压缩机等设备加注到储气罐 1 中,当常闭气动球阀 2 打开时,气体通过自力式压力阀 3 进入缓冲瓶 4,完成管道内压力调整与平缓,随后通过自力式流量控制阀 5 调整气体体积流量后,通过流量计 6 进入压缩空气管道加热器 7,由加热器 7 完成加热进入高压室内。

3 实验验证

在常温状态下开展实验,实验步骤如图 3 所示。

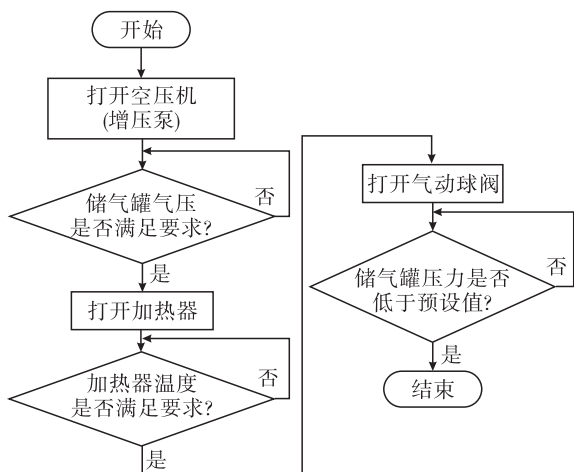


图3 实验步骤

实验过程中,气源系统输出气体的压力、温度、流量分别如图4、图5、图6所示。

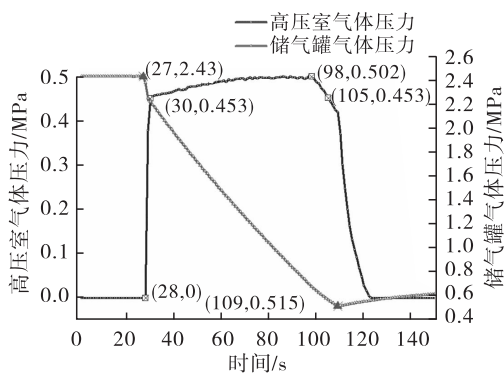


图4 气体压力

实验开始27 s时,开启气动球阀,储气罐内气体迅速充入后续管道内,经过压力调整后,30 s时高压室内气体进入压力相对稳定阶段;30 s~105 s时气源系统输出气体压力(高压室内气体压力)平均值维持在0.48 MPa,相对稳定时间持续约75 s,此阶段储气罐内气体压力逐渐减小;109 s时,储气罐内气体压力减小至0.52 MPa,关闭气动球阀,结束实验。

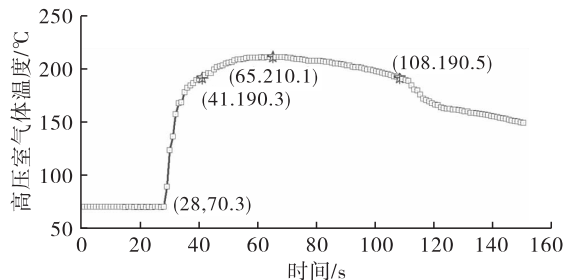


图5 气体温度

实验开始前,高压室气体经过预热温度达到70 °C。实验开始后28 s~41 s,经过加热器加热的气体介质进入高压室内,与原低温气体混合,该部分

不满足使用要求的气体沿着排气口被排出高压室;41 s~108 s时高压室内气体温度平均为203.2 °C,温度稳定持续时间为67 s,该阶段气体温度最低为190.3 °C,气体温度最高为210.1 °C。

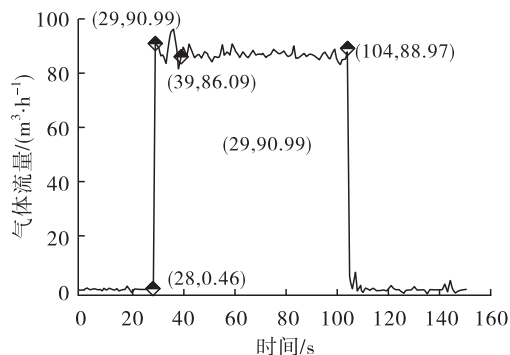


图6 气体流量

实验开始29 s时,气源系统输出气体体积流量进入稳定阶段。29 s~104 s,气体体积流量平均值为87.07 m³/h,换算为质量流量为0.15 kg/s,与设计计算值较为接近,流量稳定持续时间为75 s。

根据图4~6分析,试验开展后41 s~104 s,该文所设计的气源系统可持续为激励信号发生装置提供符合要求的稳压、稳流高温气体介质,气流温度为 (200 ± 10) °C,气流质量流量为0.15 kg/s,气流压力为0.48 MPa,持续时间约63 s,满足设计要求。

4 结论

该文以瞬态温度激励信号发生装置的气源系统为设计对象,通过理论设计与实验验证,搭建了一套可以用于提供稳压、稳流高温气流的气源系统。该文所设计气源系统所提供稳压、稳流高压气体可持续至少63 s,维持高压室内气体压力场与温度场维持稳定,有效延长瞬态温度激励信号发生装置输出温度场的稳定时间,为基于瞬态温度信号的薄膜热电偶校准装置建设提供了参考。

参考文献:

- [1] 车庆丰,刘重阳,齐新华,等. 航空发动机燃烧室出口CARS移动测温技术[J]. 航空发动机,2025,51(02): 158-162.
- [2] 王永国,马威,赵君. 航空发动机T6温度测量校准方法的研究[J]. 价值工程,2025,44(11): 141-143.
- [3] 房成宾. 航空用薄膜热电偶检定校准装置的设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
- [4] 胡宏伟,宋浦,邓国强,等. 温压炸药的特性及发展现状[J]. 力学进展,2022,52(1): 53-78.

(下转第63页)

实验结果表明,平台在精密尺寸检测中具有显著优势。高精度的标定结果为尺寸测量提供了可靠的转换基准,而自动化的流程设计则大幅提升了操作效率。与传统人工方法相比,该平台不仅保证了更高测量精度,而且实现了效率显著提升。

5 总结

该设计并实现了一种基于自标定功能的机器视觉尺寸检测平台,构建了融合笛卡尔运动系统、毫米级刻度板与多层控制架构的软硬件协同系统。实验表明,该系统能显著提升校准效率与检测精度。

在硬件方面构建了三维运动系统,该系统由多类型电动执行器协同驱动组成,并且集成了毫米级精度边缘刻度板等部件,形成了完整的检测硬件体系,软件运用多层级控制体系,构建出一套完整的闭环系统。未来可对结构设计给予优化,探索与先进算法相互融合,提升平台的适应性、稳定性以及检测精度和效率。

参考文献:

- [1] 韩瑞琦. 基于机器视觉的移动式尺寸检测平台研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2024.
- [2] 罗国强,潘光洋. 一种双目相机自标定改进算法[J]. 自动化与仪器仪表,2025(04):97-101+106.
- [3] 石李智,刘宾. 关于相机自标定算法的研究[J]. 电子技术应用,2024,50(07):78-82.
- [4] 薛琛,陈挺,陈浩,等. 基于机器视觉的量规测位偏差自动调整装置研究[J]. 工具技术,2024,58(05):137-141.
- [5] 司徒风云. 数控机床加工误差分析与补偿方法研究[J]. 南方农机,2025,56(16):156-159.
- [6] 杨艺舒. 运动状态对原子干涉重力测量误差影响研究[D]. 北京:军事科学院,2024.
- [7] 张国宁. 基于 YOLO 的目标检测软硬件协同设计[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2024.
- [8] 董嫚旎,闫亚宾,赵苗言,等. 基于 MATLAB APP Designer 的吊装机械电控系统检测平台设计[J]. 自动化与仪表,2025,40(02):148-150+164.
- [9] 柏广泉,孟燕菲,邓礼兵,等. 装置视觉检测系统的设计与应用[J]. 科技创新与应用,2025,15(08):136-140.
- [10] 庄欠芬. 利用单片机实现机电一体化系统的高效控制[J]. 时代汽车,2025(18):130-132.
- [11] 蔡站文. 三维工作台的研制及其精度优化研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2022.
- [12] 张延顺,宁远涛,黄涛,等. 基于 STM32 和 PyQt5 的分子泵监控系统设计与实现[J]. 工业仪表与自动化装置,2025(02):60-63+104.
- [13] 何玉辉. 基于 Halcon + 单片机的视觉识别系统设计[J]. 电脑编程技巧与维护,2024(09):149-151.
- [14] 朱一鑫,董帅,陈凡秀,等. 标定板位姿对相机标定精度的影响[J]. 实验力学,2024,39(06):705-718.
- [15] 汪首坤,赵金枝,姜明,等. 基于圆形阵列标定板的张氏相机标定法[J]. 北京理工大学学报,2019,39(08):859-863.
- [16] 方俊文,司娟宁,王昊伟. 基于张正友标定法的系统姿态调节方法[J]. 传感器世界,2024,30(11):15-19.
- [17] 黄文文,彭小红,李丽圆,等. 相机标定方法及进展研究综述[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(16):9-19.
- [18] 李晓晓,杨涛,雷进,等. 基于 Halcon 的相机标定方法研究与精度验证[J]. 技术与市场,2023,30(01):8-13.
- [19] 陈键. 基于机器视觉的图像处理与尺寸检测研究[J]. 河南工程学院学报(自然科学版),2022,34(03):61-64.
- [5] 杨兆欣,曾星,张文清. 气体介质条件下的热电偶动态特性[J]. 航空动力学报,2020,35(12):2514-2520.
- [6] 李可,张婷婷,李竟怡,等. 非标短型无补偿导线铍铑热电偶的校准方法研究[J]. 计量学报,2025,46(03):340-346.
- [7] 李岩峰,李佳,魏娟,等. 热电偶动态校准系统设计及动态性能评估方法[J]. 电子质量,2024(04):96-100.
- [8] 王涵宇. 基于脉冲响应的热电偶动态测试系统研究[D]. 太原:中北大学,2023.
- [9] 孟庆富,涂程旭,杨洪波,等. 微秒级温度传感器动态校准研究进展[J]. 电子测量技术,2023,46(24):54-60.
- [10] 贵州航天计量测试技术研究所,浙江大学. 一种校准热电偶温度传感器响应时间常数的装置及使用方法:202510460530.2[P]. 2025-07-18.