

doi: 10.7690/bgzd.2023.04.007

低温温度传感器校准装置设计与仿真分析

褚卫华¹, 刘展², 贾军伟²

(1. 中国空气动力研究与发展中心设备设计与测试技术研究所, 四川 绵阳 621000;
2. 北京东方计量测试研究所, 北京 100086)

摘要: 为实现低温范围内高精度温度场测量目的, 解决低温温度传感器 ITS90 国际温标固定点校准法在氩三相 (3.05 K) 到汞三相 (234.315 6 K) 温区内传感器校准存在的不足, 研制一套能在低温范围内对多支温度传感器进行高精度校准的装置。介绍该装置的设计方案, 对低温温度传感器校准装置的核心部分隔热校准腔进行热力学仿真计算, 对其主体 3 层结构型式、绝热技术、温度场均匀性保证措施等进行模拟计算, 最后对仿真结果进行实验验证。仿真和验证结果证明, 该设计方案能够满足设计技术指标要求。

关键词: 低温校准; 温度场均匀性; 不确定度; 校准腔; 仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Design and Simulation of Calibration Device for Low Temperature Sensor

Chu Weihua¹, Liu Zhan², Jia Junwei²

(1. Facility Design and Test Technology Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China; 2. Beijing Orient Institute for Measurement and Test, Beijing 100086, China)

Abstract: In order to achieve the purpose of high-precision temperature field measurement in the low temperature range, and to solve the shortcomings of the ITS90 international temperature scale fixed-point calibration method for low temperature sensors in the temperature range from argon three-phase (3.05 K) to mercury three-phase (234.315 6 K), a set of high precision calibration device for multiple temperature sensors in the low temperature range was developed. The design scheme of the device is introduced, and the thermodynamic simulation calculation of the core part of the low temperature sensor calibration device, the thermal insulation calibration chamber, is carried out, and the simulation calculation of its main three-layer structure type, thermal insulation technology and temperature field uniformity assurance measures is carried out, and finally the simulation results are verified by experiments. The simulation and verification results show that the design scheme can meet the design requirements.

Keywords: low temperature calibration; uniformity of temperature field; uncertainty; calibration chamber; simulation

0 引言

在航空、航天、风洞试验等国防科技工业领域中, 为了对温度参数进行精确测量, 需要对各种结构类型和不同尺寸 (尺寸小的如铂电阻; 尺寸大的带防护整流罩的直径 20 mm, 长度达 300 mm 以上) 的温度传感器在超低温范围内 (常温到 77 K) 进行校准, 校准精度要求较高, 且一次性要求校准数量较大。目前, 从国内外文献调研来看, 超低温范围内温度传感器校准相关技术和应用情况如下:

1) 目前我国实行的是 ITS90 国际温标, 按照 ITS90 国际温标, 从平衡氢三相点到银凝固点采用一系列固定点的方法来分度, 其中从氩三相 (3.05 K) 到汞三相 (234.315 6 K) 这段温区内没有任何的分度固定点; 因此, 这种固定点分度法通常只适用于高精度铂电阻温度计, 对于常规精度要求的一般工业

用低温传感器, 由于精度非线性问题, 必须采用比对法进行多点检定。

2) 国内现有的能对不同结构类型 (如带防护罩和不带防护罩) 和不同尺寸 (特别是大尺寸) 的温度传感器进行多支同时校准的装置都采用恒温槽提供恒温场, 常用的恒温槽有酒精低温槽、水恒温槽、油恒温槽和锡恒温槽等。这些恒温槽能提供的低温温度范围有限, 酒精低温槽校准温度范围为 173~303 K, 油恒温槽校准温度范围为 323~573 K^[1], 不能满足校准低温需要。另外, 国内有温度校准装置能满足航空航天和风洞等领域对超低温域校准应用需求, 但无法满足同时校准多支带防护罩较大尺寸的传感器校准需要, 如: 中科院理化技术研究所低温计量站建立了 2 套低温温度计标定装置覆盖 0 °C 以下的整个低温温区: 0.65~24.556 1 K 和 13.066~

收稿日期: 2022-12-13; 修回日期: 2023-01-28

作者简介: 褚卫华 (1968—), 男, 山西人, 博士, 研究员, 从事风洞测量与控制研究。E-mail: nudt_cwh123@163.com。

273.16 K, 所校准对象为实验室用薄膜铂电阻温度计, 在 29~55 K 温区内的准确度为 0.1 K; 上海交通大学建立了基于 GM 制冷机的低温温度计动态校准系统覆盖 5.2~300 K 的温度范围, 标定后的 Pt100 在 20 K 以下温区, 不确定度为 600 mK^[2]。

3) 国外在超低温范围内能对温度计进行比对法校准的装置较多, 但未见到能对各种结构类型和不同尺寸的温度传感器进行同时多支校准的相关文献报道。韩国标准与科学研究所(KRISS)建立基于两级 G-M 低温制冷机的温度计校准装置, 温度范围为 4 K~室温, 在液氦温度的均匀性 < 5 mK, 一次最多可校准 20 只温度计^[3]。欧洲核子研究组织(CERN)设计了一套工作在液氢或液氮温区至室温的温度计校准装置, 一次最多可校准 60 支温度计, 在 1.6~150 K 温度范围, 满载情况下的温度均匀性 20 mK; 150 K~室温, 温度均匀性 100 mK^[4]。

针对航空航天和风洞试验等工业领域低温温度传感器校准需要, 笔者设计一套能满足不同结构类型和尺寸的多支低温温度传感器校准装置。

1 低温温度传感器校准装置设计方案

为方便使用和保障, 低温温度传感器校准装置采用 GM 制冷机制冷, 总体组成如图 1 所示。低温传感器校准装置由隔热校准腔系统、制冷机水冷系统、真空与压力调节系统和测控机柜等部分组成, 具体性能指标如下:

温度校准范围: 77~323 K;

静态有效温度场均匀性: ± 10 mK;

静态温度场稳定性: ± 10 mK/20 min;

静态温度准度: ± 10 mK;

一次同时标校传感器的数量为支, 传感器带或不带外罩;

温度场温变过程中, 要保持有效温度场均匀性, 在温变率 0.5 K/min 条件下, 有效温度场温度最大差值 ≤ 0.3 K。

另外, 要求校准装置可以通过更换温度传感器安装座, 满足校准不同规格传感器和通道数温度测量系统需要。

由于低温温度传感器校准装置一次同时校准传感器数量多, 校准静态精度和稳态变化温度场一致性要求高, 需要在对低温温度传感器校准装置方案进行系统合理设计后, 对校准装置进行建模和仿真计算, 并建立平台对仿真结果进行试验验证。

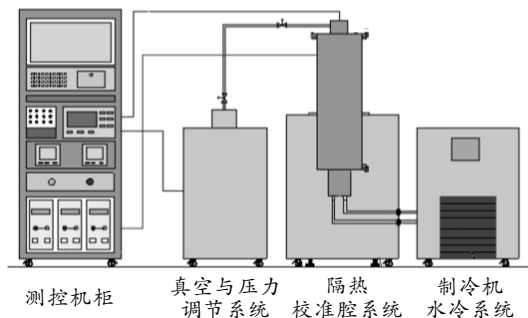


图 1 低温温度传感器校准装置组成

低温温度传感器校准装置采用 GM 制冷机和加热器综合控温方式, 由隔热校准腔系统、制冷机水冷系统、真空与压力调节系统和测控机柜组成。隔热校准腔系统是低温温度传感器校准装置的核心部分, 用于放置温度传感器安装座, 通过隔热均温设计, 为温度传感器校准提供满足指标要求的有效温度场。

校准系统的隔热校准腔结构型式如图 2 所示, 校准腔采用了 3 层结构^[5-6]: 外层筒体、中间层筒体和内层筒体。外层筒体和顶部法兰采用双层真空结构, 减少热量/冷量损失, 同时起校准腔保护作用。外层筒体底部法兰与 G-M 制冷机固定盘连接, 起支撑作用, 底部法兰上加工航空插头安装孔, 通过航空插头引出系统加热器电缆和控温传感器引线, 圆周侧壁安装 KF 接口法兰, 用于对校准腔抽真空。中间层筒体隔热防辐射保护, 底部与 G-M 制冷机冷头连接, 中间层筒体顶部法兰采用“两半拼接”的方式, 即顶部法兰有 2 个半圆法兰片组成, 通过螺栓固定形成一个完整的法兰盘, 中央为传感器接线引出孔。为了减少传感器引线对温度均匀性的影响, 在中间层筒体顶部法兰上设计安装有一个热锚系统, 引出线在离开中间层顶部法兰时在热锚处缠绕, 减小该处引线与内层筒体顶部法兰出引线的温度梯度, 从而减小热量或者冷量损失。内层筒体放置温度传感器安装座, 具体结构如图 3 所示, 传感器安装座通过安装吊杆放入内层筒体中, 依靠自身重量与内层筒底部法兰密切接触。内层筒体底部连接器用于连接制冷机冷头、中间层筒体和内层筒体, 同时兼顾制冷机冷量的合理分配, 具体结构如图 4 所示。内层筒体顶部法兰采用不锈钢加工, 与铝合金筒体通过钢丝密封。在内层筒体顶部法兰上焊接一个玻璃熔接的真空插头, 转接传感器引出线, 另一端在内层筒内与待校准传感器连接。在校准腔体工作时, 校准腔内部充入氦气, 以提高内部的温度均匀性。在内层筒体法兰上部加工通气孔, 并焊接

一根波纹管，波纹管穿过中间筒与外层筒体出的转接头连接，用于内层筒体抽真空或者充氦气^[7-8]。

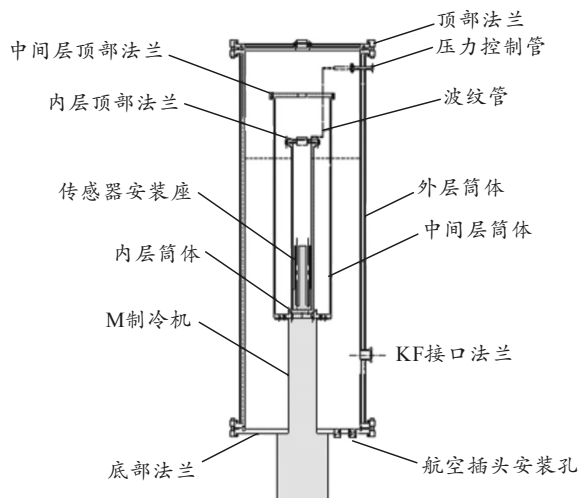


图 2 隔热校准腔总体结构

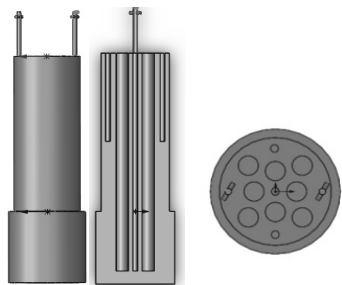


图 3 温度传感器安装铜座结构

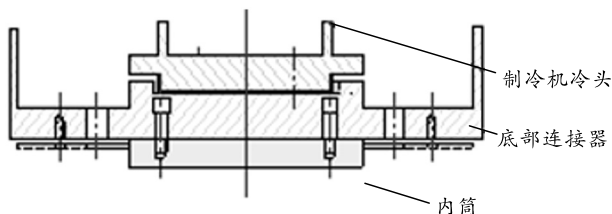


图 4 校准腔底部连接

在常见的金属材料中，不锈钢、铝和铜是低温研究中经常使用的材料。在充分考虑材料的导热系数、比热容、密度以及热扩散率的影响，以及材料的重量对低温校准系统强度、易移动性的影响，隔热校准腔确定采用材料组合方式，材料组合如表 1 所示。

表 1 校准腔部件材料选择

部件名称	材料	部件名称	材料
外层筒体	不锈钢 316	中间层筒体	不锈钢 316
外层筒体顶部密封法兰	不锈钢 316	中间层筒体顶部法兰	不锈钢 316
传感器电缆	不锈钢 316	中间层筒体	铝 6061
安装座	不锈钢 316	内层筒体	不锈钢 316
波纹管	不锈钢 316	法兰	不锈钢 316
传感器安装座	紫铜	内部筒体	铝 6061
		压线板	铝 6061

校准装置的真空与压力调节系统真空系统主要用于实现校准腔内层和中间层、中间层和外层之间真空状态，实现校准腔内氦气压力的控制；测控机柜实现校准前真空度控制与校准腔压力调节，并通过控制制冷机和加热器调节校准腔温度，监测低温整体校准装置工作状态；制冷机水冷系统用于 GM 制冷机冷却。

2 校准腔性能数值仿真分析

2.1 计算模型建立

低温温度传感器隔热校准腔系统结构复杂，部件比较多，而且引出电缆也比较多，这些部件的存在会影响系统的性能。为了验证隔热校准腔系统的隔热性能，需要通过数值模拟的方式对校准腔进行计算机仿真。为了全面考察不同数量传感器校准时校准腔性能，分别对校准腔内空载(未安装传感器)和满载(分别安装了支带防护外罩的温度传感器，结构形式如图 5 所示)时校准腔的性能进行了建模和分析研究^[9]。

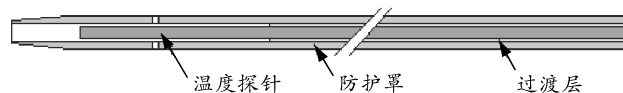


图 5 带防护罩温度传感器结构

在确定计算模型时，对空载和满载 2 种条件下的实际模型进行简化处理。考虑到中间层筒体与外层筒体之间距离较远，且外层筒体外壳为双层中空壳体，所以只保留了外层筒体的顶部法兰，略去了外层筒体。边界条件设置时，将中间层筒体外侧设为绝热面。为尽可能接近实际情况，外层筒体顶部法兰壁面设为 323 K 的恒壁温条件。当校准腔满载工作时，安装 45 根待校传感器和 3 根标准温度传感器，空载时仅安装 3 根标准温度传感器。对应于满载和空载这 2 种情况的传感器引线分别为 44 根与 12 根。根据初始设计，位于外层筒体顶部法兰与内层筒体顶部法兰的传感器引线采用线径为 0.1 mm 的软线，而内层筒体内待校传感器的引线为 0.2 mm 线径，标准传感器引线仍为 0.1 mm 直径。在确定计算模型时，考虑到网格划分的需求，将上述引线进行了简化：位于外层筒体顶部法兰与内层筒体顶部法兰之间的 44 根 0.1 mm 的传感器简化为 2 根 2 mm 的紫铜棒，内层筒体内的传感器引线，简化为 4 根 2 mm 的紫铜棒。在空载模拟时，将标准传感器引线简化为 4 根 1 mm 粗的不锈钢棒，在满载计算时，由于空间有限，忽略了标准传感器电缆的

影响^[10-11]。校准腔系统最后简化后的空载和满载的计算模型分别如图 6 和 7 所示。

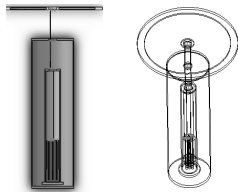


图 6 空载校准腔系统简化模型

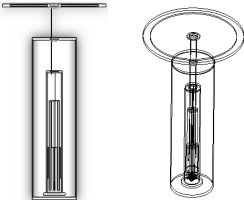


图 7 满载校准腔系统简化模型

被校传感器引线分别通过真空航插引出内层筒体和外层顶部法兰。在计算模型中，根据航空插头的结构特征，将插头简化为一个直径 34 mm，厚度为 3 mm 的不锈钢圆盘，圆盘分别与内层顶部法兰上表面、外层顶部法兰下表面齐平，传感器电缆穿过圆盘引出内层筒体和外层筒体，航空插头简化及布置示意图如图 8 所示。在满载运行工况模拟时，将 32 根 0.2 mm 直径的待校传感器引线与待校传感器的连接，简化为 4 根 2 mm 的紫铜棒，并与不锈钢圆盘连接，不锈钢盘再与待校传感器进行连接，具体如图 9 所示。

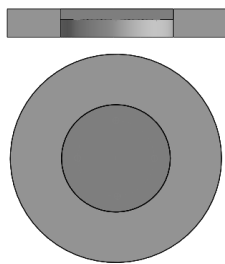


图 8 航空插头简化及布置

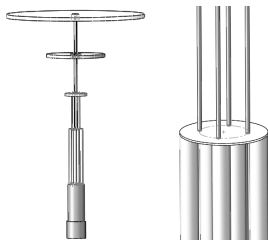


图 9 待校传感器引线连接方式简化

计算模型建立完成后，为确保计算精度和稳定性，采用多面体方法对模型进行网格划分，校准腔稳态和瞬态计算过程均采用了一套网格，网格划分结果如图 10 所示。

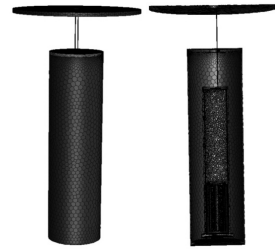


图 10 校准腔网格划分(网格数目 10 万)

2.2 仿真计算结果分析

温度传感器校准系统隔热校准腔计算模型建立后，对校准腔系统空载和满载 2 种工况分别进行瞬态和稳态仿真计算。瞬态模拟时，假设起始温度为 323 K，计算温度从 323 K 降温至 77 K 所需要的时间时，传感器座的温度以 3 支标准温度计中温度最高的一支为判断依据；在校准腔升降温模拟过程中，模拟在 77~323 K 温度区间温变中，传感器安装铜座的温度分布情况。稳态模拟时，取 77、113、173、273、323 K 5 个温度目标点进行模拟，假设校准腔内层控温层底部温度保持在设定温度点，传感器座的温度均匀性根据恒温温度区域的上、下边界，左、右边界的温度差中的最大值计算。

2.2.1 空载条件下校准腔温度场仿真计算

在对传感器校准腔进行温度场模拟计算时，取距离传感器安装座底部向上 0 mm 区域为有效温度场区域，有效温度场区域上边界对应一支标准传感器，下边界对应 2 支标准传感器。计算过程中的温度场温度均匀性以 3 支传感器的最大温差为判断依据。图 11 为温度传感器校准腔有效温度区域 3 个温度监测点示意图，3 个监测点相结合，可以有效判断有效温度场区域纵向和横向方向的温度场均匀性。

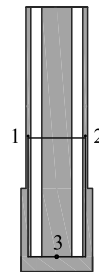


图 11 传感器校准腔性能模拟监控点设置

首先计算空载条件下全温区温降时间仿真计算，以 323 K 为计算起始点，校准腔温度从 323 K 下降至 77 K，温度监控曲线如图 12 所示。从图中可以看出，空载工况时在不到 2 500 s 的时间内，系统的温度达到 77 K，满足小于 4 h 的技术要求。

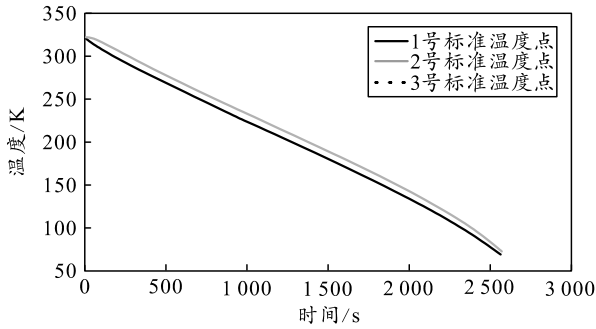


图 12 传感器校准腔空载全温区降温性能曲线

空载条件下，分别选取 77、113、173、273、323 K 的 5 个温度点对校准腔温度场稳态性能进行了模拟，其中以 113 K 模拟计算为例，残差图如图 13 所示，3 个温度监测点的温度变化曲线如图 14 所示，计算温度云图如图 15 所示，各点计算结果如表 2 所示。计算结果表明，空载静态有效温度场均匀性满足 ± 10 mK 技术要求。

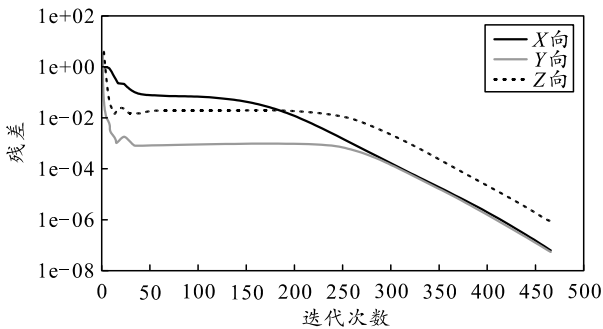


图 13 空载条件下计算过程残差图(以 113 K 为例)

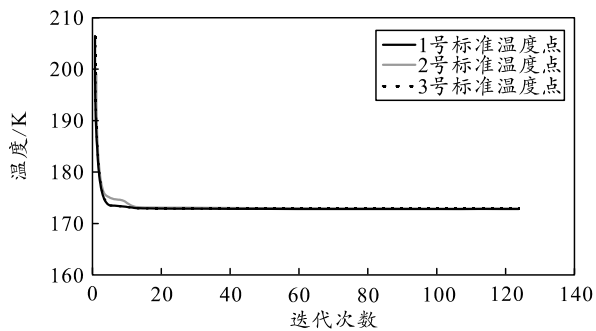


图 14 空载条件下监测点温度变化(以 113 K 为例)

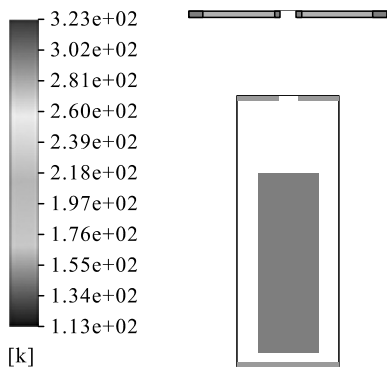


图 15 空载条件下校准腔温度分布云图(以 113 K 为例)

表 2 空载条件下静态有效温度场均匀性

名称	温度值				
制冷温度/K	77.000	110.00	173.00	273.00	323.00
上部传感器温度/K	77.019	110.02	173.01	273.01	323.01
下部传感器温度/K	77.000	110.01	173.00	273.00	323.02
温差/mK	11.000	10.00	10.00	10.00	10.00

2.2.2 满载条件下校准腔温度场仿真计算

为对校准腔系统隔热方案和制冷机功率选择进行验证，对传感器安装座在满载条件下的全温域降温速率进行了模拟^[12]。以 323 K 为起点，校准腔满载时降至 77 K 时的温度过程监控曲线如图 16 所示。计算结果表明：从 323 K 开始降温，经过 3 500 s 降至 77 K，满足小于 4 h 的技术要求。

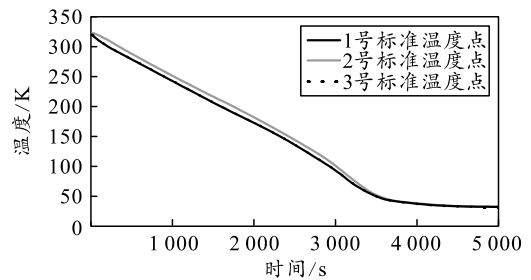


图 16 传感器校准腔满载全温区降温性能曲线

满载条件下，分别选取 77、113、173、273、323 K 5 个温度点对校准腔温度场稳态性能进行了模拟。以 113 K 模拟计算为例，3 个温度监测点的温度变化曲线如图 17 所示，各点计算结果如表 3 所示。计算结果表明，满载静态有效温度场均匀性满足 ± 10 mK 技术要求。

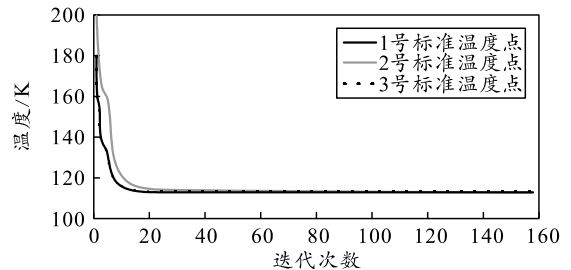


图 17 满载条件下监测点温度变化(以 113 K 为例)

表 3 满载条件下静态有效温度场均匀性

名称	温度值				
制冷温度/K	77.000	113.00	173.00	273.000	323.000
上部传感器温度/K	77.024	113.02	173.01	273.030	323.010
下部传感器温度/K	77.010	113.01	173.00	273.021	323.001
温差/mK	14.000	10.00	10.00	9.000	9.000

根据技术要求，还需要开展传感器安装不同数目的传感器时校准腔传感器安装座的温变性能，主要模拟同时标校支温度传感器的情况下，温变率 0.5 K/min，有效温度场温度最大差值是否满足小于 0.3 K 的要求^[13]。

初始温度设为 77 K 开始，以速率为 0.5 K/min 变化时，记录得到传感器安装铜座各个监控点的温度如图 18 所示，该工况下传感器安装铜座最大温差为 0.23 K。

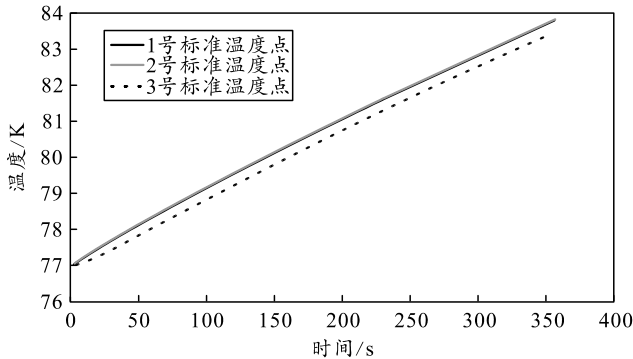


图 18 升温速率为 0.5 K/min 时传感器安装铜座监控点温度变化情况(起始温度为 77 K)

随着温度升高，金属材料的比热容增大，传感器安装铜座和传感器的热容量增大，对紫铜而言，导热系数也在降低；因此温度升高后，传感器座的热扩散率在下降，导致传感器座的温度不均匀性在增加。为了进一步确认温度升高对隔热校准腔性能的影响，考察了起始温度为 323 K 时，温升速率为 0.5 K/min 时传感器安装铜座温度分布情况，得到的结果如图 19 所示，该工况下传感器基座最大温差为 0.27 K。

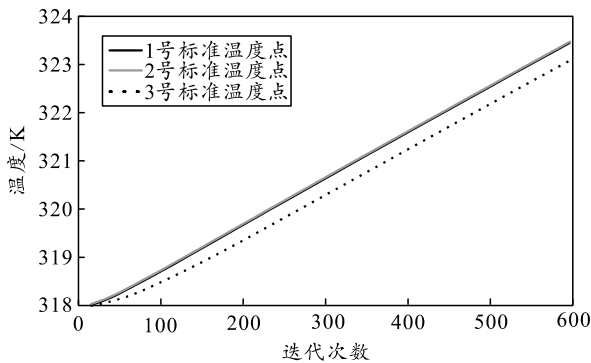


图 19 升温速率为 0.5 K/min 时传感器铜座监控点温度变化情况(起始温度为 323 K)

另外，在 113, 173, 273 K 也分别计算了温变速率为 0.5 K/min 时，传感器安装铜座的温度分布情况，计算结果表明，这些工况下传感器安装铜座最大温差都小于 0.3 K。

2.3 仿真计算结果试验验证

为了对仿真计算结果进行验证，专门建立低温整体校准装置验证平台，具体由校准腔、温度测量控制系统、制冷机、压缩机等装置组成，具体如图 20 所示。对校准腔系统的静态温度准确度、升降温速

率、升降温过程温度场一致性进行了试验验证，校准腔系统真空度为 8.3×10^{-4} Pa，验证平台外部温度 295 K，辅助制冷恒温槽 223 K，具体验证结果典型点值如表 4—5 所示。



图 20 低温整体校准装置验证平台

表 4 长时间稳定性测试结果

目标温度/K	准确度	温度场稳定性	温度场均匀性
77	0.007	0.016	0.035
223	0.021	0.033	0.030
323	0.023	0.030	0.031

表 5 10 K 阶梯升温性能测试结果

初始温度/K	目标温度/K	准确度	温度场均匀性	温场场稳定性
77	7	0.021	0.025	0.019
223	233	0.014	0.026	0.015
313	323	0.002	0.033	0.024

3 结论

针对大型低温风洞研制了一套适用于 77~323 K 温度范围的多通道温度测量系统高精度整体校准装置。其核心部分校准腔系统主体采用 3 层结构形式，中外部筒体采用真空隔热，内部筒体通过充氦实现腔内温度快速平衡；在连接中部筒体和外部筒体的不锈钢导管上设计辅助制冷套管，在内部筒体和中部筒体之间通过设置冷量分配器，解决温差导致的辐射传热问题。为验证设计方案的合理性，通过建立计算模型，对校准腔系统的静态精度、温度场均匀性、温度场稳定性以及在温度变化过程中温度场的一致性进行了数值仿真，并建立了试验验证平台对仿真结果进行了验证。仿真和试验结果表明：多通道温度测量系统高精度整体校准装置设计方案完全能够达到设计指标要求。

参考文献：

[1] 薛风国. 温度校准系统及校准方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
 [2] 李畏, 黄永华, 杨朴凡. 基于 G-M 低温制冷机的低温温度计全自动标定系统[J]. 低温工程, 2013, 22(2): 114-116.

- [3] CHOI Y S. Development of Variable Temperature Instrument for Sensor Calibration[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2014, 2(2): 747-753.
- [4] BALLE C, CASAS J, THERMEAU J P. Cryogenic Thermometer Calibration Facility at CERN[M]. Springer US: Advances in Cryogenic Engineering, 1998: 741-74.
- [5] 郭剑, 杨昆, 刘伟. 圆管插入十字形扭带强化传热数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(7): 1216-1218.
- [6] 周清杰. 温度测量系统整体校准方法研究述[J]. 计测技术, 2017, 27(z1): 114-116.
- [7] 薛生虎, 李东升, 叶子弘, 等. 基于多传感器融合技术的 PCR 仪温度校准系统[J]. 仪器仪表学报, 2011, 27(6): 1232-1237.
- *****
- (上接第 20 页)
- [3] 龚家, 谢全, 王圣东. 海军作战大数据处理系统建设及应用[J]. 指挥信息系统与技术, 2015, 6(2): 22-26.
- [4] 张曦, 王永斌, 刘宏波. 分布式战术数据链网络规划中的数据库设计[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(10): 133-136.
- [5] 魏祖宽, 江利娟, 金在弘. 数据库访问技术比较研究[J]. 计算机与现代化, 2009(12): 46-50.
- [6] 姚文琳, 王存刚, 刘世栋, 等. 基于 Oracle 的分布式数据库设计与技术[J]. 计算机工程, 2006, 32(20): 89-91.
- [7] 王永生, 马良荔, 王亮. 基于元数据的作战大数据资源目录服务技术[J]. 指挥信息系统与技术, 2018, 9(6): 95-100.
- [8] 李小涛, 胡晓惠, 郭晓利, 等. 基于元数据的复杂信息共享技术[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(3): 700-706.
- *****
- (上接第 28 页)
- [6] 刘帅, 程进军, 赵鑫, 等. VXI 总线温度传感器模拟模块设计[J]. 仪表技术与传感器, 2016(8): 1-4.
- [7] 何德军. 基于 VXI 总线的导弹综合检测系统实现技术[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(10): 2741-2743.
- [8] 吴国秋. 基于自适应 LS-SVM 的雷达 T/R 组件热管冷却故障诊断系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(7): 97-100, 106.
- [9] 蔡竞业, 夏蓉, 刘镰斧, 等. Ka 波段全相参雷达收发射频前端系统组件研制[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 629-633.
- [10] 刘林. 基于 DDS/PLL 技术宽带频综的设计与实现[J]. 8] 龚律宇. 真空低背景红外亮度温度校准方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [9] 陈素. 对于体式温度校准器轴向温场均匀性的分析研究[J]. 计量技术, 2020(1): 32-37.
- [10] 康振焯, 刘振侠, 任国哲, 等. 基于 Matlab/Simulink 的飞机燃油箱内燃油温度仿真计算[J]. 推进技术, 2014, 35(1): 62-69.
- [11] 蒋彦军. 辐射管加热的辊底炉内热传递三维数值模拟[J]. 冶金能源, 2020, 39(3): 13-19.
- [12] 常稼强. 基于有限元分析的传热仿真研究及黑体辐射源研制[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- [13] 贾一平, 黄运华. 基于 AMESim 的气动减压阀建模与仿真分析[J]. 机械工程与自动化, 201, 207(2): 60-62.
- *****
- [9] CATTELL R G G, DOUGLAS K B. The object data standard: ODMG3.0[M]. Burlington: Morgan Kaufmann Publishers, 1999: 133-139.
- [10] 赵振南. 联合作战信息系统体系结构若干关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [11] 张权. 战场数据样本高效生成与组织管理[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [12] 干哲. 面向任务的海战场环境信息服务技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [13] 王官. 现代军事信息系统中的数据库技术探析[J]. 电脑编程技巧与维护, 2017(18): 66-68.
- [14] 王英伟. 基于空海任务协同的信息管理系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [15] 任霄. 雷达组网探测系统任务规划软件设计[J]. 现代雷达, 2019, 41(3): 7-11.
- *****
- [11] 刘汝卿, 蒋衍, 李锋, 等. 感知型激光雷达多通道数据采集系统设计[J]. 红外与激光工程, 2021(5): 1-9.
- [12] 赵林峰, 陈会义, 付靖轩, 等. 基于 LabVIEW PXI 的汽车 SBW 系统硬件在环试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(3): 311-316.
- [13] 文昌俊, 陈立, 张金良, 等. 基于智能体的雷达测试性虚拟验证系统研究[J]. 现代雷达, 2020, 42(10): 1-6.
- [14] 段道聚, 张永祯, 张鹏, 等. 雷达装备自动测试系统的通用性设计[J]. 现代雷达, 2015, 37(10): 69-72.
- [15] 余刚毅, 刘放, 姚怀智. 基于 LabVIEW 的接触网作业车状态监控与姿态跟踪系统[J]. 电子测量技术, 2021, 44(18): 7-12.