

真空热试验热电偶测温参考点分析改进

孙兴华², 苏新明², 陶涛^{1,2}

(1. 可靠性与环境工程技术重点实验室; 2. 北京卫星环境工程研究所: 北京 100094)

摘要: 热电偶测温系统是真空热试验中最常用的温度测量系统, 温度参考点是热电偶测温系统的重要组成部分。文章分析了热电偶温度参考点的各项技术要求, 为参考点结构设计、热设计、电装工艺等提供了依据; 同时结合温度参考点的现状, 为简化操作, 降低使用风险, 提出了一种优化改进结构方案, 并进行了热分析计算以及试验验证, 结果表明该方案完全满足参考点各项技术要求。

关键词: 真空热试验; 热电偶; 温度参考点; 热分析计算; 试验验证

中图分类号: TH811; V416.5

文献标识码: B

文章编号: 1673-1379(2012)05-0522-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2012.05.009

0 引言

真空热试验是航天器研制过程中为了验证热设计、考核系统性能和暴露工艺缺陷等进行的试验项目, 试验过程中需要监测大量的温度数据。因此, 温度测量系统是航天器真空热试验成败的关键, 同时也是空间环境模拟器热试验能力最直观的体现。目前, 尽管国内外都在积极研制和尝试新型测温系统, 例如无线测温系统、红外摄像测温系统, 甚至有些空间机构已经计划将新型温度测量系统纳入空间环境模拟器的标准配套设备^[1], 但热电偶测温系统凭借其灵敏度高、稳定可靠、互换性好、价格低廉等特点, 将在相当长一段时期仍然是真空热试验中最具优势的温度测量系统。

温度参考点作为热电偶测温系统的重要组成部分, 直接关系到整个测温系统的精度和可靠性。多年的使用经验表明, 目前真空热试验热电偶测温系统普遍采用的内置温度参考点, 在操作便易性、可靠性以及温度场的稳定性等方面仍然存在不足和改进空间, 这也是本文的研究目的。

1 真空热试验热电偶测温系统

热电偶测温系统一般由热电偶、测温电缆、温度参考点、数据采集及处理系统组成。国内空间环境模拟器普遍采用的热电偶测温系统及接线方式如图1所示。其中, 传感器采用T型铜-康铜热电

偶, 测温电缆选用聚四氟乙烯作绝缘层的AF-200型50芯电缆, 电连接器统一使用Y2型50针航空插头, 温度参考点则采用内置公用参考点接线方式, 数据采集和处理系统采集周期一般为1min。

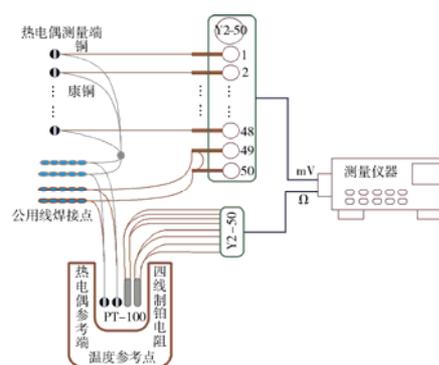


图1 热电偶测温系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermocouple temperature measurement system

如图2所示, 根据热电偶测温原理及中间温度定律^[2]:

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0), \quad (1)$$

式中, $E_{AB}(T, T_0)$ 、 $E_{AB}(T, T_n)$ 和 $E_{AB}(T_n, T_0)$ 分别为热电偶AB在接点温度分别为 (T, T_0) 、 (T, T_n) 、 (T_n, T_0) 时的电动势。

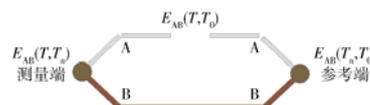


图2 热电偶测温原理示意图

Fig. 2 Principle diagram of thermocouple temperature measurement

收稿日期: 2012-02-03; 修回日期: 2012-09-20

基金项目: 北京卫星环境工程研究所可靠性改进课题

作者简介: 孙兴华(1982—), 男, 硕士学位, 研究方向为航天器真空热试验技术。E-mail: sandflying@126.com.

真空热试验中使用的铜-康铜热电偶都是经过标定的, 供方以分度表的形式提供同批次热电偶在参考端温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 测量端在不同温度 (通常是在 $-200\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 每隔 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 标定一次) 时回路中的电动势 $E_{AB}(T, 0)$ 。根据公式(1), 有

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, 0) - E_{AB}(T_0, 0), \quad (2)$$

其中 $E_{AB}(T, T_0)$ 可由测量仪器测出。如果知道参考端的温度 T_0 , 则可以由分度表查询得到 $E_{AB}(T_0, 0)$; 这样就可以计算出 $E_{AB}(T, 0)$; 此时, 测量端的温度 T 就可以根据分度表计算得出。可以看出, 分度表的使用以及参考端温度的测量对测温系统的准确度十分重要。

分度表中温度 T 和电动势 $E_{AB}(T, 0)$ 的对应关系是离散的。如果想知道在任意温度下对应的电动势, 或者在已知电动势情况下求温度值, 就需要对分度表进行数据处理。目前, 普遍采用的方法是进行分段拟合, 即在 $-200\sim -100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-100\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间根据分度表数据用公式

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 \quad (3)$$

进行双向拟合, 求出拟合系数, 从而得出温度 T 和电动势 $E_{AB}(T, 0)$ 之间连续的对对应关系^[3]。式(3)中: 进行正向拟合时, x 表示温度 T , y 表示电动势 $E_{AB}(T, 0)$; 进行反向拟合时, x 表示电动势 $E_{AB}(T, 0)$, y 表示温度 T ; a 、 b 、 c 、 d 分别为多次项系数。

目前, 确定热电偶参考端温度的方式, 是将所有热电偶参考端都集中置入温度参考点装置中, 并用高精度四线制铂电阻测量参考点装置的温度, 认为该温度即热电偶参考端的温度。可以看出, 温度参考点集中了所有热电偶的参考端, 对于整个热电偶测温系统的测量精度和可靠性有着至关重要的意义。

2 温度参考点技术要求分析

温度参考点的功能主要是为热电偶的公共参考端提供一个稳定、可靠、均匀并且可测的温度场。按照真空热试验温度数据采集及处理相关要求, 要确保该温度场的不均匀度不超过 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并且在 1 个采集周期内温度变化量不超过 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[4]。下面结合当前温度参考点现状, 分别从结构设计、热设计以及电装工艺 3 方面介绍和分析一下相关技术要求。

2.1 温度参考点现状分析

目前, 国内系统级真空热试验普遍采用内置式温度参考点, 即将温度参考点放置对环境模拟器内, 结构如图 3 所示。其中底座采用绝热性能良好的聚四氟乙烯材料, 外壳是不锈钢薄板材料, 主体结构为热容较大的紫铜, 容腔内用于集中放置热电偶参考端, 使用时需注入导热硅脂。

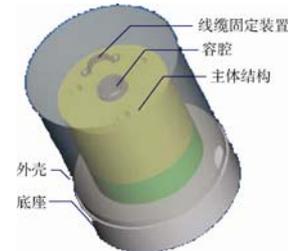


图3 温度参考点结构现状

Fig. 3 Structure of the current temperature reference equipment

根据长期使用的效果和和经验, 这种结构和形式基本上能够满足使用要求, 但在使用便易性、可靠性以及温度场的稳定性上仍然存在着不足和改进空间。从电装工艺角度看, 由于参考点内热电偶和铂电阻布线方式的限制, 致使每一次更换热电偶或者铂电阻都需要进行整体变动, 不仅工作量大, 而且频繁的操作不利于保证测温系统的可靠性; 从改进温度场的角度看, 尽管目前已在参考点的制作工艺上采取了很多措施来减少“漏热”, 但对于参考点温度特性缺少足够的研究, 以及有力的数据和计算作为支撑; 此外, 温度参考点在组装、搬运等方面也存在着不便之处。

因此, 无论从缩减工作量、简化参考点制作工艺、提高可靠性的角度, 还是在积累参考点温度特性研究数据、提高参考点的性能指标方面, 对温度参考点进行分析和改进都有着积极的意义。

2.2 温度参考点改进技术要求

根据以上的现状分析, 对于温度参考点的优化和改进应主要从改进结构入手, 并加强热分析和计算以及试验验证, 简化参考点制作工艺。

1) 结构设计

结构设计上应满足空间环境模拟器热电偶测量电缆最大数量公用线的使用要求, 并且要充分考虑温度参考点安装位置空间要求及方便组装和便携的需求, 同时要兼顾电装工艺(包括热电偶放置、包覆、布线、安装等)的实施。

2) 热设计

从热设计的角度,应结合温度参考点所处的环境,从测温精度允许的误差范围出发,计算并通过试验验证确保参考点所提供的温度场在稳定性和均匀性上都能满足设计要求,并尽量减小参考点的体积和质量。

3) 电装工艺

从电装工艺的角度,应采取方便热电偶和铂电阻安装、更换的制作工艺,并尽量降低更换的频率,避免不必要的操作,从而在一定程度上提高系统的可靠性。

3 温度参考点优化改进

根据温度参考点优化改进技术要求分析,整个改进工作将按照需求分析、结构设计、热计算与分析、试验验证的流程开展,如图4所示。

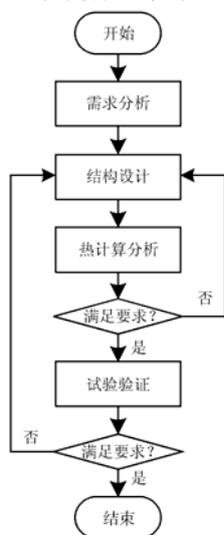


图4 温度参考点优化改进流程

Fig. 4 Flowchart for improvement of temperature reference equipment

3.1 需求分析

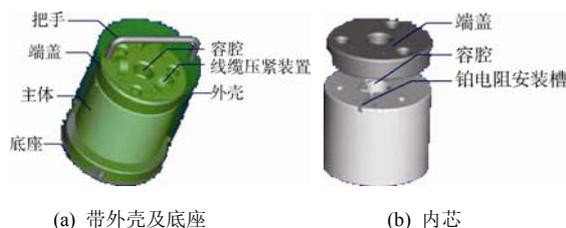
真空热试验热电偶一般可以分为星上热电偶、星上热流计以及工装热电偶3类,不同型号任务使用的星上热电偶和热流计的牌号往往不同,每次试验时需要进行更换;而工装热电偶、铂电阻在使用有效期内一般不进行更换。因此,结构上应实现不同更换频率热电偶和铂电阻的独立安装和更换,并且方便组装和搬运。

从热设计角度,不同环境模拟器温度参考点安装位置不同,所处热环境也不同,因此应保证其在最

恶劣的热环境下满足要求。除了保证容腔温度不均匀度不超过 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度变化率不超过 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 之外,还要考虑拟合误差的影响。热电偶和铂电阻测温都是根据分度表采用公式(3)进行拟合运算获得,根据拟合误差分布情况,在试验工况期间,容腔温度应在 $-50\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。

3.2 结构设计

根据需求分析,温度参考点的主体结构采用上下分离的方式,并且设计了专门的铂电阻安装槽,这样更换热电偶时就无须触动铂电阻;端盖上分别设计了针对3类热电偶的压紧装置,可实现热电偶的独立更换;同时,在外壳上设计了卡槽和把手,有利于底座的组装和满足便携式要求。整个改进结构设计如图5所示。



(a) 带外壳及底座 (b) 内芯
图5 温度参考点优化改进结构

Fig. 5 Structure of the improved temperature reference equipment

目前,国内空间环境模拟器的温度参考点主要放置在热沉与罐壁的夹层之间,根据放置空间的要求,确定了温度参考点圆柱体的最大直径和高度分别为 0.12 m 和 0.15 m ;同时考虑到公用线数量的需求以及电装实施的便利,结合以往各型号试验任务的使用情况以及空间环境模拟器的测试能力,确定温度参考点容腔的直径应大于 15 mm , 高度应小于 60 mm 。

3.3 热计算和分析

3.3.1 建立模型

根据温度参考点的结构组成和主要尺寸建立简化几何模型,如图6所示。主要结构组成材料及特性如表1所示。



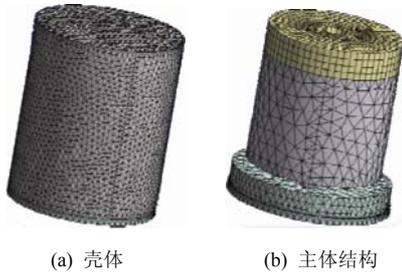
图6 温度参考点几何模型

Fig. 6 Geometrical model of improved temperature reference equipment

表 1 温度参考点组成材料特性
Table 1 Material characteristics of improved temperature reference equipment

名称	材料	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	厚度/mm	备注
多层	—	0.001 4	4	等效导热系数 0.003 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
壳体	不锈钢	15.1	1	
主体	紫铜	401	根据容腔尺寸确定	—
支柱	聚四氟乙烯	0.28	5	3 个
底座	聚四氟乙烯	0.28	20	—
导热硅脂	—	0.72	—	容腔内填注

在空间环境模拟器中, 温度参考点传热主要涉及其内部导热及与外部环境辐射换热。因此, 采用 ANSYS 软件中的 Mechanical 模块进行分析, 划分网格包括结构体网格和非结构体网格, 如图 7 所示。



(a) 壳体 (b) 主体结构
图 7 网格划分示意图
Fig. 7 The grid layout

3.3.2 确定边界条件

为了满足最恶劣的热环境要求并结合试验经验, 假定温度参考点四周及顶部均有热沉包围, 底部与空间环境模拟器罐壁接触保持 20 °C 恒温。分别通过稳态和瞬态计算, 获取温度参考点容腔温度分布及变化特性, 具体边界条件如表 2 所示。

表 2 边界条件分布
Table 2 Distribution of boundary conditions

计算类型	区域	发射率	环境条件
稳态	壳体表面	0.05	-173.15 °C
	底座四周	0.2	-173.15 °C
	底座底部	0.2	20 °C 恒温
瞬态	壳体表面	0.05	2 h 内从 20 °C 降至 -173.15 °C
	底座四周	0.2	2 h 内从 20 °C 降至 -173.15 °C
	底座底部	0.2	20 °C 恒温

3.3.3 计算结果

根据前面建立的计算模型和边界条件, 分别假定容腔直径为 15 mm、20 mm、25 mm, 高度为 40 mm、50 mm、60 mm。瞬态和稳态计算结果表明, 在这一尺寸区间范围内参考点容腔温度特性相差不大, 并且都可以满足试验使用要求。

图 8 和图 9 分别给出了容腔直径为 20 mm、高

度为 50 mm 时的瞬态和稳态计算结果, 可以看出温度参考点容腔内各点的温度和温度变化率都是单调下降的, 温度变化率最高为 0.038 °C/min, 容腔温度分布最终稳定在 -45.81 ~ -45.88 °C 之间, 满足热设计要求。

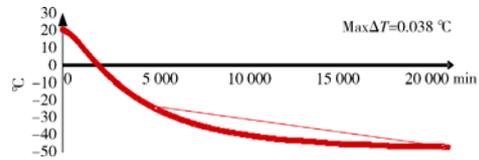


图 8 瞬态计算结果

Fig. 8 Simulation result in transient situation

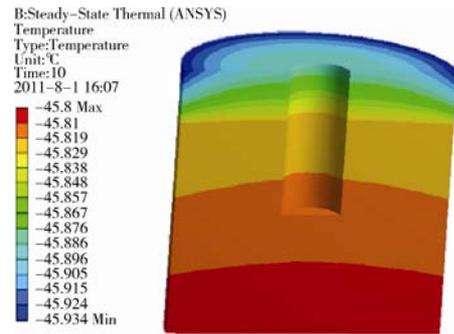


图 9 稳态计算结果

Fig. 9 Simulation result in steady situation

3.4 试验验证

为验证计算结果, 并进一步获取温度特性数据, 根据上述计算和分析结果, 按照容腔直径为 20 mm、高度为 50 mm 的尺寸, 加工出改进后的参考点实物, 专门设计进行了一次验证试验。试验中, 将温度参考点用多层材料进行包覆并放置在空间环境模拟器热沉与罐壁夹层之间, 其中底座与罐壁接触, 其他表面朝向热沉; 在温度参考点容腔中填入导热硅脂并随机布置了 10 支铂电阻, 采用四线制测量方法进行测量。

图 10 给出了从试验开机到工况结束铂电阻测温的实时曲线。在将近 14 d 的试验过程中, 10 支铂电阻的温度变化率最高为 0.032 °C/min, 温度最终稳定于 -47.08 °C, 满足温度变化率要求。

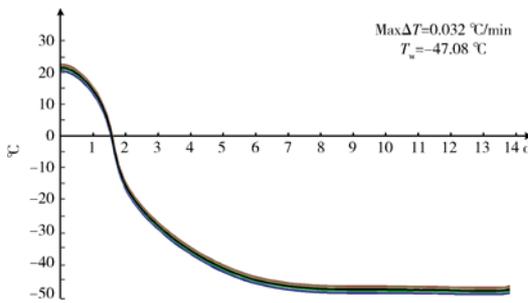


图 10 铂电阻温度变化测试结果

Fig. 10 Test results of temperature variations of the platinum resistance thermometers

图 11 给出了同一时刻 10 支铂电阻测量温度的最大差值, 可以看出, 整个试验过程中该差值都小于 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$, 满足温度参考点的均匀性要求。

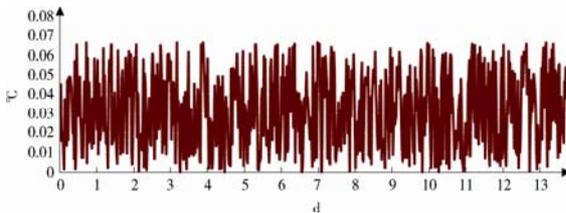


图 11 铂电阻温度均匀性测试结果

Fig. 11 Test results of temperature uniformity of the platinum resistance thermometers

综合以上整个试验结果可以看出, 该温度参考点的温度特性满足真空热试验的使用要求。

4 结束语

本文从真空热试验热电偶测温系统温度参考点的功能和应用角度出发, 分析了参考点各项技术

要求, 为参考点结构设计、热设计、电装工艺等方面提供了依据; 此外针对原有温度参考点在操作便捷性和可靠性方面存在的不足, 设计出一种新型的温度参考点结构, 该结构有效地简化了针对参考点的操作, 从而降低了参考点的使用风险; 进一步的热分析计算和试验验证表明这种新型结构完全满足参考点的使用要求。同时, 在验证过程中也积累了温度参考点温度特性等数据, 为下一步研究奠定了基础。

参考文献 (References)

- [1] 郭赣. 真空热试验温度测量系统[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(1): 33
Guo Gan. Temperature measurement system for spacecraft thermal vacuum tests[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(1): 33
- [2] 赵静宜. 热电偶使用中的几个问题和解决办法[J]. 自动化仪表, 2007, 28(1): 115
Zhao Jingyi. The problems existing in application of thermocouples and appropriated solutions[J]. Process Automation Instrumentation, 2007, 28(1): 115
- [3] 吴大军. 真空热试验试件数据测量软件的通用化设计[J]. 航天器环境工程, 2003, 20(2): 56
Wu Dajun. The design of versatile measurement software for vacuum thermal test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2003, 20(2): 56
- [4] 中国空间技术研究院. Q/W 1337—2011 航天器热平衡与热真空试验温度数据采集与处理要求[S], 2011

Analysis and improvement of temperature reference equipment for thermocouple in vacuum thermal tests

Sun Xinghua², Su Xinming², Tao Tao^{1,2}

- (1. Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory;
2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering: Beijing 100094, China)

Abstract: The temperature reference equipment is an important part of a temperature measurement system with thermocouples, as most widely used in vacuum thermal tests. This paper analyzes the technical requirements for the temperature reference equipment, to serve as the basis for the structural design, the thermal design, and the process of electric assembling. An improvement scheme is proposed by optimizing its design based on the current version to simplify the operation and to reduce the risks in its use. A thermal analysis and an experimental validation show that this scheme can meet all technical requirements for the temperature reference equipment.

Key words: vacuum thermal tests; thermocouple; temperature reference equipment; thermal analysis; experimental validation