

# 真空热试验温度参考点热响应测试系统设计及实现

朱 熙, 韩 放, 申 彬, 李西园, 梁 硕

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 在航天器真空热试验的温度测量中应用最广泛的是热电偶测温系统, 温度参考点是热电偶测温系统的重要组成部分, 对温度测试数据的准确性和航天器产品的安全有很大影响; 为了在热试验开机前对参考点铂电阻与热点偶补偿端匹配关系的正确性进行验证, 设计了一种可用于真空热试验的热电偶测温参考点热响应测试系统; 该系统由加热器以及控制箱组成, 可通过 LAN 网络与上位控制计算机连接实现热响应远程测试; 文章通过对参考点装置的热分析以及热响应测试原理分析, 给出了系统的硬件结构以及软件设计方案, 并在多项航天器真空热试验中投入使用, 提高了航天器真空热试验热电偶测温系统的可靠性。

**关键词:** 温度参考点; 真空热试验; 热响应测试; 热电偶测温

## Design and Implementation of Temperature Reference Equipment Thermal Response Test System in Vacuum Thermal Test

Zhu Xi, Hang Fang, Shen Bin, Li Xiyuan, Liang Shuo

(Beijing Institute of Spacecraft Environment and Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In the spacecraft vacuum thermal test temperature measurement is the most widely used thermocouple temperature measurement system. The temperature reference point is an important part of the thermocouple temperature measurement system, and it has a great impact on the accuracy of the temperature test data and the safety of the spacecraft products. In order to verify the correctness of the matching relationship between the platinum resistance and the compensation point of the hot spot before the start of the thermal test, a thermocouple temperature reference test system for thermal test was designed. The system consists of a heater and a control box, which can be connected to a host computer via a LAN network for thermal response remote testing. In this paper, the thermal analysis of the reference point device and the thermal response test principle analysis, given the system hardware structure and software design, and in a number of spacecraft vacuum thermal test put into use, improve the spacecraft vacuum thermal test thermocouple Reliability of temperature measurement system.

**Keywords:** temperature reference equipment; vacuum thermal test; thermal response test; thermocouple temperature measurement

## 0 引言

真空热试验是航天器研制过程中必须进行的大型地面试验之一, 在真空热试验过程中试验设备、试验工装以及航天器上有关部位的温度是最为重要的测量参数。目前, 在航天器真空热试验的温度测量中应用最广泛的是热电偶测温系统, 其通过测量热电动势来实现温度测量<sup>[1]</sup>。热电偶具有测温范围宽、体积小、动态响应速度快、互换性好、稳定性较好和便于集中控制等特点<sup>[2]</sup>, 但它需要进行冷端(参考点)补偿, 其测温准确度受冷端校准准确度的影响较大<sup>[3-4]</sup>。真空热试验航天器温度测量常用的热电偶是铜-康铜热电偶, 测量范围为 $-200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

目前, 国内通常采用将公用参考点放置在空间环境模拟室内方法<sup>[5]</sup>。温度参考点装置一般为铜圆柱体, 在圆柱体的中

间开孔并将参考点端热电偶及测温用铂电阻放置其内。通过铂电阻测得的温度反推参考点端热电偶电动势, 再利用公式计算出测温点热电偶电动势, 即可得到测点温度值。

温度参考点装置作为真空热试验中极其重要的工装, 对温度测试数据的准确性和产品安全有很大影响。在试验中, 很可能出现多套测温系统同时运行的情况, 此时需要多套参考点装置。参考点热响应测试正是对参考点电缆连接正确性进行验证的一种方法, 是试验准备阶段的关键工序。

## 1 测温系统介绍

### 1.1 热电偶测温系统

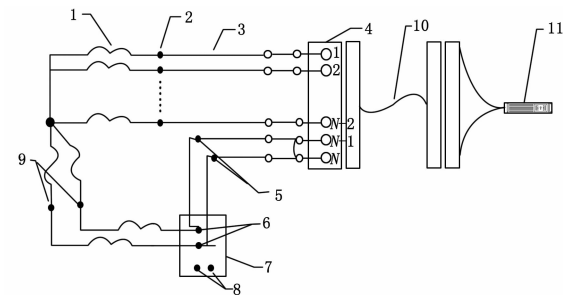
真空热试验热电偶温度测量系统一般由测温热电偶、测温线缆、电连接器、温度参考点、测量仪器、计算机数据处理系统构成, 如图 1 所示。热电偶测量线路采用双线冗余公用负极的接线方式, 将测温热电偶的康铜丝并焊, 引出两根康铜丝, 分别与两组参考点端热电偶(公用线)的康铜丝进行焊接。电连接器最后两路通道作为热电偶的公用负极的传输通道, 其余通道焊接热电偶的正极。电连接器上公用负极传输通道各引出一根铜丝, 分别与两组参考点端热电偶(公用线)的铜丝进行

收稿日期: 2017-08-31; 修回日期: 2017-10-18。

基金项目: 北京卫星环境工程研究所自主研发项目。

作者简介: 朱熙(1985-), 男, 浙江兰溪人, 硕士研究生, 主要从事航天器热试验温度测量与控制方向的研究。

焊接；同时，将电连接器最后两路通道使用铜线搭接。热电偶汇集成电连接器后，经过渡电缆引出至真空容器外，与数采仪器连接。参考点装置内部放置两只铂电阻，通过铂电阻电缆引出至真空容器外的数采仪器。通过采集铂电阻的温度，可反算参考点内热电偶的热电势。



1—测温热电偶康铜丝；2—热电偶测温点；3—测温热电偶康铜丝；4—电连接器；  
5—参考点端热电偶康铜丝焊接点；6—温度参考点；7—热电偶内置温度参考点装  
置；8—参考点测温用铂电阻；9—参考点端热电偶康铜丝焊接点；10—过渡电缆；  
11—数采仪器

图 1 热电偶测量线路组成

### 1.2 参考点装置

参考点装置选用热惯性比较大，内腔可以形成比较均匀温度场的铜圆柱体<sup>[6]</sup>，其装置实物如图 2 所示。

参考点热响应测试系统主要通过参考点装置的主体结构外表面粘贴加热片，通过程控电源对加热片施加一定电流使得参考点容腔内温度升高，通过数采系统测得容腔内铂电阻的温度以及热电偶的电动势，根据参考点热响应判定准则判定参考点连接的正确性。

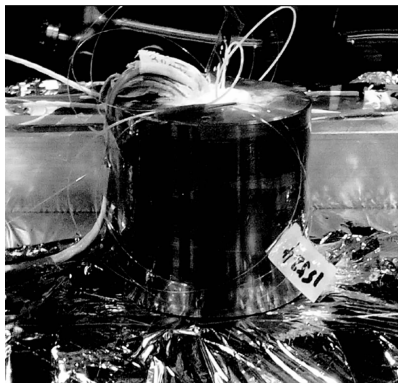


图 2 参考点装置

### 1.3 参考点装置热分析

在常温常压环境下，参考点装置传热有内部导热、自然对流及外部环境辐射换热。因此采用 ANSYS 软件中的 Mechanical 模块进行分析<sup>[7]</sup>，划分网格如图 3 所示。

计算条件：圆柱直径：100 mm；孔径：20 mm；高度 100 mm。

边界条件设置：（1）外边界：与 20℃ 背景辐射，角系数 0.15，自然对流 2 W/K·m<sup>2</sup>，外界温度 20℃。（2）上下表面：绝热。

计算结果如下：通过 20 W 的加热功率给参考点加热 10

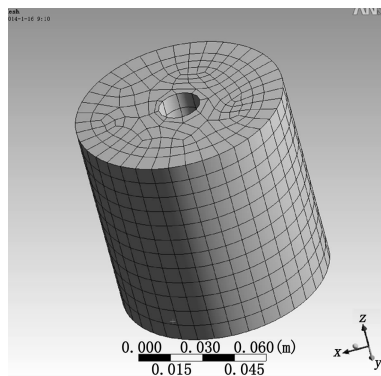


图 3 参考点网格划分示意图

min，可使其由 20℃ 增长至 24℃。内外表面温度变化如图 4 所示。

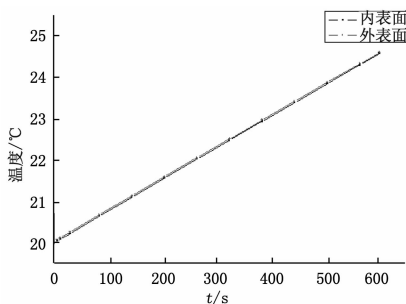


图 4 参考点内外表面温度变化图

## 2 参考点热响应测试原理

参考点热响应测试，即对参考点装置进行加热，使得所测得的铂电阻温度及热电偶热电势发生变化，通过其变化趋势判断参考点连接是否正确。

测量仪器所测得的热电偶电动势如图 5 所示。其中  $E_{AB}$  为测量仪器所测得的电动势， $E$  为测点热电偶电动势， $E_{参考点}$  为参考点热电偶电动势。

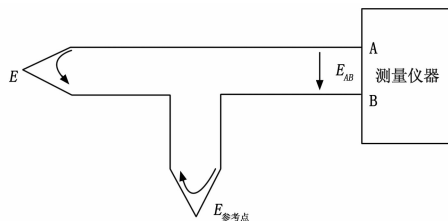


图 5 热电偶电动势的组成

1) 当参考点铂电阻电缆连接正常时：

对参考点加热，铂电阻温度增加量  $\Delta T$ ，从而计算出参考点热电偶电动势增加量  $\Delta E$ ，根据图 5 所示可得如下关系。

加热前测量仪器所测得的热电偶电动势：

$$E_{AB} = E - E_{参考点} \tag{1}$$

加热后测量仪器所测得的热电偶电动势：

$$E'_{AB} = E - E'_{参考点} = E - (E_{参考点} + \Delta E) =$$

$$E - E_{参考点} - \Delta E \tag{2}$$

结论：加热后测量仪器所测得的热电偶电动势将减小，而

计算后的测点温度值将保持不变。

2) 当参考点铂电阻电缆连接错误时:

对参考点加热, 铂电阻温度增加量  $\Delta T$ , 从而计算出参考点热电偶电动势增加量  $\Delta E$ , 而测量仪器实际所测得的电动势保持不变, 根据图 5 所示可得如下关系。

加热前测点热电偶电动势:

$$E = E_{AB} + E_{\text{参考点}} \quad (3)$$

加热后测点热电偶电动势:

$$E' = E_{AB} + E'_{\text{参考点}} = E_{AB} + E_{\text{参考点}} + \Delta E \quad (4)$$

结论: 加热后测量仪器所测得的热电偶电动势保持不变, 而计算后的测点温度值将增加, 增加量等于铂电阻温度增加量。

3) 当热电偶公用线正负极接反时:

对参考点加热, 铂电阻温度增加量  $\Delta T$ , 从而计算出参考点热电偶电动势增加量为  $\Delta E$ 。而当热电偶公用线正负极接反时, 在公用线焊接点将产生热电势  $E_{\text{焊接点}}$ , 根据图 5 所示可得如下关系。

加热前测量仪器所测得的热电偶电动势:

$$E_{AB} = E - E_{\text{焊接点}} + E_{\text{参考点}} - E_{\text{焊接点}} = E + E_{\text{参考点}} - 2E_{\text{焊接点}} \quad (5)$$

由于焊接点和参考点都处于常温状态, 可认为  $E_{\text{焊接点}} = E_{\text{参考点}}$ , 则:

$$E_{AB} = E - E_{\text{参考点}} \quad (6)$$

加热后测量仪器所测得的热电偶电动势:

$$\begin{aligned} E'_{AB} &= E + E'_{\text{参考点}} - 2E_{\text{焊接点}} = \\ &= E + (E_{\text{参考点}} + \Delta E) - 2E_{\text{焊接点}} = \\ &= E + \Delta E - E_{\text{参考点}} \end{aligned} \quad (7)$$

而计算后的测点热电偶电动势:

$$\begin{aligned} E' &= E'_{AB} + E'_{\text{参考点}} = \\ &= (E + \Delta E - E_{\text{参考点}}) + (E_{\text{参考点}} + \Delta E) \\ &= E + 2\Delta E \end{aligned} \quad (8)$$

结论: 加热后测量仪器所测得的热电偶电动势将增加, 计算后的测点温度值也将增加, 增加量等于铂电阻温度增加量的两倍。

### 3 热响应测试系统设计

#### 3.1 系统硬件设计

参考点热响应测试系统主要包括测温系统和加热系统, 根据参考点热响应控制系统所需的工艺流程分别控制热响应系统所有设备的启动/停止, 并在建立以及维持过程中监控各回路的温度和加热电流的变化, 其硬件主要由三部分组成: 1) 放置在空间环境模拟室内的参考点装置; 2) 放置在采集现场的控制箱、测量仪器以及交换机; 3) 放置在控制室的采集计算机和监控计算机。系统硬件连接如图 6 所示。

在每个参考点内各放置一只铂电阻, 在每个参考点外表面粘贴薄膜加热片, 铂电阻和薄膜加热片都通过测试电缆引至空间环境模拟室外的控制箱。控制箱主要由开关电源、温度巡检仪、PLC 控制器以及继电器组成, 其作用为对各加热回路进行供电并采集各铂电阻回路的温度值, 其内部硬件组成示意图如图 7 所示。

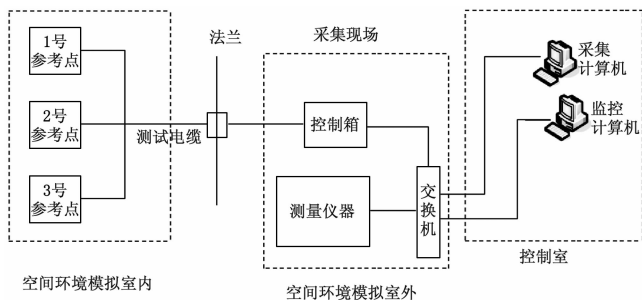


图 6 测试系统硬件连接示意图

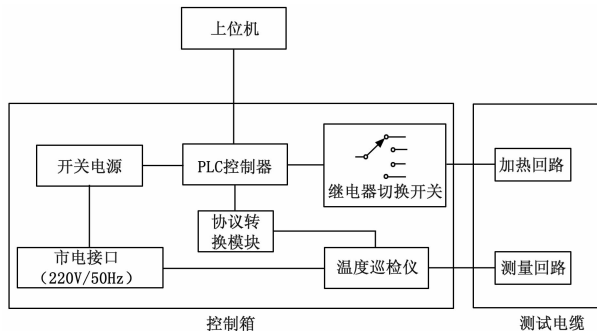


图 7 控制箱内部组成框图

参考点热响应测试系统的测温系统主要由铂电阻温度传感器、温度巡检仪、测量仪器以及上位计算机组成。温度巡检仪采集参考点内的铂电阻温度; 测量仪器采用吉时利 2750 型号, 由于采集热电偶电动势, 并将热电势转换为温度值。

参考点热响应测试系统的加热系统包括开关电源、PLC 控制器、继电器以及加热片组成。通过 PLC 控制器对继电器进行控制, 对各加热回路进行切换, 使其满足一个电源模块可以分别给 3 个加热回路供电。温度巡检仪通过协议转换模块将温度数据传送给 PLC 控制器, 然后通过以太网口与上位机进行通信。控制箱前面板设计如图 8 所示, 其上固定 1 个温度巡检仪面板, 1 个数显表面板, 3 个加热通道按钮开关、1 个“本地 \ 远程”旋钮开关以及 1 个总开关。数显表面板左侧分别显示电流值及温度值, 右侧为通道指示灯; 温度巡检仪面板显示温度值。

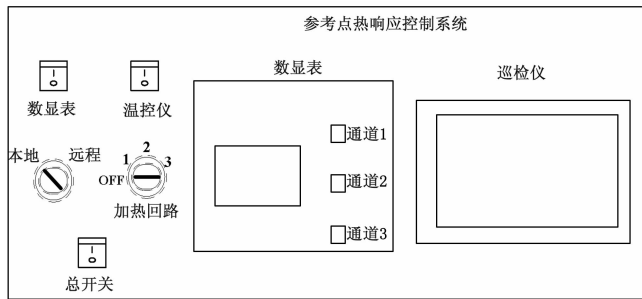


图 8 控制箱前面板示意图

控制箱放置在目前使用的测量机柜内, 通过控制箱可以对各加热回路进行供电并采集各铂电阻回路的温度值。控制箱通过网线连至交换机, 可以通过上位计算机控制各加热回路对其进行加热以及监视各回路的温度值。控制方式分为本地控制和

远程控制两种方式,用户可以通过控制箱按钮或开关对设备进行控制,也可以通过计算机上位机监控软件对设备进行控制。在控制箱上进行选择旋钮进行“本地/远程”模式的选择,若选择“本地”模式则上位机监控软件中操作按钮无效;若选择“远程”模式则本地操作按钮无效,并且确保无扰切换。

### 3.2 系统软件设计

参考点热响应测试系统可以通过“远程”和“本地”两种方式分别启动各加热回路加热功能,并能够远程和本地进行手动控制,系统软件根据功能需要分为 PLC 控制软件和上位机监控软件。

PLC 控制软件采用 SIMATIC STEP 7 Basic 软件进行编写,采用面向任务的理念,将编辑器嵌入到一个通用编辑框中,使用户可以同时打开多个编辑器。通过设计本地、远程两级控制方式,完成对系统的加热回路的控制,并完成对多路温度巡检仪、电流显示仪等数据的采集与设置。首先,向项目中添加 CPU 组态,为 PLC 创建设备配量,编辑 CPU 属性的以下参数:

1) PROFINET1: 设置 CPU 的 IP 地址和时间同步。

2) 脉冲发生器和高速计数器: 启用并组态用于脉冲串远行和脉冲宽度调制的脉冲发生器以及高速计数器。当 CPU 或信号板的输出组态为脉冲发生器时, Q 存储器中将移除相应的输出地址。

其次,将以下硬件目录中的模块添加到 CPU 组态中:

1) 将包含模拟 I/O 节点或数字 I/O 节点的信号模块连接在 CPU 的右侧。

2) 将包含附加 I/O 节点的信号板安装在 CPU 的前端。

3) 将包含通信端口 (RS232 或 RS485) 的通信模块连接在 CPU 的左侧。

最后,创建网络连接并组态 IP 地址:

1) MAC 地址: 在网络中,每个设备都具有一个唯一的“介质访问控制”地址 (MAC 地址),以对每个设备进行标识和区别。

2) IP 地址: 每个设备也部必须具有个 Internet 协议 (IP) 地址,该地址使设备可以在更加复杂的路内网络中传送数据。

3) 路由器: 网络中,路由器是 LAN 之间的链接,通过路由器连接的计算机可向其他网络发送消息。如果数据的目的地不在 LAN 之内,路由器会将数据转发给可将数据传送到其目的地的另一个网络或网络组。路由器依靠 IP 地址来传送和接收数据包。

上位机监视及控制软件采用三维力控的 ForceControl V6.0 组态软件作为开发平台开发,应用可视化控件组态技术,设计人机交互界面,远程实现对参考点装置的加热、温度及电流监视、数据分析和报警记录等功能。软件功能结构如图 9 所示。系统软件运行在监控计算机上,主要包括以下功能:

1) 系统登陆: 完成系统初始化,设置登陆权限,进入系统启动登录环境。

2) 主系统监控: 根据用户提供的系统流程,显示相应仪器设备运行状态。

3) 温度及电流监控: 对控温单元、加热电流大小进行

监控。

4) 生成数据报表: 按照格式生成数据报表,用户可以使用报表查询历史数据。

5) 实时显示曲线: 允许用户对实时数据、历史数据进行查询或进行曲线分析。

6) 系统操作管理: 允许用户对系统的采集周期、报警参数等进行设置。

系统软件通过读取不同时刻测量仪器采集的电动势、测点温度值以及参考点温度值,根据热响应测试原理得到的测试准则,判断参考点电缆连接以及热电偶公用线正负极接线的正确性。软件流程如图 10 所示。

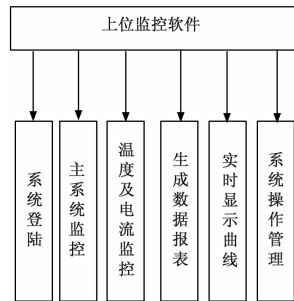


图 9 软件功能结构图

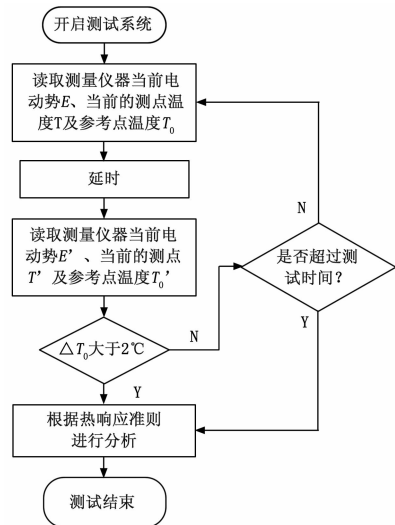


图 10 软件流程图

## 4 系统应用

该系统在某型号航天器真空热试验开机前得到了成功应用。

首先对自动判读软件的配置文件进行配置,包括温度数据读取路径,参考点铂电阻测点号。通过远程控制软件,对热响应系统进行设置及监视,自动判读软件在开始运行时首先读取配置文件,然后根据热响应准则对其进行判读并给出测试结果,完成了两个参考点装置的热响应测试,验证了温度参考点电缆连接以及热电偶公用线焊接的正确性,保障试验顺利进行。系统远程实时监控如图 11 所示。

(下转第 13 页)