

# 液体火箭发动机试验热电偶传感器测量工艺

肖培斌

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 热电偶传感器具有性能稳定、结构简单、使用安全、价格低廉、测温范围广等特点, 在液体火箭发动机地面试验中得到了广泛应用。由于输出信号小, 在发动机试验的恶劣环境中若使用不当, 则容易造成测量不准或测不到数据。针对目前测量中存在的问题, 提出了热电偶传感器使用中应注意的一些关键技术和使用工艺要求。工程实践表明, 按此工艺操作, 热电偶的测量可靠性和测量精度明显提高。

**关键词:** 热电偶传感器; 液体火箭发动机试验; 温度测量

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2009) 03-0061-04

## Measurement technology of thermocouple sensor in the liquid rocket engine test

Xiao Peibin

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Thermocouple sensor has steady performance, simple structure, extensive measurement range. It is used extensively in liquid rocket engine ground experiment for its safe and cheap characteristics. Because of its low output signal, the measurement result of the thermocouple sensor is inaccurate or even without an measurement result if it is not used normally in the severe environment of engine experiment. This thesis aims at these problems in the measurement, discusses some key techniques and technical requirements so as to enhance the stability and precision of the thermocouple sensor purposely. Engineering practice shows that the reliability and precision has greatly improved.

**Key words:** thermocouple sensor; liquid rocket engine test; temperature measurement

收稿日期: 2008-11-11; 修回日期: 2009-05-22。

作者简介: 肖培斌 (1979—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验测控技术。

## 0 引言

随着液氧煤油发动机研制进度的深入,对测量系统的测量技术及测量精度都提出了更高要求。试车中决定开车条件的发动机入口温度、主管路温度、预冷回流温度等需要用热电偶传感器测量。根据测量结果计算液氧密度并计算液氧主管路、氧主容器的液氧质量流量。热电偶传感器使用是否得当直接关系到液氧流量的测量精度。

## 1 热电偶传感器的测量原理及型号

热电偶传感器测量温度的基本原理是热电效应。热电偶传感器就是将两种不同的金属材料在一端焊接得到的,焊接的一端叫测量端,未焊接的一端叫参考端,也叫冷端。冷端在使用时通常要求温度恒定,当测量端温度变化时,在接点处就有热电势产生。当测量端温度改变后,热电势也随之改变,并且温度和热电势之间有一固定的函数关系,利用这个关系就可以测量温度。

在试验中常用的热电偶传感器有:①镍铬-镍硅型:镍铬为正电极,镍硅为负电极,测温范围为 $-50^{\circ}\text{C}\sim 1300^{\circ}\text{C}$ ;②镍铬-康铜型:镍铬为正电极,康铜为负电极,测温范围为 $-50^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$ ;③铜-康铜型:铜为正电极,康铜为负电极,测温范围为 $-200^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。

热电偶传感器一般分为A、B、C三个精度等级,在发动机试验中多数都用精度等级较高的A级,A级热电偶传感器的测量精度为 $\pm 0.0075 \times |t| ^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 热电偶传感器温度测量技术

热电偶传感器在发动机试验中得到了广泛应用,如关键测点涡轮出、入口温度,发动机液氧入口温度以及容器内介质温度等参数测量中都使用了热电偶传感器。

### 2.1 测量电路

在试验中一般都采用单点温度测量,前端通

过测量传感器测量产生信号,信号通过插头和补偿导线,再通过主电缆进入采集系统,经过信号滤波、放大、SH、AD等过程,采集的数据通过软件处理后查分度表,获得对应物理量值。其测量原理如图1所示。

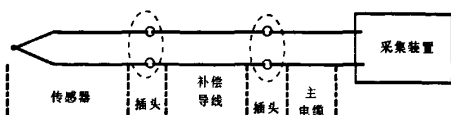


图1 热电偶传感器测量原理

Fig.1 Measurement principle of the thermocouple sensor

### 2.2 冷端补偿

#### 2.2.1 冷端温度补偿原理

由于各种热电偶传感器的分度关系是在冷端为 $0^{\circ}\text{C}$ 的情况下得到的,如果测温热电偶传感器的测量端温度为 $t^{\circ}\text{C}$ ,冷端不是 $0^{\circ}\text{C}$ 而是 $t_0^{\circ}\text{C}$ ,这时不能利用测到的 $E(t, t_0)$ 查分度表得到 $t$ ,而应该根据公式1进行修正:

$$E(t, 0) = E(t, t_0) + E(t_0, 0) \quad (1)$$

式中, $E(t, 0)$ 为冷端为 $0^{\circ}\text{C}$ 而热端为 $t^{\circ}\text{C}$ 时的热电势; $E(t, t_0)$ 为冷端为 $t_0^{\circ}\text{C}$ 而热端为 $t^{\circ}\text{C}$ 时的热电势; $E(t_0, 0)$ 为冷端为 $0^{\circ}\text{C}$ 时,热端为 $t_0^{\circ}\text{C}$ 时的热电势。

在试验室做试验一般都采用冷端为 $0^{\circ}\text{C}$ ,液体火箭发动机试车中,保持冷端为 $0^{\circ}\text{C}$ 的方法就是冷端设置恒温箱,在恒温箱中加冰水混合物,此方法虽然准确度高,但不便使用。运用冷端自动补偿技术后,可以实现冷端实时测量修正。测量冷端温度必须采用高精度的温度传感器,在试车中热电偶传感器的冷端一般为常温,采用铂电阻或AD592可以满足其测量精度要求。

运用热电偶冷端自动补偿测量的数据处理过程中,冷端测量温度 $t_0$ 查热电偶的分度表获得热电势 $E(t_0, 0)$ ,热电偶测量获得热电势 $E(t, t_0)$ 和冷端获得热电势 $E(t_0, 0)$ 相加就等于在冷端为 $0^{\circ}\text{C}$ 时热电偶测量 $t^{\circ}\text{C}$ 时所产生的热电势 $E(t, 0)$ ,再用 $E(t, 0)$ 查询热电偶分度表就可获得实际测量温度 $t$ 。

### 2.2.2 铂电阻补偿技术

铂电阻具有测量精度高、稳定性好、性能可靠等特点, 用做补偿的 A 级铂电阻的准确等级误差为  $\pm (0.15 + 0.002 |t|) ^\circ\text{C}$ , 冷端温度测量误差为  $0.2^\circ\text{C} \sim 0.1^\circ\text{C}$  左右, 满足热电偶温度测量精度的要求。

为进行冷端补偿, 需选用高精度的铂电阻, 采用四线制测量, 恒流源供电, 对热电偶传感器冷端温度进行实时采集测量。

### 2.2.3 AD592 补偿技术

AD592 温度传感器是固态双接线端集成电路, 输出与绝对温度成比例的电流信号, 输出电流是线性的, 比例系数为  $1\mu\text{A}/\text{K}$ 。其测温范围为  $-25^\circ\text{C} \sim 105^\circ\text{C}$ 。在 AD592 的测温范围内, 每高出  $1^\circ\text{C}$ , AD592 输出电流大于  $1\mu\text{A}$ 。在精确测量温度的应用中, 电流输出比电压输出更具优越性。另外, 电流源有很高的输入阻抗, 抗干扰能力很强, 并且电流信号可以在信号采集端很容易转换成电压信号, 电流源提供的信号也不受电缆长度的限制, 而且传感器的激励源与信号输出可以共用一对接线端, 所以只用两芯电缆就可以在常温范围内保持测量误差在  $0.2 \sim 0.4^\circ\text{C}$  以内。

AD592 温度补偿测量通道在 Pacific6000 的 6013 有专用测量通道, 测量原理如图 2 所示。

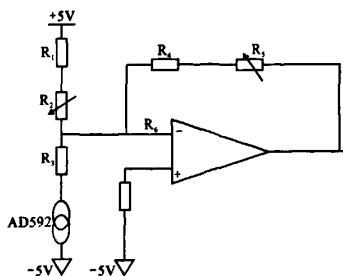


图 2 AD592 测量原理

Fig.2 Measurement principle of AD592

## 3 热电偶传感器应用工艺

### 3.1 传感器的制作工艺要求

#### 3.1.1 普通热电偶传感器

常用的热偶丝的直径为  $0.3 \sim 1\text{mm}$ , 传感器的

长度由使用要求和安装条件决定。热电偶传感器的测量端通常采用焊接方式。为了减少传热误差和滞后, 焊点尽量小, 焊点直径不要超过两倍热偶丝直径, 焊点表面应该圆滑、无玷污变质、夹渣和裂纹等。

#### 3.1.2 铠装热电偶传感器

铠装热电偶传感器的外径一般为  $8\text{mm}$  左右, 其长短可以根据实际使用情况而定; 在热试车中测量响应时间的要求比较高, 一般采用碰底型焊接, 将热电偶传感器的测量端和外层金属套管焊接在一起; 此时实际感温点就外套上, 提高了测量响应时间。如果还需要进一步提高响应时间, 可以采用露头型, 即在传感器铠装金属外套的头部留有介质进入孔, 让感温端直接暴露在测量介质中。

在传感器制作中特别要注意偶丝的极性, 做好后要进行极性检查; 用热风枪或电烙铁对感温端进行加热, 用高精度电压表测量其电压变化, 注意电压的变化方向和温度变化方向是否一致, 否则为极性接反。

### 3.2 传感器安装工艺

铠装温度传感器和热偶丝传感器有不同的安装工艺, 铠装热偶丝在安装时的力矩要适当, 保证气密性即可。对介质满流的管路, 铠装式传感器插入深度一般为管路直径的  $1/3 \sim 1/2$ 。传感器安装于管道下方或侧面时, 插入深度选择管道直径的  $1/4 \sim 1/3$  为宜。铠装插入式传感器考虑密封性能的同时, 应考虑流体冲击性、抗振性和耐腐蚀性, 确保试车介质最大流速条件下传感器不损坏。

热偶丝安装时, 被测点是常温钢质材料时, 用点焊机点焊, 被测点是低温和其它材料时用胶粘。点焊时, 如果将两热偶丝拧在一起点焊, 则测量的是该点壁温, 如果将两热偶丝分别点焊, 两点相距  $4 \sim 5\text{mm}$ , 则测量的是小区域表面温度。胶粘时, 用相应的低温胶和高温胶粘贴后外层再用  $2 \sim 5\text{mm}$  厚的毡片再粘一层, 目的是隔热, 减少热交换, 提高测量精度。热偶丝安装后, 应采取相应的固定措施, 防止碰撞掉落。胶粘传感器在常温下固化时间一般为 24 小时。如果在环境

温度较低的情况下,固化时间需要更长一些。在固化期间,应防止受力脱落。低温胶和高温胶配制时应严格按说明书的比例进行配制,并在规定时间内使用。

### 3.3 第二参考点的处理

为了方便传感器安装,常常在热偶丝和补偿导线之间采用插头对接。插头的金属插针的材料和传感器热偶丝的材料不一致,就会产生第二参考点。以前的热试车中,经常发生测量的液氧温度为 $-190^{\circ}\text{C}$ 以下,这种现象一般就是第二参考点现象造成的,主要原因是对接插头的插针与热偶丝对接点的温度和与补偿导线对接点温度不一致,也就是对接插头的两端受热不一致,温度发生变化,且温度变化量不一致造成的。为了避免第二参考点现象的出现,最简单的办法就是把对接插头进行绝热隔温包扎,在插头固定处尽量避开高温、低温管道,或者温度变化比较大的管道。

### 3.4 系统校验

最好的校验方式是现场校验,但是温度现场校验比较困难,主要是高精度的温度源很少,且使用繁琐,校验过程用时较长。由于采购的热电偶传感器都是经过计量部门鉴定合格,现在一般的系统校验是对采集系统的线性进行校验,通过加载两档标准的电压信号,采集计算后获得采集通道的斜率。

在系统校验选择标准时,尽量选择所关注温区对应的电压值进行加载,比如 T 型热电偶传感器在测量液氧温度时,关注温区在 $-183^{\circ}\text{C}$ 附近,所以就应该选择  $0\text{mV}$  和  $-5.5\text{mV}$  两档对系统进行校验。对于处在正负温区的测点,并且线性较差的系统,就需要进行分段校验,或对正温区和负温区进行分别校验后进行线性拟合获得系数。

## 4 关键测点的处理工艺要求

热电偶与铂电阻和热敏电阻相比,热电偶传感器的测量精度较低,在试车中关键点的测量上应该谨慎使用。关键点包括入口温度、发动机预冷回流温度等决定开车条件的测点。在主管路温度等计算密度的参数测量中应该采用多点测量,对测量的温度值进行平均,尽量减少由于传感器测量的不确定度对其测量精度的影响。

在液氧入口和主管路测温选用铠装热偶时,由于壳体存在一定的传热作用,会造成测点预冷缓慢或测量值偏高等现象,就需要对传感器的尾部(即管道外裸露部分)进行隔热包扎处理,尽量减少热传导,保证测量准确。

对选择好的低温传感器,在安装前应先进行低温浸泡试验,验证在大气压环境下测量的液氧温度。尽量选择测量的液氧温度接近 $-183^{\circ}\text{C}$ 的传感器进行低温关键点的测量,并进行低温增压试验,要求传感器在低温条件下所能承受的压力是试验环境下压力的 2~3 倍。

## 5 结束语

通过在试验中的不断总结,热电偶传感器测量工艺已经日渐成熟,在使用中只要注意制作安装、包扎等环节,热电偶传感器就可满足发动机试验的多测点和复杂环境的测量要求。

### 参考文献:

- [1] 赵万明. 液氧/煤油发动机试车主要参数测量方法[J]. 火箭推进, 2006, 32(5): 51-55+64.
- [2] 单成祥. 传感器原理与应用[M]. 国防工业出版社, 2006.

(编辑:王建喜)