

检测技术

低温推进剂火箭发动机温度测量技术

航天科技集团公司推进技术研究院一六五所 雷 震

文摘 由于某些低温液体已用作火箭发动机的高能推进剂, 故在发动机及其组合件的试验中不仅涉及中、高温温度测量, 而且还涉及到低温温度测量。为了保证低温测量数据的准确可靠, 必须从影响低温温度测量的几个关键环节入手, 采取技术措施以达到温度准确测量的目的。

主题词 液体火箭发动机 低温温度 测量技术

1 引言

在低温推进剂液体火箭发动机试验中, 温度是重要的测量参数, 温度测量数据是分析、判断发动机工作性能和试验系统可靠性的重要参数。在一次试验中, 将测量不同部位、不同要求的温度参数, 发动机上的一些测量数据能直接或间接反映发动机及组合件的工作性能, 如涡轮入口燃气温度、出口燃气温度、推进剂温度等; 有些测量数据是确定发动机能否点火试验的重要依据, 如发动机入口管道内的液体温度、低温液体泵壁温, 用于判断发动机低温系统的预冷程度是否符合要求, 如不满足要求, 一旦开车会使发动机产生气蚀现象, 甚至会爆炸。因此, 温度测量技术在液体火箭发动机试验中是很重要的。为了保证低温参数测量数据的准确可靠, 必须根据低温液体的特点, 在各测量的关键环节上采取特殊的技术措施和方法。

2 温度系统测量方法

对温度测量来说, 测量方法及测量系统的组成是决定测量精度的关键一环。不同的温度传感器其测温机理、测温精度各不相同。为了准确测

量不同的温度参数, 需根据不同工作条件和要求, 选择适用的传感器及测量方法来进行温度测量。

不论何种发动机试验, 只要使用传感器的类型相同, 其测量原理也相同。

2.1 热电偶温度测量系统

将两种不同的金属导体 A 和 B 组成闭合回路, 且两个接点温度不同时, 回路中将产生电动势, 这种现象称为热电效应或塞贝克效应。利用塞贝克效应制成的将温度信号转换为电信号的器件称为热电偶, 其测量原理见图 1。

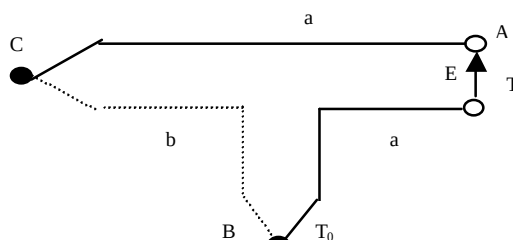


图 1 热电偶的测量原理

热电偶的输出信号为电动势, 典型输出电压为毫伏级, 因而对其输出信号进行采集时, 需进行放大处理。热电偶传感器测温系统原理框图, 见图 2。

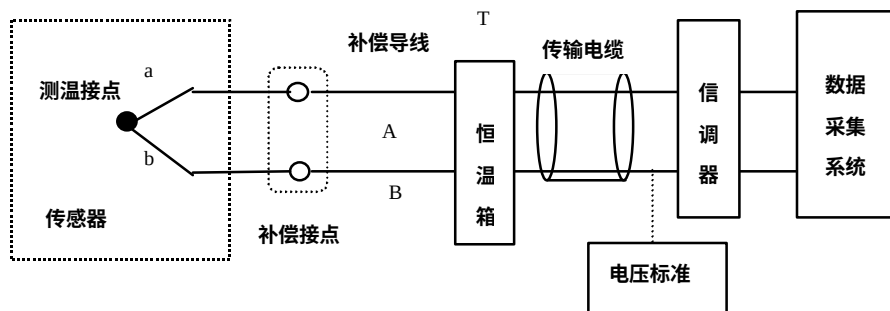


图 2 热电偶传感器测温系统原理框图

2.2 热敏电阻

热敏电阻按温度系数可分为负温度系数 (NTC) 和正温度系数 (PTC) 两大类, 其中 NTC 型热敏电阻用于温度测量, 它具有负的电阻温度系数, 即其电阻值随着温度的升高而减小。这是因为热敏电阻的导电性能主要是由其内部的载流子 (电子或空穴) 的密度和迁移率决定的。当温度升高时, 由于热激发, 将使载流子的密度大大增加, 从而导致 NTC 型热敏电阻的电阻值急剧下降。这种热性能就是热敏电阻能进行温度测量的机理。

在低温条件下, 热敏电阻本身电阻值很大 (几十千欧), 连接导线的电阻和接触电阻的影响极小, 可以忽略, 因而它适用于远距离测量。

热敏电阻阻值为温度的函数, 常通过电桥电路将电阻随温度的变化转换为电压信号的变化。由于热敏电阻具有较大的非线性特性, 一般需要线性化处理, 使输出电压与温度接近线性关系。热敏电阻线性化电路较多, 根据实际情况, 采用电桥来对热敏电阻进行线性化处理, 热敏电阻传感器测量原理图见图 3。

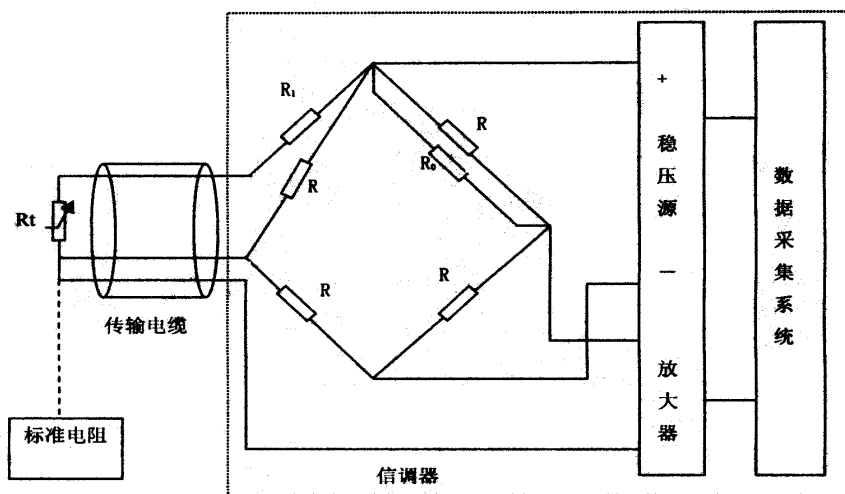


图 3 电桥变化法测量热敏电阻系统原理框图

R_1 —限流电阻, 精密绕线电阻, 精度为 0.01%; R_0 —电桥平衡电阻, 精密绕线电阻, 精度为 0.01%;
 R —桥臂电阻, 精密绕线电阻, 精度为 0.01%; R_t —热敏电阻。

3 温度传感器的选择与安装

在温度测量系统中, 选择传感器是关键环节, 它的种类、性能和使用方法直接关系到温度测量的准确性、稳定性和精确性。应根据测温区间、

测量精度的不同要求,选择不同的温度传感器。在低温推进剂火箭发动机试验中,低温测点遍布于低温推进剂贮箱、主管路、氧化剂泵入口、预冷回流出口、低温液体泵等部位。根据低温温度测量要求,一般选择铜—康铜热电偶和热敏电阻传感器用于不同测点处的温度测量。

3.1 铜—康铜热电偶传感器

铜—康铜热电偶传感器包括非铠装热电偶、铠装热电偶。非铠装热电偶传感器分为壁温传感器和温度靶。

低温推进剂发动机壁温传感器采用胶粘接安装工艺,便于发动机重复试验使用。安装壁温传感器,须先将热偶丝沿被测表面等温线敷设,再将其引离被侧面,以减少测量端的温度梯度;同时,为了降低热电偶自身导热的热量,提高低温温度测量精度,制作壁温传感器应尽量选用导热系数小、半径小的铜—康铜热电偶。

从下至上用于测量贮箱内低温液体、气体温度的一组铜—康铜热电偶传感器称为温度靶,它的测量数据不但可以了解贮箱内推进剂加注、泄出过程的温度变化和不同层面的气、液体温度,也可以推测出低温介质的加注量、剩余量。将温度靶安装于贮箱内部,传感器的输出线一般采用标准球头密封形式,因而需在相应的贮箱顶部焊接相配套的焊接接管嘴,温度靶的输出线口必须密封和绝热。

液体火箭发动机试车用铠装热电偶的设计、制造均采用标准联接形式,一般为 60° 或 37° 球头密封。安装铠装热电偶时,应考虑管路的内外径、传感器的插入深度以及焊接接管嘴的长度,根据上面的各因素确定传感器的长度和型号,使传感器的工作端处于管路的 $1/2 \sim 2/3$ 管道半径处。

3.2 热敏电阻

在发动机预冷过程中,要求测量并显示主管路、泵前管路及低温液体泵等部位的温度,这些温度变化范围很宽,从常温降至 -180°C 左右,不但涵盖了常温范围,也覆盖了低温范围,且主要是低温范围。使用铜—康铜热电偶传感器可以满

足全程观察温度变化的要求,但是在低温发动机试车中,对低温介质温度测量精度要求很高,尤其是对判定发动机能否开车的低温液体泵入口温度 ($-176 \sim -182^\circ\text{C}$)。铜—康铜热电偶传感器因测量精度、冷端补偿误差、分度误差、动态误差等因素的影响,不能精确地反映被测温度。为了反映推进剂真实温度和发动机预冷情况,应该选择测温精度高,安装在推进剂温区的热敏电阻传感器进行温度测量,以达到高精度测温的目的。因此,上述温度测点位置上需同时安装铜—康铜热电偶和热敏电阻两种温度传感器。

4 低温测量系统校准方法

测量原理不同的传感器,其校准及数据处理方法也各有差异,因而需要合理选择校准方法,以保证测量数据的准确性。

4.1 热电偶的校准

热电偶校准原理图见图 1。采用现场电量模拟温度电校的方法,即电源替代法,根据任务书要求温度测量范围,施加对应的电压标准。

校准时,断开热电偶传感器,先后施加 0mV 和标准电压信号 (mV),根据采集数据,计算出斜率 k ,见式 (1)。

$$k = \frac{E}{U_b - U_{0b}} \quad (1)$$

式中: E ——校准电标准值, mV ;

U_b ——加电标准时采集毫伏数, mV ;

U_{0b} ——加零位时采集毫伏数, mV 。

4.2 热敏电阻的校准

热敏电阻校准框图见图 3。

热敏电阻温度测量系统采用现场模拟温度量校准。因热敏电阻阻值随温度变化,电阻值是温度的函数,故模拟温度量为电阻。为了保证温度测量精度,电阻箱的精度比采集系统至少高一个数量级。

热敏电阻存在一致性较差的缺陷,因而每一只热敏电阻传感器须单独分度,具有不同的分度表。校准时应根据使用传感器的不同采用相应的

分度表。我们用分段校准的方法校准热敏电阻，即校准时，增加校准档位，采用现场根据热敏电阻分度表，按照其对应电阻值等间距施加标准，进行多档校准，形成新的 $mV-T$ 分度表。

4.3 浸泡法验证实验

低温推进剂的沸点与其承受的压力有关。当压力为 0.1MPa 时,此推进剂沸点温度为 $-183^{\circ}C$ 。试车台海拔 1172m, 当地大气压为 0.089MPa 左右。通过查美国 Table C-2 标准, 压力为 0.089MPa

时, 沸点温度为 $-184.1^{\circ}C$ 。以此为基准, 在试车台环境条件下, 将试车使用的铜—康铜热电偶和热敏电阻传感器同时浸入敞口的低温推进剂存贮容器内, 由采集系统进行采集、处理, 表 1 为传感器推进剂浸泡实验数据。将浸泡实验数据与基准温度进行对比, 将二者差值作为系统误差, 对热电偶传感器测量数据进行修正, 确保温度数据的准确可靠。

表 1 传感器推进剂浸泡实验数据

实验次数	传感器类型	校验、数据处理方法	测量温度值/ $^{\circ}C$
第一次	铜—康铜铠装热电偶	两点、查表	-183.1
	热敏电阻	多点、插值	-184.1
第二次	铜—康铜铠装热电偶	两点、查表	-182.7
	热敏电阻	多点、插值	-183.6
第三次	铜—康铜铠装热电偶	两点、查表	-183.0
	热敏电阻	多点、插值	-184.0

从表 1 的数据可以看出, 在同样的环境条件下, 热敏电阻传感器比铜—康铜热电偶传感器测量精度高, 反映了低温推进剂的真实温度。

5 数据处理方法

5.1 热电偶数据处理方法

在处理程序中, 事先输入分度表, 分度表的输入密集程度根据测量精度要求决定, 分度表输入越密集, 数据处理精度越高。

热电偶传感器测量数据用式 (2)、(3) 进行处理得出温度值。

$$U = k(U_s - U_0) + U_{ld}$$

(2)

$$T = T_i + (U - U_i) \frac{T_{i+1} - T_i}{U_{i+1} - U_i}$$

(3)

式中： U ——试车温度对应毫伏数, mV ;
 U_s ——试车实测温度电压毫伏数, mV ;
 U_0 ——试车零位毫伏数, mV ;
 U_{ld} ——冷端温度对应毫伏数, mV ;
 k ——校准斜率 ;
 T ——试车时温度值, $^{\circ}C$;
 T_i ——分度表中对应 T 的前一点温度值, $^{\circ}C$;

T_{i+1} ——分度表中对应 T 的后一点温度值, $^{\circ}C$;

U_i ——对应 T 的前一点毫伏数, mV ;

U_{i+1} ——对应 T 的后一点毫伏数, mV 。

热电偶温度测量是相对测量, 其参考端 (冷端) 电势对应于公式中的 U_{ld} , 当冷端温度为 $0^{\circ}C$ 时, 测量结果为试车温度对应电势值, 然而在实际工作中, 冷端温度一般在 $0.2^{\circ}C$ 以内, 其对应的电势很小, 对工作端测量温度影响很小, 通常不对其进行修正。

5.2 热敏电阻

根据多档校准形成新的 $mV-T$ 分度表, 用式 (3) 计算温度值。

6 结论

在低温推进剂液体火箭发动机试验时, 根据被测温度的变化范围正确选用温度传感器和测温系统, 正确安装传感器, 采取严密的校准方法和数据处理方法, 降低上述各环节对温度测量系统的影响, 不但可以保证温度测量系统的工作可靠, 确保数据的获得, 而且能确保测量数据的真实、可信。