

## 结合航天工程实际

# 谈改善和提高可靠性试验的有效性

中国运载火箭技术研究院一部高级工程师 胡经畲

**文摘** 本文介绍了温度传感器瞬态响应试验的方法、经验和典型结果,对环境应力筛选(ESS)和可靠性增长试验(RDGT)实施过程中所存在的问题,提出了改善和提高可靠性试验的有效方法。

**主题词** 可靠性增长试验 环境应力筛选 综合环境试验

### 一、温度传感器瞬态响应试验的回顾

众所周知,热传递涉及对流、传导和辐射三种机理。研究热传递的随机过程,离不开用温度传感器来“跟踪”这一变化,并随时反映出其数值,传感器“跟踪能力”的强弱,可以用瞬态响应特性来表征。

20世纪60年代初,为了分析和解释运载器遥测数据的异常现象,笔者曾对各种温度传感器的瞬态响应特性进行过较为深入的研究和试验。

#### 1. 容器温度传感器的工作原理

容器温度传感器是一种电阻式温度传感器,它是基于导体的电阻随温度改变这一特性而工作的,一般认为,金属的电阻值与温度呈线性关系。即

$$R_{\theta} = R_0 [1 + \alpha (\theta - \theta_0)] \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- $R_{\theta}$ ——某一温度下金属电阻值
- $R_0$ ——起始温度下金属电阻值
- $\alpha$ ——电阻丝的电阻温度系数
- $\theta, \theta_0$ ——分别与  $R_{\theta}, R_0$  相对应的温度值

#### 2. 容器温度传感器的瞬态响应特性

容器温度传感器就其瞬态响应特性而言,都是惯性元件。

##### (1) 瞬态响应特性的数学表达式

设热介质在 dt 时间内向传感器传递的热量为:

$$dQ = F \cdot \beta (\theta_c - \theta_{sp}) dt \dots\dots\dots (2)$$

该热量可用传感器的温度增量来表示:

$$dQ = C \cdot M \cdot d\theta_{sp} \dots\dots\dots (3)$$

将式(2)和式(3)相等,解方程得:

$$\theta_{sp} = \theta_c (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \dots\dots\dots (4)$$

其中:

$$\tau = C \cdot M / F \cdot \beta \dots\dots\dots (5)$$

式(2)、(3)、(4)中:

- $Q$ ——热流量
- $\beta$ ——对流换热系数
- $C$ ——传感器比热
- $M$ ——传感器质量
- $\theta_c$ ——热介质温度
- $\theta_{sp}$ ——传感器温度
- $F$ ——传感器与介质接触的表面积
- $\tau$ ——传感器的时间常数
- $t$ ——时间

##### (2) 对瞬态响应数字表达式(4)的讨论

从式(4)可以看出,传感器感温元件的温度将始终从小于  $\theta_c$  的方向去“跟踪”它,随着时间的增加,越趋向于  $\theta_c$ , 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $e^{-\frac{t}{\tau}} \rightarrow 0$ , 则  $\theta_{sp} = \theta_c$ 。

显然,这种“跟踪”能力的快慢将受  $\tau$  的影响,  $\tau$  值越小,“跟踪”速度就越大,当  $t = \tau$  时,

$$\theta_{np}/\theta_c = 1 - e^{-1} = 0.632 \dots \dots \dots (6)$$

$\tau$ 是传感器的时间常数,其定义为:当介质温度在某一瞬时变化 $\Delta\theta$ 时,传感器指示温度达到 $\Delta\theta$ 的0.632倍所需的时间。

与电路的瞬变过渡过程一样,要使传感器感受的温度达到被测介质的温度,  $(\theta_{np}/\theta_c)$  与  $t$  之间的关系如表1所示。

表1  $\theta_{np}/\theta_c$ 和  $t$  的关系

$t$	$\tau$	$2\tau$	$3\tau$	$4\tau$	$5\tau$
$\theta_{np}/\theta_c$	0.632	0.86	0.95	0.98	0.993

由表1可知,只有当 $t=5\tau$ 时,传感器的测量值才逼近真实值,由此而造成的测温误差将小于1%,其变化形式示于图1。

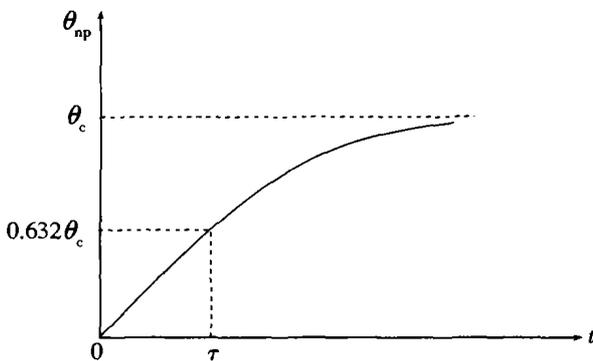


图1 阶跃函数作用下传感器瞬态响应图

(3) 瞬态响应特性的试验

①试验目的

通过试验,获得了容器温度传感器的热惯性,即当被测介质温度改变时,在热量瞬间传递给传感器的过程中,因敏感元件本身及其他构件具有的热容量而引起的热传递延迟时间。

②试验的假设

- a. 热源温度随时间的变化是阶跃函数;
- b. 热源容量相对于被测试件容量足够大;
- c. 容器温度传感器只考虑“对流”换热。

③试验方法与分析

a. 试验方法

用两个热源,将传感器从起始温度为 $\theta_0$ 的热源中迅速移入终止温度为 $\theta_c$ 的热源中,当传感器

由一种温度变化到另一种温度的90%以上时,测定所需的时间,即为在该热交换条件下的瞬态响应时间。

b. 试验线路

容器温度传感器的瞬态响应试验线路如图2所示。试验用的被测介质有空气、水和液氧。

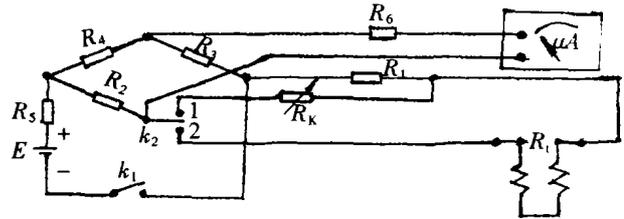


图2 容器温度传感器试验线路

图中:  $R_1=10\Omega$ ;  $R_2=97\Omega$ ;  $R_3=100.3\Omega$ ;  
 $R_4=100.3\Omega$ ;  $R_5=72.2\Omega$ ;  $R_6=3600\Omega$ ;  
 $R_k$ ——电阻箱;  $R_t$ ——传感器;  $E=5V$ ;  
 $K_1, K_2$ ——开关。

c. 试验结果与分析

其中CW2-2和CW2-3是测量舱段内空气温度的传感器,敏感元件无外壳包装,直接与被测介质接触;而CW3-2是测量液氧(或其蒸汽)温度的传感器,其敏感元件有外壳包装,不直接与被测介质接触。

从表2可知:

——用水作为热交换介质时,传感器瞬态响应所需的时间比用空气作为热交换介质时要小30倍左右,这是由于空气的热阻比水大所造成的。

表2 受试传感器试验结果数据

受试传感器型号	CW2-2		CW2-3		CW3-2	
	水	空气	水	空气	水	空气液氧
起始温度 $\theta_0$ (°C)	15.3	30	15.5	29	15.5	25.6
终止温度 $\theta_c$ (°C)	50	50	100	100	50	-183
试验次数 (次)	5	10	5	10	5	3
$\theta_m \geq (\theta_c - \theta_0) 90\%$ 以上所需时间 (S)	1.5	40	1.65	54	29.5	44

——同样用水作为热交换介质时,敏感元件有外壳包装的传感器比没有外壳外装的,其瞬态响应所需的时间要大20倍左右。这是因为有外壳包装敏感元件与被测介质是非直接接触,热交换过程中在热路上增加了热阻所致。

二、与 ESS 和 RDGT 中的温度循环试验之间

的联想

多年来可靠性增长试验(RDGT)和环境应力筛选(ESS)的工程实践告诉我们,现在很有必要去认真审视一下以往试验的有效程度,特别是温度循环试验这个项目。

按 QJ3127《航天产品可靠性增长试验指南》的规定,综合环境试验时的温度应力剖面应真实地模拟受试产品所经历的实际环境,它包括:

- ①起始温度(热浸、冷浸)和接通电源(预热)时间;
- ②工作温度(范围、变化速率及变化频率);
- ③每一任务剖面中的温度循环次数;
- ④冷却方式,冷却气流(速度和波动);
- ⑤热惯性及产品自身发热情况(特别是大型设备)。

就航天运载器而言,温度循环试验中工作温度范围和变化速率这两项指标值得关注。考虑到我国所处的地域广阔,在工程上一般要求温度范围为-35~+50℃,温变速率为5~10℃/min。

回顾过去多年在工程试验中的实例:曾做过高温(恒温)试验的某试件,在做模底试验的温度循环试验时,仍暴露出缺陷。经分析,这是由于恒定高温或低温的作用只能剔除出处于临界状态的隐患,如采用快变速率的温度循环,不但拉开了温度变化范围,而且因温度以较高的温变速率反复变化,使不同材料的结合部位在承受变化的热应力时,应力差变大,使隐患得以暴露,又通过多次循环产生热疲劳应力,从而加速了激发时效。该实例说明,单纯的高、低温试验是不能代替温循试验的,而温循试验时必须重视温变速率指标对试件作用的有效程度。这也是本文将要讨论和分析的内容之一。

必须指出,开展可靠性试验的初期,无论是可靠性增长试验,还是环境应力筛选,都采用设备级的整机做试验(注意:整机绝大多数是密封的)。工程实践表明,用整机做试验时存在着一定的弊端,对于ESS来说,整机筛选很难彻底暴露早期故障;对RDGT而言,整机试验实质上只是在进行随机振动、潮湿和恒温等条件下的综合环境试验。

这里可用如下两个实例来说明:

- ①按《电子产品环境应力筛选条件 BT-185》

和 QJ1149-87《电子产品高效应力筛选方法》中的《温度循环要求 QJ1149-2-87》,对遥测系统所属的46台电子设备进行温循试验,结果未发现任何故障,这与国外的筛选试验时温度循环试验的筛选效果最为明显的结论不一致。

②据有关资料记载,1990年,某遥测传输设备在靶场技术阵地发现多层印制板上的印制线有开路现象。经查,该设备曾按技术规范进行过高效率温度循环试验,那么多层印制板上的印制线开路的故障为什么在温循试验时未能暴露和剔除呢?

在设备级筛选采用整机(不打开外壳)进行温度循环试验时,整机外表面温度的确变化很大,可是在整机内腔印制板上的温度变化(用热电偶温度计测定)却不足0.5℃/min,远远小于要求的5~10℃/min。从效果看,实际上只对整机外表进行温循试验,而整机内部印制板上的元器件却是在进行恒定的高温或低温的筛选试验。因此,可以肯定地说,用整机(不去掉外壳)进行温循试验是很难暴露早期故障的。

分析上述情况,究其原因主要有三:一是设备级筛选时绝大多数为密封整机(试验时不开盖);二是受试设备的体积、重量均大于温度传感器,热容量较大;三是温度循环试验时主要是靠空气作为热交换介质,在缺乏对流的条件下,空气热阻大,热交换速度极慢,时间常数τ相对较大。

由于可靠性增长试验亦是采用整机(不打开外壳)参试的,因此,与ESS一样,温循试验中关于温变速率指标依然对整机内印制板上的元、器起不到预定的加应力作用。

三、改善和解决可靠性试验中现有问题的方法  
遵照提出问题、分析问题和解决问题的行为逻辑,针对上述情况,促使试验一线人员去研究一套符合航天工程实际、具有可操作性的能改善和提高可靠性试验有效性的工程方法。

1. 环境应力筛选

方法之一,ESS可以安排在“组或印制板”与“整机”两级分别进行。

有这样一组统计数据:在统计236台件试样遥测电子设备采用印制板进行温循筛选试验时,有26台件发生早期故障,占试验台件数的11.2%,占环境应力筛选总故障数的78.8%。

统计数据表明,采用印制板进行温循筛选试验

是有效的(但必须实实在在地解决好过程检测手段)。若采用整机筛选试验时,应尽量打开试件外壳,以提高温循筛选试验的有效性。

另一种可供选择的方法是:用组件或印制板只做温循筛选;整机级只做随机振动筛选试验。这可以使不同级别的组装等级各有侧重,同样可以达到环境应力筛选的目的。

## 2. 可靠性增长试验

目前,航天工程上普遍采用设备级进行可靠性增长试验。设备级试验的受试对象除了装有大功率(需启开散热窗口)管的遥测发射机外,几乎所有设备均为密封整机。面对如此似乎无法改变的客观现实,考虑到航天工程实际,可从两个方面来改善和提高可靠性增长试验的增长效果和有效程度。

(1) 可以通过增加较低级别结构层次(如元器件、单板等)的试验,促使在设备级进行有目标、有计划的试验——分析——改进(TAAF)之前设计更成熟,有助于提高增长的效果。

(2) 面对密封整机的可靠性增长试验,温循试验中的温变率 $5\sim 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,对试件腔内的元器件确实起不到实质性的作用,因而只能承认温循试验变为一定程度上的恒温试验。如果整机内腔温度变化以 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 计,那么,在增长试验的冬天半个试验循环时,从室温( $+20^{\circ}\text{C}$ )降至冬天温度( $-35^{\circ}\text{C}$ ),需要110分钟,才能使整机内部冷透;在增长试验的夏天半个试验循环时,温度由冬天

温度( $-35^{\circ}\text{C}$ )升至夏天温度( $+50^{\circ}\text{C}$ ),需要170分钟,才能使整机内部热透。若半个试验循环时间规定为4小时,那么除去冷透和热透所需的时间,则真正施加电应力的时间只剩下2.17小时(冬天)和1.17小时(夏天)。显然,试验中电应力的施加时间比理论计算值大约减少了一半,甚至还多。面对这一事实,应考虑从总试验时间和试验循环数上加以弥补、延长。

顺便指出,试验时一般不采用变温段(尽管腔内温变率很小),一开始就对受试产品施加电应力,这样可以避免因为加电所带来的对产品腔内温度冷透或热透的速度和效果。

那么,又怎样解决因降温或升温所占去的时间?原则上应全部补上。但是,在工程实施过程中,要充分考虑到同一试验箱内若干受试产品结构上各有差异,密封条件下完全一样,热容量亦不相同,故具体处理就比较灵活。根据实践经验,有两种可供选择的方法:

一是降温或升温1.5~2小时后开始施加电应力,遇到15~20个左右循环次数的可靠性增长试验,一般补加2~3个试验循环即可。

二是考虑到试验经费十分有限,为了节省试验经费和试验周期,可以采用降温或升温1小时后开始施加电应力,而毋需再补加试验循环次数。

航天工程实践中,采用第二种方法较为普遍,可供试验一线人员参考。

