

文章编号: 1000-6893(2003)04-0342-04

航天电连接器振动可靠性试验与分析

陈文华¹, 崔杰¹, 潘骏², 卢献彪³, 相平³

(1. 浙江大学 流体传动与控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

(2. 浙江科技学院 机电工程系, 浙江 杭州 310012)

(3. 中国航天科技集团九院八二五厂, 浙江 杭州 310015)

Reliability Test and Statistical Analysis of Electrical Connector under Vibration Stress

CHEN Weirhua¹, CUI Jie¹, PAN Jun², LU Xianniao³, XIANG Ping³

(1. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2. Zhejiang College of Science and Technology, Hangzhou 310012, China)

(3. Hangzhou Electrical Connector Factory, Hangzhou 310015, China)

摘要: 以 Y11X-2221 圆形电连接器为研究对象, 通过对电连接器进行失效物理分析、加速寿命试验和试验数据的统计处理, 求得了电连接器在随机振动应力作用下的可靠性参数估计值, 并对所建的振动可靠性统计模型进行了验证。

关键词: 电连接器; 振动可靠性; 统计分析

中图分类号: V442; V414.3⁺3 文献标识码: A

Abstract: The model Y11X-2221 electrical connector was taken as the object; under the action of random vibration stress, through the failure mechanism analysis, accelerated life test and data analysis, the estimated value of reliability character has been attained, and the correctness of the reliability statistical model has been verified.

Key words: electrical connector; vibration reliability; statistical analysis

作为航天用的电连接器, 在贮存和使用中都要遭受多种环境应力的影响, 鉴于环境温度和机械振动应力是影响机电元件可靠性的最大的环境因素^[1], 在研究了环境温度对电连接器可靠性的影响以后^[2], 有必要开展电连接器振动可靠性的研究, 以确定电连接器在环境振动应力作用下的可靠性水平, 并为电连接器在环境应力综合作用下的可靠性研究提供支持。本文以 Y11X-2221 型航天电连接器为研究对象, 通过产品失效机理的分析, 并根据电连接器的结构, 确定了电连接器的振动可靠性统计模型; 同时, 通过加速寿命试验, 测定了电连接器在振动应力下的可靠性水平。

1 电连接器在振动应力下的失效机理分析

电连接器由接触、绝缘、机械联接 3 部分组成, 其失效模式概括起来有接触、绝缘和机械联接 3 种失效形式, 现场使用和摸底试验表明, 主要失效形式为接触失效, 约占现场总失效数的 45.1%^[3]。

在振动应力作用下, 电连接器插针、插孔之间

会产生一定的相对运动, 由于插针、插孔的基体铜合金和表面镀金层具有相同的硬度, 以及接触压力的存在, 伴随着发生的是粘着摩擦。这种摩擦运动会产生粘着磨损, 使得材料转移并产生磨损碎屑; 并进一步导致镀金层的破损, 使得基体铜合金裸露, 裸露的基体金属因为失去金层的保护, 在摩擦热引起的高温的作用下迅速氧化, 从而产生一层电绝缘层。由于电连接器结构条件的限制, 在振动应力的作用下, 电连接器插孔和插针间的相对运动幅度很小, 仅有几个微米到几丝, 伴随着产生的摩擦腐蚀属于微动磨损。依据 Michael D Bryant^[4]的研究, 电连接器接触对在微动磨损作用下的退化模型如图 1 所示。当产生的腐蚀物碎片填满了接触处的低凹部分, 并使两接触表面分开约 20nm 时, 接触电阻急剧增大从而使电连接器失效。

2 电连接器在振动应力下的可靠性统计模型

如上所述, 电连接器在振动应力作用下的接触失效, 是由于微动磨损腐蚀物波谷填充和弹性变形层沾染腐蚀物造成接触电阻增大而引起的, 腐蚀物的生长速度, 除了取决于环境温度的高低以外, 还与振动应力的大小有关, 振动应力越大,

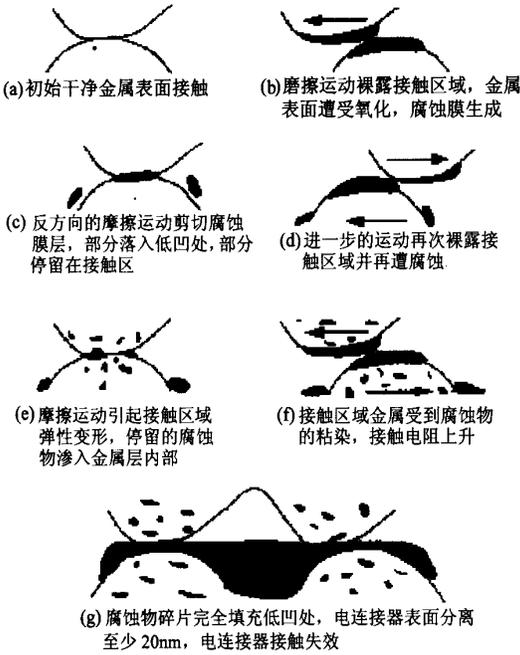


图 1 微动磨损退化模型

Fig. 1 The model for degradation due to contact

接触件的表面温升和裸露的基体金属表面也越大, 相应地, 氧化腐蚀物的生长速度也越快。按照质量作用定律和麦克斯韦-玻尔兹曼定律, 可得电连接器寿命与环境温度和振动应力的关系为^[5]

$$t = A S^{-\alpha} e^{\Delta E/kT}$$

式中: S 为振动应力; ΔE 为激活能(eV); k 为玻尔兹曼常数(0.8617×10^{-4} eV/K); T 为环境温度(K); A 和 α 为待定系数。

若环境温度 T 保持不变, 则上式可简化为

$$t = \beta S^{-\alpha} \quad (1)$$

式中: $\beta = A e^{\Delta E/kT}$ 。可见在振动应力作用下电连接器的失效物理方程满足逆幂率模型。

对于一个电连接器来讲, 它含有多对接触件, 例如 Y11X-2221 型圆形电连接器就有 21 对接触件, 2461 则有 61 对接触件。在振动应力作用下, 只要有一对接触件失效, 就会导致整个电连接器失效, 也就是说电连接器的接触寿命取决于它的接触对中接触电阻最大的接触对的寿命。因此, 从功能上看, 电连接器如同一个由一系列接触对组成的串联系统, 其寿命分布是一个最小极值问题。假定 n 对接触件中, 第 i 对接触件的寿命为 $T_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 每对接触件的寿命相互独立, 而且分布都为 $F_e(t)$, 则 $T_{(1)} = \min\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 的寿命分布即为电连接器的寿命分布, 其寿命分布函数为:

$$\Phi_{(1)}(t) = 1 - P(T_{(1)} > t) = 1 - [1 - F_e(t)]^n$$

为便于计算, 可用 $\Phi_{(1)}(t)$ 的渐近极小值分布, 即二参数威布尔分布代替严格的极小值分布来表示电连接器的失效寿命分布^[6], 其概率分布函数为

$$F(t) = 1 - \exp[-(t/\eta)^m] \quad (2)$$

式中: m 为形状参数; η 为尺度参数或特征寿命。

如上所述, 在振动应力作用下, 电连接器的寿命服从二参数 Weibull 分布, 而且与振动应力之间满足逆幂率方程。若在不同的振动应力作用下, 电连接器的失效机理保持不变, 则其可靠性统计模型为逆幂率-威布尔模型, 具体可表述为:

①产品寿命在统计上相互独立且服从二参数 Weibull 分布;

②在不同的振动应力水平时, Weibull 分布的形状参数 m 保持不变;

③产品特征寿命 η 与振动应力之间满足逆幂率方程, 即

$$\eta = \beta S^{-\alpha} \quad (3)$$

若令 $y = \ln t$, 则式(2)所示的威布尔分布就转化为极值分布, 其概率密度函数为

$$f(y) = \frac{1}{\sigma} e^{(y-\mu)/\sigma} e^{-\exp[(y-\mu)/\sigma]} \quad (4)$$

式中: $\mu = \ln \eta$; $\sigma = 1/m$ 。

这样, 上述的逆幂率-威布尔统计模型就转化为更具一般性的线性-极值统计模型, 具体为:

①产品寿命在统计上相互独立且服从极值分布;

②在各应力水平下, 产品寿命的分布参数 σ 保持不变;

③产品寿命的分布参数 μ 是应力 x 的线性函数, 即

$$\mu(x) = \gamma_0 + \gamma_1 x \quad (5)$$

式中: $\gamma_0 = \ln \beta$; $\gamma_1 = -\alpha$; $x = \ln S$ 。

3 振动可靠性加速寿命试验方案的确定

(1) 加速因子的确定 由于定频正弦振动, 仅使受试产品在一个或几个限定的频率上按规定的加速度振动, 如果产品缺陷不在振动频率点上就难以激发出来, 试验效果欠佳; 对于扫频正弦振动, 虽然其频率在给定频段内慢速变化, 能在每个谐振频率上持续激振一段时间, 使激发缺陷的能力有所加强, 但隐藏较深的缺陷仍不易暴露; 而随机振动能使所有谐振频率在整个振动时间内同时受到激励, 缺陷激发能力大大加强; 考虑到电连接

器在贮存、运输和工作环境中承受的多是随机振动,因此,为缩短试验时间、提高试验效果并切合工程实际情况,本试验采用随机振动作为试验应力进行加速寿命试验。

(2) 应力水平的确定 根据 GB2689-81“寿命试验和加速寿命试验方法”和 GJB1217-91“电连接器试验方法”中的振动试验条件 V 的规定,选择功率谱密度分别为 0.4、0.6 和 1.0g²/Hz 的 3 个振动应力水平对电连接器进行加速寿命试验。

(3) 试样的准备及失效判据的确定 为使试验结果具有一般性,现以在工程实际中用量较大且结构具有代表性的 Y11X-2221 圆形电连接器作为研究对象,共抽取 16 个试样,0.4、0.6 和 1.0g²/Hz 3 个应力水平下的试样数分别为 5 个、5 个和 6 个。试验时将试样的各对接触件以串联形式接在电源与负载之间,以方便瞬断的监测和接触电阻的测量。另外,为使试验结果能真实反映实际产品的可靠性水平,投试的样品须从例行试验合格的批次中随机抽取。

其次,为了判别试样在试验过程中是否失效,根据 GJB101A-97 的规定,确定其失效判据为:

- ① 一对接触件的接触电阻大于 3mΩ;
- ② 接触对出现大于 10μs 的瞬断。

电连接器在试验过程中,上述两种失效现象中一旦有一种现象发生,随即被判定为失效。

4 电连接器加速寿命试验数据的统计处理

按照上述试验方案,在各应力水平对 16 只 Y11X-2221 圆形电连接器进行加速寿命试验,所有试样均为因接触电阻超标(≥3mΩ^[7])而失效。经过对失效试样进行实体显微镜观察发现,接触件表面磨损严重,堆积有黑色氧化铜。由于接触电阻难以自动监测,因此本试验采用定时测试方法来判断试样是否失效。各应力水平的测试时间及各测试点的累积失效数如表 1 所示。

现取各测试区间的中点作为产品的失效时间,由中位秩公式 $F(t_j) = (j - 0.3)/(n + 0.4)$ 估算出产品的失效概率 $F(t_j)$,并将各振动应力水平下的数据 $[t_j, F(t_j)]$ 点画到同一张威布尔概率纸上(如图 2 所示)。由图中可以看出,在各振动应力水平下数据点的走势均为直线,而且数据点的走势大致平行,可以认为在各振动应力水平下电连接器的寿命均服从威布尔分布,且形状参数 m 保持不变。

表 1 各应力水平的测试时间及累积失效数

Table 1 Measurement time and cumulative failure number under different stress levels 时间单位:h

试验应力		试验应力		试验应力	
$S_1 = 0.4g^2/Hz$		$S_2 = 0.6g^2/Hz$		$S_3 = 1.0g^2/Hz$	
试样数 $n_1 = 5$		试样数 $n_2 = 5$		试样数 $n_3 = 6$	
测试时间	累积失效数	测试时间	累积失效数	测试时间	累积失效数
0	0	0	0	0	0
8	0	4	0	4	0
14	0	8	0	6	1
20	1	12	1	8	1
26	1	16	2	10	2
31	3	20	3	12	2
38	3	28	3	14	3
44	4	31	4	16	4
50	4	41	4	20	5
56	5	45	5	24	6

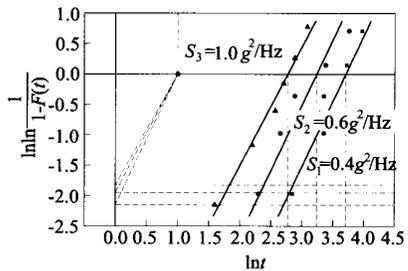


图 2 各应力水平下的威布尔分布直线

Fig. 2 Weibull distribution line under different stress levels

其次,用最小二乘估计求出各应力水平下电连接器的分布参数估计值 \hat{m}_i 和 $\hat{\eta}_i (i = 1, 2, 3)$,将数据 $(\ln S_i, \ln \hat{\eta}_i) (i = 1, 2, 3)$ 点画到对数坐标图上(如图 3 所示),由图中可以看出,数据点基本呈现为一条直线,因而可以认为满足逆幂律方程。

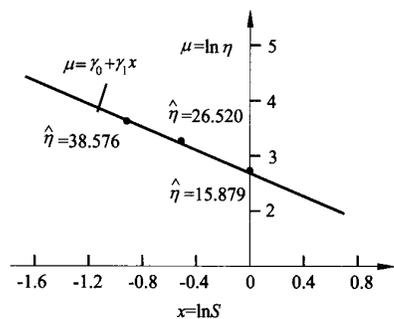


图 3 逆幂率直线方程

Fig. 3 Inverse power linear formula

最后,由于在定时测试情况下极大似然估计法具有较高的估计精度,故采用极大似然估计法对表 1 所示的失效数据进行统计处理,求得电连接器可靠性统计模型的参数估计值为

$$\gamma_0 = 2.7413, \gamma_1 = -0.9812, \sigma = 0.4001$$

在求得了模型参数的估计值以后, 即可求出各工作应力水平下电连接器可靠性特征估计值。

5 结 论

本文通过分析航天电连接器在振动应力作用下的接触失效机理, 确定了电连接器的接触寿命概率分布类型, 以及与振动应力间的数学关系; 并通过加速寿命试验数据的统计分析, 不仅验证了所建立的统计模型是合适的, 而且求出了电连接器振动应力作用下的可靠性特征估计值, 为振动环境下系统的可靠性设计和电连接器本身的可靠性增长奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] 何国伟. 可靠性试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
(He G W. Test technology of reliability [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.)
- [2] 陈文华. 航天电连接器可靠性试验和分析的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1997.
(Chen W H. Research on electrical connector reliability test and analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1997.)
- [3] 张菊华, 孔宪宝. 低频电连接器失效模式的分析[J]. 机电元件, 1989, 9(1): 36-43.
(Zhang J H, Kong X B. The analysis of failure patterns of low frequency electrical connectors [J]. Electromechanical Components, 1989, 9(1): 36-43.)
- [4] Bryant M D. Resistance buildup in electrical connectors due to fretting corrosion of rough surfaces [J]. IEEE Trans Reliab, 1994, 17(1): 86-95.
- [5] 潘骏. 航天电连接器振动可靠性建模与评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
(Pan J. Model and estimate of electrical connectors under vibration stress[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.)
- [6] 陈文华, 程耀东, 李平真, 等. 航天电连接器的可靠性数学模型[J]. 航空学报, 1997, 18(6): 732-734.
(Chen W H, Cheng Y D, Li P Z, et al. Reliability mathematics model of aerospace electrical connector [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1997, 18(6): 732-734.)
- [7] GJB101A-97, 耐环境快速分离小圆形电连接器总规范[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1997.

(GJB101A-97, General specification for environment resisting quick disconnect miniature circular electrical connectors [S]. Beijing: National Defence Science and Technology Industry Committee, 1997.)

作者简介:



陈文华(1963-) 男, 浙江杭州人, 浙江大学教授, 博士, 从事机械传动与机构、可靠性试验和设计研究。地址: 北京市朝阳区安贞西里三区 26 号浙江大厦 4010 室。邮编: 100029。电话: 010-64451310。E-mail: cherrwenhua@sohu.com



崔杰(1976-) 男, 江苏苏州人, 浙江大学在读硕士, 从事可靠性试验和设计研究。电话: 0571-87952849。E-mail: jackcui689@sohu.com



潘骏(1974-) 男, 江西南昌人, 浙江科技学院机电系助教, 硕士, 2002年毕业于浙江大学机械设计与理论专业, 现从事于可靠性设计、试验和统计分析的研究。电话: 0571-85124597。E-mail: panjunlh@sohu.com



卢献彪(1962-) 男, 浙江杭州人, 中国航天科技集团公司第九研究院八二五厂高级工程师, 学士, 从事质量管理工作。电话: 0571-88013117。E-mail: zjubj@sohu.com



相平(1960-) 男, 浙江杭州人, 中国航天科技集团公司第九研究院八二五厂高级工程师, 学士, 从事质量管理工作。电话: 0571-88013117。

(责任编辑: 李铁柏)