

电连接器腐蚀失效对信号传输的影响

李勇, 常天庆, 李坤

装甲兵工程学院控制工程系, 北京 100072

摘要 针对两栖装甲装备电连接器腐蚀失效导致的未发现故障(NFF)问题,从理论分析与电路仿真两个层面研究了腐蚀失效对信号传输的影响。分析了盐雾环境下电连接器的腐蚀失效机制,建立了腐蚀电连接器的电接触阻抗模型和电路模型,分析了腐蚀失效状态下的电路特性,通过对不同阻抗值下的电路仿真,得出了腐蚀失效对信号传输的影响规律。研究表明,电连接器腐蚀失效形成电接触阻抗,导致高频信号的传输产生失真。接触电阻的增加使信号波形幅度衰减甚至产生错误,而在一定范围内,接触电容的存在为高频信号提供通路,缓解了高频信号的失真。

关键词 电连接器;腐蚀失效机制;电接触阻抗;信号传输

中图分类号 TM501

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.25.008

Impact of Electrical Connector Corrosion Failure on Signal Transmission

LI Yong, CHANG Tianqing, LI Kun

Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China

Abstract In order to solve the problem of NFF (No-Faults-Found) caused by the electrical connector corrosion failure of an amphibious armored equipment, this paper studies the impact of the electrical connector corrosion failure on the signal transmission based on the principle analysis and the circuit simulation. The corrosion failure mechanism of the electrical connector in a salt spray environment is analyzed. The electrical contact impedance model and the circuit of the corrosive connector are established and the circuit characteristics in the corrosive failure state are analyzed. The impact of the corrosive failure on the signal transmission is studied by simulating the circuit with different impedance values. The results show that the electrical contact impedance formed by the corrosion failure of the electrical connector will lead to the transmission distortion of high frequency signals. The increase of the contact resistance reduces the amplitude of the signal wave and even completely distorts the signal. But in the limited scope, the presence of the contact capacitor provides a pathway for high frequency signals and reduces their distortion.

Keywords electrical connector; corrosion failure mechanism; electrical contact impedance; signal transmission

0 引言

新型两栖装甲装备由于工作在高温、高湿和高盐雾等环境,其腐蚀问题比较突出。目前对两栖装甲装备的腐蚀问题研究大多集中于车体部分,对装甲材料的腐蚀特性及防护措施已有了较为深入的研究^[1-2]。但对两栖装甲装备电子元(部)件因腐蚀引起的故障研究还不多见,其主要原因是电子元(部)件的腐蚀过程十分复杂,而且由腐蚀引起的故障通常属于未发现故障(No-Faults-Found, NFF),即在整个系统不能正

常工作时对每一模块进行检测都没有发现故障。对 NFF 问题的研究非常困难,其中由电连接器腐蚀造成的接触不良正是导致 NFF 的原因之一。

随着电连接器在航空、航天和军事领域的应用越来越广泛,关于电连接器失效机制及其影响的研究也引起了人们的重视。Parviainen 等^[3]通过盐雾试验研究了镀层对电连接器腐蚀失效的影响,得出不同镀层结构的电连接器具有不同耐腐蚀性能的结论,为电连接器的可靠性设计提供了依据。H.

收稿日期: 2012-05-04;修回日期: 2012-07-19

作者简介: 李勇, 博士研究生, 研究方向为装备智能故障诊断, 电子邮箱: liyong169@yahoo.cn; 常天庆(通信作者), 教授, 研究方向为装备维修保障及智能火控系统, 电子邮箱: changtianqing@263.net

Moffat 等^[4]研究了镀金-铜基电连接器在温度 30℃、浓度 10ppb H₂S、相对湿度 70% 时的腐蚀情况。腐蚀速率可以通过测量腐蚀点密度、腐蚀点大小分布及表面宏观电阻量化为时间的函数,建立一个通过微孔腐蚀的数学模型预测表面硫化铜的增长过程,进而得出接触电阻随腐蚀环境变化模型。北京邮电大学电接触教研室深入分析了多种环境对电接触的影响,通过试验方法研究了尘土等多种环境条件对电接触材料的影响^[5]。浙江大学主要通过加速寿命试验和统计分析方法研究了环境综合应力对航空电连接器可靠性的影响^[6]。以上研究主要围绕电连接器在各种环境中的失效机制展开,而较少见电连接器腐蚀失效对电路特性和信号传输影响的研究。

本文以两栖装甲装备电气电子设备中广泛使用的电连接器为对象,在分析其腐蚀失效机制的基础上,研究了电连接器的腐蚀失效对信号传输的影响。根据电连接器腐蚀失效机制建立了失效电连接器等效电接触阻抗模型。由电路理论分析了电接触阻抗对高频信号传输特性的影响,最后采用电路仿真方法,得出了电接触阻抗对信号传输的影响规律。

1 电连接器腐蚀失效机制分析

根据国家军用标准 GJB 3780—99《组合式电连接器及其零部件总规范》的规定,连接器基底材料通常为铜,而在接触件表面处理上则规定所有接触件应在镍底镀层上镀金。

由于金镀层在高可靠性电子领域中具有广泛的应用,因此与之相关的许多物理性能最终决定了连接器的使用寿命。这些性能包括表面性能、金属杂质、金属硬化剂、硬度、孔隙率、厚度、焊接性、黏接性、电阻、耐摩擦性和延展性等。其中孔隙率是影响电连接器耐腐蚀性最为关键的因素。本文主要分析这一因素影响下的腐蚀失效机制。

电接触中的孔隙率是指从微观角度观察到的金属暴露在环境中的程度,它被认为是电连接领域特别是金等贵金属电镀表面的主要失效机制之一^[7]。孔隙的实质是从中间镀层或基底金属到表面的孔洞。通常电连接器镀层的微孔类型有两种形式,一种是直接暴露中间的镀镍层,另一种是直接暴露底层的金属铜。孔隙腐蚀是指空气污染物或其他腐蚀介质和基底金属之间通过镀层表面的孔隙和其他薄弱环节发生的化学或电化学反应。相关研究^[8-10]表明,金镀层的孔隙率与镀层厚度呈反比关系,尤其是当金镀层厚度小于 1—2 μm 时,这种规律尤为明显;另外,金镀层的孔隙率依赖于底层金属的粗糙度、表面和底面的状况。孔隙率的增加不能完全归因于镀金层厚度的减少,大多数孔隙的起源都是由于底层金属表面本身存在的一些特殊区域造成的。

下面分析盐雾试验^[11]条件下电连接器腐蚀失效的机制。盐雾条件下孔隙腐蚀机制和模拟电路图如图 1 所示。这种反应会对电连接器电接触性能造成危害,这是由于它使镀层和基底金属间发生腐蚀反应,形成了绝缘膜和腐蚀产物,导致了接触不稳定、加速摩擦、接触电阻增加等现象,并最终导致

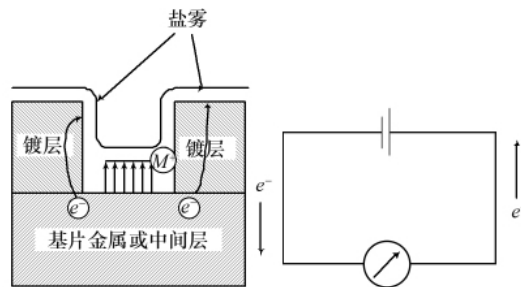
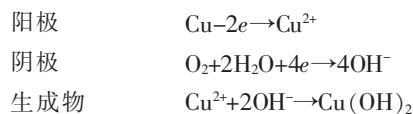


图 1 孔隙腐蚀机制及模拟电路

Fig. 1 Corrosion mechanism of pore and its simulation circuit

电连接器失效。恶劣环境下铜镀金表面通过微孔发生腐蚀反应而生成腐蚀斑。

在镀金电连接器盐雾试验中构成腐蚀原电池的机制具体如下:



Shintani^[12]依据美国军用标准 MIL-STD-202-101D 对磷青铜试样进行了盐雾试验,结果表明腐蚀产物为绿色的小山状凸起颗粒混合物,经进一步测定腐蚀产物为 CuCl₂ 和 Cu(OH)₂ 的混合物。

为了比较不同金属材料在不同腐蚀环境介质中的耐腐蚀性能,研究不同金属相互接触并处在同一腐蚀介质中的腐蚀行为,可以通过把各种金属在某一腐蚀介质中实际测得的腐蚀电位由低到高排列起来,从而得到一个电位顺序,叫做金属的腐蚀电位序或电偶序。不同金属耦合时其电位之差为腐蚀动力。

在盐雾介质中,电连接器所用金属材料的电位序为: Au> Ni>Cu^[13]。

在盐雾试验中,对于镀镍层微孔,镍首先发生腐蚀,由于镍镀层的厚度很薄,仅 2 μm 左右,腐蚀应力可以很快穿透镍镀层,然后开始腐蚀基底金属铜,由于铜是电位最负的,其腐蚀动力和速率都要比镍的强很多。所以,最后在金的表面会发现占绝大多数的铜化合物。对于铜暴露的微孔形式,主要是铜的腐蚀物,根据腐蚀电位序可知,通过微孔,金和铜的腐蚀原电池很快形成,从而加快了腐蚀的进程。

2 电连接器的接触阻抗模型

2.1 接触电阻

当两个微观粗糙面相接触时,其接触面并非整个视在表面,而是各表面凸起之间斑点的接触。由电接触理论可知,通过接触斑点电流线收缩,使电阻增加,这个增加的电阻定义为收缩电阻。接触表面上的污染膜也增加了接触斑点的电阻,这个由污染膜产生的附加电阻称为膜层电阻。由收缩电阻、膜层电阻引起的总电阻称为接触电阻。

2.2 接触电容

由于电接触表面的粗糙不平,实际接触面积要远小于视在接触面积。在高频应用中,电流除了经过金属接触进行传导,还会有经过腐蚀产物及非接触区的位移电流。如果接触面由于腐蚀严重,完全被腐蚀物所隔开,那么整个接触区即可看作一个电容器,而不会像完全断开一样无法传导电流。

2.3 接触电感

在高频时,电接触点的存在导致电流收缩等效应也将导致该电路电感的变化。特别是电接触表面突出的接触斑点,虽然很短,但是在频率很高时可能会有感性作用,即相当于在该处存在一小电感,从而当高速信号通过时瞬间感应出高压导致微区放电,或与电接触一起导致局部谐振,从而成为电路的干扰源。文献[14]指出,接触电感是由电接触故障而延长的那部分电流路径所产生的。

2.4 电接触阻抗

在高频应用中,仅仅考虑接触电阻是不够的。由于非导电面积要比导电面积大得多,并且两接触对间的平均距离非常小,再加上腐蚀产物将两接触对完全隔开,那么中间含有腐蚀产物的接触对就构成了真正的电容器。所以在高频应用中,由于分布电容的存在,不仅有流经金属接触的传导电流,还有流经非金属接触区或腐蚀产物膜层的位移电流。在考虑接触电容的同时还要考虑到由电接触的存在所导致电路额外增加的电感。构成接触阻抗的接触电阻、接触电感、接触电容之间的连接关系取决于具体的电接触尺寸、结构和几何形状等因素,考虑到电接触导致电路电感的变化(特别是在频率不是很高的情况下)非常小,因此接触电感通常可以忽略。而接触电阻和接触电容很明显为并联关系。因此,在高频电路中,电连接器的等效电路就为接触电阻和接触电容的并联,如图2所示。

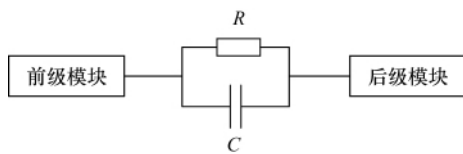


图2 电接触阻抗模型

Fig. 2 Model of electrical contact impedance

3 电接触腐蚀失效对信号传输影响的理论分析

在高频应用中可以把传输高速信号的电缆看作分布参数元件。而连接器由于其尺寸较小,可将其看作集总参数元件。所以在分析电接触故障时,可以把电连接器所连电缆看作均匀传输线。

因为电连接器所连接电缆上的电压、电流不但与时间有关,还与距连接器的距离有关。因此,可以假设电缆1上的电压、电流分别为: $u_1=u_1(x,t)$, $i_1=i_1(x,t)$;电缆2上的电压、电流分别为: $u_2=u_2(x,t)$, $i_2=i_2(x,t)$ 。如图3所示。

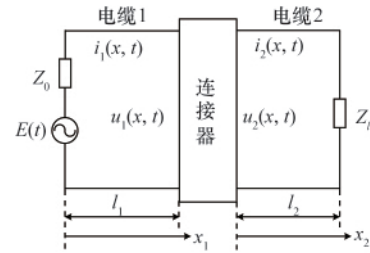


图3 连接器与电缆连接的等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit between connector and cables

根据传输线理论可以得到以下方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} = -Ri - L \frac{\partial i}{\partial t} \\ \frac{\partial i}{\partial x} = -Gu - C \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 为电缆长度, u 为电压, i 为电流, R 为电阻, L 为电感, G 为电导, C 为电容。

假设电缆1,2的长度分别为 l_1 和 l_2 ,则有边界条件:

$$(u_1 + i_1 Z_0) \Big|_{x=0} = E(t) \quad (2)$$

$$(u_2 - i_2 Z_l) \Big|_{x=l_2} = 0 \quad (3)$$

式中, Z_0 为信号源内阻, Z_l 为负载阻抗, $E(t)$ 为输入信号源的电压。

根据图2的电连接器接触阻抗模型,信号经过电连接器时,其连续性条件为

$$\begin{bmatrix} u_2(0,t) \\ i_2(0,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(l_1,t) \\ i_1(l_1,t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, B_{ij} 为取决于电接触等效网络中电参数的常数。

由于接触点尺寸相对较小,可将其视为集总参数元件,则连续性条件为

$$i_1 \Big|_{x=l_1} = i_2 \Big|_{x=0} \quad (5)$$

$$u_1 \Big|_{x=l_1} = R_j i_R + u_2 \Big|_{x=0} \quad (6)$$

其中, i_R 为流过接触电阻的电流。

设流过接触电容的电流为 i_C ,则有

$$R_j i_R = \frac{1}{C_j} \int i_C dt \quad (7)$$

$$i_R + i_C = i_1 \Big|_{x=l_1} = i_2 \Big|_{x=0} \quad (8)$$

对于初始条件,假设所有初始条件都为0,即

$$u_1 \Big|_{t=0} = u_2 \Big|_{t=0} = 0 \quad (9)$$

$$i_1 \Big|_{t=0} = i_2 \Big|_{t=0} = 0 \quad (10)$$

由于本文重点研究电连接器腐蚀失效对信号传输的影响,因此关注的对象是电连接器输出端的电路参数变化,即求解 $u_2(l,t)$ 。根据初始条件,对方程组(1)进行拉普拉斯变换并求解可得线2上的电压:

$$U_2(l,s) = \frac{E(s)e^{-\gamma l}}{2 + \frac{R_l}{Z_c(sC_j R_j + 1)}} \quad (11)$$

因为传输无损耗,则 $\gamma = s\sqrt{LC}$, $Z_c = \sqrt{L/C}$ 。负载阻抗为纯阻

性,将 $\gamma=s\sqrt{LC}$ 、 $Z_c=\sqrt{L/C}$ 代入式(11)可得:

$$U_2(l,s) = \frac{E(s)e^{-2\gamma l}}{\frac{R_l}{Z_c(sC_jR_j+1)}+2} = E(s)e^{-2ls\sqrt{LC}} \frac{sC_jR_lZ_c+Z_c}{R_j+2sC_jR_lZ_c+2Z_c} \quad (12)$$

取反变换可得:

$$u_2(l,t) = \frac{1}{2}(A'+Be^{-A(t-2l\sqrt{LC})})E(t-2l\sqrt{LC}) \quad (13)$$

其中,

$$\begin{cases} A=(R_j+2Z_c)/(2C_jR_lZ_c) \\ A'=2Z_c/(R_j+2Z_c) \\ B=R_l/(R_j+2Z_c) \end{cases} \quad (14)$$

4 电接触腐蚀失效对信号传输影响的仿真分析

为突出电接触对信号传输的影响,同时为方便仿真研究,假定如下:

(1) 信号源内阻、终端负载阻抗和两段传输线的特性阻抗相等,都为 50Ω (在通信中使用的同轴电缆的特性阻抗一般为 $40-100\Omega$,在此取 50Ω),即阻抗匹配,不存在反射波;

(2) 假定电缆为理想均匀无损耗传输线,其特性阻抗为 50Ω ,传输延时为 1ps ;

(3) 在此设置仿真信号源为方波,研究电接触腐蚀故障对方波的影响。

仿真电路如图 4 所示。

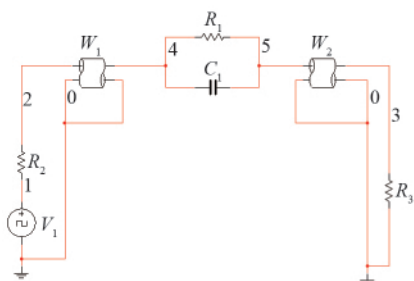


图 4 仿真电路
Fig. 4 Simulation circuit

在图 4 中, R_1 、 C_1 分别为接触电阻和接触电容, R_2 为信号源等效内阻, R_3 为传输线终端负载阻抗, W_1 和 W_2 分别表示电缆 1 和电缆 2, 在电路中将其等效为均匀无损耗传输线, V_1 为仿真信号源。设置信号源 V_1 为频率为 1MHz 、幅值为 2V 的方波。为了更好地研究电连接器的接触阻抗对信号传输的影响,采用控制单变量结合参数扫描的方法分别研究接触电阻和接触电容对信号传输的影响。

(1) 电接触理想的情况下信号的传输特性

电接触理想,即 $R_1 \rightarrow 0, C_1 \rightarrow 0$ 。分析在此条件下信号的传输情况,仿真波形如图 5 所示。

在电接触理想的情况下,负载两端的电压为

$$u_2(l,t) = \frac{1}{2}E(t-2l\sqrt{LC}) \quad (15)$$

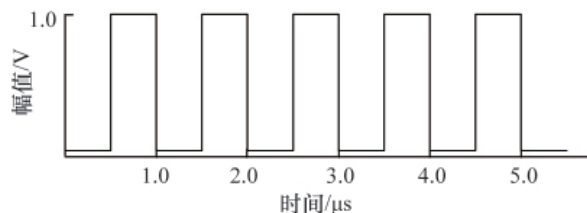


图 5 理想情况下输出端信号波形
Fig. 5 Output wave under ideal condition

电压幅值是信号源电压幅值的 $1/2$,有一定的时间延迟。从图 5 的仿真结果可以看出,理想情况下负载上的电压为 1V ,恰好为信号源电压 2V 的 $1/2$,仿真结果与理论分析结果一致。

(2) 接触电阻和接触电容同时存在时的信号传输特性

设置信号源频率为 1MHz ,采用控制单变量方法,即取定一个变量值,然后对另一个变量进行参数扫描分析。为了更好地模拟电接触的接触阻抗对信号传输的影响规律,根据前面分析可知,当接触电阻的阻值为特性阻抗的 2 倍时,负载接收的信号幅度为理想情况下信号幅度的 $1/2$,为信号发生传输错误的临界值。因为特性阻抗为 50Ω ,所以当接触电阻和接触电容的并联得到的总阻抗不小于 100Ω 时,就可以很好地模拟出电接触阻抗对信号传输的影响规律。于是有

$$\frac{1}{j\omega C_j} // R_j \geq 100 \quad (16)$$

当取接触电阻 R_j 和接触电容 C_j 之和为最小值的情况下,有 $R_j \geq 200\Omega, C_j \leq 1/200j\omega$,即 $C_j \leq 1/400j\pi f$ 。则当 R_j 取最小值 200Ω ,在信号源频率为 1MHz 时 C_j 取最大,约为 800pF 。

首先,确定 $R_j=200\Omega$,对电容值取 $100\text{pF}, 1\text{nF}, 10\text{nF}, 100\text{nF}, 1\mu\text{F}$ 进行参数扫描分析,得到仿真结果如图 6 所示。

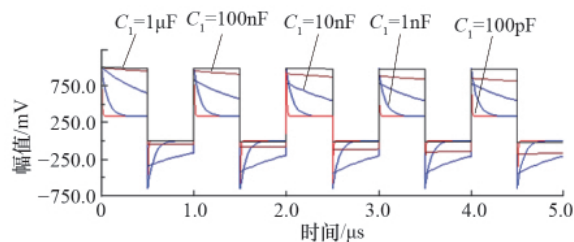


图 6 接触电阻为 200Ω 时的接触电容参数扫描结果
Fig. 6 Scan results of contact capacitor when the contact resistance is 200Ω

然后,确定 $C_j=800\text{pF}$,对电阻值从 $1-10\text{k}\Omega$ 进行参数扫描,得到仿真结果如图 7 所示。

由图 6 可以看出,当接触电容值很小时,负载所接收的信号幅度基本取决于接触电阻值,接触电容可以在一定程度上缓解由于接触电阻所导致的信号幅度的衰减,特别是对于较大的接触电容值更是如此。当接触电容值达到 $1\mu\text{F}$ 的时

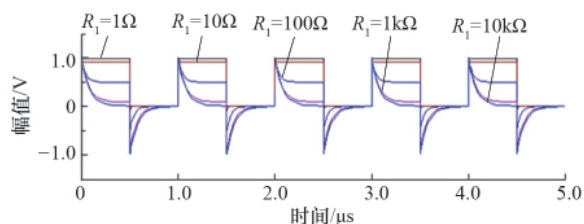


图7 接触电容为800pF时的接触电阻参数扫描结果
Fig. 7 Scan results of contact resistance when the contact capacitor is 800pF

候,负载所接收到的信号波形基本无衰减。但在实际情况中,电连接器由于腐蚀所导致的电接触故障,其接触电容通常较小,一般是在pF数量级。因此,在实际情况下,接触电阻对信号的影响作用更大,图7清楚地说明了这一点。经过上述分析可知,电接触故障对信号传输的影响主要取决于接触电阻和接触电容的并联阻抗。虽然实际情况下接触电阻值往往对信号传输的影响更大,但可以通过提高信号传输频率来减弱电接触阻抗对它的影响。

5 结论

本文建立了电连接器腐蚀失效状态下的电接触阻抗模型,通过理论分析和电路仿真的方法得出了电接触腐蚀失效对信号传输的影响规律,结果如下。

(1) 电连接器对信号传输的影响主要取决于电连接器的等效接触阻抗,即接触电阻和接触电容的并联阻抗。

(2) 接触电阻的存在会严重影响信号波形幅度。当接触电阻增加到一定值时,信号波形幅度会衰减直至产生错误。

(3) 在一定范围内,接触电容的存在可为高频信号提供通路,可缓解高频信号的失真。

参考文献 (References)

- [1] 罗九林, 张其勇, 郭金茂, 等. 两栖装甲装备腐蚀规律探讨 [J]. 车辆与动力技术, 2005(1): 52-57.
Luo Jiulin, Zhang Qiyong, Guo Jinmao, et al. *Vehicle & Power Technology*, 2005(1): 52-57.
- [2] 罗九林, 董原生, 郭金茂, 等. 两栖装甲装备腐蚀控制探讨 [J]. 车辆与动力技术, 2006(3): 55-59.
Luo Jiulin, Dong Yuansheng, Guo Jinmao, et al. *Vehicle & Power*

Technology, 2006(3): 55-59.

- [3] Parviainen A, Perala J, Frisk L, et al. Connector reliability testing using salt spray [C]. Microelectronics and Packaging Conference, Rimini, Italy, June 15-18, 2009.
- [4] Moffat H, Sun A, Enos D, et al. Modeling pore corrosion in normally open gold-plated copper connectors[R]. SAND2008-5737, Albuquerque, NM: Sandia National Laboratory, 2008.
- [5] 尹泉, 许良军, 孔志刚. 尘土颗粒对触点材料电接触性能的影响[J]. 机电产品开发与创新, 2010, 23(1): 1-3.
Yin Quan, Xu Liangjun, Kong Zhigang. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2010, 23(1): 1-3.
- [6] 钱萍. 航天电连接器综合应力加速寿命试验与统计分析的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
Qian Ping. Research on multiple stresses accelerated life test and statistical analysis of aerospace electrical connector [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [7] Braunovic M, Konchits V, Myshkin N. 电接触理论、应用与技术[M]. 许良军, 芦娜, 林雪燕, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2010.
Braunovic M, Konchits V, Myshkin N. *Electrical contacts fundamentals, applications and technology* [M]. Xu Liangjun, Lu Na, Lin Xueyan, et al tran. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [8] Abbott W H. The role of electroplates in contact reliability[C]. 48th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Orlando, FL, USA, October 21-23, 2002: 163-164.
- [9] Zhang J-G, Zhou K-D, Du C-Z. The porosity of gold plating by dust contamination [C]. 34th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, San Francisco, CA, USA, September 26-29, 1988: 301-309.
- [10] Antler M, Garte S M, Krumbein S J. Recent studies of the contact properties of gold plate [C]/Proceedings of 13th Holm Seminar on Electrical Contacts. Chicago, IL: Illinois Institute of Technology, 1997: 79-92.
- [11] 唐毅, 宋爱民. 盐雾试验条件对试验结果的影响 [J]. 微电子学, 2009, 39(2): 289-292.
Tang Yi, Song Aiming. *Microelectronics*, 2009, 39(2): 289-292.
- [12] Shintani T. Corrosion mechanism analysis of salt spray test and sulfur dioxide test on gold plated connector contact [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 1998, E81-C(3): 356-361.
- [13] Mroczkowski R S. Electronic connector handbook [M]. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [14] 朱剑, 高锦春, 黎淑兰. 同轴插接器高频接触阻抗有限元分析 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 65-69.
Zhu Jian, Gao Jinchun, Li Shulan. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(12): 65-69.

(责任编辑 朱宇)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。