

航空航天装备

航空电连接器腐蚀退化仿真研究

杜一江, 郁大照, 刘琦

(海军航空大学 航空基础学院, 山东 烟台 264001)

摘要: **目的** 探索当航空电连接器腐蚀退化时, 其接触阻抗的变化规律, 研究航空电连接器腐蚀退化对信号传输的影响规律。**方法** 首先对航空电连接器腐蚀退化的机理进行研究, 建立其等效电路模型, 然后分别对低频电连接器和射频电连接器进行仿真研究, 提取阻抗参数, 分析腐蚀退化对信号传输的影响规律。**结果** 接触电阻随着腐蚀程度的加深明显增大, 接触电感随着腐蚀程度的加深变化不大, 接触电容随着接触面腐蚀面积的增大而增大, 随接触面间腐蚀厚度的增加而减小。接触电阻随频率的增加而增大, 接触电感和接触电容随频率的增大基本保持不变。接触阻抗在低频时呈现感性特征, 高频时呈现容性特征, 阻抗幅值随频率的增加先增大、后减小, 峰值出现在感性和容性转换频率处, 腐蚀退化将使该转换频率减小。**结论** 对于低频信号, 腐蚀退化将导致信号的衰减和延迟; 对于高频信号, 在转换频率处, 信号的回波损耗、插入损耗和电压驻波比出现极值。

关键词: 电连接器; 腐蚀退化; 等效电路; 阻抗参数; 信号传输; 仿真

中图分类号: V271.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)12-0116-12

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.12.015

Simulation Research on Corrosion Degradation of Avionics Connectors

DU Yi-jiang, YU Da-zhao, LIU Qi

(School of Basic Sciences for Aviation, Naval Aviation University, Shandong Yantai 264001, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the changes in contact impedance of avionics connectors when they undergo corrosion degradation, and to study the impact of corrosion degradation on signal transmission of avionics connectors. This article first studied the mechanism of corrosion degradation of avionics connectors, established their equivalent circuit models, and then conducted simulation studies on low-frequency and RF electrical connectors, extracted impedance parameters, and analyzed the impact of corrosion degradation on signal transmission. The simulation results showed that the contact resistance increased obviously with the increase of the corrosion degree, while the contact inductance changed little. The contact capacitance increased with the increase of the corrosion area of the contact surface, and decreased with the increase of the corrosion thickness between the contact surfaces. The contact resistance increased with the increase of frequency, and the contact inductance and contact capacitance remained basically unchanged with the increase of frequency. The contact impedance presented inductive characteristics at low frequency and capacitive characteristics at high frequency. The impedance amplitude first increased and then decreased with the increase of frequency, and the peak appeared at the inductive and capacitive conversion frequency, which

收稿日期: 2023-08-22; 修订日期: 2023-10-10

Received: 2023-08-22; Revised: 2023-10-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51345790)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51345790)

引文格式: 杜一江, 郁大照, 刘琦. 航空电连接器腐蚀退化仿真研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(12): 116-127.

DU Yi-jiang, YU Da-zhao, LIU Qi. Simulation Research on Corrosion Degradation of Avionics Connectors[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(12): 116-127.

would be reduced by the corrosion degradation. For low-frequency signals, corrosion degradation will lead to signal attenuation and delay. For high-frequency signals, extreme values of return loss, insertion loss and VSWR will appear at the conversion frequency.

KEY WORDS: electrical connector; corrosion degradation; equivalent circuit; impedance parameters; signal transmission; simulation

电连接器也被称为接插件,是电子电路中重要的基础器件,用于实现信号的传输、控制以及设备之间的电子连接。电连接器在现代多电飞机和全电飞机上广泛使用,据统计,空客 A380 客机的电气互联系统中,电连接器的数量超过了 10 000 个^[1-2]。飞机上的电连接器在使用过程中容易受到振动、高温、高湿、高盐的影响,从而导致腐蚀退化。目前,航空电连接器腐蚀退化问题已成为影响飞机可靠性的薄弱环节,受到越来越多的重视。

对于航空电连接器腐蚀退化的研究,国外研究较早,而且主要集中于接触电阻对电连接器的性能影响方面。文献[3-5]通过多尺度粗糙度模型研究了实际接触面积和接触电阻之间的关系。Konto 等^[6]和 Yudate 等^[7]研究了金属表面氧化膜对接触电阻的影响,电连接器在腐蚀退化的过程中会有氧化膜覆盖在金属表面。研究表明,当氧化膜发生断裂时,可使接触电阻突降,该研究在一定程度上揭示了氧化物对腐蚀退化的影响。文献[8]研究了表面腐蚀对接触电阻的影响,结果表明,随着腐蚀物的产生和累积,导电斑点半径减小,接触电阻增大,并给出了接触电阻时变曲线。Meyyappan 等^[9]对连接器在腐蚀性环境中频繁插拔后接触电阻的变化情况进行了研究。Martens 等^[10]、Sun 等^[11]、Meyyappan 等^[12]、Reid 等^[13]建立了以铜为基底,镍为中间镀层,金为外面镀层的接触系统,并分析了其在腐蚀环境中的微孔腐蚀机理。

在国内电接触领域的研究中,电连接器领域的专家杨奋为^[14-15]对航空电连接器的失效模式和失效机理进行了研究,并制定了连接器电接触可靠性的设计准则。Sun 等^[16-17]分析了不同腐蚀退化情况和不同传输频率下的输出波形,研究了同轴连接器的腐蚀退化对误码率的影响。Zhu 等^[18]通过研究隧道电流的生成发现,同轴连接器表面的腐蚀膜层使信号通过接触点时产生非线性变化,并且认为对于大功率信号传输而言,虽然其腐蚀膜层很容易被击穿,但其非线性效应不能忽略。文献[19-20]指明我国电连接器的电接触失效主要是由于环境和微动磨损引起,并且研究了尘土对电接触性能的影响。樊军伟^[21]通过实验发现,二氧化硫气体腐蚀斑点和硝酸蒸汽腐蚀斑点的腐蚀产物膜层的介电常数和电阻率不同,接触电阻和腐蚀物的电阻率相关,接触电容与膜层的介电常数有关。结果表明,相对于二氧化硫气体来说,硝酸蒸汽对触点的阻抗影响更大。Ji 等^[22]和 Jin 等^[23]根据传输线理论,

建立了退化电连接器的等效模型,分析了其传输性能。通过研究发现,电连接器故障会导致输出波形失真。李庆娅等^[24-25]采用电路仿真模拟和理论建模相结合的方法研究了电连接器退化对模拟调制信号在时域波形、相位方面的影响,并用通过加速试验获得的退化电连接器样本进行了测试,深入剖析了接触退化对信号传输的影响规律。

综上所述,国内外对于电连接器腐蚀退化的分析研究已有较多成果,但是对电连接器电接触失效模式和机理的分析多是定性研究,少有结合实验和模型的定量研究。此外,在电连接器失效机理的深层次理论和实验分析上较为欠缺,不同失效模式下电接触表面微观物理结构的差异尚未有明确的结论。

1 电连接器腐蚀退化机理研究

根据使用频率不同,可以将电连接器划分为低频和高频连接器。其中,低频连接器用于传输电流信号和低频电信号,传输电流的范围较大,多为多芯结构,包括电源连接器、机柜连接器、电缆连接器等,典型低频连接器结构如图 1 所示。高频连接器用于传输信息,应用最广泛的是射频同轴连接器,射频同轴连接器由内导体、绝缘体和外导体组成。内导体由插针和插孔组成,作为信号线,用于信号传输;外导体是信号线的地线,同时起到屏蔽电磁场的作用。这种特点使得射频同轴连接器具有很大的空间和结构优势,更容易保证特征阻抗的连续性,降低传输损耗。典型高频电连接器如图 2 所示。

无论低频还是高频电连接器,都是通过插针和插孔相互接触完成连接的。因此,连接器插针和插孔之间的电接触性能对连接器的整体性能起着至关重要



图1 低频电连接器

Fig.1 Low frequency electrical connector



图2 高频电连接器

Fig.2 High frequency electrical connector

的作用。插针通常由基底、中间镀层和表面镀层构成,一般以黄铜为基底,镍为中间镀层,表面镀金。插针和插孔接触表面为金属-金属接触,理想情况下,2个接触表面完全接触,但是在微观情况下观察,实际情况并不是这样的,而是由许多凹凸不平的尖峰形成的接触斑点。这就导致能够导电的实际接触面积远小于视在面积,如图3所示。电流流过接触斑点将导致电流路径发生弯曲,电流线变长,电流流经面积变小,从而引起电阻值的变化。由电流线的延长而导致的电阻增加部分被称为收缩电阻。随着插针与插孔之间接触表面的腐蚀退化,接触斑点表面会形成一层污染膜,形成膜层电阻。膜层电阻与收缩电阻一起构成了插针与插孔之间的接触电阻。

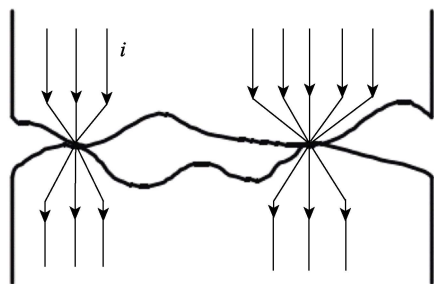


图3 电连接器接触表面

Fig.3 Contact surface of the electrical connector

当信号频率较大时,电流线的延长还会导致收缩电感效应,由此而引起的附加电感被称为接触电感。除此之外,金属接触表面接触斑点以外未接触的部分

之间,由空气填充形成了“金属-空气-金属”形式的接触电容,而随着污染膜的不断生成,另一种形式的接触电容“金属-污染膜-金属”在接触斑点之间也不断生成。接触电阻、接触电感、接触电容三者共同构成了连接器接触表面的接触阻抗。

随着电接触表面的腐蚀退化,两接触面之间的接触电阻、接触电感、接触电容不断变化,从而导致接触阻抗的不断变化,对电信号的传输性能产生影响。

综上所述,电连接器接触表面在腐蚀退化过程中会形成以下3种接触形式:

1) “金属-金属”,即金属斑点直接接触部分。这部分形成了收缩电阻和收缩电感。收缩电感与收缩电阻串联。

2) “金属-空气-金属”,即接触斑点之外的部分,这部分形成了接触电容。

3) “金属-污染膜-金属”,即接触斑点之间出现污染膜的情况。在这部分中,膜层电阻、膜层电感、膜层电容同时存在,膜层电阻与膜层电感串联后再与膜层电容并联。

在以上分析的基础上,根据腐蚀退化过程的不同阶段,建立其等效电路模型。首先,在未腐蚀退化电连接器内,接触表面的情况应为情形1)和2)的组合,其等效电路模型如图4a所示。部分接触斑点腐蚀形成污染膜后,情况1)、2)、3)同时存在,相互并联,接触表面的等效电路模型如图4b所示。所有接触斑点均腐蚀后,情况1)消失,情况2)、3)存在,其等效电路模型如图4c所示。其中, R_{cm} 、 L_{cm} 分别为收缩电阻和收缩电感; C_n 为介质为空气的接触电容; R_f 、 L_f 、 C_f 为膜层电阻、膜层电感、膜层电容; Z_1 、 Z_2 、 Z_3 为接触阻抗; ω 为信号频率。

根据等效电路模型,可以得到不同腐蚀退化情况下的接触阻抗计算公式:

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R_{cm} + j\omega L_{cm}} + j\omega C_n \quad (1)$$

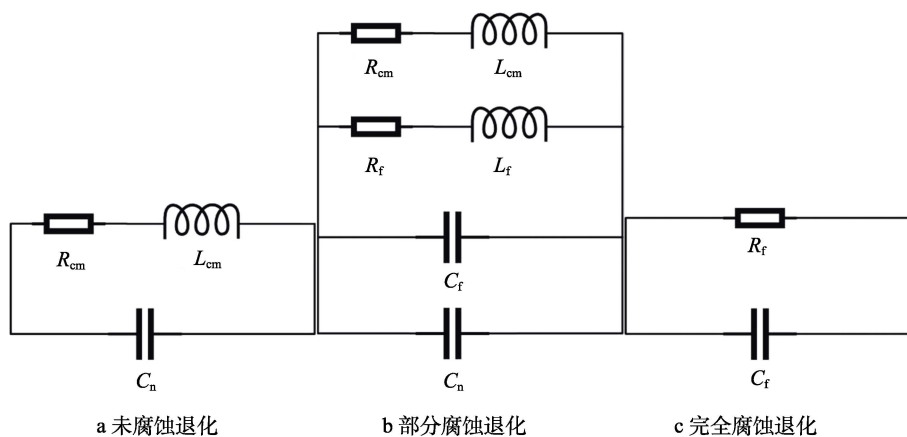


图4 等效电路

Fig.4 Equivalent circuit: a) non-corroded degenerate; b) partial corrosion-degraded; c) complete corrosion degradation

$$\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_{cm} + j\omega L_{cm}} + \frac{1}{R_f + j\omega L_f} + j\omega C_n + j\omega C_f \quad (2)$$

$$\frac{1}{Z_3} = \frac{1}{R_{cm}} + j\omega C_n \quad (3)$$

直流情况下, 电容等效为断路, 电感等效为短路, 接触阻抗只由接触电阻影响。交流情况下, 接触电容和接触电感同样对接触阻抗产生影响。

2 低频电连接器腐蚀退化仿真

低频电连接器在飞机的飞行控制系统、配电系统等系统中应用较多, 且数量较大, 起着传输信号和电能的重要作用。高温、高湿和高盐的特点使得电连接器在恶劣的环境条件下面临严峻的腐蚀挑战, 必然会导致较高的故障率。本文以 J599 系列电连接器(见图 5)为例, 开展低频电连接器腐蚀退化仿真。使用的仿真软件为 ANSYS Q3D 和 ADS。ADS(Advanced Design System)是美国 Agilent 公司所开发的电路和系统分析和设计软件, 功能强大, 仿真手段丰富多样, 可实现包括时域电路仿真、频域电路仿真、通信系统仿真、数字信号处理仿真等多种仿真分析手段。

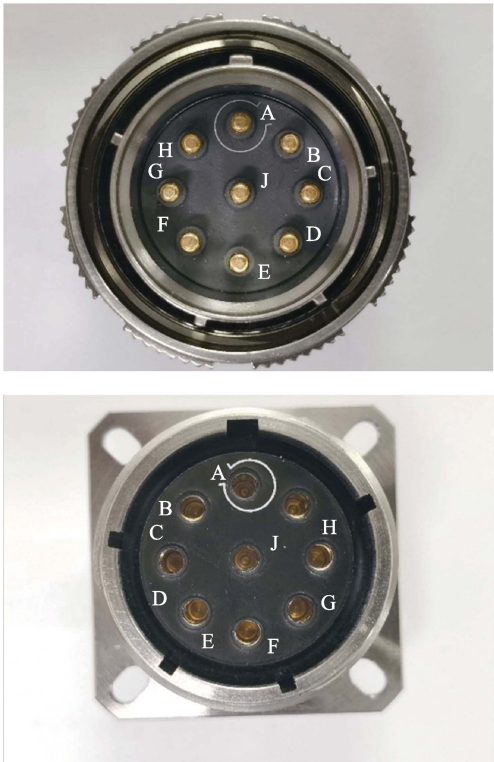


图 5 J599 系列电连接器
Fig.5 J599 series electrical connector

2.1 等效电路

在低频条件下, 并联的电容分支由于其高阻抗, 从而相当于断路状态。未腐蚀、部分腐蚀和完全腐蚀的等效电路模型如图 6 所示。

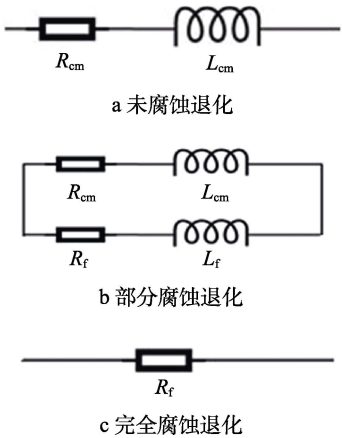


图 6 低频等效电路

Fig.6 Low-frequency equivalent circuit: a) non-corroded degenerate; b) partial corrosion-degraded; c) complete corrosion degradation

根据等效电路模型, 可以得到不同腐蚀退化情况下的接触阻抗计算公式:

$$Z_1 = R_{cm} + j\omega L_{cm} \quad (4)$$

$$\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_{cm} + j\omega L_{cm}} + \frac{1}{R_f + j\omega L_f} \quad (5)$$

$$Z_3 = R_{cm} \quad (6)$$

2.2 仿真模型构建

J599 系列电连接器由多根插头组成, 为了简化分析模型, 本仿真取其一根插头及相应插孔为研究对象, 主要尺寸见表 1。在 Q3D 中建立的实体模型如图 7 所示。

表 1 J599 系列电连接器的部分结构尺寸
Tab.1 Partial structural dimensions of J599 series electrical connectors

结构件	尺寸/mm
插针	外径 0.635
插孔	内径 2.065
插入段	半径 0.451

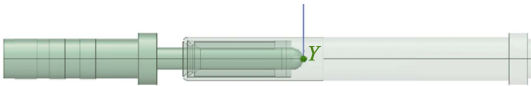


图 7 电连接器剖面
Fig.7 Profile of electrical connector

2.3 材料属性设置

在有限元建模过程中, 材料属性是影响信号传输的最关键因素, 其中材料的介电常数和电导率尤为重要。介电常数表示电介质在电场中贮存静电能的相对能力, 电导率是用来描述物质中电荷流动难易程度的参数。该模型中各个构件的材料属性参数见表 2。腐蚀膜层材料为氧化镍, 其导电性极差, 为了便于计算模拟, 仿真中将其电导率设定为 0.01 S/m。

表2 J599系列电连接器材料属性

Tab.2 Material properties of J599 series electrical connectors

结构	材料成分	介电常数	电导率/($S \cdot m^{-1}$)
插头	铜	1	58 000 000
插孔	铜	1	58 000 000
腐蚀膜层	氧化镍	11.9	0.01
空隙	空气	1.000 6	0

2.4 仿真流程

本仿真分为2步:第一步先根据不同腐蚀阶段插头与插孔的接触面积、膜层厚度的变化,在Q3D软件中分析腐蚀退化过程中的接触阻抗变化规律;第二步根据第一步的阻抗数据,在ADS软件中分析腐蚀退化对信号传输的影响。

2.5 仿真结果分析

1) 接触阻抗分析。接触电阻随频率和接触面积的变化仿真结果图8所示,可以看出,随着频率的增加,接触电阻逐渐增大,增大趋势逐渐减缓;在同一频率下,接触电阻随着接触面积的减小而显著增大,增大趋势逐渐加强,几乎成指数形式。由此可见,腐

蚀面积将对接触电阻产生显著影响。

接触电感随频率和接触面积的变化仿真结果如图9所示,可以看出,接触电感在1 MHz以下,随频率的升高迅速减小;在1~10 MHz,接触电感变化不大,基本持平。接触面积的减小则使接触电感持续增大,其增大趋势先增强、后减缓。

根据式(4)计算得到的阻抗变化如图10、11所示。可以看出,阻抗幅值随频率的增加几乎呈线性增加,同一频率下,阻抗幅值随着接触面积的减小也几乎线性增加。阻抗相位随频率的增加,迅速趋近于 $\pi/2$,在1~10 MHz时,接近 $\pi/2$ 。阻抗相位随接触面积的减小略有减小。

2) 腐蚀退化对信号传输的影响。为了研究电连接器腐蚀退化对信号的影响,本仿真采用ADS仿真软件建立仿真模型。ADS仿真电路建模如图12所示,其中连接器模型如图6a所示。为了对比不同腐蚀阶段信号的传输规律,本文设计了2个实验对照组,每组内有4个Case,分别固定接触电阻或接触电感值,然后对另外一个参数进行数值扫描(见表3)。仿真信号为方波信号,频率为1 MHz。

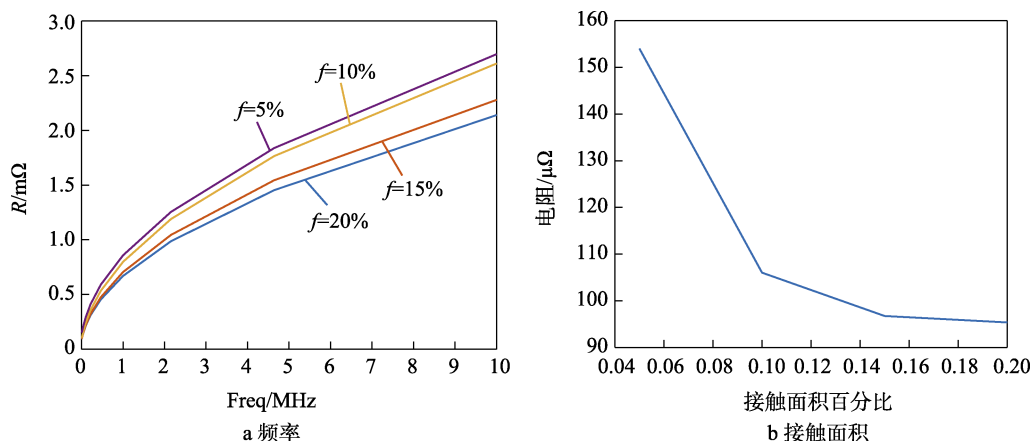


图8 接触电阻随频率和接触面积的变化

Fig.8 Contact resistance variation caused by (a) frequency and (b) contact area

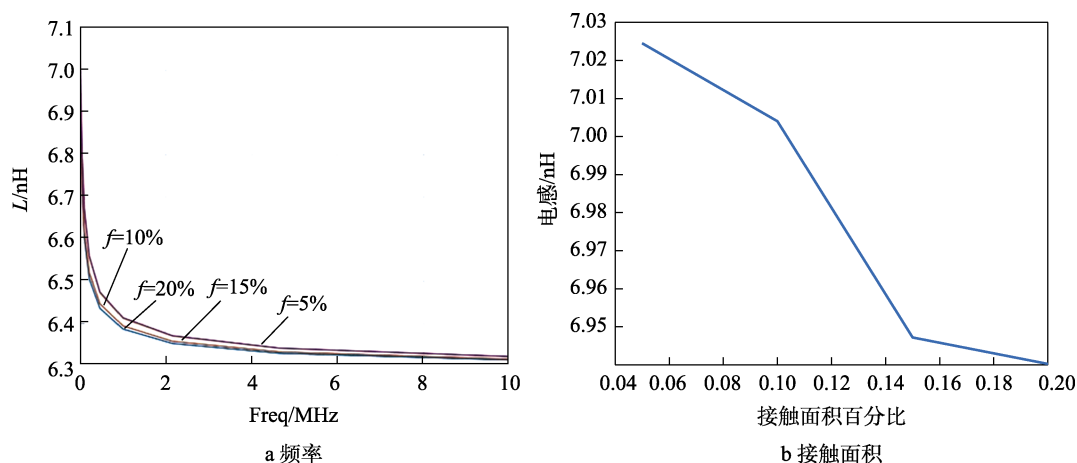


图9 接触电感随频率和接触面积的变化

Fig.9 Contact inductance variation caused by (a) frequency and (b) contact area

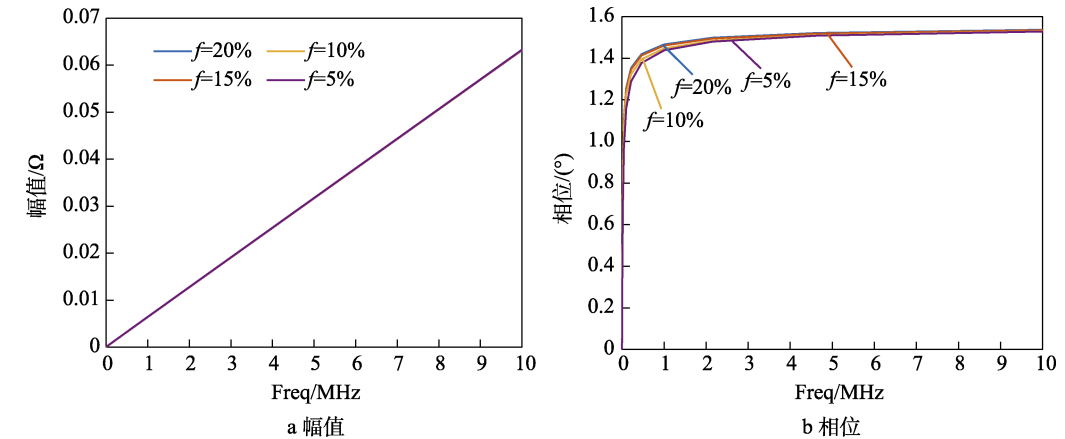


图 10 阻抗随频率的变化
Fig.10 Impedance variation caused by frequency: a) amplitude; b) phase

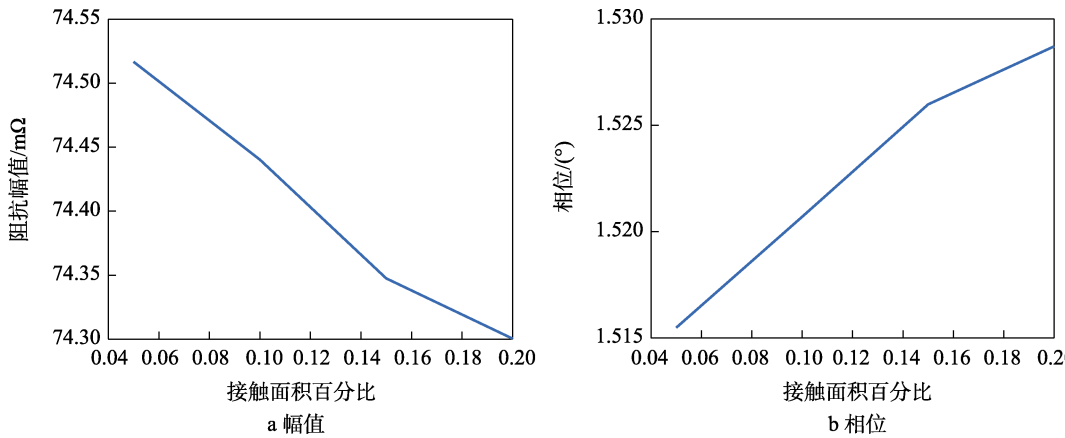


图 11 阻抗随接触面积的变化
Fig.11 Impedance variation caused by contact area: a) amplitude; b) phase

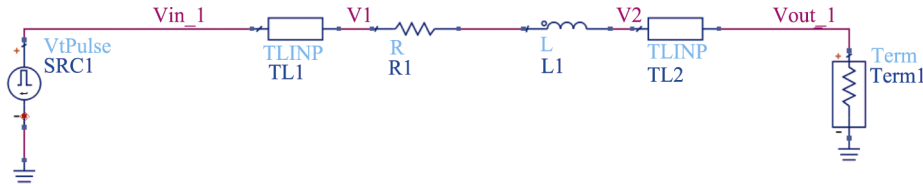


图 12 ADS 仿真电路
Fig.12 ADS simulation circuit

表 3 ADS 仿真参数对照表		
Tabl.3 Comparison table of ADS simulation parameters		
Case	接触电阻/ $\mu\Omega$	接触电感/nH
Case1	100	7
Case2	300	7
Case3	600	7
Case4	1 000	7
Case5	600	6.0
Case6	600	6.5
Case7	600	7
Case8	600	7.5

仿真结果如图 13 和图 14 所示。可以看出, 在 case1 情况下, 输出信号的幅值基本与输入信号一致。随着接触电阻的增大, 信号的幅值逐渐衰减。在 case4

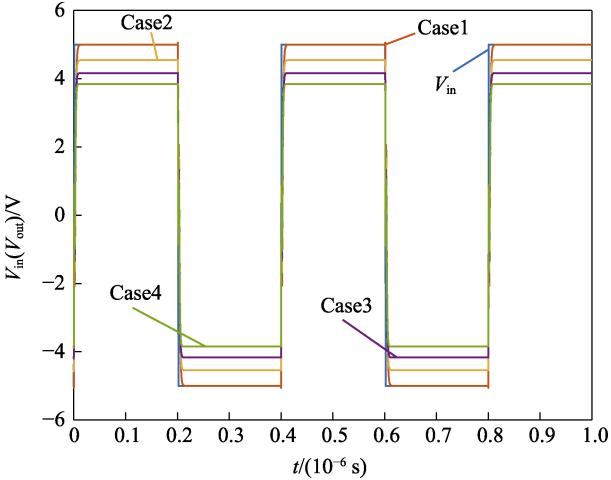


图 13 接触电阻对信号传输的影响
Fig.13 Influence of contact resistance on signal transmission

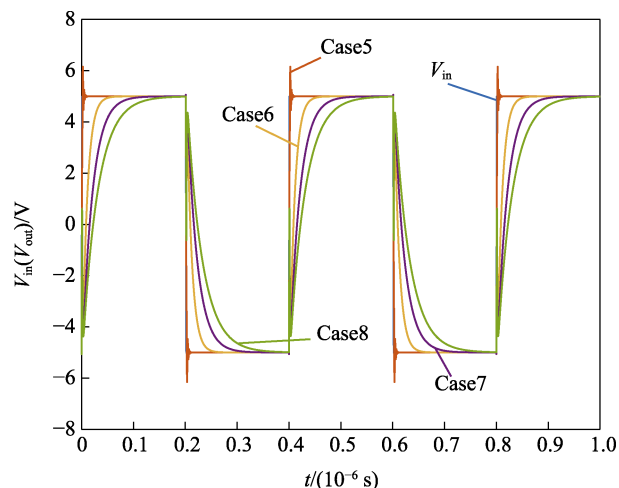


图 14 接触电感对信号传输的影响

Fig.14 Influence of contact inductance on signal transmission

情况下,输出电压比输入电压降低了 25%,幅值衰减严重。接触电感的增大,将使得信号的上升时间变长。在 Case5 情况下,信号延迟几乎可以忽略,case8 情况下,信号延迟达到 0.1 s,达到 1/4 周期。

3 射频电连接器腐蚀退化仿真

射频电连接器在航空电子系统中应用广泛。本文对射频电连接器在不同腐蚀程度下的接触阻抗进行仿真分析,并分析腐蚀退化对射频连接器信号传输的腐蚀影响规律。所使用的有限元仿真软件为 ANSYS HFSS 和 Q3D。其中, Q3D 用于提取电连接器接触阻抗参数, HFSS 用于进行射频 S 参数仿真分析。

3.1 仿真模型构建

以使用最为广泛的 SWA 型射频连接器为研究对象,其主要尺寸见表 4, a 、 b 、 c 和 d 分别表示内导体外径、外导体内径、插入段半径和间隙宽度。在 HFSS 中建立的实体模型剖面如图 15 所示。

表 4 电连接器的部分结构尺寸

Table 4 Partial structural dimensions of electrical connector

结构件	尺寸/mm
内导体	外径 $a=0.635$
外导体	内径 $b=2.065$
插入段	半径 $c=0.451$
间隙	宽度 $d=0.200$

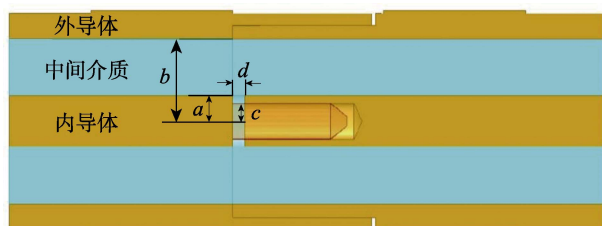
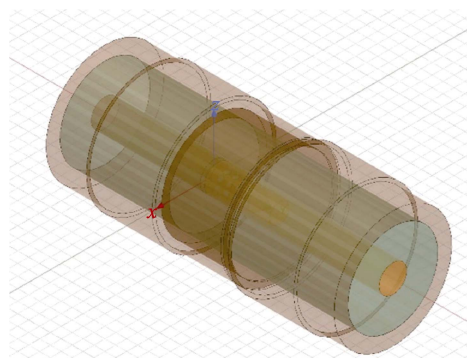


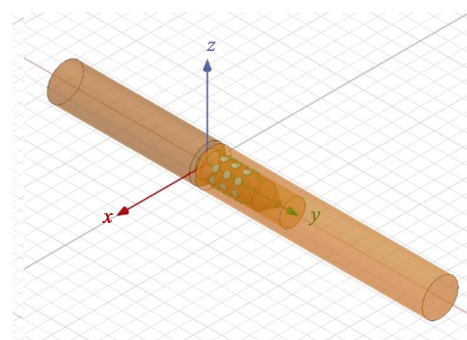
图 15 SWA 型射频电连接器剖面

Fig.15 Profile of SWA type RF electrical connector

建立的射频电连接器完整模型及其内电阻模型如图 16 所示。



a 完整模型



b 内电阻模型

图 16 射频电连接器模型

Fig.16 RF electrical connector model: a) complete model; b) internal resistance model

3.2 材料属性设置

在该有限元建模过程中,该模型中各个构件的材料属性参数见表 5。

表 5 电连接器材料属性

Tab.5 Material properties of electrical connectors

结构	材料成分	介电常数	电导率/($S \cdot m^{-1}$)
内导体	铜	1	58 000 000
外导体	铜	1	58 000 000
中间介质	聚四氟乙烯	2.04	0
腐蚀膜层	氧化镍	11.9	0.01
空隙	空气	1.000 6	0

3.3 仿真流程

在电连接器腐蚀退化机理分析的基础上,本章针对 SWA 型射频连接器退化的 3 个过程(未退化、部分退化、完全退化)进行了仿真分析,以验证前述退化机理及建模的准确性。

3.4 仿真结果分析

1) 未退化电连接器接触阻抗仿真。电连接器未

退化时, 其接触表面通过接触斑点导电。假设未退化时, 射频连接器内电阻接触斑点占视在面积的 20%。通过 Q3D 软件提取其接触电阻、接触电感、接触电容随频率的变化规律, 如图 17 所示。

从图 17 中可以看出, 接触电阻随着频率的增加而增大, 这跟接触表面的趋肤效应有关。在交流电的情况下, 变化的电场产生磁场, 磁场又会产生感应电动势, 从而形成感应电流。感应电流的方向总是与原电流方向相反, 并且越靠近导体中心, 感应电流越大, 致使从表面到中心, 导体电流密度逐渐减小。这就是

趋肤效应。趋肤深度的计算公式:

$$R = \frac{\rho l}{\pi r^2 - \pi(r - \delta)^2} \quad (7)$$

由式 (7) 可知, 趋肤深度与频率有关, 频率越大, 趋肤深度越小, 电流流经面积也就越小, 接触电阻也就越大。接触电感和接触电容在低频阶段随频率的增加略有减小, 而在高频阶段基本保持不变。有了接触电阻、电感、电容, 根据式 (7) 便可计算接触阻抗, 其幅值和相位随频率的变化规律如图 18 所示。

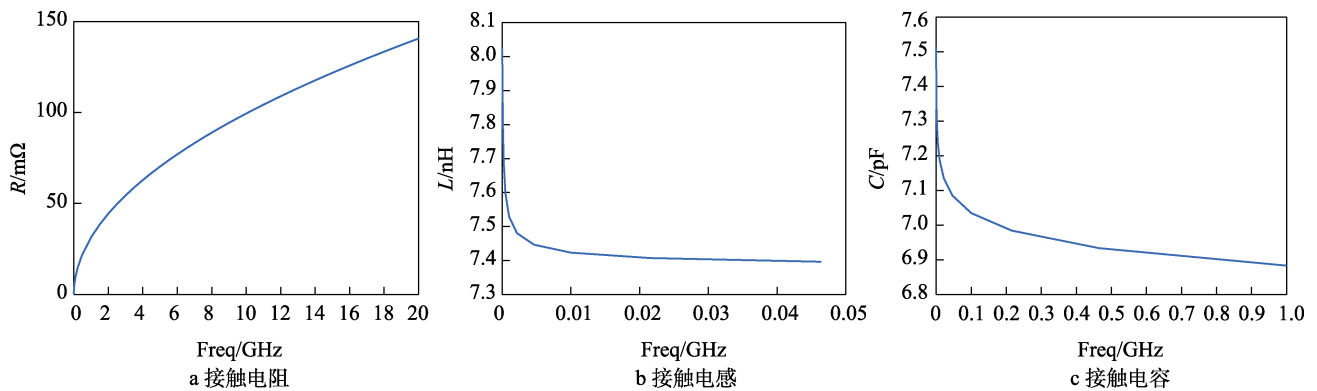


图 17 未退化时接触电阻、接触电感、接触电容随频率的变化

Fig.17 Contact resistance, inductance and capacitance variation caused by frequency when undegraded: a) contact resistance; b) contact inductance; c) contact capacitance

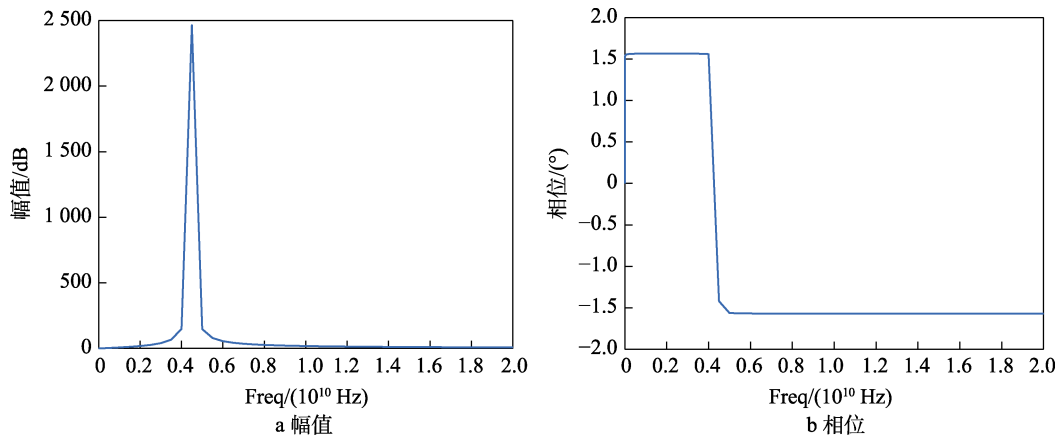


图 18 未退化时阻抗随频率的变化

Fig.18 Impedance variation with frequency without degradation: a) amplitude; b) phase

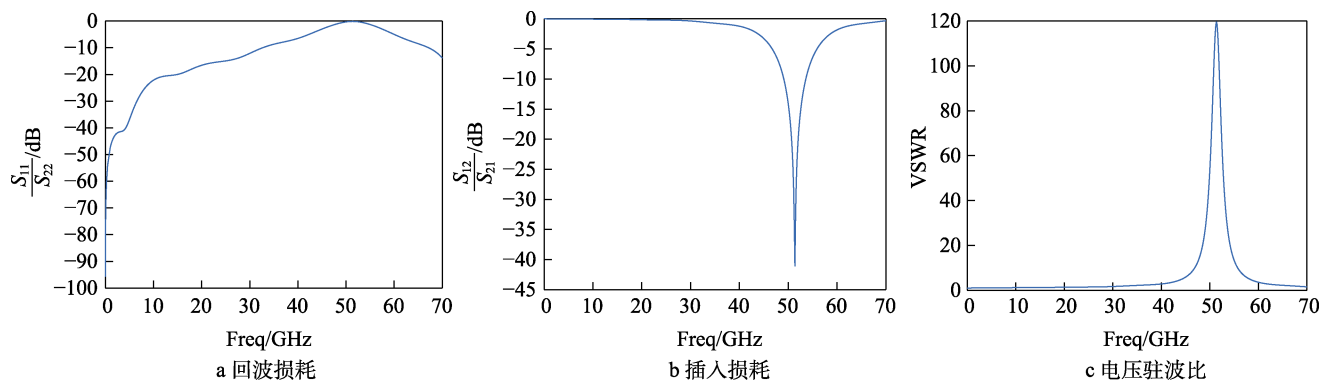
从图 18 中可得, 接触阻抗在低频阶段呈现感性特征, 阻抗相位超前 90° 。随着频率的增大, 接触阻抗幅值逐渐增大。当接触电感导致的阻抗和接触电容导致的阻抗模值相等时, 即:

$$\omega_c L = 1 / \omega_c C \quad (8)$$

接触阻抗幅值增大到最大, 相位跳变到 -90° , 此时的频率称之为过渡频率。当越过过渡频率后, 接触电容对接触阻抗的大小起主导作用, 阻抗呈现容性特征, 接触阻抗幅值逐渐减小, 相位由 90° 过渡到 -90° 。

基于 HFSS 电磁仿真软件, 在 1~70 GHz 频率范围内, 对未退化的 SWA 电连接器 S 参数进行提取,

结果如图 19 所示。对仿真结果进行分析, 回波损耗随频率的增加先增大、后减小, 插入损耗则是随频率增加先减小后增大, 相应的电压驻波比也先增大、后减小, 极值点大概处于 52 GHz 频率点处。这与接触阻抗随频率的变化规律是相适应的, 过渡频率前, 接触阻抗随频率逐渐增大, 连接器阻抗匹配度逐渐降低, 导致回波损耗逐渐增大, 插入损耗逐渐减小。当接触阻抗出现极大值点时, 连接器阻抗严重不匹配, 绝大多数能量被反射回首端, 只有很小一部分能量传输至另一端, 回波损耗接近 1, 插入损耗接近 0。越过过渡频率后, 接触阻抗迅速减小, 回波损耗逐渐减小, 插入损耗逐渐增大。

图 19 未退化时 S 参数随频率的变化Fig.19 S parameter variation caused by frequency without degradation: a) return loss; b) insertion loss; c) voltage standing wave ratio

2) 部分触点腐蚀退化接触阻抗仿真。当接触斑点被逐渐腐蚀后, 实际接触面积占视在面积的比例减小, 接触阻抗发生变化。在接触面积分别为 20%、15%、10%、5% 的情况下, 运用 Q3D 提取电参数, 得到的接触电阻、接触电感、接触电容结果如图 20 所示。

由图 20 可以看出, 随着接触面积的减小, 接触电阻不断增大。这是由于接触斑点腐蚀后, 膜层电阻逐渐取代收缩电阻的缘故。接触斑点腐蚀增多的同时会导致膜层电容面积的增大, 从而使得接触电容也不

断增大。腐蚀退化对接触电感影响较小。

接触阻抗的幅值和相位随腐蚀程度的变化规律如图 21 所示。可以看出, 随着腐蚀程度的加深, 阻抗相位的过渡频率会逐渐提前, 阻抗峰值会逐渐减小。这是由于腐蚀加深导致接触电容增大, 由式 (8) 可得, 过渡频率减小。在电感基本不变的情况下, 电容增大将导致过渡频率减小。频率减小, 电阻电感支路的阻抗减小, 并联电路的总阻抗总是小于单个支路的最小阻抗。因此, 接触阻抗的极值也相应减小。

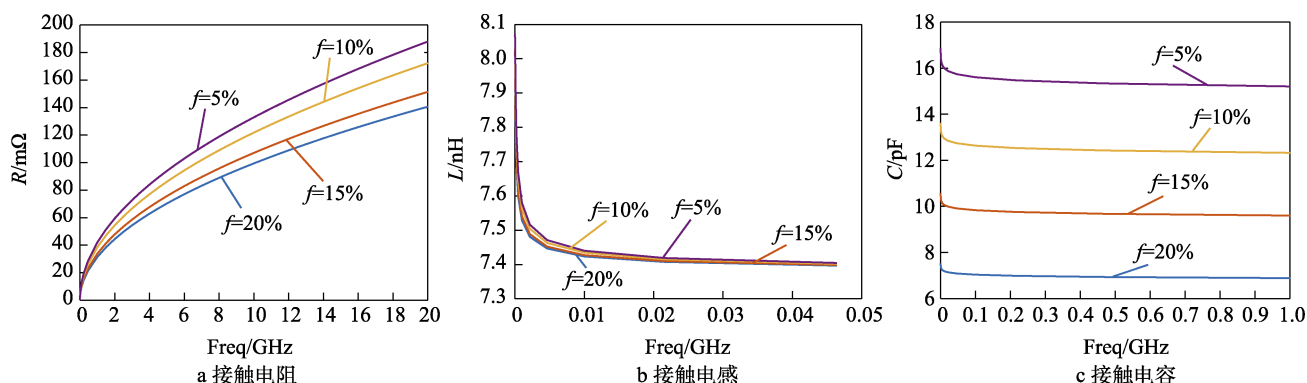


图 20 部分退化时接触电阻、接触电感、接触电容随频率的变化

Fig.20 Variation of contact resistance, inductance and capacitance caused by frequency when partially degraded: a) contact resistance; b) contact inductance; c) contact capacitance

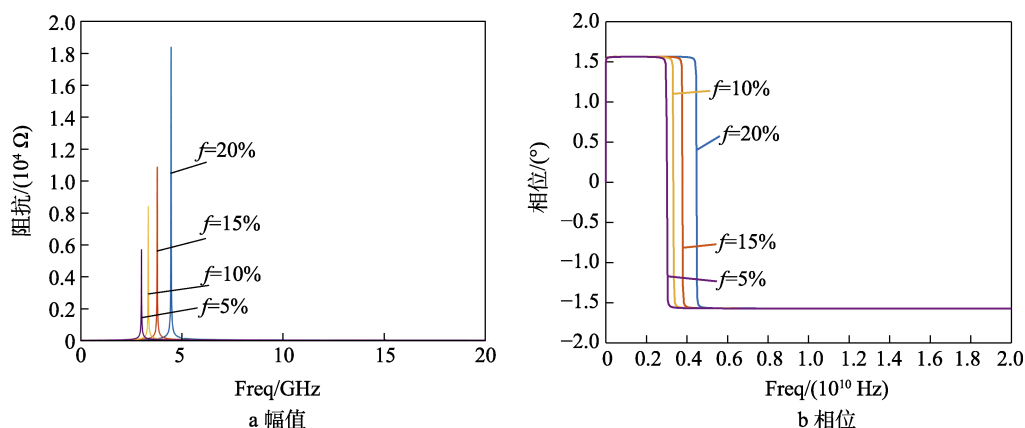


图 21 部分退化时接触阻抗随频率变化

Fig.21 Variation of contact impedance caused by frequency when partially degraded: a) amplitude; b) phase

在 1~70 GHz 内, 对不同退化程度连接器的 S 参数进行提取, 结果如图 22 所示。对结果进行分析, 随着退化程度的加深, 回波损耗和插入损耗极值点出现的频率逐步左移, 回波损耗的极大值点逐渐减小, 插入损耗的极小值点逐渐增大。这与接触阻抗变化规律基本一致。

3) 完全腐蚀接触阻抗仿真。当腐蚀退化进入到第三阶段后, 所有接触斑点均腐蚀, 接触面间被腐蚀薄膜覆盖。随着腐蚀退化程度加深, 腐蚀薄膜厚度逐步增加。在 1~60 GHz 内, 运用 Q3D 软件提取电参数,

结果如图 23 所示。

对仿真结果分析可得, 膜层电阻随着腐蚀薄膜厚度的增加逐渐增大, 而膜层电容随腐蚀薄膜厚度增加逐渐减小。薄膜厚度增大导致接触面电容极板间的距离增大, 根据式 (9) 可知, 膜层电容逐渐减小。

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi k d} \quad (9)$$

再通过式 (3) 计算接触阻抗的幅值和相位, 结果如图 24 所示。从图 24 中可知, 这一阶段, 接触阻抗幅值随频率增大迅速减小, 趋近于 0; 相位随频率

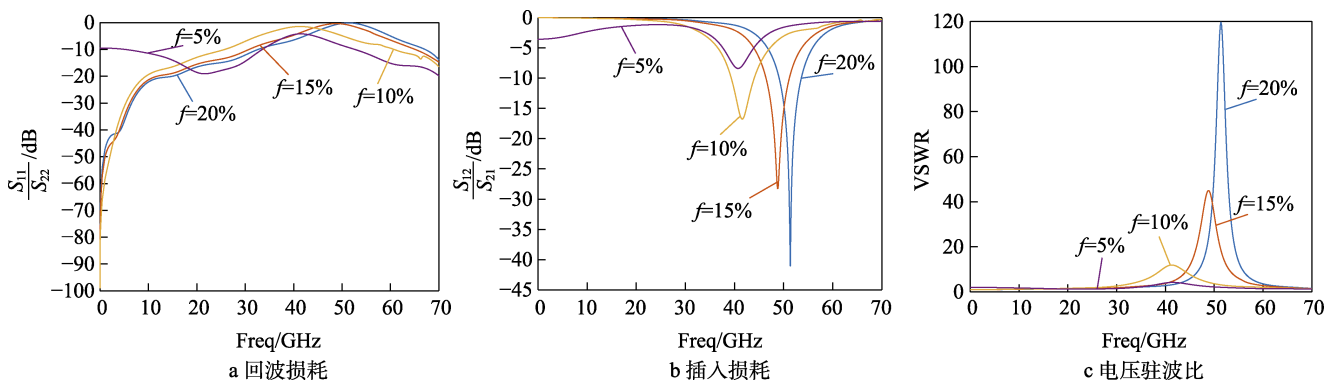


图 22 部分退化时 S 参数随频率变化

Fig.22 Variation of S parameter caused by frequency when partially degraded: a) return loss; b) insertion loss; c) voltage standing wave ratio

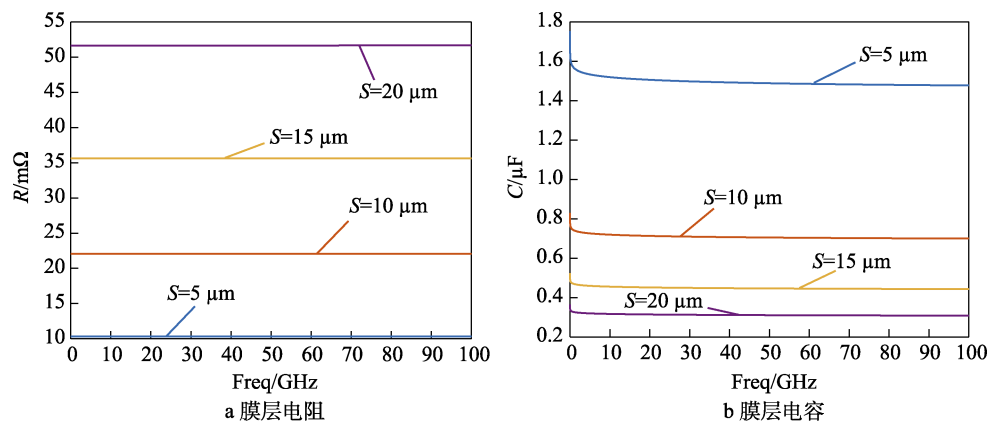


图 23 完全退化时膜层电阻、膜层电容随频率的变化

Fig.23 Variation of film resistance and capacitance caused by frequency when completely degraded: a) film resistance; b) film capacitance

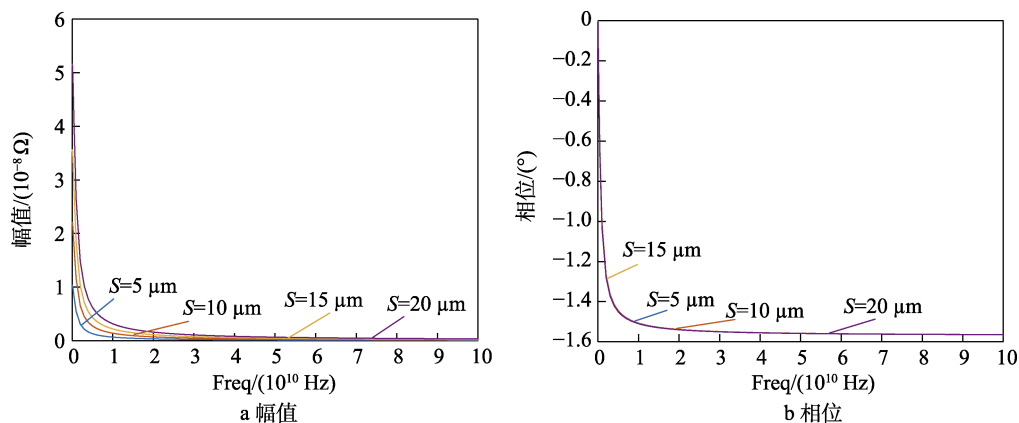


图 24 完全退化时阻抗随频率的变化

Fig.24 Variation of impedance caused by frequency when completely degraded: a) amplitude; b) phase

增大迅速趋近于 -90° 。接触阻抗完全呈现容性特征,膜层厚度增加,略微减缓了阻抗幅值的下降速度,整体趋势不变。

在 HFSS 中对不同膜层厚度的 S 参数进行提取,结果如图 25 所示。对结果进行分析,当接触表面被腐蚀薄膜完全覆盖后,回波损耗随着频率增大,逐渐由 1 趋近于 0,而插入损耗则由 0 趋近于 1。这是由于接触表面被腐蚀薄膜覆盖后,连接器阻抗呈现容性,具有通高频阻低频的特性,因此其高频性能较好,低频性能较差。膜层厚度的增加,减小了膜层电容,因而延缓了 S 参数的变化速率。

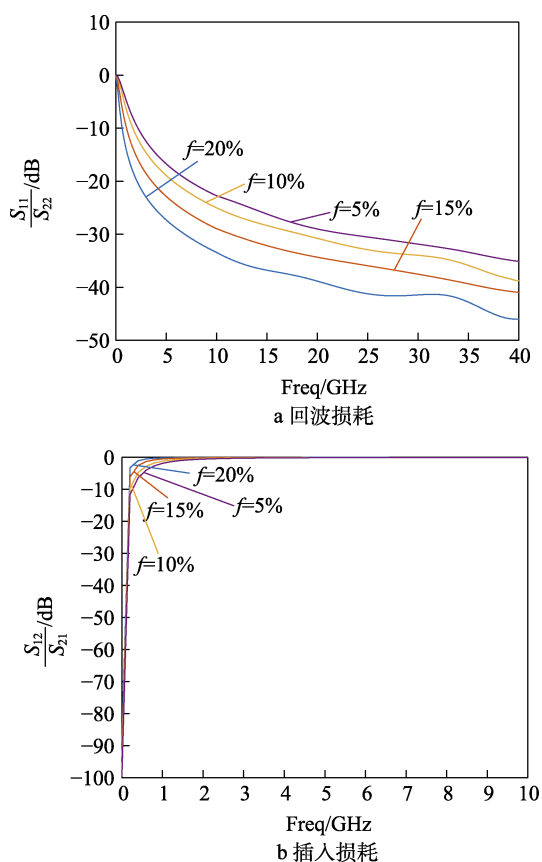


图 25 完全退化时 S 参数随频率的变化

Fig.25 Variation of S parameter caused by frequency when completely degraded: a) return loss; b) insertion loss

4 结论

1) 电连接器腐蚀退化对信号传输的影响,低频情况下主要受接触电阻、接触电感的影响,高频情况下主要受接触电感和接触电容的影响。

2) 低频情况下,电连接器接触表面接触电阻的增大将导致信号幅度的衰减,阻值越大,衰减越严重。接触电感的增大将导致信号上升的时间延长,从而导致信号的延迟。

3) 高频情况下,接触电容对接触阻抗的影响显著提高,接触阻抗在某一特定频率由感性转为容性,

阻抗相位发生突变,阻抗幅值出现峰值。电连接器腐蚀退化会使该频率减小,电连接器可正常使用的频率范围变窄。

4) 腐蚀退化对于使用频率大于转换频率的射频电连接器的影响较小,因此,对于该类射频电连接器,可以预先在其接触表面涂抹一层防腐蚀的绝缘薄膜,人为形成膜层电容,提高传输性能。

参考文献:

- [1] 何志强. 综合化航空电子系统发展历程及重要支撑技术[J]. 电讯技术, 2004, 44(4): 1-5.
HE Z Q. Development and Important Supporting Technology of Integrated Avionics System[J]. Telecommunication Engineering, 2004, 44(4): 1-5.
- [2] 任苏中. 航空电子设备电连接器[J]. 电子机械工程, 1992, 8(5): 18-41.
REN S Z. Electrical Connector of Avionics Equipment[J]. Electro-Mechanical Engineering, 1992, 8(5): 18-41.
- [3] JACKSON R L, ASHURST W R, FLOWERS G T, et al. The Effect of Initial Connector Insertions on Electrical Contact Resistance[C]// Electrical Contacts-2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Pittsburgh: IEEE, 2007.
- [4] LIU H, MCBRIDE J W. The Influence of Multiscale Surface Roughness on Contact Mechanics Using Finite Element Modeling: Applied to a Au-Coated CNT Composite Electrical Contact Surface[C]// 2017 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Denver: IEEE, 2017.
- [5] ZHANG X H, JACKSON R L. The Influence of Multiscale Roughness on the Real Contact Area and Contact Resistance between Real Reference Surfaces[C]// ICEC 2014: The 27th International Conference on Electrical Contacts. Dresden: VDE, 2014.
- [6] KONDO T, NAKATA H, SEKIKAWA J, et al. An Analysis of Relationship between Contact Resistance and Fracture of Oxide Film for Connector Contacts Using Finite Element Method[C]// 2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm). New Orleans: IEEE, 2014.
- [7] YUDATE T, TOYOIZUMI J, ONUMA M, et al. The Investigation of the Electrical Contact Resistance through Thin Oxide Layer on a Nanometer Scale[C]// 2016 IEEE 62nd Holm Conference on Electrical Contacts (Holm). Clearwater Beach: IEEE, 2016.
- [8] BRYANT M D, JIN M. Time-Wise Increases in Contact Resistance Due to Surface Roughness and Corrosion[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1991, 14(1): 79-89.
- [9] MEYYAPPAN K, MCALLISTER A, VASUDEVAN V, et al. Impact of Corrosive Environment on Contact Resistance of Infrequently Mated Connectors[C]// 2015 IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts (Holm). San Diego, CA, USA. IEEE, 2015: 317-323.
- [10] MARTENS R, PECHT M G. An Investigation of the

- Electrical Contact Resistance of Corroded Pore Sites on Gold Plated Surfaces[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2000, 23(3): 561-567.
- [11] SUN A C, MOFFAT H K, ENOS D G, et al. Pore Corrosion Model for Gold-Plated Copper Contacts[C]// Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Chicago: IEEE, 2005.
- [12] MEYYAPPAN K, MURTAGIAN G, KURELLA A, et al. Corrosion Studies on Gold-Plated Electrical Contacts[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2014, 14(3): 869-877.
- [13] REID M, PUNCH J, GRACE G, et al. Corrosion Resistance of Copper-Coated Contacts[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2006, 153(12): B513.
- [14] 杨奋为. 航天用电连接器的失效分析[J]. 机电元件, 1996, 16(1): 40-43.
YANG F W. Failure Analysis of Aerospace Electrical Connectors[J]. Electromechanical Components, 1996, 16(1): 40-43.
- [15] 杨奋为. 航天用电连接器的可靠性研究[J]. 上海航天, 1997, 14(1): 35-39.
YANG F W. Study on Reliability of Spaceborne Electric Connector[J]. Aerospace Shanghai, 1997, 14(1): 35-39.
- [16] SUN B S, ZHANG J G, LIANG G T, et al. Preliminary Investigation on Error Code Rate of High Speed Digital Circuitry Caused by Electrical Contact Failure[C]// Proceedings of the Forty-Fifth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Pittsburgh: IEEE, 1999.
- [17] SUN B S. Effects of Electric Contact Failure on Signal Transmission in Unmatched Circuits[C]// Proceedings of the Forth-Seventh IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Montreal: IEEE, 2002.
- [18] ZHU J, GAO J C, XIE G, et al. FEM Analysis of the Impact of Coaxial Connector on High Speed Signal Transmission[C]// 2007 International Symposium on Communications and Information Technologies. Sydney: IEEE, 2007.
- [19] ZHANG J G, WEN X M. The Effect of Dust Contamination on Electric Contacts[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1986, 9(1): 53-58.
- [20] ZHANG J G. Effect of Dust Contamination on Electrical Contact Failure[C]// Electrical Contacts - 2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Pittsburgh, PA, USA. IEEE, 2007: xxi-xxx.
- [21] 樊军伟. 腐蚀对电触点高频特性影响的分析[D]. 北京: 北京邮电大学, 2009.
FAN J W. Analysis on the Influence of Corrosion on High Frequency Character of Electric Contact Spot[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009.
- [22] JI R, GAO J C, XIE G. Modeling and Analysis of the Effects of Electrical Contact Degradation on High-Speed Signal Transmission[J]. IEICE Electronics Express, 2018, 15(8): 20180243.
- [23] JIN Q Y, GAO J C, XIE G, et al. A Study of the Passive Intermodulation Induced by Nonlinear Characteristics of RF Connectors[C]// 2016 IEEE 62nd Holm Conference on Electrical Contacts (Holm). Clearwater Beach: IEEE, 2016.
- [24] 李庆娅. 高频电接触失效机理及可靠性研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
LI Q Y. Research on the Failure Mechanism and Reliability of Electrical Contacts at High Frequency[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [25] LI Q Y, GAO J C, FLOWERS G T, et al. Modeling and Analysis of Radio Frequency Connector Degradation Using Time Domain Reflectometry Technique[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2020, 30(8): 13-17.

责任编辑: 刘世忠