航空航天装备

腐蚀退化情况下航空射频电连接器 电磁干扰仿真

杜一江, 郁大照

(海军航空大学 航空基础学院,山东 烟台 264001)

摘要:目的 探索复杂电磁脉冲干扰下,航空射频电连接器的电磁耦合机理,研究其在腐蚀退化情况下的抗 电磁干扰能力。方法 首先对航空射频电连接器的结构及腐蚀退化后电磁耦合机理进行研究,然后分别从频 域和时域角度研究射频电连接器在强电磁脉冲作用下的耦合电场情况和抗干扰能力。结果 射频电连接器内 部耦合电场模量随着入射电磁脉冲频率的增大而增大,低频干扰时,耦合电场模量在缝隙处取得极大值, 高频干扰时,在缝隙处取得极小值。耦合电场分量主要是与入射电磁脉冲极化方向相同的电场分量,耦合 电场强度随着腐蚀缝隙的加宽逐渐增大。入射电磁脉冲产生的耦合电压会使传输信号失真,入射电磁脉冲 幅值越大,腐蚀缝隙宽度越大,信号的震荡越剧烈,失真度越高,但这种影响具有时限性,随着耦合电场 趋于稳定,信号会逐渐趋于平稳。结论 腐蚀退化的航空射频电连接器抗干扰能力显著退化,对于高频干扰

关键词: 电连接器; 腐蚀退化; 电磁干扰; 耦合机理; 信号传输; 仿真;
中图分类号: V271.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2025)04-0036-08
DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2025.04.005

Simulation of Electromagnetic Interference due to Corrosion Degradation in Aviation RF Electrical Connectors

DU Yijiang, YU Dazhao

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

ABSTRACT: The work aims to explore the electromagnetic coupling mechanism of aviation radio frequency electrical connectors under complex electromagnetic pulse interference, and study their anti-electromagnetic interference ability under corrosion degradation. The structure of aviation radio frequency electrical connector and the electromagnetic coupling mechanism after corrosion degradation were studied, and then the coupling electric field and anti-interference capability of radio frequency electrical connector under strong electromagnetic pulse were investigated under the perspective of frequency domain and time domain respectively. The internal coupling electric field modulus of the radio frequency electrical connector increased with the increase of the incident electromagnetic pulse frequency. Under low-frequency interference, the coupling electric field modulus reached a maximum at the gap, while under high-frequency interference, it reached a minimum at the gap. The coupling electric

收稿日期: 2024-12-26; 修订日期: 2025-02-18

Received: 2024-12-26; **Revised**: 2025-02-18

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.腐蚀退化情况下航空射频电连接器电磁干扰仿真[J].装备环境工程,2025,22(4):36-43.

DU Yijiang, YU Dazhao. Simulation of Electromagnetic Interference due to Corrosion Degradation in Aviation RF Electrical Connectors[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(4): 36-43.

field component was mainly the electric field component with the same polarization direction as the incident electromagnetic pulse. The coupling electric field intensity gradually increased with the widening of the corrosion gap. The coupling voltage generated by the incident electromagnetic pulse distorted the transmission signal. The larger the amplitude of the incident electromagnetic pulse and the wider the corrosion gap, the more severe the signal oscillation and the higher the distortion degree. However, this effect was time-limited. As the coupling electric field tended to stabilize, the signal would gradually stabilize. The anti-interference capability of corroded and degraded aviation RF electrical connectors has significantly deteriorated, which is more sensitive to high-frequency interference. The electromagnetic pulse during the initial stage of interference has a greater impact on signal transmission.

KEY WORDS: electrical connector; corrosion degradation; electromagnetic interference; coupling mechanism; signal transmission; simulation

飞机上的卫星导航、通信以及干扰雷达等电子装置,形成了一个较为复杂的电磁场分布,在作战环境 下同时还会面临以高功率微波和超宽带脉冲为代表 的电磁脉冲武器的威胁,电磁环境更为复杂。航空电 连接器是飞机电子设备中最常见的基础元件,起着输 送电能和传输信号的重要作用^[1]。在高温、高湿、高 盐雾环境中,长期服役的飞机电连接器很容易受到腐 蚀退化,失去原有的电磁屏蔽性能。在强电磁场威胁 的环境下,腐蚀退化的航空电连接器势必会受到电磁 干扰,从而影响飞机各种信号的传输,出现信号延迟 甚至反转等问题,影响飞行安全^[2]。研究腐蚀退化后 的航空电连接器的电磁兼容性问题是适应现代飞机 发展的需要,是提高系统安全性和可靠性的重要课题。

目前对于航空电连接器腐蚀退化的研究主要集 中于对退化机理及信号传输影响规律的研究。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[6-7]研究了表面腐蚀对接触 电阻的影响,分析了表面腐蚀物积累程度与接触电阻 的变化关系。Martens 等^[8-11]以典型电连接器接触系统 为研究对象,对其微孔腐蚀机理进行了分析。Sun 等 [12-13]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^[14]通过研究发现, 信号通过电连接器腐 蚀膜层时,会产生隧道电流,出现非线性效应。樊军 伟等[15-17]通过实验发现,不同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。李庆娅等[18-19]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, 剖析了接触退化对信号传输的影响规律。 郁大照等[20-21]和张临志[22]分别通过仿真和实验的方 法研究了航空电连接器在腐蚀退化过程中接触阻抗 的变化规律,以及对信号传输的影响。

对于电连接器电磁干扰仿真预测方面的研究,主要集中于各型完好电连接器屏蔽性能的仿真。 Archambeault 等^[23]研究了高速高密度电连接器产生的电磁干扰的量化问题,在量化电磁干扰耦合和辐射物理方面做出了开创性的贡献。Halligan等^[24-25]提出

了一种量化高密度连接器辐射功率的方法,该方法能 够在考虑材料损耗的情况下对连接器接口处多个信 号的辐射功率进行表征。Musa 等^[26]对商用印刷电路 板连接器的电磁辐射进行了研究,发现总功率损耗主 要由材料损耗决定。Park 等^[27]对 QSFP28 连接器印制 电路板的优化问题进行了研究,发现增加电路板中接 地过孔的直径,可以显著改善连接器的串扰问题。 Huang 等^[28]对吸收材料在高速互连高频耦合方面的 抑制作用进行了研究,发现添加到连接器外壳中的吸 收材料,可以有效减小由串扰和谐振引起的噪声,提 高信号的完整性。Li 等^[29-30]通过建立板对板连接器的 电磁干扰耦合物理仿真模型,发现该型连接器的辐射 信号主要来源于信号走线上的电流,并对该型连接器 的耦合路径进行了研究。宗志祥等[31]对射频同轴连接 器在辐射放电脉冲下的电磁抗干扰能力进行了仿真 研究。饶韬等^[32]以千兆以太网连接器为研究对象,基 于HFSS软件对连接器屏蔽效能和频率的关系进行了 仿真研究。

综上所述,当前关于航空电连接器腐蚀退化的研究多集中于退化机理以及对信号传输的影响方面,对腐蚀退化后的电磁耦合机理研究较少,关于电连接器电磁干扰仿真预测的研究也多针对完好的电连接器,鲜有屏蔽性能退化的电连接器的仿真研究。为此,本文从复杂电磁环境中腐蚀退化的电连接器电磁耦合机理出发,针对 SMA 型射频电连接器开展电磁干扰仿真研究,分别从频域和时域角度研究了射频电连接器在腐蚀退化情况下的抗干扰能力。从频域角度分析了电连接器内部耦合电场模量在不同频率电磁脉冲作用下的变化规律,以及耦合电场模量与腐蚀缝隙宽度的关系;从时域角度研究了电磁脉冲对电连接器传输信号的影响规律。研究结果可为腐蚀退化后的航空射频电连接器的抗干扰能力评估提供参考。

1 SMA 型射频连接器电磁耦合机理

1.1 SMA 型射频连接器结构

SMA 型射频同轴连接器如图 1 所示,分为插头

和插座 2 个部分, 分别由外导体、中间介质和内导体 组成, 插头和插座组成接触对。结构剖面如图 2 所示。 内导体主要用于传输射频电流, 外导体可以充当电流 回路, 同时还可以屏蔽外界电磁场, 而中间介质既是 内外导体的支撑介质, 也是射频连接器中电磁波的传 输介质。射频连接器内电磁波的传播模式主要为横电 磁波模式,在传播方向上没有电场和磁场分量。由于 同轴结构既能够保证特征阻抗的连续性,又对外界电 磁干扰具有一定的屏蔽能力,因而在高频信号的传输 方面得到了广泛的应用。其主要电气参数见表 1^[33]。 SMA 型射频电连接器可以等效为一截同轴传输线, 其内外导体等效电路如图 3 所示。

表 1 SMA 型射频同轴连接器主要电气参数 Tab.1 Main electrical parameters of SMARF coaxial connector

标称阻抗/Ω	绝缘电阻/MΩ	电压驻波比	插入损耗(S ₂₁)	接触电阻/mΩ
50	≥5 000	≤1.15+0.02	≥-0.06	内导体≤3; 外导体≤2



图 1 SMA 型射频同轴连接器插头和插座 Fig.1 SMA type RF coaxial connector plug and socket



图 2 SMA 型射频同轴连接器结构剖面 Fig.2 Structural sectional view of SMA type RF coaxial connector





1.2 腐蚀退化机理

由于加工制造误差等原因,连接器插头与插座连 接处的接触表面并不是完全平整的,而是由许多凹凸 不平的接触斑点组成,这样就会在接触平面之间形成 许多细小的缝隙。如果飞机长期处于高温、高湿、高 盐环境下,那么具有腐蚀性的水汽就会很容易进入到 这些缝隙中,并在接触表面形成薄膜液,对内外导体 接触表面进行电化学腐蚀。处于凸出位置的接触斑点 一般会被先腐蚀掉,腐蚀产物会逐渐填满插头与插座 的接触表面之间,受到震动逐渐脱落,从而在插头与 插座连接处形成缝隙。电连接器腐蚀退化会造成许多 不良的影响,内导体连接处接触表面的腐蚀退化会引 起接触阻抗的变化,从而影响信号的传输;而外导体 连接处接触表面的腐蚀,不仅会影响信号回路的生 成,也会对电连接器的屏蔽性能产生影响。本文主要 研究外导体连接处的腐蚀退化对电连接器抗干扰能 力的影响。

1.3 电磁耦合机理

电磁干扰耦合的发生需要有 3 个必不可少的要 素:干扰源、耦合途径和敏感设备。高能电磁脉冲具 有能量密集、穿透力强等特点,是较为常见的机载设 备干扰源。在高温、高湿、高盐环境中,腐蚀退化而 逐渐加宽的外导体连接处的缝隙,将为外来电磁脉冲 的耦合干扰提供途径。传输射频电流的内导体对干扰 较为敏感,是典型的敏感设备。因此,高强度的电磁 脉冲、外导体的腐蚀缝隙与易受干扰的电连接器内导 体形成了完备的电磁干扰链路。当干扰电磁脉冲通过 缝隙进入到电连接器内部时,经过容性和感性耦合, 在内导体上产生耦合电流,内外导体之间产生耦合电 压,从而改变电连接器原有的传输阻抗,对电连接器 的信号传输产生影响。

2 射频电连接器电磁干扰仿真

本文基于 COMSOL Multiphysics 软件,对 SMA 型射频电连接器在高强度电磁脉冲干扰下的使用性 能进行仿真。首先,选择合适的入射电磁脉冲,并建 立电连接器仿真模型;然后对所建模型进行相应的网 格划分,引入射频下的频域和瞬态 2 个物理场进行求 解计算;最后,对仿真数据进行后处理,分析干扰耦 合对电连接器性能的影响。

2.1 入射电磁脉冲

仿真选用符合 IEC 标准的电磁脉冲, 其表达式为:

$$E = E_0 e^{-4\pi \frac{(t-t_0)^2}{\tau^2}}$$
(1)

式中: E 为电场强度, E_0 为幅值, t 为时间, t_0 为初始时间, τ 为时间常数。幅值选用 50 kV/m 时的时域波形如图 4 所示。



2.2 仿真模型

射频电连接器主要依靠外导体屏蔽干扰电磁波。 本文建立的射频电连接器模型如图 5a 所示。在模型 中,通过偶极天线产生仿真需要的干扰电磁波,在电 连接器两端添加集总端口,并设置散射边界条件,使 仿真更加接近真实情况。模型中通过设置外导体连接 处不同的缝隙宽度来模拟电连接器不同的腐蚀程度, 缝隙宽度越大,表示腐蚀程度越深,如图 5b 所示。 电连接器参数见表 2^[25]。仿真内容包括:频域下干扰



电磁波频率和腐蚀退化缝隙宽度对电连接器内部耦 合电场的影响;时域下干扰电场强度和腐蚀缝隙宽度 对电连接器信号传输的影响。

Tab.2 Partial	structural	dimensions	of electrical	connector

结构件	尺寸/mm
内导体外径	0.635
外导体内径	2.065
插入段半径	0.451

2.3 仿真结果

2.3.1 频域分析

频率是影响电磁干扰效果的重要因素。为了分析 不同频率的干扰电磁波对电连接器内部电场强度的 影响,在电连接器内导体外表面沿着连接器的轴线方 向选择一条直线作为观察线(如图 6 所示),通过测 量这条线上不同点处电场强度的变化,进而分析电连 接器内部电场的分布变化情况。仿真分别选择低频段 (10~50 MHz)和高频段(6~10 GHz)干扰电磁波作 为对比组。低频干扰和高频干扰下的耦合电场强度仿 真结果如图 7 所示。



图 5 电连接器仿真模型 Fig.5 Electrical connector simulation model



图 6 电连接器内导体耦合电场强度观察线 Fig.6 Coupling electric field intensity observation line for internal conductor of electrical connector

从图 7 可以看出,总体而言,电连接器内部耦合 电场模量随着入射电磁脉冲频率的增大而增大,但是 由不同频率的干扰信号造成的电连接器内部耦合电 场模量的分布是不同的。对于低频干扰信号,沿着电 连接器轴向,耦合电场模量先增大、后减小,在电连 接器连接缝隙处取得极大值;对于高频干扰信号,沿 着电连接器轴向,耦合电场模量先减小、后增大,在 电连接器连接缝隙处取得极小值。连接缝隙处干扰电 场的模量随入射电场脉冲频率的影响较小,而电连接 器其他部位耦合电场模量随入射电场脉冲频率的变 化较大。

分析现象背后的原因,干扰信号从缝隙处进入电 连接器内部后向两边传递,不同频率的电磁波在电连 接器内部的传播速度是不同的,频率越高,速度越快,



图 7 不同频率下的耦合电场强度

Fig.7 Coupling electric field intensity at different frequencies: a) low frequency; b) high frequency

同时传递过程中电连接器内部的阻抗效应还会耗散 电磁波的能量。对于低频干扰信号,入射干扰信号的 传播速度小于电连接器内部能量的耗散速度,耦合电 场模量从入射缝隙处向两边递减;对于高频干扰信 号,入射干扰信号的传播速度大于电连接器内部能量 的耗散速度,耦合电场模量从入射缝隙处向两边递 增。随着电连接器腐蚀程度的加深,2个外导体连接 处之间的缝隙会逐渐增大,为了研究缝隙宽度对干扰 强度的影响,分别在腐蚀缝隙d为0.1、0.3、0.5、0.7、 0.9、1.1、1.3 mm下进行了耦合电场强度仿真,干扰 电磁波频率为10 GHz,仿真结果如图 8 和图 9 所示。

从图 8 和图 9 可以看出,电连接器内部耦合电场 强度随着腐蚀缝隙的加宽逐渐增大,增加速度逐渐减 缓。这是由于耦合电场强度存在一个上限,随着缝隙 加宽,耦合电场强度逐渐接近这个上限的缘故。为了 进一步明确入射电磁脉冲的耦合机理和耦合途径,选 择极化方向为 xz 平面的电磁脉冲作为干扰信号,在 10 GHz 下进行仿真,对比电连接器内导体表面在 3 个方向上耦合电场分量,如图 10 所示。从仿真结果



图 8 不同缝隙宽度下的耦合电场强度 Fig.8 Coupling electric field intensity under different gap widths



图 9 缝隙处耦合电场强度随腐蚀缝隙宽度的变化 Fig.9 Variation of coupling electric field intensity at the gap with the width of the corrosion gap

可以看出,电连接器内部各个方向的耦合电场分量存 在量级差距,其中 x 方向和 z 方向的幅值远大于 y 方 向。因此可以得出结论,电连接器内部的耦合电场分 量主要是与入射电磁脉冲极化方向相同的电场分量。

2.3.2 时域分析

为了研究电磁干扰对电连接器信号传输的影响 规律,在 COMSOL 中添加瞬态研究模块,研究时域 下传输信号的变化规律。将电连接器的输入输出端口 均设置为集总端口,输入信号设置为频率为 10 GHz 的正弦信号,干扰信号设置为幅值 50 kV/m 的电磁脉 冲。电连接器在完好状态下的仿真情况如图 11 所示。 可以看出,完好状态下,输入输出信号之间存在传输 距离导致的信号延迟,在波形及幅值大小上没有差 异,说明完好状态的电连接器可以有效屏蔽 50 kV/m 的电磁脉冲。

在电连接器发生腐蚀退化情况下,电连接器外导体连接处缝隙将会增大,屏蔽效能显著下降。由于电磁干扰产生的耦合电场将会在电连接器内部产生耦合电压,因此输出端口的电压将不再与输入端口保持



图 11 完好状态下输入输出端口时域响应 Fig.11 Time domain response of input and output ports in good condition

一致。分别将干扰电磁波的幅值设置为 10、20、30、 40、50 kV/m 进行仿真,腐蚀缝隙宽度为 0.9 mm,得 到输出端口电压的仿真结果如图 12 所示。可以看出, 随着干扰电磁波幅值的增大,输出信号的幅值也随之



图 12 不同干扰电磁脉冲强度对传输信号的影响 Fig.12 Effect of different interference electromagnetic pulse intensities on transmission signal

增大,并且波动剧烈。但随着时间推移,在仿真的后 半段,波动逐渐趋于平稳,这是由于干扰造成的耦合 电场在电连接器内部逐渐趋于稳定的缘故。

不同腐蚀缝隙宽度的电连接器在 50 kV/m 电磁 波干扰下,输出端口的电压仿真结果如图 13 所示。 可以看出,随着腐蚀缝隙宽度的增大,输出端口电压 波动幅值逐渐增大,信号失真度逐渐增大,这与频域 仿真中的耦合电场强度相吻合。



图 13 不问腐蚀建原见反对位撤信与时影响 Fig.13 Effect of different corrosion gap widths on transmission signal

3 结论

 1)腐蚀退化会极大地削弱航空射频电连接器的 电磁抗干扰能力。退化的电连接器内部耦合电场模量 随着入射电磁脉冲频率的增大而增大,但是高频和低 频干扰下的电连接器内部耦合电场模量的分布是不 同的。低频干扰时耦合电场模量在缝隙处取得极大 值,高频干扰时在缝隙处取得极小值。

2)腐蚀退化的电连接器内部耦合电场分量主要 是与入射电磁脉冲极化方向相同的电场分量,耦合电 场强度随着腐蚀缝隙的加宽逐渐增大。

3)受到入射电磁脉冲干扰的腐蚀退化电连接器

会使传输信号失真,入射电磁脉冲幅值越大,腐蚀缝 隙宽度越大,失真信号的震荡幅值越大。但这种影响 具有时限性,主要作用于干扰初期,随着耦合电场趋 于稳定,信号会逐渐趋于平稳。

参考文献:

2023, 20(4): 48-55.

- 许振晓, 郁大照, 刘琦. 岛礁环境下航空电连接器的腐 蚀及其对信号传输的影响[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 48-55.
 XU Z X, YU D Z, LIU Q. Corrosion of Avionics Connectors in Reef Environment and Its Effect on Signal Transmission[J]. Equipment Environmental Engineering,
- [2] 张薇, 张少甫, 牛作成. 强电磁脉冲对导弹无线通信系统的干扰分析[J]. 舰船电子对抗, 2023, 46(1): 22-27. ZHANG W, ZHANG S F, NIU Z C. Analysis of the Interference of Strong Electromagnetic Pulses on Missile-Borne Wireless Communication System[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2023, 46(1): 22-27.
- [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] 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.
- [9] 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, 2005. Chicago: IEEE, 2005.
- [10] 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.

- [11] REID M, PUNCH J, GRACE G, et al. Corrosion Resistance of Copper-Coated Contacts[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2006, 153(12): B513.
- [12] 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]// Electrical Contacts-1999. Proceedings of the Forty-Fifth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Pittsburgh: IEEE, 1999.
- [13] 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, 2001.
- [14] 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.
- [15] 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 of Influence of Corrosion on High Frequency Characteristics of Electrical Contacts[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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. Study on Failure Mechanism and Reliability of High Frequency Electrical Contact[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [19] 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): e22271.
- [20] 郁大照, 许振晓, 刘琦. 航空电连接器腐蚀对信号传输 影响的仿真分析[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(3): 96-101.
 YU D Z, XU Z X, LIU Q. Simulation Analysis of the Influence of Aviation Connector Corrosion on Signal Transmission[J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43 (3): 96-101.
- [21] 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 Y J, YU D Z, LIU Q. Simulation Research on Corrosion Degradation of Avionics Connectors[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(12): 116-127.

- [22] 张临志. 航空电连接器电接触退化状态评估方法研究
 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.
 ZHANG L Z. Research on Evaluation Method of Electrical Contact Degeneration of Aviation Electrical Connector[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [23] ARCHAMBEAULT B, CONNOR S, HALLIGAN M S, et al. Electromagnetic Radiation Resulting from PCB/ High-Density Connector Interfaces[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(4): 614-623.
- [24] TIAN X X, HALLIGAN M, LI X, et al. Modeling Electromagnetic Radiation at High-Density PCB/Connector Interfaces[C]// 2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). Raleigh: IEEE, 2014.
- [25] HALLIGAN M S, TIAN X X, LI X, et al. Quantifying High-Density Connector Radiation in a Lossy Multisignal Environment[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(1): 270-277.
- [26] MUSA S M, SADIKU M N O. Effective and Accurate Modelling of Multiconductor Transmission Lines in Multilayer Dielectric Media[J]. International Journal of Signal and Imaging Systems Engineering, 2014, 7(3): 195.
- [27] PARK I Y, ROWLANDS M, QUACH M, et al. QSFP28 Connector Footprint Optimization of Crosstalk and ILD_rms_dB for 25 GBPS Signaling[C]// 2015 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility and Signal Integrity. Santa Clara: IEEE, 2015.
- [28] HUANG S W, YE X N, KANG N, et al. Suppression of

Couplings in High-Speed Interconnects Using Absorbing Materials[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(5): 1432-1439.

- [29] LI J, LI X, TOOR S, et al. EMI Coupling Paths and Mitigation in a Board-to-Board Connector[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57(4): 771-779.
- [30] ZHANG L, LI X, JIAO X Y, et al. EMI Coupling Paths and Mitigation in Optical Transceiver Modules[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(6): 1848-1855.
- [31] 宗志祥. 连接器的电磁兼容性能研究[D]. 北京: 北京 邮电大学, 2020.
 ZONG Z X. Study on Electromagnetic Compatibility of Connectors[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [32] 饶韬. 基于 HFSS 对网络连接器信号完整性及电磁兼 容性能的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2024.
 RAO T. Research on Signal Integrity and Electromagnetic Compatibility of Network Connector Based on HFSS[D].
 Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024.
- [33] 许振晓, 郁大照, 周猛蛟, 等. 薄液膜对航空射频连接器信号传输影响的分析[J]. 海军航空大学学报, 2022, 37(6): 455-461.

XU Z X, YU D Z, ZHOU M J, et al. Analysis of Effect of Thin Liquid Film on Signal Transmission of Aerial RF Connector[J]. Journal of Naval Aviation University, 2022, 37(6): 455-461.