

振动对航空电连接器的影响分析

郁大照, 张彤

(海军航空大学, 山东 烟台 264000)

摘要: **目的** 根据提高电连接器可靠性的要求, 研究振动对航空电连接器的影响。**方法** 针对研究所的现有设备, 开展电连接器的振动测试。根据厂家数据使用 Solid works 对某型号电连接器进行参数化建模, 通过 COMSOL 模态分析获得接触件的固有频率, 使用 ANSYS Workbench 对接触件进行瞬态动力学分析和谐响应分析。在不同的振动方向、振动频率和振幅下测试电连接器的接触电阻。然后, 对电连接器执行对数扫频测试, 以获得振动加速度对接触电阻的影响, 仿真得到振幅对接触压力的影响。**结果及结论** 垂直振动电连接器比水平振动电连接器具有更高的接触电阻峰值。频率幅度越大, 接触电阻越大。在敏感方向上, 振动加速度量增大, 接触电阻发生剧烈变化。

关键词: 电连接器; 振动; 试验设计; Solidworks; ANSYS; COMSOL; 模态分析; 谐响应分析; 瞬态动力学分析

中图分类号: V240.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)06-0087-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.06.013

Analysis of the Influence of Vibration on Aviation Electrical Connectors

YU Da-zhao, ZHANG Tong

(Naval Aeronautical University, Yantai 264000, China)

ABSTRACT: This paper aims to improve the reliability of the electric connector and study the effect of vibration on aviation electric connector. According to the existing equipment design institute of electric connector vibration test, Solidworks data was used for a certain type electric connector parameterized modeling according to the manufacturer, then COMSOL was used to contact pieces of modal analysis to get contact with natural frequency, and then ANSYS Workbench was used to contact a transient dynamics analysis and harmonic response analysis. At different directions of vibration, vibration frequencies and amplitudes, the contact resistance of electrical connectors was test. Then, the electric connector perform logarithmic frequency sweep was tested. The influence of amplitude on contact pressure is simulated. The contact resistance of the vertical vibration electrical connector has a higher fluctuation peak value than that of the horizontal vibration electrical connector. In the sensitive direction, the vibration acceleration measure increases and the contact resistance changes dramatically.

KEY WORDS: electrical connectors; vibration; test design; Solidworks; ANSYS; COMSOL; modal analysis; harmonic response analysis; transient dynamic analysis

收稿日期: 2021-01-10; 修订日期: 2021-02-11

Received: 2021-01-10; Revised: 2021-02-11

基金项目: 国家自然科学基金 (51375490)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51375490)

作者简介: 郁大照 (1976—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为腐蚀防护。

Biography: YU Da-zhao (1976—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion protection.

引文格式: 郁大照, 张彤. 振动对航空电连接器的影响分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 087-093.

YU Da-zhao, ZHANG Tong. Analysis of the Influence of Vibration on Aviation Electrical Connectors[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(6): 087-093.

航空电连接器是航空飞机组件和系统之间传输电信号和相关控制信号的基本组件,电连接器的安全平稳运行已经成为飞机健康飞行的重要保证。航空飞机在工作时会产生振动,因此研究振动对航空电连接器的影响十分必要。

机载设备中到处都有振动。在外部机械振动应力的作用下,插头和插座之间会有相对较小的运动幅度,这会在接触点产生各种磨损,称为微动磨损^[1]。振动是导致电连接器性能下降的主要原因之一^[2],由于振动引起的电连接器接触表面的机械变形和损坏会影响电连接器的电气性能、安全性能和力学性能^[3-5]。振动还会导致电连接器的接触表面磨损,并且造成触点接触不良,从而导致断路现象发生。由振动产生的摩擦热进一步促进了氧化层的生长,并改变了电连接器的接触性能^[6]。不同的振动幅度和频率对电连接器的性能有不同的影响^[7-9]。

国内外研究人员在分析振动对电连接器的影响方面作出了杰出的贡献。在振动应力研究方面,不同电连接器因为镀层材料、摩擦性能以及结构尺寸等不同,受振动影响的大小和性能变化趋势也不尽相同^[10-11],其中镀锡电连接器性能对振动尤其敏感^[12-13]。Lim^[14]专门总结了各类金属、陶瓷等多种材料的振动磨损机理,为研究振动磨损提供了一定的理论支持。McBride等人^[15-17]在电连接器的振动试验上开展了大量研究。Johannes等开发了一套能为电连接器提供频率达到300 Hz的振动平台,采用Wöhler^[18]法加载振动载荷,发现振幅对电连接器寿命有显著影响。微动磨损造成了接触电阻的增大,破坏接触件表面镀层,造成氧化和腐蚀,最终导致失效。骆燕燕等^[19]研究了交替振动下电连接器的应力松弛和磨损,并分析了接触件接触性能下降的原理。

1 电连接器振动试验设计

1.1 电连接器振动试验条件

采用广州某研究所提供的电磁振动台,型号为ACT2000-R0320S,如图1所示。通电的导体通过磁场的电磁力移动,当电磁振动台磁路中的动圈通过交流信号时,设备会产生激励力,从而在磁路中产生振动。额定频率为5~2000 Hz,振动方式分为随机和扫频,试验系统原理如图2所示。

试验时,借助HT702高低温湿热试验箱固定电连接器,如图3、图4所示。根据GJB 1217A—2009《电连接器试验方法》,将电连接器的实验样品固定在设备上,样品以正常方式插合好,防止实验过程中因样品位置变动引起检测误差。依照GJB 599A—1993规定的J599型电连接器的振动试验方法设计试验条件。

振动频率主要为10、20 Hz固定频率振动以及20~1000 Hz扫描频率振动。首先,在不同的振动方向、振动频率和振幅下测试接触电阻。水平和垂直方



图1 电磁振动台

Fig.1 Electromagnetic vibration table

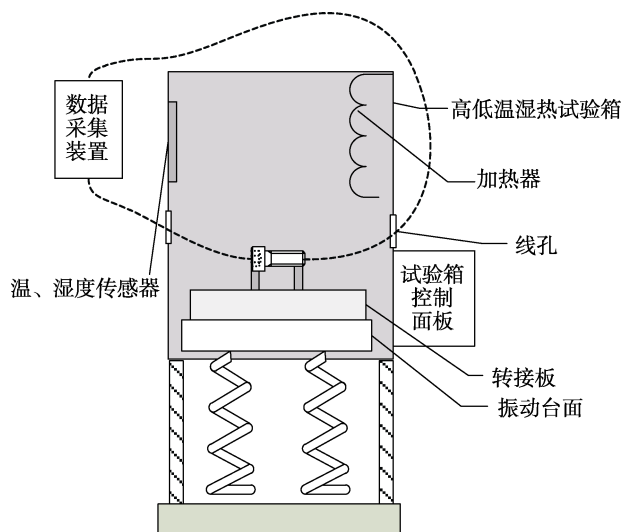


图2 试验系统原理

Fig.2 The schematic diagram of testing system



图3 高低温湿热试验箱

Fig.3 High and low temperature damp and hot test chamber



图 4 电连接器摆放图

Fig.4 Layout of electrical connectors

向的振动测试分别以 10、20 Hz 进行, 振动幅度从 0.5 mm 逐步增加到 9 mm。振动 5 s 后, 停止每个振幅, 并将振幅调整为 0.5 mm。然后, 对电连接器执行对数扫描测试, 以研究振动加速度对接触电阻的影响, 频率范围为 20~1000 Hz, 加速度分别取值 5 g、10 g 和 15 g, 时间为 25 s。

1.2 定频变幅振动试验结果分析

整个试验过程中测试到的接触电阻随时间的变化如图 5 所示。图 5a 中, 电连接器水平放置, 振动方向垂直连接器轴向, 频率为 10 Hz, 初始振幅为 0.5 mm。振动从第 10 s 开始加载, 加载时长为 5 s,

间隔 5 s 加载下一振幅振动。由图 5a 可知, 初次加载振动时, 接触电阻就开始产生波动, 峰值为 11.68 mΩ。在振动间隔期, 接触电阻基本维持稳定, 平均值为 6.81 mΩ。振幅为 1 mm 时, 接触电阻的波动峰值为 13.27 mΩ。随着振幅的增大, 接触电阻波动峰值稳定增大。当振幅达到 9 mm 时, 接触电阻已增大至 62.15 mΩ。由图 5b、c、d 可知, 当振动频率和振动方向改变时, 接触电阻随振幅的变化趋势基本相同。主要区别在于接触电阻在不同的时间点波动, 并且接触电阻对幅度波动的敏感度也不同。当振动的幅度和频率相同时, 垂直振动电连接器的接触电阻峰值比水平振动电连接器高。频率为 20 Hz 时的振动比 10 Hz 的接触电阻波动峰值更高。

对比图 5a、b 发现, 在低频振动中, 在同一种安装方式和振幅下, 频率越大, 对于接触电阻的影响越剧烈。由图 5 可知, 在同一安装方式和频率下, 接触电阻随着振动幅值的增大而增大。

1.3 定幅扫频振动试验结果分析

定幅扫频振动试验过程中测试得到的接触电阻如图 6 所示。未加载振动时, 接触电阻平均值为 10.45 mΩ; 扫频开始后, 接触电阻出现骤升, 之后随着频率的增大而减小; 扫频经过 10 s 左右, 频率进入

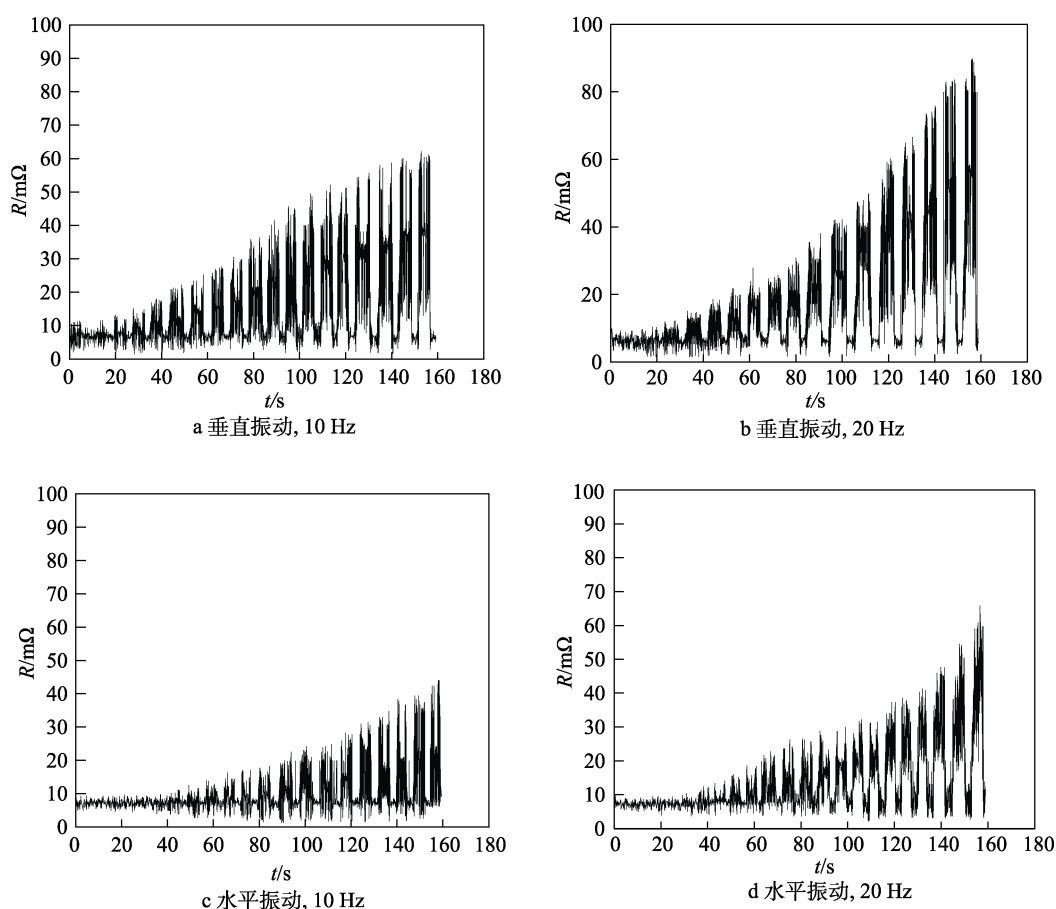


图 5 振动条件下电连接器不同安装方式的接触电阻

Fig.5 The contact resistance of different ways for installation under vibration: a) vertical vibration, 10 Hz; b) vertical vibration, 20 Hz; c) horizontal vibration, 10 Hz; d) horizontal vibration, 20 Hz

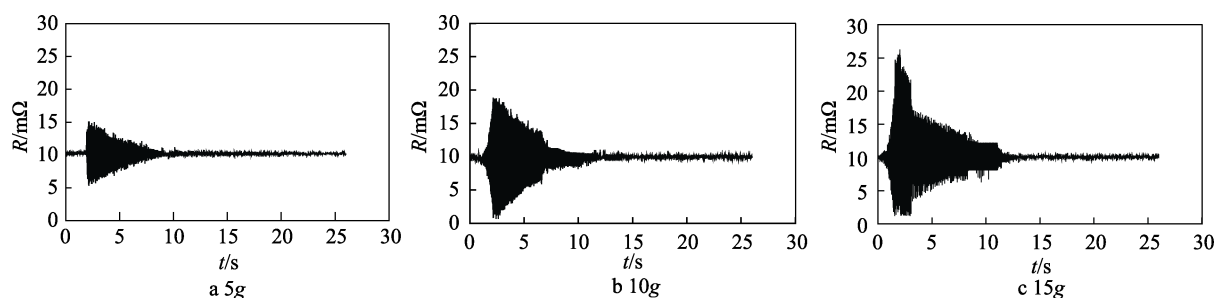


图6 扫频试验接触电阻

Fig.6 The contact resistance of frequency sweep test

中高频段后,接触电阻接近稳态值。在加速度为 5 g、10 g 和 15 g 的扫频试验中,接触电阻峰值分别为 10.06、18.86、26.22 mΩ。随着振动加速度的增加,接触电阻波动的最大值也增加。

以 5 g 加速度扫频试验的结果(图 7)为例,扫频从第 2 s 开始,接触电阻在第 4 个振动周期达到波动最大峰值 14.55 mΩ,这是因为电振动台需要 3~4 个周期才能达到编程值。达到初始最大峰值后,峰值接触电阻波动会随时间减小。10 s 后,最大接触电阻波动保持稳定。外加激励振幅达到设定值以后,在整个扫频试验周期内,接触电阻随振动频率的增大逐渐下降。高频段振动时,动态的接触电阻值在静态接触电阻阻值附近波动,数值较为稳定。整个过程中,接触电阻值变化较剧烈的时间也随着加速度量级的增大而增长。

由振动环境应力试验结果可知,在相同的振动条件下,垂直振动电连接器的接触电阻比水平振动波动更加剧烈,即电连接器的敏感方向为垂直振动方向。在敏感方向上,接触电阻随相同频率下振动幅度的增

大而增大。如果在敏感方向上的振幅相同,则低频振动对接触电阻的影响较大,而高频振动对接触电阻的影响则不明显。在敏感方向上,相同的频率扫描测试中,接触电阻的大小随振动加速度的增大而增加迅速。

2 振动仿真分析

2.1 接触件建模与前处理

J599 型电连接器是航空飞机最常用的电连接器,其接触件为典型的圆柱型双开槽结构。根据沈阳某 J599 型电连接器生产厂所给图纸,利用 Solidworks 建立 22D#型号的插针插孔的 3D 模型,如图 8 与图 9 所示。

在实际工程中,插孔的半径大于插针的半径。当直接连接时,插针和插孔之间会形成间隙,并且不会形成接触力^[20]。因此在装配之前,需要对插孔进行收口处理,使插针插孔之间产生过盈配合。为了方便仿真分析,在插孔建模时,直接接收口后的模型建立,

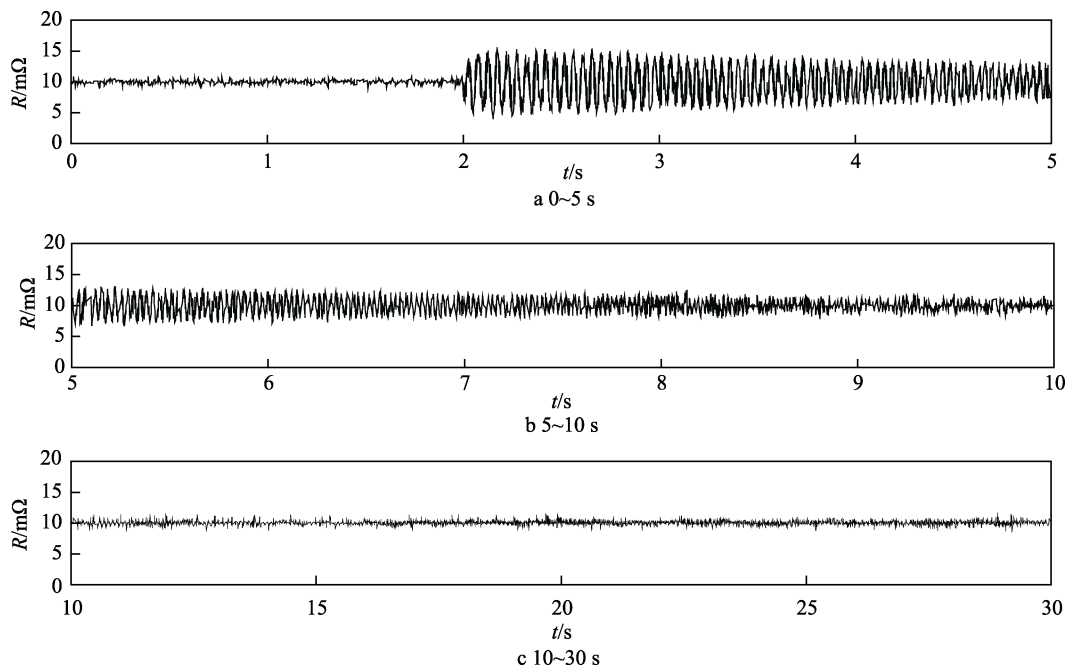


图7 5g 扫频试验接触电阻

Fig.7 The contact resistance of 5g frequency sweep test

省去了计算接触力，进而计算收口量的步骤。收口量的大小均按厂家实际计算使用，将插针插孔形成装配体如图 10 所示。将装配体导入 COMSOL，并进行网格划分，如图 11 所示。选择材料为锡青铜，材料力学属性见表 1。

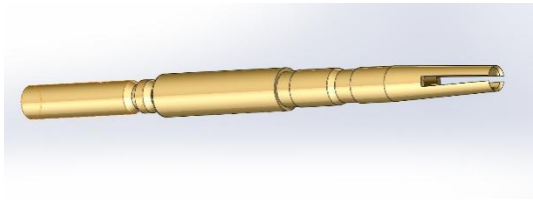


图 8 插孔模型
Fig8 Jack model

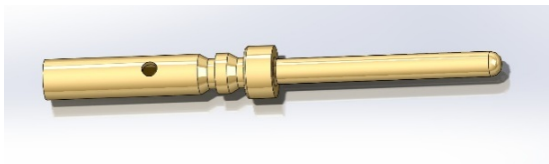


图 9 插针模型
Fig.9 Pinpoint model

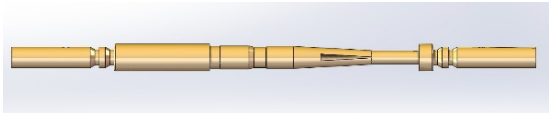


图 10 装配体模型
Fig.10 Assembly Model

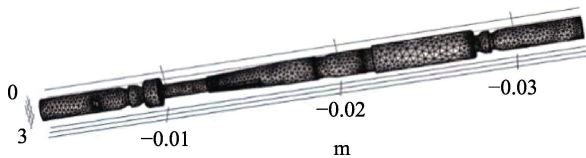


图 11 COMSOL 网格划分
Fig.11 COMSOL grid division

2.2 模态分析

模态分析在结构动力学研究中起着重要作用。根据模型的结构和物理特性，以矩阵形式反映元素的质量和刚度，将多自由度系统简化为单自由度系统，以解决特征值问题，并获得模态参数（如固有频率、模态形状以及对模型负载的动态响应）。这有助于发现结构缺陷，用于结构优化和设计参数的选取，也是其他动力学分析（响应谱分析、随机振动分析、谐响应分析）的基础。

表 1 接触件材料基本参数
Tab.1 Basic parameters of contact material

参数项	密度/(kg·m ⁻³)	杨氏模量/GPa	泊松比/MPa	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	抗拉极限/MPa	摩擦系数
参数值	8960	103.4	0.33	350	200	550	0.2

一个 n 自由度的模型，振动系统用矩阵表示为：

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \tag{1}$$

式中： M 为系统的质量矩阵； C 为系统的阻尼矩阵； K 为系统的刚度矩阵； F 为系统的激励力； X 为系统某点的位移向量； $\ddot{X}$ 为 X 的二阶导数； $\dot{X}$ 为 X 的一阶导数。对方程求解可以得到 n 个特征值，依次对应模型的 n 个固有频率，这种在自由状态下的振动特性就成为模型的模态。

接触件的一至四阶的固有频率见表 2，模态如图 11 所示。可以看出，接触件的一阶模态沿 XOZ 平面向上弯曲，二阶模态沿 Z 轴即接触件水平方向产生扭曲，一、二阶模态在插针尾部的变化程度都达到最大值。接触件三阶模态沿 XOY 平面发生弯曲，四阶模态沿 XOZ 平面发生弯曲，且三、四阶模态的弯曲程度较大，在插针与插孔的接触区域最为显著。在电连接器工作时，外界激励力的振动频率与第三阶和第四阶固有频率接近时，共振造成的损伤最为严重。

2.3 瞬态动力学分析

瞬态动力学分析反映了载荷随时间变化时的结构响应，分析使用非线性瞬态动力学方程式，允许使用非线性材料、几何形状和接触类型。ANSYS 瞬态

表 2 接触件固有频率
Tab.2 The inherent frequency of contact

阶数	频率/Hz
1	1273
2	1305
3	2503
4	3716

动力学模块考虑了惯性和阻尼力，沿 x 和 y 方向将激励载荷施加到模型上，并得出载荷的动力学方程为：

$$D = A \sin(2\pi ft + \theta) \tag{2}$$

式中： A 为振幅； f 为振动频率； θ 为相位角。

最小步进时间是瞬态动力学分析中的关键参数，为了确保求解和计算结果的准确性，将每个振动周期设置为一个计算步骤，并在每个计算步骤中设置 20 个子步骤，以满足最短的步骤时间。因此 Δt 表达式可写为：

$$\Delta t \leq \frac{1}{20f} \tag{3}$$

为了与 2.2 节的试验结果进行对比，在仿真过程中，振动载荷沿插针的水平方向和垂直方向施加，频率分别设置 10 和 20 Hz，振幅是 0.5~9 mm 的步进振

幅。由式(2)求解位移载荷,由式(3)确定最小时间步长。从求解结果中,选择每个振幅振荡周期中的最小接触压力,并绘制一条曲线,如图12所示。

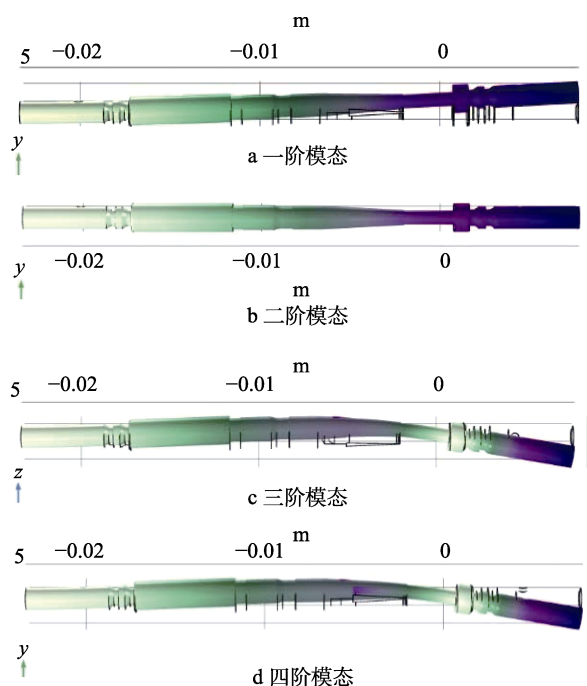


图12 接触件固有模态云图

Fig.12 The connector natural mode of vibration: a) first order mode; b) second order mode; c) third order mode; d) fourth order mode

图13显示了以特定频率振动时最小接触压力与振幅之间的关系,可以看出,如果振动方向和振动频率不变,则最小接触压力会随着振幅的增加而减小。在水平振动中,振幅越大,最小接触压力下降越快。在相同振幅下以10 Hz振动的接触压力大于在20 Hz振动的接触压力。这是因为当频率保持相同时,振幅越大,接触件的运动越快,因此插孔更容易弹开。

对于垂直振动,最小接触压力随振幅的变化尚不显著,并且很大程度上取决于运动模式。在水平振动期间,接触件的相对运动受到同轴中心水平运动的影响,振幅和频率的变化主要表现在相对运动速度和加速度中,并且接触面积几乎不变。接触电阻主要与接触压力有关,在垂直振动期间,接触件间存在明显的未对准,最小接触压力有所降低,但平均接触压力却明显增加。该变化带来了接触面积的改变和接触区域位置的变化,并且接触电阻受到接触压力和接触区域的影响,这与图5中的实验一致。

2.4 谐响应分析

在瞬态动力学分析模块中,由于最小时间步长的限制,使得高频分析时计算结果不准确,因此在涉及高频仿真时,采用谐响应分析模块。谐响应分析基于模态叠加法,摩擦类的非线性接触会转换为线性接触。谐响应分析使用插孔收口的配合模型,前处理与

插拔分析基本一致。设置接触件频率参数为20~1000 Hz的对数扫频,频率载荷施加方向为垂直方向,求解得到不同频率下接触压力波动幅值,如图14所示。由图14可知,接触压力的波动幅值随频率的增大而减小,接触压力的减小会减小插针与插孔之间的实际接触面积,增大接触电阻,这与图5所示的试验结果相一致。

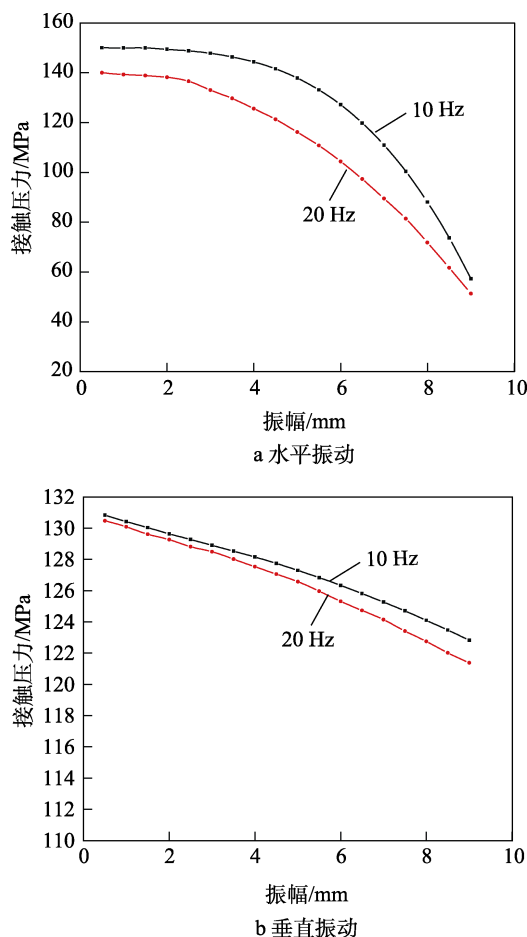


图13 最小接触压力与振幅关系

Fig.13 The relationship between minimum contact pressure and amplitude: a) horizontal vibration; b) vertical vibration

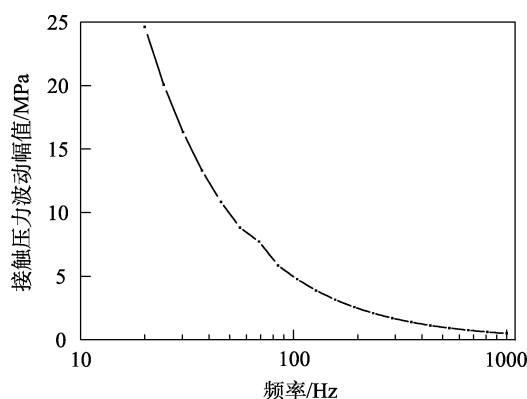


图14 接触压力波动幅值与频率关系

Fig.14 The relevance between contact pressure fluctuate and frequency

3 结论

1) 试验表明, 垂直振动电连接器的接触电阻比水平振动具有更高的波动峰值, 频率幅值越大, 接触电阻越大。低频振动对接触电阻的影响较大, 而高频振动对接触电阻的影响则不明显。在敏感方向上, 振动加速度与振动幅度的增大都会增大接触电阻。

2) 对电连接器进行模态分析可知, 在电连接器工作时, 外界激励力的振动频率与第三阶和第四阶固有频率接近时, 共振造成的损伤最为严重。

3) 振幅与频率的增大都会减小插针与插孔的接触压力, 同时水平振动对接触压力的影响大于垂直振动。接触压力的减小会减小接触区域的实际接触面积, 进而增大接触电阻。

参考文献:

- [1] 任万滨, 焦玉斌, 翟国富. 电连接器微动磨损研究综述[J]. 机电元件, 2010(1): 28-38.
REN W B, JIAO Y B, ZHAI G F. Review of fretting wear for electrical connector[J]. Electromechanical components, 2010(1): 28-38.
- [2] SUNG I H, KIM J W, NOH H J, et al. Effect of displacement and humidity on contact resistance of copper electrical contacts[J]. Tribology International, 2016, 95: 256-261.
- [3] STEFAN M G, WILLIAM F B III, BRIAND L. F-22 lessons learned: Line replaceable module(LRM) electrical connector-an investigation of vibration-induced contact wear and electro static discharge hardening[C]// Proceedings of the ASME 2009 international mechanical engineering. Lake Buena Vista, Florida, USA: [s. n.], 2009.
- [4] ITO T, OGIHARA S, HATTORI Y. Observation of structural transition of tin plated fretting contacts using FIB-SEM[J]. IEICE transactions on electronics, 2011(9): 1350-1355.
- [5] ITO T, NOMURA Y, HATTORI Y. Observation of tin plated fretting contacts using FIB-SEM[J]. IEICE transactions on electronics, 2010(9): 1452-1455.
- [6] POMPANON F, LAPORTE J, FOUVRY S, et al. Normal force and displacement amplitude influences on silver-plated electrical contacts subjected to fretting wear: A basic friction energy contact compliance formulation[J]. Wear, 2019, 426-427: 652-661.
- [7] MICHPOULOS J, TSOMANOPOULOU P, HOUSTIS E, et al. On a data-driven environment for multiphysics applications[J]. Future generation computer systems, 2005, 21(6): 953-968.
- [8] XIE F. A study of vibration-induced fretting corrosion for electrical connectors[D]. Auburn: Auburn University, 2007.
- [9] 文艺. 电连接器温度场数值分析研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
WEN Y. Numerical analysis on the temperature field of electrical connectors[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2012.
- [10] FLOWERS G T, XIE F, BOZACK M J, et al. The influence of contact interface characteristics on vibration-induced fretting degradation[C]// Proceedings of the 51st IEEE Holm conference on electrical contacts. [s. l.]: IEEE, 2005.
- [11] FLOWERS G T, XIE F, BOZACK M J, et al. A study of the physical characteristics of vibration induced fretting corrosion[C]// IEEE Holm conference on electrical contacts & the international conference on electrical contacts. Montreal: [s. n.], 2006.
- [12] MALUCCI R D. Impact of fretting parameters on contact degradation[C]// Proceedings of the 42nd IEEE Holm conference on electrical contacts. [s. l.]: IEEE, 1996.
- [13] HEATON C E, MCCARTHY S L. High cycle fretting corrosion studies on tin-coated contact materials[C]// Proceedings of the 47th IEEE Holm conference on electrical contacts. [s. l.]: IEEE, 2001.
- [14] LIM S C. Recent developments in wear-mechanism maps[J]. Tribol Int, 1998, 31(1-3): 87-97.
- [15] SWINGLER J, MCBRIDE J W. Fretting corrosion and the reliability of multicontact connector terminals[J]. IEEE transactions on components and packaging technologies, 2002, 25(4): 670-676.
- [16] HANNEL S, FOUVRY S, KAPSA P H, et al. The fretting sliding transition as a criterion for electrical contact performance[J]. Wear, 2001, 249(9): 761-770.
- [17] PARK Y W, NARAYANAN T S N, LEE K Y. Effect on fretting amplitude and frequency on the fretting corrosion behavior of tin plated contacts[J]. Surface & coatings technology, 2006, 201(6): 2181-2192.
- [18] JOHANNES S, IVANOV Y, KRÖGER B, et al. Durability studies on vibration loaded electrical contact systems subjected to tribological stress[J]. Materialprüfung, 2019, 61(2): 105-110.
- [19] 骆燕燕, 张乐, 孟凡斌, 等. 振动环境下电连接器接触性能退化机理[J]. 中国机械工程, 2018, 29(16): 1952-1957.
LUO Y Y, ZHANG L, MENG F B, et al. Contact performance degradation mechanism of electrical connectors under vibration conditions[J]. China mechanical engineering, 2018, 29(16): 1952-1957.
- [20] 张彤, 郁大照. 航空电连接器力学性能和电学性能仿真[J]. 海军航空工程学院学报, 2020, 35(2): 181-188.
T ZHANG, D YU. Simulation of mechanical and electrical properties of avionics connectors[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2020, 35(2): 181-188.