

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.05.013

配合误差对电连接器疲劳寿命影响的建模与评估

杨 强, 代朋飞, 邱 豪, 孙志礼
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 以某型电连接器通用接触件 22[#] 插针插孔为研究对象, 基于 Brown – Miller 修正准则, 建立了电连接器接触件材料的应变 – 寿命方程. 应用有限元方法计算了接触件单次插拔过程中的力学性能, 基于 Fe – Safe 软件建立了接触件接触疲劳寿命的仿真计算模型, 进而完成了配合误差对电连接器疲劳寿命影响的量化评估. 疲劳寿命分析结果表明: 该型电连接器在满足设计寿命条件下, 允许的最大位移误差为 0.038 mm, 角度误差为 0.621°, 复合误差为 0.03 mm 和 0.405°. 根据分析结果提出了提高电连接器疲劳寿命的具体建议, 为该型电连接器接触件制造、装配误差控制和工艺改进提供了理论依据.

关 键 词: 电连接器; 接触件; 疲劳寿命; 配合误差; 接触性能

中图分类号: TH 112 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005 – 3026(2018)05 – 0668 – 06

Modeling and Evaluation of the Mating Error Influences to the Fatigue Life of a Electrical Connector

YANG Qiang, DAI Peng-fei, QIU Hao, SUN Zhi-li
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: YANG Qiang, E-mail: qiangyang@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Taking a certain type 22[#] pin jack electrical connector as the research object, the strain-life equation of the contact material was established based on the Brown-Miller correction criterion. The mechanical properties of a single insertion and extraction process of the contact part were calculated by finite element method and the contact fatigue life model of the contact part was established based on the Fe-Safe software. Then the quantitative evaluation of the influence of the mating error to the fatigue life of the electrical connector is completed. The results of fatigue life analysis show that the maximum displacement error is 0.038 mm, the angle error is 0.621°, and the compound error is 0.03 mm and 0.405° under the designed life condition. According to the results, detail fatigue life improving suggests for the electrical connector are proposed, the result provides a theoretical basis for the manufacturing and control of assembling errors and process improvement for the connector.

Key words: electrical connector; contact part; fatigue life; coordination error; contact performance

在电路导通和信号的控制中,电连接器扮演着重要角色. 接触件是实现电连接器工作的关键部件^[1],接触件的疲劳寿命对电连接器的工作性能起着决定性作用. 分析某型在役电连接器接触件的危险区域并估算出其疲劳寿命,对预防因接触件失效而引发的重大航空事故,以及指导电连接器接触件的设计、加工和检验具有重要的实际意义.

Li 等^[2] 计算了不同摩擦系数下接触件间的插入力以及对其接触可靠性进行了分析. Jian 等^[3] 研究了对电连接器触头进行不同纳米电镀情况下的接触性能,并进行了实验验证. 于红光^[4] 对电连接器触头焊点的寿命进行了研究分析,指出了改善电连接器焊点寿命可靠性的具体

措施. 陈文华等^[5]研究了工作状态对电连接器接触件存储寿命的影响,并结合相关实验得到了考虑工作因素后对接触件寿命影响的具体数值. Liao 等^[6]对激光焊接在电连接器上的应用进行了相关讨论. Li 等^[7]利用 Ansys 参数化设计模块提出了一种接触性能模拟分析的新方法. Laurvick 等^[8]对试验条件下的微接触性能与可靠性之间的关系进行了研究. Fu 等^[9]研究了车用电连接器接触电阻与结构参数之间的关系. Zhang 等^[10]基于 Abaqus 研究了振动对电连接器微动腐蚀的影响,并进行了实验验证. 本文针对某在役军用航空电连接器,采用修正的 Brown – Miller 临界平面法,建立了接触件材料的应变 – 寿命方程式. 利用 SolidWorks 软件,建立了接触件精确的三维实体模型及静力学配合模型. 运用 Abaqus 进行有限元分析,仿真计算了存在配合误差条件下接触件单次插拔过程中的接触性能. 最后,通过将有限元分析的结果文件导入到 Fe – Safe 中,将单次插拔时的应变作为边界条件,计算存在配合误差时接触件的接触疲劳寿命. 定量地分析了配合误差对电连接器疲劳寿命的影响,基于分析结果给出了提高电连接器接触疲劳寿命的具体措施.

1 接触件应变 – 寿命方程式

电连接器接触件材料锡青铜属于韧性较好的金属材料,因此,采用适应于韧性材料的 Brown – Miller 临界平面法建立接触件的疲劳寿命评估模型.

将传统的应变 – 寿命等式的左边以剪切应变幅值和法向应变幅值表示,则可得到 Brown – Miller 的应变寿命方程为

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_n}{2} = C_1 \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + C_2 \varepsilon_f (2N_f)^c. \tag{1}$$

式中: $\Delta\gamma_{\max}$ 为最大剪应变范围; $\Delta\varepsilon_n$ 为最大剪应变平面上的法向应变范围; σ_f 为疲劳强度系数; E 为弹性模量; ε_f 为疲劳延性系数; b 为疲劳强度指数; c 为疲劳延性指数; N_f 是以循环数表示的疲劳寿命; C_1 为弹性情况下的实常数; C_2 为塑性情况下的实常数.

对于弹性问题,锡青铜材料的泊松比 $\nu = 0.34$,因此, $\Delta\gamma_{\max} = 1.34\Delta\varepsilon_1$, $\Delta\varepsilon_n = 0.33\Delta\varepsilon_1$,则 $C_1 = 1.67$;对于塑性问题,采用同样的方法计算得: $C_2 = 1.75$. 其中, $\Delta\varepsilon_1$ 为主应变.

因此,Brown – Miller 应变 – 寿命方程式为

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_n}{2} = 1.67 \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + 1.75 \varepsilon_f (2N_f)^c. \tag{2}$$

由于接触件插孔在插拔过程中承受应力的不均匀性,因此需要考虑平均应力对其疲劳寿命的影响,采取 Morrow 平均应力修正后,Brown – Miller 应变 – 寿命方程式为

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_n}{2} = 1.67 \frac{\sigma_f - \sigma_{m,n}}{E} (2N_f)^b + 1.75 \varepsilon_f (2N_f)^c. \tag{3}$$

式中, $\sigma_{m,n}$ 为平均正应力,其余各参数和式(1)中意义一样.

由于 Fe – Safe 本身的数据库中没有锡青铜材料的疲劳性能数据,需要根据该材料的屈服应力 $\sigma_s = 280$ MPa,弹性模量 $E = 110$ GPa;采用 Seeger 估算法得到该材料的疲劳性能数据,即 $b = -0.087$, $c = -0.58$, $\sigma_f = 420$ MPa, $\varepsilon_f = 0.59$. 根据以上参数在 Matlab 中绘出接触件材料的应变 – 疲劳寿命曲线,如图 1 所示.

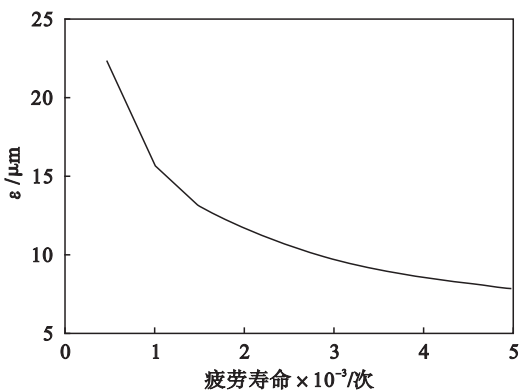


图 1 应变 – 疲劳寿命曲线图
Fig. 1 Curve of strain-fatigue life

2 配合误差对电连接器接触性能的影响

由于电连接器接触件存在制造误差和装配误差,电连接器在插拔过程中容易出现插针斜插入到插孔的现象,插针和插孔簧片的内壁之间会出现挤压现象. 一方面会造成接触件间插拔力的增大,另一方面多次插拔会导致接触件断裂疲劳破坏现象的发生,严重影响接触件正常的工作性能以及其疲劳寿命. 当电连接器的材料、接触件对数确定时,配合误差对接触件疲劳寿命的影响是决定电连接器可靠性的主要因素之一.

2.1 配合误差描述

电连接器接触件工作过程中,其存在配合误

差的接触件配合模型如图 2 所示:(a)表示接触件工作过程中,插针的轴线和插孔的轴线共线,这是理想条件下的接触件工作模型;(b)表示插针的轴线与插孔的轴线存在径向位移偏差的配合模型;(c)表示插针的轴线与插孔的轴线存在角度偏差的配合模型;(d)表示插针的轴线与插孔的轴线同时存在位移偏差和角度偏差的复合误差配合模型.通过查找相关资料和实际调查发现,配合模型(d)是接触件工作过程中较常出现的情形.

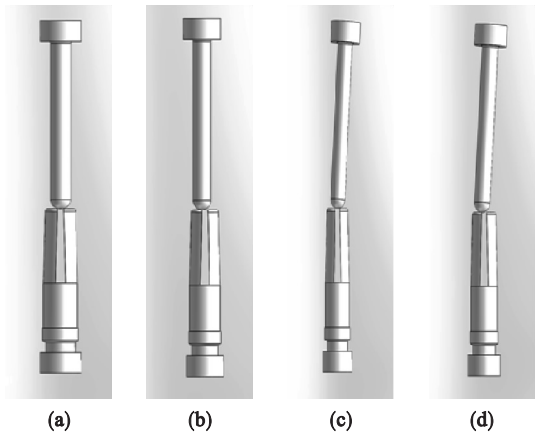


图 2 接触件的配合模型
Fig. 2 Mating model of contact part

2.2 单次插拔过程中接触性能分析

根据某型电连接器通用接触件 22#插针插孔的结构尺寸,基于 SolidWorks 建立接触件的三维配合模型,将其导入 Abaqus 中并参照表 1 对接触件进行材料属性定义,进行有限元分析,结果如图 3~6 所示.

表 1 接触件材料属性				
Table 1 Contact part material properties				
接触件	材料	弹性模量 MPa	泊松比	密度 kg·m ⁻³
插针	黄铜	1.1×10 ⁵	0.33	8.9×10 ³
插孔	锡青铜	1.0×10 ⁵	0.34	8.8×10 ³



图 3 插孔簧片的等效应力云图
Fig. 3 Equivalent stress cloud of jack reed

图 3~图 5 表示插针完全插入到插孔时的接触性能示意图.从图中可以看出:接触件间的最大

等效应力为 600.6 MPa;径向最大等效位移为 4.96×10^{-2} mm;最大接触压强为 315.4 MPa.图 6 表示插针从开始插入插孔到拔出插孔过程中,插拔力的变化曲线图,从图中可以看出其稳定分离力的值为 0.5135 N.

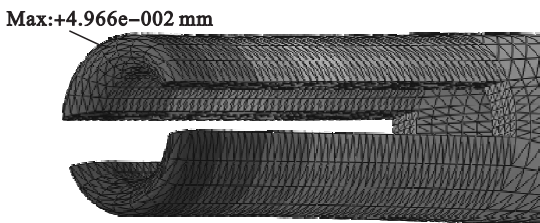


图 4 插孔簧片径向位移的等效云图
Fig. 4 Equivalent cloud of jack reed radial displacement

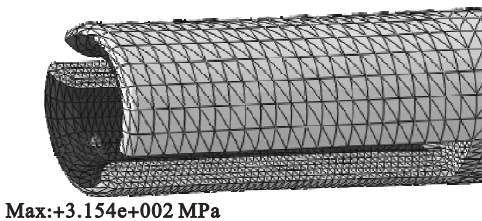


图 5 等效接触压强云图
Fig. 5 Equivalent contact pressure cloud

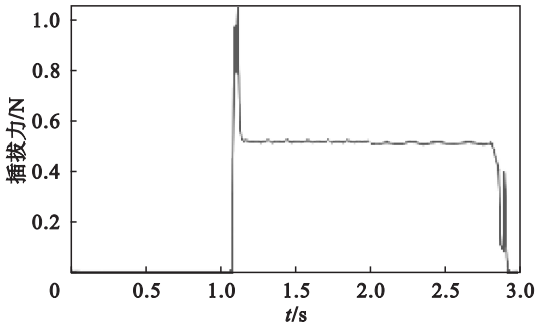


图 6 接触件插拔力示意图
Fig. 6 Schematic diagram of the contact part insertion force

2.3 位移、角度误差对接触性能的影响分析

结合接触件配合的实际情况及有限元仿真结果,选定接触件配合的位移误差为 0,0.005,0.01,0.02,0.03 mm 时其接触性能结果见图 7.

从图 7 可知:随着位移误差的增大,插孔簧片根部的最大等效应力、接触件间最大分离力以及最大径向位移均随着位移误差的增大而增大.这是因为随着位移误差的增大,接触件插孔端部的开口量增大,导致簧片的变形量增加,接触件间的等效接触压力增大,根部等效弯曲应力增大.接触件间的最大分离力的平均变化率达到 70.23%,明显高于最大等效应力和最大径向位移的变化率.从图可知:接触件间的最大等效接触压强的大小随着位移误差的增大却有小幅度上下波动的现

象. 这是因为随着配合位移误差增大,接触件间的接触位置在不断地变化,出现最大等效接触压强的位置不确定,因此等效接触压强会出现小幅度波动. 但是此时接触件的材料内部已发生塑性变形,且随着位移误差的增大,簧片根部等效弯曲应力的值随之增大,接触件材料的塑性变形严重,对接触件的疲劳寿命有直接的影响,因此接触件配合时,要控制其配合的精度. 角度误差对接触性能的影响趋势与位移误差类似,限于篇幅,在此不再赘述,如图 8 所示.

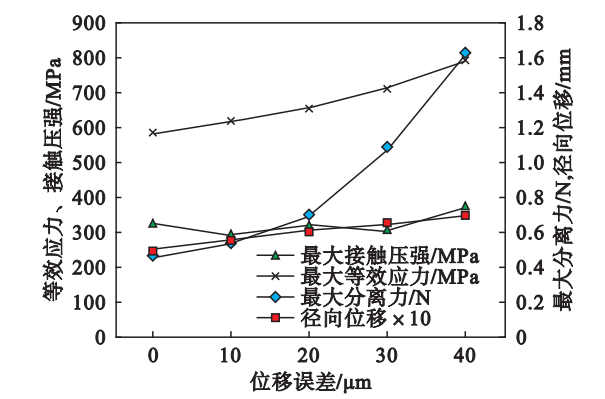


图 7 位移误差对接触性能的影响
Fig. 7 Effect of displacement error on contact performance

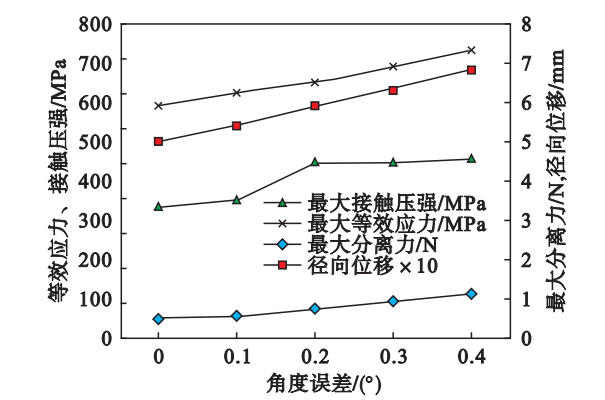


图 8 角度误差对接触性能的影响
Fig. 8 Effect of angle error on contact performance

2.3 复合误差对接触性能的影响

图 9 为复合误差对接触性能的影响. 在位移误差为 0.005 mm 的前提下,随着角度误差的不断增大,其接触件间的最大分离力、插孔簧片根部的最大等效弯曲应力以及插孔簧片端部最大径向位移均随之增大,并且近似地呈线性增加. 这是由于随着角度误差的变大,插孔簧片的变形量也不断变大. 但接触件间等效接触压强却出现上下波动,这是由于随着角度误差的增加,出现最大接触压强的位置不确定造成的. 而且,当接触件配合角

度误差由 0 到 0.1° 时,接触件间的接触性能均出现一个折变,其变化率与后面的变化率不一致,这是因为接触件配合误差中,位移误差和角度误差对接触性能影响的相互作用造成的.

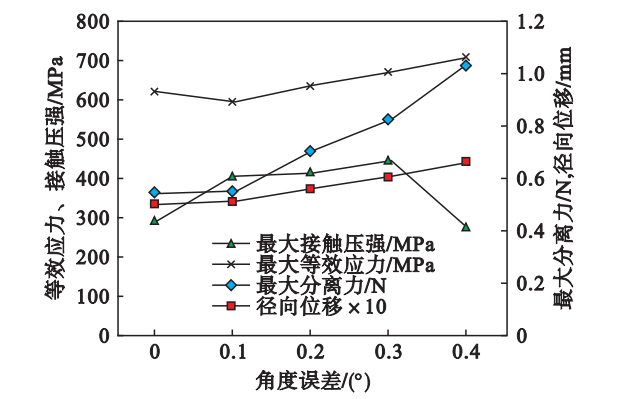


图 9 复合误差对接触性能的影响
Fig. 9 Effect of compound error on contact performance

3 配合误差对电连接器疲劳寿命的影响

通过将有限元分析的结果文件导入到耐久性分析软件 Fe - Safe 中,将单次插拔过程中的动态应变载荷作为边界条件,以产生 0.02 mm 裂纹时的疲劳寿命为评估寿命,建立接触件疲劳寿命的仿真计算模型. 进而,利用该模型完成了配合误差对接触疲劳寿命影响的定量化评估.

3.1 位移、角度误差对疲劳寿命的影响分析

图 10 为位移误差对疲劳寿命的影响. 从图 10 中可以看出:随着接触件配合的位移误差不断增大,接触件的疲劳寿命不断下降,其平均下降率为 18.13%. 这是由于随着位移误差的不断增大,将导致靠近插针一端的插孔簧片的变形量不断增大,接触件根部的最大等效弯曲应力也不断增大. 在循环载荷的作用下,簧片根部某些位置出现应力集中的现象以及材料塑性变形量的不断累积,甚至萌生裂纹. 随着累积量的不断增加,将会导致接触件间的接触压力不足,从而影响电连接器正常的工作性能,严重时甚至会发生簧片断裂的现象,引发灾难性后果. 因此,为了保证接触件正常的工作使用寿命要求,在接触件使用过程中要尽量避免出现位移误差的现象. 接触件配合时存在角度误差对接触件疲劳寿命的影响见图 11 上面第一条线,其影响变化趋势和位移误差相似,限于篇幅,在此不再赘述.

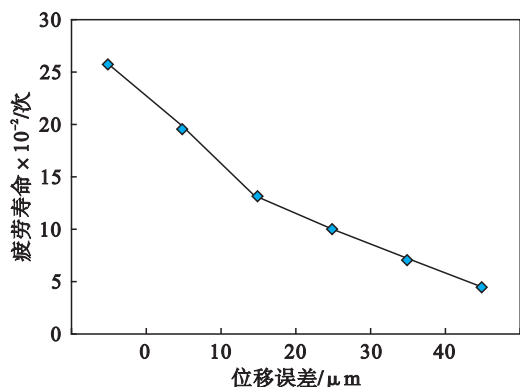


图 10 位移误差对接触件疲劳寿命的影响

Fig. 10 Effect of displacement error on fatigue life of contact parts

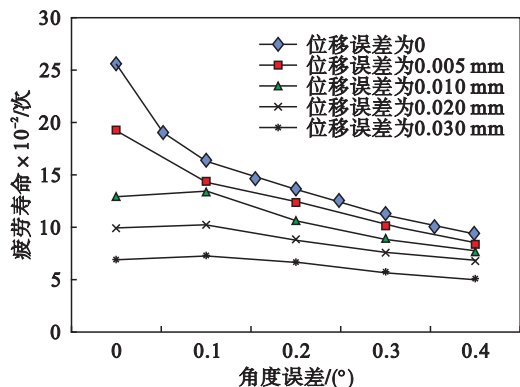


图 11 复合误差对接触件疲劳寿命的影响

Fig. 11 Effect of composite error on fatigue life of contact parts

3.2 复合误差对疲劳寿命的影响分析

图 11 为复合误差对接触件疲劳寿命的影响。当接触件间配合的位移误差不变时,随着角度误差的不断增大,接触件的疲劳寿命随之降低;当接触件间的角度误差不变时,随着位移误差的不断增大,接触件的疲劳寿命也随之降低。接触件疲劳分析结果表明:接触件插孔簧片根部的疲劳寿命最小,这个位置正是有限元分析结果中插孔簧片根部等效弯曲应力最大的位置。因此,当接触件间配合的位移误差不变时,随着角度误差的增加,插孔簧片的变形量不断变大,导致插孔簧片根部的最大等效弯曲应力不断增大,接触件的疲劳寿命随之降低。因此,为了保证接触件正常的使用寿命,要避免配合件的角度误差、位移误差、特别是复合误差的出现,以达到保证接触件正常工作寿命的要求。

对比图 10 和图 11 可以看出,复合误差的影响高于单独位移误差和角度误差影响的线性叠加,即同时存在位移和角度误差时,两种误差具有非线性叠加效应,加速接触疲劳失效。

依据 GJB 599A—1993 要求,在满足 500 次

插拔寿命要求下,该型电连接器接触件允许最大的位置误差为 0.038 mm,角度误差为 0.621°,复合误差为 0.03 mm 和 0.405°。

3.3 提高电连接器接触疲劳寿命的措施

根据上述研究,可以通过减小接触件的配合误差提高其疲劳寿命,具体措施如下:

1) 改善接触件的结构设计、优化接触件的尺寸,降低使用过程中出现的应力集中现象。

2) 研发用于接触件装配的定位导向装置,降低接触件使用过程中出现的配合误差,以达到保证接触件疲劳寿命的目的。

3) 对接触件表面进行预处理,降低其表面的摩擦系数,减小接触件在工作过程中的磨损量,提高接触件的使用寿命。

4 结 论

1) 以某型军用航空电连接器单对针孔接触件为研究对象,基于 Fe-Safe 建立了接触件接触疲劳寿命的仿真模型,完成了配合误差对电连接器疲劳寿命的量化评估。

2) 依据 GJB 559A—1993 中规定的 500 次插拔数要求,该型电连接器接触件允许最大的位置误差为 0.038 mm,最大的角度误差为 0.621°,最大的复合误差为 0.03 mm 和 0.405°,为该型电连接器接触件制造、装配工艺改进提供了理论依据。

3) 应用 Abaqus 仿真分析了接触件单次插拔过程中等效接触压强、插孔根部等效弯曲应力、最大分离力以及插孔簧片最大位移的变化规律,为接触件的性能分析和结构设计提供了参考价值。

参考文献:

- [1] 杨奋为. 航天电连接器的选用[J]. 机电元件, 2000, 19(4): 57-62.
(Yang Fen-wei. Selection of aerospace electrical connector [J]. *Mechanical and Electronic Components*, 2000, 19(4): 57-62.)
- [2] Ying L, Zhu F L, Duan K, et al. Analysis of insertion force of electric connector based on FEM [C]//21st International Symposium on Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits. Marina Bay Sands, 2014: 195-198.
- [3] Jian S, Koch C, Wang L L. Nanoscale particles modified gold plating for electrical contacts [C]//26th International Conference on Electrical Contacts. Beijing, 2012: 331-337.
- [4] 于红光. Micro-USB 电连接器无铅焊点热疲劳寿命研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014: 45-50.

(下转第 688 页)