

电连接器接触件结构分析与结构参数优化设计

汪日超¹,张伟¹,徐佳济¹,陈扬威²,陈仲海³

(1. 先临三维科技股份有限公司,浙江 杭州 311258;

2. 中国电子科技集团公司 第五十二研究所,浙江 杭州 310012;

3. 杭州航天电子技术有限公司,浙江 杭州 310052)

摘要:为研究接触件结构参数对分离力和塑性变形的综合影响,对电连接器接触件进行了结构分析,提出一种接触件收口的尺寸计算方法,建立接触件分离力与结构参数的理论公式。计算实例应用均匀拉丁方试验设计方法对关键结构参数进行采样,以接触件收口后的塑性应变和分离力为优化目标函数,结合响应面近似建模技术和遗传算法,获得了最优的关键结构参数组合。通过对接触件优化前后的实验对比论证,验证了优化结果的正确性和优化方法的有效性。

关键词:电连接器;接触件;结构分析;参数优化;响应面法;遗传算法

中图分类号:TP391 文献标志码:B 文章编号:1671-5276(2021)03-0136-04

Structural Ansysis of Electrical Connector Contacts and Optimization Design of Structural Parameters

WANG Richao¹, ZHANG Wei¹, XU Jiaji¹, CHEN Yangwei², CHEN Zhonghai³

(1. Shining 3D Tech Co., Ltd., Hangzhou 311258, China; 2. CETC 52, Hangzhou 310012, China;

3. Hangzhou Aerospace Electronic Technology Co., Ltd., Hangzhou 310052, China)

Abstract: To study the comprehensive influence of connector contacts structural parameters on separating force and plastic strain, the structure of contacts in electric connector was analyzed. A method for calculating the size of the contacts shut was established. A theoretical formula combining contact separating force and structural parameters was proposed. Uniform Latin square experimental design method was applied to sample the key structural parameters in calculation example. By application of response surface approximation modeling technology and genetic algorithm, and with optimization of separating force and plastic strain after the contacts shut as the goal, the optimal combination of key structural parameters was obtained. By comparison of optimized and unoptimized contacts, the results verify the correctness of the optimized results and effectiveness of optimized methods.

Keywords: electrical connector; contact; structural analysis; parameter optimization; response surface approximation modeling technology; genetic algorithm

0 引言

接触件是电连接器中的关键元件,其可靠性水平对电子系统起到了决定性的作用。接触件的可靠性取决于接触件的设计、工艺、管理和工作环境等多种因素。因此,分析接触件的结构对提高接触件可靠性有着重要意义。

潘俊等^[1]对接触件结构进行分析,通过仿真分析各结构参数对接触的影响,并通过仿真插拔实验,研究了分离力随插入过程的实际变化情况,为设计高可靠性的接触件提供理论依据。骆燕燕等^[2]分析接触件不同结构参数对电连接器插拔特性的影响,利用 ANSYS 对接触件插拔过程进行仿真,得到了插拔过程中插孔簧片变形、应力分布以及插拔力和接触压力的变化情况。邵丽娜等^[3]分析电连接器接触压力对接触件插拔与接触电阻的影响,建立理论模型,为设计高可靠性的电连接器接触件提供参考依据。

目前,针对接触件结构参数对分离力和塑性变形的综

合影响以及对结构参数进行优化设计的研究较少。本文首先对电连接器接触件进行结构分析,建立分离力与结构参数的理论公式,通过理论公式筛选出对分离力影响较大的关键参数。其次,计算实例应用均匀拉丁方试验设计方法对关键结构参数采样点,以接触件收口后的塑性应变和分离力为优化目标函数,结合响应面法和遗传算法,对关键结构参数进行优化设计,获得最后的关键参数组合。最后通过实验验证了该方法的有效性,为接触件的结构设计提供了理论依据和方法。

1 接触件结构分析

1.1 建立模型

电连接器主要采用圆柱式接触件、麻花式接触件、双曲线式接触件等 3 种结构,其中圆柱式开槽接触件是应用

最广泛的接触件结构。本文以两开槽接触件为研究对象,如图1所示,建立数学模型。插针与插孔插合时,依靠插孔簧片结构发生弹性变形产生接触压力,因此,插孔的结构参数对接触压力产生主要影响。插孔收口前结构简图如图2所示,结构参数包括插孔原外径 D 、原内径 d 、槽深 L_0 、槽宽 B 、插孔内孔倒角 R 。插孔收口后结构简图如图3所示,结构参数包括槽深 L 、插孔径向内径 ϕ 。

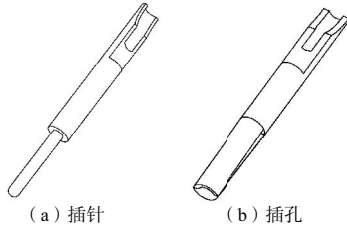


图1 圆柱式开槽接触件

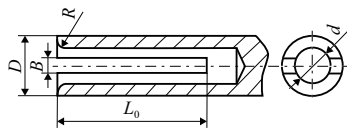


图2 插孔收口前结构简图

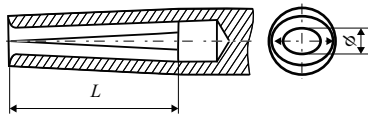


图3 插孔收口后结构简图

1.2 力学分析

为了具体分析簧片结构参数与接触压力的关系,可将圆柱式开槽接触件简化成图4所示的悬臂梁结构,其产生的接触压力 F_N 为:

$$F_N = \frac{3EI\delta}{L^3} \quad (1)$$

式中: L 为悬臂梁长度; δ 为挠度; E 为弹性模量; I 为横截面的惯性矩。

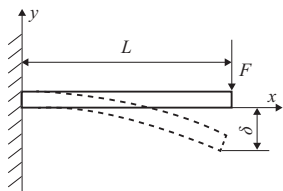


图4 悬臂梁简化模型

如图2所示,插孔的截面积为 $\frac{\pi}{4}(D^2-d^2)$;插孔完全收紧后槽宽为0,截面积为 $\frac{\pi}{4}(D^2-d^2)-B(D-d)$ 。如图3所示,假设收口后截面为椭圆,其截面积为 $\frac{\pi}{4}D(\phi+D-d)-$

$\frac{\pi}{4}d\phi$,则插孔收口后径向直径 $\phi=d-\frac{4B}{\pi}$ 。

截面惯性矩应计算簧片变形初始时的截面惯性矩,其截面简图如图5所示。该截面假设为椭圆,其截面惯性矩 $I=0.007D(\phi+D-d)^3-0.007d\phi^3$ 。

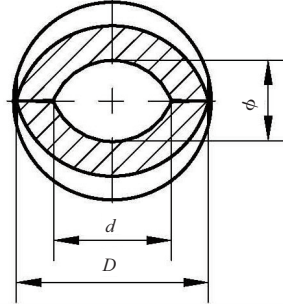


图5 变形初始时截面简图

挠度为插孔收口端径向位移,即插针插入插孔后,簧片径向移动的距离,其示意图如图6所示,挠度 $\delta=\frac{1}{2}(\psi-d)$ 。插孔收口前后的开槽深度发生变化,其变化与插孔内孔倒角、插孔径向内径、插孔内径有关,悬臂梁长度 $L=\sqrt{(L_0-R)^2-\frac{1}{4}(d-\phi)^2}$ 。

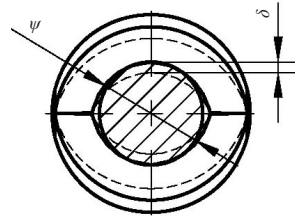


图6 变形终点时截面简图

综上所述,接触压力为

$$F_N = \frac{0.0105E \left[D \left(D - \frac{4B}{\pi} \right)^3 - d \left(d - \frac{4B}{\pi} \right)^3 \right] \left(\psi - d + \frac{4B}{\pi} \right)}{\left[\sqrt{(L_0-R)^2 - \left(\frac{2B}{\pi} \right)^2} \right]^3} \quad (2)$$

接触件分离时,接触件接触面之间的力由两部分组成,即分离力(拔出力)和接触压力。根据力学知识,摩擦力 $F_f=\mu F_N$,分离力 $F=2F_f=2\mu F_N$,结合公式(2)可得

$$F = \frac{0.021\mu E \left[D \left(D - \frac{4B}{\pi} \right)^3 - d \left(d - \frac{4B}{\pi} \right)^3 \right] \left(\psi - d + \frac{4B}{\pi} \right)}{\left[\sqrt{(L_0-R)^2 - \left(\frac{2B}{\pi} \right)^2} \right]^3} \quad (3)$$

1.3 各结构参数影响分析

根据公式(3),分析结构参数 D 、 d 、 B 、 L_0 、 R 对分离力的影响。以某一结构参数为自变量,正负逐渐增加,其余结构参数不变,得到各结构参数对分离力的影响大小,见图7。

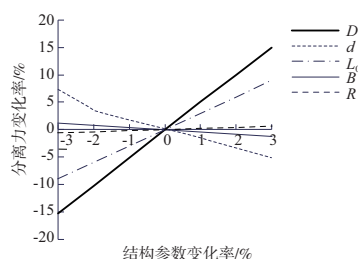


图7 各结构参数对分离力影响趋势图

由图7知, D 和 d 对分离力的影响较大, B 和 L_0 次之, R 对分离力的影响最小,几乎可以忽略不计,故 D 、 d 、 B 和 L_0 为关键结构参数。

2 优化模型

2.1 有限元模型

电连接器通过接触件的插拔来实现电气线路的连接或断开,接触件插拔有限元模型如图8所示。接触件材料为锡青铜,表面镀金处理。

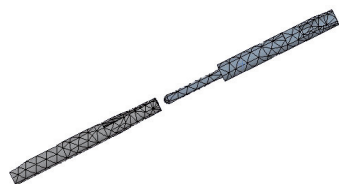


图8 接触件插拔有限元仿真模型

2.2 设计变量

设计变量一般选取对质量目标有显著影响的因素,通过上述研究可知, D 、 d 、 B 、 L_0 对分离力有较大的影响。因此,本文选取插孔壁厚 $h((D-d)/2)$ 、槽深 L_0 以及槽宽 B 作为设计变量。

结合实际情况,设计变量的变化范围如表1所示。

表1 设计变量取值范围 单位:mm

设计变量	h	L_0	B
下限	0.3	4.5	0.4
上限	0.5	6.5	0.6

2.3 目标函数

接触件分离力(拔出力)是电连接器的力学、物理性能之一,另外接触件的应变也是电连接器设计需考虑的问题。分离力和应变与接触件结构参数、材料选择有关。目前,插孔的结构参数主要是根据经验设计的,缺乏精确的计算。随着计算机技术的发展,有限元仿真在机械设计中得到广泛的应用。本文以接触件的分离力和接触件收口时产生的最大塑性应变为优化目标函数,如式(4)所示。

$$J = \alpha \frac{F - F_j}{F_j} + \beta (10 \varepsilon_{\max}) \quad (4)$$

式中: F 为接触件分离力; F_j 为分离力均值; ε_{\max} 为节点最大塑性应变; α 、 β 为权重系数,反映的是接触件分离力和最大塑性变形对目标函数 J 的影响大小。在接触件的设计中,分离力对接触件的性能影响较大,故本文中的 α 、 β 分别取为0.6和0.4。 J 值越小,表明接触件的分离力越接近均值,且最大应变越小,接触件的使用性能越好。

3 响应面近似模型

3.1 试验设计

在响应面近似模型的构造过程中,需要进行试验设计。目前广泛应用于计算机仿真试验的试验设计有全因子设计、正交设计、拉丁方设计等^[4]。本文采用均匀拉丁方试验设计,用这种方法可以得到各个设计变量对优化问题的影响,而且构造的响应面模型精度较高。

在Matlab中对上述的3个设计变量进行采样,通过ANSYS Workbench对12组实验样本进行有限元数值仿真,如图9、图10所示,目标函数计算结果如表2。

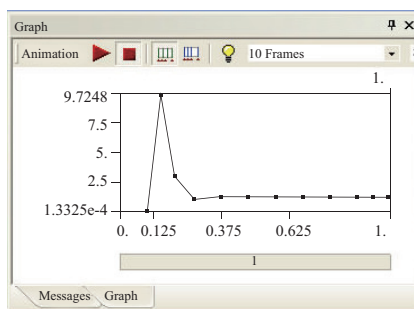


图9 接触件分离力

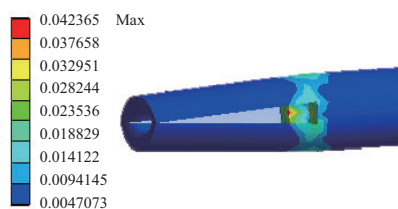


图10 接触件收口后塑性应变

表2 拉丁方实验数据

序号	h/mm	L_0/mm	B/mm	J
1	0.465 7	4.771 3	0.593 0	0.312 8
2	0.426 7	5.967 0	0.500 3	0.316 7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
11	0.413 9	5.742 0	0.566 7	0.341 8
12	0.381 6	5.342 9	0.547 1	0.369 9

3.2 建立二阶响应面近似模型

响应面法是数学方法和统计方法结合的产物,其基本思想是通过近似构造一个明确表达形式的多项式来对感

兴趣的响应受多个变量影响的问题进行建模和分析,最终达到优化响应值的目的。

响应面法中常用一次、二次、三次或四次多项式进行回归分析。本文采用相对简单却有较高准确性的二次多项式拟合模型,如式(5)所示。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j \quad (5)$$

式中: x_i 为设计变量; β_0 、 β_i 、 β_{ii} 、 β_{ij} 均为待定系数。

建立的二阶响应面模型精度需要通过决定系数检验:决定系数 R^2 和调整后的决定系数 R_a^2 。如果 R^2 和 R_a^2 越接近1,表示模型越为精确。

根据表2,利用最小二乘法求得二阶响应面函数的待定系数,得到的响应面函数如下:

$$y = 0.268 1 + 144.266 5x_1 - 9.077 8x_2 - 12.736 5x_3 - 16.608 1x_1x_2 - 133.885 7x_1x_3 + 9.991 4x_2x_3 + 17.681 7x_1^2 + 0.964 2x_2^2 + 10.09 5x_3^2 \quad (6)$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 、 y 分别表示 h 、 L_0 、 B 、 J 。

响应面函数的决定系数 R^2 和调整后的决定系数 R_a^2 分别为: $R^2 = 0.995 2$ 、 $R_a^2 = 0.973 5$ 。两者都接近于1,故构造出的二阶响应面近似模型精度较高。

4 遗传算法优化

遗传算法(GA)^[5-6]是近几年发展起来的一种全局优化算法。它是基于生物进化思想的一种迭代自适应的、全局优化概率搜索算法,具有简单通用、适合并行处理等优点。

运用 Matlab 遗传算法工具箱进行优化,设计变量采用实数编码,初始种群规模 $M = 60$,交叉概率 $P_c = 0.3$,变异概率 $P_m = 0.01$,遗传迭代为100,适应度函数取目标函数本身。

通过遗传算法得到的设计变量最优解为 $h = 0.478 \text{ mm}$ 、 $L_0 = 6.075 \text{ mm}$ 、 $B = 0.497 \text{ mm}$,得到最小的目标函数 $J = 0.001 8$ 。优化前后设计参数对比如表3所示。

表3 设计参数优化对比 单位:mm

设计变量	h	L_0	B
优化前	0.450	5.000	0.500
优化后	0.478	6.075	0.497

5 优化结果论证

接触件分离力与接触电阻是电连接器重要的考核指标,根据表3的优化结果,分别取100对优化前和优化后的接触件进行对比实验。

首先进行接触件插拔实验。优化前后接触件分离力实验结果如图11所示。从图中可以得到:优化后的接触件分离力波动范围缩小,分离力大多聚集在均值附近。

其次将其中20对接触件装入电连接器中,进行500次插拔寿命实验。寿命实验前,测试优化前与优化后两种状态接触件的接触电阻基本一致;寿命实验后,再次测试

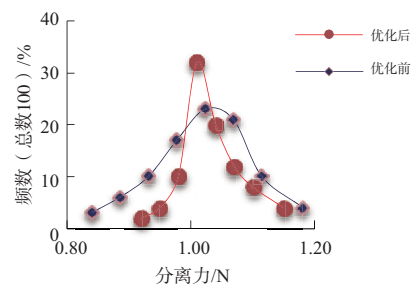


图11 接触件优化前后分离力对比图

接触电阻,得到寿命实验前后接触电阻的变化如图12所示。从图中可以得到:寿命实验后接触电阻增大,接触件优化后接触电阻变化较小,表明优化后的接触件电接触性能更好。

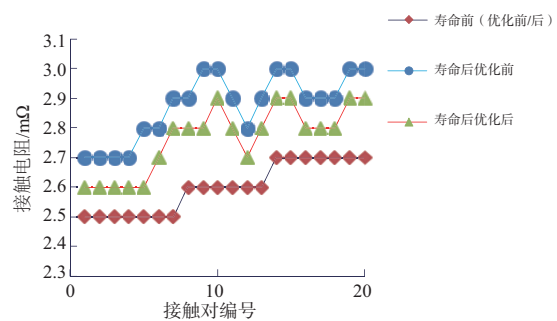


图12 接触件优化前后接触电阻对比图

6 结语

1) 本文对电连接器进行了分离力理论分析,提出了一种接触件收口的尺寸计算方法,建立了分离力与结构参数之间的关系;

2) 通过对分离力与结构参数关系式的分析,得出了各结构参数对接触件分离力的影响大小,取得关键结构参数,为优化设计提供理论依据;

3) 以接触件分离力和塑性变形优化目标函数,运用响应面法和遗传算法,获得了最优的关键结构参数组合;

4) 通过对接触件优化前后的对比实验,表明优化后的接触件接触性能更好,论证了优化结果的正确性。

参考文献:

- [1] 潘骏,靳方建,陈文华,等.电连接器接触件结构分析与插拔试验[J].中国机械工程,2013,24(12):1636-1641.
- [2] 骆燕燕,杨静宇,任永隆,等.电连接器接触件插拔特性仿真与试验研究[J].工程设计学报,2017,24(2):168-173,195.
- [3] 邵丽娜,贺占蜀,张启宵.浅谈电连接器接触件接触压力[J].汽车电器,2018(12):67-68.
- [4] 郑刚,李光耀,孙光永,等.基于近似模型的拉延筋几何参数反求[J].中国机械工程,2006,17(19):1988-1992.
- [5] 张晓缙,方浩.遗传算法的编码机制研究[J].信息与控制,1997,26(2):134-139.
- [6] 欧阳渺安.遗传算法求解多方案设计问题的研究[J].机械设计,1999,16(4):10-12.

收稿日期:2020-10-09