

基于响应面法的圆形连接器端子结构优化

吕兴利, 刘淑梅, 慕江瀚

上海工程技术大学材料工程学院, 上海

收稿日期: 2023年10月1日; 录用日期: 2023年11月15日; 发布日期: 2023年11月22日

摘要

连接器作为新能源汽车组成的重要部件, 使用量大且可靠性要求极高。为解决圆形连接器因为等效应力过大而造成的失效问题, 运用ANSYS软件对圆形连接进行插拔模拟仿真试验, 基于以端子最大壁厚、高度和间隙宽度3个因素为自变量, 以等效应力为响应目标的响应面优化模型, 得到当端子最大壁厚、高度和间隙宽度分别为1.7 mm、8.13 mm和0.52 mm时, 等效应力为20,869 Pa, 进而添加连接器应用寿命。

关键词

结构优化, 数值模拟, 圆形连接器

Optimization of Circular Connector Terminal Structure Based on Response Surface Method

Xingli Lv, Shumei Liu, Janghan Mu

School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Oct. 1st, 2023; accepted: Nov. 15th, 2023; published: Nov. 22nd, 2023

Abstract

As an important component of new energy vehicles, connectors have large usage and high reliability requirements. In order to solve the failure problem of circular connector caused by excessive equivalent stress, ANSYS software is used to carry out the plug and unplug simulation test of circular connector. Based on the response surface optimization model which takes the maximum wall thickness, height and gap width of terminal as independent variables and takes equivalent

stress as the response target. When the maximum wall thickness, height and gap width of the terminal are 1.7 mm, 8.13 mm and 0.52 mm respectively, the equivalent stress is 20,869 Pa, and then the connector application life is added.

Keywords

Structure Optimization, Numerical Simulation, Circular Connector

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着新能源汽车工业的发展,对相关行业提出的需求也随之提高,圆形连接器端子作为其中重要的组成部件,连接器的牢靠性要求也越来越高。连接器在实际使用中常出现局部应力过高而导致失效,其中触点失效是接触器的主要失效模式,占接触器失效总量的 50% 以上[1] [2] [3]。

连接器组件端子亦被称为接触件,其核心部分主要包括插针(公端)和插孔(母端),通过公端与母端的插合与分离实现电路和信号的通断[4]。在连接器插拔时,插针不仅需要克服摩擦力,还需要使弹片发生弹性变形,因此插入力往往大于拔出力,并且插入力不宜过大,同时拔出力也不宜过小[5]。目前,国内外的学者对连接器的接触牢靠性分析进行深入的研究,通过对其实际工况下的失效模式以及失效原理进行分析,并结合相关试验,建立相应的统计模型,对电连接器接触寿命和可靠性进行预测和评估[6] [7] [8] [9] [10]。大多数学者是利用模拟仿真软件对连接件进行力学、温度以及振动分析。本文是基于 ANSYS Workbench 软件对圆形连接器端子的结构进行分析,并探究该连接器最优化的结构。

2. 模型的建立

2.1. 连接器模型的建立

利用 Solid works 软件建立圆形连接器的公端、母端和二次夹紧装置的三维零件模型,并将三者进行装配,得到的模型如图 1 所示。圆形连接器通常由两部分组成,金属基体和包裹在金属外层的绝缘体。该连接器为圆柱形接触,公端与母端之间依靠挤压接触实现电路的连接。由于圆形连接器的母端结构复杂,在接触过程中易出现母端弹片端部局部应力过高,导致母端弹片断裂等失效问题。对圆形连接器母端进行关键部位的结构优化,提高连接器的使用寿命。

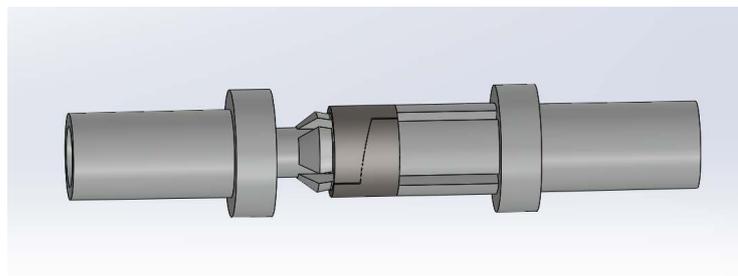


Figure 1. Circular connector 3D model diagram

图 1. 圆形连接器的三维模型图

2.2. 材料特性

连接器是实现电路连接的关键的零部件,在选择材料时需要考虑多方面因素,如导电性能,力学性能,耐高温性能等。为解决应力释放导致的电性能恶化问题,目前通用的做法是增大端子夹紧力的初始值和提高端子使用材料的机械性能[11]。目前连接器的材料大部分选择 C70250 材料,由于圆形连接器需要较高的强度和导电导热性能,该材料不仅满足条件,市场上也大量应用。本文连接器使用的是 C70250 材料,其具有良好的导电性能,如表 1 所示。

Table 1. Material performance table

表 1. 材料性能表

材料	抗拉强度 MPa	延伸率%	维氏硬度 HV	弹性系数 KN/mm ²	导电率%IACS	密度 g/cm ³
C70250	620~740	≥14	180~230	130	≥43	8.82

2.3. 边界条件和有限元模型确立

将已经装配好的圆形连接器模型转换格式,Workbench 中常用的打开格式为 x_t,首先建立一个静态结构模块,依次设置边界条件,第一步,选择材料,连接器的公端和母端选择 C70250 材料,母端上的二次夹紧装置选择不锈钢材料。第二步,对三维模型进行网格划分,划分的网格单元最小尺寸为 0.0008 m,单元之间的过渡设置为缓慢。第三步,完成接触设置,母端和二次夹紧装置之间设为无分离接触,母端和公端之间设为摩擦接触。公端和母端之间的接触可视为弹性物体的相互接触。连接器结构应力服从第四强度理论等效应力数学表达式为

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]} \quad (1)$$

式中: σ_1 , σ_2 , σ_3 ——主应力[12] [13]。

3. 基于响应面法优化模型的设计

3.1. 设计变量

响应面模型优化分析法一般分为响应面中心组合设计法(CCD)和 Box-Behnken (BBD) 2 种实验设计方法。中心组合设计一般适用于 2~9 个因素的优化实验,Box-Behnken 设计适用于 3~7 个因素的优化实验[14]。根据圆形连接器端子的产品结构选择三个因素(最大壁厚,高度和间隙宽度)作为设计变量。3 个变量的取值范围根据实际工作场景取值,如表 2 所示。3 个变量的位置示意图如图 2 所示。以连接器端子的等效应力为响应目标采用 Box-Behnken 的响应面法。

Table 2. Response surface factor level table

表 2. 变量的响应面因素水平表

水平	因素 A 最大壁厚/mm	因素 B 高度/mm	因素 C 间隙宽度/mm
-1	1.2	6.7	0.5
0	1.5	7.7	1
1	1.8	8.7	1.5

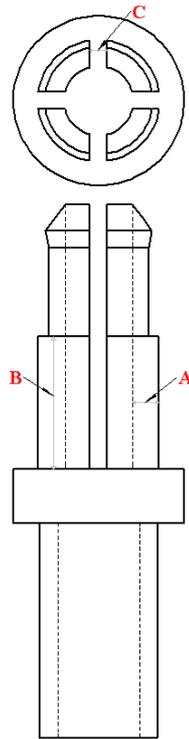


Figure 2. Diagram of the position of variables
图 2. 变量的位置示意图

3.2. 响应面模型的拟合

以端子最大壁厚、高度和间隙宽度作为自变量因素，以等效应力作为响应值，设计响应面优化模型，利用 ANSYS 软件对连接器端子进行 17 组不同结构进行数值模拟分析其等效应力值，如表 3 所示。

Table 3. Test schemes and their response target

表 3. 试验方案及其响应目标

No.	因素 1 A:A mm	因素 2 B:B mm	因素 3 C:C mm	响应 1 R1 Pa
1	1.5	8.7	0.5	21,100
2	1.5	8.7	1.5	25,200
3	1.5	7.7	1	21,100
4	1.2	7.7	0.5	23,700
5	1.5	7.7	1	21,100
6	1.8	8.7	1	22,300
7	1.8	7.7	1.5	25,500
8	1.5	7.7	1	21,100
9	1.5	6.7	0.5	21,400
10	1.8	7.7	0.5	20,800

Continued

11	1.2	7.7	1.5	25,900
12	1.5	6.7	1.5	25,700
13	1.2	8.7	1	23,900
14	1.2	6.7	1	24,500
15	1.5	7.7	1	21,100
16	1.5	7.7	1	21,100
17	1.8	6.7	1	22,800

利用最小二乘法对模拟出来的结果进行响应面的拟合分析,使连接器端子的结构参数和响应目标之间的关系通过多项式表达出来,得到连接器端子的等效应力($R1$)之间的响应面函数,如式(2)所示,根据拟合曲线来判断三个变量分别对等效应力的影响以及三个变量之间对等效应力的交互的影响。

$$R1 = 21100 - 825A - 237.5B + 1912.5C + 25AB - 625AC - 50BC + 1450A^2 + 825B^2 + 1425C^2$$

式中: A 端子最大壁厚; B 为高度; C 为间隙宽度。

通过对最大壁厚、厚度和间隙宽度这三个变量与响应值(等效应力)的变异数分析,验证实验的可靠度,圆形连接器端子的等效应力变异数由表 4 所示。

Table 4. Equivalent stress variation of connector terminals
表 4. 连接器端子等效应力变异数

因素	偏差平方和	自由度	方差	F 值	P 值	显著性
模型	5.92E+07	9	6.58E+06	157.44	<0.0001	极其显著
A	5.45E+06	1	5.45E+06	130.31	<0.0001	极其显著
B	4.51E+05	1	4.51E+05	10.8	0.0134	显著
C	2.93E+07	1	2.93E+07	700.27	<0.0001	极其显著
A ²	8.85E+06	1	8.85E+06	211.86	<0.0001	极其显著
B ²	2.87E+06	1	2.87E+06	68.58	<0.0001	极其显著
C ²	8.55E+06	1	8.55E+06	204.62	<0.0001	极其显著
残差	2.93E+05	7	41785.71			
失拟项	2.93E+05	3	97500			
净误差	0	4	0			
总误差	5.95E+07	16				
相关系数		修正决定系数		模型预测		信噪比
0.9951		0.9888		0.9213		34.922

P 值是统计学中的一个概念,用来判定假设检验结果的一个参数,通常 P 值越小,统计检验的结果

越明显。若 $0.01 < P < 0.05$ ，差异显著，若 $P < 0.01$ ，差异极其显著。F 值是用来衡量样本方差的差异，F 值越大，方差差异越大，相反，差异越小。由表 4 可知，模型 F 值为 157.44，P 值为 $0.0001 < 0.01$ ，这表明，模型是极其显著的。模型中 A、C、 A^2 、 B^2 、 C^2 的 P 值均小于 0.01，B 为 0.0134，且 $0.01 < B < 0.05$ ，这表明，这三个设计变量对等效应力影响极其显著。该模型相关系数为 0.9951，信噪比 $r = 34.922 > 4$ ，表明模型可靠度为 99.51%，该模型对响应目标等效应力的预测和评估较好。设计变量对等效应力影响显著性顺序为端子最大壁厚 > 间隙宽度 > 高度。

4. 模拟结果分析

4.1. 连接器端子的等效应力分析

连接器的组成为非接触件和接触件。非接触件包括弹簧垫片、插头、插底座、螺栓等，以用来支撑、固定的作用；接触件设计的合理性直接影响连接器的可靠性，是接插件的关键部位，圆形连接器母端的静态结构仿真如图 3 所示。

由图可知，当连接器母端最大壁厚、高度和间隙宽度分别为 1.5 mm、7.7 mm 和 1 mm 时，仿真得到的最大的等效应力为 3.646E15 Pa，且集中在凸台与夹紧片的连接处，此处等效应力过大，容易造成夹紧片与凸台之间断裂失效。可通过优化接器母端最大壁厚和间隙宽度来改变凸台与夹紧片的接触面积，也可通过优化接器母端的高度来改变凸台与夹紧片连接处的受力，进而减少失效。

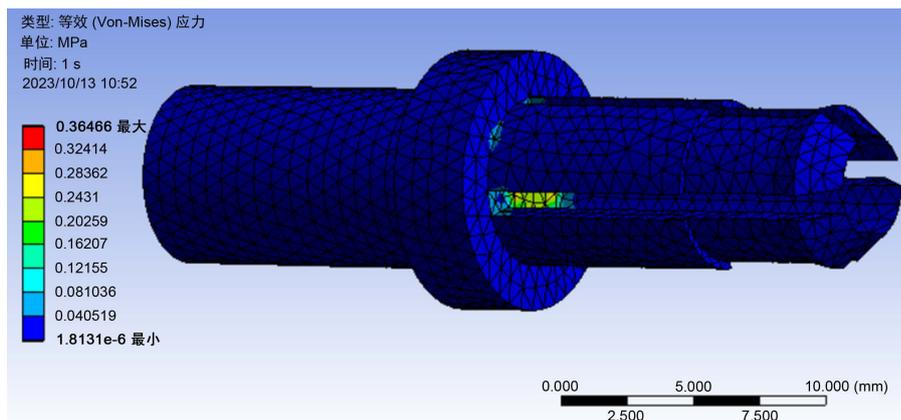


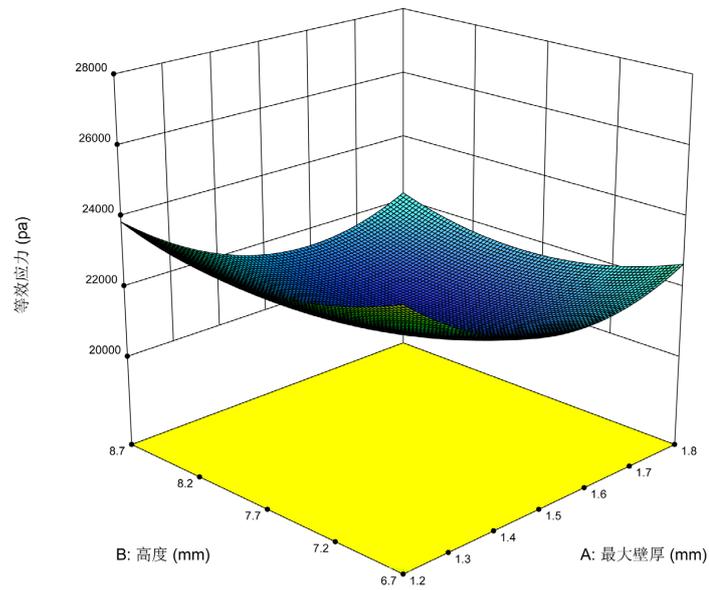
Figure 3. Circular connector female end simulation diagram
图 3. 圆形连接器母端仿真图

4.2. 响应曲面分析

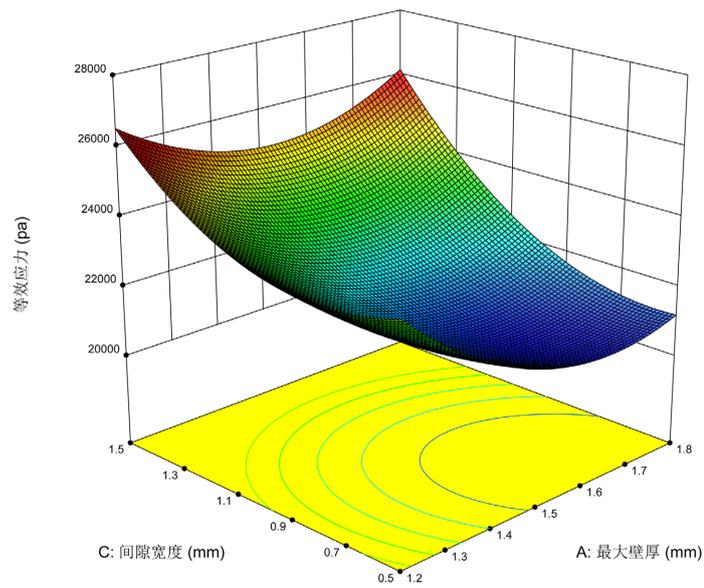
根据模型预测的结果，得到不同因素交互作用与响应目标之间的关系，图 4 为圆形连接器母端等效应力的响应面图。当母端的间隙宽度固定时，等效应力随着端子最大壁厚和高度的减少呈先减小后增加的趋势；高度和最大壁厚对等效应力的影响都比较显著，由图 4(b)可知当高度固定时，连接器等效应力随着间隙宽度的增加而逐渐增加，与端子最大壁厚相比，间隙宽度对等效应力的影响更大。

5. 等效应力优化

综合连接器端子最大壁厚、高度和间隙宽度对等效应力的影响，在响应面模型中确定等效应力为优化目标，通过对模型结果中的变量进行优化可得到因素水平的最佳组合。表 5 和表 6 分别为非线性算法优化条件和可行域内最优设计组合。



(a) 圆形连接器母端 A-B 因素响应曲面



(b) 圆形连接器母端 A-C 因素响应曲面

Figure 4. Response surface diagram of equivalent stress at female end of circular connector**图 4.** 圆形连接器母端等效应力的响应面图**Table 5.** The optimization conditions of nonlinear algorithm**表 5.** 非线性算法优化条件

名称	目标	下限	上限
端子最大壁厚/mm	全目标	1.2	1.8
高度/mm	全目标	6.7	8.7
间隙宽度/mm	全目标	0.5	1.5
等效应力 R1/Pa	最小	20,800	25,900

Table 6. Value of optimal design variable
表 6. 最优设计变量取值

变量	因素 A 端子最大壁厚/mm	因素 B 高度/mm	因素 C 间隙宽度/mm	响应值 等效应力/Pa
最优	1.7	8.13	0.52	20953.3

6. 实验验证

通过响应面法获得的连接器端子最佳结构参数，将优化后的母端最大壁厚、高度、间隙宽度重新建模，得到优化后圆形连接器母端的最大等效应力为 392,730 Pa，最小等效应力为 0.82769 Pa，平均等效应力为 20,869 Pa，如图 5 所示。与响应面法预测的结果相符，等效应力的显著减小，增加了圆形连接器端子的可靠性，优化后的圆形连接器结构如图 6 所示。

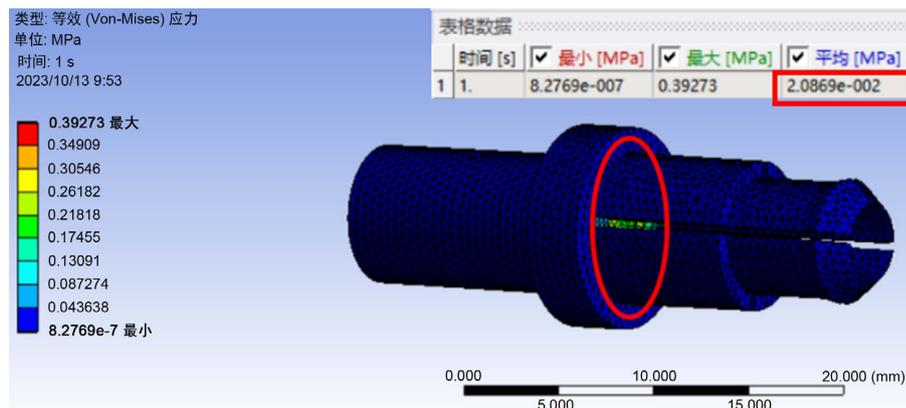


Figure 5. Optimized connector the circular connector iso-effect graph
图 5. 优化后的圆形连接器等效应力图



Figure 6. The optimized connector diagram
图 6. 优化后的连接器实物图

7. 结论

由模拟仿真结果可知，连接器的最大等效应力集中在凸台与夹紧片的连接处。通过响应面模型来优化端子结构。当等效应力随着端子最大壁厚为 1.7 mm、高度 8.13 为和间隙宽度为 0.52 mm 时，在其它设置参数不变的情况下，平均等效应力最小为 20,869 Pa，大大降低连接器的失效率提高连接器的可靠性。

参考文献

- [1] 周峻峰. 继电器触点接触失效物理浅析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 1997(1): 25-30+24.
- [2] 郭树财, 马彦深, 王喜莲. 交流接触器电磁特性分析[J]. 电器与能效管理技术, 2021(2): 14-18.
<https://doi.org/10.16628/j.cnki.2095-8188.2021.02.003>

-
- [3] 李雪岭. 基于 BP 神经网络的交流接触器电寿命预测[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- [4] 杜永英, 孙志礼, 吕春梅. JF 系列某型电连接器组件端子可靠性研究[J]. 机械与电子, 2015(9): 11-15.
- [5] 任万滨, 崔黎, 翟国富, 等. 电连接器接触件插拔特性与接触电阻的仿真分析[J]. 机电元件, 2012, 32(3): 40-44.
- [6] 钱萍. 航天电连接器综合应力加速寿命试验与统计分析的研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [7] 武海军. 航天电连接器综合应力可靠性建模及统计验证[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [8] 张通. 电连接器不同孔径差异对接触可靠性影响规律的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2022. <https://doi.org/10.27786/d.cnki.gzjlg.2021.000652>
- [9] 万梦茹. 线簧孔连接器的可靠性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [10] 赵毅. PCB 端子的可靠性分析及结构优化[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海工程技术大学, 2023. <https://doi.org/10.27715/d.cnki.gshgj.2021.000961>
- [11] 王武军, 王荣喜, 呼延颀. 汽车连接器端子夹紧力控制方案研究[J]. 汽车电器, 2018(8): 54-56. <https://doi.org/10.13273/j.cnki.qcdq.2018.08.021>
- [12] 齐小军, 冯伟杰. 连接器弹片结构接触特性分析与优化[J]. 电器与能效管理技术, 2022(10): 48-55. <https://doi.org/10.16628/j.cnki.2095-8188.2022.10.008>
- [13] 谢光荣. 同轴连接器外导体与绝缘体固定性的仿真设计[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2015(6): 7-10. <https://doi.org/10.19467/j.cnki.1006-1908.2015.06.003>
- [14] 张卫兵, 郭爱莲, 甘伯中. 响应面法优化产植酸酶黑曲霉 L2-2 的培养基和培养条件[J]. 中国饲料, 2011(7): 13-16+19. <https://doi.org/10.15906/j.cnki.cn11-2975/s.2011.07.007>