

电连接器接触组件插拔力的数值分析及结构设计*

赵立卓¹ 张纯正² 常刚刚³ 沈飞² 刘兵飞^{1**} 柯燎亮^{2***}

(¹ 中国民航大学航空工程学院, 天津, 300300)(² 天津大学机械工程学院, 天津, 300350)(³ 西安艾力特电子实业有限公司, 西安, 710114)

摘要 电连接器是电子系统中传导电流和传递信息的关键元件, 广泛应用于航空航天、通讯、计算机、汽车工业等领域, 其性能直接影响系统的可靠性与稳定性. 文中首先基于悬臂梁模型推导了电连接器接触组件插拔力的通用计算公式, 分析了插针和插孔在插入和拔出过程中的插拔力变化规律. 进一步在建立了某型号电连接器接触组件有限元模型的基础上, 进行了插拔力计算的仿真分析, 研究了插拔力随位移的变化情况. 继而通过实验研究对电连接器的插拔力进行验证, 结果表明: 理论模型预测值、仿真分析结果与实验测量值的相对误差均小于 8%, 三者呈现显著一致性. 为满足工程需求, 避免插拔力超限, 最后使用理论模型对电连接器接触组件的弹片长度和厚度进行合理设计, 确定了保证插拔力合格的设计区间, 为电连接器结构设计提供了理论依据.

关键词 电连接器, 插拔力, 理论模型, 仿真分析, 结构设计

DOI: 10.19636/j.cnki.cjsm42-1250/o3.2025.020

0 引言

电连接器作为电子电气系统的关键基础元件, 承担着电流传导与信号传输的核心功能^[1,2], 广泛应用于航空航天、通信工程及汽车工业等领域. 但因其工作环境复杂、恶劣, 其已成为公认的四种较易失效的元件之一. 其中, 接触组件作为电连接器的核心部件^[3], 其力学性能对电连接器性能具有重要影响.

在插拔过程中, 接触组件间的滑动摩擦会显著影响插拔力的大小与分布^[4,5]. 过大的插拔力不仅加剧摩擦磨损, 还可能导致插针变形或弹片断裂, 进而引发接触失效^[6]. 因此, 精准调控插拔力已成为提升电连接器可靠性的关键目标. 研究表明, 插拔力受多种结构参数影响, 包括弹片长度、厚度、开槽宽度及收口量等^[7]. 目前, 插拔力的研究主要基于理论建模、有限元仿真与实验测定三类方法^[8-11]. 例如, 闫美红^[12]通过理论-仿真协同分析, 分析了部分结构参数对两种不同型号绞线插针式电连接器插拔力变

化曲线的影响. Beloufa 等^[13]通过 ANSYS 仿真研究了高功率电连接器的插入力, 得到了双接触点设计可使插入力增大的结论. Zeng 等^[14]对 micro-D 型电连接器绞丝接触点插拔过程进行动力学模拟与实验研究, 得到了最优结构参数.

插拔力的精准控制离不开对接触组件结构尺寸的合理设计. 且在加工设计中, 其接触特性对电气系统可靠性具有重要影响^[15], 而如何在工程设计中合理定义接触组件的结构参数仍是设计的难点^[16]. 当前研究主要通过参数优化策略调控电连接器插拔力. 潘骏与骆燕燕等^[17,18]率先从结构参数敏感性出发, 揭示了簧片缩口量、厚度及长度对插拔力的调控作用, 且明确缩口量为关键敏感参数. Lv 等^[19]进一步聚焦槽宽的精细化控制, 通过实验与仿真计算将插拔力精准约束于 0.8~1.2 N 的目标区间. Hsu 等^[20]通过引入参数化有限元方法与序列线性规划算法, 优化了非对称弯曲臂几何构型, 使插入力峰值降低 31.7%, 体现了几何协同优化的高效性. Horn 等^[21]则深化至局部接触界面的极限优化, 通过尖锐

* 国家自然科学基金项目(12332006; 12372098), 天津市教育委员会研究项目(2024ZD021)和天津市自然科学基金项目(24JCZDJC00970)资助.

2025-07-22 收到修改稿, 2025-07-24 网络首发.

** 通讯作者. E-mail: bfliu@cauc.edu.cn.

*** 通讯作者. E-mail: llke@tju.edu.cn.

化插头尖端曲率与优化插座入口轮廓,使插入力下降了 30%。此外,研究表明,电连接器可靠性主要取决于插入力的稳定性^[22],后续涉及弹片的多参数优化可系统性提升接触组件的综合性能^[23]。

综上,现有研究虽为电连接器接触组件的参数优化奠定了基础,但多聚焦单一参数的独立影响,对弹片长度与厚度等参数的耦合作用研究不足,鲜少有研究结合工程实际建立插孔结构的合格设计区间。为满足工程需求,避免插拔力超限并提升可靠性与性能,本文提出电连接器接触组件多参数协同优化方法,构建了理论建模-数值仿真-实验验证的技术路径:建立插拔力理论及有限元模型进行计算;结合全自动插拔实验验证模型准确性及适用性;基于插拔力安全范围,定义关于弹片长度与厚度的合格设计区间。可为电连接器的结构优化、性能提升及可靠性增强提供参考。

1 接触组件插拔力理论模型

构建电连接器插拔力理论模型,需先通过有限

元分析获取挠度与径向力的比例系数,将其代入后续理论公式,进而完成插拔力理论模型推导。

1.1 挠度与径向力比例系数计算

开槽式接触件的接触压力由插孔弹片弹性变形提供,在实际工作中插孔弹片的基体端可视为固定端,另一端为自由端;插针与弹片接触时,可认为载荷作用于自由端;同时,当接触件对插后,弹片的径向变形量相对于接触件长度较小^[24],在此条件下进行理论推导时,一般将弹片简化为悬臂梁结构,在此结合蔺欣欣^[7]的经验:悬臂梁变形对挠度的贡献度大于过渡截面旋转产生的挠度,但单纯考虑悬臂梁变形的理论模型准确度小于二者同时考虑的准确度。所以本文在悬臂梁变形的基础上同时考虑与弹片连接的空心环结构并将其简化为半刚性梁模型。如图 1 所示。图中 F 为施加在悬臂梁一端的外力, L 为其长度, y 为弹片变形量, δ 为截面转角, M 为转矩。

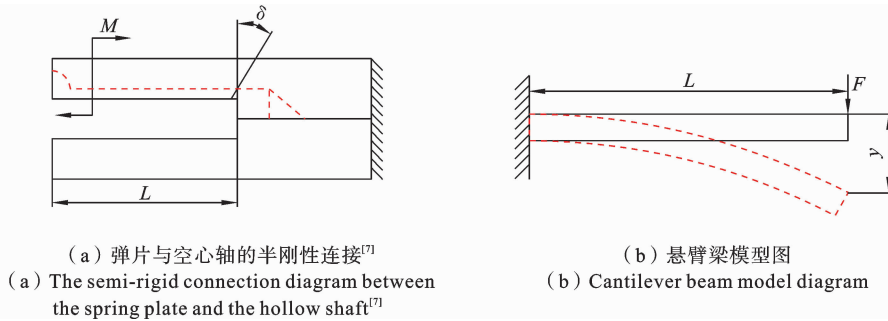


图 1 简化模型图

Fig. 1 Simplified model diagram

弹片变形 y 由悬臂梁变形 y_1 与悬臂梁及空心轴的过渡截面旋转导致的附加变形 y_2 组成。

$$y = y_1 + y_2 \quad (1)$$

其中 y_1 可由悬臂梁挠度公式计算出,将悬臂梁及空心轴间的连接看作半刚性连接^[25],采用 Frye-Morris 函数模型计算其附加变形 y_2 :

$$y_2 = L\delta = L[C_1 KM + C_2 (KM)^3 + C_3 (KM)^5] \quad (2)$$

式中 δ 为截面转角, $M = FL$, $K = EI$ 为截面抗弯刚度, E 为悬臂梁的杨氏模量, I 为截面惯性矩, C_1 、 C_2 和 C_3 为拟合系数。

结合式(1)和式(2),即有:

$$y = y_1 + L[C_1 KFL + C_2 (KFL)^3 + C_3 (KFL)^5] \quad (3)$$

上式中拟合系数通过有限元分析获取,因插孔接触部位呈对称结构,故在 ABAQUS 软件中构建仅含一个弹片的模型,如图 2 所示。依次施加 20 个间隔 0.5 N

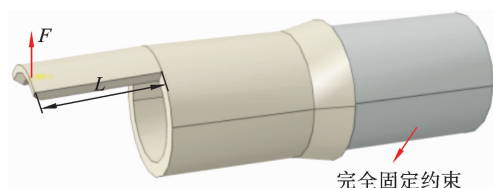


图 2 插孔弹片仿真模型及约束情况

Fig. 2 Simulation model and constraints of socket spring plate

的载荷,以模拟弹片受力变形的过程.进而求得不同力 F 值所对应的挠度 y 的数值,如表 1 所示.

表 1 插孔受力与变形关系表

Table 1 Table of the relationship between force and deformation of socket

$F(N)$	$y(mm)$	$F(N)$	$y(mm)$
0.5	0.0076443	5.5	0.0840373
1.0	0.015338	6.0	0.0918316
1.5	0.0230129	6.5	0.0990026
2.0	0.0297772	7.0	0.106720
2.5	0.0380715	7.5	0.114315
3.0	0.0453658	8.0	0.122109
3.5	0.0531601	8.5	0.1290803
4.0	0.0610544	9.0	0.137397
4.5	0.0685487	9.5	0.145592
5.0	0.0764430	10	0.153386

对数据进行拟合,可得到如图 3 所示的拟合曲线:

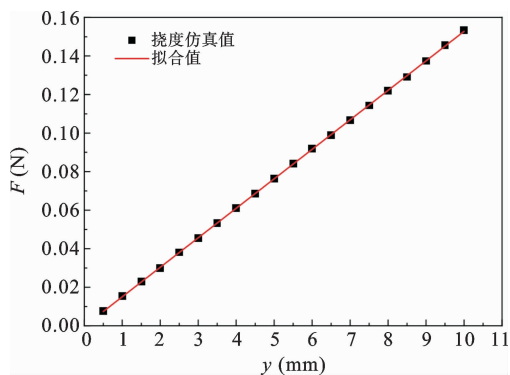


图 3 挠度 y 与外力 F 的关系图

Fig. 3 Deflection y versus external force F

$$y=0.0153F-1.185\times 10^{-6}F^3+1.942\times 10^{-8}F^5 \quad (4)$$

上式中因系数间相差量级较大,较小数值可忽略不计,故弹片受力与变形的关系可近似为线性关系:

$$y=0.0153F \quad (5)$$

故挠度与径向力比例系数可取 $C=0.0153$.

其中比例系数 C 随参数变化的规律如表 2 所示.

表 2 C 值与结构参数关系表

Table 2 Table of relationship between C value and structural parameters

参数	参数值	C 值	变化率
弹片长度	1.2 mm	0.0089	
	1.35 mm	0.0118	32.6%
	1.5 mm	0.0153	29.7%
	1.65 mm	0.0195	27.5%
	1.8 mm	0.0244	25.1%
弹片厚度	0.144 mm	0.0244	
	0.162 mm	0.0199	-18.4%
	0.18 mm	0.0153	-23.1%
	0.198 mm	0.0127	-17%
	0.216 mm	0.0107	-15.7%
开槽宽度	0.1 mm	0.0153	
	0.11 mm	0.0157	2.6%
	0.12 mm	0.0161	2.5%
	0.13 mm	0.0166	3.1%
	0.14 mm	0.0171	3%
收口量	0.042 mm	0.0152	
	0.049 mm	0.01523	0.2%
	0.056 mm	0.01524	0.07%
	0.063 mm	0.01526	0.13%
	0.07 mm	0.0153	0.26%

表 2 中探讨了弹片长度、弹片厚度、开槽宽度及收口量对 C 的影响规律,本文的分析过程基于原始尺寸进行 $\pm 20\%$ 内的参数变动计算.其中,为避免弹片挤压或重叠,开槽宽度仅考虑增大情形,收口量仅考虑减小情形,结果表明: C 值随弹片长度、开槽宽度和收口量的增大而增大,但与弹片厚度呈负相关.且弹片长度和厚度对 C 值影响较大,可为后续研究提供参考.

1.2 插拔力理论模型

电连接器接触组件采用过盈配合设计,以维持其机械稳定性.但过盈配合产生的较大摩擦力会造成初始插入困难.为此,在插孔接触端面进行倒角与圆角复合处理,以减缓初始插入时的冲击力和可能引入的磨损.

(a) 插入过程:

电连接器的插入过程分为插入过渡阶段和插入稳定阶段.插入过渡阶段与稳定阶段的判断标准为:随着插针持续插入,弹片产生弹性变形.当弹片不再产生弹性变形时,表明达到临界点,即将由过渡阶段进入稳定阶段.其中插入过渡阶段为任一状态下的受力分析如图4所示.

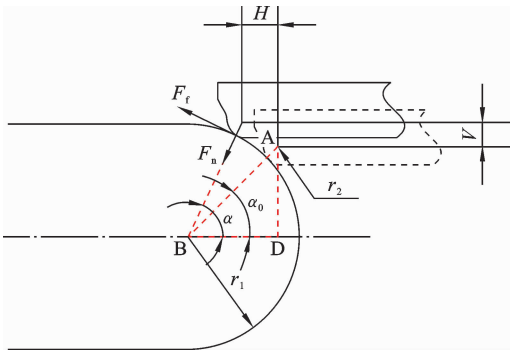


图4 插入过渡阶段受力分析图

Fig. 4 Force analysis diagram of the insertion transition phase

在过渡阶段内,插针由初始接触位置运动到任一位置时,插孔弹片的挠度变化量为 V ,插针插入深度变化量为 $H, 0 \leq H \leq |BD|$. 则有:

$$V = (r_1 + r_2) (\sin \alpha - \sin \alpha_0) \quad (6)$$

$$H = (r_1 + r_2) (\cos \alpha_0 - \cos \alpha) \quad (7)$$

其中 r_1 为插针半径, r_2 为圆角半径, α_0 为初始接触位置与水平轴的夹角, α 为运动后的位置与水平轴的夹角. ($\alpha_0 \leq \alpha \leq \pi/2$)

由图4可得:

$$\frac{F_i}{4} = F_f \sin \alpha + F_n \cos \alpha = F_n (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \quad (8)$$

$$F = F_n \sin \alpha - F_f \cos \alpha = F_n (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) \quad (9)$$

其中 F_i 为插拔力, F_f 为接触处摩擦力, F_n 为法向接触压力, $F_f = \mu F_n, \mu$ 为摩擦系数.

由式(5)可知,挠度等于径向力与比例系数相乘,故挠度变化量 V 的另一表达式如下:

$$V = CF \quad (10)$$

将式(6)和式(9)代入(10)可得:

$$F_n = \frac{(r_1 + r_2) (\sin \alpha - \sin \alpha_0)}{C (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)} \quad (11)$$

结合式(11)及(8),插入过渡阶段的力可表示为:

$$F_i = \frac{4(r_1 + r_2) (\mu \tan \alpha + 1) (\sin \alpha - \sin \alpha_0)}{C (\tan \alpha - \mu)} \quad (12)$$

结合式(7)及(12)可得:

$$F_i = \frac{4H (\sin \alpha - \sin \alpha_0) (\mu \tan \alpha + 1)}{C \cos \alpha_0 - \cos \alpha (\tan \alpha - \mu)} \quad (13)$$

令 $r_1 + r_2 = r$, 最终可得插入过渡阶段插拔力的理论公式为:

$$F_i = \frac{4}{C} r \left[\sin \left(\arccos \frac{|BD| - H}{r} \right) - \sin \left(\arccos \frac{|BD|}{r} \right) \right] \cdot \frac{\mu \tan \left(\arccos \frac{|BD|}{r} \right) + 1}{\tan \left(\arccos \frac{|BD|}{r} \right) - \mu} \quad (14)$$

当接触进入稳定阶段时,在此阶段插孔弹片停止弹性变形,此时插入力仅由二者间摩擦力产生,插入力可表示为:

$$F_i = 4\mu F_n \quad (15)$$

(b) 拔出过程:

拔出过程同样可分为拔出过渡阶段和拔出稳定阶段,拔出过渡阶段任一状态下的受力分析如图5所示.

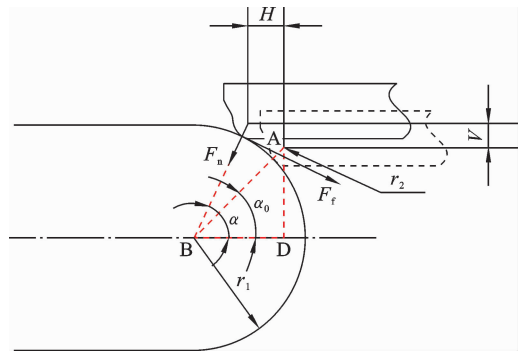


图5 拔出过渡阶段受力分析图

Fig. 5 Force analysis diagram of the extraction transition phase

其中拔出过渡阶段与稳定阶段的判断标准为:

随着插针持续拔出,当弹片再次产生弹性变形时,表明达到临界点,即将由稳定阶段进入过渡阶段。

拔出过渡阶段的受力分析如下:

$$\frac{F_i}{4} = F_f \sin\alpha - F_n \cos\alpha \quad (16)$$

$$F_i = \frac{4}{C} r \left[\sin\left(\arccos \frac{|BD| - H}{r}\right) - \sin\left(\arccos \frac{|BD|}{r}\right) \right] \frac{1 - \mu \tan\left(\arccos \frac{|BD|}{r}\right)}{\tan\left(\arccos \frac{|BD|}{r}\right) + \mu} \quad (18)$$

拔出稳定阶段,拔出力与插入力大小相同,方向相反,即:

$$F_i = -4\mu F_n \quad (19)$$

插入过渡阶段、稳定阶段和拔出过渡阶段的插拔力如式(14)、(15)和(18)所示,计算结果表明,过渡阶段与稳定阶段临界点的插拔力绝对值相等均为 0.725 N,这一边界值的一致性确保了过渡与稳定

$$F = F_n \sin\alpha + F_f \cos\alpha \quad (17)$$

结合式(6)、(7)、(9)、(16)和(17),拔出过渡阶段的插拔力理论公式为:

阶段插拔力理论模型在临界点的连续性。

2 接触组件插拔力仿真

2.1 有限元模型建立

航空电连接器实物及模型如图 6 所示,该图(a)展示了其外部壳体结构及接触端子分布。

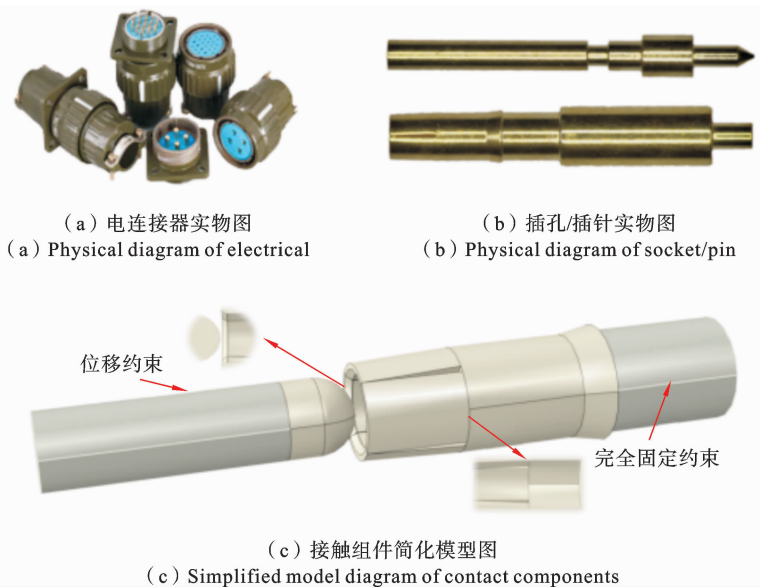


图 6 电连接器实物及模型图

Fig. 6 Electrical connector physical and model diagram

在此主要研究电连接器的接触组件,图 6(b)为某型号插孔与插针的实物图,可呈现内部弹片的排列特征.为进行后续数值模拟,构建了接触组件简化模型,如图 6(c)所示.且插针和插孔的主要尺寸参数如表 3 所示.在此尺寸下,弹片收口量定为 0.07 mm,弹片近乎贴合,符合实际。

结合工程需要与材料性能特点,本研究将插孔材料定义为铍青铜 C17300,其具有优异的导电性与高强度特性,可承受高载荷结构应力^[26].同时,将插

表 3 产品尺寸表

Table 3 Product size table

模型 尺寸(mm)	插孔	插针
内径	1.24	—
外径	1.6	1.165
圆角半径	0.02	—
倒角半径	0.1	—
弹片长度	1.5	—
劈槽宽度	0.1	—

针材料定义为 K4J29, 其与玻璃材料的热膨胀系数彼此相似^[27]. 插针和插孔的材料参数如表 4 所示^[28-30].

表 4 模型材料参数信息

Table 4 Model material parameter information

部件	弹性模量(MPa)	泊松比
插孔	129000	0.33
插针	140000	0.3

2.2 网格划分

在有限元模型网格划分中, 为确保计算精度与效率的平衡, 采用分区域网格划分策略. 首先对整体模型进行全局结构化网格划分, 随后对插针与插孔接触摩擦关键区域及弹片根部应力集中区域实施局部网格加密处理. 主要包括: 弹片圆角处布种尺寸为: 0.001 mm/0.02 mm; 弹片根部布种尺寸为: 0.01 mm; 插针半球面布种尺寸为: 0.001 mm/0.05 mm; 插针圆柱形基体接触部位布种尺寸为: 0.001 mm/0.05 mm. 未接触部位网格布种尺寸为 0.12 mm. 如图 7 所示. 其中, 插孔结构几何规则, 采用单元类型为 C3D8R 的六面体网格; 插针头部因半球面的几何复杂性, 接触区域采用单元类型为 C3D4 的四面体网格; 其余部分沿用单元类型为 C3D8R 的六面体网格^[31]. 该划分方法有效平衡了关键区域精度与整体计算效率.

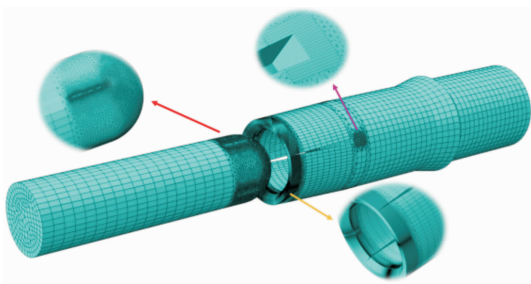


图 7 有限元模型网格局部加密图

Fig. 7 Local refinement diagram of finite element model mesh

2.3 荷载及边界条件

针对电连接器插针-插孔的配合过程, 基于 ABAQUS/Standard 模块开展静态有限元分析. 接

触与边界条件设置如下.

(1) 接触设置: 定义插针与插孔弹片接触面为表面与表面接触. 其中插针表面为主动面, 插孔弹片表面为从动面. 接触属性中, 切向行为采用罚函数法模拟摩擦效应, 摩擦系数为 0.1^[32], 法向行为采用默认硬接触准则, 允许接触面分离.

(2) 边界条件设置: 采用完全固定的边界条件约束插孔模型后端所有自由度; 在插针末端施加轴向位移荷载, 采用幅值中“表”的功能实现完整插拔 1 mm 的过程. 施加位置如图 6(c) 所示.

2.4 仿真求解及后处理分析

基于上述设置完成有限元求解, 获得插拔力-插入深度的变化曲线及插孔弹片根部的应力/应变-时间曲线图, 如图 8 和图 9 所示. 插拔过程可分为两个特征阶段: 插入/拔出过渡阶段 *ab* 与稳定阶段 *bc*. 且插入过渡阶段峰值插拔力与稳定阶段插拔力的差值决定插入初始阶段的猛冲程度, 差值越大, 猛冲程度越大; 同时, 插入过渡阶段峰值插拔力反映插入时的困难程度, 数值越大, 插入困难程度越大.

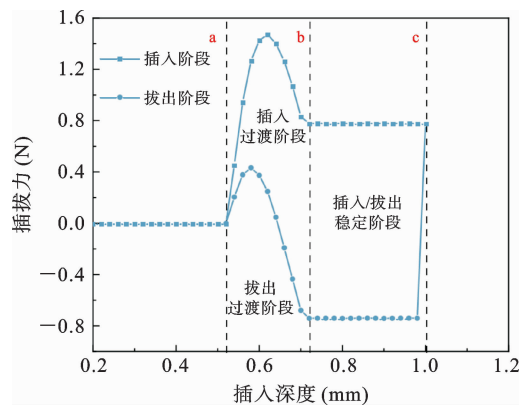


图 8 插拔力-深度曲线图

Fig. 8 Insertion & extraction force versus depth

在拔出过渡阶段, 即从刚刚退出完全接触状态到完全不接触过程中, 拔出力逐渐变大直至其值大于 0, 变为拔出过程的助力^[5].

本文在仿真软件中提取的插针圆柱基体处的轴向反作用力(RF3), 该力为法向接触力与摩擦力的合力. 故这一现象产生的原因为: 接触件由稳定阶段转入到过渡阶段后, 插针圆柱形基体脱离插孔弹片的接触区域, 接触点转移至插针前端半球面, 使得接

触面法向方向由垂直于轴线的方向转为垂直于半球形面的方向. 同时, 弹片因接触压力减小发生弹性回弹, 在接触点产生法向接触力, 因过渡阶段接触点法线与轴线夹角小于 90° , 致使出现一个指向插孔内部的轴向分力. 叠加拔出过程中阻碍相对运动的摩

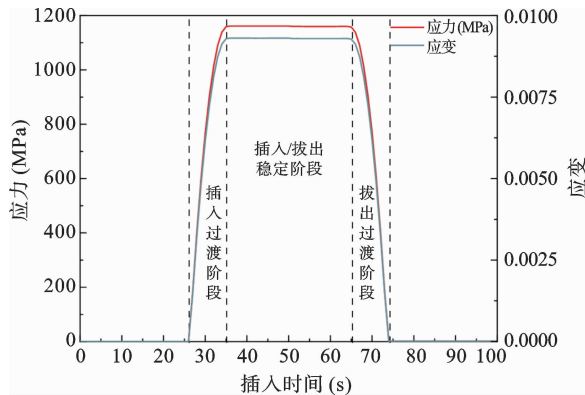


图9 应力/应变-时间曲线图

Fig.9 Stress/strain versus time

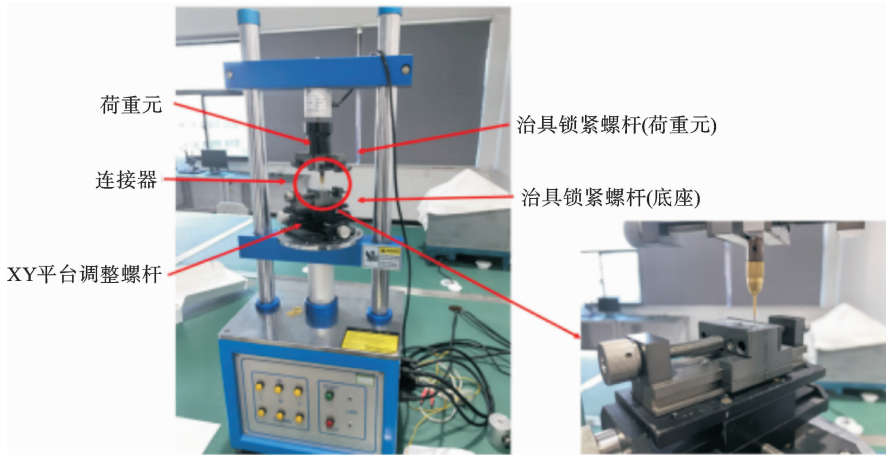


图10 全自动插拔力试验机

Fig.10 Fully automatic insertion and extraction force tester

为保障数据可靠, 实验采用标准化流程: ① 安装待测试件至专用夹持工装并轴向校准插针至预设深度; ② 打开此测试软件, 设置有效保护力为 45 kg; ③ 将工装定位至荷重元测力端, 降下底座, 使插针、插孔处于不受力状态; ④ 配置测试参数: 运动方向为压缩方向; 双向模式; 荷重测试范围设置为 20 N; 行程范围设置为 1 mm; 测试速度设置为 5 mm/min; ⑤ 荷重及行程归零; ⑥ 执行插拔过程, 同步采集插拔力-位移数据. 该流程通过参数标准化控制,

擦力, 二者叠加形成正向合力, 导致在位移-插拔力曲线上出现一段力为正值的情况^[33,34].

仿真结果表明, 插孔弹片根部为应力集中区域, 提取单次插拔过程中应力和应变最大值处单元节点的应力和应变情况, 如图 9 所示. 横坐标为插入指定深度所用的时间, 其最大应力低于材料屈服强度, 拔出后残余应力衰减至弹性恢复阈值以下, 无显著塑性应变积累, 表明弹片变形处于弹性主导状态.

3 试验测试及模型验证

为验证理论模型与仿真结果的可靠性, 在环境温度为 25.4°C , 测试湿度为 59%RH 的情况下, 使用全自动插拔力试验机(1220S)进行验证, 实验仪器如图 10 所示. 该设备通过伺服驱动系统模拟插拔动作, 同步采集动态力数据, 可精确控制速率及循环次数, 满足电连接器接触力学特性测试需求.

可确保数据可重复性与验证可靠性.

完成上述流程后, 可深入分析插针-插孔接触界面的力学情况. 理论、仿真和实验的对比结果如图 11 所示.

鉴于插入过渡阶段峰值插拔力与稳定阶段插拔力的差值决定插入初始阶段的猛冲程度及插入过渡阶段峰值插拔力表征初始插入难度, 故图 11 中重点对比该阶段理论、仿真与实验的峰值差异, 展示了三者的插拔力-插入深度的曲线对比情况: 插入过渡阶

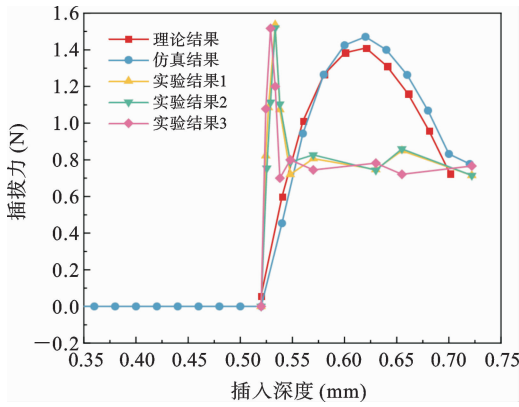


图 11 插入阶段的理论、仿真和实验结果对比
Fig. 11 Comparison of theoretical, simulation and experimental results for insertion phase

段实验平均峰值(1.524 N)较理论值(1.41 N)与仿真值(1.471 N)的误差分别为 7.5%与 3.5%;稳定阶段实验平均值(0.768 N)较理论值(0.725 N)与仿真值(0.759 N)的误差分别为 5.6%与 1.2%,误差均小于 8%。其中,图 11 初始阶段实验力值偏高且峰值位移提前,造成这种差异可能的原因如下:

(1) 实际接触非理想性:实验中可能存在表面粗糙度差异、微量污染物、装配对中误差及几何公差(如测试件未加工圆角而预测模型引入了圆角),导致实际接触点和接触面积与理想模型不符。

(2) 位移测量精度限制:实验所用仪器的位移传感器在微小位移内的精度有限,可能导致接触起始点判断偏差,即在记录约为 0.525 mm 时的真实插入深度已大于 0.525 mm,致使记录的峰值位置相对提前。

(3) 加载速度影响:实验的加载速度高于仿真设置,当以较高的速度加载时,可能导致试件真实位移滞后于记录值,使记录的峰值位置相对提前。

综上,理论预测、仿真分析与实验结果呈现良好一致性,后续可采用理论模型替代大量仿真和试验验证,显著提高研究效率。

4 接触组件结构设计

插孔弹片的结构参数变化会显著改变插拔力特征值,多参数协同改变易致插拔力超限。因此,需建立多参数协同优化的插拔力合格设计区间,以实现

性能的可控提升。

尽管弹片参数(长度、厚度、宽度、材质等)及应用场景均会影响设计区间,但若全面考量将使研究范围过大。鉴于弹片长度与厚度是插拔力的主要影响因素,故本研究聚焦于这两个参数进行设计区间的确定。结合工程实际需要,所研究的电连接器插拔力安全范围为 0.4~1.5 N^[35],依据此插拔力阈值判定其接触性能,其中下限为稳定阶段的插拔力,上限为插入过渡阶段的峰值插拔力。

插孔弹片长度与插拔力呈显著相关性:插孔弹片过长时正向作用力过小,影响其可靠性与稳定性;插孔弹片过短时正向作用力过大,造成插拔困难及使用寿命衰减。标准的电连接器接触长度要求为不小于 0.86 mm,且建议满足 2-4 mm^[36],由于本研究模型为非标准件,结合工程典型工况及提高零件精细化程度的需求,因此确定弹片长度的范围为:0.8~2.5 mm。弹片厚度为在弹片长度已定义的情况下,为满足插拔力要求,结合工程经验进行调整的尺寸范围。

表 5 低阈值插拔力状态下插孔结构参数设计区间数据表

Table 5 Low-Threshold insertion/extraction force: socket parameter design range data table

序号	弹片长度 (mm)	弹片厚度 (mm)	理论值 (N)	仿真值 (N)	误差 (%)
1	0.8	0.07	0.409	—	—
2	0.9	0.08	0.402	—	—
3	1	0.0905	0.409	0.405	1
4	1.1	0.092	0.423	—	—
5	1.2	0.12	0.401	0.45	12.5
6	1.3	0.125	0.418	0.381	8.9
7	1.4	0.139	0.421	0.37	12.1
8	1.5	0.162	0.434	—	—
9	1.6	0.165	0.417	—	—
10	1.7	0.17	0.44	—	—
11	1.8	0.18	0.447	—	—
12	1.9	0.185	0.404	0.444	10
13	2	0.2	0.442	0.457	3.4
14	2.1	0.21	0.445	—	—
15	2.2	0.22	0.432	—	—
16	2.3	0.24	0.425	—	—
17	2.4	0.25	0.418	—	—
18	2.5	0.26	0.442	0.456	3.2

表 6 高阈值插拔力状态下插孔结构

参数设计区间数据表

Table 6 High-Threshold insertion/extraction force; socket parameter design range data table

序号	弹片长度 (mm)	弹片厚度 (mm)	理论值 (N)	仿真值 (N)	误差 (%)
19	0.8	0.103	1.467	1.506	2.6
20	0.9	0.115	1.423	—	—
21	1	0.13	1.404	1.325	5.6
22	1.1	0.139	1.492	—	—
23	1.2	0.145	1.449	—	—
24	1.3	0.16	1.474	—	—
25	1.4	0.175	1.496	—	—
26	1.5	0.185	1.432	—	—
27	1.6	0.195	1.439	1.468	2
28	1.7	0.21	1.442	1.481	2.7
29	1.8	0.225	1.465	—	—
30	1.9	0.24	1.481	—	—
31	2	0.25	1.441	—	—
32	2.1	0.265	1.476	—	—
33	2.2	0.28	1.494	1.479	1
34	2.3	0.29	1.443	1.44	0.2
35	2.4	0.295	1.455	—	—
36	2.5	0.31	1.488	—	—

鉴于仿真与试验的计算和时间成本,结合理论模型验证结果的高置信度,在所选弹片长度范围内完成了 36 组理论模型计算. 为验证模型可靠性,采用随机抽样法选取 13 组模型进行有限元仿真验证,可证明该设计区间的合理性. 数据详见表 5 与表 6.

根据所计算的 36 组数据,进行曲线拟合,可得到如图 12 所示的合格设计区间.

图中两条边界线的拟合函数如下:

$$h_1 = 0.46l^8 - 5.79l^7 + 31.53l^6 - 95.99l^5 + 178.44l^4 - 207.03l^3 + 146.19l^2 - 57.26l + 9.59 \quad (20)$$

$$h_2 = -0.16l^8 + 2.51l^7 - 16.36l^6 + 59.37l^5 - 130.81l^4 + 178.47l^3 - 146.86l^2 + 66.62l - 12.7 \quad (21)$$

式中 h_1 和 h_2 表示弹片的厚度值 l 表示弹片的长度.

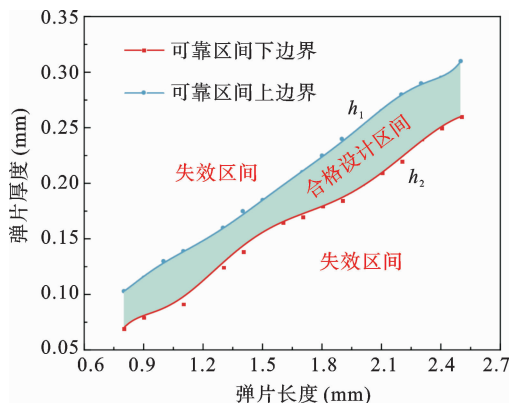


图 12 电连接器插孔结构尺寸合格的设计区间二维示意图
Fig. 12 Two-dimensional schematic diagram of the qualified design range of electrical connector socket structure size

基于上述函数生成的插拔力合格设计区间,可知弹片厚度随长度呈非线性递增分布. 可见短弹片需降低厚度以维持有效弹性变形能力,长弹片则需增加厚度补偿结构刚度损失. 图中阴影区域表征插拔力满足工程阈值的弹片参数合格设计区间,其边界由弹片长度-厚度共同界定. 当参数位于合格设计区间外侧时,插拔力偏离阈值将诱发接触失效或机械损伤. 考虑理论模型误差、制造公差等因素,工程应用中建议规避临界边界区域. 本研究模型主要应用于航空航天行业,实际使用中应根据其实际工作环境进行调整:标准环境下可根据需求对此设计区间进行使用;在高温条件或振动条件下,会出现插拔力降低的情况,故在技术可行性与操作要求允许的情况下,构建合格设计区间时,可适当增大插拔力的上限以增强其适用性^[37-38]. 但不同行业的应用环境和适配场景存在差异,本研究可为其他行业研究者提供借鉴,使其针对特定需求完成其适配的设计区间.

5 结论

本研究通过理论分析、数值仿真与实验验证相结合的方法,系统揭示了电连接器插拔力力学行为演化规律,并建立参数化设计准则,主要结论如下:

(1) 插拔力理论模型有效性验证:构建的插拔

力理论模型与仿真和实验数据对比效果理想,最大误差为7.5%,且在36组参数组合中最大误差为12.5%,同样表现出高准确性.多源数据的一致性验证了理论模型的适用性,证实该模型可作为插拔力快速评估的工具.

(2) 插拔力约束下弹片结构参数设计区间的构建与验证:弹片长度与厚度是影响插拔力的关键结构参数.基于插拔力安全范围及工程约束条件,通过理论计算与仿真验证的方法,在36组理论计算中随机选取了13组进行仿真对比的基础上,建立了弹片长度与厚度的二维合格设计区间,划分了安全与失效区间.为其抗失效设计与寿命优化提供了工程指导边界.

(3) 工程应用价值与展望:研究通过弹片参数优化提升插拔性能及寿命为电连接器接触组件的结构优化提供指导.未来需探索环境因素、多周期磨损等对插拔力的影响.

参考文献

- [1] Cheng X Z, Lv K H, Zhang Y, Yang W X, Wang L, Zhao W H, Liu G J, Qiu J. Intermittent fault diagnosis in connector components based on arc wave characteristics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G; Journal of Aerospace Engineering, 2024, 238(11): 1068-1081.
- [2] Song H C, Kim Y L, Lee D H, Song J B. Electric connector assembly based on vision and impedance control using cable connector-feeding system [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2017, 31(12): 5997-6003.
- [3] 张平均, 嵇凯生, 王颖, 李士, 王小红. 电连接器接触件接触特性仿真分析[J]. 福建工程学院学报, 2023, 21(3): 264-268. (Zhang P J, Ji K S, Wang Y, Li S Y, Wang X H. Simulation analysis of contact characteristics of electrical connectors[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2023, 21(3): 264-268. (in Chinese))
- [4] Schutz S, Suarez S, Mucklich F. Tribo-electric analysis of multi-cycle wear in asymmetric laser-structured cu-sn connectors[J]. Tribology letters, 2023, 71(4): 127.
- [5] 李友华, 沈飞, 王志慧, 刘奕光, 邢前, 柯燎亮. 计及磨损的电连接器插拔力分析[J]. 固体力学学报, 2024, 45(1): 52-60. (Li Y H, Shen F, Wang Z H, Liu Y G, Xing Q, Ke L L. Insertion and withdrawal forces of electrical connectors considering wear[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2024, 45(1): 52-60. (in Chinese))
- [6] 侯香妮, 彭战良, 李百科, 赵欣, 张祎. 基于有限元仿真的某脱落电连接器拉脱力研究[J]. 机电元件, 2024, 44(2): 13-17. (Hou X N, Peng Z L, Li B K, Zhao X, Zhang Y. Research on the pulling force of a detachable electrical connector based on finite element simulation[J]. Electromechanical Components, 2024, 44(2): 13-17. (in Chinese))
- [7] 蔺欣欣. SMA型连接器电接触可靠性研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2018. (Lin X X. Study on Electrical Contact Reliability of SMA Connector[D]. Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese))
- [8] 孟圆. 电连接器插拔与电接触行为的研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2020. (Meng Y. Study on Insertion-Withdrawal and Electrical Contact Behaviors of Connectors[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese))
- [9] Bogard F, Murer S, Debray K, Yu N, Bartkowiak B. FE optimization of the ejection force of a spring-maintained connector [J]. Mechanics & Industry, 2016, 17(6): 605.
- [10] Yuan R, Li H Q, Wang Q Y. Simulation-based design and optimization and fatigue characteristics for high-speed backplane connector[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(6): 168781401985675.
- [11] Dong S, Jing Z, Yong H D, Zhou Y H. A theoretical model for characterizing the internal contact of the CICC strands under axial strain[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2016, 29(05): 455-467.
- [12] 闫美红. 绞线插针电连接器的力学仿真分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2023. (Yan M H. Mechanical Simulation Analysis of Stranded Pin Electrical Connectors[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023. (in Chinese))
- [13] Beloufa A, Amirat M. Design and study of new power connector with parallel contact points[J]. Proceed-

- ings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2018, 232(14): 2014-2021.
- [14] Zeng Z, Zhou Z M, Li X B, Tang M L, Peng B. Numerical modeling and optimization on micro-D electrical connector[J]. International Journal of Numerical Modelling-Electronic Networks Devices and Fields, 2018, 31(1): e2256.
- [15] Qian P, Wang Y W, Chen W H, Wang Z, Wei Y J. Contact reliability design modeling for wire spring-hole electrical connectors[J]. Microelectronics, Reliability: An International Journal & World Abstracting Service, 2023, 148: 115182.
- [16] 曾羽飞, 陈向荣. 电连接器叠片叉状结构接触件的受力研究[J]. 汽车文摘, 2025, (03): 57-62. (Zeng Y F, Chen X R. The research on the force distribution of the lamination fork-shaped structure contacts of electrical connectors[J]. Automotive Digest, 2025, (03): 57-62. (in Chinese))
- [17] 潘骏, 靳方建, 陈文华, 钱萍. 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. (Pan J, Jin F J, Chen W H, Qian P. Structural analysis of electrical connector contacts and insertion-extraction test[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(12): 1636-1641. (in Chinese))
- [18] 骆燕燕, 杨静宇, 任永隆, 张元雷, 李文君. 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. (Luo Y Y, Yang J Y, Ren Y L, Zhang Y L, Li W J. Simulation and experimental study on plug and pull characteristic of electrical connector contact[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2017, 24(2): 168-173. (in Chinese))
- [19] Lv B, Zhou S J, Zhao L Y. Technical research on optimization design of contacts of electrical connector [J]. Journal of Zhejiang University (SCIENCE A), 2007, 8(3): 506-510.
- [20] Hsu Y L, Hsu Y C, Hsu M S. Shape optimal design of contact springs of electronic connectors[J]. Journal of Electronic Packaging: Transactions of the ASME, 2002, 124(3): 178-183.
- [21] Horn J, Egenolf B, Gmbh D. Shape optimization of connector contacts for reduced wear and reduced insertion force[J]. Amp Journal of Technology, 1992, 2: 42-46.
- [22] Qin B, Zhang Y. Comprehensive analysis of electromechanical characteristics and new regression models of a novel slanted groove electrical connector[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2024, 166: 104863.
- [23] Qian P, Chen Q Q, Chen C, Pan J, Han K K. Integrated design of insertions-extractions performance and contact reliability of spring-wire socket electrical connector[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2024, 16(5): 4-7.
- [24] 郭建设, 仇振安, 张小娟, 付金辉. 片式接触件力学模型分析与研究[J]. 机电元件, 2021, 41(3): 45-50. (Guo J S, Chou Z A, Zhang X J, Fu J H. Analysis and research on the mechanical model of reed-type contact [J]. Electromechanical Components, 2021, 41(3): 45-50. (in Chinese))
- [25] 贾博贤. 分离脱落电连接器分离可靠性评估的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2014. (Jia B X. Research on the Separation Reliability Evaluation of Separation Electrical Connector[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2014. (in Chinese))
- [26] Cao J, Li C, Sun Y Z, Wu B A, Tang H Y, Shen X Y, Song K X, Zhou Y J, Cui C Q. Study on the effect of heat treatment on the microstructure and properties of C17300 beryllium copper alloy microwires[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 6578-6592.
- [27] Tian J W, Jin Z, Tang X, Peng W X, Liu J F, Liu Y P, Chen T T, Xiao J Q, Liu J H. Design and fabrication of leadless package structure for pressure sensors[J]. Journal of Electronic Packaging, 2022, 144(4): 041005.
- [28] 王明文. 继电器线圈引出线点焊参数的优化研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2017. (Wang M W. Study on Optimization of Spot Welding Parameters of the Relay Coil Lead Wire[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese))
- [29] 赵雯雯, 赵晶, 刘振照, 陈杰, 李世忠. 旁路开关轴向斜圈弹簧插入力仿真与实验[J]. 厦门理工学院学报, 2020, 28(1): 33-38. (Zhao W W, Zhao J, Liu Z Z, Chen J, Li S Z. Simulation and experiments of in-

- sertion force of bypass switch canted coil spring[J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2020, 28(1): 33-38. (in Chinese))
- [30] 杜建东, 朱赫, 王敏兴. 铍青铜接触件分离力稳定性提升技术研究[J]. 机电元件, 2020, 40(3): 28-31. (Du J D, Zhu H, Wang M X. Research on the stability improvement of separation force of beryllium bronze contact[J]. Electromechanical Components, 2020, 40(3): 28-31. (in Chinese))
- [31] 高瑞, 米彩盈. 基于 ABAQUS 的构架疲劳强度高效分析方法与可视化研究[J]. 机车电传动, 2024, (3): 99-107. (Gao R, Mi C Y. Research on efficient analysis method and visualization for fatigue strength of welded frames based on ABAQUS[J]. Electric Drive for Locomotives, 2024, (3): 99-107. (in Chinese))
- [32] Hsu S W, Liao K C. Wear analysis and verification of metallic terminals for electronic connectors [J]. Engineering Failure Analysis, 2012, 25: 71-80.
- [33] 贺占蜀, 张远西, 王培卓, 汤勇, 邵丽娜. 电连接器接触件的插拔和温升特性[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2017, 45(4): 59-65+80. (He Z S, Zhang Y X, Wang P Z, Tang Y, Shao L N. Insertion-extraction and temperature rise properties of electrical connector[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(4): 59-65+80. (in Chinese))
- [34] 王腾雨, 任万滨. 电连接器接触件插拔模拟试验系统的设计[J]. 电工材料, 2019(1): 12-16. (Wang T Y, Ren W B. A novel test rig of insertion and withdrawal simulation for electrical connector[J]. Electric Materials, 2019(1): 12-16. (in Chinese))
- [35] 李翠玲, 代朋飞, 杨强, 张孟君. 航空电连接器接触性能评估与参数灵敏度分析[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2018, 39(1): 71-75. (Li C L, Dai P F, Yang Q, Zhang M J. Contact performance evaluation and parameter sensitivity analysis for aerospace electrical connector[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2018, 39(1): 71-75. (in Chinese))
- [36] 张剑, 张彦, 王震, 朱艳红, 赵秋芹. 电连接器插拔及接触不良失效分析[J]. 机电元件, 2024, 44(1): 34-38.
- [37] 范景峰. 液动汽车电连接器插拔试验系统设计与分析[J]. 机床与液压, 2025, 53(6): 200-207. (Fan J F. Design and analysis of a plug and pull test system for hydraulic automotive electrical connectors [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2025, 53(6): 200-207. (in Chinese))
- [38] 骆燕燕, 蔡明, 于长潮, 王彪. 振动对电连接器接触性能退化的影响[J]. 航空学报, 2017, 38(8): 118-129. (Luo Y Y, Cai M, Yu C C, Wang B. Influence of vibration on contact performance degradation of electrical connectors[J]. Acta Aerconautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(8): 118-129. (in Chinese))

Numerical Analysis and Precise Control of Insertion and Extraction Forces in Contact Components of Electrical Connectors

Lizhuo Zhao¹ Chunzheng Zhang² Ganggang Chang³

Fei Shen² Bingfei Liu¹ Liaoliang Ke²

(¹*Aeronautical Engineering Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300*)

(²*School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300350*)

(³*Xi'an Elite Electronic Industrial Co., Ltd., Xi'an, 710114*)

Abstract Electrical connectors are critical components in electronic systems, enabling the conduction of electrical current and the transmission of signals. They are extensively used in various fields such as aerospace, telecommunications, computing, and the automotive industry. The reliability and stability of an entire system often depend on the performance of these connectors. Any failure may not only disrupt normal device operation but also result in severe equipment damage. Among known failure mechanisms, contact failure caused by inadequate insertion and extraction force accounts for a significant proportion. To address this issue, a general analytical formula for calculating insertion and extraction force was derived based on a cantilever beam model. This model was used to analyze the mechanical behavior and force variation during the insertion and extraction of the pin and socket components. A comprehensive understanding of the force distribution during these processes was established through this approach. Subsequently, a finite element model was developed for a specific type of electrical connector's contact components. Simulation analyses were conducted to examine how the insertion and extraction force changes with displacement. These simulation results were then validated through controlled experimental tests. The findings indicate that the relative error between the theoretical predictions, simulation outputs, and experimental measurements remains below 8%. The strong agreement among these methods confirms the accuracy and applicability of the developed models. To fulfill practical engineering requirements and avoid excessive mechanical stress, the validated theoretical model was further applied to optimize the design parameters of the connector's contact springs, with a particular focus on their length and thickness. A qualified design range was identified, effectively distinguishing safe and failure regions. This provides clear engineering boundaries for failure-resistant design and enhanced service life. Additionally, the outcomes offer valuable guidance for the structural optimization of contact components in electrical connectors, supporting enhanced performance, stability, and durability in demanding applications.

Key words electrical connector, insertion and extraction force, theoretical model, finite element simulation, structural design