

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.05.009

基于 ANSYS 的 USB 数据接口 球头弹片结构改进

陈锐搏, 姚廷强, 赵 健

(昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650500)

摘 要:为提高 USB 接口数据传输的稳定性和延长使用寿命, 课题组对弹片结构进行了改进。基于弹片压力变形理论和库仑摩擦定律, 同时考虑弹片接触大变形的关键因素, 运用 ANSYS Workbench 软件建立了某型号 USB 数据接口球头弹片和接头接触的力学模型; 运用有限元方法, 对接头与数据接口球头弹片插入过程进行仿真分析, 对比分析了插入过程中球头弹片的力学特性的理论计算和仿真分析结果。研究表明: 球头弹片的 3 种结构参数对其力学特性存在影响, 原始结构设计存在缺陷; 依据仿真分析的结果对 3 种结构参数进行调整, 获得了既能满足其材料屈服强度又具有良好力学性能的结构参数范围。研究结果为高性能 USB 数据接口的结构优化设计与可靠性设计提供了参考依据。

关 键 词: USB 数据接口; 弹片; 有限元方法; ANSYS Workbench

中图分类号: TH123+.4 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2020)05-0049-06

Structure Improvement of USB Data Interface Spring Piece with Ball Head Based on ANSYS

CHEN Ruibo, YAO Tingqiang, ZHAO Jian

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to improve the stability of USB interface data transmission and prolong the service life, the structure of the spring piece was optimized. Based on the pressure deformation theory of spring piece and Coulomb law of friction, and considering the key factors of large deformation of spring piece contact, the mechanical model of the contact between a certain type of USB data interface spring piece with ball head and the plug was established by using ANSYS Workbench software. The simulation analysis of the plug and the data interface spring piece with ball head insertion process was carried out by using the finite element method, and the theoretical calculation and simulation analysis results of the mechanical characteristics of the spring piece with ball head in the insertion process were compared and analyzed. The results show the influence of three different structural parameters of the spring piece with ball head on its mechanical characteristics as well as the defects in the original structural design. According to the results of simulation analysis, the three structural parameters of the ball head spring piece is improved and the range of structural parameters which can meet the material yield strength and have good mechanical properties is obtained. The research results provide a reference for the structural optimization and reliability design of high-performance USB data interface.

Keywords: USB data interface; spring piece; FEM (finite element method); ANSYS Workbench

USB 数据接口是数据传输过程中的重要部件之一, 而弹片作为数据接口内部的核心部件, 由于具有体积小, 质量轻, 回弹性强等特点, 广泛应用于各种类型

的数据接口内部结构之中, 对数据的传输起着至关重要的作用。但是, 数据接口弹片在外部设备接头插入或拔出的过程中, 易受到接头和弹片接触过程中所产

收稿日期: 2020-01-14; 修回日期: 2020-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(11462008)。

第一作者简介: 陈锐搏(1994), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为机械系统动力学。E-mail: Ruibo_Chen@163.com

生的压力导致弹片发生永久性变形或疲劳,从而造成数据接口失效,影响数据的传输。弹片与接头的接触变形问题属于边界条件高度非线性的复杂问题,近几年来,随着计算机技术的发展,有限元方法^[1]成为解决这类问题的重要手段之一,并广泛地应用于各种电子元器件的结构设计^[2-4]当中。左亚军^[5]通过 ANSYS 软件建立了 ATM 机中轴承弹片的有限元模型,对弹片在拾钞过程中的弹力和应力进行了分析,并根据分析得到的结果对弹片进行了结构优化;欧阳波^[6]基于 Abaqus 有限元软件,模拟了连接器在弹片式接触端子内的插入和拔出过程,分析了插入力、拔出力、接触力以及应力之间的关系,利用有限元法和响应曲面法相结合的方式,以插拔过程中弹片式接触端子不发生永久性变形为目标,完成了对弹片式接触端子的优化设计;刘培林等^[7]利用 ANSYS 建立了水下插拔式电连接器中电针和弹片的接触有限元模型,对电针和弹片的插合过程进行了数值模拟,分析了电针在插合过程中弹片的结构参数对弹片的变形量、等效应力、接触应力以及摩擦应力的影响。

课题组针对某型号的 USB 数据接口,首先建立球头弹片插入数据接口的力学模型,计算分析作用力、弹性变形和应力的理论值;再运用 ANSYS Workbench 建立接头与数据接口球头弹片的接触有限元模型,对接头与数据接口的插拔过程中的球头弹片的力学特性进行数值模拟。将模拟结果与理论计算结果进行比较,分析了插拔过程中数据接口球头弹片的不同结构参数对其力学特性的影响,从中发现了对弹片最大弯曲应力影响较大的结构参数;并对现有的结构进行了适当的改进,使数据接口的球头弹片在插拔过程中满足其材料的屈服强度极限。

1 弹片的设计理论

1.1 USB 数据接口的工作过程

如图 1(a) 所示,该型号 USB 数据接口主要由中心固定弹片、球头弹片、固定挡块以及内部金属芯片等组成。当有外部设备需要接入数据接口时,外部设备的接头沿其法向运动与数据接口中的球头弹片发生接触,使球头弹片产生变形;接头的 4 个内表面对中心固定弹片上的 5 个弹簧片施加压力使其变形,随后,接头继续向前运动,直到接头内部的金属芯片与数据接口中的金属芯片完全接触,同时两球头弹片的球头滑入接头两侧的滑槽内,完成插合过程如图 1(c) 所示。由于接头在插入数据接口内部的过程中,接头和数据接口内部的金属芯片几乎不会产生变形,因此可对其运

动模型进行适当的简化,忽略接口内部的金属芯片接触过程如图 1(b) 所示,减少模型计算所需的时间,提高仿真效率。

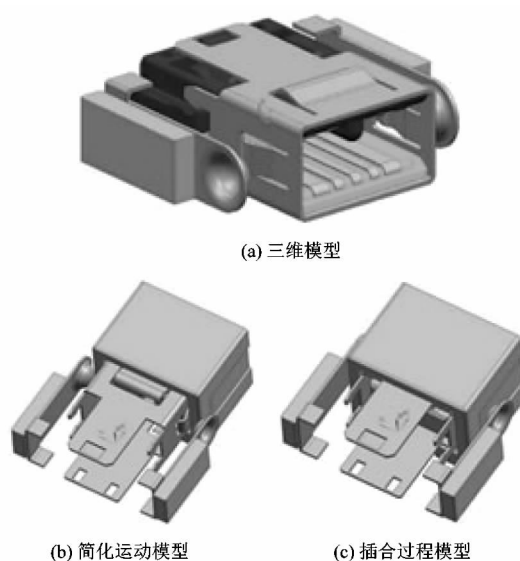


图 1 USB 数据接口的结构及工作过程
Figure 1 Structure and working process of USB data interface

1.2 弹片接触的力学模型

接头与数据接口进行插合的过程中,接头的圆角边与球头弹片的球头部分相接触,并产生了一个法向接触压力 F_n ,使球头弹片发生了变形,如图 2 所示。随着接头的继续运动,最终接头的圆角边与球头弹片的球头顶点相接触,使球头弹片达到了最大变形量,并产生了最大弯曲应力。为具体分析球头弹片的结构参数与受力情况之间的关系,根据材料力学的相关知识可将球头弹片简化为一悬臂梁结构^{[8]709},其等效模型如图 3 所示。作用在弹片上的压力 F 与球头弹片的最大变形量以及球头弹片的各结构参数之间满足如下关系式:

$$F = \frac{EI\gamma_A}{dl^2} \quad (1)$$

其中截面惯性矩(近似为矩形截面)为

$$I = bt^3/12 \quad (2)$$

式中: l 为弹片的有效长度; d 为弹片球头顶点距弹片表面的距离; E 为弹片材料的弹性模量; I 为弹片截面的惯性矩; γ_A 为弹片的球头处的最大变形量; t 为弹片的厚度; b 为弹片的宽度。

在接头插合过程中,接头与球头弹片接触点处的法向压力、接触力,插入力与弹片的弹力以及弹片受到的压力之间保持平衡,并满足库仑摩擦定律。由于接

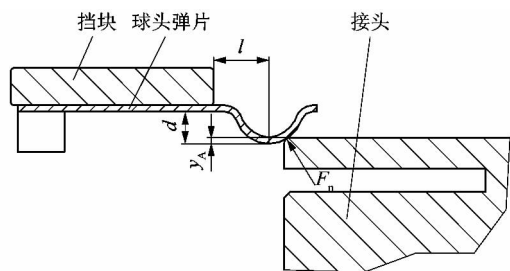


图2 接头插入过程弹片受力状态
Figure 2 Stress state of spring piece during plug insertion process

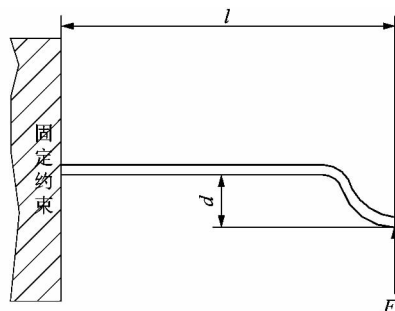


图3 球头弹片的等效模型
Figure 3 Equivalent model of ball head spring piece

头与弹片之间存在摩擦,接头与弹片之间的接触力方向与水平方向的角度为法向压力与接触力之间的摩擦角 α 加上插入力与法向压力之间的正向角 φ ,并且随着接头的向前运动,正向角逐渐增大,当接头运动到弹片的球头顶点位置时法向压力与接触力共线,即正向角 $\varphi = 90^\circ$ 时,弹片所受到的压力最大,此时弹片的弹力与弹片所受到的压力(接触力)保持平衡。接头插入过程的受力状态如图4所示。

由图4(a)可得接头插入力,弹片的弹力满足下列关系式:

$$F_x = F_n \cos \varphi - F_t \sin \varphi = F_n \cos \varphi - \mu F_n \sin \varphi; \quad (3)$$

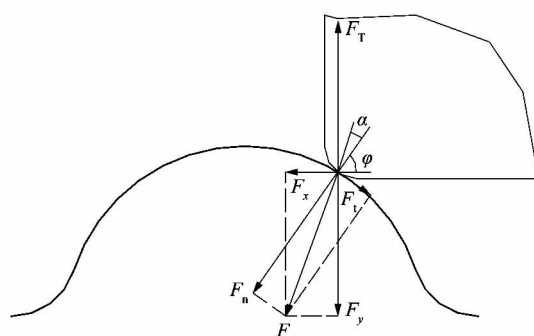
$$F_y = F_T = F_n \sin \varphi + F_t \cos \varphi = F_n \sin \varphi + \mu F_n \cos \varphi. \quad (4)$$

式中: F_x 为接头的插入力, F_y 为接头对弹片的压力, F_n 为弹片所受到的法向压力, F_t 为接触点处的切向分力, F_T 为弹片的弹力, μ 为摩擦因数, φ 为正向角。

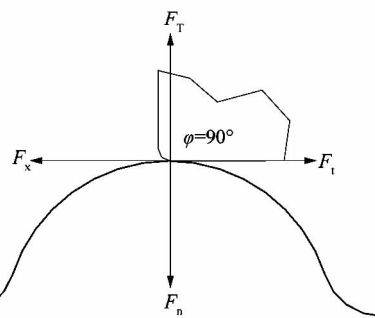
根据公式(1)及图4所示的弹片的等效模型可知,弹片的根部所受到的弯矩最大,即弹片的根部为其最大应力区,最大应力计算公式为:

$$\sigma_{\max} = \frac{Mt}{2I} = \frac{F_y l}{2I} = \frac{E y_A t}{2dl}. \quad (5)$$

式中 M 为截面的弯矩。



(a) 初始接触状态



(b) 到达球头顶点状态

图4 接头插入过程受力分析

Figure 4 Force analysis of plug insertion process

1.3 弹片的理论计算

本次所研究的球头弹片具体结构参数如下:弹片有效长度 $l = 1.781 \text{ mm}$,弹片的球头距弹片表面的距离 $d = 1.04 \text{ mm}$,弹片的厚度 $t = 0.2 \text{ mm}$,弹片宽度 $b = 3.1 \text{ mm}$,弹片的球头处的最大变形量 $y_A = 0.2 \text{ mm}$,弹片的惯性矩 $I = 0.0021 \text{ mm}^4$ 。球头弹片的材料为 SUS304 (不锈钢),接头材料为 PA46-GF30 (尼龙塑料),其材料属性如表1所示。根据表1以及公式(1)~(5)计算出弹片所受到的最大压力 $F = 26 \text{ N}$ (弹片弹力),接头的插入力 $F_x = 3.38 \text{ N}$,弹片的最大弯曲应力 $\sigma_{\max} = 2212 \text{ MPa}$,而弹片材料 SUS304 的屈服强度极限为 650 MPa ,弹片的最大弯曲应力远超其材料的屈服强度极限,接头在插入过程中会使球头弹片发生永久性变形。

表1 接头与球头弹片的材料属性表

Table 1 Material properties of plug and ball head spring piece

部件名称	材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松比	抗拉强 度/MPa	屈服强 度/MPa
接头	PA46-GF30	1 410	10 000	0.40		
球头弹片	SUS304	7 930	197	0.27	1 035	650

2 有限元仿真分析

2.1 有限元分析模型

笔者主要研究的是 USB 数据接口在插拔过程中的受力情况,只考虑接头与球头的法向接触力的作用,同时忽略惯性和阻尼的影响,属于静力学问题,在 Workbench 中选择分析模块为 Static Structural。弹片厚度 $t=0.2$ mm,而 $y_A=0.2$ mm,因此 $y_A>0.2t$ 。在工程上通常把挠度大于板材厚度 $1/5$ 的变形视为大变形^[9-10],因此该球头弹片的接触变形问题属于大变形问题,在分析时要将 Workbench 的大变形分析选项打开。并根据表 1 中数据接口部件的 2 种材料,在 Workbench 中定义 PA46-GF30 和 SUS304 的 2 种材料的属性。采用自由网格划分方法,设置总体网格单元大小为 0.2 mm,并在接头与球头弹片的接触面进行网格细化,生成的有限元模型如图 5 所示。此次网格划分完成后共生成 335 814 个节点,200 630 个单元。

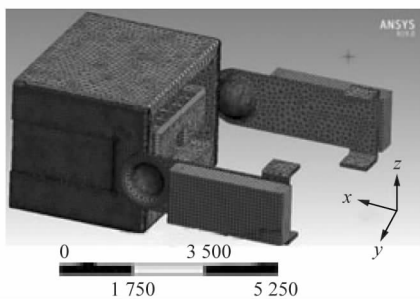


图 5 USB 数据接口插合过程的有限元模型

Figure 5 Finite element model of USB data interface insertion process

2.2 设置接触和边界条件

接口插合过程存在 2 种类型的接触:分别为左右挡块和左右球头弹片之间的绑定接触;接头和左右球头弹片之间的摩擦接触。接头和弹片之间摩擦接触的摩擦因数为 0.13 。对于绑定接触采用罚函数算法,而摩擦接触属于非线性接触问题,采用增强拉格朗日算法^[11]。2 种接触类型都需将微小滑动选项关闭,同时为减少接触面和目标面之间的接触穿透,限制接触面和目标面之间不能穿透,对于摩擦接触将接触行为设置为对称接触。为提高非线性接触计算的收敛性,需要合理定义接触刚度。对于普通弯曲变形问题,接触刚度因子取 $0.01 \sim 0.10$;对于大变形问题,接触刚度因子取 1.00 。同时将刚度更新设置为每一次迭代,即每一次计算重新生成刚度矩阵以提高计算收敛性。

为模拟该 USB 数据接口的插拔动作,对 2 个球头弹片,中心弹片施加固定约束,左右挡块相对于 2 个球

头弹片也施加固定约束,对接头施加位移载荷约束,使接头在 1.0 s 内沿 x 负向运动 4.0 mm。

2.3 有限元仿真结果后处理

有限元仿真的球头弹片的应力、应变以及变形结果如图 6 所示。由有限元仿真结果可知,接头在与数据接口的插合过程中球头弹片所受到的最大弯曲应力为 $2\,408$ MPa,且应力主要集中在中部为球头弹片有效长度的根部,弹片沿 y 方向的最大变形量为 0.381 mm,弹片球头处的最大变形量为 0.211 mm。弹片的压力(弹力)及插入力随接头位移的变化曲线如图 7 所示。该型号 USB 数据接口在插合过程中弹片受到的最大压力(弹片弹力)为 25.147 N,最大插入力为 3.486 N。

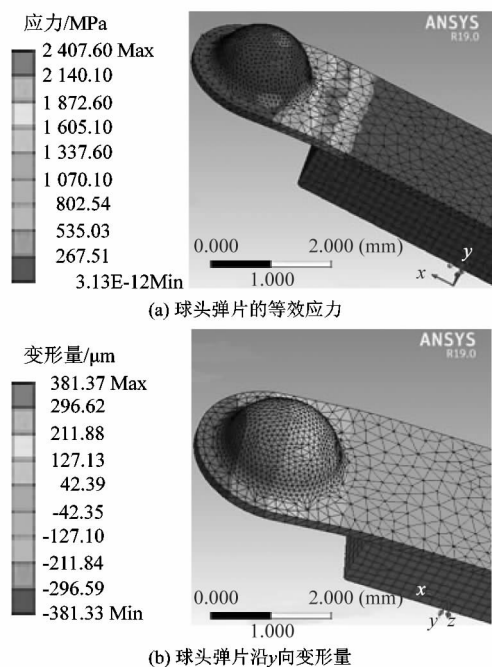


图 6 有限元仿真结果后处理

Figure 6 Post processing of finite element simulation results

根据有限元仿真分析的结果,与理论计算结果进行对比可知,理论计算结果和仿真分析结果的误差约为 8% 左右,属于合理误差范围,误差主要源于对球头弹片的球头部分进行了矩形截面的近似简化。球头弹片的最大弯曲应力远超材料的屈服强度极限,此结构参数状态下接头与数据接口插合过程中,左右 2 个球头弹片会发生永久性变形失效。同时,根据图 7 所示的弹片的压力(弹力)及插入力与位移曲线^[12-13]可以看出:初始插合阶段弹片压力逐渐上升,插入力随压力的上升而下降,此过程满足公式(3)~(4)。随着位移的增加,压力和插入力趋于平稳状态,说明此时接头完

全到达球头的顶点,并随之运动了一定距离,此时的压力和插入力关系为 $F_x = \mu F_n$;之后随着位移的继续增加,压力和插入力迅速下降;然后再次趋于平稳状态。说明此时弹片的球头已滑过接头的表面并进入接头两侧的滑槽内,并最终完成了插合过程。

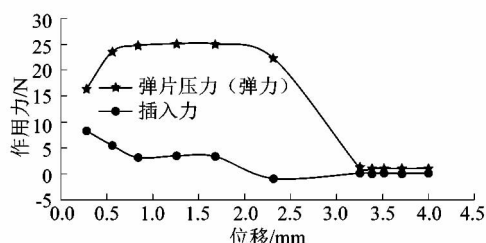


图7 弹片的压力(弹力)与插入力
随位移的变化曲线

Figure 7 Curve of pressure (elasticity) and
insertion force of spring piece with displacement

3 结构参数对弹片力学性能的影响分析

由弹片的弯曲应力及压力计算公式可知,影响弹片力学性能的主要结构参数为弹片的有效长度 l (挡块长度)、弹片的球头到弹片表面的距离 d 及弹片的宽度 b 。改变这3种结构参数的数值都会对球头弹片的力学性能产生影响,从而使球头弹片的弯曲应力满足其材料的屈服强度极限。

结合理论分析与仿真分析的结果,对现有的3种结构参数进行调整,并分析调整后的3种参数对弹片弯曲应力、压力以及变形量的影响。采用控制变量法,研究单一结构参数对弹片力学特性的影响。首先控制球头到弹片表面的距离 d 和弹片的宽度 b 这2个参数不变,设置3种不同的挡块长度,即研究弹片有效长度 l 对弹片力学特性的影响,依次设置挡块长度为 5.5, 4.5 和 3.5 mm,其有限元仿真结果如表2所示。

表2 不同挡块长度对球头弹片的力学性能的影响

Table 2 Influence of different block length on
mechanical properties of ball head spring piece

l/mm	弯曲应力/MPa	压力(弹力)/N	插入力/N
5.5	1 059	8.828	1.151 0
4.5	628	3.741	0.506 6
3.5	417	1.917	0.249 8

然后,控制挡块长度和弹片宽度不变,设置3种不同的球头到弹片表面的距离 d ,令 d 依次为 0.50, 0.75 和 1.25 mm,其有限元仿真结果如表3所示。

最后,控制挡块长度和球头到弹片表面的距离不变,设置3种不同的弹片宽度 b ,令 b 依次为 2.5, 2.0 和 1.5 mm,其有限元仿真结果如表4所示。

表3 不同球头到弹片表面的距离对球头
弹片的力学性能的影响

Table 3 Influence of distance from ball head to
surface of spring piece on mechanical
properties of ball head spring piece

d/mm	弯曲应力/MPa	压力(弹力)/N	插入力/N
1.25	2 447	33.307	4.516 2
0.75	2 357	31.600	4.082 7
0.50	2 164	27.441	3.611 1

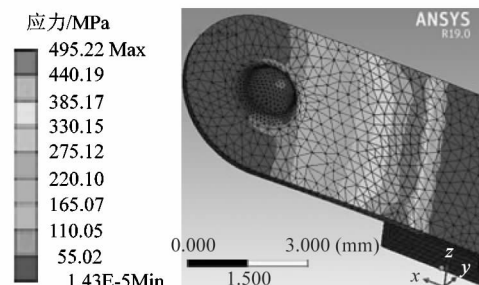
表4 不同弹片宽度对球头弹片力学性能的影响

Table 4 Influence of different spring piece width on
mechanical properties of ball head spring piece

b/mm	弯曲应力/MPa	压力(弹力)/N	插入力/N
2.5	2 407	24.818	3.226 3
2.0	2 404	20.527	2.674 1
1.5	2 405	14.871	1.981 1

根据表2~4的有限元仿真结果可以看出,对弹片力学特性影响较大的结构参数为固定弹片的挡块长度 l ,其次为弹片的球头到弹片表面的距离 d ,而弹片的宽度 b 几乎对弹片的弯曲应力不产生影响,但是会对弹片的弹力及插入力产生一定的影响。

为保证接头与数据接口的插合过程中球头弹片的弯曲应力满足材料的屈服强度极限,同时保证弹片有足够的弹力(2~5 N)进行回弹,挡块与弹片表面有足够的接触面积起到固定弹片的作用,应在此结构参数的基础上进行以下的改进:减小固定弹片挡块的长度,采用较小的球头,并适当增大弹片的宽度。即在原有结构参数挡块长度 $l = 6.5 \text{ mm}$,球头到弹片表面距离 $d = 1.04 \text{ mm}$,弹片宽度 $b = 3.1 \text{ mm}$ 的基础之上,控制参数 $l = 3.5 \sim 4.5 \text{ mm}$,参数 $d = 0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$,并令参数 b 满足 $3.1 \text{ mm} < b \leq 5.75 \text{ mm}$ (接头的高度)。选取改进后球头弹片3种结构参数范围中的一组数值 $l = 4.0 \text{ mm}$, $d = 0.75 \text{ mm}$, $b = 4.5 \text{ mm}$,其有限元仿真结果如图8所示。



(a) 改进后的球头弹片等效应力

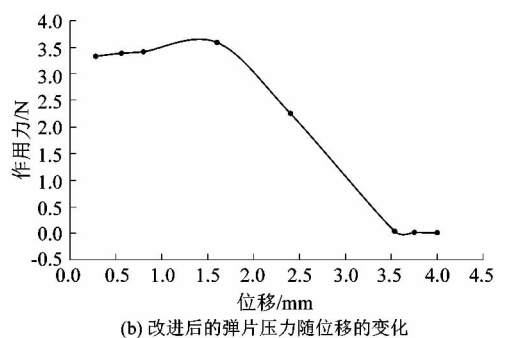


图8 结构改进后的有限元仿真结果

Figure 8 Finite element simulation results after structure improvement

由图8可以看出,弹片的弯曲应力为495 MPa,满足了材料的屈服强度极限,同时拥有超过2 N的弹力进行回弹。说明所选取的球头弹片的改进结构参数范围是合理的。

4 结论

课题组基于弹片压力变形理论及库仑摩擦定律,建立了数据接口球头弹片和接头接触的力学模型,运用有限元方法,建立了接头与数据接口球头弹片插入过程的仿真模型。通过对某型号USB数据接口的插入过程进行理论计算和数值模拟,对比研究分析了插入过程中球头弹片的力学特性,并得到了以下结论:

1) 弹片有效长度 l 、弹片的球头到弹片表面的距离 d 以及弹片宽度 b 3种不同结构参数对数据接口球头弹片的力学特性存在影响。其中 l 和 d 对球头弹片的弯曲应力、压力及插入力均会产生影响,而弹片的宽度几乎对弹片的弯曲应力不产生影响,但是会对弹片的弹力及插入力产生一定的影响。

2) 原有的结构设计存在着明显的缺陷,其中对数据接口中球头弹片力学特性影响较大结构参数为弹片的有效长度,该参数的大小使得球头弹片的力学特性波动幅度较大。

3) 依据仿真分析的结果对3种结构参数进行改进,获得了数据接口球头弹片3种结构参数的合理范围。在此参数范围内,球头弹片既能满足其材料屈服强度,又具有良好的力学性能,同时改进分析的结果为高性能USB数据接口的结构优化设计与可靠性设计提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 张小良,林炜峰.有限元方法在波形弹片设计中的研究与应用[J].工程设计学报,2015,22(4):399-404.
- [2] 汤继强,赵韶璞,王阔.磁悬浮控制力矩陀螺锁紧机构可靠性设计及优化[J].光学精密工程,2018,26(3):597-605.
- [3] 苏秀苹,董家盈,乔延华,等.基于Abaqus的磁保持继电器中弹片反力特性研究[J].系统仿真学报,2018,30(4):1528-1534.
- [4] 李辉,张明柱.基于ABAQUS的车用连接器插座端子弹片结构优化设计[J].汽车电器,2017(11):59-62.
- [5] 左亚军.ATM拾钞部轴承弹片结构的优化设计[J].机械工程与自动化,2017(5):94-95.
- [6] 欧阳波仪.电动汽车某连接器弹片式接触端子的优化设计[J].汽车零部件,2017(10):47-50.
- [7] 刘培林,贾鹏,苏峰,等.水下插拔式电连接器设计及接触体分析[J].机械工程师,2018(12):62-68.
- [8] 刘强,武登云,房建成,等.磁悬浮飞轮抱式锁紧机构碳纤维弹片优化设计[J].振动、测试与诊断,2016,36(4):708-715.
- [9] SURANA K S. Geometrically nonlinear formulations for the curved shell elements[J]. Numerical Methods in Engineering,1983,19(4):581-615.
- [10] JENKINS J A, SEITE J B, PRZOMIENIENIECKI J S. Large deflection of diamond-shaped frames[J]. International Journal of Solids and Structures,1966,2(4):591-603.
- [11] PIETRASZKIEWICZ W. Lagrangian description and incremental formulation in the nonlinear theory of thin shells[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics,1983,19(2):115-140.
- [12] 蔡川,杨志坚,余宁,等.手机连接器插拔力仿真分析[J].机电工程技术,2016,45(11):47-50.
- [13] 孙德刚,郭勤涛,展铭.继电器底座插拔结构接触正压力的优化设计[J].机电工程,2018,35(3):229-234.