

# 同心连接器的力学性能测试技术和系统研究\*

李艳生<sup>1</sup>, 杨美美<sup>1</sup>, 芦娜<sup>2</sup>, 姜雪英<sup>2</sup>, 张毅<sup>1</sup>

(1. 重庆邮电大学先进制造工程学院 重庆 400065; 2. 北京邮电大学自动化学院 北京 100876)

**摘要:**为了能快速测量同心连接器插拔过程中的力学性能和准确评价机械寿命,研制了一种同心连接器的力学性能测试系统。该系统主要由运动模拟的机械装置和传感测量与电机控制的测控子系统组成,具有四路同步自动测试能力;根据连接器测试标准分析系统的性能指标,提出一种直线运动与旋转运动相结合的测试方法,使测试条件更加符合连接器真实使用情况;同时设计出具有自适应能力的柔性夹具,减少安装误差对测试结果的影响;对运动模拟机构进行建模分析研究,在极限速度条件下确定插拔循环周期内直线与旋转运动配合时序。对连接器样品进行单次和多次插拔测试,分析数据得到了连接器的力学性能并对机械寿命评估验证,实验结果表明该系统满足测试要求且能得到预期效果。

**关键词:**同心连接器;测试系统;凸轮机构;力学性能;机械寿命

**中图分类号:** TH87      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.15

## Research on testing technology and system of mechanical properties for a concentric connector

Li Yansheng<sup>1</sup>, Yang Meimei<sup>1</sup>, Lu Na<sup>2</sup>, Jiang Xueying<sup>2</sup>, Zhang Yi<sup>1</sup>

(1. School of Advanced manufacturing engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** In order to accurately measure the mechanical properties and rapidly evaluate of the mechanical life of the concentric connector during the inserting and unplugging, a concentric connector testing system of mechanical properties is developed. The system is mainly composed of the motion simulating mechanical device, the sensor measurement and the motor control subsystem, which has four-channel test capabilities. According to the connector test standard, the system performance index is analyzed, and a testing method combining linear motion and rotary motion is proposed to make the test conditions better fit the actual use of the connector. At the same time, an adaptive flexible fixture is designed to reduce the installation error. The kinematic model is established and analyzed with which the time sequence of the linear and rotational motion is determined under ultimate speed. Multiple connector samples are tested, and the mechanical properties and the service life of the connectors are evaluated. The experimental results show that the system can meet the testing requirements and achieve the desired performance.

**Keywords:** concentric connector; test system; cam mechanism; mechanical properties; mechanical life

## 1 引言

随着现代电子信息技术的快速发展,对电子连接器的机械性能和电气性能要求不断提高,有向小型化、个性化和标准化发展的趋势。作为电子产品的必要元件,电子连接器在生活、生产和工程领域应用十分广泛,发挥着

设备间物理连接和信号传递的桥梁作用,只有连接器接触可靠且性能良好才能保证整个电子系统的正常运行,因此连接器的可靠性和使用寿命是衡量连接器产品质量水平的重要指标<sup>[1-3]</sup>。

由于电子连接器自身运动和工作条件特点,在实际使用过程中会频繁的插入和拔出,插头和插座之间的这种相对滑动不可避免地会造成接触对的损伤,导致连接

器失效,最终影响整个系统的可靠运行<sup>[4-5]</sup>。电子连接器的使用寿命主要分为电气寿命和机械寿命两种,镀层的磨损、脱落或某些部位断裂将导致接触电阻变化,会影响连接器电气寿命,而机械寿命的终结又可表现为插头无法锁紧和插拔力减小等情况,因此对连接器进行失效分析和使用寿命测试,提前发现连接器机械结构和材料方面存在的缺陷,评估连接器的使用预期和安全裕度是必要的<sup>[6-9]</sup>。

耳机连接器是一种传递声音信号的同心连接器,其机械寿命测试是这种连接器使用寿命测试的重要环节,为了能够准确有效地评估出这种连接器的机械寿命,需要通过模拟真实的使用环境,进行力学性能测试和加速寿命实验<sup>[10-11]</sup>。刘向禹<sup>[12]</sup>设计了多芯连接器分离力的快速测试方法,通过配重加载分离力,可一次检验多个连接器是否合格;赵佃云等人<sup>[13]</sup>研制了基于 PLC 控制的电连接器的分离测试系统,采用气缸驱动方式来进行单次测量;郭宇鹏等人<sup>[14]</sup>利用机器视觉的方法来检测 9 针连接器的外观缺陷,提升了连接器的测试效率,但这种测试方法对连接器内部结构缺陷检测无效,不能给出力学性能;许成彬等人<sup>[15]</sup>在高温条件下对电连接器进行插拔实验,考虑到真实使用环境的影响,分析了不同温度条件下的热特性,这使可靠性评估更加有效。目前,学者们在连接器的力学性能测试技术和测试系统研发方面虽然取得了一些成果,但是针对耳机同心连接器自动测试系统的研究并不多见,尤其在测试效率和模拟环境的真实度上存在不足。

因此,本文以耳机连接器为研究对象,研制一种同心连接器力学性能自动测试系统。为了提高测试效率,该系统采用了基于计算机和显示面板的两种控制方式,具有四路同步自动测试能力;为了模拟连接器的真实使用情况,提出了一种直线运动与旋转运动相结合的测试方法,更真实地模拟插拔运动过程,通过传感器实时在线测取力学参数,同时设计了具有自适应调整能力的柔性夹具,减小初始装配影响;进一步对测试系统的机械传动部分进行理论建模分析,确保测试条件满足速度指标要求;应用该系统对连接器样品进行测试,分析提取数据特征,对连接器的机械寿命进行评估。

## 2 测试系统性能指标

耳机连接器是标准的同心连接器,主要由插头端和插座端两部分组成,插头端通过有线或无线方式与耳机相连,而插座端通常固定在手机或播放器等设备上,接口根据插针的直径尺寸主要分为两种:2.5 mm 接口和 3.5 mm 接口。如图 1 所示,插头端的导电材料被绝缘套环分隔开,插座端的导电材料做成簧片式结构,在使用时

将插头尖端对准插座的插孔,然后用力将其插入插座内,插座内的簧片的夹持力可以防止脱离,插头的导电材料与插座内部的导电材料对应接触,实现信号的分路传输。由于连接器的长时间使用,频繁的插入和拔出会使内部的导电材料逐渐磨损,簧片结构也会变形,最终体现为接触电阻变大,插头插入的力和拔出的力变小,严重情况会导致连接器失效,无法完胜信号传递任务。因此需要对这种连接器在出厂之前进行力学性能测试,这是使用寿命评估的必要条件。

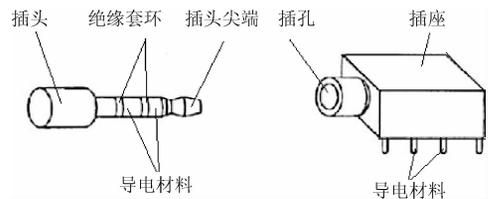


图 1 耳机同心连接器外形

Fig. 1 The outline figure of headphone concentric connector

为了使连接器测试条件最大程度的符合真实使用情况,提高自动测试性能,新研制的同心连接器力学性能测试系统要满足以下性能需求:1) 由于同心连接器每次使用过程中插头与插座的相对角度存在随机性,所以模拟插拔运动装置不仅要具有直线运动能力,还要有调整角度的能力;2) 在机械力的作用下,连接器插头插入插座的插孔过程中要考虑夹具的初始安装误差,要保证这种不对中误差影响插拔力性能测试;3) 大量的测试样品才能得到可信的使用寿命评价结果,新研制的测试系统要严格满足测试速度要求,更要在测试效率上有所提高,体现出自动测试的优势。

测试标准<sup>[16]</sup>要求耳机连接器的机械寿命测试过程中,插头插入插座的最大速度不要超过 10 mm/s,要以 10 次/min 的速率重复插拔 5 000 次以上,而在力测试中,插头插入插座的最大速度不能超过 12 mm/s,测试需要重复 5 次。根据测试系统的性能需求和测试标准要求,耳机同心连接器的运动模拟装置采用四路并行的直线运动和旋转运动相结合的方法来提高模拟真实度和测试效率,并设计被动自适应柔性夹具来减小不对中影响,力学性能测试系统的性能指标的具体参数如表 1 所示。

表 1 测试系统的性能指标参数

Table 1 Testing system performance parameters

性能指标	参数值	性能指标	参数值
最大插拔行程	16 mm	测试通道数	4 路
最小插拔周期	6 s	力测量频率	500 Hz
最大插拔力值	50 N	力测量精度	0.01 N

### 3 运动模拟装置分析

#### 3.1 运动模拟机械装置

在同心连接器的力学性能测试系统中,运动模拟机械装置能模拟人们使用耳机的真实运动情况,承担着将插头插入和拔出插座的任务,在设计方案中运动机构主要包括插拔机构、旋转机构、柔性夹持机构和弹簧储能机构4部分,总体装配示意图如图2所示。插拔机构主要由手柄、凸轮、升降台和底板组成;旋转机构主要由顶板、螺旋传送带和顶板调节螺母组成;柔性夹持机构主要由下夹具、上夹具和软轴连接部分组成;弹簧储能机构主要由储能弹簧和导轨组成。

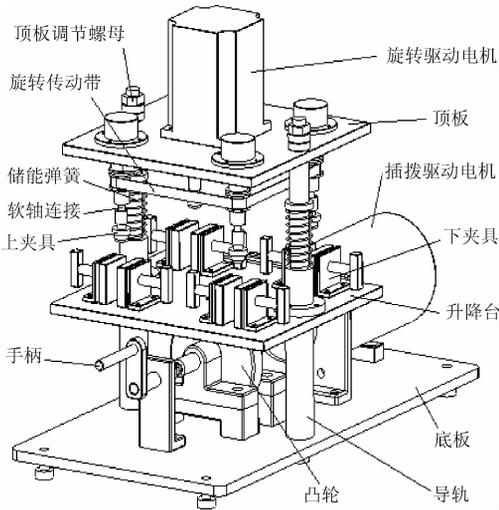


图2 运动模拟装置装配示意图

Fig.2 Assembling diagram of motion simulation device

运动模拟机械装置的插拔驱动电机提供插拔直线运动的动力,电机输出轴与凸轮轴连接,凸轮转动可以托起升降台做往复的直线运动,手柄也可以提供人力给凸轮,在安装调试过程中使用。旋转驱动电机用来提供插头相对于插座旋转运动的动力,通过旋转传送带将动力最终传输给四路软轴连接的上夹具。测试时上夹具柔性的夹持连接器的插头,下夹具夹持插座固定在升降台上,上夹具水平旋转运动配合升降台垂向上下直线运动,即可完成周期性的插拔运动模拟过程。插头尖端插入插座的插孔瞬间,在不对中情况下插头受到的被动接触力能够迫使柔性连接部分自适应调整插头位置,矫正径向偏差并确保插头能够顺利插入插座。弹簧储能机构在插头插入插座过程中被压缩储存能量,在插头拔出插座的过程中辅助升降台复位并释放能量。

#### 3.2 凸轮机构数学模型

凸轮是运动模拟装置中最重要的运动机构,其结构和尺寸直接与测试系统的最大插拔量程指标相关,进行凸轮机构的运动分析能验证插拔速度和插拔频率是否符合要求,同时也能确定运动模拟过程中直线运动与旋转运动的配合时序<sup>[17]</sup>。为了减小凸轮与升降台之间因滑动摩擦造成磨损,在升降台下底面中心位置安装小滚轮,将直接的滑动摩擦改为滚动摩擦,磨损将大幅度降低。忽略小滚轮直径影响,可得凸轮的等效机构运动简图如图3所示。

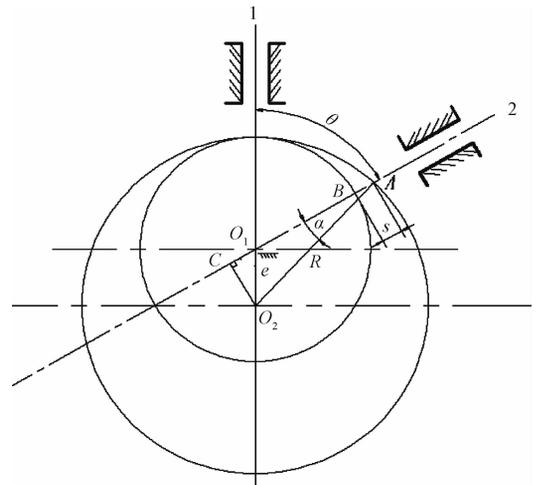


图3 凸轮等效机构运动简图

Fig.3 Motion diagram of cam equivalent mechanism

在图3中 $O_1$ 是凸轮的旋转轴心位置, $O_2$ 是半径为 $R$ 的圆凸轮几何中心位置,直线1表示在最低点起始位置时,升降台几何中心与凸轮旋转轴心的连线,在此位置该直线经过圆心 $O_2$ 。当凸轮逆时针旋转 $\theta$ 角度时,根据相对运动原理可以视凸轮为静止不动,升降台绕凸轮旋转轴心顺时针旋转 $\theta$ 角度,直线1运动到达直线2位置, $A$ 是升降台与凸轮的接触点, $O_1O_2$ 之间的距离 $e$ 是凸轮的偏心距,为了建立凸轮机构的运动数学模型,以 $O_2$ 为圆心,以 $r = R - e$ 为半径做基圆,基圆与直线2相交于 $B$ 点,因此 $s$ 表示凸轮旋转 $\theta$ 角度过程中升降台升高的距离, $\alpha$ 表示凸轮机构的压力角。根据图3中的几何关系可得出一个插拔周期内压力角 $\alpha$ 的表达式如下:

$$\alpha = \begin{cases} \arcsin\left(+\frac{e\sin\theta}{R}\right), & \theta \in [0, \pi) \\ \arcsin\left(-\frac{e\sin\theta}{R}\right), & \theta \in (\pi, 2\pi] \end{cases} \quad (1)$$

一个插拔周期的运动位移函数可用如下的数学方程来表示:

$$s = R\cos\alpha - r - e\cos\theta = R\sqrt{1 - \frac{e^2\sin^2\theta}{R^2}} + e - R - e\cos\theta \quad (2)$$

对位移方程(2)求导可得速度方程:

$$v = -\frac{e^2\dot{\theta}\cos\theta\sin\theta}{\sqrt{R^2 - e^2\sin^2\theta}} + e\dot{\theta}\sin\theta \quad (3)$$

对速度方程(3)求导可得加速度方程:

$$a = \frac{e^2\dot{\theta}^2\sin^2\theta - e^2\dot{\theta}^2\cos^2\theta - e^2\ddot{\theta}\cos\theta\sin\theta}{\sqrt{R^2 - e^2\sin^2\theta}} - \frac{e^4\dot{\theta}^2\cos^2\theta\sin^2\theta}{\sqrt{(R^2 - e^2\sin^2\theta)^3}} + e\ddot{\theta}\sin\theta + e\dot{\theta}^2\cos\theta \quad (4)$$

### 3.3 装置模拟运动分析

为了确定凸轮机构的尺寸,使插头插入和拔出的速度满足寿命测试和力测试要求,得出模拟运动的配合时序,需要对凸轮机构进行运动分析。由图3可得出测试系统升降台在一个插拔周期内的最大行程  $s_{\max}$  与偏心距  $e$  的关系为  $s_{\max} = 2e$ ,再根据表1中指标参数最大插拔行程 16 mm,可以确定偏心距  $e = 8$  mm。在指标参数最小插拔周期为 6 s 的要求下,插拔电机匀速驱动凸轮转动,可确定凸轮转动角度与时间的关系为:

$$\theta = \frac{\pi}{3}t \quad (5)$$

将关系式(5)分别带入式(1)~(4)中进行化简,在3种不同凸轮半径参数条件下,利用MATLAB进行数值计算<sup>[18]</sup>,得出单周期内插拔运动的凸轮机构压力角、插拔位移、插拔速度和插拔加速度曲线如图4所示。

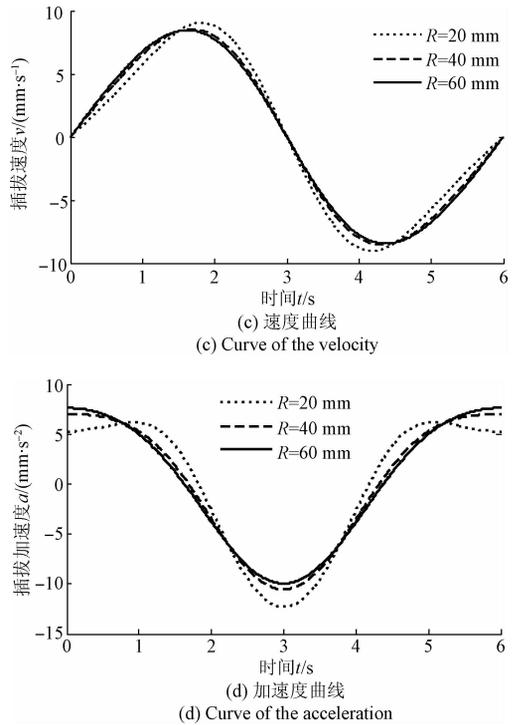
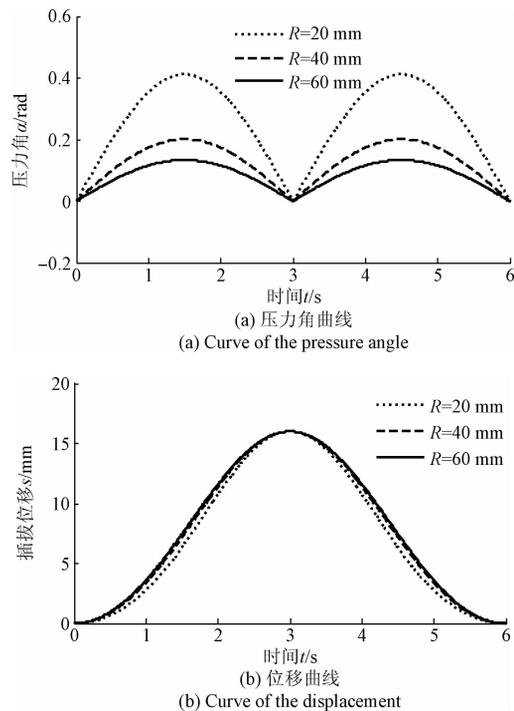


图4 不同凸轮半径参数下运动曲线

Fig.4 Movement curve under different cam radiuses

从图4(a)压力角中可以看整个插拔周期内有两个相等的压力角峰值小于 0.5 rad,且随着凸轮半径的增大,压力角有逐渐越小的趋势,这说明半径取较大值时凸轮机构有较好的力传递性能。从图4(b)插拔位移曲线中可以看整个插拔周期内仅有一个峰值 16 mm,且与凸轮半径大小无关,这验证了插拔行程与偏心距的 2 倍关系,满足最大插拔行程指标。从图4(c)插拔速度曲线中可知整个插拔周期内有一个正向峰值和一个反省峰值,速度绝对值小于 10 mm/s,满足寿命测试和力测试中的速度要求。图4(c)中的速度值在起始时刻为 0 mm/s,而图4(d)中的加速度值在起始时刻为 6 mm/s<sup>2</sup>左右,这说明测试装置第一次插拔运动启动时,存在一定的柔性冲击,但是不存在刚性冲击,在多周期连续运行过程中加速度曲线平滑,不存在任何冲击。

### 3.4 配合时序与柔性夹具

根据人们真实使用情况,插入和旋转插头的动作一般不会同时进行,所以调整插头插入角度的旋转运动过程必须在插头还未插入插座之前进行。耳机同心连接器插头长度范围主要有 11 和 14 mm 两种,测试系统的最大插拔行程 16 mm,由图4(b)可确定插拔位移最低起始点到 2 mm 行程内的时间段是最佳的旋转运动时间段。根据图4(a)中压力角的曲线和机械装置的最大尺寸限制,最终确定凸轮半径取值 58 mm,在 6 细分角度的条件下,

运动模拟装置一个旋转周期内的直线运动与旋转运动的配合时序如图5所示。

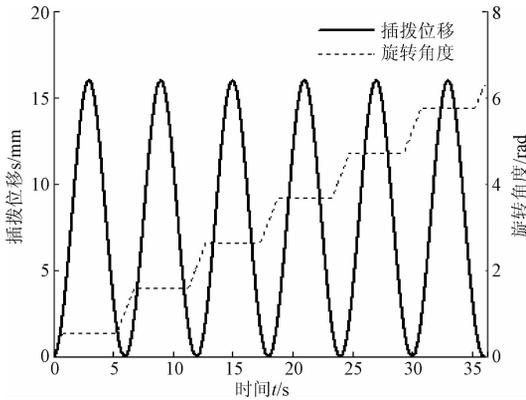


图5 模拟运动配合时序图

Fig. 5 Timing diagram of the simulated motion

测试系统的夹具要能够减小插头和插座初始安装的不对中影响,因此在四爪夹具和插拔旋转轴之间的软轴连接部分被专门设计成了柔性结构,在不改变垂向传递插拔力大小的前提下,被动自适应的调整径向对中误差,大大减小了插孔施加给插头的横向接触力和偏转弯矩。这种柔性结构和插拔力传递示意图如图6所示。

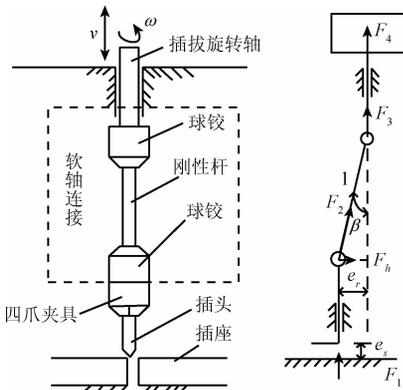


图6 柔性结构和力示意图

Fig. 6 Schematic diagram of flexible structure and force

从图6左图可以看出,柔性上夹具的软轴连接部分主要由长度为 $l$ 的刚性杆和两个球铰组成。当插头的中心轴线与插孔中心轴线之间存在径向偏差 $e_r$ 时,插头与插孔间的作用力会迫使两个球铰转动 $\beta$ 角度,保证插头可以顺利的插入插座插孔。从图6右图给出了插入力的传递示意过程,垂向插入力 $F_1$ 传递到刚性杆时变成了 $F_2$ ,传递到插拔旋转轴下端时变成了 $F_3$ ,传递到力传感器时变成了 $F_4$ ,整个传递过程中有横向力 $F_h$ 和垂向插拔位移误差 $e_s$ 产生,并满足如下关系:

$$\begin{cases} F_4 = F_3 = F_2 \cos\beta = F_1 \\ F_h = F_1 \tan\beta = \frac{F_1 e_r}{\sqrt{l^2 - e_r^2}} \\ e_s = l(1 - \cos\beta) = l - \sqrt{l^2 - e_r^2} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)可知,设计的柔性夹具可以等值的传递插拔力 $F_1$ 到传感器处,由于软轴连接的刚性杆 $l$ 的长度远大于径向偏差 $e_r$ ,所以横向力 $F_h$ 和垂向插拔位移误差 $e_s$ 很小,可忽略不计。

## 4 连接器样品测试

同心连接器的力学性能测试系统的总体组成如图7所示,控制柜主要用来进行插拔运动控制,计算机、显示器和安装传感器的测力顶板主要用来进行连接器的插拔力测量。控制柜面板可以设定插拔次数和插拔频率等参数,内部主控器接收计算机串口信号控制电机运动。在测力过程中顶板的传感器实时将插拔力值转换成模拟电压信号,经过采集卡转换成数字信号,由PCI接口输入到计算机内,开发的测控软件界面可实现插拔运动参数设定,测量信号的滤波处理,力曲线动态显示和数据特征提取与保存等功能<sup>[19]</sup>。

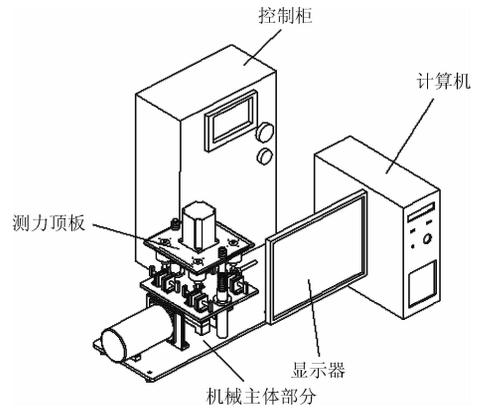


图7 测试系统的总体组成

Fig. 7 Total composition diagram of the testing system

通过对连接器性能指标分析,制定测试系统方案并设计插拔运动模拟和测控装置,最终研制出如图8所示的同心连接器的力学性能测试系统。应用该同心连接器力学性能测试系统对直径3.5 mm、长度11 mm的镍铜材料的耳机连接器进行力学性能测试和机械寿命测试实验。在单周期插拔的力学性能测试过程中,利用移动平均法对采集的数据进行平滑滤波处理<sup>[20]</sup>,测试样品实物和四路插拔力的实时动态曲线如图9所示。

图9(a)和(b)分别是样品的插头和插座,图9(c)是单周期插拔力曲线,前3 s时间段为插入过程,后3 s时

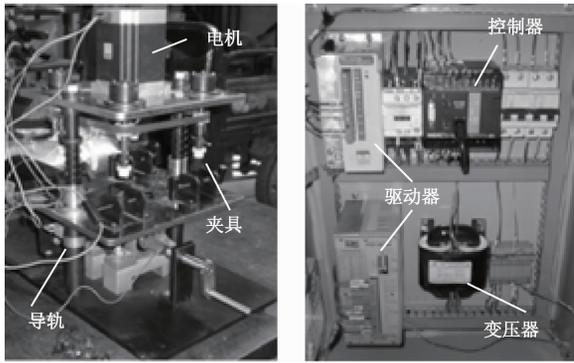


图8 机械装置和控制器件实物  
Fig. 8 Mechanical and control devices

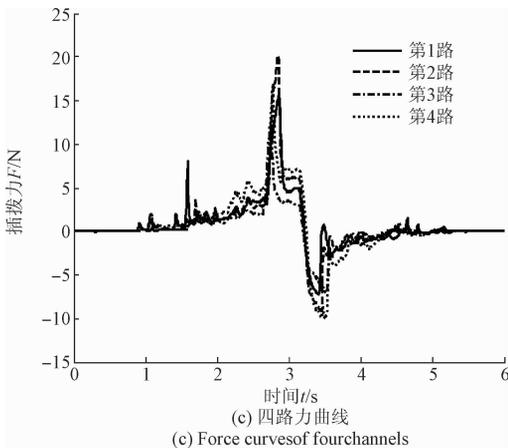
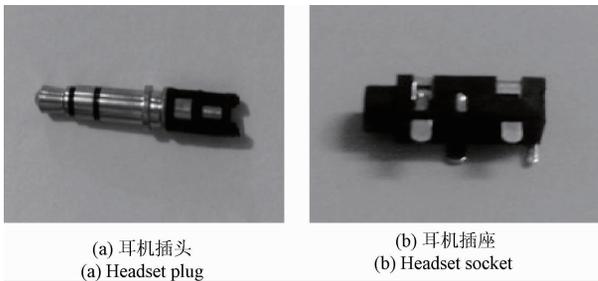


图9 测试样品和力特性曲线

Fig. 9 Test sample and force characteristic curve

间段为拔出过程,结合图4(b)插拔位移曲线,得出当插头完全插入插座的最后1 mm内,即3 s时刻前后出现了插拔力的极值,插入力与拔出力相反,其余时刻也存在摩擦力引起的插拔力波动。四路插拔力动态曲线略有差别,体现出同批生产样品间的个体差异性,但总体变化趋势一致,不影响该批样品的机械寿命评估。

通过对该批次多个样品进行1 000次、2 000次、3 000次、4 000次和5 000次插拔的机械寿命实验,然后分别进行5周期的力学性能测试并提取极值特征点,最后计算相同机械寿命实验样品特征点的平均值,得出的

插拔力与机械寿命的对应关系如图10所示。可以看出全机械寿命周期内测试样品的插入力始终大于拔出力,插拔力随着使用次数的增加有变小趋势,尤其插入力在初始使用时会迅速变小,随后与拔出力一同缓慢变小。在机械寿命5 000次插拔周期内,连接器样品的插拔力始终处在2.2~22.2 N,满足标准<sup>[16]</sup>的要求。

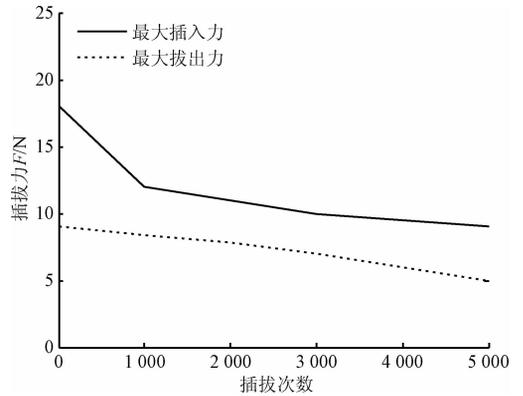


图10 最大插拔力统计图

Fig. 10 Statistics of maximum inserting and unplugging forces

## 6 结 论

本文根据耳机同心连接器的测试标准,提出测试系统的性能指标,研制出一种包括插拔运动模拟机械装置、寿命实验运动控制和插拔力测量装置的同心连接器的力学性能测试系统,主要研究成果总结如下。

1) 设计出一种可以四路高效并行测试的运动模拟装置,并运用直线运动与旋转运动相结合的方法来更真实模拟连接器的使用情况。通过建模分析确定运动模拟过程中直线运动与6细分旋转运动的配合时序,经验证符合最大插拔速度小于10 mm/s要求。

2) 提出一种包含两个球铰和一个刚性杆的被动结构,设计出测试系统专用的柔性夹具。该种夹具可以减小连接器初始安装引起的不对中影响,能够被动自适应的补偿径向误差,且可以等值传递插拔力。

3) 开发出配套的使用寿命和力学性能实验的测控系统。基于可编程主控器并采用控制面板和计算机界面交互控制的方式,保证测试的灵活性和安全性;软件界面可实时动态显示插拔力曲线,保存测量数据并提取极值特征。

4) 应用研制的测试系统对连接器样品进行测试,得到连接器单次插拔过程中插拔力的动态特性,以及不同使用寿命实验后插拔力极值的统计特点,通过大样本的插拔力测量数据分析,评估出所选测试样品满足5 000次的机械寿命要求。

## 参考文献

- [1] 杨奋为. 军用电连接器创新发展研讨[J]. 机电元件, 2012, 32(4): 52-61.  
YANG F W. Discussion for innovation and development of military electric connector [J]. Electromechanical Components, 2012, 32(4): 52-61.
- [2] 闻春国. 一种低插拔力、高寿命同轴接触件的开发[J]. 机电元件, 2016, 36(2): 52-58.  
WEN CH G. Development of a low insertion force, high life coaxial contact element [J]. Electromechanical Components, 2016, 36(2): 52-58.
- [3] ANGADI S V, JACKSON R L, CHOE S Y, et al. A multi-physics finite element model of a 35A automotive connector including multiscale rough surface contact[J]. Journal of Electronic Packaging, 2010, 134(1): 1-11.
- [4] 周怡琳. 同轴连接器镀金层磨损分析方法的研究[J]. 电子学报, 2006, 34(10): 1852-1855.  
ZHOU Y L. Investigation on analysis methods of wear of gold plating on coaxial connectors [J]. Acta Electronic Sinica, 2006, 34(10): 1852-1855.
- [5] 王安麟, 傅英超, 刘瑜华, 等. 基于田口方法的电子连接器微颤振磨损自组织模型的优化[J]. 机械工程学报, 2010, 46(21): 118-123.  
WANG AN L, FU Y CH, LIU Y H, et al. Optimization of self-organization model of electronic connector under fretting wear based on taguchi method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(21): 118-123.
- [6] FU R J, CHOE S Y, JACKSON R L, et al. Modeling and analysis of vibration-Induced changes in connector resistance of high power electrical connectors for hybrid vehicles [J]. Mechanics Based Design of Structures & Machines, 2012, 40(3): 349-365.
- [7] 赵春颖, 温晓兰, 李一. 电连接器的机械寿命浅析[J]. 机电元件, 2014(4): 28-30.  
ZHAO CH Y, WEN X L, LI Y. Analysis on the mechanical life of electric connector [J]. Electromechanical Components, 2014(4): 28-30.
- [8] 张福民, 曲兴华, 孟宪伟, 等. 一种机械寿命实验设计方法与精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(7): 1170-1175.  
ZHANG F M, QU X H, MENG X W, et al. Design method for mechanical endurance test and its precision analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(7): 1170-1175.
- [9] 杜永英, 孙志礼, 吕春梅, 等. 基于 ANSYS 某型电连接器插拔过程的可靠性分析[J]. 中国工程机械学报, 2015, 13(6): 545-549.  
DU Y Y, KONG ZH L, LV CH M, et al. Reliability analysis on terminal contact parts for electrical connector based on ANSYS [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2015, 13(6): 545-549.
- [10] 陈文华, 李红石, 连文志, 等. 航天电连接器环境综合应力加速寿命实验与统计分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(2): 348-351.  
CHEN W H, LI H SH, LIAN W ZH, et al. Accelerated life test and statistical analysis of aerospace electrical connectors under multiple environmental stresses [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(2): 348-351.
- [11] 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.  
PAN J, JIN F J, CHEN W H, et al. Structural analysis of electrical connector contacts and insertion-extraction test [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(12): 1636-1641.
- [12] 刘向禹. 多芯连接器整体分离力测试工装[J]. 机电元件, 2015(4): 23-24, 34.  
LIU X Y. Test on integral separation force of multi-fiber connector [J]. Electromechanical Components, 2015(4): 23-24, 34.
- [13] 赵佃云, 洪涛. 航天电连接器分离性能测试系统的 PLC 控制[J]. 自动化与仪表, 2016, 31(8): 73-76.  
ZHAO D Y, HONG T. PLC control of separation performance test system for space electric connector [J]. Automation & Instrumentation, 2016, 31(8): 73-76.
- [14] 郭羽鹏, 韩震宇, 邹龙飞. 电子连接器外观缺陷检测方法研究[J]. 计测技术, 2015, 35(3): 48-52.  
GUO Y P, HAN ZH Y, ZOU L F. The research on the inspection method of electronic connector appearance defects [J]. Metrology & Measurement Technology, 2015, 35(3): 48-52.
- [15] 许成彬, 潘骏, 陈文华, 等. 高温电连接器有限元热分析与接触件插拔试验[J]. 工程设计学报, 2015(3): 250-255.  
XU CH B, PAN J, CHEN W H, et al. Finite element thermal analysis and plugging test of the high temperature electrical connector [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2015(3): 250-255.
- [16] ZHU X F, LU Y P. YD/T1885-2009 Mobile handsets wired headset interface technical requirements and test methods [S]. China Standardization, 2012.
- [17] 黄长征, 谭建平. 液压机分配阀芯驱动凸轮升程曲线优化设计[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(2): 303-308.  
HUANG CH ZH, TAN J P. Optimization design for cam

lifting curve used to drive spool of distributor in hydraulic press [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(2): 303-308.

- [18] 赵科佳, 张爱敏, 徐清华, 等. 数字式双混频时差测量系统的试验研究 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2858-2865.

ZHAO K J, ZHANG AI M, XU Q H, et al. Experimental research on digital DMTD measurement system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(12): 2858-2865.

- [19] 牛玉广, 李玉荣, 马华杰, 等. 基于报警的汽包水位故障诊断专家系统研究 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(增刊2): 1766-1767.

NIU Y G, LI Y R, MA H J, et al. Research of fault diagnosis expert system for drum level based on alarm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(Suppl. 2): 1766-1767.

- [20] 唐玉发, 张合, 徐国泰, 等. 基于加权移动平均的姿态角测量技术实现 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1844-1849.

TANG Y F, ZHANG H, XU G T, et al. Implementation of attitude angle measurement technique based on weighted moving average [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(8): 1844-1849.

## 作者简介



李艳生, 分别在 2009 年和 2016 年于北京邮电大学获得学士学位和博士学位, 现为重庆邮电大学讲师, 主要研究方向为机器人技术和智能测控技术。

E-mail: liyansheng0@163.com

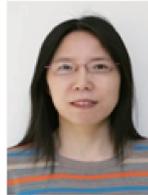
**Li Yansheng** received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2009 and 2016, respectively. Now he is a lecturer in Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests are robotics, intelligent measurement and control technology.



杨美美(通讯作者), 2011 年于北华航天工业学院获得学士学位, 2014 年于北京邮电大学获得硕士学位, 现为重庆邮电大学教师, 主要研究方向图像处理 and 机器人控制技术。

E-mail: 478182341@qq.com

**Yang Meimei** (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 2011 from North China Institute of Aerospace Engineering, and M. Sc. degree in 2014 from Beijing University of Posts and Telecommunications. Now she is a teacher in Chongqing University of Posts and Telecommunications. Her main research interests are image processing and robot control technology.



芦娜, 分别在 1999 年和 2009 年于北京邮电大学获得硕士学位和博士学位, 现为北京邮电大学高级工程师, 主要研究方向为机电系统设计与机电元件分析。

E-mail: nalu@bupt.edu.cn

**Lu Na** received her M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Beijing University of Posts and Telecommunications in 1999 and in 2009, respectively. Now she is a senior engineer in Beijing University of Posts and Telecommunications. Her main research interests are the design of mechanical electrical system and the analysis of mechanical electronic components.