

# 正畸弓丝弯制特性分析及实验研究

张永德 蒋济雄

哈尔滨理工大学, 哈尔滨, 150080

**摘要:**对镍钛合金弓丝、 $\beta$ -钛合金弓丝、澳丝和国产不锈钢弓丝这4种正畸弓丝的回弹特性进行了分析。采用 MSC. Marc 有限元分析软件根据实际弯制方法建立弓丝弯制有限元模型并进行仿真分析, 结合弯制实验得到4种正畸弓丝的回弹特性曲线, 并对实验结果进行了对比。结果表明, 镍钛合金弓丝、 $\beta$ -钛合金弓丝、澳丝和国产不锈钢弓丝这4种正畸弓丝的回弹性依次减小, 回弹角随着弯制角度的增加而增大; 有限元仿真结果和实验结果基本一致。采用弓丝弯制机器人在弓丝回弹特性的基础上进行弓丝弯制, 固定夹具和移动夹具的距离  $t=2\text{mm}$  时的拟合曲线要优于  $t=10\text{mm}$  时的拟合曲线; 因此在使用弓丝弯制机器人弯丝时要尽量减小固定夹具和移动夹具之间的距离。

**关键词:** 正畸弓丝; 有限元分析; 弯制特性; 弓丝弯制机器人

**中图分类号:** TG135; TP242 **文章编号:** 1004-132X(2011)15-1827-05

## Bending Property Analysis and Experimental Study of Orthodontic Wires

Zhang Yongde Jiang Jixiong

Harbin University of Science and Technology, Harbin, 150080

**Abstract:** This paper analysed the bending properties of nickel steel wires, including domestic stainless steel wires,  $\beta$ -titanium alloy wires and Australia stainless steel wires. The finite analysis software MSC. Marc was used to model the process of orthodontic wires' bending combined with actual experiments. Then the paper compared the results and analyzed the errors. The results indicate that rebound angle of the four kinds of orthodontic wires is reduced sequencely, furthermore, rebound angle increases as bending angles' addition. The finite element analysis results are basically the same with the experimental ones. An orthodontic wires bending robot was used to bend wire based on orthodontic wires' bending properties. The fitting curve obtained when the distance of the fixed fixture and mobile fixture is two millimeters is much better than the fitting curve obtained when the distance is ten millimeters. So the distance between the fixed fixture and mobile fixture should be as small as possible when using orthodontic wires to bend wires.

**Key words:** orthodontic wire; finite element analysis; bending property; orthodontic wire bending robot

### 0 引言

在人的生长发育过程中, 遗传因素和环境因

素常常会导致牙齿畸形的产生。随着社会的进步, 越来越多的人关注牙齿的健康和美观, 因此进行口腔正畸治疗的人也越来越多。口腔正畸治疗中最为常见和有效的方法是佩戴矫正弓丝, 通过矫正弓丝在变形过程中产生持续且具有一定大小

收稿日期: 2010-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675054); 黑龙江科技厅攻关计划资助项目(GC05A514)

[6] 叶万水. 设备工程[M]. 3版. 上海: 华东科技大学出版社, 2005.

[7] Swanson L. Linking Maintenance Strategies to Performance[J]. International Journal of Production Economics, 2001, 70(3): 237-244.

[8] Saynisch M, Burgers H. General Aspects of Configuration Management[J]. International Journal of Project Management, 1997, 15(5): 331-332.

[9] Moubray J. Reliability-centred Maintenance[M]. 4th ed. New York: Industrial Press, 2001.

[10] SAP Corporation. SAP Service and Asset Management Brief ENTERPRISE ASSET MANAGEMENT Maximizing Return on Assets with an

End-to-End Solution[EB/OL]. (2008-11-04) [2010-08-25]. <http://www.sap.com>.

[11] Forta B. Sams Teach Yourself Regular Expressions in 10 Minutes[M]. 2nd ed. New York: Pearson Education, 2006.

(编辑 张洋)

**作者简介:** 胡浩, 男, 1971年生。浙江大学机械工程学系博士研究生。主要研究方向为产品生命周期管理与产品-服务系统。发表论文2篇。纪扬建, 男, 1973年生。浙江大学机械工程学系副教授。祁国宁, 男, 1949年生。浙江大学机械工程学系教授、博士研究生导师。陈飞, 男, 1988年生。浙江大学机械工程学系硕士研究生。骆华武, 男, 1970年生。杭州娃哈哈集团灌装车间高级工程师。

的弹性力来控制牙齿的移动,从而达到矫正的目的<sup>[1]</sup>。正畸弓丝的的弯制一直以来都是正畸治疗中的重要部分,由于正畸弓丝都具有比较大的弹性且成形弓丝的形状复杂,因此弯制十分困难。

镍钛合金弓丝、不锈钢弓丝、β-钛合金弓丝和澳丝是目前国内外比较常用的正畸弓丝<sup>[2-3]</sup>,本文对这 4 种弓丝的弯制特性进行实验和分析。国内外许多学者对正畸弓丝的性能做了大量的研究工作<sup>[4-7]</sup>,但大多都是集中于弓丝性能对正畸治疗效果的影响方面,没有分析弓丝的弯制特性对弓丝成形的影响。传统的正畸弓丝的弯制是医生凭经验、靠手工来完成的,效率低且不能保证精度,因此国内外有学者提出采用机器人来弯制正畸弓丝<sup>[8]</sup>。采用机器人来弯制正畸弓丝主要是通过目标函数对各个离散的弯制节点进行弯制,这一过程中很重要的一个方面就是要知道弓丝的回弹特性,即回弹特性。

为了实现机器人弯制弓丝的高精度和高可靠性,以及满足弯制成形中弓丝与患者真正的牙弓曲线的吻合误差要求,在分析弓丝成形机理的基础上,提出采用有限元分析和实验相结合的方法来研究正畸弓丝的弯制特性;在有限元分析软件 MSC. Marc 上建立弓丝弯制模型,模拟实际的弓丝弯制过程,得到弓丝回弹特性;采用弓丝弯制机器人弯制不同的角度,手动测量得到弓丝的回弹角度,通过多次实验和误差分析得到弓丝的弯制特性;通过比较软件所得仿真数据和实验数据,分析数据误差的来源和改进方法,从而确定常用的镍钛合金弓丝、不锈钢弓丝、β-钛合金弓丝和澳丝的回弹特性数据曲线,为采用机器人进行矫正弓丝的弯制提供依据。

### 1 标准正畸弓丝数学模型

在采用机器人进行弓丝弯制的过程中,首先必须对弓丝进行量化,建立合适的数学模型来描述成形弓丝。目前主要有两种数学模型来描述弓丝曲线:Beta 方程模型和幂函数模型<sup>[9]</sup>。本文选择比较符合亚洲人口腔参数的幂函数模型作为定量描述弓丝曲线的方程,模型如下:

$$y = \alpha x^\beta \quad x \geq 0 \quad (1)$$

其中,α 和 β 为弓形特征参数,可以用如下拟合公式计算:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \sigma(S/W - \mu L/W)^\tau \\ \alpha &= L/W^\beta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中,S、W、L 分别为半侧颌弓及半侧牙弓的弧长、弓宽和弓长;σ、μ、τ 为拟合常数,σ = 10.889,μ = 0.88,τ = 3。

选取一例患者的口腔参数如下:S = 52.05mm, W = 25.04mm, L = 39.73mm,得到其标准正畸弓丝曲线,如图 1 所示。

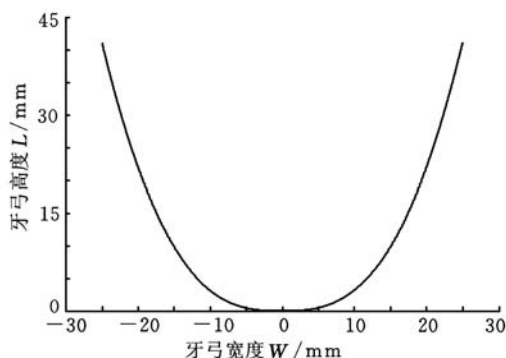


图 1 标准正畸弓丝曲线

### 2 正畸弓丝有限元分析及实验分析

#### 2.1 正畸弓丝有限元分析

为了分析弓丝在不同弯制角度下的回弹,在弯制角度分别为 110°、90°、60°、45°、30°、15°、10°、8°、4°和 2°,固定夹具和移动夹具距离 t 分别为 2mm 和 10mm 的情况下分析弓丝的回弹特性。弓丝回弹角度如图 2 中的 α 角所示,它是回弹前弯制弧线的切线与回弹后弯制弧线的切线的夹角。在 MSC. Marc 中可通过直接测量弓丝节点间的夹角得到弓丝回弹前后与水平面所成的角度。

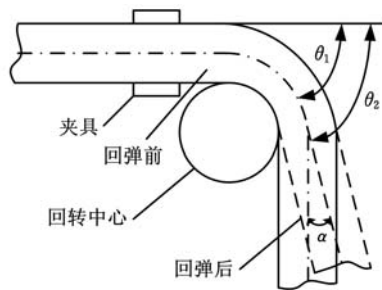


图 2 回弹角度测量示意图

MSC. Marc 是功能齐全的高级非线性求解器,可以进行各种线性和非线性结构分析,它为用户提供了丰富的单元库和材料库<sup>[10]</sup>。本文建立的正畸弓丝弯制模型如图 3 所示。通过设置不同的材料属性来代表不同的材料,分别分析 4 种常用正畸弓丝的弯制特性。将弯制过程抽象成正畸弓丝一端被固定夹紧,另一端采用夹块夹紧弓丝并随着回转圆盘一起转动的模型。这样,只要设置圆盘旋转不同的角度就可以得到弓丝弯曲的不同角度。

从图 3 中我们可以看到模型由正畸弓丝、固定夹具、移动夹具和回转圆盘组成。首先,通过输

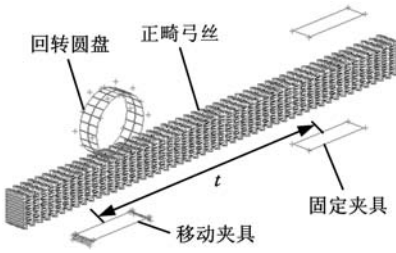


图3 弓丝弯制有限元模型

入正畸弓丝的材料参数(弹性模量、泊松比、应力—应变曲线和摩擦因数)来分别代表镍钛合金弓丝、不锈钢弓丝、 $\beta$ -钛合金弓丝和澳丝的材料特性,然后生成弓丝模型;驱动夹具夹紧弓丝的固定端和弯制端,夹紧过程结束后,回转圆盘开始旋转并配合移动夹具带动弓丝旋转到给定的角度;达到指定角度  $\theta_1$  后,保持一定时间,然后松开弯制端;这时由于弓丝的弹性,正畸弓丝会有一些的回弹角度;待正畸弓丝回弹结束后测量此时的角度  $\theta_2$ 。这样就分别得到了正畸弓丝弯制的角度  $\theta_1$  和弓丝形成的角度  $\theta_2$ 。改变所要弯制的角度  $\theta_1$  重复进行实验。弓丝弯制  $30^\circ$  时模型如图 4 所示,回弹后模型如图 5 所示。它的工作流程如图 6 所示。

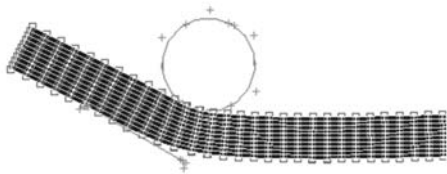


图4 弯制  $30^\circ$  时的模型

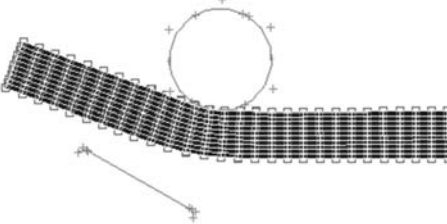


图5 回弹后的模型

## 2.2 正畸弓丝实验分析

正畸弓丝实验分析采用的装置是由首钢 MOTOMAN 公司生产的 MOTOMAN 工业机器人、自行设计制造的末端执行机构和送丝机构组成的。与有限元分析一样,正畸弓丝实验分析也在固定夹具和可移动夹具距离  $t=2\text{mm}$  和  $t=10\text{mm}$  两种情况下进行,实验装置如图 7 所示。实验分析步骤如下:

- (1)将直的正畸弓丝固定在送丝机构上;
- (2)移动机器人使其末端执行机构运动到与送丝机构距离  $t=2\text{mm}$  处;

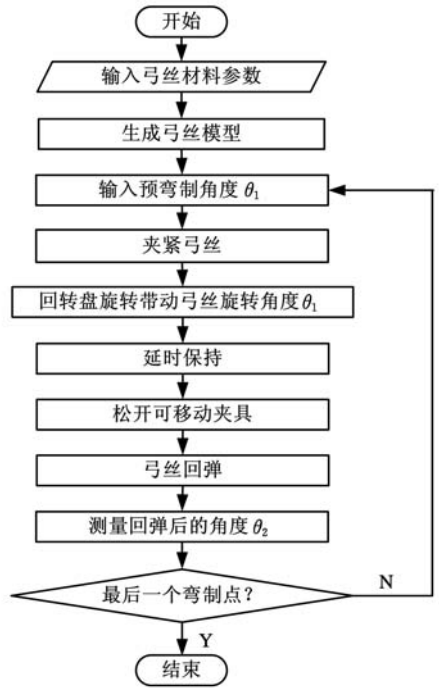


图6 弓丝弯制特性分析流程图

- (3)夹紧弓丝弯制角度,保持 30s 后松开夹具并测量此时弓丝角度;
- (4)改变弯制角度测量每种弯制角度下的弓丝回弹特性;
- (5)修改末端执行机构和送丝机构距离  $t$ ,使其为 10mm 重复进行实验。

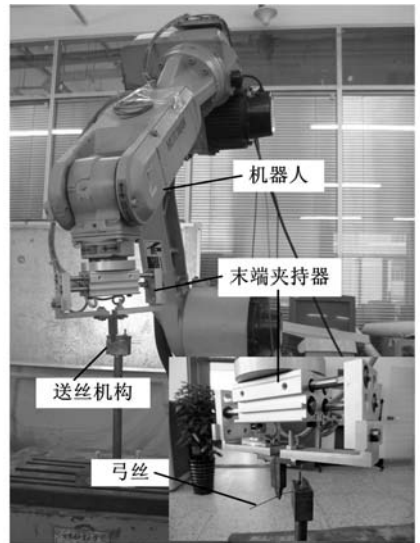


图7 弓丝实验分析装置

## 2.3 结果对比及讨论

综合分析 4 种材料的有限元分析结果和实验分析结果,绘制出 4 种材料的回弹曲线,如图 8 所示。由图 8 可知,4 种正畸弓丝材料的回弹角度均随着弯制角度的增加而增大,但是每种材料的回弹特性各不相同,镍钛合金材料的回弹性最大, $\beta$ -钛合金弓丝的回弹性次之,澳丝的回弹性比

$\beta$ -钛合金弓丝的回弹性要小一些,国产不锈钢丝的回弹性最小。

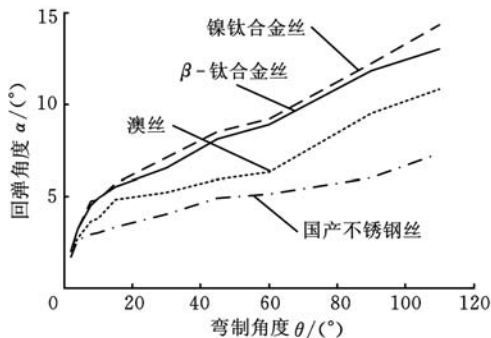


图 8 4 种正畸弓丝回弹曲线

图 9~图 12 所示分别为在固定夹具和可移动夹具之间距离  $t$  为 2mm 和 10mm 时镍钛合金弓丝、 $\beta$ -钛合金弓丝、澳丝和国产不锈钢弓丝的回弹曲线。由图可知,4 种材料在  $t=2\text{mm}$  时的回弹性要小于  $t=10\text{mm}$  时的回弹性,而且  $t=2\text{mm}$  时的有限元分析结果和实验分析结果吻合很好。但  $t=10\text{mm}$  时的有限元分析结果和实验分析结果的差别比较大,而且由曲线可以看到此时存在一些奇异点(回弹角度不随弯制角度的增加而增大的点)。因此在实际弯制弓丝过程中要尽量减小  $t$  的值,但受夹具尺寸的限制,取  $t=2\text{mm}$  是比较合适的。

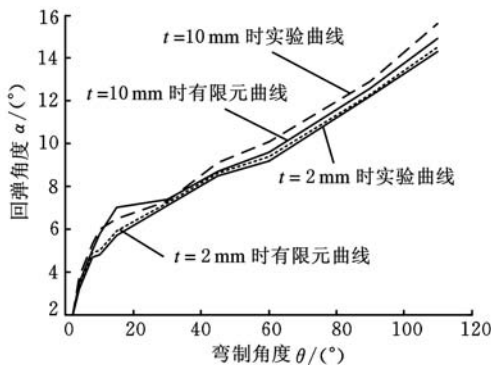


图 9 镍钛合金弓丝回弹曲线

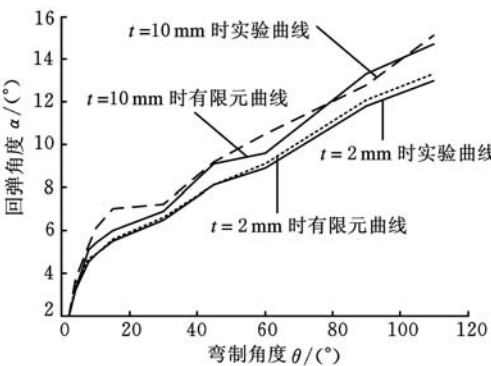


图 10  $\beta$ -钛合金弓丝回弹曲线

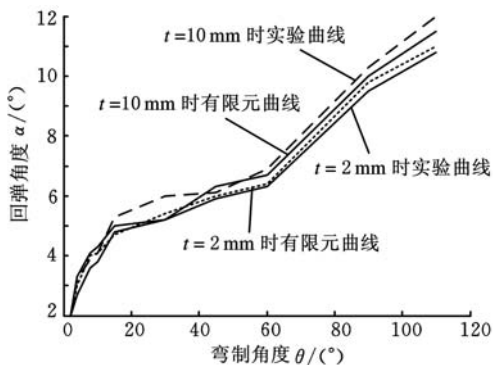


图 11 澳丝的回弹曲线

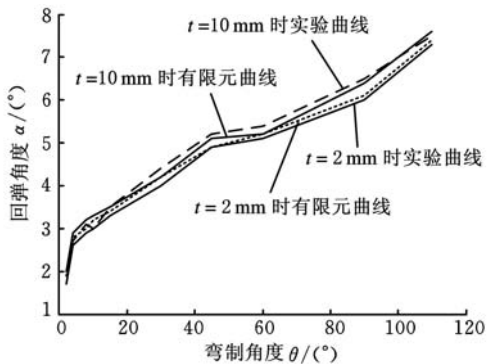


图 12 国产不锈钢弓丝的回弹曲线

### 3 实验研究和误差分析

#### 3.1 实验研究

通过对正畸弓丝的弯制特性的分析,并利用分析所得数据结果对弓丝弯制机器人的工作进行运动轨迹规划和弓丝弯制角度规划,最后调用弓丝弯制运动控制程序驱动弓丝弯制机器人实验系统进行弓丝弯制实验。选取患者口腔参数  $S=52.05\text{mm}$ 、 $W=25.04\text{mm}$ 、 $L=39.73\text{mm}$  进行弯制实验,实验系统主要由弓丝弯制机器人、主控计算机、弓丝弯制运动规划和控制软件以及实验台组成。

#### 3.2 误差分析

经过多次实验,得到了  $t=2\text{mm}$  和  $t=10\text{mm}$  情况下在回弹特性基础上的拟合曲线。以标准正畸弓丝曲线与拟合曲线之间围成的面积误差值作为误差评判指标,面积误差的计算见图 13(图中阴影部分)。点 A 是正畸弓丝曲线上任意的一点,经过点 A 做平行 y 轴的直线,该直线与拟合曲线相交于点 B。线段 AB 的长度即为两条曲线在该点的误差,对这个长度在曲线围成的面积内进行积分即可得出其面积。

面积误差值的要求只能保证正畸弓丝曲线的整体误差符合要求,并不能保证其局部误差要求。因为面积误差符合要求时,面积区域两端点

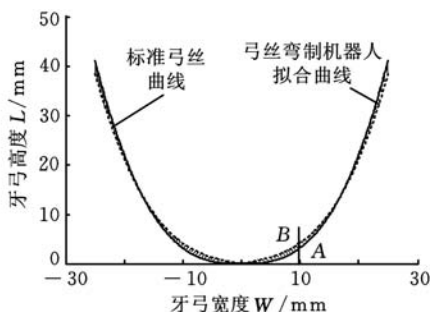


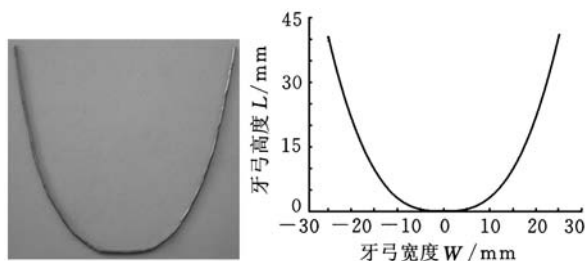
图 13 正畸弓丝面积误差

的  $x$  坐标差值有可能很小(即面积区域既高又窄),这就说明有奇异点的存在,这也是不符合要求的。因此,在面积误差值基础之上提出以该面积区域的两个端点的  $x$  坐标差值最小值作为另一个评判指标。计算方法是只需要简单计算面积区域两端点  $x$  坐标差值的绝对值即可。

根据面积误差值和端点  $x$  坐标差值最小值的计算原理,利用 MATLAB 编程计算,可以得到  $t=2\text{mm}$  时面积误差值为  $16.35\text{mm}^2$ ,端点  $x$  坐标差值最小值为  $10.63\text{mm}$ ;  $t=10\text{mm}$  时面积误差值为  $36.08\text{mm}^2$ ,端点  $x$  坐标差值最小值为  $11.25\text{mm}$ 。可以看出  $t=2\text{mm}$  时拟合出的弓丝曲线误差符合系统的误差要求。 $t=10\text{mm}$  时拟合出的弓丝曲线误差要远大于  $t=2\text{mm}$  时拟合出的弓丝曲线误差,与弓丝弯制特性分析所得到的结论是一致的。

### 3.3 弓丝弯制实验结果分析

采用弓丝弯制机器人进行弓丝弯制,以口腔参数  $S=52.05\text{mm}$ 、 $W=25.04\text{mm}$ 、 $L=39.73\text{mm}$  为例,图 14 所示为弓丝弯制机器人弯制所得弓丝与标准弓丝的对比,从图中可以看出,两者形状非常接近,曲线光滑清晰。



(a) 实验结果

(b) 理论弓丝

图 14 实验结果与理论弓丝的对比

## 4 结束语

正畸弓丝的弯制特性是采用机器人进行口腔正畸弓丝弯制过程中的关键因素,对弓丝弯制特性的定量分析能够为快速、高精度地进行正畸弓

丝弯制提供依据。采用有限元分析软件对弓丝弯制过程进行建模仿真,并与实际弯制相比较,得出镍钛合金弓丝、 $\beta$ -钛合金弓丝、澳丝和国产不锈钢弓丝这 4 种正畸弓丝的回弹性依次减小的结论;正畸弓丝的回弹性随着弯制角度的增大而增大。在采用机器人进行弓丝弯制时,要尽量减小固定夹具和移动夹具之间的距离。

### 参考文献:

- [1] 步捷. 常用正畸镍钛弓丝机械性能的研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [2] 胡友安, 周建方, 林萍华, 等. 正畸矫治弓丝材料的性能和应用[J]. 河海大学常州分校学报, 2006, 20(3): 5-8.
- [3] 林军, 董陈, 赵研, 等. 三种相变点正畸镍钛合金弓丝的力学性能比较[J]. 浙江大学学报, 2007, 36(5): 503-508.
- [4] Fishcer-Brandies H, Es-Souni M, Kock N, et al. Transformation Behavior, Chemical Composition, Surface Topography and Bending Properties of Five Selected  $0.016" \times 0.022"$  NiTi Archwires[J]. Journal of Orofacial Orthopedics Fortschritte der Kieferorthopädie(1434-5293), 2003, 64(2): 88-99.
- [5] Lijima M, Brantley W A, Yuasa T, et al. Joining Characteristics of Orthodontic Wires with Laser Welding[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 2008, 84(1): 147-153.
- [6] Ahmadabadi M N, Shahhoseini T, Habibi-Parsa M. Static and Cyclic Load-deflection Characteristics of NiTi Orthodontic Archwires Using Modified Bending Tests[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18(5/6): 793-796.
- [7] 黄宁, 白丁, 韩向龙, 等. 正畸弓丝转矩力的分析[J]. 华西口腔医学杂志, 2008, 36(2): 152-155.
- [8] 杜海艳, 贾裕祥, 张永德, 等. 弓丝弯制机器人运动轨迹规划[J]. 中国机械工程, 2010, 21(13): 1605-1608.
- [9] 姜金刚, 张永德, 吕培军, 等. 多电机驱动的牙弓曲线发生器的运动控制与实验研究[J]. 机器人, 2009, 31(5): 465-471.
- [10] 童宏永. U 形件弯曲回弹的数值模拟[D]. 天津: 河北工业大学, 2006.

(编辑 袁兴玲)

作者简介: 张永德, 男, 1965 年生。哈尔滨理工大学机械动力工程学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为医疗机器人、仿生机器人等。发表论文 72 篇。蒋济雄, 男, 1985 年生。哈尔滨理工大学机械动力工程学院博士研究生。