

# 口腔正畸弓丝矫治器自动制备成形中的 回弹补偿方法

邓 豪<sup>1,2</sup> 翁少葵<sup>1,2</sup> 夏泽洋<sup>1,2</sup> 甘阳洲<sup>1,2</sup> 熊 璟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

<sup>2</sup>(中国科学院人机智能协同系统重点实验室 深圳 518055)

**摘 要** 在传统的口腔正畸临床治疗中, 弓丝矫治器主要依赖于正畸医师手工弯制来完成, 这不仅要求医师有长时间的训练过程, 同时难以达到理想的个性化及精度要求, 也增加了患者复诊次数及椅旁等待时间。据此, 我们研发机器人系统来实现自动化的正畸弓丝矫治器制备。其中的一个难点问题是, 弓丝材料的高弹性引起的回弹现象严重影响了弓丝矫治器的成形精度。因此, 提出一种基于过弯预补偿模型和回弹力在线检测的过弯补偿方法, 来消除弯制过程中的弓丝回弹现象。该方法首先通过一个自行设计的弯制回弹装置测量回弹前后的角度差, 并将回弹后的角度作为目标成形角, 以此建立成形角过弯量预补偿模型; 然后通过力传感器进行弓丝回弹力在线检测, 建立基于零力状态判断的自动弯制控制方法。上述方法在所研发的弓丝弯制机器人系统中进行弯制实验测试。结果表明, 它能够最大限度地减小回弹效应, 实现满足临床精度要求的正畸弓丝自动弯制成形。

**关键词** 口腔正畸弓丝; 自动制备; 弹性回弹; 过弯补偿

**中图分类号** TP 24 **文献标志码** A

## A Compensation Method of Springback Effect for Automatic Orthodontic Archwire Preparation

DENG Hao<sup>1,2</sup> WENG Shaokui<sup>1,2</sup> XIA Zeyang<sup>1,2</sup> GAN Yangzhou<sup>1,2</sup> XIONG Jing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

<sup>2</sup>(Key Laboratory of Human-Machine Intelligence-Synergy Systems, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

**Abstract** In traditional orthodontic treatment, archwire preparation is performed by orthodontists manually. This manual pattern not only requires long time training of the clinicians, but also can not ensure the clinical requirement of customization and accuracy. It also increases the number of patient's office visits and long chairside time. Thus, an archwire bending robotic system aiming to perform this task automatically was

收稿日期: 2016-03-22 修回日期: 2016-04-13

基金项目: 广东省自然科学基金杰出青年基金(2015A030306020); 广东省科技计划项目(2014B090919002); 深圳市孔雀计划技术创新项目(KQCX20130628112914284); 深圳市基础研究项目(JCYJ20140901003939038)

作者简介: 邓豪, 硕士, 研究实习员, 研究方向为医疗、智能机器人系统控制; 翁少葵(共同第一作者), 硕士, 研究实习员, 研究方向为医疗、智能机器人系统设计; 夏泽洋(通讯作者), 博士, 副研究员, 博士研究生导师, 研究方向为医疗机器人、计算生物力学、精准口腔诊疗、医学图像处理及应用, E-mail: zy.xia@siat.ac.cn; 甘阳洲, 博士, 助理研究员, 研究方向为医学图像处理及应用; 熊璟, 博士, 高级工程师, 硕士研究生导师, 研究方向为医疗机器人。

developed. The springback effect caused by high elasticity of material affects the accuracy of bend forming. In this paper, a compensation method based on an overbend prediction model and an online force detection was presented to eliminate the springback effect of archwire. This method contains two steps. Firstly, an overbend prediction model was constructed to predict the overbend allowance of a target angle, based on calculating the difference of two angles measured by a self-designed instrument and taking the angle after springback as the target angle. Secondly, a force-based bending control algorithm was designed to detect the defined zero-force state using a force sensor to online measure the force at a given target angle. Finally, bending experiments were conducted in the self-developed orthodontic archwire bending system. Results show that the proposed compensation method can eliminate springback effect to minimum and accomplish the preparation of clinical required orthodontic archwire.

**Keywords** orthodontic archwire; automatic preparation; springback; overbend compensation

## 1 引 言

在传统的口腔正畸临床治疗中, 弓丝矫治器主要依赖于正畸医师手工弯制来完成<sup>[1]</sup>, 这不仅要求医师有长时间的训练过程, 同时还难以达到理想的个性化及精度要求, 增加了患者复诊次数及椅旁等待时间<sup>[2]</sup>。因此, 机器人系统希望实现弓丝矫治器制备的自动化及个性化<sup>[3-5]</sup>, 但在研发这些自动化正畸弓丝矫治器制备机器人系统过程中, 一个难点问题: 如何解决弓丝材料的高弹性引起的回弹对弓丝矫治器成形精度的严重影响。这是因为弓丝材料具有高弹性, 弓丝的弯制是一个金属的折弯成形过程, 弓丝的弯制成形精度严重依赖弯制过程中对弹性回弹效应的控制。

目前对弯制过程中弹性回弹效应的研究主要有理论计算和有限元分析两种思路。采用理论计算的方法对一般金属丝变形过程进行了分析<sup>[6-8]</sup>: 基于经典材料力学理论, 建立金属丝弯制计算模型以得到弯制变形与弹性回弹量之间的关系。在相关研究基础上, 针对具体的正畸弓丝弯制应用进行了研究, 建立了一套正畸弓丝弯制回弹理论计算模型, 并在机器人弯制系统中进行了初步的尝试<sup>[9,10]</sup>。然而在实际应用中, 由于正畸弓丝材

料的属性、弯制条件的不一致性等因素, 单单采用所提出的理论计算模型控制回弹效应不可避免地存在较大误差。而且建立一个通用的、适用于所有弯制条件的理论计算公式往往非常困难。采用有限元方法<sup>[11-13]</sup>, 期望建立弯制应力与弹性回弹之间的有限元分析关系, 进而准确计算一定弯制条件下的回弹特性。对于已知条件的弯制过程, 该方法具有很好的预测精度, 但有限元分析在解决理论计算对弯制条件考虑不周全的同时将问题复杂化了。不仅参数设定复杂、计算耗时, 而且多数情况下, 对于商业成品弓丝, 获取其准确的材料属性参数也存在一定的困难。这些都限制着有限分析方法从实验室走向工程应用。

如何做到理论计算模型对弯制过程可预测性的同时兼顾考虑材料属性、弯制条件等差异性因素影响, 但又不使计算方法过于复杂, 是研发正畸弓丝矫治器制备机器人系统<sup>[14]</sup>的一个难点问题。其关键在于亟需建立一套实用的正畸弓丝弯制回弹计算方法来实现对弹性回弹效应的控制。为此, 本文研究提出一种基于过弯预补偿和回弹力在线检测的两步式弯制成形控制方法。在第一步中, 针对一类弓丝通过简易回弹测量试验快速建立初步的过弯预补偿模型; 在第二步中, 通过

对弯制回弹力在线检测准确判断回弹效应过程并作出自动弯制补偿。

本论文内容将按如下逻辑组织，第二部分分析弓丝弯制回弹效应及过弯制策略；第三部分建立过弯预补偿模型，第四部分给出了基于过弯预补偿模型的回弹力检测自动弯制补偿算法；第五部分对所提出的成形方法在已开发的硬件系统中进行弯制实验，并对弯制结果进行测量分析；最后，第六部分对本文的研究内容进行总结。

## 2 弓丝弯制回弹效应及过弯成形

正畸弓丝弯制作为金属折弯工艺的一种应用，与金属折弯工艺具有极大的相似性。弓丝弯制成形操作如图 1 所示：通过弯制钳头夹持弓丝施加弯制力，强迫弓丝发生变形。由材料力学可知，金属材料的变形分为弹性变形和塑性变形。其中，弹性变形的重要特征是其可逆性，即受力后产生变形，载荷卸除后变形消失；而塑性变形则是不可恢复的<sup>[15]</sup>，金属只有在发生塑性变形时才能实现所需各种形状、尺寸的金属制品的加工成形。

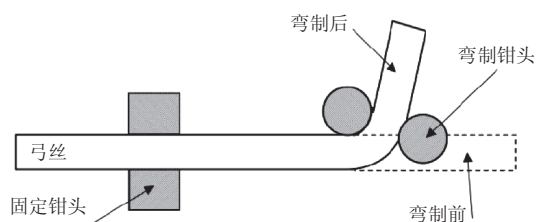


图 1 弓丝弯制操作

Fig. 1 Operation of bend forming

如图 2 所示，对于不锈钢材质的正畸弓丝，冷作成形弯制一般是处于弹塑性变形阶段。当弯制力撤去后这部分弹性变形会被释放，造成弓丝的最终成形角  $\alpha_f$  比预先设计的弯制角  $\alpha_i$  小，这种现象一般称为弹性回弹效应。

解决回弹效应的一般策略是执行过弯操作。从回弹分析过程逆向来看，如果以回弹后的成形

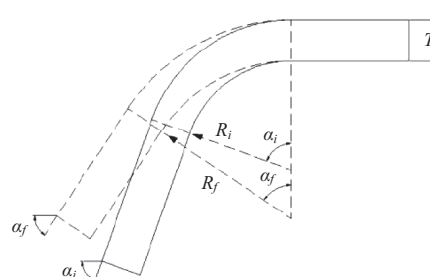


图 2 弓丝回弹效应

Fig. 2 Springback effect of archwire

角  $\alpha_f$  作为期望弯制角，初始弯制操作是将弓丝弯制到一个更大角度  $\alpha_i$  的，最后实现过弯量对回弹量的补偿。对于图 2 所示的弯制过程，定义回弹率  $k_s$  来衡量不同条件下弓丝的回弹程度， $k_s$  的表达式为：

$$k_s = \alpha_f / \alpha_i \quad (1)$$

当弯制存在回弹现象时， $0 < k_s < 1$ 。回弹率  $k_s$  除与弓丝材料属性有关，还与弯制操作方式、初始弯制角、弯制半径等有关<sup>[16]</sup>。由过弯操作过程，我们不难得到过弯量的表达式为：

$$\Delta\theta = \alpha_i - \alpha_f = (1/k_s - 1) \times \alpha_f \quad (2)$$

$\alpha_f$  作为期望弯制角，也是过弯成形操作时的目标角，我们一般化式(2)得到过弯量计算公式为：

$$\Delta\theta = (1/k_s - 1) \times \theta \quad (3)$$

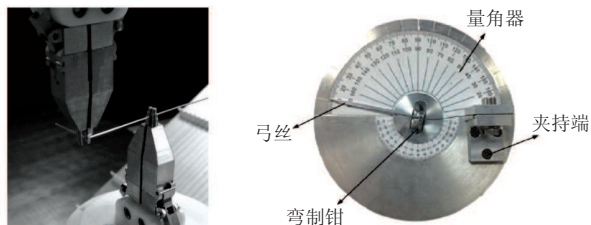
因而对于不锈钢材质正畸弓丝的冷作成形弯制，采用过弯成形方法的关键在：如何建立如式(3)关于目标成形角度过弯量预补偿模型。

## 3 过弯预补偿模型

本文采用的正畸弓丝自动弯制系统执行弯制操作如图 3(a)所示，弯制手爪和夹持手爪相互配合实现如同正畸医师的弯制成形动作。本文提出采用实验方法建立过弯预补偿模型，以获取目标成形角度初步的过弯量预测值。

运用等效实验原理设计了如图 3(b)所示的弓丝弯制回弹角测量仪。进行弯制测试实验时，该装置中部设置有正畸钳安装机构，右侧设置有弓

丝夹紧装置, 通过对某类型不锈钢弓丝, 并使用与自动弯制系统类似特征的正畸钳头, 重复进行弯制实验, 记录弯制角度和实际成形角度。



(a) 弓丝自动弯制操作 (b) 自行设计的弓丝回弹测量仪

图 3 弯制回弹角等效测量原理

Fig. 3 Mechanism of equivalent measurement of springback angles

针对本文将采用的  $0.017 \text{ inch} \times 0.022 \text{ inch}$  的不锈钢弓丝, 选取 Kim 正畸钳的  $1 \text{ mm}$  半径头进行弯制成形测量试验。弯制测量范围从  $0^\circ$  到  $200^\circ$  并以  $5^\circ$  的步长进行, 得到的原始测量数据如图 4 所示。

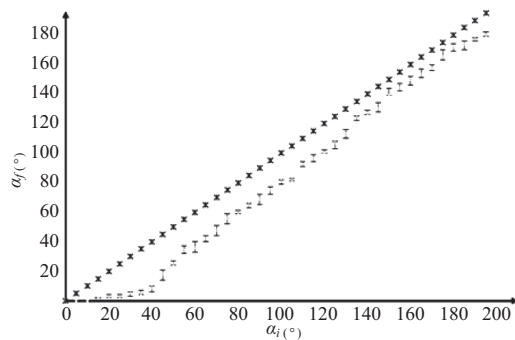


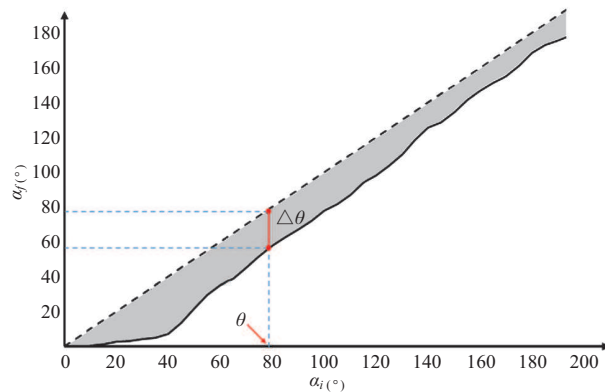
图 4 弯制实验测量数据点

Fig. 4 Measuring points from bending experiment

对原始数据点进行曲线拟合得到弓丝弯制回弹角数据曲线如图 5(a) 所示, 由式 (3) 可得到目标成形角度的过弯量预补偿模型如图 5(b) 所示。

采用此方法可快速得到目标弯制环境下任意弓丝成形角的过弯预补偿模型。在自动弯制系统中, 通过查表法建立了图 5(b) 模型的过弯量自动获取程序。对于任意的目标成形角  $\theta$ , 过弯预补偿模型将会给出一个过弯量建议值, 指导机器人

进行弯制操作。



(a) 弯制测量点拟合曲线



(b) 目标成形角度的过弯量

图 5 过弯预补偿模型

Fig. 5 Overbend precompensation model

## 4 回弹力检测自动弯制补偿

过弯预补偿模型要求弯制条件具有一致性, 如弓丝材料属性、弯制半径以及弯制力等。在实际运用中, 预补偿模型与实际操作场景不可避免地存在较大差异。本文在已建立的过弯预补偿模型的基础上, 提出基于回弹力检测自动弯制补偿方法, 来实现一种两步式的弯制成形控制。

如图 6 所示, 在弓丝弯制钳头对弓丝进行弯制操作过程中, 弓丝变形抗力作用在钳头, 并与机器人主动施加的弯制力矩形成一对平衡力。当



弓丝弯制至过弯角度，即期望成形角与过弯补偿角之和时，弯制系统执行回弹操作。由金属材料的变形机理可知，在回弹过程中，弓丝弹性变形所带来的回弹抗力是单调减小的。当弹性变形完全恢复时，塑性变形对弓丝产生的永久变形将形成最终的弓丝成形角度。因而在回弹过程中必定存在一个回弹抗力的极小值，我们定义此时的弓丝变形阶段是处于一个零抗力状态角位置 (Zero Force Angle, ZFA)，即弹性变形消失时刻。因而本文在弯制末端执行器法兰处安装力传感器，实现对钳头与弓丝间接触力的实时检测。

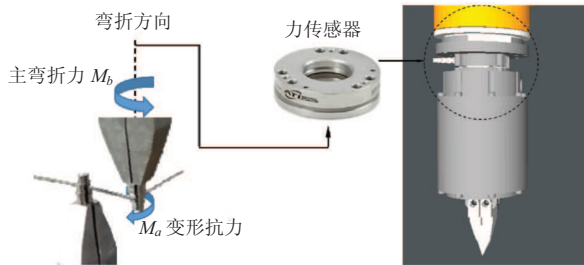


图6 回弹力检测原理及机构实现

Fig. 6 Force detection of springback and its mechanism realization

基于上述分析，当检测得到的零状态角与期望目标成形角度一致时，我们认定弓丝成形到位，回弹效应基本消除。否则，弯制系统将通过再次的过弯操作迭代，最终实现成形角度与目标角不断趋近的。因而不难得到，基于回弹力检测的自动弯制补偿控制的终止判据为：

$$|F_{\theta'}| < \Delta F(\theta), \text{ when } |\theta' - \theta| < \varepsilon \quad (4)$$

其中， $\theta$  是期望的目标成形角度； $\theta'$  是 ZFA 位置的成形角度； $\Delta F(\theta)$  是一个弯制回弹力的检测极小值，与弯制成形角和传感器的灵敏度有关； $\varepsilon$  是成形角度的弯制成形允许误差。

基于回弹力检测弯制终止判据，采用的自动弯制补偿策略是：过弯操作迭代直到 ZFA 位置与目标成形角在精度范围内。该过程框图如图 7 所示。回弹力检测弯制控制策略主要包含以下三个操作步骤：

(1) 过弯预补偿。对于一个期望的成形角  $\theta$ ，预补偿模型将根据弯制系统的弯制配置以及弓丝状态，计算出过弯量建议值。自动弯制系统将根据此过弯预补偿值执行弯制操作，弯制弓丝至一个修正角度  $\theta_b = \theta + \Delta\theta$ 。

(2) ZFA 状态检测。在过弯制成形到修正角度后，力传感器会读取当前位置回弹抗力的数值，并根据回弹抗力的方向判断当前状态是欠成形或是过成形，并由此决定返回方向。弯制系统将会按照弯制操作路径进行返回，在此期间力传感器不断读取回弹抗力的数值，直到回弹力满足设定的 ZFA 较小值判据。此时，根据机器人的关节状态可以快速获取当前弓丝的实际成形角度  $\theta'$ 。根据目标成形角度和实际成形角度对当前弯制操作结果进行判断。

(3) 弯制迭代。如果实际的成形角度  $\theta'$  与期望成形角  $\theta$  在误差范围内，标记此次弯制操作完成；否则，弯制系统需要根据当前的实际成形角  $\theta'$  重新执行折弯操作。

本文提出的基于预补偿模型和回弹力检测的

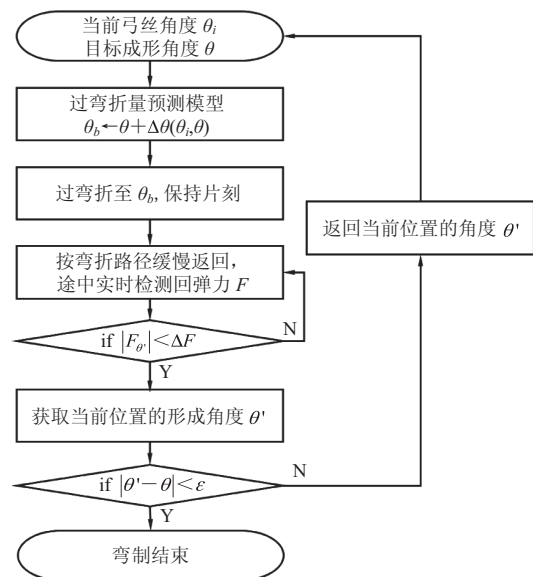


图7 回弹力检测自动弯制控制策略

Fig. 7 Strategy of force detection bending control for autocompensation

两步自动弯制控制方法适用于以旋转弯制方式实现弓丝成形的任一机器人系统。该弯制控制算法实现的伪代码如下表 1 所示。

表 1 预补偿模型和回弹力检测弯制控制

Table 1 Automatic bending control based on overbend precompensation model and force detection

Algorithm Bending_Control( $d\_angle, p\_config$ )	
1	<b>procedure</b> Bending_Main( $d\_angle, p\_config$ )
2	$c\_angle \leftarrow robot\_state.get\_pose()$ ;
3	Bending_Exec( $c\_angle, d\_angle$ );
4	$nc\_angle \leftarrow Bent\_Check()$ ;
5	<b>while not</b> $nc\_angle$ equal to $d\_angle$ <b>do</b>
6	Bending_Exec( $nc\_angle, d\_angle$ );
7	$nc\_angle \leftarrow Bent\_Check()$ ;
8	<b>end while</b>
9	<b>return</b> Done;
10	<b>end procedure</b>
11	<b>procedure</b> Bending_Exec( $c\_angle, d\_angle$ )
12	$o\_angle \leftarrow preM(c\_angle, d\_angle, p\_config)$ ;
13	robot_move( $o\_angle$ );
14	<b>end procedure</b>
15	<b>procedure</b> Bent_Check()
16	$nc\_angle \leftarrow robot\_return().zeroP()$ ;
17	<b>return</b> $nc\_angle$ ;
18	<b>end procedure</b>

算法中,  $d\_angle$  是期望的目标成形角度;  $p\_config$  是弯制系统的弯制钳头配置;  $c\_angle$  是弯制回弹过程中的中间成形角;  $nc\_angle$  是执行弯制迭代时的最新弓丝状态; Done 是单次弯制操作结果状态标识; robot\_move() 和 robot\_return().zeroP() 是与实际弯制硬件系统相关的机器人弯制操作动作, 实现实际的机器人弯制动作执行。

## 5 实验结果及讨论

本文主要是针对在口腔正畸弓丝弯制系统开发过程中遇到的弹性回弹效应控制问题开展研究。因而为验证提出的基于预补偿模型和回弹力

检测的两步自动弯制控制方法, 将其集成在已开发的正畸弓丝自动制备机器人系统<sup>[17]</sup>中。该弯制系统如图 8 所示。弯制系统由一台六自由度工业机械臂以及一副自行设计的正畸弓丝弯制末端执行器<sup>[18]</sup>组成。机械臂可重复定位精度 $\pm 0.03$  mm。系统运行时, 在机械臂的驱动下弯制末端执行器能够执行协调的弯制操作动作, 同时机械臂能够提供主动弯制单元足够的弯制力、运动精度以及灵活的弯制运动空间。

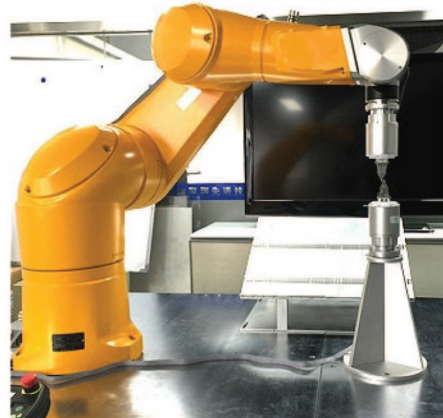


图 8 口腔正畸弓丝弯制机器人系统

Fig. 8 Robot system for orthodontic archwire bending

为验证弯制成形控制算法的有效性, 在弯制系统中进行了两类实验: 特征角弯制成形和完整弓丝矫治器的弯制成形。

### 5.1 特征角度弯制实验结果

组成正畸弓丝的基本元素是功能曲, 功能曲的弯制是从原始的直弓丝通过一系列的特征角弯制实现成形。常见弓丝特征角有  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $180^\circ$ 。弯制系统采用本文提出的弯制控制算法, 对每一个特征角进行 20 次的重复弯制实验, 测量其实际的成形角度并统计实验结果。

由于目前临床上尚未建立完整的正畸弓丝弯制成形精度评价体系, 在对本文的结果进行精度评价时, 我们结合临床弓丝制备操作和制备工具<sup>[19]</sup>的特性以及临床医师咨询, 设定弯制系统

的特征角成形精度为 $\pm 1.5^\circ$ 。为此本文选用均值和误差分布区间作为分析评价指标。其中, 均值误差衡量实际成形角度与目标成形角度的趋近程度; 误差分布衡量结果的离散程度。

特征角弯制实验的结果如表 2 所示。弯制结果均值最大偏差小于 2%, 最大分布区间小于 $\pm 1.4^\circ$ 。弯制结果较大分布区间发生在特征角度范围两端处。因而目标弓丝矫治器上含相应角度区间的特征角弯制精度将对目标弓丝成形影响较大。

表 2 特征角弯制实验结果

Table 2 Bending Results of six characteristic angles

特征角	均值( $^\circ$ )	误差分布( $^\circ$ )
$15^\circ$	15.2	$\pm 1.3$
$30^\circ$	30.1	$\pm 0.5$
$45^\circ$	44.8	$\pm 0.8$
$60^\circ$	59.9	$\pm 0.6$
$90^\circ$	89.8	$\pm 1.1$
$180^\circ$	180.2	$\pm 1.4$

## 5.2 弓丝弯制实验结果

选取如图 9(a)所示类型弓丝作为弯制实验的目标弓丝, 该弓丝由一系列第一阶序列曲和第二阶序列曲组成。其中第二阶序列曲包括两组垂直加力曲, 第一阶序列曲组合则形成最终的牙弓形状。在弯制系统中对目标弓丝进行了 20 次重复弯制实验, 其中之一的弯制成形弓丝及关键评价参数如图 9(b)所示。目标弓丝牙弓开口宽度  $D_0$  在一定程度上可反映弓丝成形角的累计误差。

目标弓丝  $D_0$  的设计参数为 50 mm, 实验测得的  $D_0$  分布范围为 [48.2, 52.3] mm。对于特征功能区, 其成形精度将直接影响正畸力加载。对于垂直曲, 其关键参数是特征曲高度  $H_1$  和宽度  $T_1$ 。目标弓丝曲高度  $H_1$  和宽度  $T_1$  的设计参数为 6 mm 和 2 mm。实验测得的  $H_1$  分布范围为 [5.7, 6.5] mm,  $T_1$  分布范围为 [1.8, 2.3] mm。其中部分参数呈现一定的误差, 主要原因有以下两个方面: (1) 由于目前弯制系统采用功能曲顺序弯制策略, 目标弓丝牙弓开口宽度  $D_0$  存在弓丝成形角累计误差, 下一步将回弹补偿方法与弯制规划策略结合, 实现分段控制; (2) 自行设计加工的第一代弯制末端执行器尚存在系统误差, 目前已完成第二代弯制末端执行器的结构优化设计, 将能在一定程度上进一步提高目标弓丝的弯制成形精度。

## 5.3 本方法的优越性

目前已有报道的正畸弓丝弯制回弹补偿方法主要包括理论计算<sup>[6-10]</sup>和有限元分析<sup>[11-13]</sup>两类, 但都属于离线预测方法, 实际的弯制过程仍为开环控制。本文首次提出基于过弯预补偿和回弹力在线检测的两步式弯制成形控制方法。在第一步中, 任一类弓丝通过简易回弹测量试验快速建立初步过弯预补偿模型; 在第二步中, 通过对弯制回弹力在线检测准确判断回弹效应过程并作出自动弯制补偿。与已有方法相比, 本方法实现理论

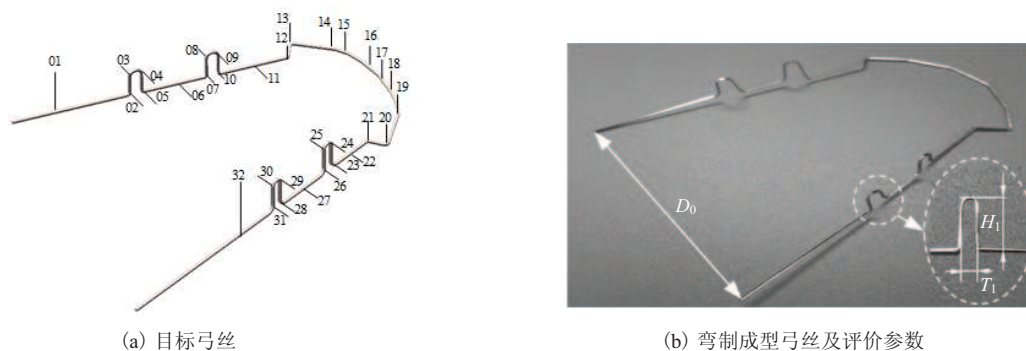


图 9 弓丝弯制实验

Fig. 9 Archwire preparation experiment

计算模型对弯制过程可预测性的同时, 也兼顾到材料属性、弯制条件等差异性因素影响, 但又不使计算方法过于复杂, 能够应用于实际的正畸弓丝矫治器制备机器人系统, 提高弯制成形精度。实验结果表明, 本方法能够提高特征功能曲弯制成形精度, 实现功能曲关键参数在 $\pm 1\text{ mm}$ 范围内, 其中 $D_0$ 参数误差在 $\pm 2.5\text{ mm}$ 范围内(等效误差率在 5% 左右), 明显优于已有方法<sup>[9,10]</sup>中 15% 的成形误差率。

## 6 结 论

本文提出一种基于过弯预补偿和回弹力在线检测的两步式弓丝自动弯制回弹补偿弯制控制方法, 以针对性解决口腔正畸弓丝矫治器制备机器人系统开发时遇到的弹性回弹效应问题。该方法包括两个方面, 首先通过一个自行设计的弯制回弹装置测量回弹前后的角度差, 以建立成形角过弯量预补偿模型; 然后通过力传感器进行弓丝回弹力在线检测, 建立基于零力状态判断的自动弯制控制方法。上述方法在所研发的矫治器制备机器人系统中进行弯制实验测试, 结果表明它能够最大限度地减小回弹效应, 实现满足临床制备要求的正畸弓丝自动成形。

## 参 考 文 献

- [1] Proffit WR, Fields HW, Sarver DM. Contemporary Orthodontics [M]. Elsevier LTD, Oxford, 2012.
- [2] Mavreas D, Athanasiou AE. Factors affecting the duration of orthodontic treatment: a systematic review [J]. European Journal of Orthodontics, 2008, 30(4): 386-395.
- [3] Fischer-Brandies H, Orthuber W, Pohle L, et al. Bending and torquing accuracy of the bending art system [J]. Journal of Orofacial Orthopedics, 1996, 57(1): 16-23.
- [4] Gilbert A. An in-office wire-bending robot for lingual orthodontics [J]. Journal of Clinical Orthodontics Jco, 2011, 45(4): 230-234, 236.
- [5] Rigelsford J. Robotic bending of orthodontic archwires [J]. Industrial Robot: An International Journal, 2004, 31(6): 321-335.
- [6] Baragetti S. A theoretical study on nonlinear bending of wires [J]. Meccanica, 2006, 41(4): 443-458.
- [7] Anggono AD, Siswanto WA, Omar B. Algorithm development and application of spring back compensation for sheet metal forming [J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2012, 4(14): 2036-2045.
- [8] 王萌萌, 姚斌, 沈志煌, 等. 线材折弯回弹的分析与补偿 [J]. 锻压技术, 2014, 39(12): 65-70.
- [9] 张永德, 蒋济雄. 正畸弓丝弯制特性分析及实验研究 [J]. 中国机械工程, 2011, 22(15): 1827-1831.
- [10] 姜金刚, 王钊, 张永德, 等. 机器人弯制澳丝的回弹机理分析及实验研究 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 919-926.
- [11] Luis CJ, León J, Luri R. Comparison between finite element method and analytical methods for studying wire drawing processes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164-165(10): 1218-1225.
- [12] 孔灿. 正畸不锈钢弓丝弯曲成型与回弹的有限元数值模拟研究 [D]. 南京: 东南大学, 2009.
- [13] 张宪, 卢楚才, 赵章风. 线材滚弯过程的回弹量数学模型的建立与研究 [J]. 轻工机械, 2010, 28(6): 60-65.
- [14] Deng H, Xia ZY, Weng SK, et al. Motion planning and control of a robotic system for orthodontic archwire bending [C] // IEEE/RSJ I International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2015: 3729-3734.
- [15] Singh A, Agrawal A. Experimental investigation on Elastic spring back in deformation machining bending mode [C] // ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2015: 9283-9290.
- [16] Allen DK, Todd RH. Manufacturing Process Reference Guide [M]. Industrial Press Inc., 1994.
- [17] Xia ZY, Deng H, Weng SK, et al. Development of a robotic system for orthodontic archwire bending [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2016.
- [18] 夏泽洋, 郭杨超, 甘阳洲, 等. 口腔正畸器械制备机器人及其机械手: 中国, CN201410083066.1 [P]. 2014-03-06.
- [19] 李小彤. 口腔正畸治疗常用弓丝弯制技术 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2010.