

橡胶鞋底弹性打磨仿真及试验

刘 洋

(湖南师范大学 工程与设计学院, 长沙 410081)

摘要:为解决含轮廓误差的鞋底自动打磨问题,提出了弹性打磨方法。首先,将鞋底轮廓分为理论轮廓和制造误差两部分,由鞋底两自由度运动跟踪鞋底的理论轮廓,由弹性磨头的接触变形适应鞋底的制造误差,建立描述鞋底轮廓的数学模型;其次,将磨头力控与鞋底运动控制相结合,建立弹性打磨机构的动力学模型,仿真不同磨头偏角条件下鞋底与磨头之间的接触力,研究弹性打磨的关键参数;最后,开发了鞋底弹性打磨试验系统,验证了弹性打磨的可行性和有效性。

关键词:机械设计及理论;橡胶鞋底;轮廓误差;弹性打磨;接触力仿真

中图分类号:TP242.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2024)08-2167-07

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20221332

Simulation and experiment of elastic roughing for rubber shoe

LIU Yang

(College of Engineering and Design, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: To address the problem of automatically roughening the sole with some contour error, an elastic roughing method is proposed. Firstly, the sole contour is divided into theoretical contour and manufacturing error. The mathematical model describing the sole contour is established. The theoretical contour of the sole is tracked by the two degree of freedom motion of the sole. The manufacturing error of the sole contour is adapted by the deformation of the grinding head under the contact action. Secondly, combining the force control of the grinding head with the motion control of the sole, the dynamic model of the elastic roughing mechanism is established. The contact force changes between the sole and the grinding head under different grinding head postures are simulated, and the key parameters of the elastic roughing are studied. Finally, the test system of sole elastic grinding mechanism is developed, and the feasibility and effectiveness of the elastic roughing of the sole are verified by experiments.

Key words: mechanical design and theory; rubber sole; contour error; elastic roughing; contact force simulation

收稿日期:2022-10-13.

基金项目:建设机械关键技术国家重点实验室开放基金项目(SKLCM2022-02).

作者简介:刘洋(1981-),男,副教授,博士.研究方向:机器人系统设计和起重机动力学分析.

E-mail:liuyang@hunnu.edu.cn

0 引言

鞋底打磨工序是制鞋工艺的重要环节。目前鞋底打磨工序多采用手工作业,生产效率低,打磨过程中产生的粉尘严重威胁工人的健康,且打磨质量难以保证^[1]。随着制鞋工业的发展,研究自动打磨技术对提升制鞋水平和提高制鞋效益具有重要意义。

工业机器人是实施工件自动打磨的常用工具。例如,采用工业机器人对光学玻璃进行磨抛^[2],对金属零件表面实施抛光^[3],对涡轮叶片进行磨削^[4],对鞋底面实施打粗^[5,6]等。这些应用均局限于一致性较好的工件或具有一致性的工件部位。然而,橡胶鞋底在制造过程中,受材料、温度、压力等影响容易变形,难以保证鞋底轮廓的一致性。根据现行橡胶鞋底标准,鞋底误差小于5 mm为合格产品^[7]。由于理论轮廓与实际轮廓存在较大的误差,根据理论轨迹进行运动控制编程不能满足橡胶鞋底的打磨要求。

鞋底轮廓建模是鞋底自动打磨的关键问题。目前解决鞋底轮廓建模问题主要依靠激光或图像识别,如Luh等^[8]应用机器视觉扫描鞋底自动生成轮廓轨迹,武传宇等^[9]和Wang等^[10]采用结构光对鞋底扫描生成鞋底轮廓曲线,赵国如等^[11]采用激光扫描重建鞋底模型。这些方法对硬件要求高,扫描速度慢,作业效率低。目前,在鞋底自动打磨过程中通过在线重建鞋底模型处理鞋底轮廓跟踪问题还不够经济。

力控补偿误差是跟踪鞋底轮廓的另一种方法。袁海兵^[12]设计了一种自适应鞋底打磨机构,通过恒力气缸使磨轮与鞋底被动压紧,由鞋底模具推动磨头被动平移,但该机构仅能打磨鞋底外侧;Pedrocchi等^[13]采用模糊控制器控制鞋底打磨力,处理鞋帮底面打磨问题,但难以适应鞋帮侧边复杂轮廓。目前,在鞋底自动打磨过程中,如何通过力控主动适应鞋底轮廓仍是一个难题。

高斯曲线拟合参数如表1所示。由表1可得到描述鞋底理论轮廓曲线的非参数模型,其均方根误差为0.72 mm。

根据式(1),控制鞋底作 x 和 RZ 两自由度运动,使鞋底外边缘绕磨头作平面运动。

取轮廓轨迹点坐标为 $P(x, y)$,磨头半径为 r ,

本文以典型的橡胶鞋底为对象,建立描述鞋底外轮廓的理论模型,研究通过力控主动适应鞋底轮廓误差的弹性打磨机构;建立磨头与鞋底之间的刚柔耦合模型,进行不同工况的弹性打磨仿真,研究磨头与鞋底之间接触力的变化规律;开发弹性打磨机构试验系统,通过试验验证弹性打磨的可行性。

1 弹性打磨原理

1.1 橡胶鞋底运动分析

为研究橡胶鞋底轮廓建模,现取应用广泛的型号为BF1905-6B的橡胶鞋底,分析其外轮廓。将鞋底外轮廓分为内侧、外侧、鞋跟和鞋尖4部分。以鞋底模具定位圆为鞋底中心,以鞋底轮廓边缘到鞋底中心的距离为鞋底轮廓半径,建立极坐标系。现以鞋底轮廓半径与 x 轴之间的夹角为变量,将鞋底轮廓展开,如图1所示。

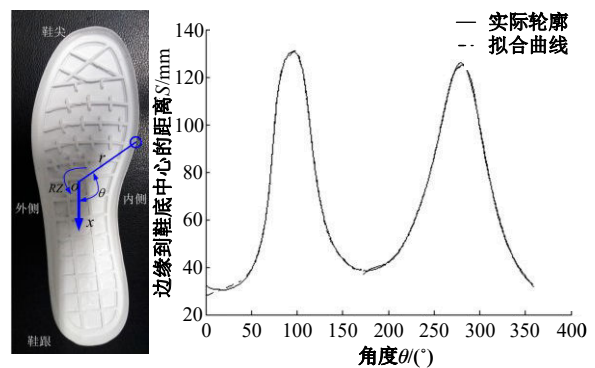


图1 BF1905-6B橡胶鞋底及鞋底轮廓曲线

Fig. 1 Rubber sole and contour curve with model BF1905-6B

图1中,鞋底轮廓半径随转角变化而变化。为了简化鞋底轮廓曲线的数学模型,现将轮廓从中间分成两段,定义鞋底轮廓到鞋底中心的距离为鞋底轮廓半径 S ,单位为mm;定义鞋底轮廓半径与 x 轴之间的夹角为转角 θ ,单位为度。对两段轨迹分别采用高斯曲线拟合,建立 S 与 θ 之间的关系:

$$S(\theta) = a_1 e^{-((\theta - b_1)/c_1)^2} + a_2 e^{-((\theta - b_2)/c_2)^2} + a_3 e^{-((\theta - b_3)/c_3)^2} + a_4 e^{-((\theta - b_4)/c_4)^2} + a_5 e^{-((\theta - b_5)/c_5)^2} \quad (1)$$

鞋底逆时针转动,则刀具偏移分量为:

$$\begin{cases} r_x = \frac{ry}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ r_y = -\frac{rx}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{cases} \quad (2)$$

则有刀补点坐标 $P_k(x_k, y_k)$ 为:

表 1 高斯曲线拟合参数表

Table 1 Parameter table for Gauss fitting curve

参数	角度范围[0,180°)	角度范围[180°,360°)
	拟合参数取值	拟合参数取值
a_1	-41.02	63.94
b_1	82.45	278.6
c_1	14.89	27.53
a_2	46.01	53.77
b_2	80.36	244.4
c_2	11.36	36.43
a_3	100.8	56.86
b_3	94.99	301.3
c_3	25.2	37.01
a_4	47.83	36.66
b_4	200.8	178.9
c_4	273.4	46.37
a_5	-8.306	26.71
b_5	166.9	355.7
c_5	17.28	36.79

$$\begin{cases} x_k = x + \frac{ry}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ y_k = y - \frac{rx}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{cases} \quad (3)$$

根据式(2)(3),建立轨迹点的齐次矩阵 T_b 和刀补点的齐次矩阵 T_k 。将鞋底轮廓轨迹数据密化,鞋底轮廓轨迹与刀补轨迹如图 2 所示。

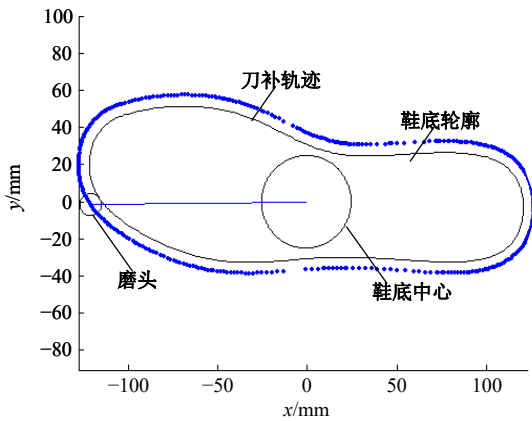


图 2 鞋底两自由度打磨示意图
Fig. 2 Schematic diagram of two degrees of freedom grinding of sole

图 2 中鞋底在绝对坐标系下绕磨头作两自由度运动,鞋底运动后的刀补轨迹点齐次矩阵 T_c 可描述为:

$$T_c = T_x \times T_{RZ} \times T_k \quad (4)$$

式中: T_x 为刀补轨迹点沿 x 方向运动的齐次矩阵,

其中 x 方向偏移量为相邻刀补轨迹点到鞋底中心的距离之差; T_{RZ} 为刀补轨迹点绕鞋底中心转动的齐次矩阵,其中绕 Z 轴的转角为相邻刀补轨迹点与鞋底中心的连线的角度差。

1.2 自适应弹性打磨方法

由于缩水、温度、工艺等原因,橡胶鞋底的实际轮廓与理论轨迹之间存在一定误差。根据行业标准,鞋帮歪斜不超过 3 mm,包头大小不超过 3 mm,后跟长短不超过 4 mm,后帮高低不超过 5 mm 均为合格产品。由于每只鞋底的误差都不一样,为适应鞋底实际轮廓与理论轮廓之间的误差,本文将磨头设计为具备预压力的弹性磨头,结合鞋底两自由度运动,提出自适应弹性打磨方法。

自适应鞋底弹性打磨方法为,根据鞋底模具建立鞋底运动的理论轨迹,鞋底外边缘绕磨头的理论中心作平面运动,鞋底与磨头之间的接触力通过包含预压力的线性弹簧进行补偿。弹性打磨原理如图 3 所示,其中,鞋底绕鞋底中心 RZ 轴转动,同时鞋底沿磨头理论中心和鞋底中心的连线 x 轴作直线运动,鞋底外轮廓与磨头接触,磨头通过弹簧变形适应鞋底轮廓误差。在一定的鞋底误差条件下,为了保证鞋底转动过程中与磨头始终保持接触,弹簧预压力 F_0 应较大;为了保证磨头适应鞋底误差过程中两者接触力近似不变,弹簧刚度 k 应较小。

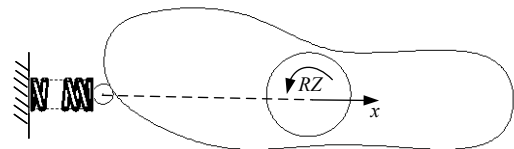


图 3 弹性打磨原理图
Fig. 3 Principle diagram of elastic grinding

在鞋底打磨过程中,鞋底按照式(1)所示理论轮廓轨迹绕磨头作两自由度平面运动。当鞋底实际轮廓与理论轮廓一致时,磨头与鞋底之间的接触力不超过弹簧的预压力;当鞋底实际轮廓与理论轮廓存在较大误差时,鞋底推挤磨头运动,弹簧压力增加,即通过两自由度运动控制与被动力控制相结合解决鞋底复杂轮廓误差跟踪问题。

1.3 弹性打磨机构设计

现根据弹性打磨原理,设计弹性打磨机构,如图 4 所示。

图 4 中,弹性打磨机构包括两自由度鞋底运载台和弹性磨头。鞋底运载台包含线性模组和转

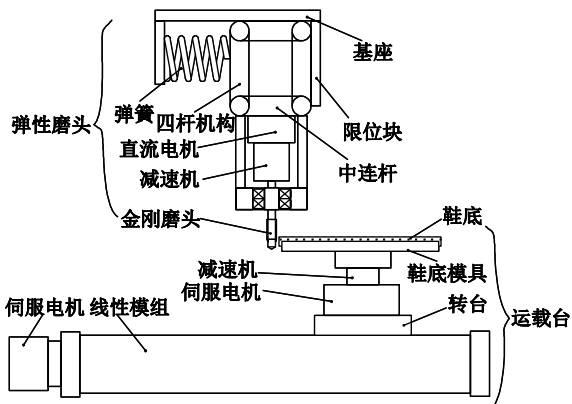


图 4 弹性打磨机构原理

Fig. 4 Principle of elastic grinding mechanism

台,转台包括伺服电机、减速机和鞋底模具,线性模组包括伺服电机和滚珠丝杠。转台安装在线性模组的滑块上,鞋底模具固定在转台的输出轴上。转台沿着线性模组作直线运动,通过减速机驱动鞋底回转。转台沿线性模组的直线运动与转台自身的回转运动合成鞋底边缘绕磨头的平面运动。

弹性磨头由四杆机构、直流电机、弹簧和金刚

磨头组成。直流电机固定在四杆机构的连杆上,通过减速机驱动金刚磨头转动。四杆机构的一个连架杆与限位块接触,四杆机构的另一个连架杆通过弹簧与基座相连。

在初始状态时,四杆机构的连架杆与限位块接触,弹簧受压并保持一定的预压力,弹簧预压力为达到鞋底纹路所需要的鞋底压力。在打磨过程中,鞋底与磨头接触,鞋底与磨头之间的压力由弹簧压力和轮廓误差决定。弹性打磨机构通过运载台驱动鞋底作平面运动,解决鞋底推动磨头运动过程中出现机构死点问题,将鞋底轮廓误差跟踪问题转变为弹性磨头被动力控问题,降低了运动控制难度。

2 弹性打磨仿真

为研究打磨过程中磨头与鞋底之间的相互作用关系,在 I-deas simulation 中建立磨头与鞋底的刚柔耦合模型,如图 5 所示。

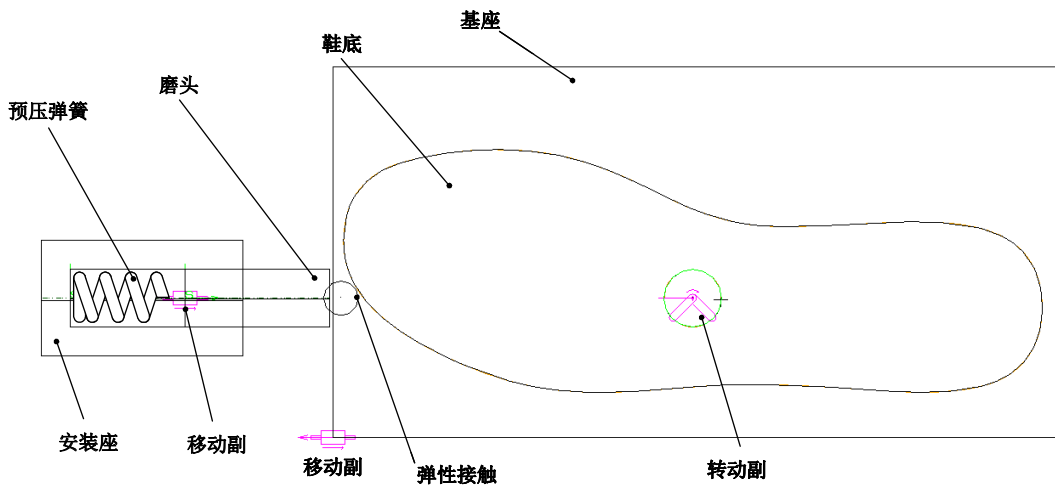


图 5 鞋底打磨动力学仿真模型

Fig. 5 Dynamic simulation model of sole grinding

鞋底与基座通过转动副连接,基座与地面之间为滑动副连接,磨头通过弹簧与安装座相连,磨头与安装座之间为滑动连接。为模拟鞋底与磨头碰撞的动力学行为,设磨头与鞋底之间为接触碰撞模型。取磨头与鞋底的接触碰撞参数^[14]为 $stiffness=2855 \text{ N/mm}$, $damping=0.57 \text{ N}\cdot\text{sec/mm}$, $exponent=1.1$, $penetration=0.1 \text{ mm}$ 。设定弹簧刚度为 2 N/mm , 阻尼为 $0.1 \text{ N}\cdot\text{sec/mm}$, 预压力为 10 N , 当前长度为 25 mm 。以竖直方向为参考,改变磨头轴线与鞋底轮廓法线之间的角度,取磨头偏角为 -20° 、 -10° 、 0° 、 10° 和 20° 进行

不同姿态打磨仿真,如图 6 所示。

对 BF1905-6B 型鞋底打磨过程进行两自由度运动规划,驱动鞋底作回转和平移运动,使鞋底轮廓边缘与磨头产生接触碰撞。磨头与鞋底之间的表面接触力是评价打磨效果的关键指标。打磨 BF1905-6B 型鞋底外轮廓一圈,鞋底与磨头之间的接触力以及磨头弹簧力的时域仿真曲线,如图 7 所示,其中,在磨头偏角为 -20° 时,鞋底接触力最大;在磨头偏角为 20° 时,鞋底与磨头之间出现无接触力状态;在磨头的偏角范围为 $[0^\circ, 10^\circ]$ 时,弹性磨头的弹簧力和接触力之间具有较小的偏

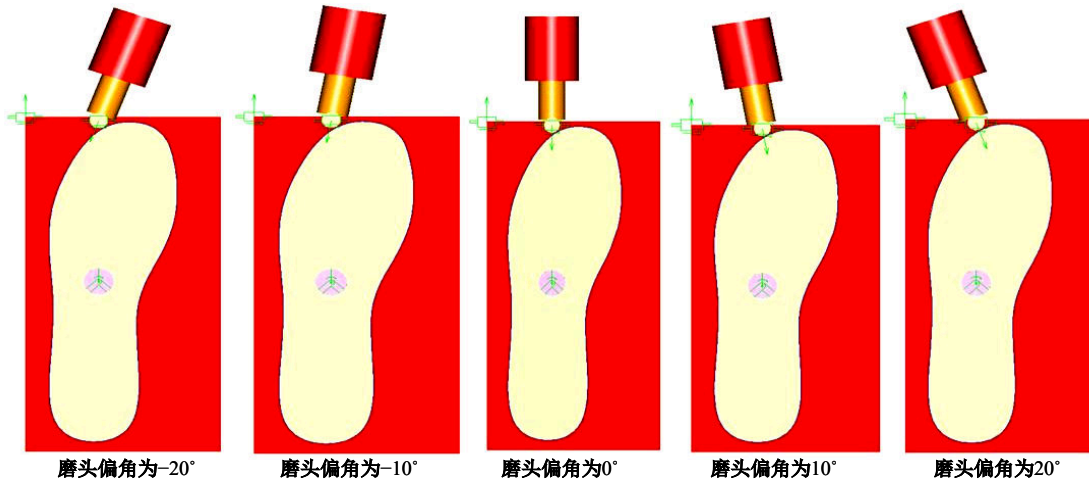


图 6 不同姿态打磨仿真

Fig. 6 Grinding simulation of different posture

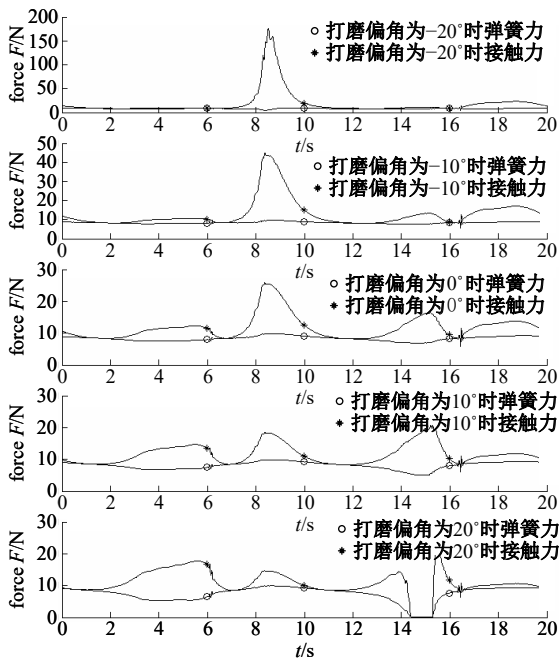


图 7 不同姿态下磨头接触力和弹簧力

Fig. 7 Contact force and spring force of grinding head in different attitudes

差。在磨头偏角 $[-20^{\circ}, 20^{\circ}]$ 范围内,鞋底接触力峰值出现的位置相同而峰值显著变化,说明磨头姿态与接触力之间存在相关性。

取磨头偏角 10° ,研究鞋底的极大接触力和极小接触力的姿态,如图 8 所示,可知,接触力最大值和最小值集中在鞋跟部位,其中,接触力的最大值出现在磨头进入鞋跟位置,最小值出现在磨头脱离鞋跟位置。

鞋底对磨头的接触力取决于磨头接触处鞋底轮廓对磨头的挤压作用。在极小接触力状态,鞋底对磨头不产生挤压作用,接触力最大为弹簧预

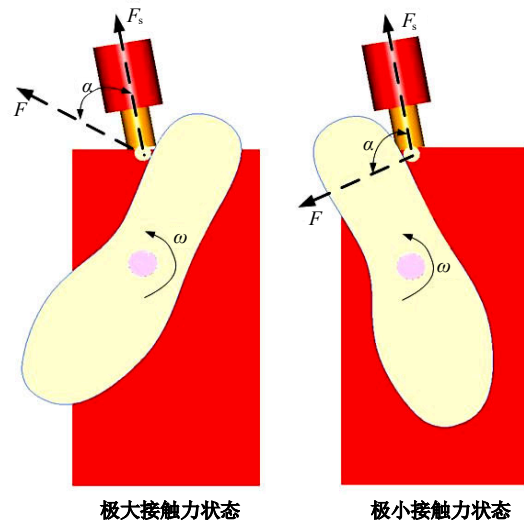


图 8 接触力峰值对应的鞋底与磨头姿态

Fig. 8 Posture of sole and grinding head corresponding to peak contact force

压力。在极大接触力状态且接触力在磨头轴线的分量可推动磨头运动时,鞋底轮廓接触点的法线与磨头轴线之间的夹角 α 满足关系式:

$$\alpha = a \cos(F_s/F) \quad (5)$$

式中: F_s 为弹性磨头的弹簧力; F 为鞋底与磨头的接触力。

这一夹角 α 随磨头轴线偏角减小而增加。当夹角 α 增大至接触力在磨头轴向方向的分量小于弹簧预压力时,磨头沿轴向压缩运动减弱至零,鞋底与磨头之间的接触力主要是垂直于磨头轴线方向的力分量。这一力分量增加了鞋底外轮廓挤压变形,增加了鞋底与磨头之间的摩擦力,从而降低了鞋底打磨纹路的一致性。因此,为了保证鞋底打磨纹路的一致性,磨头偏角范围应控制在 $[0^{\circ}$,

10°]。鞋跟处最大接触力为弹性打磨机构的动力学设计提供了依据。

3 试验验证

为验证弹性打磨原理,研制鞋底弹性打磨机构试验系统,如图9所示,

试验样机以 STM32F103 单片机为控制器,控制 x 和 RZ 两个轴作复合运动,其中, x 轴由伺服电机和滚珠丝杠组成的线性模组构成, RZ 轴由伺服电机和中空减速器组成的电动转台构成。

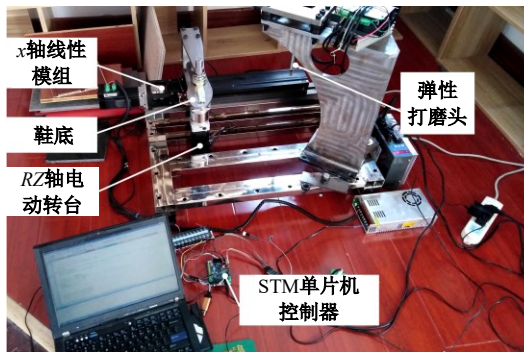


图9 两自由度弹性打磨机构试验系统

Fig. 9 Test system of two degree of freedom elastic grinding mechanism

x 轴和 RZ 轴伺服电机选择无刷直流伺服一体机,额定功率 188 W,额定转矩 0.6 N·m,额定转速 3000 rpm。 RZ 轴的减速机为 60 型中空减速机,速比为 10。驱动磨头转动的电机为无刷直流电机,功率 210 W,额定转速 3000 rpm,额定扭矩 0.7 N·m。

将鞋底打磨过程分为快进、工进和快退 3 个过程,其中,工进过程为多圈渐进方式,每打磨一圈鞋底沿 x 轴前进 0.5 mm。打磨一只鞋底一圈需 15 s,打磨 4 圈完成一个工作循环。鞋底打磨结果如图 10 所示,其中,鞋底轮廓分成内侧、外侧、鞋尖和鞋跟等 4 个部位进行打磨质量评价。

外侧、鞋尖、鞋跟和内侧的下半部部位具有连续的较长的打磨纹路,且在高度方向具有一致性,这说明在超过 3/4 的鞋底轮廓区域,鞋底平面运动轨迹精度满足鞋底绕磨头运动的作业要求,鞋底与磨头之间的接触力也达到了打磨纹路的质量要求。

内侧上半部的打磨纹路呈条带状,特别是在朝向脚尖方向的内侧,仅在距离轮廓边缘 5 mm 处存在纹路,说明鞋底内侧在高度方向存在一定的弧度,而垂直作业的磨头不能侧摆适应整个高

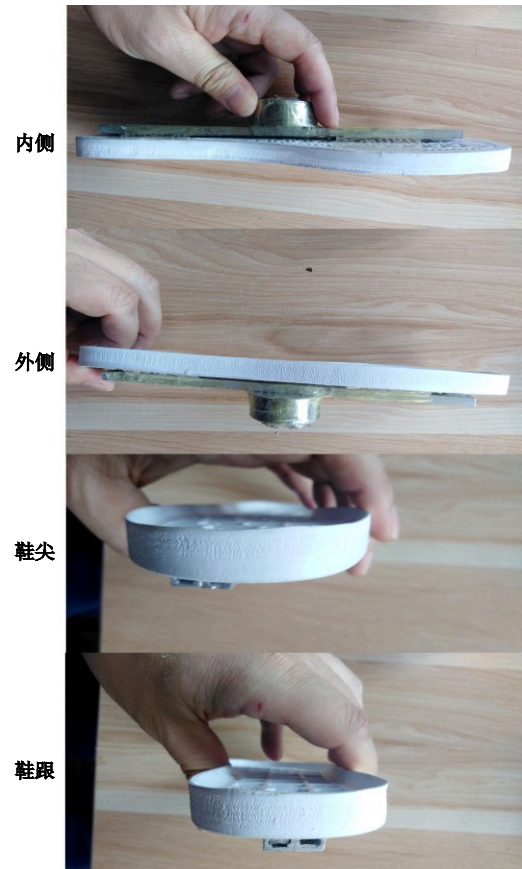


图10 鞋底打磨试验结果

Fig. 10 Results of sole grinding test

度,降低了打磨质量。

综上所述,现有弹性打磨机构在保证接触力的条件下可实现全部鞋底外轮廓的自动打磨,但这一机构难以适应鞋帮高度方向存在弧度的情况。为了解决这一问题,弹性磨头应增加绕 y 轴摆动自由度,这对打磨机构的设计提出进一步的要求。

4 结论

(1)针对鞋底轮廓跟踪难题,提出了鞋底弹性打磨方法,减少鞋底轮廓误差对打磨一致性的影响,相对于基于机器视觉的工业机器人方案,这一方法具有更高的性价比。

(2)开发了弹性打磨机构虚拟样机模型,通过不同磨头姿态下鞋底打磨仿真,获得了保证接触力一致性的最大打磨偏角,为弹性打磨机构优化设计提供参考。

(3)对型号为 BF1905-6B 的典型鞋底实施鞋底打磨试验,打磨后鞋底连续纹路超过普通运动鞋标准试件所要求的有效长度 80 mm,验证了多

圈渐进打磨方法的有效性,表明了弹性打磨机构具备可行性。

参考文献:

- [1] 李恒,沈辉,吕明明,等.全自动鞋底磨边机研制[J].机械制造与自动化,2013,42(3):175-177.
Li Heng, Shen Hui, Lyu Ming-ming, et al. Development of full-automatic sole edge grinding machine[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(3): 175-177.
- [2] Zhao L X, Zhang J, Gao L M. Path optimization for uniform removal pre-polishing of optical glass with industrial robots[J]. Optical Engineering, 2022, 61(4): 045104.
- [3] Zhang C, Tang Z, Li K L, et al. A polishing robot force control system based on time series data in industrial internet of things[J]. Acm Transactions on Internet Technology, 2021, 21(2): 1-22.
- [4] 赵扬,赵继,张雷,等.基于逆向工程的机器人磨削叶片[J].吉林大学学报:工学版,2009,39(5):1176-1180.
Zhao Yang, Zhao Ji, Zhang Lei, et al. Robotic blade grinding based on reverse engineering[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(5): 1176-1180.
- [5] 张立彬,周邦达,沈遥,等.基于工业机器人的鞋帮打磨系统设计[J].高技术通讯,2020,30(8):822-830.
Zhang Li-bin, Zhou Bang-da, Shen Yao, et al. Design of upper grinding system based on industrial robot[J]. High Technology Letters, 2020, 30(8): 822-830.
- [6] Kim M G, Kim J, Chung S Y, et al. Robot-based automation for upper and sole manufacturing in shoe production[J]. Machines, 2022, 10(4): 1004255.
- [7] HG T 2017—2011. 普通运动鞋[S].
- [8] Luh Y P, Huang L C, Lu H J, et al. A smart manufacturing solution for multi-axis dispenser motion planning in mixed production of shoe soles[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2020, 7: 769-779.
- [9] 武传宇,贺磊盈,李秦川,等.鞋底曲面数据提取与喷胶轨迹的自动生成方法[J].机械工程学报,2008,44(8):85-89.
Wu Chuan-yu, He Lei-ying, Li Qin-chuan, et al. Method for extraction of information of shoe upper and for automatic generation of spraying trajectory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 85-89.
- [10] Wang A G, Shen W P, Wu C Y. Research on a new extraction method of laser light stripes center based on soles information scanned[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2010, 27(2): 21-23.
- [11] 赵国如,任露泉,田丽梅,等.利用逆向制造系统集成技术开发仿生防粘鞋底[J].吉林大学学报:工学版,2005,35(6):87-91.
Zhao Guo-ru, Ren Lu-quan, Tian Li-mei, et al. Exploiting biomimetic anti-adhesive shoe soles using reverse manufacturing system integration technology[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2005, 35(6): 87-91.
- [12] 袁海兵.一种自适应鞋底打磨机构[P].中国专利:CN201821020354.2,2019-05-24.
- [13] Pedrocchi N, Villagrossi E, Cenati C, et al. Design of fuzzy logic controller of industrial robot for roughing the uppers of fashion shoes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77: 939-953.
- [14] MSC Corporation. ADAMS/Solver online help version [EB/OL]. [2022-10-13]. <https://help-be.hexagon-mi.com/bundle/Adams>