

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.01.004

砂抛柔性加工单元中砂带磨损补偿策略研究*

成楚楚^{1,2}, 傅高升^{1,2*}, 陈鸿玲¹, 宋莉莉^{1,2}, 雷浩浩²

(1. 宁德职业技术学院 机电工程系, 福建 宁德 355000;

2. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:针对工业机器人砂抛柔性加工单元中,砂带因磨损导致磨削效率降低,加工一致性降低等问题,以铜合金水龙头作为磨抛对象,对其磨抛过程中的砂带磨损补偿策略进行了分析与试验。提出了基于提高砂带速度的补偿策略及其机制,通过公式推导得出了应当提高的砂带速度公式,该策略克服了传统的线性提速补偿策略与砂带非线性磨损之间的矛盾;并通过试验验证了该补偿策略的可行性。研究表明:在传统线性提速方法下,当加工到第100个工件时,其工件磨削量为10.67 g;加工第101个工件时,采用非线性提速补偿策略将砂带速度从15.99 m/s提高到16.83 m/s后,第101个工件的磨削量提高到11.02 g,接近标准磨削量,表明该非线性提速补偿策略是可行的。

关键词:工业机器人;磨抛;砂带磨损;补偿策略

中图分类号:TH161;TG580.61+9.2;TP272

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)01-0018-05

Wear compensation strategy of sand belt in grinding flexible manufacturing unit

CHENG Chu-chu^{1,2}, FU Gao-sheng^{1,2}, CHENG Hong-ling¹, SONG Li-li^{1,2}, LEI Hao-hao²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Ningde Vocational and Technical College, Ningde 355000, China; 2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at the problem of the reduction of grinding quantity due to abrasive wear and maintaining consistency of grinding workpiece in flexible manufacturing unit of sand belt polishing by industrial robot, the wear compensation strategy of sand belt in the process of polishing was analyzed and tested, taking copper alloy tap workpiece as the grinding objects. The compensation strategy and mechanism based on improving the speed of sand belt were put forward, which overcame the contradiction between the traditional linearly-increasing-speed-based method and the nonlinear trend of belt wear. The acceleration velocity formula of sand belt was also derived. The results indicated that the grinding quantity of the 100th workpiece is 10.67 g, using the linearly-increasing-speed-based compensation method. The grinding quantity of the 101th workpiece increased to 11.02 g which is close to the standard grinding quantity, when the belt speed is nonlinearly increased from 15.99 m/s to 16.83 m/s, showing that the nonlinear acceleration compensation strategy is feasible.

Key words: industrial robot; grinding; belt wear; compensation strategy

收稿日期:2018-05-31

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA041006);福建省科技重大专项资助项目(2012HZ0006-2);福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT171133);宁德市科学技术计划项目(2017-137-21)

作者简介:成楚楚(1990-),女,山西太原人,硕士,讲师,主要从事工业机器人技术应用等方面的研究。E-mail:691932931qq.com

通信联系人:傅高升,男,博士,教授,博士生导师。E-mail:fugaosheng@fzu.edu.cn

0 引言

传统的水暖卫浴产品的抛光通常由手工完成,其加工过程包括:(1)低压铸造形成龙头毛坯;(2)通过砂带磨削轮完成粗加工;(3)通过布抛轮完成精加工。随着磨抛行业的不断发展,工作环境恶劣、生产效率低下、对工人经验要求高、加工一致性低等不足,使传统人工抛光已无法满足市场需求^[1]。

为了提高磨抛行业的自动化程度,本研究与福建长江工业公司合作研发了 CMP-60/4-A 型工业机器人自动磨抛中心,实现了复杂形状工件磨抛的自动化^[2]。

课题组研发的工业机器人砂抛柔性加工单元在实际应用中,随着磨削的进行,存在着砂带因磨损导致磨削效率降低,同样的磨抛路径下,工件磨削量减少,加工一致性降低等问题,因此需通过改变磨削参数来补偿工件磨削量。通过查阅文献及调研了解到,砂带磨损补偿可通过增大磨削力或提高砂带速度的方式进行。增大磨削力的方式基于一定的数学模型,通过算法插补补偿,或通过工具和工件位姿标定,离线编程加工路径,利用激光检测等先进技术实现高精度复杂曲面的加工。通过增加机器人力觉控制系统,在六维力传感器测量的基础上,运用刚度控制方法,实现了曲面跟踪试验,通过对机器人的力控制,达到补偿效果^[3]。这些补偿控制机理基于一定的先进设备及复杂算法,对仪器精度要求高,实现过程复杂,技术难度高,并不适用于水龙头工件的磨削加工环境^[4]。通过提高砂带速度来实现砂带磨损补偿,目前现有的提速方式为线性提速,由于砂带的磨损变化是非线性的,传统的线性提速补偿策略与砂带非线性磨损之间存在矛盾,故线性提速的补偿机制并不合理,应根据砂带的磨损规律研究非线性提速的补偿策略。

笔者前期已就砂带磨削参数对工件磨削量的影响规律进行了探讨^[5],但对砂带的磨损补偿策略还缺乏研究。

本文将进一步探究工业机器人砂抛柔性加工单元自动化生产中砂带的磨损补偿策略,为砂带管理系统的建立提供理论和试验依据。

1 补偿策略分析

磨削参数包含砂带的磨削线速度、工件运动速度、磨削深度^[6]。这些参数均会影响工件的磨削量,以下对基于不同磨削参数的工件磨削量补偿策略进行分析

讨论。

1.1 基于增加工件进给量的补偿策略

砂带磨削时工件进给深度和实际磨削深度有差别,通常把进给深度称为名义磨削深度,实际磨削深度称为有效磨削深度^[7]。进给深度越大,法向磨削力越大,切向磨削力也因此增大,接触长度增加,接触区域不同位置的砂粒均会受到磨削力的作用,参与磨削的磨粒增多,工件磨削量明显增加。由此可知,根据砂带的磨损量来增加进给深度,可以一定程度地补偿磨削量。当砂带磨损量增加,通过增加进给深度,从而增加切向、法向磨削力及砂带与工件的接触面积,以达到增大磨削量的目的,因此可通过修正磨抛路径增加工件进给量以补偿工件磨削量^[8],主要通过在线编程和离线编程实现修正磨抛路径^[9]。在线编程是通过操作示教控制器、人工引导或传感器引导等方式移动机器人^[10-11],使机器人末端执行器以所需的姿态到达指定位置,写入一条包含位置坐标、运动速度、机器人配置等相关运动信息的机器人运行程序。离线编程是以完整的机器人工作空间的 CAD 三维图型为基础,在计算机端完成磨抛轨迹规划、自动生成程序、程序运行模拟等过程^[12]。

工件磨削量的补偿需要利用传感器感测末端执行器工件的位置和姿态^[13],识别当前的砂带磨削状况,根据反馈结果修正磨抛路径,利用机器人的逆运动学计算出机器人各轴关节角。通过在线编程的方法来实现,需要一定的算法,目前在线编程磨抛路径的技术还不够成熟。此外,这种方法对测量环境的要求较高,震动、噪声对结果的精度影响大。夹持精度一方面受机械手臂夹持工件精度的影响,另一方面受工件本身的尺寸偏差的影响,这些误差都会最终累计到机械手臂的运动误差上。在工业生产的条件下,修正这样的误差存在较大的困难。增加工件进给量,也会增大机器人与砂带间的压力,对机器人设备的损伤较大,砂带的磨损加剧、寿命缩短。加之铸造工件形状的差异,工件的实际形状与数学模型相差较大,需要增加大量的传感器,对传感器的精度要求也很高,费用增加。在线编程时间长,占用自动化生产流水线的工作时间,在程序最终编完前不可进行生产,目前无论从硬件还是软件方面都不成熟,实现难度较大,不适用于水龙头这种大批量、低成本的工件工业化生产。

此外,由笔者的研究结果表明^[14]:通过增加工件进给量进行磨削量补偿的效果与增加砂带速度相比不明显,因此通过增加工件进给量的补偿策略并不合适。

1.2 基于提速的补偿策略

提速的补偿方式有两种,一是提高工件速度,二是提高砂带速度。提高工件速度与提高砂带速度的补偿机理相同,提高工件速度可以增大工件与砂带间的相对速度,起到补偿工件磨削量的作用。由笔者的前期研究表明,相比于砂带速度,工件速度的影响可以忽略不计,而且提高工件速度的实现方式复杂,需通过编程、修正磨削程序在线补偿工件磨削量,对编程技术人员的要求较高,对机器人的要求也相应提高,使得加工成本上升,不适合应用于工业生产。通过提高砂带速度进行工件磨削量补偿效果明显,而且方便简单,适用于工厂大批量生产。

目前,工厂设计的砂抛机大多通过提高转数,从而提高砂带速度,补偿因砂带磨损而造成的磨削量减少。本研究采用 PLC 记录调用对应砂抛机工作的次数,每加工一个工件,通过提高砂带速度来增加工件磨削量。这种控制方式简单实用,成本低廉,适合应用于工业生产。然而砂带的磨损趋势并非线性,故线性提速并不能完全达到补偿要求。

为了科学地设定非线性补偿量,需要进一步通过试验,探讨工业机器人砂抛柔性加工单元在磨削过程中砂带磨损的主要影响因素及其规律。

1.3 分析讨论

砂带的切除率即磨削效率 Z_w ,标准材料切除率即单位宽度砂带在单位时间内的材料切除量,其计算式为:

$$Z_w = \frac{1}{B} \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: Δm —磨抛前后的工件质量差; B —砂带宽度; Δt —磨削时间。

由于砂带宽度 B 和磨削时间 Δt 均为定值,磨削效率可以等效于通过磨抛前后的工件质量差 Δm 进行测量,则磨削量 Z 为:

$$Z = Z_w \Delta t = \frac{1}{B} \Delta m \quad (2)$$

砂带磨削加工过程比较复杂,砂带速度、砂带粒度、磨抛深度、工件速度等因素均会影响材料的去除率。国内外很多学者对砂带磨抛去除率进行了研究,发现工件材料的去除量和法向磨削压力 F_n (即法向磨削力)、工件与砂带之间的相对速度 (由于工件速度相较于砂带速度可以忽略不计,此处的相对速度为砂带速度) 有关,因此磨削量 Z 可表示如下^[15]:

$$Z = K_0 F_n V \quad (3)$$

式中: F_n —法向磨削力; V —砂带速度; K_0 —比例系数 (与砂带粒度、环境温度、磨抛液等因素有关)。

结合公式(2,3),可得:

$$\Delta m = BK_0 F_n V \quad (4)$$

令 $K = BK_0$,可得:

$$V = \frac{\Delta m}{KF_n} \quad (5)$$

式(5)反映了工件磨削量、法向磨削力及加工时间的数学关系式,为非线性提速补偿砂带磨损策略提供了重要的理论依据。

由测得的当前磨削量 Δm_1 可计算出当前的砂带比例系数 K_1 :

$$K_1 = \frac{\Delta m_1}{F_{n1} V_1} \quad (6)$$

式中: F_{n1} —当前砂带与工件间的法向磨削力值; V_1 —当前砂带速度。

为了补偿当前磨损砂带的工件磨削量,通过提高砂带速度使工件磨削量达到标准磨削量 Δm_0 ,此时的砂带速度及砂带与工件间的法向磨削力应满足下式:

$$K_1 F_{n2} V_2 = \Delta m_0 \quad (7)$$

即:

$$V_2 = \frac{\Delta m_0}{K_1 F_{n2}} = \frac{\Delta m_0 F_{n1}}{\Delta m_1 F_{n2}} V_1 \quad (8)$$

式中: V_2 —为了补偿工件磨削量到 Δm_0 ,砂带应当提到的速度; F_{n2} —砂带速度提到 V_2 时工件与砂带间的法向磨削力。

笔者的研究发现,砂带速度对切向、法向磨削力的影响可忽略,砂带应提高的速度可按下式确定:

$$V_2 = \frac{\Delta m_0}{\Delta m_1} V_1 \quad (9)$$

2 工件磨削量影响试验条件及结果

2.1 试验条件

工件:铜合金水龙头,尺寸为 175 mm × 70 mm × 40 mm,材料为铸造铜合金 (牌号:ZCuSn₃Zn₁₁Pb₄)。砂带材料:韩国 DEERFOS 鹿牌 80#砂带,型号为 JC122,砂带周长为 4 m,宽度为 90 mm。磨抛条件:ABB 机器人 IRB 4400-60/1.9 和试验用砂抛机,如图 1 所示。

2.2 试验结果

为确定稳定期的砂带完成工件磨削测试路径的工件磨削量,本研究在砂带型号为 80#,砂带速度为 15 m/s,工件进给量为 0.2 mm 的磨削条件下,测量工件的磨削深度与工件磨削量的值,重复 20 次试验求其平均值,试验结果如图 2 所示。



图1 试验现场

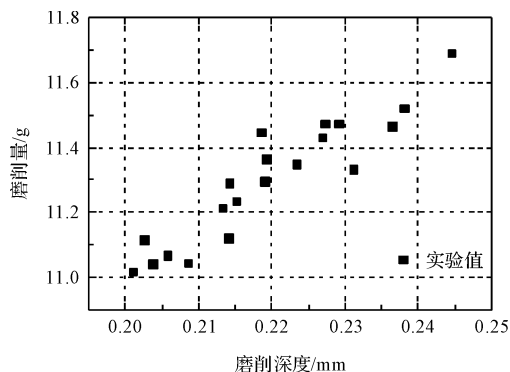


图2 磨削深度与工件磨削量散点图

对图2中的试验点求平均值可知:稳定期砂带的平均磨削深度为0.22 mm,平均磨削量为11.3 g。此时的工件磨削量符合加工余量要求,以该结果作为标准磨削量($\Delta m_0 = 11.3$ g),该可由式(9)得出砂带应提高的速度公式:

$$V_2 = \frac{\Delta m_0}{\Delta m_1} V_1 = \frac{11.3}{\Delta m_1} V_1 \quad (10)$$

为了探讨加工次数增加对工件磨削量的影响规律,本研究设定在工件速度为60 mm/s、砂带初始速度为15 m/s(每加工一个工件线性提速0.01 m/s),工件进给量为0.2 mm的条件下,记录工件磨削量随加工次数的变化值,结果如图3所示。

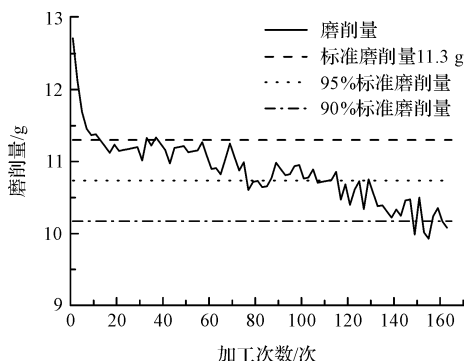


图3 工件的磨削量随加工时间的变化曲线图

从图3曲线可以看出:加工前20个工件时,工件磨削量变化剧烈,下降迅速,此时砂带加工出的工件差

异大,不符合工艺要求;经过快速下降期后(约加工20次后)磨削量的变化趋于平缓,稳定下降,进入砂带的稳定期,工件磨削量接近标准磨削量。这是由于在砂带磨削初期,砂带刃型锋利,虽然切削磨粒数多,但磨粒因破碎而磨损较快。此时磨粒磨损的总量不大,因此该阶段的切削力最强,磨削量最高;进入稳定期后主要以磨耗磨损为主,经过初期的磨粒破碎,锋利性降低,切削力相对减弱,磨削量也减少,变化相对平缓。为了保证加工磨削量的一致性,一般是通过2条新砂带互磨,将较锋利的磨粒先打掉,等砂带进入稳定期时,再开始正式加工,故本文不考虑快速磨损期的补偿。

图3中分别标注了标准磨削量、95%标准磨削量、90%标准磨削量的位置。加工至100个工件时,磨削量下降快速,开始逐渐低于95%标准磨削量,此时需要进行一次非线性提高砂带速度的补偿策略,减少累计误差,保证加工件的一致性。

由于铸件形状、尺寸的差异,飞边大小各不相同,加工间隔较小时,此时的砂带磨损并不明显,后加工的工件磨削量可能高于先加工的磨削量,无法准确识别砂带的磨削状态。采用实时识别磨削参数,并通过提高砂带速度进行磨削量补偿的方法,会造成识别和补偿系统的混乱,不能及时地根据此时砂带的磨削状态进行调整。

因此,磨削量补偿不适合实时补偿的方式,而应选择周期补偿,根据工件的磨削量随加工时间的变化曲线来确定补偿周期。

3 工件磨削量补偿效果验证

为了验证理论推导得出的砂带应提高速度公式的可行性,现通过试验验证其补偿效果。

初始速度为15 m/s,前100个工件通过传统线性提速(每加工1个工件提速0.01 m/s)的方法补偿。工件磨削量随时间的变化曲线如图4所示。

由图4可知:第100个工件完成测试路径时的磨削量为10.67 g,此时砂带速度为 $(15 + 0.01 \times 99) = 15.99$ m/s,通过采用非线性提高砂带速度的补偿策略,提高后的砂带速度计算式为:

$$V_2 = \frac{\Delta m_0}{\Delta m_1} V_1 = \frac{11.3}{10.67} \times 15.99 = 16.83 \text{ m/s} \quad (11)$$

将砂带速度从15.99 m/s提高到16.83 m/s后,继续测量随加工次数变化磨削量的变化曲线,结果如图5所示。

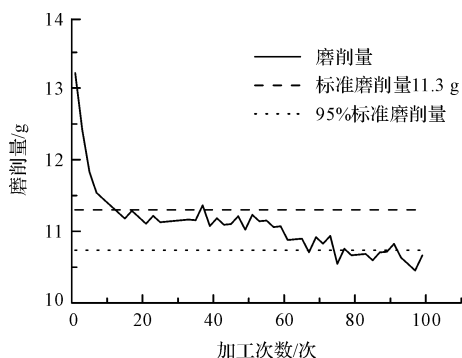


图 4 传统线性提速补偿方法下工件磨削量的变化曲线图

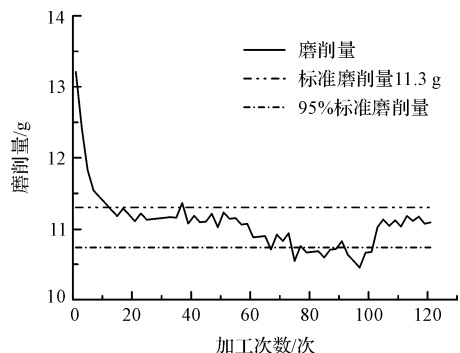


图 5 非线性提速补偿机制下磨削量的变化曲线

由图 5 中可知:在加工第 100 个工件后,通过非线性补偿策略提高砂带速度后,工件磨削量由 10.67 g 提高到 11.02 g,接近标准磨削量 11.3 g,说明非线性提速补偿策略是可行的。

4 结束语

针对在工业机器人砂抛柔性加工单元中,砂带因磨损导致磨削效率降低等问题,本文对其磨抛过程中的砂带磨损补偿策略进行了分析与试验。

分析与试验结果表明:采用提高砂带速度来补偿工件磨削量的非线性提速补偿策略为最佳方案;该非线性提速补偿策略是可行的。

参考文献 (References):

[1] 刘 克. 工业机器人自动磨抛系统[J]. 福建农机, 2010, (4): 39-41.

- [2] 林少丹,傅高升. 基于工业机器人的自动磨抛系统柔性加工系统设计[J]. 成都信息工程学院学报, 2012, 27(5): 462-465.
- [3] PAN Z, ZHANG H. Robotic machining from programming to process control: a complete solution by force control [C]. World Congress on Intelligent Control and Automation. New York: IEEE, 2008: 400-409.
- [4] 陈天炎,傅高升. 工业机器人磨抛柔性加工系统研究[J]. 闽江学院学报, 2014, (5): 22-27.
- [5] 成楚楚,傅高升,陈鸿玲,等. 砂带磨削参数对工业机器人砂抛工件磨削量的影响试验[J]. 制造业自动化, 2017, 39(11): 4-10.
- [6] 李向东. 金刚石砂轮磨削参数对陶瓷加工表面粗糙度影响的研究[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2004.
- [7] 黄 云,黄 智. 现代砂带磨削技术及工程应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009.
- [8] 林少丹. 工业机器人自动磨抛系统的离线仿真研究[J]. 长江大学学报: 自科版, 2014, 11(22): 71-74.
- [9] CHONG J W S, ONG S K, NEE A Y C, et al. Robot programming using augmented reality: An interactive method for planning collision-free paths [J]. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, 2008, 25(3): 689-701.
- [10] MASSA D, CALLEGARI M, CRISTALLI C. Manual guidance for industrial robot programming [J]. **Industrial Robot**, 2015, 42(5): 457-465.
- [11] 马宇箭,唐小琦,卢少武. 砂带磨削系统摩擦力补偿控制技术[J]. 润滑与密封, 2010(7): 68-70.
- [12] 林少丹,傅高升,李俊达. 磨抛离线编程中修正砂带位姿及加工姿态[J]. 武汉工程大学学报, 2015, 3(9): 50-56.
- [13] LIN Y, CHEN T, FU G, et al. Relative pose estimation from points by Kalman filters [C]. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, New York: IEEE, 2016.
- [14] 成楚楚. 工业机器人砂抛柔性加工单元磨削参数识别及其补偿策略[D]. 福州: 福州大学机械设计及自动化学院, 2016.
- [15] SONG Y, LIANG W, YANG Y. A method for grinding removal control of a robot belt grinding system [J]. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2012, 23(5): 1903-1913.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

成楚楚,傅高升,陈鸿玲,等. 砂抛柔性加工单元中砂带磨损补偿策略研究[J]. 机电工程, 2019, 36(1): 18-22.

CHENG Chu-chu, FU Gao-sheng, CHENG Hong-ling, et al. Wear compensation strategy of sand belt in grinding flexible manufacturing unit[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(1): 18-22.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>