

轮毂毛刺机器人打磨刀路规划与工具姿态优化

郭万金^{1,2,3,4*} 孙浩¹ 利乾辉¹ 田玉祥¹ 曹维清² 赵立军^{2,4}

1.长安大学道路施工技术装备教育部重点实验室,西安,710064

2.长三角哈特机器人产业技术研究院,芜湖,241007

3.埃夫特智能机器人股份有限公司,芜湖,241060

4.哈尔滨工业大学机电工程学院,哈尔滨,150006

摘要:为解决机器人在打磨去除轮毂窗口边缘毛刺时存在刀位点稀疏或冗余与分布不均、作业工具姿态获取困难和变化剧烈等问题,提出一种含有刀位点规划和工具姿态获取与优化的轮毂窗口毛刺机器人打磨路径规划方法。采用 NURBS 曲线形态特征参数描述轮毂窗口边缘曲线,开展轮毂窗口边缘机器人刀位点规划;提出一种考虑轮毂点云和窗口表面特征的轮毂窗口内侧面法向量获取方法,并建立刀位点处局部坐标系,描述机器人工具姿态;建立机器人末端工具姿态优化模型并优化求解,获得连续平滑的轮毂窗口机器人末端工具姿态;开展轮毂窗口边缘毛刺机器人打磨实验,验证所提轮毂窗口毛刺机器人打磨路径规划方法的有效性。结果表明,在轮毂窗口毛刺打磨去除过程中,机器人关节角曲线较平滑,机器人可以精准到达所规划的刀位点且其末端工具较好地接触窗口边缘并保持适宜的加工姿态;经毛刺打磨后的不同轮毂窗口边缘倒角最大不超过 1.50 mm,多处不同位置倒角测量的最大平均值为 0.64 mm,均在工艺规范规定范围内。

关键词:机器人打磨;刀路规划;刀位点规划;工具姿态优化;轮毂窗口

中图分类号: TP242.2

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Tool Path Planning and Tool Orientation Optimization for Robotic Grinding of Wheel Hub Burrs

GUO Wanjin^{1,2,3,4*} SUN Hao¹ LI Qianhui¹ TIAN Yuxiang¹ CAO Chuqing² ZHAO Lijun^{2,4}

1.Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, 710064

2.Yangtze River Delta HIT Robot Technology Research Institute, Wuhu, Anhui, 241007

3.EFORT Intelligent Robot, Co., Ltd., Wuhu, Anhui, 241060

4.School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150006

Abstract: In order to solve the problems of sparse or redundant and uneven distribution of cutter location points, and the difficulty in acquiring the operational tool orientation and drastic changes when the robot was grinding and removing wheel window edge burrs, a robot grinding path planning method with cutter location point planning and tool orientation acquisition and optimization for wheel window burrs were proposed. The wheel window edge curve was described by using NURBS curve morphology feature parameters and robotic cutter location point planning was conducted for the wheel window edge a method for acquiring the normal vector of the inner face of the wheel window was proposed considering the wheel point cloud and window surface features, and a local coordinate system at the tool position points was established to describe the robot tool orientation. A robot end tool orientation optimization model was established and optimally solved to obtain a continuous smooth robot end tool orientation for the wheel window. Wheel window edge burr robot grinding experiments were conducted to verify the effectiveness of the proposed robot grinding path planning method for wheel window burrs. The results show that the robot joint angle curve is relatively smooth in the wheel window burr grinding and removing processes, and the robot may accurately reach the planned cutter location

收稿日期:2024-06-03

基金项目:国家自然科学基金(52275005);陕西省自然科学基金基础研究计划(2025JC-QYXQ-027, 2025-YBMS-619);中央高校本科业务费专项资金(300102253201);中国博士后科学基金(2024M760002);安徽省博士后科研项目(2023B675);芜湖市重点研发与成果转化项目(2023yf044)

points and the end tool contacts window edges well and maintains the appropriate operational orientation. The maximum chamfer of different wheel window edges after burrs grinding remains below 1.50 mm, and the maximum average value of chamfer measurements at different positions is as 0.64 mm, which is within the specified range of the processing specification.

Key words: robotic grinding; tool path planning; cutter location points planning; tool orientation optimization; wheel hub window

0 引言

汽车轮毂由于铸造和机加工过程中材料未完全剪切等原因,不可避免地在其表面和边缘产生微小尖锐的毛刺。毛刺的存在会影响轮毂的整体美观性,可能直接损伤轮胎,影响汽车高速行驶时的稳定性^[1]。通常人工去毛刺方法存在作业质量不均匀、生产效率低和工作环境恶劣等缺点,且容易导致安全隐患。当前,工业机器人技术逐渐成熟且应用广泛^[2],发展机器人打磨去除轮毂毛刺是实现高效打磨作业的有效途径^[3]。

近年来,国内外学者在毛刺去除方面开展了诸多研究,促进了机器人打磨去除毛刺技术的发展。ÖZEL等^[4]设计了一个机器人去毛刺系统用于清除铸造杆件毛刺并通过深度学习方法检测毛刺形态和大小。FALANDYS等^[5]搭建了一个机器人去毛刺实验台并通过实验确定了去除低压涡轮叶片毛刺的工艺参数。ONSTEIN等^[6]提出一种用于铸件去毛刺的机器人自动刀具轨迹规划系统,并通过不同的铸件模型验证了轨迹生成算法。LAI等^[7]提出了一种基于视觉辅助的自动去毛刺方法和离线编程系统,并在视觉数据有限情况下生成了机器人去毛刺路径。SHIH等^[8]提出了一个具有自动位置补偿和缺陷检测功能的机器人去毛刺系统,自动生成机器人去毛刺路径并通过缺陷位置检测生成新的清除路径,确保去除所有残余毛刺。TAO等^[9]提出了一种针对去毛刺工业机器人的自适应模糊PID控制方法,在线控制机器人末端执行器的轨迹和关节角参数。KUSS等^[10]提出了一种基于工件尺寸公差自适应机器人去毛刺方法,通过迭代最近点技术比较模型点云与实测点云并选出形状最接近的模型指导去毛刺。BHUTE等^[11]提出了一种图像处理算法用于识别二维与三维工件的毛刺位置和估计尺寸,并利用生成的毛刺数据规划机器人去毛刺轨迹。GUO等^[12]提出了一种机器人去毛刺工具路径规划方法,用于机器人去毛刺工具位置和方向规划以及机器人分层去毛刺规划。

合适的机器人末端工具打磨姿态有助于避免工具与工件之间的异常碰撞或接触,减少对机器人或工件的潜在损害。LI等^[13]建立了一种抛光

过程中接触力与机器人位姿之间的模型,实时获取当前刀具与工件接触状态与法向期望接触状态的姿态偏差并进行调整。LIAO等^[14]提出了一种考虑机器人旋转变形的刚度指数,并建立了优化模型以优化机器人工具姿态。ZHAO等^[15]建立了一种具有约束边界解的复合约束模型,将人工势位规划模型应用于机器人末端执行器姿态调整。

上述机器人打磨去除毛刺方法在机器人去毛刺系统或方案设计和工艺参数优化等方面取得了显著成果^[4]。部分理论研究在机器人及其末端工具打磨去除毛刺过程中的运动规划策略^[12]、机器人末端执行器姿态调节与优化^[13-15]等方面也提供了有效的实现方案与途径。然而,对于去除汽车轮毂窗口边缘毛刺这样的特定任务,因汽车轮毂窗口的形状各异、窗口边缘呈现局部曲率变化较大的封闭三维曲线特征,使得轮毂窗口边缘去毛刺过程复杂性增加,当前关于机器人刀路规划和工具姿态优化的相关研究还不够充分,无法满足当前行业内对机器人打磨轮毂窗口边缘毛刺的刀具路径规划与姿态优化研究的迫切需求。

针对上述不足与局限,本文提出一种含有刀位点规划、工具姿态获取与优化的机器人打磨路径规划方法。通过轮毂窗口边缘曲线形态特征规划机器人打磨刀位点,定义并获取机器人末端工具初始姿态;建立工具姿态优化模型并进行优化求解,解决毛刺打磨去除过程中机器人刀位点稀疏/冗余和分布不均匀影响加工效率与精度的问题,以及轮毂窗口机器人末端工具姿态不适宜对加工质量造成影响的问题,提高机器人毛刺打磨去除效率与质量;最后通过轮毂窗口边缘毛刺机器人打磨实验验证所提出方法的有效性。

1 轮毂窗口边缘毛刺机器人打磨刀路规划

机器人加工路径一般由一系列离散的路径点位置与对应的机器人及其末端工具姿态两部分组成,因此,研究机器人打磨去除毛刺路径规划任务被分为机器人刀路规划和机器人工具姿态规划,前者包括机器人刀具路径生成与刀位点规划。

1.1 轮毂窗口边缘曲线路径生成

轮毂及待去毛刺窗口边缘曲线如图 1 所示。

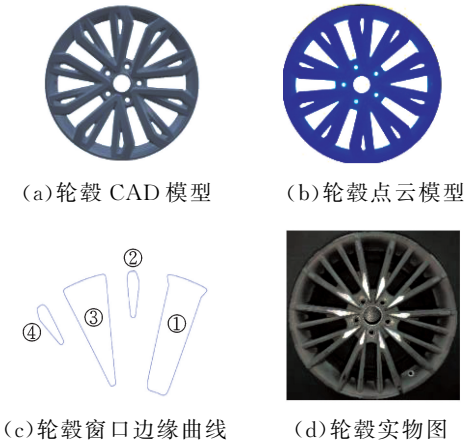


图 1 轮毂及窗口边缘曲线

Fig.1 Wheel hub and window edge curve

在研究轮毂窗口边缘毛刺打磨去除任务中,机器人末端打磨工具将与轮毂窗口边缘接触并沿该边缘曲线移动进行毛刺打磨去除。于是,轮毂窗口边缘曲线即为机器人刀路。轮毂窗口边缘是典型的三维复杂连续封闭曲线,其复杂形态对机器人刀路规划和姿态调整具有一定的挑战,传统的二维路径规划方法通常无法满足规划要求,因此,采用具有高灵活性和自由度的 NURBS 曲线来描述该边缘曲线,其表达式为^[2]

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,k}(u)w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,k}(u)w_i} \quad a \leq u \leq b \quad (1)$$

其中, P_i 为控制顶点, w_i 为对应权因子且首末权因子大于 0。 $N_{i,k}$ 为由节点矢量 U 计算确定的 k 次规范 B 样条基函数共计 $m+1$ 个节点, $U = (a, \underbrace{\dots, a}_{k+1}, u_{k+1}, u_{k+2}, \dots, u_{m-k-1}, \underbrace{\dots, b}_{k+1})$ 。通常假定 $a=0, b=1, k$ 为样条阶数(亦代表曲线次数), $u_{k+1}, u_{k+2}, \dots, u_{m-k-1}$ 为 a, b 之间共计 $m-2k-1$ 个均匀分布的节点参数。

通过曲线离散过程获取的轮毂窗口曲线上的等距离散点在 NURBS 曲线拟合过程中被称为型值点。要构建一条通过所有给定型值点的 NURBS 曲线,需要确保曲线端点与对应型值点对齐,并为每个型值点分配合适的参数值即节点矢量。考虑到轮毂窗口曲线的复杂程度,采用积累弦长参数化法反映各型值点的分布情况和实际距离,保证曲线参数化均匀,改善曲线的平滑程度和精度。

在机器人打磨和抛光等作业中常用曲面或曲线的曲率、切矢量、弦长和弦高误差等作为机器人

路径规划的依据^[16]。根据窗口边缘 NURBS 曲线的形状特征,通过曲率和弦长近似计算节点矢量 U 处的弦高误差 δ 为

$$\delta = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2} \quad (2)$$

式中: l 为弦长; R 为曲线在节点矢量 U 处的平均曲率半径。

弦高误差示意图见图 2,用于描述路径曲线与相邻点连线之间的偏差,是表示工件加工精度的重要参数。

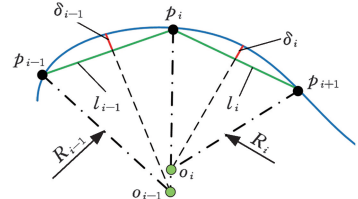


图 2 弦高误差示意图

Fig.2 Schematic diagram of chord height error

通过上述 NURBS 曲线微分和参数计算过程已间接得到轮毂窗口边缘曲线的形状特征和初始刀位点在曲线上的部分信息,这将作为规划刀位点的依据。为对具有类似性质的刀位点进行统一处理,提高规划效率,引入 K-均值聚类算法(K-means),用于将数据集中的样本分成若干个簇,其目标是最小化每个点到簇中心的距离;再利用肘部法通过误差平方和(SSE)的变化即下降幅度来确定最佳解。K-均值聚类算法一般表达式为

$$\arg \min_c J(C) = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in S_i} \|x - c_i\|_2^2 \quad (3)$$

式中: J 为评估指标,在式中为数据与中心点之间距离的累加和; K 为聚类个数; S_i 为第 i 个簇; x 为数据点; c_i 为第 i 个簇的中心点。

1.2 机器人打磨刀位点规划

机器人刀位点是指在机器人刀具路径(即轮毂窗口边缘曲线)上选择一系列离散的点,作为机器人进行毛刺打磨去除的目标点。刀位点的选择和疏密直接影响加工效果和质量。考虑轮毂窗口边缘曲线的特征和毛刺打磨去除要求,提出一种机器人刀位点规划方法,采用 NURBS 曲线形态特征参数描述轮毂窗口边缘曲线,解决刀位点数量稀疏或冗余与分布不均的问题,实现对轮毂窗口边缘毛刺打磨机器人刀位点的精确规划。所提机器人刀位点规划方法流程如图 3 所示,具体过程如下。

1) 获取轮毂窗口边缘曲线等距离散点作为初始刀位点,并进行 NURBS 曲线拟合。

2) 对拟合 NURBS 曲线微分,求取初始刀位

点对应的曲率、弦长与弦高误差,并设置弦长阈值和弦高误差阈值。

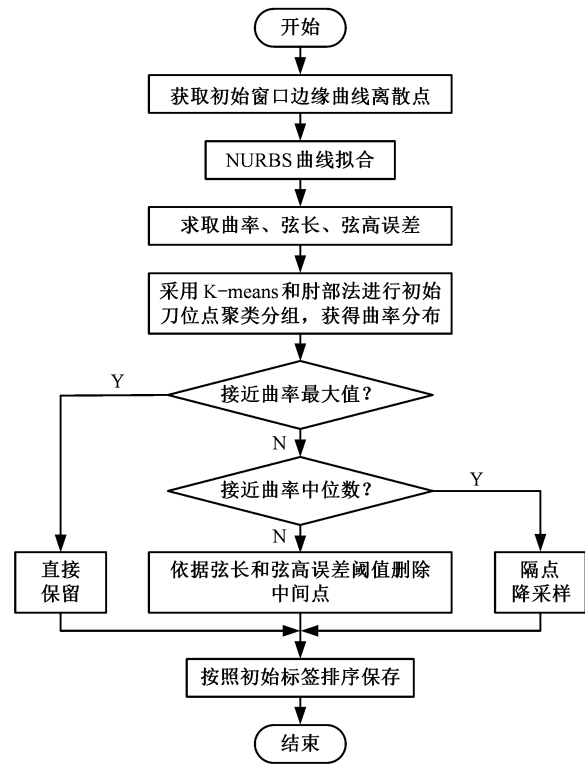


图3 所提机器人刀位点规划方法流程图

Fig.3 Flow chart of proposed robot cutter location points planning method

3) 采用 K-means 算法和肘部法对初始刀位点进行聚类分组,并获得各组曲率分布信息;根据各组曲率分布信息和加工需求,分别设置接近最大曲率和接近中位数曲率与较小曲率的判断条件。

4) 根据步骤 3) 中设置的曲率判断条件,分情况处理:① 保留接近最大曲率的刀位点;② 对于接近中位数曲率的刀位点,按照曲率由大到小排序并进行隔点降采样;③ 将较小曲率的刀位点分为一组,并按原始点位标签由小到大排序,通过设置的弦长阈值和弦高误差阈值进行判断,以该组内第一点为起始点,其最后一刀位点作为判断点,计算起始点与判断点的弦长与弦高误差,如果均小于对应所设阈值则删除此判断点,继续将其最后一刀位点作为判断点,任意两者之一大于其设定阈值则保留该判断点,并从该点继续开始进行后续点判断,直到该范围内刀位点集全部判断结束。

5) 将规划后刀位点按照初始标签重新排序,生成最终的机器人刀位点序列。

2 机器人工具姿态获取与优化

2.1 轮毂窗口内侧面法向量获取

打磨机器人末端工具姿态通常根据工件表面

的特征确定^[17]。在汽车轮毂窗口边缘毛刺打磨去除过程中,机器人末端工具将以一定姿态沿窗口边缘曲线移动,工具姿态需要根据三维空间边缘曲线形态调整。同时,为了提高加工质量和避免干涉等,工具通常也要与窗口内侧面呈一定角度^[18]。一般将窗口内侧面的法向量作为参考向量。

轮毂窗口内侧面是由一系列平面和曲面构成的较为复杂的表面。对于处在不同位置的刀位点处法向量的获取,通过该点处的局部表面特征来采取不同的表面拟合方法。本文提出一种考虑轮毂点云和窗口表面特征的轮毂窗口内侧面法向量获取方法,准确获取不同位置刀位点处的法向量,作为参考向量用于后续描述机器人末端工具作业姿态。所提轮毂窗口内侧面法向量获取方法的具体流程如下。

1) 获取轮毂点云模型并对其进行体素滤波,然后保存规划后的刀位点及其曲率和切矢量。

2) 对所有刀位点进行点云半径搜索得到窗口曲线两侧面的点云,然后采用 K 最近邻搜索(K-nearest neighbors search, KNNSearch) 算法进行点云特征查询并通过 K-means 聚类方法将该部分点云聚类分为两组。

3) 设置曲率阈值筛选关键点,将曲率大于阈值的刀位点作为关键点,其他为非关键点。采用 NURBS 曲面拟合方法和随机抽样一致(random sample consensus, RANSAC) 算法,分别对关键点和非关键点局部范围内的两组点云进行表面拟合并求出刀位点处两侧表面法向量。

4) 对于步骤 3) 中求取的两组点云拟合的表面模型及其法向量,判断法向量方向一致性并分组保存。选择前一刀位点的其中一个法向量为参考向量,并计算它与后一刀位点两个表面法向量的两个夹角,由于拟合表面计算出的法向量方向是随机的,因此将所有计算出的夹角转换,具体为将计算出的夹角取绝对值并减掉 $\pi/2$ 后再次取绝对值。由窗口内侧面特征可知,数值较大表明两法向量方向接近,其对应的法向量与该参考向量分为一组,另一法向量则分到另一组。

5) 对于步骤 4) 中获取的两组法向量,计算该窗口边缘所有刀位点的重心位置和该重心点位置处局部坐标系的 Z 轴方向,计算该 Z 轴方向矢量与两组法向量的夹角,并取其绝对值的平均值。由轮毂窗口边缘曲线两侧面位置特征可知,计算结果较大者对应的法向量即为轮毂窗口内侧面法向量。

6) 对步骤 5) 中筛选出的法向量进行方向调

整,计算每个刀位点到刀位点重心位置的向量,然后计算法向量与该向量的点积,如果该值小于 0 或者其绝对值小于阈值则表明该法向量方向指向窗口内侧,需将其方向进行反向处理,确保

所有法向量指向轮毂窗口内侧。

7) 对窗口曲线上所有刀位点进行以上步骤 2) ~ 步骤 6),直至完成所有刀位点处法向量的获取。所提法向量获取方法的流程图见图 4。

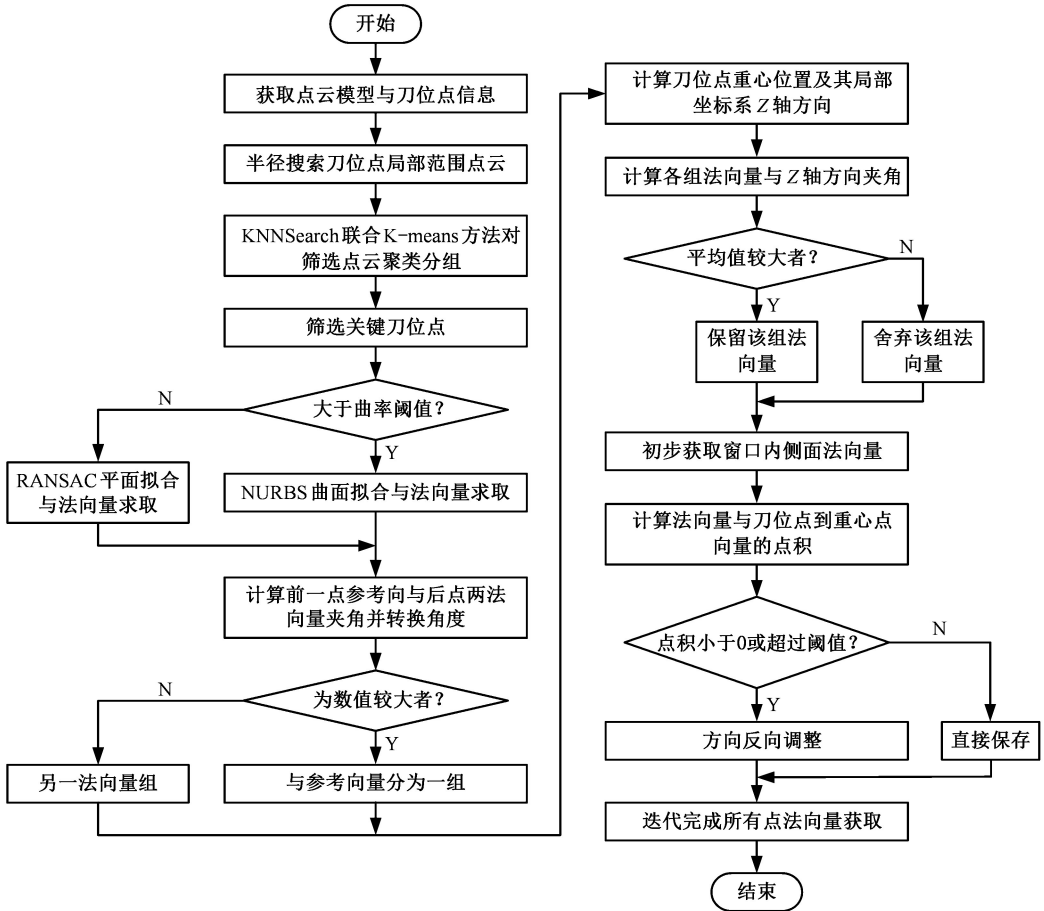


图 4 所提法向量获取方法流程图

Fig.4 Flow chart of the proposed vector acquisition method

2.2 工具姿态定义与获取

根据轮毂去毛刺工艺规范^[19],机器人在进行毛刺打磨去除时,其末端工具姿态一般与轮毂加工表面和工具前进方向均保持一定夹角来提高加工质量。为方便描述所研究的机器人工具姿态,建立刀位点局部坐标系,并采用工具刀轴矢量的旋转方式来定义工具姿态。

机器人打磨工具在某一刀位点处的姿态如图 5 所示。图 5 中, θ_A 表示工具刀轴矢量与刀位点处法向量方向的夹角, θ_B 表示该刀轴矢量与刀位点处切矢量方向的夹角,通过这两个夹角定义工具姿态。

将已获得的刀位点处的法向量和切矢量分别作为 X 轴和 Y 轴构建轮毂工件刀位点处局部坐标系,并将其 Z 轴作为工具刀轴矢量的初始方向,然后使其先绕 Y 轴(法向量方向,即远离窗口内侧方向)旋转角度 θ_A ,而后绕 X 轴(切矢量方向,即工具前进方向)旋转角度 θ_B ,完成工具姿态的

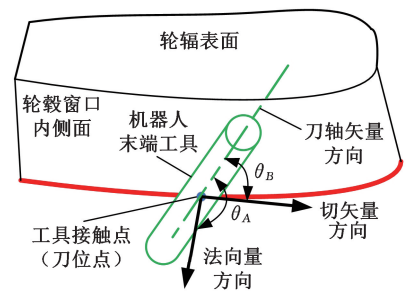


图 5 机器人工具刀位点处姿态示意图

Fig.5 Orientation diagram of robotic tool cutter location points

表示,其示意图见图 6。图中 O 为坐标系原点即刀位点,黑色坐标系为构建的局部坐标系,绿色坐标系为旋转后的坐标系。 Z_{rot} 表示旋转后坐标系的 Z 轴方向,同时仍表示工具刀轴矢量方向,即工具姿态。

构建轮毂窗口边缘刀位点处局部坐标系的具体步骤如下。

1) 轮毂窗口边缘曲线刀位点处的切矢量 T

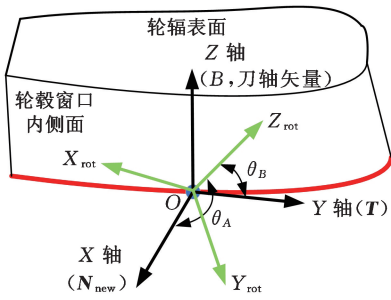


图6 轮毂窗口边缘刀位点处局部坐标系示意图

Fig.6 Schematic diagram of local coordinate system at cutter location points on edge of wheel hub window

和法向量 N 两者叉乘得到向量 B , 即

$$B = T \times N \quad (4)$$

2) 为了校正可能由于计算误差或原始向量非正交产生的偏差, 通过向量 B 和 T 叉乘得到修正后的法向量 N_{new} , 确保 T 、 N_{new} 和 B 三个向量相互正交, 即

$$N_{\text{new}} = B \times T \quad (5)$$

3) 构建刀位点处局部坐标系, 将新的参考法向量 N_{new} 作为局部坐标系 X 轴, 原切矢量 T 作为局部坐标系 Y 轴, B 作为局部坐标系 Z 轴, 并将三个相互正交的单位向量 N_{new} 、 T 和 B 构成一个正交变换矩阵 R_{loc} , 即

$$R_{\text{loc}} = [N_{\text{new}} \quad T \quad B] \quad (6)$$

矩阵 R_{loc} 可将一个点从原始坐标系映射到由 N_{new} 、 T 、 B 定义的局部坐标系中。

根据前述对工具姿态的定义, 由正交变换矩阵 R_{loc} 和 θ_A 与 θ_B 即可表示机器人工具姿态, 进一步可计算局部旋转矩阵, 使得定义在局部坐标系下的两个工具姿态角度 θ_A 和 θ_B 可以统一表示在机器人基础坐标系中。

2.3 工具姿态优化模型建立

适宜的机器人末端工具姿态可有效提高毛刺去除作业的准确性与加工质量, 尤其针对机器人在较小三维空间内作业工况。为提高去毛刺质量, 保证被加工工件轮毂窗口边缘光滑无毛刺, 减少工具磨损及降低成本, 提高机器人末端工具操作的灵活性, 开展机器人末端工具姿态优化研究, 保证末端工具动作平稳, 实现姿态变化连续、平滑, 并且在轮毂窗口狭小三维空间复杂边缘曲线路径上没有明显突变。

为实现机器人去毛刺工具姿态优化, 根据前述定义的机器人工具姿态和局部坐标系, 定义待优化的工具姿态 φ_{tool} 为

$$\varphi_{\text{tool}} = (\theta_A, \theta_B) \quad (7)$$

以机器人末端工具姿态角度变化幅度来描述工具姿态变化的平滑性, 机器人末端工具姿态角

度变化 $\Delta\theta$ 表示为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_{A_i} &= \theta_{A_i} - \theta_{A_{i-1}} \\ \Delta\theta_{B_i} &= \theta_{B_i} - \theta_{B_{i-1}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: θ_{A_i} 、 $\theta_{A_{i-1}}$ 分别为工具刀轴矢量与第 i 和 $i-1$ 个刀位点处法向量方向的夹角; θ_{B_i} 、 $\theta_{B_{i-1}}$ 分别为该刀轴矢量与第 i 和 $i-1$ 个刀位点处切矢量方向的夹角。

机器人刀位点是一系列连续且疏密程度不同的离散点, 为进一步表征工具姿态变化程度, 量化姿态变化的平滑程度相对于路径上的位置变化, 将前后两个离散刀位点的欧氏距离即弦长引入工具姿态优化模型, 定义工具姿态优化模型 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = (\Delta\varphi_A, \Delta\varphi_B) \left. \begin{aligned} \Delta\varphi_A &= \frac{\theta_{A_i} - \theta_{A_{i-1}}}{\Delta d_i} = \frac{\Delta\theta_{A_i}}{\Delta d_i} \\ \Delta\varphi_B &= \frac{\theta_{B_i} - \theta_{B_{i-1}}}{\Delta d_i} = \frac{\Delta\theta_{B_i}}{\Delta d_i} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中, Δd_i 表示第 i 段弦长, 即第 i 和 $i-1$ 个刀位点之间的欧氏距离。通过将姿态角变化量除以前后两点的距离, 可以将姿态变化与距离进行归一化, 消除距离不同导致的尺度差异影响, 有助于平衡姿态变化和距离大小之间的权重。

同时, 为更好地适应不同角度变化量的分布情况, 鼓励模型输出更优值和更稳健的优化结果, 采用 L2 损失函数模型对所建工具姿态优化模型引入非线性特性, L2 损失函数表示为

$$L(Y | f(x)) = \sqrt{\frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (Y_i - f(x_i))^2} \quad (10)$$

式中: Y_i 为第 i 个样本真实值; $f(x_i)$ 为第 i 个样本预测值; j 为样本个数。

在毛刺打磨去除过程中, 机器人工具在不同方向姿态对应的重要程度可能有所不同。有时可能更重视工具刀轴矢量与刀位点处法向量方向的夹角 θ_A , 以确保刀具与轮毂窗口内侧表面的正确接触; 有时可能更重视工具刀轴矢量与刀位点处切矢量方向的夹角 θ_B , 以控制刀具的振动。于是, 分别对两个待优化变量添加对应权重系数 W_1 和 W_2 表征其重要程度。

最终, 在式(9)中, 采用式(10)的形式, 将 θ_{A_i} 、 θ_{B_i} 作为样本真实值, $\theta_{A_{i-1}}$ 、 $\theta_{B_{i-1}}$ 作为样本预测值, 来表征以 L2 损失函数对所建工具姿态优化模型引入的非线性特性, 建立机器人末端工具姿态优化模型为

$$\left. \begin{aligned} \min_{\theta_A, \theta_B} \varphi_{\text{smooth}} &= \sum_{i=2}^n \sqrt{W_1 (\Delta\varphi_A)^2 + W_2 (\Delta\varphi_B)^2} \\ \text{s.t.} \quad &W_{\text{tool}} P = P(x, y, z) \\ &\theta_{A_{\min}} < \theta_{A_i} < \theta_{A_{\max}} \\ &\theta_{B_{\min}} < \theta_{B_i} < \theta_{B_{\max}} \\ &W_1 + W_2 = 1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: ${}^W P$ 为刀位点在机器人基础坐标系下的位置; n 为规划后的机器人刀位点的数量; θ_{Amin} 、 θ_{Amax} 分别为机器人工具刀轴矢量与刀位点处法向量方向的夹角 θ_A 取值的下限和上限; θ_{Bmin} 、 θ_{Bmax} 分别为刀轴矢量与刀位点处切矢量方向的夹角 θ_B 取值的下限和上限。

采用 PSO 算法对机器人末端工具姿态优化模型进行优化求解, 并采用高斯平滑方法对所求得的最优解进行后处理, 在高斯平滑过程中, 为避免边界效应, 采用数据镜像扩展法在数据的头部和尾部添加与原始数据镜像的点以模拟数据在边界外的延续进而改善高斯平滑结果。

2.4 机器人打磨路径规划方法

为解决机器人在打磨去除汽车轮毂窗口边缘毛刺时存在的刀位点数量稀疏或冗余以及分布不均、末端工具姿态获取困难和姿态变化剧烈影响加工效率和加工质量的问题, 提出一种含有刀位点规划和工具姿态获取与优化的轮毂窗口毛刺机器人打磨路径规划方法, 实现机器人轮毂窗口边缘毛刺高效打磨去除。首先, 提出一种采用 NURBS 曲线形态特征参数进行机器人刀位点规划方法, 规划机器人打磨去除轮毂窗口边缘毛刺刀位点。然后, 提出一种考虑轮毂点云和窗口表面特征的轮毂窗口表面法向量获取方法, 并建立局部坐标系, 描述机器人去毛刺工具姿态。最后, 建立机器人去毛刺工具姿态优化模型并优化求解, 获得连续平滑的轮毂窗口机器人去毛刺工具姿态。

轮毂窗口毛刺机器人打磨路径规划方法的流程图见图 7, 主要流程如下:

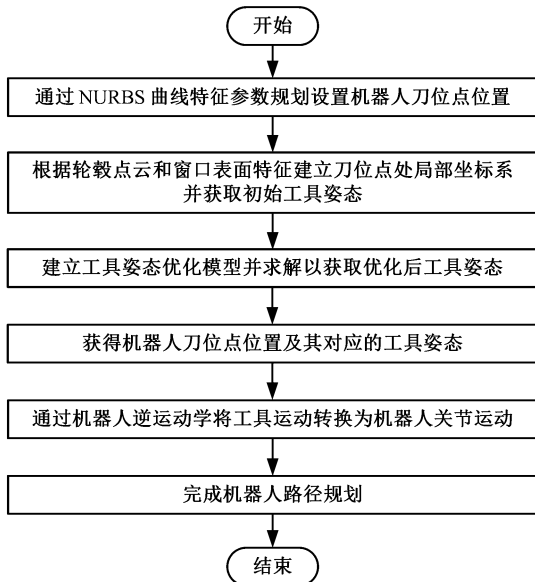


图 7 机器人打磨路径规划方法流程

Fig.7 Flow chart of proposed path planning method for robot grinding

1) 通过轮毂 CAD 模型获取窗口曲线及初始离散刀位点, 采用 NURBS 曲线拟合窗口边缘曲线路径并求取曲线形态特征参数, 对初始刀位点进行规划;

2) 通过预处理后的轮毂点云模型和窗口表面特征获取工具姿态参考法向量, 并建立刀位点处的局部坐标系, 获得初始机器人工具姿态;

3) 分析不同轮毂窗口特征, 建立机器人工具姿态优化模型并进行优化求解, 获得优化后的工具姿态;

4) 根据已获得的工具姿态和机器人逆向运动学, 由机器人末端工具的位置和姿态求解机器人关节角, 完成机器人打磨路径规划。

3 轮毂窗口边缘毛刺机器人打磨实验

3.1 机器人刀位点规划

为验证所提出的机器人刀位点规划方法的有效性, 开展图 1c 所示的轮毂四个不同大小形状窗口边缘曲线路径的刀位点规划, 并与传统的等参数法和等弦高误差法的刀位点规划对比。其中, 等参数法中使用初始点的累计弧长作为参数, 等弦高误差法中定义的最大误差阈值为 0.12^[19], 所提方法中的弦长阈值和弦高误差阈值分别设为 10 和 0.12。三种方法对应刀位点规划结果如图 8~图 10 所示。

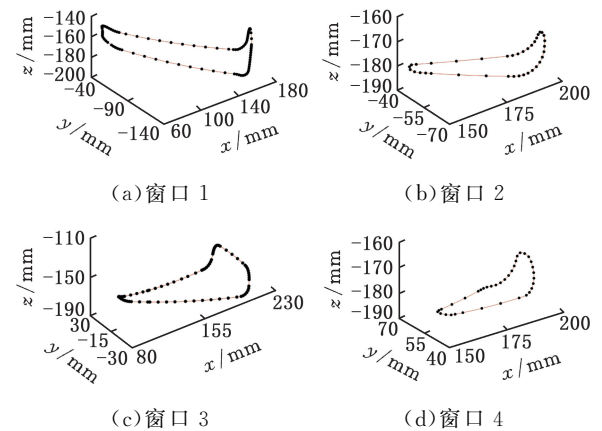


图 8 所提方法刀位点规划结果

Fig.8 Cutter location points planning results by proposed method

由图 8~图 10 可知, 所提机器人刀位点规划方法相较于等参数法和等弦高误差法在刀位点数量和分布均匀性两方面均有改进。等参数法生成的点分布较均匀但数量明显过多, 等弦高误差法生成了较少的刀位点, 然而点的分布明显不均匀, 尤其是在曲线变化复杂的区域。由所规划点的分布结果来看, 所提刀位点规划方法明显优于两种

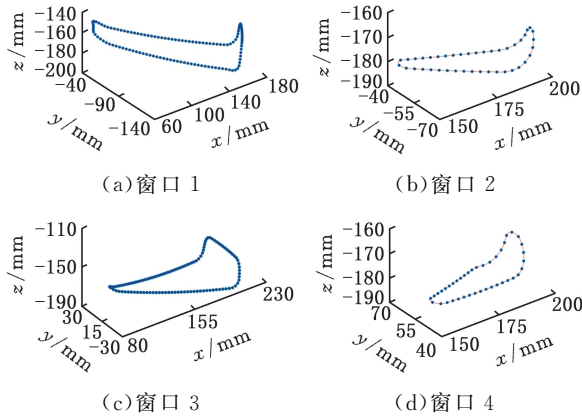


图9 等参数法刀位点规划结果

Fig.9 Cutter location points planning results by isoparametric method

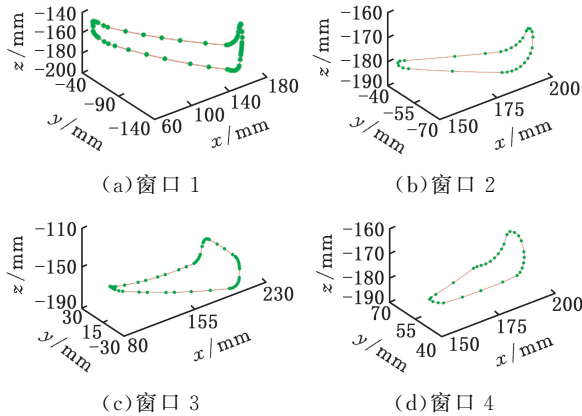


图10 等弦高误差法刀位点规划结果

Fig.10 Cutter location points planning results by equichord height error method

对比方法,对轮毂窗口边缘曲线曲率较大的区域保留了更多的点,且在曲线曲率相对较小区域,由于刀位点的数量和分布受到弦长和弦高误差两者的共同限制,使得相邻刀位点的分布不过于离散。对分布均匀性的进一步量化度量指标采用距离变异系数(coefficient of variation, CV)描述。CV是点对之间距离标准差与平均距离的比值,其表达式为

$$c_v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (12)$$

式中: μ 为样本平均值; σ 为样本标准差。

c_v 是一个量纲一的量,用于衡量点对距离分布的相对波动或者离散程度。 c_v 值越小,表明刀位点围绕平均值分布越紧密,点的分布越均匀;反之则表明刀具路径上某些点的位置可能不理想。表1和表2所示分别为所提方法、等参数法和等弦长误差法规划对应刀位点数量和分布均匀性的对比结果。

由表1和表2可知,所提刀位点规划方法与等参数法相比,由于等参数法的规划特性使得本

表1 刀位点数量对比

Tab.1 Comparison of total number of cutter location points

刀位点对比	窗口1	窗口2	窗口3	窗口4
初始刀位点	182	63	167	63
所提方法	91	36	74	38
等参数法	121	41	111	41
等弦高误差法	62	29	53	30

表2 c_v 值对比

Tab.2 Comparison of c_v

c_v 值对比	窗口1	窗口2	窗口3	窗口4
所提方法	0.6127	0.6535	0.5765	0.6530
等参数法	0.5504	0.5534	0.5402	0.5536
等弦高误差法	0.6277	0.6953	0.5975	0.6676

文所提方法在分布均匀性上相比较低,但刀位点数量减少了7.3%~33.3%,这在一定程度上减少了加工过程中的机器人移动和定位时间,有利于提高加工效率;与等弦高误差法相比,本文所提方法的分布均匀性提高了2.3%~6.0%,有利于提高轮廓变化复杂区域的轮毂窗口边缘毛刺打磨去除加工质量。由于受到所设弦长和弦高误差阈值的限制,刀位点数量相比较多,但这有利于保证和提高加工质量,避免产生加工瑕疵。另外,采用所提刀位点规划方法,针对轮毂四个不同大小形状窗口边缘进行刀位点规划仿真,所需时间分别为15.3 s、8.8 s、13.9 s和8.4 s,耗时较少,表明所提刀位点规划方法具有较好的规划效率。

3.2 窗口表面法向量获取

为验证所提考虑轮毂点云和窗口表面特征的表面法向量获取方法的有效性,对图1b所示轮毂的不同窗口边缘曲线的刀位点法向量获取过程进行分析。设定曲率阈值为 0.12 mm^{-1} ,半径搜索算法的查询半径为6 mm,RANSAC算法的参数阈值为0.1 mm。

首先,通过点云搜索和聚类,根据曲率划分刀位点并选取不同表面拟合方法的计算结果,如图11所示。其中,蓝色曲线为窗口边缘NURBS曲线,绿色和红色箭头分别表示由RANSAC平面拟合方法拟合的轮毂窗口边缘两侧对应的两个平面上的法向量,黑色和蓝色箭头表示关键点处由NURBS曲面拟合方法拟合的轮毂窗口边缘两侧对应的两个局部曲面在刀位点处的法向量。

其次,通过上文所述的方法对初始法向量进行筛选分组,得到窗口内侧面的法向量,如图12所示。由图12可知,通过所述方法可以筛选出轮毂窗口内侧面的法向量,然而该法向量方向仍是随机的,需作进一步调整。

最后,通过所提表面法向量获取方法中的法

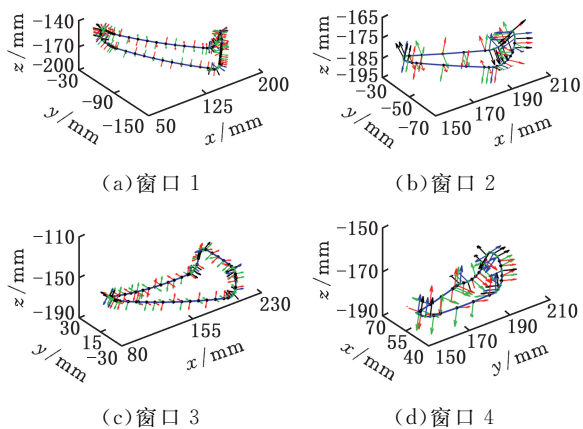


图 11 刀位点处法向量初步获取结果

Fig.11 Obtained preliminary results of normal vectors at cutter location points

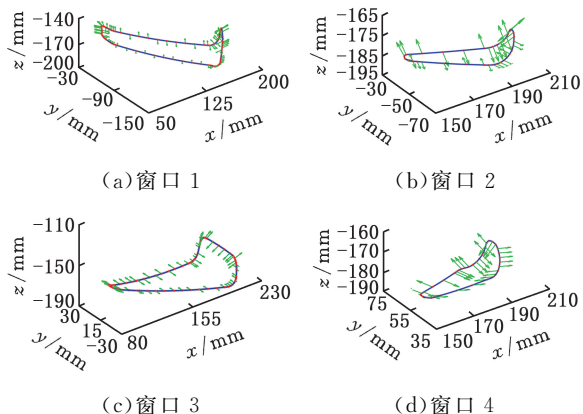


图 12 经筛选后的窗口内侧面法向量

Fig.12 Filtered results of window inner side normal vectors

向量方向调整方式对上述筛选出的法向量进行方向调整,使其指向轮毂窗口内部,如图 13 所示。

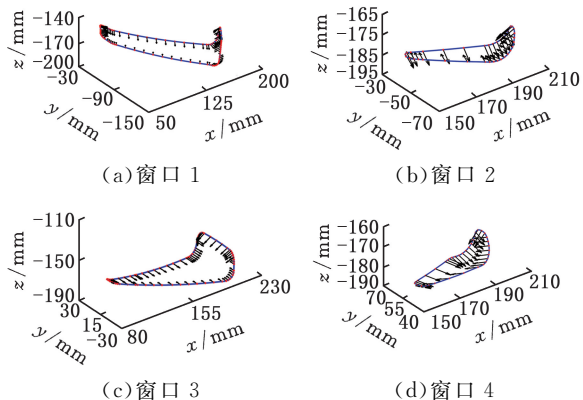


图 13 最终法向量结果

Fig.13 Final results of normal vectors

通过已获取的刀位点处切矢量和法向量,进一步得到轮毂窗口边缘局部坐标系和初始机器人工具姿态即刀轴矢量,分别如图 14 和图 15 所示。在图 14 所示局部坐标系中,红色箭头为调整后的刀位点处的法向量,绿色箭头为刀位点处的切矢

量,蓝色箭头为切矢量叉乘原法向量得到的叉乘矢量并代表初始刀轴矢量方向,三者共同构成各刀位点处的局部坐标系。由图 14 可知,经过调整后的法向量指向窗口内侧面且与切矢量垂直,两者及其叉乘结果构成了相互正交的局部坐标系,表明了所提轮毂窗口表面法向量获取方法的有效性,为后续机器人工具姿态优化模型的建立和求解提供了基础。

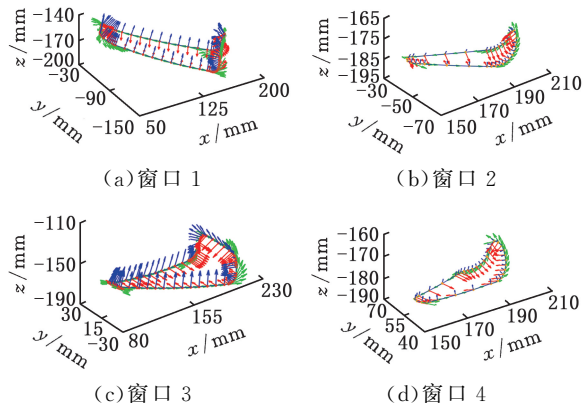


图 14 刀位点处局部坐标系

Fig.14 Local coordinate system at cutter location points

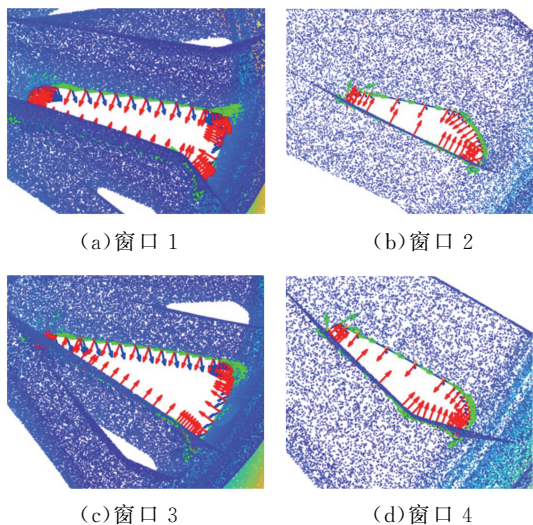


图 15 轮毂点云模型的局部坐标系结果

Fig.15 Results of local coordinate system for wheel hub point cloud model

3.3 工具姿态优化

为验证所建立的机器人工具姿态优化模型的正确性及优化求解结果,分别设置粒子群粒子数量为 50、最大迭代次数为 200、惯性权重为 0.8、个体和社会学习因子均为 2、 θ_A 和 θ_B 在优化模型中的权重分别为 0.6 和 0.4,曲率阈值为 0.1,位置差分阈值 $\Delta\theta_{ts}$ 和速度阈值 v_{max} 分别设为 0.09 rad 和 0.17 rad/s。根据相关工艺规范^[19]并参考实际加工与工具避障需要,窗口 1 和窗口 3 的姿态角范围设置为 0.26~0.44 rad,窗口 2 和窗口 4 的姿态

角范围设置为 $0.09 \sim 0.26$ rad。其中, θ_A 和 θ_B 在优化模型中的权重取值对刀具振动影响较小, 相比于控制刀具的振动, 确保刀具与轮毂窗口内侧表面的正确接触更为重要, 即更重视对工具刀轴矢量与刀位点处法向量方向的夹角 θ_A 的控制。

针对图 1c 所示四种不同形状轮毂窗口开展机器人末端工具姿态优化求解, 如图 16、图 17 和表 3~表 6 所示。由图 16 可知, 不同窗口的工具姿态在经过 200 次优化迭代求解后均能收敛到接近 0 的较小范围内, 表明所建优化模型具有较好的收敛性和可解性, 工具姿态变化在给定范围内是可以达到最小的; 由图 17 可知, 经优化后, 随着轮毂窗口边缘曲率的变化, 工具姿态角曲线较为平滑, 仅在某些点有较小范围的波动。

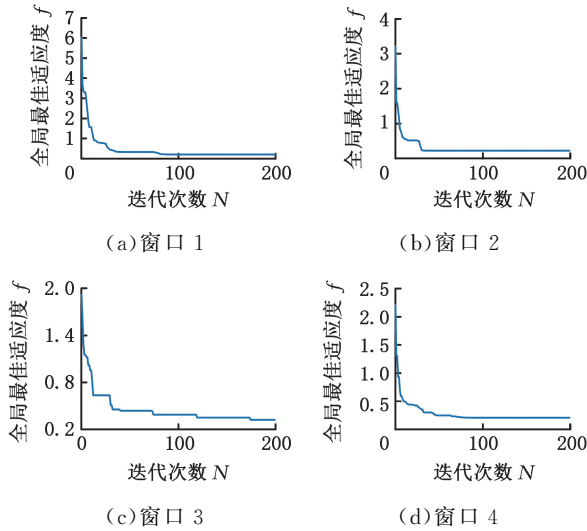


图 16 不同窗口适应度函数迭代结果

Fig.16 Fitness function iteration results of different windows

由表 3~表 6 可知, 不同窗口的两姿态角最大值和最小值均在所设定角度范围内, 方差和 c_v 值均在较低水平, 表明相邻各组姿态角彼此之间相差较小、离散程度较低, 优化求解结果稳定收敛。

通过优化后的工具姿态角获得优化后的工具刀轴矢量, 结果如图 18 和图 19 所示。其中, 黑色箭头表示工具刀轴矢量方向。由图 18 可知, 工具刀轴矢量与刀位点处局部坐标系 X 轴和 Y 轴(即法向量和切向量)均保持一定角度, 且沿着窗口边缘曲线路径和刀位点位置分布, 在路径曲率和窗口形状较大变化处, 均呈现较为平滑的变换与过渡, 无明显突变, 表明工具姿态优化结果良好。

3.4 机器人打磨窗口曲线路径仿真

基于 RobotStudio 软件搭建机器人打磨路径

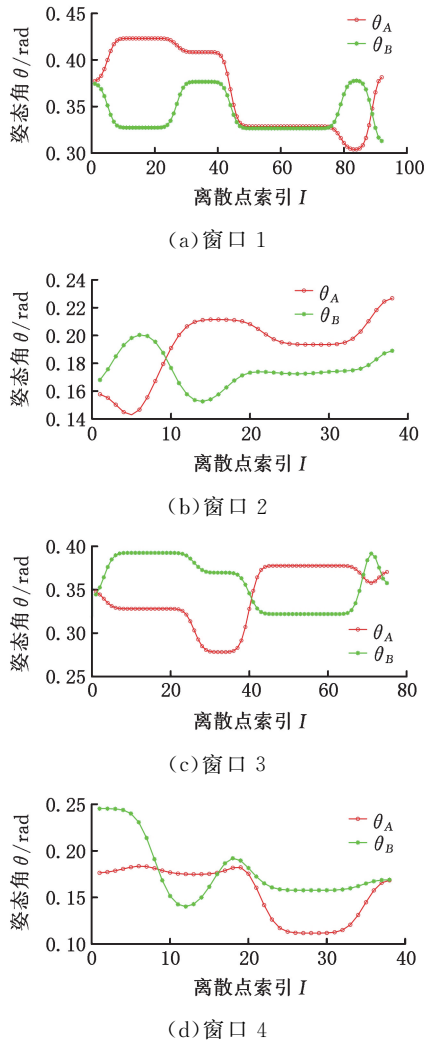


图 17 工具姿态优化求解结果

Fig.17 Result of tool orientation optimization

表 3 窗口 1 工具姿态角优化统计结果

Tab.3 Statistical results of tool orientation angle optimization for window 1

参数	最大值	最小值	方差	c_v 值
θ_A /rad	0.4230	0.3040	0.0019	0.1190
θ_B /rad	0.3778	0.3130	0.0004	0.0612

表 4 窗口 2 工具姿态角计算结果统计参数

Tab.4 Statistical results of tool orientation angle optimization for window 2

参数	最大值	最小值	方差	c_v 值
θ_A /rad	0.2267	0.1429	0.0005	0.1203
θ_B /rad	0.2003	0.1525	0.0001	0.0701

表 5 窗口 3 工具姿态角计算结果统计参数

Tab.5 Statistical results of tool orientation angle optimization for window 3

参数	最大值	最小值	方差	c_v 值
θ_A /rad	0.3754	0.2787	0.0012	0.1102
θ_B /rad	0.3967	0.3208	0.0010	0.0886

仿真环境, 所搭建的针对轮毂窗口边缘毛刺打磨去除的机器人路径规划仿真系统布局见图 20。

表 6 窗口 4 工具姿态角计算结果统计参数

Tab.6 Statistical results of tool orientation angle optimization for window 4

参数	最大值	最小值	方差	c_v 值
θ_A /rad	0.2592	0.1412	0.0021	0.2256
θ_B /rad	0.2556	0.1830	0.0005	0.1047

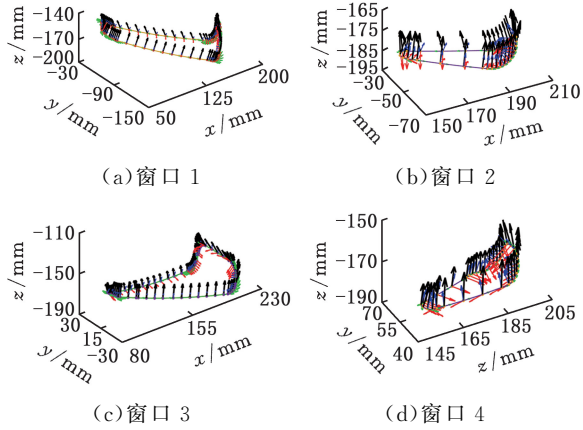


图 18 工具刀轴矢量结果

Fig.18 Tool axis vector results

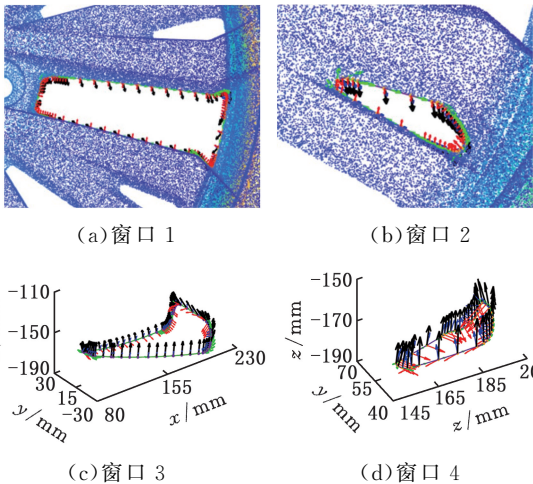


图 19 轮毂点云模型的工具刀轴矢量结果

Fig.19 Tool axis vector results for wheel hub point cloud model

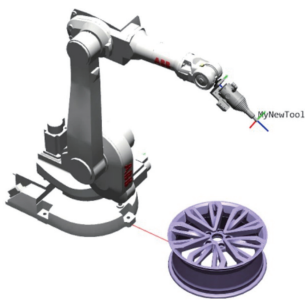
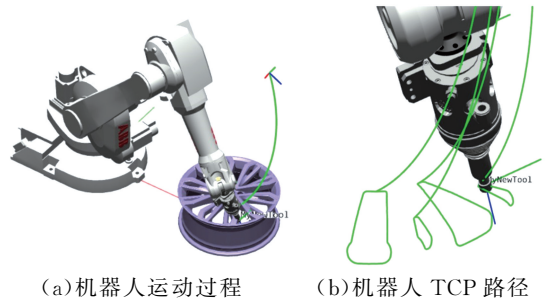


图 20 机器人打磨路径仿真环境

Fig.20 Robot grinding path simulation environment

在已有仿真环境的基础上,将 MATLAB 输出的机器人刀位点位姿信息编写为 RAPID 程序并写入 RobotStudio 软件中。对该轮毂的不同窗口进行机器人打磨路径仿真,如图 21 所示。



(a) 机器人运动过程 (b) 机器人 TCP 路径

图 21 机器人运动过程及 TCP 路径

Fig.21 Robot motion process and TCP path

由图 21 可知,由搭建完成的仿真环境和预设的坐标转换信息可知,机器人较好地接近了待打磨轮毂窗口边缘,机器人工具中心点(tool center point, TCP)移动路径是一组相对平滑的曲线,无明显弯折,较好地表征了轮毂窗口边缘曲线的形状与特征,表明了所提刀位点规划方法和工具姿态优化方法的有效性。

图 22、图 23 所示分别为工具姿态角优化前后不同窗口曲线路径下的机器人关节角变化结果。其中,横坐标时间范围不同的原因是省略了机器人靠近轮毂窗口进刀和出刀远离的过程。对比图 22、图 23 可知,工具姿态角优化后机器人关节角变化曲线相对平滑,尤其与机器人末端工具定位和导向密切相关的关节 4、5、6(即 J_4 、 J_5 、 J_6),除在窗口边缘曲线曲率变化剧烈处必要的工具姿态调整,以及机器人必须沿轮毂窗口边缘曲线路径走刀且窗口大小不同引起机器人关节运动外,整体上无显著波动,呈现了相对平缓的变化趋势,进一步表明机器人末端去毛刺工具的姿态

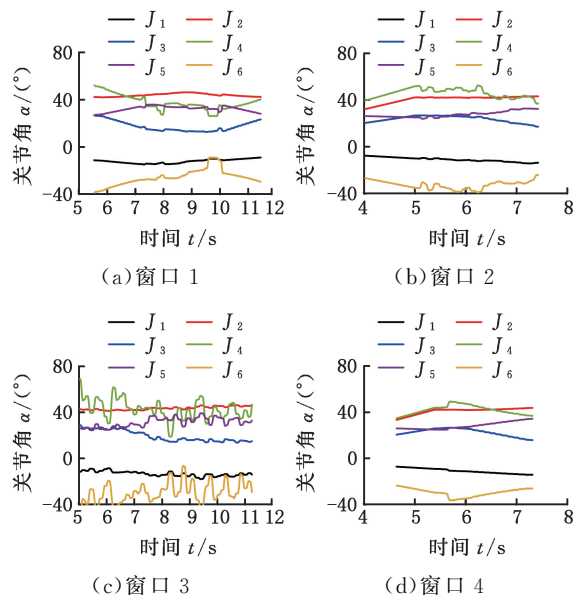


图 22 优化前机器人各关节角度变化

Fig.22 Angle of each joint of robot changes before optimization

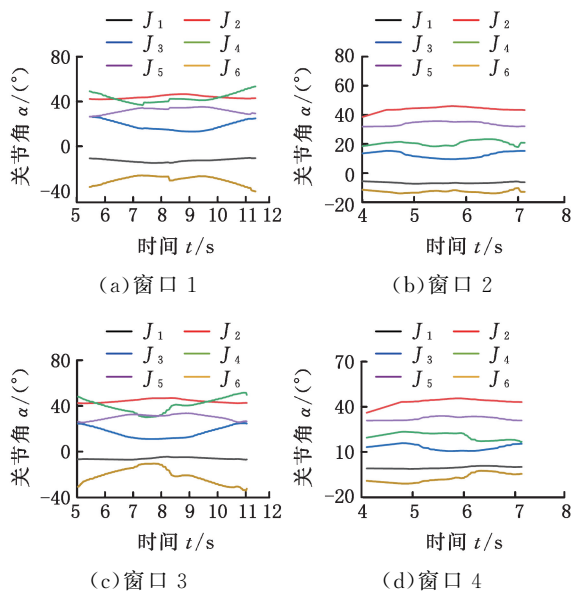


图 23 优化后机器人各关节角度变化
Fig.23 Angle of each joint of robot changes after optimization

变化较为光滑平滑。对于轮毂窗口 1 和 3 这种工作范围相对较大且曲率变化范围也较大的情况，机器人第 6 轴关节角的整体变化范围在 20°以内，而对于窗口 2 和窗口 4 这种工作范围较小的情况，对应关节角的变化范围则在 10°以内，整体变化范围均较小。

通过上述仿真可知，所提路径规划方法可使机器人各关节 $J_1 \sim J_6$ 及其末端工具在进行复杂形状汽车轮毂窗口毛刺打磨去除作业时能够保持稳定运动，有利于减小因急剧变动带来的动态负载和颤振，提高机器人作业的精度和加工质量。

3.5 机器人实验平台打磨去毛刺实验

所使用的轮毂窗口边缘毛刺打磨机器人实验平台如图 24 所示。该实验平台为一工位轮轴打磨工作站，具有轮毂自动进出料、型号识别、轮辐识别与定位和机器人自动打磨去毛刺等功能。通过机械定位与视觉定位相结合的方式提供牢固准确的轮毂定位。首先轮毂自动进出料系统将轮毂自动运送，并通过 4 个夹爪进行轮毂周向机械式定位与夹紧，确保轮毂在去毛刺过程中保持牢固与稳定；然后通过视觉系统准确识别轮毂中心位置、轮毂型号，并定位轮毂窗口的周向角度。机器人及其末端工具分别为 IRB1600-10/1.2 型机器人和 RC-340 浮动主轴，刀具为硬质合金锥形铣刀。为验证所提机器人打磨路径规划方法的有效性，在该平台上进行不同型号汽车轮毂窗口毛刺打磨实验。机器人打磨参数如表 7 所示。其中，切削深度 1.50 mm 和 1.20 mm 分别是针对较大和较小窗口设置的。

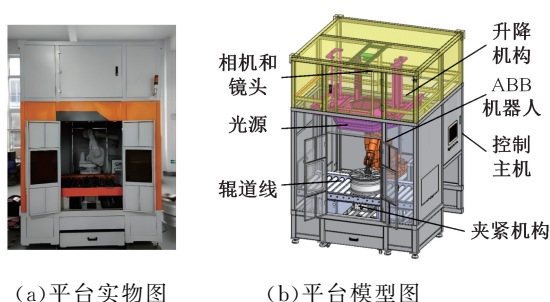


图 24 实验平台

Fig.24 Experimental platform

表 7 机器人打磨参数表

Tab.7 Robot grinding parameters table

参数	数值
打磨速度 v_c (mm · s ⁻¹)	150
窗口切换速度 v_s (mm · s ⁻¹)	450
吹扫速度 v_p (mm · s ⁻¹)	600
回零速度 v_r (mm · s ⁻¹)	600
气动主轴工作压力 p_p /MPa	0.15
切削深度 b_c /mm	1.2, 1.5

两个待打磨轮毂工件如图 25 所示。其中，轮毂 1 中的轮辐和窗口呈散射状分布，标识①表示较大窗口，标识②表示较小窗口；轮毂 2 中的轮辐和窗口呈弯曲散射状分布，均为较大窗口。在轮毂窗口边缘毛刺机器人打磨实验中，机器人末端工具将沿其窗口边缘曲线路径以优化后的姿态完成毛刺打磨去除作业。通过对轮毂 1 和轮毂 2 不同散射状分布形态和不同大小的窗口开展边缘毛刺机器人打磨实验，验证了所提方法的有效性。



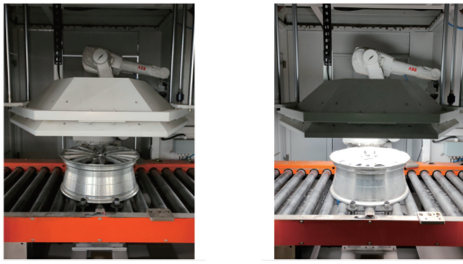
(a) 轮毂 1 (b) 轮毂 2

图 25 待打磨毛刺轮毂

Fig.25 Hubs for grinding burrs

轮毂窗口边缘毛刺机器人打磨实验过程如图 26 和图 27 所示。视觉系统采集轮毂位姿信息过程如图 26 所示，通过准确识别轮毂型号和角度定位，为进一步的路径规划方案生成提供基础信息。

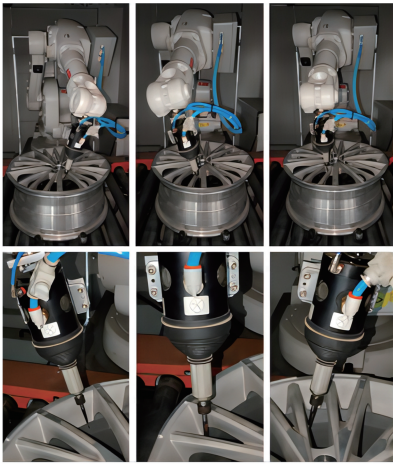
实验平台软件系统主要由海康威视 Vision-Master 软件为基础的视觉系统和基于 AnyCAD 库的三维交互系统构成。前者将获得的轮毂图像信息进行处理，识别轮毂中心位置、轮毂型号与定位轮毂窗口，经过提前标定好相机坐标系、机器人基础坐标系以及工具坐标系的相对关系，将轮毂



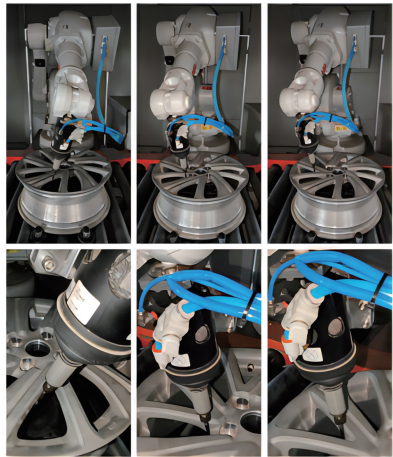
(a) 轮毂型号识别 (b) 轮毂角度定位

图 26 轮毂位姿信息采集

Fig.26 Information acquisition for wheel position and orientation



(a) 轮毂 1



(b) 轮毂 2

图 27 轮毂窗口毛刺机器人打磨过程

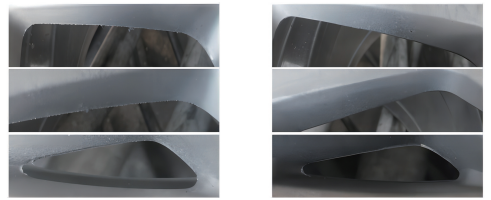
Fig.27 Process of robotic grinding for wheel window burrs

窗口边缘图像中的位置变换为机器人基础坐标系和工具坐标系中的位置。后者用于机器人离线规划和运动仿真。该软件系统接收来自视觉系统识别的轮毂型号和位姿信息,通过该信息和所提机器人打磨路径规划方法,在笛卡儿坐标系下对各轮毂窗口生成相应的机器人末端工具刀位点和工具姿态,并通过求解提前建立的机器人逆向运动学模型,实现将工具运动转化为机器人各关节运

动,而后根据规划出的路径进行机器人本体及其末端工具的运动仿真,确保机器人打磨路径的可行性。同时,该系统还能够自主完成系统标定任务,测试机器人路径规划方案的合理性,调整工艺参数,输出轮毂识别率和加工耗时等信息。

机器人打磨去除轮毂窗口毛刺作业过程如图 27 所示,可知,根据所提路径规划方法生成的机器人打磨路径,机器人较好地实现了刀位点定位且其末端工具与轮毂窗口边缘曲线有效接触作业,工具刀轴矢量与窗口内侧面和刀位点处的切矢量方向均成一定角度,打磨作业姿态变化平滑连续,验证了所提机器人打磨路径规划方法即机器人刀位点规划和工具姿态获取与优化方法的有效性。

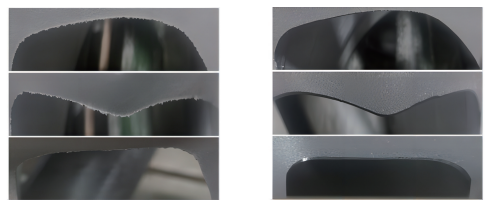
轮毂窗口毛刺打磨去除对比如图 28 和图 29 所示,可知,未经打磨的轮毂窗口边缘有许多明显的细小毛刺和不规则凸起飞边;通过所提方法生成机器人打磨路径,并在实验平台上进行打磨去毛刺作业,两轮毂窗口边缘毛刺和飞边均被较好地去除了,打磨后窗口边缘平滑且均匀。



(a) 窗口毛刺分布 (b) 毛刺打磨去除效果

图 28 轮毂 1 窗口毛刺机器人打磨

Fig.28 Robotic grinding for window burrs of wheel 1



(a) 窗口毛刺分布 (b) 毛刺打磨去除效果

图 29 轮毂 2 窗口毛刺机器人打磨

Fig.29 Robotic grinding for window burrs of wheel 2

根据相关工艺规范^[19],对毛刺打磨去除后的轮毂产品要求为:边缘倒角宽度为 0.50~1.50 mm;边缘无毛刺及锐边,徒手触摸无针刺感。

图 28 和图 29 所示经毛刺打磨后的窗口边缘较为光滑,没有毛刺和飞边残留,徒手触摸没有针刺感。进一步对毛刺打磨后的窗口边缘多个不同位置处的倒角尺寸进行测量,见图 30~图 32。由打磨均匀性测量结果(图 30)可知,在曲率相对较小处窗口边缘经打磨后的倒角尺寸在 1.00 mm 以内,最小尺寸接近 0.50 mm,且打磨均匀性较

好;在曲率相对较大处或圆弧拐角处对应倒角尺寸在 1.00~1.50 mm 范围内,仅在极个别点处如圆弧拐角处和靠近螺栓孔拐角处存在一定程度的

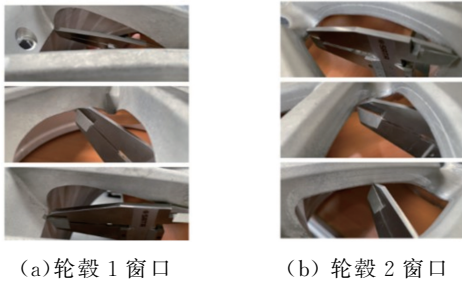


图 30 机器人打磨后的轮毂窗口边缘倒角尺寸测量
Fig.30 Dimensional measurements of chamfered wheel window edges after robotic grinding

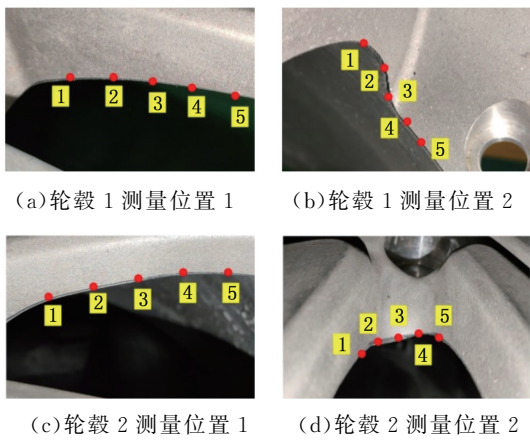


图 31 轮毂窗口毛刺打磨均匀性测量
Fig.31 Uniformity measurements for wheel window edges burrs grinding

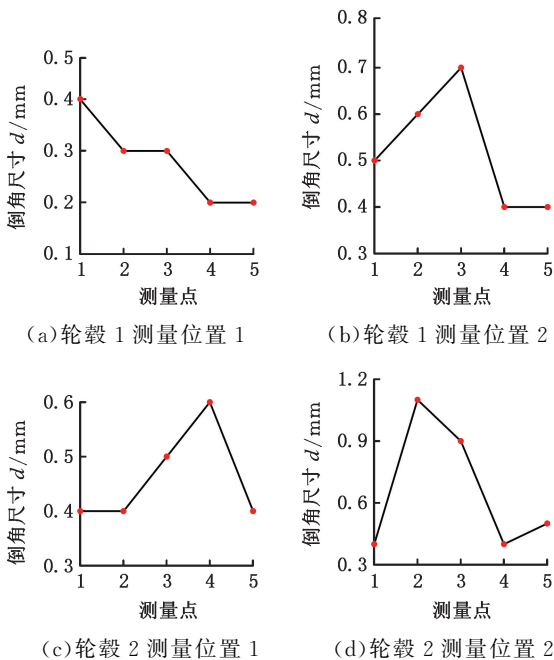


图 32 轮毂窗口边缘毛刺打磨均匀性测量结果
Fig.32 Results of grinding uniformity measurements for wheel window edges burrs

打磨不均匀现象,部分倒角最大尺寸接近 1.50 mm,这是由于毛刺本身较大,以及所处位置和轮毂窗口形状特征较难打磨导致的。如图 31 所示,为进一步体现不同位置的打磨均匀性和所提方法的有效性,选取了部分实验结果并通过分别在曲率相对较小处窗口边缘和曲率相对较大的圆弧拐角处或靠近螺栓孔拐角处边缘设置 5 个等距测量点对打磨均匀性进行测试。由图 32 可知,对于轮毂 1 的两个测量位置,其倒角尺寸均在 1.00 mm 以内,两位置测量的平均值分别为 0.26 mm 和 0.51 mm;对于轮毂 2 的两个测量位置的倒角尺寸均在 1.20 mm 以内,两位置测量结果的平均尺寸分别为 0.43 mm 和 0.64 mm,表明打磨效果是均匀的。

对某企业机器人打磨后轮毂与其窗口边缘倒角尺寸进行测量,如图 33 所示。对该企业轮毂选取两个测量位置,并且每个位置设置 5 个等距测量点测量倒角尺寸,如图 34 所示。由轮毂窗口边缘毛刺打磨均匀性测量结果(图 35)可知,对于该企业轮毂的两个测量位置,其倒角尺寸均在 1.40 mm 以内,两位置测量的平均值分别为 0.81 mm 和 0.89 mm。



图 33 某企业机器人打磨后轮毂窗口边缘倒角尺寸测量
Fig.33 Dimensional measurements of chamfered wheel window edges after robotic grinding in enterprise

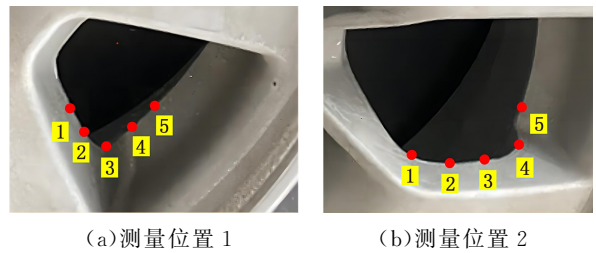


图 34 某企业轮毂窗口边缘毛刺打磨均匀性测量
Fig.34 Uniformity measurements for wheel window edges burrs grinding in enterprise

选取测量位置 1,对实验平台打磨轮毂 1 和某企业打磨轮毂对应窗口毛刺打磨均匀性进行对比,结果如表 8 所示。由表 8 可知,实验平台打磨

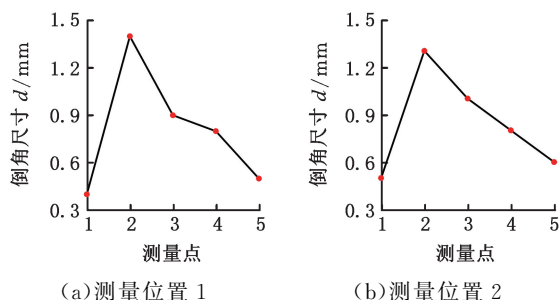


图 35 某企业轮毂窗口边缘毛刺打磨均匀性测量结果

Fig.35 Results of grinding uniformity measurements for wheel window edges burrs in enterprise

表 8 实验平台与某企业打磨后轮毂窗口测量位置 1 的毛刺打磨均匀性对比结果

Tab.8 Comparison results of grinding uniformity of wheel window edges burrs grinding for measuring position 1 on experimental platform and enterprise

打磨轮毂窗口	最大值/ mm	最小值/ mm	平均值/ mm	方差/ mm ²
实验平台打磨轮毂	0.41	0.22	0.26	0.005
某企业打磨轮毂	1.38	0.43	0.81	0.119

后轮毂窗口毛刺测量尺寸方差为 0.005 mm^2 , 而某企业打磨后轮毂窗口毛刺测量尺寸方差为 0.119 mm^2 。比较而言, 实验平台打磨后轮毂窗口边缘毛刺打磨均匀性较好。

综上, 实验平台打磨后的窗口边缘倒角均在工艺规范^[19]规定的 1.50 mm 以内, 符合规范要求, 毛刺打磨效果较好, 进一步验证了所提机器人打磨路径规划方法通过窗口边缘曲线和表面特征进行刀位点规划和工具姿态优化的有效性与可行性。

上述实验结果表明, 采用所提机器人打磨路径规划方法能够生成分布均匀的机器人刀位点和连续的工具姿态, 确保了机器人有效定位接触轮毂窗口边缘并保持一个适宜的加工姿态进行打磨毛刺作业, 高质量地去除了不同分布形态和大小的轮毂窗口边缘毛刺并获得了良好的去毛刺效果, 验证了所提方法的有效性。

4 结论

1) 提出一种机器人刀位点规划的方法, 采用 NURBS 曲线形态特征参数描述轮毂窗口边缘曲线并对机器人刀位点进行了适宜的规划, 通过与传统方法对比可知, 所提方法对应刀位点数量相比等参数法减少了 $7.3\% \sim 33.3\%$, 分布均匀性相比等弦高误差法提高了 $2.3\% \sim 6.0\%$ 。

2) 提出一种考虑轮毂点云和窗口表面特征的轮毂窗口表面法向量获取方法, 获得了所需窗口

内侧面法向量和刀位点处的局部坐标系, 通过求解窗口内侧面法向量验证了所提方法的有效性。

3) 定义并获取了机器人末端工具姿态, 建立了一种机器人工具姿态优化模型, 改进了粒子群算法求解优化模型, 获得了优化的机器人末端工具姿态以及过渡平滑连续的工具刀轴矢量, 且机器人关节角变化连续平滑无突变。

4) 开展轮毂窗口边缘毛刺机器人打磨实验, 实验结果表明, 经所提机器人打磨路径规划方法规划后, 机器人可以精准地到达刀位点且其末端去毛刺工具有效地与窗口边缘接触并保持适宜的去毛刺加工姿态; 在曲率相对较小处窗口边缘打磨后的倒角尺寸在 $0.50 \sim 1.00 \text{ mm}$ 范围内, 在曲率相对较大处或圆弧拐角处的倒角尺寸在 $1.00 \sim 1.50 \text{ mm}$ 范围内; 分别对打磨后两个轮毂 4 处不同位置进行测量, 所得平均尺寸分别为 0.26 mm 、 0.51 mm 、 0.43 mm 和 0.64 mm , 均在工艺规范规定范围内, 毛刺去除效果和打磨均匀性较好。与某企业轮毂窗口边缘毛刺打磨对比, 实验平台打磨后轮毂窗口边缘毛刺打磨均匀性较好。通过机器人打磨实验, 验证了所提含有刀位点规划和工具姿态获取与优化的机器人打磨路径规划方法的有效性。

参考文献:

- [1] 朱肖飞, 樊双蛟, 闫兆彬, 等. 扫描式阴极电化学光整加工对车削外圆面边缘毛刺的去除[J]. 表面技术, 2021, 50(12):111-118.
ZHU Xiaofei, FAN Shuangjiao, YAN Zhaobin, et al. Scanning Cathode Electrochemical Finishing for Removal of Burrs on Edge of Turning Cylindrical Surfaces[J]. Surface Technology, 2021, 50(12): 111-118.
- [2] 吴超群, 赵松, 雷艇. 曲线焊缝的机器人焊接轨迹规划与高频控制[J]. 中国机械工程, 2023, 34(14):1723-1728.
WU Chaoqun, ZHAO Song, LEI Ting. Robot Welding Trajectory Planning and High Frequency Control for Curved Seams[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(14):1723-1728.
- [3] 葛吉民, 邓朝晖, 李尉, 等. 机器人磨抛力柔顺控制研究进展[J]. 中国机械工程, 2021, 32(18):2217-2230.
GE Jimin, DENG Chaohui, LI Wei, et al. Research Progresses of Robot Grinding and Polishing Force Compliance Controls[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(18):2217-2230.
- [4] ÖZEL M A, GÜL M Y. Ensuring Stability and Au-

- Automatic Process Control with Deburring Process in Cast Z-rot Parts[C]//International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems. Singapore, 2023:27-35.
- [5] FALANDYS K, KURC K, BURGHARDT A, et al. Automation of the Edge Deburring Process and Analysis of the Impact of Selected Parameters on Forces and Moments Induced during the Process[J]. Applied Sciences-Basel, 2023, 13(17):9646.
- [6] ONSTEIN I F, BJERKENG M, MARTINSEN K. Automated Tool Trajectory Generation for Robotized Deburring of Cast Parts Based on 3D Scans[J]. Procedia CIRP, 2023:507-512.
- [7] LAI Zengliang, XIONG Rentao, WU Hongmin, et al. Integration of Visual Information and Robot Offline Programming System for Improving Automatic Deburring Process [C] // 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Kuala Lumpur, Malaysia, 2019:1132-1137.
- [8] SHIH C H, WU C Y. Robotic Slag Removal System with Position Compensation and Defect Detection Based on YOLO Algorithm[C]//2023 International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS). Taipei, 2023:1-6.
- [9] TAO Yong, ZHENG Jiaqi, LIN Yuanchang, et al. Fuzzy PID Control Method of Deburring Industrial Robots[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2015, 29(6):2447-2455.
- [10] KUSS A, DRUST M, VERL A. Detection of Workpiece Shape Deviations for Tool Path Adaptation in Robotic Deburring Systems [J]. Procedia CIRP, 2016, 57:545-550.
- [11] BHUTE R Y, RAHUL M R. Estimation of Burr Dimensions Using Image Processing for Robotic Deburring[C]//Advances in Mechanical Engineering, ICAME 2020. Singapore, 2021:559-565.
- [12] GUO Wanjin, LI Ruifeng, ZHU Yaguang, et al. A Robotic Deburring Methodology for Tool Path Planning and Process Parameter Control of a Five-degree-of-freedom Robot Manipulator[J]. Applied Sciences, 2019, 9(10):2033.
- [13] LI J, GUAN Y, CHEN H, et al. Robotic Polishing of Unknown-Model Workpieces with Constant Normal Contact Force Control [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 28(2):1093-1103.
- [14] LIAO Z Y, WANG Q H, XIE H L, et al. Optimization of Robot Posture and Workpiece Setup in Robotic Milling with Stiffness Threshold [J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(1):582-593.
- [15] ZHAO S Q, PENG F Y, SUN H, et al. Robotic Milling Posture Adjustment under Composite Constraints: a Weight-sequence Identification and Optimization Strategy[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2024, 85.
- [16] 张铁, 张斌. 机器人砂带磨削路径优化插补算法 [J]. 中国机械工程, 2018, 29(8):983-990. ZHANG Tie, ZHANG Bin. Optimized Interpolation Algorithm for Robotic Belt Grinding Processes[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(8):983-990.
- [17] 郭万金, 赵伍端, 于苏扬, 等. 无先验模型曲面的机器人打磨主动自适应在线轨迹预测方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(8):1655-1666. GUO Wanjin, ZHAO Wuduan, YU Suyang, et al. Active Adaptive Online Trajectory Prediction Method for Robotic Grinding on Surface without Prior Model [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, 57(8):1655-1666.
- [18] 卢耀安, 丘洪键, 王成勇. 基于关键刀轴矢量插值的球头铣刀五轴加工光顺刀轴矢量生成方法[J]. 中国机械工程, 2023, 34(20):2466-2474. LU Yaoan, QIU Hongjian, WANG Chengyong. Smooth Tool Orientation Generation Method of Five-axis Ball-end Milling via RTOs Interpolation [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(20):2466-2474.
- [19] 中国汽车工业协会. 铝合金车轮自动去毛刺工艺规范:T/CAAMTB 126—2023[S]. 北京:中国汽车工业协会, 2023. China Association of Automobile Manufactures. Automatic Deburring for Aluminum Alloy Wheels—Technological Specification:T/CAAMTB 126—2023[S]. Beijing:China Association of Automobile Manufactures, 2023.

(编辑 王艳丽)

作者简介:郭万金* (通信作者),男,1983年生,副教授、博士研究生导师。研究方向为工业机器人打磨与智能控制。E-mail: guowanjin@chd.edu.cn.

本文引用格式:

郭万金,孙浩,利乾辉,等.轮毂毛刺机器人打磨刀路规划与工具姿态优化[J].中国机械工程,2025,36(6):1222-1237.

GUO Wanjin, SUN Hao, LI Qianhui, et al. Tool Path Planning and Tool Orientation Optimization for Robotic Grinding of Wheel Hub Burrs [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6): 1222-1237.