

文章编号 1004-924X(2024)05-0704-10

眼镜镜片尖边轮廓的五轴数控加工

李宏涛¹, 项华中^{1*}, 郑泽希², 丁琦慧¹, 张欣¹, 王彭¹, 张大伟³, 庄松林³

(1. 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093;

2. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093;

3. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了改善和优化眼镜镜片的加工流程, 避免镜片尖边加工过程中刀轴矢量变化剧烈、影响工件表面的加工质量, 提出了一种基于 UG NX 的五轴数控加工路径。利用智能镜框扫描仪对镜框边缘进行扫描, 获得镜框凹槽点云数据文件, 编写相应程序对符合眼镜片加工标准的 OMA 文件中的球坐标数据进行坐标及格式转换等处理。基于 NURBS 曲线拟合算法, 实现刀路轨迹的连续性并保证拟合曲线的精度。设计和建立一种控制刀轴矢量平滑变化的刀轴驱动约束方法, 依靠曲线驱动刀轴及镜片曲面法向量约束刀轴使刀头平滑进给, 并将刀轨文件经过后处理转换为 NC 文件。最后, 对加工后的镜片进行误差测量, 结果表明, 通过点云数据拟合刀路曲线的方法提高了加工面的精确度和光滑性, 有效缩减了加工流程, 提高了加工效率。

关键词: 光学加工; 数控系统; 非均匀有理 B 样条; 曲线拟合; 刀具路径

中图分类号: TG502 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243205.0704

Five-axis CNC machining method for eyeglass lens edge profile

LI Hongtao¹, XIANG Huazhong^{1*}, ZHENG Zexi², DING Qihui¹, ZHANG Xin¹,

WANG Peng¹, ZHANG Dawei³, ZHUANG Songlin³

(1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

3. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

* Corresponding author, E-mail: xiang3845242@usst.edu.cn

Abstract: To enhance the eyeglass lens manufacturing process and mitigate issues stemming from abrupt changes in tool axis vectors during lens edge processing, which could degrade surface quality, this study introduces a five-axis numerical control machining path strategy using UG NX (Unigraphics NX). Initially, an intelligent frame scanner captures the eyeglass frame edges, generating point cloud data of the notches. A program is then crafted to convert the spherical coordinate data from OMA files, adhering to eyeglass lens processing standards, into the required coordinates and formats. Furthermore, employing the

收稿日期: 2023-08-22; 修订日期: 2023-10-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52206102, No. 61605114)

NURBS curve fitting algorithm enables continuous tool path trajectories, ensuring curve fitting accuracy. The NC (numerical control) machine tool, fitted with a specialized conical milling cutter for lens edge processing, thus improves the precision and efficiency of lens production. In addition, a technique is developed to ensure the tool axis vector changes smoothly, utilizing curve-driven tool axis motion and normal vector constraints of the lens surface for steady tool feeding. The tool path file undergoes post-processing to be converted into NC code. Upon manufacturing, lens error measurement reveals that the proposed method, focusing on curve fitting and tool axis control, significantly enhances machining surface accuracy and smoothness, reduces the manufacturing timeline, and boosts machining efficiency.

Key words: optical fabrication; numerical control system; non-uniform rational B-spline; curve fitting; tool path

1 引言

目前,关于工业加工流程的优化方法多集中于加工路径的设计和刀轴矢量的约束优化。非均匀有理B样条(Non-Uniform Rational B-spline, NURBS)曲线拟合算法^[1]可以精确表示二次曲线曲面,为自由曲线的精确表示提供了基础,已经成为工业产品中几何定义的STEP标准,并在刀具路径优化中起到重要作用^[2]。

现代数控加工(Computer Numerical Control, CNC)加工期望含有曲线曲面的刀具路径都能以可编辑参数形式表达,可以对刀轨曲线直接进行实时参数化调整,因此,对通用CAD/CAM系统输出的离散化刀具路径的平滑优化具有深远的工程意义^[3]。董艇舰^[4]在航空发动气压机叶片加工中为重构叶片截面曲线,利用三次B样条曲线整体逼近拟合的方法提高了叶片的精确性。陈良基在计算机辅助控制五轴数控机床进行刀具路径规划的过程中,针对密集离散刀具数据点提出了一种剪切跳跃特征点的NURBS拟合方法,去除了大量原始离散数据点,较好地保证了拟合精度^[5]。Prabha^[6]利用样条拟合的方法,在Solidworks软件中对汽轮机叶片截面进行了模型重建,并通过编写后处理程序在五轴数控机床上对叶片进行加工。肖建新在双NURBS曲线轨迹的基础上求解五轴CNC的非线性效应,生成平滑的插补数据,实现加工效率、质量和加工精度的均衡提升^[7]。上述研究都基于NURBS样条曲线拟合的方法进行逆向建模^[8],成功拟合出样

条曲线并规划出刀路,但并未对用来拟合样条的数据进行格式及坐标系转换等处理以保证加工精度,也没有进行刀轴矢量分析^[9]来优化加工工序。

眼镜片的尖边加工作为镜片整个加工流程中不可缺少的环节之一,其加工面的精确度及平滑完整程度决定着镜片与订制镜框的嵌合紧密性,整体加工流程的工序直接影响镜片的加工面精度及顺滑程度。在传统镜片磨边加工生产线中,为保证所加工尖边符合加工要求,经历换刀、换料等多道工序后还需要加工人员人为判断加工后镜片的可用性,以便调节机床的各项参数,生产工序复杂且生产周期过于冗长。郭彩萍^[10]利用电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)测量镜片轮廓,将CCD电信号放大转换为图像进行镜片轮廓测量,但CCD测量精度较低,且轮廓曲线未进行平滑优化,加工刀路和加工细节还有很大的改善空间。为改善上述情况,在CNC和计算机辅助设计的基础上^[11],本文运用NURBS曲线拟合算法对镜框凹槽模型曲线进行精确表达,完成了加工过程中的刀具路径规划^[12]、刀位文件生成、刀具轨迹仿真、后处理及NC代码生成等工作。在已有研究的基础上^[4-7,10],根据镜片加工的实际需求,基于NURBS曲线拟合算法在UG NX环境中逆向重构镜框凹槽曲线,用以规划加工刀路和约束刀轴矢量,设计了一套镜片加工流程。最后,对两组不同曲率半径的镜片进行加工,探究该加工方法对眼镜片尖边的整体精度和表面光顺程度的影响。

2 加工原理

2.1 眼镜镜片 CAD/CAM 加工流程

眼镜镜片加工从建模到刀路生成是系统工程,本文基于 CNC 技术研究一种眼镜镜片专用 CAD/CAM 加工流程,设计镜片加工刀具模型及规划镜片加工刀路^[13],并在 Unigraphics NX 软件中完成镜片尖边加工路径曲线的拟合及优化。整体加工流程如图 1 所示。

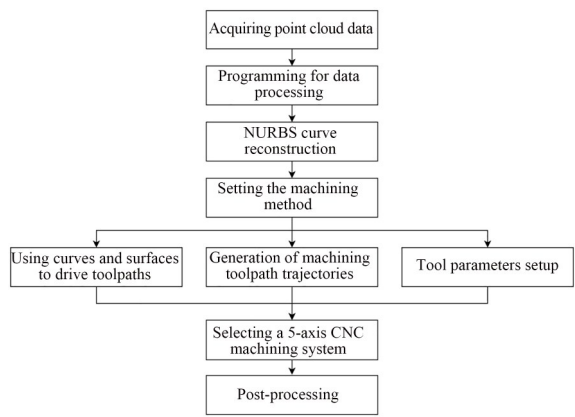


图 1 镜片加工 CAD/CAM 系统流程

Fig. 1 Flowchart of lens machining CAD/CAM system

2.2 数据收集及预处理

本文利用 NIDEK LT-1200 扫描仪(明月镜片股份有限公司)扫描镜框的各项数据,该扫描仪扫描触针在任何轴线角和高度都与框架垂直,可自动调整触针至框架内侧的接近角,并追踪测量框架弧度、框架形状。扫描数据要包含镜框周长、弧度等,1 000 个扫描样本点逆时针沿镜架左框或右框一周 360°平均取点,相邻两点间的角度间隔为 0.36°,扫描数据的测量精度达到 ±0.01 mm,所有测得数据都存储为符合眼视光学仪器标准的 OMA 格式文件。

在实际测量过程中,探测触针的移动方式如图 2 所示,1 为扫描仪触针前后移动机构,2 为探测触针,3 为探针旋转移机构。在镜框放置于扫描仪中卡紧时,探测触针升起处于转盘中心,测量开始后,触针随着 1 和 3 的复合移动,时刻贴紧镜框凹槽,旋转一周后回到初始位置,测量结束。

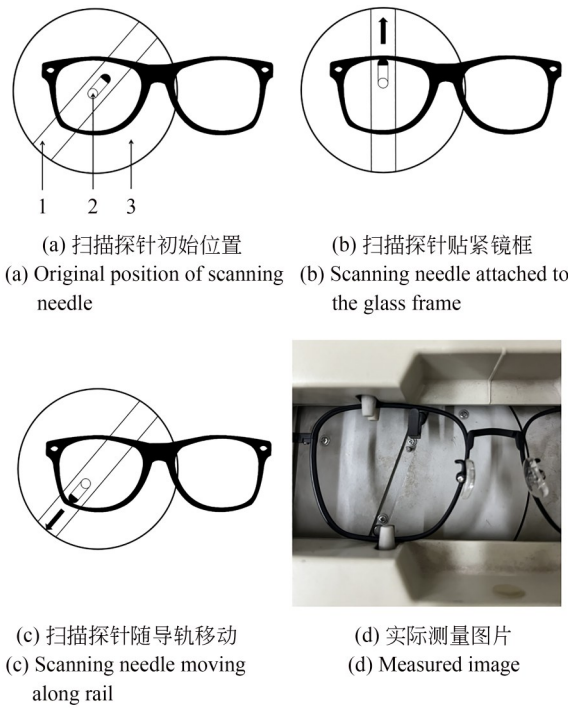


图 2 镜框扫描测量过程

Fig. 2 Frame scanning and measurement process

由于 LT-1200 扫描仪采用机械探针触发式测量,测量扫描路径为探针嵌入镜框凹槽周转一圈的路径点位,每一次获取被测路径上的坐标值均为极坐标数据,故需要进行自动扫描仪与样条拟合处理过程之间的坐标系转换,如图 3 所示。

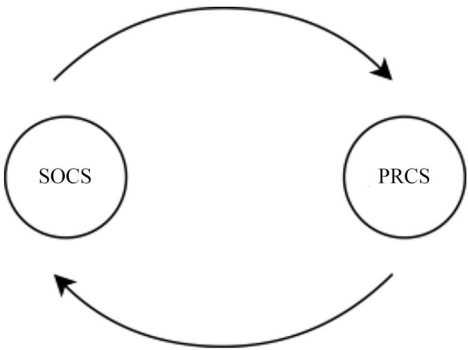


图 3 坐标系转换关系示意图

Fig. 3 Coordinate system transformation relationship

SOCS (Scanner's Own Coordinate System): 扫描仪坐标系,即扫描仪自身的局部坐标系。

PRCS(Project Coordinate System):项目坐标系是一种局部坐标系,在把点云数据拼接拟合后选择适当模型环境的坐标系放置拟合后的样条曲线。

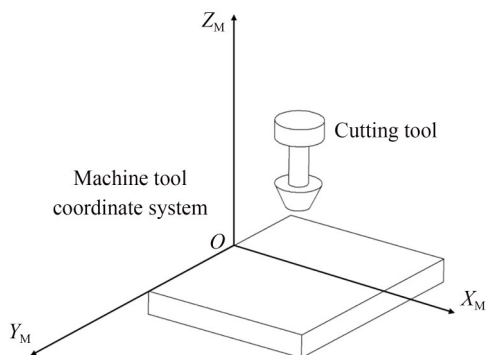


图4 机床坐标系

Fig. 4 Machine tool coordinate system

放置样条曲线的项目坐标系为机床坐标系,如图4所示。在机床坐标系下,刀具路由3个平动位移量和2个旋转角度值来共同表示。机床的回转运动可以绕着X,Y,Z分别进行,将扫描仪测量得出的OMA文件中的1 000个三维球坐标数据转换为适用于机床加工的空间直角坐标数据:

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \phi \\ y = r \sin \theta \sin \phi, \\ z = r \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

其中: r 为极径, θ 为测量中心 P 点的极角, ϕ 为测量中心 P 点在 XY 平面上的投影与正 x 轴的夹角。但在OMA文件中,角度 ϕ 为1 000个等差递增的角度 ϕ_i ,极径 r 分别是1 000个角度下对应变化的极径值 R_i , z 坐标为测量仪器直接测量得出的对应值 Z_i ,故不需要再测量极角 θ 。因此推导转换公式为:

$$\begin{cases} x_i = R_i \cos \phi_i \\ y_i = R_i \sin \phi_i, \\ z_i = Z_i \end{cases} \quad (2)$$

其中: R_i 与 Z_i 都为每一个测量对应的极径和 Z 值, ϕ_i 则表示为:

$$\phi_i = i \cdot \phi_0. \quad (3)$$

并将转换后的坐标值处理为便于UG NX进

行样条拟合的三维坐标矩阵形式如下:

$$T_{3D} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_k & Y_k & Z_k \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: k 为扫描仪细化分割所测数据的样本点数,实验中所采样点数为1 000个。

为充分利用UG良好的建模能力,编写相应程序用于OMA文件的读取及转换,保证点云数据通过dat.格式导入UG中拟合重建镜框曲线,实现镜框扫描数据在UG环境中的可视化。

2.3 NURBS曲线拟合算法

针对刀具路径的几何特征,根据加工过程的实际需要,选择并运用基于B样条函数(B-spline Function)的NURBS曲线精确拟合的方法,通过一系列控制点和节点来定义曲线的形状,以最佳方式逼近数据点。

NURBS曲线即非均匀有理B样条。在B样条曲线的定义范畴中,可以给NURBS曲线进行定义,设 $D(u)$ 为一段NURBS曲线,那么NURBS曲线 $D(u)$ 可定义如下^[14-15]:

$$D(u) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i P_i N_{i,k}(u)}{\sum_{j=0}^N w_j N_{j,k}(u)} = \sum_{i=0}^n P_i R_{i,k}(u), \quad (5)$$

$$R_{i,k}(u) = \frac{w_i N_{i,k}(u)}{\sum_{j=0}^n w_j N_{j,k}(u)}, \quad (6)$$

其中: w_i 为权重因子, P_i 为NURBS曲线的控制点 $D(u)$, $N_{i,k}(u)$ 为 k 次规范B样条基函数, $R_{i,k}(u)$ 为 k 次有理基函数。在实际应用中,NURBS曲线取值常为 $u \in [0, 1]$,此时其节点向量通常设为: $U = [0, 0, 0, 0, u_{k+1}, \dots, u_{n-k-1}, 1, 1, 1, 1]^T$ 。

利用点云数据进行曲线拟合,在UG NX中模拟曲线^[16]的过程如图5所示。传统曲线拟合方法对刀位数据点进行了同一拟合插补^[17],虽能保证曲线接续,却在曲线中产生了拐点或直线等,容易引起刀头跳动。根据图5所示的拟合结果可知,通过NURBS曲线调整控制点后的几何曲线形状平滑^[18]并消除了拐点,与镜框形状保持一致。

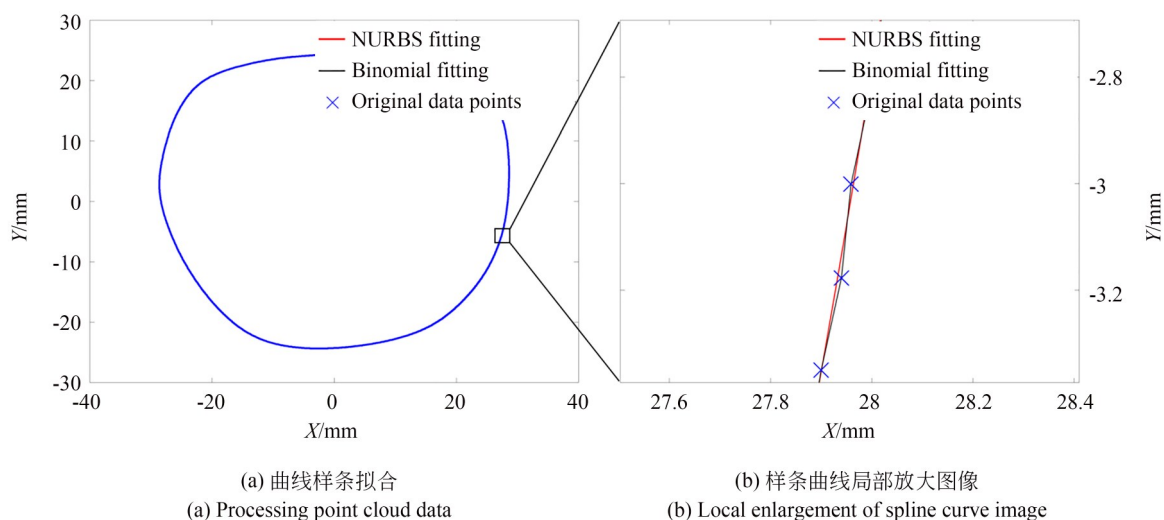


图 5 样条曲线拟合效果

Fig. 5 Process of spline curve fitting

2.4 刀具运动分析及刀轴矢量的确定

当刀轴矢量突变时,刀轴转动发生突变,刀头无法到达加工区域,导致过切或欠切,降低加工精度和表面质量。为避免该问题,基于五轴加工刀具的运动分析,首先分析刀具的运动过程,再建立刀轴矢量优化模型,实现五轴加工中刀轴矢量的平滑控制。

如图 6 所示,在加工过程中,用于镜片磨边加工的特制刀具摆动范围限定在被加工区域 Q_0 上切触点 S 的切平面之上 $1/2$ 空间内。为避免加工过程中产生顶刀及过切问题^[19],其摆动范围进一步减小,被限制在不发生顶刀的临界摆刀平面 T_L 与切平面 T_S 之间的区域。设 n_s 为切触点 S 的走

刀方向,为保证不发生顶刀和过切,临界位置应该是刀具处在与走刀方向时刻垂直的平面内,因此,切触点 S 处的临界摆刀平面 T_L 应垂直于 S 点的走刀方向 n_s ^[20]。

所选镜片的加工轮廓由 OMA 文件转换 .dat 格式中的数据点拟合。而镜片与镜框配合面不仅要保证镜片轮廓的顺滑,还要保证镜片边沿卡入镜框的尖边精度。具体步骤如下:切割镜片的刀轴轴线需要与镜片球面时刻成法向垂直,通过这种位置定义可使镜片轮廓加工的专用刀头准确进刀,使镜片轮廓的加工面与镜框卡槽紧密嵌合。因此在设置刀路参数前,根据所加工镜片的基准曲面的曲率半径创建相同曲面,用于驱动刀路和定义刀轴方向。在眼镜片设计中,设计不同曲率半径的镜片前需确定一个基准曲面的光焦距,基准曲面光焦距与镜片整体的弯曲程度直接相关。加工尖边时,不同曲率半径的镜片所使用的刀轴驱动曲面不可混合使用,基准曲面光焦距不同加工路径曲线的弯曲程度不同。

在分析所得的刀具运动临界区域的基础上,设刀轴矢量为 n_d ,样条曲线在切触点 S 处的切线为 T ,在切触点处与镜片曲面的切平面为 M ,刀头与镜片毛坯切触点 S 则始终在所拟合出的样条曲线 η 上,该样条曲线则为镜片表面上的刀具轨迹。刀轴、刀轨与被加工曲面的关系如图 7 所示。

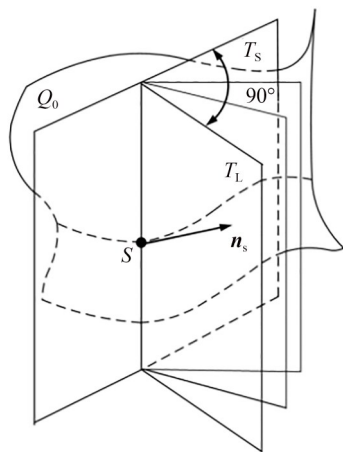


图 6 刀具运动分析

Fig. 6 Tool motion analysis

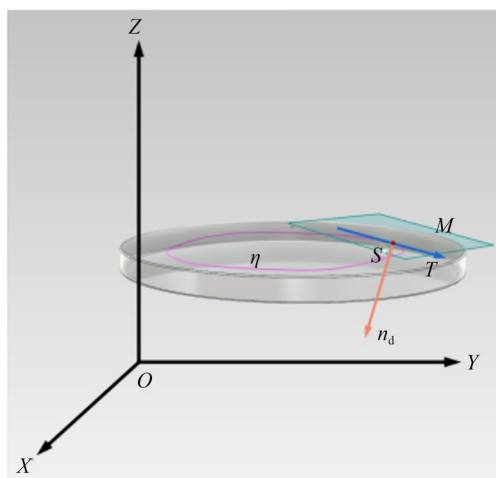
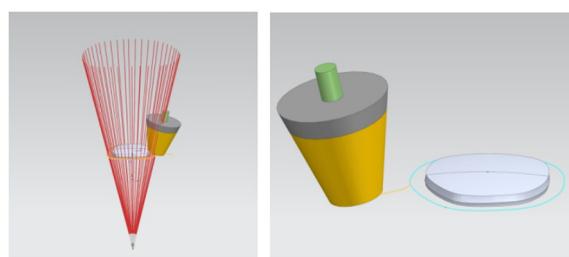


图7 刀轴、刀轨与被加工曲面的关系

Fig. 7 Relationship of tool axis and tool path with machined surface

利用设计的这种刀轴矢量确定方法,刀轴在被加工曲面和潜在干涉区面上的运动平滑稳定,没有出现刀轨变化剧烈和抖动的现象,优化后的刀轴保持不变,能够线坠改善机床运动性能,避免刀具干涉,如图8所示。由UG NX中对走刀路径和刀轴矢量的模拟可以看出,刀轴矢量统一朝向过曲面上轨迹曲线的法向量,专用刀具凹槽主刀部分时刻沿镜片被切割边缘行进,满足加工精度和加工需求,与此同时镜片尖边加工过程被显著简化,提高了加工效率和工件表面质量。



(a) 刀轴矢量
(a) Tool axis vector

(b) 走刀路径
(b) Tool path

图8 刀轴矢量及走刀路径

Fig. 8 Tool axis vector and tool path

2.5 后处理

后置处理是数控加工自动编程过程中一个重要组成部分。自动编程经过刀具轨迹计算产生的不是数控程序,而是刀位数据文件,把刀位数据文件转换成指定数控机床能执行的数控程序过程称为后处理。

在实际加工工件过程中,软件自动编程生成的NC代码受到软件本身的控制和影响,无法直接应用于机床加工,而且软件目前已有的通用后处理无法适用于所有机床,需要根据目标机床的代码特性进行分析,创建出适用于目标机床的后处理器^[21]。UG软件提供的后处理创建模块非常简便,用户可以直接通过图形化界面对机床控制系统参数、辅助命令格式进行配置,利用配置好的后处理器生成的NC代码可以直接导入机床进行实际加工,开发出符合五轴联动数控机床要求的后处理器。如图9所示,后处理时,刀具路径必须根据不同的数控机床及数控面板的独特参数进行修改。

后处理时,刀具路径必须根据不同的数控机床及数控面板的独特参数进行修改。

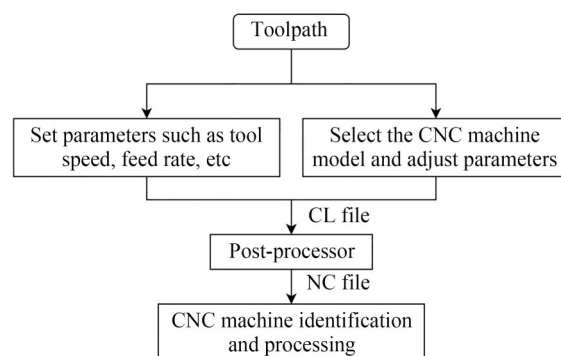


图9 后处理流程

Fig. 9 Post-processing flowchart

3 加工实例及测量分析

3.1 机床及刀具参数

本文加工镜片使用RIKE全自动车片机,这是一种专为成镜加工的五轴联动数控机床,可加工多种材质的镜片,加工精度达 $\pm 0.008 \sim \pm 0.010$ mm,集成割片、铣槽、钻孔等加工工序,不同工序可以根据需求组合转换,一次完成多道工序^[22]。

传统锥铣刀主要是直径小、长径比大,整体的强度和刚性不足,且无法在较少走刀圈数内加工处理出镜片尖边,故本文针对锥形铣刀进行重新设计及刀具建模,探讨更适合于镜片加工尖边的刀具结构形式^[23-24]。根据加工需求,对实验使用的铣刀进行完全参数化建模,如图10所示。眼镜片加工专用锥形铣刀的主要几何参数如表1所示。

待加工的镜片毛坯是折射率为1.55的非球

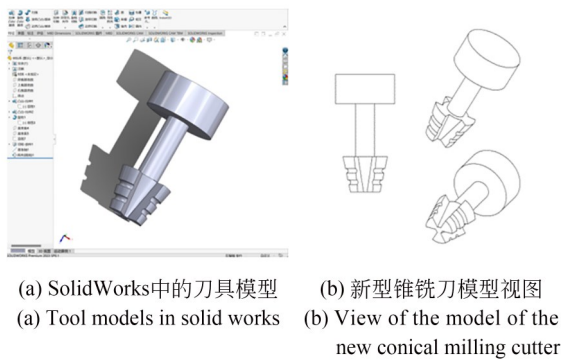


图 10 专用锥形铣刀

Fig. 10 Special conical milling cutter

表 1 新型锥铣刀的几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of novel conical milling cutter

刃径	刃长	锥度角	夹头直径	刀柄直径	刀柄长度
25 mm	30 mm	12°	50 mm	10 mm	45 mm

面树脂实验用片。该镜片的透过率为 84%~90%，透光性好，折射率适中，树脂材质密度低、抗冲击力强，但导热性低、材质较为柔软，加工过程中需要控制刀头转速，防止加工产热较高导致镜片变形影响光学性能，故需保证刀头转速在 2 500~3 000 r/min 左右。

加工时，传统刀具在工件加工中吃刀量较大，可以切出镜片形状但无法加工出尖边，加工尖边还需更换尺寸较小、精度更高的铣刀，大大增加了加工工序和时间。本文设计的专用铣刀的主刀部分为刀面凹槽，刀具凹槽与镜片毛坯直接接触，在镜片切型的同时，利用凹槽主刀部分留下尖边余量，既能保证切出符合镜框的镜片形状，亦能完整切出嵌入镜框的尖边部分，刀具切削关系如图 11 所示。

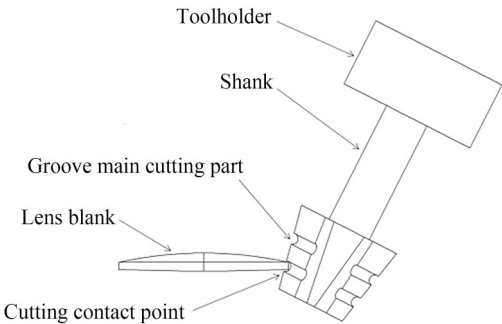


图 11 刀具切削关系

Fig. 11 Tool cutting relationship

3.2 加工过程及误差分析

在镜片毛坯进入机床加工之前，首先要对镜片进行找正。眼镜片的加工过程较为特殊，为保证佩戴眼镜片时按预期矫正佩戴者的屈光不正，则需要镜架几何中心、镜片光学中心以及瞳孔重合，保持光轴相一致。佩戴者的瞳孔时刻与镜片光学中心重合，当镜片的光学中心无法与镜框的几何中心重合时，那么在镜片磨边过程中就要进行镜片移心，以此来找正眼镜片毛坯的加工中心，与机床坐标系相匹配。镜片移心分为垂直移心与水平移心，在进行水平移心时，设镜架的几何中心水平距为 m ，佩戴者的瞳距为 D_p ，那么水平移心量 C 的计算及移动方向如下：

$$C = \frac{(m - D_p)}{2}. \quad (7)$$

当 $m = D_p$ 时，无需移动；当 $m > D_p$ 时，光学中心向鼻侧移动；当 $m < D_p$ 时，光学中心向颞侧移动。

当进行垂直移心时，设镜架垂直高度为 h ，镜片的光学中心高度为 H ，垂直移心量 V 的计算及移动方向如下：

$$V = H - \frac{h}{2}. \quad (8)$$

当 $H = \frac{h}{2}$ 时，无需移动；当 $H > \frac{h}{2}$ 时，光学中心向上方移动；当 $H < \frac{h}{2}$ 时，光学中心向下移动。

确定镜片的光学中心后，将磨镜防滑吸盘中心对准镜片的光学中心后进行加工。

将生成的代码导入 RIKE 990J 五轴联动全自动车片机^[25]进行加工，加工过程如图 12 所示。

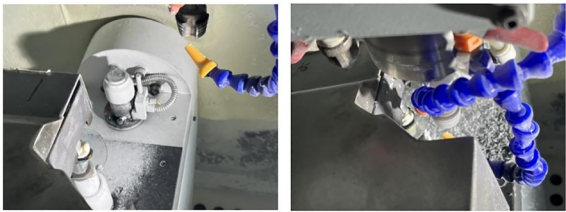


图 12 五轴数控机床镜片加工实例

Fig. 12 Five-axis CNC machine lens machining example

图 13 分别是优化后的刀轴路径在五轴数控机床上进行自动加工的镜片(上半部分)及通过传统手动镜片磨边机进行手动加工后的镜片(下

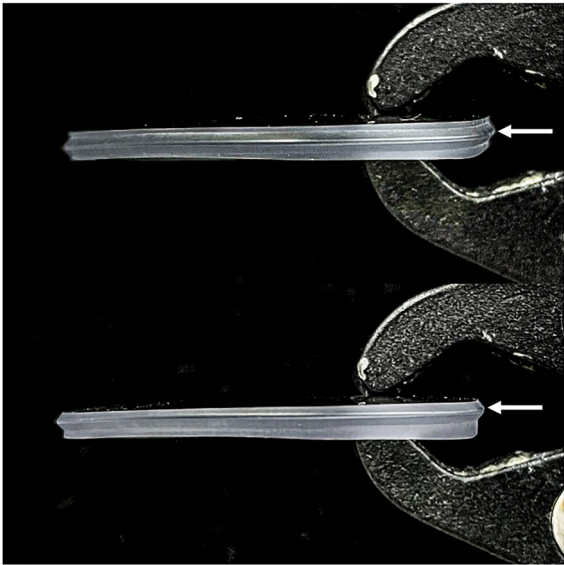


图 13 镜片尖边加工效果
Fig. 13 EImage of machined lens edge

半部分),可以看出,通过构造被加工曲面优化刀轴矢量后加工出的镜片尖边按照预期处于镜片切面正中位置,尖边明显且均匀,便于与镜框装配;手动磨边加工出的镜片虽然尖边明显,但尖边未均匀处于切面正中,而是偏上位置,无法与镜框装配紧密。

使用游标卡尺测量两种方法的加工精度,游标卡尺的测量精度为 $\pm 0.01\text{ mm}$,镜框数据取自扫描仪测得的镜框几何中心的垂直高度,镜片测量数据通过游标卡尺测量被加工镜片几何中心的垂直高度,两组镜片的测量数据及误差如表 2 所示。

表 2 加工精度对比			
Tab. 2 Processing accuracy comparison (mm)			
镜 片	加工镜片 测量数据	镜框垂直高 度扫描数据	误差
机床加工镜片(左片)	45.55	45.54	+0.01
手工加工镜片(左片)	45.64		+0.10
机床加工镜片(右片)	45.21	45.29	-0.07
手工加工镜片(右片)	45.56		+0.27

由表 2 可知,按照本研究方法在机床上加工出的镜片测量数据与镜框扫描数据差距更小,最大误差不超过 0.07 mm ,最小误差接近

0.01 mm ,均小于 $\pm 0.1\text{ mm}$,与扫描数据更接近并符合光学镜片的加工误差要求^[26],通过五轴数控机床加工实例测量验证了该加工流程的可靠性。

4 结 论

本文研究了一种基于 UG NX 的五轴数控加工流程,旨在改善和优化镜片加工流程。利用点云数据扫描仪对镜框进行扫描以及科学参数化处理,将符合眼镜片加工标准的 OMA 文件中的球坐标数据转换为 NURBS 曲线拟合所需的格式。采用 NURBS 曲线拟合算法恢复刀路轨迹的连续性,并配合专用新型锥铣刀加工镜片,提高镜片加工的精度和效率。设计并建立一种控制刀轴矢量平滑变化的刀轴驱动约束方法,通过曲线驱动刀轴和镜片曲面法向量约束刀轴使刀头平滑进给,将刀轨文件经过后处理转换为 NC 文件。对两组曲率半径不同的眼镜片进行加工,得出符合镜框凹槽的尖边,进行加工测量和误差分析。测量结果显示,该曲线重建方法和刀轴驱动方式完全符合镜片尖边的加工需求,根据本文方法拟合出的刀路曲线进行加工显著缩短了加工周期,利用专用加工刀具避免了先切型后切边的情况,沿着精简后的加工路线可以同时加工片型及尖边。在满足加工需求的同时,对眼镜片尖边的相应误差测量数据进行分析,边光顺无毛刺,加工误差最大不超过 0.07 mm ,最小误差接近 0.01 mm ,与扫描数据差距微小,后期镶嵌镜片更为流畅。由于尖边测量存在一定误差,实际的边缘误差能够满足尖边的机械加工精度要求。

目前,应用广泛的眼镜片磨边机无法对镜框数据进行参数调整,亦无法调整需求。由于人工操作过于繁琐,需要人为换刀换料,在大批量镜片尖边加工过程中,加工效率较低,本文方法不但满足不同镜框参数的尖边加工需求,当同一镜框参数下镜片尖边大批量生产时,加工过程精简且高效的优势尤为明显。在此基础上,后续可以进一步通过曲线、曲面拟合重建并驱动刀轴的方法对医疗器械中含有大量曲线曲面的机械结构进行精准加工,提高加工面的精确度和光滑性,缩减加工流程并提高加工效率。

参考文献:

- [1] HUGHES T J R, COTTRELL J A, BAZILEVS Y. Isogeometric analysis: cad, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2005, 194(39/40/41): 4135-4195.
- [2] LEI C L, NUKMAN Y, YAP H J, *et al.* Local tool path smoothing based on symmetrical NURBS transition curve with look ahead optimal method: experimental and analytical study[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 126(3/4): 1509-1526.
- [3] ZHANG H R, WU Y J, SHEN Z B, *et al.* Mixed tiny path smoothing method based on sliding convolution windows for CNC machining[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 102: 685-699.
- [4] 董艇舰, 桑超, 张吉. 航空发动机压气机叶片的逆向建模及应用[J]. *机械设计与制造*, 2022(1): 193-197.
DONG T J, SANG CH, ZHANG J. 3D model reconstruction and its application of aeroengine compressor blades[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2022(1): 193-197. (in Chinese)
- [5] CHEN L J, WU W Y, LI H Y, *et al.* Five-axis NURBS toolpath fitting method based on shear leap characteristic points[C]. 2022 *IEEE International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA)*. February 25-27, 2022. Changchun, China. IEEE, 2022: 855-858.
- [6] ARUNA P K, BALLA S P. Machining of steam turbine blade on 5-axis CNC machine[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 18(7): 3001-3007.
- [7] XIAO J X, ZHANG H, LI B R. A dual NURBS curve five-axis interpolator with interval division under axial kinematic constraints[J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2024: 1-11.
- [8] WEIR D J, MILROY M J, BRADLEY C, *et al.* Reverse engineering physical models employing wrap-around B-spline surfaces and quadrics[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 1996, 210(2): 147-157.
- [9] YANG J X, ALTINTAS Y. Generalized kinematics of five-axis serial machines with non-singular tool path generation[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 75: 119-132.
- [10] 郭彩萍. 基于线阵 CCD 镜片轮廓测量系统的研究[D]. 太原: 中北大学, 2009.
GUO C P. *Edge Detection System of Lens Based on Linear Array CCD* [D]. Taiyuan: North University of China, 2009. (in Chinese)
- [11] 潘云鹤, 孙守迁, 包恩伟. 计算机辅助工业设计技术发展状况与趋势[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 1999, 11(3): 248-252.
PAN Y H, SUN S Q, BAO E W. The current developing situation and trend of computer aided industrial design technology[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 1999, 11(3): 248-252. (in Chinese)
- [12] PETROVIC A, LUKIC L, IVANOVIC S, *et al.* Optimisation of tool path for wood machining on CNC machines[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2017, 231(1): 72-87.
- [13] CHENG Y N, GUAN R, ZUO D G, *et al.* Design and research on the special system for high efficient manufacturing of blisk based on UG[J]. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2016, 9(10): 289-302.
- [14] PIEGL L, TILLER W. *The NURBS Book* [M]. 2nd Ed. New York: Springer, 1995.
- [15] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条: CAGD & NURBS[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994.
SHI F ZH. *Computer Aided Geometric Design and Non-uniform Rational B-spline: CAGD & NURBS* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 1994. (in Chinese)
- [16] 袁夏. 三维激光扫描点云数据处理及应用技术[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
YUAN X. *Data Processing and Application Technology of Three-dimensional Laser Scanning Point Cloud* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [17] 冯肖维, 胡海云, 庄睿卿, 等. 三维点云自适应稀疏优化重构[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(10): 2495-2503.
FENG X W, HU H Y, ZHUANG R Q, *et al.* Adaptive reconstruction of 3D point cloud by sparse optimization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(10): 2495-2503. (in Chinese)
- [18] 周广利, 陈帅, 王超, 等. 基于 NURBS 技术的船

- 体几何重构研究与实现[J]. 应用科技, 2021, 48(1): 6-11, 17.
- ZHOU G L, CHEN SH, WANG CH, *et al.* Research and implementation of hull geometry based on NURBS technology [J]. *Applied Science and Technology*, 2021, 48(1): 6-11, 17. (in Chinese)
- [19] 张佳康, 陈家璧, 魏叶飞, 等. 内渐进镜片加工中的过切判据的研究[J]. 光学仪器, 2016, 38(4): 331.
- ZHANG J K, CHEN J B, WEI Y F, *et al.* Research of the causes of over-cutting on the process of interior progressive addition lenses [J]. *Optical Instruments*, 2016, 38(4): 331. (in Chinese)
- [20] 毕庆贞, 王宇晗, 朱利民, 等. 刀触点网格上整体光顺五轴数控加工刀轴方向的模型与算法[J]. 中国科学E辑, 2010, 40(10): 1159-1168.
- BI Q ZH, WANG Y H, ZHU L M, *et al.* Model and algorithm of five-axis NC machining tool axis direction with integral fairing on tool contact grid [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2010, 40(10): 1159-1168. (in Chinese)
- [21] 段春辉. 五轴联动数控机床通用后置处理系统研制[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- DUAN CH H. *Development of Universal Post-processing System for Five-axis NC Machine tools* [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [22] LIU H L, WANG Y, DONG J C. Application of combined optimization strategy and system of CNC machining parameter[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2022, 14(7): 168781322211100.
- [23] 刘志兵, 王西彬, 解丽静, 等. 微细切削刀具的特征及其制备技术[J]. 工具技术, 2006, 40(10): 16-19.
- LIU ZH B, WANG X B, XIE L J, *et al.* Characteristics of micro-cutting tool and its manufacturing technology[J]. *Tool Engineering*, 2006, 40(10): 16-19. (in Chinese)
- [24] HERRAZ M, REDONNET J M, MONGEAU M, *et al.* A new method for choosing between ball-end cutter and toroidal cutter when machining free-form surfaces[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111(5/6): 1425-1443.
- [25] 王晶, 张定华, 罗明, 等. 复杂曲面零件五轴加工刀轴整体优化方法[J]. 航空学报, 2013, 34(6): 1452-1462.
- WANG J, ZHANG D H, LUO M, *et al.* A global tool orientation optimization method for five-axis CNC machining of sculptured surfaces [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(6): 1452-1462. (in Chinese)
- [26] 程亚平, 张恩忠, 齐月玲, 等. 光学自由曲面精密数控机床几何误差测量与综合建模[J]. 光学精密工程, 2017, 25(10s): 174-182.
- CHENG Y P, ZHANG E ZH, QI Y L, *et al.* Geometric error measurement and integrated modeling for precision CNC machine tools of optical free-form surface [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(10s): 174-182. (in Chinese)

作者简介:



李宏涛(1998—),男,甘肃酒泉人,硕士研究生,2020年于上海理工大学获得学士学位,主要从事五轴数控机床加工镜片的研究。E-mail: 961474291@qq.com

通讯作者:



项华中(1986—),男,安徽安庆人,博士后,副教授,2012年于上海理工大学获得硕士学位,2016年于上海理工大学获得博士学位,主要从事医学光学与视光学的研究。E-mail: xiang3845242@usst.edu.cn