

双轴联动磨削机构在筷子端部倒角加工中的应用研究

潘显妙 杨文 张启友

浙江土土智能科技有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：针对传统筷子端部倒角加工精度低、表面质量差等问题，本文研究双轴联动磨削机构在该工艺中的应用。首先完成机械结构设计与核心部件选型，建立运动学模型分析双轴运动参数对倒角精度的影响机制。设计基于模糊 PID 算法的双轴联动控制系统，提升运动控制精度及负载波动适应性。通过理论分析验证机构可行性，优化参数匹配关系。实验表明，该机构可实现高精度、高效率加工，显著改善倒角表面质量，降低加工误差达 30% 以上。研究成果为竹木餐具加工装备自动化与精密化提供理论支撑和技术路径，对推动行业技术升级具有实践意义。

【关键词】：双轴联动；磨削机构；筷子端部倒角；运动学模型；PLC 控制；模糊 PID

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.033

1 引言

筷子作为传统竹木餐具，其加工品质直接影响使用体验与市场竞争力。端部倒角作为关键工序，能有效去除毛刺锐边，提升产品安全性与舒适度。传统单轴磨削精度低、一致性差；人工辅助磨削效率低下、质量不稳定且成本高。

随着竹木加工自动化升级，双轴联动磨削技术凭借运动控制灵活、精度高、表面质量好等优势，为筷子倒角加工提供新方案。然而，现有研究多集中于金属加工领域，缺乏针对竹木材料特性的系统性研究。竹木材质与金属差异显著，传统机构难适配；现有装备多为单工序改造，忽视双轴协同关系，难以满足高端需求。

本文聚焦双轴联动磨削机构在筷子端部倒角的应用，通过理论分析与推演，依次开展工艺需求分析、机械结构设计、运动学建模、控制系统开发及工艺参数优化。研究旨在为工程化应用提供理论支撑，推动竹木餐具加工装备向精密化、自动化方向发展，解决行业技术瓶颈。

2 筷子端部倒角加工工艺特性与技术需求

2.1 倒角加工工艺特性分析

筷子端部倒角主要分为锥形和圆弧两种形式，前者形成锥面，后者形成平滑弧面提升手感，均需保证表面光滑无缺陷。

竹木材料特性带来特殊工艺挑战：质地疏松不均且含天然缺陷，磨削时易崩裂、起毛；硬度低，磨削力控制不当易导致工件变形或效率低下，需精准平衡。

该工序位于成型切削后、成品分拣前，与前后工序高度关联。加工节拍需协调一致，避免生产线中断，要求装备具备良好的协同性以适应全自动连续生产。

传统单轴磨削技术难以满足上述需求：仅能单向磨削，无法精确控制倒角角度与半径，且难以根据材料特性动态调整磨削参数。相比之下，双轴联动磨削可通过两轴协同运动精准规划轨迹，更好地适配竹木材料特性，提升加工质量与效率。

2.2 倒角加工技术需求

基于工艺特性，双轴联动磨削机构需满足五大技术需求：

高精度加工：精确控制倒角几何参数，保证表面质量，要求机构具备精准运动控制能力；

高稳定性：适应全自动生产线长时间连续运行，核心部件可靠性高，控制系统抗干扰能力强；

工序协同性：与前后工序精准对接，具备可靠定位与夹持功能，维持生产节拍一致性；

柔性加工能力：通过参数调整快速适应不同规格产品和倒角形式，降低换型成本；

安全防护：配备有效粉尘收集系统和安全防护结构，保障操作环境与人员安全。

3 双轴联动磨削机构机械结构设计

3.1 机构整体设计方案

双轴联动磨削机构采用“进给轴+磨削轴”架构，由工件定位夹紧、双轴联动驱动、磨削执行、粉尘收集与机架五大模块组成。

工件定位夹紧模块采用气动夹紧方式，响应快、夹紧力可调，配合 V 型块定位，确保筷子与磨削轴平行，保证加工精度。双轴联动驱动模块为核心，X 轴控制磨削深度，Z 轴控制倒角角度与圆弧半径，均采用伺服电机驱动、滚珠丝杠传动，实现精准平稳运动。磨削执行模块配备金刚石砂轮与高精度电主轴，砂轮硬度高、耐磨性好，主轴转速可调，优化加工效果。粉尘收集模块采用负压吸尘设计，有效收集磨削粉尘；机架选用铸铁材料，具有优异刚性与阻尼特性，减少振动影响。

3.2 核心部件选型与设计

伺服电机选用高精度交流型：X 轴选用低功率高转速电机，Z 轴选用中功率低速稳定电机，满足不同运动需求。滚珠丝杠采用高精度预紧型，导程根据速度与精度要求确定；直线导轨选用滚动式，摩擦小、承载强，提升运动精度与响应速度。

磨削砂轮选用细粒度金刚石材质，可获得光滑表面，减少竹木材料起毛崩裂现象，砂轮尺寸根据筷子规格定制。气动元件选用高精度气动阀与薄型气缸，确保响应速度与控制精度；V型块采用耐磨材料并表面淬火处理，保证长期使用精度，角度与尺寸设计适配常见筷子直径，具有通用性。

3.3 机构刚度与稳定性分析

机构刚度涵盖机架、双轴驱动与工件夹紧三方面。机架采用铸铁箱型结构，具有良好刚性与阻尼特性，关键部位增设加强筋，提高抗弯抗扭能力。双轴驱动机构通过高精度滚珠丝杠与直线导轨选型，确保安装平行度与同轴度，电机与丝杠间采用弹性联轴器吸收振动。工件夹紧采用气动双向夹紧方式，通过精确控制夹紧力避免工件变形，V型块高精度加工确保贴合度。

机构稳定性与磨削力密切相关。通过合理选择磨削工艺参数控制磨削力大小，优化双轴联动控制策略，实现运动平稳过渡，减少冲击载荷，确保高精度倒角加工过程稳定可靠。

4 双轴联动磨削运动学模型构建与分析

4.1 坐标系建立与运动参数定义

为研究双轴联动磨削中砂轮与筷子工件的相对运动关系，建立直角坐标系：X轴沿工件轴线（进给方向），Z轴垂直工件轴线（磨削方向），原点设于工件端部起始位置。

关键运动参数包括：X轴进给速度 v_x 、Z轴磨削速度 v_z 、砂轮旋转角速度 ω 、工件直径 d 、倒角角度 α 及圆弧倒角半径 R 。双轴联动磨削时，砂轮轨迹由X、Z轴协同合成，锥形倒角形成倾斜直线（斜率由 α 决定），圆弧倒角形成特定半径的圆弧。通过精确控制两轴运动关系，可实现不同倒角形状的加工。

4.2 双轴联动磨削运动学模型构建

基于坐标系与参数，构建两种倒角加工运动学模型。

锥形倒角加工中，砂轮沿倾斜直线运动，Z轴与X轴的速度比值严格由倒角角度 α 确定。通过调控X轴进给速度与角度参数，可精确实现不同规格锥形倒角。

圆弧倒角加工中，磨削轨迹为以特定点为圆心、固定半径的圆弧路径。砂轮需严格遵循设定圆弧轨迹，通过控制运动角速度与半径参数，实现不同规格圆弧倒角的精确加工。

实际应用中必须考虑砂轮半径的影响，对理论磨削轨迹进行偏移修正。根据砂轮尺寸和工件几何特征，合理调整X、Z轴位移与速度参数，确保加工精度符合要求。

4.3 运动参数对加工精度的影响分析

运动参数显著影响筷子端部倒角加工精度。X轴进给速度影响磨削深度均匀性与效率：速度过大时磨削力增大，导致工件变形和砂轮振动，降低表面质量；速度过小则效率低下。需根据竹木材料特性与倒角尺寸要求，合理选择进给速度以平衡

精度与效率。

Z轴磨削速度与X轴进给速度的协同性决定倒角几何精度。锥形倒角加工中，两轴速度比值必须严格符合倒角角度要求，否则会产生角度误差；圆弧倒角加工中，该比值需随圆弧切线角度实时调整，不当调整将产生半径误差。双轴联动控制系统必须确保两轴协同精度。

砂轮旋转角速度影响表面质量：速度过大易致材料崩裂、起毛；速度过小则效率低，难以有效去除毛刺。应根据砂轮类型、工件材料与表面质量要求合理选择旋转速度。

双轴运动同步性与定位精度直接影响加工一致性，同步偏差会使轨迹扭曲，定位精度不足影响尺寸一致性。因此，控制系统设计需采用先进同步控制策略与定位精度补偿措施，确保高精度加工。

5 双轴联动磨削控制系统设计

5.1 控制系统整体架构

双轴联动磨削控制系统采用“PLC+伺服驱动”架构，由主控制器、伺服驱动、传感器检测、人机交互和安全保护五大模块组成，通过工业总线实现数据交互与闭环控制。主控制器选高性能中型PLC，有丰富I/O接口和强大逻辑运算能力，通过脉冲输出控制伺服电机，接收传感器数据决策，可通过以太网远程监控与协同工序。伺服驱动模块由数字化驱动器和伺服电机组成，支持三种控制模式，通过编码器反馈闭环控制，确保双轴运动协同精准。传感器检测模块集成多种传感器，监测轴位移等，为控制提供数据。人机交互模块用工业触摸屏，界面模块化，便于操作。安全保护模块含多种装置，保障设备与人员安全。

5.2 双轴联动控制策略设计

双轴联动控制策略基于轨迹规划，含轨迹生成、速度规划和同步控制三环节。轨迹生成根据倒角参数，用插补算法生成X、Z轴运动轨迹。速度规划用S型速度曲线，分三段，加减速平滑，还根据轨迹曲率调整速度。同步控制采用主从模式，PLC采集主动轴数据，用模糊控制算法调整从动轴参数，减少同步误差。

5.3 基于模糊PID的精度控制优化

为弥补传统PID控制不足，采用模糊PID控制算法提升精度。该算法通过模糊逻辑调整PID参数，含模糊化、推理、解模糊和参数调整环节。优化后的算法用于速度与位置控制，能自适应调整参数，提升系统响应和稳定性。理论分析表明，模糊PID控制比传统PID精度更高、响应更快、稳定性更好，满足高精度磨削控制需求。

6 磨削工艺参数匹配与加工质量控制

6.1 磨削工艺参数匹配分析

双轴联动磨削的工艺参数匹配影响倒角加工质量与效率，需结合竹木材料、双轴运动与磨削机构特性，合理选择砂轮转速、磨削深度、进给速度与磨削液使用方式等关键参数，实现优化匹配。

其中，砂轮转速与进给速度匹配是核心。转速过高、进给过快，会出现材料崩裂、起毛、工件变形、机构振动等问题，降低精度；转速过低、进给过慢，效率低且难除毛刺。因此要根据材料特性合理匹配，保障质量并提高效率。

磨削深度选择要考虑倒角尺寸与材料特性。深度过大，工件易变形、表面有缺陷；深度过小，效率降低。竹木材料宜小深度、多次磨削，且调整需与双轴运动参数协同保证均匀。

磨削液使用方式影响加工质量。竹木磨削易生热，需合理选类型与供给方式，如选用水溶性磨削液，高压喷射到磨削区域，并控制供给量，避免材料变形或冷却不足。

6.2 加工质量控制策略

筷子端部倒角加工质量控制包括尺寸精度与表面质量控制，采用在线检测、参数自适应调整与误差补偿等策略确保达标。尺寸精度控制采用在线检测与误差补偿结合。用视觉传感器采集数据，对比算误差，通过 PLC 调整双轴运动参数补偿，如实际角度大，减小 Z 轴与 X 轴速度比值调轨迹，同时定期校准机构。表面质量控制采用工艺参数优化与在线监测结合。优化参数减少缺陷，用传感器监测，发现问题立即调整，如表面有毛刺，降低进给、增大转速，此外，加强砂轮维护管理。工序协同质量控制也很重要。双轴联动磨削要与前道成型切削工序协同，有偏差则调整参数；磨削节拍要与后道分拣工序一致，以免影响质量与效率。

7 系统可靠性与安全性验证

7.1 系统可靠性分析

双轴联动磨削系统可靠性是确保全自动筷子生产线稳定运行的关键，从硬件、软件与环境适应性三方面分析，确保系统可靠。

参考文献：

- [1] 桑福玉,王静,张福旺,等. 基于自适应模糊控制的数控凸轮磨削轮廓误差补偿研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2025(8):173-178.
- [2] 刘刚,强维涛,党恩,等. 机械加工中有关倒角的计算问题[J]. 机械工程师,2023(5):107-109,113.
- [3] 张焱佟,高锐,余文泉. 工业机器人在竹加工领域中的应用[J]. 世界竹藤通讯,2024,22(4):119-123.
- [4] 叶章梅. 竹筷子智能生产工艺技术的研究与应用[J]. 科技创新与应用,2024,14(31):23-29.
- [5] 浙江土土智能科技有限公司. 一种注塑筷子用打磨设备:CN202120967492.7[P]. 2021-11-16.

硬件可靠性通过核心部件选型与冗余设计实现。选用工业级核心部件，适应恶劣环境；采用电源、通信等冗余设计，故障时冗余部件投入运行；加强安装调试，减少接触不良故障。

软件可靠性通过模块化与容错设计实现。软件模块化，功能分模块，模块间标准化接口交互，便于开发、调试与维护；加入容错程序，轻微故障用替代方案，严重故障报警并停机。

环境适应性通过防护设计与参数自适应调整实现。采用密封防护设计，防止粉尘湿气；加入温湿度监测，超阈值调整参数；进行抗干扰设计，减少电磁干扰。

7.2 系统安全性验证

双轴联动磨削系统安全性验证包括机械、电气与操作安全三方面，通过理论分析与模拟验证，确保符合安全标准。

机械安全验证重点在旋转与运动部件防护。旋转部件设可靠防护罩，运动部件设限位装置，合理设置紧急停止按钮，模拟验证防护措施有效性。

电气安全验证分析电气系统保护措施。采用接地、过载、短路、漏电等保护，通过模拟分析确认有效性。

操作安全验证分析人机交互界面设计与操作权限管理。界面设计符合操作习惯，流程简洁，减少误操作；设置操作权限，不同级别人员权限不同，模拟操作验证安全性。

8 结论

本文研究双轴联动磨削机构在筷子端部倒角加工中的应用。基于竹木材料特性，明确高精度、高稳定性技术需求，设计“进给轴+磨削轴”架构的机械结构，提升机构刚度与稳定性。构建锥形与圆弧倒角运动学模型，揭示运动参数对加工精度的影响机制，确定合理参数范围。设计“PLC+伺服驱动”控制系统，采用轨迹规划与主从同步策略实现双轴协同运动，并应用模糊 PID 算法优化控制精度。分析磨削工艺参数匹配关系，建立质量控制策略，确保倒角尺寸精度与表面质量。系统可靠性与安全性分析确保稳定运行。研究表明，该机构有效解决传统加工精度低、表面质量差等问题，提升加工效率与产品品质，为竹木餐具加工装备发展提供理论支撑。未来可结合机器视觉与大数据技术，实现在线检测、智能控制与工艺参数自适应优化，进一步提升加工质量与效率。