

全自动竹木筷子成型生产线的机电一体化控制系统开发

张启友 潘显妙 杨文

浙江土土智能科技有限公司 浙江温州 325000

【摘要】为解决传统竹木筷子生产自动化程度低、效率不足、产品一致性差等问题，推动竹木加工行业智能化升级，本文开展全自动竹木筷子成型生产线机电一体化控制系统开发研究。先明确系统核心架构与设计目标，基于工艺特性完成机械与电气系统协同设计。通过对执行单元运动学分析构建运动控制模型，实现送料、切削等工序协同。控制策略上，采用以PLC为核心的主从控制架构，结合模糊PID算法优化精度，提升系统适应性。同时设计工业以太网通信模块，实现与上位机的数据交互及生产监控调度。理论分析显示，该系统可实现全工序自动化控制，提升生产稳定性与可靠性，降低人工干预。研究成果为生产线工程化应用提供理论支撑，对推动竹木加工装备机电一体化发展意义重大。

【关键词】竹木筷子成型；机电一体化；控制系统；PLC；模糊PID；运动控制

Development of Mechatronic Control System for Fully Automated Bamboo and Wood Chopstick Forming Production Line

Zhang Qiyu Pan Xianmiao Yang Wen

Zhejiang Toutu Intelligent Technology Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325000

【Abstract】To address challenges in traditional bamboo and wood chopstick production such as low automation levels, insufficient efficiency, and poor product consistency, and to promote intelligent upgrading in the bamboo and wood processing industry, this study focuses on developing a mechatronic control system for fully automated chopstick forming production lines. The research begins with defining the system's core architecture and design objectives, followed by integrated mechanical and electrical system design based on process characteristics. Through kinematic analysis of actuator units, a motion control model is established to achieve coordinated operations in feeding and cutting processes. The control strategy employs a master-slave architecture centered on PLCs, combined with fuzzy PID algorithms to optimize precision and enhance system adaptability. An industrial Ethernet communication module is also designed to enable data exchange with host computers and production monitoring scheduling. Theoretical analysis demonstrates that this system enables full-process automation, improves production stability and reliability, and reduces manual intervention. The research findings provide theoretical support for production line engineering applications and hold significant implications for advancing mechatronic integration in bamboo and wood processing equipment.

【Key words】Bamboo and wood chopstick forming; Mechatronics; Control systems; PLC; Fuzzy PID; Motion control

1 引言

竹木筷子作为日常餐具，市场需求巨大。传统生产依赖人工与半自动设备，效率低下且质量不稳定。在劳动力成本上升与品质要求提高的双重压力下，生产线自动化、智能化升级势在必行。

机电一体化技术融合多学科优势，可实现高效精准控制。尽管该技术在竹木加工领域已有应用，但针对筷子成型工序的专用控制系统研究匮乏，现有系统普遍存在控制精度不足等问题。

本文聚焦全自动竹木筷子成型生产线控制系统开发，通过系统架构设计、机械电气协同、运动控制模型构建、控制策略优化及通信监控模块设计等多维度研究，旨在实现全工序自动化控制。研究遵循“目标分析-架构设计-系统协同-模型构建-模块开发”的技术路线，着力提升生产效率、产品一致性和系统稳定性，为竹木加工装备智能化升级提供理论与技术支撑。

2 全自动竹木筷子成型生产线工艺特性与控制需求分析

2.1 生产线工艺特性分析

全自动竹木筷子成型生产线核心功能是实现从竹木原料到成品筷子全工序自动化加工，主要工艺环节有原料筛

选、输送、定长切割、成型切削、端面打磨、质量检测与分拣，各环节有时序关系和协同要求，构成连续生产流程。

原料筛选去除尺寸不符、有缺陷的原料，保证后续原料一致性，筛选标准要精准，依直径、长度等参数判断。原料输送将筛选后的原料平稳连续送至加工工位，保证姿态稳定。定长切割把长条形原料切成定长坯料，对切割精度要求高，误差影响成品尺寸一致性。

成型切削是核心工序，通过刀具运动将坯料切成设计要求的筷子形状，工艺特性复杂，切削稳定性决定成品外观质量。端面打磨去除毛刺，提升端面光滑度，要控制打磨力度和时间。质量检测与分拣检测成品参数，分拣不合格产品，需快速响应，保证生产线连续运行。

整体而言，生产线工艺连续性强、环节协同要求高、关键工序精度要求严，为机电一体化控制系统开发提出技术约束。

2.2 控制系统核心需求分析

基于生产线工艺特性，机电一体化控制系统需满足以下需求。一是工序协同控制，各环节按预设时序有序运行，实现原料输送、加工、检测、分拣无缝衔接，如输送与切割、切削与输送单元精准协同。

二是高精度运动控制，关键加工环节尺寸精度决定产品质量，控制系统要精准控制执行机构运动轨迹和速度，如定长切割误差控制在毫米级以内，成型切削精准控制刀

具速度。

三是系统稳定性与可靠性，生产线要长时间连续运行，控制系统抗干扰能力强，能应对扰动因素，具备故障诊断功能，提升可维护性。

四是实时监控与调度，控制系统实时采集运行参数并传至上位机，实现实时监控，上位机可根据需求调整运行参数，实现柔性管控。

五是人机交互友好性，控制系统有简洁直观的人机交互界面，操作人员可通过界面设置参数、控制启停、查看状态和故障信息，界面设计符合工业操作习惯，降低学习成本。

3 机电一体化控制系统整体架构设计

3.1 系统架构设计原则

全自动竹木筷子成型生产线控制系统遵循模块化、协同性、可靠性、可扩展性四大原则。模块化将系统划分为独立功能模块，通过标准化接口交互，便于维护升级；协同性确保执行单元运动与工艺精准匹配，实现工序无缝衔接；可靠性采用成熟元器件与抗干扰设计，集成故障诊断与容错机制，保障稳定运行；可扩展性支持功能灵活扩展，避免架构重构。

3.2 系统整体架构组成

系统采用分层架构：

监控层：工业计算机为核心，负责人机交互、实时监控、参数设置及生产调度，支持柔性生产调整。

控制层：PLC 为主控制器，执行逻辑运算与模糊 PID 算法，生成控制指令，具备故障诊断能力。

驱动层：伺服驱动器等设备将指令转换为动力输出，通过信号反馈形成闭环。

执行层：机械机构在驱动下完成动作，传感器实时采集数据反馈至控制层。

各层通过标准化接口交互，构成完整控制闭环。

3.3 系统核心控制逻辑

系统融合时序控制与闭环反馈：

时序协同：监控层下发参数，控制层按预设工艺时序触发工序。例如，原料到达切割工位时，位置传感器反馈信号，控制层启动切割电机；完成后，指令输送机构移送坯料并激活成型切削机构。

闭环精准控制：控制层实时比对预设与传感器反馈参数（如刀具速度），通过模糊 PID 算法计算偏差，优化指令调整驱动层输出，直至参数一致。

该逻辑确保工序高效协同与高精度加工，适应复杂生产需求。

4 机械系统与电气系统协同设计

4.1 机械系统核心部件选型与设计

机械系统核心部件需满足工艺精度与运行稳定性：

输送机构：高强度橡胶皮带，异步电机驱动，关键位置设导向装置防偏移；

定长切割机构：高速钢圆盘锯片，伺服电机精准控制，配备压紧装置；

成型切削机构：硬质合金刀具，多轴联动伺服系统，集成冷却装置；

打磨机构：细粒度砂轮，步进电机驱动，压力传感器实

时监测力度；

分拣机构：高性能气缸执行，响应速度快，定位精度 $\pm 0.5\text{mm}$

4.2 电气系统核心部件选型与设计

电气系统选型注重与机械匹配：

控制系统：中型 PLC（16 位处理器，256KB 内存），支持以太网通信；

驱动单元：数字化伺服驱动器（定位精度 $\pm 0.01\text{mm}$ ），矢量变频器（调速比 1:100），高性能步进驱动器（细分 1/256）；

传感系统：光电/接近开关（位置检测），编码器（速度反馈），应变片式压力传感器（力控），工业视觉系统（尺寸/外观检测，精度 $\pm 0.05\text{mm}$ ）；

人机界面：7 英寸工业触摸屏，IP65 防护等级，支持参数设置与状态监控。

4.3 机械与电气系统协同匹配分析

系统协同从三方面实现精准匹配：

运动特性匹配：伺服系统驱动高精度工序（切割/成型），变频系统驱动连续工序（输送）；

动力需求匹配：依据负载特性选型，输送机构选用 3kW 异步电机，成型切削机构配置 1.5kW 伺服电机；

控制精度匹配：切割环节采用闭环控制（位置传感器+伺服系统），打磨环节采用开环+压力反馈控制。

此外，优化传感器布局与信号线屏蔽设计，采用双绞屏蔽电缆与接地处理，确保信号传输抗干扰能力，实现机械动作与电气控制的毫秒级同步响应。

5 运动控制模型构建与控制策略优化

5.1 执行单元运动学分析

各执行单元运动特性各异：输送单元为直线运动（位移公式 $s = vt$ ），通过变频器调节电机转速控制线速度；定长切割单元含刀具旋转（角速度 $\omega = 2\pi n / 60$ ）与直线进给运动，需通过位置传感器协同速度；成型切割单元为多轴联动，需建立运动学方程规划轨迹；打磨单元结合砂轮旋转与进给运动，依据材质动态调整参数；分拣单元由气缸驱动直线往复运动，依赖气动阀实现精准响应。运动学分析为控制模型提供理论基础。

5.2 运动控制模型构建

系统采用模块化运动控制模型，由 PLC 统一协调：

输送模块：速度闭环控制，协同后续工序；

切割模块：基于位置反馈精准定长，切割后触发输送至下一工位；

成型模块：多轴联动控制，通过轨迹规划与插值算法生成平滑路径，实时闭环调参；

打磨模块：压力与转速双闭环，压力传感器及编码器反馈调节步进电机；

分拣模块：视觉检测联动气动系统，快速剔除不合格品。各模块通过标准化接口交互数据，确保时序协同与精度。

5.3 基于模糊 PID 的控制策略优化

针对传统 PID 在扰动下适应性不足的问题，引入模糊 PID 算法：通过实时检测偏差

e 及变化率 ec ，经模糊化、规则推理（基于工程经验）和解模糊（重心法）动态调整 K_p 、 K_i 、 K_d 参数。应用于关键环节：

定长切割：根据位置偏差优化切割电机响应，提升长度精度；

成型切削：协调多轴位置/速度偏差，保障轨迹一致性。

理论验证表明，该算法显著增强抗干扰能力与自适应性，较传统 PID 控制精度提高 15%以上，满足高稳定性生产需求。

6 通信与监控系统设计

6.1 通信系统架构设计

系统采用工业以太网与 PROFINET 现场总线的混合架构：工业以太网基于 TCP/IP 协议连接监控层与控制层，实现高速数据传输（参数下发、状态上传）；PROFINET 总线连接控制层与底层设备，提供强实时性与抗干扰能力。架构采用标准化协议——监控层与 PLC 间使用 Modbus TCP，控制层与驱动/执行层采用 PROFINET IO 协议，确保兼容性与互操作性。网络设计含冗余链路，主链路故障时自动切换，保障通信可靠性。分布式节点结构便于系统扩展与维护。

6.2 数据传输与处理机制

数据采用全双工传输模式：上行传输执行/驱动层状态数据，下行传输控制指令。为确保完整性，实施 CRC 与奇偶校验双重机制，校验失败时自动重传。

数据处理分四步：

采集：传感器实时获取运行参数；

滤波：卡尔曼算法消除噪声干扰；

转换：A/D 模块将模拟信号转为数字信号；

存储：工业计算机数据库按定时/事件触发双模式存储生产参数、故障信息等关键数据，支持后续分析。

6.3 监控系统功能设计

监控系统以工业计算机为核心，集成四大功能：

实时监控：通过图形化界面动态展示设备状态、电机转速等参数；

参数设置：模块化界面支持切割长度等关键参数调整，配置权限管理防误操作；

故障诊断：基于规则诊断法识别异常，触发声光报警并记录故障信息至数据库；

数据分析：自动统计产量等数据，生成可视化报表支持决策。

系统扩展远程监控模块，支持互联网远程访问与控制，提升管理灵活性。所有功能通过工业以太网与现场总线协同实现，确保生产过程可视化、可控化。

参考文献

- [1]王仲娟,孙燕平.基于机器视觉技术的自动化生产线质量控制方法研究[J].自动化应用,2025,66(12):72-74,77. DOI:10.19769/j.zdhy.2025.12.020.
- [2]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. DOI:10.19981/j.CN23-1581/G3.2024.31.005.
- [3]翁赞斌,黄仕胜,李建成.餐具自动化包装生产线的设计与智能化升级研究[J].工程技术研究,2025,7(11):172-174. DOI:10.12417/2705-0998.25.11.058.
- [4]蒋蓓.基于PLC的机电一体化控制系统设计与实现[J].机电产品开发与创新,2025,38(5):124-126. DOI:10.3969/j.issn.1002-6673.2025.05.036.
- [5]庄欠芬.利用单片机实现机电一体化系统的高效控制[J].时代汽车,2025(18):130-132. DOI:10.3969/j.issn.1672-9668.2025.18.042.

7 系统可靠性与安全性分析

7.1 系统可靠性分析

系统可靠性从硬件、软件和环境三方面保障：

硬件：采用工业级核心器件，实施电源、通信及控制模块三重冗余设计；集成屏蔽、接地与滤波抗干扰措施，降低外部噪声影响。

软件：基于模块化与结构化编程架构，各功能模块通过标准接口交互；嵌入故障自诊断算法与容错机制，异常时自动切换备用策略。

环境适应性：核心部件支持 $-20^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ 宽温工作，具备 IP54 级防尘防潮性能；内置温湿度传感器实时监测环境，超阈值自动报警，确保极端工况稳定运行。

7.2 系统安全性分析

安全体系覆盖机械、电气与操作三维度：

机械安全：旋转部件加装防护罩，运动机构配置机械限位器，全线布置急停按钮（响应时间 $<0.1\text{s}$ ），符合 ISO 13857 安全标准。

电气安全：采用 TN-S 接地系统，集成过载（断路器）、短路（熔断器）及漏电（30mA 保护器）三重防护，绝缘电阻 $>100\text{M}\Omega$ 。

操作安全：人机界面遵循 Ergonomic 原则设计，权限分级管理（操作员仅限启停/监控，工程师可参数配置）；系统实时监测操作行为，违规指令自动拦截并声光报警，防止人为误操作风险。

8 结论

本文完成全自动竹木筷子成型生产线机电一体化控制系统全流程研究。基于连续性强、协同精度高的工艺特性，设计四层分层架构（监控层、控制层、驱动层、执行层），以 PLC 为核心实现时序与闭环反馈协同控制。完成机械电气协同设计，构建模块化运动控制模型，采用模糊 PID 算法优化关键工序精度与抗干扰能力。开发工业以太网与现场总线混合通信架构，集成实时数据处理与多功能监控系统。系统通过硬件冗余、软件容错及三重安全防护（机械/电气/操作）确保可靠性与安全性。研究成果解决了传统生产效率低、精度差等问题，为竹木加工装备智能化提供理论支撑。未来将融合大数据与人工智能技术，进一步提升系统自适应能力与生产质量。