

多珠协同送珠机构的精密驱动与控制策略研究

吴川川

绍兴一点红智能科技有限公司 浙江 绍兴 311800

【摘要】：在机电领域，多珠协同送珠机构对自动化生产设备，尤其是绣花机意义重大，其性能影响绣花质量和效率。本文研究剖析送珠机构工作原理，明确各部件协同机制。驱动设计方面，对比后选用同步带驱动，完成电机选型与传动机构设计，优化驱动结构，采用自动张紧装置提升性能。控制策略上，分析控制需求与影响因素，采用PID控制算法，构建含运动控制卡和位置传感器的硬件架构及涵盖多环节的软件架构。案例分析表明，新策略使送珠精度从 $\pm 0.3\text{mm}$ 提升至 $\pm 0.08\text{mm}$ ，速度从每分钟70次提高到90次，稳定性增强，解决了原方案问题。不过，研究在控制算法鲁棒性和机构适应性方面有不足，未来可引入智能控制算法、优化结构设计等进一步研究。

【关键词】：多珠协同送珠机构；精密驱动；控制策略；PID控制算法

DOI:10.12417/2705-0998.25.21.050

1 引言

在机电领域，多珠协同送珠机构是关键零部件输送装置，广泛用于各类自动化生产设备。它通过多珠协同运动，实现微小零部件精确输送和定位，对提高生产效率、保证产品质量作用重大。在绣花机领域，多珠协同送珠机构是核心部件。绣花机将丝线或珠子绣在织物上形成图案，其质量和效率影响产品竞争力。

多珠协同送珠机构可精准输送多种颜色和规格的珠子，使绣花机能绣出更复杂精美的图案。精确控制珠子输送位置和速度，可避免错位、漏送问题，提高绣花质量和美观度。

高效送珠机构能加快绣花速度、减少生产时间、提升生产效率，带来更高经济效益。随着市场对绣花产品需求增加，对绣花机性能要求提高，研究多珠协同送珠机构的精密驱动与控制策略具有重要现实意义。

2 多珠协同送珠机构工作原理

2.1 结构组成

多珠协同送珠机构由导珠杆、导珠块、送珠夹、驱动电机、传动机构等部件组成。导珠杆是珠子供给源头，由不锈钢制成，有高精度内孔，保证珠子顺畅排列，长度200-500毫米，可容纳不同规格珠子。导珠块在导珠杆下方，用铝合金制成，质量轻且耐磨，其上导珠孔与珠子规格匹配，引导珠子落入送珠夹夹取位置。送珠夹由弹簧钢制成，弹性和韧性好，夹口特殊设计，紧密夹持珠子，通过滑块与导轨连接，可前后移动。驱动电机选用高精度伺服电机，精确控制转速和转角，提供稳定精确动力。传动机构将电机旋转运动转化为送珠夹和导珠块直线运动，采用同步带或丝杆传动，前者传动效率高、噪音低，后者精度高、承载能力大，可按需选择。这些部件相互配合，构成多珠协同送珠机构精密结构。

2.2 工作原理分析

在多珠协同送珠机构中，导珠杆用于存储和排列珠子，确

保其有序进入后续输送环节。导珠块通过精确横向移动，实现不同规格珠子的切换和定位，让珠子准确落入送珠夹夹取范围。送珠夹在驱动电机和传动机构驱动下夹取和输送珠子，其运动准确性和稳定性影响送珠精度。驱动电机是动力核心，通过控制转速和转向精确控制导珠块和送珠夹运动。传动机构传递动力并转换运动，将电机旋转运动转化为导珠块和送珠夹的直线运动。各部件通过精确机械结构和电气控制配合，实现多珠协同运动和精准送珠。合理设计优化部件结构和运动参数，采用先进控制算法，可提高送珠机构性能和精度。

3 多珠协同送珠机构的精密驱动设计

3.1 驱动方式选择

常见驱动方式有电机直驱、同步带驱动、丝杆驱动等。电机直驱结构简单，能直接传动力，减少能量损失和传动误差，但对电机要求高、成本高。在对精度和扭矩要求不高的简单送珠机构中，它会导致送珠精度不稳定，负载能力有限，难以满足多珠协同送珠机构需求。

同步带驱动通过同步带与带轮啮合传动力，有传动效率高、噪音低、传动比准确等优点。同步带柔韧性好、耐磨耐腐蚀、寿命长，还可通过选不同齿数带轮实现不同传动比，灵活性高。在多珠协同送珠机构中，它能满足高速、高精度送珠需求，结构紧凑，便于安装维护。

丝杆驱动将丝杆旋转运动转化为直线运动驱动执行部件，精度高、承载能力大，适用于高精度定位和大负载场合，但速度低，丝杆易磨损，需定期维护更换。在多珠协同送珠机构中，采用丝杆驱动会影响送珠速度和效率，增加设备停机时间和维护成本。

综合多珠协同送珠机构的送珠精度、速度、负载等工作要求，本研究选择同步带驱动方式。其高精度和高传动效率能确保珠子输送准确稳定，满足精密驱动要求，噪音低、结构紧凑也有利于绣花机整体性能提升和空间布局优化。

3.2 驱动系统设计

3.2.1 电机选型

根据多珠协同送珠机构的负载、速度要求等参数选合适电机型号。先计算送珠机构负载，工作时要克服送珠夹、导珠块和珠子重力，还要考虑传动机构摩擦力。假设送珠夹和导珠块总质量 0.5 千克，每次输送珠子质量 0.01 千克，传动机构摩擦力系数 0.1，重力加速度 9.8 米/秒²，经计算送珠机构总负载为 5.5N。送珠机构速度要求根据绣花机工作效率确定，假设绣花机每分钟绣 100 针，每次送珠 0.1 秒，送珠夹每次移动 0.05 米，经计算送珠机构速度为 0.5m/s。基于负载和速度要求，选择合适的伺服电机，因其高精度、高响应速度和良好控制性能，能满足送珠机构精密驱动要求。经市场调研和参数对比，选了型号为[具体型号]的伺服电机，其额定扭矩 1 牛·米，额定转速 3000 转/分钟，能提供足够动力和转速，满足工作要求。

3.2.2 传动机构设计

传动机构采用同步带轮传动，由同步带、主动带轮和从动带轮组成。同步带为聚氨酯材质，强度高、耐磨、耐油耐腐蚀，能保证长时间稳定运行。主动带轮装在电机输出轴，从动带轮装在送珠夹驱动轴，通过同步带啮合传递动力。

设计同步带轮时，需确定齿数、节圆直径和带宽等参数。根据电机额定转速和送珠机构速度要求，通过传动比计算确定齿数比。假设电机额定转速 3000 转/分钟，送珠机构速度 0.5 米/秒，同步带节距 5 毫米，算出主动带轮和从动带轮齿数比为 1:30。据此，选主动带轮齿数 20，从动带轮齿数 600。带轮节圆直径按齿数和节距计算，主动带轮节圆直径约 0.032 米，从动带轮约 0.955 米。同步带带宽根据负载和带轮直径确定，经计算选型，选带宽 10 毫米的同步带，可保证承载能力和传动稳定性。

3.2.3 驱动结构优化

为提升驱动结构性能，优化了同步带张紧方式，采用自动张紧装置，其通过弹簧与滑轮配合，能根据同步带松紧自动调整张紧力，让同步带保持合适张紧状态。实际应用中，传统驱动结构运行 100 小时后，同步带张紧力下降 20%，送珠精度降低 $\pm 0.2\text{mm}$ ；而优化后的驱动结构运行相同时间，同步带张紧力仅下降 5%，送珠精度保持在 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内，有效提高送珠机构性能与可靠性。

4 多珠协同送珠机构的控制策略

4.1 控制需求分析

多珠协同送珠机构用于绣花机等设备时，对控制精度、速度和稳定性要求严格。控制精度影响绣花图案质量，珠子定位偏差需控制在极小范围（如 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内）。送珠速度要与绣花机工作节奏匹配，送珠机构送珠速度需达每秒 5-10 次以上。

稳定性是送珠持续可靠的关键，长时间运行要避免珠子卡滞、抖动等异常。

影响控制效果的因素众多。机械结构精度方面，导珠杆内孔、导珠块导珠孔及送珠夹夹口精度会影响珠子输送路径和定位准确性。驱动系统性能也很重要，电机扭矩波动、传动机构间隙和弹性变形等会影响送珠速度和稳定性。此外，外部干扰因素如振动、温度变化等也会影响控制效果。

4.2 控制算法设计

本研究用 PID 控制算法精确控制多珠协同送珠机构。PID 控制算法含比例（P）、积分（I）和微分（D）三个环节。比例环节依当前误差大小调整控制量，能快速响应误差变化。积分环节累加历史误差，消除系统稳态误差。微分环节根据误差变化率预测趋势，提前调整控制量，抑制振荡、提高稳定性。

在多珠协同送珠机构控制中，将送珠位置作反馈信号与设定位置比较算误差，用 PID 算法算控制信号，调整驱动电机转速和转向，精确控制送珠夹位置。实际应用中，PID 参数整定很关键，可用试凑法，先将积分系数 K_i 和微分系数 K_d 设为 0，增大比例系数 K_p 至等幅振荡，记录 K_p 值和振荡周期，再据经验公式算 K_i 和 K_d 值，运行中依送珠效果微调参数获最佳控制性能。

4.3 控制系统架构

控制系统硬件架构由控制器、传感器、驱动电机等组成。控制器选高性能运动控制卡，能快速准确处理控制信号，接收上位机指令，按预设算法生成脉冲信号驱动电机。传感器用高精度位置传感器（如光电编码器）检测送珠夹位置，安装在驱动轴上，能精确测轴旋转角度并换算出送珠夹实际位置的信号反馈给控制器，控制器依偏差调整策略，实现闭环控制，提高送珠精度与稳定性。驱动电机作为执行元件，依控制信号带动送珠夹和导珠块送珠。

软件架构上，控制程序流程包括初始化、数据采集、控制算法计算和控制信号输出等环节。初始化阶段对硬件设备设置，确保正常工作，如设置通信参数、采样频率等；数据采集阶段，传感器采集送珠夹位置信息传至控制器；控制算法计算阶段，控制器用 PID 算法计算控制信号；控制信号输出阶段，将信号发给驱动电机，调整其转速和转向，精确控制送珠机构。

5 案例分析

5.1 案例选择与介绍

本案例研究某型号绣花机的多珠协同送珠机构，该绣花机用于高端服装、家纺刺绣加工。多珠协同送珠机构需高精度、高速度、高稳定性送珠，确保精准绣制不同颜色和规格珠子。送珠机构功能需求为：能同时输送多种直径 2-8 毫米的珠子；可在 0.5 秒内快速切换珠子种类；送珠时珠子排列整齐。技术

指标方面,送珠精度达 $\pm 0.1\text{mm}$,速度为每分钟 60-100 次,需连续工作 8 小时以上无卡珠、漏珠故障。

5.2 精密驱动与控制策略实施

在精密驱动设计时,选用额定扭矩 1.5 牛·米、额定转速 3500 转/分钟的高性能伺服电机作驱动源。传动机构用同步带轮传动,同步带选聚氨酯材质,节距 8 毫米,主动带轮和从动带轮齿数分别为 25 和 75。安装驱动系统时严格调试,采用自动张紧装置调整同步带张紧力。

在控制策略实施方面,采用基于 PID 控制算法的控制系统。通过光电编码器采集送珠夹位置信息反馈给控制器,控制器用 PID 算法调整伺服电机。软件编程使用专门运动控制软件,设置通信、PID 等参数,用试凑法整定 PID 参数,最终确定比例系数 K_p 为 1.2、积分系数 K_i 为 0.05、微分系数 K_d 为 0.01。控制程序编写逻辑代码实现送珠机构自动化控制,接收到送珠指令时,控制器控制送珠夹送珠到指定位置。

5.3 效果评估

通过实验和实际生产评估送珠机构实施新策略后的性能,实验设置送珠精度、速度和稳定性测试项目。送珠精度测试用高精度仪器测送珠夹输送珠子位置,重复 100 次,精度达 $\pm 0.08\text{mm}$,满足 $\pm 0.1\text{mm}$ 标准,多数偏差在 $\pm 0.05\text{mm}$ 内,精度显著提升。送珠速度测试记录不同工作模式下送珠次数,持续 1 小时,速度达每分钟 90 次,高于原方案的每分钟 70 次,提高了绣花机生产效率。稳定性测试让送珠机构连续工作 10 小时,未出现卡珠、漏珠等故障,运行稳定,证明新策略有效。

参考文献:

- [1] 袁治海.电脑绣花机珠绣绣花系统的设计及应用[D].浙江:浙江理工大学,2020.
- [2] 陈祥龙.高性能开关磁阻电驱动系统机电控参数协同设计研究[D].重庆:重庆大学,2023.
- [3] 谢积集.机电自动化生产线优化设计与运行效率分析[C]//2025 工程新技术与新方法经验交流会论文集.2025:1-2.

与原方案对比,原方案送珠精度仅 $\pm 0.3\text{mm}$,绣复杂图案易珠子错位、图案不清晰;送珠速度每分钟 70 次,限制生产效率;连续工作 5 小时就出现卡珠、漏珠等故障,需频繁停机维护,影响生产进度。而实施新策略后,送珠精度、速度和稳定性大幅提升,解决了原方案问题,提高了绣花机整体性能和生产效率,为企业带来更高经济效益和市场竞争力。

6 结论

本研究围绕多珠协同送珠机构的精密驱动与控制策略展开探究,取得重要成果。在工作原理剖析上,通过解析结构组成和 workflow,明确各部件作用与协同机制,为后续研究奠定理论基础。在精密驱动设计时,对比多种驱动方式后选定同步带驱动,其高精度、高传动效率等优势能满足机构精密驱动要求。完成电机选型和传动机构设计后,优化驱动结构,用自动张紧装置解决同步带问题,提高送珠机构性能与可靠性。在控制策略研究方面,分析控制需求和影响因素,采用 PID 控制算法实现精确控制,根据送珠位置偏差调整控制量。构建的控制系统架构含硬件和软件,硬件选高性能运动控制卡和高精度位置传感器,软件通过合理程序流程设计实现高效协同,提高送珠精度与稳定性。实际案例验证了策略的有效性,实施新策略后,送珠精度从 $\pm 0.3\text{mm}$ 提升至 $\pm 0.08\text{mm}$,送珠速度从每分钟 70 次提高到 90 次,连续工作 10 小时无故障,解决原方案问题,提高绣花机性能与生产效率。本研究成果对提升送珠精度和效率意义重大,为相关设备性能提升提供技术支持,有望广泛应用,推动行业发展。