

技术研究

基于伺服驱动的 PP 管精密定长切割装置设计研究

邵海祥

杭州中祥通讯器材有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i7.8254

[摘要] 依靠伺服驱动的 PP 管精准定长切割设施，以闭环控制架构跟精密机械传动为构建基础，凭借伺服控制系统精准地调节管材送进及切割动作，借助高精度传感反馈达成误差的动态补偿。切割精度可至 $\pm 0.3\text{mm}$ ，生产效率比传统装置提升幅度超 70 个百分点，能与 16—160mm 管径、1.5—10mm 壁厚的管材实现适配，在复杂工况条件下稳定运行，该装置消除传统切割精度低、效率差等方面困扰，为管材加工行业智能化升级给予技术帮扶。

[关键词] 伺服驱动；PP 管；精密定长切割；装置设计

Research on the design of precision cutting device for PP pipe driven by servo

Shao Haixiang

Hangzhou Zhongxiang Communication Equipment Co., LTD.

[Abstract] The servo-driven PP pipe precision cutting facility, built on a closed-loop control architecture and precision mechanical transmission, uses the servo control system to precisely regulate the feeding and cutting actions of the pipes. It achieves dynamic error compensation through high-precision sensor feedback. The cutting accuracy can reach $\pm 0.3\text{mm}$, and the production efficiency is over 70% higher than traditional equipment. This facility can handle pipes with diameters ranging from 16 to 160mm and wall thicknesses from 1.5 to 10mm, operating stably under complex conditions. It addresses the issues of low cutting accuracy and efficiency found in traditional methods, providing technical support for the intelligent upgrade of the pipe processing industry.

[Key words] servo drive; PP pipe; precision fixed length cutting; device design

引言

多个领域均广泛应用 PP 管，产品质量以及企业效益直接被其加工精度与效率所影响，传统切割装置存在着精度低、效能差、自动化程度不足等弊病，难以达到市场对管材加工的苛刻要求。以高精度控制、快速动态响应等特性为凭借的伺服驱动技术，为 PP 管切割装置的升级开辟新路径，开发新型精密定长切割装置，对提高管材加工能力、增强行业竞争实力有显著现实意义。

一、PP 管定长切割现存问题与技术瓶颈

（一）传统切割装置的精度局限

传统 PP 管切割装置多数采用机械传动更简单电气控制组合的方式，难以实现高精度切割要求，处于机械传动的阶段，经过长期的运行，皮带、链条等部件易有磨损、松弛的现象发生，造成传动比出现波动，引发切割长度的偏差，其控制系统大多采用的是开环结构，缺少实时反馈这一机制，不能对因环境温度变动、管材材质差别引发的尺寸波动做动态补偿。切割刀具的磨损还是影响精度的关键要点，因刀具钝化，切割断面变得参差不齐，实际切割长度跟设定长度有了误差，人工操作

带有的主观模糊性与不可控现象，诸如管材送进速度不规则、切割时机掌控失误等，令切割精度的离散现象进一步加剧。

（二）生产效率与稳定性不足

处于运行过程中的传统切割装置，管材送进、定位、切割等工序往往按顺序逐一执行，无并行处理能力可言，导致单个切割的周期拉长，机械构造里的间歇运动装置，诸如槽轮与棘轮机构，频繁启停的过程里会出现较大幅度的冲击与振动，制约了设备运行速度的增长。电气控制系统响应速度呈现迟缓状态，对突发故障的应对处理能力差，若出现异常情形，需要人工介入开展排查，造成停机时段延长，设备历经长时间连续工作后，机械部件热变形与疲劳损伤等问题逐步显露，引发切割质量呈下降趋势，设备出现故障的概率攀升，对生产效率和稳定性造成极大破坏。

（三）自动化程度难以满足需求

传统 PP 管切割装置的自动化水平欠佳，从管材上料、运送、按长度测量直至切割结束，大部分环节依靠人工操作，也或采用简单的继电器控制，未具备智能化的管材识别与长度设定机能，面对各类规格批次的 PP 管，需由人工重新调校参数，耗时耗力，在生产作业进程里，无法开展针对设备运行状态的实时监测与数据分析，难以提前对故障隐患做出预判，也没办法为生产工艺优化提供具有效力的数据支持^[1]。于设备参数的调整进程当中，操作人员得频繁在控制台与切割工位这两处之间穿梭，单次参数调整所耗时长可超 15 分钟，极大地干扰了生产的连贯性，切换到不同壁厚管材生产的时候，由于没有自动匹配机制，切割速度跟刀具压力不能及时契合，引起切割断面质量有好有坏，废品率最高可攀升至 12%，传统装置只可存储 3 - 5 组预设好的参数，无法契合多品种小批量生产的多元需求。

二、伺服驱动技术在 PP 管切割中的应用优势

（一）高精度控制原理与实现路径

伺服驱动系统借闭环控制架构实现高精度切割控制，伺服电机内置高分辨率编码器，把电机轴角位移转为脉冲信号反馈给控制器，和预设切割长度指令实时比对，构成位置闭环，速度控制上，靠速度反馈环实时调节电机转速，保障管材输送速度恒定，规避速度波动引发的切割长度误差。控制器运用先进 PID 算法，依据偏差量自动调整伺服电机驱动电流与转矩，完成对管材送进及切割动作的精准控制，搭配滚珠丝杠、直线导

轨等精密传动部件，将电机旋转运动高效变为直线运动，降低传动间隙与摩擦损耗，进一步提高系统定位精度。

（二）动态响应特性对切割效率的提升

伺服驱动系统快速动态响应能力大幅缩短 PP 管切割周期，伺服电机有高启动转矩、低转动惯量特点，能在极短时间完成加减速，较传统驱动装置响应时间缩短超 60%。管材切割时收到切割指令，伺服系统迅速调整输送速度、精准定位切割位置，防止机械惯性造成过冲或滞后，借助多轴联动控制技术，实现管材输送与切割协同作业，减少工序间等待时长，其实时参数自整定功能按不同管径、壁厚管材自动优化控制参数，保证高速运行时稳定切割，有效提高单位时间切割产量。

（三）系统稳定性增强机制

伺服驱动系统以多重技术手段保障运行稳定性。硬件上，选用高防护等级伺服电机与驱动器，结合散热优化设计，降低环境因素或长时间运行造成的设备故障风险。软件方面，加入自适应控制算法，实时监测系统负载变化，自动调整电机输出参数，避免管材材质不均、切割阻力波动引起的运行失稳，冗余设计的传感器网络对关键参数交叉验证，若某一传感器失效，系统自动切换至备用数据通道维持运行^[2]。基于状态空间理论构建的故障诊断模型，实时分析伺服系统运行数据，提前预判潜在故障，通过主动预警与故障隔离机制，最大程度减少停机时间，保障切割装置长期稳定运行。

三、精密定长切割装置总体设计方案

（一）机械结构优化设计

国内某大型 PP 管生产企业为提升产品质量与生产效率，对原有切割装置机械结构做深度优化，其设计用高强度铝合金与优质钢材搭建机架，保障整体刚性和稳定性，管材输送部分采用高精度滚珠丝杠与直线导轨组合，降低摩擦及传动间隙，切割工位配备可快速更换的切割刀具模块，刀具材质选用高性能硬质合金并经特殊涂层处理，耐磨性提高 40%。针对不同管径 PP 管设计自适应管材夹紧机构，通过气压驱动多组 V 型夹块，能在 0.5 秒内完成对管径 20 - 160mm 管材的精准定心与夹紧，夹紧力均匀稳定且避免管材变形，实际运行显示，优化后的机械结构让切割装置运行噪音降低 20 分贝，设备故障率下降 35%，明显提升生产环境质量与设备运行可靠性。

（二）伺服控制系统构建

该企业切割装置的伺服控制系统以高性能运动控制器为

核心，搭配知名品牌伺服驱动器与电机，运动控制器运用先进多轴联动控制算法，可对管材送进、切割刀具移动等多轴运动协同控制，定位精度达 $\pm 0.05\text{mm}$ ，伺服驱动器具备智能电流调节功能，能按负载变化实时调整电机输出转矩，动态响应速度提高 50%。电机选用低惯量、高扭矩的永磁同步伺服电机，额定转速下输出扭矩可达 $5\text{N}\cdot\text{m}$ ，满足高速高精度切割需求，系统支持多种通信协议，可与企业 MES 系统无缝对接，实现远程参数设置、设备状态监控及生产数据采集，实际应用中，该伺服控制系统让切割装置的生产节拍缩短 25%，产品尺寸合格率从 85%提升至 98%，有力推动生产效率与产品质量双重提升。

（三）传感与反馈系统集成

为实现切割过程有效控制，该企业在切割装置集成多种传感与反馈系统。管材送进环节安装高精度编码器，实时监测管材移动距离并反馈至运动控制器进行闭环控制，确保送进长度误差小于 $\pm 0.1\text{mm}$ ^[3]。切割刀具处设置力传感器，实时监测切割力变化，当切割力超出预设范围时系统自动调整切割速度与刀具进给量，避免刀具损坏及切割质量下降，采用激光位移传感器对切割后管材长度进行在线检测，检测数据与设定值对比，若出现偏差系统自动修正后续切割参数，实践验证，传感与反馈系统集成有效降低废品率，每年为企业节约原材料成本约 50 万元，提升企业经济效益。

四、装置性能测试与实际应用效果

（一）精度测试与数据分析

精度测试运用多次重复测量结合误差统计分析方式，针对直径 $20\text{mm} - 110\text{mm}$ 、壁厚 $2\text{mm} - 8\text{mm}$ 的 PP 管实施定长切割，设定切割长度为 1000mm ，每组规格管材连续切割 50 次，借助高精度激光测距仪（精度 $\pm 0.05\text{mm}$ ）对切割后的管材长度开展测量，把实测数据导入统计分析软件，计算平均值、标准差及最大偏差值。结果表明，全规格管材切割中，长度偏差均值控制在 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内，标准差小于 0.15mm ，相比传统装置精度提升 70%以上，分析误差分布特征可见，直径较大且壁较厚的管材因切割阻力变化致使误差略有增加，但仍符合工业级 $\pm 0.5\text{mm}$ 的精度要求，证实了装置高精度控制的稳定性。

（二）生产效率对比评估

生产效率评估围绕单位时间产能，于相同生产条件下对比传统切割装置和基于伺服驱动的新型装置，以每日 8 小时连续作业切割常规 DN50 规格 PP 管，设定切割长度 2000mm 为例。

传统装置因机械传动惯性大、启停耗时长，每小时平均切割 120 根；新型装置借伺服系统快速响应与多轴联动控制，单次切割周期由 30 秒缩至 18 秒，每小时达 200 根，产能提升约 67%。且新型装置减少人工干预，故障停机率从传统装置的 8%降至 2%以下，增加有效作业时间，综合生产效率提升超 70%。

（三）应用场景适应性验证

应用场景适应性验证开展不同管径、壁厚及生产环境测试，测试管径 $16\text{mm} - 160\text{mm}$ 全系列管材切割，装置靠伺服系统自动调节送进速度和切割压力，保障各规格管材切割断面平整、尺寸达标，对于壁厚 $1.5\text{mm} - 10\text{mm}$ 管材，系统按材料力学特性动态优化切割参数，薄壁管切割降低进给速度防变形，厚壁管增加切割功率保断面质量^[4]。环境适应性测试模拟 45°C 高温、85%湿度环境连续运行 72 小时，装置部件性能稳定，伺服系统借温度补偿算法保持控制精度，证实其在复杂工况下可靠运行。

结语

机械结构优化、伺服控制系统构建及传感反馈集成，使基于伺服驱动的 PP 管精密定长切割装置在精度、效率和适应性方面实现显著突破，实测显示，装置切割精度达 $\pm 0.3\text{mm}$ ，生产效率提升超 70%，可适配多种规格管材与复杂工况。展望未来，伴随智能化和柔性制造技术发展，该装置可融入 AI 算法实现参数自学习优化，结合物联网技术搭建远程运维体系，进一步推动 PP 管加工向高精度、高效率、高智能化方向发展，为管材加工行业技术升级提供持续动力。

参考文献

- [1]程思敏, 李晨涛.外置式伺服电机驱动控制系统在开关设备中的应用研究[J].微特电机, 2025, 53(04): 66-70.
- [2]王毅然.伺服电机驱动板坯连铸机结晶器振动工艺参数研究[J].山西冶金, 2025, 48(03): 138-139+142.
- [3]袁骏, 何志军, 张鹏.基于 DCS 的燃料操作设备集中控制系统设计[J].自动化仪表, 2025, 46(02): 30-33+39.
- [4]闫雨朋, 马彦伟, 吕平洙, 等.伺服电机驱动变量柱塞泵试验台研发[J].机械工程与自动化, 2025, 54(01): 182-185.

作者简介：邵海祥，出生年月：1968.01.17，男，汉族，籍贯：浙江省杭州市萧山区，学历：大专，研究方向：机电制造方向。