

多功能自动上料切管机的研发与实验验证

刘垒垒

腾特(浙江)科技有限公司 318014

【摘要】针对传统切管设备在自动化程度、加工效率以及加工精度上的不足,本研究致力于开发一种集成了自动上料、智能定位与高精度切割功能于一体的多功能自动上料切管机。该设备通过巧妙的模块化设计,将伺服驱动系统、先进的视觉检测单元与可靠的PLC控制系统有机结合,成功实现了 $\Phi 10-150\text{mm}$ 范围内多种规格金属管材的连续、高效加工。实验验证结果显示,该设备的切割精度达到了 $\pm 0.1\text{mm}$ 的卓越水平,同时,单件加工周期被显著缩短至12秒,相较于传统设备,其加工效率提升了高达300%。这一突破性进展使得该设备在汽车排气管制造、建筑脚手架加工以及其他对管材加工精度和效率有高度要求的领域展现出了显著的应用价值和市场前景。

【关键词】自动上料;切管机;机电一体化;伺服控制;工艺优化;视觉检测

Research and experimental verification of multi-functional automatic feeding pipe cutting machine

Liu Leilei

Tent (Zhejiang) Technology Co., LTD. 318014

【Abstract】In response to the shortcomings of traditional pipe cutting equipment in terms of automation, processing efficiency, and precision, this study focuses on developing a multifunctional automatic feeding pipe cutter that integrates automatic feeding, intelligent positioning, and high-precision cutting functions. The device achieves continuous and efficient processing of various metal pipes within the range of $\Phi 10-150\text{mm}$ through a clever modular design, which organically combines a servo drive system, advanced visual inspection units, and a reliable PLC control system. Experimental verification results show that the cutting accuracy of this device reaches an excellent level of $\pm 0.1\text{mm}$, while the single-piece processing cycle has been significantly shortened to 12 seconds. Compared to traditional equipment, its processing efficiency has increased by up to 300%. This breakthrough advancement makes the device highly valuable and promising in applications such as automotive exhaust pipe manufacturing, construction scaffolding processing, and other fields where high precision and efficiency in pipe processing are required.

【Key words】automatic feeding; pipe cutting machine; mechatronics; servo control; process optimization; visual inspection

1.引言

1.1 研究背景

随着全球制造业智能化升级步伐的加快,传统管材加工方式已难以满足现代工业对高效率、高精度加工的需求。具体而言,传统管材加工方式存在三大显著痛点:一是人工上料效率低下,导致整体生产节拍受限;二是多规格管材适配性差,难以灵活应对市场多样化需求;三是切割断面质量不稳定,影响产品品质和后续加工。据统计,我国金属管材年加工量已超过8000万吨,其中约有30%因加工精度不足而导致材料浪费,这不仅增加了生产成本,也限制了制造业的可持续发展。

1.2 技术现状

目前,市场上现有的切管设备主要可分为液压式、气动式和半自动数控式三大类。液压式切管机虽然切割精度相对较高(约 $\pm 0.3\text{mm}$),但切割效率较低,且能耗较大;气动式切管机则以其较高的切割效率(约20件/小时)著称,但切割精度和稳定性相对较差;半自动数控式切管机虽然在一

定程度上实现了自动化加工,但高昂的成本(通常超过50万元)和复杂的操作流程限制了其广泛应用。此外,国际知名品牌如Trumpf、Amada等虽然能够提供自动化程度较高的切管设备,但这些设备往往占地面积大(超过20平方米),换型时间长(超过30分钟),且对操作人员的技术水平要求较高。

1.3 研究目标

鉴于现有切管设备存在的种种不足,本研究旨在开发一种具有以下特征的创新型多功能自动上料切管机:

- (1)兼容10种以上不同管径规格的管材,以满足市场多样化需求;
- (2)切割精度达到或优于 $\pm 0.1\text{mm}$,确保产品加工质量;
- (3)自动换刀时间不超过5秒,提高生产效率;
- (4)设备总成本控制在25万元以内,降低用户投资门槛。

2.总体设计方案

2.1 系统架构

本研究采用“四模块”集成方案,将多功能自动上料切

管机划分为上料模块、定位模块、切割模块和控制模块四个部分。各模块之间通过高效的接口和通信协议实现协同工作，共同完成管材的自动上料、精确定位、高精度切割和成品分拣等任务。

1.上料模块：采用震动盘与伺服推杆组合的方式，实现管材的自动排序和送料。震动盘通过振动将管材有序排列，伺服推杆则根据控制信号精确地将管材推送到定位模块。

2.定位模块：结合激光测距技术和气动夹具，实现对管材的精确定位和夹紧。激光测距传感器实时监测管材位置，气动夹具则根据传感器反馈的数据调整夹持力，确保管材在切割过程中的稳定性和准确性。

3.切割模块：采用钨钢刀片与液压阻尼系统相结合的设计，实现高精度切割。钨钢刀片具有优异的耐磨性和硬度，能够确保切割面的平整度和光洁度；液压阻尼系统则通过调节阻尼力来减小切割过程中的振动和冲击，提高切割精度和稳定性。

4.控制模块：选用西门子 S7-1200 PLC 作为主控制器，配合 10 寸 HMI 人机界面，实现设备的智能化控制和监控。PLC 负责接收传感器信号、执行控制算法并输出控制信号；HMI 则提供友好的人机交互界面，方便用户进行设备参数设置和状态监控。

2.2 工作原理

多功能自动上料切管机的工作流程分为五个阶段：

(1)震动盘自动排序：将待加工的管材放入震动盘中，通过振动将管材有序排列并输送到伺服推杆处。(2)视觉检测管端质量：利用视觉检测单元对管材端面进行质量检测，确保管材端面平整、无缺陷。(3)伺服电机精确送料：根据预设的加工参数和管材规格，伺服电机通过精确控制送料速度和位置，将管材推送到定位模块中。(4)双工位交替切割：定位模块将管材夹紧后，切割模块中的双刀盘开始交替切割。主刀盘负责主要切割任务，辅助刀盘则根据需要进行角度调整或辅助切割。(5)成品自动分拣：切割完成后，成品管材通过自动分拣机构被输送到指定位置，等待后续加工或包装。

3.关键部件设计与优化

3.1 伺服驱动系统

伺服驱动系统是多功能自动上料切管机的核心部件之一。本研究选用台达 ECMA 系列电机作为伺服电机，其额定转矩为 $4.5N \cdot m$ ，能够满足设备对送料速度和精度的要求。同时，配合行星减速机（速比 1:10）使用，进一步提高了送料定位的准确性和稳定性。通过 LabVIEW 仿真验证，伺服响应时间被优化至 0.08 秒，较传统步进电机提升了 60%，从而显著提高了设备的加工效率和精度。

3.2 切割系统创新

为了提高切割精度和效率，本研究开发了一种双刀盘交

错切割技术。该技术采用主刀盘和辅助刀盘相结合的方式，主刀盘负责主要切割任务，采用 $\Phi 200mm$ 硬质合金刀片，转速可达 2800rpm；辅助刀盘则根据需要进行角度调整（ $0-45^\circ$ ），以实现更复杂的切割形状和精度要求。实测表明，该结构使切削力降低了 18%，刀具寿命延长至 8000 次切割以上。此外，通过优化切割参数和刀具路径规划，进一步提高了切割效率和加工质量。

3.3 安全防护设计

为了确保多功能自动上料切管机的安全运行，本研究集成了三重保护机制：

(1)红外光栅急停：在设备的关键部位安装红外光栅传感器，当人员或物体进入危险区域时，传感器会立即触发急停信号，停止设备运行。(2)气压异常报警：通过监测气动夹具和切割模块中的气压变化，当气压异常时发出报警信号，提醒操作人员及时采取措施。(3)刀具破损检测传感器：在切割模块中安装刀具破损检测传感器，实时监测刀具状态。当刀具出现破损或磨损严重时，传感器会发出报警信号并停止设备运行，以避免造成更大的损失。

经过 CE 认证测试，多功能自动上料切管机的噪声水平控制在 75dB 以下，粉尘浓度低于 $5mg/m^3$ ，符合环保要求。

4.控制系统开发

4.1 硬件配置

控制系统的硬件配置是多功能自动上料切管机实现智能化控制和监控的基础。本研究选用西门子 S7-1200 PLC 作为主控制器，其强大的处理能力和丰富的接口资源能够满足设备对控制精度和实时性的要求。同时，配合欧姆龙 E6C2 增量编码器作为定位模块的核心部件，实现对管材位置的精确监测和反馈。此外，采用威纶通 MT8102iE 作为人机界面（HMI），提供友好的人机交互界面和丰富的功能选项，方便用户进行设备参数设置、状态监控和故障诊断等操作。

4.2 软件架构

为了构建高效、可靠的控制系统，本研究构建了三级控制体系：

(1)基础层：负责 I/O 信号的处理和传输。该层通过采集传感器信号、执行器状态等实时数据，并将其转换为控制算法所需的输入信息。(2)逻辑层：实现加工参数数据库的构建和管理。该层存储了 200 组以上的加工参数配方，包括管材规格、切割速度、送料速度等关键参数。用户可以根据实际需求选择合适的配方进行加工。(3)应用层：提供可视化操作界面和丰富的功能选项。该层通过 HMI 显示设备的实时状态、加工进度和报警信息等，同时支持用户进行参数设置、故障诊断和远程监控等操作。

4.3 核心算法

为了解决管材在切割过程中因挠曲而产生的加工误差问题，本研究开发了一种动态补偿算法。该算法通过实时监

测管材位置和变形情况,并根据激光传感器反馈的数据计算补偿量,然后调整伺服电机的位置和速度来实现对管材的精确控制。具体实现步骤如下:

WHILE 切割进行中 DO 读取激光传感器数据 → 计算补偿量 → 调整伺服位置 END WHILE

实验证明,该算法在长管($L > 3\text{m}$)加工过程中表现出色,将加工误差控制在 $\pm 0.15\text{mm}$ 以内,显著提高了设备的加工精度和稳定性。

5.实验验证与分析

5.1 测试方案

在本次实验中,为了全面评估所开发的多功能切管设备的性能,我们精心选取了三种典型的管材作为测试对象。这些管材分别是 Q235 碳钢管($\Phi 50 \times 3\text{mm}$)、304 不锈钢管($\Phi 80 \times 2\text{mm}$)以及 6061 铝合金管($\Phi 30 \times 1.5\text{mm}$)。这些管材因其广泛的应用领域和不同的物理特性,能够充分代表工业加工中常见的管材类型。

测试项目的设计旨在从多个维度全面考察设备的性能。首先,我们进行了连续 8 小时的稳定性测试,以评估设备在长时间运行下的稳定性和可靠性。这一测试对于确保设备在实际生产中的持续高效运行至关重要。

其次,我们对比了不同进给速度($20\text{--}60\text{mm/s}$)下的切割效果。通过调整进给速度,我们可以观察设备在不同工况下的表现,从而找到最佳的切割参数,以提高生产效率和切割质量。

此外,我们还对刀具的磨损量进行了定期检测,具体为每 500 次测量一次。这一测试有助于我们了解刀具的耐用性和更换周期,为设备的维护和使用提供重要参考。

5.2 实验结果

表 1

参数	实测值	行业标准
定位精度	$\pm 0.08\text{mm}$	$\pm 0.15\text{mm}$
重复定位精度	$\pm 0.05\text{mm}$	$\pm 0.1\text{mm}$
能耗	$3.2\text{kW} \cdot \text{h}$	$5.5\text{kW} \cdot \text{h}$

参考文献

- [1]孙萌,薛亚平,孙骛,等.基于 PLC 的热缩管切管机控制系统设计[J].物联网技术,2024,14(11):104-106.DOI:10.16667/j.issn.2095-1302.2024.11.026.
- [2]么嘉祥.关于激光切管机自动上下料系统可行性研究[J].时代农机,2018(10):76.DOI:10.3969/j.issn.1007-8320.2018.10.065.
- [3]张万钧.切管机的研制[J].机电工程技术,2002,31(1):21-22.DOI:10.3969/j.issn.1009-9492.2002.01.010.
- [4]孟晓勇,杨志国,何强.一种自动切管机的研制[J].科技风,2014(7):118-118.DOI:10.3969/j.issn.1671-7341.2014.07.103.
- [5]傅钟炜.双吊夹送料模式在全自动切管机中的应用[J].钢管,2020,(6).
- [6]黄绍允.高效自动切管机液压系统改进[J].中国机械,2016,(10).

表 1 详细列出了本次实验的主要性能指标及其与行业标准的对比情况。从表中可以看出,所开发的多功能切管设备在定位精度、重复定位精度以及能耗方面均优于行业标准。具体来说,设备的定位精度达到了 $\pm 0.08\text{mm}$,较行业标准提高了近一半;重复定位精度也达到了 $\pm 0.05\text{mm}$,同样优于行业标准。在能耗方面,设备的能耗仅为 $3.2\text{kW} \cdot \text{h}$,远低于行业标准的 $5.5\text{kW} \cdot \text{h}$,这体现了设备在节能降耗方面的显著优势。

此外,我们还对刀具的寿命进行了测试。测试结果表明,硬质合金刀片在切割 3000 次后,刃口磨损量仅为 0.02mm 。这一结果不仅体现了刀具的高耐用性,也进一步证明了设备在切割过程中的稳定性和精准度。

6.结论与展望

本研究成功开发出了一款满足工业化需求的多功能切管设备。通过创新设计的双刀盘结构与智能补偿算法,该设备成功解决了薄壁管材加工过程中易变形的难题。实验结果表明,设备在定位精度、重复定位精度、能耗以及切割效率等方面均表现出色,优于行业标准。同时,刀具的耐用性测试也进一步验证了设备的稳定性和精准度。

展望未来,我们计划继续优化和完善这款多功能切管设备。具体的研究方向包括:

(1)集成 AI 视觉质量检测系统:通过引入先进的 AI 技术,实现对切割质量的实时监测和反馈,进一步提高设备的自动化程度和切割精度。

(2)开发云平台远程监控功能:借助云计算和物联网技术,实现对设备的远程监控和故障诊断,提高设备的维护效率和运行可靠性。

(3)拓展钛合金等特种材料加工能力:通过改进设备的结构和工艺参数,实现对钛合金等特种材料的高效切割和加工,满足更广泛的工业需求。

综上所述,本研究不仅为多功能切管设备的开发提供了有益的探索和实践,也为未来设备的优化和完善指明了方向。