

高性能铝材切割设备研发与工业应用案例分析

乔天冠 周雪婷 徐玉美
浙江乔老爷铝业有限公司 324400

【摘要】本文深入探讨了高性能铝材切割设备的研发历程及其在工业应用中的实际效果。该设备集成了支撑、上料、夹持、切割及预定位五大核心组件，并通过模块化结构设计与智能控制系统的深度融合，实现了铝材切割效率与精度的显著提升。本案例研究不仅详细阐述了设备的研发背景、目标、架构设计、关键技术突破，还结合了一家汽车零部件制造企业的实际应用情况，验证了设备的卓越性能与稳定性。此外，本文还提出了基于前沿数字孪生技术的设备改进与优化方案，为铝材加工行业的产业升级提供了宝贵的实践经验与理论支撑。

【关键词】铝材切割；模块化设计；智能制造；加工精度；工业自动化；高性能设备

High-performance aluminum cutting equipment research and development and industrial application case analysis

Qiao Tianguan Zhou Xueting Xu Yumei

Zhejiang Qiao Master Aluminum Co., LTD. 324400

【Abstract】 This paper discusses the research and development process of high performance aluminum cutting equipment and its practical effect in industrial application. The equipment integrates the five core components of support, feeding, clamping, cutting and reservation, and through the deep fusion of modular structure design and intelligent control system, the efficiency and accuracy of aluminum cutting are significantly improved. This case study not only elaborates the research and development background, objectives, architecture design and key technology breakthrough of the equipment, but also combines the actual application situation of an auto parts manufacturing enterprise to verify the excellent performance and stability of the equipment. In addition, this paper also proposes the equipment improvement and optimization scheme based on cutting-edge digital twin technology, which provides valuable practical experience and theoretical support for the industrial upgrading of aluminum processing industry.

【Key words】 aluminum cutting; modular design; intelligent manufacturing; machining precision; industrial automation; high-performance equipment

1 引言

1.1 研究背景

随着全球制造业的迅猛发展,轻量化材料在多个行业中的应用日益广泛,尤其是汽车和航空航天领域。铝材因其轻质高强度的特性,成为这些领域中的理想材料。然而,传统的铝材切割设备在效率和精度方面存在明显不足,无法满足市场对高质量、高效率加工的需求。据统计,2022 年我国铝材加工行业因切割过程中的缺陷导致的材料损耗高达

12.7 万吨,直接经济损失超过 18 亿元人民币。这一严峻形势迫切要求研发更高效、更精确的铝材切割设备,以降低生产成本,提升行业竞争力。

1.2 研究目标

针对传统铝材切割设备存在的问题,本研究致力于开发一种高性能的铝材切割设备,旨在实现以下目标:

- 1.切割速度不低于 3m/min, 大幅提高加工效率;
- 2.重复定位精度控制在 0.1mm 以内, 确保高精度加工;
- 3.具备处理从 20×20mm 至 150×150mm 截面尺寸范围

内多种规格铝材的能力，增强设备的通用性和灵活性。

2 设备系统架构设计

2.1 整体结构布局

本高性能铝材切割设备采用线性模组与旋转工作台相结合的复合式布局设计。这种设计不仅优化了空间利用率，使设备占地面积仅为 3.2×2.1 米，而且通过优化动力传输路径，降低了功率消耗，相比传统设备节能 25%。此外，该设计还提升了设备的稳定性和加工精度，为高效率、高质量的切割作业提供了坚实基础。

2.2 核心功能组件

2.2.1 支撑组件

支撑平台是设备的核心部件之一，采用双层蜂窝式结构，选用 7075-T6 航空铝合金材料制成。这种材料具有高强度、高刚性和优异的抗疲劳性能，确保了平台的稳定性和耐久性。支撑平台还配备了主动减震系统，有效降低了振动幅度，为高精度切割提供了有力保障。

2.2.2 上料组件

上料系统集成六轴机械臂与先进的视觉定位系统，实现了快速而准确的上料操作。六轴机械臂具有高度的灵活性和精度，能够适应不同规格和形状的铝材。视觉定位系统则利用高精度相机和图像处理算法，实现了对铝材的精确识别和定位。通过引入定位误差补偿算法（如基于卡尔曼滤波的算法），进一步提升了上料的精确度，确保了后续加工流程的顺利进行。

2.2.3 夹持组件

夹持机构采用气液增压设计，具有强大的夹持力和稳定性。压力可在 0.6-1.2MPa 范围内调节，以适应不同材质和规格的铝材夹持需求。多点同步夹持系统能够同时处理最多 8 根铝材，显著提高了加工效率。夹持表面经过激光微织构处理，增大了摩擦系数，有效防止了加工过程中的滑动现象。

2.2.4 切割组件

切割组件是设备的核心部分，由高速主轴、金刚石涂层刀具、液态 CO₂ 冷却系统等组成。高速主轴转速高达 24,000rpm，确保了高效且高质量的切割效果。金刚石涂层刀具

具有优异的硬度和耐磨性，能够长时间保持锋利，延长了刀具寿命。液态 CO₂ 冷却系统有效降低了切割过程中产生的热量，维持了刀具的工作温度，进一步提高了切割质量和效率。此外，还集成了振动传感器和红外热像仪，实时监测切割状态，及时调整切割参数，确保加工质量。

2.2.5 预定位组件

预定位系统采用激光阵列技术，具有高精度和快速定位的特点。激光阵列由多个高精度激光器组成，能够发射出稳定且平行的激光束。通过测量激光束在铝材上的反射位置，实现铝材的初步定位。自适应夹具调节机构能够根据铝材的实际尺寸自动调整夹持位置，进一步提高了加工的灵活性和准确性。

3 关键技术突破

3.1 多轴协同控制算法

为了实现五轴联动的高精度控制，本研究开发了基于 RTX64 实时操作系统的控制架构。该控制架构通过构建精确的运动学模型，实现了复杂空间轨迹的高精度追踪与控制。运动学模型考虑了各轴之间的几何关系与运动耦合，确保了多轴协同运动时的位置与姿态精度。通过不断优化算法和参数，实现了对设备运动状态的精确控制和调整，提高了加工精度和效率。

3.2 智能补偿系统

智能补偿系统集成温度、振动、负载等多参数补偿模型，能够实时监测这些影响切割精度的关键因素，并进行精确补偿。通过对温度、振动等参数的实时监测和分析，系统能够及时调整切割参数，降低切割误差。此外，智能补偿系统还能够根据负载情况自动调整设备的工作状态，确保设备在连续、高强度加工环境下的稳定性和可靠性。

4 工业应用验证

4.1 测试环境

为了验证高性能铝材切割设备的实际效果，本研究选择了一家专注于铝型材生产的企业作为测试基地。该企业拥有

先进的生产设备和丰富的加工经验,能够为设备提供真实的加工环境和测试条件。测试材料选用 6061-T6 铝合金,该材料具有优异的力学性能和加工性能,广泛应用于汽车、航空航天等领域。测试周期自 2024 年 9 月至 2024 年 11 月,为期三个月。

4.2 性能指标对比

通过与传统设备的对比测试,本研发设备在切割效率、尺寸公差、刀具寿命及能耗等方面均表现出显著优势。具体指标对比如下:

参数	传统设备	本设备
切割效率	28 件/h	42 件/h
尺寸公差	$\pm 0.15\text{mm}$	$\pm 0.06\text{mm}$
刀具寿命	1200 件	2500 件
能耗	8.5kW · h	5.2kW · h

从表中可以看出,本研发设备在切割效率上提高了约 50%,尺寸公差控制更为精确,刀具寿命延长了一倍以上,能耗也显著降低。这些优势不仅提高了企业的生产效率和产品质量稳定性,还降低了生产成本和能耗水平。

4.3 典型故障分析与解决

在测试期间,设备发生了几次定位偏差故障。经过详细分析和排查,发现故障原因在于环境温度波动导致激光定位系统漂移。针对此问题,采取了增加恒温保护罩的措施,将工作温度控制在 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 范围内。这一措施有效解决了定位偏差问题,提高了系统的稳定性和可靠性。

此外,在测试过程中还发现了一些其他问题,如切割过程中产生的噪音和振动等。针对这些问题,对设备进行了进一步的优化和改进,如加强减震措施、优化切割参数等。这些改进措施有效降低了噪音和振动水平,提高了设备的整体性能和用户体验。

参考文献

- [1]孙志敏. 铝及铝合金加工技术[M]. 冶金工业出版社, 2014.
- [2]王玉, 李爱红. 基于 S7-1200 PLC 的铝型材切割机控制系统设计[J]. 工业控制计算机, 2024: 171-172.
- [3]郭华, 于胜文. 基于 Cortex M3 的铝型材生产全自动牵引切割系统的研究与设计 [J].测控技术. 2014: 80-83,

5 改进方向

5.1 数字孪生系统构建

计划构建设备的数字孪生系统,实现设备运行状态的实时监测、故障预警与全生命周期管理,进一步提升设备的维护效率与运行可靠性。

5.2 碳纤维复合材料应用

考虑在设备结构中引入碳纤维复合材料,预计可减轻设备重量 15%-20%,同时保持甚至提升结构强度,降低设备运行时的能耗与惯性负载。

5.3 智能诊断系统开发

开发智能诊断系统,利用机器学习算法对设备运行数据进行深度分析,实现故障的早期发现与准确预测,目标故障预测准确率超过 85%,大幅减少非计划停机时间。

6.结论

本研究成功研发的高性能铝材切割设备已顺利在三家制造企业完成了产业化应用,累计加工铝材超过 1500 吨。实验数据表明,该设备的投资回报周期可缩短至 14 个月,显著提升了铝材加工行业的生产效率与经济效益,为行业的转型升级提供了强有力的技术支持与解决方案。

本研究不仅验证了高性能铝材切割设备的技术可行性与经济性,也为未来铝材加工技术的进一步研发与应用提供了宝贵的经验与启示。随着技术的不断进步与市场的持续发展,相信高性能铝材切割设备将在更多领域展现其独特价值,推动制造业向更高水平迈进。