

3.4 管理能效提升实践

3.4.1 节能文化建设与能力提升

公司致力于培育全员参与的节能文化。具体措施包括：
能力矩阵与培训体系：建立能源管理人员能力矩阵，

据此制定并实施覆盖节能法规、精益运行与能量平衡的年度培训计划。

主题化节能活动：每年定期举办“节能周”等主题活动，动员全员挖掘节能机会。例如，2025 年“节能我在行”活动中提出的压缩机能效提升方案，年节能量达 1064 吨标煤。

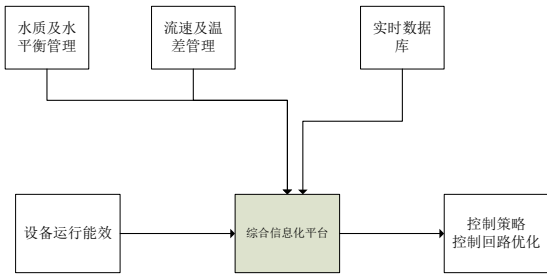
创新激励机制：设立专项奖励，对有效的节能建议给予物质与荣誉激励，激发员工节能自驱力。

3.4.2 关键系统专项能效管理

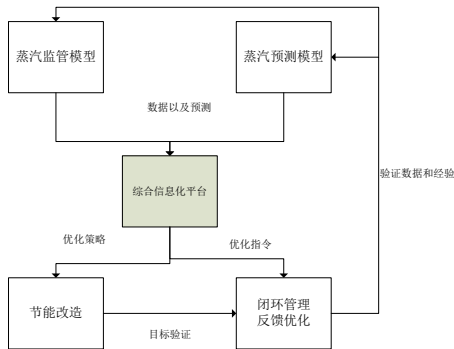
针对高能耗系统，公司实施了专项管理机制，确保能效优化常态化。

动设备运行能效管理：通过实时监测与能效核算，对偏离基准的设备进行诊断与调控。例如，2025 年通过优化冷冻水泵运行台数（3 台调整为 2 台），年节电 83 万 kWh。

循环水系统能效管理：以“电单耗”为核心指标，通过监测换热器工况与实施水泵精准改造，在 2023-2024 年间使 3 套系统电单耗降低超 10%，年节电量达 990 万千瓦时。其管理流程如图所示。



蒸汽管网能效管理：形成了“状态分析、精准管控、统一调度、闭环管理”的十六字管理模式，通过建立实时模型、统一调度和项目全流程闭环管理，实现系统持续优化（管理模型见下图）



4 成效分析和讨论

2020-2024 年累计节能 86594 吨标煤（图 1），按标准

煤单价 1200 元 / 吨计算，累计经济效益超 1.2 亿元，同时减排 CO₂ 22.51 万吨。关键系统如循环水电单耗下降 10.8%，蒸汽利用效率提升 22%。



图 1 2020 年 -2024 年节能量

5 结论和展望

5.1 结论

本研究表明，万华化学通过构建制度流程、管理、技术三重协同的能效提升体系，实现了能源利用效率的显著优化与碳排放的有效控制。具体而言：

系统化的基础建设是前提。通过确立清晰的能源战略、构建覆盖全流程的制度体系、完善三级计量网络，公司为能效管理奠定了坚实的“上层建筑”与数据基础。

管理 - 技术双轮驱动是核心路径。在管理层面，专项能效管理、节能文化建设与 APC 先进控制的应用，实现了从“人”到“系统”的精细化管理；在技术层面，基于循环经济理念的蒸汽梯级利用、余热回收、工艺热集成等改造，则从工艺本质上挖掘了节能潜力。

经济效益与环境效益显著。实践数据证明，2020-2024 年间累计节能超 8.6 万吨标煤，在创造逾亿元经济效益的同时，实现了超 22 万吨的 CO₂ 减排，验证了该体系的有效性与巨大价值。

5.2 未来展望

面向“双碳”目标下更为严峻的挑战，公司的能效提升工作仍需向更深层次、更广维度拓展。未来重点方向包括：

深化数字化转型：构建覆盖全厂的虚拟动态模型，实现对能源流向的实时模拟、能效异常的精准诊断与优化方案的预测仿真，推动能效管理从“事后分析”向“事前预测、事中干预”的智能化阶段演进。

探索能源结构转型：积极布局绿电 - 化工耦合路径，通过采购绿电，逐步替代化石能源电力，并探索绿电制氢等新型低碳原料路线，从源头降低工艺过程的碳足迹。

推动产业链协同降碳：将能效管理的边界从工厂内部延伸至整个产业链，通过绿色采购标准、共享节能技术等方式，带动上下游合作伙伴共同减排，构建绿色低碳的产业生态链，从而实现全生命周期的碳减排。

参考文献

- [1] GB/T 23331-2020, 能源管理体系 要求及使用指南.
- [2] 国家工业和信息化部节能降碳技术装备推荐目录（2024 年版）.
- [3] 国家鼓励的工业节水工艺、技术和装备目录（2023 年）.
- [4] 《“十四五”工业绿色发展规划》.工业和信息化部(2021).

Precision control of additive manufacturing technology in production of complex mechanical structures

Zucui Chen

Guangxi Nanguo Copper Industry Co., Ltd., Chongzuo, Guangxi, 532100, China

Abstract

With the rapid advancement of additive manufacturing (AM) technology, particularly its widespread application in aerospace, automotive, and medical fields, maintaining production precision during AM processes has become a crucial research focus. While AM offers distinct advantages over traditional manufacturing methods—such as higher design flexibility and superior material utilization efficiency—its inherent process characteristics still pose significant challenges in precision control. Starting from the fundamental principles of AM, this paper thoroughly analyzes key factors affecting the precision of complex mechanical components and proposes effective quality assurance strategies. Through comparative analysis of various AM techniques, the study evaluates the strengths and limitations of different manufacturing processes in precision control, aiming to provide theoretical foundations and technical support for enhancing application accuracy in additive manufacturing.

Keywords

additive manufacturing; precision control; complex mechanical structure parts; process parameters; model optimization

增材制造技术在复杂机械结构件生产中的精度控制

陈祖萃

广西南国铜业有限责任公司, 中国·广西 崇左 532100

摘要

随着增材制造(AM)技术的迅猛发展,尤其是在航空航天、汽车及医疗等领域的广泛应用,如何在增材制造过程中保持生产精度已成为重要的研究课题。增材制造技术具有诸多传统制造技术无法比拟的优势,如设计自由度高、材料利用率高,但由于其固有的工艺特性,精度控制问题在实际应用中仍面临诸多挑战。本文从增材制造的基本原理出发,详细分析了影响复杂机械结构件精度的主要因素,并提出了一系列有效的精度控制方法。通过对不同增材制造技术的对比,本文讨论了不同工艺在精度控制中的优势与不足,旨在为提高增材制造技术的应用精度提供理论依据和技术支持。

关键词

增材制造; 精度控制; 复杂机械结构件; 工艺参数; 模型优化

1 引言

随着工业制造的不断发展,传统的加工技术已难以满足现代制造业对复杂零部件和高精度要求的需求。增材制造作为一种新型的制造技术,因其能够逐层积累材料制造零件,提供了前所未有的设计自由度,尤其在复杂结构件的制造中显示出独特的优势。增材制造技术的出现不仅打破了传统制造方式的局限,也为高精度制造提供了新的可能。然而,尽管增材制造技术在诸多领域取得了突破性的进展,其精度问题仍然是限制其广泛应用的瓶颈之一。如何在保证零件强度、功能性及美观性的前提下,控制增材制造过程中的尺寸精度和表面质量,是当前增材制造技术面临的核心问题之一。

【作者简介】陈祖萃(1987-),男,中国广西人,本科,中级,从事机械研究。

在增材制造的过程中,工艺参数、材料性能、设备精度等多种因素均会对最终产品的精度产生重要影响。尤其是在生产复杂机械结构件时,由于零件形状复杂、内外形变化大,精度控制问题愈加显著。因此,探索增材制造过程中的精度控制方法,确保零件尺寸精度和表面质量达到设计要求,是提高增材制造技术可靠性和应用范围的重要环节。

本文的核心目标是通过分析增材制造技术中影响精度的主要因素,结合现有研究成果,提出可行的精度控制措施,进一步提升增材制造技术在复杂机械结构件生产中的应用效果。

2 增材制造技术概述

2.1 增材制造的基本原理

增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术是通过逐层添加材料来构建三维物体的技术,通常采用计算机辅助设计(CAD)模型作为基础,通过3D打印设备逐层制造出具

有复杂几何形状的零部件。与传统的减材制造（如铣削、车削等）不同，增材制造不需要模具，能够直接根据设计图纸制造出所需的复杂结构。

增材制造的基本流程包括设计、数据处理、打印以及后处理等几个步骤。在设计阶段，工程师通过 CAD 软件对零件进行建模，并进行尺寸、形状等参数的优化。随后，通过切片软件将三维模型分解为层状数据，并根据不同的增材制造技术要求进行参数设置，最后由 3D 打印设备进行打印。

2.2 增材制造的主要技术路线

目前，增材制造技术主要包括激光选区熔化（SLM）、熔丝沉积（FDM）、电子束熔化（EBM）、立体光刻（SLA）等几种主要类型。其中，SLM 技术和 FDM 技术由于其较高的应用成熟度，在复杂机械结构件生产中得到了广泛应用。

激光选区熔化（SLM）技术通过激光束熔化金属粉末，逐层构建零部件，具有较高的精度和材料适应性，常用于航空航天和医疗领域。而熔丝沉积（FDM）技术则通过加热融化热塑性塑料丝，将其按预定路径逐层沉积，适用于小批量生产和原型制造。不同的技术路线各有其优缺点，选择合适的增材制造技术对保证精度至关重要。

2.3 增材制造的应用领域

增材制造技术在多个行业中得到了广泛应用，尤其在航空航天、汽车、医疗和模具制造等领域中，展现了独特的优势。在航空航天领域，增材制造可以制造复杂的高性能零件，减轻重量并提高燃油效率；在汽车制造中，增材制造可用于零部件的快速生产和定制化制造；在医疗领域，增材制造被广泛应用于个性化医疗器械、义肢以及生物打印等方面。尽管应用广泛，精度问题仍然是制约增材制造技术普及的瓶颈。

3 增材制造中的精度影响因素

3.1 工艺参数对精度的影响

在增材制造过程中，工艺参数如激光功率、扫描速度、层厚、填充密度等直接影响着成品的尺寸精度和表面质量。以激光选区熔化（SLM）为例，激光功率过高会导致熔池过大，从而影响熔融金属的均匀性，进而引发零件的尺寸误差和形变。此外，扫描速度过快可能导致局部过度冷却，使得材料凝固过程不均匀，从而产生零件表面的粗糙度增加或变形。层厚也同样重要，较薄的层厚能够提高表面质量和精度，但会增加打印时间并影响生产效率。填充密度则影响材料的致密度，低密度可能导致零件内部空洞或材料不均匀分布，从而影响其力学性能。优化这些工艺参数，是确保增材制造过程达到预期精度的关键所在，尤其在面对复杂结构件时，工艺的微调可能对零件精度产生显著影响。

3.2 材料性能对精度的影响

材料的性质对增材制造精度具有重要影响，尤其是在高温和复杂结构条件下。不同材料具有不同的热膨胀系数、

熔点、流动性等物理特性，这些都直接影响增材制造过程中的成型精度。对于金属材料而言，较高的熔点可能使得材料在熔化过程中更难控制，增加了热变形的风险。而材料的热膨胀系数较大的情况下，零件在冷却过程中容易产生变形或应力，从而影响最终产品的尺寸和形状。在高性能材料的应用中，材料的流动性和热传导性对成型质量有重要作用，流动性较差的材料可能在成型过程中出现气泡或熔池不均匀现象，从而影响精度。基于材料的这些特性，选择合适的材料并合理调整工艺参数可以显著提高零件的制造精度。例如，在使用高温合金或塑料材料时，常常需要通过精确控制温度、速度和层厚来优化成型效果。

3.3 设备精度与环境因素

增材制造设备的精度与稳定性直接影响零件的制造精度和质量。如果设备本身的精度较低，即便工艺参数选择得当，最终产品的精度仍难以满足设计要求。因此，选择高精度和高稳定性的增材制造设备至关重要，尤其是在要求精细和高复杂度零件的生产中。此外，设备的长期稳定性也会影响生产过程中的精度波动，如设备老化或维护不当可能导致打印精度的下降。环境因素，如温度、湿度、气压等，也对增材制造过程的精度产生重要影响。温度变化会影响材料的熔化和冷却过程，导致零件的尺寸变化或形状变形；湿度过高则可能导致某些材料在打印过程中吸湿，影响材料性能，导致表面粗糙或结构不稳定。因此，在控制精度时，除了优化工艺参数和选择合适材料外，维持良好的生产环境也是确保增材制造精度的必要条件。

4 增材制造精度控制方法

4.1 工艺优化

增材制造的精度控制关键在于优化工艺参数。由于增材制造工艺具有高度的个性化，工艺参数的优化对于保证零件的尺寸精度和表面质量至关重要。具体来说，激光功率、扫描速度、层厚、填充密度、扫描路径等都是影响零件精度的重要因素。在激光选区熔化（SLM）技术中，激光功率过高容易导致过度熔化，造成熔池尺寸过大，进而影响零件的尺寸精度和表面质量。扫描速度则影响成形过程中的热传导效应，过快的扫描速度可能导致局部材料冷却不均，产生翘曲和内应力。因此，合适的扫描速度和激光功率相匹配，能够有效改善零件的成形精度。

4.2 后处理技术

增材制造在成型过程中常出现表面粗糙和形变问题，这直接影响到零件的精度要求。因此，后处理技术成为提高精度的一个重要手段。后处理可以分为机械加工、热处理、表面喷涂等方式，其中机械加工通常用于改善零件的几何尺寸和表面质量。对于一些复杂形状的零件，通常需要使用精密铣削、磨削等方法对其进行进一步的加工，以提高尺寸精度和表面光洁度。热处理则通过控制温度变化来缓解增