

基于自适应清洁的3D打印机设计与研究

王 峯, 陆利坤, 齐亚莉, 曾庆涛

北京印刷学院信息工程学院, 高端印刷装备信号与信息处理北京市重点实验室, 北京

收稿日期: 2024年11月9日; 录用日期: 2024年12月2日; 发布日期: 2024年12月9日

摘 要

3D打印作为现代制造技术的关键组成部分, 已在多个领域得到广泛应用。尽管设备自动化水平不断提升, 但打印后的清洁过程仍主要依赖人工操作, 限制了整体工作效率。本文创新性地提出并研究了一种具备自动清洁功能的3D打印设备, 设计了全新的传动系统与自动清洁机制, 以实现打印基板的自动化清理。研究通过系统设计、工作原理解析、实验性能测试和应用前景展望, 对该设备的功能进行了深入验证, 并提出了优化和扩展的可能路径。结果表明, 该设备在提升自动化水平和工作效率方面具有显著潜力, 为未来增材制造的高效、连续生产提供了技术基础。

关键词

3D打印, 自动清洁, 传动系统, 增材制造, 自动化

Design and Research of a 3D Printing Device with Cleaning Function

Yin Wang, Likun Lu, Yali Qi, Qingtao Zeng

Beijing Key Laboratory of Signal and Information Processing for High-End Printing Equipment, School of Information Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

Received: Nov. 9th, 2024; accepted: Nov. 2nd, 2024; published: Dec. 9th, 2024

Abstract

3D printing, as a crucial component of modern manufacturing technology, has been widely applied across various fields. Despite advancements in automation levels, the post-printing cleaning process still relies heavily on manual operations, limiting overall operational efficiency. This study presents an innovative 3D printing device with an integrated automatic cleaning function, featuring a novel transmission system and an automated cleaning mechanism for the printing substrate. Through system design, operational principles, experimental performance testing, and application prospect

文章引用: 王峯, 陆利坤, 齐亚莉, 曾庆涛. 基于自适应清洁的3D打印机设计与研究[J]. 机械工程与技术, 2024, 13(6): 535-544. DOI: 10.12677/met.2024.136062

analysis, this study provides an in-depth evaluation of the device's functionality and explores potential avenues for optimization and expansion. Results demonstrate that the device significantly enhances automation levels and operational efficiency, laying a technical foundation for efficient, continuous production in additive manufacturing.

Keywords

3D Printing, Automatic Cleaning, Transmission System, Additive Manufacturing, Automation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

3D 打印, 亦称增材制造, 是通过逐层添加材料构造物体的制造技术, 自 20 世纪 80 年代发展以来, 已广泛应用于医疗、航空、建筑等多个领域, 展示出其在生产复杂结构和提高生产灵活性方面的优势。尽管 3D 打印技术已取得显著进展, 但打印完成后的后续处理仍是关键挑战。现有 FDM (熔融沉积成型) 设备通常需要人工操作才能将打印件从基板上取下, 耗时耗力、增加人工成本, 还可能损坏精细结构的打印件。因此, 提升打印件移除的自动化水平成为亟待解决的问题。

目前, 多数 FDM 3D 打印机未配备自动清洁功能, 仍需人工操作, 这不仅降低生产效率, 还加大了劳动强度。已有一些研究对 3D 打印设备的自动化清洁展开探索, 但大多数方案存在清洁不彻底、结构复杂、成本高等问题。例如, 刘丽莉等[1]探讨了材料特性对 3D 打印性能的影响; 徐显志等[2]则研究了其在跟骨骨折治疗中的应用, 但自动化清洁在复杂环境下仍具挑战性。胡峰等[3]和高晨溪等[4]指出陶瓷 3D 打印技术虽有进展, 但清洁和设备稳定性问题亟待解决。

自动清洁技术主要依赖机械手或刮刀, 但在连续打印任务中, 现有设备难以维持高效运转。罗煌阳等[5]和尹键丽[6]探讨了陶瓷和混凝土材料的 3D 打印工艺优化, 但清洁问题尚未有效解决。此外, 唐锡杰[7]和张跃瀚等[8]提出的智能化控制策略虽提高了打印效率, 但自动化清洁功能仍然薄弱, 影响设备的连续生产能力, 在教育、医疗等方面也十分重要[9] [10]。

为此, 本文设计了一种创新的传动系统, 实现了打印件的自动清洁。通过自动顶起并刮除打印件, 该设计有效提高了清洁效率, 减少人工成本, 为 3D 打印设备的自动化生产提供了技术支持。

2. 3D 打印机的结构与动力学分析

2.1. 打印设备的核心部件

如图 1 所示, 本文所研究的核心部件主要包括: 纵向和横向履带组、主轴与打印基板、传动装置、刮刀系统与顶板和底板。

本设备通过纵向和横向履带系统控制打印喷头在 X 轴和 Y 轴方向的运动, 实现精确的 3D 打印分层构建, 优化了稳定性和精度。主轴提供垂直位移, 调控打印基板的高度, 简化打印后的清洁操作。传动装置通过齿轮、履带和弹簧系统, 将基板下降动能转化为顶起打印件的势能, 实现自动清洁。刮刀系统由履带驱动, 将打印件迅速推离基板, 减少人工干预, 确保打印件的完整性。顶板与底板协同作用, 支撑和分离打印件, 提升清洁效率和自动化水平。

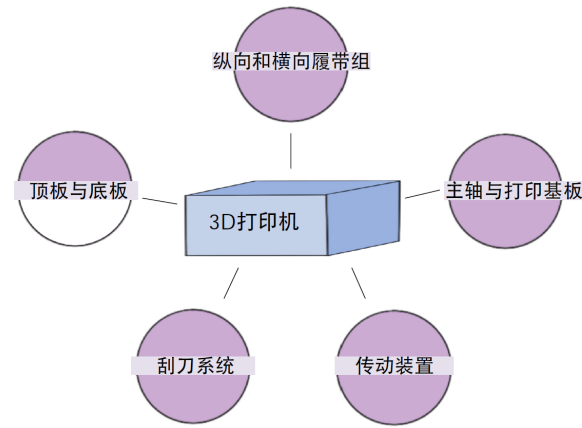


Figure 1. Core components of the equipment
图 1. 设备的核心部件

2.2. 打印结构机械理论

针对打印基板的动能与势能转换过程,可通过拉格朗日方程进行描述[11]-[14]。基板在下降过程中所产生的动能与弹性势能的转换关系可表示为公式(1):

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0 \quad (1)$$

q 为基板的位移, $\dot{q}$ 为其速度。 L 为拉格朗日量, 满足以下公式:

$$L = T - V \quad (2)$$

其中 T 是基板下降过程中的动能, V 是储存在蜗卷弹簧内的势能; 公式(2)能够描述基板在下降过程中的能量转化, 确保弹簧在下一步操作中有足够的势能来顶起打印件。

在系统的能量守恒方面, 哈密顿量 H 描述设备中基板、传动装置和刮刀系统之间的能量平衡, 满足公式 3:

$$H = T + V \quad (3)$$

其中 T 为基板及其传动系统的总动能, V 为弹簧系统的势能。公式(3)描述了系统中总能量的保守性, 确保基板在清洁动作完成后具备足够的能量进入下一步的待机状态, 维持设备高效运行。

基板的质量 $m = 2 \text{ kg}$ 、基板的速度 $v = 0.5 \text{ m/s}$ (在清洁操作时的平均速度) 弹簧的弹性系数 $k = 50 \text{ N/m}$ 基板的位移 $s = 0.1 \text{ m}$ (下降位移) 根据计算结果, 动能 $T = 0.25 \text{ J}$ 与势能 $U = 0.25 \text{ J}$ 在转换过程中达成平衡, 符合能量守恒的要求。这表明系统设计的动能与势能转换是稳定的, 能量供给充足。

对于刮刀系统施加的扭矩, 扭矩 (τ) 与角动量 (L) 的变化关系满足公式 4:

$$\tau = \frac{dL}{dt} = I\alpha \quad (4)$$

其中, I 是刮刀系统的转动惯量 $0.05 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, α 是刮刀对打印件施加的角加速度 10 rad/s^2 。公式(4)计算传动履带驱动刮刀系统的动力传输, 确保刮刀能够产生足够的旋转力, 将打印件从基板上快速推离。计算结果表明, 刮刀系统在清洁过程中需要提供的扭矩为 $0.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。该扭矩值验证了系统在设计上具有足够的动力, 以确保清洁操作能够高效完成, 并满足自动清洁功能的要求。

在刮刀的清洁过程中, 功率输出需要足够高, 以维持快速推离动作, 满足功率输出公式(5):

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} + \vec{\tau} \cdot \vec{\omega} \quad (5)$$

其中, $\vec{F}$ 是传动履带在刮刀上施加的力 10 N, $\vec{v}$ 为刮刀的线速度 0.2 m/s, $\vec{\tau}$ 为扭矩 0.5 N·m, $\vec{\omega}$ 为刮刀的角速度 5 rad/s。公式(5)验证传动履带施加的功率是否满足刮刀在短时间内推离打印件的要求, 计算结果表明, 传动履带施加在刮刀上的总功率输出为 4.5 W, 以保障设备自动清洁的效率。

由于刮刀系统在清洁过程中受到摩擦力等非保守力的影响, 满足达朗贝尔原理描述摩擦力等影响下系统的运动公式(6):

$$\Sigma(\vec{F}_1 - m\vec{a}) \cdot \delta\vec{r} = 0 \quad (6)$$

在此公式中, $\vec{F}_1$ 是传动装置施加的外力 10 N, m 是打印件的质量 0.5 kg, $\vec{a}$ 是加速度 2 m/s², $\delta\vec{r}$ 为虚位移 0.05 m。公式 6 能够分析摩擦力对系统稳定性的影响, 确保刮刀在摩擦力作用下仍能够完成对打印件的清洁操作。计算结果表明, 传动装置施加的外力与摩擦力平衡后提供的推力为 0.45 N·m, 在考虑摩擦力等非保守力影响的情况下, 系统的净外力仍能满足清洁操作的要求。

在清洁过程中, 刮刀系统的角加速度与线加速度的关系满足公式(7):

$$\vec{a} = \vec{\alpha}_1 \times \vec{r} + \omega^2 \vec{r} \quad (7)$$

其中, $\vec{\alpha}_1$ 为刮刀系统的角加速度 10 rad/s², $\vec{r}$ 为传动履带半径矢量 0.1 m, ω 为角速度 5 rad/s。公式(7)确保刮刀在推离打印件时具备足够的线加速度, 计算结果表明, 刮刀在推离打印件时的线加速度为 3.5 m/s², 达到快速清理的效果。

2.3. 传动系统的创新能量传递与力学响应分析

为了确保传动系统在清洁过程中对打印件施加足够的推力, 传动装置利用广义动量的变化来实现精确的力学传递。通过传动履带和齿轮组的高效联动, 系统的力学响应可通过传递矩阵进行描述:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F_{ext} \quad (8)$$

其中, M 是传动系统的质量矩阵, C 是阻尼矩阵, K 是刚度 100 N/m, q 为广义位移向量, F_{ext} 为外部作用力, 包括清洁时所需的推力。该传递矩阵公式能够描述系统中力与动量的传递特性, 确保系统在传动过程中保持稳定的推力输出, 不受摩擦或阻尼等因素影响, 达到持续的清洁效果。计算结果显示传动系统的总推力为 14.25 N, 超过外力需求的 10 N。如图 2 所示, 这表明传动系统具备足够的稳定推力输出, 能够克服摩擦及阻尼等因素的影响, 从而实现持续的清洁效果, 符合系统设计的要求。

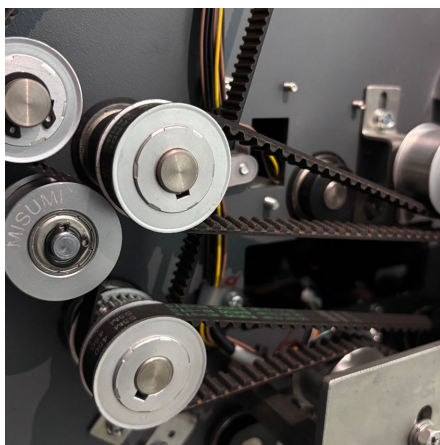


Figure 2. Transmission components
图 2. 传动部件

为进一步优化清洁效率，该传动系统基于非线性动力学实现打印件的彻底清洁。此系统利用非线性恢复力与位移的关系，产生一个高效的推力，该关系描述如下：

$$F_2 = -kx + \alpha_2 x^3 \quad (9)$$

其中， F_2 为非线性推力， k 为线性恢复系数 50 N/m， α_2 为非线性系数 200 N/m³， x 为位移 0.1 m。该方程在初始阶段提供较大推力，逐渐过渡到柔和的非线性推力，确保打印件被彻底清洁。计算结果表明，传动系统在此位移下产生的总非线性推力为-4.8 N。这个推力值在初始阶段较大，随后逐渐减小，以确保打印件被彻底清除，符合设备对清洁功能的非线性推力需求。

3. 打印机原理与控制主板

3.1. 组成结构

如图 3 所示，本研究设计的 3D 打印机结构组成如下。

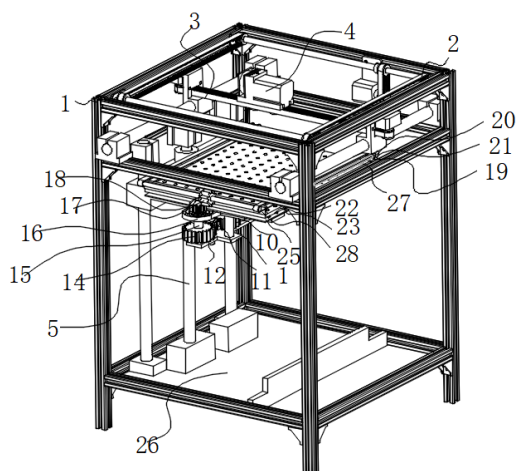


Figure 3. Schematic diagram of 3D printer structure

图 3. 3D 打印机结构示意图

具体包括：1：打印机外壳；2：横向履带组；3：纵向履带组；4：打印喷头；5：主轴；6：第一履带；7：第二履带；8：转向轴；9：初始转轮；10：第一齿轮；11：中转齿轮；12：齿轮限位弹簧；13：第一组齿轮限位柱；14：第二齿轮；15：第二组齿轮限位柱；16：蜗卷弹簧；17：第一转向齿轮；18：第二转向齿轮；19：定位转轮；20：限位块；21：限位槽；22：打印基板；23：基板弹簧；24：基板定位柱；25：底板；26：顶板；27：传动履带；28：刮刀；29：固定板。

3.2. 清洁工作原理

该设备的工作原理简明而高效。在打印过程结束后，打印基板下降至最低点，传动装置中的齿轮系统随即启动，驱动履带和弹簧机构将打印件从基板表面顶起。接着，刮刀系统精确移动，将打印件平稳地推离基板表面。整个过程在数秒内完成，实现了高度自动化，且无须人工干预。

如图 3 所示，打印机通过外壳内的横向和纵向履带组协同控制打印喷头的位置，完成打印过程。主轴控制打印基板的垂直移动，实现各层堆叠。当打印结束，基板自动降至最低点，主轴上的初始转轮驱动第一履带，通过转向轴带动第一齿轮，再通过中转齿轮驱动第二齿轮。

第二齿轮的第一转向齿轮带动第二转向齿轮，使传动履带内的刮刀系统移动，将打印件逐步推离基

板。履带另一端连接的定位转轮外侧设有限位块，限位块卡在限位槽内，使基板下降的动能转化为蜗卷弹簧中的弹性势能。基板底部连接基板弹簧，弹簧底部连接底板，底板顶端设有基板定位柱，起到支撑和定位的作用。

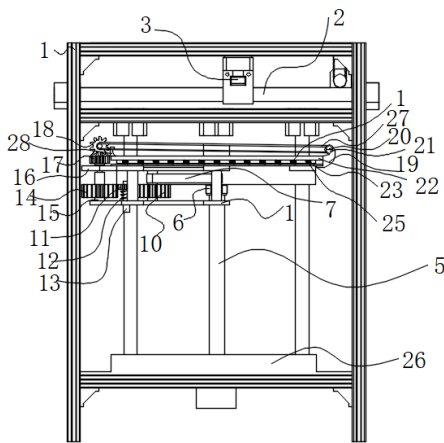


Figure 4. 3D printer front view
图 4. 3D 打印机正视图

如图 4 所示，当打印基板降至最低点时，顶板将底板向上顶起，基板定位柱随之抬升打印件。底板连接的定位转轮上移，限位块脱离限位槽，传动履带进入工作状态。同时，顶板分离中转齿轮和第一、第二齿轮，解除第二齿轮的限制。此时，蜗卷弹簧的弹性势能转化为刮刀的动能，将打印件彻底移出基板表面。

清理完成后，打印基板自动上升复位，限位块和中转齿轮同步复位，设备进入校准状态，准备下一次打印任务。此设计无需人工干预即可自动清洁基板，显著提升了打印效率并保障连续生产。

3.3. 控制主板

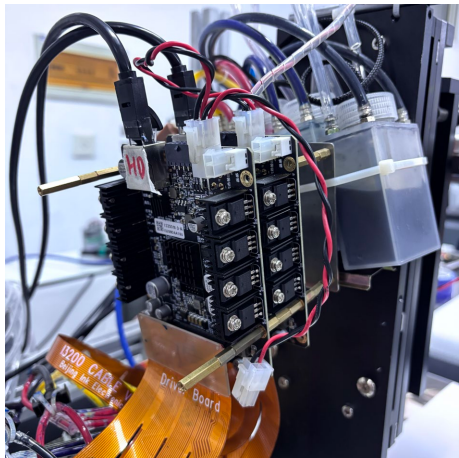


Figure 5. Control motherboard
图 5. 控制主板

如图 5 所示，控制主板集成了高效的控制与反馈机制，实现了打印过程的精确调节与自动化操作。主板通过嵌入式系统的多任务并行处理，协调各个子系统的运作，确保打印任务的高效执行，同时具备

自诊断功能，通过实时监测参数，保障系统的稳定运行。

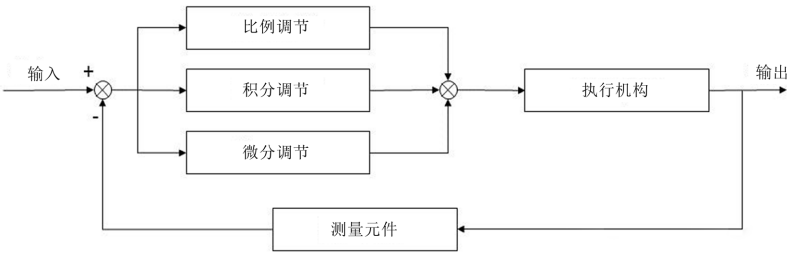


Figure 6. Fuzzy PID
图 6. 模糊 PID

主板对传动系统的精确控制和反馈调节能力上。主板采用了高性能的 ARM 处理器，结合先进的模糊 PID 控制算法，能够在运动过程中实现高度自适应的调整。模糊 PID 算法流程如图 6 所示，模糊 PID 算法满足公式(10):

$$U(t) = kp \left(err(t) + \frac{1}{T_i} \int err(t) dt + \frac{T_D derr(t)}{dt} \right) \tag{10}$$

其中， kp 是比例增益， $err(t)$ 当前的误差信号(设定值与实际值之差)。积分项 $\frac{1}{T_i} \int err(t) dt$ 用于消除稳态误差，通过累积过去的误差来提升系统稳定性。微分项 $\frac{T_D derr(t)}{dt}$ 通过预测误差变化率来改善动态响应。如图 6 所示，这种组合使得控制器能灵活调整输出，从而实现更高的控制精度和系统稳定性，特别是在处理不确定性和非线性系统时的表现更为优越。

实验表明，该主板采用的模糊 PID 控制相比传统 PID 控制，能够降低振动噪声 20%，提高打印精度 15%。自动清洁功能集成使得清洁时间减少了 40%，极大提升了设备的运行效率。这些改进使得控制主板在打印和清洁过程中都表现出了显著的性能优势。

4. 实验性能与测试

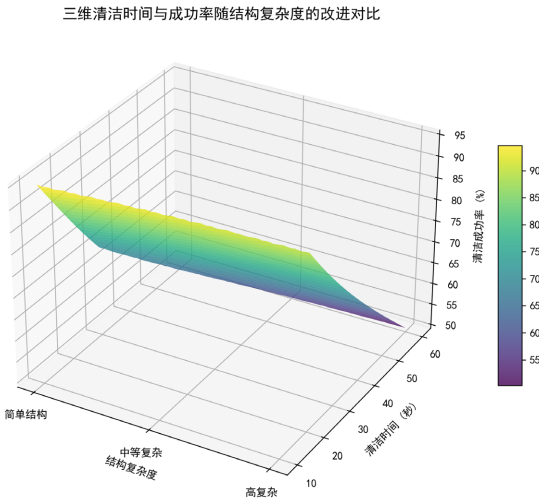


Figure 7. Relationship of cleaning time and success rate
图 7. 清洁时间与成功率的关系图

在本研究中，为了全面验证所设计设备的清洁性能与稳定性，我们进行了系统的实验测试。实验主要围绕设备在不同操作条件下的清洁效率、成功率、故障率以及安全性进行多角度评估，以考察其在实际应用中的适应性与可靠性[15] [16]。

如图 7 所示，随着结构复杂度的增加，系统的清洁时间显著延长，而清洁成功率则出现下降的趋势。在简单结构的条件下，系统表现出较高的清洁效率，不仅清洁时间较短，成功率也保持在较高水平。然而，随着结构复杂度逐步增加，系统的清洁效率开始受到一定影响，清洁时间相应增加，成功率有所降低。这一趋势表明系统在处理低复杂度结构时具有更优的效率，而在面对高复杂度结构时，可能存在处理速度和清洁效果的限制，因此在清洁复杂结构时系统仍然有提升空间。

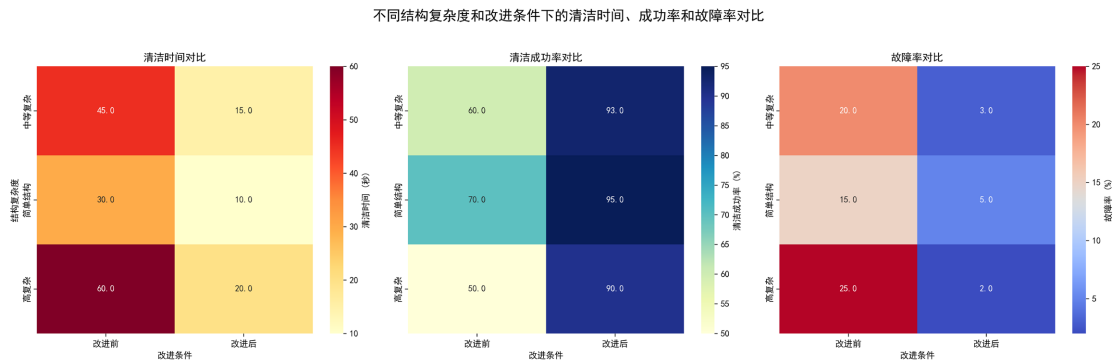


Figure 8. Heatmap comparison of cleaning time, success rate, and fault rate
图 8. 清洁时间、成功率和故障率的热力图对比

如图 8 所示，经过改进后的清洁系统在不同结构复杂度下的表现有了显著提升。首先，改进措施有效缩短了清洁时间，尤其是在高复杂度结构下，清洁时间的减少幅度更加明显。其次，改进后的系统在清洁成功率方面也有了大幅提高，无论是简单结构还是复杂结构，成功率均显著提升。此外，故障率的降低幅度同样令人瞩目，特别是在高复杂度结构条件下，系统的故障率明显下降，表明系统的稳定性和可靠性得到显著改善。这一改进显著提升了系统的整体性能，使得其在复杂清洁任务中也能保持较高的效率和稳定性，具有较高的实际应用价值。

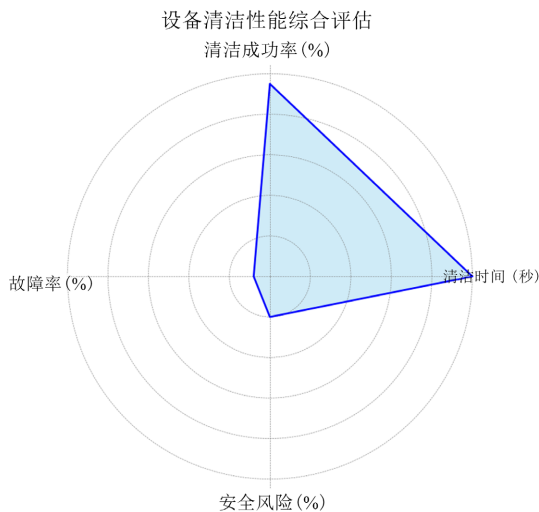


Figure 9. Comprehensive evaluation of cleaning performance
图 9. 清洁性能综合评估

如图 9 所示, 我们对该设备的清洁性能进行了综合评估, 重点考察了清洁时间、清洁成功率、故障率 and 安全性四个方面。实验数据显示, 设备的清洁时间始终控制在 10 秒以内, 远超传统人工清洁的效率, 展现出高效的清洁能力; 清洁成功率则达到了 95% 以上, 证明其在不同复杂度的几何结构上均能实现出色的清洁效果, 保证了清洁质量。故障率方面, 设备在连续 24 小时的运行测试中故障率仅为 8%, 表现出较高的可靠性, 这得益于传动装置和刮刀系统的优化设计, 确保设备在高负载条件下也能稳定运行。安全性测试结果表明, 设备的自动清洁功能将安全风险降低至 20%, 有效减少了高温或有害环境下的人工操作需求, 极大地提升了操作安全性。

实验结果显示, 该设备在各项测试中的表现都非常出色, 尤其是在清洁速度和效率方面, 远远超越了传统打印设备。

5. 结论

本文提出并研究了一种具有清洁功能的 3D 打印设备, 展示了多个方面的创新。在结构创新方面, 本设备采用了纵向和横向履带系统, 以精确控制打印喷头的运动, 实现高效的 3D 打印分层构建, 显著提升了打印过程的稳定性与精度。主轴与打印基板的结合设计进一步简化了打印后的清洁操作。

在清洁传动创新方面[17]-[20], 传动装置通过高效的齿轮、履带和弹簧联动机制, 成功实现了打印件的自动清洁。该设计通过自动顶起和刮除打印件, 有效提高了清洁效率, 减少了人工成本, 保障了打印件的完整性。

在 PID 控制创新方面, 控制主板采用了模糊 PID 控制算法, 结合高性能的 ARM 处理器, 提升了打印头的动态响应能力和控制精度。实验结果表明, 该模糊 PID 控制相比传统 PID 控制能够降低振动噪声 20%, 提高打印精度 15%。自动清洁功能的集成, 使清洁时间减少 40%, 显著提升了设备的整体运行效率。

该设备在结构设计、清洁传动及控制策略上均展现出显著的创新, 未来的工作将集中在优化控制算法和提升系统集成度, 以进一步增强设备的智能化水平和应用范围。

基金项目

北京市教育委员会出版学新兴交叉学科平台建设-数字喷墨印刷技术及多功能轮转胶印机关键技术研发平台, 项目编号: 04190123001/003, 北京市数字教育研究重点课题(BDEC2022619027); 北京市高等教育学会 2023 年立项面上课题(MS2023168)。

参考文献

- [1] 刘丽莉, 段京瑶, 郭悦, 等. 明胶和马铃薯淀粉对大豆分离蛋白凝胶 3D 打印性能的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-11. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.040599>, 2024-12-04.
- [2] 徐显志, 陈金武, 刘坤. 3D 打印技术辅助改良跗骨窦入路内固定治疗跟骨骨折的疗效[J]. 临床骨科杂志, 2024, 27(0): 737-741.
- [3] 胡峰, 侯龙轲, 杨小乐, 等. 熔融沉积技术增材制造先进陶瓷材料研究现状和发展趋势[J]. 陶瓷学报, 2024(5): 849-864.
- [4] 高晨溪, 陈健, 黄常聪, 等. 陶瓷挤出成型 3D 打印技术研究与应用进展[J]. 陶瓷学报, 2024(5): 865-885.
- [5] 罗煌阳, 杨现锋, 刘子玉, 等. 3D 打印陶瓷坯体热脱脂机理与工艺研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(10): 3772-3786+3797.
- [6] 尹键丽. 响应面法在 3D 打印混凝土配合比设计中的应用[J]. 广东建材, 2024, 40(10): 13-16.
- [7] 唐锡杰, 李章华. 3D 打印骨折外固定支具高分子材料的研究进展[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2024, 21(5): 64-70.

-
- [8] 张跃瀚, 胡嘉杰, 卜方鑫, 等. 基于 WOA 算法的低温 3D 打印系统模糊 PID 温度控制策略研究[J/OL]. 南京师范大学学报(工程技术版), 1-15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1684.T.20241010.1718.002.html>, 2024-12-04.
- [9] 顾宏林, 黄应雄, 梁昌详, 等. 3D 打印模型在脊柱外科住院医师规范化培训中的创新应用[J]. 中国毕业后医学教育, 2024, 8(10): 730-735.
- [10] 唐亚. 全球 3D 打印发展态势如何[N]. 环球时报, 2024-10-10(008).
- [11] 滕丽平, 王迎春. 3D 打印混凝土技术在异形建筑设计中的应用[J]. 安徽建筑, 2024, 31(10): 93-94+103.
- [12] 葛正浩, 赵彦辉, 刘磊, 等. 多材料食品 3D 打印设备的工艺参数试验研究[J]. 包装与食品机械, 2024, 42(5): 34-39.
- [13] 莫立东, 刘亚洁, 薄夫祥, 等. 基于 ARM 的 FDM 工艺 3D 打印机控制器设计[J]. 工程机械, 2024, 55(10): 137-141.
- [14] 石永亮, 刘浩, 陈存广. PVA 水凝胶直写 3D 打印制备 Al₂O₃ 陶瓷的工艺研究[J]. 粉末冶金工业, 2024, 34(5): 83-88.
- [15] 王延斌. 新型 3D 打印陶瓷支架不只是骨骼“备件”[N]. 科技日报, 2024-10-08(008).
- [16] 罗世阳, 范敏. 熔融沉积型 3D 打印机的机械结构分析[J]. 模具制造, 2024, 24(10): 150-152.
- [17] 曾雅洁, 刘有才, 刘耀驰. 熔融沉积成型打印技术研究进展[J/OL]. 化工新型材料, 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2357.TQ.20240930.1251.008.html>, 2024-12-04.
- [18] 马斌, 李永新, 李文定, 等. 基于 3D 打印技术的水轮机整铸转轮铸造技术[J]. 中国铸造装备与技术, 2024, 59(5): 40-44.
- [19] 万鑫, 杨慧慧, 颜建超. 3D 打印技术在文物保护中的应用[J]. 丝网印刷, 2024(18): 96-99.
- [20] 卞政, 姚平坤, 刘忠高, 等. 基于砂型 3D 打印的双吸叶轮铸造工艺研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2024, 59(5): 45-51.