

本文引用格式：黄庆鸿,张浩,曹立超,等.基于虚拟参考反馈整定的激光定向能量沉积过程控制[J].自动化与信息工程,2026,47(2):34-45.

HUANG Qinghong, ZHANG Hao, CAO Lichao, et al. Laser-directed energy deposition process control based on virtual reference feedback tuning[J]. Automation & Information Engineering, 2026,47(2):34-45.

基于虚拟参考反馈整定的激光定向能量沉积过程控制*

黄庆鸿^{1,2} 张浩² 曹立超² 毕贵军²

(1.成都航空职业技术大学, 四川 成都 610100

2.广东省科学院智能制造研究所, 广东 广州 510070)

摘要：在激光定向能量沉积（L-DED）过程中，熔池特征与热积累高度相关，易导致零部件尺寸精度出现偏差。针对现有 PID 控制器大多依赖预设参数与试错法确定最优控制参数，耗时且智能化程度低的问题，提出一种虚拟参考反馈整定（VRFT）-PID 自适应控制方法。采用熔池图像处理算法（中值滤波、灰度转换、二值化、形态学处理与椭圆拟合）提取熔池宽度；以熔池宽度为反馈，设计 VRFT-PID 自适应控制器，以实时调整激光电压，按预设时间间隔 10 s 自动更新 PID 参数，实现 L-DED 过程熔池宽度的稳定控制；搭建熔池监测与控制一体化系统，对 VRFT-PID 自适应控制方法进行实验验证。实验结果表明，采用 VRFT-PID 自适应控制方法制备的工件，其尺寸精度得到提升，且该精度提升与熔池宽度的一致性呈现良好相关性。

关键词：虚拟参考反馈整定；激光定向能量沉积；熔池宽度；自适应控制；PID 控制

中图分类号：TP273

文献标志码：A

文章编号：1674-2605(2026)02-0005-12

DOI：10.12475/aie.20260205

开放获取

Laser-directed Energy Deposition Process Control Based on Virtual Reference Feedback Tuning

HUANG Qinghong^{1,2} ZHANG Hao² CAO Lichao² BI Guijun²

(1.Chengdu Aeronautic Polytechnic University, Chengdu 610100, China

2.Institute of Intelligent Manufacturing, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China)

Abstract: During laser-directed energy deposition (L-DED), the melt pool characteristics are highly correlated with heat accumulation, which can easily lead to dimensional deviations in the manufactured components. To address the problem that existing PID controllers mostly rely on preset parameters and trial-and-error methods to determine the optimal control parameters—resulting in time-consuming procedures and low intelligence—a virtual reference feedback tuning (VRFT)-PID adaptive control method is proposed. An image processing algorithm for the melt pool (median filtering, grayscale conversion, binarization, morphological processing, and ellipse fitting) is used to extract the melt pool width. Using the melt pool width as feedback, a VRFT-PID adaptive controller is designed to adjust the laser voltage in real time, automatically updating the PID parameters at preset time intervals of 10 seconds, thereby achieving stable control of the melt pool width during the L-DED process. An integrated melt pool monitoring and control system is established to experimentally validate the VRFT-PID adaptive control method. The experimental results show that the dimensional accuracy of the components fabricated using the VRFT-PID adaptive control method is improved, and this improvement in accuracy exhibits a good correlation with the consistency of the melt pool width.

Keywords: virtual reference feedback tuning; laser-directed energy deposition; melt pool width; adaptive control; PID control

0 引言

激光定向能量沉积（laser-direct energy deposition,

L-DED）技术是一种激光增材制造技术，其利用激光作为热源来熔化增材材料（包括粉末、金属丝等），

34 * 基金项目：广东省基础与应用基础研究基金项目（2023B1515120045）；2025 年成都航空职业技术大学校级自然科研项目（ZZX0625136）。

使材料沉积在基板或已沉积部件上^[1-2],用于逐层制造金属零部件。凭借分层制造、材料成分设计自由度高以及快速加热冷却带来的优异组织性能,L-DED 技术在航空航天、交通运输、生物医药及海洋工业等领域展现出广阔的应用前景^[3-4]。然而,与传统金属成形工艺相比,L-DED 工艺因热应力不均匀、熔池动力学特性显著、局部热积累、送粉速度不一致以及激光束输送与材料馈送过程中不可预测的干扰等因素,导致 L-DED 过程稳定性较差^[5],易产生缺陷和尺寸不准确等问题^[6]。相关研究表明,熔池特征(包括尺寸、形状、温度等)与 L-DED 过程稳定性、零部件成形质量高度相关,且熔池的尺寸、温度均与激光功率正相关^[9]。因此,基于传感器反馈的闭环控制系统对 L-DED 过程的精准调控至关重要^[7]。但 L-DED 工艺条件的动态变化、层间温度差异等因素,均使熔池特征呈非线性与动态变化规律^[8],导致恒定的控制参数无法适用于 L-DED 过程的精准控制需求。

PID 控制器因结构简单、控制有效,常用于基于熔池特征的 L-DED 控制系统。文献[10-11]利用热辐射计识别分析熔池的红外温度数据,并发送给 PID 控制器;PID 控制器根据熔池温度的波动实时调整激光功率,提高了沉积试样的组织性能、硬度均匀性与尺寸精度。文献[12]采用双输入单输出的混合控制系统(包含主沉积层高度控制器与从熔池温度控制器),实现沉积层高度与熔池温度的联合控制,保障零部件的稳定成形。然而,上述基于 PID 控制器的 L-DED 控制方法通常依赖人工调整控制参数,难以适应 L-DED 过程的动态变化。

近年来,基于数据驱动的自适应控制方法逐渐应用于 L-DED 过程。文献[13]通过有限元热模拟实现 PI 控制器对激光功率的调控,以精准控制熔池深度,但该方法对算力要求较高,且模拟与实际 L-DED 过程的匹配性仍需优化。现有数据驱动的自适应控制方法虽能自动调整控制参数,适配 L-DED 过程的层间变化,但仍存在系统辨识过程复杂、参数整定耗时等问题,且未考虑熔池动力学的层内变化,难以实现 L-

-DED 过程的精准控制。

针对多层零部件 L-DED 过程中,熔池特征随沉积层数增加而持续变化,恒定控制参数的 PID 控制器无法满足高精度成形与过程稳定性需求的问题,本文提出一种无需系统辨识的虚拟参考反馈整定(virtual reference feedback tuning, VRFT)-PID 自适应控制方法,实现 L-DED 过程熔池宽度的实时稳定控制,并搭建熔池监测与控制一体化系统,验证本文方法对不同形状/尺寸零部件的适应性。

1 熔池图像处理算法

本文利用 CMOS 相机采集熔池图像。熔池图像采集过程受到的粉末飞溅、烟雾、高温等离子体等因素干扰;图像传输与记录过程因设备误差而引入的噪声,均影响熔池特征的提取精度。为了快速、准确地提取熔池宽度,本文采用熔池图像处理算法对熔池图像进行中值滤波、灰度转换、二值化、形态学处理、椭圆拟合等处理,具体流程图如图 1 所示。

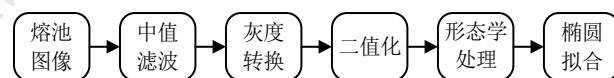


图 1 熔池图像处理算法流程图

熔池图像处理算法具体流程如下:

1) 中值滤波,将熔池图像的每个像素点灰度值设为其邻域窗口内所有像素点灰度值的中值,以滤除椒盐、脉冲等孤立噪声,且能有效保持熔池图像的边缘特征,避免图像过度模糊;

2) 灰度转换,利用灰度化算法将三维彩色熔池图像转换为一维灰度图像,以简化后续处理流程;

3) 二值化,采用 Otsu 自适应阈值法自动确定二值化阈值,以实现熔池图像与基板图像的精准分割;

4) 形态学处理,对二值化后的熔池图像进行先腐蚀、后膨胀的开运算,以消除图像中的细小连通域,使熔池图像轮廓更平滑,减少噪声对熔池边缘提取的干扰;

5) 椭圆拟合,在 L-DED 过程中,熔池受激光扫

描方向、粉末馈送速度等影响呈近似椭圆形态。椭圆的长轴与激光扫描方向一致，短轴长度为熔池宽度。本文采用最小二乘法椭圆拟合法获取熔池宽度，可有

效避免因粉末飞溅、噪声干扰而导致的熔池边缘不规则，提升熔池宽度提取的准确性与稳定性。

熔池图像处理结果如图 2 所示。

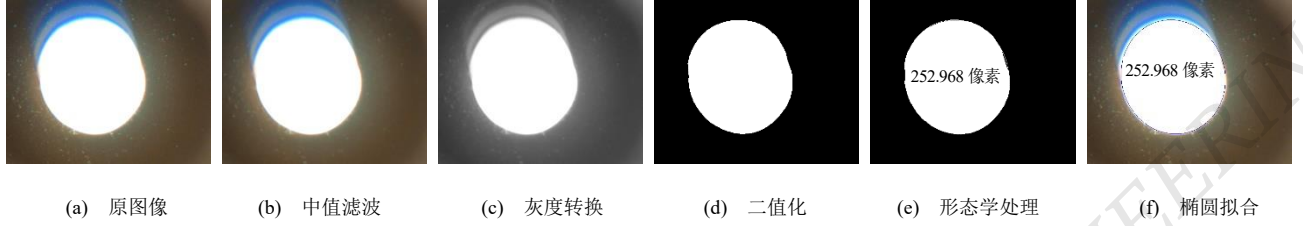


图 2 熔池图像处理结果

由图 2 可知，熔池轮廓能够被准确提取，椭圆拟合轮廓与熔池轮廓高度匹配，且未受背景基板亮斑的干扰。

2 控制器

2.1 传统 PID 控制器

在 L-DED 过程中，闭环控制通过调整激光电压来调节激光功率，从而稳定控制熔池宽度。L-DED 过程中传统 PID 控制器的流程框图如图 3 所示。

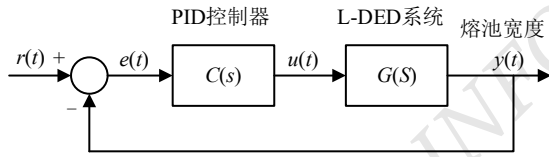


图 3 L-DED 过程中传统 PID 控制器的流程框图

在连续时间域内，传统 PID 控制器的控制公式为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

式中： $e(t)$ 为期望熔池宽度 $r(t)$ 与实际熔池宽度 $y(t)$ 的差值， K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分系数， $u(t)$ 为 PID 控制器输出的激光电压^[17]。

为提升控制器的稳定性，引入带一阶低通滤波器的 PID 控制器，其在 s 域的传递函数为^[18]

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{1 + \tau_d s} \quad (2)$$

式中： s 为频域的复数变量， τ_d 为一阶低通滤波器的时间常数。

为获得最优的控制参数 $\theta = (K_p, K_i, K_d)$ ，建立模型参考型数据驱动的优化模型^[19]：

$$\hat{\theta}_{MR} = \arg \min_{\theta} J_{MR}(\theta) \quad (3)$$

优化模型的目标为通过最小化 $J_{MR}(\theta)$ 来求解最优控制参数 θ 。

$$J_{MR}(\theta) = \left\| G(z^{-1}) \frac{1}{1 + G(z^{-1})C(z^{-1}, \theta)} - T_d(z^{-1})L_r(z^{-1}) \right\|_2^2 \quad (4)$$

式中：代价函数 $J_{MR}(\theta)$ 为期望传递函数 $T_d(z^{-1})$ 与实际传递函数的差值， $G(z^{-1})$ 、 $C(z^{-1}, \theta)$ 分别为 L-DED 系统 $G(s)$ 、PID 控制器 $C(s)$ 的离散化形式， $L_r(z^{-1})$ 为带通噪声滤波器。

传统参数整定方法需对 L-DED 系统 $G(s)$ 进行系统辨识，即需通过大量试错实验来确定最优控制参数，不仅增加材料消耗与实验成本，系统辨识误差还会导致控制参数并非最优，影响零部件成形质量。

2.2 VRFT-PID 自适应控制器

本文在传统 PID 控制器中引入 VRFT 模块，提出 VRFT-PID 自适应控制器，无需系统辨识即可实现控制参数的自动更新与最优整定。VRFT-PID 自适应控制器框架如图 4 所示。

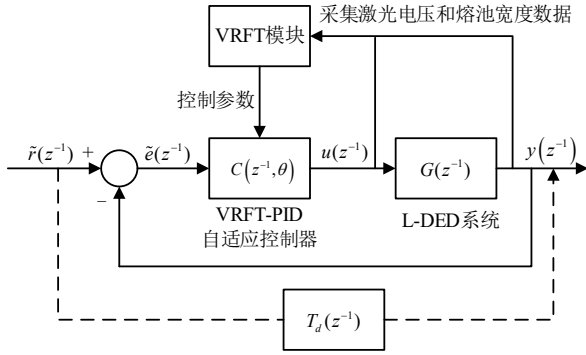


图4 VRFT-PID 自适应控制器框架图

设系统参考模型 $T_d(s)$ 为期望的系统调整时间和响应速度^[20]，其计算公式为

$$T_d(s) = \frac{e^{-s\tau}}{(1 + 0.2t_s s)^n} \quad (5)$$

式中： t_s 为稳态跟踪调整时间， τ 为响应延迟时间。

为保证 L-DED 系统稳定性，设稳态跟踪调整时间 t_s 为 0.01 s，响应延迟时间 τ 为 0， n 为 1。通过双线性变化法^[21]将连续域系统参考模型 $T_d(s)$ 离散化为 $T_d(z^{-1})$ ，以适配数字控制系统。

VRFT 模块的核心功能是最优化 PID 控制参数，使实际传递函数与系统参考模型 $T_d(z^{-1})$ 一致，且无需对 L-DED 系统进行系统辨识。系统参考模型 $T_d(z^{-1})$ 生成的期望系统输出 $y_d(z^{-1})$ 为

$$y_d(z^{-1}) = T_d(z^{-1})r(z^{-1}) \quad (6)$$

式中： $r(z^{-1})$ 为离散域的参考信号，即期望熔池宽度。

在 L-DED 过程中，每个时间帧的熔池宽度与激光电压存储在数据缓存区供 VRFT 函数读取。基于系统参考模型 $T_d(z^{-1})$ 与系统实际输出 $y(z^{-1})$ 计算虚拟参考信号为

$$\tilde{r}(z^{-1}) = T_d(z^{-1})y(z^{-1}) \quad (7)$$

式中： $y(z^{-1})$ 为熔池宽度数据集的离散化形式。

当将系统实际输出 $y(z^{-1})$ 为期望系统输出 $y_d(z^{-1})$ 时， $\tilde{r}(z^{-1})$ 为系统参考模型 $T_d(z^{-1})$ 的期望参

考信号。

由虚拟参考信号 $\tilde{r}(z^{-1})$ 计算虚拟误差 $\tilde{e}(z^{-1})$ ：

$$\tilde{e}(z^{-1}) = \tilde{r}(z^{-1}) - y(z^{-1}) = (T_d^{-1}(z^{-1}) - 1)y(z^{-1}) \quad (8)$$

将虚拟误差 $\tilde{e}(z^{-1})$ 输入理想控制器 $C(z^{-1}, \theta)$ ，输出的激光电压 $u(z^{-1})$ 为

$$u(z^{-1}) = C(z^{-1}, \theta)e(z^{-1}) = \rho^T(z^{-1})\theta \tilde{e}(z^{-1}) \quad (9)$$

式中： $\rho^T(z^{-1})$ 为传递函数向量。

对公式(2)进行双线性变化，得到离散域 PID 控制器的传递函数为

$$C_{\text{PID}}(z^{-1}, \theta) = \begin{bmatrix} K_p & K_i & K_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - z^{-1} \\ \frac{T_s z^{-1}}{1 - z^{-1}} \\ \frac{1 - z^{-1}}{2T_s} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中： T_s 为系统采样时间。

通过求解 VRFT 函数，得到最优 PID 控制参数 $\hat{\theta}_{\text{VRFT}}$ 为

$$\hat{\theta}_{\text{VRFT}} = \arg \min_{\theta} J_{\text{VRFT}}(\theta) \quad (11)$$

$$J_{\text{VRFT}}(\theta) \triangleq \|u(z^{-1}) - C(z^{-1}, \theta)\tilde{e}(z^{-1})\|_2^2 =$$

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [u_k - C(z^{-1}, \theta)(T_d^{-1}(z^{-1}) - 1)y_k]^2 \quad (12)$$

式中： u_k 、 y_k 分别为第 k 个时间帧的激光电压、熔池宽度， N 为数据样本数。

为进一步降低噪声对控制参数整定的影响，引入滤波函数 $L(z^{-1})$ 对虚拟误差与激光电压进行滤波，滤波后的虚拟误差 $\tilde{e}_F(k)$ 、激光电压 $u_F(k)$ 分别为

$$\begin{aligned} \tilde{e}_F(k) &= L(z^{-1})\tilde{e}(k) \\ u_F(k) &= L(z^{-1})u(k) \end{aligned} \quad (13)$$

将公式(13)代入公式(12), 可得

$$J_{\text{VRFT}}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [u_F(k) - C(z^{-1}, \theta) \tilde{e}_F(k)]^2 =$$

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left\{ L(z^{-1}) [u(k) - C(z^{-1}, \theta) \tilde{e}(k)] \right\}^2 =$$

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left\{ L(z^{-1}) [u(k) - C(z^{-1}, \theta) (T_d^{-1}(z^{-1}) - 1) y(k)] \right\}^2$$
(14)

其中, 滤波器 $L(z^{-1})$ 为

$$L(z^{-1}) = \frac{(1 - T_d(z^{-1})) T_d(z^{-1})}{\Phi_u(z^{-1})^{\frac{1}{2}}} \quad (15)$$

式中: $\Phi_u(z^{-1})$ 为激光电压信号的谱密度, 可通过激光电压数据集, 采用周期图法进行计算。

本文采用 ROS 系统^[22]实现 VRFT-PID 自适应控制框架的信息传递。数据驱动 VRFT-PID 自适应多任务框架包括熔池监测模块、VRFT 模块、PID 模块和电压驱动模块, 各模块独立连续执行任务, 并通过 ROS 的话题订阅与发布实现数据交互。数据驱动 VRFT-PID 自适应多任务框架如图 5 所示。

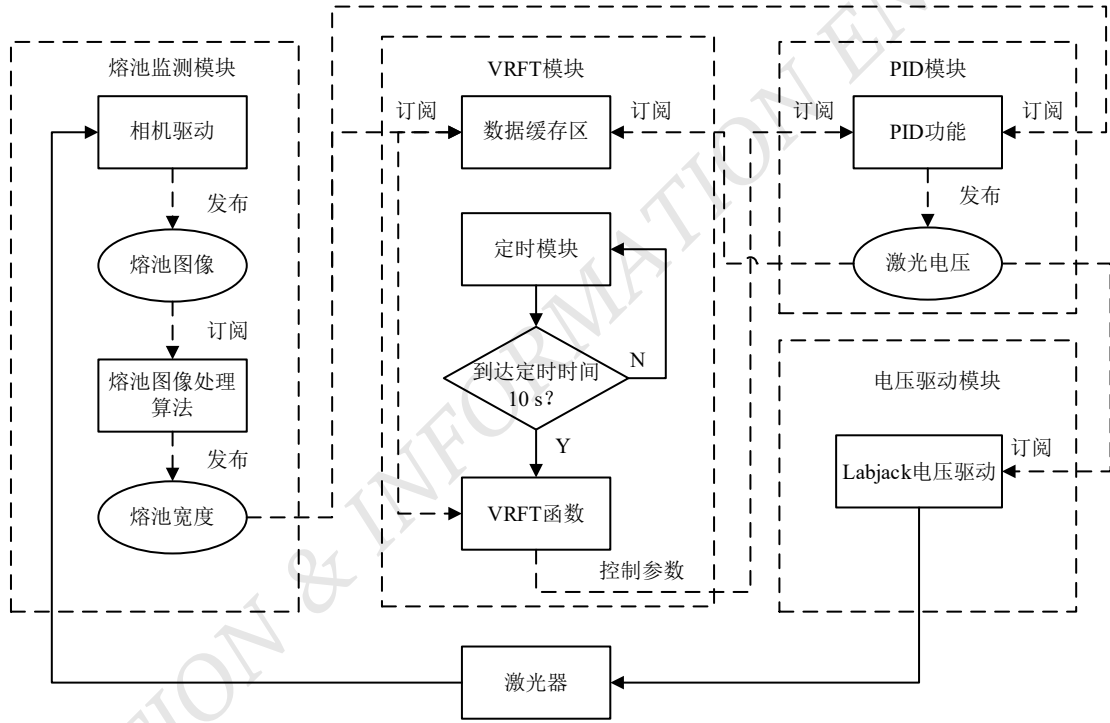


图 5 数据驱动 VRFT-PID 自适应多任务框架图

熔池监测模块: 采用 CMOS 相机捕捉熔池图像, 通过 CvBridge 将熔池图像传递给 OpenCV 与 ROS 系统; 通过熔池图像处理算法提取熔池宽度并通过 ROS 话题发布。

VRFT 模块: 将订阅的熔池宽度与 PID 模块发布的激光电压数据实时存储在数据缓存区; 定时模块按预设时间间隔 10 s 采集熔池宽度、激光电压数据, 定时时间 10 s 到达后数据缓存区清零并启动 VRFT 函

数; VRFT 函数计算最优 PID 控制参数并发布。

PID 模块: 订阅熔池宽度与 VRFT 模块发布的最优控制参数, 并根据 PID 控制公式 (公式(1)) 计算激光电压并发布。

电压驱动模块: 订阅激光电压, 通过 Labjack 的 ROS 驱动包对激光电压进行数模转换, 并将直流电压信号输入激光器, 实现激光功率的实时调节。

数据驱动 VRFT-PID 自适应多任务框架的运行步

骤为：

- 1) 参考模型预设，由公式(5)确定系统参考模型 $T_d(s)$ ，并通过双线性变化离散化为 $T_d(z^{-1})$ ；
- 2) 数据集采集与预处理，按预设时间间隔 10 s 采集每个时间帧的激光电压、熔池宽度，并将其存储在数据缓冲区；由公式(7)、(8)计算虚拟参考信号 $\tilde{r}(z^{-1})$ 和虚拟误差信号 $\tilde{e}(z^{-1})$ 、公式(15)确定滤波器 $L(z^{-1})$ ；
- 3) VRFT 控制参数计算，到达定时时间 10 s 后，将该时间内数据缓冲区中的数据导入 VRFT 函数，由公式(14)计算最优 PID 控制参数 $\theta = (K_p, K_i, K_d)$ ；
- 4) PID 参数更新与循环，PID 模块订阅 VRFT 模块发布的最优控制参数，完成参数更新；同时，重置定时器，清空数据缓冲区，返回步骤 2) 继续循环，以实现 L-DED 过程的自适应控制。

3 实验

为验证 VRFT-PID 自适应控制方法的有效性，在

本文搭建的熔池监测与控制一体化系统中进行 3 组恒定激光功率模式与 VRFT-PID 自适应控制模式的对比实验，比较熔池宽度稳定性与工件成形质量。其中，实验 1 制备方形工件，沉积层高度为 0.45 mm；实验 2 制备小尺寸方形工件，沉积层高度为 0.45 mm；实验 3 制备薄壁墙型工件，沉积层高度为 0.35 mm。

由于 L-DED 系统惯性较大、动态变化平缓，VRFT-PID 自适应控制器的微分项作用有限，且易造成控制量波动。因此，本实验采用 PI 控制策略，可有效消除稳态误差、抑制热积累。

3.1 实验材料与系统

实验材料：Q235 碳钢的基板；粒径为 15~53 μm 的 420 不锈钢粉末，其化学组成成分如表 1 所示。

表 1 420 不锈钢粉末化学组成成分

成分	Ni	Mo	Si	Cr	Mn	P	Fe
含量 wt/%	0.3	0.76	0.05	13.39	0.37	0.016	Bal.

熔池监测与控制一体化系统如图 6 所示。

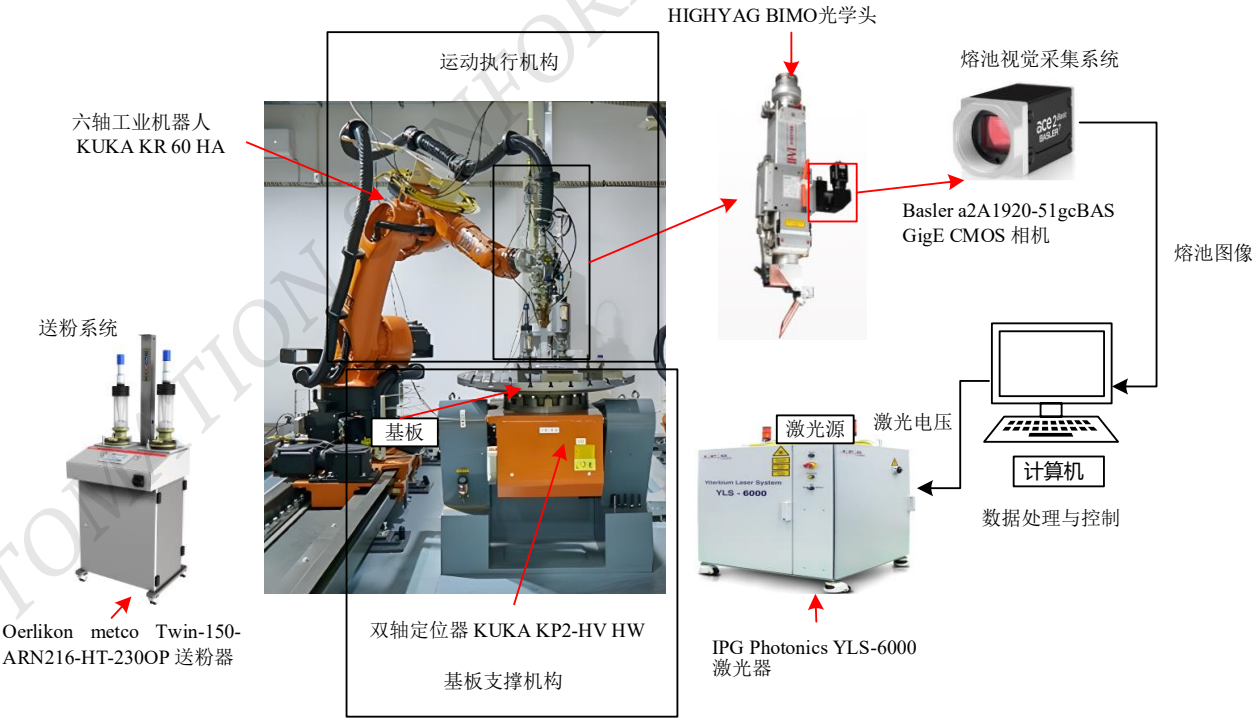


图 6 熔池监测与控制一体化系统

熔池监测与控制一体化系统核心设备包括：

1) 激光源, IPG Photonics YLS-6000 激光器, 波长为 1 070 nm, 最大输出功率为 6 000 W;

2) 运动执行机构, 搭载 HIGHYAG BIMO 光学头的六轴工业机器人 KUKA KR 60 HA, 光学头通过光纤接收激光束并聚焦于基板, 用于熔化金属粉末;

3) 基板支撑机构, 双轴定位器 KUKA KP2-HV HW, 用于调整基板姿态与位置;

4) 送粉系统, Oerlikon metco Twin-150-ARN216-HT-2300P 送粉器向喷嘴稳定输送金属粉末;

5) 熔池视觉采集系统, 由 Basler a2A1920-51gcBAS GigE CMOS 相机与 780~1 000 nm 近红外带通滤波片组成, 用于隔离熔池与周围环境, 并过滤 1 070 nm 激光束, 避免激光对图像采集的干扰。

根据工件尺寸与成形质量要求, 确定恒定激光功率模式的实验过程参数如表 2 所示。

表 2 实验过程参数

序号	激光功率/ W	扫描速度/ (mm/s)	送粉速率/ (r/min)	激光光斑 直径/mm
1	900	15	8	1.6
2	900	15	8	1.6
3	900	12	6	1.2

3.2 实验 1：方形工件

实验 1 采用逐层垂直扫描方式制备方形工件（单层尺寸为 25.2 mm×24.6 mm×0.45 mm），其期望模型图如图 7 所示。

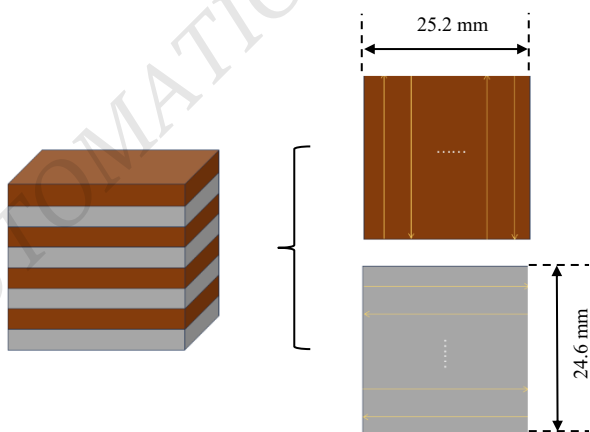
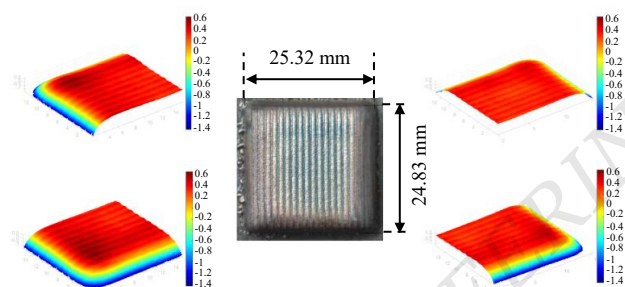
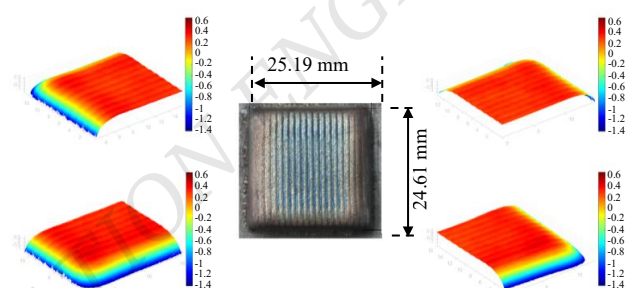


图 7 方形工件期望模型图

采用点云匹配技术对制备完成的方形工件进行三维扫描, 其点云图如图 8 所示。



(a) 恒定激光功率模式下方形工件点云图

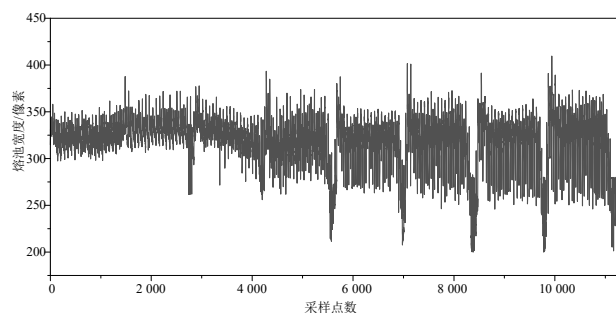


(b) VRFT-PID 自适应控制模式下方形工件点云图

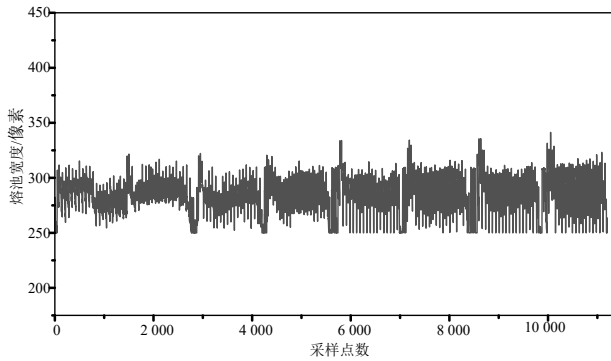
图 8 实验 1 方形工件点云图

由图 8 可知：恒定激光功率模式下的方形工件边缘存在明显突起，原因在于工件边缘区域的冷却条件优于中心区域，且激光头在来回扫描的末端区域存在减速或加速过程，停留时间较长，导致边缘区域热积累过多、熔化粉末量增加，最终造成工件尺寸偏大、边缘成形缺陷；VRFT-PID 自适应控制模式下的方形工件表面光滑，边缘无突起，实际尺寸与期望模型高度匹配，成形质量显著提升。

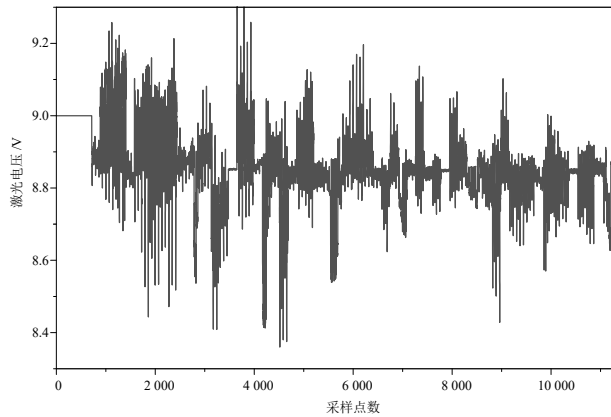
实验 1 过程中采集的关键数据如图 9 所示。



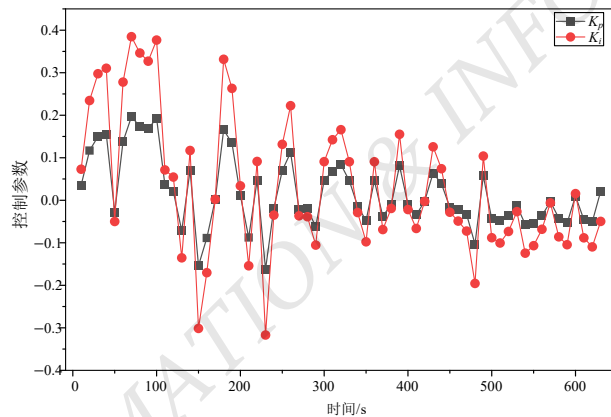
(a) 恒定激光功率模式下方形工件熔池宽度图



(b) VRFT-PID 自适应控制模式下方形工件熔池宽度图



(c) VRFT-PID 自适应控制模式下方形工件激光电压图



(d) VRFT-PID 自适应控制模式下方形工件 PID 参数变化图

图 9 实验 1 过程关键数据图

由图 9(a)可知：在恒定激光功率模式下，熔池宽度随沉积层数增加呈持续增大趋势，原因为沉积层数增加，热积累也不断增加，熔池温度持续升高；每层打印边缘熔池宽度出现显著骤降，原因为粉末直接沉积于基板上，材料利用率较低。

由图 9(b)可知，VRFT-PID 自适应控制模式下的熔池宽度稳定在 290 像素左右，波动范围小。

由图 9(c)可知，VRFT-PID 自适应控制模式下的激光电压在 7.5~9.5 V 范围内动态调整。

由图 9(d)可知，VRFT-PID 自适应控制模式下的 PID 控制参数随熔池特征每 10 s 动态更新。

3.3 实验 2：小尺寸方形工件

实验 2 采用与实验 1 相同的过程参数与沉积轨迹制备小尺寸方形工件（单层尺寸为 17.6 mm×16.8 mm×0.45 mm），其期望模型图如图 10 所示。

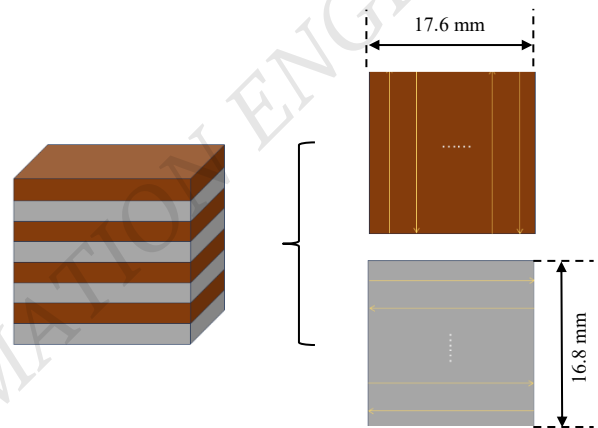
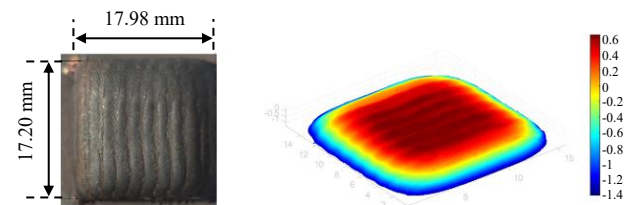
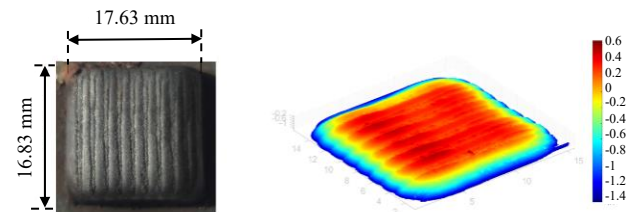


图 10 小尺寸方形工件期望模型图

采用点云匹配技术对制备完成的小尺寸方形工件进行三维扫描，其点云图如图 11 所示。



(a) 恒定激光功率模式下小尺寸方形工件点云图

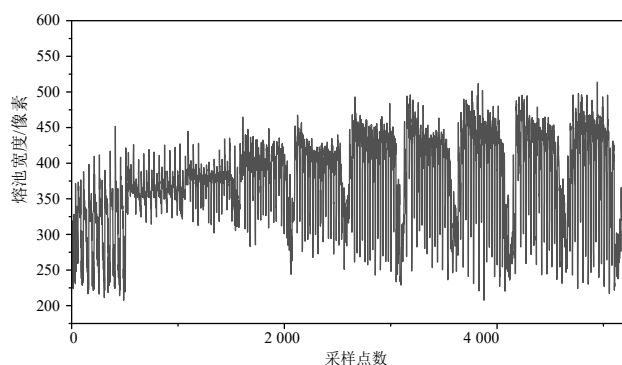


(b) VRFT-PID 自适应控制模式下小尺寸方形工件点云图

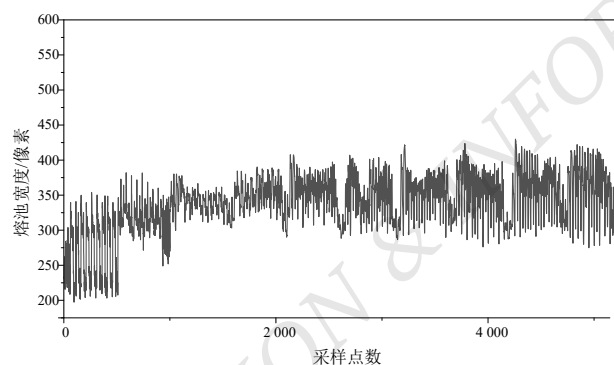
图 11 小尺寸方形工件点云图

由图 11 可知：在恒定激光功率模式下，小尺寸方形工件中间与边缘区域出现明显塌陷，原因为体积小、散热条件差，激光头在边缘扫描时的热积累更加显著，导致熔池温度过高，粉末熔化后在重力作用下向下飞散，最终形成塌陷缺陷；在 VRFT-PID 自适应控制模式下，通过动态调整激光电压抑制了热积累，小尺寸方形工件无明显塌陷，实际尺寸与期望模型高度一致，表面平整度较好。

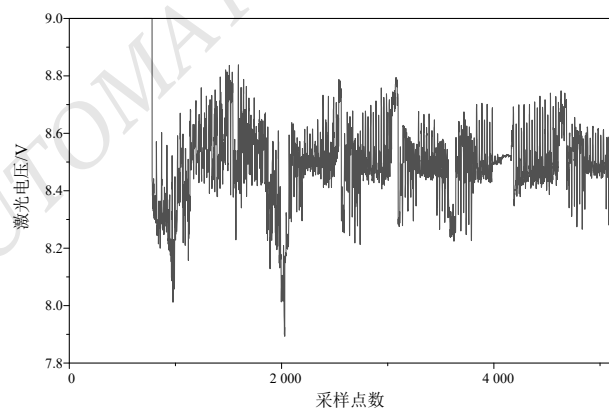
实验 2 过程中采集的关键数据如图 12 所示。



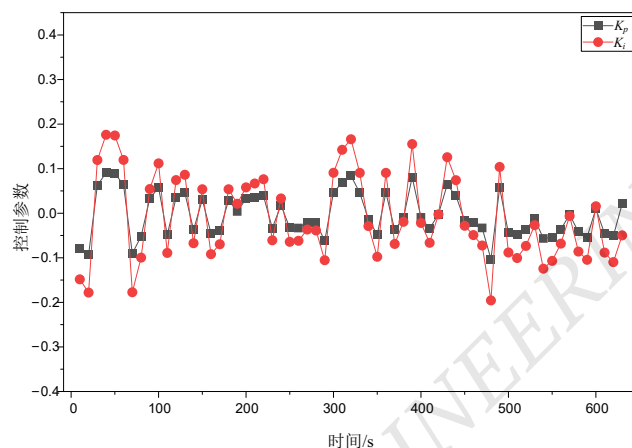
(a) 恒定激光功率模式下小尺寸方形工件熔池宽度图



(b) VRFT-PID 自适应控制模式下小尺寸方形工件熔池宽度图



(c) VRFT-PID 自适应控制模式下小尺寸方形工件激光电压图



(d) VRFT-PID 自适应控制模式下小尺寸方形工件 PID 参数变化图

图 12 实验 2 过程关键数据图

由图 12(a)可知，恒定激光功率模式下的熔池宽度波动范围较大（200~520 像素），且随沉积层数增加呈明显上升趋势，热积累效应显著。

由图 12(b)可知，VRFT-PID 自适应控制模式下的熔池宽度在 320 像素左右，波动幅度小。

由图 12(c)可知，VRFT-PID 自适应控制模式下的激光电压在 7.8~9.0 V 范围内动态调整。

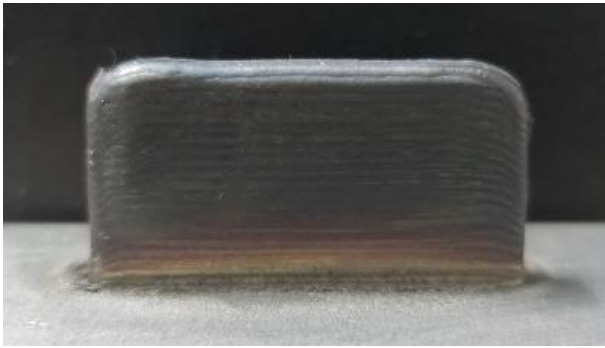
由图 12(d)可知，VRFT-PID 自适应控制模式下的 PID 控制参数随熔池特征每 10 s 动态更新。

3.4 实验 3：薄壁墙型工件

实验 3 采用往复扫描向上堆叠的方式制备薄壁墙型工件，沉积层高度为 0.35 mm，打印层数为 40 层，成形工件如图 13 所示。



(a) 恒定激光功率模式下薄壁墙型工件图

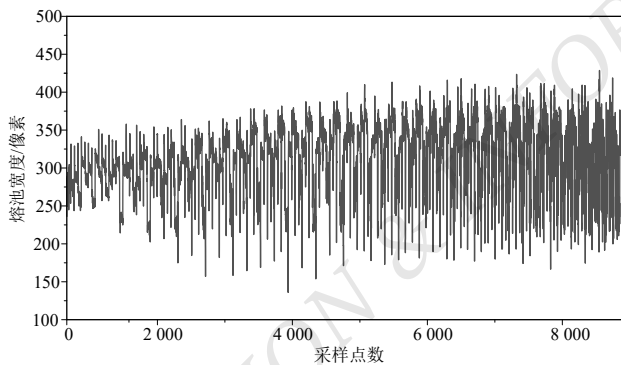


(b) VRFT-PID 自适应控制模式下薄壁墙型工件图

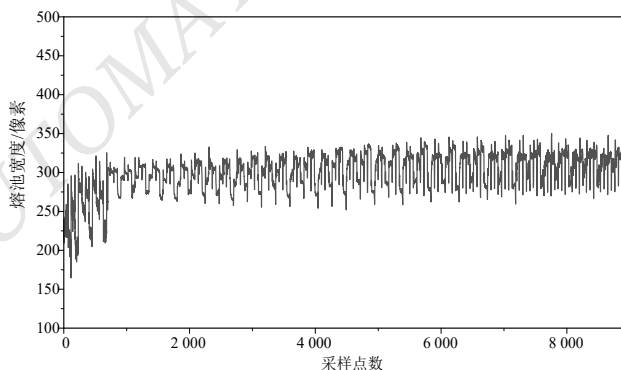
图 13 薄壁墙型成形工件图

由图 13 可知：在恒定激光功率模式下，薄壁墙型工件表面不平整，中间存在明显凹陷，两端出现坍塌现象，且每层成形路径不齐，其原因为热积累与散热特性较为复杂，恒定激光功率无法适配其动态变化的熔池控制需求；VRFT-PID 自适应控制模式下，薄壁墙型工件表面平整、无凹陷，两端坍塌明显改善，每层成形路径高度齐平。

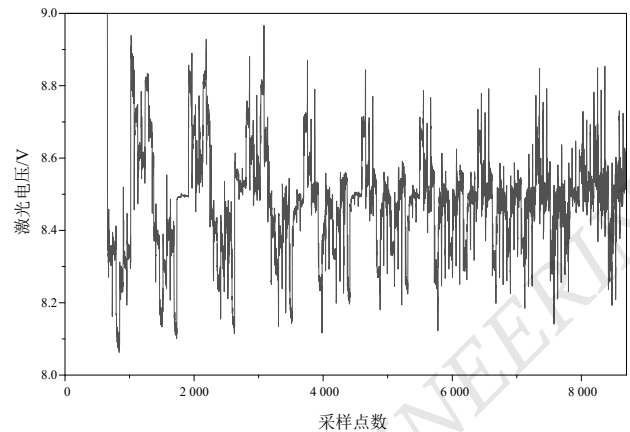
实验 3 过程中采集的关键数据如图 14 所示。



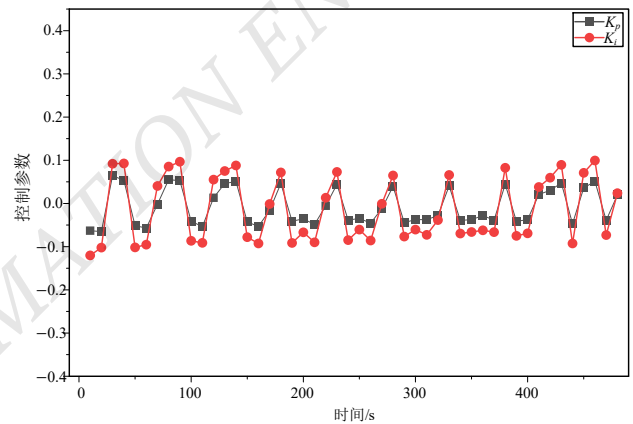
(a) 恒定激光功率模式下薄壁墙型工件熔池宽度图



(b) VRFT-PID 自适应控制模式下薄壁墙型工件熔池宽度图



(c) VRFT-PID 自适应控制模式下薄壁墙型工件激光电压图



(d) VRFT-PID 自适应控制模式下薄壁墙型工件 PID 参数变化图

图 14 实验 3 过程关键数据图

由图 14(a)可知，恒定激光功率模式下的熔池宽度波动范围较大（120~430 像素），无法实现稳定控制。

由图 14(b)可知，VRFT-PID 自适应控制模式下的熔池宽度稳定在 280 像素左右，波动幅度较小。

由图 14(c)可知，VRFT-PID 自适应控制模式下的激光电压在 8.0~9.0 V 范围内动态调整。

由图 14(d)可知，VRFT-PID 自适应控制模式下的 PID 控制参数变化随熔池特征每 10 s 动态更新。

3.5 实验结果分析

上述 3 组对比实验结果表明：

1) 在恒定激光功率模式下，熔池宽度随沉积层数增加而持续增大，且波动范围较大，热积累效应显著，导致工件出现边缘突起、塌陷、表面不平整等成

形缺陷, 尺寸精度较低;

2) 在 VRFT-PID 自适应控制模式下, 通过动态调整激光电压实现熔池宽度的稳定控制, 有效抑制热积累, 消除多类成形缺陷;

3) VRFT-PID 自适应控制模式对不同形状(方形、薄壁墙型)、不同尺寸的工件均具有良好的适配性, 可提升工件的尺寸精度与表面成形质量。

4 结论

本文针对 L-DED 过程热积累导致熔池动态变化、传统 PID 控制器参数整定效率低、成形精度不足等问题, 提出 VRFT-PID 自适应控制方法, 并搭建熔池监测与控制一体化系统, 实现熔池宽度的稳定控制。该系统对不同几何形状、尺寸的零部件均表现出良好的控制效果与适配性, 为 L-DED 过程的高精度调控提供了新的方法与思路。

本文仅对熔池宽度单参数进行控制, 未来可融合熔池温度、沉积层高度等参数, 实现多参数协同控制, 进一步提升 L-DED 过程的控制精度。

参考文献

- [1] WANG T, ZHU Y Y, ZHANG S Q, et al. Grain morphology evolution behavior of titanium alloy components during laser melting deposition additive manufacturing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015,632:505-513.
- [2] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J S, et al. Additive manufacturing of metallic components-Process, structure and properties[J]. Progress in Materials Science, 2018,92:112-224.
- [3] SONG Y, YAN Y, ZHANG R, et al. Manufacture of the die of an automobile deck part based on rapid prototyping and rapid tooling technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002,120(1):237-242.
- [4] GIANNATIS J, L-DEDOUSSIS V. Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009,40(1):116-127.
- [5] WONG K V, HERNANDEZ A. A review of additive manufacturing[J]. ISRN Mechanical Engineering, 2012,2012:1-10.
- [6] BLAKEY-MILNER B, GRADL P, SNEDDEN G, et al. Metal additive manufacturing in aerospace: A review[J]. Materials & Design, 2021,209:110008.
- [7] BI G, SUN C N, GASSER A. Study on influential factors for process monitoring and control in laser aiL-DED additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013,213(3):463-468.
- [8] AKBARIM, KOVACEVIC R. Closed loop control of melt-pool width in robotized laser powder-directed energy deposition process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019,104(5):2887-2898.
- [9] VASINONTA A, BEUTH J L, GRIFFITH M J, et al. Process maps for predicting residual stress and melt-pool size in the laser-based fabrication of thin-walled structures[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007,129(1):101-109.
- [10] BI G, GASSER A, WISSENBAACH K, et al. Identification and qualification of temperature signal for monitoring and control in laser cladding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44(12):1348-1359.
- [11] BI G, GASSER A, WISSENBAACH K, et al. Characterization of the process control for the direct laser metallic powder deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2006,201(6): 2676-2683.
- [12] SONG L, BAGAVATH-SINGH V, DUTTA B, et al. Control of melt-pool temperature and deposition height during direct metal deposition process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012,58(1):247-256.
- [13] LIAO S, WEBSTER S, HUANG D, et al. Simulation-guiL-DED variable laser power design for melt-pool depth control in directed energy deposition[J]. Additive Manufacturing, 2022,56:102912.
- [14] GOLLAPUDI S. OpenCV with python[M]//GOLLAPUDI S. Learn Computer Vision Using OpenCV: With Deep Learning CNNs and RNNs. Berkeley, CA: Apress, 2019:31-50.
- [15] QUIGLEY M, GERKEY B P, CONLEY K, et al. ROS: An open-source robot operating system[C]//Proceedings of the ICRA Workshop on Open Source Software, Kobe, Japan, May 17, 2009.
- [16] FORMENTIN S, CAMPI M C, CARÈ A, et al. Deterministic continuous-time virtual reference feedback tuning (VRFT) with application to PID design[J]. Systems & Control Letters, 2019,127:25-34.
- [17] WANG L, SONG W Z. PID Control[J]. Process Automation Instrumentation, 2004,25(4):1-6.
- [18] XIN W H, PING S S. Basis of theory and applications on PID control[J]. Control Engineering of China, 2003,10(1):37-42.
- [19] BAZANELLA A S, CAMPESTRINI L, ECKHARD D. Data-driven controller design: The H2 approach[M]. Data-driven

Controller Design: The H2 Approach, 2012.

[20] FORMENTIN S, CAMPI M C, CARÈ A, et al. Deterministic continuous-time virtual reference feedback tuning (VRFT) with application to PID design[J]. Systems & Control Letters, 2019,127:25-34.

[21] ORTIGUEIRA M D, TENREIRO MACHADO J A. New

discrete-time fractional derivatives based on the bilinear transformation: Definitions and properties[J]. Journal of Advanced Research, 2020,25:1-10.

[22] BOEIRA E, ECKHARD D. pyvrft: A Python package for the virtual reference feedback tuning, a direct data-driven control method[J]. SoftwareX, 2020, 11: 100383.

作者简介：

黄庆鸿，男，1999 年生，硕士研究生，研究实习员，主要研究方向：图像处理、增材制造在线监测与控制。E-mail: huangqh77@foxmail.com

张浩，男，1993 年生，硕士研究生，工程师，主要研究方向：机器人及自动化。E-mail: h.zhang@giim.ac.cn

曹立超，男，1991 年生，硕士研究生，工程师，主要研究方向：机械。E-mail: lc.cao@giim.ac.cn

毕贵军（通信作者），男，1971 年生，博士研究生，研究员，主要研究方向：增材制造技术，涵盖机械、材料、数值仿真、过程监测与控制、机器学习、加工工艺及设备开发等。E-mail: gj.bi@giim.ac.cn

2027 年“磷化工过程具身智能”专题征稿启事

磷化工过程与具身智能的深度融合是磷化工产业绿色低碳转型、实现高质量发展的前沿重点研究方向，旨在将具身智能的感知、认知、决策与行为执行能力融入磷化工全流程，破解行业高污染、高资源消耗及高危场景作业等痛点难点，实现磷矿开采、磷酸制备、磷石膏处理、高端产品合成等环节的智能化升级，全面提升生产效率、资源利用率与安全生产水平，具有重要的科学研究价值与广阔的产业应用前景。随着大模型技术与工业智能的创新突破，磷化工过程与具身智能的融合发展面临新的机遇与挑战。本刊组织“磷化工过程具身智能”专题，聚焦于探索多模态感知融合的磷化工具身智能大模型，研究基于行业机理与数据驱动的认知决策方法，构建磷化工关键环节灵巧操作、智能调控与无人值守的具身智能模型，支撑磷化工产业从“资源依赖”向“技术驱动”转型，推动其向绿色化、智能化、高端化发展。特邀本刊编委黄自鑫教授、刘皓教授、丁芝侠教授、程莉教授、李璇教授作为特邀主编，策划并主持该专题，现真诚邀请广大专家、学者积极撰文，踊跃投稿。

一、专刊征稿范围（包括但不限于）

- 1、磷化工复杂场景具身智能建模、仿真与优化调控
- 2、基于大模型的磷化工过程具身智能集成系统
- 3、磷化工过程多模态具身感知与融合理论
- 4、磷化工过程人机协作与多具身智能装备协同
- 5、磷化工过程物理数字孪生系统建模与仿真
- 6、磷化工过程数据建模与具身智能预警技术
- 7、磷化工工艺过程具身智能柔顺调控技术
- 8、基于磷化工机理的知识化认知与决策模型
- 9、基于具身智能的磷化工厂区安全监测
- 10、磷化工厂区具身智能巡检装备自主导航与路径规划
- 11、磷化工厂区具身智能巡检装备安全控制
- 12、磷化工具身智能装备操作技能学习与优化
- 13、磷化工高危场景具身机器人灵巧操作技术
- 14、磷化工物料处理具身智能装备精准操作
- 15、磷化工过程隐私与数据安全

二、投稿要求：请参考本刊官方网站 <http://www.giim.ac.cn/scipub/postdoc/> 或扫描右边本刊微信公众号的二维码获取“投稿须知”。

三、投稿截止时间：2026 年 12 月 20 日

四、出版时间：2027 年第 1 期（2027 年 2 月 28 日）

五、投稿方式

- 1、登录 <http://gzxg.cbpt.cnki.net/WKE/WebPublication/index.aspx?mid=gzxg> 网上投稿或 aie@giim.ac.cn 邮箱投稿。
- 2、投稿时请务必注明是“磷化工过程具身智能”专题投稿。

六、编辑部联系方式

邮箱：aie@giim.ac.cn；电话：(020)87687999

