

激光沉积制造成形表面偏差监测与反馈控制

王 达, 钦兰云, 王 伟, 杨 光, 王 超

(沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 沈阳 110136)

摘要: 为解决激光沉积制造成形表面出现凹陷与凸起偏差的问题, 设计了一种成形表面偏差监测与反馈控制的算法。通过三维点云重构、坐标系配准、精简降噪、偏差值计算实现了表面偏差监测。由反馈控制算法获取偏差区域轮廓, 凹陷偏差区域分层生成补偿轨迹, 凸起偏差区域分区生成调控轨迹, 实现了成形表面偏差区域的反馈控制。设计了验证实验, 实验中表面偏差监测与反馈控制程序能够及时识别样件表面的凹陷与凸起偏差区域并进行反馈控制, 大幅降低了样件表面的平面度误差。成形表面偏差监测与反馈控制算法的有效性得到验证, 对激光增材制造技术的发展具有重要意义。

关键词: 激光沉积制造; 表面偏差; 偏差监测; 反馈控制; 偏差补偿调控

中图分类号: TH161

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1248.2026.04.004

Surface deviation monitoring and feedback control of laser deposition manufacturing

WANG Da, QIN Lanyun, WANG Wei, YANG Guang, WANG Chao

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: To address the issue of concave and convex deviations on the surface of laser deposition manufacturing, an algorithm for surface deviation monitoring and feedback control was designed. Surface deviation monitoring was achieved through three-dimensional point cloud reconstruction, coordinate system registration, simplified noise reduction, and deviation value calculation. The feedback control algorithm extracted contour profiles of deviation zones, generating layered compensation trajectories for concave areas and zoned control trajectories for convex areas, thereby implementing feedback control over surface deviation regions. A validation experiment was conducted: the surface deviation monitoring and feedback control program promptly identified concave and convex deviation zones on the test specimen surface and applied feedback control, significantly reducing surface flatness errors. This demonstrated the effectiveness of the forming surface deviation

收稿日期:2026-03-09 修回日期:2026-04-03 接受日期:2026-04-05

基金项目:国家自然科学基金(项目编号:51975387);辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金(项目编号:LJ222410143001, LJ232410143008, LJ232410143010)。

作者简介:王达(2000—),男,辽宁铁岭人,硕士研究生,主要研究方向为增材制造, E-mail:wangdasau@163.com;钦兰云(1977—),女,江苏睢宁人,教授,博士,主要研究方向为航空航天先进材料增材制造,电弧、激光成型与修复, E-mail:qinly@sau.edu.cn。

monitoring and feedback control algorithm, holding significant implications for the advancement of laser additive manufacturing technology.

Key words: laser deposition manufacturing; surface deviation; deviation monitoring; feedback control; deviation compensation control

在激光沉积制造过程中,激光快速熔化金属粉末,熔融状态下的金属冷却凝固后,逐层堆积成高性能的近净成形零件,这个过程是一个涉及温度场、应力场等多物理场的耦合过程,制造过程中金属材料反应过程剧烈,熔池行为复杂,且成形过程的温度场难以控制,具有较强的不确定性,诸多因素共同作用使激光沉积制件易形成表面不平整^[1-3]、凹陷塌边^[4-5]及开裂分层^[6]等几何偏差。其中,较为突出的问题就是制件成形表面存在凹陷或凸起偏差,大幅降低了制件成形精度,在表面偏差过大时将影响后续沉积制件过程。因此,在激光沉积制造过程中,对制件成形表面偏差进行监测并反馈控制,是提高制件效率和成形表面质量的重要保证。

鉴于此,各国学者在成形表面形貌监测,其中包括:熔池监测^[7]、表面点云监测^[8-10]及图像监测^[11-12]等,表面偏差控制,其中包括:温度场控制^[13-15]、工艺参数控制^[16-17]等,点云处理算法^[18-20]、图像处理算法^[21-23]等方面进行了广泛的研究工作。杨启等^[24]基于激光沉积制造系统设计了电荷耦合设备(charge coupled device, CCD)相机同轴拍摄系统,基于该系统获取熔池的双色图像,并采用最小外接矩形算法来处理图像以获得熔池宽度数据,再由比例—积分—微分控制器(proportion integral differential, PID)控制器反馈控制激光功率,使沉积过程中的熔池宽度趋于稳定,显著提高了沉积制件成形表面质量。苏立志等^[25]搭建了彩色电荷耦合设备相机同轴测温系统与基于模糊增量式PID控制器的闭环控制系统,通过试验验证,该系统能够显著地改善由熔池温度波动引起的

激光沉积成形制件的表面形貌与质量问题。彭程^[26]基于红外测温仪获取熔池尾部温度,并由PID控制器对激光功率进行闭环调控,实现了激光沉积制件的熔池温度监测与调控,通过试验证明,该方法能够有效减少激光沉积制件过程中的热累积,使熔池温度趋于稳定,从而提高沉积制件成形质量。Huang等^[11]建立了一种非接触式原位三维激光轮廓仪检测系统,系统将扫描得到的三维空间点云转换为二维平面图像,然后对像素进行分类并识别表面缺陷,验证试验结果表明:该方法可以检测到制件成形表面广泛存在的凸起和塌陷缺陷。Chen等^[18]提出了一种激光沉积制件成形表面缺陷的快速识别方法,利用机器学习的方法开发了形貌点云数据处理程序,点云数据处理程序包括过滤、分割、面点距离计算、点聚类 and 特征提取等模块,并通过试验验证了该方法能够实现样件表面缺陷的检测和分类。张潇丹^[27]提出了点云数据预处理、点云数据配准及表面缺陷识别的几种先进方法,将标准点云数据与待测点云数据配准并对比计算,根据计算结果将缺陷分类为凸起、凹陷和划痕3种,并通过试验验证了该方法的可行性和有效性。

综上所述,国内外在激光沉积制造过程中对成形表面进行偏差监测与闭环反馈控制的研究尚未成熟。因此本文研究在激光沉积制件的过程中使用激光轮廓扫描仪扫描并获取沉积样件的表面形貌点云数据,由设计的表面偏差监测算法程序进行一系列数据处理并判定成形表面是否存在表面偏差。若成形表面存在凹陷或凸起偏差区域,则由设计的反馈控制算法程序进行闭环控制,在凹陷偏差区域内

生成分层补偿轨迹,在凸起偏差区域内生成分区调控轨迹,所有轨迹以数控代码程序输出并反馈给控制激光沉积制造系统进行表面偏差区域的补偿调控。

1 成形表面偏差监测与反馈控制系统

1.1 系统硬件

基于激光沉积制造系统搭建的系统成形表面偏差监测与反馈控制系统路线图如图 1 所示。

系统中使用 KEYENCE 公司生产的 LJ-V7300 型激光轮廓扫描仪监测制件成形表面偏差,此型号扫描仪的扫描测量精度为 5 μm。扫描仪安装在步进电机上,再将二者一同安装至沉积设备的激光头上,沉积过程中不进行扫描时由步进电机控制扫描仪沿 z 轴方向向上移动,避免高温金属粉末飞溅损坏扫描仪镜头。扫描仪、计算机与数控系统之间保持通信。控制系统由课题组自主研发,用于控制设备三轴运动平台及激光器、送粉器等设备的工艺参数。

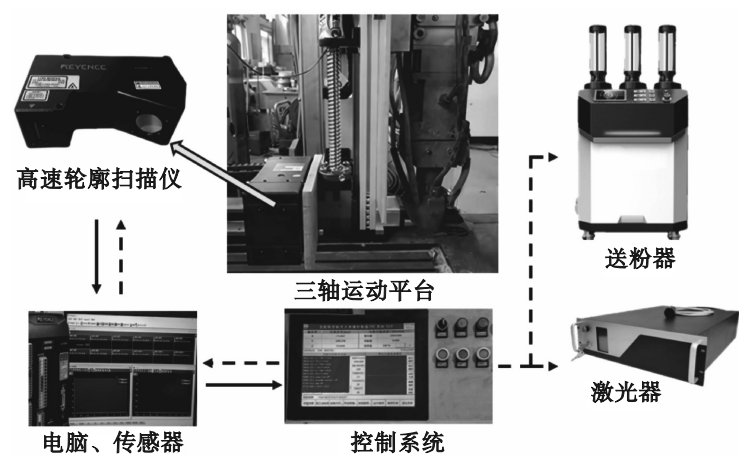


图 1 成形表面偏差监测与反馈控制系统路线图

1.2 系统软件

成形表面偏差监测与反馈控制系统软件模块图如图 2 所示。该软件系统主要包括 4 个

模块,分别是偏差监测模块、可视化模块、反馈控制模块及系统控制模块。

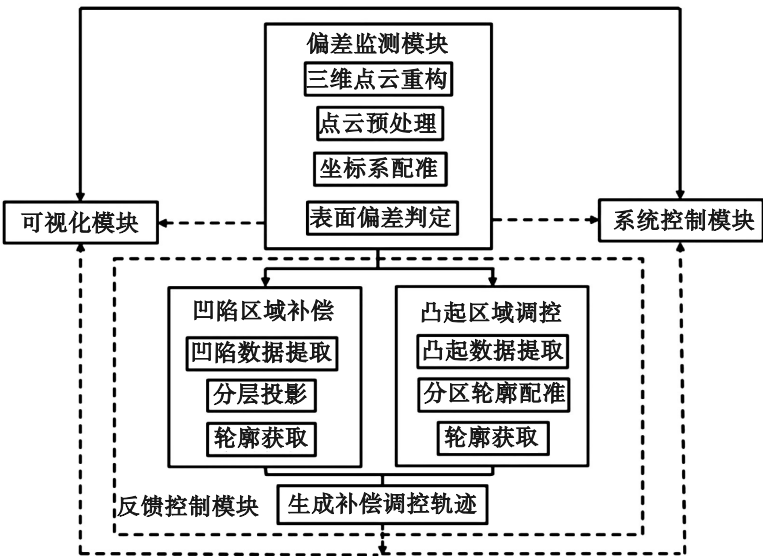


图 2 成形表面偏差监测与反馈控制系统软件模块图

经扫描仪扫描得到形貌点云数据,由偏差监测模块进行数据预处理与表面偏差判定,判定存在表面偏差后,由反馈控制模块对凹陷与凸起偏差数据分别进行处理并生成对应的补偿调控轨迹。监测过程中数据处理结果由 PCL 库实现可视化,偏差监测结果与补偿调控轨迹信息均反馈至控制系统,形成闭环控制。

2 成形表面偏差监测与反馈控制算法

2.1 成形表面偏差监测算法

2.1.1 成形表面三维点云数据获取

在激光沉积制件过程中,由激光轮廓扫描仪扫描获取制件成形表面的形貌点云数据,并由偏差监测算法进行形貌点云数据的预处理。经预处理后的点云数据应为平滑、精简且能够反映成形表面形貌特征的三维点云,进而由三维点云数据进行偏差值计算,判定成形表面是否存在表面偏差。由激光轮廓扫描仪发射一条激光线,扫描得到的初始点云数据为仅包含 (x_i, z_i) 的二维数据点,此时由位置编码器获取该激光线上数据点的 Y 坐标位置信息,将二维轮廓数据与坐标位置信息融合,生成三维空间中的数据点点集。高速轮廓扫描仪的测量坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 与设备加工坐标系 $O_m-X_mY_mZ_m$ 之间存在距离差值,测量与加工坐标系位置示意图如图 3 所示。

图 3 测量与加工坐标系位置示意图

将二维轮廓数据与 Y 坐标位置信息融合时需考虑测量坐标系与加工坐标系之间的距离差值,增加坐标系距离差值后的三维坐标计算

公式为

$$(x, y, z) = (x_i + \Delta h_x, y_c + \Delta h_y, z_i + \Delta h_z) \quad (1)$$

式中: x_i, z_i 为扫描激光线上的初始数据; y_c 为位置编码器记录的 y 坐标位置信息; $\Delta h_x, \Delta h_y, \Delta h_z$ 为测量坐标系与加工坐标系之间的距离差值。

2.1.2 三维点云数据预处理

由于在激光沉积制件过程中常伴随激光、粉末飞溅及其他环境因素的影响,使得到的三维点云数据中包含大量的噪声点。为了避免无效噪声点影响后续点云数据处理结果,在进行成形表面偏差判定之前,需要对点云数据进行预处理。通过分析三维点云数据的空间分布情况,可知点云数据中噪声点一般偏离制件成形表面,而成形表面的数据点的空间分布更为集中,噪声点与邻域点之间的距离一般较远,相反主体点与邻域点之间的距离一般较近。统计滤波算法是通过计算数据点与邻域点之间的距离并与距离阈值进行比较,从而实现噪声点判定^[28],因此该算法适用于成形表面点云数据的预处理。经降噪处理后,采用包围盒算法精简三维点云数据^[29],建立一个能够包括成形表面点云的三维体素栅格,每个栅格内的全部数据点都由该体素栅格的重心点近似代替。在保证点云精度的前提下,尽可能精简点云数据以提高后续数据处理效率。最后,采用基于区域生长的点云分割算法来分割基板及设备平台等无效点云数据,仅保留制件成形表面的点云数据。基于区域生长的点云分割算法就是根据点的曲率将曲率相近的点互相组合为一个区域,分割与主体数据点曲率差距较大的点^[20]。经预处理后获得精简、光滑且能够反映完整制件成形表面形貌的三维点云数据。

2.1.3 成形表面偏差判定

在激光沉积制件过程中,当沉积至第 n 层时,经高速轮廓扫描仪扫描并由程序预处理后得到第 n 层制件成形表面的形貌点云数据。此时根据预期样件模型的第 n 层沉积的预期高

度, H_n 拟合生成平行于 XOY 的判定平面, 并与得到的第 n 层成形表面形貌点云数据进行配

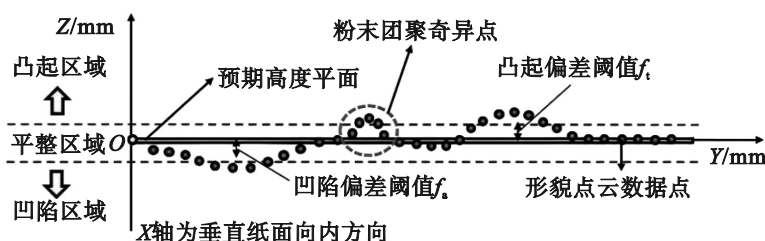


图4 表面偏差判定示意图

设判定为凹陷偏差区域的偏差阈值为 f_a , 判定为凸起偏差区域的偏差阈值为 f_i 。一般情况下, 由于激光沉积制件的沉积层厚 $\leq 1.0 \text{ mm}$, 而凹陷偏差的补偿也是基于此厚度进行分层补偿, 故当偏差 $> 1.0 \text{ mm}$ 时, 才能获得良好的偏差补偿效果。综合成形精度与监测效率两方面考虑, 将 f_a 与 f_i 的值皆设置为 1.0 mm , 在保证精度的前提下提高算法运行效率。计算点云数据与预期高度平面之间的偏差值 f , 对于高于预期高度判定平面且偏差值大于凸起区域偏差阈值的表面区域判定为凸起偏差区域; 对于低于预期高度判定平面且偏差值大于凹陷区域偏差阈值的表面区域判定为凹陷偏差区域。在激光沉积制件过程中, 由于激光功率、扫描速度、送粉速率及离焦量等工艺参数波动, 可能导致熔池、粉末飞溅及粉末黏附等不良现象, 在制件表面形成面积较小的缺陷, 在成形表面点云数据中此类奇异点一般由不超过 200 个数据点构成 (200 个数据点面积约为 30 mm^2), 当奇异点偏差值大于凸起偏差阈值时判定为奇异点偏差, 在后续打印过程中应跳过该区域直至偏差值小于阈值; 偏差值在偏差阈值范围内的表面区域则判定为平整区域, 该区域表面较为平整不需要进行补偿调控。预期高度 H_n 与偏差值 f 计算公式为

$$H_n = n\Delta z \quad (2)$$

式中: H_n 为第 n 层的预期高度; n 为沉积层数; Δz 为沉积层之间 Z 轴抬升量。

$$f = |H_p - H_n| \quad (3)$$

式中: f 为偏差值; H_p 为点云数据点高度。

2.2 成形表面偏差反馈控制算法

2.2.1 成形表面偏差区域轮廓获取

在表面偏差监测算法进行偏差判定后, 由反馈控制算法提取判定为凹陷偏差区域和凸起偏差区域内的点云数据, 并将两个偏差区域的点云数据分别储存, 便于后续对凹陷区域与凸起区域的点云数据进行数据处理。

1) 凹陷区域轮廓获取。制件成形表面凹陷区域偏差需按沉积层厚进行分层补偿, 因此, 首先需要获取凹陷偏差区域内每层补偿沉积层的凹陷区域轮廓。凹陷偏差区域轮廓的获取需将提取到的凹陷偏差区域点云数据沿 Z 轴正方向进行分层切片处理, 分层厚度 Δh 与激光沉积制件过程中 Z 轴抬升量保持一致。 Z 轴抬升量是激光沉积制件初始设定的工艺参数, 为激光沉积制造完成每一层沉积后激光头沿 Z 轴正方向移动的距离。沿 Z 轴正方向分层切片并以 Z 轴抬升量为分层层厚, 使得分层平面即为补偿沉积层平面, 分层平面上的补偿轨迹即为补偿沉积过程中沉积层的扫描轨迹, 因此仅需在凹陷偏差区域的每一层平面内生成补偿轨迹即可实现凹陷偏差区域补偿。首先, 基于最小二乘法在凹陷偏差区域点云内沿 Z 轴正方向拟合 XOY 分层切片平面, 以凹陷偏差区域点云数据的最低点为起点, 沿 Z 轴正方向每上升 Δh 后拟合一层分层平面, 直至平面与凹陷偏差

区域点云不存在交点,此时不再生成分层平面。构造全部分层平面后,将各平面之间的数据点沿平面的法向量方向垂直投影至相邻平面上。投影处理后,依次提取每个分层平面上的偏差区域轮廓点,本文基于最大相邻角的边缘检测算法实现偏差区域轮廓点的提取。基于最大相邻角的边缘检测算法是根据分层平面上的偏差轮廓点两侧数据点的分布均匀程度差异较大实现的,计算每个数据点与其附近的 k 近邻点所构成的 k 个向量之间的夹角,并将

每个数据点计算得到的所有夹角进行排序。其中, k 近邻点是指该点周围与其距离最近的 k 个点,此方法源于 K 最近邻(k -nearest neighbor, KNN)分类算法^[30-31]。因此,若计算某一个点得到的所有夹角中的最大值大于设定的角度阈值,则判断该点为该分层平面上的偏差区域轮廓点;相反若得到的所有夹角中的最大值小于设定的角度阈值,则该点不是分层平面上的偏差区域轮廓点。偏差轮廓点提取过程示意图如图 5 所示。

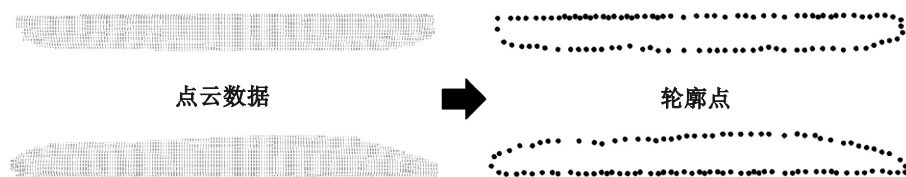


图 5 偏差轮廓点提取过程示意图

此算法中角度阈值设定得越小则后续构造的轮廓曲线越平滑;相反角度阈值设定得越大则构造出的轮廓曲线越尖锐^[32],一般设置角度阈值为 120° 。由分层平面上提取到的偏差区域轮廓点构造分层平面的偏差区域轮廓曲线。

2) 凸起区域轮廓获取。凸起偏差区域的轮廓曲线获取需要将前文提取得到的凸起偏差区域点云中包含的所有数据点均投影至第 n 层预期高度平面上,第 n 层预期高度平面为法向量平行于 Z 轴的 XOY 平面,平面所在高度为 H_n ,投影方向为沿预期高度拟合平面的法向量方向垂直投影。经算法投影处理后,提取预期高度拟合平面上的凸起偏差区域轮廓点,偏差轮廓点提取算法与凹陷偏差区域轮廓点提取算法相同,不再赘述。基于提取的凸起偏差区域轮廓点构造凸起偏差区域轮廓曲线,本文通过增大成形表面存在凸起偏差区域内的扫描轨迹间距、平整区域扫描轨迹间距保持不变、分区扫描的调控策略来降低成形表面凸起偏差区域的沉积体高度,进而使得整体表面各区

域沉积体高度趋于一致。因此,需分别获取成形表面凸起偏差区域与平整区域的轮廓曲线,将沉积样件的第 $n+1$ 层预期轮廓与前文获取的凸起偏差区域轮廓配准,即可获取凸起偏差区域与平整区域的轮廓曲线,后续只需要分别在平整区域轮廓与凸起偏差区域轮廓内生成不同扫描间距的调控轨迹即可实现对制件成形表面凸起偏差区域的调控。

2.2.2 偏差区域补偿调控轨迹生成算法

补偿成形表面的凹陷区域时无需改变工艺参数,仅需在凹陷区域内按沉积层厚进行分层补偿即可。对于成形表面的凸起区域则需通过改变下一层沉积的工艺参数分区调控,进而减小凸起偏差。经过前期研究发现,虽然改变沉积过程中的激光功率、送粉速率和扫描速度等关键工艺参数都可以在一定程度上减小小样件成形表面的偏差程度,但是这 3 种调控策略都存在一定弊端。送粉速率和激光功率的调控存在一定延迟,容易导致样件表面形成新的偏差,且频繁改变激光功率极易引起熔池失稳、应力变化、降低沉积过程稳定性,而调控扫描速度易引起未熔化金属粉末飞溅,进一步降

低样件成形表面质量。只有分区调控轨迹扫描间距能够实现精准调控且不存在延迟,并且能够在一定程度上改善沉积层热分布,有利于后续沉积过程。因此,本文采用调整凸起区域内扫描间距分区扫描的策略来调控成形表面的凸起偏差。补偿调控轨迹的填充方式包括平行线填充、环形填充等^[33],本文采用等距平行线填充的方式生成补偿调控轨迹。

1) 凹陷区域分层补偿轨迹生成算法。对于沉积样件凹陷偏差区域分层补偿应按初始沉积制件的工艺参数进行沉积补偿,因此生成补偿轨迹的扫描间距 I 应和初始扫描间距保持一致。成形表面凹陷偏差区域分层补偿轨迹生成算法流程图如图6所示。每层分层平面内可能包含多个凹陷偏差区域,将分层平面与每层分层平面上的凹陷偏差区域分别编号,在凹陷偏差区域轮廓内,按扫描间距 I 生成一系列平行于 X 轴的等距平行线,并求得所有平行线与凹陷偏差区域轮廓的交点,将得到的所有交点按 Y 的大小从小到大排序,所有 Y 相同的点分为一组,每组数据点按 X 从小到大排序并连接成一条补偿轨迹线段,所有补偿轨迹线段首尾顺次连接创建出第一个凹陷偏差区域的补偿轨迹,依次循环生成此层分层平面上所有编号凹陷区域的补偿轨迹,每层分层平面按编号依次循环即可生成样件表面凹陷偏差区域内的所有补偿轨迹,相邻两分层平面的补偿轨迹之间的 Z 轴抬升量即为分层厚度 Δh 。

2) 凸起区域分区调控轨迹生成算法。根据前文所述,沉积样件成形表面凸起偏差区域的补偿调控需在平整区域内与凸起偏差区域内生成不同扫描间距的分区调控扫描路径。在样件表面平整区域内沉积制件时,所有工艺参数应与激光沉积样件设置的初始工艺参数保持一致。成形表面凸起偏差区域调控轨迹生成算法流程图如图7所示。在第 $n+1$ 层预期轮廓内,生成一系列平行于 X 轴的等距平行线,平行线间距离为样件沉积的初始扫描间距,求

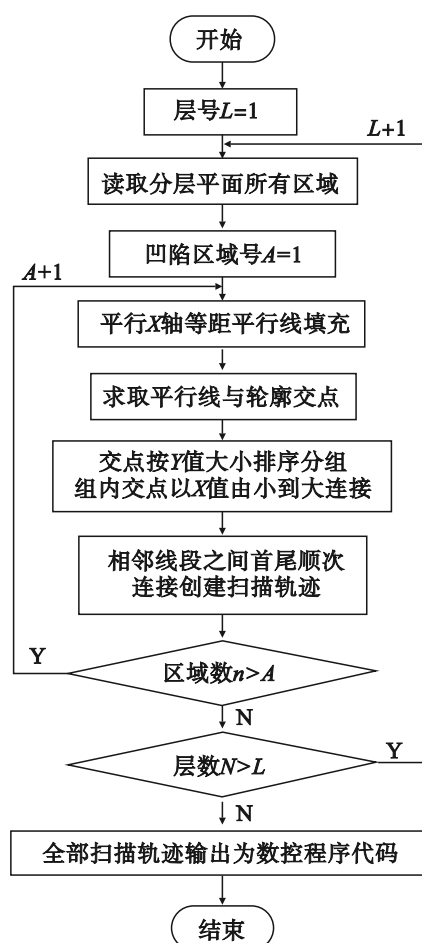


图6 成形表面凹陷偏差区域分层补偿轨迹生成算法流程图

取所有平行线与预期轮廓和凸起区域轮廓的交点,设平行线与预期轮廓交点为 P_i ,平行线与凸起区域轮廓交点为 P_j ,将所有交点按 Y 从小到大排序,并将 Y 相同的点分为一组;将每组数据点按 X 从小到大排序,按 X 排序顺序连接组内相邻交点,并去除由两个凸起偏差区域轮廓交点 P_i 构成的线段,所有分组按 Y 排序依次循环此流程,此时连接得到的所有线段即为平整区域的扫描轨迹线段。进一步将所有凸起偏差区域编号,在第一个凸起偏差区域轮廓内,生成一系列平行于 X 轴的等距平行线,此时相邻平行线之间的距离为增大后的扫描间距。求取平行线与凸起偏差区域轮廓曲线交点 P_i ,并将得到的所有交点按 Y 由小到大排序,所有 Y 相同的点分为一组,每组数据点以 X 由小到

大排序并依次连接为线段,将相邻分组连接的线段首尾顺次连接。此时得到的所有线段即为第一个凸起偏差区域的调控轨迹,按凸起偏差区域编号依次循环此流程,生成所有凸起偏差区域的调控轨迹。最后,需将得到的所有补偿调控轨迹输出为增量坐标系下的数控代码程序,以反馈控制激光沉积制造系统。

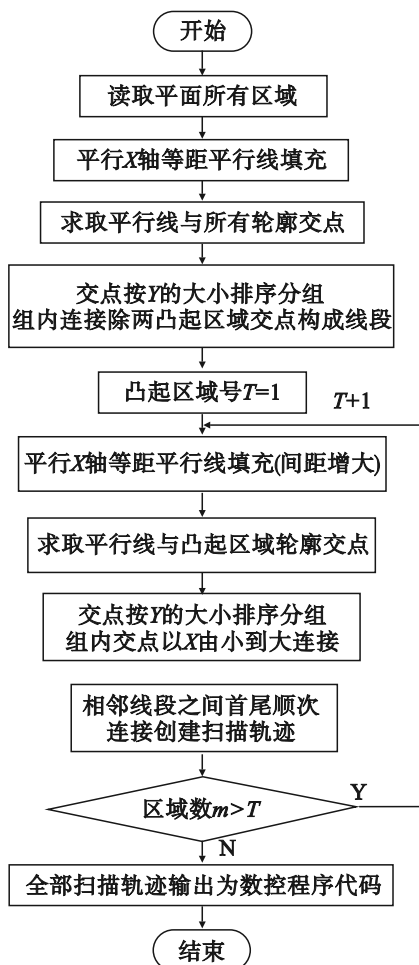


图7 成形表面凸起偏差区域调控轨迹生成算法流程图

3 试验验证

为验证系统的有效性,采用激光沉积制造工艺制备TC4钛合金样件,监测沉积制件过程中样件的成形表面是否出现表面偏差并及时对表面偏差进行反馈控制。验证试验选用的基板材料为TC4钛合金,样件尺寸为85 mm×

70 mm×30 mm,样件预期模型如图8a所示,样件沉积工艺参数如表1所示。

表1 样件沉积工艺参数

激光功率	扫描速度	送粉速率	扫描间距	Z轴抬升量
W	(m·ms ⁻¹)	(g·min ⁻¹)	mm	mm
2 000	10	8	2.3	0.6

凸起偏差区域调控轨迹的扫描间距增大2.5 mm,高速轮廓扫描仪采样频率设置为20 Hz,其单次触发的扫描范围为200 mm×240 mm,能够完整扫描样件表面。试验中设定样件每沉积5层进行一次表面偏差扫描,成形表面凹陷与凸起偏差阈值根据前文所述皆设定为1.0 mm。

当样件沉积至第45层时,算法判定此时成形表面偏差值大于设定的凹陷与凸起偏差阈值,样件成形表面同时存在凹陷与凸起偏差,需反馈控制程序介入进行表面偏差的补偿调控,样件缺陷表面俯视图如图8b所示。程序预处理前三维点云图如图9a所示,程序预处理后样件表面形貌点云图如图9b所示。

点云数据经算法预处理后,首先计算此时样件表面的平面度误差,采用一组平行于XOY的平面包容补偿前的点云数据,每个平面都保证至少与3~4个数据点相交,同时还需满足交叉准则、三角形准则及直线准则中的一条,平面之间的距离即为平面度误差^[34]。定义参考平面为该层沉积后预期高度的拟合平面,此时样件成形表面凸起区域平面度误差 f_1 和凹陷区域平面度误差 f_2 分别为1.77 mm和4.15 mm,如图10所示。

经表面偏差计算后,由算法生成对应偏差区域的补偿调控轨迹。样件凹陷偏差区域分层平面(第7层)上凹陷区域轮廓配准如图11a所示,对应到补偿轨迹如图11b所示。由于样件成形表面凸起偏差区域的调控是在表面平整区域与凸起偏差区域内进行不同扫描间距的分区扫描,因此在凸起偏差区域调控之前,先进行表面凹陷偏差区域的分层补偿,得到仅

包含平整区域与凸起区域的平面后再进行凸起偏差调控。调控结束后,由程序再次调用轮廓扫描仪扫描样件表面,并计算此时样件表面是否存在表面偏差,若仍存在表面偏差则继续进行补偿调控。样件成形表面凸起偏差区域(首层调控)轮廓配准如图 12a 所示,调控轨迹如图 12b 所示。

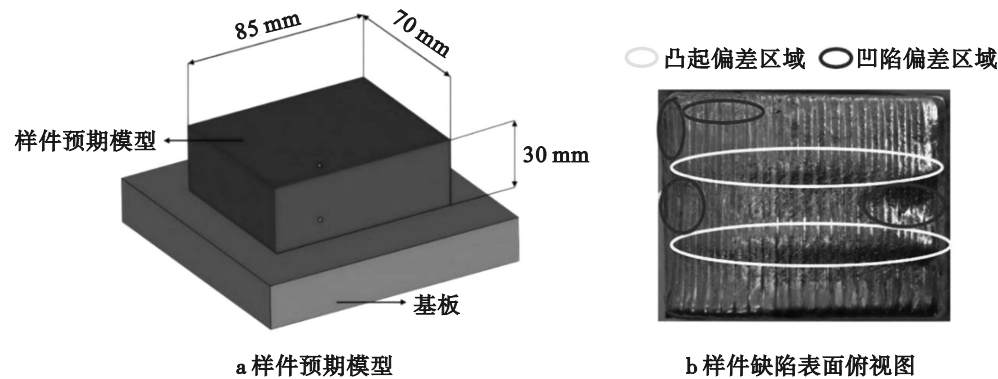


图 8 样件预期模型与样件缺陷表面俯视图

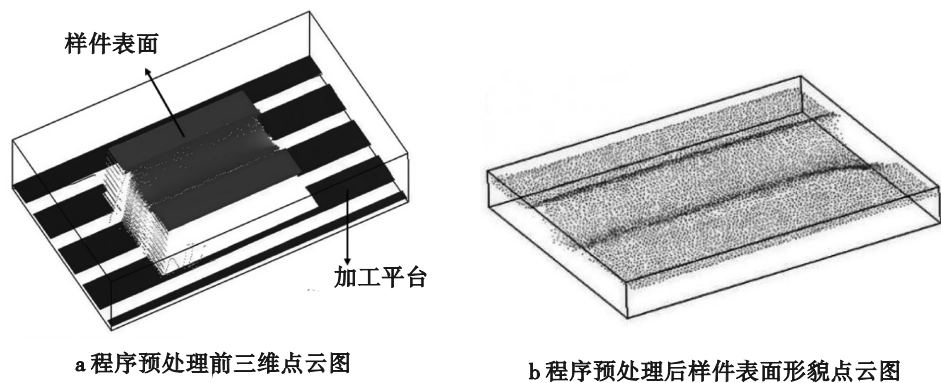


图 9 程序预处理前三维点云图和程序预处理后样件表面形貌点云图

图 10 样件成形表面与参考平面偏差

在进行第一次补偿调控后,由程序调动轮廓扫描仪再次扫描样件成形表面,经程序计算发现此时样件表面凸起偏差值仍超出阈值范围,再次进行凸起偏差调控,并在调控后再次扫描样件成形表面。样件表面凸起偏差区域经两层分区调控后,由程序判定为平整区域,图 13a 为反馈控制后样件表面实物图,图 13b 为反馈控制后样件表面与参考平面偏差。为比较反馈控制前后样件表面的平面度误差,经平面度误差计算后获得反馈控制后的样件表面凸起区域与凹陷区域的平面度误差 f_1 、 f_2 分别为 0.39 mm 和 0.32 mm,较反馈控制前平面度误差减少了 88.01%,大幅减小了制件成形表面偏差,验证了成形表面偏差监测与反馈控制算法对成形表面出现的凹陷及凸起偏差反馈控制的有效性。

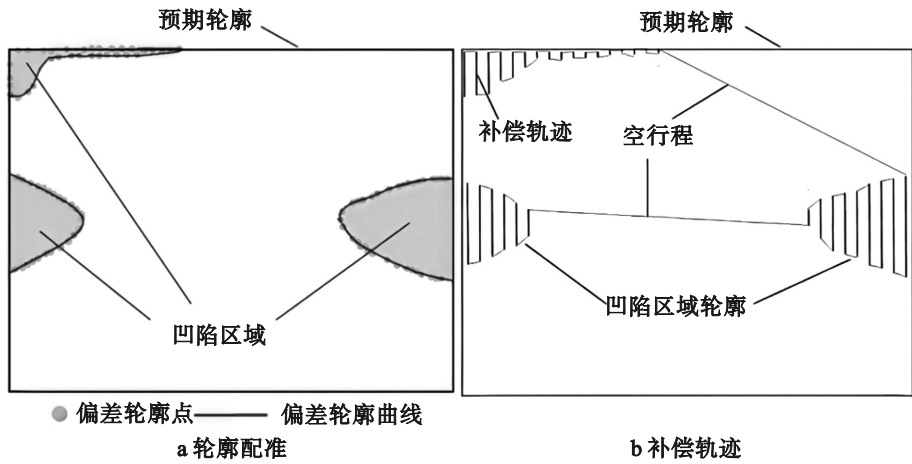


图 11 凹陷偏差区域分层平面第 7 层

图 12 凸起偏差区域首层调控

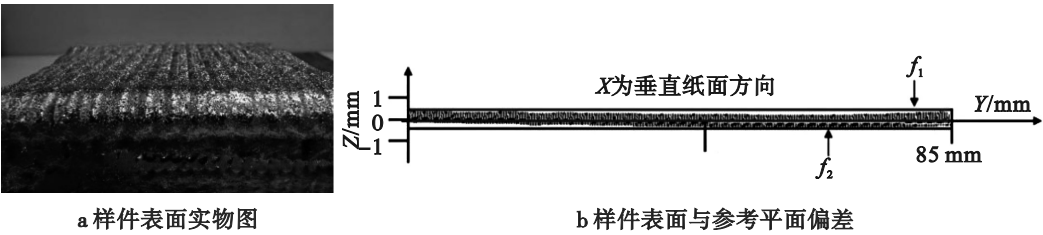


图 13 反馈控制后样件表面实物图和样件表面与参考平面偏差

4 结论

本文提出一种激光沉积制造成形表面偏差监测与反馈控制的新算法,以样件成形表面的平面度误差作为判断依据,根据样件沉积预期高度设定偏差阈值,判断并提取偏差区域点

云数据,生成不同偏差区域的补偿调控轨迹,实现了成形表面偏差监测与反馈控制,并通过试验验证了算法的有效性。主要结论如下:

1)设计了一种成形表面凹陷与凸起偏差监测算法,由轮廓仪扫描得到的二维数据与位置编码器数据重构制件表面三维点云,将三维点云数据进行预处理,然后计算表面偏差值,

根据设置的偏差阈值判断是否存在凹陷或凸起偏差。

2)设计了一种针对激光沉积制造成形表面凹陷与凸起偏差的反馈控制算法,提取表面偏差区域的点云数据,在凹陷区域内生成分层补偿轨迹,在凸起区域与平整区域内生成不同扫描间距的分区调控轨迹,将所有补偿调控轨迹输出为数控程序实现反馈控制。

3)试验结果表明,该算法能够有效监测样件成形表面是否存在凹陷与凸起偏差,并且能够针对表面凹陷与凸起偏差区域进行反馈控制,有效提高了制件成形表面质量。

参考文献(References):

- [1] Latte M, Mazzarisi M, Guerra G M, et al. Key performance indexes for the evaluation of geometrical characteristics and subsurface defects through laser line monitoring of laser metal deposition process [J]. Optics and Laser Technology, 2025, 182: 112085.
- [2] Masaylo D, Igoshin S, Popovich A, et al. Effect of process parameters on defects in large scale components manufactured by direct laser deposition [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 30: 665-671.
- [3] Douellou C, Balandraud X, Duc E. Assessment of geometrical defects caused by thermal distortions in laser-beam-melting additive manufacturing: a simulation approach [J]. Rapid Prototyping Journal, 2019, 25(5): 939-950.
- [4] 彭谦,董世运,闫世兴,等.激光熔化沉积成形缺陷及其控制方法综述[J].材料导报,2018,32(15):2666-2671.
- [5] 张学军,陈冰清.航空典型金属材料增材制造组织、缺陷、表面、构型研究进展[J].航空材料学报,2024,44(1):1-14.
- [6] 刘静怡,李文辉,李秀红,等.航空零部件的金属增材制造光整加工技术研究进展[J].表面技术,2023,52(12):20-41.
- [7] Qin L Y, Zhao D X, Wang W, et al. Geometric defects identification and deviation compensation in laser deposition manufacturing [J]. Optics and Laser Technology, 2022, 155: 108374.
- [8] Koca A, Hooshmand H, Leach R, et al. Detecting microscale surface imperfections in powder bed fusion through light scattering and machine learning-validation of inspection principles [J]. Precision Engineering, 2025, 94: 761-772.
- [9] Sun F Y, Chen J M, Zhang J, et al. Study on the surface/subsurface defects of cylindrical components based on laser ultrasonic technology [J]. Optics and Laser Technology, 2025, 180: 111399.
- [10] Syam W P, Rybalcenko K, Gaio A, et al. Methodology for the development of in-line optical surface measuring instruments with a case study for additive surface finishing [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121: 271-288.
- [11] Huang C, Wang G L, Song H, et al. Rapid surface defects detection in wire and arc additive manufacturing based on laser profilometer [J]. Measurement, 2022, 189: 110503.
- [12] 李俊宏,张萍,高椿明,等.双轮廓仪金属增材制造工件表面3维重建技术[J].兵工自动化,2022,41(3):59-62.
- [13] Kovchik A Y, Babkin K D, Rakhmatulina Z A. Distortion compensation in LMD process [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 30: 568-571.
- [14] Zheng B, Haley J, Yang N, et al. On the evolution of microstructure and defect control in 316L SS components fabricated via directed energy deposition [J]. Materials Science & Engineering A, 2019, 764: 138243.
- [15] 赵宇辉,赵吉宾,王志国. Inconel 625镍基高温合金激光增材制造翘曲变形行为研究[J].真空,2020,57(2):88-93.
- [16] 王霞,王维,杨光,等.激光沉积薄壁结构热力演化的尺寸效应[J].金属学报,2020,56(5):745-752.
- [17] 胡楷雄,李克,周勇,等.基于Kriging模型和强化学习的激光直接能量沉积成形尺寸控制[J].激光与光电子学进展,2024,61(23):246-256.

- [18] Chen L Q, Yao X L, Xu P, et al. Rapid surface defect identification for additive manufacturing with in-situ point cloud processing and machine learning [J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2021, 16 (1): 50–67.
- [19] Xu J T, Hou W B, Zhang H Z. An improved virtual edge approach to slicing of point cloud for additive manufacturing [J]. *Computer-Aided Design and Applications*, 2018, 15(3): 330–336.
- [20] 邢宏文, 刘思仁, 邱磊, 等. 基于点云数据的零件数字化检测技术研究[J]. *机械制造与自动化*, 2020, 49(6): 217–219.
- [21] 周祥曼, 费世港, 田启华, 等. 增材制造数字化模型平面与非平面切片及路径规划研究进展[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(16): 40–68.
- [22] 陈达, 章轩, 赵圣斌, 等. 基于深度学习的激光熔覆层表面缺陷识别研究[J]. *光学学报*, 2025, 45 (9): 193–203.
- [23] 韩金玉, 赵歆, 姜亚萍. 激光三维点云下机械零件表面缺陷识别方法[J]. *激光杂志*, 2025, 46(1): 234–239.
- [24] 杨启, 田虎成, 闫昭华, 等. 激光近净成形中熔池宽度实时监控系统的研究[J]. *激光与红外*, 2019, 49(9): 1060–1067.
- [25] 苏立志, 杨建利, 卢通, 等. 基于模糊增量式PID控制的激光定向能量沉积熔池温度监测与闭环控制[J]. *中国表面工程*, 2025, 38(3): 199–212.
- [26] 彭程. 中空激光内送粉TC4钛合金沉积温度控制研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2020.
- [27] 张潇丹. 基于点云处理的工件高度测量和表面缺陷检测关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [28] Ren Y J, Li T Z, Xu J K, et al. Overall filtering algorithm for multiscale noise removal from point cloud data[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 110723–110734.
- [29] He S W, Liu B L. Review of bounding box algorithm based on 3d point cloud [J]. *International Journal of Advanced Network, Monitoring and Controls*, 2021, 6(1): 18–23.
- [30] Agathos A, Azariadis P. Multi-GPU 3D k-nearest neighbors computation with application to ICP, point cloud smoothing and normals computation [J]. *Parallel Computing*, 2024, 121: 103093.
- [31] Lu J X, Gweon H. Random k conditional nearest neighbor for high-dimensional data[J]. *PeerJ. Computer Science*, 2025, 11: e2497.
- [32] 丁承君, 孙刚, 尹李亮, 等. 散乱点云的边界提取[J]. *计算机技术与发展*, 2017, 27(7): 83–86.
- [33] Lashgari H R, Xue Y, Onggowarsito C, et al. Microstructure, tribological properties and corrosion behaviour of additively manufactured 17-4PH stainless steel: effects of scanning pattern, build orientation, and single vs. double scan[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 25: 101535.
- [34] 吴呼玲. 平面度误差评定的几种方法[J]. *产业与科技论坛*, 2015, 14(22): 68–69.

(责任编辑: 吴萍 英文审校: 侯宁)