

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.04.07

核用增材制造数字孪生中复杂路径规划的数学建模与仿真验证

严鹏飞

核工业第八研究所, 上海 201800

摘要: 金属增材制造是实现核用高可靠性构件“材料-结构-制造”一体化的重要途径,而基于熔池监控的数字孪生(DT)技术是保障其成形质量的核心方向。然而,针对复杂激光扫描路径的瞬态空间位置难以通用数字化,现已成为制约热力耦合仿真与数字孪生闭环控制的首要底层算法瓶颈。本文提出了一种适用于任意复杂路径规划的移动热源空间坐标求解数学模型与算法框架。通过重构增材制造设备路径规划的初始约束条件,引入时间与激光扫描轨迹的夹逼映射关系,从理论上彻底消除了实时道次识别与光斑瞬态位置匹配的不确定性。在此基础上,基于有限元环境实现了该解析算法,并成功验证了其在提取复杂路径热历史及构建特征温度场中的准确性与高效性。本研究不仅打破了传统数值仿真对简化阵列路径的依赖,成功实现了复杂路径规划的数字化建模,还为核用增材制造设备的高保真数字孪生系统提供了完整、独立的底层算法支撑。该方法学同时具备向材料挤出等其他复杂轨迹增材制造工艺拓展的潜力。

关键词: 增材制造; 路径规划; 移动热源; 数字孪生; 数值仿真

中图分类号: TH164; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)04-0060-05

Mathematical Modeling and Simulation Verification of Complex Path Planning in Digital Twin for Nuclear Additive Manufacturing

YAN Pengfei

Eighth Research Institute of Nuclear Industry, Shanghai 201800, China

Abstract: Metal additive manufacturing (AM) is a pivotal approach for achieving high-reliability components of nuclear-oriented components, wherein the digital twin (DT) of in-process melt pool monitoring represents a critical developmental direction. However, the absence of a generalized digital modeling methodology for transient spatial localization of moving lasers under complex scanning paths remains a primary algorithmic bottleneck for thermomechanical simulation and closed-loop control. This paper proposes a mathematical model and a corresponding computational algorithm for determining the spatial coordinates of moving heat sources under arbitrary complex path planning. By reformulating the initial path constraints of AM equipment and introducing a temporal-spatial mapping mechanism, the computational uncertainties regarding real-time track identification and transient spot localization are theoretically eliminated. Furthermore, the proposed algorithm was implemented and validated within a finite element environment, demonstrating its accuracy and efficiency in extracting thermal history and reconstructing characteristic temperature fields for complex scanning strategies. This study successfully establishes the foundational modeling for the DT of complex path planning, overcoming the traditional reliance on simplified scanning paths. It provides a complete and independent theoretical and algorithmic framework for high-fidelity DT in nuclear AM, with significant potential for transferability to extrusion-based AM processes.

Keywords: additive manufacturing; path planning; moving heat source; digital twin; numerical simulation

收稿日期: 2025-11-05 修回日期: 2026-03-05

基金项目: 中核浦原青年英才项目(KY-ZHBS-2024-08);上海市启明星项目(24QB2707100);中核集团青年英才项目(KY-ZHBS-2025-011)

作者简介: 严鹏飞(1990—),男,博士,高级工程师,主要从事增材制造研究。E-mail: 752543688@qq.com。

引用格式:严鹏飞.核用增材制造数字孪生中复杂路径规划的数学建模与仿真验证[J].电焊机,2026,56(4):60-64.

Citation:YAN Pengfei. Mathematical Modeling and Simulation Verification of Complex Path Planning in Digital Twin for Nuclear Additive Manufacturing[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(4): 60-64.

0 引言

金属增材制造技术(Additive Manufacturing, AM)通过逐点、逐道、逐层的材料添加方式,能够实现微区冶金凝固过程的精细控制,从而完成高性能构件的无模具快速制备^[1-3]。这种“材料—结构—制造”一体化的成形特点,为突破传统铸造、锻造及粉末冶金等整体成形工艺中难以彻底避免的微区组织缺陷问题提供了有效途径。特别是在核安全领域,实现核用部件微观组织的精准控制、达到“绝无一失”的宏伟目标是行业发展的核心诉求。因此,具备高阶组织控制能力的金属增材制造技术被视为满足核用材料苛刻成形要求的重要“未来制造技术”之一。

随着增材制造向极高可靠性方向发展,数字孪生(Digital Twin, DT)技术在过程监控与缺陷抑制中展现出巨大价值。文献[4]研究表明,数字孪生体结合传感器数据,能够对打印部件中的缺陷形成进行精确且可解释的检测。为了实现核用部件制造全流程的质量把控,构建基于熔池监控系统的数字孪生体已成为当前的重点发展方向。近年来,具备先进熔池监控系统的核级金属3D打印硬件设备不断涌现,如“睿眸”熔池监控系统(见图1),这类系统能够实时测量并记录激光功率、光斑形态、打印路径等关键制造参数,为制造流程的溯源与监控奠定了坚实的数据基础。

然而,尽管硬件监控能力日益完善,熔池监控系统的数字孪生及后续的闭环控制仍面临基础性理论瓶颈。其首要障碍在于:对于复杂扫描路径规划,目前缺乏一种通用的数字化表达与计算方法。文献调研表明,即便是针对较为基础的45°单向/双向扫描路径,相关的仿真验证工作^[5-7]相比实验验证工作^[8-20]也相对匮乏,且鲜有研究系统论述复杂扫描路径的具体设定与控制方程。在有限元或数字孪生建模中,通用设置方法的最大挑战在于:难以确定复杂表达式(或难以用解析式描述的非规则路

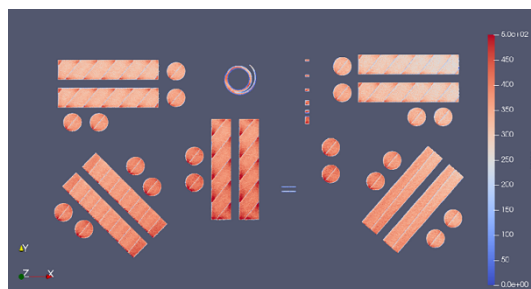


图1 “睿眸”熔池监控系统某打印层的完整特征温度场数据(“特征温度场”是经过熔池监控系统数据重构的温度场,而不是真实温度场)

Fig. 1 Reconstructed temperature field of a printed layer acquired by the Ruimou melt pool monitoring system (Data represents computationally reconstructed thermal characteristics, not raw instantaneous measurements)

径)下,激光光斑在任意实时时间(t)的精确空间坐标。这种困难主要源于加工过程中的两个不确定性:(1)每道扫描路径的长度各异,导致实时扫描的道次难以动态确定;(2)实时扫描时,激光光斑在当前道次内的相对位置难以瞬态匹配。

针对上述共性基础问题,本文提出了一种适用于复杂路径建模的数学解析方法。该方法从理论上消除了路径长度与实时扫描状态的不确定性,推导并建立了任意时刻(t)与对应激光光斑位置坐标(P_i^{ch})的明确映射关系。本研究旨在实现任意复杂路径规划的数字化精确复现,从而为核用增材制造设备数字孪生系统的构建补齐关键的算法短板,奠定智能控制算法的基础。

1 复杂路径规划的数学建模

当前处理(切片)软件完成路径规划后,对某一层的切片规划可以如图2所示。

假设软件在当前层总共规划了(cht)道路径。其中,第一道路径起点和终点及道长分别为(P_0^1)、(P_1^1)和($|P_0^1 P_1^1| = l^1$);第(ch)道分别为(P_0^{ch})、(P_1^{ch})和($|P_0^{ch} P_1^{ch}| = l^{ch}$)。假设激光光斑当前扫描至第(ch)道,根据目前的LPBF设备技术现状,每一道内激光光

表2 预给定的“道数-扫描速度矢量”路径规划规整化数据

Table 2 Path planning data-Unit velocity vectors

ch	v_e^{ch} x/mm	v_e^{ch} y/mm	ch	v_e^{ch} x/mm	v_e^{ch} y/mm
1	-0.7071	0.7071	12	0.7071	-0.7071
2	0.7071	-0.7071	13	-0.7071	0.7071
3	-0.7071	0.7071	14	0.7071	-0.7071
4	0.7071	-0.7071	15	-0.7071	0.7071
5	-0.7071	0.7071	16	0.7071	-0.7071
6	0.7071	-0.7071	17	-0.7071	0.7071
7	-0.7071	0.7071	18	0.7071	-0.7071
8	0.7071	-0.7071	19	-0.7071	0.7071
9	-0.7071	0.7071	20	0.7071	-0.7071
10	0.7071	-0.7071	21	-0.7071	0.7071
11	-0.7071	0.7071			

表3 预给定的“道数-当前道长”路径规划规整化数据

Table 3 Path planning data -Track lengths

ch	l^{ch}/mm	ch	l^{ch}/mm
1	0.4	12	7.770 6
2	1.2	13	6.970 6
3	2.0	14	6.170 6
4	2.8	15	5.370 6
5	3.6	16	4.570 6
6	4.4	17	3.770 6
7	5.2	18	2.970 6
8	6.0	19	2.170 6
9	6.8	20	1.370 6
10	7.6	21	0.570 6
11	8.4		

表4 通过计算得到的“道数-当前道完成时刻”路径规划规整化数据

Table 4 Path planning data Cumulative times(Computed via Eq. (2))

ch	$t_i^{ch}(s)$	ch	$t_i^{ch}(s)$
1	4.0000E-04	12	5.6171E-02
2	1.6000E-03	13	6.3141E-02
3	3.6000E-03	14	6.9312E-02
4	6.4000E-03	15	7.4682E-02
5	1.0000E-02	16	7.9253E-02
6	1.4400E-02	17	8.3023E-02
7	1.9600E-02	18	8.5994E-02
8	2.5600E-02	19	8.8165E-02
9	3.2400E-02	20	8.9535E-02
10	4.0000E-02	21	9.0106E-02
11	4.8400E-02		

法无缝集成至有限元软件(如用户子程序接口)中,具体的算法实现流程如下:

算法1:复杂路径下瞬态移动热源坐标与热流

密度求解算法

输入:仿真当前时刻 t ;有限元节点坐标 (x, y) ;总扫描道数 cht ;预处理序列:各道次起点坐标序列 $P0$ 、各道次方向向量序列 ve 、各道次完成时刻序列 tf ;扫描速度 v ;激光总功率 P ;高斯光斑半径 R 。

输出:当前节点的热流密度 q 。

1: 初始化节点热流密度 $q \leftarrow 0$

2: for $ch \leftarrow 0$ to $cht-1$ do

3: if $tf[ch] \leq t < tf[ch+1]$ then /*基于夹逼关系确定当前所处道次 ch */

4: /* 基于数学模型求解瞬态光斑中心坐标 $Ptch(xH, yH)$ *

5: $xH \leftarrow P0[ch].x + (t - tf[ch]) * v * ve[ch].x$

6: $yH \leftarrow P0[ch].y + (t - tf[ch]) * v * ve[ch].y$

7:

8: /* 计算当前节点距光斑中心的欧式距离 d */

9: $d \leftarrow \sqrt{(x-xH)^2 + (y-yH)^2}$

10:

11: /*设定有效热输入截断半径为 $2R$ 以优化计算效率*/

12: if $d \leq 2R$ then

13: $q \leftarrow (2P/\pi R^2) * \exp(-2d^2/R^2)$

14: end if

15: break /*成功匹配当前道次后直接跳出循环,避免冗余计算*/

16: end if 17: end for 18: return q

在上述算法实现中,为了兼顾仿真精度与计算开销,在算法第12行引入了以 $2R$ 为半径的计算截断域。因为当节点距离光斑中心达到 $2R$ 时,该范围内的功率能量积分与实际激光输入功率的比值已达到约99.97%:

$$\frac{P_I}{P} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{2R} q_{\max} e^{-\frac{2r^2}{R^2}} r dr d\theta}{q_{\max} \frac{\pi R^2}{2}} \cong 99.97\% (6)$$

忽略 $2R$ 范围外的微弱热通量,可在不损失精度的前提下显著降低计算量。运算结果如图4所示,温度场分布特征与文献[7]一致,验证了该算法模型的有效性与准确性。

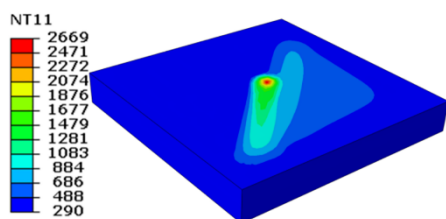


图4 本例某时刻瞬态温度场仿真结果(NT11为温度指标)

Fig. 4 Simulated transient temperature field at a specific moment

3 结论

为了解决复杂路径规划难以在增材制造数字孪生与有限元仿真中实现瞬态数字化的基础性难题,本文提出了一种基于时空映射关系的移动热源坐标求解解析方法,并将其转化为普适性的计算机算法。主要得出以下结论:

(1)突破了传统热力耦合仿真中高度依赖简化扫描路径(如单向/双向直线阵列)的理论局限。通过重构增材制造路径规划的初始给定条件,建立了时间(t)与激光瞬态空间坐标(P_i^{ch})之间的严格数学映射关系,从理论上消除了复杂路径下实时道次与瞬态位置的不确定性。

(2)将上述数学解析模型成功转化为无需依赖特定编译环境的通用算法。通过引入“激光扫描夹逼关系”精准锁定当前道次,并结合“(2R)截断域”准则优化能量积分计算,在有限元分析中实现了计算精度与效率的良好平衡。数值验证表明,该算法能准确复现复杂路径下的瞬态特征温度场。

(3)本文提供的方法学框架打通了核用金属增材制造“从路径规划到热力耦合仿真”的数字化计算断点,使低成本预测复杂构件在极端成形条件下的热历史成为可能;更为重要的是,该算法为先进熔池监控系统未来实现基于数字孪生的闭环控制与缺陷在线修正提供了必不可少的底层理论支撑,对提升核用构件制造的极高可靠性具有重要的工程应用价值。

参考文献:

- [1] DENG Q, CHANG Z, SU N, et al. Developing a novel high-strength Mg-12Gd-2Y-1Zn-0.5Mn (GWZ1221 M) alloy for laser powder bed fusion additive manufacturing process [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2024, 12(3): 470-485
- [2] LU B H, LI D C, TIAN X Y. Development Trends in Additive Manufacturing and 3D Printing [J]. Engineering, 2015, 1(1): 085-089
- [3] PENG L M, DENG Q C, WU Y J, et al. Additive Manufacturing of Magnesium Alloys by Selective Laser Melting Technology: A Review [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(1): 31-54.
- [4] TAHERI H, SHOAIB M R B M, KOESTER L W, et al. Powder-based additive manufacturing—a review of types of defects, generation mechanisms, detection, property evaluation and metrology [J]. International Journal of Additive and Subtractive Materials Manufacturing, 2017, 1(2): 172-204.
- [5] CAI L, LIANG S Y. Analytical modelling of temperature distribution in SLM process with consideration of scan strategy difference between layers [J]. Materials, 2021, 14(8): 1869.
- [6] CHENG B, SHRESTHA S, CHOU K. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting [J]. Additive Manufacturing, 2016, 12: 240-251.
- [7] ALI H, GHADBEIGI H, MUMTAZ K. Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 712: 175-187.
- [8] QIU C L, WANG Z, Aladawi A S. Influence of laser processing strategy and remelting on surface structure and porosity development during selective laser melting of a metallic material [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50: 4423-4434.
- [9] McLouth T D, Witkin D B, Bean G E, et al. Variations in ambient and elevated temperature mechanical behavior of IN718 manufactured by selective laser melting via process parameter control [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 780: 139184.
- [10] ZHAO C, BAI Y, ZHANG Y, et al. Influence of scanning strategy and building direction on microstructure and corrosion behaviour of selective laser melted 316L stainless steel [J]. Materials & Design, 2021, 209: 109999.
- [11] XIONG W, HAO L, LI Y, et al. Effect of selective laser melting parameters on morphology, microstructure, densification and mechanical properties of supersaturated silver alloy [J]. Materials & Design, 2019, 170: