

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.01.016

基于数字孪生的FDM增材制造系统的开发及应用

王昱钧^{1,2}, 茅健^{1,2,3}

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620;

2. 机械工业大型复杂构件智能制造技术重点实验室, 上海 201620; 3. 上海交通大学四川研究院, 成都 610213)

摘要: 数字孪生驱动的增材制造系统在打印质量控制和过程优化方面起着重要作用, 针对增材制造设备存在调试周期长、材料浪费大、打印过程可视化程度低以及参数验证成本高等问题, 本文提出一种数字孪生驱动增材制造系统的方案。使用多学科协同设计方法, 基于机电一体化概念, 结合虚实同步、相互映射的策略构建数字孪生模型, 实现了运动控制逻辑、运动轨迹与打印过程的一体化建模, 从而在虚拟空间中对控制参数和工艺路径进行优化。其次, 提出长短期记忆(LSTM)温度预测模型, 优化熔融沉积成型(FDM)增材制造过程中打印喷头的温度控制, 提高打印过程的精度与稳定性, 为工艺参数调整和异常工况预警提供数据支撑。最后, 以FDM工艺下的尼龙材料增材制造系统为例, 在虚拟环境中完成设备调试与打印过程验证, 当输入序列长度为60 s时, LSTM模型预测精度评估得分达到平均绝对误差=0.296 7、决定系数=0.934 1, 表明所构建的数字孪生驱动增材制造系统在温度预测与打印质量控制方面具有较高的可靠性, 并且适配同类型增材制造设备, 具有较高的应用价值。

关键词: 机电一体化概念; 数字孪生; 虚拟调试; 增材制造; 长短期记忆

中图分类号: TQ320 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)01-0124-08

Development and application of FDM additive manufacturing system based on digital twin technology

WANG Yujun^{1,2}, MAO Jian^{1,2,3}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology for Large Complex Thin-Walled Components of Aviation in Machinery Industry, Shanghai 201620, China 3. Shanghai Jiao Tong University Sichuan Research Institute, Chengdu 610213, China)

Abstract: Digital twin-driven additive manufacturing systems play a crucial role in print quality control and process optimisation. Addressing the problems existing in additive manufacturing equipment, such as long commissioning cycles, excessive material waste, low visualization degree during the printing process, and high cost for parameter verification, a digital twin-driven additive manufacturing system solution was proposed. Employing a multidisciplinary collaborative design methodology, mechatronics concept designer platform was utilised to construct digital twin models by combining virtual-physical synchronization and mutual mapping strategies. This enables the unified modelling of motion control logic, motion trajectories, and printing processes, thereby facilitating the optimisation of control parameters and process paths within the virtual environment. Secondly, long short-term memory (LSTM) temperature prediction model was proposed to optimise temperature control of the print head during fused deposition modeling (FDM) additive manufacturing, which can enhance the precision and stability of the printing process, providing data support for process parameter adjustments and early warning of abnormal operating conditions. Finally, taking a nylon material additive manufacturing system under FDM process as an example, equipment commissioning and printing process validation were completed in a virtual environment. When the input sequence length is 60 seconds, LSTM model achieve an accuracy assessment score of mean absolute error of 0.296 7 and coefficient of determination of 0.934 1, demonstrating that the constructed digital twin-driven additive manufacturing system exhibits high reliability in temperature prediction and print quality control. Furthermore, it is adaptable to similar additive manufacturing equipment, possessing significant practical value.

Keywords: mechatronics concept designer ; digital twin ; virtual commissioning ; additive manufacturing ; long short-term memory

基金项目: 四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0366)

通信作者: 茅健, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为碳纤维复材增材制造等

收稿日期: 2025-11-10

引用格式: 王昱钧, 茅健. 基于数字孪生的FDM增材制造系统的开发及应用[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(1): 124-131.

WANG Yujun, MAO Jian. Development and application of FDM additive manufacturing system based on digital twin technology[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1): 124-131.

增材制造是未来制造业发展的重点方向。增材制造设备从非运行状态到运行状态的转换称为调试阶段,其目的是测试和验证设备的运行^[1]。在增材制造设备的全生命化周期管理过程中,需要对设计、装配、运行、维护阶段进行调试检查。调试检查内容包含机械设计参数、控制程序参数、G代码、系统运行稳定性等。据统计,在传统的增材制造设备调试过程中,对物理控制器和执行器的调试时间约占整个项目时间的25%^[2],物理空间的调试存在周期较长、浪费打印材料、可视化效果差和风险高等缺陷。为解决上述问题,部分学者提出了虚拟调试的解决方法。使用搭建的虚拟场景进行虚拟调试,其具有高效、可靠、安全、可重复等优点^[3-5]。虚拟场景运行于计算机仿真系统中,且与物理空间保持一致,仅在设计阶段就可以缩短75%的调试时间。

增材制造和数字孪生作为工业4.0的关键部分,近年来,这些研究领域经常相互交织和结合,以寻求数字制造创新潜力的更具颠覆性的发展^[6]。目前增材制造数字孪生领域着重集中于材料孪生、故障检测和孪生框架设计等方面,其孪生的领域较为单一。Wang等^[7]提出了一个将深度学习剩余使用寿命预测与多目标混合整数线性规划维护调度相融合的数据驱动预测性维护框架,通过迭代 ε 约束与模糊决策获取帕累托最优方案,并在NASA的航空发动机退化仿真数据集上的飞机发动机维护场景中实现了维护成本均超过40%的降低。Ahsan等^[8]系统综述了增材制造中数字孪生的研究现状,围绕数字孪生的主要类型及应用、最新发展与实现方式、在工艺改进与混合制造中的作用以及与工业4.0技术的集成这四个问题进行系统评价,揭示当前挑战并为未来研究和工程实践提供参考方向。代定强等^[9]开发了面向飞机设计验证与使用维护阶段的数字孪生模型,通过融合多学科模型与实测数据,实现了对疲劳与结构完整性的精确评估与预测,显著提升了飞机全生命周期的安全保障能力。Chen等^[10]总结了在文献综述中发现的增材制造数字双胞胎,并提出了一个新颖的、面向服务的数字孪生框架。Li等^[11]提出了一种分级数字孪生框架,用于防止皮带打滑导致的打印错误。Li等^[12]提供一种高度还原电弧增材制造系统的途径,让人们更好地理解 and 可视化制造过程。增材制造数字孪生开发周期较长,各学科相互独立,缺少统一的平台进行融合。大

量的研究关注于制造过程的可视化,缺乏对增材制造设备的孪生。现有的孪生平台中,数据难以采集,且只能作用于特定的对象,无法快速迁移至其他增材制造设备。

本文提出一种数字孪生驱动增材制造系统的方案,实现了控制器、执行机构、人机交互界面(HMI)与虚拟环境的相互映射。开发了可编程逻辑控制器(PLC)与G代码联动的虚拟调试平台,实现了对打印参数的在线验证;长短期记忆(LSTM)温度预测模型为控制参数优化、故障预警和设备资源管理提供数据支持。以尼龙增材制造设备为例进行实验验证,实验结果表明该系统在温度预测与打印质量控制方面有较高的可靠性与可迁移性。

1 数字孪生驱动的虚拟调试系统

1.1 数字孪生总体架构

数字孪生驱动增材制造虚拟调试框架如图1所示。它是以“多学科协同设计+虚实映射”构建设备级数字孪生,包括四个部分:虚拟控制器、虚拟执行机构、人机交互界面和虚拟调试平台^[13-16]。其中,虚拟控制器、虚拟执行机构和HMI构成数字孪生模型,结合虚拟调试平台实现虚拟调试的功能。以熔融沉积成型(FDM)增材制造设备为例,根据物理空间的增材制造设备的多耦合性和虚实映射方法,构建了数字孪生模型。其次,基于孪生模型构建虚拟设备。然后,开发了一种虚拟平台,为虚拟控制器、虚拟设备和HMI提供交互途径。最后,对增材制造设备进行虚拟调试,验证了控制参数的准确性,并对过程进行可视化。

数字孪生是物理空间增材制造设备的生命化周期的虚拟映射,是对物理空间设备运行过程的完整复刻,是一种全新的数字化方法,可以复制物理空间的结构、执行机构、控制器和HMI构成虚拟的调试平台。增材制造设备数字孪生模型由多学科协同设计和虚实结合的方式构成。增材制造设备是一种复杂的、多学科和多耦合的制造设备,其设计和调试过程中涉及机械、电气、计算机和材料等相关领域^[17-18]。

1.2 虚拟调试平台

虚拟调试平台采用多学科协同设计的方式构建增材制造设备的数字孪生系统,整套系统能够迁移到具有三轴控制方式并使用G代码进行轨迹与工艺控制的增材制造设备,同时该设备应具备OPC

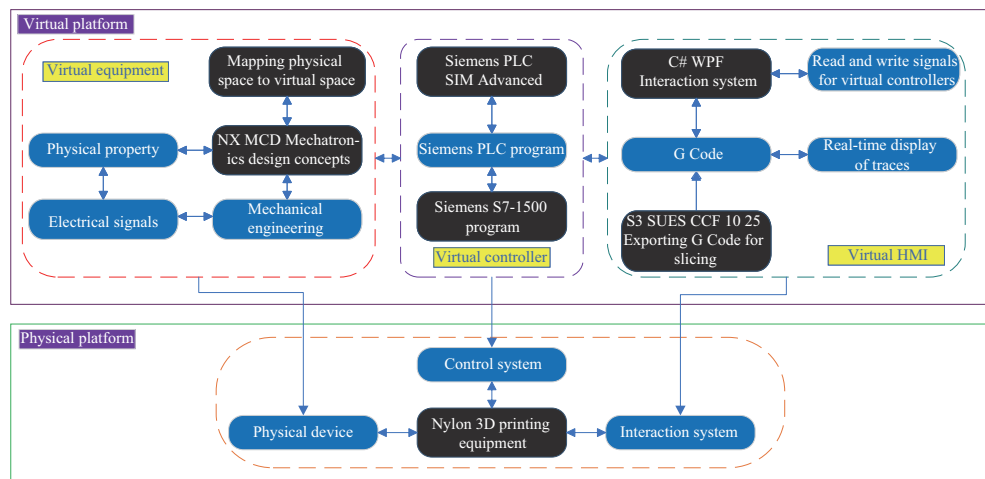


图1 数字孪生驱动增材制造虚拟调试框架

Fig. 1 Virtual commissioning framework for digital twin-driven additive manufacturing

UA/S7通讯协议。

具体步骤如下。

(1)对物理空间增材制造设备的结构进行分解,考虑物理设备实际运行中执行机构的功能,建立高度还原的映射模型,达到虚实相生、以虚证实的目标。

(2)对增材制造设备的系统进行分解。考虑增材制造设备虚拟调试过程中所需要的虚拟控制器、三维模型切片、虚拟执行机构和HMI等功能,增材制造设备的数字孪生模型应该包含机械、电气、控制系统3个子模块。机械模块通过NX UG建立目标设备的三维模型,并通过MCD设置运动逻辑;电气模块使用PLC编程设置控制逻辑;控制系统模块利用C# WPF进行虚拟人机交互界面的开发。

(3)每个子模块需要依照物理增材制造设备进行详细划分,确保虚拟空间与物理空间功能保持一致。物理空间内机械子模块包含增材制造设备的基本结构、执行机构和步进电机等部分。电气子模块包含步进驱动器、IO控制信号和控制器等部分。控制系统包含HMI界面、控制决策和控制效果等部分。

(4)机械系统描述了执行机构之间的运动特性和耦合程度,电气系统通过电气信号控制执行机构运行。控制系统通过HMI界面控制增材制造设备的启停,实现过程可视化。

(5)采用多学科协同设计的方法对各模块进行虚拟映射,建立与物理空间子模块保持一致的虚拟系统。在虚拟空间中搭建虚拟机械、电气和控制子系统,完整还原物理空间中的系统。

虚拟调试平台是在数字孪生模型的基础上,使

用S7通信协议将各个子模块进行连接交互,在MCD环境中组合构成虚拟调试平台,如图2所示。

虚拟调试平台中主要控制参数 C 有轴速度 V 、轴位置 P 、打印层数 L 和填充密度 D 。 $C=\{V,P,L,D\}$,其中 P 、 L 和 D 由切片软件S3 SUES CCF 10 25自动生成的G代码文件进行控制, V 由人为设定。将G代码文件分别载入虚拟与物理调试平台,设置相同的轴速度,比对对应的调试时间 T 和打印过程可视化程度(Vis)。 T 由虚拟调试平台和物理调试平台运行时间获得,Vis由两种平台打印过程的可视化评估得来。

虚拟调试平台和物理调试平台运行完成后,比对两种平台打印成品数据是否一致。通过比对数据的一致性,得出虚拟调试平台可以预测物理调试平台的打印过程和成品的策略。在虚拟平台验证后的调试参数可以显著降低物理平台的故障率,保证虚拟验证后的控制参数是物理平台的最优解。同时,虚拟调试平台可以减少物理设备的调试时间,改善物理设备的可视化程度。

1.3 LSTM预测模型

为提升数字孪生驱动虚拟调试平台对增材制造过程状态演化的刻画能力,并实现对关键工艺参数的前瞻性决策支持,本文提出了LSTM预测模型,作为虚拟调试平台内部的数据分析与智能预测模块,如图3所示。

LSTM模型包含细胞状态、遗忘门、输入门、输出门^[19]。LSTM模型结构图如图4所示。

细胞状态作为LSTM模型核心储存单元,长期保留关键信息,确保历史数据应用于当前预测。遗忘门可以动态清理细胞状态中冗余信息,它会查看

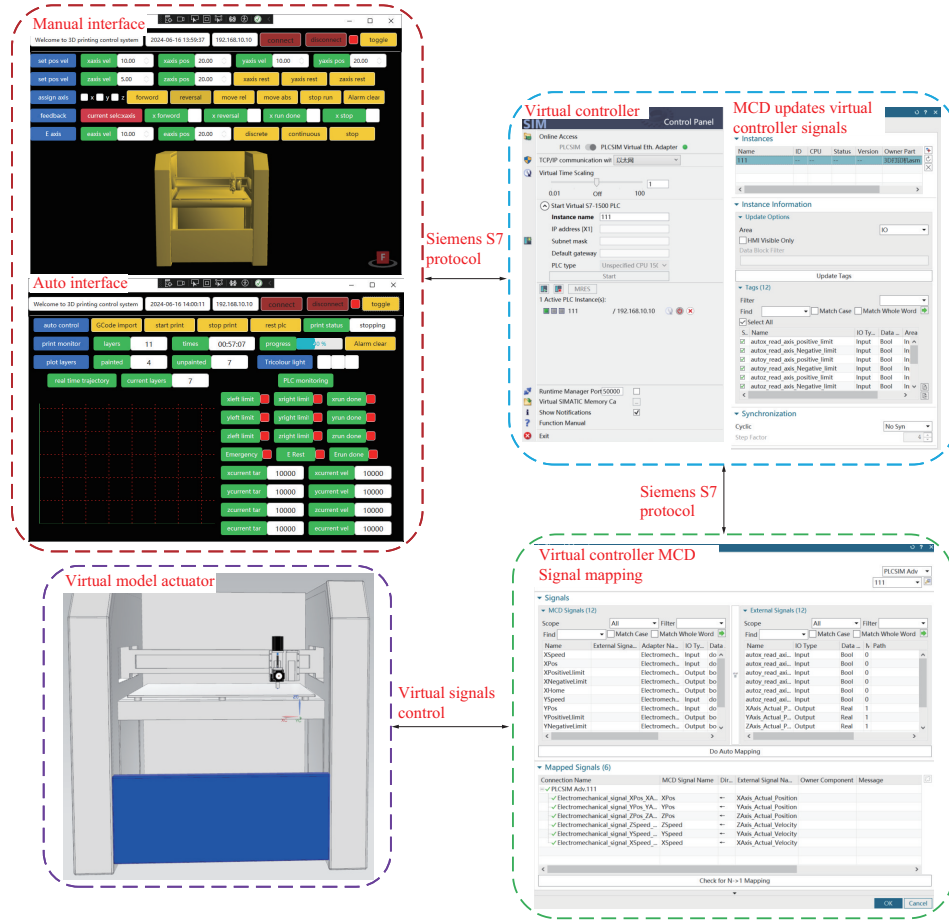


图2 虚拟调试平台

Fig. 2 Virtual commissioning platform

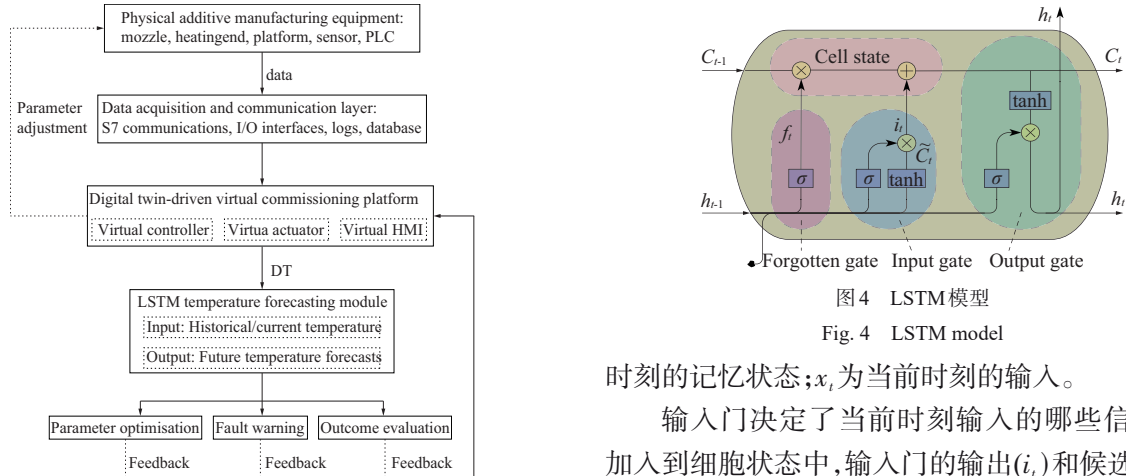


图3 LSTM预测模块嵌入示意图

Fig. 3 Schematic diagram of LSTM prediction module embedding

当前输入和上一时刻的隐藏状态,并通过 Sigmoid 激活函数(σ)决定哪些信息应该保留,遗忘门的输出(f_t)计算公式见式(1)。

$$f_t = \sigma[W_f(h_{t-1}, x_t) + b_f] \quad (1)$$

式中: W_f 和 b_f 为权重矩阵和偏置项; h_{t-1} 为上一

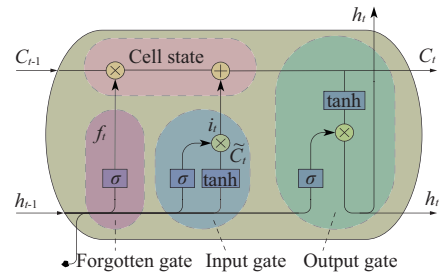


图4 LSTM模型

Fig. 4 LSTM model

时刻的记忆状态; x_t 为当前时刻的输入。

输入门决定了当前时刻输入的哪些信息应该加入到细胞状态中,输入门的输出(i_t)和候选的细胞状态(C'_t)计算公式分别见式(2)和式(3)。

$$i_t = \sigma[W_f(h_{t-1}, x_t) + b_i] \quad (2)$$

$$C'_t = \tanh[W_c(h_{t-1}, x_t) + b_c] \quad (3)$$

式中: W_c 为输入门权重矩阵; b_i 和 b_c 为偏置项。

输出门决定了当前时刻的细胞状态有多少信息应传递到下一时刻的隐藏状态或输出层,输出门的输出(O_t)和当前时刻的隐藏状态(h_t)计算公式见

式(4)和式(5)。

$$O_i = \sigma[W_o(h_{i-1}, x_i) + b_o] \quad (4)$$

$$h_i = O_i \tanh(f_i C_{i-1} + i_i C'_i) \quad (5)$$

式中: W_o 为输出门的权重矩阵; b_o 为输出门的偏置项; C_{i-1} 为长期记忆状态。

2 FDM 尼龙增材制造实验验证

为了验证所提出的数字孪生驱动增材制造虚拟调试平台的可靠性和有效性,以FDM尼龙增材制造为例,使用上述搭建完成的虚拟调试平台对增材制造设备进行虚拟调试。

本实验使用材料为 PolyMide™ PA612-CF, 是一款碳纤增强的长链共聚尼龙材料, 不含玻璃纤, 同时具有比一般的尼龙 12 类材料更高的打印性能, 见表 1。

表 1 PolyMide™ PA612-CF 的打印性能
Tab. 1 PolyMide™ PA612-CF printing performance

Parameters	Value
Tensile modulus/GPa	4.7
Yield strength/MPa	85

2.1 FDM 打印调试

FDM 打印调试是使用 HMI 解析 G 代码后, 通过调试平台发送解析后 G 代码中的数据至虚拟控

制器。虚拟控制器使用西门子 PLC SIM Advanced 软件将真实的西门子 PLC 与虚拟过程连接起来, 以虚拟调试的方式模拟闭环系统。虚拟控制器存储并执行 G 代码中的数据指令, 同时通过 HMI 发送连续打印指令。虚拟控制器接收指令后, 开始多轴连续打印, 虚拟执行结构依照 G 代码数据以绝对运动的方式运行到指定的位置。在打印喷嘴设置轨迹生成器, 记录虚拟调试平台中打印喷嘴的轨迹。

同时运行物理增材制造设备和虚拟增材制造设备, 开始多轴连续打印, 如图 5 所示。打印产品为长方形样条和复杂几何样条, 长方形样条标准尺寸为长 100 mm、宽 20 mm、高 3 mm, 复杂几何样条标准尺寸为长 170 mm、宽 20 mm、高 3 mm。虚拟调试平台和物理调试平台均通过同一份 G 代码提供控制参数, 记录物理平台和虚拟平台的调试时间 T 和过程可视化效果 Vis。物理平台展示了在打印过程中底层、中间层和最终成品之间的打印效果。然而, 物理平台运行过程中喷嘴的直径仅为 0.35 mm, 导致肉眼难以进行观测。因此, 物理平台对打印轨迹可视化的效果较差。同时打印过程中一旦控制参数出现故障, 将导致整个打印材料的浪费, 打印成品无法预测。

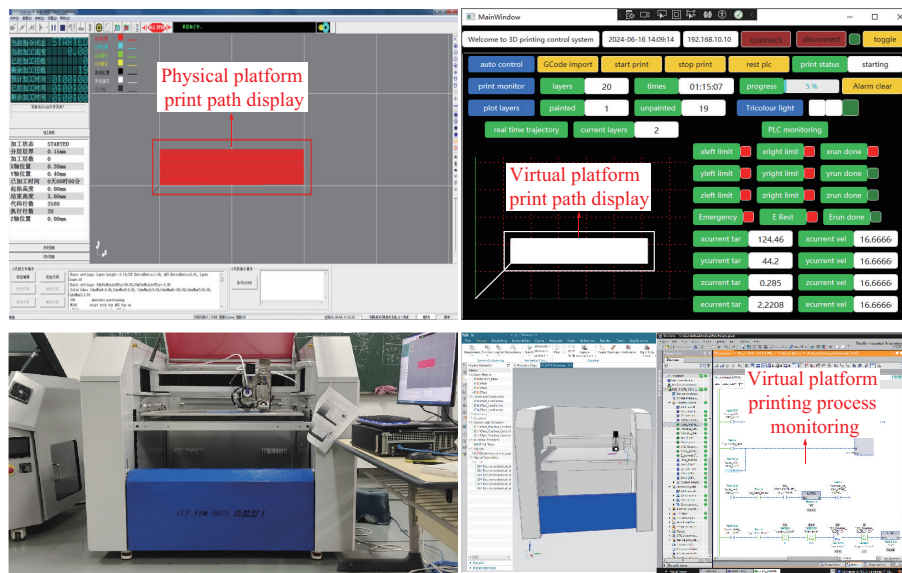


图 5 两种调试平台打印的样条

Fig. 5 Splines printed by two commissioning platforms

2.2 虚拟平台与 G 代码一致性分析

G 代码数据由切片软件产生, 虚拟调试平台的数据由轨迹生成器进行导出。采用正则表达式对数据进行解析^[20], 使用 Matlab 读取数据并生成三维图像。

以长方形样条为例, 长方形样条的 G 代码和虚拟调试平台数据三维图如图 6 所示。

对打印样条的 G 代码数据和虚拟调试平台轨迹数据进行分析, 所有不同打印层之间填充的长、宽、高均为一定, 且打印层数均为 20 层, 如图 7 所

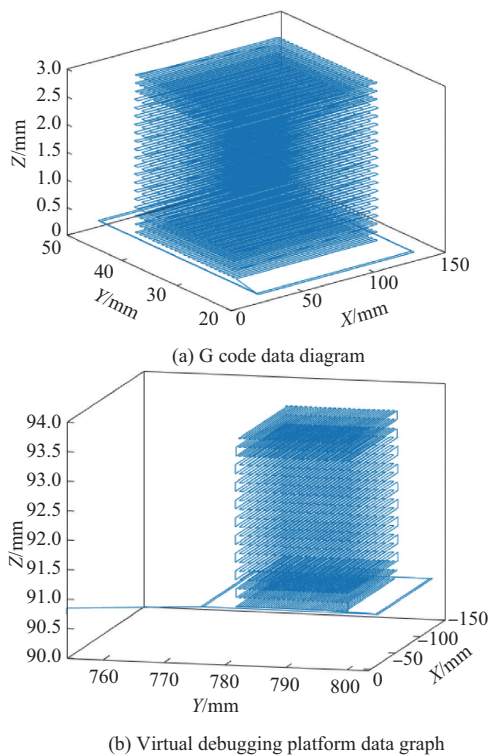


图6 长方形样条G代码和虚拟调试平台数据三维图

Fig. 6 Rectangular spline G-code and virtual commissioning platform data 3D diagram

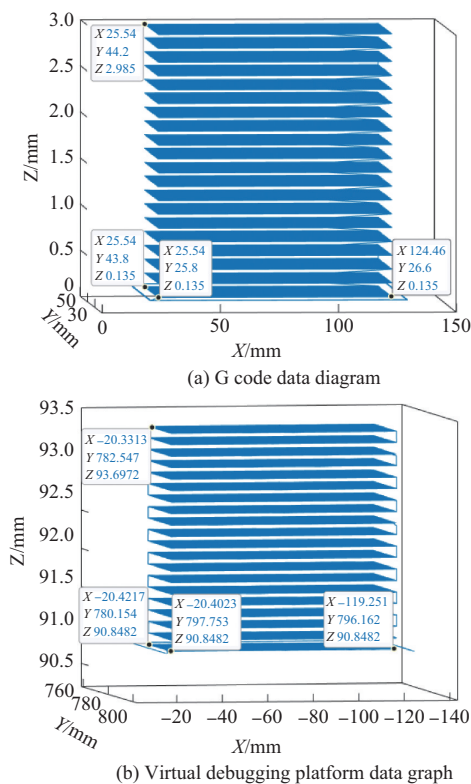


图7 长方形样条G代码和虚拟调试平台填充层

Fig. 7 Rectangular spline G-code and virtual commissioning platform fillin layer

示。通过对上侧G代码数据进行分析可以得到打印样条最终的切片数据为长98.92 mm,宽为18.4 mm,高为2.85 mm。对下侧虚拟调试平台的数据进行分析可以得到孪生样条最终数据为长98.92 mm,宽为18.4 mm,高为2.85 mm。

图8为FDM尼龙增材制造实验打印效果图。如图8所示,在FDM尼龙增材制造实际打印中,长方形样条、复杂几何样条最终打印件形状规整,通过与标尺对比,其尺寸与G代码及虚拟调试平台数据所体现的尺寸高度契合,说明在形状和尺寸精度上达到了较好的水平,能保证打印件的结构完整性。最终打印件表面较为均匀、无明显的打印缺陷,呈现出较为良好的外观质感。

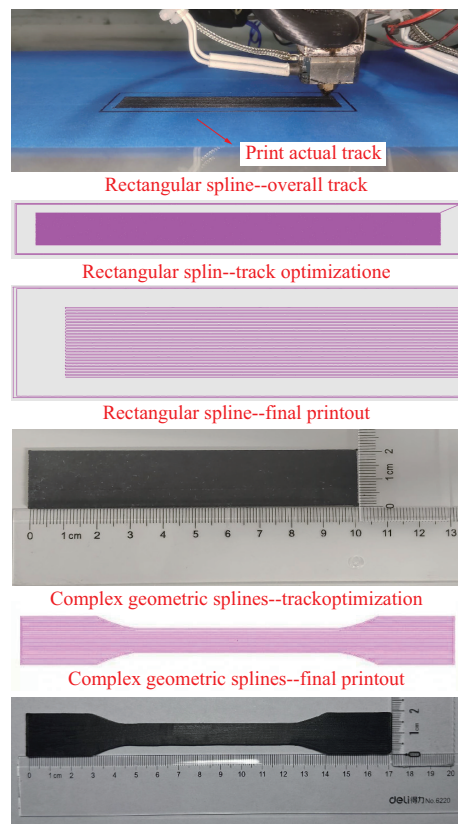


图8 FDM尼龙增材制造实验打印效果图

Fig. 8 FDM nylon additive manufacturing experimental print results

通过上述对打印样条的G代码和虚拟调试平台的试机数据、打印数据和填充密度进行分析,得出以下结论:

- (1)虚拟调试平台的打印数据与G代码的数据相对一致,总体复现了切片数据,存在小部分误差。
- (2)虚拟调试平台可以提前验证物理平台的G代码参数,确保打印准确性。
- (3)虚拟调试平台能有效发现切片过程中的错

误,突破了传统增材制造中G代码验证必须依赖物理设备的瓶颈。

(4)在尼龙增材制造实验中,打印件形状规整、尺寸精度高,层间结合紧密且外观质量良好,实际打印效果与虚拟调试平台及G代码所体现的设计预期高度契合,验证了基于该虚拟调试平台进行尼龙增材制造的可靠性与准确性。

2.3 LSTM温度预测结果与模型评估

2.3.1 实验数据预处理

数据使用最大最小值归一化方法进行预处理,通过线性变换将数据缩放到[0, 1],最大、最小值归一化公式如下。

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (6)$$

式中: X_{norm} 为标准化后的新数据值; X 为原始数据值; $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 为原始数据中的最小值和最大值。

2.3.2 超参数设置

实验训练迭代次数epoch设置为150次,学习率设置为0.000 1,损失函数loss设置为均方误差(MSE),LSTM模型超参数见表2。当输入序列为60 s时,模型损失曲线如图9所示。

表2 LSTM超参数

Tab. 2 LSTM hyperparameters

Model	Parameters	Value
LSTM	Input_size	1
	Hidden_size	128
	Num_layers	2
	Output_size	1

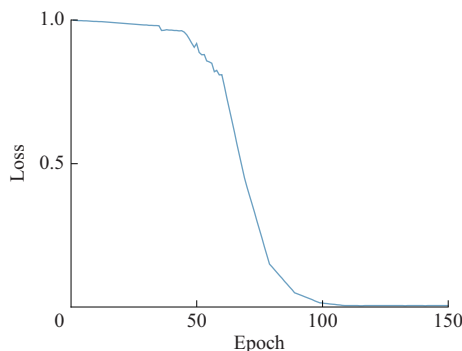


图9 模型损失曲线

Fig. 9 Model loss curve

2.3.3 预测结果

评价指标可以客观地评估模型的预测性能,为衡量模型性能选用的评价指标是平均绝对误差(MAE,简称 M)和决定系数(R^2),计算公式见式(7)和式(8)。

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

式中: n 为样本的总数量; y_i 为样本的真实值; $\hat{y}_i$ 为样本的预测值; $\bar{y}$ 为样本的平均值。

在输入序列长度均为60 s时,利用评价指标MAE、 R^2 评估模型的预测精度和稳定性,其中MAE值为0.296 7, R^2 为0.934 1,说明该模型能够较为准确地捕捉增材制造过程温度变化规律,具有良好的拟合与稳定性。基于该预测结果,虚拟调试平台可在虚拟环境中提前评估不同控制参数对温度场的影响,为打印过程的参数优化和异常工况预警提供可靠支撑,对比实验结果见表3,测试结果如图10所示。

表3 模型评估

Tab. 3 Model evaluation

Model	Evaluation	Value
LSTM	MAE	0.296 7
	R^2	0.934 1

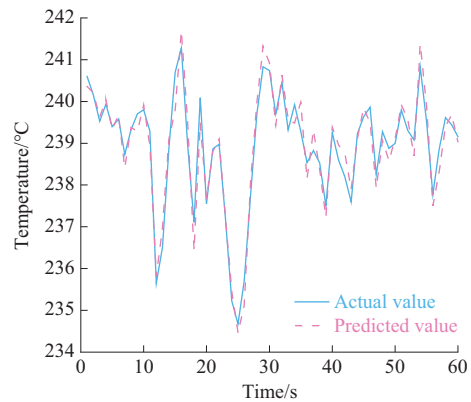


图10 模型预测结果

Fig. 10 Model prediction results

3 结论

(1)针对增材制造设备调试过程中存在的调试周期长、材料浪费大、过程可视化程度低、参数验证成本高等问题,提出了一种数字孪生驱动的增材制造虚拟调试系统,以FDM尼龙增材制造设备为对象进行验证研究。

(2)构建面向增材制造设备的数字孪生虚拟调试系统,实现虚拟控制器、执行机构、人机交互界面与虚拟场景一体化建模,孪生运行策略与物理设备一致,为设备级调试提供可靠环境。

(3)虚拟调试平台可与实际G代码和PLC逻辑直接对接,对FDM打印过程进行可视化仿真和轨迹

复现,打印尺寸与几何特征与实物吻合,验证其在精度与一致性评估方面的有效性。

(4)平台支持控制参数提前验证与在线调整,相较传统物理调试在保证质量前提下,降低试错成本与材料消耗并提升安全性和可视化水平。

(5)提出了LSTM温度预测模型,实现对关键区域温度演化预测,为参数优化、故障预警和资源管理提供数据支撑,增强平台智能化与可推广性。

参考文献

- [1] HANANTO A L, TIRTA A, HERAWAN S G, et al. Digital twin and 3D digital twin: Concepts, applications, and challenges in industry 4.0 for digital twin[J]. *Computers*, 2024, 13(4). DOI: 10.3390/computers13040100.
- [2] SHVYDYUK K O, LANCEROS-MENDEZ S, SILVA A P. Advanced ceramics in aerospace and defense: The interrelationship between traditional and additive manufacturing approaches[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2025, DOI: 10.1002/admt.202501012.
- [3] TAŞCI B, OMAR A, AYVAZ S. Remaining useful lifetime prediction for predictive maintenance in manufacturing[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 184. DOI:10.1016/j.cie.2023.109566.
- [4] 林裕程, 韩勇. 基于NX MCD的数控机床虚拟调试[J]. *制造技术与机床*, 2021(2):151–156.
LIN Yucheng, HAN Yong. Virtual commissioning for CNC machine tools based on NX MCD[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2021(2):151–156.
- [5] 彭于华. 数字孪生在新能源汽车驱动系统制造中的实践与思考[J]. *汽车制造业*, 2025(2):15–19.
PENG Yuhua. Practice and thinking of digital twinning in the manufacture of new energy vehicle drive system[J]. *Automobil Industrie*, 2025(2):15–19.
- [6] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1):1–18.
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1):1–18.
- [7] WANG L B, LI B T, ZHAO X F. Multi-objective predictive maintenance scheduling models integrating remaining useful life prediction and maintenance decisions[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 197. DOI:10.1016/j.cie.2024.110581.
- [8] AHSAN M M, LIU Y T, RAMAN S, et al. Digital twins in additive manufacturing: A systematic review[J]. *Internet of Things*, 2025, 33. DOI:10.1016/j.iot.2025.101692.
- [9] 代定强, 周轩, 董雷霆, 等. 数字工程与数字孪生在航空疲劳与结构完整性领域的研究进展与展望[J]. *航空学报*, 2025, 46(19):19–40.
DAI Dingqiang, ZHOU Xuan, DONG Leiting, et al. Research progress and prospects of digital engineering and digital twin in field of aeronautical fatigue and structural integrity[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46(19):19–40.
- [10] CHEN Z J, SURENDRAARCHARYAGIE K, GRANLAND K, et al. Service oriented digital twin for additive manufacturing process[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2024, 74:762–776.
- [11] LI N Y, LINK G, JELONNEK J, et al. Digital twins towards microwave-assisted 3D printing of continuous carbon fiber reinforced composites[J]. *Procedia CIRP*, 2023, 119:158–163.
- [12] LI H R, SHI X C, WU B T, et al. Wire arc additive manufacturing: A review on digital twinning and visualization process[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 116:293–305.
- [13] 贾慧芳, 黄晖, 邱祖峰. 后副车架多学科多性能集成协同优化设计[J]. *中国工程机械学报*, 2025, 23(1):49–54.
JIA Huifang, HUANG Hui, QIU Zufeng. Multi-disciplinary and multi-performance integrated collaborative optimization design of a rear subframe[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2025, 23(1):49–54.
- [14] 李仲树, 顾晓洋, 陈琪, 等. 基于数字孪生技术的智能制造虚实映射平台探索与研究[J]. *物联网技术*, 2025, 15(16):149–153, 157.
LI Zhongshu, GU Xiaoyang, CHEN Qi, et al. Exploration and research on virtual reality mapping platform of intelligent manufacturing based on digital twin technology[J]. *Internet of Things Technologies*, 2025, 15(16):149–153, 157.
- [15] PAWAR P, PAWALE P, NAGTHANE T, et al. Performance enhancement of dual axis solar tracker system for solar panels using proteus ISIS 7.6 software package[J]. *Global Transitions Proceedings*, 2021, 2(2):455–460.
- [16] DE OLIVEIRA HANSEN J P, DA SILVA E R, BILBERG A, et al. Design and development of automation equipment based on digital twins and virtual commissioning[J]. *Procedia CIRP*, 2021, 104:1167–1172.
- [17] TIAN F N, VOSKUIJL M. Automated generation of multiphysics simulation models to support multidisciplinary design optimization[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2015, 29(4):1110–1125.
- [18] MARTINS J R R A, LAMBE A B. Multidisciplinary design optimization: A survey of architectures[J]. *AIAA Journal*, 2013, 51(9):2049–2075.
- [19] 王印松, 张炬. 基于IGRA和CNN-LSTM的垃圾焚烧炉主蒸汽温度预测[J]. *动力工程学报*, 2025, 45(8):1308–1318, 1344.
WANG Yinsong, ZHANG Ju. Main steam temperature prediction for waste incinerator based on IGRA and CNN-LSTM[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2025, 45(8):1308–1318, 1344.
- [20] BORSOTTI A, BREVEGLIERI L, CRESPI REGHIZZI S, et al. General parsing with regular expression matching[J]. *Journal of Computer Languages*, 2023, 74. DOI:10.1016/j.col.2022.101176.