

激光选区熔化多振镜系统的打印时间预估算法

翁丰强, 杨永强*, 陈铎, 李阳

华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641

摘要 激光选区熔化(SLM)技术是目前最主要的激光粉末床熔融制造方式之一。SLM技术是基于逐层制造成型的过程,其工作时间成本一直是该技术领域的重要科学问题。该研究将为激光选区熔化多振镜系统的打印时间预估提供一种准确的算法及计算思路。铺粉式的激光选区熔化设备的打印原理主要涉及铺粉模块将金属粉末均匀地铺在制造成型区域和振镜扫描系统完成制造成型的扫描打印工作。该算法基于铺粉式的激光选区熔化设备的打印原理,采用多振镜激光选区熔设备软件控制系统编程,将算法程序集成到设备控制系统之中。该算法先通过模型图和工艺参数来计算得出激光选区熔化设备的扫描系统理论打印时间,再通过设备控制系统在打印过程中获得各个计时单元铺粉模块实时运行的时间,并采用计时单元内铺粉模块的算数平均值来提高各计时单元内铺粉模块时间预估精度。利用 SLM 设备扫描系统的实际运行时间和时间预估数值的差异,进行校正参数的实时修正。通过累加 SLM 设备每一层的打印时间,最终得到较为准确的制造成型时间预估。实验验证表明,十小时以上的打印任务中,打印预估时间和实际打印时间之间的偏差率小于 $\pm 1\%$ 。本研究的算法可以准确地得到打印任务的工作时长,为 SLM 控制系统提供一种有效的时间预估方法,在帮助企业合理计划生产任务、预估打印成本和控制系統优化方面提供了新方向,有助于推动 SLM 设备和控制系统的持续发展。

关键词 激光技术; 激光选区熔化; 时间预估; 控制系统; 多振镜; 算法

中图分类号 TP301.6

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1802019

1 引言

当前激光增材制造设备的应用已经涉及激光粉末床熔融(LPBF)和激光定向能量沉积(LDED)^[1]。基于激光选区熔化(SLM)技术的产业正在广泛地应用于社会生产^[2],并且在全世界范围内持续发展和技术创新。其中,设备控制系统在激光增材制造设备发展过程中扮演极其重要的角色,目前国产软件和外国软件依然存在很大的差距。随着激光选区熔化设备功能不断的优化,激光选区熔化设备可以实现气体循环系统研究^[3]、机器视觉监控研究^[4]、温度控制^[5]、压力监控、清筛送粉末处理控制、制造成型时间预估等功能。当前,激光选区熔化领域的研究绝大多数集中在材料及其工艺与性能和成型零件

性能研究等方面^[6-10],对激光选区熔化设备的控制系统研究却不热衷,以至于国产软件控制系统依然处于发展初期,国内激光选区熔化设备依然摆脱不了对国外软件的依赖。

国内激光选区熔化设备控制系统主要是高校和企业自主研发为主。每年举行一次的 TCT Asia 展会都会带来最新的三维(3D)打印技术成果,TCT Asia 2020^[11]汇集了超过 350 家展商带来最新技术革新,大尺寸多振镜控制系统已经成为新趋势。目前,国内企业软件的时间预估功能依然没有公开准确预估打印时间的解决方案以及时间预估准确度效果数据指标,从目前市场上出售的软件的时间预估功能使用效果以及宣传方面来看,少有时间预估准确度高于 95% 的报道,而且实际预估效果很不稳

收稿日期: 2021-03-26; **修回日期:** 2021-04-21; **录用日期:** 2021-05-17

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2018B090905001)、广东省重点领域研发计划项目(2020B090924002)、国家自然科学基金(U2001218、51875215、81772428)、广东省特支计划(2019TQZ110)、广东省区域联合基金重点项目(2020B1515120013)

通信作者: *meyqyang@163.com

定,甚至现有控制系统还存在缺少时间预估这个功能的问题。国外控制系统繁多且大多数设备生产商的控制系统处于自研自用和采购定制软件控制系统的模式。公开商业销售的控制系统中,具有代表性控制软件有 Materialise 公司的系列产品,其性能处于国际顶尖水平。时间预估在激光选区熔化设备的加工服务中扮演不可或缺的角色,主要涉及加工任务的安排和影响激光选区熔化的运行成本^[12-14]。成型效率一直是制约激光选区熔化技术广泛应用的难题,随着 SLM 设备打印样件的尺寸变大,加工时间可达半个月甚至一个月,这不仅要考虑设备运行时间内的物料配置,还要考虑人员的值班安排,如果有更好的时间预估功能,将为生产工作带来极大便利。时间预估不仅可以指导生产加工,也可推动激光选区熔化设备的升级发展。目前,现存的激光选区熔化设备控制系统都按其自主研发的算法,还未正式公开提出一种现成有效的的时间预估计算方法。因此,尽可能在现有设备的基本配置的情况下,设计出一种较精确的制造成型时间预估计算方法,使用户实时掌控加工进度,这是一种较强的现实需求,对增强 3D 打印 SLM 产品的核心竞争力方面具有重要的积极意义,也为控制系统功能的优化升级提供一个评价指标。本文从一般适用性出发,提供了一种较为有效的的时间预估算法。

本文围绕激光选区熔化多振镜系统,也称多振镜铺粉式激光选区熔化设备,分析其工作模式加工逻辑,并针对它提出了一种加工时间预估方法。该方法步骤如下:首先,加工任务确定模型和工艺参数后,按理论算法计算振镜工作的预估时间。其次,在

设备运行加工任务后,以某一采样周期提取铺粉模块的运行时间和扫描系统实际打印时间。最后,在完成第一层打印工作后,将采集到的数据作为修正数据基准,算法开始不断优化更新打印时间,并在控制系统实时显示更新。

2 算法基本原理

如图 1 所示,铺粉式激光选区熔化设备的打印原理主要完成两个动作:1)将金属粉末均匀地铺在制造成型区域;2)振镜扫描系统完成制造成型的扫描打印工作。设备都需要围绕满足这个两个动作来设计。以上两部分的工作时间就是本算法对于预估时间的预估依据,并且从一般适用性角度分析两部分打印时间,适用于各种机型。激光选区熔化多振镜系统运行时间主要由铺粉模块和扫描系统两部分组成。打印工作过程中,铺粉模块包括送粉系统、成型缸按层厚下降、刮刀铺平粉末等一系列完成铺粉功能的运动;扫描系统是由振镜及其运动板卡和激光器及其配置等组成。铺粉式的激光选区熔化设备工作是逐层累加制造成型三维零件的过程,其中铺粉模块执行的是层层循环重复铺粉工作。算法计算铺粉模块时,将以铺粉车实际的逐层铺粉运动时间的均值作为铺粉车的层运动时间,每种机型的铺粉模块运动时间都以其实际运动时间为基准,这样就不用考虑不同机型的铺粉模块在控制上的差异。利用算法求多振镜的工作时间,只考虑每层打印工作中最长制造成型时间的振镜,这样不论多少振镜都满足振镜计算打印时间的计算方式。算法程序是集成在 SLM 控制系统软件之中,设备在自动加工过程中将实时采集的状态数据用于时间预估算法的实

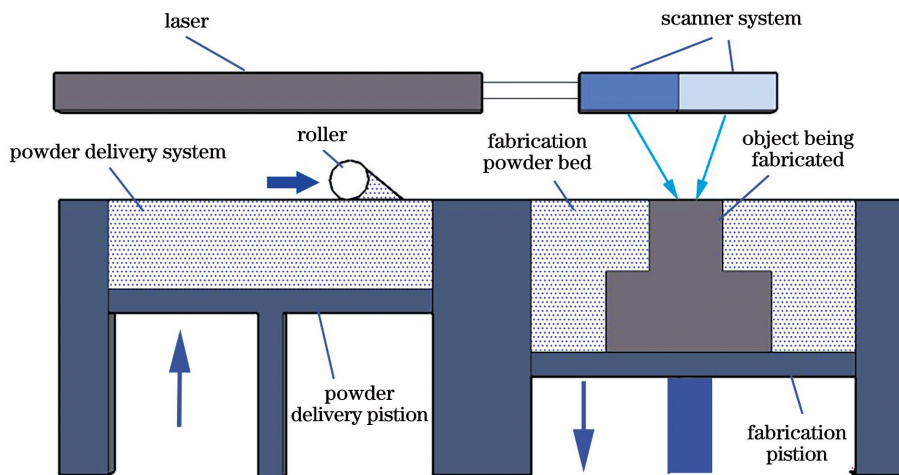


图 1 铺粉式激光选区熔化设备原理

Fig. 1 Principle of powder spreading selective laser melting equipment

时计算,以保持算法的时效性。激光选区熔化多振镜的打印时间预估主要是研究预估打印任务中扫描系统制造成型所需时间和铺粉模块运动所需时间,以及两者时间预估的相互关系,最终得到激光选区熔化多振镜系统的打印时间动态预估值。

2.1 扫描系统制造成型时间预估

STL 模型切片输出 CLI 格式中主要分为两种曲线集合:闭合曲线(外轮廓线和内轮廓线)和开线(非闭合曲线)^[15]。目前,主流的激光选区熔化设备中扫描系统的振镜运动控制卡是基于 XY2-100 协议^[16]开发的。扫描系统通过振镜运动控制卡控制振镜实现打标动作^[17]。SLM 的扫描系统和激光打标机原理^[18-19]是一样的,两者均通过振镜来控制激光扫描曲线的过程。

多振镜系统的扫描系统采用特定的打印方法^[20-22],通过打印方法给多振镜分配打印任务,振镜最终得到的任务是曲线集和打印参数(如打标速度、激光功率、延时等)。本文算法不用考虑打印方法具体分配图形任务的过程,也不需要考虑具体的路径规划策略设置,只需要考虑打印方法配分至每个振镜的曲线集和其对应的工艺参数,算法将根据曲线集和工艺参数计算得到相应的打印时间。

2.1.1 扫描系统打印曲线的理论时间预估

2.1.1.1 单条曲线打印时间

扫描系统主要功能是扫描曲线(直线),线由点集 $p(x, y)$ 表示: $P_{\text{polygon}} = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$, 激光按点集的点阵排列顺序先后扫描打标,即 $p_0 \rightarrow p_1 \rightarrow p_2 \rightarrow \dots \rightarrow p_n$ 。

激光扫描是通过振镜运动实现的。在振镜运动时间参数中激光扫描时间的主要参数包括:

1) 激光扫描速度 V_{Mark} , 即激光从一点扫描到另一点的速度,单位 mm/s。

2) 跳转速度 V_{Jump} , 即激光从一点跳转到另一点的速度,单位 mm/s。

3) 跳转延时 t_{jDelay} , 即激光从一点跳转到另一个点的动作指令生效时所需的延时,单位 μs 。

4) 拐弯延时 t_{pDelay} , 即激光扫描经过拐点处时,由于激光扫描方向的改变,两条打标指令之间的指令执行延时,单位 μs 。

5) 打标结束延时 t_{mDelay} , 即由跳转过渡至打标的引导延时,单位 μs 。

6) 光斑起点位置 $p_{\text{or}}(x, y)$, 即在振镜启动开始工作时,光斑(振镜)所处的位置,单位 mm。

曲线打印的理论打印时间=激光扫描时长+跳转时长+曲线拐弯延时+打标结束延时+跳转延时。曲线打印的理论加工时间公式为

$$t_{\text{polygon}} = \frac{L_{\text{pLength}}}{V_{\text{Mark}}} + \frac{L_{\text{jLength}}}{V_{\text{Jump}}} + t_{\text{polygonDelay}} + t_{\text{mDelay}} + t_{\text{jDelay}}, \quad (1)$$

式中: $L_{\text{pLength}} = \begin{cases} \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{(p_i \cdot x - p_{i+1} \cdot x)^2 + (p_i \cdot y - p_{i+1} \cdot y)^2}, & n > 1 \\ 0, & n \leq 1 \end{cases}$ 为曲线的长度; $L_{\text{jLength}} =$

$\sqrt{(p_{\text{or}}x - p_0x)^2 + (p_{\text{or}}y - p_0y)^2}$ 为跳转至曲线起点的长度; $t_{\text{polygonDelay}} = \begin{cases} (n-1) \times t_{\text{pDelay}}, & n > 2 \\ 0, & n \leq 2 \end{cases}$ 为曲线拐弯延时。

2.1.1.2 曲线集的打印时间

在 3D 打印的扫描图形中,图形及其路径规划都是由简单曲线组成的集合: $\text{List} \langle P_{\text{polygon}} \rangle = \{P_{\text{polygon}0}, P_{\text{polygon}1}, \dots, P_{\text{polygon}n}\}$ 。

激光扫描曲线集的动作是连续打印,打印线集的起点光斑位置处于原点(0,0),如果不在原点,则假设在原点(0,0);除曲线集的第一条曲线的跳转起点为 p_{or} 外,第 $i(i > 0)$ 条曲线的跳转起点为上一条曲线(第 $i-1$ 条曲线)的最后一个点。曲线集打印时间是其包含所有曲线打印时间的累加。由(1)式

可以得到:

$$t_{\text{LP}} = \sum t_{\text{polygon}} \quad (2)$$

2.1.2 扫描系统单层的制造成型时间预估算法

目前,激光选区熔化设备工作是逐层制造成型的过程。加工零件的每层层线类型分为:轮廓线、路径规划的填充线、支撑、实体支撑,并且各类曲线均以曲线集的形式打印。针对不同类型的曲线特性,会设置不同的工艺参数。所以,不同工艺参数的曲线打印时间需要单独计算工作时间。

2.1.2.1 对于单层激光扫描理论时间预估

本研究将零件的每层层线类型分为:轮廓线、路径规划的填充线、支撑、实体支撑。振镜负责对象主要是曲线集和其对应的工作参数,不同曲线可以设置不一样的参数,相对振镜来说,加工不同曲线的工作过程原理是一样的。对于单个零件的单层制造成型理论时间预估公式为

$$t_{LP}^p = t_{LP}^c + t_{LP}^f + t_{LP}^s + t_{LP}^{sb}, \quad (3)$$

式中: t_{LP}^f 为填充线集的单层打印时间; t_{LP}^c 为轮廓线集的单层打印时间; t_{LP}^s 为支撑线集的单层打印时间; t_{LP}^{sb} 为实体支撑线集的单层打印时间; t_{LP}^c 、 t_{LP}^f 、 t_{LP}^s 、 t_{LP}^{sb} 均按(2)式计算得出。

加工任务由一个或者多个零件组成。加工任务的切片层的打印时间等于各个零件单切片层打印时间的总和。对于有任意个零件的加工任务的单层理论预估时间 t_{LP}^{sm} 代入(3)式展开得到:

$$t_{LP}^{sm} = \sum t_{LP}^p = \sum (t_{LP}^c + t_{LP}^f + t_{LP}^s + t_{LP}^{sb}). \quad (4)$$

2.1.2.2 校正比例系数

考虑到不同零件曲线会配有不同工艺参数(扫描速度、激光功率、跳转速度、延时等),而振镜对不同参数进行打印过程和理论计算之间必然有一定的误差:扫描系统每层的预估时间是理论计算结果,由于振镜在加速和减速的时间、振镜构件和振镜参数配置上的差异,振镜的实际工作时间和预估时间之间会有一定的误差^[23-24]。为了防止理论时间和实际时间的误差累积而导致算法准确度下降,将采用校正比例系数 β (初始值为 1)对理论打印时间进行校正。校正比例系数的实时动态值=每层扫描系统实际工作时间的累加/相应层理论时间预估累加。当加工任务进行到第 i 层时,

$$\beta = \sum_{k=0}^i \frac{t_{LP(k)}^{layer*}}{t_{LP(k)}^{sm}}, \quad (5)$$

式中: $t_{LP(k)}^{layer*}$ 为单层扫描系统实际工作时间。

2.1.2.3 单振镜单层切片制造成型的校正时间预估

随着打印的进行,对于一个有限层数的加工任务,通过(4)式和(5)式,得到单振镜单层制造成型时间预估 t_{LP}^{layer} , 表示为

$$t_{LP}^{layer} = \beta \cdot t_{LP}^{sm}. \quad (6)$$

2.1.2.4 多振镜单层切片制造成型的时间预估

目前,激光选区熔化设备的扫描系统不仅是由一个振镜扫描系统组成,还发展出大幅面多振镜激光设备^[25]。在多振镜激光扫描系统中每个振镜负责的打印任务是不尽相同的,不论采用分区

打印(振镜负责固定的区域的打印任务)还是同幅面打印(多振镜可以自由在整个工作幅面区域工作)的模式,振镜负责的打印任务依然由填充线集、轮廓线集、支撑线集和实体支撑线集四大类曲线集组成。

对于 $n(n>1)$ 个振镜的扫描系统,每个振镜的工作时间可按(6)式计算,在 n 个振镜的扫描系统中,将会得到各单振镜单层切片制造成型时间预估: t_{LP1}^{layer} 、 t_{LP2}^{layer} 、 \dots 、 t_{LPn}^{layer} 。那么最终的振镜扫描系统的单层切片制造成型时间预估为

$$t_{LP}^{layer} = \max \{t_{LP1}^{layer}, t_{LP2}^{layer}, \dots, t_{LPn}^{layer}\}. \quad (7)$$

2.2 铺粉模块运动时间预估

本文将激光工作完成后才能进行铺粉运动的位置作为铺粉模块的起点(终点)。将铺粉模块从起点回到终点的这一过程也称为“铺粉计时单元”。设备的打印动作单纯从铺粉模块角度来看,铺粉计时单元的时间预估分为等待激光完成扫描任务的时间 t_w 和铺粉模块铺粉运动时间 t_{mp} 。在制造成型过程中,在扫描系统工作(激光开始直到激光工作结束的整个过程)时,铺送粉模块不能干扰正常的扫描工作。由于铺粉模块是重复计时单元的铺粉动作,为了保证对铺粉模块的运动时间准确性,铺粉模块计时按实际运行时间平均值来表示。

2.2.1 铺粉模块总运动时间

各种激光选区熔化设备的铺粉模块采用运动形式是不尽相同的。本文按照铺粉车铺粉的模式,将铺粉形式主要分为:单向铺粉和双向铺粉^[26-27]。在预估铺粉模块运动时间的计算方式上,本文计算方式采用均值进行实时修正计算,铺粉模块每次从铺粉计时单元的起点到终点的用时称为“计时单元用时”。本文定义:实际计时单元用时表示为 t_{mp}^* , 预估计时单元用时为 t_{mp} 。计时单元内铺粉模块的运动会有很小的运动时间差异,采用实际计时单元的 t_{mp}^* 均值来求取 t_{mp} , 将单层的误差进行均分可以得到较为准确的 t_{mp} 值。

本研究将两种铺粉形式采用不同的计时方式。

1) 单向铺粉模式每铺一层铺粉就可以作为一次铺粉计时单元 t_{mp} 。对于一个 N 层的打印任务,当加工任务进行到 $i(i>0)$ 层时,铺粉模块的理论预估总运动时间等于各计时单元用时的总和。

$$t_{mall} = t_{mp} \cdot N = \frac{t_{mp0}^{S*} + t_{mp1}^{S*} + \dots + t_{mpi}^{S*}}{i + 1} \cdot N, \quad (8)$$

$$\text{式中: } t_{mp} = \frac{t_{mp0}^{S*} + t_{mp1}^{S*} + \dots + t_{mp_i}^{S*}}{i+1}; t_{mp0}^{S*}, t_{mp1}^{S*}, \dots, t_{mp_i}^{S*}$$

为单向铺粉模块各计时单元的实际运行时间。

2) 双向铺粉模式每铺两层铺粉的时间才可以作为一次铺粉计时单元 t_{mp} 。在双向铺粉时,两次单层铺粉的时间可能是不一样的,计时单元应为两层铺粉时间。对于一个 N 层的打印任务,从第 0 层开始工作,每打印到偶数层 $2i (i > 0)$ 时,铺粉模块的理论预估总运动时间等于各计时单元用时的总和。

$$t_{mall} = t_{mp} \cdot N/2, \quad (9)$$

$$\text{式中: } t_{mp} = \frac{t_{mp0}^{D*} + t_{mp1}^{D*} + \dots + t_{mp_i}^{D*}}{i}; t_{mp0}^{D*}, t_{mp1}^{D*}, \dots, t_{mp_i}^{D*}$$

为双向铺粉模式各计时单元的实际运行时间。

本文采用各个实际计时单元用时的均值,提高了 t_{mp} 以及铺粉模块总运动时间 t_{mall} 的准确度。 t_{mall} 的计算需要在加工任务启动,并且完成一个计时单元的制造后,才能由实际运行时间得出具体数值,并且该种算法可以不用考虑铺粉机构组成和运动参数的具体细节的时间计算,简化了时间预估算法,大大提高计算精度和适用性。

2.2.2 铺粉模块总等待时间

铺粉模块和扫描系统在制造成型过程中,两者是相对独立又相对制约联系。这两个基本计时模块会存在重复时间。在计算预估时间时,需要将重复时间去掉,这样才能保证时间预估是准确的。设备的打印动作单纯从铺粉模块角度来看,铺粉计时单元的预估时间可分为铺粉模块等待激光完成扫描动作的等待时间和铺粉模块铺粉运动时间。

2.2.2.1 铺粉模块出光回零运动时间

出光回零运动是指铺粉计时单元内,当激光出光时,铺粉模块运动到起点位置的过程。出光回零运动时间用 t_{mG} 表示,当 $t_{mG} = 0$ 时,不存在“出光回零运动”。

1) 对于单向送粉模块,从第 0 层开始工作,随着工作持续进行至 i 层,记录实际铺粉单元运行时间 $t_{mG(0)}^*, t_{mG(1)}^*, \dots, t_{mG(i)}^*$ 。那么铺粉模块的出光回零运动时间将由下式求取。

$$t_{mG} = \frac{t_{mG(0)}^* + t_{mG(1)}^* + \dots + t_{mG(i)}^*}{i+1}. \quad (10)$$

2) 对于双向送粉模块,从第 0 层开始工作,打印到 $2i$ 层,每次到偶数层就重新校正计算一次 t_{mG}^* 。随着工作持续进行,记录实际铺粉各个单元运行时间 $t_{mG(0)}^*, t_{mG(1)}^*, \dots, t_{mG(2i)}^*$ 。针对奇偶层的差异,铺粉模块的出光回零运动时间计算公式为

$$t_{mG} = \begin{cases} t_{mG}^{\text{even}} = \frac{t_{mG(0)}^* + t_{mG(2)}^* + \dots + t_{mG(2i)}^*}{i} \\ t_{mG}^{\text{odd}} = \frac{t_{mG(1)}^* + t_{mG(3)}^* + \dots + t_{mG(2i-1)}^*}{i} \end{cases}, \quad (11)$$

式中: t_{mG}^{even} 为偶数层的出光回零运动时间; t_{mG}^{odd} 为奇数层的出光回零运动时间。

2.2.2.2 计时单元中模块等待时间

计时单元中模块等待时间 t_w 是指铺粉模块在起点位置等待激光扫描结束的时间。 t_w 的计算公式为

$$t_w = t_{LP}^{\text{layer}} - t_{mG}. \quad (12)$$

注意: 1) 若计时单元的等待时间 $t_w \leq 0$, 则计时单元的等待时间为 $t_w = 0$; 2) 若计时单元的等待时间 $t_w > 0$, 则计时单元的等待时间为 t_w 。

2.2.2.3 铺粉模块总等待时间

对于 N 层的加工任务,则铺粉模块等待时间等于各层计时单元的等待时间 t_w 的累加,由(12)式得到铺粉模块总等待时间计算公式为

$$t_{\text{wall}} = \sum_0^N t_{wi}. \quad (13)$$

2.3 激光选区熔化多振镜系统的打印时间预估

激光选区熔化多振镜系统从实际运行与测量的角度来看,由于铺粉模块运动比较稳定,单从铺粉模块的周期运动来计算和预估打印时间是比较有效的。本文算法从铺粉模块的角度来计算制造成型过程的打印时间预估=铺粉模块运动总时间+铺粉模块总等待时间。即:

$$t_{\text{work}} = t_{\text{wall}} + t_{\text{mall}}. \quad (14)$$

由(8)~(13)式分析可知,单/双向铺粉形式会有一定差异,为了统一计算公式,采用每完成两层铺粉打印工作作为一个更新计算的依据,当工作进行到第偶数层 $i (i \% 2 = 0)$ 层时,打印时间预估的最终算法计算公式为

$$t_{\text{work}} = \begin{cases} \frac{t_{mp1}^* + t_{mp2}^* + \dots + t_{mp_i}^*}{i} \cdot N + \sum_{k=0}^M t_{LP(m)}^{\text{layer}} - \frac{t_{mG(1)}^* + t_{mG(2)}^* + \dots + t_{mG(i)}^*}{i} \cdot M \\ \frac{t_{mp1}^* + t_{mp2}^* + \dots + t_{mp_i}^*}{i} \cdot N + \sum_{k=0}^M t_{LP(m)}^{\text{layer}} - t_{mG}^{\text{odd}} \cdot H - t_{mG}^{\text{even}} \cdot (M - H) \end{cases}, \quad (15)$$

式中： M 表示 N 层任务中满足 $t_{LP}^{layer} > t_{mG}$ 的个数， $M < N$ ； H 表示 M 层中含有奇数层的数量； $\sum_{k=0}^M (t_{LP(m)}^{Layer})$ 表示 N 层任务中满足 $t_{LP}^{layer} > t_{mG}$ 关系的 M 层的 t_{LP}^{Layer} 之和， $t_{LP(m)}^{Layer}$ 的下标 m 表示满足 $t_{LP}^{Layer} > t_{mGoZero}$ 关系的具体层号； t_{mG}^{even} 和 t_{mG}^{odd} 表示(11)式中奇偶层的出光回零运动时间； $t_{mp_i}^*$ 表示第 i 层铺粉模块计时单元的运动时间。

2.4 算法流程

时间预估算法程序在激光选区熔化设备的软件控制系统中作为一个线程。设定四个全局变量链表，采用辅助程序获取激光选区熔化设备运行每层的 t_{mp}^{S*} 、 t_{LP}^{layer*} 、 t_{mG}^* 、 t_{mp}^{D*} 值，并将以上的数值保存到全局链表中；每个振镜的层理论打印时间 t_{LP}^{sm} 保存成一个全局链表、校正参数 β 作为全局变量，其他算法

所需参数可为局部变量，时间预估算法将实时取用上述链表中的数据 and β 值来计算预估时间。

将算法程序用于激光选区熔化多振镜系统中，采用如下流程(图 2)实现实时预估打印时间功能。详细算法步骤如下：

- 1) 设备加载读取 CLI 文件并设置工艺参数后，激光选区熔化设备开始自动打印工作；
- 2) 算法获取各个振镜分配得到的打印曲线集和相应工艺参数。根据振镜所负责的任务，由(4)式计算出各个振镜每一层的 t_{LP}^{sm} ，并保存成各个链表；
- 3) 判断设备是否为单向铺粉模式。如果是单向铺粉模式，继续步骤 4，否则跳至步骤 6 继续执行；
- 4) 将自动打印过程中实时记录的 t_{mp}^{S*} 、 t_{LP}^{layer*} 、 t_{mG}^* 保存在全局相应的链表中；

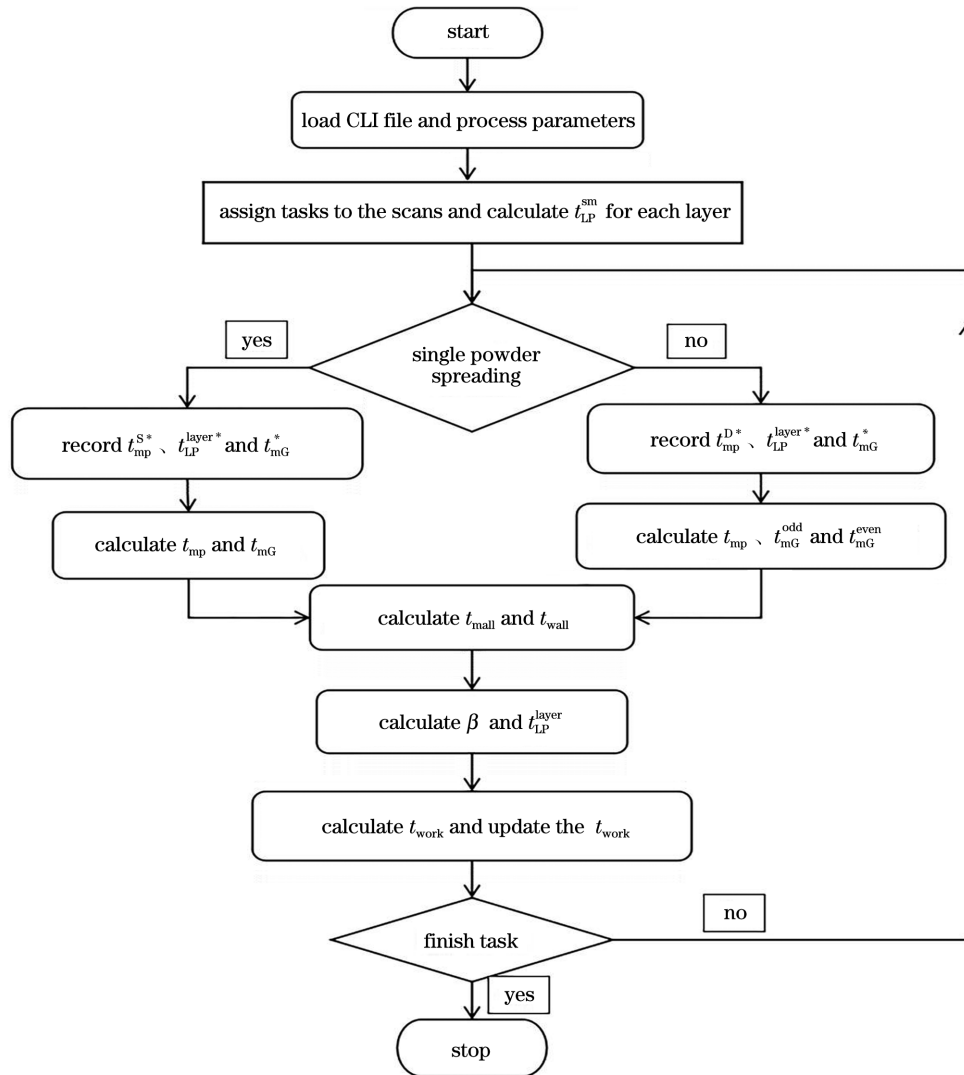


图 2 激光选区熔化多振镜系统的打印时间预估算法程序流程图

Fig. 2 Program flow chart of the printing time estimation algorithm of the SLM multi-galvanometer system

- 5) 根据(8)式计算 t_{mall} 和(10)式计算 t_{mG} ;跳至步骤 8;
- 6) 将自动打印过程中实时记录的 $t_{\text{mp}}^{\text{D}^*}$ 、 $t_{\text{LP}}^{\text{layer}^*}$ 、 t_{mG}^* 保存在相应的全局链表中;
- 7) 根据(9)式计算 t_{mall} 和(11)式计算 t_{mG} ;
- 8) 按(5)式计算 β 并且按(6)式重新计算各个振镜每层的 $t_{\text{LP}(i)}^{\text{layer}}$, 并按照(7)式得到每层扫描系统用时 $t_{\text{LP}}^{\text{layer}}$;
- 9) 按(12)式计算每层 t_w , 然后按(13)式计算 t_{wall} ;
- 10) 按(14)式计算 t_{work} , 并将最新计算的 t_{work} 给软件实时刷新显示;
- 11) 判断设备自动打印是否完成。如果没有完成,跳至步骤 3;如果完成,算法结束。

3 算法实用性检验

3.1 算法实用性检验实验

实验样机为广州雷佳增材科技有限公司自主研发的 DiMetal-450, 具有加载 CLI 文件数据并能设

置合理的扫描策略^[28-31], 扫描系统能实现双振镜双激光同幅面 425 mm×425 mm×450 mm 尺寸的打印工作, 其铺粉模块可以实现单向和双向两种铺粉形式。实验采用双振镜双激光同幅面打印, 以及单向铺粉的形式进行样件打印。样件采用无支撑实体图形, 通过验证实际工作时间和时间预估之间的偏差率来验证算法实用性。实验工艺参数和样件信息如图 3 和表 1~3 所示。

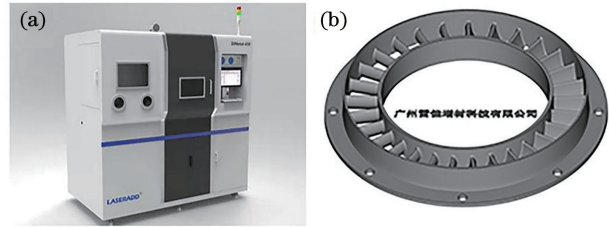


图 3 实验工艺参数和样件信息。(a)DiMetal-450 外观图;(b)打印样件模型图

Fig. 3 Experimental process parameters and sample information. (a) Appearance of DiMetal-450; (b) print sample model

表 1 影响时间预估工艺参数

Table 1 Process parameters that affect time estimation

Polygon type	$V_{\text{Mark}} / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{\text{Jump}} / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$t_{\text{mDelay}} / \mu\text{s}$	$t_{\text{pDelay}} / \mu\text{s}$	$t_{\text{jDelay}} / \mu\text{s}$	p_{or}	P / W
Fill	3000	2000	1000	550	3000	(0,0)	480
Counter	2000	2000	1000	550	3000	(0,0)	380

表 2 实验样件基本信息

Table 2 Basic information of experimental samples

Volume /mm ³	Slice thickness / μm	Number of slices	Material	Part type
1382663.404	50	1000	316L	Solid

表 3 切片扫描路径策略

Table 3 Slice scanning path strategy

Layer type	Space /mm	Type of fill	Fill mode	Block size / (mm×mm)	Scan region
Odd layer	0.1	Straight line	whole	-	Evenly split
Even layer	0.1	Straight line	block	40×40	Evenly split

实验结束后,针对样件打印情况,进行样本取样。根据打印实际情况,样本将在 255~1000 层间满足实验验证要求,故而在此范围进行随机取样(表 4)。

根据(7)式,结合表 4 的样本数据来看,扫描系统的工作时间是以振镜 2 的工作时间 $t_{\text{LP2}}^{\text{layer}^*}$ 决定的。

根据(6)式,扫描系统时间预估满足: $t_{\text{LP}}^{\text{layer}} = \beta \cdot t_{\text{LP2}}^{\text{sm}}$ 。从以秒为精度的铺粉模块运行时间上看,铺粉模块的层运动是较为稳定的。通过(10)式和(8)式可以得到实验中 $t_{\text{mG}} = 4 \text{ s}$ 和 $t_{\text{mp}} = 18 \text{ s}$, 在实验中,铺粉模块的计时单元时间预估误差几乎可以忽略不计。

表 4 实验样本实际运行时间参数

Table 4 Actual running time parameters of experimental samples

Layer number	t_{LP1}^{layer*} /s	t_{LP2}^{layer*} /s	t_{mp}^* /s	t_{mG}^* /s
256	124	130	18	4
304	123	130	18	4
352	122	129	18	4
404	120	125	18	4
452	118	121	18	4
504	115	117	18	4
552	109	113	18	4
604	62	56	18	4
652	62	56	18	4
704	62	56	18	4
752	62	56	18	4
804	61	56	18	4
852	62	57	18	4
904	43	39	18	4
952	43	38	18	4
996	43	38	18	4

3.2 扫描系统时间预估验证

本文定义扫描系统的偏差率 $p_1 = \frac{t_{LP}^{layer} - t_{LP2}^{layer*}}{t_{LP}^{layer}} \times 100\%$, 表 5 中各定义变量均由实验数据按照(1)~(7)式计算的得来。

例如:第 256 层时, $\beta_{(256)} = \sum_{i=1}^{256} \frac{t_{LP2(i)}^{layer*}}{t_{LP2(i)}^{sm}} = 0.9258$;

$t_{LP(256)}^{layer} = \beta_{(256)} \cdot t_{LP(256)}^{sm} = 0.9258 \times 140.007 = 129.618$; $p_{1(256)} = (129.618 - 130)/129.618 \times 100\% = -0.2943\%$ 。

表 5 扫描系统时间预估分析

Table 5 Scanning system time estimation analysis

Layer number	t_{LP2}^{layer*} /s	t_{LP2}^{sm} /s	β	t_{LP}^{layer} /s	$p_1 / \%$
256	130	140.007	0.9258	129.618	-0.2943
304	130	140.942	0.9254	130.428	0.3279
352	129	140.473	0.9230	129.657	0.5063
404	125	136.575	0.9212	125.812	0.6461
452	121	132.590	0.9195	121.917	0.7517
504	117	128.738	0.9178	118.156	0.9781
552	113	124.482	0.9165	114.088	0.9534
604	56	63.362	0.9144	57.938	3.3453
652	56	63.180	0.9128	57.670	2.8969
704	56	63.180	0.9113	57.576	2.7371
752	56	63.181	0.9100	57.495	2.5997
804	56	63.170	0.9088	57.409	2.4541
852	57	63.165	0.9085	57.385	0.6716
904	39	43.424	0.9082	39.438	1.1098
952	38	43.423	0.9072	39.393	3.5370
996	38	43.421	0.9062	39.348	3.4261

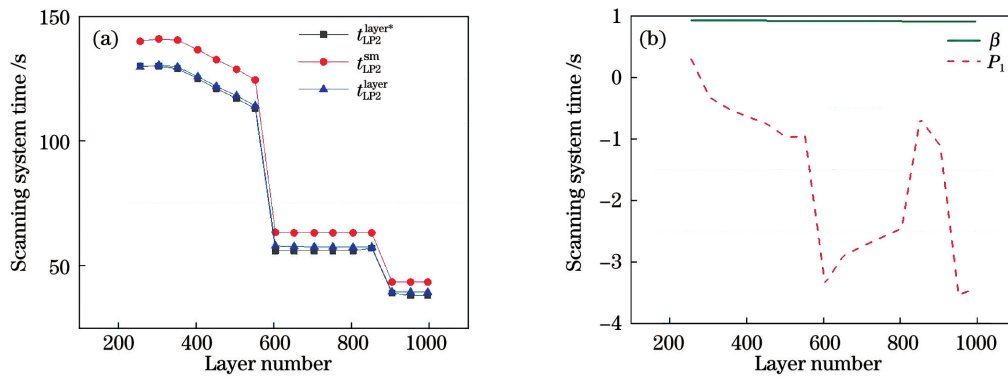


图 4 实验结果。(a)扫描系统时间预估和实际时间拟合效果图;(b)扫描系统偏差率及比例系数变化趋势

Fig. 4 Experimental results. (a) Scanning system time estimation and actual time fitting effect diagram; (b) scanning system deviation rate and proportional coefficient change trend

从实验数据和图 4 分析来看,扫描系统时间预估的偏差率会在一定的小范围之内波动。校正系数 β 随着打印层数的增加而缓慢的减少,说明扫描系统实际打印时间和理论预估时间的误差累积随着层数的增加而增大。单层打印时间和图形面积成正相关,从扫描系统的理论计算过程来看,曲线数量决定打印时间的长短。经过 β 校正后的扫描系统预估时间的偏差率保持在 5% 以下,可有效遏制误差积累,使扫描系统的时间预估保持 95% 以上的准确率。实验结果表明,通过校正系数的

校正作用,算法能有效地提高扫描系统时间预估的精准度。

3.3 打印时间预估实用性效果检验

随着工作的进行, t_{work} 是一个动态修正数值。本研究采用工作时间和工作时间预估之间的偏差率来检验实用性效果,同时检验剩余时间预估变化。本文定义实时预估时间偏差率 $p_t = (\text{工作用时} - \text{工作用时预估}) / \text{工作用时预估} \times 100\%$,如表 6 所示。如第 256 层, $p_t = (15.9289 - 16.0245) / 16.0245 \times 100\% = -0.5966\%$ 。

表 6 打印任务的时间预估实用性分析

Table 6 Practical analysis of time estimation for printing tasks

Layer number	Working time /h	Estimate working time /h	p_t /%	Estimate remaining time /h	t_{work} /h
256	15.9289	16.0245	-0.5966	20.7961	36.8206
304	18.0089	18.0990	-0.4978	18.8811	36.9801
352	19.7422	19.8334	-0.4598	17.1080	36.9414
404	21.6055	21.7062	-0.4639	15.1519	36.8581
452	23.4588	23.5828	-0.5258	13.4316	37.0144
504	25.4088	25.5428	-0.5246	11.0626	36.6053
552	27.1555	27.3026	-0.5388	9.2898	36.5924
604	28.9900	29.1490	-0.5455	7.4261	36.5751
652	29.9233	30.1068	-0.6095	6.4579	36.5648
704	30.9344	31.1301	-0.6287	5.4157	36.5458
752	31.9455	32.0833	-0.4295	4.6430	36.7264
804	32.9566	33.1149	-0.4780	3.4201	36.5351
852	33.9000	34.0968	-0.5772	2.4674	36.5642
904	34.9255	35.1236	-0.5640	1.4359	36.5595
952	35.6322	35.8355	-0.5673	0.7073	36.5428
996	36.2678	36.4875	-0.6021	0.0328	36.5203
999	36.3111	36.5213	-0.5756	0	36.5213

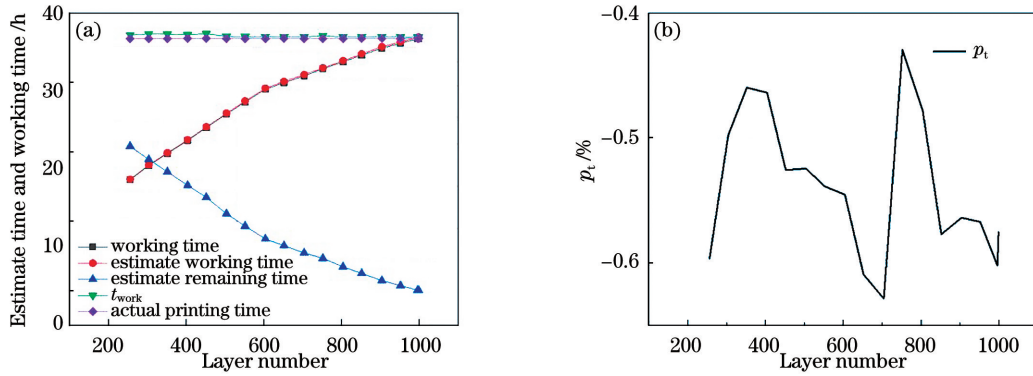


图5 实验结果。(a)打印任务的时间预估效果图;(b)打印时间预估偏差率变化情况

Fig. 5 Experimental results. (a) Time estimation effect diagram of printing task; (b) change of printing time estimation deviation rate

从表6和图5分析来看,可以得到如下结论:

1) 工作用时和工作用时预估的偏差率 p_t 始终在 $\pm 1\%$ 范围之间波动,检验了实时预估加工用时的有效性。

2) t_{work} 的预估值和实际打印总时间曲线非常接近,两者最大差值为 0.4931 h (37.0144~36.5213),最大偏差为 1.35% (0.4931/36.5213 $\times 100\%$)。从图5可以看出,随着打印工作的进行, t_{work} 的预估值和实际打印总时间的拟合效果越好,验证了整体打印时间预估上的准确性。

3) 对于剩余时间的预估是设备最大的现实需求,本实验中预估剩余时间是由 t_{work} 和工作时间预估间接求得(预估剩余时间 = t_{work} - 工作用时预估),从实验数据可以得到:剩余时间在接近工作结束的过程中,其数值越来越准确。从设备的加工现实用途来看,这样的预估效果极具实用性,可以给设备安排后的处理工作带来更好的便利性。

从整个实验来看,扫描系统时间预估的偏差率高于加工任务时间预估的偏差率。根据(1)~(13)式,加工任务的偏差率 p_t 计算公式为

$$p_t = \frac{\Delta t_{\text{mall}} + \Delta t_{\text{wall}}}{t_{\text{work}}} \cdot 100\%, \quad (16)$$

式中: Δt_{mall} 表示铺粉模块运动时间预估和实际运动时间的总偏差; Δt_{wall} 表示铺粉模块等待时间总偏差。

通过上述实验可以得到以下结论:扫描系统时间预估的偏差率高于加工任务时间预估的偏差率。主要原因是加工任务偏差来源于铺粉模块偏差和扫描系统的偏差之和,实验中由于铺粉模块较高的准确性,总体的时间预估具有更高的准确度。

4 结 论

激光选区熔化多振镜系统的打印时间预估算法可以较为准确地预估设备的加工运行时间,经实验验证可以得到以下结论:

1) 激光选区熔化多振镜系统的打印时间预估算法的偏差主要来自扫描系统的时间预估部分,这由于振镜的控制参数较多、振镜运动系统误差和振镜负责打印图像面积和曲线数都对时间预估有一定的影响。激光选区熔化多振镜系统的打印时间预估偏差在振镜扫描任务量增大时就会有一定的累积,从而导致预估时间偏差率在一定小范围内变化。

2) 通过实时优化校正比例系数 β ,扫描系统预估时间始终保持在较高的准确度。铺粉模块在工艺参数和运动逻辑确定之后将稳定的运行,可以较好的保持一致性。在实验中,通过每个计时单元的铺粉模块的算数平均数来进一步提高时间预估精度,铺粉模块可以达到以秒为精度的零误差。

3) 经过实验验证可知,加工时间预估算法可以精确预估激光选区熔化设备的加工时间,准确度达到 95% 以上,偏差率小于 $\pm 1\%$ 。经实验验证,激光选区熔化设备控制系统的加工时间预估算法可以适应现有的设备,并且可以得到比较理想的效果。

4) 由于曲线数量对扫描系统打印时间有比较大的影响,在未来研究中,扫描系统打印时间预估将成为优化激光选区熔化扫描路径的一个重要评价指标。

参 考 文 献

- [1] Yang Y Q, Wei H M. Present situation and development of laser additive manufacturing

- equipment[J]. *Electric Welding Machine*, 2021, 51(1): 17-22, 119.
- 杨永强, 魏宏鸣. 激光增材制造设备现状及发展[J]. *电焊机*, 2021, 51(1): 17-22, 119.
- [2] Jiang H Y, Lin W K, Wu S B, et al. Application status and development trend of laser selective melting technology[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2019(5): 223-226.
- 姜海燕, 林卫凯, 吴世彪, 等. 激光选区熔化技术的应用现状及发展趋势[J]. *机械工程与自动化*, 2019(5): 223-226.
- [3] Wang Z G, Ma F, Chen S B. A gas circulation purification continuity of operation equipment for laser selective melting makes: CN108115130A [P]. 2018-06-05.
- 王志国, 马凤, 陈少博. 用于激光选区熔化制造的气体循环净化连续作业设备: CN108115130A [P]. 2018-06-05.
- [4] Zhang Y. Research on quality monitoring of selective laser melting process based on machine vision[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2020.
- 张勇. 基于机器视觉的选区激光熔化成型质量监测的研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2020.
- [5] Barnes A H, Vanessa V, Shepherd M A. Temperature control in additive manufacturing systems: CN112020417A [P]. 2020-12-01.
- 巴恩斯, 维尔兹韦维尔特, 谢普尔德. 增材制造系统中的温度控制: CN112020417A [P]. 2020-12-01.
- [6] Guo Y, Long X H, Liu M, et al. Research status of metal powder for powder bed melting additive manufacturing[J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2021, 30(1): 6-10.
- 郭瑜, 龙学湖, 刘敏, 等. 粉末床熔融增材制造用金属粉末的研究现状[J]. *中国建材科技*, 2021, 30(1): 6-10.
- [7] Zhang Z L, Song M, Hou J Y. Research status of metal materials for additive manufacturing[J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2021, 30(1): 1-5.
- 张忠伦, 宋旻, 侯建业. 增材制造用金属材料的研究现状[J]. *中国建材科技*, 2021, 30(1): 1-5.
- [8] Hu Z H, Song C H, Liu L Q, et al. Research progress of selective laser melting of nitinol [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1202005.
- 胡泽华, 宋长辉, 刘林青, 等. 镍钛合金激光选区熔化成形技术研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1202005.
- [9] Zhao Y, Song Z M, Jin J B, et al. Electrochemical corrosion properties of Ti-5%TiN composites formed by selective laser melting in Hank's solution [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0902005.
- 赵宇, 宋振明, 金剑波, 等. 激光选区熔化成形 Ti-5%TiN 复合材料在 Hank 溶液中的电化学腐蚀性能[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0902005.
- [10] Duan S Q, Liu T T, Liao W H, et al. Research on forming quality of overhanging round hole by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0402007.
- 段声勤, 刘婷婷, 廖文和, 等. 悬垂圆孔激光选区熔化成形质量研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0402007.
- [11] TCT Asia 2020 Design-manufacturing integration innovation event [J]. *Maschinen Markt*, 2020(1): 47.
- TCT Asia 2020 设计-制造一体化的革新盛会[J]. *现代制造*, 2020(1): 47.
- [12] Lindemann C, Jahnke U, Moi M, et al. Analyzing product lifecycle costs for a better understanding of cost drivers in additive manufacturing [C] // In 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium proceedings, August 8, 2012, Austin, TX, USA. Austin: University of Texas At Austin, 2012: 177-188.
- [13] Kopf R, Gottwald J, Jacob A, et al. Cost-oriented planning of equipment for selective laser melting (SLM) in production lines[J]. *CIRP Annals*, 2018, 67(1): 471-474.
- [14] Baumers M, Tuck C, Wildman R, et al. Combined build-time, energy consumption and cost estimation for direct metal laser sintering [C] // In 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium proceedings, August 8, 2012, Austin, TX, USA. Austin: University of Texas At Austin, 2012: 932-944.
- [15] Zhou T R, Xu C H, Zhang Y, et al. The modifying and information distilling of the STL slice before outputting CLI [J]. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)*, 2007, 29(4): 364-367.
- 周天瑞, 徐春晖, 张永, 等. STL 模型切片输出 CLI 前的修补和信息提取[J]. *南昌大学学报(工科版)*, 2007, 29(4): 364-367.
- [16] Wang W Y, Lu Y, Chen Q S, et al. Design and implementation XY2-100 galvanometer control protocol conversion board [J]. *Automation & Instrumentation*, 2014(12): 147-148, 151.
- 王文毅, 吕勇, 陈青山, 等. 基于 XY2-100 协议的振镜控制转换板的设计与实现[J]. *自动化与仪器仪表*, 2014(12): 147-148, 151.
- [17] Dong W J. Fiber laser marking technology and experimental research[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.

- 董婉佳. 光纤激光打标技术与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [18] Lu J. Composition principle of fiber laser marking machine and application[J]. *Laser Journal*, 2013, 34(2): 41-42.
卢杰. 光纤激光打标机的组成原理及其应用[J]. *激光杂志*, 2013, 34(2): 41-42.
- [19] Zhang Y H, Lu Y. Research on the principle of laser marking and development [J]. *Automation & Instrumentation*, 2014(5): 33-34, 37.
张玉华, 陆茵. 关于激光打标的原理及发展的研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2014(5): 33-34, 37.
- [20] Li Y G. 3D printing method based on multiple galvanometers: CN111070685A[P]. 2020-04-28.
李永刚. 一种基于多振镜的 3D 打印方法: CN111070685A[P]. 2020-04-28.
- [21] Chen H Q, Liu X Y, Pan L M, et al. Multi-galvanometer scanning control method, device, computer device and storage medium: CN108790180B [P]. 2018-11-13.
陈虎清, 刘鑫炎, 潘良明, 等. 多振镜扫描控制方法、装置、计算机设备和存储介质: CN108790180B [P]. 2018-11-13.
- [22] Dong Y. Accuracy analysis and error compensation of beam direction control system based on scanning galvanometer[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
董洋. 基于扫描振镜的光束指向控制系统精度分析与误差补偿[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [23] Wang T, Yang S M, Li S S, et al. Error analysis and compensation of galvanometer laser scanning measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2315001.
王腾, 杨树明, 李述胜, 等. 振镜激光扫描测量系统误差分析与补偿[J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2315001.
- [24] Xu Y P, Tao X H. Effect of scanner's structure on accuracy and speed[J]. *Applied Laser*, 1998, 18(4): 169-170.
许亚平, 陶霞虹. 振镜结构对精度和速度的影响[J]. *应用激光*, 1998, 18(4): 169-170.
- [25] Chen G, Yuan C, Tian K H. Large-format multi-galvanometer laser device: CN110026679A [P]. 2019-07-19.
陈刚, 袁聪, 田凯华. 一种大幅面多振镜激光设备: CN110026679A[P]. 2019-07-19.
- [26] Song C H, Wang A M, Yang Y Q, et al. Mobile hopper type bidirectional powder spreading device of selective laser melting (SLM) equipment: CN206104881U[P]. 2017-04-19.
宋长辉, 王安民, 杨永强, 等. 一种激光选区熔化 SLM 设备移动料斗式双向铺粉装置: CN206104881U [P]. 2017-04-19.
- [27] Hu X Q. Selective laser melting single-knife two-way powder laying device and selective laser melting equipment: CN105921748A[P]. 2016-09-07.
胡小全. 激光选区熔化单刀双向铺粉装置及激光选区熔化设备: CN105921748A[P]. 2016-09-07.
- [28] Qiang X H. Research on scanning path optimization algorithm for laser selective melting [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
强旭辉. 面向激光选区熔化的扫描路径优化算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [29] Ma Q. Study on the path planning technology of selective double-laser melting [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
马奇. 双光源选区激光熔化路径规划技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [30] Deng S S, Yang Y Q, Li Y, et al. Planning of area-partition scanning path and its effect on residual stress of SLM molding parts[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1202003.
邓诗诗, 杨永强, 李阳, 等. 分区扫描路径规划及其对 SLM 成型件残余应力分布的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1202003.
- [31] Ge Y N, Wu M P, Mao Y Y, et al. Effect of scanning strategy on forming precision of titanium alloy by selective laser melting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091403.
葛亚楠, 武美萍, 冒浴沂, 等. 激光选区熔化扫描策略对钛合金成形精度的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 091403.

Printing-Time-Estimation Algorithm for Selective Laser Melting Multi-Galvanometer System

Weng Fengqiang, Yang Yongqiang*, Chen Xin, Li Yang

School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China

Abstract

Objective Selective laser melting (SLM) technology is one of the most important manufacturing methods for laser powder bed fusion (LPBF). SLM technology is based on the layer-by-layer manufacturing process. Even with the wide application of SLM technology, its working time cost has remained a crucial scientific problem in this technical field. The working time of SLM additive manufacturing equipment is becoming increasingly important in production applications. Predicting the working time of additive manufacturing equipment has great practical significance in the operation and maintenance of the whole equipment and cost control.

This study provides an accurate algorithm and calculation method for predicting the printing time of the multilaser SLM system.

Methods The algorithm is based on the basic working principle of powder-laying SLM equipment. We employed the software control system of the multi-galvanometer SLM equipment to program and integrate the algorithm into the equipment control system. First, the algorithm calculated the theoretical printing time of the scanning system of the SLM equipment using the model diagram and process parameters and then obtained the real-time operation time of the powder-laying module of each time unit using the equipment control system in the printing process. The average number of powder-laying modules in the time unit was used to improve the time-prediction accuracy of the powder-laying module in each time unit. Adjusting the correction parameters in real-time was conducted using the difference between the actual operation time and the time-prediction value of the scanning system of the SLM equipment. By accumulating the working time of each layer of the equipment, a more accurate prediction of the manufacturing molding time was obtained. The practicability of the algorithm was verified using the existing dual-galvanometer SLM equipment. The experimental prototype was DiMetal-450, developed independently by Laseradd Technology (Guangzhou) Co Ltd, with loading CLI file data and setting reasonable path planning. The scanning system can realize the printing of a dual-galvanometer laser with the same size of 425 mm × 425 mm × 450 mm, and the powder-laying module can realize one- and two-way powder-laying forms. The experiment adopted dual-galvanometer laser printing in the same plane and one-way powder-laying for sample printing. To facilitate the verification, the sample adopted the unsupported entity graphics and the practicability of the algorithm was verified by measuring the deviation rate between the actual working and predicted working times.

Results and Discussions After verifying the algorithm via experiment, the following conclusions are obtained. First, from Table 4, the prediction error of the timing unit time of the powder-paving module can be ignored, indicating that after the motion logic of the powder-paving module is determined, the motion time in the timing unit will be relatively stable and the error of the running time for each timing unit is small. Second, from the analysis of Fig. 4 and Table 5, there is a relatively large error between the theoretical prediction and actual printing times in the scanning system. The deviation rate of the estimated time for the scanning system after β -corrections remain $<5\%$, thereby effectively curbing error accumulations and maintaining the time-prediction accuracy of the scanning system at $>95\%$. It shows that the method of β -correction is reasonable and effective. Third, the correction coefficient β decreases slowly with an increase in printing layers, indicating that the error accumulation of both the actual printing and theoretical prediction times of the scanning system increases with an increase in printing layers. Fourth, single-layer printing time decreases with a decrease in the area of the printing graphics. From the theoretical calculation of the scanning system, the number of curves determines the length of printing time. Fifth, from the analysis of Table 6 and Fig. 5, the deviation rate of the actual and predicted working times fluctuates between $\pm 1\%$, verifying the effectiveness of real-time prediction of machining time. Finally, from Fig. 5, with the printing work, the fitting effect of the predicted and the actual total printing times is better, verifying the accuracy of the overall printing time prediction.

Conclusions The processing-time-prediction algorithm of the SLM equipment control system can adapt to the existing equipment and can get ideal results. This algorithm provides an effective time-prediction method for the SLM control system, which helps enterprises plan production tasks reasonably, predict printing costs, and optimize the control system. It promotes a chain of continuous development of SLM equipment and control systems. Because the number of curves greatly influences the printing time of the scanning system, the prediction of the printing time of the scanning system will become an important evaluation index for optimizing the scanning path of SLM in future research.

Key words laser technique; selective laser melting; time estimation; control system; multi-galvanometer; algorithm

OCIS codes 350.3390; 350.3850; 220.4610