

激光金属沉积成形的扫描方式*

卞宏友^{1,2} 刘伟军¹ 王天然¹ 尚晓峰¹ 张凯^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所先进制造技术实验室 沈阳 110016;

2. 中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 扫描方式是激光金属沉积成形(Laser metal deposition shaping, LMDS)制造过程中的关键技术, 在分析现有扫描方式及其对成形质量和成形效率影响的基础上, 指出现有扫描方式的缺陷, 并提出一种基于层面轮廓优化单调区分解的分区平行扫描方式。该方式基于极值顶点可见性原理, 对分层后的断面轮廓进行去除内环、非单调多边形的单调剖分等处理, 可最大限度地减少分区数量, 获得若干个单调子区域。针对各单调子区域采用适应性变间距平行路径填充, 可减小扫描线的长度, 并保证均匀致密性填充。试验表明这种扫描方式能够提高成形效率和成形质量。

关键词: 激光金属沉积成形 顶点可见性 单调区 分区平行扫描

中图分类号: TP391

0 前言

快速成形技术是一种基于材料累加思想的新型制造技术, 它可以实现直接从 CAD 模型到三维实体模型或零件的制作, 而不需要任何刀具、夹具, 目前在工业、医疗等领域已得到了广泛应用。在快速成形诸多工艺方法中, 金属零件的激光快速制造技术由于可直接制造出致密金属零件, 被认为是最有发展前途的方法之一, 正在成为目前国内外研究的热点。中国科学院沈阳自动化研究所开展的激光金属沉积成形技术(Laser metal deposition shaping, LMDS)研究, 就是利用高功率激光束、基于材料累加思想、以金属粉末为原料直接熔覆成形金属零件的激光快速制造技术^[1], 成形原理如图 1 所示。

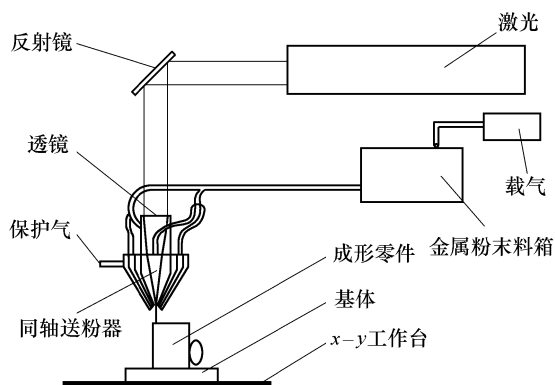


图 1 LMDS 成形原理图

同其他大多数快速成形工艺如光固化成形(Stereolithography apparatus, SLA)、熔融沉积制造(Fused deposition modeling, FDM)、选择性激光烧结(Selective laser sintering, SLS)等工艺一样, 扫描路径规划问题也是 LMDS 工艺所必须的环节, 它直接关系到成形效率和成形质量, 一直是人们研究的热点。

对上述成形工艺而言, 扫描路径的生成本质上就是根据分层得到的截面轮廓数据, 完成对其内部的填充, 但由于成形工艺的不同, 扫描方式也有所不同。现有的扫描方式主要有光栅扫描、平行扫描和环形扫描^[1-4], 对于 LMDS 工艺而言, 由于是边送粉边扫描熔覆一次成形, 单层内扫描线不能重复或相交扫描熔覆, 因此, 可采用平行扫描和环形扫描。由于环形扫描路径生成十分复杂, 特别是对于孔洞和凹槽区域较多的零件, 有时甚至无法实现^[2]。相比之下, 平行扫描轨迹的生成相对简单, 实际中常常被采用。文献[1~4]提出了可避开孔洞和凹槽的平行扫描方式, 但利用其生成的平行扫描路径在 LMDS 系统中进行实际扫描时, 在内外环极值点处常常出现局部凸起的过熔覆现象或局部沟壑的欠熔覆现象, 这严重影响边界成形精度和成形质量, 甚至直接影响后续成形加工的顺利进行, 故需进一步研究激光金属沉积成形的扫描方式。

1 现有平行扫描方式及其特点

这里将文献[1~4]提出的平行扫描方式统一称为分组平行扫描, 这种扫描方式的实现可分为层面的内外边界扫描和内部平行填充扫描。

* 国家 863 高科技(2001AA421160)和辽宁省自然科学基金(L050210)资助项目。20051220 收到初稿, 20060512 收到修改稿

目前内部平行填充扫描线的获取方法是:在 y 值最小的极小值点和最大的极大值点之间,按照设定的扫描间距布置扫描线和断面轮廓多边形求交,将每条扫描线上的交点排序并组合成填充线。实际扫描时,由于 LMDS 系统是边送粉边扫描熔覆,扫描线经过之处都会均匀送粉,在内外环的极值点处常常会出现不等间距扫描(图2),当相邻扫描线间距变小会造成扫描线间搭接率过大而出现重复熔覆现象,相反,当相邻扫描线间距变大会造成扫描线间搭接率过小而出现欠熔覆现象;另外分组扫描1(图2a)中当某一组内相邻填充扫描线长度突变时,它们之间的过渡扫描线处也会出现扫描线间距变小而导致重复熔覆现象;试验表明重复熔覆会导致层面凸起,而欠熔覆则会导致出现沟壑缺陷,无论重复熔覆或欠熔覆现象都会严重影响成形质量,故针对 LMDS 成形系统的路径规划应避免此现象的发生。

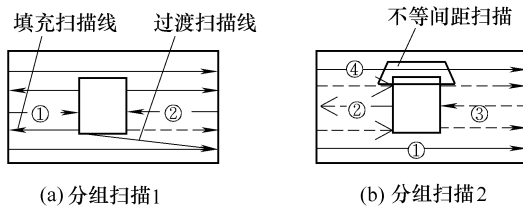


图2 分组扫描示意图

内部填充扫描线通常需要进行分组,以此来形成若干个可连续扫描的子区域,目前分组方法可分为两种:①当激光扫至边界即回折反向填充同一区域,由此将扫描线分组^[1-3](图2a)。②根据扫描线上填充线段的段数变化与否来分组^[4](图2b)。相比前者形成的分区数量较少,但两者都没有进行针对减少子区域数量的优化划分。实际扫描时,不同子区域间需要空跳动作,空跳距离的长短直接关系到成形效率高低,且空跳次数的多少决定了激光器的开关次数,直接影响成形系统的稳定性和激光器的使用寿命。因此,如何合理而最大限度地减少扫描轨迹中的空跳动作次数和空跳距离是一个主要问题。

分组平行扫描又可分为沿长边扫描和沿短边扫描,试验表明沿长边扫描的层面翘曲变形更大,沿短边扫描相邻扫描线间的相互浸润性好,成形效果好;而单纯的优选方向沿短边扫描,又会造成同一方向层间变形的累积,导致翘曲变形增大,通常采用层间变向的扫描方式,但这又会出现短边扫描和长边扫描交替的情况。此时,扫描填充路径规划需要考虑:如何在扫描方向确定情况下,使扫描线相对变短来减小翘曲变形。

鉴于此,提出一种基于断面轮廓优化单调分区的平行扫描路径生成算法,基本思想是首先基于极值点可见性原理将层面轮廓优化分解成若干个单调子区域,最大限度地减少分区数量;然后针对各个子区域内部采用适应性扫描间距的平行路径填充。

2 分区平行扫描方式研究

2.1 基本概念

由分层得到的断面轮廓是由若干封闭的外环和内环多边形组成,另外每个多边形的复杂程度不定,可能是凸多边形或凹多边形。每个外轮廓和其所属内环形成一个独立轮廓组。

首先给出几个定义,为便于讨论,假设扫描方向平行于 x 轴,对于任意扫描方向,可通过坐标变换使其平行于 x 轴。

定义1 极值点:如 $P(x_i, y_i)$ 点为极值点,其判别条件为

$$y_{i-1} - y_i \geq 0 \quad y_{i+1} - y_i \geq 0 \quad (1)$$

$$y_{i-1} - y_i \leq 0 \quad y_{i+1} - y_i \leq 0 \quad (2)$$

式中 y_{i+1} 和 y_{i-1} 分别为 P_i 点的前后相邻点的纵坐标值。满足式(1)者为极小值点,满足式(2)者为极大值点。式(1)与式(2)中不能同时取等号,若式(1)与式(2)中各式都不取等号,则将该极值点称为平凡极值点,否则为非平凡极值点;一对非平凡极值点相当于一个平凡极值点。另外根据其凸凹性分别称为凸(凹)极大(小)值点^[5]。

定义2 连接点:当用水平扫描线从下向上扫过,连接点处将原有的两个区域合并为一个区域。其中外环的凹极大值点,内环的凸极大值点为连接点。

定义3 分离点:当用水平扫描线从下向上扫过,分离点将原有的一个区域分割为两个区域。其中外环的凹极小值点,内环的凸极小值点为分离点。

定义4 单调多边形:如果任意水平线穿越一个多边形,有效交点最多只有两个时(当多边形上的水平边的两个端点与水平线重合时,只记其中一点),则称该多边形为单调多边形。单调多边形一定不含连接点和分离点。

根据上述定义,给出如下几个定理(如图3所示)。

定理1 对于一个非单调多边形,如果有且仅有一个连接点或分离点,则过该点引一条直线,可将该非单调多边形分割为两个单调多边形。

定理2 在消除分离点时,应保证插入边的另

一端点比相应的分离点低,在消除连接点时,应保证插入边的另一端点比相应的连接点高,这样即可将原分离点和连接点类型的顶点改变为普通顶点。

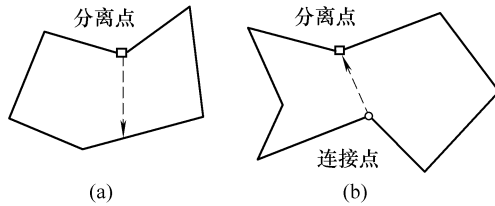


图 3 连接点和分离点的消除

定理 3 对于一个非单调多边形,假设它只包含一个连接点和一个分离点,如果分离点的 y 值大于连接点的 y 值,且这两点在内多边形内彼此可见,则这两点连线将原多边形分割为两个单调多边形。

2.2 分区平行扫描路径的生成算法

由于独立轮廓组的内外环之间构成一个待填充的连通子区域,分区平行扫描就是以此为断面轮廓的基本单位来进行扫描路径规划的,因此分区平行扫描路径的生成过程如下。

(1) 先找出断面的所有独立轮廓组^[6],在此基础上再进行单调区的划分。

(2) 针对每个独立轮廓组区域,基于极值点可见性原理^[7-8],先通过去除内环将平面区域分割成若干简单多边形子区域,然后再将非单调简单多边形分割成若干单调多边形子区域。

(3) 对各个单调多边形子区域采用适应性扫描间距进行平行扫描路径规划。

2.2.1 去除内环算法

对于包含由内环轮廓的独立轮廓组,要将此类平面区域转化为单调多边形子区域,就是要在区域内的分离点和连接点处通过插入适当的边,从而消除这些点。由于内轮廓上的最大 y 值点和最小 y 值点必为连接点和分离点,而它们的数量要远少于平面区域内连接点和分离点的数量。为此,提出两步走的单调分区算法,先通过去除内环将平面区域分割成若干简单多边形子区域,然后再将非单调简单多边形分割成若干单调多边形子区域。

为使断面的分区数减到最少,应使一个分区轮廓上包含尽可能多的端点为原平面图形的连接点和分离点的直割线。因此,提出基于顶点可见性原理,以内环最大 y 值点和最小 y 值点为视点选择可见连接点的去除内环算法,如图 4 所示。该算法具体步骤如下所述。

(1) 找出所有内环多边形的 y 方向的最大值点 (y_{\max}) 和最小值点 (y_{\min}), 对应分别存储在最大值点数组和最小值点数组中,并按各点 y 值由小到大的

顺序统一存储在极值点数组中;同时找到外环多边形的连接点和分离点,按各点 x 值由小到大的顺序,分别存放在一个分离点数组和一个连接点数组中,并给各点加标识。

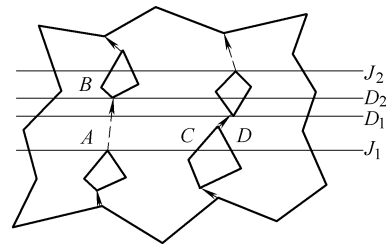


图 4 去除内环示意图

(2) 取出水平线 J_1 以下的 x 值最小的 y_{\min} 点作视点,并依次取外环分离点数组中 y 值小于视点 y 值的分离点作为待选可见点进行可见性判断,如存在可见点,找到第一个可见点作为连接点;否则,以该点为一端点向下发出垂直割线与外环多边形求交,并取最近交点作为连接点;然后找到该 y_{\min} 点所在内环上的 y_{\max} 点作视点。

(3) 判断该视点以上是否存在 y_{\min} 点,如存在 y_{\min} 点,则找到相邻的 y_{\min} 点确定水平线 D_1 ,并取该 y_{\min} 点以上相邻的 y_{\max} 点确定水平线 J_2 ,转步骤(4);否则,转步骤(6)。

(4) 这两条水平线 D_1 和 J_2 之间的 y_{\min} 点并按各点 x 值由小到大排列形成待选可见点数组,然后依次取待选可见点数组中的 y_{\min} 点进行可见性判断,如存在可见点,则找到第一个可见点作为连接点,然后找到该可见 y_{\min} 点所在内环上的 y_{\max} 点作视点,转步骤(3);否则,转步骤(5)。

(5) 以该视点为一端点向上发出垂直割线与外环和其他内环多边形求交,并取最近交点作为连接点,如连接点在内环上,则找到该内环上的 y_{\max} 点作视点,转步骤(3);否则,转步骤(7)。

(6) 依次取外环连接点数组中的 y 值大于视点 y 值的连接点作为待选可见点进行可见性判断,如存在可见点,找到第一个可见点作为连接点;否则,以该点为一端点向上发出垂直割线与外环多边形求交,并取最近交点作为连接点。

(7) 将原外环分割为左右两个外环多边形,各点标识不变,判断是否还有未去除的内环,并将其归入对应的外环多边形中。对于包含内环的外环多边形返回步骤(1)继续去除内环,并且首先处理左外环多边形,这样所得简单多边形从左到右依次排列,便于后续处理,直到所有内环均被去除。

上述顶点对之间可见性判断方法与下节所述的

多边形顶点可见性判断算法同理,只是当过两点的水平线与内环相交时(如图4所示), A 和 B 两点作可见性判断,过连接点 A 的水平线与其他内环存在右交点 C 和 D ,此时候选区内存在内环上的待判定点,增加判断这些点与分割线 AB 位置关系的判定。判定规则是右交点之间的各待判定点不在分割线 AB 左侧,左交点之间的各待判定点不在分割线 AB 右侧,则分割线 AB 的两端点 A 和 B 可见。

2.2.2 单调剖分算法

断面轮廓图形去除内环形成若干个简单多边形分区图形。针对每个简单多边形,判断是否还存在分离点或连接点,如存在分离点或连接点,则该简单多边形为非单调多边形,需要进行单调剖分,此时如果同时存在分离点和连接点,结合定理2,判断它们之间是否存在可见点对,如存在一对可见点,则可以形成一条以这两点为端点的直割线,并由定理3可知,该直割线可将原图形分割为两个仅在割线处相交的多边形,且同时消除了一个连接点和分离点,达到减少单调分区的目的。因此,提出基于简单多边形连接点和分离点可见性判断的单调剖分算法,如图5所示。该算法具体步骤如下所述。

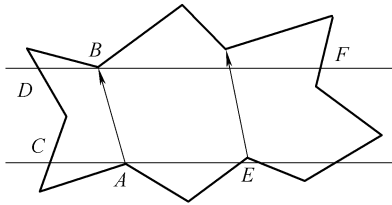


图5 简单多边形的单调剖分示意图

(1) 将简单多边形上的分离点和连接点找出来,按各点 x 值由小到大的顺序,分别存放在一个分离点数组和一个连接点数组中。

(2) 判断连接点和分离点数组中元素的个数,如两者都为零表示不存在连接点和分离点,则转到步骤(5);如只有一个为零,表示只存在分离点或只存在连接点,则转到步骤(4);如两者都不为零,表示同时存在分离点和连接点,则转到步骤(3)。

(3) 比较两个数组中元素个数的多少,以元素个数较少的数组为视点数组,另一数组为待选可见点数组,依次取视点数组中的各元素为视点,并结合定理2选择待选可见点数组的元素为待选可见点,进行可见性判断,如存在可见点对,则找到第一对可见点形成分割线,将原多边形剖分成左右两个多边形,针对每个多边形转到步骤(1);如不存在可见点对,则将这两组元素按各点 x 值由小到大的顺序统一存储在极值点数组中,转到步骤(4)。

(4) 从相应数组中取出第一个元素,以该点为

一端点,结合定理2向上或向下发出垂直割线与多边形各边求交点,并取最近交点作为连接点形成分割线,将原多边形剖分成左右两个多边形,针对每个多边形转到步骤(1)。

(5) 结束。

由上述内容可知,顶点对可见性判断是单调剖分的关键环节,提出了如下的顶点可见性判断算法。如图5所示,分别过连接点 A 和分离点 B 作水平线,与多边形边求交,可得最近左右交点(C 、 E 、 D 、 F),两水平线之间的实体内部区域称为候选区,候选区内的各点称为待判定点。该算法具体步骤如下所述。

(1) 判断左交点 C 、 D 之间是否存在凹点,如不存在凹点,则转步骤(2);否则,判断该凹点是否在有向分割线 AB 的左侧,如在左侧,则转步骤(2);否则转步骤(4)。

(2) 判断右交点 E 、 F 之间是否存在凹点,如不存在凹点,则转步骤(3);否则,判断该凹点是否在有向分割线 AB 的右侧,如在右侧,则转步骤(3);否则转步骤(4)。

(3) 顶点 A 、 B 可见,结束。

(4) 顶点 A 、 B 不可见,结束。

2.2.3 单调子区域适应性变间距的扫描填充矢量生成算法

为避免前文所述分组扫描中出现的不等间距扫描而导致重复熔覆或欠熔覆现象,提出适应性变间距填充方法,针对不同子区域采用适应性的扫描间距,保证均匀致密性填充扫描。该方法的实现步骤如下所述。

(1) 搜索单调多边形子区域的极值点。因为假设扫描线方向为水平方向,搜索单调多边形,得到 y 方向的最大值点和最小值点,同时求得该单调子区域 y 方向待扫描距离,将待扫描距离与设定的扫描间距的比值取整得到扫描线数,反过来,将待扫描距离与扫描线数的比值作为适应性的实际扫描间距。

(2) 搜索扫描线与单调多边形的交点。从最小值点处开始根据实际扫描间距布置扫描线与单调多边形求交,将求得交点存储在相应的扫描线链表中,同时在该扫描线链表的头结点的交点数加2。当遇到最大值点时,扫描线与单调多边形的交点数减少到零,此时扫描结束。

(3) 扫描填充矢量的生成。依次提取每条扫描线的两个交点的 x 坐标,与该扫描线的 y 坐标合成一个填充矢量。当处理第偶数条填充矢量时,应将矢量的起点和终点位置互换,倒置矢量的方向,从

而形成往复填充扫描。如果该区域是第一个单调多边形子区域时,按照 y 坐标值增加的顺序提取扫描线上的填充矢量;否则搜索该区中与上一相邻单调区最后一条扫描矢量终点最近的极值点,如果是极小值,则按照 y 坐标值增加的顺序提取扫描线上的填充矢量,如果是极大值,则按照 y 坐标值减小的顺序提取扫描线上的填充矢量。

(4) 补偿轮廓与内部填充矢量的连接。每个子区域的最后一条内部填充线与补偿轮廓求交点,将内部填充矢量与补偿轮廓连接起来;最后以 CLI 格式输出扫描路径文件。

2.3 分区平行扫描方式

为避免扫描线的收缩应力方向一致导致层间变形的累积,采用层间变向(即相邻层截面的扫描方向之间错开一个 α 角)的扫描方式,一般采用正交扫描,即 $\alpha=90^\circ$ 。因此,如果当前层前扫描线方向与 x 坐标轴成 α 角时,其内部填充路径规划步骤如下所述。

- (1) 将当前断面按顺时针方向旋转 α 角。
- (2) 按平行于 x 坐标轴的扫描方向规划扫描路径。
- (3) 将所得扫描路径反向旋转 α 角。

3 扫描路径生成实例与对比试验

为验证提出的分区平行扫描方式的有效性,选择了分区数量相对较少的分组扫描 1 与分区扫描在 LMDS 系统上进行了对比试验,并记录了单层扫描成形过程中分区扫描和分组扫描的若干测量值结果(如下表所示)。图 6 显示了两种扫描方式下某一层的扫描路径;图 7 显示了在其他工艺参数一致的情况下进行分区扫描和分组扫描的填充轨迹照片,其中分区扫描是先进行内部填充后扫描分区轮廓,而分组扫描是先扫描边界轮廓后进行内部填充。

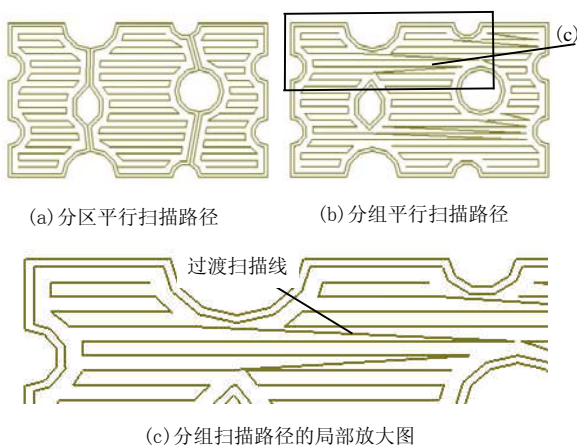


图 6 扫描路径生成实例

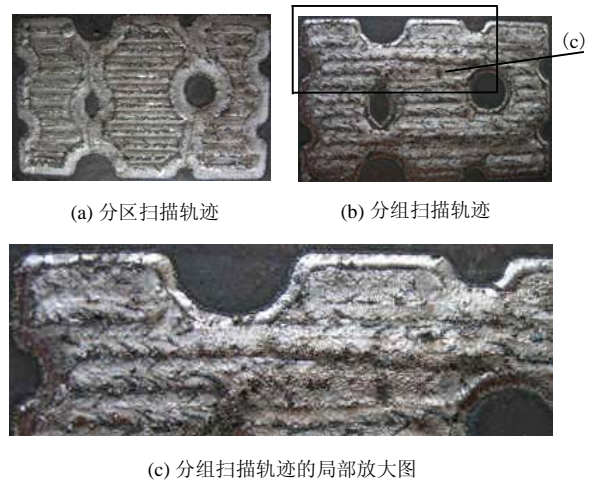


图 7 扫描轨迹照片

表 单层分组扫描与分区扫描若干测量值对比

| 扫描方式 | 扫描线总长 | 空跳线总长 | 光闸开关次数 |
|--------|-----------------|-----------------|--------------|
| | l_1/mm | l_2/mm | $N/\text{次}$ |
| 分区扫描 | 993.3 | 36.68 | 2 |
| 分组扫描 1 | 1 099.3 | 146.70 | 8 |

注:层厚 0.6 mm,扫描间距 1.3 mm,扫描速度 5 mm/s,激光功率 900 W,送粉量 4 g/min,成形材料为镍基金属粉末,断面尺寸 50 mm×30 mm。

4 结论

(1) 分区扫描与分组扫描相比,扫描线总长有所减少,空跳线总长明显大幅度减少,能够提高成形效率。

(2) 分区扫描与分组扫描相比,光闸开关次数大幅度减少,在 LMDS 成形系统中有电动式和气动式两种激光光闸,其中气动式光闸运动振动较大,并且两者都存在光闸灵敏度问题,激光光闸开关次数的减小有利于提高系统稳定性和零件成形精度。

(3) 分区扫描的适应性变间距填充方法避免了出现分组扫描中不等间距扫描,从根本上消除了局部重复熔覆或欠熔覆现象(图 7c),成形层面的扫描线间连接平滑稳定,并且分区后使扫描线相对变短,相邻扫描线间的相互浸润性好,能够实现均匀致密性扫描,有利于提高零件成形质量。

试验分析表明,分区平行扫描方式的提出和应用对提高 LMDS 制件的成形效率和成形质量具有积极意义,同样对其他快速成形工艺方法也有很高的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 尚晓峰. 金属粉末激光成形技术研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2005.
- [2] 赵吉宾. 紫外光固化快速成制造中的工艺规划方法研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2004.

- [3] 赵毅, 李占利, 卢秉恒. 激光快速成形中激光扫描路径的快速生成算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1998, 10(3): 260-265.
- [4] 史玉升, 钟庆, 陈学彬, 等. 选择性激光烧结新型扫描方式的研究及实现[J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 35-39.
- [5] 吴春福, 陆国栋, 张树有. 基于拓扑映射的多边形顶点凹凸判别算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(9): 810-814.
- [6] 刘斌, 肖跃加, 韩明, 等. 实体截面轮廓的内外边界的自动识别算法[J]. 华中理工大学学报, 1996, 24(10): 23-25.
- [7] SCHNEIDER P J, EBERLY D H. 计算机图形学几何工具算法详解. 周长发译. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [8] 孙家广. 计算机图形学. 第3版. 北京: 清华大学出版社, 1998.

SCANNING MODE FOR LASER METAL DEPOSITION SHAPING

BIAN Hongyou^{1,2} LIU Weijun¹ WANG Tianran¹
SHANG Xiaofeng¹ ZHANG Kai^{1,2}

(1. Laboratory of Advanced Manufacture
Technology, Shenyang Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;
2. Graduate University, Chinese Academy of
Sciences, Beijing 100039)

Abstract: The scanning mode is a key technology in the laser metal deposition shaping (LMDS) fabrication process. On the basis of analysis of the existing scanning mode and its influence on the fabrication efficiency and quality of the parts, some disadvantages of the existing scanning mode are pointed out. A kind of subarea-parallel scanning mode for LMDS basic on subdividing profiled outline into monotonous polygon subareas is presented. On the basis of the principle of extreme point visibility, inner loops are eliminated, and simple polygons are subdivided into monotonous polygons with the minimal zones. Parallel scanning paths with adaptive scan space of all monotonous polygon subareas are finished, which diminishes the length of scanning line, and ensures uniform and compact filling scan. Practical application shows that the scanning mode can enhance the fabrication efficiency and quality.

Key words: Laser metal deposition shaping Point visibility
Monotonous polygon Subarea-parallel scan

作者简介: 卞宏友, 男, 1975年出生, 博士研究生。研究方向为快速成形制造系统和计算机图形学。

E-mail: bhy@sia.cn