

激光沉积制造特征分区定义及识别方法研究

钦兰云, 张晶晶, 王伟, 杨光

(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, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 激光沉积制造技术在飞机框、梁类大型件增材制造方面具有独特的优势, 然而应力和变形成为阻碍该技术应用的瓶颈。因此分区工艺被广泛采用以离散制件的残余应力和缓解零件变形。然而, 传统分区工艺不考虑零件的几何结构特征易导致不规则的分区搭接, 从而引入气孔、熔合不良等缺陷。为了解决这一问题, 提出了一种特征分区方法, 根据典型框、梁结构件的片层结构几何形状特点, 将特征分为“十”字形、T 字形、L 形和“一”字形 4 类, 并对各类分区特征从形状、姿态和尺寸三方面进行限定, 完成分区特征定义。提出一种基于区域骨架线检测的特征识别算法, 利用骨架化算法有效简化特征并保留构型特性, 采用向量叉乘法、定比分点法对特征区域骨架线完成特征角、平面姿态角及特征分支数等相关参数计算。通过比较计算值和定义值实现特征类型识别。采用典型飞机框件模型的切片数据对算法进行了验证, 结果表明该算法能够快速而准确地识别各类特征, 实现零件自动特征分区, 为智能化增材制造技术打下基础。

关键词: 激光沉积制造; 特征分区; 特征定义; 特征识别

中图分类号: TG665

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)01-0148-11

激光沉积制造 (laser deposition manufacturing, LDM) 技术在航空航天、汽车和国防工业领域的快速发展, 有望大幅降低与制造零件相关的成本和浪费^[1]。然而, 在激光沉积制造大型整体构件的过程中由应力作用引发的变形问题^[2-7]依旧普遍存在。因此残余应力的缓解问题是目前激光沉积制造领域的首要问题, 而目前对于激光沉积过程中的应力离散方法主要有以下几种: 调节工艺参数^[8-12]、后处理^[13-14]、加设辅助外场^[15]、预热调控^[3,5,16]。与其余离散应力方法相比, 调节工艺参数更加便捷、成本低。

分区工艺是离散应力比较有效的手段, 诸多学者对该方法也展开了大量研究。Yu^[12]等人分别采用光栅、偏置和希尔伯特曲线对分区进行沉积扫描, 分析了沉积结束时温度场分布对称性和基板变形情况, 发现不同的扫描策略在 LDM 过程中所产生的残余应力和变形不同。Zhao^[17]等基于分区成形对 Fe-Cr-Ni-B 钢进行增材整体连接, 分析其组织性能发现利用该方法成形可以有效改善增材制造零件边缘处应力。Foroozmehr^[18]研究采用不同扫描方式时分区内激光沉积温度场和应力场分布, 结果表明不同扫描方式下沉积过程的热历程也不同, 从而使材料的性能也发生变化。Wan^[19]等对 Inconel 718 合金

分别采用双向扫描策略和连续切片层间扫描方向旋转 90° 的扫描策略进行选择激光熔融加工, 并研究成形件的晶粒生长机制发现热流方向会随激光扫描轨迹的旋转而旋转, 即可以通过不同的扫描策略对层间的热流方向进行控制。Wang^[20]等人利用 Ti-6Al-4V 验证了分区尺寸的大小和各分区之间跳跃策略对残余应力以及变形的影响, 发现小分区有助于降低构件的宏观变形, 提高成形质量, 并总结得到分区区域间激光跳跃策略应尽可能避免相邻数量。Liu^[21]等分别在单向光栅扫描模式和正交往复扫描模式下采用 Inconel 718 合金完成激光沉积制造, 对其微观结构和力学性能研究发现正交往复扫描模式下得到的晶粒尺寸更加均匀和更好延展性。Promopattum^[22]模拟了不同扫描长度的 Ti-6Al-4V 材料的增材制造, 得到扫描长度对平面内应力的各向异性有决定性影响。Woo 等^[23]研究了分区扫描策略对 LDM 制备功能梯度材料残余应力的影响。研究结果表明, 90° 旋转填充应力远小于无旋转填充时的应力。目前在激光沉积领域模型分区方法大多基于规则多边形分割, 虽然可以达到应力离散和减小变形的目的, 但在分区过程中由于未考虑零件几何构型特征, 会引入不规则的狭小或者带尖角分区^[24], 从而会因搭接不当导致过熔覆或者引入新的缺陷

收稿日期: 2023-01-12

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFE0122600); 国家自然科学基金 (51975387)

作者简介: 钦兰云, 女, 1977 年生, 博士, 教授, 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, 辽宁 沈阳 110136, 电话: 024-89723852, E-mail: qinly@sau.edu.cn

等问题^[25-26]。

鉴于此, 本研究针对激光沉积工艺提出一种新的分区方法—特征分区方法, 该方法根据待沉积制件切片数据几何构型特征进行分区。首先根据飞机典型框、梁结构片层模型的几何构型特点, 将相似形状进行分区归类 and 定义; 然后设计算法对切片特征分区进行识别。在此基础上将结构相似的同类型分区赋予相同的加工工艺, 即可实现大型构件 LDM 制造的工艺移植。而结构相似且制备工艺相同的分区其热应力分布必然相近, 因此特征分区方法对于 LDM 大型构件的快速仿真也将奠定坚实基础。

1 特征分类和定义

激光沉积制造的传统分区方法是利用矩形 (或其他规则多边形) 对零件切片层进行分区, 如图 1a 所示, 分区过程中不考虑片层数据的几何特征, 分区后会产生诸多狭小区域单元 (如图 1b 中箭头所指处)。狭小区域通常面积较小, 路径填充过程时易导致过熔覆且降低加工效率^[27], 将其舍弃又会造成直接的加工超差。分区算法即使经过优化合并了这些小区域单位, 但仍避免不了尖角区域 (如图 1c 箭头处所示)。

经统计分析发现, 典型的飞机框、梁构件含有大量的肋、筋条 (如图 2a 所示), 且二者相互交错, 激光沉积肋、筋交汇处时, 由于肋、筋数量不同导致散热条件和热累积状况各异, 从而使制件应力大小及方向也不相同。因此以肋、筋交汇为中心, 按照形成此中心的肋、筋数量的不同将不同区域分为 “十” 字形特征、T 形特征和 L 形特征。采用传统分区的最佳分区尺寸^[20], 对图 2b 所示零件切片中的上述 3 类特征划分后发现, 由于分区尺寸的影响, 上述 3 类特征中间还会产生 “一” 字形特征。因此将飞机框、梁片层结构初步分成了如下特征分区类型: “十” 字形特征、T 形特征、L 形特征以及 “一” 字形特征 (图 2c)。

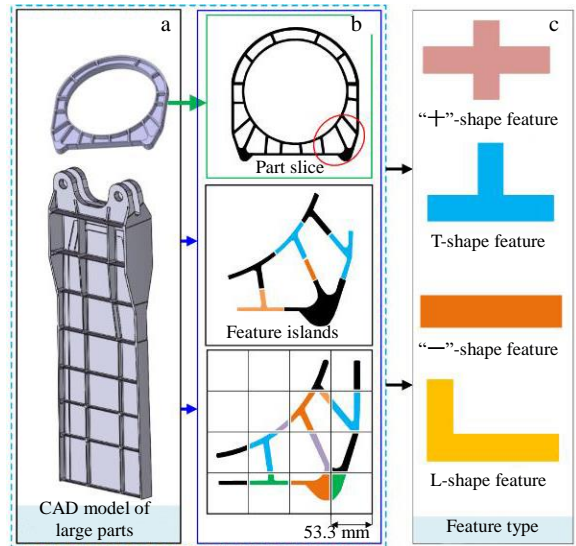


图 2 特征分类

Fig.2 Feature classification: (a) CAD model of aircraft frame and beam structural parts; (b) slice islands; (c) feature types

1.1 特征形状定义

飞机框、梁结构件中的各类特征的中心线 (骨架) 会交叉形成交点, 将其定义为特征交点 (图 3a 中 P 点), 在特征中从特征交点位置至分支端点 (图 3a 中 A、B、C、D 点) 的部分为特征分支, 按交叉分支走向将特征分支分为横向特征分支和纵向特征分支, 且将特征交点至分支端点之间的中心线长度值定义为特征分支长度 (图 3b 中 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4), 判断特征分支长度是否为零, 即可辨别特征分支是否存在。诸类特征中, L 形、T 字形、“一”字形特征均可视为 “十” 字形特征的特殊形式, 即利用特征分支数量确定特征形状。用特征分支长度分别对横向、纵向特征分支进行表达: 纵向特征分支集合 $Q_L=\{d|d \in (d_1,d_3)\}$, 横向特征分支集合 $Q_W=\{d|d \in (d_2,d_4)\}$, 利用特征分支集合 Q_L 、 Q_W 之间的逻辑运算表示各类特征分支的数量。

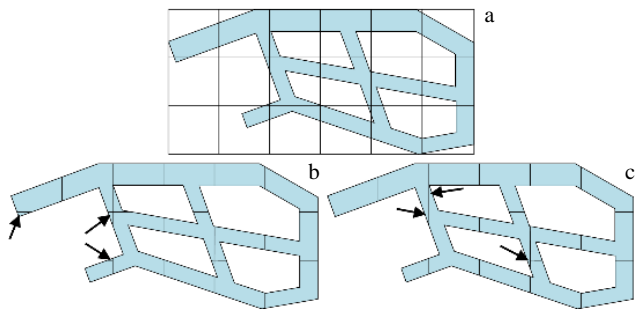


图 1 传统分区结果

Fig.1 Result of traditional islands: (a) separated rectangle slice contour; (b) clipped of area unit; (c) optimal islands

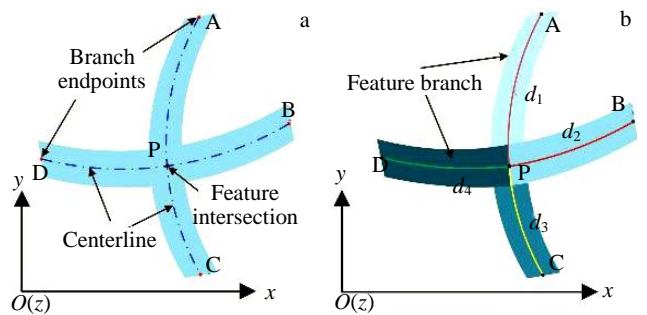


图 3 特征分支定义图

Fig.3 Feature branches definition diagram: (a) feature intersection; (b) feature branches

用 $\langle d_1, \dots, d_n \rangle = 0$, 表示 $\langle \rangle$ 符号中所含分支长度 d_1 至 d_n ($n \leq 4$) 均为 0; $\langle d_1, \dots, d_n \rangle \neq 0$, 表示 $\langle \rangle$ 符号中所含分支长度 d_1 至 d_n ($n \leq 4$) 均不为 0; $[d_1, \dots, d_n] = 0$, 表示 $[\]$ 符号中所含分支长度 d_1 至 d_n ($n \leq 4$) 中只有一个为 0。

基于特征分支长度 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 之间的逻辑运算将特征表示为 $X_{\text{Feature}} = \{(Q_L, Q_W)\}$, 其中 X 代表特征名称, 即 X 为“+”、T、L、“—”, Q_L 、 Q_W 为特征分支集合。针对 L 形的特征形状限定条件说明: 当 $d_1 = d_2 = 0$ ($\langle d_1, d_2 \rangle = 0$) 且 d_3, d_4 均不为 0 ($\langle d_3, d_4 \rangle \neq 0$) 时, 由 d_3, d_4 可构成 L 形特征, 同理, $d_2 = d_3 = 0$ ($\langle d_2, d_3 \rangle = 0$)、 $d_3 = d_4 = 0$ ($\langle d_3, d_4 \rangle = 0$)、 $d_4 = d_1 = 0$ ($\langle d_4, d_1 \rangle = 0$), 以上 3 种情况均可形成 L 形特征, 即 $L_{\text{Feature}} = \{(Q_L, Q_W) | [\langle d_1, d_2 \rangle, \langle d_2, d_3 \rangle, \langle d_3, d_4 \rangle, \langle d_4, d_1 \rangle] = 0\}$ 。同理对 T 字形特征、“+”字形特征、“—”字形特征均做出相应的定义, 具体定义如表 1 所示。

1.2 特征姿态限定

特征在切片层中会展现出不同姿态, 其中特征自身姿态是指横向和纵向特征分支形成的夹角, 将整个特征在切片层所处平面 (XOY 平面) 内呈现的不同角度定义为特征的平面姿态。为考虑特征分支的整体走向, 连接特征交点与分支端点形成特征的姿态辅助线。

对于特征的自身姿态, 用姿态辅助线 PA 与相邻的姿态辅助线 PB 的夹角进行限定, 记为特征角 α , 如图

4a 所示; 而对于特征所呈现的平面姿态, 利用姿态辅助线 PA 与切片层所处平面的 x 轴所形成的夹角来限制, 记为平面姿态角 β , 如图 4b 所示。

对于存在分支的 L 形、T 字形、“+”字形特征, 当特征角 α 过小或过大时, 各分支在特征中心处汇聚过密, 在激光沉积制造该特征时, 特征交点处的热累积严重, 会严重影响成形质量, 故将 L 形、T 字形以及“+”字形特征的特征角 α 的取值范围限定于 $\pi/6$ 至 $5\pi/6$ 之间, 即特征角 α 取值范围为: $\pi/6 \leq \alpha \leq 5\pi/6$ 。特征在切片层所属平面内的平面姿态不影响沉积制造, 所以特征在任何空间姿态下均可, 即平面姿态角 β 取值范围为: $0 \leq \beta \leq 2\pi$ 。而“—”字形特征不存在特征角, 且其平面姿态角 β 取值范围为: $0 \leq \beta \leq 2\pi$ 。

1.3 特征尺寸限定

特征分区的每个分区尺寸与应力的均匀离散息息相关, 在特征分区过程中, 影响分区大小的特征尺寸是特征分支在分区时的长度。在特征分区时, 为确定“+”字形、T 字形、L 形特征的特征分支长度, 利用已知待加工模型的实体宽度对特征进行特征尺寸限定。图 5a 中所示特征分支宽度不一致, 此类现象在诸多特征中均存在, 故需按图 5a 中所示, 从该分支与其余分支的交界位置开始, 沿此分支所在方向单向平均间隔 Δk 取一个实体宽度值 k_r , 在得到 10 个实体宽度 k_r 之后, 利用公式

表 1 特征形状定义

Table 1 Feature shape definition

Feature name (X)	Feature shape definition
L-shape feature	$L_{\text{Feature}} = \{(Q_L, Q_W) [\langle d_1, d_2 \rangle, \langle d_2, d_3 \rangle, \langle d_3, d_4 \rangle, \langle d_4, d_1 \rangle] = 0\}$
T-shape feature	$T_{\text{Feature}} = \{(Q_L, Q_W) [d_1, d_2, d_3, d_4] = 0\}$
“+”-shape feature	$“+”_{\text{Feature}} = \{(Q_L, Q_W) \langle d_1, d_2, d_3, d_4 \rangle \neq 0\}$
“—”-shape feature	$“—”_{\text{Feature}} = \{(Q_L, Q_W) [\langle d_1, d_3 \rangle, \langle d_2, d_4 \rangle] = 0\}$

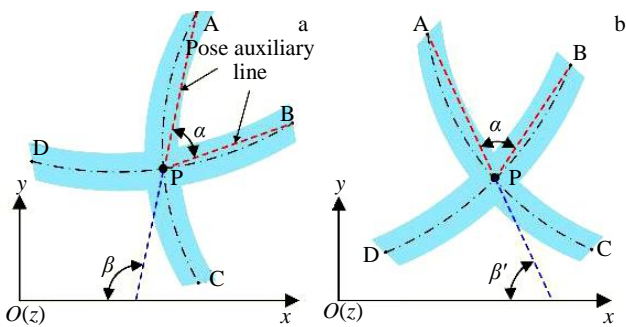


图 4 特征姿态定义示意图

Fig.4 Schematic diagram of feature definition: (a) angle α and (b) plane pose angle β

(1) 可取的该特征分支的平均宽度 k , 特征分支实体宽度为定值, 故 k 也为定值, 所以可利用特征分支的平均宽度 k 来确定特征分支 (d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4) 的长度, 计算关系如公式 (2) 所示。

$$k = \frac{\sum_{r=1}^{10} k_r}{10} \quad (1)$$

其中, k_r 为所取实体宽度, 其中 $r=1, 2, \dots, 10$ 。

$$d_n = \eta k \quad (2)$$

其中, η 是为获取特征分支长度所设系数, 最佳分区尺寸为 $53.3 \text{ mm}^{[20]}$, 且常规飞机框、梁结构件采用激光沉积制造时的宽度为 $10 \sim 20 \text{ mm}$, 可将 η 取值范围定为: $1 \leq \eta \leq 3$ 。

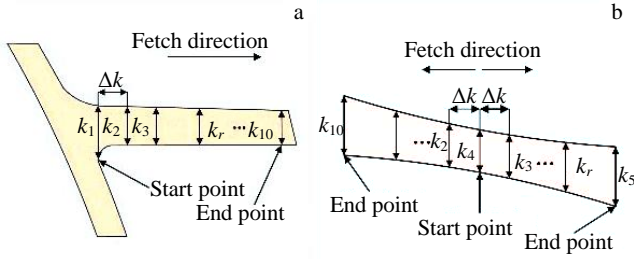


图 5 特征宽度 k 值的示意图

Fig.5 Schematic diagram of the value of feature width k : (a) feature “T” and (b) feature “-”

完成特征形状与特征姿态定义后, 存在一些 L 形、T 字形、“十”字形特征满足特征形状定义而不满足特征角度定义, 将此类特征划分为“一”字形特征, 但因存在特征分支, 所以按图 5a 所示取值方式对其特征尺寸进行限定。

“一”字形特征只有一条特征分支, 故只需依图 5b 中所示, 从“一”字形特征的任意位置开始, 向分支所在方向双向平均间隔 Δk 取一实体宽度 k_r , 同样利用 k_r 求得平均宽度 k 来限定“一”字形特征的尺寸。

2 特征识别算法

2.1 特征骨架提取

骨架是指保持原图像拓扑结构、连通性以及形状的诸多细小的中心线所形成的集合^[28-29]。本研究所提出的特征识别方法是基于图像的单像素骨架线进行的。经典的 Zhang 并行快速细化算法^[30]是从二值图像像素的角度

出发由外向内逐层遍历与迭代, 在遍历与迭代的过程中保证了骨架线的单像素性、连续性、拓扑性、平滑性等特点, 防止了所提取骨架线对特征识别过程产生误差或错误。

利用图 6a 中的流程进行骨架提取, 首先将图 6b 中的沉积件 CAD 模型完成切片, 再将图 6c 中的切片层按沉积方向依次转换为几何图像, 将保存的如图 6d 所示的几何图像依次输入程序进行二值化处理(以“1”黑色为前景, “0”白色为背景, 如图 6e)。随后由外向内逐层进行迭代, 直至遍历二值化后图像的每个像素点, 得到图 6f 所示的单像素骨架图。

将像素点作为坐标点进行遍历, 对所得骨架线进行连续性检测, 即判断骨架线上各像素点 8 邻域内是否均存在 2 个像素值为 1 点。如图 7a 所示的骨架线, 骨架线端点为骨架线起始或结束的像素点, 骨架线断点是指理论上存在而未检测到的像素点。当骨架线上某一像素点的 8 邻域内只有 1 个像素值为 1 的像素点时, 对该点在阈值为 3 的矩形区域内遍历, 若不存在其余 8 邻域内只有 1 个像素值为 1 的像素点, 则说明该点为骨架线端点(图 7b); 若存在, 则称这两点为断点(图 7c)并记录坐标。为保证骨架线的连续性, 在阈值范围内将断点进行单像素连接(图 7d)。

2.2 特征交点计算

2.2.1 特征分支规则化

在采用 HoughLinesP 函数对图 8a 中的 S 梁骨架检测时发现: 由首尾相连的直线组成的特征分支在直线检测时, 所有直线储存毫无规则且只储存两 endpoints。此现象导致在进行求交运算时, 同一特征分支中各直线也会产生

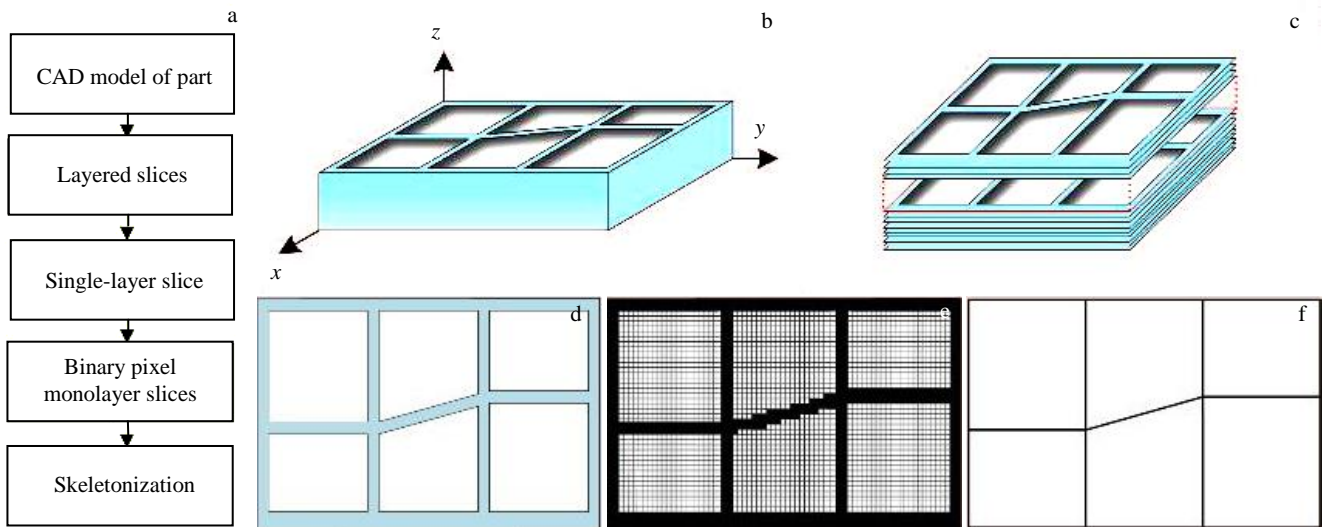


图 6 激光沉积零件骨架提取

Fig.6 Directed energy deposition (DED) part skeleton extraction: (a) skeleton extraction process; (b) CAD model of part; (c) part slice; (d) single slice; (e) single slice pixel binarization; (f) single slice skeletonization result

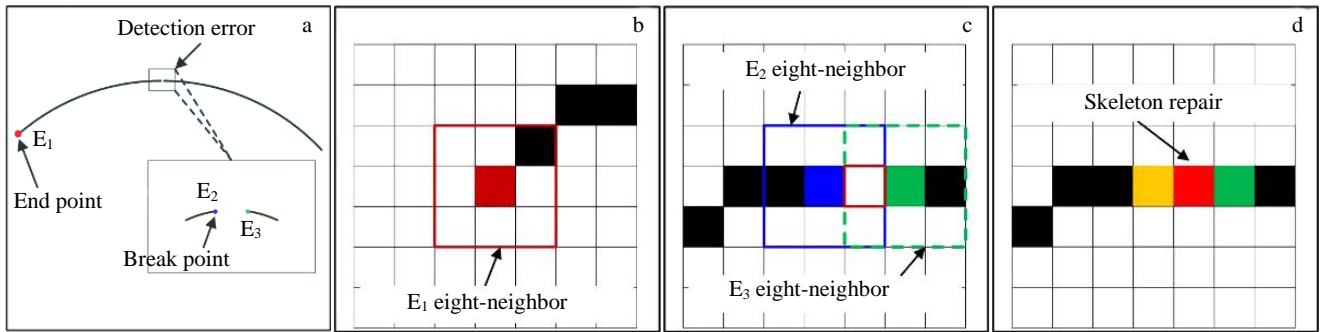


图 7 特征骨架线端点和断点

Fig.7 Feature skeleton-line endpoint and breakpoint: (a) feature skeleton-line; (b) distinguishing endpoint within threshold range; (c) distinguishing breakpoint within threshold range; (d) skeleton repair result

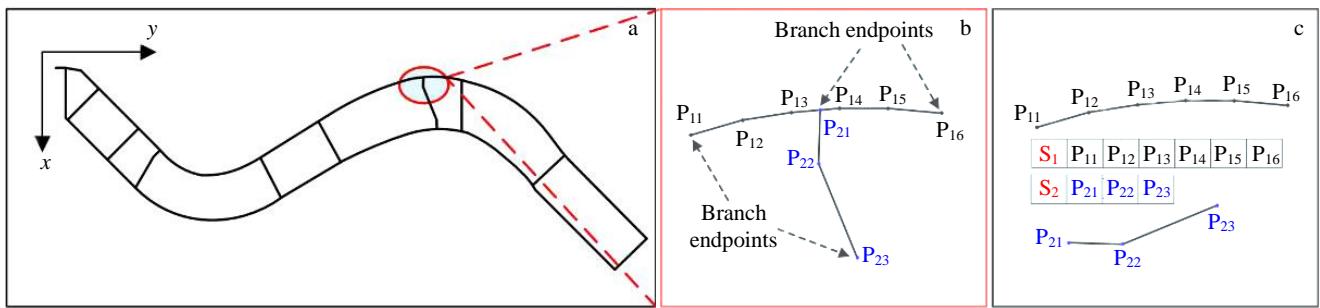


图 8 特征分支规则化

Fig.8 Feature branch regularization: (a) S-beam overall skeleton-line; (b) feature branches of local feature of S-beam; (c) regularization of local feature of S-beam

交点，影响分支交点的获取。为避免此类情况，对特征分支进行规则化，相同走向的特征分支将其按序存储在同一分支集合 S_n 中。

取图 8b 所示的 S 梁局部特征，其包含的特征分支在直线检测后得到的 P_{11} 、 P_{12} 、 P_{21} 等直线端点，而其中只有特征分支的端点在乱序储存时不会被重复储存，即从所储存的直线组任意调取一短直线，判断该直线端点是否被重复储存。遍历整个特征区域得到分支端点分别为 P_{11} 、 P_{16} 、 P_{21} 、 P_{23} 。在诸分支端点中 P_{11} 的坐标最小，首先将直线 $P_{11}P_{12}$ 储存至 S_1 中，随后将含有点 P_{12} 的直线 $P_{12}P_{13}$ 储存至 S_1 并删除重复储存的 P_{12} 点，直至 S_1 中含有另一分支端点 (P_{16}) 为止，完成图 8b 中横向特征分支的规则化。利用同样的方法可对图 8b 中纵向特征分支完成规则化，其结果如图 8c 中 S_2 所示。

2.2.2 特征交点位置判别和坐标计算

向量叉乘法判别交点位置时，交点存在条件：(I) 2 条线段中任意线段为基时，利用向量叉乘所得 2 个向量三角形面积均异号；(II) 2 条线段其中 1 条为基时，所产生的两向量三角形中存在向量三角形面积为 0 的向

量三角形且另一线段为基时两向量三角形面积异号。两直线满足 (I)、(II) 中任意一条则证明两直线存在交点。

特征交点是在特征分支规则化后形成的分支集合 S_n 之间进行判别和计算。对图 8b 所示的特征完成规则化工作后，按储存顺序分别调取分支集合 S_1 、 S_2 中所储存的直线进行求交运算。按分支集合储存直线的顺序调取时，首先调取 S_1 中的 $P_{11}P_{12}$ 与 S_2 中的 $P_{21}P_{22}$ 的端点坐标，随后按图 9a、9b 所示，利用向量叉乘（带符号）计算分别以 $P_{11}P_{12}$ 、 $P_{21}P_{22}$ 为基时各矢量三角形的面积，可得 $P_{11}P_{12}$ 为基时， $S_{\Delta P_{11}P_{12}P_{21}}$ 与 $S_{\Delta P_{11}P_{12}P_{22}}$ 同为负号，即点 P_{21} 、 P_{22} 处于直线段 $P_{11}P_{12}$ 的同侧，不会产生交点；以同样的方式判断得到点 P_{11} 、 P_{12} 处于直线段 $P_{21}P_{22}$ 的同侧；而只有在满足条件 (I) 或条件 (II) 时 2 只线段才有交点，所以 $P_{11}P_{12}$ 与 $P_{21}P_{22}$ 无交点。当遍历至 $P_{13}P_{14}$ 与 $P_{21}P_{22}$ 时，图 9c 中 $S_{\Delta P_{13}P_{14}P_{21}}$ 为 0 且图 9d 中 $S_{\Delta P_{13}P_{14}P_{21}}$ 与 $S_{\Delta P_{13}P_{14}P_{22}}$ 异号，符合条件 (II)，故该特征的交点为 $P_{13}P_{14}$ 与 $P_{21}P_{22}$ 的交点。

已知该特征交点为 $P_{13}P_{14}$ 与 $P_{21}P_{22}$ 的交点，从 S_1 、 S_2 中调取所储存 $P_{13}P_{14}$ 与 $P_{21}P_{22}$ 的端点坐标，按定比分点法建立图 10 所示的三角形，使用向量叉乘法（不带符

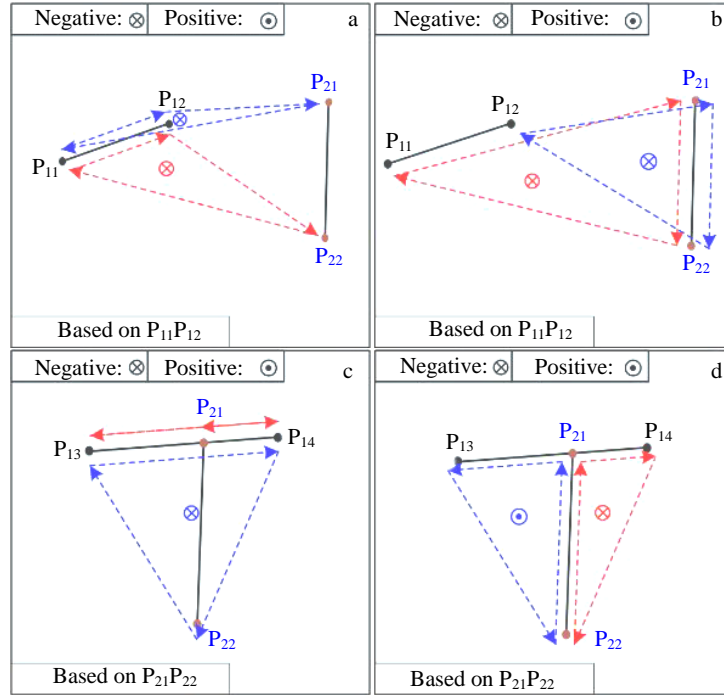


图 9 特征交点位置判别

Fig.9 Feature intersection position discrimination: (a) triangle $\Delta P_{11}P_{12}P_{21}$ generated by bases $P_{11}P_{12}$, (b) triangle $\Delta P_{11}P_{12}P_{22}$ generated by bases $P_{11}P_{12}$, (c) triangle $\Delta P_{13}P_{14}P_{21}$ generated by bases $P_{21}P_{22}$, and (d) triangles $\Delta P_{21}P_{22}P_{13}$ & $\Delta P_{21}P_{22}P_{14}$ generated by bases $P_{21}P_{22}$

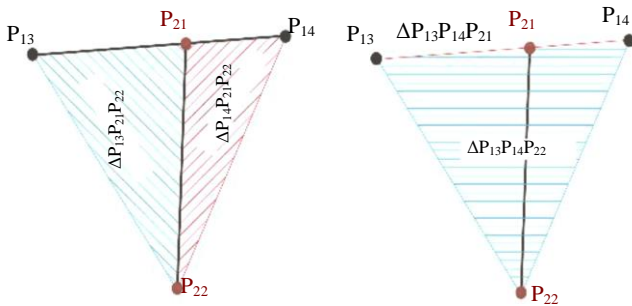


图 10 定比分点法原理图

Fig.10 Schematic diagram of fixed-ratio point method

号) 计算图 10 中各三角形面积, 随后利用公式 (3)、(4) 对交点 P 的坐标 (x_p, y_p) 进行计算。

$$x_p = \frac{S_{\Delta P_{13}P_{21}P_{22}} \times x_{P_{14}} + S_{\Delta P_{14}P_{21}P_{22}} \times x_{P_{13}}}{S_{\Delta P_{13}P_{21}P_{22}} + S_{\Delta P_{14}P_{21}P_{22}}} \quad (3)$$

$$y_p = \frac{S_{\Delta P_{13}P_{14}P_{21}} \times y_{P_{22}} + S_{\Delta P_{13}P_{14}P_{22}} \times y_{P_{21}}}{S_{\Delta P_{13}P_{14}P_{21}} + S_{\Delta P_{13}P_{14}P_{22}}} \quad (4)$$

2.3 特征类型识别

2.3.1 特征角和特征分支数计算

特征分支只存在于“十”字形、T 字形、L 形特征之中, 且在特征角的计算过程中, 为考虑特征分支的整体走向, 不采用交点位置的短直线段进行特征角的计算。

所以在对图 11a 所示 S 梁局部特征得到交点 P 的坐标后, 从 S_1 、 S_2 中调取储存的分支端点, 随后如图 11a 中将特征交点 P 与诸分支端点分别连接形成姿态辅助线, 利用姿态辅助线对特征角 α 进行求解。根据分支端点储存的位置确定其所属分支, 随后根据公式 (5) 计算姿态辅助线的长度 $|PP_{11}|$ 、 $|PP_{16}|$ 、 $|PP_{21}|$ 、 $|PP_{23}|$, 并取 $a = \max\{|PP_{11}|, |PP_{16}|\} = |PP_{11}|$, $b = \max\{|PP_{21}|, |PP_{23}|\} = |PP_{23}|$, $c = |P_{11}P_{23}|$ 。为避免误差累积, 本研究在对特征角 α 的求取上避开斜率, 采用公式 (6) 进行计算两直线夹角 α 。

$$|PP_{11}| = \sqrt{(x_p - x_{P_{11}})^2 + (y_p - y_{P_{11}})^2} \quad (5)$$

$$\alpha = \arccos \frac{(a^2 + b^2 + c^2)}{2ab} \quad (6)$$

利用特征交点和分支集合可将分支集合拆分形成特征分支集合。将特征交点插入 S_n 中, 并从特征交点位置处将各 S_n 拆分形成特征分支集合 Q_n , 在形成的各 Q_n 中, 以特征交点为起点, 叠加特征分支集合中所有直线长度得到特征分支长度。

已知特征交点 P 是由 $P_{13}P_{14}$ 、 $P_{21}P_{22}$ 相交产生, 所以将特征交点 P 分别插入 S_1 中点 P_{13} 、 P_{14} 与分支集合 S_2 中点 P_{21} 、 P_{22} 之间, 以此形成图 11b 所示的特征分支集合 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 。随后使用公式 (5) 对特征分支集合 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 中所储存的各直线进行长度计算,

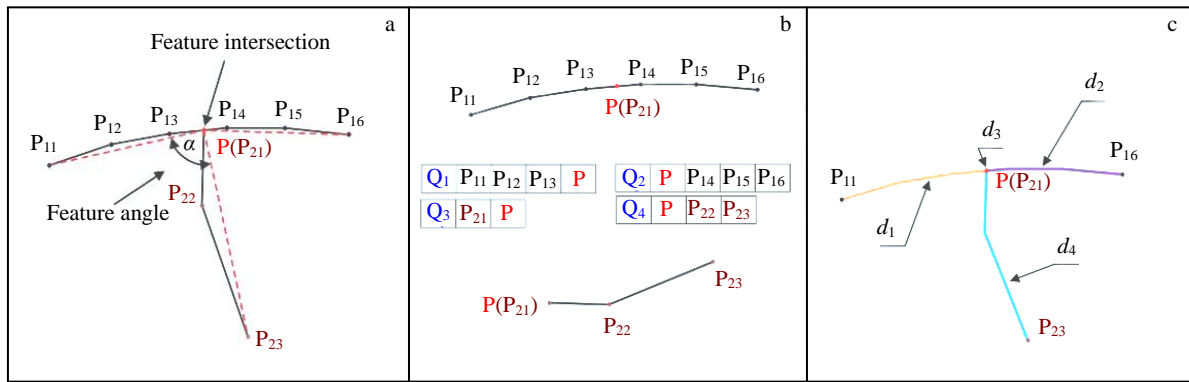


图 11 S 梁局部特征分支示意图

Fig.11 Schematic diagram of S-beam local feature branch: (a) feature intersection and feature angle; (b) feature branch set Q_n ; (c) feature branch length d_n

并依次叠加直线长度得到图 11c 所示的特征分支长度 d_n : d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 。为避免特征分支长度过短影响特征识别,对特征分支设定最小分支长度 $\Delta d=5$ mm。将得到的特征分支长度 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 分别与 Δd 进行比较,当 d_n 大于 Δd 时,特征分支数 m 加 1,若 d_n 小于 Δd 时,对特征分支数 m 不作处理。

2.3.2 特征识别和分区流程

特征识别算法是将特征定义程序化,完成特征定义中特征角、特征分支长度等特征要素的计算,主要利用特征的特征角 α 与特征分支数量 m 完成对“十”字形、T 字形、L 形及“一”字形特征的识别,特征的平面姿态角 β 基本不影响具体特征的特征识别。在特征完成骨架化得到该特征的特征骨架线后,对整体骨架进行求交运算得到骨架交点后,采用以最大宽度 K 作为边长的正方形对交点位置的特征完成特征分割。将分割后得到的特征骨架线进行直线检测,并对检测后所得直线按序进行规则化处理,并将各直线储存至分支集合 S_n 中,对其分支数量 n 进行判断,若 $n=1$,说明只有一条分支,不存在特征交点,则该特征属于“一”字形特征;当 $n=2$ 时,利用特征交点坐标与 2 条分支的端点,获得特征的特征角 α ,判断 α 是否满足特征定义,不满足则归为“一”字形特征;若满足特征定义则利用交点将分支集合 S_1 、 S_2 分割成 4 个特征分支集合 Q_n ,将 Q_n 中所有直线长度叠加得到特征分支长度 d_n ,并判断 d_n 与规定的最小分支长度 Δd 之间的大小关系,若 $d_n < \Delta d$ 则舍弃该分支;而当 $d_n \geq \Delta d$ 时,将特征分支数量 m 加 1,以此得到最终特征分支数量 m 。最后利用最终特征分支数量 m 对特征完成特征识别。

在特征识别完成后,将特征识别结果反馈于零件切片的骨架线,在该零件切片所涉及的特征中,在骨架线交点位置利用公式(2)依次对“十”形、T 形、L 形特征的分支尺寸进行计算。各类特征分支尺寸计算得到理

论长度 d_n 后,判断各特征的理论长度是否会相互干扰,若干扰则由被干扰特征平分干扰区域。随后在各类特征需要分割的位置处求得该处骨架线的垂线,将骨架线的垂线与零件边缘所形成的交点作为特征的分割点,并利用公式(3)、(4)计算其坐标。将所得的特征分支长度 d_n 和分割点坐标反馈于切片层,最终连接同一位置的两分割点,可依次完成“十”字形、T 字形、L 形和交点位置“一”字形特征的分区。随后从已完成特征分区的分区位置开始,直至与下一个已分区的特征分区位置或切片边缘位置重复为止,计算剩余区域长度 u ,判断 u 与“一”字形特征分区尺寸的大小关系,若 $u \geq \mu d_n$,则单独划分为“一”字形特征,否则让相邻特征平分该区域,以此实现特征分区。具体流程如图 12 所示。

3 特征识别和分区算法验证

为了验证特征识别和分区算法,将飞机某框件模型的切片数据(如图 13a 所示)输入设计软件,首先对其进行骨架化处理得到其骨架线,对整体骨架进行求交运算得到骨架交点后(图 13b),采用以最大宽度 $K=20$ mm 作为边长的正方形对交点位置的特征完成特征分割(图 13d),并使用本研究所提出的特征识别算法完成特征的识别,得到该零件切片中含有“十”字形、T 字形、L 形与“一”字形特征,识别结果以相应标准特征形状输出,如图 13d 所示。

将特征识别结果反馈于零件切片的骨架线,在该零件切片所涉及的特征中,在骨架线交点位置利用公式(2)(其中 $\eta=2$)依次对“十”字形、T 字形、L 形特征的分支尺寸进行计算。各类特征分支尺寸计算得到理论长度 d_n 后,发现两 T 字形特征在 N_1 处(图 13c)的分支在分区时产生干扰,将干扰区域长度平分后分别赋予被干扰 2 个 T 字形特征的相关分支,得到最终的“十”字形、T 字

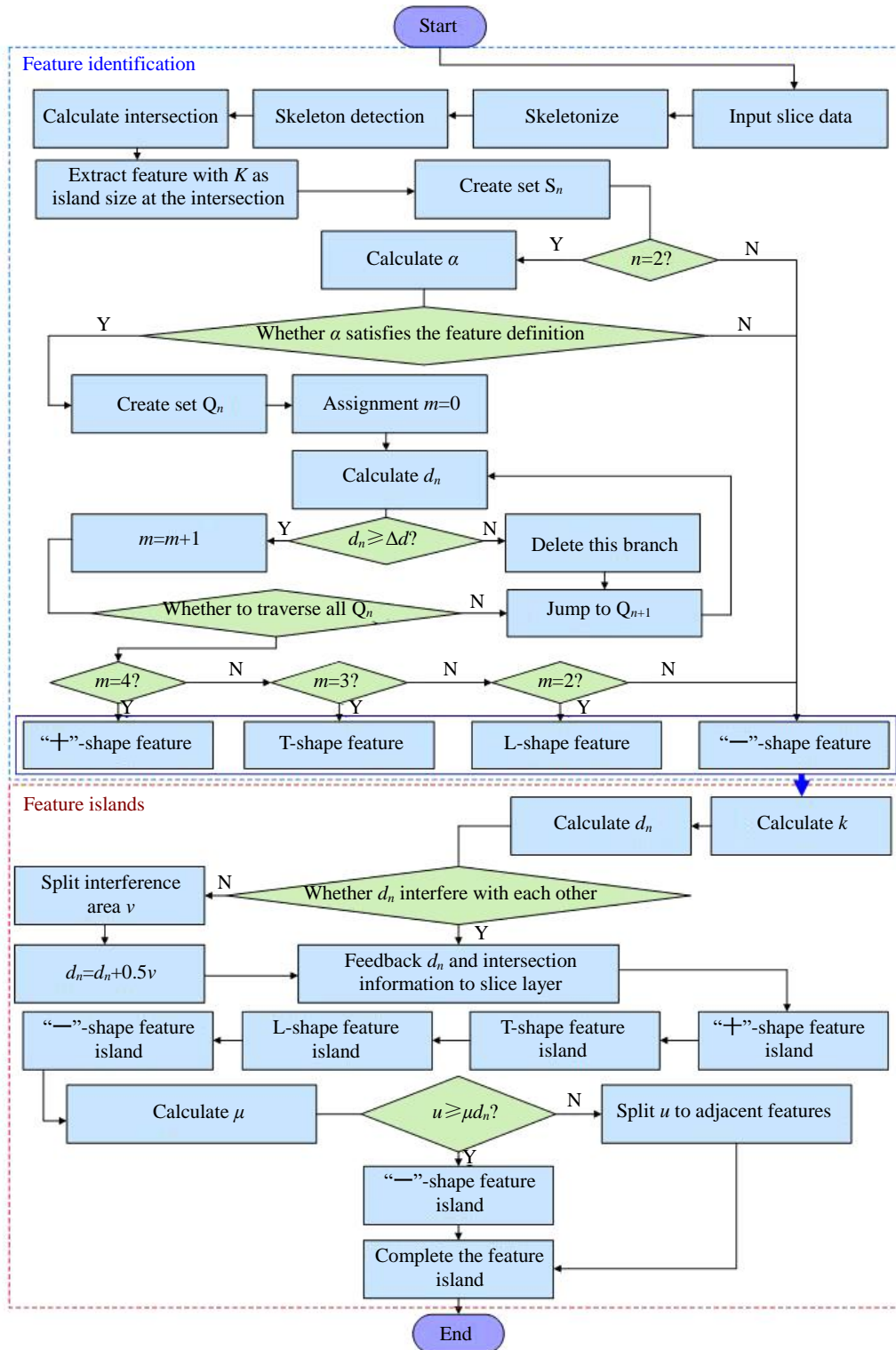


图 12 特征识别及分区算法流程图
 Fig.12 Flow chart of feature identification and island algorithm

形和 L 形特征的分支尺寸。随后计算各处分割点坐标。将特征交点坐标、特征分支尺寸、分割点坐标和特征识别结果反馈于零件切片，对切片中 3 类特征完成分区（图 13e）。

在对以上 3 类特征完成分区后，对交点位置的“—”

字形特征以相同方式进行分区。随后计算此零件剩余区域的尺寸 u ，发现 M_1 至 M_7 （图 13c）处“—”字形特征的实际尺寸 u 小于计算长度的 $\mu=0.3$ 倍，将 M_1 至 M_7 处的“—”字形特征归于相邻的已分区的特征分支，其

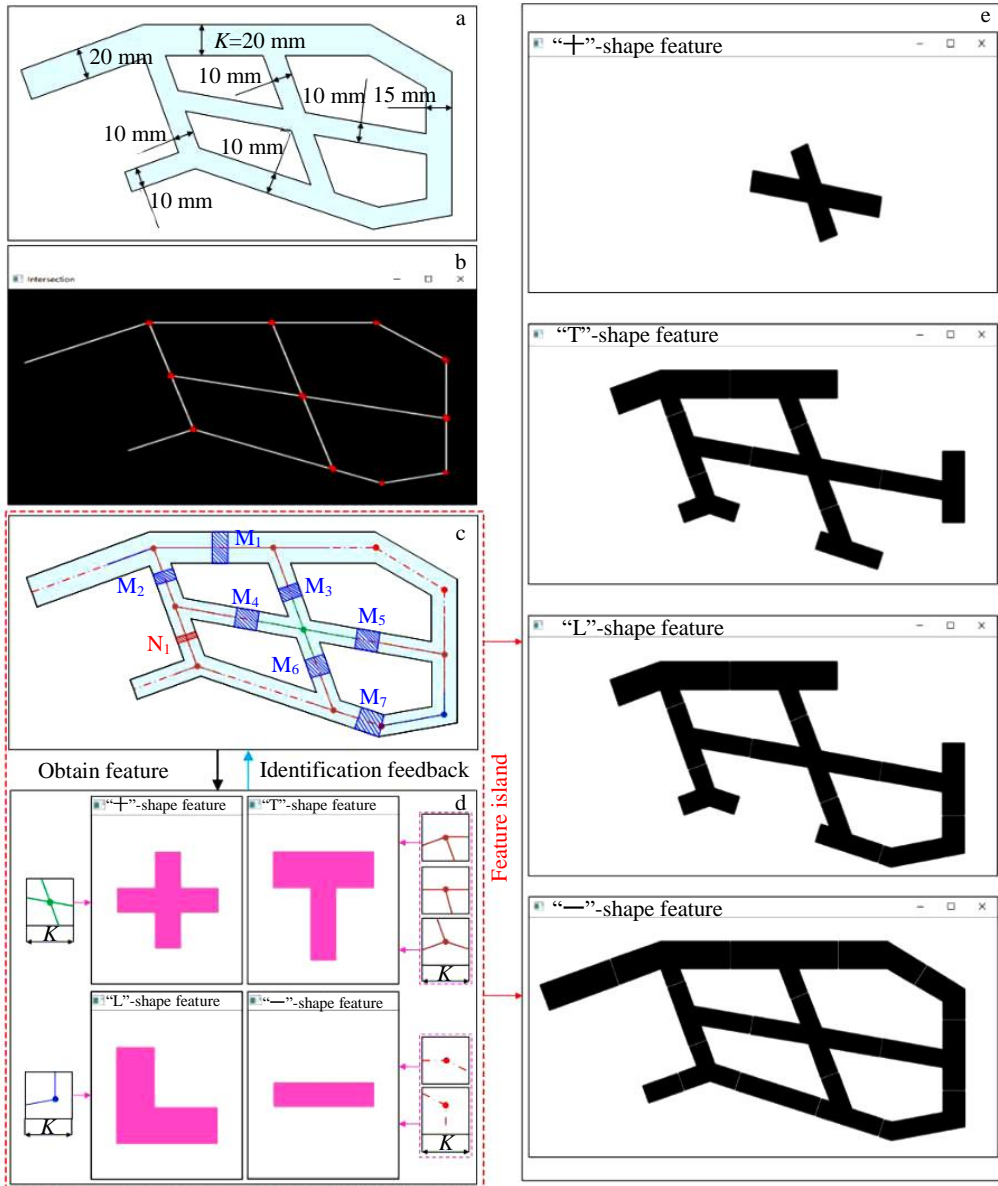


图 13 零件特征分区

Fig.13 Part feature island: (a) part slice; (b) slice skeleton-line and intersection of parts; (c) slice involved features; (d) slice intersection position feature segmentation and identification; (e) feature islands results of part slice

余位置为“一”字形特征。将相关信息反馈于零件切片，完成该零件切片的特征分区（图 13e）。为了保证制造过程中，各特征之间能够完整连接，如图 14 所示，特征分区时，特征与特征之间的分割宽度为激光光斑的一个直径 s 大小，且在路径规划过程中要保证分割位置处于激光斑点中心。

与传统分区相比，特征分区是在考虑大型结构件层面几何特征的前提下进行分区，极大程度地保护零件特征不被破坏。特征分区的分割线是垂直于零件分支的骨架线进行分区，避免了尖角区域的产生，降低了沉积制造过程中过熔覆的几率。

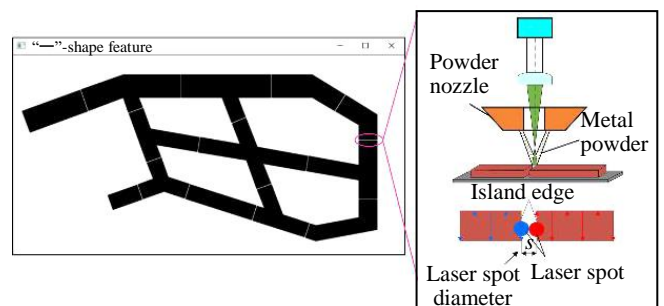


图 14 特征连接示意图

Fig.14 Schematic diagram of feature linkage

4 结 论

为了解决激光沉积制造飞机框梁结构大型构件变形大的问题,提出了一种以模型切片数据几何结构特征为分区依据的特征分区方法,并对特征进行了分类、定义,且设计了特征识别算法,为了大型制件工艺移植和快速仿真打下基础。得到结论如下:

1) 针对激光沉积制造大型框、梁类结构件提出了一种新的特征分区概念,经统计分析将框、梁类构件的结构特征分为“十”字形、T 字形、L 形和“一”字形 4 类特征;并将各类特征从形状、姿态和尺寸 3 方面进行了定义。

2) 基于特征区域骨架线的检测提出了一种特征识别算法,利用检测结果完成特征骨架规则化,采用向量叉乘法、定比分点法、余弦定理和两点间距离公式分别进行特征交点位置判别、特征交点计算、特征角计算、特征分支长度计算,所得计算值与特征定义比较完成特征识别。

3) 结合特征交点和特征识别结果实现“十”字形、T 字形、L 形特征在切片层中的定位,计算特征分支长度,解决分区之间干扰后依次完成此 3 类特征的分区,最后实现“一”字形特征的分区分位。

4) 采用典型飞机框件模型的切片数据对特征识别和分区算法进行了验证,结果表明该算法可准确识别各类特征,并实现零件的自动特征分区,且避免了传统分区形成尖角区域等缺点,降低了过熔覆的几率。

参考文献 References

- [1] Wang Tianyuan(王天元), Huang Shuai(黄 帅), Zhou Biao(周 标) et al. *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2023, 43(1): 1
- [2] Debroy T, Wei H L, Zuback J et al. *Progress in Materials Science*[J], 2018, 92: 112
- [3] Lu Xuwei, Lin Xin, Chiumenti M et al. *Additive Manufacturing*[J], 2019, 26: 166
- [4] Carpenter K, Tabei A. *Materials*[J], 2020, 13(2): 255
- [5] Alimardani M, Toyserkani E, Huissoon J P et al. *Optics & Lasers in Engineering*[J], 2009, 47(11): 1160
- [6] Promopattum P, Uthaisangsuk V. *Finite Elements in Analysis and Design*[J], 2021, 189(7): 103528
- [7] Pp A, Scy B. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 49: 247
- [8] Denlinger E R, Heigel J C, Pan M et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 215: 123
- [9] Zhang Y C, Li Z, Nie P et al. *Metallurgical & Materials Transactions A*[J], 2013, 44(12): 5513
- [10] Liu Zhanqi, Yin Guili, Zhu Xiaou et al. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2022, 73: 624
- [11] Liu Zhaoyang, Zhu Qiang, Zhang Xiaoli. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2021, 68(2): 1837
- [12] Yu J, Xin L, Liang M et al. *Materials Science & Engineering A*[J], 2011, 528(3): 1094
- [13] Colegrove P A, Donoghue J, Martina F et al. *Scripta Materialia*[J], 2016, 135: 111
- [14] Lebrun T, Nakamoto T, Horikawa K et al. *Materials & Design*[J], 2015, 81: 44
- [15] Yamaguchi H, Omar F, Wu P Y et al. *CIRP Annals*[J], 2017, 66(1): 305
- [16] Corbin D, Nassar A R, Reutzel E et al. *Journal of Manufacturing Science and Engineering: Transactions of the ASME*[J], 2018, 140(6): 1
- [17] Zhao Yuhui, Wang Zhiguo, Zhao Jibin et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2018, 47(8): 2305
- [18] Foroozmehr E, Kovacevic R. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2010(51): 659
- [19] Wan H Y, Zhou Z J, Li C P et al. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2018, 34(10): 1799
- [20] Wang Jingsheng, Zhang Jiajia, Liu Guangtao et al. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2022, 75: 23
- [21] Liu Fencheng, Xin Lin, Huang Chunping et al. *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2011, 509(13): 4505
- [22] Promopattum P, Rollett A D. *Materials & Design*[J], 2021, 204(7): 109658
- [23] Woo W, Kim D K, Kingston E J et al. *Materials Science & Engineering A*[J], 2019, 744: 618
- [24] Bian Hongyou(卞宏友), Yang Guang(杨 光), Li Ying(李 英) et al. *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2013, 49(11): 171
- [25] Prabhu A W, Vincent T, Chaudhary A et al. *Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2015, 20(8): 659
- [26] Svetlizky D, Das M, Zheng B et al. *Materials Today*[J], 2021(49): 271
- [27] Wang Wei(王 伟), He Yan(何 妍), Qin Lanyun(钦兰云) et al. *Applied Laser*(应用激光)[J], 2016, 36(4): 373
- [28] Paydas H, Mertens A, Carrus R et al. *Materials and Design*[J], 2015, 85(15): 497
- [29] Tagliasacchi A, Delame T, Spagnuolo M et al. *Computer Graphics Forum*[J], 2016, 35(2): 573
- [30] Zhang T Y, Suen C Y. *Communications of the ACM*[J], 1984, 27(3): 236

Feature Islands and Identification Method of Laser Deposition Manufacturing

Qin Lanyun, Zhang Jingjing, Wang Wei, Yang Guang

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process,

Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Laser deposition manufacturing (LDM) technology has unique advantages in additive manufacturing of large aircraft frames and beams. However, stress and deformation have become bottlenecks that hinder the application of this technology. Therefore, the islands process is widely used to discrete the residual stress and alleviate the deformation of the parts. However, the traditional islands process does not take into account the geometric structural features of parts, easily leading to irregular partition lap, which introduces pores, poor fusion and other defects. In order to solve this problem, a feature islands method was proposed. According to the geometric shape characteristics of the slicing layers of typical frame and beam structural parts, the features were classified into four types: “十”-shape, T-shape, L-shape and “—”-shape features, and all kinds of features were limited from three aspects: shape, pose and size, to complete the definition of island features. A feature recognition algorithm based on region skeleton line detection was proposed, where the skeletonization was used to effectively simplify the features and retain the part characteristics. The vector cross-product and fixed-ratio point method were used to calculate the relevant parameters such as feature angle, plane attitude angle and number of feature branches. Feature type identification was achieved by comparing calculated values with defined values. The algorithm was verified by slice data of a typical aircraft frame model. The results show that the algorithm can quickly and accurately identify various features to realize automatic feature islands of parts, which lays a foundation for intelligent additive manufacturing technology.

Key words: laser deposition manufacturing; feature islands; feature definition; feature identification

Corresponding author: Qin Lanyun, Ph. D., Professor, Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, P. R. China, Tel: 0086-24-89723852, E-mail: qinly@sau.edu.cn