基于特征划分熔覆轨迹的干涉检测及修正

刘金朵，孙文磊，张冠，黄勇

（新疆大学 机械工程学院，乌鲁木齐 830047）

摘 要：目的 激光再制造技术在实际加工过程中会遇到多种复杂曲面的零件，合理的激光路径规划是获得高性能涂层的关键因素。**方法** 将当前光束向量平移一定距离，平面空间被分割成正域和负域，利用特征属性判断当前点的归属关系，快速排除肯定不与零件发生干涉的激光束。转入精确检测，计算干涉因子 λ，确定矢量 h，将曲面划分成规则的微元对象 block，分析光束与 block 的交点信息，完成干涉检测的精确搜索。在保证熔覆层质量理想的条件下，计算相应干涉量 Θ，以当前点为焦点，切线方向为固定轴旋转角度 Θ，调整光束姿态至安全区域。**结果** 编写 C 程序算法，对实际零件三维建模并进行轨迹仿真。预期点集共 47 883 个，其中失效点 7341 个，计算相应干涉量在 10°范围内。完成所有干涉光束的有效修正，生成优化后的机器人路径程序。**结论** 再制造前处理阶段，该算法通过仿真实验模拟对象间的碰撞检测，及时消除激光加工中存在的安全隐患，形成合理的熔覆轨迹，提高加工效率，节约生产成本。

关键词：凹形曲面；激光熔覆；干涉检测；姿态修正；轨迹优化

中图分类号：TG174.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2020)03-0275-06

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.035

Interference Detection and Correction of Cladding Trajectory Based on Feature Division

LIU Jin-duo, SUN Wen-lei, ZHANG Guan, HUANG Yong

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

ABSTRACT: Laser remanufacturing technology will encounter many kind of parts with complex curved surface in the actual processing. Reasonable laser path planning is the key factor to obtain high-performance metallurgical cladding. The plane space was divided into positive and negative domains by translating the current beam vector to a certain distance. The feature partition was used to judge the relationship between the current point set and rapidly eliminate the interference between laser beam and parts. For accurate detection, the interference factor λ was calculated to determine the vector h, divide the surface into regular micro-objects (block) and analyze the intersection information between the beam and the block to complete the accurate search of interference detection. The interferences Θ was calculated under the condition of ideal cladding layer. With the current point

收稿日期：2019-03-20；**修订日期：**2019-05-25

Received：2019-03-20；**Revised：**2019-05-25

基金项目：新疆克拉玛依市科技重大专项（2018ZD002B）

Fund：Supported by Major Science and Technology Projects in Karamay, Xinjiang (2018ZD002B)

作者简介：刘金朵（1993—），女，硕士研究生，主要研究方向为激光熔覆曲面零件轨迹规划。

Biography：LIU Jin-duo (1993—), Female, Master, Research focus: laser cladding trajectory for curved surface parts.

通讯作者：孙文磊（1962—），男，博士，教授，主要研究方向为 CAD/CAM 和再制造工程。邮箱：sunwenxj@163.com

Corresponding author：SUN Wen-lei (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: CAD/CAM and remanufacturing engineering. E-mail: sunwenxj@163.com

引文格式：刘金朵，孙文磊，张冠，等. 基于特征划分熔覆轨迹的干涉检测及修正[J]. 表面技术，2020, 49(3): 275-280.

LIU Jin-duo, SUN Wen-lei, ZHANG Guan, et al. Interference detection and correction of cladding trajectory based on feature division[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 275-280.

as the focus and the tangent direction as the fixed axis rotation angle Θ, the beam attitude was adjusted to the safe area. The three-dimensional model of parts was established and the trajectory was simulated by C program. The expected set of points was 47 883 of which 7341 were failure points, and the interferences were in the range of 10°. The effective correction of all interference beams was completed to generate the optimized robot path program. Collision detection between objects is executed by simulation experiments in the pre-processing stage, which eliminates potential safety hazards in laser remanufacturing in time, forms reasonable cladding trajectory, improves processing efficiency and saves production costs.

KEY WORDS: concave surface; laser cladding; interference detection; attitude correction; trajectory optimization

再制造技术是 21 世纪新兴研究领域，以废旧资源为对象，利用各种修复技术达到循环使用资源的目的。激光熔覆技术作为再制造领域一项重要的先进技术，通过高能激光束照射在基材表面，同时熔化粉末，形成组织致密、性能较好的冶金涂层，修复后零件的性能不低于甚至优于原材料[1-4]。再制造分为几个重要阶段：获取点云数据、重建三维模型、轨迹规划、仿真与优化、转换机器语言。激光熔覆成形质量受工艺参数、粉末类型等多种因素影响[5-7]，其中轨迹规划对获取高性能涂层的影响不可忽略[8]。

Xiao 等[9]研究零件截面形状的曲率变化，利用改进算法提取点完成路径规划，通过对叶片激光熔覆，证明该算法的可行性。Liu 等[10]研究了离线熔覆路径生成，通过设计偏差生成轨迹点，通过切平面与零件交点计算凸区域，移动激光头位置避免局部干扰。Zheng 等[11]在优化三角面片模型的基础上，建立 *XY* 平面沿 *Z* 方向生成一定数量的平面组，生成一系列交点，并进行排序，得到实际加工路径，为机械臂的轨迹编程提供了新的解决方案。黄勇等[12]对于复杂轴类零件，结合逆向工程提出对点云数据进行等弧长插补搜索，开发了 6 自由度机器人的轨迹规划程序，为轴类零件提供了可靠的路径规划方案。董世运等[13]针对凸轮轴磨损失效问题，提出路径规划方案，采用分段调整加工速度，在边缘处进行补偿，获得较好的熔覆层质量。戴士杰等[14]利用 NURBS 曲线方法对叶片关键部位进行轨迹规划，结合弓高误差等参数，实现进给速度的自适应控制，通过实例证明该算法的可靠性与精确性。李鹏飞等[15]研究了在激光呈非垂直入射姿态下的熔覆层质量情况，在光、粉和基体的耦合的基础上，通过生死单元技术，仿真并实例验证了激光不同扫描角度对熔覆层的影响，为光束姿态修正提供思路。

目前大多数研究对象为简单凸形和平面零件，通过算法搜索路径插补点以及规划扫描轨迹顺序。但在工程应用中存在许多曲面结构的零件，如蒸汽阀、叶片及凹形模具等，由于曲率因素，激光在扫描过程中无法直接作用于加工点，导致与零件发生干涉，造成安全隐患。而现阶段鲜有研究提出激光与零件发生干涉时的路径规划方案。

因此，本文针对激光修复凹形曲面零件时易发生干涉的难题，提出一种特征划分的干涉检测方法，通过建立 block 对象进行精确搜索，考虑间隙余量计算修正值并调整光束姿态，完成曲面零件的熔覆轨迹优化，达到提高加工效率的目的。

1 熔覆轨迹优化策略

设计高效的碰撞检测方案需要考虑多方面相关联系，包含被测物体对象的表达方式、约束条件、实际环境参数等[16,17]。

1.1 预期路径点集的搜索和生成

根据作者已提出的切片直接与模型求交搜索插补点算法[18]，获取所有相交点集 *D*，如图 1。根据实际加工零件的要求，选取合适搭接率作为切片间距的参考值。通过曲面参数获得当前点在曲面上的法向量，由此得到预期轨迹点集，整体算法流程如图 2。

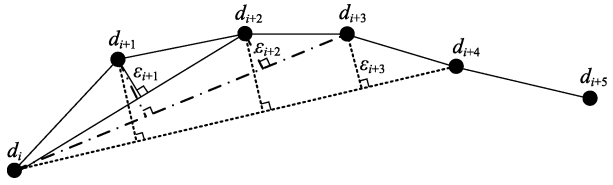


图 1 插补点搜索算法

Fig.1 Interpolation point search algorithm

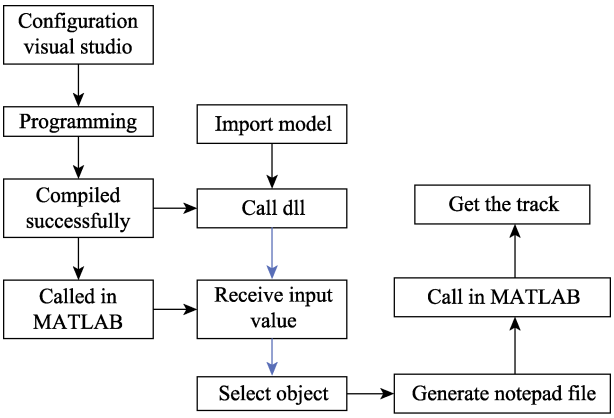


图 2 切片算法流程图

Fig.2 Flow chart of slicing algorithm

1.2　特征划分

特征划分是提取目标对象的特征值，根据要求将对象划分至不同区域。如图 3，算法关键思想是绘制一条直线 y 将数据划分至两个区域，箭头表示直线 y 的法向量，圆集在直线的正方向区域内，叉集划分在直线负方向区域内。对于简单可分问题，算法模型一般是由线性函数构成。

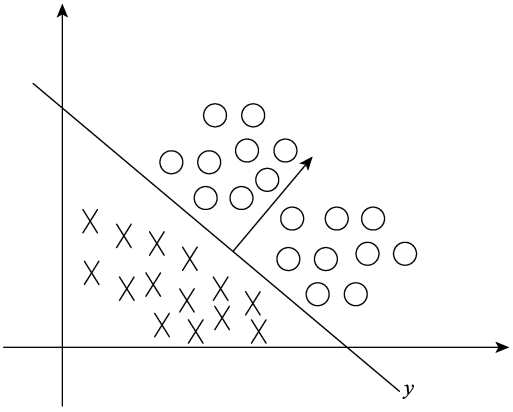


图 3　特征划分原理
Fig.3 Principle of characteristic partition

1.3　局部化空间曲面

预期轨迹点集中存在可能干涉的点数量有限，通过分析当前光束是否与零件有交点，判断干涉情况。若每条光束与待修复区域的整体表面展开计算，则运算量过大，程序执行缓慢，效率过低。

根据预期点集的规律特征，设当前点为 $d_i(x_i, y_i, z_i)$，此处光束为 l_i，法向量为 $\boldsymbol{n}_i$，下一个轨迹点为 $d_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$，光束为 l_{i+1}，法向量为 $\boldsymbol{n}_{i+1}$，如图 4，计算前后两点间的距离 Δd 。

$$\Delta d=\sqrt{\left(x_i-x_{i+1}\right)+\left(y_i-y_{i+1}\right)+\left(z_i-z_{i+1}\right)} \tag{1}$$

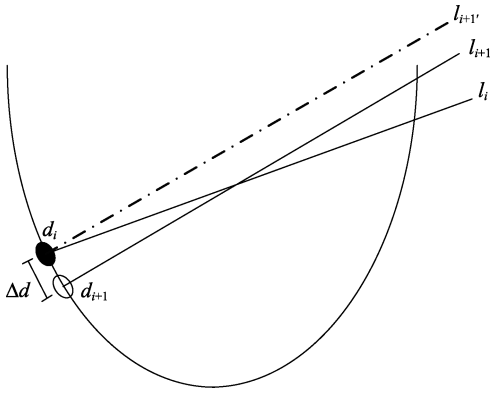


图 4　相邻光束平移
Fig.4 Translation of adjacent beams

$\boldsymbol{n}_{i+1}$ 保持稳定的情况下，移动 l_{i+1} 至 d_i 点处，得到 l'_{i+1}。以 l_{i+1} 和 l'_{i+1} 为斜边，水平 x 方向上线段 b、闭合线段 a 为公共直角边，构成直角三角形，斜边与底边夹角分别为 Θ_1 和 Θ_2，如图 5。

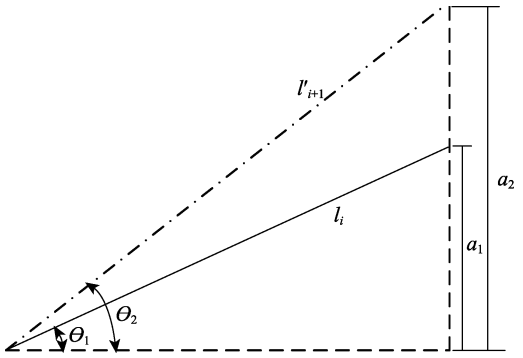


图 5　干涉因子
Fig.5 Interference factors

$$a_1\cdot\cos\Theta_1=a_2\cdot\cos\Theta_2 \tag{2}$$

$$a_2-a_1=a_1\left(1-\frac{\cos\Theta_1}{\cos\Theta_2}\right)=a_1\cdot\lambda \tag{3}$$

$$h=\lambda\cdot\Delta d \tag{4}$$

根据直角三角形定理得出公式(2)，从而推导出公式(3)，为方便计算，公式(3)中引入系数因子 λ，由此可建立微元对象与点之间的关联关系，即为公式(4)。

任意维度内的平面称作超平面[19]，将高一级维度的空间划分为多个包含无穷点集的子空间，正负由超平面法向量决定，相互垂直的 X、Y 两个平面空间组成的相交矩形 T 包含同时存在于 X、Y 平面中的所有点，称为 block 区。在当前点 d_i 处构造矩形，宽度为沿法矢 h_1 值，长度为沿点切线方向对称 h 值。将矩形沿矢量投影到零件表面，得到微元对象 block。

设直线 AB：

$$A_0x+B_0y+C=0 \tag{5}$$

标记线段进入 X、Y 平面的点坐标和射出点坐标，如图 6 中圆实心与空心分别代表 X 平面的进入点与退出点，三角实心与空心分别为 Y 平面的进入点与退出点，检测线段是否与零件发生干涉，需比较射入最大值 $V_{\max}$ 和射出最小值 $V_{\min}$。若 $V_{\max}$ 大于 $V_{\min}$，则线段

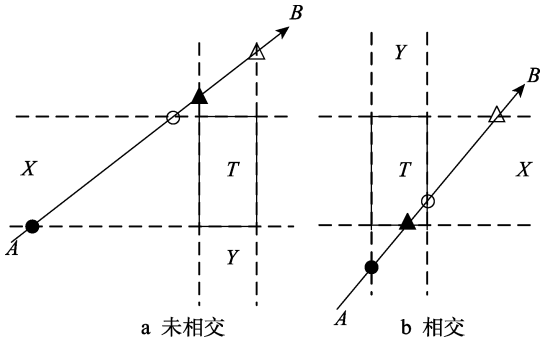


图 6　直线与平面空间求交
Fig.6 Intersection between straight line and plane space: a) not intersect, b) intersect

与 block 有交点，如图 6b；若 V_{max} 小于 V_{min}，表明线段不同时存在于平面空间，线段肯定不与零件相交，则该点为有效路径点并存储，如图 6a。

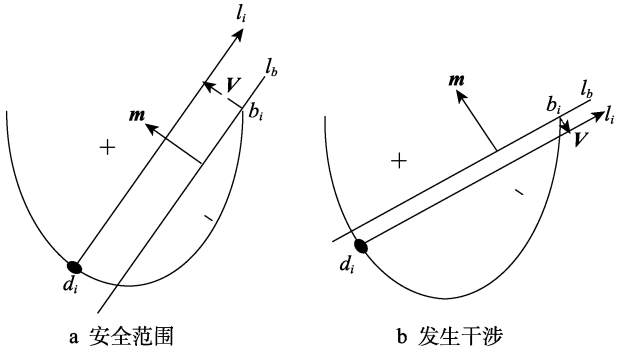
1.4　碰撞检测及干涉修正

通过切片算法建立待修复面加工轨迹，为保证机器人在安全情况下连续作业，进行光束与零件的干涉检测。由于加工点集数量庞大，有必要排除不可能发生干涉的光束。进行碰撞检测第一步：粗略检测。

如图 7，在边界点 b_i 处创建与向量 n_i 平行的粗实线 l_b，平面被分割成两个子空间，规定指向零件开口位置的为正域 R^+，指向零件实体的为负域 R^-，得到 l_b 的法向量 $\boldsymbol{m}(m_x,m_y,m_z)$，在 b_i 点处作垂直于 l_b 指向 l_i 的向量 $\boldsymbol{v}(v_x,v_y,v_z)$

$$(v_x,v_y,v_z)=k(m_x,m_y,m_z) \tag{6}$$

若 k>0，两向量同向；k<0，两向量反向。图 7a 中，$\boldsymbol{m}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 同向，$d_i \epsilon R^+$，d_i 为有效扫描路径点，存储到链表中。由图 7b 看出，$\boldsymbol{m}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 反向，$d_i \epsilon R^-$，则当前点可能与零件发生相交，归为干涉点，转入精确检测。



a 安全范围　　b 发生干涉

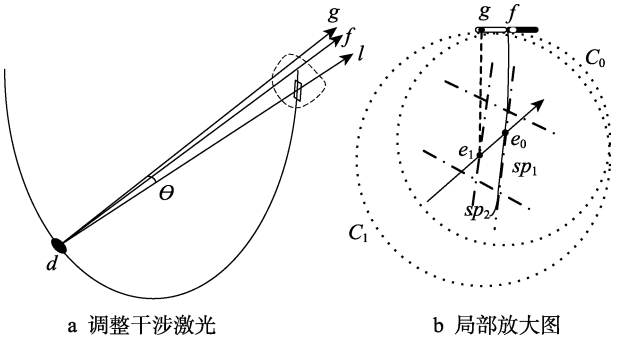
图 7　粗略检测

Fig.7 Rough detection: a) safe rage, b) interference

干涉域尺寸过大时，block 区域面积增加，很大可能覆盖到相邻路径点区域，降低碰撞检测速度和精确度；干涉域尺寸过小时，block 区域狭窄，无法检测到交点信息，程序进入死循环。综合考虑计算效率、数据存储等方面，计算干涉因子，从而确定合适的 block 对象。

在点 d 处创建剖切面 P，将光束 l_i、零件外轮廓投影到平面 P，通过干涉因子 λ 构造 block 元，图 8b 为 block 元局部放大图，粗实线代表零件外轮廓，空心线为安全边界，sp_1、sp_2 为平面空间，箭头线为矢量为 $\boldsymbol{n}$ 的激光光束 l_i，与 block 区产生交点 e_0 和 e_1，其中 e_0 为实际相交点，完成精确检测。

计算出干涉点后，实施光束姿态调整方案：以图 8b 中 e_0 为圆心，绘制与零件边界相切的基圆 C_0，若将切点 f 定为修正点，d 点为旋转中心，旋转一定角度，将光束姿态调整成 d_f，此时激光虽不与零件发生



a 调整干涉激光　　b 局部放大图

图 8　精确检测及修正

Fig.8 Accurate detection and correction: a) adjust the interference laser, b) local enlarged drawing

整体碰撞，但易出现“擦边”现象。为排除安全隐患，两者存在间隙余量时，姿态调整方案最优。以 e_1 为圆心，绘制与零件安全区域相切的基圆 C_1，切点 g 定为优化点，更新后的修正光束为 dg。将向量 $\boldsymbol{n}$ 和 dg 带入公式(7)计算出干涉角Θ，并与 γ 比较：若小于，则修正后的光束 dg 可以作为保证熔覆质量的有效光束；若大于，则点 d_i 为无效点，需要另寻解决方案。

$$\theta=\arccos\left(\frac{\mathrm{dg}\cdot\boldsymbol{n}}{|\mathrm{dg}|\cdot|\boldsymbol{n}|}\right) \tag{7}$$

算法流程如下：

1）初始化各参数数据。

2）调用切片算法，生成预期轨迹点集信息，all 为点的总个数。

3）I=i+1，创建光束 l_i，计算 Δd 。

4）构造直线 l_b、向量 $\boldsymbol{m}$ 和向量 $\boldsymbol{v}$，比较 $\boldsymbol{m}$、$\boldsymbol{v}$ 方向关系，同向将点 d_i 存入有效链表中，返回上一步。若两向量反向，进入下一步。

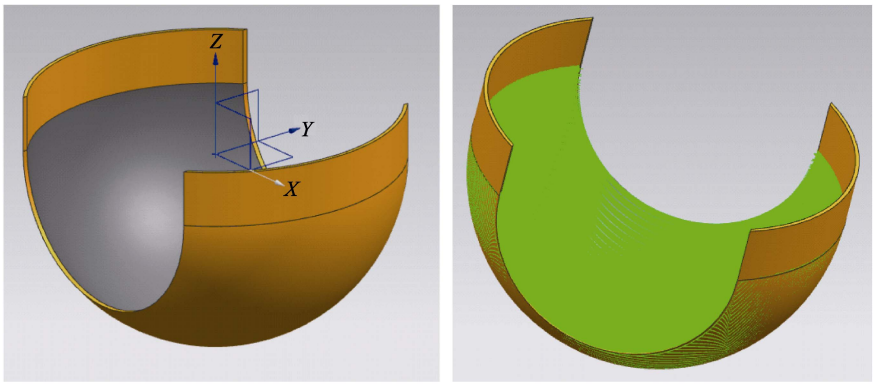
5）计算比例因子 λ，求解光束与 block 的交点 e_0，绘制 C_0 圆。

6）若Θ<γ，则光束姿态可修正，否则为无效光束。

7）当 i<all，重复步骤 3）；如果 i>all，程序结束。

2　算法应用实例

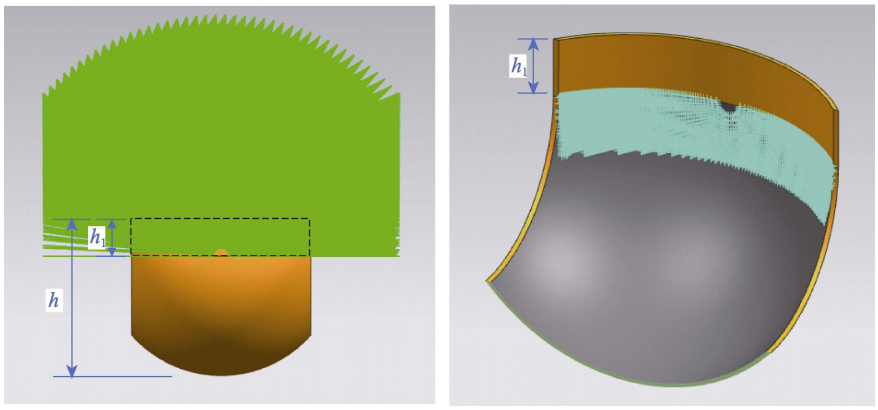
为验证本文提出的算法的可行性，编写程序进行仿真模拟。图 9 为凹曲面零件的三维模型和生成的预期点集。在扫描轨迹处创建理想光束（如图 10a），若检测到光束与零件发生干涉，标记当前点为干涉点，如图 10b，零件整体高度为 h，其中上部分 h_1 高度区域内激光与零件发生干涉，干涉点集中在受损区域边界相邻处，同时计算相应修正量，如图 11。可以看出，旋转角在 10°范围内，满足冶金涂层质量要求。图 12 为进行光束姿态调整前后对比图，红色线表示修正前的干涉光束，绿色线表示修正后的有效光束。



a 三维模型　　b 预期点集

图 9　建立零件模型

Fig.9 Build part model: a) three-dimensional model, b) expected point set



a 所有扫描激光　　b 干涉点

图 10　干涉检测

Fig.10 Interference detection: a) all scanning laser, b) interference points

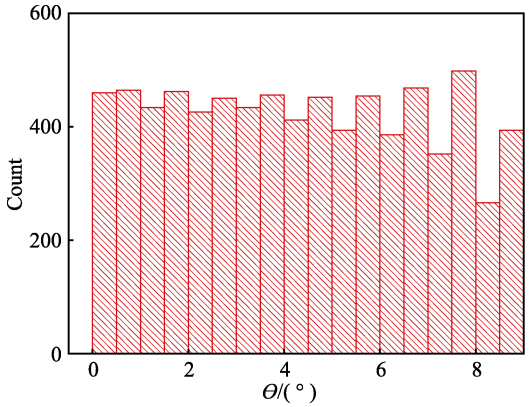


图 11　干涉量分析

Fig.11 Analysis of interferences

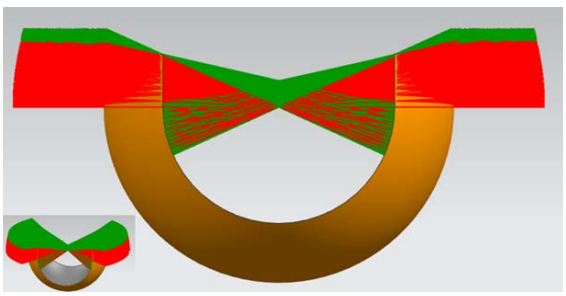


图 12　修正光束姿态

Fig.12 Correction of laserattitude

3　结论

1）生成预期路径点的情况下，考虑凹形曲面曲率因素，利用点特征划分找出可能发生碰撞的点，完成粗略检测，提升算法搜索速度。

2）进入精细检测阶段，提出干涉因子 λ，获取 block 微元对象进行计算，确定干涉位置信息。

3）提出基圆激光姿态修正算法，满足冶金涂层质量精度情况下，快速将失效点转换为有效点。该算法为熔覆层仿真优化模块提供理论支持，尤其适用于复杂结构曲面零件。

参考文献：

[1] LIAN G, YAO M, YANG Z, et al. Analysis and prediction on geometric characteristics of multi-track overlapping laser cladding[J]. International Journal of advanced manufacturing technology, 2018, 97(9): 2397-2407.

[2] PIERA A, MONTEALEGRE M, PULIDO-JIMÉNEZ J, et al. Analysis of the process parameter influence in laser cladding of 316L stainless steel[J]. Journal of manufacturing and materials processing, 2018, 2(3): 55.

[3] LIU B, LIU H P, JING X B, et al. The effect of laser process parameters on microstructure and dilution rate of cladding coatings[J]. IOP conference series materials science and engineering, 2018, 307: 012035.

[4] 高绪杰, 郭娜娜, 朱光明, 等. 激光熔覆制备高熵合金涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(6): 107-117.
GAO Xu-jie, GUO Na-na, ZHU Guang-ming, et al. Research status of high-entropy alloys coating prepared by laser cladding[J]. Surface technology, 2019, 48(6): 107-117.

[5] APOLINARIO L H R, WALLERSTEIN D, MONTEALEGRE M A, et al. Predominant solidification modes of 316 austenitic stainless steel coatings deposited by laser cladding on 304 stainless steel substrates[J]. Metallurgical and materials transactions A, 2019, 50(8): 3617-3628.

[6] 李俐群, 申发明, 周远东, 等. 超高速激光熔覆与常规激光熔覆 431 不锈钢涂层微观组织和耐蚀性对比研究[J]. 中国激光, 46(10): 174-183.
LI Li-qun, SHEN Fa-ming, ZHOU Yuan-dong, et al. Microstructure and corrosion resistance analysis of 431 stainless steel coating prepared by extreme high speed laser cladding and conventional laser cladding[J]. Chinese journal of lasers, 46(10): 174-183.

[7] 潘博, 黄怡晨, 李俐群, 等. 多次激光修复对 ZTC4 组织与硬度的影响[J]. 中国激光, 46(10): 184-190.
PAN Bo, HUANG Yi-chen, LI Li-qun, et al. Effect of multiple laser cladding repairs on microstructure and hardness of ZTC4[J]. Chinese journal of lasers, 46(10): 184-190.

[8] NAZEMI N, URBANIC R J. A numerical investigation for alternative toolpath deposition solutions for surface cladding of stainless steel P420 powder on AISI 1018 steel substrate[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2018, 96: 4123-4143.

[9] XIAO G, HUANG Y. Surface reconstruction of laser-cladding remanufacturing blade using in adaptive belt grinding[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, 101: 3199-3211.

[10] LIU J. Online measurement based tool path generation toward integrated robotic laser cladding[J]. Industrial robot: an international journal, 2013, 40(5): 494-501.

[11] ZHENG H, CONG M, DONG H, et al. CAD-based automatic path generation and optimization for laser cladding robot in additive manufacturing[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2017, 92: 3605-3614.

[12] 黄勇, 孙文磊, 陈影. 激光熔覆再制造复杂轴类零件的轨迹规划[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 53-59.
HUANG Yong, SUN Wen-lei, CHEN Ying. Trajectory planning of laser cladding remanufacture for complex shaft shaped part[J]. Infrared and laser engineering, 2017, 46(5): 53-59.

[13] 董世运, 张晓东, 徐滨士, 等. 45 钢凸轮轴磨损凸轮的激光熔覆再制造[J]. 装甲兵工程学院学报, 2011, 25(2): 85-87.
DONG Shi-yun, ZHANG Xiao-dong, XU Bin-shi, et al. Laser cladding remanufacture of 45 steel camshaft worn cam[J]. Journal of academy of armored force engineering, 2011, 25(2): 85-87.

[14] 戴士杰, 张熠, 王志平, 等. 基于 NURBS 的航空发动机叶片焊接修复的轨迹规划[J]. 焊接学报, 2015, 36(1): 23-26.
DAI Shi-jie, ZHANG Yi, WANG Zhi-ping, et al. Trajectory planning of welded repair for aero-engine blades based on NURBS curve[J]. Transactions of the China welding institution, 2015, 36(1): 23-26.

[15] 李朋飞. 零件修复中非垂直激光熔覆形貌预测与基础研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
LI Peng-fei. Non-vertical laser melt cladding morphology prediction and basic research on repaired component[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2017

[16] 孙敬荣, 卢新明. 基于混合包围盒与三角形相交的碰撞检测优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(19): 198-203.
SUN Jing-rong, LU Xin-ming. Optimized collision detection algorithm based on hybrid bounding box and intersection of triangles[J]. Computer engineering and applications, 2018, 54(19): 198-203.

[17] 于瑞云, 赵金龙, 余龙, 等. 结合轴对齐包围盒和空间划分的碰撞检测算法[J]. 中国图象图形学报, 2018, 23(12): 1925-1937.
YU Rui-yun, ZHAO Jin-long, YU Long, et al. Collision detection algorithm based on AABB bounding box and space division[J]. Journal of image and graphics, 2018, 23(12): 1925-1937.

[18] 刘金朵, 孙文磊, 黄勇, 等. 曲面零件激光熔覆轨迹的快速算法与自动生成[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 223-228.
LIU Jin-duo, SUN Wen-lei, HUANG Yong, et al. Fast algorithm and auto generation for kaser cladding trajectory on curved surface parts[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 223-228.

[19] 毕晓君, 王朝. 基于超平面投影的高维多目标进化算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(7): 1284-1293.
BI Xiao-jun, WANG Chao. Many-objective evolutionary algorithm based on hyperplane projection[J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2018, 52(7): 1284-1293.