

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20240604002

基于激光熔覆机器人的复杂曲面路径规划与实现

宋玉杰^{1,2} 吴意发¹ 祖海英¹ 陈文启¹

(1. 东北石油大学机械科学与工程学院 大庆 163318;
2. 黑龙江省石油钻采装备再制造技术创新中心 大庆 163318)

摘要: 目前激光熔覆技术可用于简单平面零件局部损伤表面的修复,但针对复杂曲面零件的激光熔覆修复还存在许多问题。为实现激光熔覆再制造技术在复杂曲面上的应用,结合逆向工程和机器人技术,开展复杂曲面激光熔覆路径的生成研究。基于逆向工程,以螺杆泵转子的螺旋曲面作为研究对象,利用等距平行平面组与试件表面求交得到熔覆路径,针对传统等弓高误差法在曲率变化较大场合的局限性,提出一种曲线离散方法离散熔覆路径,完成路径平滑过渡处理。通过机器人正逆运动学分析验证和运动链的解耦分析,完成激光熔覆机器人轨迹规划;在机器人离线编程软件 PQart 中搭建机器人激光熔覆仿真平台,进行仿真模拟。选取合适材料与工艺参数,开展复杂曲面机器人激光熔覆试验。结果表明:该方法下的激光熔覆加工路径与曲面轮廓的最大弓高误差在设定目标值范围内,熔覆曲面表面平滑,波纹度小,在曲率变化较大部位搭接良好,整体成型质量较好。研究实现了复杂曲面零件的路径规划,并验证了其合理性与有效性,可为激光熔覆技术在复杂曲面零件上的修复提供参考。

关键词: 逆向工程; 机器人; 复杂曲面; 路径规划; 激光熔覆

中图分类号: TG456; TP242

Path Planning and Realization of Complex Surface Based on a Laser-cladding Robot

SONG Yujie^{1,2} WU Yifa¹ ZU Haiying¹ CHEN Wenqi¹

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University,
Daqing 163318, China;

2. Heilongjiang Petroleum Drilling Equipment Reinforcement Technology Innovation Center,
Daqing 163318, China)

Abstract: Currently, laser-cladding technology is used to repair local damaged surfaces of simple plane parts; however, remain several problems in the laser cladding repair of complex curved parts. The flexibility and applicability of laser cladding remanufacturing have been greatly improved by employing industrial robot technology and laser cladding technology in conjunction. This led to a new idea for the laser-cladding processing of complex surfaces. The curvature radius of a complex surface varies widely, and the normal vector of every point on the surface is irregular, increasing the difficulty of laser cladding path planning. Trajectory planning is employed to design a reasonable cladding path to improve cladding quality, which is also the goal of domestic and foreign scholars for conducting in-depth research on the cladding path. The laser cladding path generation of complex surfaces was studied in combination with reverse engineering and robot technology to realize the application of laser cladding remanufacturing technology on complex surfaces. The solid model of complex surface parts was obtained based on reverse engineering technology. A three-dimensional laser scanner was used to collect the point cloud data of complex surface parts, and the point cloud data was

基金项目: 国家自然科学基金 (52374383)。

Fund: National Natural Science Foundation of China (52374383).

收稿日期: 2024-06-04; 修改日期: 2024-09-26; 接受日期: 2024-12-12; 上线日期: 2025-03-21。

Received June 4, 2024; Revised September 26, 2024; Accepted in revised form December 12, 2024; Available online March 21, 2025.

引用格式: 宋玉杰, 吴意发, 祖海英, 等. 基于激光熔覆机器人的复杂曲面路径规划与实现[J]. 中国表面工程, 2025, 38(4): 335-346.

Citation format: SONG Yujie, WU Yifa, ZU Haiying, et al. Path planning and realization of complex surface based on a laser cladding robot[J]. China Surface Engineering, 2025, 38(4): 335-346.

preprocessed to obtain the rotor triangular surface model. The complex surface was fitted according to the NURBS surface fitting theory and the reverse solid model was obtained. The laser cladding path planning for complex surfaces was also studied. The initial cladding path was obtained using the intersection method between the isometric cutting plane and triangular surface. The initial path was discretized based on the equal arch height error method, and the normal vector of the interpolation points was estimated using a normal vector. According to the scanning sequence, the local Cartesian coordinate system of the interpolation points was established for obtaining the pose of each interpolation point, and the path smoothing was performed on the laser coating path. Research on kinematics analysis and trajectory planning of laser cladding robot was conducted. The mathematical model of the six-axis industrial robot was established by using the improved D-H parameter method, the forward and inverse kinematics equations of the robot were deduced and verified, and the kinematic relationships and decoupling in the machining process were analyzed. A simulation platform for laser cladding trajectory planning was developed. An off-line programming software, PQart, was used to create the machining scene, conduct path simulation, verify the feasibility of the trajectory, and post the machining code. A multibody model of the laser coating platform was built in MATLAB Simulink, and the angular change value of each joint in the machining path was considered the joint drive. The motion characteristic curves of the angular displacement, angular velocity, and angular acceleration of each joint were analyzed over time. Combined with the previous studies, suitable materials and process parameters were selected to perform laser-cladding experiments of complex curved surface robots. The rationality and effectiveness of path planning were verified by analyzing the operating posture of the robot and the surface topography of the curved cladding layer in the actual machining process. The results indicated that the maximum arch height error between the laser cladding processing path and surface contour under the proposed method was within the set target value range, the surface of the cladding surface was smooth, the ripple was small, the overlap was good in the part with a large curvature change, and the overall molding quality was good, thereby verifying the rationality and effectiveness of the path planning. Thus, this study provides a reference for applying laser cladding remanufacturing on complex surfaces.

Keywords: reverse engineering; robots; complex surface; path planning; laser cladding

0 前言

工业机器人技术与激光熔覆技术的结合应用,极大地提高了激光熔覆再制造的灵活性与适用性^[1],为复杂曲面的激光熔覆加工提供了新思路^[2]。复杂曲面的曲率半径变化范围广,曲面上每一点的法向矢量没有规律性,增加了激光熔覆路径规划的难度。轨迹规划的目的是设计出合理的熔覆路径,从而提高熔覆质量,这也是国内外学者对熔覆路径做深入研究的最终目的所在。黄勇等^[3]直接以零件的逆向点云模型为研究对象,通过平面与点云求交得到以密集离散点表示的近似激光扫描路径,避免了反求建模的过程。CALLEJA 等^[4]对发动机叶片的激光熔覆过程进行模拟,确定了熔覆路径,得到了最佳工艺参数组合。JIN 等^[5]针对受损表面建立了 CLFD 模型利用切片法生成加工轨迹,提高了涂层表面的平整度。YAN 等^[6]提出一种以熔覆缝隙截面面积最大化为目标的优化方法,成功实现大尺寸焊接接头的熔覆修复并为每一道熔覆道提供可行的熔覆道和熔覆参数。董玲等^[7]针对叶片的凹面部位,采用等距的平行截面和三角网格模型相交确定了插补点的位置。黄海博等^[8]以切平面与点云带宽平面

的交点确定了激光扫描轨迹,并根据等弓高误差法确定加工点,验证了轨迹规划的可行性。ALESSANDRO 等^[9]通过将最优控制问题转化为凸优化问题来解决转矩控制刚性机器人的问题,用于优化规划柔性关节机器人沿参数化路径的运动。黄海博等^[10]基于 NURBS 曲面拟合的几何模型重构方法,优化获取稳定的激光功率密度的路径规划方法。岳晴晴^[11]研究了 NURBS 曲线与速度曲线结合规划,使机器人各关节加速度曲线平滑连续,有效减少冲击,并进一步对螺旋线使用遗传算法进行基于时间最优的轨迹规划。祖海英等^[12]基于逆向工程实现 PDC 钻头的再制造,利用等距平面族 Γ 与修复部位相交获取熔覆路径,并进行仿真模拟,优化机器人加工轨迹,实现了对复杂曲面的激光熔覆。

本文基于逆向工程,对螺旋体曲面进行数据采集与处理,得到实体模型,采用截切平面组与三角面片求交的方法得到熔覆初始路径;针对等弓高误差法的局限性,提出等距曲线切线法离散熔覆路径,完成螺旋体的激光熔覆路径规划与头位姿确定;通过机器人运动链的解耦分析和路径平滑过渡处理,完成激光熔覆机器人轨迹规划,进行机器人激光熔覆仿真模拟;开展基于机器人复杂曲面激光熔覆实验,验证复杂曲面零件路径规划的合理性和有效性,可为激

光熔覆技术在复杂曲面零件上的修复提供参考。

1 激光熔覆路径规划与位姿确定

1.1 复杂曲面的逆向建模

本文以螺杆泵转子作为复杂曲面激光熔覆路径规划的研究对象, 使用三维激光扫描仪对转子表面进行数据采集, 将点云数据转化为 STL 模型, STL 文件由逼近三维实体模型表面的多个三角面片构成, 为后续的路径规划做准备。STL 文件可能存在缺陷, 须要在逆向软件 Geomagic Design X 中修复模型面片缺陷, 并对冗余的数据进行精简, 最终获得较为完整的转子表面模型, 如图 1 所示。

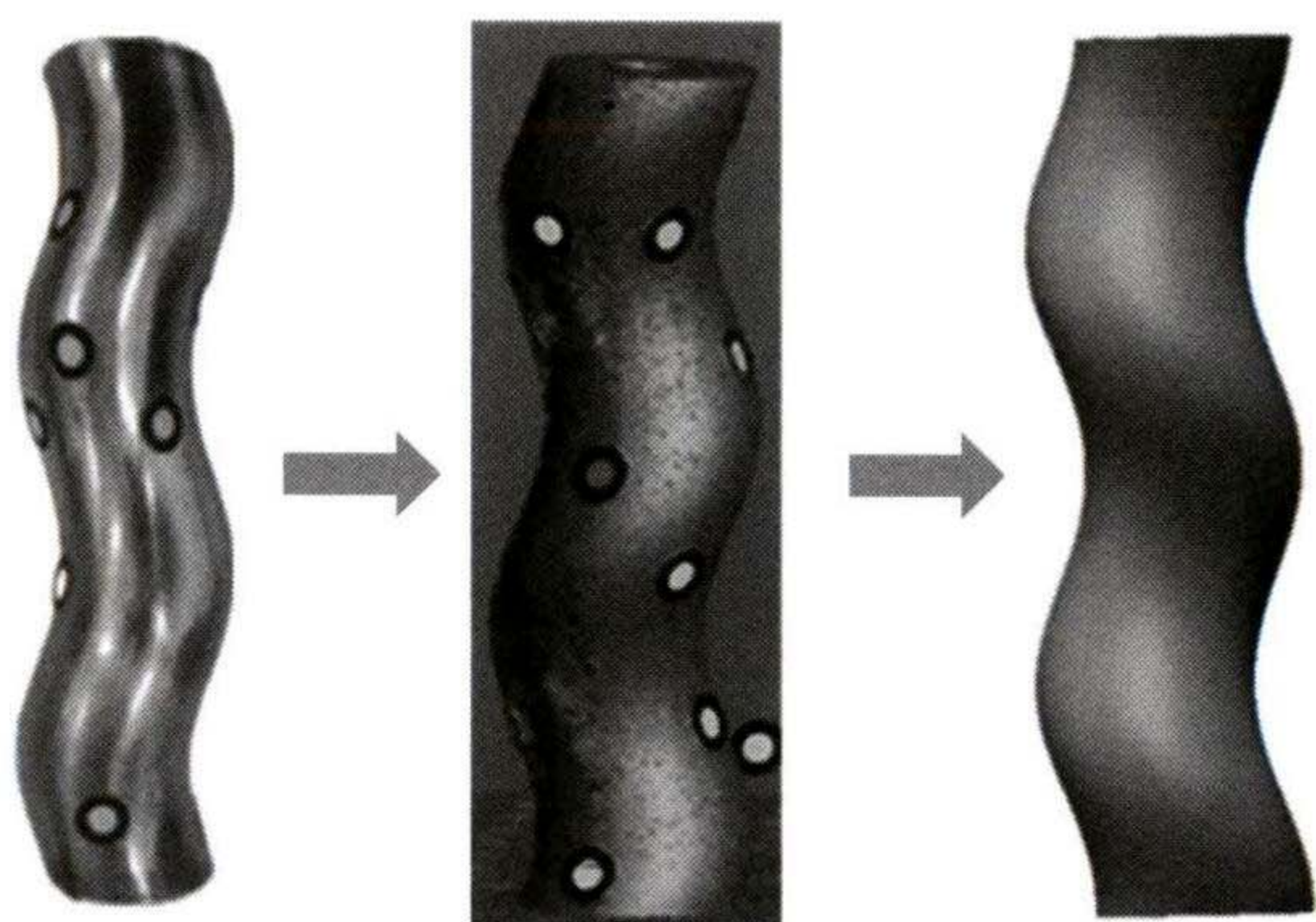


图 1 转子表面模型的获取

Fig. 1 Acquisition of rotor surface model

在 Geomagic studio 中对转子点云数据进行领域划分, 利用 NURBS 曲线进行曲面拟合并拼接, 再利用三维建模软件 Solidworks 将拼接好的曲面体进行实体建模^[13], 最终将逆向模型与标准模型进行 3D 对比, 整体误差在 ± 0.15 mm 之内, 满足精度要求。

1.2 激光熔覆路径的规划与离散

激光熔覆加工曲面是由单道熔覆层进行多次搭接而成的, 得到的熔覆层表面平整度主要受接率的影响^[14]。因此建立理论搭接模型^[15]: 假设单道熔覆层高度 h , 宽度 w , 多道搭接后表面波峰于波谷的高度差 h_s , 相邻截切平面间距为 d , 相邻两道熔覆中心为 O_1 、 O_2 , 如图 2 所示。

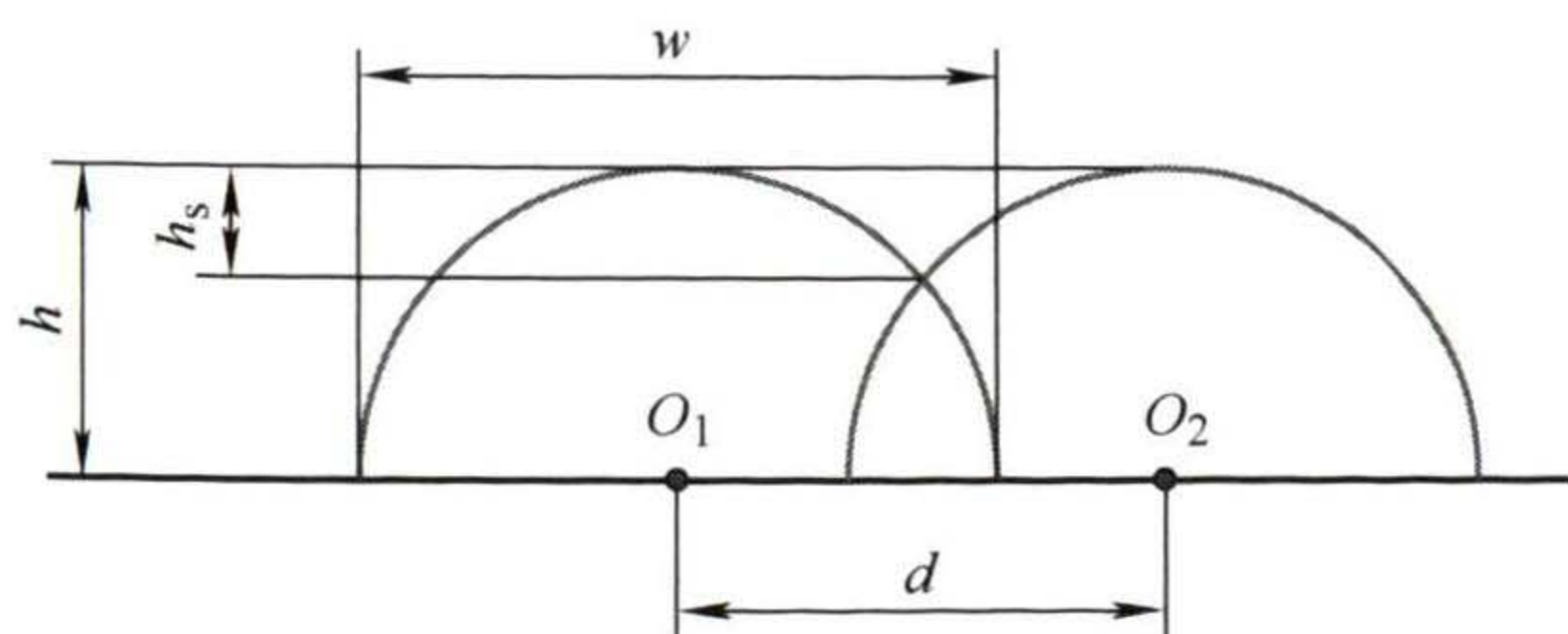


图 2 理论搭接模型

Fig. 2 Theoretical lap model

由图 2 可知, h_s 越小, 熔覆层表面形貌越好, 通过测量单道熔覆层的高度 h , 宽度 w , 计算得到间距 d 以及搭接率 k , 如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} d = \frac{\left[\frac{(w/2)^2 + h^2}{2h} \right]^2 \arcsin(wh) - (w/2) \left[(w/2)^2 - h^2 \right]}{h} \\ k = \frac{w-d}{w} \end{cases} \quad (1)$$

不同搭接率下多道激光熔覆层会有以下三种不同效果, 如图 3 所示。

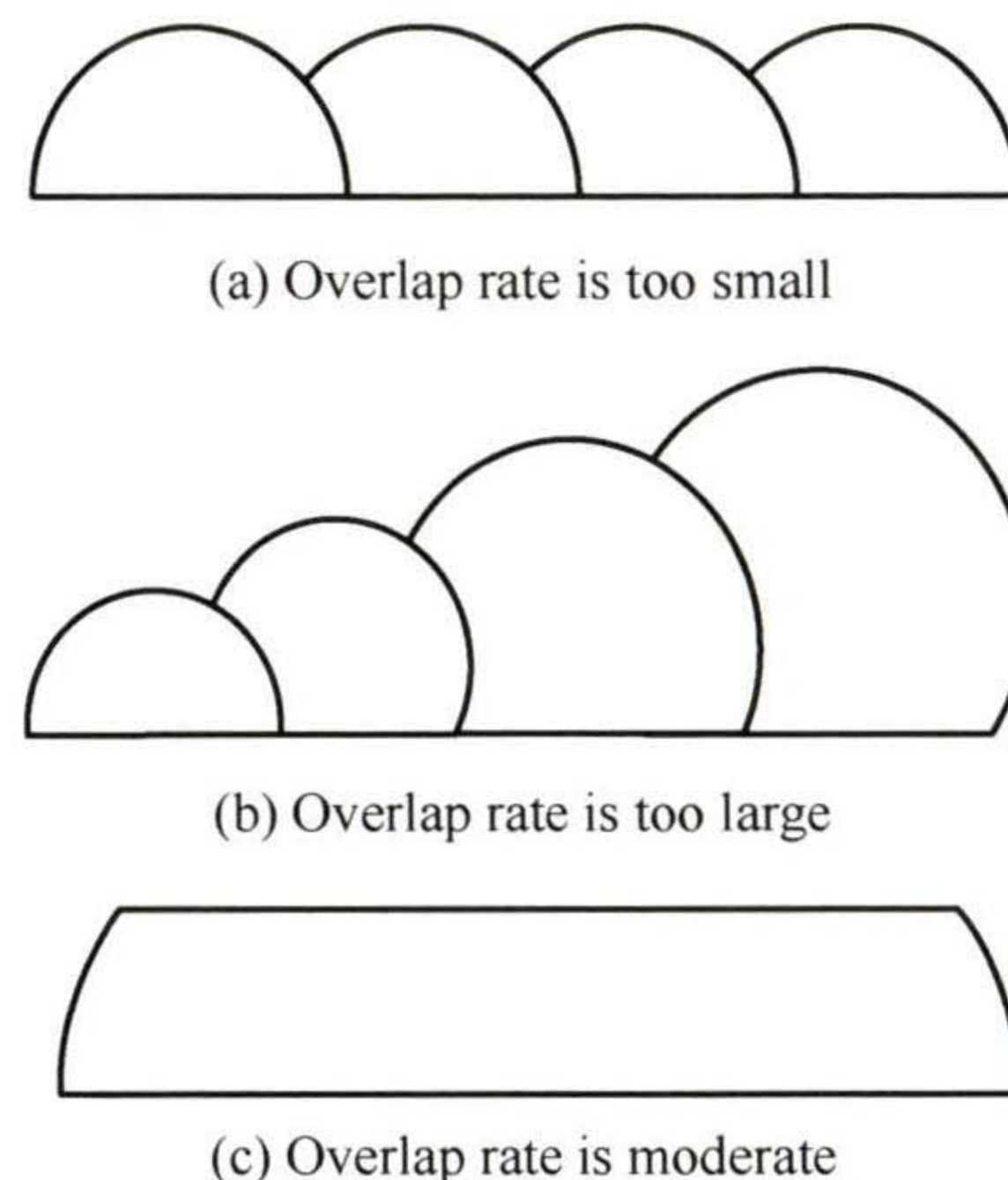


图 3 不同搭接率下多道激光熔覆层形貌图

Fig. 3 Morphology of multi-channel laser cladding layer at different bonding rates

(1) 若搭接率过小, 表面形貌会有明显不平整现象, 熔覆层间会产生塌陷, 两道之间没有形成有效结合。

(2) 若搭接率过大, 两道之间的重叠部分过大, 熔覆层会越堆越高, 无法完成修复要求。

(3) 搭接率适中时, 熔覆层表面大致成为一个平面, 熔覆效果良好, 能够满足修复要求。

在确定切片方向与切片间距后, 按照截切平面与三角面片模型求交的方法^[16]计算得到螺旋体的激光熔覆初始路径, 即用等距平行平面组切割零件的 STL 模型, 等距平行平面组之间的间距即为相邻两道之间的距离。计算切平面与三角面片网格生成的交点, 相邻两个交点确定一条直线, 有序连接所有线段即可获得初始熔覆路径, 如图 4 所示。

在计算三角面片与切平面的交点的过程中涉及以下几种空间位置关系, 见表 1, 不同的空间位置关系, 交点坐标的求解不同。

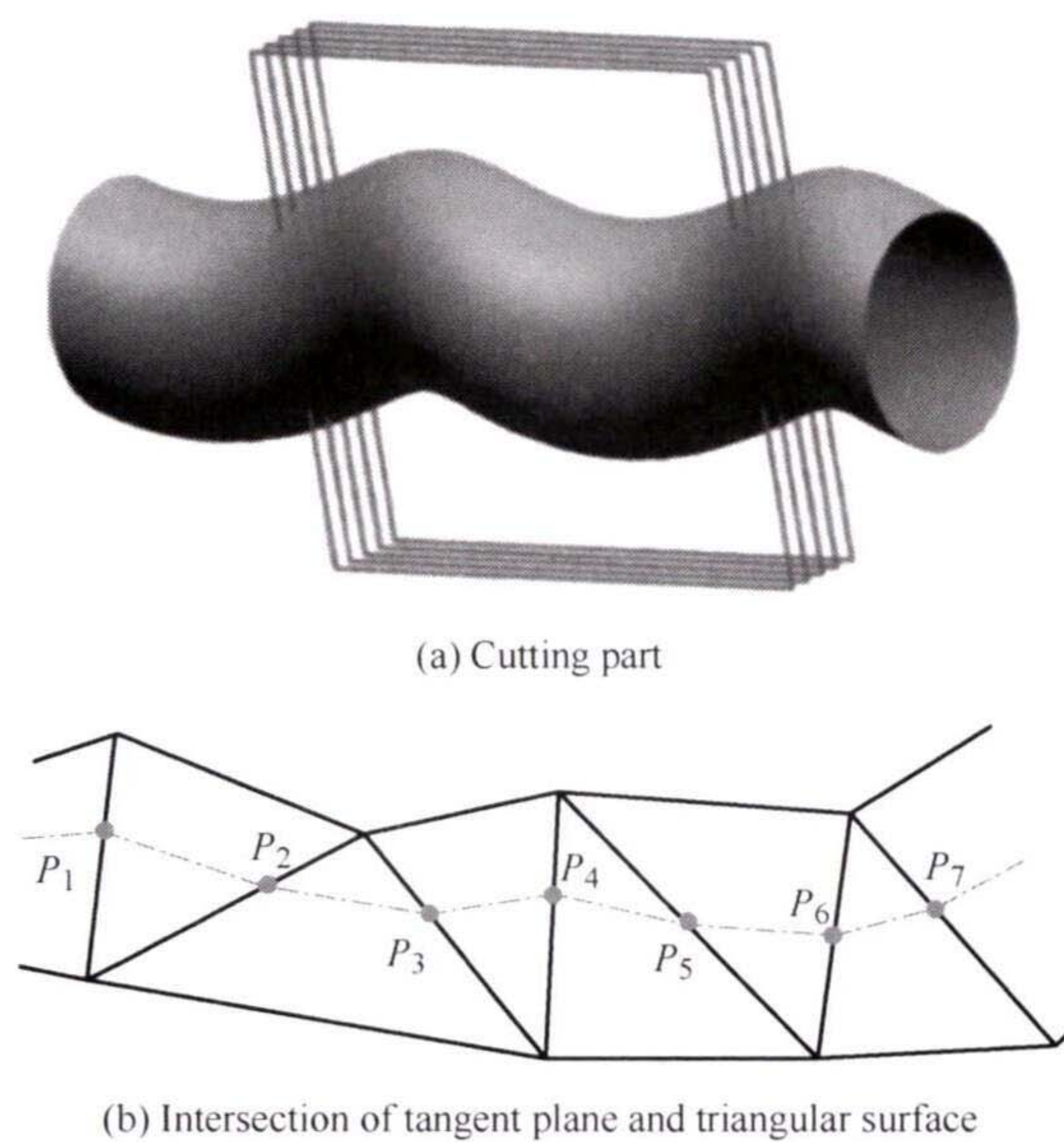


图4 激光熔覆路径的获取

Fig. 4 Acquisition of laser cladding path

表1 三角面片与切平面的位置关系

Table 1 Position relation between the triangular surface and the tangent plane

Serial number	Type	Instructions
1		Irrelevance
2		A vertex falling on the plane produces an intersection
3		Two edges cross the plane to produce two points of intersection
4		An edge cuts the plane and a vertex falls on the plane producing two points of intersection
5		An edge falling on the plane produces two points of intersection

得到激光熔覆初始路径后, 离散曲线轨迹。为了保证熔覆质量, 熔覆路径的离散须要满足弓高要求。传统的等弓高误差法虽满足弓高要求, 但在曲率变化较大的场合存在局限性, 因此提出基于等弓高误差的等距曲线切线法, 如图5所示。

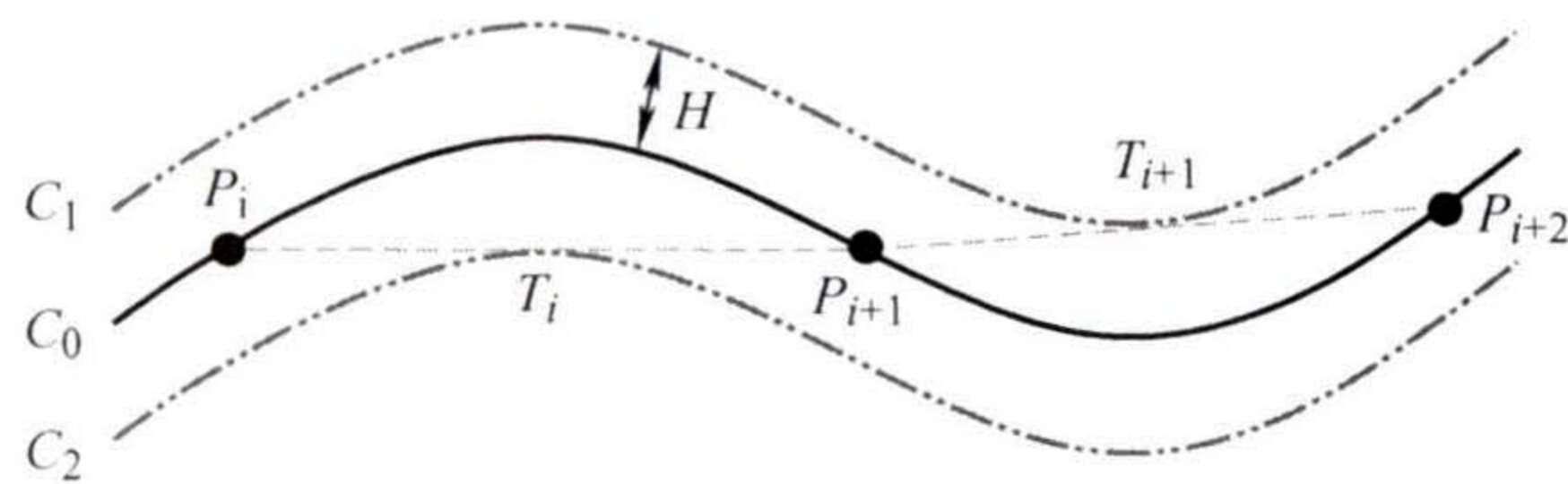


图5 等距曲线切线法

Fig. 5 Isometric curve tangent method

(1) 将原曲线 C_0 沿法线方向上下偏移 H 距离, 得到等距曲线 C_1 、 C_2 。

(2) 将 C_0 的端点作为初始点 P_0 , 作以 P_0 为起点与 C_1 、 C_2 相切的射线 T_0 , 通过筛选得到射线 T_0 与 C_0 的另一交点 P_1 。

(3) 将 P_1 作为新的起始点重复上述步骤, 得到插补点集 $D=\{P_i|P_i=(x_i, y_i, z_i), i=0, 1, 2, \dots, n\}$ 。

根据等距曲线切线法, 对激光熔覆路径进行等弓高离散, 如图6所示。

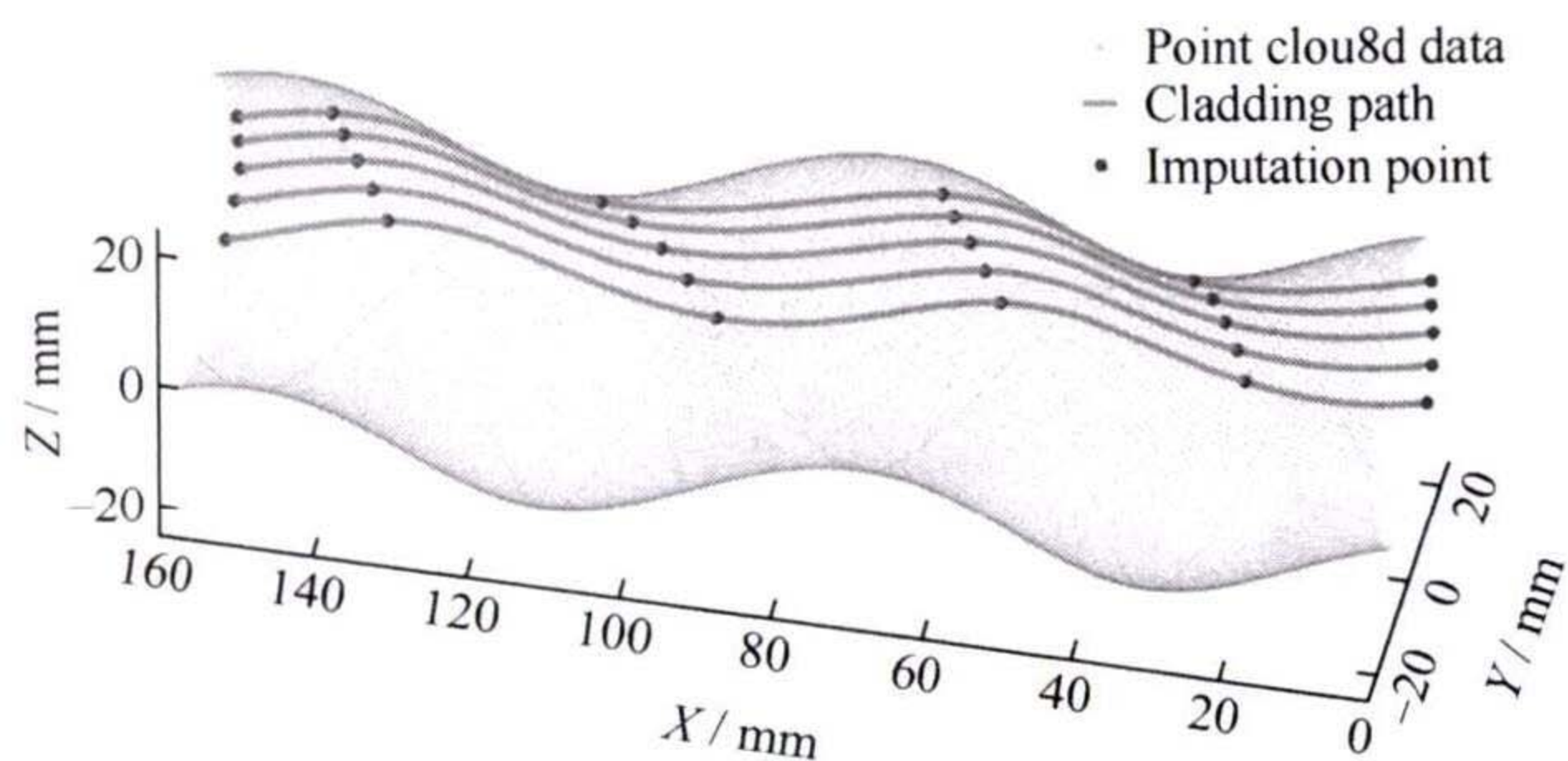


图6 熔覆路径及其插补点

Fig. 6 Cladding path and its interpolation points

1.3 插补点与激光头位姿确定

为保证曲面螺旋体的熔覆质量, 应尽量保持激光束方向与扫描点的法矢重合。基于局部表面拟合的方法^[17]进行插补点的法矢量估计, 将拟合平面的法矢量作为曲面上该点的法矢, P_i 为插补点, K 为最近邻相邻点的个数, P 为这些近邻点集 $\alpha=\{pn_i|pn_i=(x_i, y_i, z_i), i=0, 1, 2, \dots, k\}$ 拟合局部平面, $\mathbf{n}$ 为平面 P 的法矢量, d 为 P 到坐标原点的距离, 如式(2)所示:

$$P(\mathbf{n}, d) = \arg \min_{(\mathbf{n}, d)} \sum_{i=1}^k (\mathbf{n} \cdot P_i - d)^2 \quad (2)$$

插补点近邻点集 α 拟合出的平面的法矢量即为当前插补点的法矢。平面 P 的法矢量可由分析得到, 平面 P 经过插补点 K 邻域点的质心 P_c , 如式(3)所示。

$$P_c = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k p \cdot n_i \quad (3)$$

平面 P 的法矢量, 即为 M 的最小特征值所对应的特征矢量, 如式(4)所示:

$$M = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (P_i - P_c)(P_i - P_c)^T \quad (4)$$

通过上述方法得到的法矢量具有二义性, 进行重定向得到插补点的法矢。

在激光熔覆加工过程中存在着运动耦合, 为了简化分析, 须要建立插补点处的笛卡尔坐标系, 如图7所示。将插补点法矢方向作为插补点坐标系的 z 轴方向; x 轴方向由当前插补点指向下一个插补点; y 轴由 x 、 z 轴确定, 具体计算由式(5)所示, 插补点位姿如图8所示。

$$\begin{aligned} X_i &= P_i P_{i+1} - (P_i P_{i+1} \cdot Z_i) \\ Y_i &= X_i \times Z_i \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $P_i P_{i+1}$ 为相邻插补点方向矢量; X_i 为插补点 x 轴的方向矢量; Y_i 为插补点 y 轴的方向矢量; Z_i 为插补点的法矢。

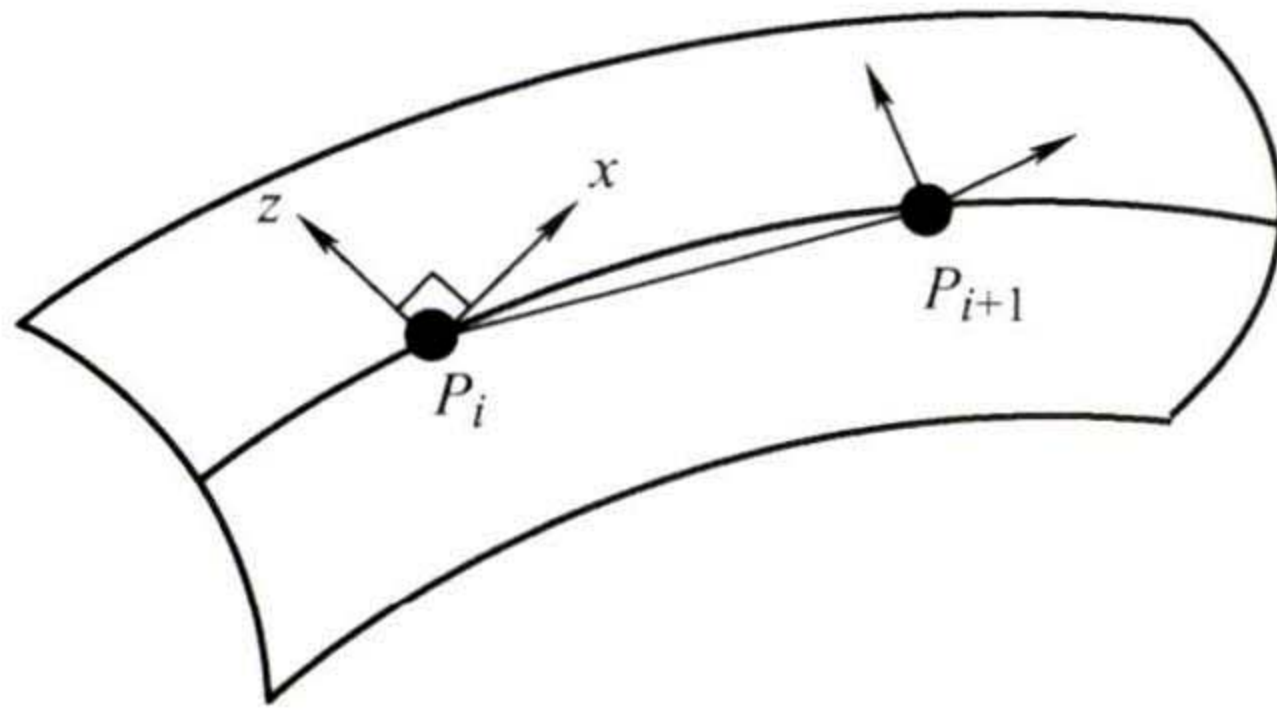


图7 插补点坐标系

Fig. 7 Interpolating point coordinate system

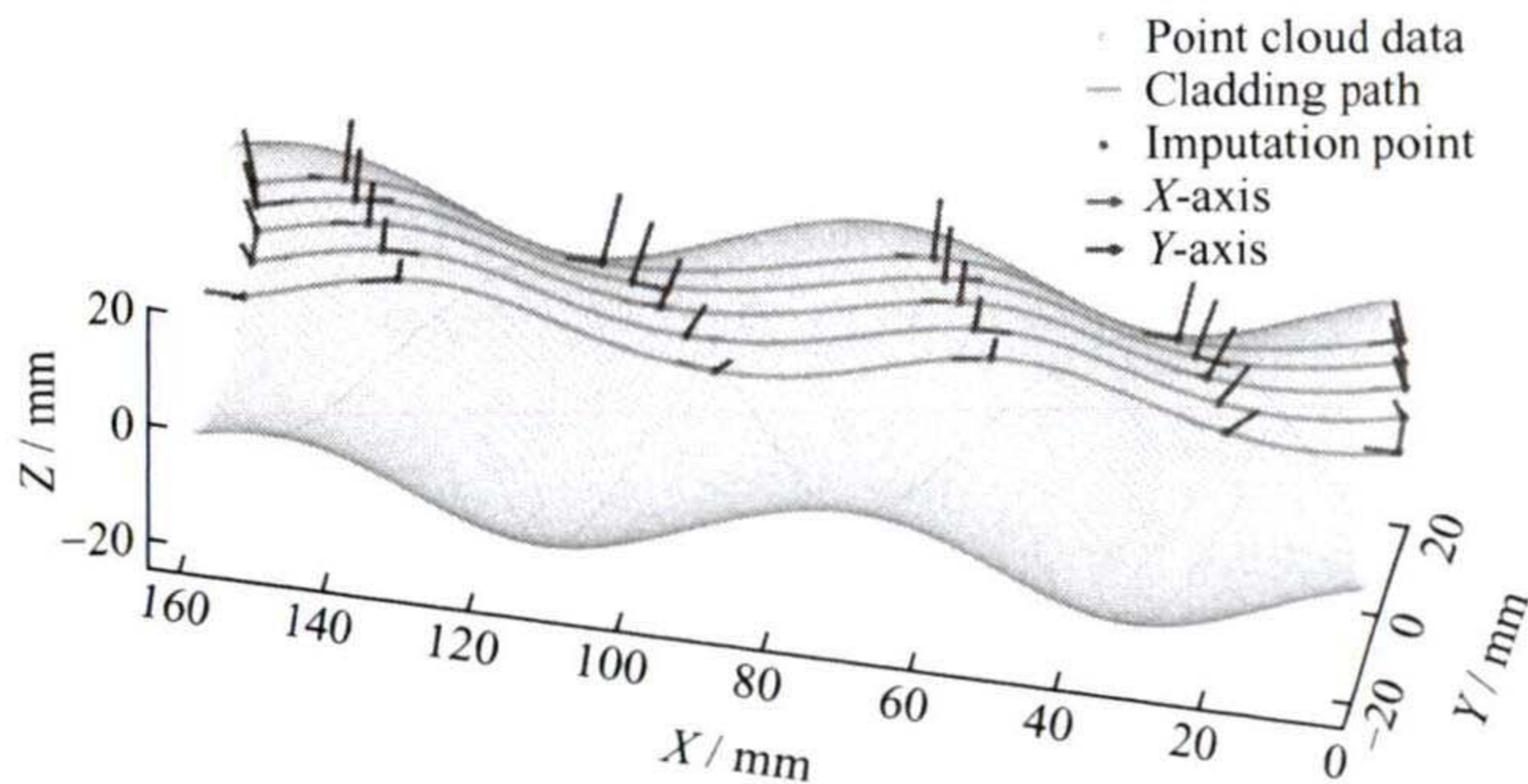


图8 插补点位姿

Fig. 8 Interpolation point pose

已知插补点的位置和各坐标轴方向矢量, 将各坐标轴的方向矢量化为单位矢量, 并将插补点位置与之拼接, 如式(6), 即得到插补点的位姿矩阵:

$$T_{pi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & p_{ix} \\ n_{ix} & n_{iy} & n_{iz} & p_{iy} \\ 0 & 0 & 0 & p_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中, n_{ix} 、 n_{iy} 和 n_{iz} 为补点坐标系各轴的矢量单位化; p_{ix} 、 p_{iy} 和 p_{iz} 为插补点在工件坐标系中的坐标值。在激光熔覆过程中, 为避免激光头损坏, 须要将激光

头沿加工曲面法矢方向向外延伸一定的距离, 则有激光头处的位姿矩阵:

$$T_{li} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & p_{ix} \\ n_{ix} & n_{iy} & n_{iz} & p_{iy} \\ 0 & 0 & 0 & p_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.4 多段路径平滑过渡轨迹规划

在激光熔覆加工过程中, 如果直接按照点到点的加工方式, 插补点处会发生机器人末端位姿的跳变, 造成抖动, 因此须对路径进行平滑过渡处理^[18]。

如图9所示, 已知三个目标点 P_0 、 P_1 和 P_2 , 过渡节点 P_{T1} 、 P_{T2} 、 P_{T3} 和 P_{T4} , 过渡圆弧圆心与半径 C_1 、 C_2 与 r_1 、 r_2 , 两段相邻直线间的夹角为 θ_1 、 θ_2 。

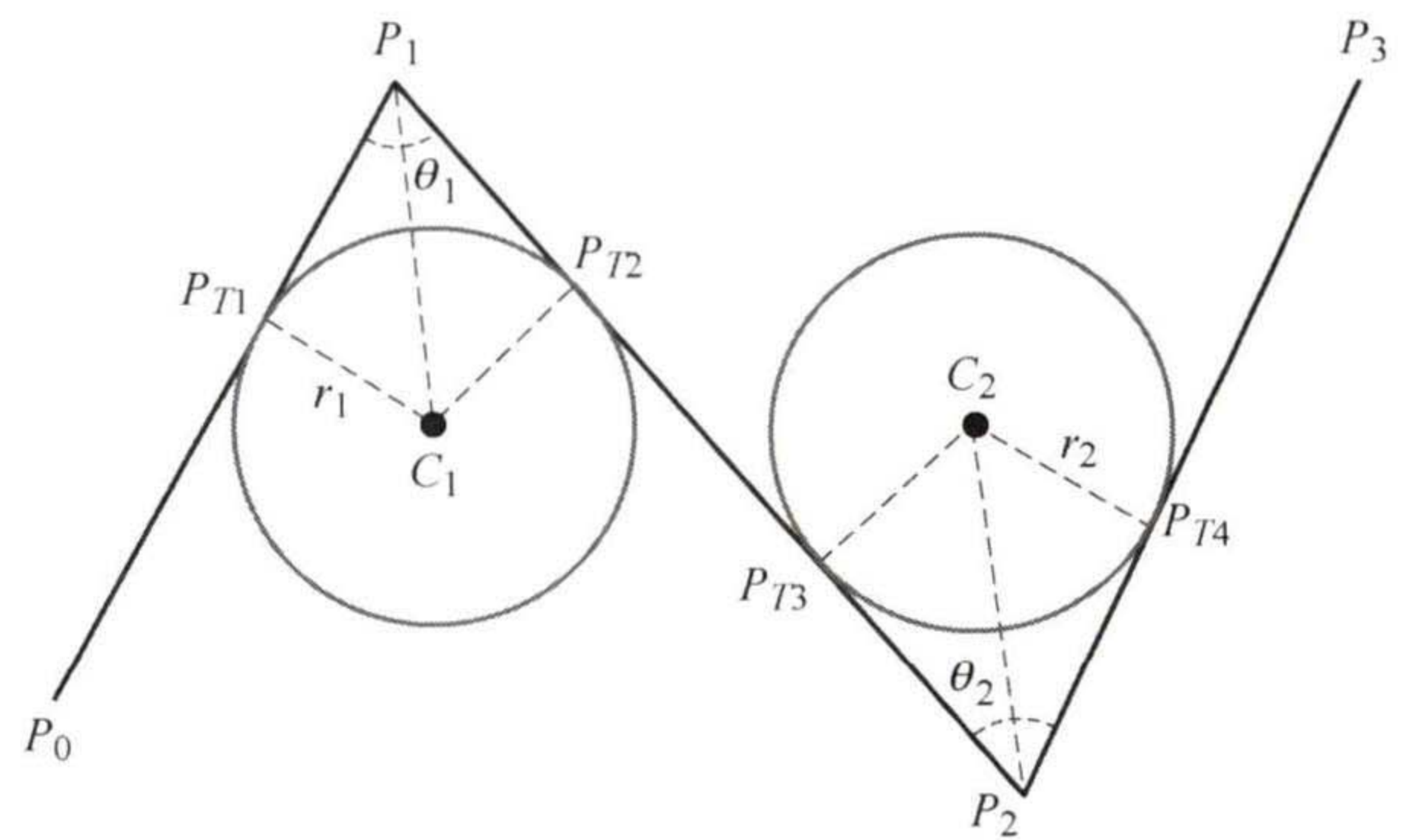


图9 圆弧过渡模型

Fig. 9 Arc transition model

(1) 根据过渡模型的几何关系计算夹角 θ_1 、 θ_2 , 以及过渡节点 P_{T1} 、 P_{T2} :

$$\theta_1 = \arccos \frac{P_1 P_0 \cdot P_1 P_2}{|P_1 P_0| |P_1 P_2|}, \quad \theta_1 \in (0, \pi) \quad (8)$$

(2) 计算过渡圆弧圆心 C_1 及分割路径长度:

$$\begin{cases} P_{T1} M_1 = \frac{1}{2} P_{T1} P_{T2} \\ P_1 C_1 = \frac{|P_1 C_1|}{|P_1 M_1|} P_1 M_1 \end{cases} \quad (9)$$

由三角形 $\triangle C_1 P_1 P_{T1}$ 函数关系可得:

$$|P_1 C_1| = \frac{r_1}{\sin(\theta_1 / 2)} \quad (10)$$

联立方程可得到 C_1 和 M_1 的坐标, 由上述两步可求得所有过渡节点以及各段路径长:

$$\begin{cases} d_1 = |P_0 P_{T1}| \\ d_2 = (\pi - \theta_1) r_1 \end{cases} \quad (11)$$

根据上述平滑过渡处理, 在 Matlab 语言环境下, 选取激光熔覆路径中的一条轨迹^[19], 在相邻的两段轨迹之间插入一段圆弧, 将原轨迹分成若干直

线与圆弧，设置插值间隔 20 ms，进行编程仿真验证，结果如图 10 所示。

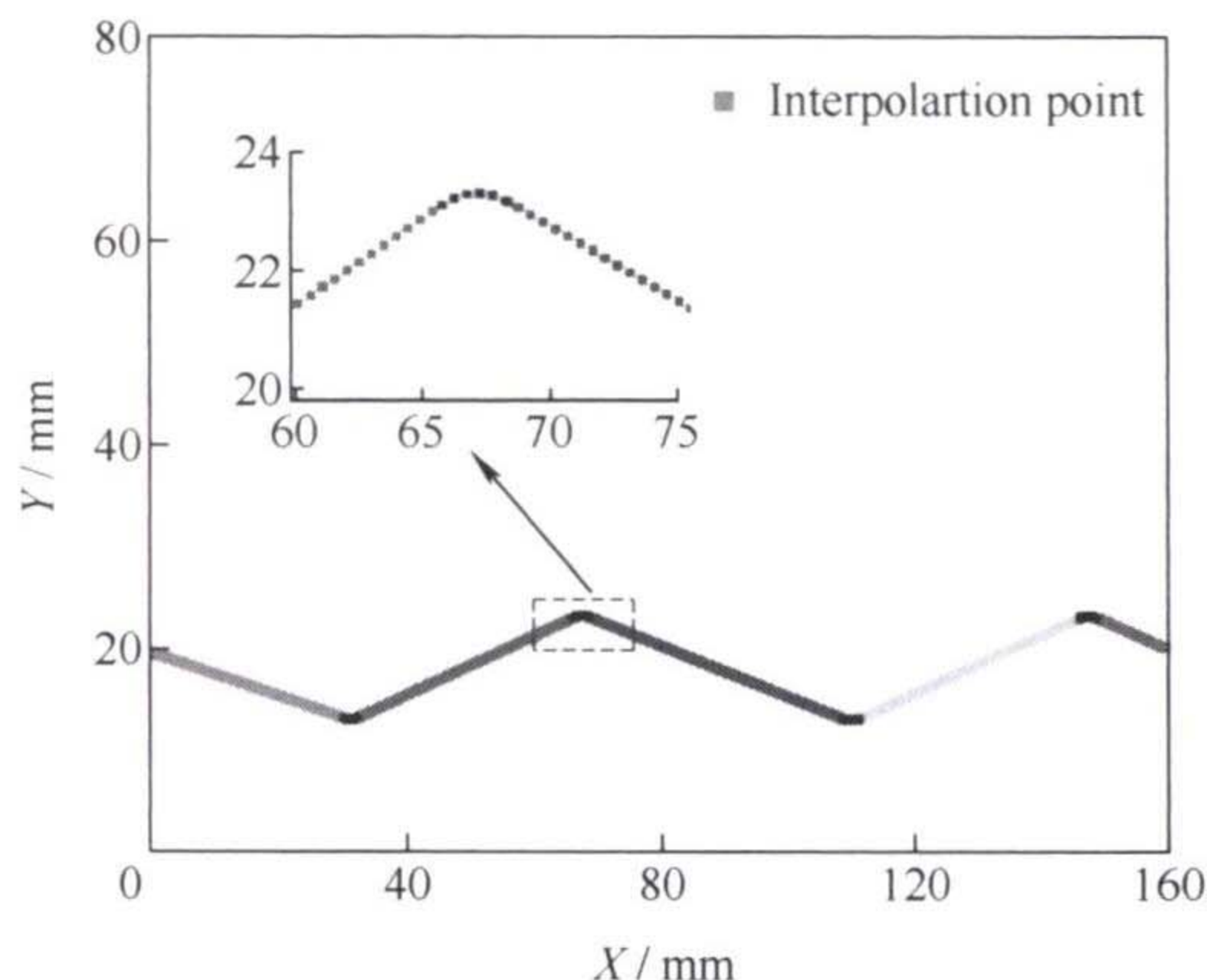


图 10 多段路径平滑过渡轨迹规划

Fig. 10 Multi-segment path smooth transition trajectory planning

由图 10 可知，6 个路径点之间产生 5 段直线轨迹，经过平滑处理后分成 5 段直线与 4 段圆弧，其中直线段按照空间直线轨迹规划算法离散，圆弧段按照空间圆弧轨迹规划算法离散，各段离散均匀，能够实现插补点处的平滑过渡。

2 机器人运动学仿真和后置处理

2.1 机器人模型建立

本文选用的机器人为新时达 SA1400 型号六轴串联机器人，如图 11 所示。SA 系列机器人是专用的焊接机器人，具有外形紧凑、体积小、精度高等优点。



图 11 新时达 SA1400

Fig. 11 STEP SA1400

在机器人各关节处建立关节坐标系， $\{O\}$ 为机器人基坐标系， $\{O_1\} \sim \{O_6\}$ 为机器人各个关节相对于基坐标系的关节坐标系，如图 12 所示，表 2 为机

器人 D-H 参数表。

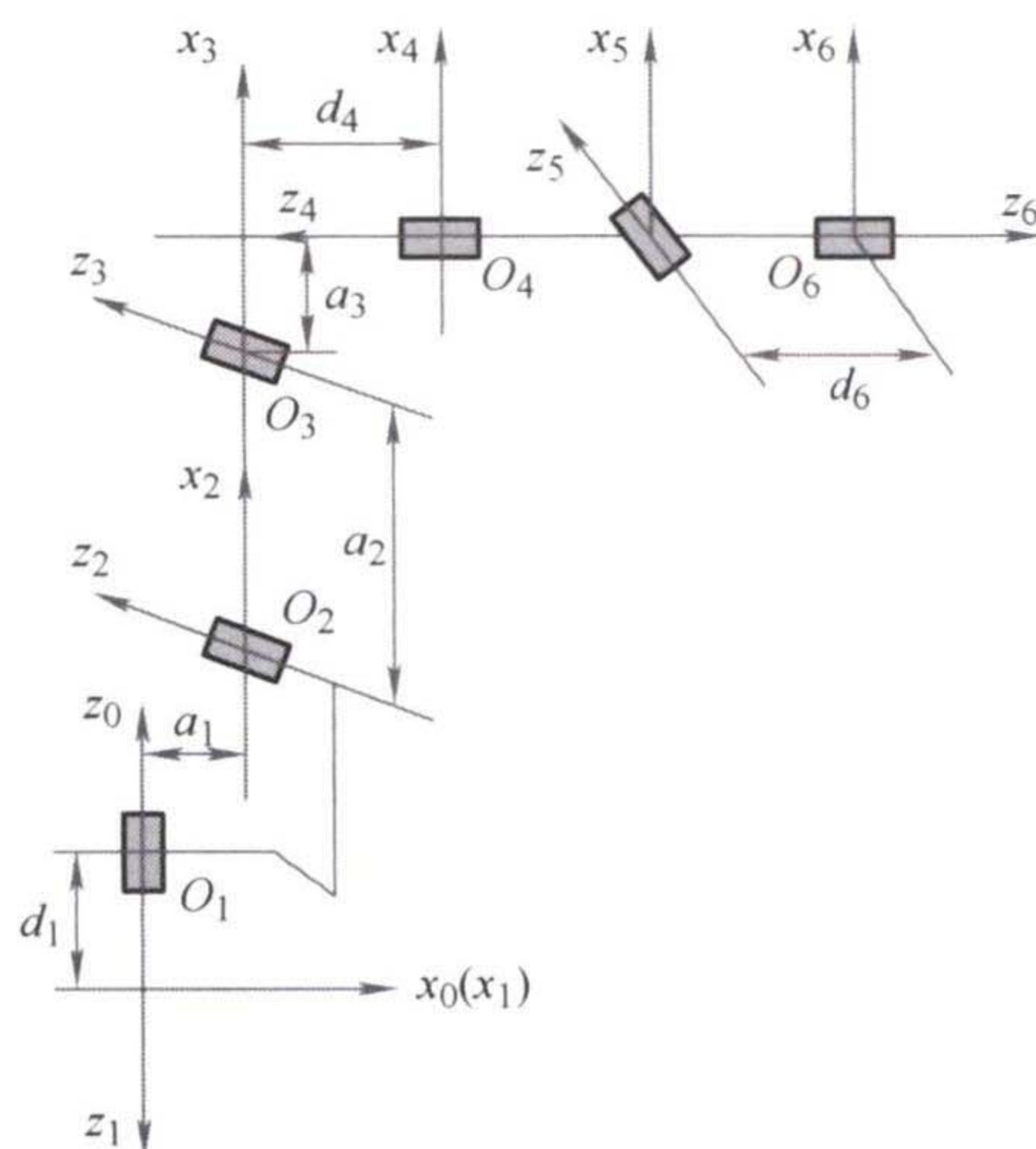


图 12 SA1400 机器人连杆坐标系

Fig. 12 SA1400 robot linkage coordinate system

表 2 机器人 D-H 参数表

Table 2 Robot D-H parameter table

Joint	Torsion angle $\alpha_{i-1} / (^{\circ})$	Joint angle $\theta_i / (^{\circ})$	Setover d_i / mm	Rod length a_{i-1} / mm	Joint range $\theta_{\text{lim}} / (^{\circ})$
1	180	θ_1	-415	0	$[-160, 160]$
2	90	$\theta_2(-90)$	0	180	$[-80, 145]$
3	0	θ_3	0	590	$[-190, 65]$
4	90	θ_4	-625	115	$[-165, 165]$
5	-90	θ_5	0	0	$[-115, 115]$
6	-90	$-\theta_6$	98	0	$[-360, 360]$

使用 Matlab Robotics Toolbox 机器人工具箱建立 SA1400 型机器人的数学模型，如图 13 所示。

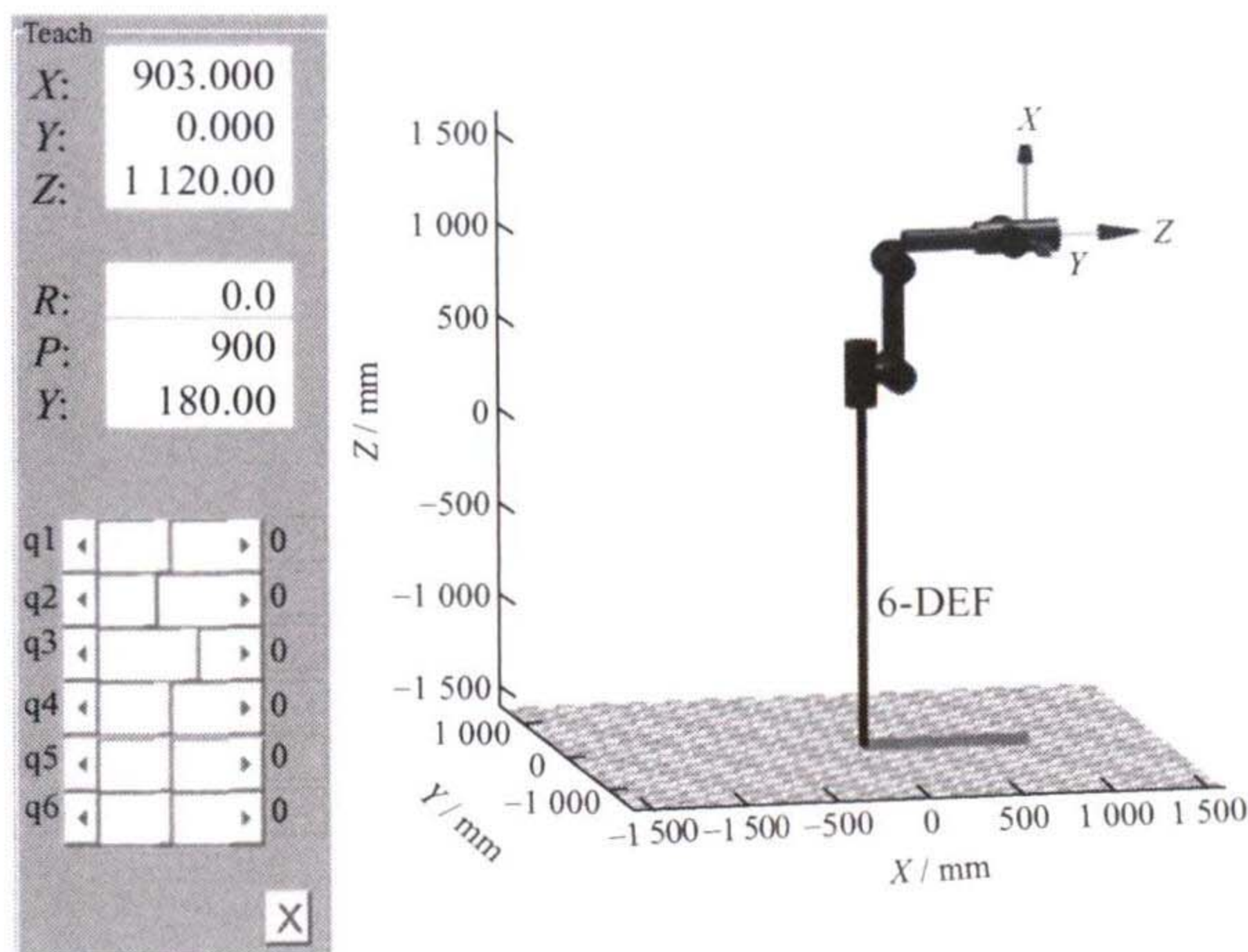


图 13 SA1400 机器人数学模型

Fig. 13 Mathematical model of SA1400 robot

2.2 机器人正运动学

根据已知机器人各关节角度，计算出机器人末端在笛卡尔坐标系中的位姿，称为机器人的正运动

学求解。根据坐标系变换的链式法则, 坐标系 $\{O_i\}$ 到坐标系 $\{O_{i+1}\}$ 的变换矩阵可以写成:

$$\begin{aligned} {}^{i-1}_i \mathbf{T} &= \text{Rot}(x, \alpha_{i-1}) \text{Trans}(a_{i-1}, 0, 0) \times \\ &\quad \text{Rot}(z, \theta_i) \text{Trans}(0, 0, d_i) = \\ &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $c\theta_i = \cos \theta_i$, $s\theta_i = \sin \theta_i$, $c\alpha_{i-1} = \cos \alpha_{i-1}$, $s\alpha_{i-1} = \sin \alpha_{i-1}$ 。

根据机器人的 MD-H 参数表将各关节变量代入式 (12), 得到相邻关节间的位姿变换矩阵:

$${}^0_1 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ -S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 415 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$${}^1_2 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & 180 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^2_3 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & 590 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$${}^3_4 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & 115 \\ 0 & 0 & -1 & 625 \\ S_4 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$${}^4_5 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S_5 & -C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$${}^5_6 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 98 \\ -S_6 & -C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中, $S_i = \sin \theta_i$, $C_i = \cos \theta_i$ 。

已知 6 个关节连杆坐标系的变换矩阵, 将各坐标系齐次变换矩阵依次相乘, 即可得到机器人末端

相对于基坐标系的齐次变换矩阵, 如式 (19):

$${}^0_6 \mathbf{T} = {}^0_1 \mathbf{T} {}^1_2 \mathbf{T} {}^2_3 \mathbf{T} {}^3_4 \mathbf{T} {}^4_5 \mathbf{T} {}^5_6 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

根据 2.1 节建立的 SA1400 机器人连杆模型对机器人正运动学进行验证, 将上述推导封装成函数 myfk, 运用 Robotics Toolbox 机器人工具箱的正运动学函数 fkine 与 myfk 所求结果进行对比验证。

2.3 机器人逆运动学

由于机器人有 6 个自由度, 并且末端三轴轴线相交于一点, 满足于 Piper 法则, 机器人逆运动学有如下解法。已知机器人末端位姿矩阵:

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0_1 \mathbf{T} {}^1_2 \mathbf{T} {}^2_3 \mathbf{T} {}^3_4 \mathbf{T} {}^4_5 \mathbf{T} {}^5_6 \mathbf{T} \quad (20)$$

将等号右侧含有未知数的齐次矩阵依次求逆, 分别左乘等号两侧的矩阵, 可以依次求得各关节角度。得到机器人关节角 $\theta_1 \sim \theta_6$ 的表达式:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= A \tan 2(d_6 a_y - p_y, p_x - d_6 a_x) \\ \theta_2 &= -A \tan 2(M, N) + A \tan 2(P, \pm \sqrt{M^2 + N^2 - P^2}) \\ \theta_3 &= -A \tan 2(a_3, d_4) + A \tan 2(Q, \pm \sqrt{a_3^2 + d_4^2 - Q^2}) \\ \theta_4 &= A \tan 2(S_4, C_4) \\ \theta_5 &= A \tan 2(S_5, C_5) \\ \theta_6 &= -A \tan 2(U, V) + A \tan 2(W, \pm \sqrt{U^2 + V^2 - W^2}) \end{aligned} \quad (21)$$

式中,

$$\begin{aligned} M &= -a_1 - d_6 a_x c\theta_1 + p_x c\theta_1 + d_6 a_y s\theta_1 - p_y s\theta_1 \\ N &= -d_1 + d_6 a_z - p_z \\ P &= \frac{M^2 + N^2 + a_2^2 - a_3^2 - d_4^2}{2a_2} \\ Q &= \frac{M^2 + N^2 - a_2^2 - a_3^2 - d_4^2}{2a_2} \\ U &= s\theta_4 c\theta_5 \\ V_A &= -c\theta_4 \\ W &= n_y c\theta_1 + n_x s\theta_1 \end{aligned}$$

在 Matlab 语言环境中编写运动学逆解函数 myik 并对其进行验证。选取任意一组关节角变量, 通过推导的正解函数 myfk 计算得到机器人末端位姿矩阵 $\mathbf{T}_{\text{test}}$, 将位姿矩阵代入推导的逆解函数 myik, 计算得到 8 组逆解, 结果见表 3。

$$T_{\text{test}} = \begin{bmatrix} -0.186\ 6 & -0.682\ 9 & -0.706\ 2 & 335.059\ 4 \\ -0.926\ 7 & -0.116\ 2 & 0.357\ 2 & -665.210\ 5 \\ -0.326\ 0 & 0.721\ 2 & -0.611\ 1 & 172.983\ 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

表 3 逆运动学求解结果

Table 3 Inverse kinematic calculation results

Serial number	Joint angle θ_1/rad	Joint angle θ_2/rad	Joint angle θ_3/rad	Joint angle θ_4/rad	Joint angle θ_5/rad	Joint angle θ_6/rad
1	1.047 2	0.785 4	0.628 3	0.523 6	1.047 2	1.047 2
2	1.047 2	0.785 4	0.628 3	3.665 2	-1.047 0	-2.094 0
3	1.047 2	2.920 2	2.877 2	1.080 4	2.628 5	-0.254 0
4	1.047 2	2.920 2	2.877 2	4.222 0	-2.628 0	2.886 7
5	-2.094 0	3.894 8	6.113 3	-1.89 4	2.667 3	-0.444 0
6	-2.094 0	3.894 8	6.113 3	1.247 3	-2.667 0	2.697 3
7	-2.094 0	5.165 6	3.675 4	-2.682 0	1.788 5	0.659 7
8	-2.094 0	5.165 6	3.675 4	0.459 5	-1.788 0	-2.481 0

将表中 8 组不同的逆解，分别代入工具箱正运动学函数 fkin 中，经过工具箱函数运算所得的 8 个位姿矩阵皆与给定的位姿矩阵 T_{test} 相同，证明了本文所推导逆解方程式的正确性。

2.4 机器人运动链的解耦分析

研究采用机器人夹持工件进行激光熔覆工作，须要分析机器人末端与激光头的运动耦合关系。设机器人基坐标系为 $\{R\}$ ，机器人基坐标与世界坐标系重合，机器人末端坐标系为 $\{E\}$ ，法兰坐标系为 $\{F\}$ ，工件坐标系为 $\{U\}$ ，插补点坐标系为 $\{P\}$ ，激光头末端坐标系为 $\{T\}$ ，如图 14 所示。

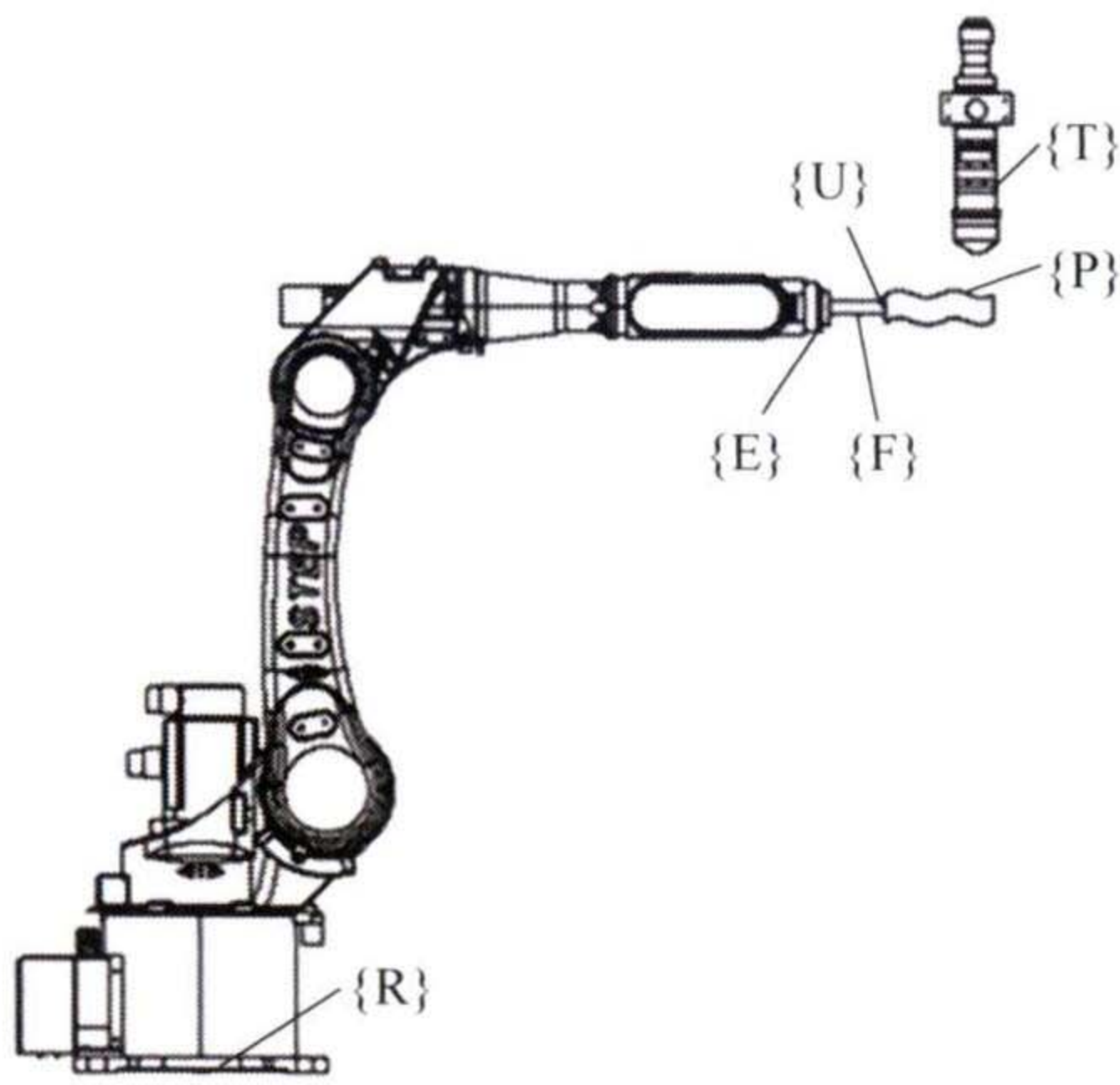


图 14 运动耦合关系

Fig. 14 Kinematic coupling relation

各个坐标系之间可以通过坐标齐次变换相互转换， $\{R\}$ 与 $\{E\}$ 的齐次变换矩阵为 ${}^R T_E$ ；通过标定确定 $\{R\}$ 与 $\{T\}$ 的齐次变换矩阵 ${}^R T_T$ ；由连接法兰的几何尺寸确定 $\{E\}$ 与 $\{F\}$ 的齐次变换矩阵 ${}^E T_F$ ；由相对位置关系确定 $\{F\}$ 与 $\{U\}$ 的齐次变换矩阵 ${}^F T_U$ ， $\{U\}$ 与 $\{P\}$ 的齐次变换矩阵为 ${}^U T_P$ ；得到 $\{P\}$ 与 $\{T\}$ 的齐次变换矩阵为 ${}^P T_T$ 。

根据上述已知条件可以得到机器人末端位姿矩阵的表达式 ${}^R T_E$ ，如式 (22) 所示。

$$\begin{aligned} {}^U T_P \cdot {}^P T_T &= T_{li} \\ {}^R T_E &= {}^R T_T \cdot ({}^E T_F \cdot {}^F T_U \cdot T_{li})^{-1} \end{aligned} \tag{22}$$

3 激光熔覆仿真分析与试验验证

3.1 激光熔覆轨迹仿真

本次熔覆仿真使用机器人离线编程软件 PQart，在 PQart 中搭建工作场景，如图 15 所示，在 Solidworks 中对模型进行建模，以 STEP 格式输出，并将其导入到离线编程软件 PQart。

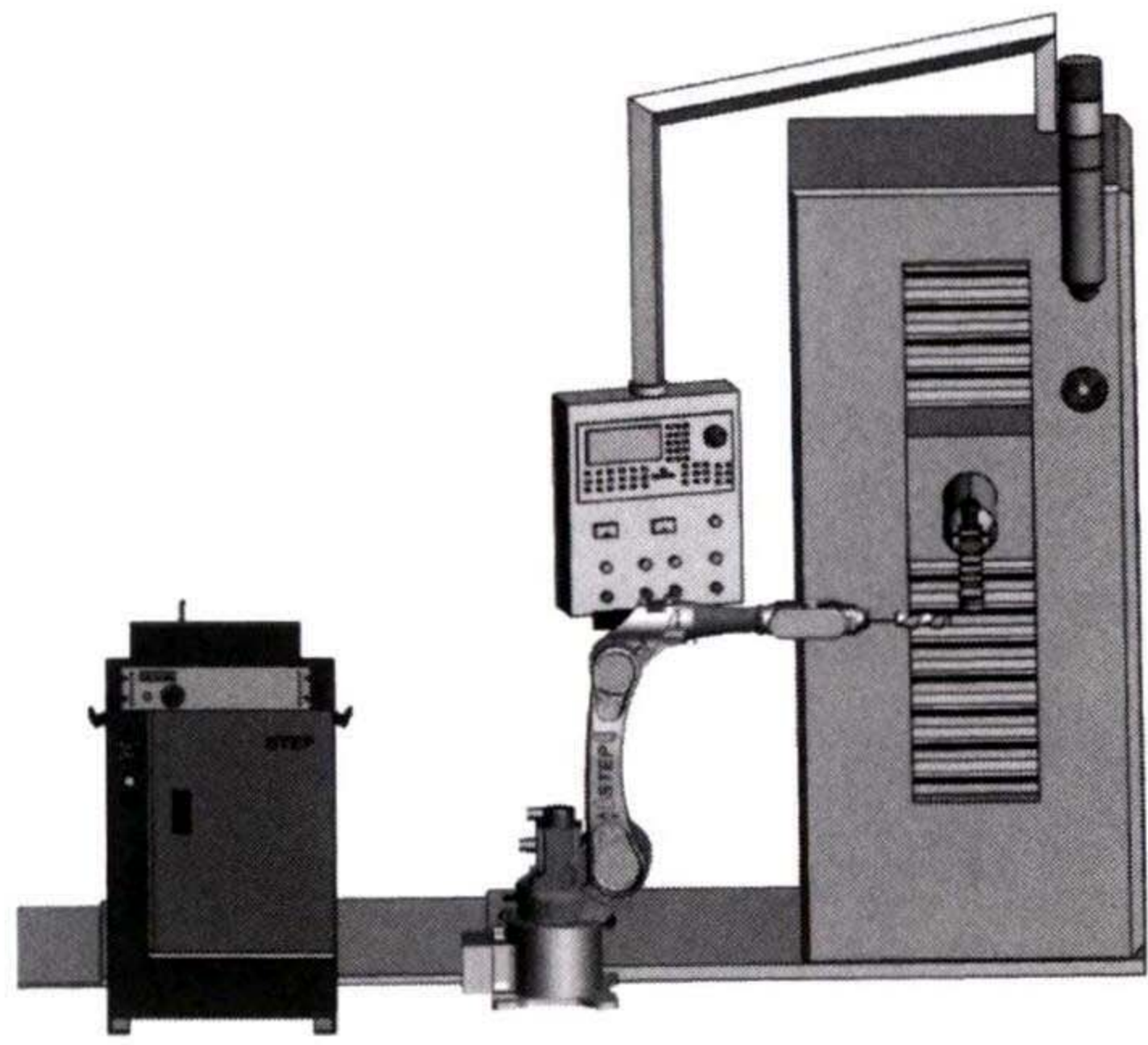
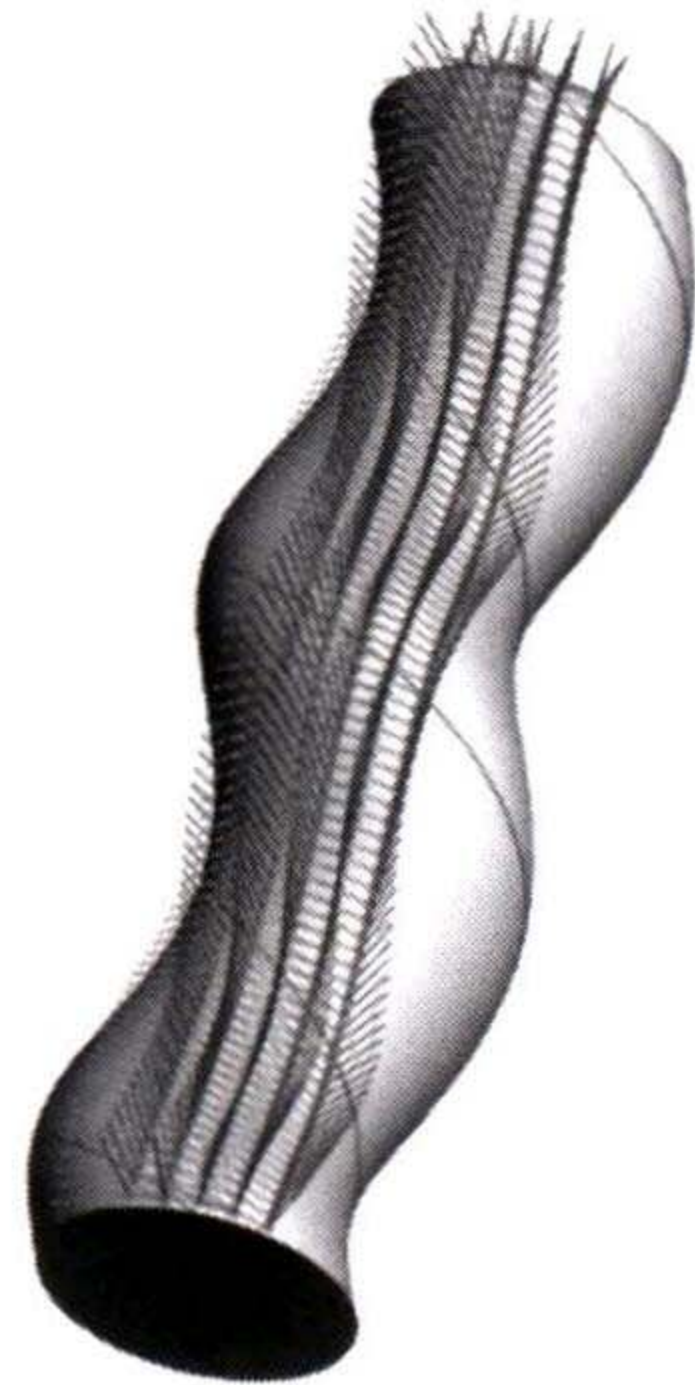


图 15 激光熔覆仿真模拟平台

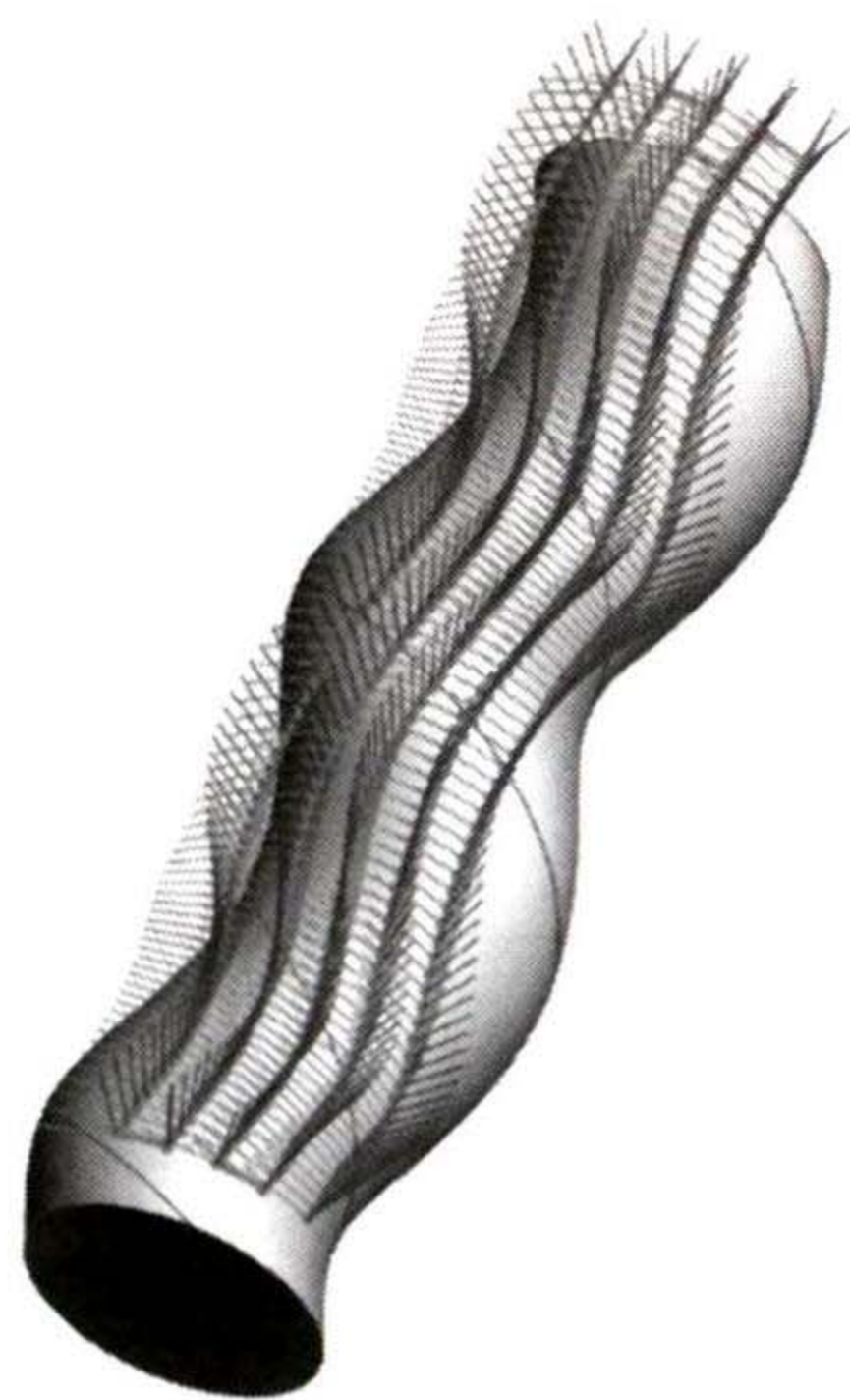
Fig. 15 Laser cladding simulation platform

在仿真模拟平台搭建好后，根据实际情况对机器人的基坐标系、法兰工具坐标系、工件坐标系、加工刀具坐标系应进行校准对齐，防止因位置误差与姿态误差而产生的实际加工误差。已规划的轨迹数据按照 PQart 内置的导入轨迹模板修改参数，输入到 apt 文件内，将规划好的轨迹关联螺旋体模型。

预留安全距离，防止激光器发生损坏，将各个插补点沿其 Z 轴方向延伸 15 mm，如图 16 所示。



(a) Rotor surface trajectory diagram

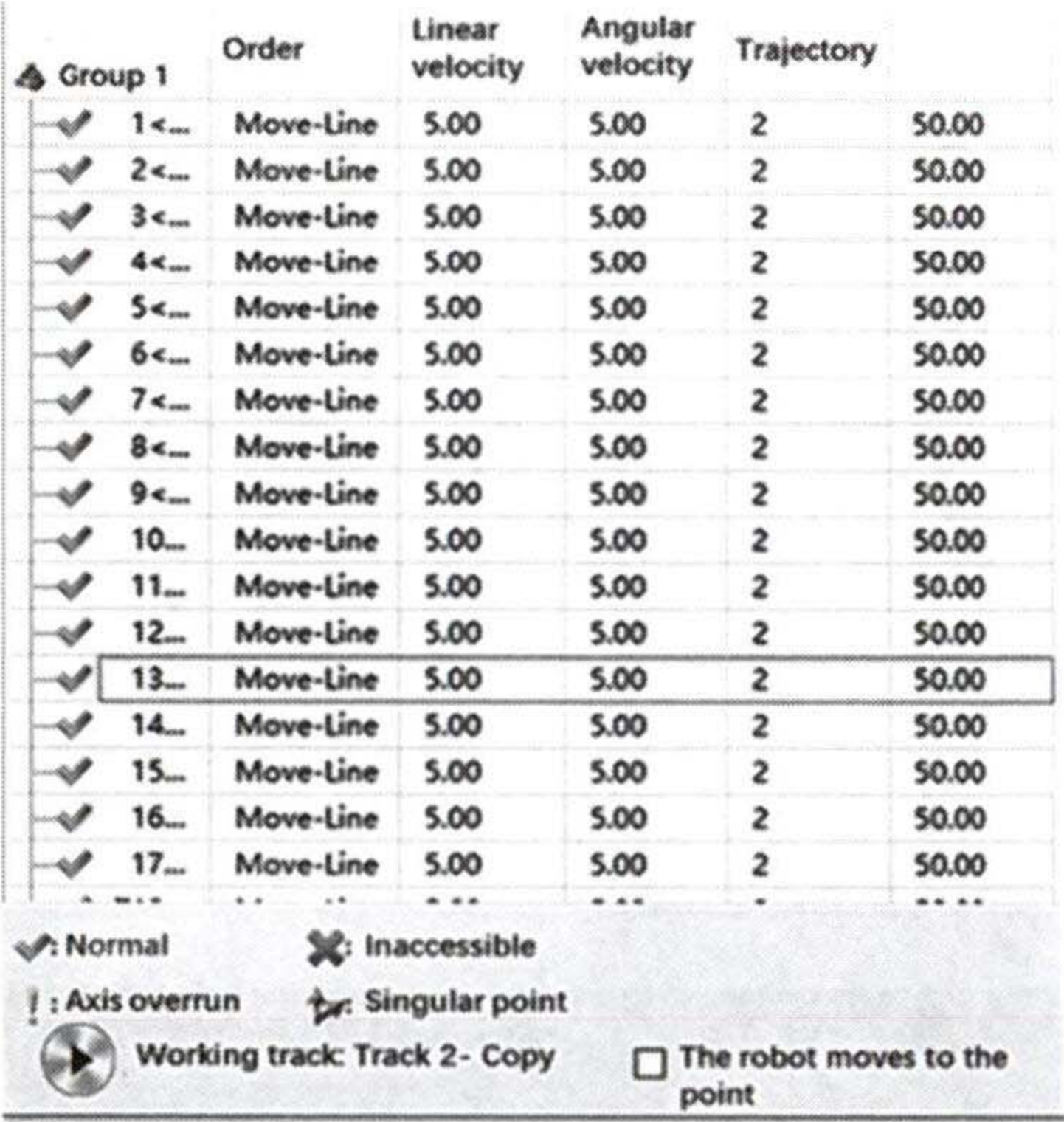


(b) Trajectory diagram after Z-axis offset

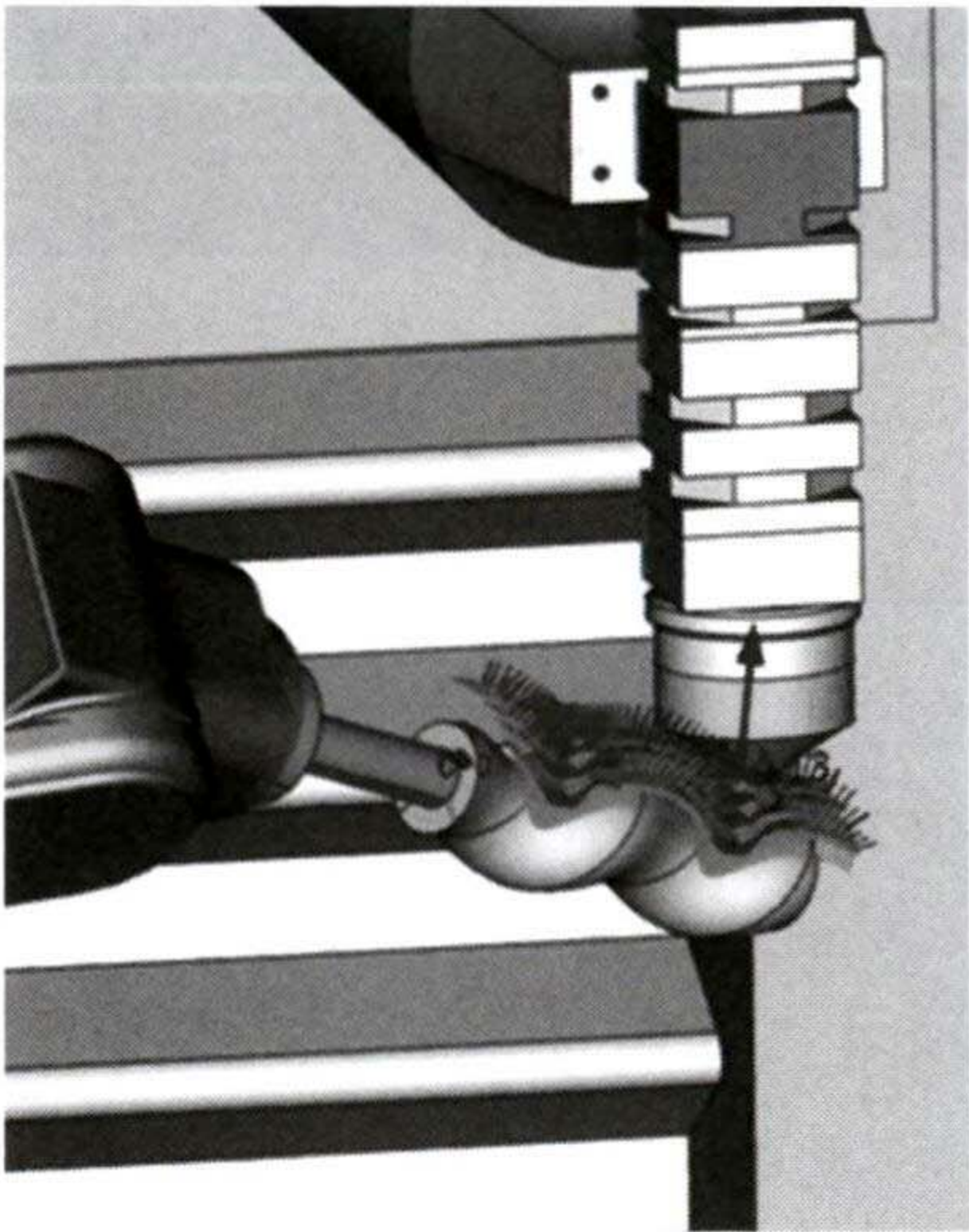
图 16 熔覆轨迹图

Fig. 16 Cladding simulation trajectory diagram

对设置好的轨迹进行仿真分析，设置运行线速度为 5 mm/s，仿真结果显示路径总长度为 875.21 mm，用时 175.04 s，运行至各轨迹点处未出现空间不可达、轴超限和奇异点等错误，如图 17 所示。



(a) Track point information



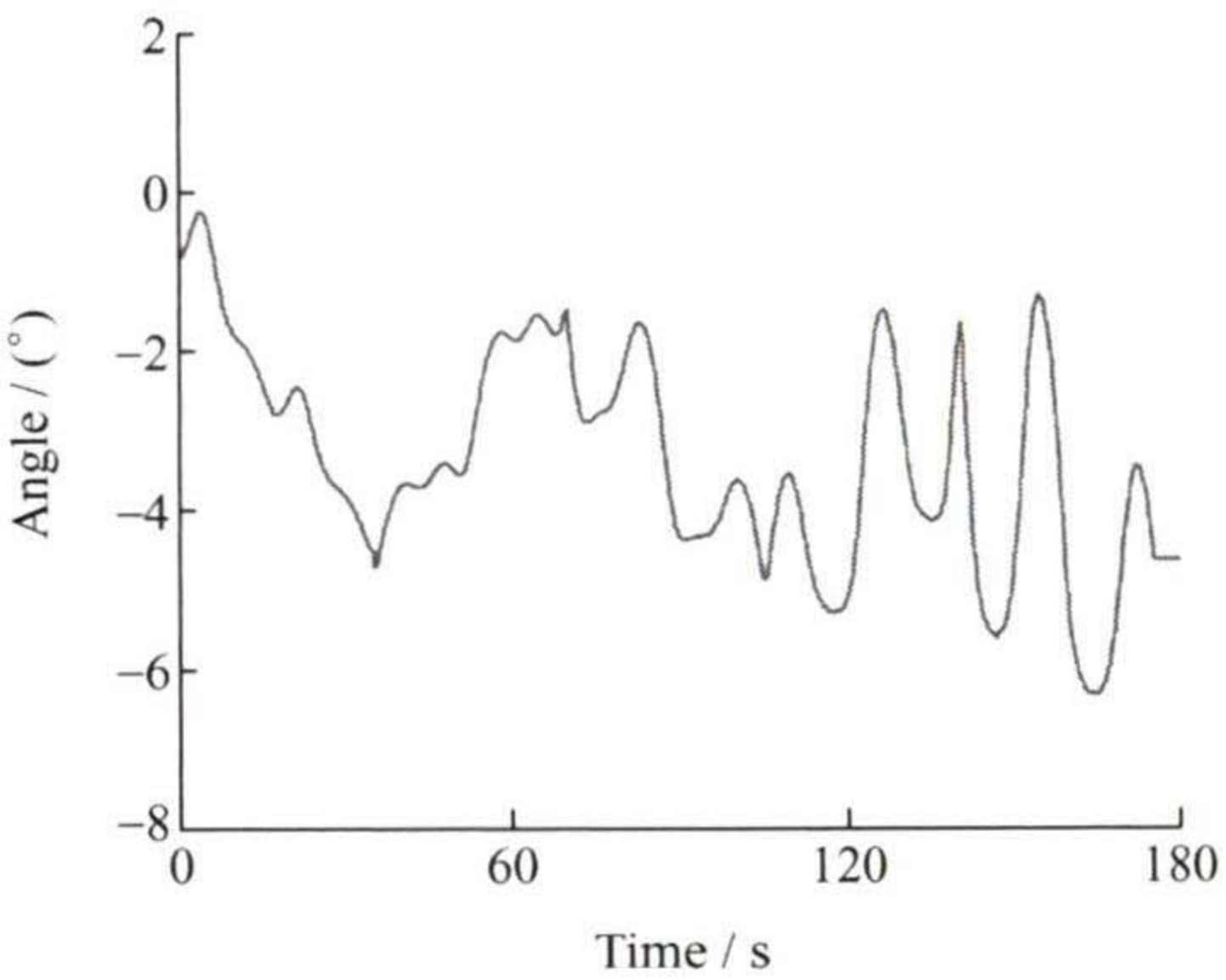
(b) Robot attitude at trajectory point

图 17 激光熔覆轨迹仿真结果图

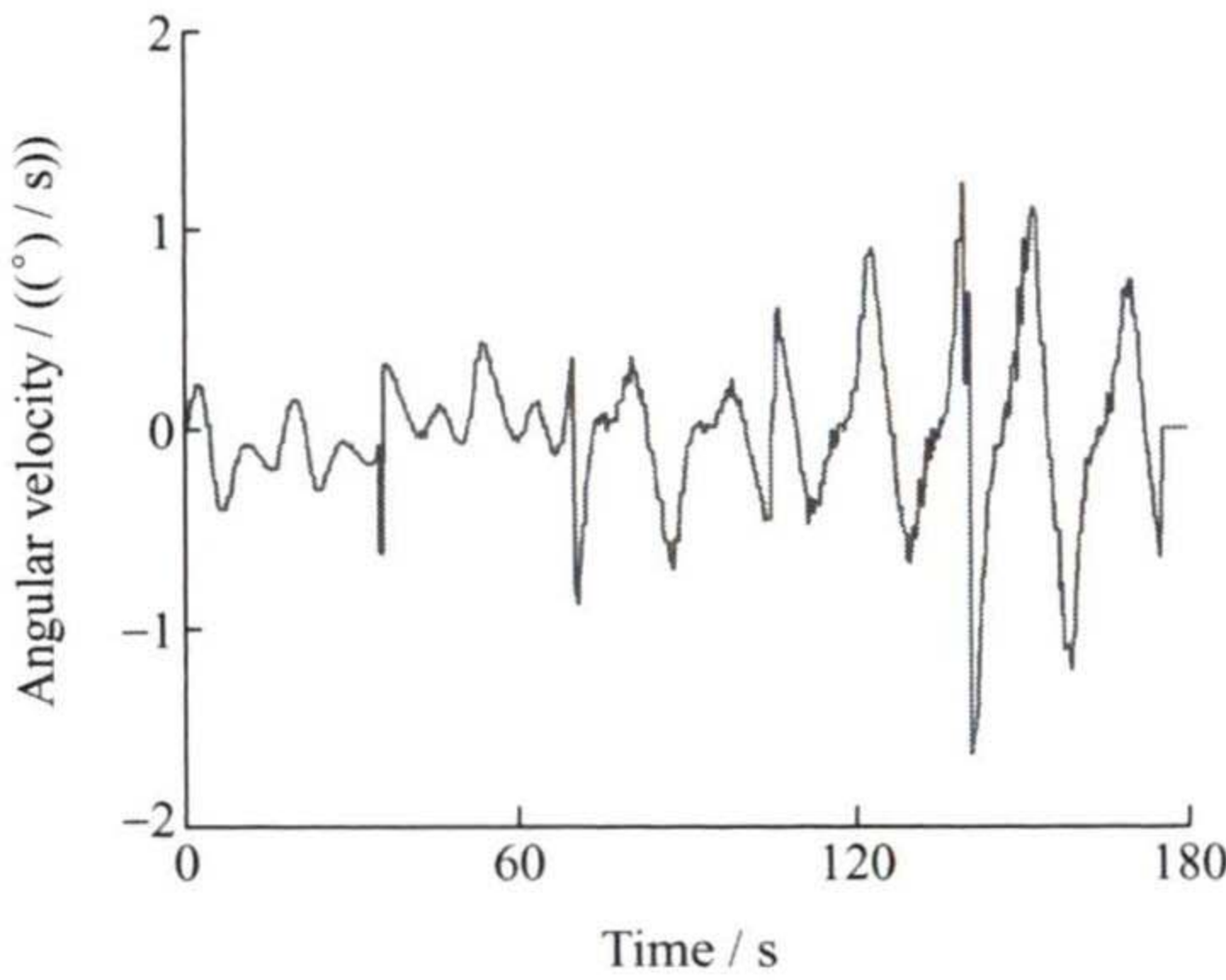
Fig. 17 Simulation result of laser cladding trajectory

在轨迹仿真无误后，使用 PQart 软件的后置功能，将机器人加工路径输出为加工代码，加工代码为关节空间内关节角度变化，以便于后续的分析。

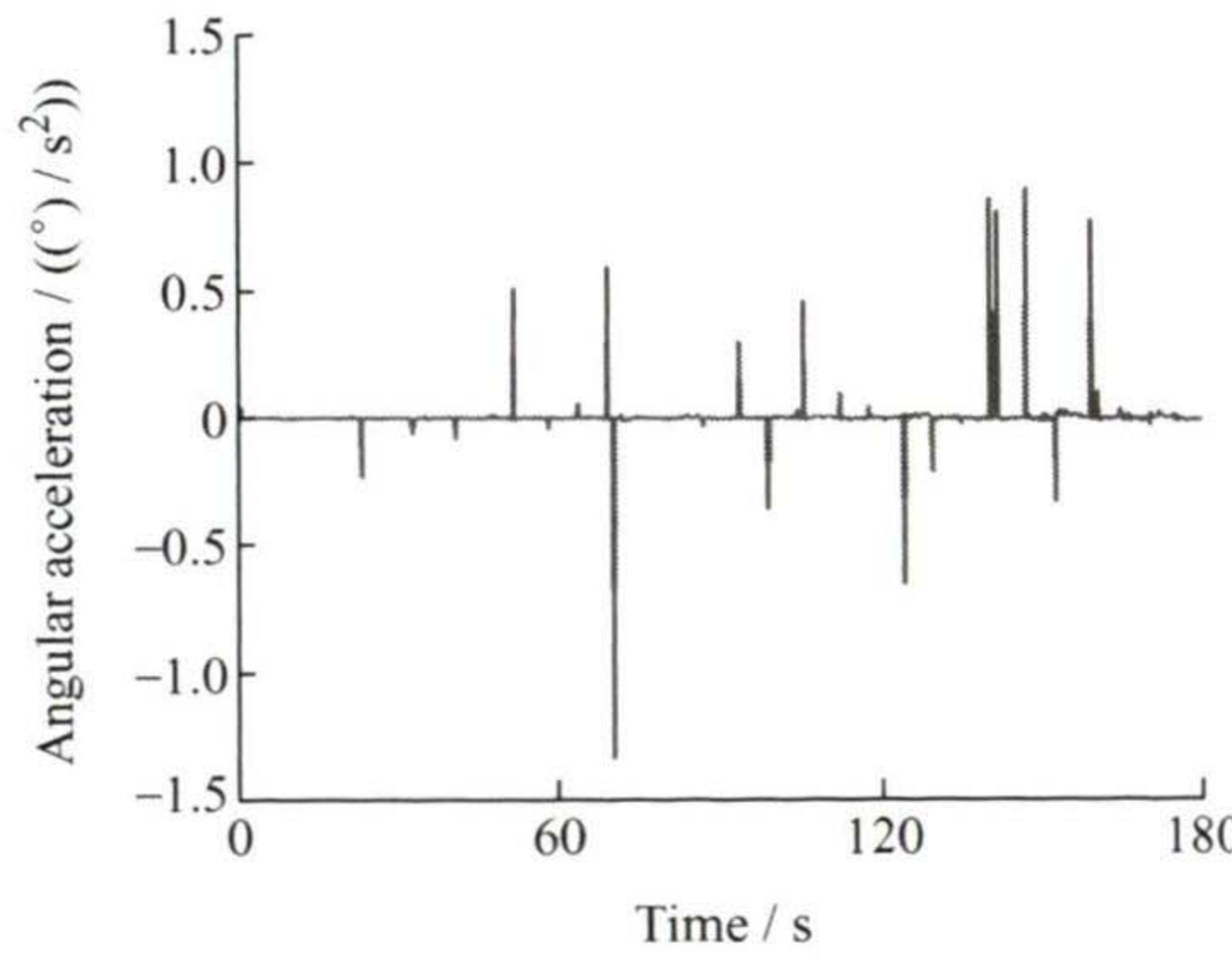
通过 SW2URDF 插件将机器人的实体模型导入到 Matlab / Simulink 中，在关节驱动模块中输入各关节角度变化值，对仿真过程进行实时检测，得到各个关节角位移、角速度和角加速度随时间的变化曲线，轨迹仿真用时 175.04 s，测量各关节输出的位移、速度和加速度^[20]，以关节 1 为例，如图 18 所示。



(a) Joint Angle change curve



(b) Joint angular velocity curve



(c) Joint angular acceleration curve

图 18 机器人关节 1 角位移、速度、加速度变化曲线

Fig. 18 Curve of joint angular displacement, velocity and acceleration of robot 1

结果表明机器人关节角变化曲线连续, 未出现无穷大的情况, 未出现轴超限和奇异行位错误, 满足试验要求。

3.2 激光熔覆试验与结果

在确保机器人仿真模拟运行无误的情况下, 开展复杂曲面激光熔覆试验, 进行熔覆路径的验证。使用的激光熔覆试验系统主要包括数控系统、光纤激光器、送粉器、激光头、冷水机和六轴串联机器人等设备。

根据实际情况采用的试验基材为 45 号钢, 化学成分见表 4。熔覆粉末材料采用 Fe90-2 合金粉末, 化学成分(质量分数)见表 5。

表 4 45 号钢化学成分(质量分数 / wt.%)

Table 4 Chemical composition of 45 steel (wt.%)

Element	C	Si	Mn	P	S	Fe
Content	0.42	0.17	0.5	0.035	0.035	Bal.

表 5 Fe90-2 合金粉末化学成分(质量分数 / wt.%)

Table 5 Chemical composition of Fe90-2 alloy powder (wt.%)

Element	C	Cr	Si	Mo	Mn	Fe
Content	0.3	14	1.3	≤1	≤1	Bal.

激光熔覆工艺参数是影响熔覆层形貌与质量的重要因素, 在经过多组工艺试验, 最终选取最优的一组作为复杂曲面激光熔覆工艺参数, 最终选定的工艺参数^[21], 见表 6。

表 6 复杂曲面激光熔覆工艺参数

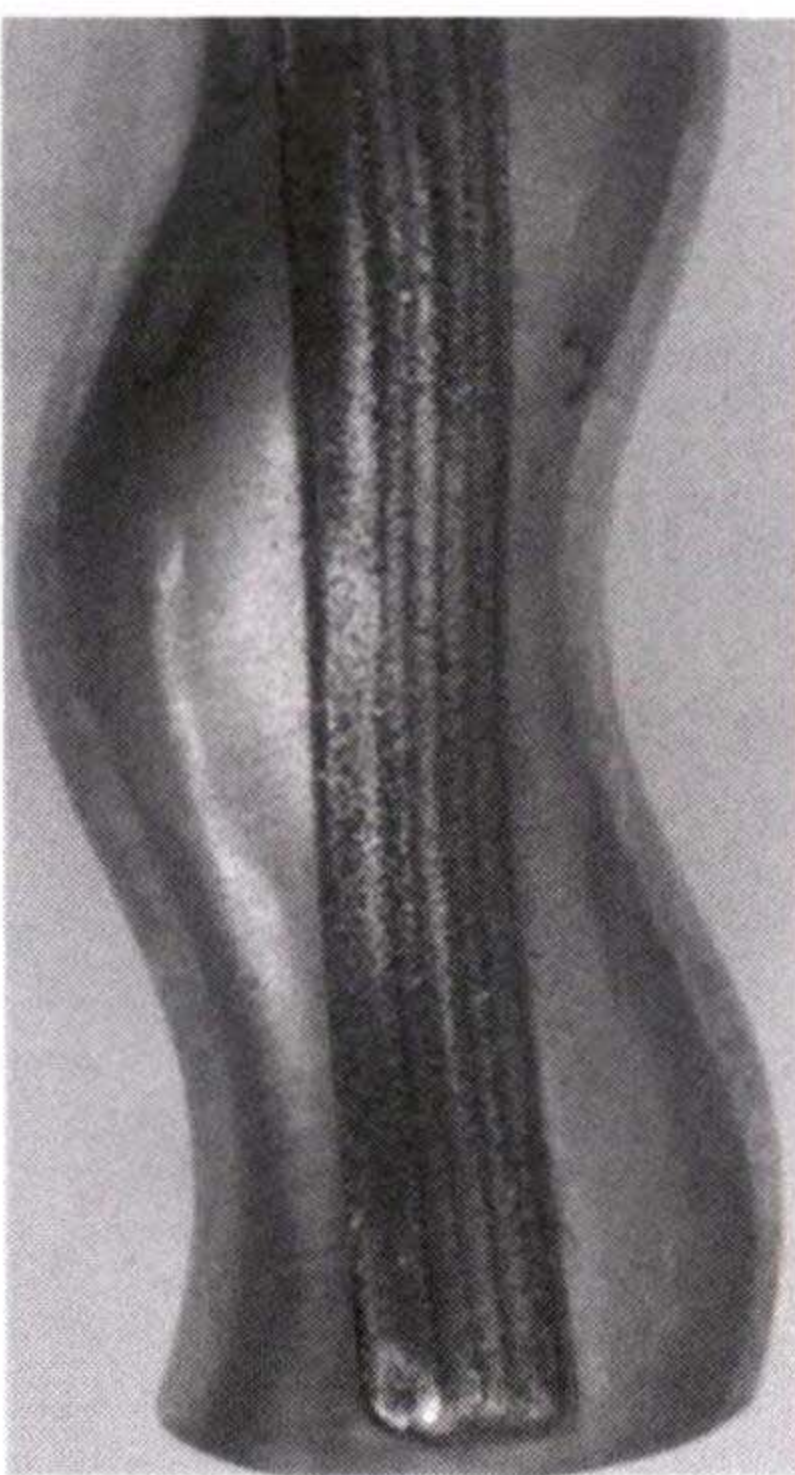
Table 6 Laser cladding process parameters for complex surfaces

Parameter	Value
Laser power / kW	1.6
Powder feeding rate / (r / min)	2
Laser scanning speed / (m / s)	5
Lap rate / %	30
Defocusing amount / mm	15

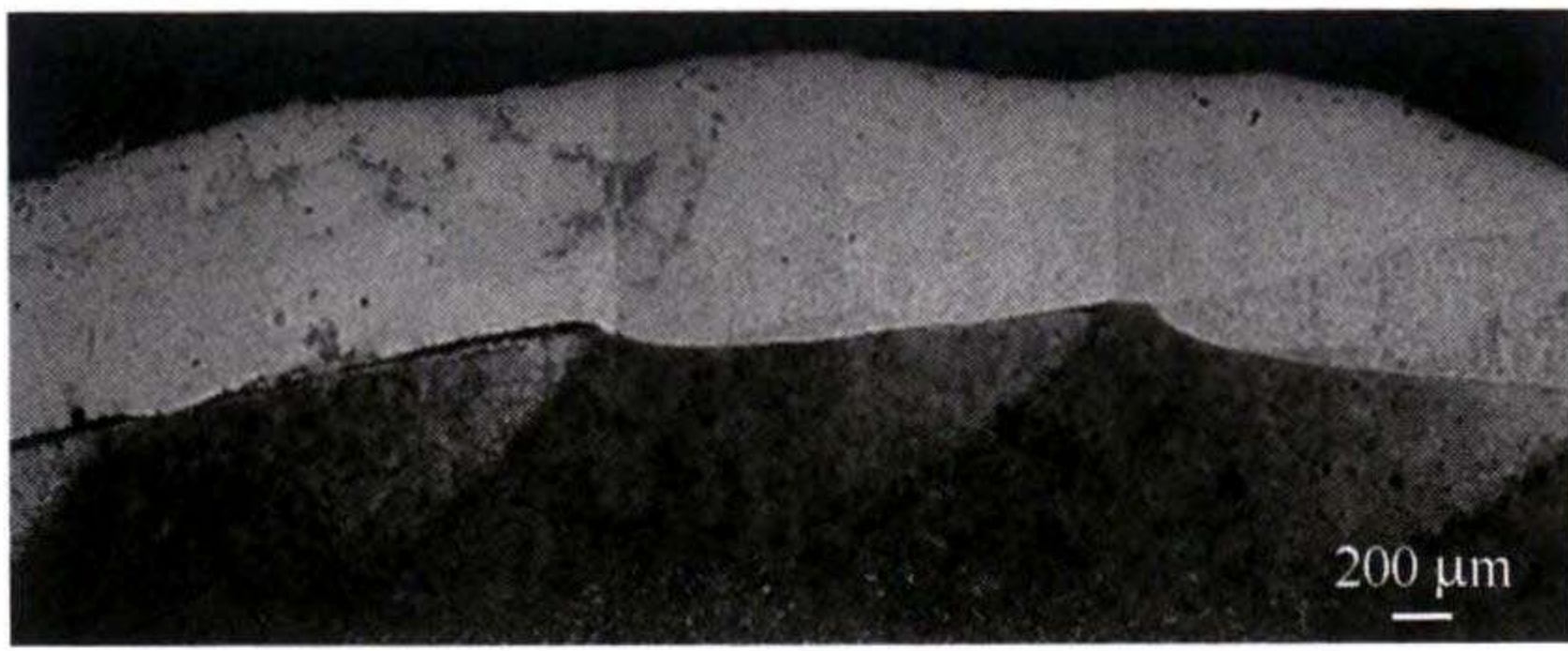
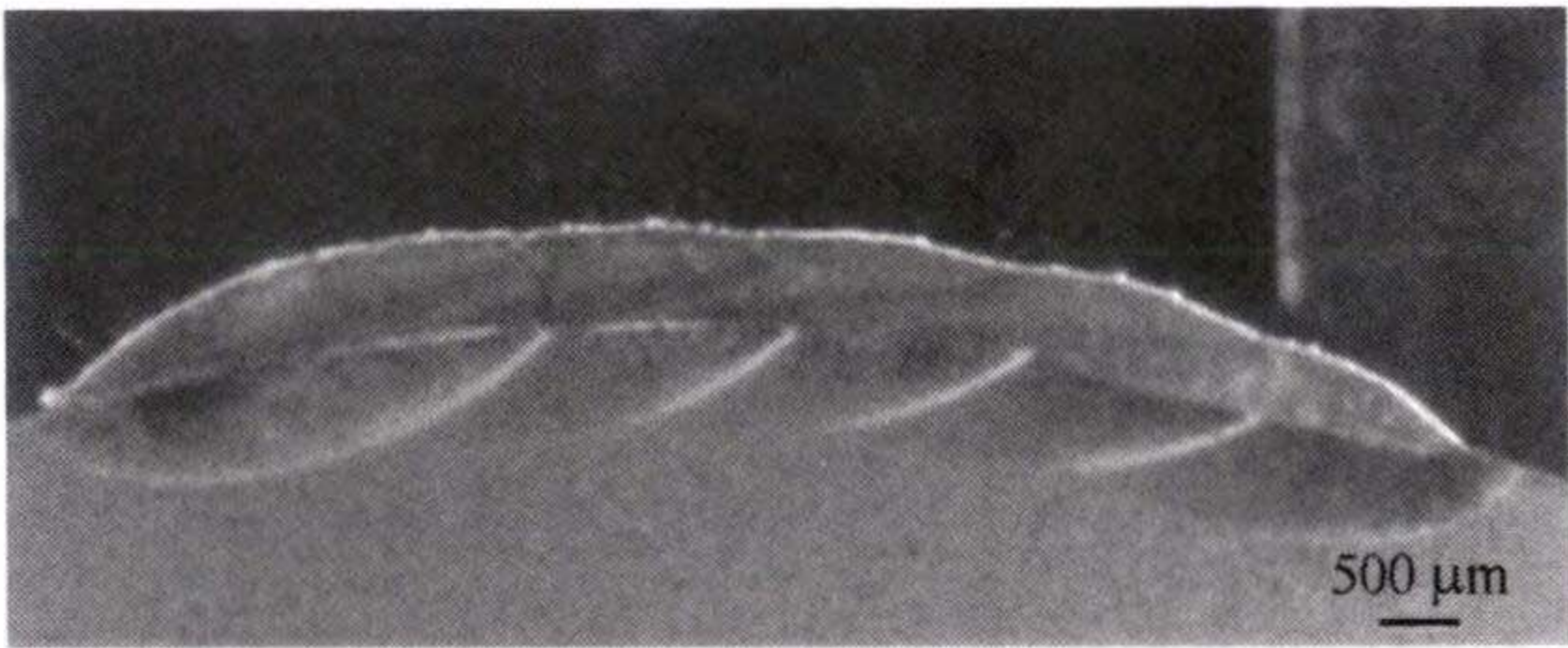
根据最终选定的工艺参数, 按照前文的路径规划方法进行上机试验。在激光熔覆加工过程中, 机器人运行姿态正确, 无轴超限和奇异行位错误, 运行平稳连续。试验结果如图 19 所示, 熔覆后的样品纵截面符合图 3 中搭接率适中时的情况, 熔覆层厚度变化均匀, 熔覆层表面大致成为一个平面, 熔覆效果良好, 能够满足修复要求, 整体表面熔覆层平整光滑, 波纹度较小, 成型质量较好。



(a) Laser cladding



(b) Post-cladding



(c) Cross section of cladding layer

图 19 激光熔覆试验结果

Fig. 19 Experimental results of laser cladding

4 结论

(1)提出等距曲线切线法对熔覆路径进行离散, 加工路径与曲面轮廓的最大弓高误差在设定值之内, 激光束方向与插补点法矢方向重合, 满足路径离散要求, 弥补了传统等弓高误差法在曲率变化较大场合不适用的局限性, 熔覆质量更好。

(2)通过机器人运动学仿真分析与试验测试, 机器人在激光熔覆加工过程中, 各个关节角变化曲线连续, 无轴超限和奇异行位错误, 姿态正确, 能够按照预设轨迹运行, 加工精度更高, 稳定性更好。

(3)激光熔覆后的样品纵截面符合搭接率适中的情况, 熔覆层厚度变化均匀, 熔覆层表面大致成为一个平面, 熔覆效果良好, 波纹度较小, 成型质

量较好, 实现了复杂曲面零件的激光熔覆路径规划, 并试验验证了其合理性与有效性。

参 考 文 献

- [1] 葛世荣. 智能表面工程[J]. 中国表面工程, 2024, 37(1): 1-17.
GE Shirong. Intelligent surface engineering[J]. China Surface Engineering, 2024, 37(1): 1-17. (in Chinese)
- [2] 郭永明, 叶福兴, 祁航. 超高速激光熔覆技术研究现状及发展趋势[J]. 中国表面工程, 2022, 35(6): 39-50.
GUO Yongming, YE Fuxing, QI Hang. Research status and development trend of ultra-high speed laser cladding technology[J]. China Surface Engineering, 2022, 35(6): 39-50. (in Chinese)
- [3] 黄勇, 孙文磊, 陈影, 等. 曲面塑料模具激光熔覆再制造快速加工路径生成方法[J]. 中国表面工程, 2017, 30(5): 150-158.
HONG Yong, SUN Wenlei, CHEN Ying, et al. Rapid path generation method for laser cladding remanufacturing of curved plastic mold[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(5): 150-158. (in Chinese)
- [4] CALLEJA A, TABERNERO I, FERNANDEZ A, et al. Improvement of strategies and parameters for multi-axis laser cladding operations[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014: 56113-120.
- [5] JIN Y, DU J, HE Y, et al. Modeling and process planning for curved layer fused deposition[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1-4): 273-285.
- [6] YAN S, FANG H, ONG S, et al. Optimal pass planning for robotic welding of large-dimension joints with nonuniform grooves[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2018, 232(13): 2386-2397.
- [7] 董玲, 杨洗陈, 张海明, 等. 自由曲面破损零件激光再制造修复路径生成[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 96-101.
DONG Ling, YANG Xichen, ZHANG Haiming, et al. Laser remanufacturing repair path generation for damaged freeform surface parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(7): 96-101. (in Chinese)
- [8] 黄海博, 孙文磊, 黄勇, 等. 自由曲面熔覆路径的点云切片算法研究[J]. 激光技术, 2017, 41(5): 718-722.
HUANG Haibo, SUN Wenlei, HUANG Yong, et al. Research on point cloud slicing algorithm of free-form surface cladding path[J]. Laser Technology, 2017, 41(5): 718-722. (in Chinese)
- [9] ALESSANDRO P, RICCARDO M, FRANCO A, et al. Time-optimal trajectory planning for flexible joint robots[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 938-945.
- [10] 黄海博, 孙文磊, 张冠, 等. 基于 NURBS 曲面的汽轮机叶片激光熔覆再制造路径规划[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 175-183.
HUANG Haibo, SUN Wenlei, ZHANG Guan, et al. Path planning of turbine blade laser cladding remanufacturing based on NURBS surface[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(5): 175-183. (in Chinese)
- [11] 岳晴晴. 六轴工业机器人轨迹规划的研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.
YUE Qingqing. Research on trajectory planning of six-axis industrial robot[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [12] 祖海英, 卢兴宇, 宋玉杰, 等. 基于激光熔覆再制造 PDC 钻头的机器人仿真分析[J]. 焊接学报, 2022, 43(10): 71-76, 117-118.
ZU Haiying, LU Xinyu, SONG Yujie, et al. Robot simulation analysis of PDC bit remanufacturing based on laser cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(10): 71-76, 117-118. (in Chinese)
- [13] 王鑫龙, 孙文磊, 张建杰, 等. 基于逆向工程的激光熔覆再制造路径规划[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 245-253.
WANG Xinlong, SUN Wenlei, ZHANG Jianjie, et al. Path planning of laser cladding remanufacturing based on reverse engineering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 245-253. (in Chinese)
- [14] SARAT S, ASIMAVA R, OLAF D, et al. Modeling and evaluation of curved layer fused deposition[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2011, 212(1): 27-35.
- [15] 张富祯, 孙文磊, 王恪典, 等. 激光多层熔覆搭接对成型质量的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(14): 7-11, 15.
ZHANG Fuzhen, SUN Wenlei, WANG Kedian, et al. Influence of laser multilayer cladding on forming quality[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(14): 7-11, 15. (in Chinese)
- [16] 周祥曼, 费世港, 田启华, 等. 增材制造数字化模型平面与非平面切片及路径规划研究进展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(16): 40-68.
ZHOU Xiangman, FEI Shigang, TIAN Qihua, et al. Research progress of planar and non-planar slicing and path planning of additive manufacturing digital model[J].

Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(16): 40-68. (in Chinese)

[17] XIAOCUI Y, BAOLING L, YONGLI M. Anisotropic neighborhood searching for point cloud with sharp feature[J]. Measurement and Control, 2020, 53(9-10): 1943-1953.

[18] 王斌锐, 王涛, 李正刚, 等. 多路径段平滑过渡的自适应前瞻位姿插补算法[J]. 控制与决策, 2019, 34(6): 1211-1218.

WANG Furui, WANG Tao, LI Zhenggang, et al. Adaptive prospective pose interpolation algorithm for smooth transition of multipath segment[J]. Control and Decision, 2019, 34(6): 1211-1218. (in Chinese)

[19] KIM J, CROFT A E. Online near time-optimal trajectory planning for industrial robots[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2019: 58158-171.

[20] SU B, ZOU L. Manipulator trajectory planning based on the algebraic-trigonometric hermite blended interpolation spline[J]. Procedia Engineering, 2012, 29(C): 2093-2097.

[21] ERFANMANESH M, ABDOLLAH-POUR H, MOHAMMADIAN-SEMNANI H, et al. An empirical-statistical model for laser cladding of WC-12Co powder on AISI 321 stainless steel[J]. Optics and Laser Technology, 2017, 97: 180-186.

作者简介: 宋玉杰, 男, 1968 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为机械产品绿色设计与制造、激光熔覆增材制造。
E-mail: syjdqpi@163.com

祖海英 (通信作者), 女, 1979 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为高端油气装备智能制造技术、机械设备逆向工程技术。
E-mail: zuhaiying@126.com