

# 基于激光熔覆再制造 PDC 钻头的机器人仿真分析

祖海英, 卢兴宇, 宋玉杰, 李大奇

(东北石油大学, 大庆, 163318)

**摘要:** 为了降低 PDC 钻头维修成本以及钻井周期, 基于激光熔覆再制造技术, 提出用机器人实现对钻头的再制造. 基于逆向工程, 对 PDC 钻头进行数据采集, 再对获取的钻头点云数据进行数据处理、三维重构, 构造出与实体 PDC 钻头相同的三维模型. 利用软件 Geomagic 布尔运算得出工件缺损部位, 在软件 NX1899 中利用等距平面族  $\Gamma$  与钻头修复部位相交, 实现对曲面零件的路径规划. 对机器人末端焊枪修复 PDC 钻头轨迹进行仿真模拟, 利用软件 PQart 模拟工作环境中工件相对于机器人的位置, 实现对机器人的轨迹优化. 调整机器人末端焊枪位姿, 提高修复后 PDC 钻头的表面性能. 验证了所述方法的可行性, 为激光熔覆再制造技术修复复杂曲面提供了参考.

**创新点:** (1) 提出了工件复杂曲面数据提取与逆向建模的方法, 通过布尔运算获得了 PDC 钻头缺损部位, 利用等距平面族  $\Gamma$  与钻头修复部位相交, 完成了对曲面工件的路径规划.

(2) 建立了 6 自由度机器人运动学模型, 确定了多层轨迹熔覆焊枪姿态矩阵.

(3) 通过对机器人激光熔覆修复 PDC 钻头的过程模拟仿真, 对机器人末端焊枪姿态进行调整, 优化了机器人的加工轨迹.

**关键词:** PDC 钻头; 机器人; 激光熔覆再制造; 焊枪位姿

**中图分类号:** TG 456.7; TH 17

**文献标识码:** A

**doi:** 10.12073/j.hjxb.20211008001

## 0 序言

目前大部分油田重点开发地区面临着可钻性差、开发地构造复杂等困难, 从而加剧了 PDC 钻头的磨损<sup>[1-2]</sup>, 传统方式维修或者直接报废损坏的钻头会影响工作效率并增加成本. 激光熔覆增材再制造技术已经实现产业化并取得一定成效, 它是对磨损工件进行逆向建模、失效部位提取分层、路径规划, 智能控制激光束、电子束、等离子束等热源完成工件破损部分工艺堆积, 实现磨损工件尺寸、性能恢复并提升的技术<sup>[3]</sup>. 利用激光熔覆再制造技术维修 PDC 钻头不仅可以降低维修周期、节约成本, 还能较好地保持钻头的性能, 为油田开发带来经济效益.

在 PDC 钻头修复方面, 有关学者对钻头磨损程度进行分析、评定, 并为钻头制定了一套烧结式的修复方案, 其修复后的性能达到新钻头的 80%~90%, 而成本只有其 30%<sup>[4]</sup>. 而对于激光熔覆修复

PDC 钻头的研究较少, 利用机器人进行选区激光熔覆修复可以节省材料, 其性能更能满足工作环境差等要求, 因此对机器人激光熔覆修复 PDC 钻头的研究是十分必要的. 机器人离线编程相比于传统手动示教编程, 能够极大提高加工效率和精度<sup>[5]</sup>, 李金华等人通过可视化仿真对机器人运动路径进行修正, 保证安全的同时提高了工作效率<sup>[6]</sup>. 在使用机器人对工件修复之前, 通过机器人路径仿真可以观察到熔覆枪头的姿态, 对加工轨迹优化处理可以得到更好的修复效果<sup>[7]</sup>.

文中基于激光熔覆再制造, 对损坏的 PDC 钻头逆向建模, 进一步进行路径规划, 并对机器人激光熔覆模拟仿真. 结合仿真结果, 对再制造修复 PDC 钻头路径规划的可行性进行验证, 通过及时调整加工过程焊枪位姿, 获得更高质量熔覆层. 为激光熔覆再制造修复 PDC 钻头以及其它复杂曲面工件修复提供了一定参考.

## 1 建模与路径规划

### 1.1 PDC 钻头逆向建模

扫描钻头前, 对待修复工件贴黑圈标点, 相邻

两标点之间距离应大于 5 mm, 所贴标点不在同一直线上, 共 30 个标点, 如图 1 所示。



图 1 PDC 钻头贴定位标点  
Fig. 1 PDC bit position punctuation

标点定位完毕后, 采用 HandySCAN 3D 扫描仪获取钻头表面特征的点云数据, 如图 2 所示。扫描过程当中, 扫描激光只一次扫过工件表面时, 会造成工件表面点云数据采集不完整, 而多次扫描工件表面会得到过多不必要的点云数据, 因此使用扫描仪获取的原始点云数据需要先经过预处理才能够进行工件逆向建模。研究中所采用的扫描仪可以实现对散乱点云的自动拼接, 对于自动拼接生成的三维点云图, 用 Geomagic Studio 将点云数据处理为面片数据, 在此基础上, 选取点云数据较为完整的面片数据, 通过延长曲面、剪切曲面、对曲面进行拼接拟合生成完整的 PDC 钻头模型, 如图 2b 所示。

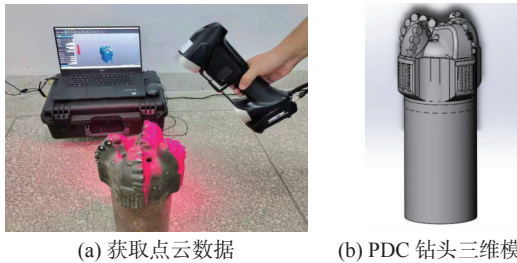


图 2 工件扫描及处理后的三维模型

Fig. 2 3D model of workpiece after scanning and processing. (a) Get point cloud data; (b) 3D model of PDC bit

## 1.2 PDC 钻头激光熔覆再制造路径规划

利用 Geomagic 布尔运算得出工件缺损部位如图 3a 所示, 将处理后的 PDC 钻头三维模型转换成 stl 格式并导入到软件 NX1899, 如图 3b 所示。

用一定厚度的平面族  $\Gamma$  和待修复模型目标修复位置相交可以得到切片并生成激光熔覆路径, 切片的方向一般与熔覆路径相互垂直, 如图 4 所示为目标修复位置切片图。平面族  $\Gamma$  相邻两个平面之间的距离即为熔覆路径之间的距离  $\delta$ ,  $\delta$  主要受熔覆搭接率的影响。通过测量得出单个熔覆轨迹的高度以及宽度, 进一步计算推出平面间距  $\delta$ <sup>[8]</sup>, 如式 (1) 所示。

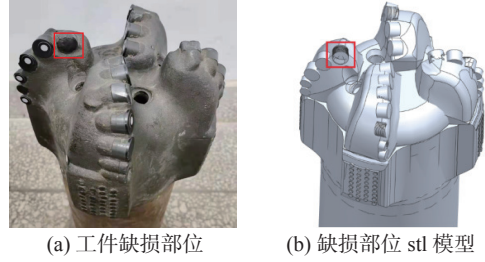


图 3 PDC 钻头缺损部位

Fig. 3 PDC bit defect area. (a) defective part of workpiece; (b) defect site stl model

$$\delta = \frac{\left\{ \frac{(\varepsilon/2)^2 + h^2}{2h} \right\}^2 \arcsin(\varepsilon h) - \frac{(\varepsilon/2)^2 - h^2}{h\varepsilon}}{h} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon$  为单个熔覆层宽度,  $h$  为熔覆层高度。

得到点云切片如图 4b 所示, 不同切片的切片点云表示成为<sup>[9-10]</sup>

$$D_i = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\} \quad (2)$$

即为熔覆枪头的加工轨迹, 加工轨迹最终输出为 NC 代码格式。

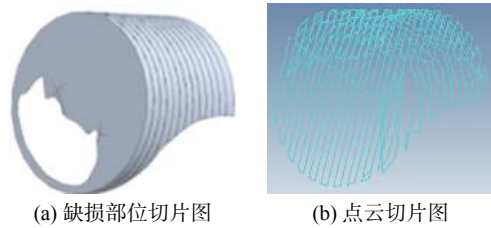


图 4 目标修复位置切片及点云图

Fig. 4 Target repair position slice and point cloud image (a) Section view of the defect; (b) Point cloud slice diagram

## 2 末端焊枪姿态调整

### 2.1 6 自由度机器人运动学模型

研究采用的是 SA1400 型号 6 轴机器人, 其  $D-H$  坐标系如图 5 所示, 0 是机器人的基坐标系, 1~6 为机器人机械臂的 6 个坐标原点, 机器人的末端坐标系原点为 6, 机器人各关节的  $D-H$  参数如表 1 所示, 在已知机器人各关节  $D-H$  参数的情况下, 可求得机器人末端对于基坐标位姿表达式<sup>[11-12]</sup> 为

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \quad (3)$$

根据表 1, 得出机器人各关节变换 连杆扭转  $\theta$  矩阵为

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & D_1 & a_1 B_1 \\ -D_1 & 0 & B_1 & -a_1 D_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} D_2 & B_2 & 0 & a_2D_2 \\ -B_2 & D_2 & 0 & -a_2B_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} B_3 & 0 & -D_3 & a_3B_3 \\ D_3 & 0 & B_3 & a_3D_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} B_4 & 0 & -B_4 & 0 \\ -D_4 & 0 & -D_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} B_5 & 0 & -D_5 & 0 \\ D_5 & 0 & B_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} B_6 & D_6 & 0 & 0 \\ -D_6 & B_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

上述矩阵中,  $B_n = \sin\theta_n$ ,  $D_n = \cos\theta_n$ .

根据 pieper 准则, 机器人逆运动学具有以下简便算法<sup>[13]</sup>:

$${}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 = {}^1T_2^{-1} {}^0T_1^{-1} {}^5T_6^{-1} \quad (10)$$

根据等式分别求出机器人的 6 个关节角  $\theta_1 \sim \theta_6$ :

$$\theta_1 = \begin{cases} A \tan 2[-(p_y - a_y d_6), p_x - d_6 a_x] \\ A \tan 2[p_y - a_y d_6, -(p_x - d_6 a_x)] \end{cases} \quad (11)$$

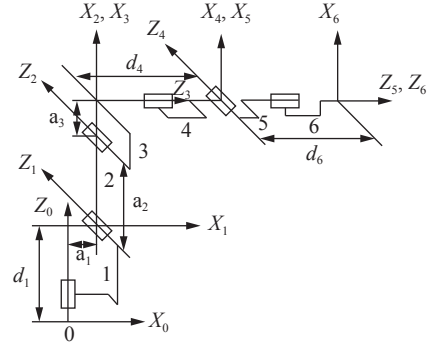


图 5 SA1400 机器人 D-H 连杆坐标系

Fig. 5 SA1400 robot D-H linkage coordinate system

$$\theta_2 = -A \tan 2(q, p) + A \tan 2\left(o, \sqrt{p^2 + q^2 - o^2}\right) \quad (12)$$

式中:  $p = a_1 + B_1(a_x d_6 - p_x) + D_1(p_y - a_y d_6)$ ,  $q = a_z d_6 - p_z + d_1$ ,  $o = (d_4^2 + a_3^2 - a_2^2 - p^2 - q^2) / (2a_2)$

$$\theta_3 = A \tan 2(D_3, B_3) \quad (13)$$

$$\theta_4 = A \tan 2(D_4, B_4) \quad (14)$$

$$\theta_5 = A \tan 2(D_5, B_5) \quad (15)$$

$$\theta_6 = A \tan 2(e, f) - A \tan 2\left(-B_4, \pm \sqrt{e^2 + f^2 - B_4^2}\right) \quad (16)$$

式中:  $e = o_x D_1 + o_y B_1$ ,  $f = n_x + n_y B_1$

由机器人角度表达式得出, 机器人逆运动学存在多组解, 选取的角度应当在机器人的运动范围内, 且同一组解中选取较小的关节角度值, 可以实现连续快速运转, 提高修复 PDC 钻头的效率。

表 1 机器人 D-H 参数

Table 1 D-H parameters of robot

| 关节 | 连杆扭转 $\theta_i/^\circ$ | 连杆长度 $d_i/\text{mm}$ | 连杆偏移 $a_i/^\circ$ | 关节转角 $\alpha_i/^\circ$ | 关节范围 $\theta_i/^\circ$ |
|----|------------------------|----------------------|-------------------|------------------------|------------------------|
| 1  | $-\theta_1$            | 415                  | 180               | -90                    | $[-160, 160]$          |
| 2  | $\theta_2 - 90$        | 0                    | 590               | 0                      | $[-80, 145]$           |
| 3  | $\theta_3$             | 0                    | 115               | -90                    | $[-190, 65]$           |
| 4  | $-\theta_4$            | 625                  | 0                 | 90                     | $[-165, 165]$          |
| 5  | $\theta_5$             | 0                    | 0                 | -90                    | $[-115, 115]$          |
| 6  | $-\theta_6$            | 98                   | 0                 | 0                      | $[-360, 360]$          |

## 2.2 焊枪姿态表达

如图 6 所示, 焊接工具熔覆焊枪的长度设为  $l$ , 工具坐标系原点为 7, 工具相对于机器人末端机械臂坐标轴的转角为  $\theta$ , 可以将工具相对于末端坐标原点的变换矩阵  ${}^6T_7$  表示为<sup>[14]</sup>

$${}^6T_7 = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

## 2.3 多层熔覆轨迹焊枪姿态规划

焊枪的姿态对 PDC 钻头目标位置的修复每一

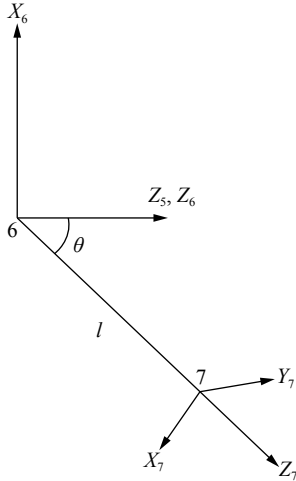


图 6 机器人末端焊枪位姿

Fig. 6 Position of robot end welding gun

层轨迹质量有着很重要的影响,因此在修复 PDC 钻头过程中,需要根据每一层已知熔覆轨迹及时调整焊枪的姿态,从而获得更高的加工质量<sup>[15]</sup>. 多层轨迹焊枪姿态如图 7 所示,  $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$  分别是焊枪以  $O$  为基准,沿着  $y$  方向与  $z$  方向的移动量.

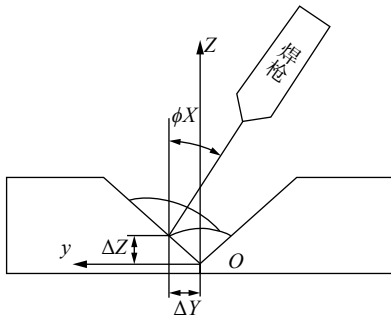


图 7 多层轨迹焊枪姿态示意图

Fig. 7 Multi-layer trajectory welding gun posture diagram

焊枪沿水平方向以及沿竖直方向的偏移量分别为

$$\Delta Y_{ij} = \frac{q_i - 1 - 2(j-1)}{q_i} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i q_i}{\tan \frac{\alpha}{2}}} \quad (18)$$

$$\Delta Z_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i q_i}{\tan \frac{\alpha}{2}}} \quad (19)$$

式中:  $\Delta Y_{ij}$ 、 $\Delta Z_{ij}$  分别为轨迹中第  $i$  层第  $j$  道的水平偏移量以及竖直偏移量;  $n$  为轨迹层数;  $f_i$  为第  $i$  层一共  $f$  道;  $q_i$  为第  $i$  层轨迹的熔覆面积;  $\alpha$  为坡口角度.

$\phi X$  是熔覆枪头绕  $X$  轴的旋转角度,焊枪沿  $X$  方向偏移量会给熔覆轨迹深度、宽度带来直接影响,因此会通过现场给定. 根据上式求出各层熔覆轨迹的焊枪姿态矩阵为

$$A_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta Y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi X & -\sin \phi X & 0 \\ 0 & \sin \phi X & \cos \phi X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\text{即 } A_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi X & -\sin \phi X & \Delta Y \\ 0 & \sin \phi X & \cos \phi X & \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

### 3 激光熔覆修复钻头仿真模拟

修复 PDC 钻头机器人仿真模拟流程如图 8 所示,在进行仿真模拟之前,建立统一的钻头模型与设计修复钻头路径的坐标系,这样在导入 PQart 之后,保证了钻头工件的待修复位置与它对应的轨迹重合,钻头待加工示意如图 9 所示.

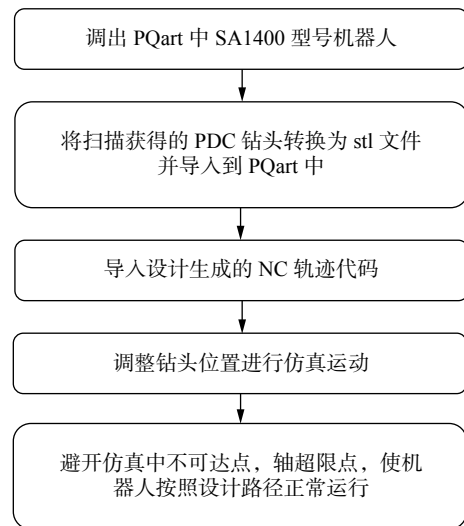


图 8 仿真修复流程图

Fig. 8 Simulation repair flow chart

#### 3.1 加工轨迹优化

钻头工件在加工时应当尽量靠近熔覆焊枪,避免工件待修复位置存在不可达点,同时避免机器人发生轴超限以及出现奇异点. 轴超限即工件待修复的表面存在机器人关节轴运动范围内不可达到的点;奇异点即机器人的末端执行器到达机器人待修复表面的某个点的过程中,机器人的某 2 个关节在



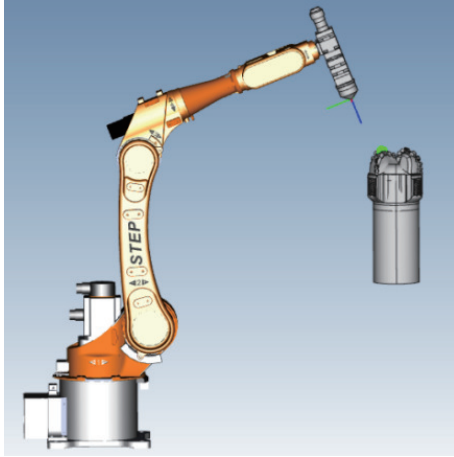


图 9 钻头待加工示意图

Fig. 9 Diagram of bit to be machined

一条轴线上,例如 3 轴和 5 轴在同一条轴线上,根据运动学逆解部分的知识可以得知  $\theta_3$  和  $\theta_5$  将会存在多个解,转动  $\theta_3$  或者  $\theta_5$  均可到达指定点,此时机械手臂的关节轴将无法继续运转,这种点便称之为奇异点. 在调整位置摆放工件的过程当中,避免这些问题点,实现机器人的正常运转. 机器人加工轨迹优化如图 10 所示,机器人位于可工作区间之内.

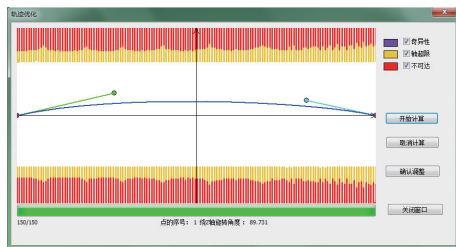


图 10 加工轨迹优化

Fig. 10 Machining path optimization

### 3.2 调整焊枪姿态

由式 (21) 得出,熔覆焊枪在修复 PDC 钻头的过程中,焊枪的位姿始终处于一个不断变换的状态,使枪头始终保持垂直于加工表面的姿态可以提高修复后的性能. 如图 11 所示,焊枪在修复过程某点的位姿,焊枪垂直于加工表面,调整焊枪姿态统一于此点所使用的枪头姿态.

### 3.3 仿真模拟

为了确保减少机器人的上机失误,在机器人真机操作之前掌握机器人的运动情况,应当对导入的轨迹进行仿真模拟,如图 12 所示,轨迹以及轨迹上的各个点没有出现问题点,机器人的各个关节处于运动范围内.

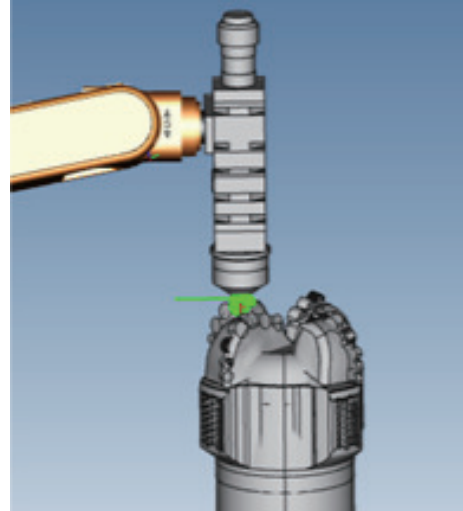


图 11 某点焊枪位姿

Fig. 11 Position of a spot welding gun



图 12 仿真结果图

Fig. 12 Simulation result diagram

## 4 结论

(1) 基于逆向工程, 采用激光扫描与逆向建模相结合的方法, 实现了复杂曲面零件的点云数据采集、曲面重构, 建立了 PDC 钻头的三维模型。

(2) 通过布尔运算获得了 PDC 钻头缺损部位, 利用等距平面族  $\Gamma$  与钻头修复部位相交, 完成了 PDC 钻头激光熔覆再制造路径的规划。

(3) 建立了 6 自由度机器人运动学模型, 运用齐次变换矩阵表达机器人熔覆焊枪的位姿, 确定了修复 PDC 钻头多层轨迹熔覆焊枪姿态矩阵。

(4) 通过激光熔覆修复钻头仿真模拟, 得出机器人在按照制定的轨迹进行修复时, 焊枪姿态处于一个变化的过程, 统一焊枪位姿于一点, 优化机器人的加工轨迹, 实现了复杂曲面工件表面的激光熔覆修复。

## 参考文献

- [1] 李艳波, 于连杰, 王辉, 等. 混合型 PDC 切削齿钻头在吉林油田深井中的应用[J]. 设备管理与维修, 2021(10): 92 - 94.  
Li Yanbo, Yu Lianjie, Wang Hui, *et al.* Application of hybrid PDC cutter bit in deep well of Jilin Oilfield[J]. Equipment Management and maintenance, 2021(10): 92 - 94.
- [2] 董振国, 熊伟, 龚长芳, 等. 海上油田开发井钻井并优化设计和应用实践[J]. 钻探工程, 2021, 48(7): 46 - 57.  
Dong Zhenguo, Xiong Wei, Gong Changfang, *et al.* Drilling and optimization design and application practice of offshore oilfield development wells[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7): 46 - 57.
- [3] 朱胜, 周超极, 周克兵. 绿色增材再制造技术[J]. 中国机械工程, 2018, 29(21): 2590 - 2593.  
Zhu Sheng, Zhou Chaoji, Zhou Keping. Green Additive Remanufacturing Technology[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(21): 2590 - 2593.
- [4] 孔丽丽. 胎体 PDC 钻头修复技术的探讨[J]. 科技创业家, 2012(21): 49.  
Kong Lili. Discussion on restoration technology of PDC bit in body[J]. Science and Technology entrepreneur, 2012(21): 49.
- [5] 杨伟, 刘建永. ABB 机器人激光熔敷系统离线编程与应用[J]. 制造业自动化, 2015, 37(9): 87 - 88.  
Yang Wei, Liu Jianyong. Off-line programming and application of ABB robot laser cladding system[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(9): 87 - 88.
- [6] 李金华, 冯伟龙, 李高松, 等. 基于机器人的激光熔覆离线编程与仿真研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(24): 102 - 104.  
Li Jinhua, Feng Weilong, Li Gaosong, *et al.* Off-line programming and simulation research of laser cladding based on robot[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(24): 102 - 104.
- [7] 邵青青, 王好臣. 多孔口罐盖焊接机器人运动模型研究[J]. 制造业自动化, 2016, 38(4): 59 - 62.  
Shao Qingqing, Wang Haochen. Research on motion model of multi-orifice tank cover welding robot[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(4): 59 - 62.
- [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 for free-form surface cladding path[J]. Laser Technology, 2017, 41(5): 718 - 722.
- [9] 熊骏伟, 刘全香. 基于物体表面变化的点云自适应切片算法[J]. 包装工程, 2016, 37(5): 167 - 171, 177.  
Xiong Junwei, Liu Quanxiang. Point cloud adaptive slicing algorithm based on object surface change[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(5): 167 - 171, 177.
- [10] Kiswanto G, Lauwers B, Kruth J P. Gouging elimination through tool lifting in tool path generation for five-axis milling based on faceted models[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(3-4): 293 - 309.
- [11] 郝建豹, 查进艳, 谢炼雅. 基于 DH 算法的平面关节机器人的运动学建模与仿真[J]. 机电工程技术, 2018, 47(4): 99 - 102.  
Hao Jianbao, Zha Jinyan, Xie Lianya. Kinematics modeling and simulation of planar joint robot based on DH algorithm[J]. Electromechanical engineering Technology, 2018, 47(4): 99 - 102.
- [12] Kuo YongLin. Mathematical modeling and analysis of the Delta robot with flexible links[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2016, 71(10): 1973 - 1989.
- [13] 李庆, 谢一首, 郑力新, 等. STEP-SA1400 型机器人运动学建模与仿真[J]. 微型机与应用, 2016, 35(5): 4 - 7, 11.  
Li Qing, Xie Yishou, Zheng Lixin, *et al.* STEP-SA1400 robot kinematics modeling and simulation[J]. Microcomputer and Its Applications, 2016, 35(5): 4 - 7, 11.
- [14] 李湘文, 吴宏宝, 洪波, 等. 旋转电弧机器人 V 形坡口焊缝跟踪模型与仿真[J]. 焊接学报, 2020, 41(8): 85 - 89, 102.  
Li Xiangwen, Wu Hongbao, Hong Bo, *et al.* Welding seam tracking model and simulation of V-shaped groove by rotating arc robot[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(8): 85 - 89, 102.
- [15] 曹林攀, 易际明, 谢传禄, 等. 激光传感的机器人多层多道焊路径规划[J]. 机械设计与制造, 2016(1): 186 - 189.  
Cao Linpan, Yi Jiming, Xie Chuanlu, *et al.* Multi-layer and multi-pass welding path planning for laser sensing robot[J]. Machinery Design and Manufacture, 2016(1): 186 - 189.

第一作者: 祖海英, 博士, 副教授; 主要研究方向为机械设计与制造; Email: zuhaiying@126.com.

通信作者: 宋玉杰, 博士, 教授; 主要研究方向为石油石化装备再制造、机电装备工作性能和参数检测、机械 CAD/CAM; Email: syjdqpi@163.com.

(编辑: 张基隆)