

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.015

激光加工技术在机场弱电集成化通信设备中的应用研究

宋健¹, 贺小辉¹, 薛钟松¹, 林伟文², 万里², 赵宇明²

(1. 广东省机场管理集团有限公司 工程建设指挥部, 广东 广州 510425;

2. 广州白云国际机场建设发展有限公司, 广东 广州 510470)

摘 要:针对机场弱电集成化通信设备的精密切割工艺,深入研究激光加工技术。识别待加工零件截面的轮廓线,确定轮廓线离散化的点距离和点数量,采用等距离离散化方法完成对零件截面轮廓线的离散化处理,计算待加工零件截面轮廓线各个离散点的入射激光脉冲数,将脉冲数最大的离散点设为激光切割起点。以此为依据,求取所有激光切割点的位置坐标,并按照路径点位置规划切割光路,由此生成激光切割路径,实现机场弱电集成化通信设备零件的精密切割。实验结果表明:在所提方法的应用下,零件切割面的表面粗糙度小于 $1.5\ \mu\text{m}$,其切割面较为平滑,能够保证加工质量。

关键词:激光加工技术;机场弱电集成化通信设备;激光切割;零件轮廓;加工质量

中图分类号:TG485 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)06-0085-05

Research on Application of Laser Processing Technology in Airport Weak Current Integrated Communication Equipment

SONG Jian¹, HE Xiaohui¹, XUE Zhongsong¹, LIN Weiwen², WAN Li², ZHAO Yuming²

(1. Engineering Construction Headquarters, Guangdong Airport Authority Co., Ltd., Guangzhou 510425, China;

2. Guangzhou Baiyun International Airport Construction and Development Co., Ltd., Guangzhou, 510470, China)

Abstract: Regarding the precision cutting process of airport weak current integrated communication equipment, in-depth research is conducted on laser processing technology. The contour line of the section of the parts to be processed is identified, the distance and number of points for discretization of the contour line is determined, equidistant discretization method is applied to discretize the contour line of the part section, the number of incident laser pulses at each discrete point of the zero section contour line to be processed is calculated, and the discrete point with the highest pulse number is set as the starting point of laser cutting. Based on this, the position coordinates of all laser cutting points are sought after, and the cutting optical path is planned according to the path point position to generate a laser cutting path, achieving precise cutting of airport weak current integrated communication equipment parts. The experimental results show that with the application of the proposed method, the roughness of the cutting surface of the part is less than $1.5\ \mu\text{m}$, with smooth cutting surface and ensured machining quality.

Keywords: laser processing technology; airport weak current integrated communication equipment; laser cutting; part contour; processing quality

0 引言

在当今快速发展的航空业中,机场弱电集成化通信设备作为确保机场运营安全和效率的关键基础设施,发挥着至关重要的作用^[1]。传统上,机场弱电综合通信设备的制造依赖于各种加工技术。然而,当面对高精度和高复杂度零件的加工要求时,传统方法难以在保证加工质量的同时平衡加工效率和成本控制。特别是零件的精密切削和表面处理已成为制约设备性能提高的主要瓶颈。因此,需研究一种新的通信设备零件加工技

术,以提高零件加工质量,从而保证通信设备的稳定性。

针对此问题,已经有很多学者提出了具体方法。文献[2]通过确定要切割的零件图像元素的特征点并使用随机函数生成初始切割路径,继而基于模拟退火算法找到最优切割路径。该方法能减少空行程,有效提高切割效率。然而,这种方法在设置切割起点时,缺少动态顶点的选择,导致切割质量不佳。文献[3]建立双激光协同切割的数学模型,使用模糊聚类算法初步分配切割任务,通过疫苗接种操作获得最优激光切割路径。此方法

基金项目:广东省科技项目(2020B0101130024)

第一作者简介:宋健(1979—),男,山东即墨人,高级工程师,硕士,研究方向为机场弱电系统,hxhui1973@163.com。

具有更短的时空行程和更高的算法稳定性,并显著提高了切割效率和材料利用率。但疫苗免疫算法在求解过程中需要设置多个参数,增加了算法求解的复杂度。文献[4]使用3D激光扫描仪获取待切割物体的点云数据,引入平面网格法对点云数据进行分割,结合切割要求和激光切割机的运动学约束,规划切割路径。该方法可以适应不同形状和尺寸的物体,扩展性较好。然而,处理3D点云数据需要大量的计算资源和时间,会增加切割前的准备成本。文献[5]通过使用模板匹配方法,自动识别零件的位置和方向,并从预处理后的图像中提取边缘、直线、曲线等信息,形成数字轮廓,结合数字图像处理技术,生成切割路径。该方法通过在线路径调整和优化,可以实时适应切割过程中的变化,提高切割效率和稳定性。但图像预处理的有效性直接影响轮廓提取和特征点选择的准确性,因此在实际应用中其加工效果有限。

在此背景下,本文通过探索激光加工技术在机场弱电集成化通信设备中的潜在应用,以提高通信设备零件切割加工的质量。

1 激光加工技术应用研究

激光加工技术借助高功率、高密度、高方向性及高相干性的激光束与材料的单色相互作用来加工零件^[6]。本文针对机场弱电集成化通信设备精密切割工艺,对其应用展开深入分析。

1.1 通信设备零件截面轮廓离散化

在弱电集成化通信设备激光切割中,需识别待加工零件轮廓线并转化为离散点以提取轮廓特征点,便于规划切割路径。设定零部件由圆弧、线段、圆等基本轮廓组成,轮廓为复杂封闭性轮廓^[7]。利用最大尖端高度调整原理对零件切割截面轮廓进行自适应识别,根据轮廓线复杂程度和切割要求确定离散化点距离和数量,采用等距离散化方法处理轮廓线,计算离散点坐标完成离散化,为激光切割起点设置奠定基础。

相关计算公式如下。

1) 自适应识别表达式:

$$X_r = \frac{\beta_g}{h_r} \cdot \frac{j_e}{R_s/k_j} \quad (1)$$

式中: X_r 表示零件轮廓点检测算子; β_g 表示零部件内轮廓的距离; h_r 表示外轮廓距离; j_e 表示经验常数; R_s 表示零件样片第 s 个图元的长度; k_j 表示激光器行走的空行程。

2) 确定离散化点距离^[8]和数量公式:

$$d_{ij} = \frac{X_r}{\sqrt{\beta_d \cdot f_{ij}}} \quad (2)$$

式中: d_{ij} 表示第 i 个和第 j 个离散点之间的距离; β_d 表示零部件轮廓线个数; f_{ij} 表示叠加标度函数。

3) 等距离散化方法^[9]表达式:

$$p_i = \frac{d_{ij}}{\lambda_i} \exp\left(-\frac{l_c}{V_d}\right) \quad (3)$$

式中: p_i 表示第 i 个离散点的概率密度分布函数; λ_i 表示自适应参数; l_c 表示轮廓线的等效长度; V_d 表示正倒数矩阵。

4) 确定离散点位置公式:

$$\begin{cases} x_i = p_i \times \alpha_r \\ y_i = \frac{p_i}{d_e \cdot g_0} \end{cases} \quad (4)$$

式中: (x_i, y_i) 表示第 i 个离散点的坐标; α_r 表示离散点 r 的切线斜率; d_e 表示离散点平滑系数; g_0 表示1阶滞后变量。

1.2 激光切割起点设置

激光切割起点设置是关键参数,影响切割效率和质量。基于零件截面轮廓线离散化结果确定最佳切割起点位置,需确定激光切割速度、计算系统脉冲当量、轮廓离散点特征属性约束以及入射激光脉冲数,将脉冲数最大的离散点设为切割起点^[10]。

相关计算公式如下。

1) 激光切割速度^[11]公式:

$$v_d = \frac{\tau_k}{L_0} \lg \frac{b_n}{y_e} \quad (5)$$

式中: τ_k 表示与待加工材料材质相关的参数; L_0 表示聚焦镜的焦距; b_n 表示焦点直径; y_e 表示材料厚度。

2) 系统脉冲当量公式:

$$D_r = \frac{a_s \sqrt{x_i^2 \times y_i^2}}{\|\gamma_r\| \times v_d} \quad (6)$$

式中: a_s 表示材料定位孔个数; γ_r 表示激光设备的额定动载荷。

3) 轮廓离散点特征属性约束^[12]公式:

$$c_i = D_r \cdot \delta_w \cdot q_g / k_t \quad (7)$$

式中: δ_w 表示误差系数; q_g 表示激光设备与加工材料的接触系数; k_t 表示表面粗糙度函数。

4) 入射激光脉冲数公式:

$$b_i = \frac{c_i}{A_r} \left| \frac{\pi_e}{r_k} \right| \quad (8)$$

式中: b_i 表示第*i*个轮廓离散点的入射激光脉冲数; A_r 表示实际光斑直径; π_e 表示阈值通量; r_k 表示转换系数; b_i 表示第*i*个轮廓离散点的入射激光脉冲数。

利用式(8)分别计算待加工零截面轮廓线离散点的入射激光脉冲数,将脉冲数最大的离散点设为激光切割起点^[13],由此完成激光切割起点的设置,便于最终激光切割路径的生成。

1.3 弱电集成化通信设备激光切割路径生成

完成切割起点设置后,选择切出点并确定所有切割点位置,规划激光切割光路^[14]。以基准坐标系原点为参考点,遍历离散点求取到参考点距离^[15],结合加工顺序和离散点位置分布衡量各点优劣,考虑加工工艺参数约束和信息约束确定切出点,进而确定各个切割点具体位置,最终生成激光切割路径,实现零件精密切割。

相关计算公式如下。

1) 求取离散点到参考点距离公式:

$$l_{i,o} = b_i \times \rho_r \times F_y \quad (9)$$

式中: $l_{i,o}$ 表示第*i*个轮廓离散点与坐标原点*O*的距离; ρ_r 表示从激光原点出发到切割起始点的空行程; F_y 表示激光功率。

2) 衡量各点优劣公式:

$$H_j = l_{i,o} \times \sqrt{\frac{v_e}{Z_s}} \quad (10)$$

式中: H_j 表示第*j*个轮廓离散点的劣化系数; v_e 表示切割路径点的特征量; Z_s 表示标准正态累积概率函数。

3) 假设零件在激光切割时的切割特征点选取概率为 P_d ,考虑加工工艺参数约束和信息约束,确定切割切出点^[16],即

$$u_t = \frac{H_j}{P_d} \lg \frac{\mu_f}{m'} \quad (11)$$

式中: μ_f 表示比例系数; m' 表示切割路径点个数。

4) 确定切割点位置公式:

$$\begin{cases} a_t = u_t \times \zeta_e \\ b_t = u_t / J_r / \omega_\alpha \end{cases} \quad (12)$$

式中: (a_t, b_t) 表示第*t*个切割点的位置; ζ_e 表示缩放因子; J_r 表示切割距离; ω_α 表示单位计算矩阵。

通过式(12)确定所有激光切割点的位置坐标,并按照路径点位置规划切割光路,由此生成激光切割路径,实现机场弱电集成化通信设备零件的精密切割。

2 实例论证分析

为验证本文提出的激光加工技术在机场弱电集成化通信设备应用中的效果,将本文方法应用在某弱电集成化通信设备零件精密切割中,并对其切割路径的规划,根据实验结果分析该方法的切割应用效果。

2.1 实验准备

本次实验选取某机场弱电集成化通信系统中的 GHT-COMM-5G-BaseStation-Unit1 通信设备为主要研究对象。以该设备中的核心部件作为待加工零件。该零件采用高强度铝合金材料制成,尺寸为 200 mm×100 mm×25 mm。其中需要切割的部分具有复杂的几何形状。该零件的切割精度要求极高,需要确保切割边缘的表面粗糙度,以保证零件在组装后的稳定性和可靠性。待加工零部件如图 1 所示。

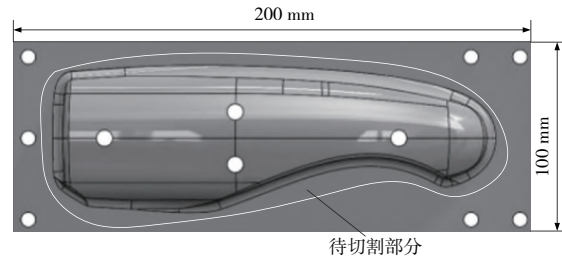
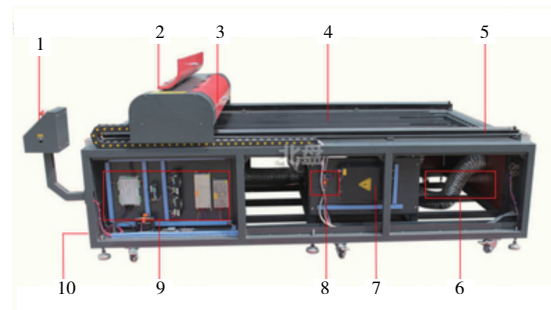


图 1 待加工零部件

实验中采用 MK4015 型金属激光切割机对图 1 所示的通信设备零件进行切割操作。该激光切割机采用固体激光器,具有输出功率大、切割速度快等优势,适用于金属、塑料和木材等多种材料的加工,具体如图 2 所示。



1—操控平台;2—激光头;3—激光管;4—大幅平台;
5—导轨;6—排尘系统;7—电源器;8—水保护器;
9—控制系统;10—外部分。

图 2 激光切割机及其构造

根据零件的切割要求,设置激光切割参数,如表 1 所示。

表 1 激光切割参数配置

参数	数值
切割速度/(mm/min)	6 000
激光输出功率/W	800
焦点位置/mm	0.22
辅助气体气压/Pa	7
喷嘴距离/mm	0.8
光斑直径/mm	2
丝-束直径比例	7 : 2

实验平台采用高精度、稳定的光学平台,以满足精密切割的要求。平台需要配备专业的激光切割系统,包括激光器、工控机、工作台等,具体如图 3 所示。

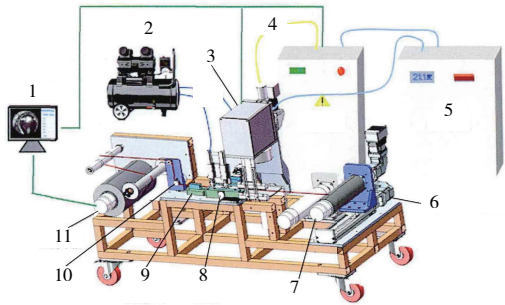


图 3 实验硬件平台

实验过程如下:

1)使用计算机上的专业 CAD 软件设计零件图,确保零件的尺寸和形状以符合设计要求;

2)将设计的零件图纸导入切割软件进行参数设置和模拟;将零件放在激光切割机的工作台上并用夹具固定;

3)调整激光头的位置,以确保激光束能够准确地照射在零件上;在切割软件中启动切割程序,激光切割机将根据预设路线自动切割。

2.2 通信设备零件激光切割结果与分析

基于以上实验准备与相关参数的设置,将本文设计的方法应用于图 1 所示的待加工零部件激光切割中,并引入双链基因的退火算法(方法 1)、模糊聚类疫苗免疫算法(方法 2)作为本文方法的对比方法^[17]。分别采用 3 种方法对该零部件进行精密切割,得到的切割成品如图 4 所示。



图 4 基于不同方法的零件切割成品示意图

为直观体现出上述 3 种方法对通信设备零部件切割的效果,对 3 个零部件切割成品的切割面表面粗糙度进行计算。该指标的计算公式如下:

$$Ra = \frac{1}{n \times s_p} \tag{13}$$

式中: n 表示零件轮廓线上测量点数量; s_p 表示第 p 个测量点到轮廓中线的距离。

利用式(13)分别计算切割完成后零件的切割面表面粗糙度,为使数据更加丰富全面,增加了更多切割时间点的数据,结果如表 2 所示。

表 2 基于不同方法的零件切割面表面粗糙度对比

切割时间/s	切割面表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$		
	方法 1	方法 2	本文方法
5	2.5	2.5	1.2
8	2.6	2.4	0.9
10	2.7	2.3	0.3
12	2.8	2.2	0.4
15	2.9	1.7	1.1
18	3.0	1.8	0.7
20	3.0	1.9	0.6
22	2.9	2.0	0.5
25	1.8	2.0	0.5
28	1.9	2.1	0.6
30	2.1	2.2	1.0
33	2.2	2.3	0.9
35	1.7	1.4	0.8
38	1.8	1.5	0.7
40	3.3	1.9	1.2

从表2中的数据可以看出,应用激光加工技术对通信设备零部件进行精密切割,切割成品的表面粗糙度 Ra 值均小于 $1.5\ \mu\text{m}$,明显低于对照组方法,这表明本文方法能够有助于保持零件切割面的纹理清晰和本色,保证了切割质量^[18]。

2.3 对比实验与分析

为综合体现本文提出的激光加工技术在弱电集成化通信设备切割应用中的优越性能,对不同方法切割加工后的零件切割面毛刺数量进行统计与比较,进一步分析切割性能。实验结果如图5所示。

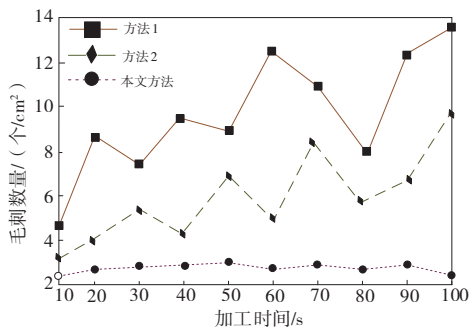


图5 基于不同方法的零件切割面毛刺数量对比

分析图5可知,采用本文所提的方法进行零部件切割,切割面的毛刺数量始终低于 $3\ \text{个}/\text{cm}^2$,远低于对照组方法。这是因为本文方法通过精确控制激光束的参数和切割路径,显著提高了切割边缘的平滑度,继而提高了零部件的整体切割质量^[19]。

2.4 切割精度分析

为进一步深入验证本文方法的有效性,对不同方法切割后的零件进行切割精度分析。采用三坐标测量仪对切割后的零件进行尺寸测量,测量多个关键尺寸,并与设计尺寸进行对比,计算尺寸偏差。测量结果如表3所示。

表3 基于不同方法的零件切割精度对比 单位:mm

关键尺寸 编号	设计尺寸	尺寸偏差		
		方法1	方法2	本文方法
1	50.00	± 0.15	± 0.12	± 0.05
2	30.00	± 0.10	± 0.08	± 0.03
3	25.00	± 0.13	± 0.11	± 0.04
4	40.00	± 0.18	± 0.16	± 0.06
5	15.00	± 0.08	± 0.07	± 0.02

从表3可以看出,本文方法的尺寸偏差明显小于其他两种方法,进一步证明了本文方法在切

割精度方面的优势,更好地满足机场弱电集成化通信设备零件的精密切割要求^[20]。

3 结语

在激光加工技术在机场低压弱电集成化通信设备中的应用研究中,通过设备零件轮廓线离散化处理 and 激光切割起始点设置以及激光切割路径生成,实现了复杂零件的精密切割与加工。激光加工技术的引入为机场弱电集成化通信设备的制造提供了新的思路和方法,对促进通信设备制造业的技术和产业升级具有重要意义。

参考文献:

- [1] 闫剑锋,郭恒,赵宇智,等. 微型超级电容器的激光加工研究进展[J]. 中国激光,2024,51(16):1602410.
- [2] 常翠芝,高文良,严蓬辉,等. 双链基因的退火算法用于激光切割路径优化[J]. 武汉工程大学学报,2023,45(3):331-336.
- [3] 闫嘉,李林峰,林毓培,等. 基于模糊聚类疫苗免疫算法的汽车零件双激光切割路径规划研究[J]. 应用激光,2023,43(9):75-83.
- [4] LIU Y, NING R, DU M X, et al. Online path planning of pork cutting robot using 3D laser point cloud [J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2024, 51(3): 511-517.
- [5] 常翠芝,高文良,杨潇,等. 图像处理和双链基因的退火算法用于激光切割路径的优化[J]. 制造技术与机床,2023(5):35-40.
- [6] 何娟,曹杰,钱伟,等. 基于皮秒激光的石墨表面亚微结构加工方法[J]. 激光与光电子学进展,2024,61(5):322-330.
- [7] 翟兆阳,李欣欣,张延超,等. 基于正交试验的金属薄壁材料激光切割工艺优化[J]. 中国机械工程,2024,35(7):1279-1289.
- [8] 王勇,陈娇娇,张鹏,等. 基于响应面-遗传算法的不锈钢激光切割工艺参数优化与试验研究[J]. 应用激光,2023,43(11):85-94.
- [9] 牛满钝,贾文祺,王树伦,等. 基于光束分析的高功率激光切割头光路优化[J]. 光学技术,2024,50(2):146-149.
- [10] 钟正根,徐侠,黄扬,等. 基于25 mm厚碳素钢激光切割工艺试验研究[J]. 金属加工(热加工),2023(9):43-46.
- [11] 邓彦波,王峰,李建国. 车用CFRP脉冲超皮秒激光切割参数优化及质量分析[J]. 中国工程机械学报,2023,21(4):343-347.
- [12] 全宏升,马威峰,唐赞,等. 可调谐超快激光贝塞尔光束加工方法研究[J]. 红外与激光工程,2024,53(8):66-74.

(下转第125页)

- Conference (SIU). Mersin,Turkiye: IEEE,2024:1-4.
- [8] NIE D,WANG X W,SHI L C,et al. EEG-based emotion recognition during watching movies [C]//2011 5th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering. Cancun,Mexico: IEEE,2011:667-670.
- [9] LIN Y P,WANG C H,JUNG T P,et al. EEG-based emotion recognition in music listening [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering,2010,57(7):1798-1806.
- [10] WANG D,LIAN J,CHENG H B,et al. Music-evoked emotions classification using vision transformer in EEG signals[J]. Frontiers in Psychology,2024,15:1275142.
- [11] JHA S K, SUVVARI S, KUMAR M. EEG-based emotion recognition;an in-depth analysis using DEAP and SEED datasets [C]//2024 11th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom). New Delhi,India: IEEE,2024:1816-1821.
- [12] BERGIL E, ORAL C, ERGÜL E U. Classification of arithmetic mental task performances using EEG and ECG signals[J]. The Journal of Supercomputing,2023,79(14):15535-15547.
- [13] ZANGENEH SOROUSH M, MAGHOOLI K, SETAREHDAN S K,et al. A review on EEG signals based emotion recognition [J]. International Clinical Neuroscience Journal,2017,4(4):118-129.
- [14] KOELSTRA S, MUHL C, SOLEYMANI M, et al. DEAP: a database for emotion analysis; using physiological signals [J]. IEEE Transactions on Affective Computing,2012,3(1):18-31.
- [15] LI X, ZHANG Y Z, TIWARI P, et al. EEG based emotion recognition: a tutorial and review [J]. ACM Computing Surveys,2023,55(4):1-57.
- [16] BRADLEY M M, LANG P J. Measuring emotion;the self-assessment manikin and the semantic differential [J]. Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry,1994,25(1):49-59.
- [17] 李湘喆,王丹,张柏雯,等. 基于脑电信号的通道选择研究综述[J]. 生物医学工程学杂志,2024,41(2):398-405.
- [18] TOPIC A, RUSSO M, STELLA M, et al. Emotion recognition using a reduced set of EEG channels based on holographic feature maps [J]. Sensors, 2022,22(9):3248.
- [19] 晁浩,刘永利,连卫芳. EEG 情感识别中基于集成深度学习模型的多分析域特征融合[J]. 控制与决策,2020,35(7):1674-1680.
- [20] CORTES C, VAPNIK V. Support-vector networks[J]. Machine Learning,1995,20(3):273-297.
- [21] BREIMAN L. Random forests[J]. Machine Learning,2001,45(1):5-32.

收稿日期:2025-10-22

(上接第89页)

- [13] 翟科,王一帆,杨子昊,等. 面向晶圆划刻的兆声辅助激光加工实验研究[J]. 电加工与模具,2024(4):50-54,60.
- [14] 李锦洋,关翔予,孔晓光,等. 基于 PSO 算法优化模糊 PID 控制器的灵巧手抓取控制研究[J]. 工业仪表与自动化装置,2024(2):75-79.
- [15] 刘远洋,杨红艳,张增焕. 基于人工神经网络的航空铝合金激光切割工艺研究[J]. 航空制造技术,2023,66(7):113-117.
- [16] 杨韩,王洪建,罗登成,等. 响应面分析法优化低碳钢薄板激光切割工艺参数[J]. 激光杂志,2023,44(1):188-193.
- [17] 战祥华,范常峰,李振涛,等. 脉冲激光加工对正弦表面织构成形性的影响研究[J]. 应用激光,2024,44(11):61-71.
- [18] 江华侨,崔银辉,张森. 激光加工技术在航空结构件领域的研究与应用进展[J]. 应用激光,2024,44(6):70-79.
- [19] 徐同乐. 现代激光技术在航空机械加工中的应用实践[J]. 中国机械,2023(5):68-71.
- [20] 蒋旭,徐飞,刘镇嘉. 激光切割机精准加工过程除渣技术研究[J]. 中国机械,2024(22):57-60.

收稿日期:2024-12-12