

本文引用格式：黄伟溪,李若涛,李文威,等,激光切割高频动态复合运动轨迹规划与控制方法[J].自动化与信息工程,2024,45(5):54-61.

HUANG Weixi, LI Ruotao, LI Wenwei, et al. High frequency dynamic composite motion trajectory planning and control method for laser cutting[J]. Automation & Information Engineering, 2024,45(5):54-61.

激光切割高频动态复合运动轨迹规划与控制方法*

黄伟溪¹ 李若涛² 李文威^{1,5} 杜斌²
张庆茂³ 梁佳楠^{1,4} 黄宗力² 李嘉铭³

- (1.华南智能机器人创新研究院, 广东 佛山 528300
2.广东宏石激光技术股份有限公司, 广东 佛山 528300
3.华南师范大学信息光电子科技学院, 广东 广州 510006
4.广东省科学院智能制造研究所, 广东 广州 510070
5.佛山智优人科技有限公司, 广东 佛山 528300)

摘要: 为提升激光切割的加工质量评价, 提出一种激光切割高频动态复合运动轨迹规划与控制方法。首先, 设计激光切割光学系统, 实现激光焦点光斑在三维空间内的高频动态运动; 然后, 探讨激光焦点光斑不同维度的运动轨迹规划方法; 接着, 提出激光焦点光斑高频动态运动轨迹规划方法, 并设计相应的激光切割驱动控制系统; 最后, 将该文方法与静态表面质量优先切割方法、静态最快切割方法进行钢板激光切割试验测试。试验测试结果表明, 该文方法的切割速度为 1 m/min、挂渣尺寸为 0.9 mm、表面粗糙度为 0.09 mm, 其切割加工质量评价参数优于以上两种方法。

关键词: 激光切割; 光学系统; 运动轨迹规划; 高频动态运动; 加工质量评价

中图分类号: TG485

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2024)05-0008-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2024.05.008

开放获取

High Frequency Dynamic Composite Motion Trajectory Planning and Control Method for Laser Cutting

HUANG Weixi¹ LI Ruotao² LI Wenwei^{1,5} DU Bin²
ZHANG Qingmao³ LIANG Jianan^{1,4} HUANG Zongli² LI Jiaming³

- (1.South China Robotics Innovation Research Institute, Foshan 528300, China
2.HSG Laser Co., Ltd., Foshan 528300, China 3.School of Information and Optoelectronic
Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China
4. Institute of Intelligent Manufacturing, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou
510070, China 5.Foshan Zhiyouren Technology Co., Ltd., Foshan 528300, China)

Abstract: To improve the processing quality evaluation of laser cutting, a high-frequency dynamic composite motion trajectory planning and control method for laser cutting is proposed. Firstly, design a laser cutting optical system to achieve high-frequency dynamic motion of the laser focal spot in three-dimensional space; Then, explore the methods for planning the motion trajectories of laser focal spots in different dimensions; Next, a high-frequency dynamic motion trajectory planning method for laser focal spot is proposed, and a corresponding laser cutting drive control system is designed; Finally, the method proposed in this article will be tested in steel plate laser cutting experiments with the static surface quality priority cutting method and the static fastest cutting method. The

54 * 基金项目: 国家自然科学基金项目(62005081); 佛山市重点领域“揭榜挂帅”科技攻关项目(2120001009232); 佛山市创新科技团队项目(FS0AA-KJ919-4402-0060)。

experimental test results show that the cutting speed of the method proposed in this paper is 1 m/min, the slag hanging size is 0.9 mm, and the surface roughness is 0.09 mm. Its cutting and processing quality evaluation indicators are superior to the above two methods.

Keywords: laser cutting; optical system; motion trajectory planning; high frequency dynamic motion; processing quality evaluation

0 引言

激光加工是一种利用光热效应侵蚀工件表面的加工方法,在材料加工领域具有重要的地位。随着激光加工技术的快速发展,激光切割工艺也越来越受重视^[1-3]。但受激光切割运动轨迹规划和机械控制方法等因素的影响,激光切割在实际应用中易产生条纹、挂渣、精度低等问题,导致激光切割成效不佳,缺乏广泛的经济适用性。

近年来,学者们对激光切割运动轨迹规划展开了相关研究。LÜTKE 等^[4]提出一种二维扫描仪控制轨迹实现激光切割的方法,但该方法属于静态单一轨迹规划与控制,易产生明显的条纹和挂渣等问题。KOZHEVNIKOV 等^[5]针对激光切割的运动轨迹规划和优化算法展开了理论研究,采用路径插补的方法来拟合轨迹曲线,但未能满足运动轨迹精确控制的要求。SYAM 等^[6]提出一种二维激光切割过程轨迹的图像处理算法,实现了降本增效,但该算法的适用性较低。张红勇等^[7]提出一种激光切割运动轨迹自动化控制模型,实现了运动轨迹自动控制与精准切割,但该模型在实际工程应用中的适用性与灵活性有待提高。CHEN^[8]针对高速混合运动轨迹规划问题,提出了一种在预定义绝对精度下的规划方法和理论,虽然仿真证明了其可行性,但该方法 and 理论仍不完善且不具备实际应用价值。丁喜合等^[9]针对激光焦点光斑的位置控制技术和直径控制方法展开了详细的理论研究,但缺乏试验验证,且技术理论模型具有明显的局限性。

针对上述问题,本文提出一种激光切割高频动态复合运动轨迹规划与控制方法,开展相应的方法分析和系统设计,提升实际激光切割的加工质量评价,以满足实际工程应用的需求。

1 激光切割光学系统

为实现激光焦点光斑在三维空间内的高频动态运动,本文设计了激光切割光学系统。该系统主要包括激光器、准直镜组、反射镜、振动镜组、聚焦镜组、扫描头等,结构示意图如图 1 所示。

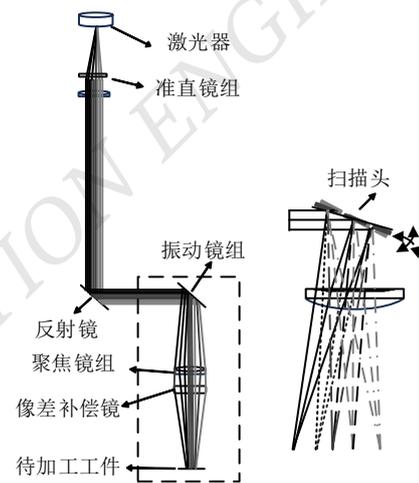


图 1 激光切割光学系统结构示意图

首先,准直镜组对激光器输出的激光束进行准直配光;然后,反射镜根据切割角度调整准直配光后的激光束角度;接着,振动镜组将调整角度后的激光束传输到聚焦镜组;最后,聚焦镜组对激光束聚焦,形成激光焦点光斑照射在待加工工件上。像差补偿镜可避免激光束因透射或高频反射而产生散斑效应或激光焦点光斑畸变等问题,有效提升激光焦点光斑的质量^[10-11]。

振动镜组在扫描头的带动下,通过控制激光束的反射方向来改变激光束的角度,实现激光焦点光斑在 x 、 y 轴方向上的高频移动。聚焦镜组配有压电驱动单元,根据压电元件电压与位移之间的关系,控制聚焦镜组沿 z 轴方向移动。因此,通过对扫描头和压电元件的精准控制,可实现激光焦点光斑在三维空间内的精确移动。

2 激光焦点光斑切割运动轨迹规划

2.1 激光焦点光斑单点和直线切割运动轨迹规划

在激光切割待加工工件的过程中，当激光焦点光斑进行单点切割时，设激光器的输出功率为 P_0 ，材料表面对激光能量的吸收率为 δ ，激光焦点光斑半径为 ω_0 ，激光焦点光斑面积 $S = \pi \cdot \omega_0^2$ ，则激光器的输出功率与激光焦点光斑的峰值功率 I_0 的关系为^[12]

$$P_0 = \frac{SI_0}{\delta} \quad (1)$$

在平面坐标系中，激光焦点光斑切割待加工工件时，假设待加工工件的切口宽度等于激光焦点光斑的直径 $2\omega_0$ ，且保持不变，则激光焦点光斑在 x 、 y 轴方向上的移动距离 Δx 、 Δy 的直线运动速度 V 为

$$\begin{aligned} V(x) &= \Delta x f_x \\ V(y) &= \Delta y f_y \end{aligned} \quad (2)$$

式中： f_x 和 f_y 分别为扫描头在 x 、 y 轴方向的振荡频率。

由公式(1)、(2)可知：当 $f = 0$ 时，激光焦点光斑进行单点切割；当 $f > 0$ 时，扫描头带动振动镜组在 x 或 y 轴方向进行摆动，激光焦点光斑在 x 或 y 轴方向进行直线切割。同时，需避免激光焦点光斑能量分布过度集中或照射时间不当等原因，导致激光切割成效不良的现象^[13]。

2.2 激光焦点光斑曲线切割运动轨迹规划

在激光切割待加工工件的过程中，当激光焦点光斑切割运动轨迹为曲线时，需建立运动轨迹自动化控制数学模型^[7]。该模型通过 3 次 B 样条曲线来拟合激光焦点光斑曲线切割运动轨迹。同时，结合高斯分布概率算法的控制原理，实现激光焦点光斑曲线切割运动轨迹偏移的自行纠正。

一般地， k 次 B 样条曲线有 $k+1$ 个控制点，即采用 3 次 B 样条曲线来拟合激光焦点光斑曲线切割运动轨迹时，通过 4 个点即可确定一段光滑曲线。基于 MATLAB 平台进行了 3 次 B 样条曲线的仿真计算，示例如图 2 所示。

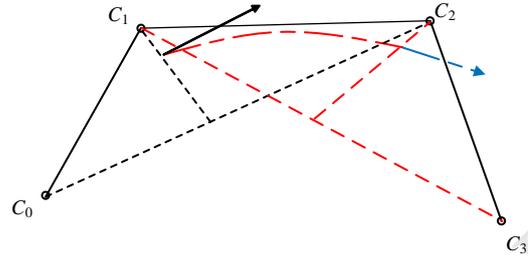


图 2 3 次 B 样条曲线仿真计算示例

先设定曲线轨迹的拟合控制点，再通过 3 次 B 样条曲线来拟合激光焦点光斑曲线切割运动轨迹，可避免后续因任何一个控制点改变而影响整条曲线。

B 样条曲线公式为

$$S_e(t) = \sum_{j=i-k}^i C_j \cdot N_{j,k}(t) \quad (3)$$

其中，

$$N_{j,k}(t) = \frac{1}{k!} \cdot \sum_{r=0}^{k-i} (-1)^r G_{k+1}^r (t+k-i-r)^k, \quad (4)$$

$$i = 0, 1, \dots, k,$$

式中： j 为曲线的起始控制点； k 为曲线阶次； i 为迭代参数，相当于在控制点 P_j 到 P_{j+k} 之间插入 i 个控制点； C_j 为任意控制点； $N_{j,k}(t)$ 为基函数，是各参数计算后的阶乘之和； $S_e(t)$ 为任意段曲线，是控制点和基函数的乘积之和。

对于 3 次 B 样条曲线，即 $k = 3$ ，相应的 4 个基函数为

$$\left. \begin{aligned} N_{0,3}(t) &= \frac{1}{6}(-t^3 + 3t^2 - 3t + 1) \\ N_{1,3}(t) &= \frac{1}{6}(3t^2 - 6t^2 + 4) \\ N_{2,3}(t) &= \frac{1}{6}(-3t^3 - 3t^2 + 3t + 1) \\ N_{3,3}(t) &= \frac{1}{6}t^3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

根据公式(5)的 4 个基函数，可得到图 2 曲线端点位置控制点的公式为

$$C_{0,3}(t) = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & t & t^2 & t^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

即曲线端点位置为

$$\left. \begin{aligned} C_{0,3}(0) &= \frac{1}{6}(C_0 + 4C_1 + C_2) \\ C_{0,3}(1) &= \frac{1}{6}(C_1 + 4C_2 + C_3) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

曲线端点求导后的切矢推导公式为

$$\left. \begin{aligned} C'_{0,3}(0) &= \frac{1}{2}(C_2 - C_0) \\ C'_{0,3}(1) &= \frac{1}{2}(C_3 - C_1) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

联合公式(6)、(7)、(8)可分别计算出图 2 的控制点 C_0 、 C_1 、 C_2 和 C_3 。根据以上 4 个控制点,即可拟合出激光焦点光斑曲线切割运动轨迹。

激光焦点光斑进行曲线切割时,将该预设曲线上 4 个控制点的坐标输入到激光切割数控系统中,可拟合出激光焦点光斑曲线切割运动轨迹。同时,设定扫描头在 x 、 y 轴方向的振荡频率 f_x 、 f_y 和振幅 A_x 、 A_y ,即可实现激光焦点光斑对待加工工件的曲线切割。

2.3 激光焦点光斑多维曲面切割运动轨迹规划

在 x 、 y 轴方向曲线切割运动轨迹的基础上,增加激光焦点光斑在 z 轴方向的运动轨迹,即通过改变压电元件的电压来调整 z 轴方向的振幅 A_z ,从而实现激光焦点光斑切割三维运动轨迹规划。此外,依据高斯概率分布原理,运动轨迹自动化控制数学模型通过调整激光器的输出功率 P_0 和激光焦点光斑的运动速度 V 等参数,将控制参数闭环反馈给扫描头和压电元件,可快速精准地调整激光切割的角度及深度,实现激光焦点光斑在多维空间内精准的运动轨迹规划及控制。

为便于推算激光焦点光斑的峰值功率 I_0 、运动速度 V 以及激光束与多维空间 3 个维度面夹角(3 个切割角)的内在关系,将这 3 个切割角投影转换为

α 、 β 、 θ , 其投影原理图如图 3 所示。

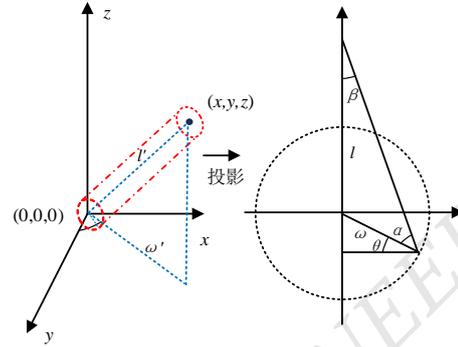


图 3 激光切割物体多维空间投影原理图

在图 3 的球坐标系中, (x, y, z) 为激光束中心坐标, $(0, 0, 0)$ 为待加工工件的中心坐标, l 为激光束中心与待加工工件中心的距离, l 为 l 投影后的距离, ω 为实际切割点到待加工工件中心的距离, ω 为 ω 投影后的距离。

在实际工程应用中,随着激光焦点光斑的切割运动轨迹变化,3 个切割角也相应地发生变化。经投影转换后,结合正弦、余弦原理,可得到 α 、 β 、 θ 之间的转换变化关系为^[7,14]

$$\left. \begin{aligned} \sin \alpha &= \frac{l}{\omega} \sin \beta \\ \alpha &= \arcsin\left(\frac{l}{\omega} \sin \beta\right) \\ \theta &= \arcsin\left(\frac{l}{\omega} \sin \beta\right) + \beta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

在激光焦点光斑切割运动时,实际照射在待加工工件上的峰值功率 I_0 、运动速度 V 以及 3 个切割角会发生联动变化,变化关系公式为^[7,15]

$$\frac{l \sin \theta}{\sqrt{I_0^2 \sum_1^n V \cdot I_0}} = \alpha \sin \left(\beta + \arcsin \left(\frac{l}{\omega} \sin \beta \right) \right) \quad (10)$$

$$\frac{l \cos \theta}{\sqrt{\sum_1^n V \cdot I_0^2}} = \alpha \sin \left(\alpha + \arcsin \left(\frac{l}{\omega} \sin \beta \right) \right) \quad (11)$$

通过对公式(10)、(11)进行积分运算^[14], 运动轨迹自动化控制数学模型闭环反馈调整扫描头振荡频率、压电元件电压、激光器输出功率等, 根据 $V = Af$ 进行 V 和 I_0 等参数的联动设定, 实现激光头运动及姿态的控制^[16], 即可实现激光焦点光斑多维曲面切割运动轨迹规划。

3 激光焦点光斑高频动态运动轨迹规划

为提高激光切割质量, 在激光焦点光斑沿着预设切割轨迹运动的同时, 通过对压电元件设置不同的频率和振幅, 可使激光焦点光斑进行高频动态运动。这样, 激光焦点光斑的实际运动轨迹为沿着切割轨迹的高频动态运动轨迹。

设激光焦点光斑高频动态运动轨迹的一般形式为

$$S_r(t) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{33} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ \sin t \\ \cos t \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, 矩阵 A 的9个元素 $a_{ij}(i=1, 2, 3)$ 取值不同时, 会形成不同类型的高频动态运动轨迹。

$$1) \text{ 当 } A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & r \\ 0 & r & 0 \\ 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}, r \text{ 为常数时, 公式(12)}$$

描述的激光焦点光斑运动轨迹为等截面圆螺旋线, 可实现激光焦点光斑沿 z 轴方向做高频动态运动。通过调节待加工工件的断面热影响区能量分布, 可避免激光切割断面产生挂渣或粗条纹等现象。设参数方程的驱动参数 t 为 $[0, 4\pi]$, R 为 x 、 y 轴方向的振幅, 得到激光焦点光斑的高频动态运动轨迹如图4(a)所示。

$$2) \text{ 当 } A = \begin{bmatrix} 0 & a & bt \\ 0 & -dt & c \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, a, b, c, d \text{ 为常数}$$

时, 公式(12)描述的激光焦点光斑运动轨迹为墨西哥顶帽螺旋线, 可实现激光焦点光斑沿 z 轴方向做高频动

态运动, 提高了激光切割断面的质量。设参数方程的驱动参数 t 为 $[0, 10\pi]$, a 、 b 、 c 、 d 的取值为 x 、 y 轴方向的振幅, 得到激光焦点光斑的高频动态运动轨迹如图4(b)所示。

$$3) \text{ 当 } A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & a \\ 0 & b & 0 \\ 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}, a, b \text{ 为常数, 且 } a \neq b$$

时, 公式(12)描述的激光焦点光斑运动轨迹为椭圆螺旋线, 可实现激光焦点光斑沿 z 轴方向做高频动态运动, 从而改善激光切割断面的倾角, 减少后续处理工序。设参数方程的驱动参数 t 为 $[0, 4\pi]$, a 、 b 取值为 x 、 y 轴方向的振幅, 得到激光焦点光斑的高频动态运动轨迹如图4(c)所示。

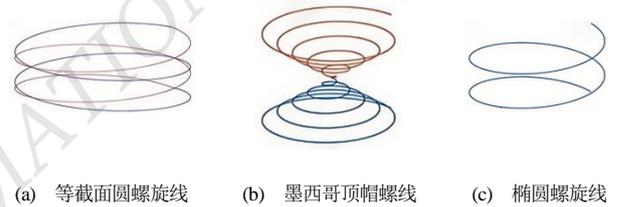


图4 激光焦点光斑的高频动态运动轨迹

4 激光切割驱动控制系统设计

将激光焦点光斑的切割运动轨迹(牵连运动 S_e)和局部高频动态运动轨迹(相对运动 S_r)复合, 形成高频动态复合运动轨迹 S_a (绝对运动):

$$S_a(t) = S_e(t) + S_r(t) \quad (13)$$

当激光焦点光斑沿切割轨迹单向运动时, 为直接切割, 这时激光束作用在待加工工件的时间较短, 易产生挂渣、粗条纹等现象。

当激光焦点光斑沿切割轨迹运动的同时做局部高频动态运动, 为动态复合切割, 可提高待加工工件材料对激光能量的吸收效率, 加快切割速度, 缩小切割挂渣尺寸, 改善切割断面的表面粗糙度。

直接切割运动轨迹与动态复合切割运动轨迹如图5所示。

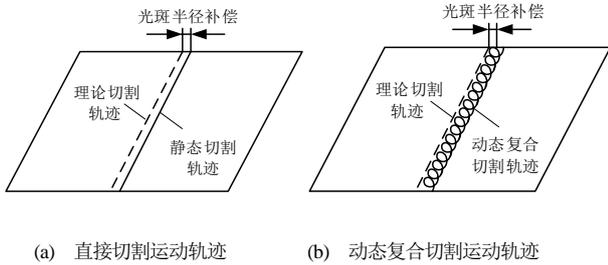


图5 直接切割与动态复合切割的运动轨迹

为精确控制动态复合切割运动轨迹，满足实际工程应用的需求，本文在常用的激光切割数控系统的基础上，叠加了轨迹规划复合高频动态运动控制模块，形成新的激光切割数控系统。新的激光切割数控系统与激光切割头驱动控制模块共同组成了激光切割驱动控制系统，其结构示意图如图6所示。

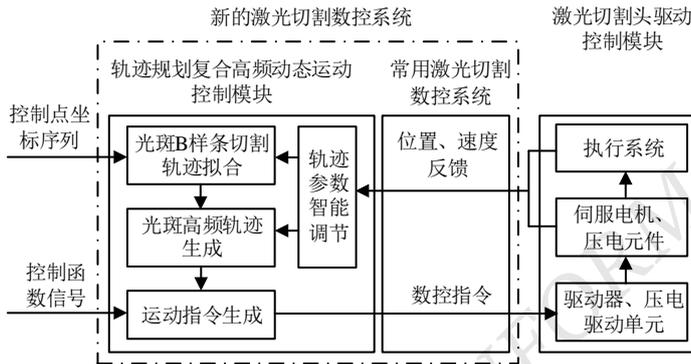


图6 激光切割驱动控制系统结构示意图

在新的激光切割数控系统中，输入激光焦点光斑运动轨迹的各控制点坐标序列，并利用3次B样条曲线对激光切割运动轨迹进行拟合，生成激光焦点光斑动态复合运动轨迹对应的数控指令；将该数控指令输入到激光切割头驱动控制模块的驱动器、压电驱动单元；驱动器、压电驱动单元控制相应的伺服电机和压电元件完成相应的动作指令，从而驱动执行系统完成激光焦点光斑的预设运动轨迹；根据切割要求，输入相应的控制函数信号，驱动执行系统进行预设的高频动态运动控制；最终，两路信号复合驱动激光焦点光斑在三维空间内完成预设运动轨迹的高频动态运动。同时，执行系统将激光焦点光斑的实际位置和运动速度参数反馈给轨迹参数智能调节单元。如果该单元获取的反馈参数存在误差，则其自行调整激光焦点光斑

的位置、运动轨迹和动态运动等参数，使激光切割更精准、高效。

5 激光切割试验

5.1 试验条件

本文在材质为45#、厚度为10mm的钢板上进行激光切割试验。试验中，设定x、y轴方向的振幅为300μm，激光焦点光斑复合高频动态运动控制的主要参数如表1所示。

表1 激光焦点光斑复合高频动态运动控制的主要参数

方向	形式	测试振幅@2 kHz	测试振幅@4 kHz
xy面	振镜	+300 μm	+300 μm
z方向	压电	+1 mm	+5 mm

本文基于激光切割测试平台进行激光切割试验。首先，激光器输出1060~1090nm波长的激光束至激光切割头，形成的激光焦点光斑对45#钢板（待加工工件）进行激光切割；然后，利用光束测量设备对激光束和激光焦点光斑进行质量分析、功率测量；接着，函数发生器输出控制函数信号给数控系统主机；数控系统主机输出复合指令控制激光切割头的运动及姿态；激光切割测试平台拍摄切割结果图像，并采集及输出激光切割速度、挂渣尺寸和表面粗糙度等数据。激光切割试验原理示意图如图7所示。

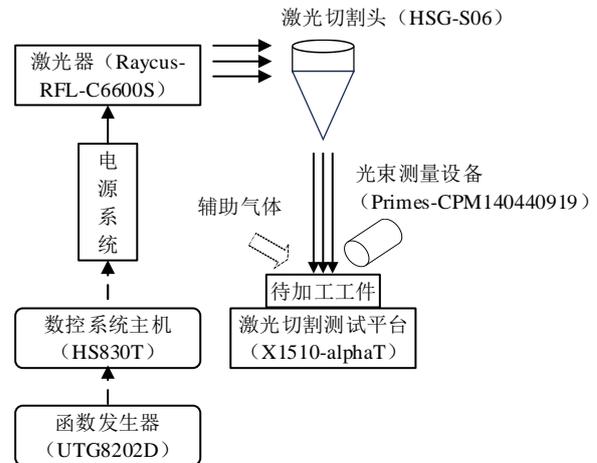


图7 激光切割试验原理示意图

5.2 试验结果

按照表 1 的控制参数,根据图 7 所示的试验原理,对钢板进行激光切割试验测试,试验效果如图 8 所示。



(a) z 轴幅振 1 mm, 频率 2 kHz 时, 薄材激光切割效果



(b) z 轴幅振 5 mm, 频率 4 kHz 时, 厚材激光切割效果

图 8 激光切割效果

由图 8 可知:在 z 轴幅振 1 mm, 频率 2 kHz, 及 z 轴幅振 5 mm, 频率 4 kHz 时均能实现激光切割断面切痕的平滑规整且挂渣不明显,且图 8(a)的切痕边缘优于图 8(b),这是因为激光焦点光斑 z 轴方向小振幅的高频动态复合运动,有效减少了光束双曲面缺陷^[17]对材料局部产生应力变化而导致的形变影响。综上所述,以上两种试验效果均满足一般激光切割的实际工程应用需求,无需再进行后续的二次切痕边缘加工。

5.3 结果评价

将本文方法(动态复合切割)与实际工程常用的静态表面质量优先切割方法、静态最快切割方法^[18]进行对比试验,并采集激光切割加工质量评价的关键参数(切割速度、挂渣尺寸和表面粗糙度),试验结果如表 2 所示,实际切割效果如图 9 所示。

表 2 3 种激光切割方法的试验结果

参数	静态表面质量优先切割方法	静态最快切割方法	动态复合切割方法
切割速度/(m/min)	0.2	0.5	1
挂渣尺寸/mm	1	1	0.9
表面粗糙度/mm	0.05	0.17	0.09



(a) 静态表面质量优先切割方法断面 (b) 静态最快切割方法断面 (c) 动态复合切割方法断面

图 9 3 种激光切割方法的实际效果对比

由表 2 和图 9 可知:与静态表面质量优先切割方法、静态最快切割方法相比,本文方法在切割速度和挂渣尺寸方面均有明显的优势,但切割断面的表面粗糙度略差于静态表面质量优先切割方法。

根据表 2 数据,得到 3 种激光切割方法的加工质量评价框图如图 10 所示。

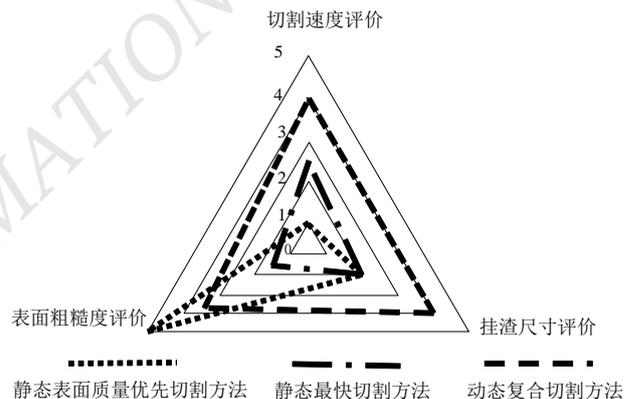


图 10 3 种激光切割方法的加工质量评价框图

由图 10 可知,本文方法的加工质量评价明显优于静态表面质量优先切割方法和静态最快切割方法,说明该方法提高了激光切割加工的总体质量。

6 结论

为了优化激光切割加工质量评价的 3 个关键参数(切割速度、挂渣尺寸、表面粗糙度),本文提出了一种激光切割高频动态复合运动轨迹规划与控制方法。基于激光切割光学系统、激光焦点光斑在不同维度的运动轨迹规划方法,以及高频动态运动控制方法,设计了新的激光切割驱动控制系统,实现激光切割运动轨迹的精准规划与高频动态运动的控制,使激光切割更精准、高效。试验测试结果表明,本文方法的切

割速度为 1 m/min、挂渣尺寸为 0.9 mm、表面粗糙度为 0.09 mm, 具有良好的实际应用效果。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

- [1] 陈胜,黄辉宇,董雄炜,等.激光切割技术的研究现状[J].有色金属加工,2022,51(5):1-6;26.
- [2] WANAMAKER K. MULTIAXIS LASER CUTTING in the automotive industry[J]. Welding Journal, 2023,102(5):24-26.
- [3] 梁磊,张宁.激光技术应用综述[J].河南科技,2019(35):79-80.
- [4] LÜTKE M, MAHRLE A, HIMMER T, et al. Remote-cutting—A smart solution using the advantages of high brightness lasers [C]//International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. AIP Publishing, 2008.
- [5] KOZHEVNIKOV M M, CHUMAKOV O A, SHEMENKOV V M, et al. Methods and algorithms for robotic manipulator trajectory planning in laser cutting[J]. Bulletin of Belarusian Russian Universities, 2019,2(63):4-13.
- [6] SYAM W P, BANSAL R, BENARDOS P, et al. Image processing algorithm to determine an optimised 2D laser cutting trajectory[J]. 2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC), IEEE, 2019:1-6.
- [7] 张红勇,张晓辉,郑勐.激光切割轨迹的自动化控制模型改进与实现[J].激光杂志,2017,38(11):68-71.
- [8] CHEN W C, CHEN C S, LEE F C, et al. High speed blending motion trajectory planning using a predefined absolute accuracy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019,104(8):2179-2193.
- [9] 丁喜合,董香龙,郝文胜,等.激光切割头焦点控制技术研究[J].雷达与对抗,2022,42(1):43-46.
- [10] 董繁龙,赵方舟,葛廷武,等.全光纤激光器光束质量的优化[J].光学精密工程,2014,22(4):844-849.
- [11] 胡昌奎,杨应平,陈培锋.高光束质量 CO₂ 激光焊接、切割机的光学系统[J].激光与红外,2007,37(3):217-219.
- [12] 王蕾,吴翠红,郭士茹.光纤激光精密切割系统功率智能控制方法[J].激光杂志,2022,43(11):215-219.
- [13] 李祥友,曾晓雁,刘勇,等.激光精密切割不锈钢薄板的工艺研究[J].中国激光,2001,28(12):1125-1129.
- [14] 朱蟋蟋,孙兵,朱大奇.基于改进 D* 算法的 AUV 三维动态路径规划[J].控制工程,2021,28(4):8:736-743.
- [15] 陈国兴,高爱梅,程秀全,等.精密切割工艺的轨迹规划研究[J].电子工业专用设备,2019,48(2):8-12.
- [16] 黄伟溪,陈儒,李文威,等.一种激光切割设备的切割过程激光头控制方法及相关装置:CN202311800576.1[P].2024-05-28.
- [17] 安毓英,刘继芳,曹长庆.激光原理与技术[M].科学出版社,2010.
- [18] 尤胜超,张伟.中厚板激光切割技术应用与研究[J].现代制造技术与装备,2018(7):82-83.

作者简介:

黄伟溪,男,1983年生,硕士研究生,工程师,主要研究方向:自动化技术、光学智能加工与检测装备技术。E-mail: wxhuang2012@126.com

李若涛,男,1978年生,硕士研究生,工程师,主要研究方向:激光技术、激光加工技术。E-mail: ruotaoli@hsglaser.cn

李文威,男,1981年生,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:智能机器人、CAD/CAE 数字化仿真、机械动力学、制造业信息化。E-mail: liwenwei011@163.com

杜斌,男,1990年生,硕士研究生,主要研究方向:激光光学应用、激光智能加工技术。E-mail: dubin@hsglaser.cn

张庆茂,男,1966年生,博士研究生,教授,博士生导师,主要研究方向:激光精密焊接、激光微纳制造。E-mail: zhangqm@scnu.edu.cn

梁佳楠,男,1989年生,在读博士研究生,高级工程师,主要研究方向:自动化技术、机器视觉及智能制造技术。E-mail: jn.liang@giim.ac.cn

黄宗力,男,1990年生,本科,主要研究方向:激光应用和激光加工技术。E-mail: 378004943@qq.com

李嘉铭,男,1990年生,博士研究生,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向:激光先进制造和诊断。E-mail: jmli@m.scnu.edu.cn