

提高三维激光切割平顺性的切割头空间位姿优化方法

吴问才 邓帆 胡俊

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要 三维激光切割头空间位姿变化的平顺性直接影响机床切割效率、安全和稳定性。建立了三维激光切割机五轴联动运动学模型,分析切割轨迹刀位点几何信息转换为机床五个运动轴空间坐标的可选值。结合 B 和 C 旋转轴运动部件间的摩擦力、质量和转动惯量,建立相邻刀位点间的旋转轴旋转运动耗能模型。将完整切割环上旋转轴运动最低总耗能作为优化目标,通过 Dijkstra 最小路径优化算法,获得完整切割环上的最佳切割方式。通过实例分析,该方法可避免 B 和 C 轴瞬间摆动过大情况,提高了切割头运动的平顺性。

关键词 激光技术;三维激光切割;运动学模型;耗能;路径优化

中图分类号 TG485 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0103005

Optimal Orientation of the Cutting Head for Enhancing Smoothness Movement in Three-Dimensional Laser Cutting

Wu Wencai Deng Fan Hu Jun

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract The changes of three-dimensional (3D) laser cutting head's orientation directly affect the cutting efficiency, security and stability of machine tool. A kinematic model of 3D laser cutting machine is established, and optional values are analyzed when geometric information of cutter location points on the cutting trajectory is transformed to space coordinates of five axes. Based on the friction between moving parts and the quality and the inertia of rotation axis, this paper establishes an energy model of the rotational motion of B , C -rotation axis between adjacent cutter location points. The optimization goal is the lowest total energy consumption of rotational motion of B , C -rotation axis on the complete cutting ring, then a minimum energy consumption path can be found by Dijkstra algorithm. Through example calculation, this method can avoid the momentary swing of B , C -rotation axis and enhance the movement smoothness of laser cutting head.

Key words laser technique; three-dimensional laser cutting; kinematic model; energy consumption; path optimization

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 350.3850; 160.3380

1 引 言

三维(3D)激光切割质量和效率的影响因素众多^[1,2]。其中,三维激光切割自动编程方法是影响三维激光切割机工作效率和精度的关键技术之一,其工作原理为从工件计算机辅助设计(CAD)图形文件中获取待切割轨迹的几何特征,通过离散化处

理得到刀位点,在相邻刀位点之间通过直线插补实现切割加工控制^[3]。

刀位点在工件坐标系中的表达方式为 (X, Y, Z, i, j, k) ,包含了位置和法向量信息。在生成相应的数控加工代码时,需要将刀位点坐标转换为机床坐标系下的切割头前端位置坐标和法向矢量,即确立

收稿日期: 2012-07-20; **收到修改稿日期**: 2012-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(50905112)资助课题。

作者简介: 吴问才(1987—),男,硕士研究生,主要从事数控技术和激光切割加工工艺等方面的研究。

E-mail: wencai0928@yahoo.com.cn

导师简介: 胡俊(1975—),男,副教授,主要从事数控技术和激光加工工艺等方面的研究。E-mail: hujun@sjtu.edu.cn

切割头的空间位姿,以控制激光束沿法向矢量方向实现对该点的切割加工。三维激光切割一般带有3个移动轴(X, Y, Z)和两个旋转轴(B, C),由工件上的刀位点转换得到切割头空间位姿时,存在多解,必须通过优化以获得最佳的切割头空间位姿,避免切割过程中切割头出现大的摆动,提高机床切割的稳定性。

金建新^[4]研究了五轴加工中心加工曲线时的刀具姿态实时控制方法,建立了刀具姿态求解及控制的数学模型,实现数控机床(CNC)系统对刀具姿态的实时控制。Makhanov等^[5]通过建立刀具在相邻刀位点间的运动误差模型,根据刀具运动误差和旋转轴变化量,对五轴加工中心的刀具姿态进行优化。Munlin等^[6]研究了曲面上奇异点附近时的旋转轴角度优化方法,建立了该奇异点附近从不同路径移动的刀具运动误差模型,由此对五轴加工中心的旋转轴位姿进行了优化。文献[4~6]提供了一些通过优化刀具位姿来提高五轴加工中心加工精度的方法,优化目标是加工误差。

徐宏伟等^[7]对五轴激光淬火机床加工时的工件姿态进行优化,根据工件的瞬间淬火区域法向矢量

需垂直于 XOY 坐标平面的要求,利用该区域的4个边界点构成两个平面,建立其法向矢量来确定工件的最佳姿态。陈继明等^[8,9]假定起始点处切割头位姿已定,在不发生碰撞前提下以相邻刀位点 B 和 C 轴角度变化值最小,依次在4个可选值中选择下一刀位点处激光切割头位姿,该方法不能避免完整切割环上的 B 和 C 轴瞬间摆动过大问题。

由于三维激光切割机 B 和 C 轴出现瞬间大角度摆动会增加旋转轴的能耗,本文提出一种基于旋转轴旋转运动最低耗能的三维激光切割头空间位姿求解方法,可获得完整切割环上的最优切割头位姿,提高激光切割头空间位姿变化的光顺性。

2 三维激光切割机运动学分析

三维激光切割机的典型结构为激光头整体沿 X, Y, Z 轴平移、沿 C 轴旋转和沿 B 轴摆动,如图1所示。设激光头的初始位置齐次坐标 $(0, L_1, -L_2, 1)$,法向矢量齐次坐标 $(0, 0, 1, 0)$;工件切割点的齐次坐标 $(x_0, y_0, z_0, 1)$,法向矢量坐标 $(i, j, k, 0)$;机床五轴坐标 $(x, y, z, \varphi_B, \varphi_C)$,如图2所示。利用齐次坐标变换可得

$$\mathbf{Q}_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_C & -\sin \varphi_C & 0 & 0 \\ \sin \varphi_C & \cos \varphi_C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_B & 0 & \sin \varphi_B & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi_B & 0 & \cos \varphi_B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ L_1 \\ -L_2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{T}_R = \begin{bmatrix} \cos \varphi_C & -\sin \varphi_C & 0 & 0 \\ \sin \varphi_C & \cos \varphi_C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_B & 0 & \sin \varphi_B & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi_B & 0 & \cos \varphi_B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{Q}_R = [x_0 \quad y_0 \quad z_0 \quad 1]^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{T}_R = [i \quad j \quad k \quad 0]^T. \quad (4)$$

由(1)~(4)式可建立刀位点信息与机床五轴的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - L_2 \sin \varphi_B \cos \varphi_C - L_1 \sin \varphi_C \\ y - L_2 \sin \varphi_B \sin \varphi_C + L_1 \cos \varphi_C \\ z - L_2 \cos \varphi_B \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varphi_B \cos \varphi_C \\ \sin \varphi_B \sin \varphi_C \\ \cos \varphi_B \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由(5)式可以得出:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + L_2 \sin \varphi_B \cos \varphi_C + L_1 \sin \varphi_C \\ y_0 + L_2 \sin \varphi_B \sin \varphi_C - L_1 \cos \varphi_C \\ z_0 + L_2 \cos \varphi_B \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

根据(6)式反求 φ_B 和 φ_C 角,已知三维激光切割机 φ_B 和 φ_C 角的实际旋转范围分别是: $\varphi_B \in [-\frac{3}{4}\pi, \frac{3}{4}\pi]$, $\varphi_C \in [-2\pi, 2\pi]$ 。则 φ_B 和 φ_C 角为

$$\varphi_B = k_B \arccos k, \quad k_B = 1, -1 \quad (8)$$

$$\varphi_C = (-1)^k \arctan\left(\frac{j}{i}\right) - 2k_C\pi, \quad (9)$$

$$k_C = 0, 1; i \neq 0$$

式中 φ_C 角求解需要考虑 $\frac{i}{\sin \varphi_B}$ 和 $\frac{j}{\sin \varphi_B}$ 值的正负 (当 $\varphi_B \neq 0$ 时), 可设 $\frac{i}{\sin \varphi_B} > 0, \frac{j}{\sin \varphi_B} > 0$, 则 φ_C 角确定在第一象限。由此求得:

$$\varphi_C = \arctan\left(\frac{j}{i}\right). \quad (10)$$

又考虑到 φ_C 的运动范围, 则 φ_C 还有另一值:

$$\varphi_C = \arctan\left(\frac{j}{i}\right) - 2\pi. \quad (11)$$

每个刀位点的三维激光切割机5个运动轴坐标

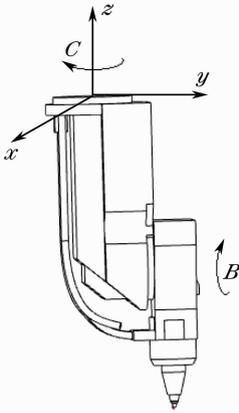


图1 三维激光切割机运动关系图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D laser cutting machine

值会有4种可选值, 需要从每个刀位点对应的4个可选值中确定最佳值, 尽量保证切割过程的平稳。

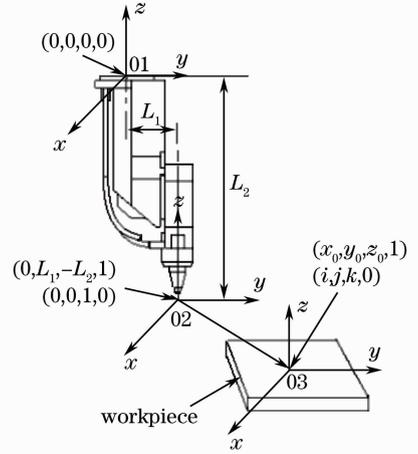


图2 坐标系转换示意图

Fig. 2 Coordinate system of 3D laser cutting machine

3 激光切割机床的旋转轴运动耗能模型

当激光切割头从当前刀位点直线运动至下一刀位点时, B 和 C 轴所耗能量包括动能消耗和克服摩擦力做功。

3.1 机床切割旋转轴所需动能计算

设两相邻刀位点分别为 $P_{n-1}(x_{n-1}, y_{n-1}, z_{n-1}, \varphi_{B_{n-1}}, \varphi_{C_{n-1}})$ 、 $P_n(x_n, y_n, z_n, \varphi_{B_n}, \varphi_{C_n})$, 点 P_{n-1} 和 P_n 间的进给速率 F 恒定, 根据直线插补原理有

$$L_{n-1,n} = \sqrt{(x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2 + (z_n - z_{n-1})^2 + k_{dl}^2(\varphi_{B_n} - \varphi_{B_{n-1}})^2 + k_{dl}^2(\varphi_{C_n} - \varphi_{C_{n-1}})^2}, \quad (12)$$

式中 $L_{n-1,n}$ 为刀位点 P_{n-1} 和 P_n 之间的直线插补距离, k_{dl} 为长度和角度转化当量系数。则 B 和 C 轴的运动方向系数:

$$\mathbf{k} = \frac{1}{L_{n-1,n}} \Delta \mathbf{s}, \quad (13)$$

式中 $\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_B \\ k_C \end{bmatrix}$, $\Delta \mathbf{s} = \begin{bmatrix} k_{dl}(\varphi_{B_n} - \varphi_{B_{n-1}}) \\ k_{dl}(\varphi_{C_n} - \varphi_{C_{n-1}}) \end{bmatrix}$ 。 k_B, k_C 分别为 B 和 C 轴的运动方向系数。

由(12)、(13)式可计算出 B 和 C 轴的运动速率为

$$\mathbf{v} = \mathbf{k}'F, \quad (14)$$

式中 $\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \omega_B \\ \omega_C \end{bmatrix}$, $\mathbf{k}' = \begin{bmatrix} k_B \\ k_{dl} \\ k_C \\ k_{dl} \end{bmatrix}$ 。 ω_B, ω_C 分别为 B 和 C 轴的角速度。

假设 B, C 轴质量分别为 m_B, m_C , B 轴转动惯量为 J_B , B 轴相对于 C 轴的转动惯量为 J_B^C , C 轴的转动惯量为 J_C , B 轴的动能为 E_B^B , C 轴的动能为 E_k^C 。 B 和 C 轴的旋转动能为

$$\mathbf{E}'_k = \frac{1}{2} \mathbf{J} \boldsymbol{\omega}^2, \quad (15)$$

式中 $\mathbf{E}'_k = \begin{bmatrix} E_k^B & 0 \\ 0 & E_k^C \end{bmatrix}$, $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_B & 0 \\ 0 & J_C + J_B^C \end{bmatrix}$,

$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_B & 0 \\ 0 & \omega_C \end{bmatrix}$, 可得出相邻刀位点间 $L_{n-1,n}$ 的 B 和 C 轴运动所需总动能为

$$E_k^{n-1} = E_k^B + E_k^C. \quad (16)$$

当切割头从 $L_{n-1,n}$ 运动到 $L_{n+1,n}$ 时, B 和 C 轴所产生的动能变化量 $\Delta E_k^{n-1,n}$ 为

$$\Delta E_k^{n-1,n} = E_k^n - E_k^{n-1}. \quad (17)$$

每一个刀位点处 B 和 C 轴动能变化量直接关系到此处切割头的运动平稳性,动能变化量越大表明切割头可能出现大摆动,造成运动冲击。

3.2 克服摩擦力做功计算

假设三维激光切割机 B 和 C 轴在 $L_{n-1,n}$ 上克服摩擦力做功分别为 W_f^B, W_f^C , B 和 C 轴转矩分别为 M_B, M_C 。 B 和 C 轴伺服电机驱动力矩表示为^[10]

$$M_\alpha = M_{\alpha\max} - k_{E,\alpha}\omega_\alpha, \quad \alpha = B, C \quad (18)$$

式中 M_α 表示电机输出转矩, $M_{\alpha\max}$ 表示电机最大输出转矩, $k_{E,\alpha}$ 为与伺服电机反电动势的有关常数。

激光头在刀位点间匀速运动,驱动力等于阻力,则 B 和 C 轴克服摩擦力做功为

$$W_f = \int_{\theta_{n-1}}^{\theta_n} \mathbf{M} d\theta, \quad (19)$$

式中 $\mathbf{W}_f = \begin{bmatrix} W_f^B \\ W_f^C \end{bmatrix}$, $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_B \\ M_C \end{bmatrix}$, $\int_{\theta_{n-1}}^{\theta_n} d\theta$ 为相应轴上角度积分。

因此 $L_{n-1,n}$ 上 B 和 C 轴克服摩擦力做功为

$$W_f^{n-1,n} = W_f^B + W_f^C. \quad (20)$$

3.3 旋转轴运动总耗能模型

综合 3.1 和 3.2 节分析,可得出 $L_{n-1,n}$ 上运动时的 B 和 C 轴旋转运动总耗能为

$$W_{n-1,n} = \Delta E_k^{n-1,n} + W_f^{n-1,n}. \quad (21)$$

4 切割路径优化算法

由于每个刀位点对应的机床运动轴坐标值有 4 个可选值,如果切割轨迹上有 N 个刀位点,则可能的切割路径最多有 4^N 种选择,如图 3 所示。

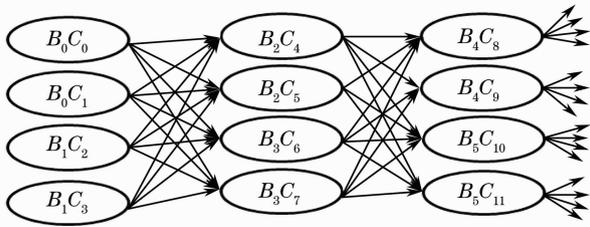


图 3 可选的路径图
Fig. 3 Optional path

设一条封闭的切割路径 B 和 C 轴旋转运动总耗能为 W_{total} , 则:

$$W_{\text{total}} = \sum_{n=1}^N W_{n-1,n}. \quad (22)$$

将 $\min(W_{\text{total}})$ 作为优化目标函数,可在 4^N 条路径中选择一条 W_{total} 最小的路径,可避免 B 和 C 轴出现瞬间大角度摆动现象,提高切割时机床运动的

平稳性。采用 Dijkstra 最小路径优化算法^[11],将相邻刀位点间切割运动 B 和 C 轴旋转运动做功 $W_{n-1,n}$ 赋值为路径长度,可在 4^N 种选择中找到能耗最低的切割方式。

5 实例分析

5.1 机床和工艺数据

分析和实验采用的三维激光切割机为 ESAMO-2545 三维激光切割机,具体参数为: X 、 Y 、 Z 轴行程:4500、2500、1000 mm, B 轴: $\pm \frac{3}{4}\pi$ 摆动, C 轴: $\pm 2\pi$ 旋转, $F = 0.3$ m/s, $k_{\text{dl}} = 0.15$ m/rad, $m_B = 6$ kg, $m_C = 15$ kg, $L_1 = 0.3$ m, $L_2 = 0.8$ m, $J_B = 0.06$ kg·m², $J_C + J_B^C = 0.4$ kg·m², $M_{B\max} = 8$ N·m, $k_{E,B} = 0.8$ N·s, $M_{C\max} = 18$ N·m, $k_{E,C} = 1.8$ N·s。

拟加工的切割环如图 4 所示,刀位点为按照文献[3]方法获得,切割头的运动方向为顺时针。

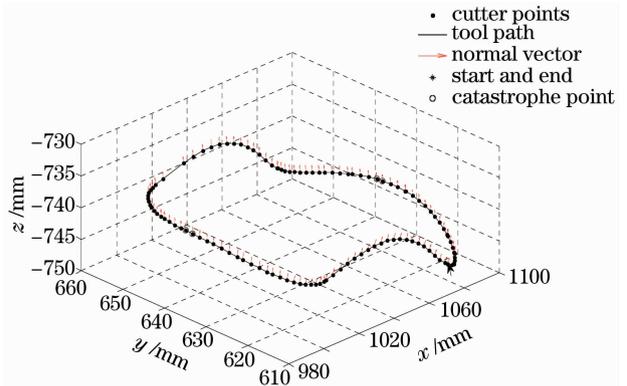


图 4 切割环刀位点及其法向量

Fig. 4 Cutting loop cutter points and its normal vector

5.2 计算分析

采用文献[6,7]方法求解出各刀位点 B 和 C 轴的坐标值如图 5 所示。 B 和 C 轴角度在刀位点 43 和 92 处发生大的突变, B 轴角度变化量分别为 -15.38° 和 25.95° , C 轴角度变化量分别为 -175.39° 和 -177.96° 。42、43 节点间的 B 和 C 轴角速度分别为 $10.00^\circ/\text{s}$ 和 $114.15^\circ/\text{s}$, 91、92 节点间分别为 $16.54^\circ/\text{s}$ 和 $113.39^\circ/\text{s}$ 。由于刀位点 42 的 B 和 C 轴角度是 $(7.97^\circ, 355.51^\circ)$, C 轴角度已经接近机床运动范围限制;而刀位点 43 处 B 和 C 轴角度可选值为 $(7.41^\circ, 0.12^\circ)$ 、 $(7.41^\circ, -359.88^\circ)$ 、 $(-7.41^\circ, 180.12^\circ)$ 或 $(-7.41^\circ, -179.88^\circ)$, 按照相邻刀位点之间 B 和 C 轴角度变化量之和最小原则,刀位点 43 优化选择了 $(-7.41^\circ, 180.12^\circ)$, C 轴出现了大的摆动。刀位点 92 摆动的原因与刀位点 43 类似。

图6为局部优化后的B和C轴耗能变化曲线,图中黑点表示刀位点。刀位点43和92处总耗能增加量分别为28.3 J和29.6 J,完整切割路径上的总耗能为182.2 J。

采用本文所提出方法进行优化计算后,B和C

轴角度变化和总耗能变化分别如图7,8所示,B和C轴角度和总耗能变化平滑,没有出现大的突变,实现平稳加工运动。B和C轴旋转运动总耗能为125.4 J,与局部优化方法相比下降了31.2%。

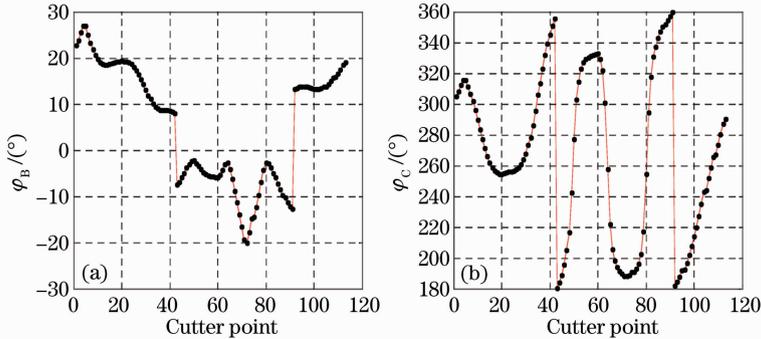


图5 局部优化后的B和C轴角度变化曲线

Fig. 5 B, C-axis angle curves after local optimization

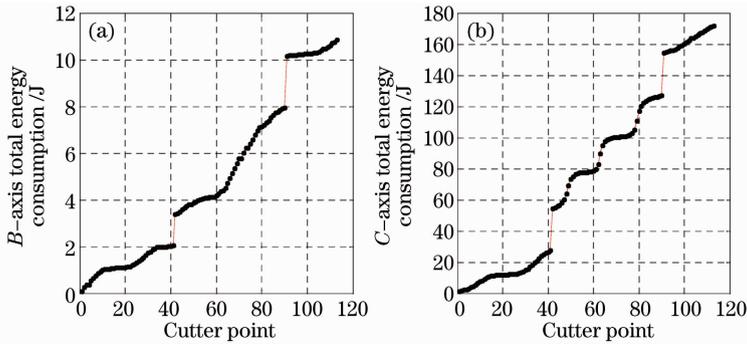


图6 局部优化后的B和C轴总耗能变化曲线

Fig. 6 B, C-axis total energy consumption curves after local optimization

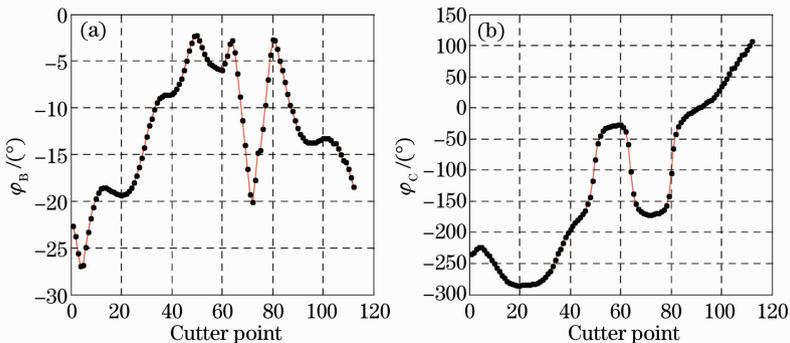


图7 基于能耗最小法优化后的B和C轴角度变化曲线

Fig. 7 B, C-axis angle curves after optimization based on minimum energy consumption

5.3 实验验证

按照上述方法,分别对图4中的切割环生成激光切割程序并在SESAMO-2545三维激光切割机上进行实际切割加工。切割过程中,利用霍尔电流传感器采集B、C轴伺服电机的电流信号,绘制电流随时间变化的曲线分别如图9、10所示。计算出两种方法下的B、C轴总耗能分别为201.6 J和144.4 J。

由于电机自身损耗等原因,实际功耗比理论功耗有所增加。本文所提方法使功耗降低了28.4%,且由于C轴的实际运动行程缩短,加工时间也由10 s减少到7 s。实际观察发现本文所提方法切割过程机床运动平稳,实测的切割精度满足要求;使用局部优化方法则出现了两次切割头摆动情况,与仿真结果一致,实际加工的样品如图11所示。

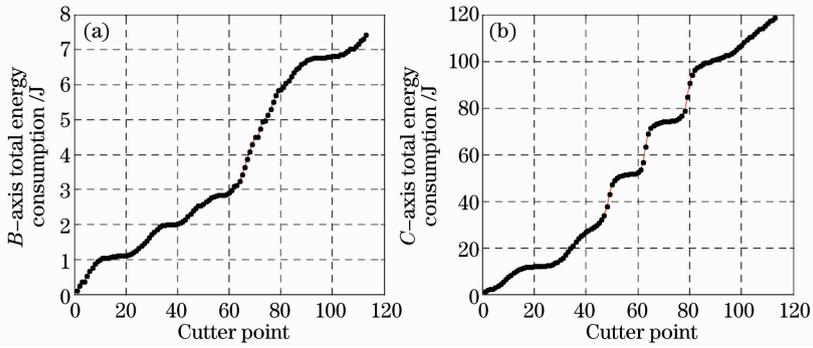


图 8 基于能耗最小法优化后的 B 和 C 轴总耗能变化曲线

Fig. 8 B, C-axis total energy consumption curves after optimization based on minimum energy consumption

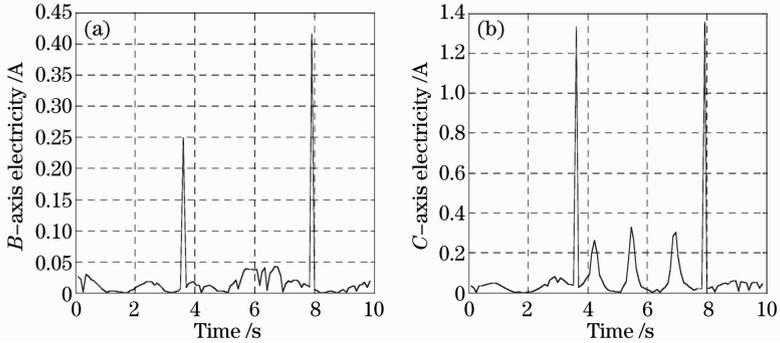


图 9 局部优化后 B、C 轴电流变化曲线

Fig. 9 B, C-axis electricity curves after local optimization

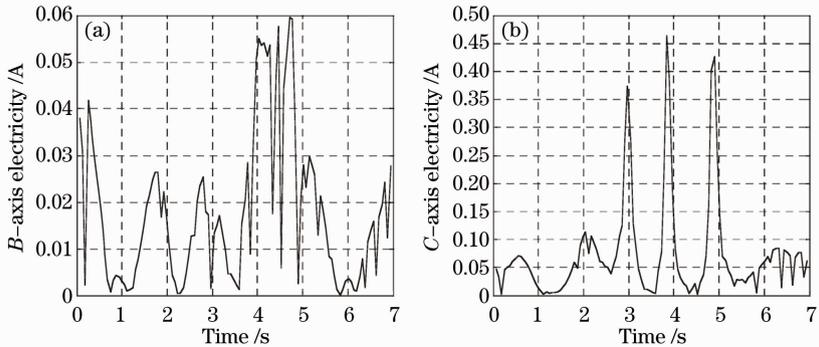


图 10 基于能耗最小优化后 B、C 轴电流变化曲线

Fig. 10 B, C-axis electricity curves after optimization based on minimum energy consumption



图 11 加工后的工件

Fig. 11 Processed workpiece

6 结 论

1) 由三维激光切割的刀位点直接求解切割头的空间位姿时,存在 4 个可选值,选择不当会导致实

际切割时旋转轴 B 和 C 出现大角度摆动。

2) 提出了一种切割头空间位姿的优化方法。建立相邻刀位点之间机床 B 和 C 轴切割运动的耗

能模型,将完整切割环的 B 和 C 轴旋转运动最低总耗能作为优化目标函数,通过 Dijkstra 最小路径优化算法,可从可选值中得到最佳切割头的空间位姿。

3) 该方法提高了激光切割头空间位姿变化的光顺性,避免切割过程中常见的 B 和 C 轴摆动过大情况,有效降低能量消耗。

参 考 文 献

- 1 Deng Qiansong, Zhao Chenfeng, Chen Liang *et al.*. Study on reducing apex angle burnt rate during laser cutting based on path transformation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0803006
邓前松, 赵辰丰, 陈亮等. 基于轨迹变换法降低激光切割尖角“烧蚀率”研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0803006
- 2 Li Shuyu, Tian Xinguo, He Jingdi *et al.*. Laser cut flow curve of automatic flow control valves [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1003008
李淑玉, 田新国, 贺敬地等. 自动流量平衡阀过流曲线激光切割工艺[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1003008
- 3 Wang Liu, Hu Guanhu, Hu Jun *et al.*. A new method to obtain discrete cutting points of space curve in three-dimensional laser cutting[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1643~1646
汪 夔, 胡关虎, 胡俊等. 激光三维切割空间曲线的刀位点离散方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1643~1646
- 4 Jin Jianxin. Real time control of cutter orientation for machining surface-curve with multi-axis CNC machine tool [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2001, **37**(3): 85~88
金建新. 多轴 CNC 机床加工曲面上曲线的刀具姿态实时控制[J]. *机械工程学报*, 2001, **37**(3): 85~88

- 5 S. S. Makhanov, M. Munlin. Optimal sequencing of rotation angles for five-axis machining [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, **35**(1-2): 41~54
- 6 M. Munlin, S. S. Makhanov, E. L. J. Bohez. Optimization of rotations of a five-axis milling machine near stationary points[J]. *Computer Aided Design*, 2004, **36**(12): 1117~1128
- 7 Xu Hongwei, Huang Yumei, Yang Xingang *et al.*. Algorithm optimization for gesture of workpiece in 5-axis laser quenching of free form surface[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 487~493
徐宏伟, 黄玉美, 杨新刚等. 自由曲面五轴激光淬火工作姿态优化算法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 487~493
- 8 Chen Jiming, Zuo Tiechuan. The generation of 3-dimensional trace for 3D laser processing[J]. *Applied Laser*, 2001, **21**(1): 1~2
陈继明, 左铁钊. 三维激光加工的加工轨迹生成[J]. *应用激光*, 2001, **21**(1): 1~2
- 9 Chen Jiming. Research on 3-Dimensional Intelligent Processing CAM for High Power CO₂ Laser[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2001
陈继明. 大功率 CO₂ 激光三维智能加工 CAM 的研究[D]. 北京工业大学, 2001
- 10 Chen Jincheng, Xu Zhiming, Zhong Tingxiu. Analysing kinematic and dynamic properties of a machine tool along curved tool path in high machining[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, **38**(1): 32~34
陈金成, 徐志明, 钟廷修. 机床沿曲线高速加工时的运动学与动力学特性分析[J]. *机械工程学报*, 2002, **38**(1): 32~34
- 11 A. Crauser, K. Mehlhorn, U. Meyer. A parallelization of Dijkstra's shortest path algorithm [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 1998, **1450**: 722~731

栏目编辑:宋梅梅