

小功率激光热导焊接速度规划策略

吴 波, 许 力
(浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

摘 要: 在激光焊接工艺中, 速度大小的变化会导致焊缝不均匀, 文中提出了一种可行性强的速度规划策略. 对于焊接启动和停止过程中的速度变化, 采用增加预加减速的空走路径使得速度变化的过程在非焊接路径中完成以保证焊接路径速度的恒定性, 并采用 S 形速度规划曲线, 以降低对焊接平台的柔性冲击. 对于相邻段折角处速度的变化, 采用增加圆弧迂回的空走路径的策略, 使得速度方向的改变在增加的闭合路径上完成, 以保证焊接段的速度大小的恒定, 提升焊缝的均匀性. 文中所提出的速度规划策略在四轴激光焊接平台的研发中得到了实际应用.

关键词: 激光技术; 激光焊接; 速度规划; S 形速度曲线

中图分类号: TG 439.4 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20150606003

0 序 言

激光焊接具有能量密度高、焊接速度快、热输入小、焊接热影响区小、焊缝晶粒细小等优点^[1], 可以在短时间内在被焊件的焊缝中形成连续的而且完全熔透的焊缝, 这使得焊缝深宽比、焊接速度相比常规电弧焊技术有了显著的提高, 因而激光焊接工艺被广泛的应用到机械制造、汽车工业、航空航天、精密仪器加工等诸多行业中^[2].

在精密仪器的焊接中, 焊缝均匀性往往是焊接的首要要求, 然而在激光功率恒定的前提下, 在焊接轨迹的启动、停止处和折角过渡部分必然存在着速度大小的变化, 这是导致焊缝不均匀的根源. 针对这一难题, 毛志伟等人^[3]提出根据焊接速度实时在线调整焊接电流的方法, 其核心思想是通过试验得到焊接速度与焊接电流相匹配的方案, 但是针对不同的焊接材料, 需要有不同的电流匹配方案, 实现起来比较繁琐. Yoo 等人^[4]提出轮式小车与机械手的组合结构, 并采用激光传感器和视觉传感器等非接触式传感器的移动焊接机器人, 用于折线角焊缝的焊接. 该机构复杂, 且传感器所提取焊接点的位置易出现偏差.

为解决这一难题, 文中针对两种不同情况下的速度变化分别提出对应性的解决方案. 一是针对焊接启动和停止的时候加减速变化, 采用延长线预加减速的策略来保证焊接段的速度均匀, 并采用 S 形速度规划曲线保证焊接平台的平稳性. 二是针对折

角处的速度大小的变化, 采用圆弧迂回的速度控制策略, 可有效的避免折角处速度大小的变化, 保证焊缝均匀性.

1 延长线预加减速控制策略

1.1 延长线预加减速原理

对于图 1 所示的焊接路径, $\overrightarrow{ABC}$ 表示实际的焊接路径. 采用常规的焊接速度控制策略, 在 A 点开始打开激光的同时启动焊接运动过程, 加速运动到给定速度 v_0 , 到达 B 点之前预减速, 使得 B 点的速度为 0, 然后在 $\overrightarrow{BC}$ 上再加速运动到给定速度 v_0 , 到达 C 点之前预加减速, 最终使得运动停止在 C 点. 这种速度规划方式虽然简单易操作, 但是必然使得在 A, B, C 三点附近由于速度低于给定速度 v_0 , 这使得焊缝熔深和小孔的深度均呈现上升的趋势^[5], 影响焊缝的均匀性.

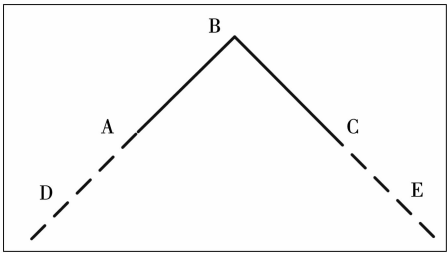


图 1 焊接路径示意图
Fig. 1 Welding path diagram

接的特点,文中提出了预加减速的速度控制策略.在 $\overrightarrow{AB}$ 的反向延长线上增加空走路径 $\overrightarrow{DA}$,在 $\overrightarrow{BC}$ 的延长线上补充空走路径 $\overrightarrow{CE}$.首先在 D 点启动焊接过程,并在 $\overrightarrow{DA}$ 上完成预加速到给定速度 v_0 ,在到达 A 点的同时打开激光,然后匀速运动到 C 点(折角 B 处的速度规划策略将在下文中具体描述),在到达 C 点的同时关闭激光,然后减速运动 E 点,并停止在 E 点.由于虚线路径 $\overrightarrow{DA}$, $\overrightarrow{CE}$ 并不是实际的焊接路径,其速度大小的变化并不会影响焊缝的均匀性.只要是焊接路径 $\overrightarrow{ABC}$ 上速度的恒定即可保证焊缝的均匀性,提升焊缝的美观度.

1.2 预加减速控制策略的实现

在 $\overrightarrow{DA}$ 和 $\overrightarrow{CE}$ 处的加减速运动,常规的做法就是梯形加减速运动控制,如图 2 所示,此种加减速方法的优点计算简单,节省时间,但是由于其加速度不连续,即加速度对时间的导数 $a(t) = dv(t)/d(t)$ 不连续,会导致出现跳变(jerk),造成对焊接平台的柔性冲击,影响电机和焊接平台的使用寿命^[6].保证加速度的连续,避免出现跳变,是机器人运动控制的基本要求.文中将采用 S 形速度曲线进行速度规划,保证焊接平台速度的平稳性,降低加减速变化带来的柔性冲击.

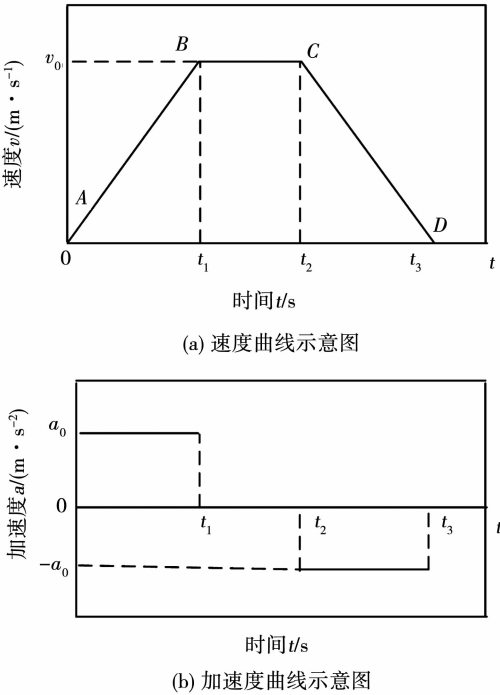


图 2 梯形加减速曲线

Fig. 2 Trapezoidal acceleration and deceleration curve

在 $\overrightarrow{DA}$ 段采用图 3a 的 S 形加速速度曲线, $\overrightarrow{CE}$ 段采用图 3b 的减速速度曲线.先假定 $\overrightarrow{DA}$ 段的长度足

够长,开始采用加加速度为 j 启动运动,当速度达到 $0.5v_0$ 的时候加加速度变为 $-j$,使得在到达 A 点前速度达到 v_0 .然后再以给定速度 v_0 匀速运动,如图 3a 中 LMN 段所示.当运动到 B 点的时候,运动速度也为 v_0 ,此时可按照 OPQ 段的速度规划完成速度减为 0 的过程.

加速度公式为

$$a(t) = \begin{cases} jt, & t \in (0, t_1) \\ -jt + 2jT_1, & t \in (t_1, t_2) \end{cases} \quad (1)$$

速度公式为

$$v(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}jt^2, & t \in (0, t_1) \\ -\frac{1}{2}jt^2 + 2jt_1t - jt_1^2, & t \in (t_1, t_2) \end{cases} \quad (2)$$

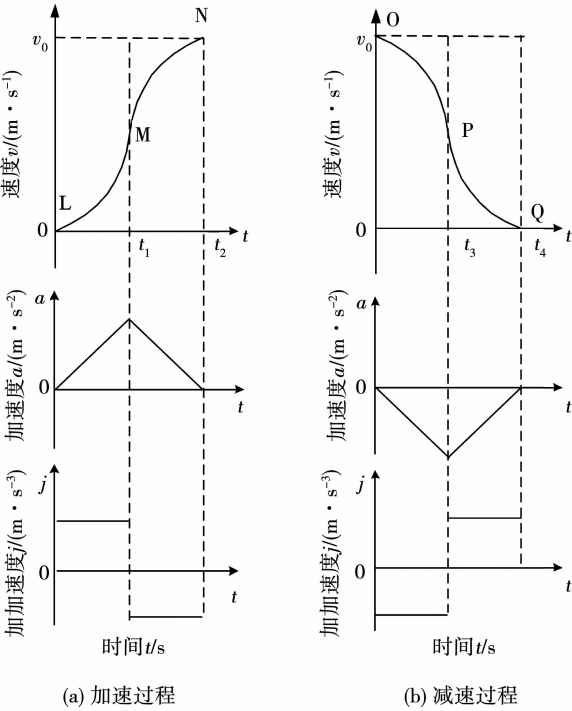


图 3 S 形速度曲线

Fig. 3 S-curve acceleration and deceleration

式(1)、式(2)表明 S 形速度曲线是一种加减速过渡的柔性速度规划算法,可有效降低因速度变化给焊接平台带来的冲击,提升焊接的精度,延长焊接平台的使用寿命.由于采用预加减速控制算法,使得速度的变化在激光焊接过程之前完成,即使在激光焊接过程中速度为一个恒定值,可有效的保证焊缝的均匀性.

对于给定的焊接速度为 v_0 (mm/s),有

$$t_1 = \sqrt{\frac{2v_0}{j}}, t_2 = 2t_1 = 2\sqrt{\frac{2v_0}{j}} \quad (3)$$

增加的预加减速段所带来的额外的距离 S 和时间消耗 t_a 为

$$S = 2^{\frac{3}{2}} v_0^{\frac{3}{2}} j^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$t_a = 2T_2 = 4 \sqrt{2v_0/j} \quad (5)$$

由上式可以看出由于增加空走的预加减速路径带来的额外的距离和时间消耗随着加加速度的变大均会变小,因此,为了尽可能减少增加预加减速路径带来的时间效率上的降低,文中将采用焊接平台所允许的最大的加加速度值,以求获取最快的预加减速过渡过程。

2 折角速度控制算法

2.1 圆弧迂回折角速度控制原理

在连续焊接的路径中,相邻焊接段的连接处存在着折角的变化,这就意味着在折角处就会出现速度大小的变化,这在激光功率不变的前提下,必然会带来焊缝的不均匀性,极大地影响折角处的焊接质量。常规的速度规划算法如速度前瞻控制算法^[7]、基于样条曲线的速度控制算法^[8]等运动控制算法仅可以实现速度的平滑过渡,却不可以保证速度的大小在折角处不发生变化,这无法满足激光焊接对于速率恒定的要求。若采用激光功率在线匹配的控制算法,则需要更为复杂且昂贵的激光发生器,且高速焊接中适时调整存在严重的滞后,效果不佳。文中根据激光焊接非接触的特点,提出了一种基于圆弧迂回的折角速度控制算法,可实现速度大小不变的折角处过渡。

在激光焊接的过程中,待焊件大多都是非标准件,无法通过测量直接获取焊接轨迹。通常的做法都是通过单步控制运动轴进行示教编程,利用直线和圆弧拟合得到多段相连的焊机路径^[9],而一般的运动控制卡也都可以提供直线和圆弧的插补运动。这样就会产生直线与直线相连接、直线与圆弧相连接和圆弧与圆弧相连接这三种连接过渡的情况,如图 4 所示。 $\overrightarrow{ABC}$ 表示待焊接的轨迹,其中 α 为其夹角,在圆弧轨迹中 α 表示圆弧切线之间的夹角,夹角 α 的范围在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

圆弧迂回的折角速度控制策略的核心在于增加闭合空走路径 $\overrightarrow{BDFE}$ 。D 点为 $\overrightarrow{AB}$ 延长线的一点(若 $\overrightarrow{AB}$ 为圆弧, D 点为圆弧 $\overrightarrow{AB}$ 在 B 点切线上的一点), E 点为 $\overrightarrow{BC}$ 反向延迟上的一点(若 $\overrightarrow{BC}$ 为圆弧,则 E 点为圆弧 $\overrightarrow{BC}$ 在 B 的切线上的一点),且满足 $|\overrightarrow{BD}| = |\overrightarrow{BE}|$ 。DEF 为圆弧, O 点为圆心,其半径为 R 。对于激光焊接平台而言,为了保证运动平稳性和精度可

靠性,其运动的最小圆弧的半径是有限制的,采用焊接平台所允许的最小半径,以求尽可能减少由于增加的空走路径而带来的时间消耗。

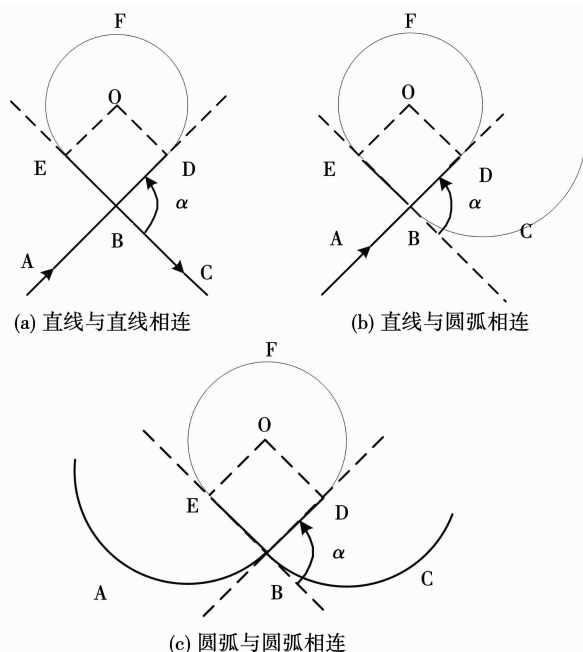


图 4 圆弧迂回路径规划示意图

Fig. 4 Circuitous circular path diagram

2.2 圆弧迂回折角速度控制的实现

假定给定的焊接速度为 v_0 (mm/s), 在路径 $\overrightarrow{AB}$ 上以速度 v_0 保持匀速运动, 当 $\overrightarrow{AB}$ 段直线插补结束的时候, 依次关闭激光和隔离气体, 然后在保持匀速运动到 D 点。再在 D 点以线速度 v_0 开始进行圆弧插补运动, 运动到 E 点后, 再保持原有速度以直线插补的方式运动到 B 点, 在抵达 B 点之前提前打开隔离气体, 然后在抵达 B 点的同时打开激光, 如此就可以实现在 B 点速度方向改变的同时保证 B 点附近速度大小的恒定, 从而保证了焊缝的均匀性。

在闭合路径 $\overrightarrow{BDFE}$ 中, 有 $OD \perp DB$, $OE \perp EB$, $|\overrightarrow{OD}| = |\overrightarrow{OE}| = R$, $\angle EBD = \pi - \alpha$ 。则有 $|\overrightarrow{BD}| = |\overrightarrow{BE}| = R \sin(\alpha/2)$, $|\overrightarrow{DEF}| = R(2\pi - \alpha)$, $\alpha \in (0 \sim \pi)$, 则增加的闭合路径的长度 L 为

$$L = 2R \sin(\alpha/2) + R(2\pi - \alpha) \quad (6)$$

由式(6)即可计算出由于增加闭合路径所带来的时间成本为

$$t_b = \frac{2R \sin(\alpha/2) + R(2\pi - \alpha)}{v_0} \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 当 α 为定值的时候, 随着 R 的变大 t_b 也随之变大, 因而为了减少增加闭合路径 $\overrightarrow{BDFE}$ 带来的额外时间消耗, 采用在兼顾焊接平台平稳性的前提下所允许的最小半径。

3 仿真和试验结果

为了验证文中所提速度控制策略的有效性,针对一个典型的激光焊接平台,进行了相关的仿真和试验. 给定焊接速度为 30 mm/s,最大加速度为 80 mm/s²,最大加加速度为 40 mm/s³,当前给定速度值下焊接平台所允许的最大圆弧插补半径为 20 mm. 通过 MATLAB 仿真即可得到增加圆弧迂回路径所带来的额外时间消耗随着角度变化的曲线图,如图 5 所示.

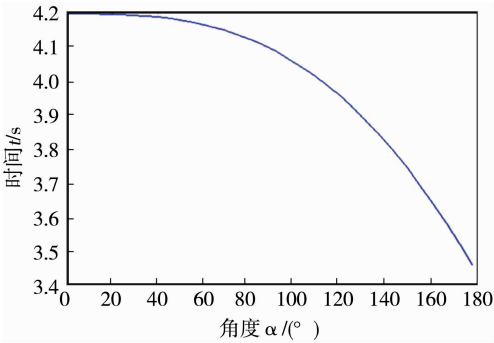


图 5 时间随角度变化的曲线

Fig. 5 Time changing with Angle figure

由图 5 看出,随着角度的变大,增加时间消耗越小,这说明文中所提出的速度规划算法是一种适合大折角速度控制的算法. 当折角接近 0°的时候,有最大的时间的消耗 4.188 s,这对于一般的焊接过程来说,以可忍受的时间成本换取焊缝的均匀性是值得的.

文中所提出的速度规划策略在四轴激光焊接平台的研发中得到了实际的应用. 图 6 为采用常规直接加速算法启动焊接过程(下)和采用预加减速算法启动焊接过程(上)的效果对比图,焊缝的实际宽度约为 1 mm. 试验采用德国产的 IPG-GCW 激光器,激光功率为 33 W,激光频率为 16 Hz,隔离气体为 CO₂. 焊接速度为 15 mm/s,加速度为 40 mm/s²,加加速度为 30 mm/s³,焊接材料为 304 不锈钢.

从图 6(下)可以看出采用常规的直接减加速的启动策略会导致在加速阶段的焊点的重叠率上升,而使得焊缝均匀性差. 从图 6(上)可以看出采用文中的预加减速速度规划算法,可使得在启动焊接过程中保证单位长度上的激光频率的恒定性,从而确保焊缝的均匀性. 且采用了 S 形加减速控制策略,可有效的保证焊接平台的平稳行,降低了因速度变化给焊接平台带来的柔性冲击.

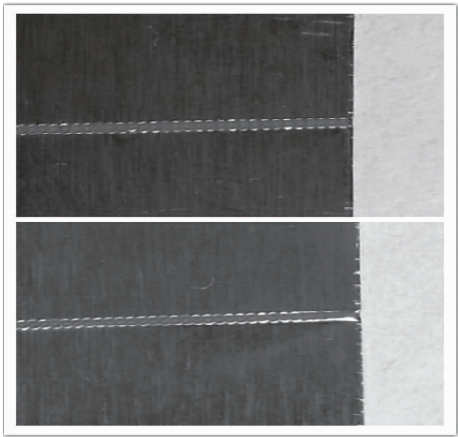


图 6 焊接效果对比图(一)

Fig. 6 Welding effect comparison chart(A)

图 7 为采用常规的折角控制算法和文中圆弧迂回控制算法的焊缝效果对比. 图 7 中左侧表示文中算法效果,右侧为常规算法的效果图. 折角从上到下折角大小依次为 45°,90°,135°. 从图 7 中可以看出在折角处采用常规加减速算法会由于在折角附近焊接点的重叠率增加导致焊缝不均匀,且外观较差,并且随着折角的增大这一弊端会更加突出. 而采用文中提出的圆弧迂回的折角速度规划策略可有效改善折角处的焊缝质量,焊接点连续均匀,并且焊缝质量不随折角大小的改变而改变,这说明文中所提出的圆弧迂回速度规划算法对于折角的大小具有普适性.

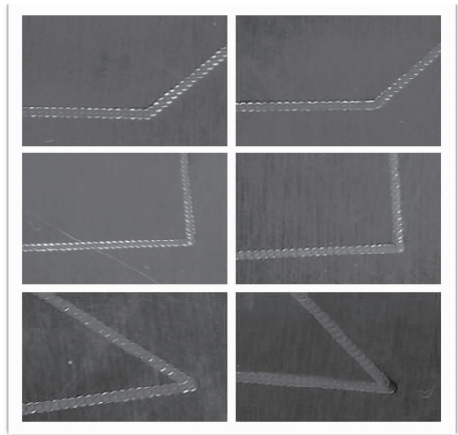


图 7 焊接效果对比图(二)

Fig. 7 Welding effect comparison chart(B)

4 结 论

(1) 在激光焊接的启动和停止的阶段采用 S 形预加减速的控制策略,可以有效的避免在焊接开始

和结束的阶段速度变化对于焊接平台的柔性冲击,保证焊接平台的平稳性.采用预加减速的速度策略,使得速度变化过程在增加的空走路径上完成,保证了焊接过程中速度大小的恒定.

(2)在连续焊接的相邻折角处采用圆弧迂回的速度规划策略,可以避免折角处速度变化对于焊缝均匀性的影响.文中提出的算法对于折角的大小具有普适性,且随着折角的增大,增加闭合迂回路径带来的额外的时间消耗反而越小.

参考文献:

- [1] 吴世凯,肖荣诗,陈 铠.大厚度不锈钢板的激光焊接[J].中国激光,2009,36(9):2422-2425.
Wu Shikai, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser welding of heavy section stainless steel slants[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2422-2425.
- [2] 李亚江,王 娟.高能束流焊接技术现状及发展[J].航空制造技术,2011,380(8):30-33.
Li Yajiang, Wang Juan. Application and development of advanced welding technology by high-energy density beam[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 380(8): 30-33.
- [3] 毛志伟,李舒扬,葛文韬,等.移动焊接机器人大折角角焊缝跟踪及工艺[J].焊接学报,2011,32(2):33-36.
Mao Zhiwei, Li Shuyang, Ge Wentao, *et al.* Tracking and technique of large fillet weld seam of mobile welding robot[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(2): 33-36.
- [4] Yoo W S, Kim J D, Na S J. A study on a mobile platform-manipulator welding system for horizontal fillet joints[J]. Mechatronics, 2001, 11(7): 853-868.
- [5] 赵 琳,塚本进,荒金吾郎,等.大功率光纤激光焊接过程中工艺参数对熔深和气孔的影响[J].中国激光,2013,40(11): 96-100.
Zhao Lin, Susumu T, Goro A, *et al.* Influence of welding parameters on weld depth and porosity in high power fiber laser welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11): 96-100.
- [6] 胡建华,廖文和. CNC 系统中几种升降速控制曲线的研究与比较[J].南京航空航天大学学报,1999,31(6):706-711.
Hu Jianhua, Liao Wenhe. Research and comparison for several curves of acceleration and deceleration in CNC systems[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1999, 31(6): 706-711.
- [7] Wang L, Cao J. A look-ahead and adaptive speed control algorithm for high-speed CNC equipment[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(5): 705-717.
- [8] 刘 放,罗 磊,胡 俊,等.复杂轮廓曲线的样条插补与速度规划方法[J].上海交通大学学报,2009,43(5):834-836.
Liu Fang, Luo Lei, Hu Jun, *et al.* New algorithm of complex curve spline interpolation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(5): 834-836.
- [9] 周友行,张建勋,董银松.点焊机器人复杂轨迹逆运动学组合优化求解[J].焊接学报,2010,31(9):21-24.
Zhou Youhang, Zhang Jianxun, Dong Yinsong. An optimization algorithm for combination inverse kinematics problems of welding robot in complex trajectory. welding system for horizontal fillet joints [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(9): 21-24.

作者简介: 吴 波,男,1989 年出生,硕士研究生.主要从事智能控制与智能系统的研究工作.已发表论文 3 篇. Email: bobanvip@163.com

通讯作者: 许 力,男,博士,教授,博士研究生导师. Email: xupower@zju.edu.cn