

文章编号: 1001-3806(2013)01-0001-05

双光束激光双路焊接的跟踪控制技术研究

蒋志伟 龚时华* 王启行

(华中科技大学 装备数字化国家工程研究中心, 武汉 430074)

摘要: 为了实现对 T 型接头的双光束激光焊接, 采用基于多轴联动数控机床的双光束激光焊接平台和基于视觉传感器的焊缝跟踪控制相结合的方法, 进行了理论分析和实验研究。通过建立平台的运动学模型实现了焊缝的轨迹规划, 设计了基于比例、积分、微分控制的位置环和高速焊接过程中的跟踪算法来提高控制系统的控制精度等, 并且通过焊接试验, 验证了所提出的算法。结果表明, 该焊接跟踪控制系统能够快速、准确地对焊接过程中的偏差进行动态补偿, 很好地完成了对 T 型接头的双光束焊接。

关键词: 激光技术; 激光加工; 双光束激光焊接; 动态补偿; 跟踪控制

中图分类号: TG439.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jjgjs.issn.1001-3806.2013.01.001

Study on the tracking control technology of dual-beam laser welding

JIANG Zhi-wei, GONG Shi-hua, WANG Qi-xing

(State Engineering Research Center of Manufacturing Equipment Digitization, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to achieve the dual-beam laser welding for T-joint, the dual-beam laser welding platform based on multi-axis computer numerical control machine tools and the seam tracking control based on vision sensors were adopted. Theoretical analysis and experiments were carried out, including the welding trajectory planning according to the established mathematic model of welding platform, the design of the position loop based on proportional integral derivative control and the algorithm of high speed tracking to improve the accuracy of the tracking system, etc. Finally, the proposed algorithm was verified in the welding experiments. The results show that the welding tracking control system can eliminate the deviation during laser welding process with a high speed and a high precision by means of dynamic compensation, and can do the dual-beam laser welding for T-joint well.

Key words: laser technique; laser machining; dual-beam laser welding; dynamic compensation; tracking control

引 言

航空、汽车制造及造船等行业的筋壁板通常采用 T 型接头结构。T 型接头的激光焊接质量和效率直接影响了这些行业的发展速度和激光焊接技术的应用推广。一般无约束情况下, 高强铝合金 T 型接头结构采用激光焊接时容易出现变形、气孔、裂纹和焊缝成形等问题^[1]。针对 T 型接头激光焊接过程中出现的这些问题, 国内外学者进行了大量的研究。研究表明: 采用双光束激光对 T 型接头两侧同时焊接, 不仅能够解决因为对一侧进行焊接需要对另一侧进行保护的问题,

还可以缓解筋板的弯曲变形^[1]。由于焊接过程中焊缝容易变形, 一般采用视觉传感来实现焊缝的实时测量, 并将测量的数据实时反馈到控制系统中, 形成有效的闭环控制来消除焊接过程中焊缝的变形偏差, 达到对焊缝的精确跟踪。

目前国内针对激光焊接的自动跟踪系统主要采用工业机器人与视觉传感器配合。但是由于机器人应用的一些局限性, 如焊接速度、可达范围等参量不能满足大构件 T 型接头双光束激光焊接要求, 而多轴联动数控系统的应用成熟、行程大、速度快、精度高, 已经在激光焊接中有过成功的应用^[2]。因此, 研究基于多轴联动数控机床的双光束激光焊接平台有重要意义。

1 双光束双跟踪焊接平台模型

1.1 角焊缝分析和平台方案

采用双光束激光对 T 型接头进行焊接时, 两个激光焊头(主动侧焊头和从动侧焊头)分别分布在两侧,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875097); “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项基金资助项目(2009ZX04007-031-06)

作者简介: 蒋志伟(1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事数控技术、专用特种设备方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: gongshihua@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2012-06-12; 收到修改稿日期: 2012-06-27

式中 M, N 为多项式, 且 $M = c_2 s_y s_x - s_2 c_x$, $N = s_2 s_y s_x + c_2 c_x$; a_{11} 表示该矩阵第 1 行第 1 列的元素, $s_x = \sin \varphi_{m_x}$, $s_y = \sin \varphi_{m_y}$, $s_z = \sin \varphi_{m_z}$, $c_x = \cos \varphi_{m_x}$, $c_y = \cos \varphi_{m_y}$, $c_z = \cos \varphi_{m_z}$, $s_a = \sin \varphi_{a_x}$, $c_a = \cos \varphi_{a_x}$ 。得到了从测量坐标系到工件坐标系的转换矩阵 $T_{w \rightarrow m}$ 后, 对空间中任一点 P , 设 $r_w(x_w, y_w, z_w)$ 和 $r_m(x_m, y_m, z_m)$ 分别为 P 在工件坐标系和测量坐标系下的位置坐标, $n_w(i_w, j_w, k_w)$ 和 $n_m(i_m, j_m, k_m)$ 分别为 P 在工件坐标系和测量坐标系下的方向矢量。则机床的运动学模型为:

$$\begin{bmatrix} r_w & n_w \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = T_{w \rightarrow m} \cdot \begin{bmatrix} r_m & n_m \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过机床的运动学模型, 可以将测量坐标系下测得的焊缝点空间位置信息转化到工件坐标系下, 通过这些焊缝点的信息, 利用 3 次准均匀 B 样条拟合焊缝型值点 $r_w(x_w, y_w, z_w)$, 对焊缝轨迹进行 3 维建模^[6-7]。通过焊缝 3 维模型, 对焊缝进行轨迹规划, 并结合机床运动控制系统的特性, 完成对焊接轨迹的优化以进行加工。

2 激光焊接过程的动态补偿与控制

2.1 激光双光束焊接控制系统

为实现双光束激光焊接, 要求焊接平台能够实现六轴的插补运动, 并且能够实时的接收、处理视觉传感器测得的焊缝偏差信息, 然后通过控制两组十字滑台的运动来补偿焊接过程中产生的误差。为满足焊接测量一体化的控制要求, 设计了如图 3 所示的基于运动控制器的控制系统。控制系统主要由工业电脑、运动控制器、激光控制器、伺服驱动装置、视觉传感器、可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 等组成。激光控制器用来控制激光的开关、调节激光功率。采用工业以太网实现上位机与运动控制器之间的通讯。基于 Modbus 协议, 利用工业以太网, 实现对激光器、视觉传感器、操作开关等基本控制 I/O 的连接和

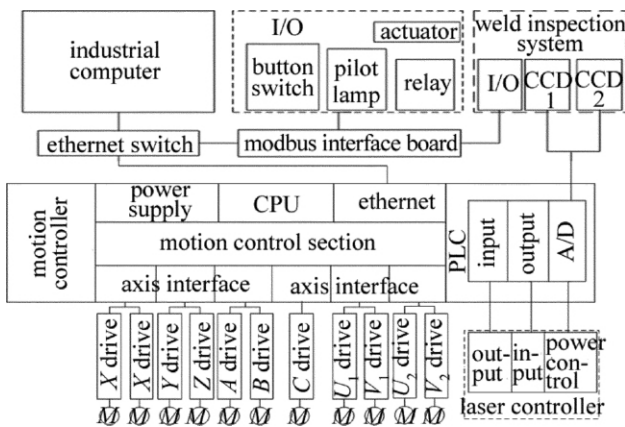


Fig. 3 Control system structure

操作, 大大简化了大型设备的工业现场布置。测量系统将测得的偏差信息通过模拟信号传输给控制系统, 控制系统通过相应的 A/D 转换获得数据。

2.2 动态补偿方案及位置环设计

根据补偿原理不同, 焊接过程中的动态补偿分为独立式补偿和分解式补偿^[8]。分解式补偿的原理是将测得的偏差通过运动学模型分解为机床所有运动轴的补偿运动量, 以实现焊缝的精确跟踪。而此种补偿方式并不适用于对 T 型接头的两条角焊缝同时焊接的情况。

独立式补偿采用补偿控制器把获得的拼缝变形偏差值, 采用一定的控制算法计算出焊接轨迹补偿量, 然后通过相应的接口电路, 把控制信号送给调节机构实施相应的纠偏动作, 从而达到对焊缝精确跟踪的目的。独立式补偿的基本原理见图 4。

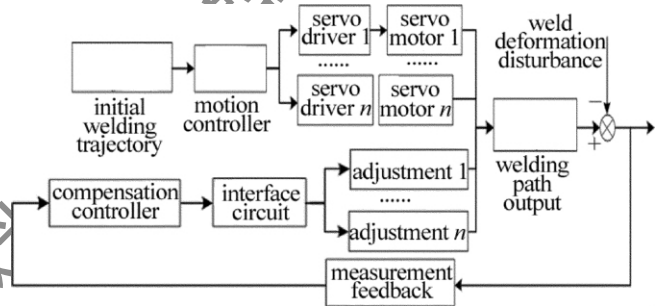


Fig. 4 Basic principles of independent compensation

本平台采用独立式补偿的方案。即在主、从动侧分别采用独立的视觉传感器检测焊接过程产生的偏差, 然后通过两组十字滑台对偏差分别进行动态的补偿^[9]。

在确立了系统的动态补偿方案后, 为达到最理想的焊接效果, 需要运动执行机构能够准确地完成插补运动和补偿运动。为对各轴的精确位置控制, 设计了如图 5 所示的基于 PID 控制的位置环。位置反馈来自于各个轴的编码器, K_{vf} , K_{aff} 分别为速度前馈增益和加速度前馈增益。 K_p , K_i , K_d 分别为比例增益、积分增益和微分增益。位置给定通过 G 代码将轨迹位置传给控制器, 执行插补运动。速度给定为位置环的输出, 它是基于矢量控制的永磁同步伺服系统的输入。

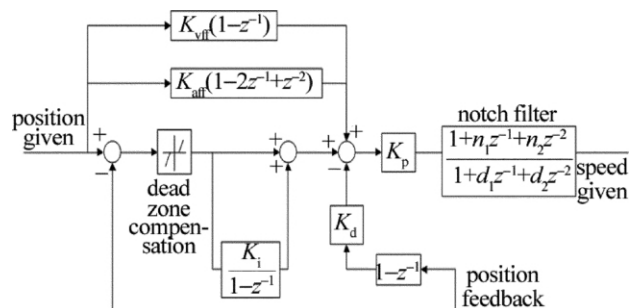


Fig. 5 Configuration diagram of position control loop

3 针对前置测量系统的补偿算法

3.1 偏差数据处理

焊接过程中视觉传感器前置焊枪,由于采用的是将焊头和焊枪跟踪执行机构固定连接在一起^[10-11]。当焊头跟踪执行机构做出补偿动作时,测量头的轨迹也会一起变化,因此,需要对视觉传感器测得的数据进行分析处理后,才能通过运动学变换矩阵转换为执行机构的运动量。如图6所示,焊枪和传感器固连在执行机构上,前置距离为 L ,系统焊接速度为 v ,此时测量系统的超前时间 $t=L/v$ 。视觉传感器测量系统可以看作是一个周期采样系统,系统周期时间为 Δt ($0.01\text{s} \sim 0.04\text{s}$)。假设在点1后开始出现偏差,各点的偏差值用 ξ_i 表示, i 为点的序号值,偏差值由视觉传感器测得。两个测量点间的距离为测量系统周期与焊接速度的乘积,即 $\Delta l=v \times \Delta t$ 。

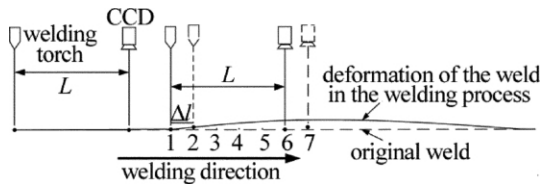


Fig. 6 Schemes of sensor lead welding

视觉传感器测得的偏差值并不能直接作为各个点的偏差补偿量,需要经过一系列的处理。例如当焊枪运动到点3的时候,此时若以 ξ_3 作为补偿量送给执行机构,此时会出现超调。这是由于在点2时执行机构已经针对其偏差 ξ_2 做出了相应的调整。此时假设焊枪的实际位置已经处于第2点并完成了对 ξ_2 的补偿,因此调整量应该为 $\xi_3 - \xi_2$ 。即第 i 个点的调整量应为 $\xi_i - \xi_{i-1}$ 。注意到当焊枪处于点2处时,此时视觉传感器处于前方的某处。不妨设在点7处,此时采集到的位置偏差值 $\Delta\xi_7$,实际由于焊枪和传感器固连在执行机构上,此时点2的补偿量由执行机构补偿后也在点7中表现了出来,所以实际的 $\xi_7 = \Delta\xi_7 + \xi_2$ 。对数据采用这种处理的好处是统一偏差基准,即所有偏差量都是针对形变后的焊缝和原始焊接轨迹的。此时可以得到第 i 个点的补偿量 $\Delta\xi_i = \xi_i - \xi_{i-1}$ 。最后通过运动学模型将 $\Delta\xi_i$ 分解为各个补偿轴的运动量。为满足第 $i+n$ 个测量点正好是第 i 个焊接点,实现基准统一,必须保证 $t = n \times \Delta t$ 。

3.2 跟踪算法

对测得的偏差采用上述的处理方法,还需要相应的跟踪算法。一般的,当焊枪运动到点1时,由于在点1处的偏差值 $\xi_1 = 0$,若简单地根据点1的位置偏差做出相应的补偿动作即不补偿。然后运动到点2处时再补偿点2的位置偏差 ξ_2 ,运动到点3处时再补偿点3的位置偏差 $\xi_3 - \xi_2$ 。此时的补偿路径如图7所示。当

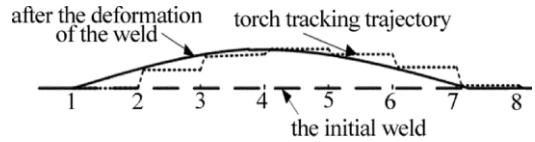


Fig. 7 Schemes of compensation path

系统焊接速度为低速时,此种方式的补偿基本可以满足焊接要求。但焊接速度为高速时,此种方式会产生明显的偏差。

为满足高速焊接速度下精度要求,设计了细化偏差补偿的算法:即将当前补偿点与后一个补偿点的偏差值 $\Delta\xi = \xi_{i+1} - \xi_i$ 等分成 n 份,补偿周期相应地变成 $\Delta t/n$, Δt 为测量系统的周期。 n 的值根据速度的快慢选取。这种算法可以明显提高高速焊接时的补偿精度。

4 实验验证

为验证平台的性能,对图8所示的T型接头进行激光焊接实验,焊接过程利用焊缝跟踪系统对焊缝进行实时跟踪补偿。焊接效果如图9所示。

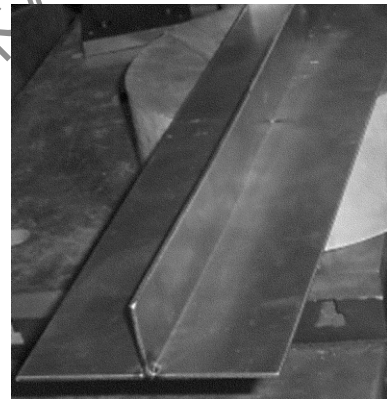


Fig. 8 T-joint weld



Fig. 9 Effect of T-joint welding

5 结论

(1) 采用基于多轴联动数控机床和焊缝跟踪系统的双光束激光焊接平台能够很好地完成对T型接头的激光焊接。

(2) 通过焊缝跟踪系统能够很好地补偿焊接过程中产生的偏差。本文中设计的高速焊接时的补偿算法可以有效地提高系统补偿精度。

(3) 通过焊接试验,证明了双光束激光焊接平台的准确性和实用性。

参 考 文 献

- [1] ZUO T Ch. Laser processing of high strength aluminum alloy [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 75-80 (in Chinese).
- [2] GONG Sh H, YU J F, HUANG Y, *et al.* Study on 3-D joint seam tracking control in non-ferrous metal complicated curve surface laser welding [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(5): 587-590 (in Chinese).
- [3] LU X Q, ZHANG K, WU Y X. Condition and expectation of automatic weld seam tracking system [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 2003, 39(12): 80-84 (in Chinese).
- [4] KANG M G, KIM J H, PARK Y J, *et al.* Laser vision system for automatic seam tracking of stainless steel pipe welding machine [C]//International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS'07. Seoul, Korea: Institute of Control, Robotics and Systems 2007: 1046-1051.
- [5] HE Y X, XU Q H, ZHOU Y H. Kinematics model and its solution for NC machines of arbitrary configuration [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 2002, 38(10): 31-35 (in Chinese).
- [6] YANG J Zh, WANG B Sh, HUANG K, *et al.* A processing method for measuring data of 3-D welding seam based on active framework [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(24): 2947-2953 (in Chinese).
- [7] CHEN H Y, XU D, WANG H. Comparison of two modeling method of 3-D curve welding seam [J]. *Transactions of the China Welding Institution* 2008, 29(6): 41-44 (in Chinese).
- [8] GONG Sh H, YU J F, YANG J Zh, *et al.* Dynamic compensation for deformation in laser welding of 3-D joint seam [J]. *Transactions of the China Welding Institution* 2011, 32(2): 89-92 (in Chinese).
- [9] FANG Z J, XU D, TAN M. A vision-based self-turning fuzzy controller for fillet weld seam tracking [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2011, 16(3): 540-550.
- [10] KIM Ch H, CHOI T Y, LEE J J, *et al.* Intelligent vision sensor for the robotic laser welding [C]//International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2008 6th IEEE. Daejeon, Korea: IEEE, 2008: 406-411.
- [11] MENNO D G, RONALD A, BEN J, *et al.* Real-time seam tracking for robotic laser welding using trajectory-based control [J]. *Control Engineering Practice*, 2010, 18(8): 944-953.