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/jgjs.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-hang

(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 multiaxis 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 Tjoint 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,

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: gongshihua1@ mail. hust. edu. cn 收稿日期: 2012-06-12; 收到修改稿日期: 2012-06-27 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, 激光束与筋板成一定的角度。焊接过程中,两侧的角 焊缝变形不一致,需要在焊接过程中在主、从动侧分 别引入测量环节和补偿环节,实时地检测激光焦点 与焊缝中心之间的偏差,进行相互独立实时的位置 补偿,以完成对 T 型接头两条角焊缝的准确跟踪。 由此确立了如图 1 所示的激光焊接机床结构方案。 机床的结构为 X,Y Z A, B, C, U_1 , V_1 , U_2 , V_2 共 10 个 轴,其中前 6 个轴用来控制焊头的位置和姿态, U_1 , V_1 和 U_2 , V_2 为两组独立补偿运动轴。激光焊接过程 中对焊缝位置信息的获取主要通过视觉传感器来实 现^[3]。该平台采用的智能型激光传感器(smart laser sensor, SLS) 是激光传感器最新的技术,该激光视觉 传感器基于三角测量原理^[4],能准确地获取复杂结 构件 3 维拼缝位置信息。



Fig. 1 Structure diagram of dual-beam laser welding dual tracking platform

1.2 机床运动学建模

刀具、工件和机床的运动关系可以用刀具坐标系、 工件坐标系和机床坐标系之间的坐标变换矩阵表示。 机床运动链中任意两相邻坐标系间的变换矩阵,由机 床的机构模型和机床各坐标轴的运动量决定^[5]。设 O_i 表示机床坐标系, $O_{(i-1)}$ 表示与 O_i 相邻的坐标系, 记坐标系 O_i 到坐标系 $O_{(i-1)}$ 的变化矩阵为 $Q_i^{[5]}$ 。

机床运动学和相关参量如图 2 所示。 $I_x I_y I_z$ 分别 表示 A B C 轴的旋转轴线 , $O_x X_x Y_x Z_x$ 表示工件坐标



Fig. 2 Kinematic coordinate system and relevant parameters

系 $\rho_{j}X_{j}Y_{j}Z_{j}$ 表示机床坐标系 $\rho_{m,r}X_{m,r}Y_{m,r}Z_{m,r}$ 表示主动 侧测量坐标系 $\rho_{m,1}X_{m,1}Y_{m,1}Z_{m,1}$ 表示从动侧测量坐标系。 其 它 为 依 附 在 相 应 构 件 上 的 临 时 坐 标 系。 $O_{t,r}X_{t,r}Y_{t,r}Z_{t,r} \rho_{t,r}X_{t,r}Y_{t,r}Z_{t,r} \rho_{t,r}X_{t,r}Y_{t,r}Z_{t,r}$ 分别表示依附 在 X,YZ 3 个平动轴的临时坐标系 $\rho_{m,r}X_{m,r}Y_{m,r}Z_{m,r}$, $O_{m,r}X_{m,r}Y_{m,r}Z_{m,r} \rho_{m,r}X_{m,r}Y_{m,r}Z_{m,r}$, $G_{m,r}X_{m,r}Y_{m,r}Z_{m,r} \rho_{m,r}X_{m,r}Y_{m,r}Z_{m,r}$, $O_{r,r}X_{r,r}Y_{r,r}Z_{r,r} \rho_{y,r}X_{y,r}Y_{y,r}Z_{y,r}$, $O_{r,r}X_{r,r}Y_{r,r}Z_{r,r} \rho_{y,r}X_{y,r}Y_{y,r}Z_{y,r}$, $O_{r,r}X_{r,r}Y_{r,r}Z_{r,r} \rho_{y,r}X_{y,r}Y_{y,r}Z_{y,r}$, $O_{r,r}X_{r,r}Y_{r,r}Z_{r,r} \rho_{y,r}X_{y,r}Y_{y,r}Z_{y,r}$, $O_{r,r}X_{r,r}Y_{r,r}Z_{r,r} \rho_{x,r}X_{x,r}Y_{r,r}X_{x,r} \rho_{x,r}$, $O_{r,r}X_{r,r}Y_{r,r}Z_{r,r} \rho_{x,r}X_{r,r} \rho_{x,r} \rho_{x,r}$

根据各坐标系的定义,可以得到相邻坐标系间的 位置矢量等数据,通过下式可求得相邻坐标系的变换 矩阵,最终求得机床的测量坐标系到工件坐标系和焊 头坐标系到工件坐标系的总变换矩阵。以主动侧测量 头为例,相邻坐标系的变换矩阵依次为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{T}_{w \to j} = \operatorname{trans}(L_{w j x} \ L_{w j y} \ L_{w j z}) \\ \boldsymbol{T}_{j \to 1 x} = \operatorname{trans}(p_{x} \ \rho \ \rho) \\ \boldsymbol{T}_{r_{y \to 1 z}} = \operatorname{trans}(0 \ p_{y} \ \rho) \\ \boldsymbol{T}_{r_{y \to 1 z}} = \operatorname{trans}(0 \ \rho \ p_{z}) \\ \boldsymbol{T}_{1 z \to m \mu} = \operatorname{trans}(0 \ \rho \ L_{z}) \operatorname{rot}(Y \ \varphi_{m y}) \\ \boldsymbol{T}_{m \mu \to m \mu} = \operatorname{trans}(0 \ \rho \ L_{z}) \operatorname{rot}(X \ \varphi_{m x}) \\ \boldsymbol{T}_{m \mu \to y x} = \operatorname{trans}(0 \ L_{y \mu x} \ L_{z \mu x}) \operatorname{rot}(Z \ \varphi_{a x}) \\ \boldsymbol{T}_{y \mu \to z x} = \operatorname{trans}(0 \ L_{y x} \ \rho \ \rho) \end{cases}$$
(1)

式中 trans 表示转换 rot 表示旋转; $P_x P_y P_z$ 为 X, Y Z 工作台的位置 $\varphi_{m,x} \varphi_{m,y} \varphi_{m,z}$ 分别为绕 A, B, C 3 个旋 转轴的旋转角度 $L_{y,x}$ 和 $L_{z,x}$ 为主动侧补偿平台两轴的 移动量,这 8 个参量是机床的实际运动量; L_z 表示 C 轴旋转轴线和 B 轴旋转轴线之间的 Z 向距离 L_x 表示 B 轴旋转轴线和 A 轴旋转轴线之间的 X 向距离 $L_{m,x}$ 为 测量头到补偿平台的 X 向距离,这 3 个参量是机床固 有的参量。图 2 中位置矢量 $r_{w,x}$ 为工件在工作台的定 位位置,位置矢量 $R_{a,x}$ 表示坐标系 $O_{y,x}X_{y,x}Y_{y,x}Z_{y,x}$ 原点 在坐标系 $O_{m,x}X_{m,x}Y_{m,x}Z_{m,x}$ 中的位置矢量:

$$\begin{cases} \boldsymbol{r}_{w\,j} = \left(L_{w\,j\,x} L_{w\,j\,y} L_{w\,j\,z} \right)^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{R}_{a\,x} = \left(0 L_{y\,a\,x} L_{z\,a\,x} \right)^{\mathrm{T}} \end{cases}$$
(2)

由机床运动链关系,可以得到测量坐标系到工件坐标 系的总转换矩阵 *T*_{w→m}:

$$T_{w \to m} = T_{w \to j} T_{j \to t, x} T_{1, x \to t, y} T_{1, y \to t, z} T_{1, z \to m, r} T_{m, r \to m, b} T_{m, p \to m, a} T_{m, p \to m, a} T_{m, p \to y, r} T_{y, r \to z, r} T_{z, r \to m} = - c_z c_y c_a + M s_a - c_z c_y s_a + M c_a s_z s_x + c_z s_y c_x a_{11} L_{m, r} + a_{13} (1 + L_{z, r} + L_{z, \mu, r}) + a_{12} L_{y, r} + M L_{y, \mu, r} + c_z c_y L_x + P_x + L_{w, j, x} - s_z c_y c_a + N s_a - s_z c_y s_a + N c_a - c_z s_x + s_z s_y c_x a_{21} L_{m, r} + a_{23} (1 + L_{z, r} + L_{z, \mu, r}) + a_{22} L_{y, r} + N L_{y, \mu, r} + s_z c_y L_x + P_y + L_{w, j, \mu} - s_y c_a + c_y s_x s_a s_y s_a + c_y s_x c_a c_y c_x a_{31} L_{m, r} + a_{33} (1 + L_{z, r} + L_{z, \mu, r}) + a_{32} L_{y, r} + c_y s_x L_{y, \mu, r} + s_y L_x + P_z + L_{w, j, \mu} - 0 0 0 1$$

式中 M N为多项式 且 $M = c_z s_y s_x - s_z c_x N = s_z s_y s_x + c_z c_x$; 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 $T_{w\to m}$ 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:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{r}_{w} & \boldsymbol{n}_{w} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}_{w \to m} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{r}_{m} & \boldsymbol{n}_{m} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$
(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30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



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,以实现对焊缝的精确跟踪。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。为实现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*_{vff},*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于焊枪,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 $\Delta t(0.01s \sim 0.04s)$ 。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 52 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 ξ2 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 Δξ, 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



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

- 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

HANAFIT

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 working using trajectory-based control [J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(8): 944-953.