

# 三维T形焊缝的双光束激光焊接及其焊缝跟踪控制

梁斌焱<sup>1</sup>, 许先雨<sup>2</sup>, 龚时华<sup>1</sup>, 王启行<sup>1</sup>, 王鑫润<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 装备数字化国家工程研究中心, 武汉 430070; 2. 湖北荆能输变电工程公司, 武汉 430070)

**摘要:** 由于三维T形焊缝的焊接中存在双光束焊接结构特殊、三维焊接轨迹难以拟合、焊接变形量大的难点, 针对三维T形焊缝的双光束焊接需求, 在六轴联动机床上设计了双光束焊接平台的方案, 根据焊件的三维模型, 运用三维焊接路径控制技术, 生成实际的三维双光束焊接路径; 在双光束焊接过程中采用双路实时闭环焊缝跟踪技术, 对焊接过程中的焊接变形引起的焊接偏差进行的跟踪。结果表明, 双光束焊接平台的实施及其双路焊缝跟踪技术很好的满足了双光束激光焊接要求。

**关键词:** 三维T形焊缝; 双光束; 激光焊接; 双路焊缝跟踪

中图分类号: TG 439.4 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2016)02-0047-04

## 0 序 言

随着航空工业的发展, 在航空整体结构件的制造中, 更多的采用激光焊接工艺, 来减轻飞行器的重量、改善连接性能。激光焊接能量集中, 对材料损伤小, 焊接过程易于集成化、自动化, 实现高速高精焊接, 焊接效率大大提高。但是现在的激光焊接对三维复杂T形焊缝的处理, 往往先用一束激光焊接角焊缝的一侧, 再焊接另外一侧, 存在焊接热源不对称, 容易产生焊接变形等焊接缺陷<sup>[1]</sup>。采用双光束激光对T形焊缝两侧同时焊接, 则能克服上述缺点, 并且双光束激光由一束高功率激光分光而成, 保证两侧工艺参数的一致性。

在实际焊接过程中, 工件安装误差和焊接热应力引起的焊接变形仍然难以避免, 为保证焊缝质量, 需采用夹具定位, 普通的夹具无法满足要求, 必须采用更为精确的夹具<sup>[2]</sup>, 因此增加了加工成本并且大型航空件的装配误差通常比较大, 为高精加工带来了难度; 采用多自由度机器人配备视觉传感器做法<sup>[3]</sup>, 可以灵活保证加工要求, 克服上述不足, 但是目前不能用于双光束焊接, 只能两束激光不同步焊接, 比双光束同时焊接工艺性差, 也难以满足越来越高的焊接要求, 如焊接速度9 m/min、定位精度0.05 mm。因此研究针对三维T形焊缝双路焊接及焊缝跟踪的多轴联动控制的关键技术就颇具意义。

收稿日期: 2014-04-09

基金项目: “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); 国家自然科学基金项目(51375192); 武汉市科技计划项目(2013010501010127)

## 1 三维T形焊缝双光束焊接控制模型

### 1.1 三维T形焊缝双光束焊接平台方案

三维T形焊缝的双光束焊接技术主要应用于飞机整体壁板、蒙皮等大尺寸的结构件<sup>[4]</sup>, 一般的焊接机器人技术、中小型多轴运动控制技术难于一次完成长度大于3 m的结构件。系统采用横梁结构的大型多轴联动机床, 最长焊接行程为5 m, 以解决大尺寸结构件的单次焊接问题。

三维T形焊缝较一般焊缝的加工难点在于三维加工路径实施中焊接姿态的适时调整, 具体来说: (1) 双光束激光焊接的两条激光束均位于三维焊缝曲线的法平面内。 (2) 两条激光束与T形焊缝所在底板成一定角度(30°左右, 可调)。 (3) 两束参数相同焊接激光的焦点严格落在两侧三维焊缝的中心位置。图1为双光束激光焊接平台。

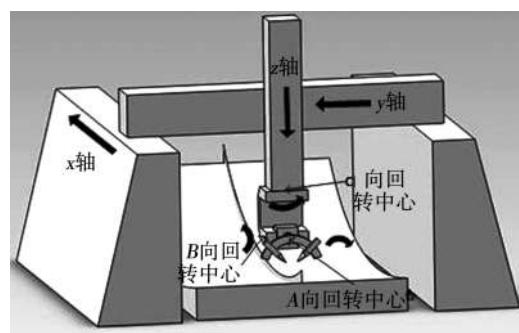


图1 双光束激光焊接平台

Fig. 1 Dual-beam laser welding platform

经过对需求分析的研究之后,确立了机床结构方案(图1). 机床结构中 $x, y, z$ 轴用于控制空间曲线焊接运动, $A, B, C$ 三个轴用于控制焊接姿态,保证激光头的正确角度,三轴的回转中心相交于一点,便于运动控制建模和焊接路径规划.  $U_1, U_2, V_1, V_2$ 为两个十字滑台上的四个十字直线轴,用于对双光束焊接过程中的双路跟踪控制.

## 1.2 双光束激光焊接的三维焊接路径控制技术

双光束激光焊接路径控制过程的建模,要遵循如图2所示几何条件:(1) 通过规划 $x, y, z$ 三直线坐标轴的运动路径可以带动焊接头行走出焊缝的三维空间曲线;(2) 工艺要求,两束激光必须落在三维焊接曲线上焊接点所在的法平面内, $B, C$ 轴的实时运动可以实现此几何要求;(3)  $A$ 轴作角度,调整保证焊接中两激光束与底板的夹角固定为 $\alpha^\circ$ .

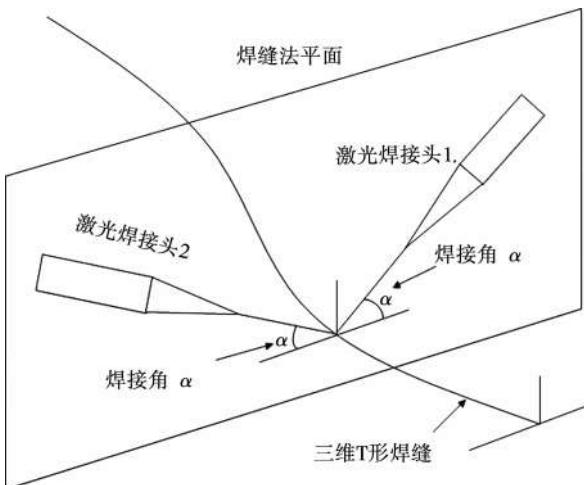


图2 双光束焊接的几何约束

Fig. 2 Geometric constraints of dual-beam laser welding

分析由计算机辅助设计技术建立三维T形焊缝的空间模型,三维焊缝曲线上的任意一个焊接点所在机床坐标系 $Oxyz$ 中的位置坐标为 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ;计算该点的法平面数学信息,确定 $B, C$ 两轴在该焊接点的旋转角度 $C_i$ 和 $B_i$ ;由焊接点所在底板曲面法矢的数学信息,确定 $A$ 轴的旋转角度 $A_i$ .

根据 $x, y, z, A, B, C$ 六个轴的运动量,分析规划三维T形焊缝的双光束激光焊接路径. 焊接路径的规划中首先保证双光束的焊接姿态,即 $A, B, C$ 轴的旋转角度 $A_i, B_i, C_i$ ,由于 $A, B, C$ 三轴的旋转将对 $x, y, z$ 位置信息产生影响,需将三维焊缝曲线上焊接点的位置坐标 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 转化为焊接姿态确定后的位置坐标 $P_j(x_j, y_j, z_j)$ . 结合机床结构模型,机床各轴的位置信息由下式求得

$$\left. \begin{aligned} x_j &= x_i - \sqrt{x^2 + y^2} [\cos(B_0 - B) + \cos C] + 2L \\ y_j &= y_i - \sqrt{x^2 + y^2} (\sin A + \sin C) \\ z_j &= z_i - \sqrt{x^2 + y^2} (\sin(B_0 - B) + \sin A) + 2H \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $H, L$ 为分别激光焦点到三向旋转中心点的垂直、水平方向距离; $B_0$ 为激光焦点和三向旋转中心点连线与水平方向夹角.

## 2 双光束激光焊接的双路跟踪控制

### 2.1 T形焊缝的焊接偏差测量技术

三维T形焊缝的双光束激光焊接过程中,为了克服工件装夹定位、路径规划精度、焊接变形等引起的误差,引入了双路焊缝跟踪控制技术. 双路焊缝偏差测量技术是利用基于结构光原理<sup>[5]</sup>的机器视觉传感器对焊接过程进行实时误差检测.

测量坐标系 $O_cUV$ 与机床坐标系 $Oxyz$ 的关系如图3所示. 每个线结构光视觉传感器由一个摄像机和一个结构光投射器构成,视觉传感器先将一条线性结构光打在T形焊缝上,在机床坐标系 $Oxyz$ 下形成一条三维空间折线 $P_0P_1P_2$ ,其中 $P_0$ 为落在三维焊缝上焊接点,机床坐标 $P_0(x_w, y_w, z_w)$ ,根据三角测量原理,视觉传感器在成像平面 $OcUV$ 上形成的二维图像 $\angle P'_1P'_0P'_2$ ,则测量坐标系中焊接点图像坐标为 $P'_0(u_c, v_c)$ . 将焊缝点位信息由三维机床坐标系转化至二维图像坐标系的数学模型为

$$w \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

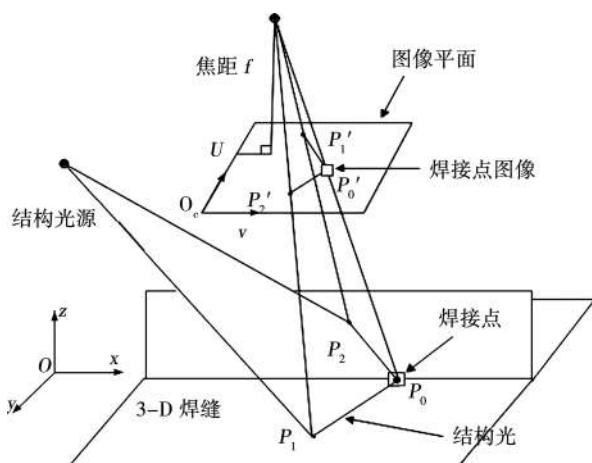


图3 测量坐标系与工件坐标系的关系

Fig. 3 Relationship between measuring and workpiece coordinate system

式中: $R$  为与传感器安装角度相关的旋转矩阵; $t$  为平移矢量; $f$  为摄像机焦距.

$$R = \begin{bmatrix} \cos B & \cos A \cos B & -\sin A \cos B \\ -\sin A & -\sin A \cos B & \cos A \sin B \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $A, B$  为与传感器安装参数有关的旋转角度.

由于  $A, B, t, f$  由线结构光和摄像机经过精确标定得到, 可以确定由机床三维空间坐标到测量二维空间坐标的转换矩阵. 标定后的实际视觉测量图像如图 4 所示. 图像上焊缝特征点的水平和垂直偏移分别换算, 将测量坐标系下的焊接点位置信息发送给焊缝跟踪控制接口做焊缝跟踪运动处理.

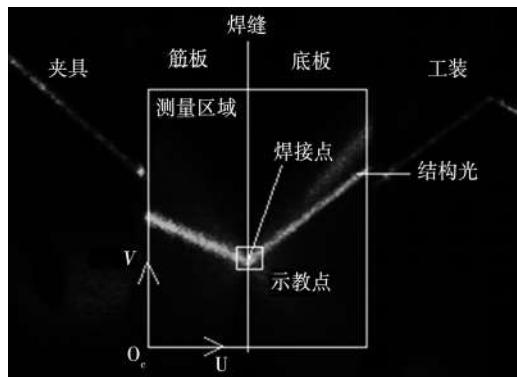


图 4 跟踪传感器测量图像

Fig. 4 Measured image by tracking sensor

## 2.2 基于机器视觉的 T 形焊缝双路跟踪控制技术

视觉传感器反馈给控制器的  $U, V$  轴偏移量  $U_c, V_c$ , 系统采用独立跟踪控制方式<sup>[6]</sup>, 由双路视觉传感器作为测量反馈元件, 将焊接变形扰动信息作闭环反馈, 由跟踪控制器做位置环处理, 跟踪控制器输出两组速度控制信号, 通过接口电路控制调节机构完成双路跟踪控制, 系统框图如图 5 所示.

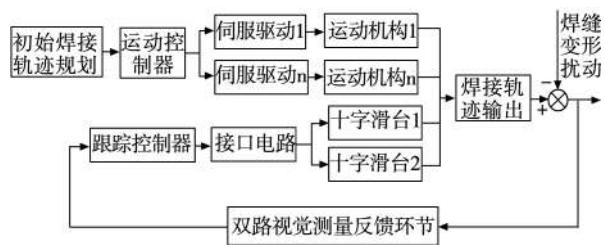


图 5 跟踪控制系统框图

Fig. 5 Dual tracking control system block diagram

由 2.1 节知, 两路视觉传感器测得的焊缝偏差信号, 通过跟踪控制器发出的速度信号控制接口电路和调节机构, 接口电路采用速度、电流双闭环控制技术, PI 速度调节器、电流调节器对速度和电流进行闭环控制, 控制结构框图如图 6 所示.

图 6 中  $n_r, n_f$  分别为给定速度和实际速度,  $P$  为位置输出,  $K_f$  为速度反馈系数,  $K_T, T_f, T_r$  为输出转

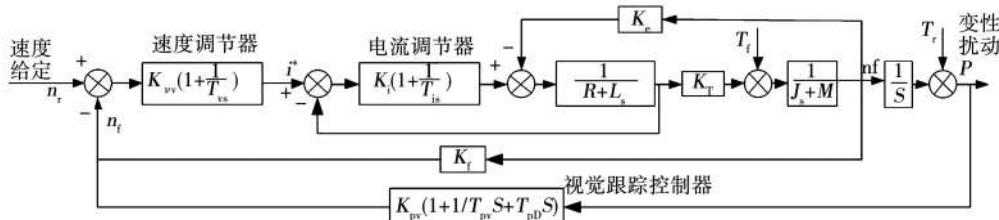


图 6 跟踪控制速度控制模型

Fig. 6 Control model of tracking control speed

矩比例系数、负载转矩、变形扰动,  $R, L$  为电机参数,  $J, M$  为传动机构惯性环节参数.

系统中, 调节电流 PI 积分器的积分时间常数, 使得:  $T_i + 1 \approx Ls/R + 1$ , 可简化为电流闭环 I 型系统, 传递函数为:  $G_{ib}(s) = 1/(T_i s + 1)$ , 其中  $T_i = RT_i/K_i$ . 速度调节器采用 PI 控制器  $G_v(s) = K_v(T_v s + 1)/T_v s$  来控制速度环的对象  $G_{vd}(s)$ , 得到典型速度环 II 型系统, 速度控制的开环传递函数为

$$G_{vk}(s) = \frac{K_T K_v (T_v + 1)}{T_v s (T_i s + 1) (J s + M)} \quad (4)$$

由开环传递函数可求得速度环闭环控制函数:

$G_{vb} = G_{vk}(s) / [1 + K_f G_{vk}(s)]$ , 针对变形扰动的视觉跟踪控制器采用 PID 控制器:  $G_{PID} = K_{pV} (1 + 1/T_{pV} s + T_{pD} s)$ , 则变形扰动  $T_r$  的位置响应为

$$T_r(s) = \frac{G_{vb}(s)}{[s + G_{vb}(s) G_{PID}(s)]} \quad (5)$$

将控制器增益、电机参数、机械传动惯性参数一并代入上式, 求得系统对单位阶跃扰动的响应: 最大扰动量  $M_p = 23\%$ 、调整时间  $T_s = 32$  ms, 系统的抗干扰性和对扰动响应的快速性均满足跟踪要求.

通过数据采集软件将系统对正弦速度输入曲线和速度误差曲线绘制成图(图 7). 采集结果显示,

系统对速度信号响应速度快,响应误差在0.05 mm以内,系统的快速性和准确性均满足要求。

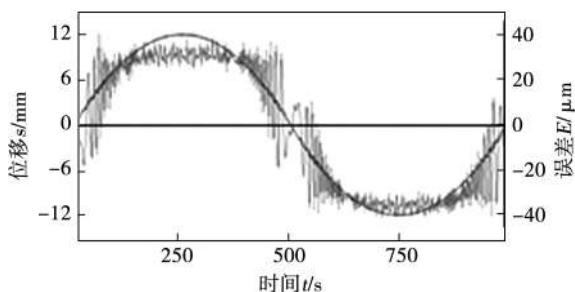


图7 实际系统速度响应和误差  
Fig. 7 Speed response and error

### 2.3 跟踪误差分析与改善措施

双路跟踪控制技术的闭环测量反馈环节,一方面由于视觉传感器的图像采集、图像处理等环节造成闭环反馈的滞后环节 $e^{T1S}$ ;另一方面,视觉传感器前置于焊接头安装,带来超前环节 $e^{T2S}$ ,由于 $T_2 > T_1$ ,闭环反馈总体表现为超前控制,故超前控制带来的误差是跟踪误差的主要成因。

为了减小跟踪误差,系统采取以下改善措施:

(1) 软件中采用延时处理算法抵消超前环节;(2) 尽量减少视觉传感器前置距离;(3) 将测量得到的偏差分多个伺服周期补偿到各轴。

### 3 焊件验证

如图8所示,选取某三维T形焊缝的一段,由焊件数模得到三维焊接代码,在5 m/min的焊接速度下运行代码,对400 mm的三维焊缝使用双路跟踪

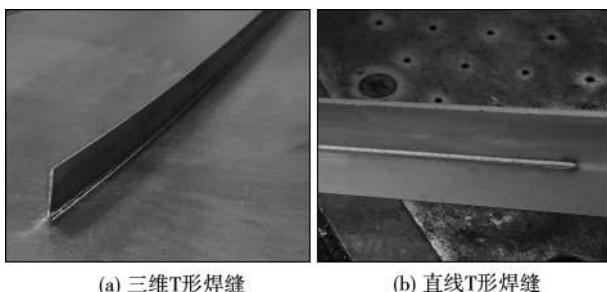


图8 焊件验证  
Fig. 8 Weldment verification

控制技术,通过纠正偏差,焊接最大偏差量0.15 mm,属误差允许范围内,焊件合格。

### 4 结论

(1) 针对三维复杂T形焊缝的双光束焊接三维路径的规划,满足三维路径的高速高精控制要求。

(2) 焊接过程中采用双路焊缝跟踪的技术能有效的减小焊接偏差,大大提高双光束焊接效果。

(3) 成果已经应用于某大型高功率双光束激光焊接设备,达到最大焊接行程5 m,最快双光束焊接速度9 m/min,焊接运动定位精度0.05 mm,焊接过程中实际测量双路跟踪技术最大焊接偏差0.2 mm,对由装夹、焊接变形引起的误差有较明显的纠正。

### 参考文献:

- [1] 巩水利, 陈 例. 一种用于激光焊接的双光束焊接方法: 中国. 200410088810.3[P]. 2005-08-24.
- [2] 王 伟, 邹奇仕. 视觉传感焊缝跟踪技术的发展状况及实施方案探讨[J]. 电焊机, 2002, 32(5): 1-5.  
Wang Wei, Zou Qishi. Development status and implementation scheme of visual sensor for seam tracking[J]. Elsetric Welding Mechine, 2002, 32(5): 1-5.
- [3] 徐 德, 谭 民, 李 原. 机器人视觉测量与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [4] 龚时华, 杨建中. 三维拼缝激光焊接的变形动态补偿[J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 89-92.  
Gong Shihua, Yang Jianzhong. The dynamic deformation compensation of 3D seam laser welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(2): 89-92.
- [5] Pei Yang, Bin-shi XuLin Wu. Rapid calibration for line structured light vision sensors[J]. Optoelectronics Letters, 2006, 2(3): 175-178.
- [6] 龚时华, 喻俊峰, 黄 禹, 等. 复杂曲面有色金属3维激光拼焊的跟踪控制研究[J]. 激光技术, 2010, 34(5): 587-590.  
Gong Shihua, Yu Junfeng, Huang Yu, et al. Research on tracking control of 3D laser tailor welding of complex curved surface[J]. Laser Technology, 2010, 34(5): 587-590.

**作者简介:** 梁斌焱,男,1988年出生,硕士研究生。主要从事激光及相关特种加工装备控制的研究工作。Email: 543781234@qq.com

**通讯作者:** 龚时华,男,博士,教授。Email: gongshihua1@mail.hust.edu.cn