

十轴六联动双光束激光焊接及其跟踪控制技术*

龚时华, 郑忠香, 王平江, 杨建中

(华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074)

[摘要] T型接头常见于大型构件的筋壁板,其加工方法和质量往往影响着整个结构件的性能。研制了十轴六联动双光束激光焊接机床,其中六轴联动控制单元实现了在三维激光焊接中对位置和姿态的控制,同时对T型接头两侧进行实时焊缝测量,实现了对双侧焊缝的跟踪与补偿。通过对试验件的焊接,验证了十轴六联动双光束激光焊接及其跟踪控制系统满足大型结构件三维T型接头加工要求。

关键词: 十轴六联动数控机床; 双光束激光焊接; 焊缝跟踪; 控制系统; T型接头

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.11.034



龚时华

博士、教授,主要从事激光及相关特种加工装备控制的研究工作。

大型结构件的筋壁板通常采用T型接头结构,用以加强结构件刚度,如图1所示。以往的筋壁板加工多采用铆接工艺。与铆接加工相比,采用激光焊接能够减轻工件重量,改善零件刚度,提高生产效率^[1]。

激光焊接T型接头最好的方法是采用双光束激光对两侧拼缝同时进行焊接,而双光束的获得可以采用光学分光的方法或者使用两台激光器分别出光来实现^[2]。

最早的双光束激光焊接设备是在20世纪90年代由德国不莱梅射线研究所、亥姆霍兹联合会、福朗霍夫材料与射线研究所、汉诺威激光研

究所、亚琛工大等科研院所经过近10年的研发共同完成,并且成功应用于空客A380机头下壁板的焊接^[3-4]。

由于双光束激光焊接技术属于高端加工技术并涉及国家安全,相关基础研究及技术进展,特别是相关制造装备的软硬件技术并未见到实质报道。

国内对T型接头的焊接往往采用两台机器人控制两束激光对准T型接头的两侧焊缝同时焊接^[5],这种方法往往应用于双光束焊接试验,以验证工艺可行性,但是不适用于大尺寸筋板结构的整体焊接,并且无法保证精度和效率,因而不满足工程实际应用条件。

为满足各行业日益增长的大型筋壁板结构件焊接需求,迫切需要自主研发三维双光束激光焊接技术。为此,必须解决三维T型接头双光束激光焊接的技术难点^[6]:

(1)三维焊接过程中,焊接头位置与姿态的控制必须满足精度要求。

(2)三维焊接过程中,焊接速度、

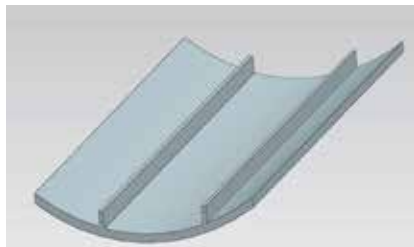


图1 T型接头焊接件
Fig.1 T type joint weldment

*基金项目: 国家科技重大专项“高档数控机床与基础制造装备”(2009ZX04007-031-06); 国家自然科学基金面上项目(51375192)。

激光功率、激光焦点等必须满足焊接工艺要求。

(3) 激光焊接的过程中焊缝容易变形,会导致激光焊接的质量变差甚至焊接失败,因此必须进行激光焊接过程的实时跟踪与补偿。

(4) 双光束焊接过程中,一侧的调整会对另一侧构成影响,必须加以控制与约束。

为此,必须自主研发满足三维 T 型接头的双光束激光焊接 CNC 系统,这种系统除了具备三维加工数控功能外,还需要完成特殊的控制功能:双光束激光控制;三维焊接轨迹示教及运动规划;双侧焊缝的实时在线测量、建模与跟踪^[7-8];六轴联动运动控制器与焊缝测量和跟踪装置的有机集成^[9-10];根据焊接工艺自动调节焊接激光焦点位置;控制系统软件与 CAD/CAM 系统集成。

十轴六联动(6+2+2)双光束激光焊接及其跟踪平台

为实现三维双光束激光焊接,需要保证激光束姿态随着曲面的弯曲程度变化翻转,而传统的三坐标机床不能满足要求。因此,平台采用六轴联动的机床,通过 3 个平动轴控制焊点位置,3 个旋转轴控制激光束的入射方向,满足三维激光焊接过程中焊接头位置和姿态的控制要求。

双光束激光焊接平台采用在三坐标机床上集成三自由度双光束焊接头而成,如图 2 所示。C 轴的旋转机构安装在滑枕内部,使得工作头部件能绕 Z 轴旋转;再依次经过 B 轴、A 轴的旋转机构,运动传至弧板。

此外,由于使用双光束焊接工艺需要保证两束激光同步加工,除了要保证激光焊接头的位置及其法矢满足要求外,还要约束焊接点的切矢量(双光束焊接具有两个焊接头,若不限限制切矢,则一个焊头切向变化时,另一个焊头丢失加工方向)。因此, T 型焊缝跟踪采用双边独立调整的

方式(两套十字滑台,每个十字滑台独立进行 U、V 向调节)对焊接过程中的焊缝偏差进行调整。如图 3 所示,弧板的两侧装有焊缝跟踪装置,4 个辅助直线轴 U1、V1、U2 和 V2 分两组分别构成两套十字运动滑台机构,用来实现焊缝跟踪与补偿。

在激光焊接头工作面上,建立一个二维坐标系 U1-V1,其中 V1 向为某侧激光束的入射方向,U1 向为经过激光束上某点垂直于 V1 向的轴线方向。同样以另一侧激光束的入射

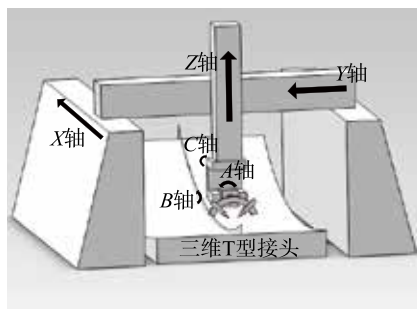


图2 双光束激光焊接平台
Fig.2 Dual-beam laser welding platform

方向及其垂直方向为基准建立二维坐标系 U2-V2,如图 4 所示。

十轴六联动双光束激光焊接控制系统硬件配置

为实现双光束激光焊接及跟踪,控制系统采用“上位工控机+6 轴运动控制器+双通道 2 轴跟踪控制器”的数控系统结构。上位工控机主要提供人机界面、参数设置、系统诊断和程序后台管理,6 轴控制器实现对三维焊接运动轨迹的控制, T 型焊缝两侧各自采用 2 轴跟踪控制器实现双路焊缝跟踪与补偿控制。

1 三维焊接的六轴联动控制配置

六轴联动控制单元由多轴联动运动控制器及 X、Y、Z、A、B、C 6 个运动轴构成,其中 X 轴是龙门轴,由 2 个电机驱动同步轴运动完成。由于各轴传动机构复杂,为保证运动精度,直线轴和旋转轴分别采用光栅尺和圆光栅进行位置与

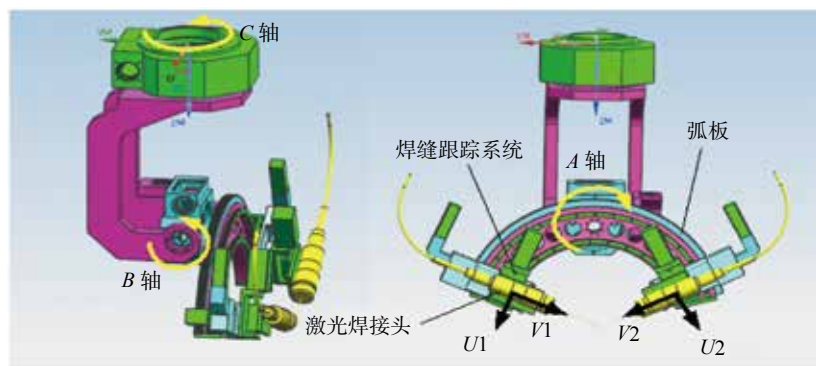


图3 焊接工作头
Fig.3 Welding head

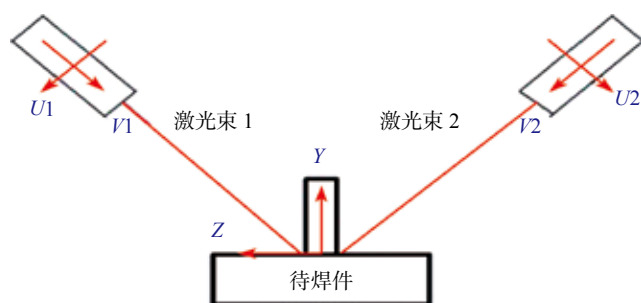


图4 焊缝跟踪局部坐标系
Fig.4 Local coordinate system for weld seam tracking

角度反馈。控制系统结构如图 5 所示。

本控制系统采用交流伺服电机作为各个运动轴的执行部件,运动控制器与伺服驱动形成一个 PID 控制环,通过调节 PID 参数,使各个电机的响应性能达到所需要的静态和动态指标。上位工控机与运动控制器之间采用高速以太网实现双向数据通信。

2 双光束焊缝实时测量与跟踪单元配置

为实现激光焊接过程中焊缝变形跟踪的自适应控制,必须对焊缝形变进行实时检测,并实施纠偏。

针对 T 型焊缝双边测量,自主研发了基于微景深的焊缝测量单元。图 6 为基于微景深的拼缝测量单元示意图。该系统包括工业相机、4 倍镜头和 LED 照明光源,调整相机主光轴与激光焊接对接拼缝局部平面的角度,使相机的微景深中心平面与拼缝局部平面夹角约为 45° ,并调整相机与焊接拼缝的相对位置,使微景深区域与拼缝局部平面的相交线呈现在相机的可视范围(如图 6 中的矩形 ABCD),最后根据拍摄的图像计算出拼缝的宽度、位置、法矢等数据信息。

测量单元主要性能如下:

(1) 拼缝检测宽度:最小达到 0.02mm;

(2) 拼缝法矢测量精度:相对误差 $\leq 1\%$;

(3) 拼缝中心位置检测精度为 0.02mm;

(4) 拼缝检测与跟踪速度:最大达到 9m/min。

为保证拼缝测量与跟踪的实时性,在机床末端执行装置(即弧板)的两组十字滑台上各自安装了激光焊接头和视觉测量头,实时对拼缝在焊接过程中出现的偏差进行测量与补偿。在激光焊接过程中,机床控制系统控制焊接头随着拼缝轨迹进行运动,同时视觉测量头实时对拼缝局部表面进行图像采集,并传输到上位工控机进行拼缝图像分析;当拼缝的位置与激光焊接头的位置存在偏差时,测量系统会根据拼缝的偏差大小,计算出十字滑台上的两轴应该移动的速度和方向,并将速度大小和方向通过 DA 转换成带符号的模拟量,然后传递给伺服驱动(伺服驱动工作于速度方式),伺服驱动控制十字滑台的两个电机运动,即补偿控制器通过视觉测量形成位置闭环,达到拼缝实时检测与跟踪的目的。整个平台的运动控制及跟踪补偿控制模型如图 7 所示。

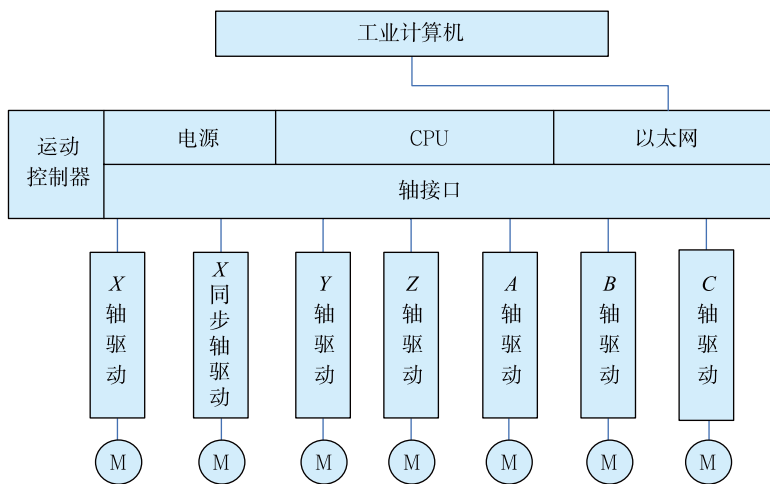


图5 六轴联动控制硬件配置

Fig.5 Hardware configuration of six-axis linkage control

双光束激光焊接及其跟踪控制软件实现

1 三维焊接轨迹示教

筋壁板结构件在进行三维焊接前,要通过机床控制系统对 T 型焊缝进行示教,并满足以下条件:

(1) 对每个示教点的间距进行约束,曲率越大处示教点越密集,以实现六轴联动的平滑运动;

(2) 拼缝图像始终位于窄景深图像的中间。

示教结束,控制系统将自动测量得到的示教点信息(如拼缝中心位置和法矢等信息)记录到数据文件中,然后通过系统 CAD/CAM 模块对示教数据进行后置处理,首先建立拼缝的三维模型,然后输出焊接与测量控制的 NC 代码,保证焊接头的激光焦点始终处于拼缝中心,视觉测量头处于较好的拼缝测量姿态,如图 8 所示。

2 基于双U向基准的三维焊接轨迹规划

如上所述,为保证双侧激光束的 U 向位置对准、V 向上激光焦点随动这一目标,可构建轨迹规划思路:首先以一侧焊缝曲线为参考,构建焊接头工作平面;然后根据焊缝位置约束两侧 U 向位置;再在工作面上将设定的激光束工艺倾斜角作为约束条件设定激光束姿态;最后取两激光束的中间方位构建虚拟刀具,作为

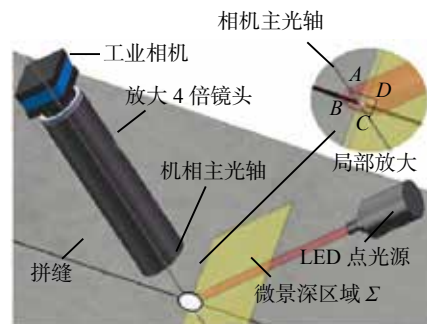


图6 拼缝测量示意图

Fig.6 Schematic diagram of the seam measurement

实际控制刀具。由于约定了两个 U 向基准,这种方法被形象地称为双 U 向基准法。

这种方法不考虑激光束 V 向焦距,认为激光束是一条无限长的射线。只要保证两侧的激光束射线一定投射在两侧的焊缝曲线上,剩下的就交由焊缝跟踪系统在 V 向上补偿即可。两侧激光束位姿规划完成后,令在中央位置存在一把虚拟刀具。它以激光束的“交点”作为刀尖,刀轴平分左右两侧激光束,如图 9 所示。这样将双光束轨迹规划问题转化成虚拟刀具的单条路径规划问题。

算法步骤如下:

第一步,规划主侧激光束位姿:

$$\begin{cases} P_{1i} = \text{disc}(L_1, i) \\ T_{1i} = t_{1i} \\ N_{1i} = n_{1i} \cdot \text{Rot}(t_{1i}, \theta_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_{1i} 代表焊缝曲线 L_1 上的第 i 个焊接点(如图 9 中 A 点),由 L_1 直接离散得到; T_{1i} 表示焊接点上的切矢,方向为点在焊缝曲线 L_1 上的切线方向; N_{1i} 表示该焊接点上的轴矢量,由焊接点在曲面上法矢绕切矢方向旋转侧倾角 θ_1 得到。焊接点 P_{1i} 、切矢 T_{1i} 、法矢(轴矢量) N_{1i} 构成第一组焊接点位数据,代表着主侧激光束位姿。

第二步,规划副侧激光束位姿:

$$\begin{cases} P_{2i} = S_i \cap L_2 \\ T_{2i} = T_{1i} \\ N_{2i} = N_{1i} \cdot \text{Rot}(T_{1i}, \theta_2) \end{cases} \quad (2)$$

过 P_{1i} 各点创建截平面 S_i 作为焊接头工作面。构建方法为:以第一组对应焊接点位数据中的切矢作为 P_{1i} 在该平面上的法矢(这种情况下焊接头工作面始终垂直立于表面上的), P_{2i} 代表焊缝曲线 L_2 上的第 i 个焊接点(如图 9 中 B 点),由平面 S_i 与焊缝曲线 L_2 求交得到; T_{2i} 表示第二组焊缝曲线上焊接点位切矢,令其与第一组焊接点位上对应的切矢

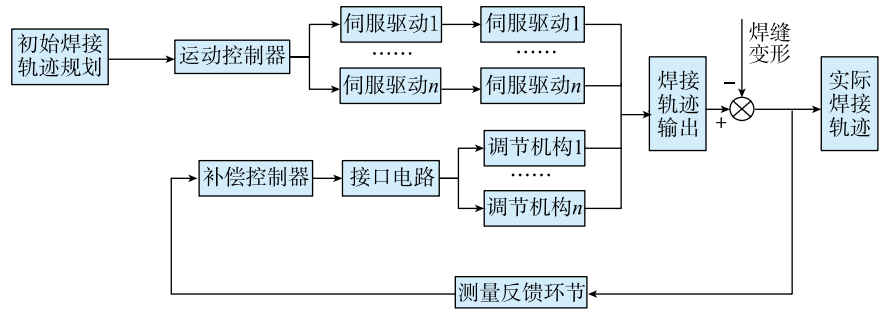


图7 激光焊接与跟踪控制模型
Fig.7 Laser welding and tracking control model

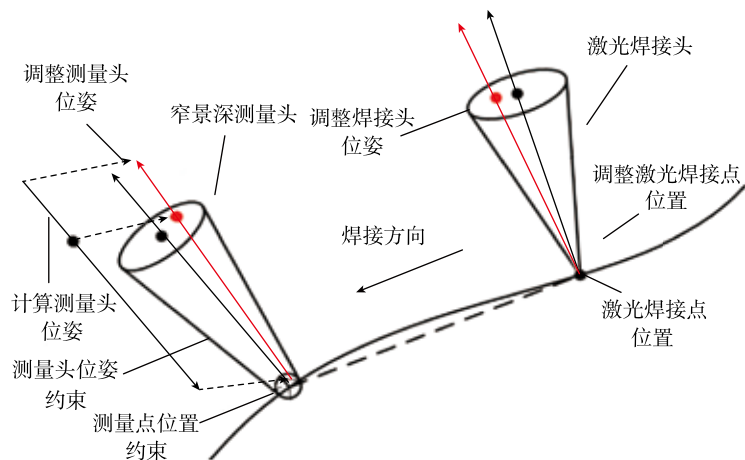


图8 测量头与焊接头三维运动示教(单侧)
Fig.8 3D motion teaching of measuring head and welding head (one side)

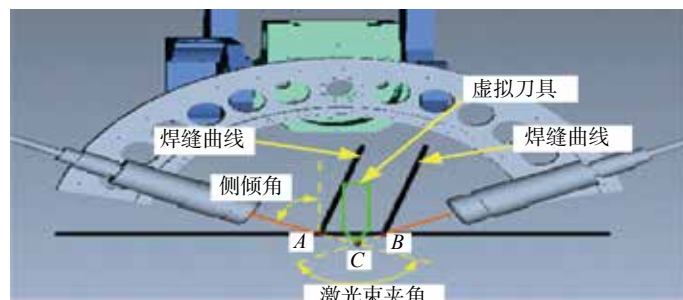


图9 轨迹规划方法
Fig.9 Trajectory planning method

相同; N_{2i} 表示第二组焊缝曲线上焊接轴矢量,在数值上等于第一组对应轴矢量 N_{1i} 绕切矢旋转激光束夹角 θ_2 。 P_{2i} 、 T_{2i} 和 N_{2i} 构成第二组焊接点位数据,代表着副侧激光束位姿。

第三步,规划虚拟控制焊接头位姿:

$$\begin{cases} P_{3i} = l_{1i} \cap l_{2i} \\ T_{3i} = \frac{T_{1i} + T_{2i}}{2} \\ N_{3i} = \frac{N_{1i} + N_{2i}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, P_{3i} 是两激光束 l_{1i} 、 l_{2i} “交点”(如图 9 中 C 点),记为第三组点位上第 i 个焊接点。该点的切矢、法矢均为

前两者对应切矢、法矢的平均值。这里的 P_{3i} 在三维空间分量即为焊接点位文件中的 $X、Y、Z、N_{3i}$ 的分量为 $I、J、K、T_{3i}$ 的分量为 $L、M、N$ ，由此构成第三组焊接点位数据，作为虚拟控制的焊接点位数据，也是参与后置计算中的焊接点位数据。

下面对轨迹规划的结果进行分析。机床末端到虚拟焊接点的结构为：圆弧盘两边分别安装左侧焊接头(左侧光束)和右侧焊接头(右侧光束)，这套结构固连在一起，可以看作一个刚体。双光束焊接的虚拟焊接头就是依附在这个刚体上。焊接头的轨迹规划可以看作是这个刚体在零件上摆放姿态的规划。

令 A 点为机床末端圆弧盘的旋转中心(即旋转轴 A 位置)， $B、C$ 点为左右两侧激光发生器末端位置， D 点为两束激光的“交点”。如图 10 所示，可知 $A、B、C、D$ 相对位置关系是固定的，可认为是一个刚体。轨迹规划即为在两侧焊缝曲线上摆放姿态的设定。 $E、F$ 点为激光束投射到焊缝曲线上的位置。按上述轨迹规划，由 E 创建平面截右侧焊缝曲线得 F ，再由 $E、F$ 得到“交点” D 。如此，可使刚体“靠”在两条焊缝曲线上。在后续的焊接点位上，线段 BE 与线段 CF 的长度发生变化，说明两侧实际施焊位置 E 与 F 是不固定的，即在加工过程中，对于两侧焊缝曲线相对位置变化的结构，左右两束激光的离焦量是变化的，因此两侧焊接头的 $V1、V2$ 轴必须随动控制，以保证离焦量维持基本不变。

3 双光束激光焊接过程的实时跟踪与补偿控制

T 型接头双光束焊接过程中，一方面焊接头按照 NC 代码进行三维运动，另一方面测量头实时进行焊缝信息测量。

通过实时焊缝测量分析采集图像中焊缝的中心位置、宽度、深度和法矢，将测量信息与编程路径进行

比较，如果超过阈值则对焊接头进行位姿的调整，即首先计算得到焊接点在测量坐标系中的偏差 $\Delta U、\Delta V$ ，由补偿控制器完成对偏差的跟踪补偿。

由于本平台对双侧焊缝跟踪与补偿采用了独立控制器，在对轴的控制上，六轴联动控制器负责三维

轨迹的精确运动，补偿控制器负责跟踪补偿控制，各自对相关电机进行控制。双路跟踪与补偿控制流程如图 11 所示。

整个双光束激光焊接过程中，三维焊接轨迹的运动始终在原有的控制器和机械结构上，双侧焊缝补偿由补偿控制器控制双侧十

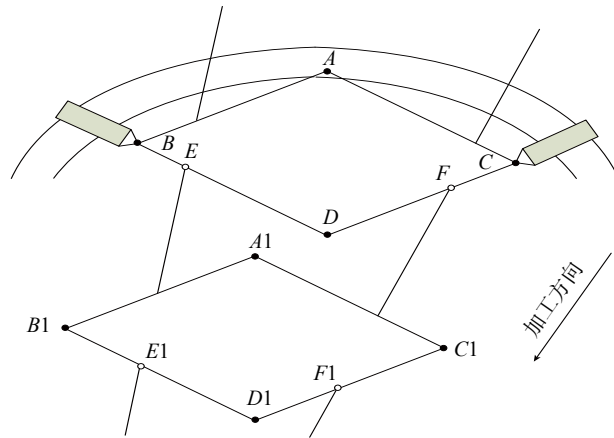


图 10 离焦问题说明
Fig.10 Explanation of the changing focus

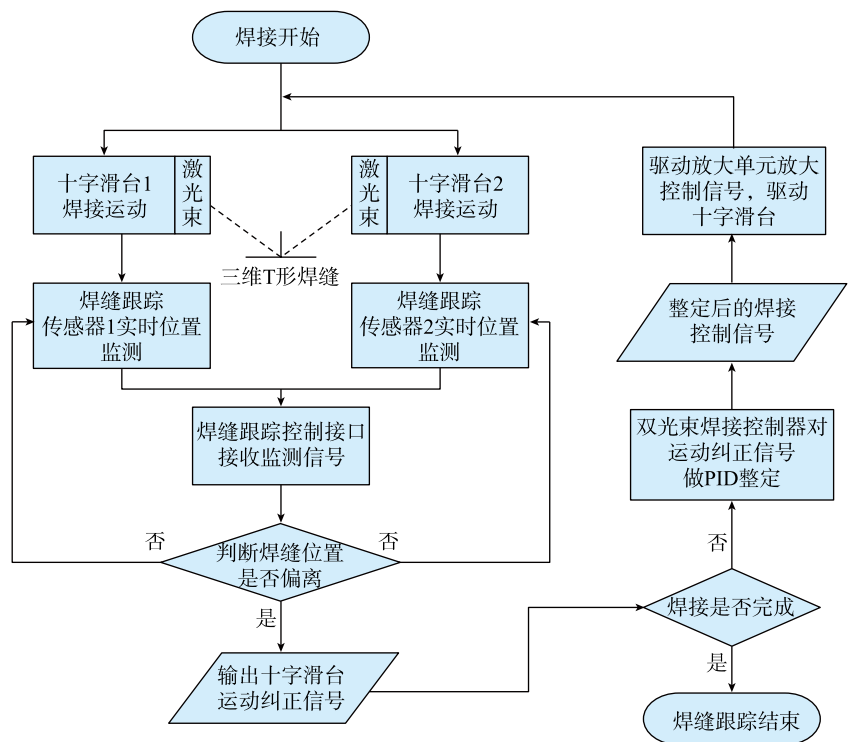


图 11 双路跟踪与补偿控制流程图
Fig.11 Flow chart of the dual track and compensation control

字滑台电机完成。因而,本系统在实现六轴联动控制的同时实现了对双侧焊缝的实时检测与补偿,满足了双光束激光焊接与跟踪控制要求。

验证

自主研发的双光束激光焊接机床经检测: X 、 Y 、 Z 轴最大行程分别达到5m、3m、1m,定位精度及重复定位精度分别达到0.05mm、0.03mm, X 和 Y 轴最大速度达到20m/min, Z 轴最大速度达到10m/min; A 、 B 、 C 轴转动范围分别达到 $\pm 100^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$,定位精度及重复定位精度分别为 $20''$ 、 $15''$, A 、 B 、 C 轴最大转速都达到20r/min。

选取某三维T型焊缝的一段,由焊件数模得到三维焊接代码,在5m/min的焊接速度下运行代码,对400mm的三维T型焊缝使用双路检测与跟踪控制技术,通过实时补偿,焊缝最大偏差量0.15mm,属误差允许范围,焊件合格,如图12所示。

结论

综上所述,本文提出的基于“6+2+2”轴的双光束激光焊接及其跟踪控制系统,通过硬件和软件的开发,在实现了三维示教、轨迹规划功能的基础上,系统中六轴联动控制单元实现了对三维激光接头位置和姿态的控制,系统中双十字滑台单元对T型接头两侧进行实时焊缝测量,实现了对双侧焊缝的跟踪与补偿。通过对试验件的焊接,验证了十轴六联动双光束激光焊接及其跟踪控制系统满足大型结构件三维T型接头加工要求。

参考文献

[1] 张盛海,陈恺,肖荣诗,等. 高强铝合金T型接头激光焊接的研究现状[J]. 激光杂志,2005,26(4):77-78.

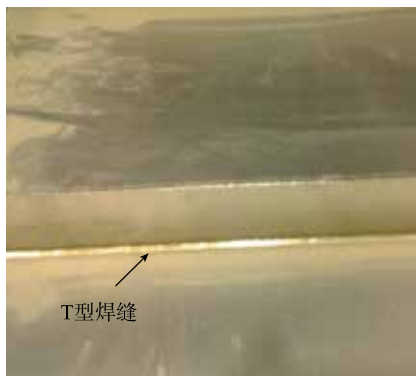


图12 T型接头构件焊接验证
Fig.12 Weldment verification of T type joint component

ZHANG Shenghai, CHEN Kai, XIAO Rongshi, et al. Current situation of laser welding of high strength aluminum alloy in tee joint[J]. Laser Journal, 2005, 26(4): 77-78.

[2] 梁斌焱,许先雨,龚时华,等. 三维T形焊缝的双光束激光焊接及其焊缝跟踪控制[J]. 焊接学报,2016,37(2):47-50.

LIANG Binyan, XU Xianyu, GONG Shihua, et al. Dual-beam laser welding and seam tracking control technology for 3D T-seam[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(2): 47-50.

[3] 占小红,欧文敏,魏艳红,等. 飞机壁板先进焊接技术应用现状[J]. 航空制造技术,2013,56(22):42-44.

ZHAN Xiaohong, OU Wenmin, WEI Yanhong, et al. Application status of advanced welding technology of aircraft panels[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(22): 42-44.

[4] 赵耀邦,徐爱杰,姜勇,等. 激光焊

接技术研究进展及其在航天领域的应用[J]. 航天制造技术,2013(3):55-58.

ZHAO Yaobang, XU Aijie, JIANG Yong, et al. Technology of laser welding—recent advances of research and application in aerospace[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013(3): 55-58.

[5] 梁斌焱. 三维T型接头激光焊接轨迹控制关键技术[D]. 武汉:华中科技大学,2015.

LIANG Binyan. 3D T-joint dual-beam laser welding trajectory control technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.

[6] 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.

[7] WANG P J, HUANG Y T, PENG F Y, et al. A seam measurement method based on micro depth of field for laser welding[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 121-126: 3107-3112.

[8] WANG Y, YIN J. The research of a new type of sensor dynamic compensation technology[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 1575-1579.

[9] 黄雅婷. 基于微景深的激光焊接拼缝测量方法[D]. 武汉:华中科技大学,2012.

HUANG Yating. A seam measurement method based on micro depth of field lens for laser welding [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

[10] 许超. 5083铝合金T型搭接接头高功率CO₂激光焊接工艺研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.

XU Chao. Study of high power CO₂ laser welding technique on T-lap joint of 5083 aluminum alloy [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.

通讯作者:郑忠香,助理工程师,研究方向为先进制造装备, E-mail: 1999010043@hust.edu.cn.

(下转第47页)

Technology, 2006.

[27] 刘成颖, 谭锋, 王立平, 等. 面向机床整机动态性能的立柱结构优化设计研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(3): 161-168.

LIU Chengying, TAN Feng, WANG Liping, et al. Research on optimization of column structure design for dynamic performance of machine tool[J]. Journal of

Mechanical Engineering, 2016, 52(3): 161-168.

通讯作者: 肖望强, E-mail: wqxiao@xmu.edu.cn.

Research on Lightweight of CNC Machine Tools Based on Particle Damping Technology

XIAO Wangqiang¹, XU Zhanhao¹, BIAN Hechuan²

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361000, China;

2. Tangshan Sanchuan Steel Machinery Manufacture Co., Ltd., Tangshan 063000, China)

[ABSTRACT] With the development of CNC machine tools toward high-precision, high-speed and greening, the advantages of lightweight CNC machines become more and more obvious. Taking ZN-XK2840 CNC gantry boring and milling machine as an example, this paper presents a lightweight design method of CNC machine tools based on particle damping technology. Firstly, the static property of the conventional CNC machine tool structure is analyzed by finite element method, the wall thickness is optimized, and the static property of the lightweight machine tool structure is analyzed to ensure that the maximum deformation and strength meet the requirements. Then analyze the dynamic property of conventional CNC machine tools such as modal characteristics, harmonic response. The particle damping technology can effectively reduce the vibration of the machine tool structure in the vibration transfer path. In this paper, through the establishment of particle system-gantry milling machine dynamics model, using discrete elemental dynamics software developed by ourselves to analyze the dynamic property of the machine tool with particle damper installed. By comparing with the dynamic property of conventional machine tools, it is found that the dynamic property of lightweight machine tool is better than conventional machine tools. According to the lightweight design, the gantry boring and milling machine with particle damper is installed. The acceleration amplitude and displacement amplitude are measured during the idling and milling process, which are all smaller than the conventional machine tools. Its weight is 53.8% lower than similar products, effectively reducing the weight.

Keywords: CNC machine tool; Particle damping; Lightweight design; Vibration control; Column

(责编 逸飞)

(上接第 39 页)

Control Technology for Dual-Beam Laser Welding and Seam Tracking With Ten-Axis Six-Linkage CNC

GONG Shihua, ZHENG Zhongxiang, WANG Pingjiang, YANG Jianzhong

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

[ABSTRACT] T type joints, which often affect the quality of the whole structural parts, are widely used in the stiffened wall plate of large components. In view of the above problems, a dual-beam laser welding platform is built to meet the welding requirements of large size structural parts. Then, the ten-axis six-linkage CNC system is designed to meet the needs of both sides welding of T type joint at the same time. While controlling the position and attitude of the 3D welding, the welding seam measurement and tracking compensation on both sides of the T type joint are realized simultaneously. Through the actual welding experiment, the control system of dual-beam laser welding and seam tracking with ten-axis six-linkage is tested and the result shows it can meet the processing requirements for T type joints.

Keywords: Ten-axis six-linkage CNC; Dual-beam laser welding; Seam tracking; Control system; T type joint

(责编 逸飞)