

电子束熔丝成形随行退火系统设计及其仿真*

王宏泽, 刘方军, 张 伟

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

[摘要] 控制电子束偏转扫描对成形件进行局部实时退火热处理,可降低大型金属工件在电子束熔丝成形过程中产生的热应力,减少热应力累积而超过材料屈服强度产生的变形。采用工控机、波形发生卡、驱动电路及偏转扫描线圈搭建了电子束偏转扫描控制试验平台;使用 LabVIEW 开发了扫描控制程序,合成了 X、Y 两路输出波形,实现了矩形折线扫描及圆形偏置扫描。针对电子束扫描加热对成形件局部温度分布的影响,建立了随行退火扫描的有限元模型,分析了随行退火偏转扫描对 100mm×100mm 区域内温度场分布的影响。仿真结果表明,在束流 30mA、束斑直径 4mm、束斑搭接 1mm 的条件下,电子束以 25m/s 的速度扫描加热 0.6323s,区域内温度差值由初始的 94℃减小到 11℃,有效改善了 100mm×100mm 区域内温度场分布均匀程度。

关键词: 电子束熔丝增材; 电子束偏转扫描; LabVIEW; 温度场; 随行退火

Programming and Simulation of Real Time Annealing Technology for Electron Beam Rapid Manufacturing System

WANG Hongze, LIU Fangjun, ZHANG Wei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] During the electron beam rapid manufacturing procedure of large metal work piece, the electron beam is used for scanning and heating in order to implement real-time annealing treatment which can eliminate the residual stress in the electron beam freedom fabrication process and reduce the deformation caused by the stress accumulation. In this paper, an electron beam high-frequency deflection scan control experiment platform, which consists of industrial computer, waveform generation card, drive circuit, and deflection scanning coil, is built to generate X, Y output waveform, do rectangular scan and circular offset scan. LabVIEW is used to develop the software interface. A real time annealing finite element model is built to analyze the influence of scanning on temperature distribution difference in a range of 100mm×100mm. The conclusion is the temperature difference in the area is reduced from 94℃ to 11℃ which improves the uniformity of the temperature distribution when the beam current is 30mA, beam spot radius is 4mm, beam spot overlap is 1mm, and using the electron beam to scan for 0.6323s with a speed of 25m/s.

Keywords: Electron beam rapid manufacturing; Electron beam deflection scan; LabVIEW; Temperature field;

Real time annealing

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.08.088

电子束熔丝成形技术^[1-3]具有成形速度快、材料利用率高和保护效果好等特点,适用于大中型金属构件的高效整体化成形,在制造领域特别是在航空航天领域得到快速的发展和应用。然而,在大型金属构件的熔丝成形过程中,构件局部温度梯度较大,由此产生的热应力

在成形过程中不断累积,超过材料屈服强度而产生变形,变形量随着成形件尺寸的增大而不断变大,影响成形质量^[4]。因此,变形控制是大型复杂构件熔丝成形所需掌握的关键技术。

针对 TC18 钛合金电子束熔丝成形过程中的变形问题,黄志涛等^[5]采用分块填充成形以及热处理工艺,降低了平板翘曲量。在电子束焊接中,马梁等^[6]采用电子束高频偏转扫描技术实现了多束流电子束焊接,用辅

* 基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1103101); 中国航空基金(20165451023)。

助电子束热源控制焊缝温度,有效减小了焊接变形。电子束高频偏转扫描技术^[7-8]可控制电子束以极高的频率在工件的不同位置快速切换,通过调节电子束能量在工件上的分布,改善电子束加工过程、优化焊接接头组织、减小工件变形。国外 SST、PTR 等公司对电子束高频扫描技术进行了深入研究^[9],相关研究成果已成功应用在多束流加工、电子束表面合金化等领域。

通过电子束偏转扫描可以准确控制工件表面某个区域的热输入量和冷却速度,在加工过程中进行实时的退火热处理,改善成形件局部温度分布均匀程度、减小热应力累积,从而减小成形过程产生的变形量。电子束偏转扫描随行退火无需单独的热处理设备,在成形件冷却变形前进行温度控制,对改善电子束熔丝成形大型复杂金属构件中的变形问题具有重要意义。

搭建了随行退火偏转扫描控制系统,开发了基于 LabVIEW 的偏转扫描控制软件,以 G 代码编写的 TXT 文档为输入方式,扫描路径及图形可根据需求编写修改,实现了熔丝成形过程中的电子束偏转扫描控制。规划了 100mm × 100mm 矩形区域随行退火扫描加热的路径,并对扫描加热过程进行了数值模拟仿真,有效改善了温度场分布均匀程度,为电子束熔丝成形过程中的变形控制提供了技术参考。

1 电子束偏转扫描系统

电子束偏转扫描系统由工业控制计算机、波形发生卡、功率放大电路、X/Y 方向偏转线圈等组成,如图 1 所示。首先根据加热需求规划扫描路径,可采用 G 代码编写扫描路径以 TXT 格式文件输入,上位机用 LabVIEW 软件编写控制程序,读取 G 代码并计算出 X、Y 两路扫描波形信号。程序运行过程中,由波形发生卡处理波形数据并转换为模拟信号,经过功率放大电路进行功率放大后分别输送给 X、Y 方向偏转线圈。两对线圈分别控制电子束在 X、Y 方向的偏转,产生规划输入的扫描轨迹。

电子束偏转扫描控制系统中工控机选用研华 IPC-610L 型号,波形发生卡选用阿尔泰 PCI8103 波形发生卡,该卡具有 4 路高速 DA 输出通道,每路 DA 输出精度为 12 位,偏转线圈采用实验室自行设计的新型偏转扫描线圈。该波形发生卡的最大输出信号为 -5~5V,经过功率放大电路,偏转扫描线圈中电流为 -2~2A,此时电子束在 X、Y 方向最大可分别实现 -175~+175mm 的偏转范围。

2 偏转扫描控制程序设计

上位机采用 LabVIEW 软件开发主控程序,控制程

序以 TXT 文件(G 代码命令流)为输入。在计算过程中,100mm × 100mm 矩形区域被离散为 1001 × 1001 个点,扫描精度为 0.1mm。分析计算后输出 X、Y 两路扫描信号,同时在面板上分别显示 X、Y 两路信号输出波形以及扫描图形,主控界面控制部分如图 2 所示。

G 代码是数控程序中通用的指令,使用 G 代码可以实现数控加工中快速定位、直线插补、逆时针圆弧插补等进给操作。线下可以在 TXT 文档中根据扫描需求及预先规划的路径逐行编写 G 代码,编写完成的 G 代码便于阅读修改。

TXT 文件输入扫描控制程序流程如图 3 所示。运行时首先要对波形发生卡的控制参数进行配置,并选择

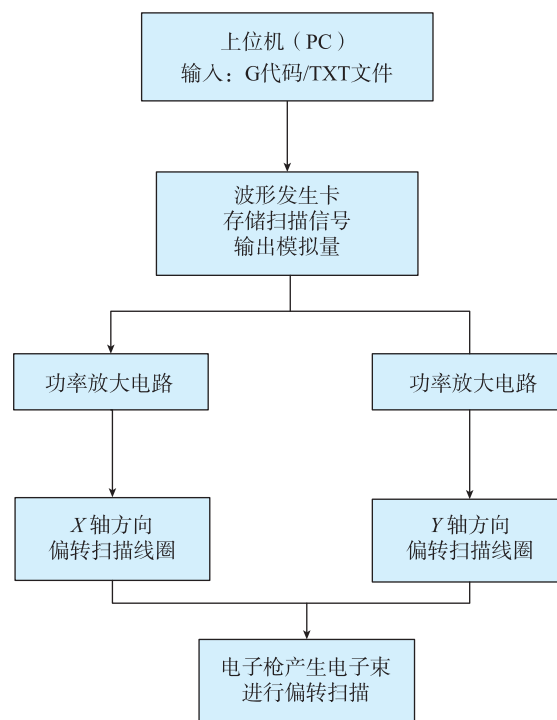


图1 电子束偏转扫描系统

Fig.1 Composition of electron beam high frequency deflection scanning system



图2 偏转扫描控制程序主控界面 (局部)

Fig.2 Main control interface (part) of deflection scan control program

读取拟扫描的TXT格式文件。程序逐行读取文档中字符串,通过检索G代码中的关键字对输入字符串进行解析,根据不同G指令及相关参数进行插补运算,计算扫描轨迹中各点坐标,存储为X、Y两路数字信号,在读取完所有字符串后分别将两路数字信号输入到波形发生卡中,通过波形发生卡产生X、Y两路模拟信号。

3 扫描系统输出控制波形

搭建电子束偏转扫描控制测试平台检测输出波形及合成扫描图形。扫描测试系统包括工控机、任意波形发生卡、示波器。通过控制程序产生X、Y两个方向扫描信号,由波形发生卡输出两路峰值为±1.43V的电压信号,将两路输出信号分别与示波器两个通道连接,通过示波器可以观察X、Y两路扫描信号,在示波器XY模式下可观察扫描轨迹及图形。试验中,波形发生卡产生的两路模拟量扫描信号通过功率放大电路放大后分别输入至X、Y两组偏转线圈,偏转线圈产生对应的偏转磁场,使电子束在X、Y两个方向产生偏转。该试验中,输出电压区间为-1.43V~+1.43V,对应的实际扫描中坐标值区间为-50mm~+50mm。

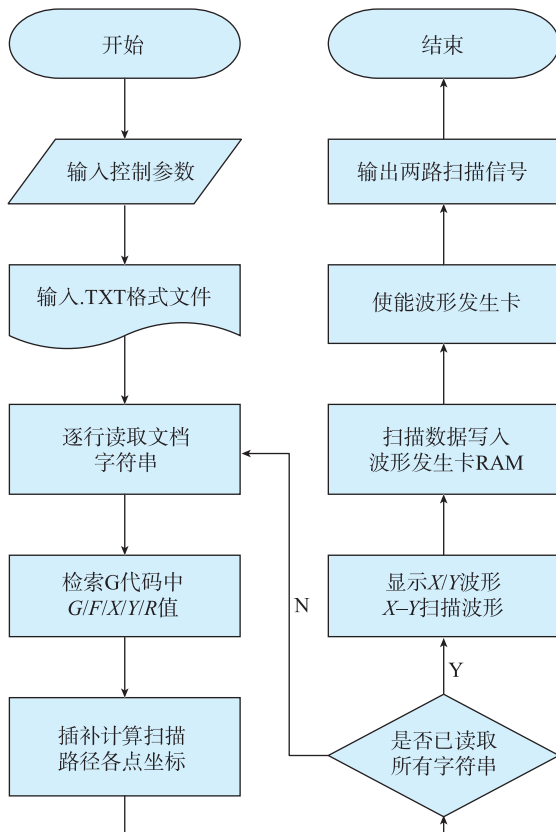


图3 TXT文件输入扫描控制程序流程图

Fig.3 Flow chart of TXT file input scan control program

通过编写G代码,分别对边长为100mm的矩形区域进行折线往复扫描输出波形测试,对直径为100mm的圆形区域进行轮廓偏置扫描输出波形测试。为保证示波器扫描轨迹显示清晰,选择扫描偏移量均为5mm,两路扫描波形循环输出。

从波形发生卡DA输出端检测的矩形扫描控制波形如图4所示,其中通道1为X方向扫描控制波形,通道2为Y方向扫描控制波形。示波器XY显示模式下矩形折线扫描轨迹如图5所示。

圆形偏置扫描控制波形如图6所示,其中通道1为X方向扫描控制波形,通道2为Y方向扫描控制波形。示波器XY显示模式下图形偏置扫描轨迹如图7所示。

图4~7表明,将设定的G代码输入电子束偏转扫描控制系统,可以产生相应的X、Y两路稳定输出波形,根据需求编写G代码,可以通过该程序实现电子束按照预定路径的偏转扫描。

4 局部温度控制数值模拟仿真

在ANSYS中,根据实际成形过程中材料的属性、工件的尺寸、能量的输入和散热边界等条件建立有限元

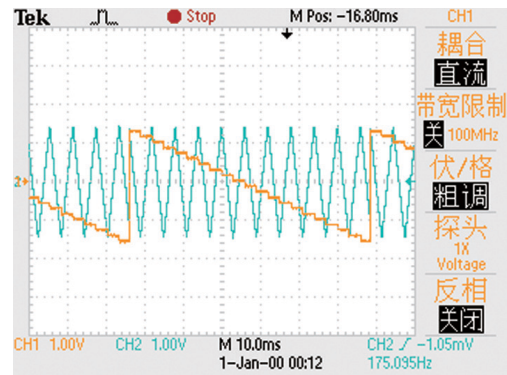


图4 矩形折线扫描输出波形

Fig.4 Output waveform of a rectangular fold line scan

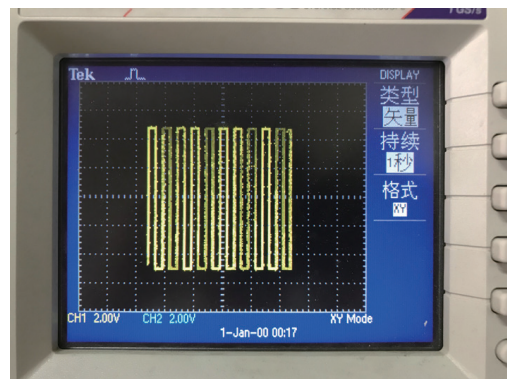


图5 示波器XY模式下矩形折线扫描轨迹

Fig.5 Path of rectangular fold line scanning under XY mode of oscilloscope

分析模型,观察分析电子束扫描加热下成形件表面温度场的分布情况,调整相应的工艺参数,指导随行退火偏转扫描局部温度控制。

本文选取 150mm × 150mm × 5mm 的 TC4 钛合金板为模型,对钛合金平板中心 100mm × 100mm 矩形区域进行扫描加热。为了保证扫描区域计算精度,对扫描加热区域采取较密集的 solid70 单元网格划分,单元尺寸为 0.25mm × 0.25mm × 2.5mm,对非扫描加热区域,采用自适应网格划分,有限元模型如图 8 所示。

电子束在工件表面扫描加热,产生的热量通过热传导的方式向工件其他部分传递^[10],根据能量守恒定律与傅里叶定律,模型中的温度场应满足如下数学表达式:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + q \quad (1)$$

式中, T 为温度; t 为时间; ρ 、 c 和 λ 分别为材料的密度、比热和导热系数; q 为热流密度。

随行退火过程不涉及材料的熔化过程,属于表面加热,电子束扫描加热时,加热区域中心能量高,边缘能量低,进行数值模拟时可以采用中心温度高、边缘温度低的面热源模拟偏转扫描加热过程的特点。因此采用表

面高斯热源模型,热流分布可以表示为式(2)高斯分布的函数:

$$q_s = \frac{3\eta Q}{\pi R^2} \cdot \exp\left(\frac{-3r^2}{R^2}\right) \quad (2)$$

式中, q_s 为面热源模型能量密度; Q 为热源瞬时给工件的热能; r 为热源模型上任意点到热源中心的距离; η 为热源模型的加热效率; R 为电子束束斑加热作用半径。

电子束熔丝成形过程中,工件不同区域因成形时间差具有温度梯度。本文对模型初始温度场进行简化处理,如图 9 所示,中心矩形区域初始温度区间为 712.5~806.5℃,局部温度差为 94℃。成形件在真空室中加热,环境温度 20℃,真空度可达 3×10^{-2} Pa,认为是绝热边界,考虑工件内部热传导和热辐射,假设电子束输入热量集中在束斑以内,热效率 η 为 95%。

在电子束扫描加热过程中,工件表面整体温度的提升受到束流、束斑直径的大小和扫描速度等因素的影响。综合考虑随行退火的扫描加热需求,数值模拟中选取电子束加速电压 U 为 60kV,电子束电流 I 为 30mA,束斑直径 4mm,扫描速度为 25m/s。

根据初始温度场温度梯度对中心矩形区域分 8 次

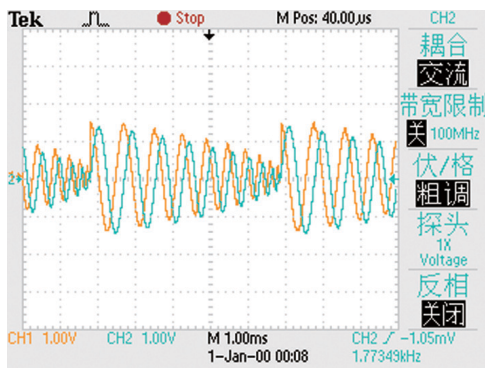


图6 圆形偏置扫描输出波形

Fig.6 Output waveform of circular offset scan

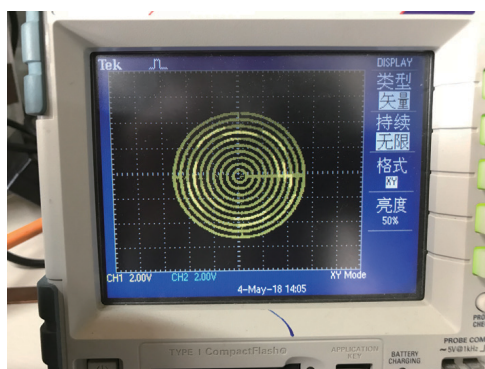


图7 示波器XY模式下圆形偏置扫描轨迹

Fig.7 Path of circular offset scanning under XY mode of oscillograph

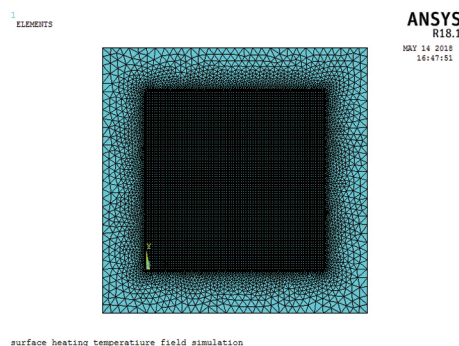


图8 有限元模型

Fig.8 Finite element model

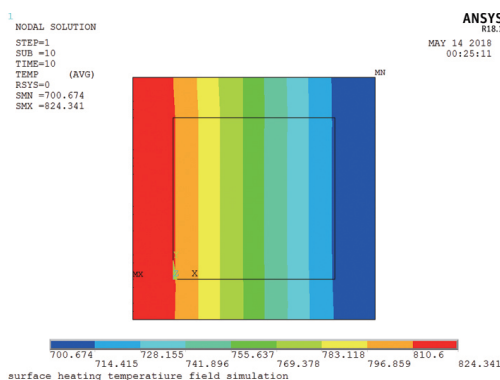


图9 模型初始温度场分布

Fig.9 Initial temperature field distribution of model

进行扫描加热,每次扫描区域根据温度区间逐步缩小,每次扫描加热的温度区间如表 1 所示。

常见的电子束扫描方式中,“Z”形往复扫描方式相对简单,它不仅能克服单向扫描带来的温度梯度累积问题,而且能避免单向扫描引起的冗余空程^[11]。因此文中以“Z”形往复扫描方式作为扫描填充方式,按照图 10 所示扫描路径进行扫描加热,两条扫描线偏置距离为 3mm,相邻两行扫描线束斑搭接 1mm。第 1 次扫描加热温度区间在 712~806℃的区域,共有 33 条扫描线,后续扫描区域根据温度分布依次递减。为了补偿矩形上下边缘因热传导产生的热量流失,扫描线在矩形 y 方向两端各补偿 2mm。

对上述电子束偏转扫描温度控制过程进行瞬态温度场数值模拟仿真,扫描加热时间为 0.6323s,此时得到图 11 所示的温度场分布情况。

在中心矩形区域内选取图 11 所示 6 点,自左至右依次编号 1~6,在 ANSYS 的 /POST26 后处理器中生成 6 点所在位置在扫描加热过程中温度随时间变化曲线,如图 12 所示。由图 12 可以看出,在扫描加热前,6

点最高温度为 806.5℃,最低温度为 712.5℃,温度差为 94℃;经过 0.6323s 扫描加热,最高温度为 812.5℃,最低温度为 801.5℃,温度差为 11℃。

5 结论

(1)设计了基于 LabVIEW 的电子束偏转扫描控制系统,可实现以 G 代码编写任意扫描路径,产生并输出 X、Y 两路模拟量扫描信号,输出电压在 -1.43~+1.43V 间,扫描范围为 100mm×100mm 矩形,输出波形稳定。

(2)建立模拟电子束随进行退火过程的有限元分析模型,并进行电子束扫描加热数值模拟仿真。仿真计算结果表明,通过控制电子束以“Z”形扫描为基础分区域多次扫描加热,矩形区域内温度差由 94℃减小为 11℃,有效改善了温度场的分布均匀程度。

表1 单次扫描加热温度区间

Table 1 Heating temperature per scan

扫描次数	扫描区域温度 /℃
1	712~806
2	712~794
3	712~782
4	712~770
5	712~758
6	712~746
7	712~734
8	712~722

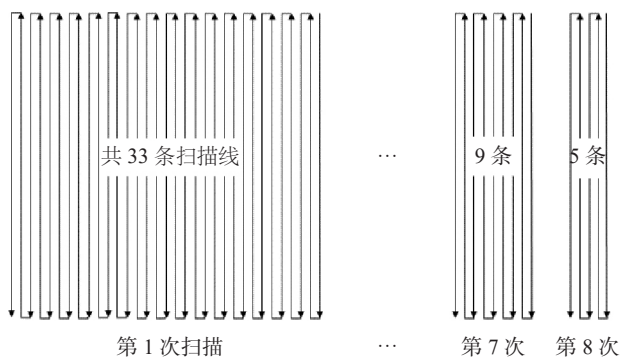


图10 扫描路径示意图

Fig.10 Schematic of scan path

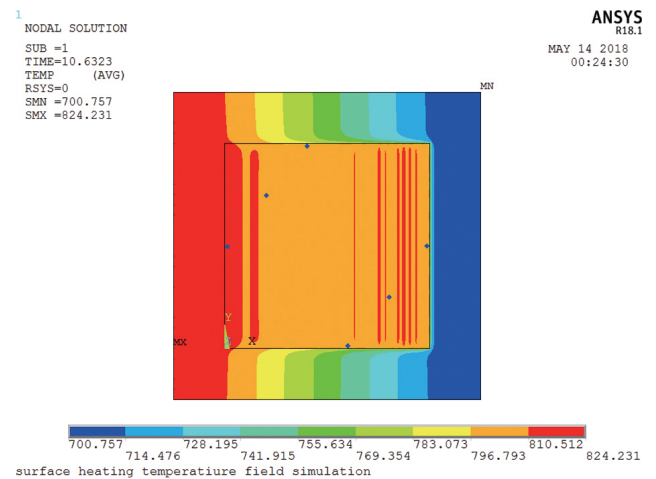


图11 第8次扫描后温度场分布

Fig.11 Temperature field distribution after the 8th scan

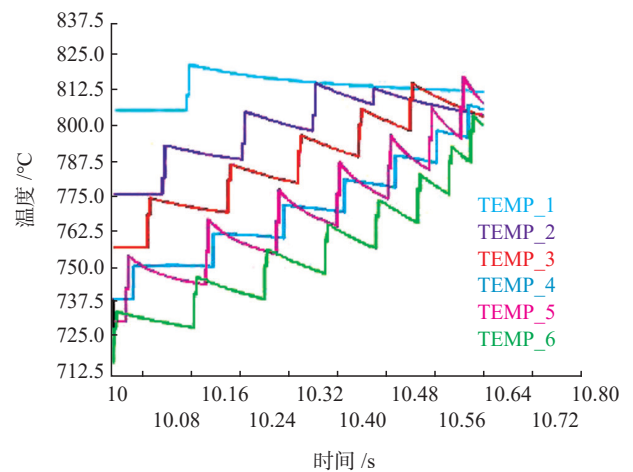


图12 扫描过程中各点温度变化曲线

Fig.12 Temperature curve at each point during scanning

(下转至第97页)

$$\sqrt{\frac{N-1}{N}} \cdot U = \sqrt{\frac{2}{3}} \times 0.02\% = 0.016\%$$

经验证: $|y-\bar{y}| < \sqrt{\frac{N-1}{N}} \cdot U$ 满足要求。

6 结论

本文基于位移传感器校准问题,形成以下3点结论:

(1) 首次将直线电机加气浮导轨的驱动方式应用于位移传感器自动化校准。相对于传统的机械驱动方式,直线电机不仅能够直接让运动部件作直线运动,简化了设备结构,不需要中间转换过程,其动态响应性能和重复定位精度都大大提高,通过和气浮导轨配合可使得校准过程稳定性好。

(2) 将标准与被校传感器置于气浮导轨两端,传感器牵引端与气吸附滑块上的运动端通过转接装置相连,激光干涉仪的反射镜同样置于滑块上,校准时通过夹具调节使位移传感器运动方向与激光干涉仪测量方向在同一条直线上,实现阿贝误差的消除。

(3) 基于磁致伸缩测杆式传感器校准设计专用夹具,配合支撑点消除变形的校准方式,解决了该类传感器校准过程中存在的挠度问题。最后,通过对位移传感器校准装置不确定度的评定和验证,表明该校准方法准确、有效、可行。

参考文献

- [1] 牛生辉. 浮子式光纤 Bragg 光栅密度传感器[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
NIU Shenghui. Study on float fiber Bragg grating density sensor[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [2] 朱小和. 柔性磁致伸缩式液位传感器可靠性结构设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
ZHU Xiaohu. Research on reliability structure design of flexible magnetostrictive liquid level sensor[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [3] 孙英, 孙和泰, 李军, 等. 一种位移传感器校准装置[J]. 测绘与测试技术, 2017, 44(4): 38-41.
SUN Ying, SUN Hetai, LI Jun, et al. A calibration device used for displacement sensors[J]. Metrology & Measurement Technology, 2017, 44(4): 38-41.
- [4] 张丰, 曾燕华, 张伟. 线位移传感器校准方法研究[J]. 光学仪器, 2016, 38(1): 63-68.
ZHANG Feng, ZENG Yanhua, ZHANG Wei. Research on calibration of linear displacement transducer[J]. Optical Instruments, 2016, 38(1): 63-68.

通讯作者: 解岩, 工程师, 研究方向为几何量计量及工程测量, E-mail: xy_915@126.com.

(责编 一元)

(上接第92页)

参考文献

- [1] TAMINGER K M B, HAFLEY R A, DICUS D L. Solid freeform fabrication: enabling technology for future space missions[C]//Proceedings of 2002 International Conference on Metal Powder Deposition for Rapid Manufacturing. San Antonio: Metal Powder Industries Federation, 2002.
- [2] TAMINGER K M, HAFLEY R A. Electron beam freeform fabrication: a rapid metal deposition process[C]//Proceedings of the 3rd Annual Automotive Composites Conference. Troy, 2003.
- [3] 陈哲源, 锁红波, 李晋炜. 电子束熔丝沉积快速制造成型技术与组织特征[J]. 航天制造技术, 2010(1): 36-39.
CHEN Zheyuan, SUO Hongbo, LI Jinwei. The forming character of electron beam freeform fabrication[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2010(1): 36-39.
- [4] 熊进辉, 李士凯, 耿永亮, 等. 电子束熔丝沉积快速制造技术研究现状[J]. 电焊机, 2016, 46(2): 7-11.
XIONG Jinhui, LI Shikai, GENG Yongliang, et al. Research status of electron beam freeform fabrication[J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(2): 7-11.
- [5] 黄志涛, 锁红波, 巩水利, 等. TC18 钛合金电子束熔丝成形技术研究[J]. 航天制造技术, 2015(4): 15-21.
HUANG Zhitao, SUO Hongbo, GONG Shuili, et al. Study on TC18 titanium alloy by electron beam wire deposition[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(4): 15-21.
- [6] 马梁, 刘方军, 张伟, 等. TC4 钛合金薄板多束流电子束焊接变形控制研究[J]. 航空科学技术, 2015, 26(11): 114-118.
MA Liang, LIU Fangjun, ZHANG Wei, et al. Research on multi electron beam welding deformation control of TC4 titanium alloy sheet[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(11): 114-118.
- [7] HE P, FENG J C, ZHANG B G, et al. Microstructure and strength of diffusion-bonded joints of Ti/Al base alloy to steel[J]. Materials Characterization, 2002, 48(5): 401-406.
- [8] CLAUB U, NEUKIRCHEN D. Industrial electron beam applications[C]//International Electron Beam Welding Conference. Aachen, 2012.
- [9] 许海鹰, 左从进, 付鹏飞. 电子束高频偏转扫描电路基础研究[J]. 焊接试验研究, 2013(8): 26-29.
XU Haiying, ZUO Congjin, FU Pengfei. Basic research of electron beam high frequency deflection scanning circuit[J]. Research on Welding Test, 2013(8): 26-29.
- [10] 李少青, 芦凤桂, 唐新华, 等. 电子束扫描加热温度场的有限元分析[J]. 航空制造技术, 2006, 49(5): 79-82.
LI Shaoqing, LU Fenggui, TANG Xinhua, et al. Finite element analysis on temperature field of electron beam scanning and heating[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 49(5): 79-82.
- [11] QI H B, YAN Y N, LIN F, et al. Scanning method of filling lines in electron beam selective melting[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2007, 221(12): 1685-1694.

通讯作者: 刘方军, 教授, 研究方向为高能束流焊接技术及加工工艺焊接、材料加工, E-mail: liufangjun@buaa.edu.cn.

(责编 铃兰)