

# 大量程高精度位移传感器自动校准技术研究

宋一罡, 解 岩

(航空工业第一飞机设计研究院, 西安 710089)

**[摘要]** 基于传统的位移传感器校准存在摩擦、空程等缺陷问题,提出了一种量程为 0~3000mm 高精度校准方案。该方案以激光干涉仪为基准,直线电机配合气浮导轨为驱动单元,创新型光栅实现闭环控制,使定位精度在  $3\mu\text{m}/\text{m}$  量级。位移传感器校准时,通过六个自由度的可调夹具,使位移传感器运动方向与标准测量方向在同一条直线上,可实现阿贝误差的最大化消除。尤其针对特殊的浮子式传感器校准,通过设计专用夹具配合支撑点消除变形的校准方式,解决了测杆在校准过程存在的形变难题。同时,校准装置不确定度的评定和验证,表明该校准方法可行有效。

**关键词:** 大量程; 高精度; 位移传感器; 校准; 浮子式

## Research on Wide Scale and High Accuracy Calibration Technology of Linear Displacement Sensor

SONG Yigang, XIE Yan

(AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

**[ABSTRACT]** It is a big challenge for the traditional calibration to make friction and backlash, so a wide scale and high accuracy calibration technology of linear displacement sensor is proposed. Taking laser interferometer as the reference, linear motor and bearing sliders are the driving unit, the grating achieves closed-loop control, and the positioning accuracy is on the micron level. Meanwhile, by a six-degree-of-freedom adjustable fixture in the calibration process, the reference direction is aligned with the measurement direction to eliminate the Abbe error. Meanwhile, aiming at the special float type sensor, a special fixture is designed to eliminate the deformation with support points, which solves the deformation problem of the measuring rod in the calibration process. The evaluation and verification of the uncertainty show that the calibration method is feasible and effective.

**Keywords:** Wide scale; High accuracy; Displacement sensor; Calibration; Float type sensor

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.08.093

位移传感器广泛应用于航空航天、石油化工、船舰等领域,其校准技术研究有着重要的社会效益。国外传感器生产厂家采用激光干涉技术,配合高精度的导轨及辅助装置,实现线位移传感器的校准,其校准技术研究集中在 1m 量程范围<sup>[1-2]</sup>。国内一般采用万工显、测长机等设备进行校准,以手工操作为主,不仅存在操作繁杂、工作效率低、测量可靠性差、测量范围小等缺陷,而且对测量人员的检测素养要求极高。近年出现的自动化校准技术,主要采用滚轴丝杠加步进电机的形式,存在着摩擦损耗、空程等缺陷,这在很大程度上影响了位移传感器各项指标的可靠性<sup>[3]</sup>。

鉴于此,本文以高精度、大量程、自动化为目标,采用激光干涉仪作为基准,直线电机作为驱动单元,气浮导轨作为运动单位,光栅尺实现闭环控制方式,自动采集和处理校准数据,以实现位移传感器的自动化校准。此外,针对浮子式位移传感器测杆变形问题,设计专用夹具配合支撑点消除变形的校准方式,其中,专用夹具由升降 V 形组合物、浮子传感器磁环组合物、滑轮支撑组合物, T 形槽板四部分组成,可实现六个自由度旋转调整。该校准技术可根据杆的弯曲情况选择合适的位置点滑轮支撑组合物,通过后期微调专用夹具,解决浮球式传感器在校准过程中存在的测杆挠度难题。

## 1 位移传感器组成原理

位移传感器是用来测量位移、距离、位置和应变长度等长度尺寸的计量器具。以浮子式位移传感器(图1)为例,它由电缆、波导丝、测杆、浮子等元器件组成。位移传感器输出主要形式为电信号,如:不同频率的脉冲信号、电压或电流等模拟量,也有部分位移传感器集成了信号转化功能,直接以数字方式或其他方式输出长度值。其校准技术 JJF1305-2011《线位移传感器校准规范》规范中只给出了安装原则,却没有给出具体的实施方案<sup>[4]</sup>,因此位移传感器的校准技术研究非常必要。

## 2 校准系统的硬件组成

位移传感器校准系统硬件主要由激光干涉仪、光栅尺、校准台、位移驱动控制系统、夹具组件等组成,以激光干涉仪为基准,以高精度气浮导轨作为运动单元,通过直线电机带动气吸附滑块在导轨上运动,给出水平运动方向的标准长度量,并配合专用夹具,实现位移传感器自动校准。

### 2.1 激光干涉系统

干涉仪光束进入线性干涉镜被分成两束。一束光被引向装在分光镜上的反射镜,另一束光则穿过分光镜到达第2个反射镜,最终两束光都被反射回分光镜,在此它们重新组合并被导回激光头产生干涉。在线性测量过程中,一个光学组件保持静止不动,另一个光学组件沿线性轴移动。通过监测测量光束和参考光束之间的光路差异的变化,产生定位精度测量值。

### 2.2 气浮导轨系统

试验台采用精密切割和研磨加工花岗石,全长直线度满足相应的技术指标要求。滑块与导轨的3个工作面配合形成具有一定刚度的气膜吸附在导轨上,保证滑块在导轨全长运行流畅。气浮滑块上具有安装附件的螺纹孔,便于安装直线电机定子、光学附件及夹具附件。相对于传统的机械驱动方式,采用直线电机驱动气吸附滑块的方式,直线电机能够直接产生运动部件的直线运动,设备的结构简化,不需要中间转换过程,其动态响应性能和定位精度都大大提高,直线电机运动时无机械摩擦、噪音小、运动平稳、整体传动效率更容易保证。运动控制通过控制器,并利用光栅尺反馈实现精确定位。

### 2.3 夹具设计

位移传感器的安装对校准结果的影响显著,因此夹具的设计对传感器的校准尤其重要。夹具设计思路按通用和特殊传感器两种类型进行分类,其具体设计方案如图2所示。

#### 2.3.1 通用传感器夹具设计

基于通用传感器设计了可随需要更换组合式夹具,且夹具都预留有接口,便于各类型位移传感器快速校准的实现。

该夹具具有3个自由度的结构,上下方向可以移动120mm,前后方向可以移动200mm,左右方向可以实现7.5°的旋转调整。被测传感器的固定端通过该夹具夹紧,伸缩端通过固定在气吸附滑块上面的拉线座固定,其中拉线座上下、前后可调,整套夹具的仪器机械结构设计保证了传感器校准时尽可能遵守阿贝原则。

#### 2.3.2 特殊传感器夹具设计

基于磁致伸缩式位移传感器采用水平校准的方式,由于浮子式传感器杆的浮杆直径较细,长度较长,这就必须要考虑到大长度浮子传感器的变形问题,为此设计了专用夹具,此专用夹具由升降V形组合体、浮子传感器磁环组合体、滑轮支撑组合体、T形槽板4部分组成,如图3所示。

(1)升降V形组合体。可以实现4个自由度,便于浮子式传感器头部的固定。浮子式传感器头部是通过两点夹紧,由于浮子传感器的两端夹持部分的直径不同,所以一端采用上下可调并锁紧的结构。升降V形组合体上下方向可以移动120mm,前后方向可以移动200mm,左右方向可以实现7.5°的旋转调整。

(2)浮子传感器磁环组合体。巧妙通过磁环组合体

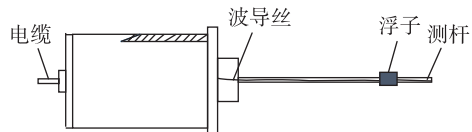


图1 磁致伸缩式位移传感器简图

Fig.1 Schematic diagram of a magnetostrictive displacement sensor

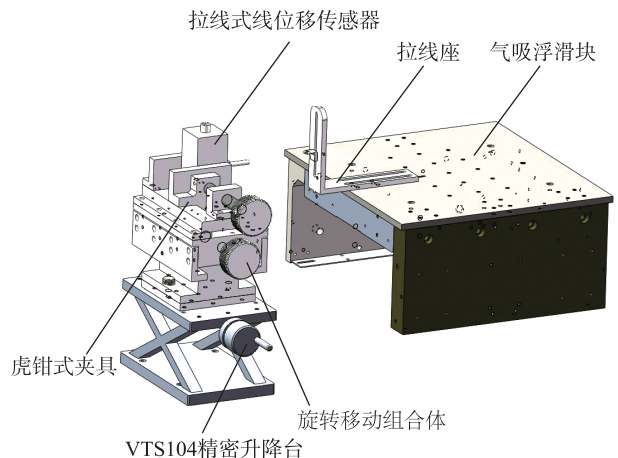


图2 通用传感器夹具示意图

Fig.2 Schematic diagram of a universal sensor fixture

夹紧球形浮子或者圆柱形浮子的中间凸起部分来固定浮子。测量时把浮子通过磁环组合体固定在气吸附滑块上,将气吸附滑块推到不影响浮子传感器调整的位置。

(3) 滑轮支撑组合体。通过在滑轮上面的球形面完成测杆的支撑。将被检测浮子传感器头部放在升降 V 形组合体上,慢慢升起浮子传感器,在靠近浮子传感器头部位置布置 2 个滑轮支撑组合体,微调各自自由度使测杆落在滑轮支撑组合体球面槽里面慢慢推动气吸附滑块,让测杆穿过浮子,在浮子和测杆发生摩擦的位置附近布置滑轮支撑组合体,以便浮子无摩擦通过(滑轮支撑组合体的布局根据杆的弯曲实际情况进行布局)。由于采用不同位置的支撑点,并没有强行改变支撑点与

支撑点之间测杆的原始状态,支撑夹具只是将夹紧点校正到正确位置(水平和垂直),只是夹紧而没有拉直。

(4) T 形槽板。实现滑轮支撑组合体在左右方向的移动。通过后期微调使滑轮支撑组合体的球形面和磁环组合体的中心处在同一条直磁致伸缩式上面。

#### 2.4 位移驱动控制系统

在有效校准范围为 0~3000mm,采用直线电机驱动气吸附滑块的方式。相对于传统的机械驱动方式,直线电机能够直接地产生运动部件的直线运动,设备的结构简化,不需要中间转换过程,其动态响应性能和定位精度都大大提高,直线电机运动时无机械摩擦、噪音小、运动平稳、整体传动效率更容易保证,通过和气浮配合的方式,设备的稳定性更好。采用运动控制卡控制,并通过光栅尺反馈实现精确定位。传感器的位置通过数字多用表读取并采集至台式计算机中,当传感器位置发生变化时,其电压或电流随之发生变化,传感器的移动距离和光栅尺的移动距离同步且等值。

### 3 控制算法及软件系统

为实现行程上的单向运动,在控制算法方面采用二分法,即在运动策略上采用在输入值上减去定值的方法,通过在给定方向上将缩小后输入值作为运动目标量,将偏差值的一半作为反馈量,保证滑台运动到指定位置后停止反馈。

软件采用 C# 编程,数据处理采用最小二乘法进行数据处理。其可视化界面分为采样测量窗口和数据管理窗口,应用软件的组成结构如图 4 所示。

### 4 不确定度评定

为考量位移传感器校准装置及校准技术的整体性能,需对其进行不确定度评定。位移传感器校准装置采用激光干涉仪为标准,气浮导轨作为驱动单元,光栅尺实现闭环控制。在校准位移传感器时,其不确定度来源

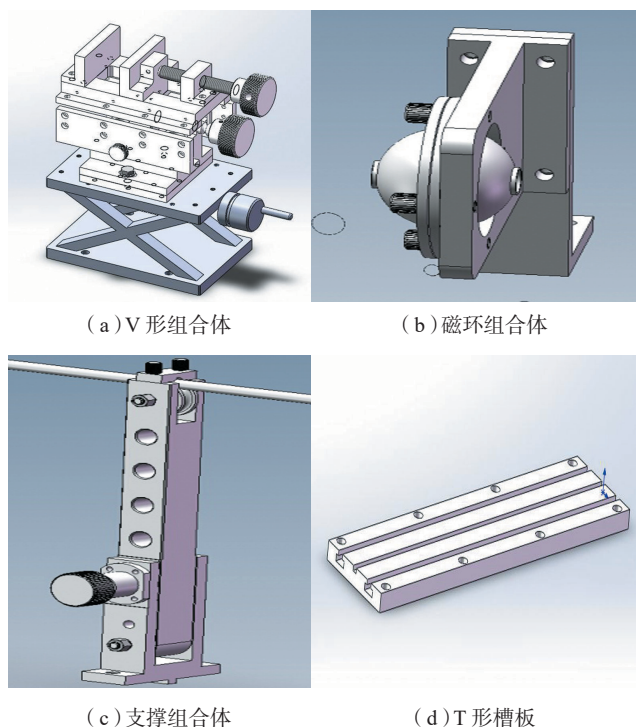


图3 特殊传感器夹具部分示意图

Fig.3 Schematic diagram of special sensor fixture

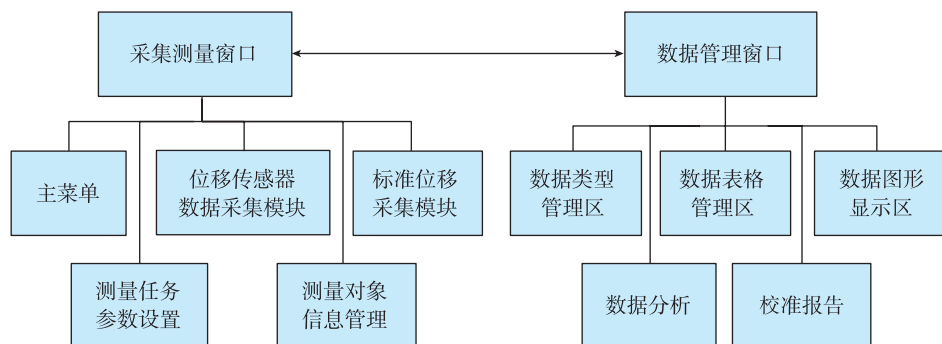


图4 软件结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of software structure

主要有以下 8 个方面:(1)标准器具引入的不确定度分量;(2)测量重复性引入的不确定度分量;(3)导轨直线度引入的不确定度分量;(4)基准台膨胀系数引入的不确定度分量;(5)夹具安装误差引入的不确定度分量;(6)直流稳压电源引入的不确定度分量;(7)数字多用表示值误差引入的不确定度分量;(8)环境变化引入的不确定度分量。

#### 4.1 A类不确定度评定

选取稳定性好的位移传感器,测量范围为0~2000mm,输出为4~20mA,在标准装置正常工作条件下,短时间内,对受检点等精度重复测量10次,得到试验标准偏差,共测6组,则不确定度分量为:

$$u_1 = \frac{s_n(x)}{\sqrt{6}} = 0.0017\% \quad (1)$$

#### 4.2 B类不确定分量评定

(1)测距误差引入的不确定度分量。

激光干涉仪测距的最大允许误差为  $\pm 0.5\mu\text{m}/\text{m}$ ,  $L$  的上限为 3000mm,忽略固有误差,只考虑与测量距离有关的相对误差。激光干涉仪测距误差引入的不确定度分量由式(2)估算,按均匀分布处理。

$$u_2 = \frac{0.5 \times 3 \times 10^{-3}}{L \cdot \sqrt{3}} \times 100\% = 0.00003\% \quad (2)$$

(2)由直线度引入的不确定度分量。

经上级计量技术机构检测,导轨全长范围内水平运动直线度误差最大为  $10''$ ,若标准轴线与测量轴线之间存在 200mm 的距离,假设为均匀分布,则水平运动直线度误差引入的不确定度分量为:

$$u_3 = \frac{200 \times \tan(10''/3600)}{L \cdot \sqrt{3}} \times 100\% = 0.002\% \quad (3)$$

导轨在全长的范围内垂直运动直线度误差最大为  $10''$ ,若测量轴线与装置运动轴线之间存在 200mm 的距离,假设为均匀分布,则垂直运动直线度误差引入的不确定度为:

$$u_3' = \frac{200 \times \tan(10''/3600)}{L \cdot \sqrt{3}} \times 100\% = 0.002\% \quad (4)$$

(3)基准台膨胀系数引入不确定度分量  $u_4$ 。

测量装置基准台膨胀系数的偏差为  $9.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,若环境温度与标准温度差值  $0.2^\circ\text{C}$ 。假设满足均匀分布,则:

$$u_4 = \frac{0.2 \times 9.4 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}} \times 100\% = 0.0001\% \quad (5)$$

(4)夹具安装误差引入的不确定度分量  $u_5$ 。

安装误差主要是余弦误差,它是由测量轴线与气浮滑台运动的直线安装不平行而引起的误差,  $\Delta = L(1 - \cos \alpha)$ ,  $\alpha$  为两轴线间夹角。为尽量减小余弦误差,在安装时使用可调专用夹具,使测量轴线与气浮滑台托架运动

的轴线一致。本装置经校正,  $\alpha \leq 10'$ 。其几何关系如图 5 所示。假设为均匀分布,则安装误差引入的不确定度分量为:

$$u_5 = \frac{L(1 - \cos \alpha)}{\sqrt{3} \cdot L} \times 100\% = 0.0003\% \quad (6)$$

(5)直流稳压电源引入的不确定度分量  $u_6$ 。

在测量过程中,直流稳压电源 4h 漂移 1mV,按均匀分布,输入电压为 24V 时,则:

$$u_6 = \frac{1 \times 10^{-3}}{24 \times \sqrt{3}} \times 100\% = 0.002\% \quad (7)$$

(6)数字多用表示值误差引入不确定度分量。

使用数字多用表电流档(34470A 七位半数表),直流电流量程选择为 100mA,由校准结果知,当输出测量上限至 20mA 时,最大示值误差为 0.002mA,按均匀分布处理,则:

$$u_7 = \frac{0.002}{\sqrt{3} \times 20} \times 100\% = 0.006\% \quad (8)$$

(7)环境变化引入的不确定度分量。

环境条件的影响主要为室温的变化,即被校传感器与装置的温度差异等方面,经试验,只要在校准规范规定的温度下进行校准,以上因素引入的不确定度分量可忽略不计。

#### 4.3 不确定度合成

考虑到各影响量,且各不确定度分量独立不相关,取各分量中较大值,合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2} = 0.007\% \quad (9)$$

线位移校准装置相对扩展不确定度:

$$U_{\text{rel}} = k \cdot u_c = 0.02\% \quad (k=2) \quad (10)$$

### 5 不确定度验证

3 台同等精度装置不确定度验证采用比对法,分别使用本校准装置的激光干涉仪作标准和光栅尺作标准进行验证。选取一性能良好的线位移传感器,使用 3 台同等精度装置,分别对同一线位移传感器的线性度误差进行校准,本校准装置校准结果为 0.066%,校准装置 1 校准结果为 0.066%,校准装置 2 校准结果为 0.067%。

3 台设备给出的校准结果算术平均值  $\bar{y} = 0.066\%$ 。

对比结果:  $|y - \bar{y}| = 0.001\%$ 。

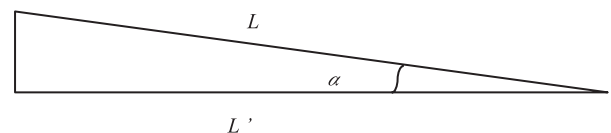


图5 安装引起余弦误差示意图

Fig.5 Schematic diagram of cosine error caused by installation

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

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)