

# 基于 Helmholtz 的低感抗电子束偏转扫描线圈仿真<sup>\*</sup>

李平林<sup>1</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 许海鹰<sup>2</sup>, 黄业文<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;  
2. 中国航空制造技术高能束流加工技术国防科技重点实验室, 北京 100024)

**[摘要]** 为了提高电子束偏转扫描频率和磁场均匀性, 采用 Helmholtz 空心线圈结构设计了一种低感抗电子枪偏转扫描线圈。采用 ANSYS 有限元分析软件对偏转扫描线圈的电磁场分布进行仿真, 并采用高斯计对线圈内部的电磁场进行了测量, 仿真结果与实际测量值基本吻合, 线圈内部的磁感应强度大小和电磁场分布的均匀性可以满足电子束高频偏转扫描的要求。实际扫描试验表明, 该线圈实现了两点电子束高频偏转扫描, 扫描频率可达 30 kHz。

**关键词:** Helmholtz 空心线圈; 电子枪; 低感抗偏转扫描线圈; 仿真

## Design and Simulation of Electron Beam Low Impedance Deflection Scanning Coil Based on Helmholtz Coil

LI Pinglin<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, XU Haiying<sup>2</sup>, HUANG Yewen<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;  
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Power Beam Processes, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

**[ABSTRACT]** In order to improve the electron beam deflection scanning frequency and magnetic field uniformity, a low impedance deflection scanning coil for the electron beam gun is designed, employing the Helmholtz air-core coil. Adopting the finite element analysis software ANSYS workbench, the magnetic field distribution of the deflection scanning coil is simulated, and the electromagnetic field in the coil is measured by the gauss meter. It showed that the analog data is consistent with the measured data and the magnetic flux density and uniformity of the magnetic field inside the coil could satisfy the requirement of the electron beam high frequency deflection scanning. The actual scanning test showed that the coil can achieve the two-point electron beam high frequency deflection scanning, reaching a 30kHz frequency.

**Keywords:** Helmholtz air-core coil; Electron beam gun; Low impedance deflection scanning coil; Simulation

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2017.12.089

钛合金因具有轻质、高强度等优点, 逐渐成为航空制造领域的重要结构材料, 其连接方式多采用焊接方法。电子束焊接具有功率密度高、焊接变形小、深宽比大等优点, 且焊缝具有优良的微观组织、机械性能和疲劳性能, 在大厚度钛合金构件加工方面具有明显的优势。高温钛合金具有较强的冷裂倾向, 焊接时容易出现裂纹, 通常需要进行焊前预热和焊后缓冷。然而, 由于电子束焊接在真空条件下进行, 焊接过程中采用辅助热源进行预热和缓冷存在较大困难<sup>[1]</sup>。

通过偏转扫描线圈产生的电磁场控制电子束偏转产生的多束流, 可在焊接过程中进行焊前预热和焊后

缓冷, 可明显降低焊接裂纹、气孔数量和减小焊接变形。国外机构和学者就此开展了大量工作, 并取得了积极的研究进展。Kolenic 等<sup>[2]</sup>和 Rùthrich 等<sup>[3]</sup>分别在 AW6060 合金和铸铁两种材料上试验成功; 美国 NASA 采用电子束多束流焊接 F-22 钛合金支座, 该零件成功通过了两个周期的最大载荷全谱疲劳测试, 并未发现永久变形<sup>[4]</sup>。然而, 国内在电子束多束流焊接技术方面尚处于起步阶段, 与国外还存在较大差距。目前, 国内使用的偏转扫描线圈多为环形结构, 此类线圈绕组的内外侧在线圈中心的磁场方向相反, 且磁感线平行度差, 导致磁感应强度较低、磁场均匀性差; 另一方面, 采用了

磁芯结构,使得偏转扫描线圈的感抗较大,由此导致线圈的偏转扫描频率大都低于 1kHz<sup>[5]</sup>。偏转扫描电磁场均匀性差不仅会增加标定工作量,且很难实现偏转扫描的精确控制<sup>[5-6]</sup>。此外,偏转扫描频率太低,扫描时容易产生束斑拖尾,损坏工件<sup>[6]</sup>。因此,研制出磁感应强度较强、磁场均匀性较好并能保证高频工作的偏转扫描线圈,对推进电子束多束流焊接技术的应用和发展具有重要意义。

Helmholtz 线圈可以产生均匀的磁场,并且由于不含铁芯而具有较低的感抗<sup>[7-8]</sup>。根据某型号电子枪的结构尺寸和偏转扫描技术要求,计算了偏转扫描线圈磁场强度;基于 Helmholtz 结构设计低感抗偏转扫描线圈,并建立了几何模型和有限元分析模型。采用有限元分析软件 ANSYS Workbench 进行电磁场仿真,并对所研制的低感抗偏转扫描线圈的电磁场分布进行实际测量,仿真结果与实际测量值基本吻合,所设计线圈工作区域内的磁感应强度和磁场均匀性可以满足电子束高频偏转扫描的要求。

### 1 偏转扫描线圈结构设计

当具有一定初速度的电子束垂直射入到偏转扫描线圈产生的磁场中时,因为受到洛伦兹力而发生偏转,导致电子束在多个位置快速移动,由于移动的频率很高从而产生“多束”的扫描效果<sup>[9-11]</sup>。电子束偏转扫描原理的示意图如图 1(a)所示。

图 1(b)所示为某型号电子枪的枪体直径  $D_{外}=124\text{mm}$ ,中间铜管直径  $D_{内}=20\text{mm}$ ,长  $L=100\text{mm}$ 。所设计的线圈需要安装至电子枪枪体中,同时电子枪枪体中需设计中空通道来方便电子的运动,根据枪体的结构,线圈组中两个线圈的尺寸要求如下:

- (1) 长度  $2a \leq 100\text{mm}$ ;
- (2) 线圈之间的距离  $2d \geq 20\text{mm}$ ;

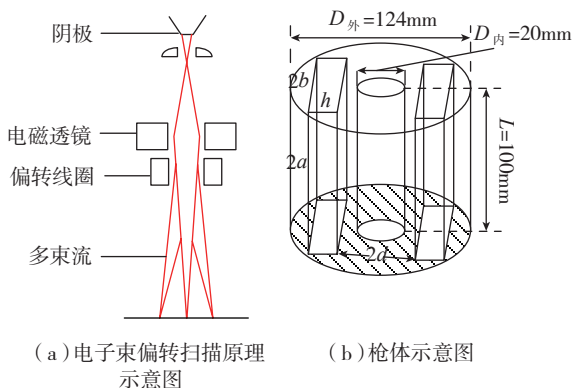


图1 电子束偏转扫描原理和枪体示意图

Fig.1 Schematic diagram of electron beam deflection scanning process and the gun block

(3) 线圈高度  $h \leq 52\text{mm}$ 。

#### 1.1 偏转扫描线圈结构的选择

线圈的电感对其电流响应速度影响极大。一个通有电流的线圈,其等效工作电路如图 2 所示。其中,  $R$  为偏转扫描线圈内阻,  $L$  为偏转扫描线圈感抗,  $U$  是电源电压,  $i$  为通过偏转扫描线圈的电流。

根据基尔霍夫定律可得回路电压方程,可得:

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} \tag{1}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{U - Ri}{L} \tag{2}$$

一般地,偏转扫描线圈的内阻很小,  $Ri$  可以忽略不计。由公式(2)可以看出电流变化率  $di/dt$  随  $L$  的减小而增大。因此,采用空心线圈结构可以大大减小偏转扫描线圈的感抗,从而可以实现更高的偏转扫描频率<sup>[8-10]</sup>。

#### 1.2 Helmholtz线圈

Helmholtz 线圈是一对相同的矩形载流线圈彼此平行且共轴,密绕有  $N$  匝绕组且通同方向电流  $I$ ,如图 3 所示, Helmholtz 线圈长为  $2a$ 、宽为  $2b$ ,线圈的距离为  $2d$ 。Helmholtz 结构的偏转扫描线圈可以产生均匀的磁场,更好地实现电子束的偏转控制<sup>[7-8]</sup>。

采用 Helmholtz 结构,结合电子枪内部结构特点,设计电子束低感抗偏转扫描线圈, $X$ 、 $Y$ 轴各装一对线圈<sup>[8]</sup>,从而实现电子束在任意方向的偏转。所设计的电子束低感抗偏转扫描线圈示意图见图 4。

#### 1.3 线圈的参数计算

据能量守恒定律和洛伦兹力公式可得最大磁感应强度<sup>[12]</sup>:

$$B = \frac{\sin \theta \cdot \sqrt{\frac{2m}{q}} \cdot \sqrt{E_a}}{H} = 3.37 \times 10^{-6} \cdot \frac{\sin \theta \cdot \sqrt{E_a}}{H} \tag{1}$$

式中,电子加速电压  $E_a=150\text{kV}$ ; 电子束偏转角度  $\theta=3^\circ$ ;  $m/q$  为电子的质荷比;  $H$  为磁场的有效厚度,此处等于线圈的长  $2a$ ,值为  $80\text{mm}$ 。

计算所需最大磁感应强度  $B=1.4 \text{mT}$ 。

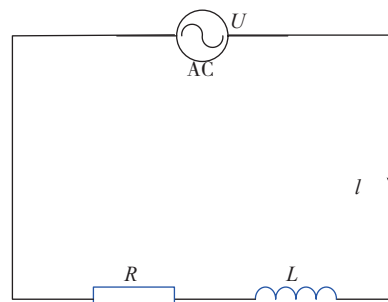


图2 等效工作电路

Fig.2 Equivalent work circuit

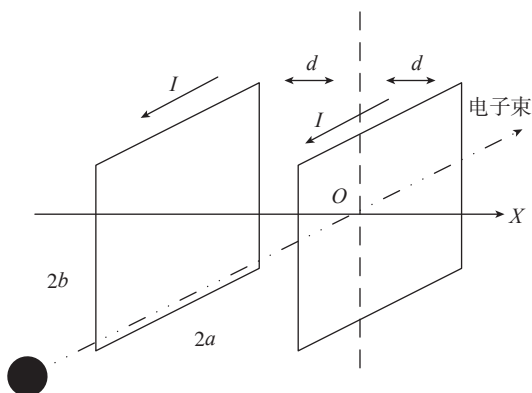


图3 Helmholtz线圈示意图

Fig.3 Schematic diagram of Helmholtz coil

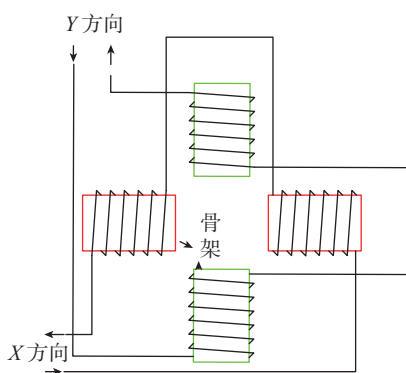


图4 电子束低感抗偏转扫描线圈示意图

Fig.4 Schematic diagram of electron beam high frequency deflection coil

根据全电流定理和磁路欧姆定理可得磁场与线圈中电流的关系式:

$$NI = HL = \frac{B}{\mu_0} \cdot \frac{\pi 2d}{k \sin(\alpha + \beta)} = \frac{B\pi 2d}{k\mu_0 \sin(\alpha + \beta)} \quad (4)$$

式中,  $N$  为线圈的匝数;  $I$  为电流强度;  $k$  为线圈的形状因子, 此处取值为 1;  $B$  为线圈的最大磁感应强度;  $\alpha$  为高度偏转因子, 设计线圈中假设在高度方向磁力线是平行没有垂直分量, 所以该因子取  $0^\circ$ ;  $\beta$  为水平因子取值为  $90^\circ$ ;  $2d$  为线圈之间距离, 值为 40 mm;  $\mu_0$  为真空中的磁导率。

当  $I=8\text{A}$  时, 将  $I$  带入公式(4), 得到  $N=16$ , 即每个线圈绕 8 匝。所设计偏转扫描线圈允许通过的电流  $\leq 15\text{A}$ 。考虑到趋肤效应, 采用 8 根 0.71mm 的漆包线并联来绕制偏转扫描线圈, 则导线中的电流密度  $J_s=2.5\text{A}/\text{mm}^2$ 。

结合电子枪实际的结构尺寸要求和上述计算结果的分析, 所设计的低感抗偏转扫描线圈结构参数如图 5 所示。

(1) 低感抗偏转扫描线圈由一对尺寸相同的、共轴且彼此平行放置的矩形载流线圈构成;

(2) 单个线圈的长  $2a=80\text{mm}$ , 宽  $2b=40\text{mm}$ ;

(3) 线圈选择 8 股  $\Phi=0.71\text{mm}$  的绝缘漆包线, 每个线圈绕 8 匝, 共绕 1 层, 则此时线圈高度  $h=46\text{mm}$ , 厚度  $\sigma=0.71\text{mm}$ ;

(4) 两个线圈的距离  $2d=40\text{mm}$ ;

(5) 考虑到线圈用铜量大、匝数多, 设计了专用绝缘骨架作为支撑和绕制漆包线的结构。

## 2 偏转扫描线圈电磁场仿真

由于两对低感抗偏转扫描线圈结构完全相同, 只是放置在不同的坐标轴上, 故他们的磁场分布是相同的, 因此在电磁场仿真时, 只需对一组进行仿真。将建立好的几何模型导入有限元分析软件 ANSYS Workbench 进行电磁场仿真。

### 2.1 有限元模型

选用自动网格划分法, 网格参数物理环境设定为电磁场 (Electromagnetics), 网格尺寸的平滑度设定为高级 (High)。图 5 为网格划分后的有限元模型。

### 2.2 求解与仿真分析

假设线圈通入电流为一恒定值, 先进行简单的三维静态磁场分析, 线圈加载的电流密度  $J_s=2.5\text{A}/\text{mm}^2$ , 选择 Static 静态求解。同时, 考虑到线圈中不包含铁区, 采用 RSP 法求解。

制定 3 条路径  $P1$ 、 $P2$  和  $P3$  来考察线圈内部的电磁场分布, 其中  $P1$  考察平行于线圈长的中心线上的电磁场分布 (由 1 点 (0,0,40 mm) 和 2 点 (0,0,-40 mm) 连线而成), 路径  $P2$  考察平行于线圈高的中心轴上的电磁场分布 (由 3 点 (20mm,0,0) 和 4 点 (-20mm,0,0) 连线而成), 路径  $P3$  考察平行于线圈宽的中心线上的电磁场分布 (由 5 点 (0,20mm,0) 和 6 点 (0,-20mm,0) 连线而成), 3 条路径上的电磁场分布云图和磁感应强度曲线分别如图 6 (a)、(b) 所示。

从图 6 (b) 可以看出, 在路径  $P1$  上与 1 点距离为 15~65 mm 区域中电磁场分布比较均匀, 磁感应强度差值在 0.25mT 以内; 而路径  $P2$  上最小磁感应强度出现

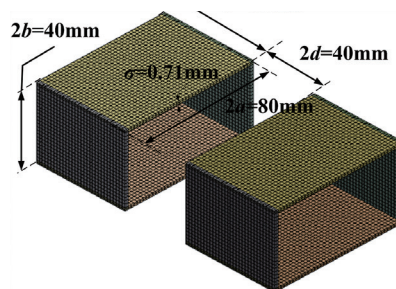


图5 网格划分后的有限元模型

Fig.5 Finite element model by mesh generated

在中心处,由于两端更靠近两边的线圈,故两端磁场强度较大,中心处的磁场虽然稍弱,但在路径 P2 上与 3 点距离为 10~30mm 区域中电磁场分布比较均匀,磁感应强度的差值不到 0.2mT,与路径 P1 中心区域磁场均匀度相差不大;最后,路径 P3 上与 5 点距离为 10~30mm 区域内电磁场分布更加均匀,磁感应强度差值为 0.15mT 以内,相比路径 P2 更均匀。

由图 4 可知,除去线圈内部边缘附近区域外,在电子枪工作区域内 ( $D \leq 20\text{mm}$ ) 的电磁感应强度能够达到 1.5mT 以上,电磁场分布也比较均匀,可以满足偏转扫描线圈的工作要求。

### 3 偏转扫描线圈电磁场测试

在制作完成后的低感抗偏转扫描线圈中选取 15 个关键测试点进行磁感应强度测量。表 1 所示为 15 个点的坐标,皆以线圈的中心点为坐标原点。

采用 HT201 (分辨力为 0.01mT,误差为  $\pm 2\%$ ) 便携式数字特斯拉计,分别对表 1 中各点的电磁场进行测量。当矩形偏转扫描线圈中通 8A 电流(导线中的电流密度  $J_s=2.5\text{A}/\text{mm}^2$ ) 时,各测试点的磁感应强度测量数据和仿真数据如图 7 所示。

上述 15 个测试点的测量结果表明:线圈内部的磁感应强度测试值与仿真值基本一致,各测试点的电磁感应强度均大于 1.5mT,并且各点的磁感应强度的最大差值为 0.19mT,小于 0.2mT,电磁场分布比较均匀,可以满足电子束高频偏转扫描时磁感应强度和磁场均匀性的需要。

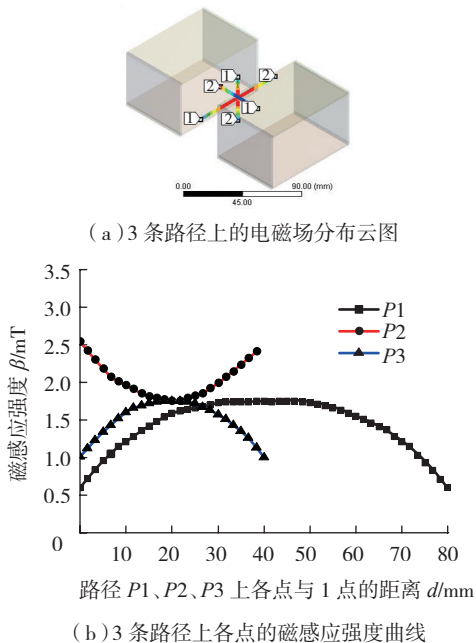


图6 3条路径上的电磁场分布

Fig.6 Distribution of electromagnetic field on three paths

### 4 两点电子束偏转扫描试验

将所研制的偏转扫描线圈安装到电子枪内,开展两点跳转的扫描试验。采用专门的电子束高频偏转电源,对 Y 方向的偏转扫描线圈加载 30kHz 的驱动电流,电流幅值为 8A。利用交流传感器 CHB-500 (采样电阻为  $5\Omega$ ,变比 1:500)、示波器 TPS2024,对线圈中的电流波形进行检测。

试验中,电子枪加速电压 150kV,束流 20mA,束流到工件的距离为 50cm,两束斑之间距离为 6cm。实际扫描图如图 8 所示。随着线圈电流的高频变化,单束电子束在两个不同的位置快速偏转扫描,形成了两个束斑的效果。从图 8 中可以清晰看到两个电子束束斑。电子束两点快速扫描的试验验证了所设计的低感抗偏转扫描线圈能够实现电子束高频偏转扫描的功能。

### 5 结论

(1) 基于 Helmholtz 线圈的工作原理,针对某型号电子枪的结构特征,设计了一对尺寸相同的共轴平行放置的低感抗偏转扫描线圈。

(2) 采用 ANSYS 有限元分析软件对低感抗偏转扫描线圈进行三维静态电磁场仿真,并采用高斯计对该线圈进行了测量。结果表明:仿真结果和实际测量值基本吻合,15 个测试关键点的磁感应强度幅值能达到 1.71

表1 15个测试点的坐标

| 序号 | 坐标(x, y, z)/mm  | 序号 | 坐标(x, y, z)/mm |
|----|-----------------|----|----------------|
| 1  | (-10, 10, -20)  | 2  | (-10, 10, 0)   |
| 3  | (-10, 10, 20)   | 4  | (10, 10, -20)  |
| 5  | (10, 10, 0)     | 6  | (10, 10, 20)   |
| 7  | (-10, -10, -20) | 8  | (-10, -10, 0)  |
| 9  | (-10, -10, 20)  | 10 | (10, -10, -20) |
| 11 | (10, -10, 0)    | 12 | (10, -10, 20)  |
| 13 | (0, 0, -20)     | 14 | (0, 0, 0)      |
| 15 | (0, 0, 20)      | —  | —              |

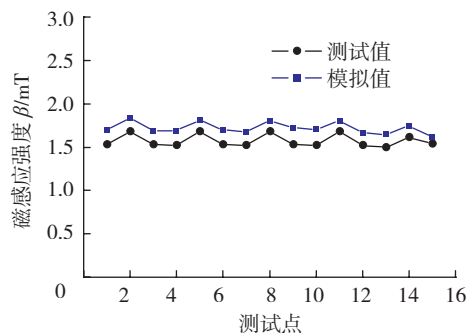


图7 15个测试点的磁感应强度

Fig.7 Magnetic induction of 15 test points

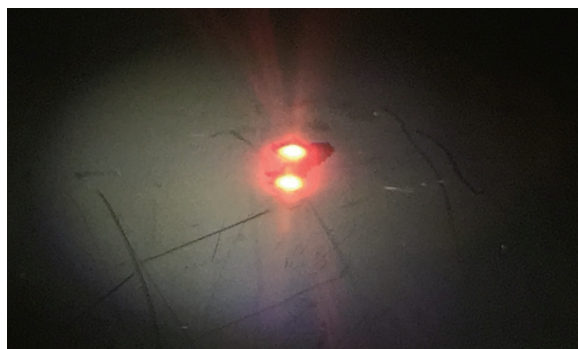


图8 电子束两点跳转的扫描试验

Fig.8 Electron beam scanning experiment of two-point jump

mT,最大差值为0.19mT,小于0.2mT,可以满足电子束高频扫描所需磁感应强度和磁场均匀性的需要。

(3) 试验结果表明所设计的低感抗偏转扫描线圈能够实现两点电子束高频偏转扫描,扫描频率高达30 kHz。

### 参考文献

- [1] CLAUB U, NEUKIRCHEN D. Industrial electron beam applications[C]// Proceedings of International Electron Beam Welding Conference. 2012.
- [2] KOLENIC F, FODREK P, POLAK P. EB welding of Al alloys susceptible to hot cracking and porosity[C]//The 63rd IIW Conference. Istanbul: Welding in the World, 2010.
- [3] RÜTHRICH K, ZENKER R, MANGLER M. Investigations relating to electron beam multipole welding of metal welds based on cast iron[C]//The 64th IIW Conference. Mumbai:Welding in the World, 2011.
- [4] 余伟,王西昌,巩水利.快速扫描电子束加工技术及其在航空制造领域的潜在应用[J].航空制造技术,2010(16):44-47.
- YU Wei, WANG Xichang, GONG Shuili. Fast scanning electron beam processing technology and its potential applications in the field of aerospace manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(16): 44-47.
- [5] 王西昌,赵海燕,左从进,等.多束电子束扫描偏转扫描线圈电磁场的数值分析[J].新技术新工艺,2008(10):15-18.
- WANG Xichang, ZHAO Haiyan, ZUO Congjin, et al. Numerical multi-beam scanning electron beam deflection coil electromagnetic field analysis[J]. New Technology & New Process, 2008(10): 15-18.
- [6] 苗志飞,左从进,许海鹰,等.基于PIC单片机的电子束高频扫描系统[J].航空制造技术,2013(11):74-77.
- MIAO Zhifei, ZUO Congjin, XU Haiying, et al. High-frequency scanning system for electron beam based on PIC[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(11): 74-77.
- [7] 刘翠红,王建永.长方形Helmholtz线圈研究[J].现代仪器科学,2008(2):29-31.
- LIU Cuihong, WANG Jianyong. Study on rectangular Helmholtz coils[J]. Modern Science Instruments, 2008(2): 29-31.
- [8] 黄松涛,张伟,张鹏飞,等.基于Helmholtz线圈的大尺寸均匀电磁场研究[J].北京航空航天大学学报,2015,41(2):203-208.
- HUANG Songtao, ZHANG Wei, ZHANG Pengfei, et al. Research on Helmholtz coils large uniform electromagnetic field[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(2): 203-208.
- [9] 郭光耀,刘方军,韩瑞清.电子束扫描控制系统[J].焊接学报,2003,24(1):91-93.
- GUO Guangyao, LIU Fangjun, Han Ruiqing. Electron beam scanning control system[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003,24(1): 91-93.
- [10] 王学东,姚舜.扫描轨迹可控的电子束钎焊[J].焊接学报,2004,25(6):31-35.
- WANG Xuedong, YAO Shun. Control on electron beam scanning track in brazing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(6):31-35.
- [11] 李少青,王学东,张毓新,等.基于可编程控制的扫描电子束加工技术[J].焊接学报,2005,26(7):59-63.
- LI Shaoqing, WANG Xuedong, ZHANG Yuxin, et al. The scanning electron beam processing technology based on programmable control[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(7): 59-63.
- [12] 杨波,代建辉,左从进,等.控制电子束高频偏转扫描的电磁系统仿真及设计[J].航空制造技术,2015(S1):87-90.
- YANG Bo, DAI Jianhui, ZUO Congjin, et al. The simulation and design of electromagnetism system for electron beam control with high frequency scan[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(S1): 87-90.

通讯作者:张伟,博士、讲师、硕士生导师,研究方向为特种电源, E-mail: zhangweih@buaa.edu.cn

(责编 铃兰)

(上接第88页)

blade based on orthogonal experimental design[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(2): 376-384.

[7] 杨剑秋,王延荣.空心风扇叶片结构优化设计方法及程序实现[J].航空动力学报,2012,27(1):97-103.

YANG Jianqiu, WANG Yanrong. Structural design optimization method and program implementation for a hollow fan blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(1): 97-103.

[8] 纪福森,丁拳,李惠莲.某结构空心风扇叶片设计与分析[J].航空发动机,2013,39(4):42-44,66.

Ji Fusen, DING Quan, LI Huilian. Design and analysis of hollow fan blade structure[J]. Aeroengine, 2013, 39(4): 42-44,66.

[9] WEI D S, WANG Y R, YANG X G. Analysis of failure behaviors of dovetail assemblies due to high gradient stress under contact loading[J]. Engineering Failure Analysis, 2011,18: 314-324.

[10] GOLDEN P J, NICHOLAS T. The effect of angle on dovetail fretting experiments in Ti-6Al-4V[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2005, 28: 1169-1175.

通讯作者:王家广,工程师,研究方向为民用航空发动机风扇增压级结构, E-mail: jiaguang\_wang@163.com.

(责编 铃兰)