基于亥姆霍兹线圈的电子束偏转 扫描技术研究



路开通^{1,2}, 许海鹰^{1,*}, 彭勇² 1. 中国航空制造技术研究院 高能束流发生器实验室, 北京 100024 2. 南京理工大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210094

摘 要:针对电子束偏转扫描频率低以及扫描线圈磁场不均匀的问题,研究了电子束在磁场中的运动原理,设计了基于亥姆 霍兹线圈的电子束偏转扫描线圈,并研究了相应的驱动电路。由电子枪的结构尺寸及亥姆霍兹线圈的基本原理设计了扫描 线圈,由电子枪加速电压、工作距离及所需偏转范围确定了所需磁场强度,并进一步计算了安匝数。设计了基于PID控制的 高频扫描驱动电路。结果表明,所设计的电子束偏转扫描线圈的磁场强度均匀性高,其驱动电路性能稳定,流过扫描线圈 3A 电流高达 30kHz。

关键词:亥姆霍兹,电子束,扫描,驱动电路,闭环控制

中图分类号:TP211+.4 文献标识码:A

航空、航天、船舶、电力和石化等现代工业高端装备正 在向大型化、高可靠性、长寿命服役的方向快速发展,其关 键金属构件结构日益复杂,性能要求日益提高印。利用传统 的铸、锻、焊等制造技术,不仅需要重型铸造、锻造和机加工 设备及大型模具,而且材料切削量大利用率低、生产周期 长、制造成本高。电子束熔丝增材制造是一种采用高能电 子束作为热源,通过熔融丝料,逐层堆积,实现构件无模成 形的制造技术,具有功率高、效率高、无反射、能量利用率 高、成形质量好、真空环境下防止零件氧化等优点,可实现 复杂零部件的高效快速成形,在航空航天、能源、船舶等领 域有非常广泛的应用前景[2]。但电子束熔丝增材制造过程 中因热输入不均匀而产生热应力,进而导致零件变形的问 题尤为突出[3~6]。利用电子束高频偏转扫描技术可将电子 束由点热源高频扫描成面热源,实现热输入量的均匀化,在 电子束熔丝增材制造的同时实现预热、缓冷和辅助热处理, 解决增材制造过程中零件变形问题,对电子束熔丝增材制 造的质量和效率的提高具有重要意义。

DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2019.07.012

当前,电子束高频偏转扫描技术已得到了广泛应用,如 多束流焊接、电子束"毛化"、电子束表面合金化等^[7-10]。国 外一些著名电子束加工设备研制单位,如英国压缩机阀生 产公司(CVE)、英国焊接研究所(TWI)、德国PTR公司 (PTR)等均对高频电子束偏转扫描技术进行了深入研究, 并得到工程化应用^[11]。国内相关研究起步较晚,所研制的 电子束高频偏转扫描技术与国外还存在一定差距。

亥姆霍兹线圈没有磁芯,因而具有较低的电感量,其特殊的结构使其在一定范围内能产生高均匀磁场。本文基于 亥姆霍兹线圈原理设计扫描线圈,并研究了相应的驱动电路,获得高达30kHz的扫描电流波形。

1 扫描线圈的设计

由电子枪射出的高速电子束垂直进入扫描线圈产生的 磁场中,受洛伦兹力作用,其运动方向而产生偏转,如图1 所示,d为磁场厚度,θ为偏转角度,L为偏转距离,S为电子 束工作距离。

收稿日期:2019-04-30;退修日期:2019-06-14;录用日期:2019-06-20

^{*}通信作者. Tel.: 13911460829 E-mail: xhyxhy@126.com

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB1103101);国家自然科学基金(5177052649)

引用格式: Lu Kaitong, Xu Haiying, Peng Yong.Research of electron beam deflection scanning coil based on helmholtz coil[J].Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(07): 73-79. 路开通, 许海鹰, 彭勇.基于亥姆霍兹线圈的电子束偏转扫描技术研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(07): 73-79.





由于电子束熔丝增材制造在真空室中进行,不存在对 流换热,工件的热量只能通过与基板热传导以及空间热辐 射的方式传递,因此,在扫描线圈磁场高频变化时,电子束 高频扫描,基于金属的热惯性,频率达到一定值时,点热源 即为面热源。

若磁场区域足够大,则电子在磁场中将做匀速圆周运动,半径为*R*。根据洛伦兹力公式、能量守恒定律,以及圆周运动规律和几何关系,可得:

$$B = \frac{\sin\theta}{d} \cdot \sqrt{\frac{2mU}{q}} \tag{1}$$

式中:m为电子质量,q为电子电荷量,已知电子荷质比q/m= 1.758×10¹¹C/kg,U为电子加速电压,已知U=60kV,根据电子枪及真空室结构设计扫描线圈磁场厚度d=80mm, θ 较小时, $\sin\theta \approx \tan\theta = L/S = 50$ mm/500mm=0.1。计算得所需磁场强度 $B \approx 1.03$ mT。

根据全电流定理和磁路欧姆定律可得线圈中电流与之 产生的磁场的关系式为:

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

式中:N为线圈匝数;I为线圈中电流值;k为线圈形状因子, 此处取1;B为磁场强度;a为高度偏转因子,设计线圈中假 设磁力线在高度方向没有分量,即a=0; β 为水平因子,取值 90°;a为一对线圈之间的距离,根据电子枪结构尺寸设计a=40mm; μ_0 为真空中的磁导率, $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ 。计算得所需安 匝数NI=103。

1.1 亥姆霍兹线圈

亥姆霍兹线圈为一对相同、共轴、相互平行且绕有相同 匝数、通电电流大小和方向均相同且距离等于其半径的圆 形线圈。亥姆霍兹线圈不含磁芯,电感量较小,对电流响应 速率较高;其特殊的结构能在其内部产生均匀度较高的磁 场,如图2所示。



图2 亥姆霍兹线圈示意图 Fig. 2 Schematic diagram of Helmholtz coil

经过不断研究发现,亥姆霍兹线圈已不仅限于圆形,正 方形和矩形结构也可在一定区域产生匀强磁场,正方形更 适应于实际结构的设计加工以及工程研究。

1.2 扫描线圈的结构设计

基于亥姆霍兹线圈的基本结构及电子枪结构尺寸,设 计两对完全相同的正方形线圈,边长为80mm,每对线圈间 距为40mm,如图3所示。



Fig. 3 Coil structure

为使扫描线圈稳定工作,需稳定的安装固定扫描线圈, 为此设计了具有上述线圈结构的线圈骨架以支撑扫描线 圈。骨架材料选用绝缘胶木,结构如图4所示。

1.3 扫描线圈的参数确定

线圈中的电感量是影响其工作频率的关键因素。线圈 电感量遵循以下公式:



Fig. 4 Coil skeleton structure

$L=DN^{2}k$

式中:D为线圈直径,N为线圈匝数,k为形状因子。前文所 述线圈直径D已确定,因此形状因子也已确定,故线圈电感 由线圈匝数确定。由式(2)计算得知所需安匝数*NI*=103, 所需电流与线圈匝数及其电感量的关系见表1,其中线圈由 直径0.65mm的漆包线绕制,其电感由电容电感表LC200A 测得。

表1 线圈电流与匝数和电感的关系

Table 1 Relationship between coil current and turns and inductance

电流/A	每对匝数	单边匝数	电感/µH
2	52	26	340
3	35	18	163
4	26	13	88
5	21	11	61

考虑到驱动电流过大时线圈发热较严重以及驱动电路 驱动能力的问题,并考虑实际电感量的值,取*I=*3A,则单边 匝数18。

为减小线圈中高频变换的电流所产生的电流趋肤效应 的影响,降低损耗,采用多股漆包线绕制线圈。

单边匝数为18的线圈其电感量与漆包线股数的关系 见表2。

表2 线圈漆包线股数和与电感的关系

Table 2 Coil enameled strand number and relationship with inductance

漆包线股数	电感量/μH	
1	163	
2	136	
3	112	
4	108	

由表2中数据可以发现,漆包线股数从3股增加到4股时,线圈电量减小已不是很明显,并考虑到绕制后线圈的宽度以及厚度等因素,漆包线股数不能过多,因此选用4股漆包线绕制线圈。

所设计线圈具有以下参数:

(1)扫描线圈由两对相同、共轴、相互平行且绕有相同 匝数、通电电流大小和方向均相同的正方形线圈构成。

(2) 线圈边长 *d*=80mm,每对线圈之间距离 *a=d/2=*40mm,线径 φ=0.65,4 股同时绕制。

2 扫描线圈的磁场测试

由于两组线圈完全相同,故选用其中一组线圈测试 其磁场强度。以两个线圈空间中心为坐标原点,选取15 个关键点测量其磁场强度,15个测试点的坐标见表3。

表3 所测点的坐标 Table 3 Coordinates of the measured points

序号	坐标(x,y,z)/mm	序号	坐标(x,y,z)/mm
1	(-10,10,-40)	2	(-10,10,0)
3	(-10,10,40)	4	(10,10,-40)
5	(10,10,0)	6	(10,10,40)
7	(-10,-10,-40)	8	(-10,-10,0)
9	(-10,-10,40)	10	(10,-10,-40)
11	(10,-10,0)	12	(10,-10,40)
13	(0,0,-40)	14	(0,0,0)
15	(0,0,40)	_	

采用德国 COLIY G92 手持式高斯计(25℃时精度为 ±0.5%,分辨力为0.1G,1T=10⁴G)对各点进行测量,当扫描 线圈中通有3A电流时,各被测点的磁场强度对应的高斯值 如图5所示。

由图5可知,描线圈内部所测各点磁感应强度均不小于1.1mT,最大差值为0.18mT,扫描线圈内部磁场强度分布 较均匀,能够满足电子束高频偏转扫描时所需要的磁场强 度和磁场均匀性。

3 高频扫描线圈驱动电路研究

高频扫描线圈驱动电路主要由外环PID控制电路和功 率放大芯片组成。利用正负电源供电,驱动电路可提供正、 负交变电压,在线圈中产生高频变换的电流,使得电子束在 高频变换的电流所产生的高频变换磁场中快速扫描。



图5 测试点的磁感应强度曲线分布图

Fig. 5 Magnetic induction curve distribution of test points

3.1 驱动电路的设计

线圈通电的某一瞬间,其等效电路如图6所示。



图6 驱动电路驱动线圈等效电路



在图6中,*R*为扫描线圈等效内阻,*L*为扫描线圈电感, *U*为该时刻电压,由此可列方程:

 $U = Ri + L \cdot di/dt$

(

式中:i为流过线圈的电流,由此可知电流变化率di/dt为:

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = \frac{U - Ri}{L} \tag{3}$$

线圈内阻通常很小,线圈电感在线圈制作完成后已 确定不变,因此,当驱动电压远大于扫描线圈的自感电 动势时,方能得到较大的电流变化率,进而得到高频变 化的磁场。

外环PID控制电路包括输入信号放大模块(见图7)、反 馈信号放大模块(见图8)、反馈系统差分比例运算放大模块 (见图9)、一级放大电路(见图10)。

经U1A放大的输入信号接入差分电路的同相输入端, 经U1B放大的反馈信号接入差分电路的反相输入端,经差 分运算后输出至后续电路。

由 U2A 输出的差分信号接入一级放大电路的同相输入端,经放大后接入后续两个功率放大芯片模块 OPA 548。



图7 输入信号放大模块





图8 反馈信号放大模块





图9 反馈系统差分比例运算放大模块



如图11和图12所示。

两个功率放大芯片分别从正端和负端输入,输出分别



图 10 一级放大电路 Fig. 10 Primary amplifier circuit



图 11 功率放大模块 1 Fig. 11 Power amplifier module 1



Fig. 12 Power amplification module 2

接在扫描线圈的两端,输出能力增强一倍,以实现电流高速 变化率的目的。同时将霍尔电流传感器串入线圈,反馈信 号接入反馈信号放大模块U1B的同向输入端,形成闭环反 馈控制电路,使系统稳定,在线圈中串入取样电阻5Ω,用以 检测其两端电压波形进而推断线圈中电流波形,如图13 所示。



图 13 负载驱动及反馈模块 Fig. 13 Load drive and feedback module

3.2 **驱动电路测试**

将所设计的扫描线圈接入驱动电路,信号发生器接入驱动电路的信号输入端,输入不同频率的方波以测试驱动电路的性能。示波器的通道1接驱动电路输入端,以检测输入波形,通道2接输出端取样电阻两端,用以检测其两端电压波形,由于取样电阻阻值已知,故可反推线圈中电流波形。

经测试,在输入信号为30kHz、±5V时,输出电压可达 到±15V高速变化。由于取样电阻为5Ω,所以此时负载线 圈中通过3A以30kHz高速变化的电流,电流大小和频率达 到预期,波形图如图14所示。

由波形图可知,虽然输出波形有一定的畸变,但其仍 能达到相应的幅值并高速变化,其上升沿和下降沿时间



图 14 测试波形图 Fig.14 Test waveform

均为17µs。

4 结论

通过分析,可以得出以下结论:

(1)基于亥姆霍兹线圈基本原理,针对电子枪的结构及 尺寸,设计了低一种感抗、能实现大电流变化率的电子束偏 转扫描线圈。

(2)设计的扫描线圈各点磁场强度值均满足要求,最大 差值为0.18mT,具有较好的磁场均匀性。

(3)基于PID 控制器的闭环自动控制原理设计了偏转 扫描驱动电路,驱动所研制线圈,线圈中电流能够达到3A、30kHz 高速变化,电流上升沿下降沿时间均为17μs。 **ΔST**

参考文献

 [1] 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 rapid manufacturing technology for electron beam fused deposition[J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(2): 7-11. (in Chinese)

[2] 赵攀峰, 刘方军, 张伟. 电子束高频偏转扫描线圈的设计与仿 真[J]. 航空制造技术, 2019,62(3):75-80.

Zhao Panfeng, Liu Fangjun, Zhang Wei. Design and simulation of electron beam high frequency deflection scanning coil[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2019, 62(3): 75-80. (in Chinese)

- [3] Wanjara P, Brochu M, Jahazi M. Electron beam free forming of stainless steel using solid wire feed[J]. Materials & Design,2007,28(8):2278-2286.(in Chinese)
- [4] 齐海波,林峰,颜永年,等.316L不锈钢粉末的电子束选区熔
 化成形[J].清华大学学报:自然科学版,2007,47(11):1941-1944.

Qi Haibo, Lin Feng, Yan Yongnian, et al. Electron beam selective melting forming of 316L stainless steel powder[J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition, 2007, 47(11): 1941-1944.(in Chinese)

 [5] 韩建栋,林峰,齐海波,等.粉末预热对电子束选区熔化成形 工艺的影响[J]. 焊接学报,2008,29(10):77-80.
 Han Jiandong, Lin Feng, Qi Haibo, et al. Effect of powder preheating on the melt forming process of electron beam selective zone[J]. Transactions of the China Welding Society, 2008, 29(10): 77-80.(in Chinese)

- [6] 郭超,林峰,葛文君.电子束选区熔化成形316L不锈钢的工 艺研究[J]. 机械工程学报,2014,50(21):152-158.
 Guo Chao, Lin Feng, Ge Wenjun. Study on the process of melting and forming 316L stainless steel by electron beam selection[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(21): 152-158.(in Chinese)
- [7] Claub U, Neukirchen D. Industrial electron beam applications
 [C]// International Electron Beam Welding Conference, Aachen:2012:11-13.(in Chinese)
- [8] Schultz H.Electron beam welding[M]. England: Abingdon Publishing, 1993.(in Chinese)
- [9] 王之康,高永华,徐宾.真空电子束焊接设备及工艺[M]. 北京:原子能出版社,1990.
 Wang Zhikang, Gao Yonghua, Xu Bin. Vacuum electron beam welding equipment and process [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990.(in Chinese)
- [10] Claub U, Bull J. Fast beam deflection and beam quality- keys to economic high quality electron beam applications[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011,40(s4):90-94.
- [11] 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, 58(s1):87-90.
 Yang Bo, Dai Jianhui, Zuo Congjin, et al. Simulation and design of electromagnetic system for controlling electron beam high-frequency deflection scanning[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2015, 58(s1): 87-90. (in Chinese)

(责任编辑 陈东晓)

作者简介

路开通(1993-)男,硕士研究生。主要研究方向:电子束 控制技术。 Tel:18761690221 E-mail:18761690221@163.com 许海鹰(1973-)男,博士,研究员。主要研究方向:电子束 源技术。 Tel:13911460829 E-mail:xhyxhy@126.com 彭勇(1984-)男,副教授,硕士研究生导师。主要研究方 向:高能束流品质测试评价。 Tel:18013800901 E-mail:ypengnj@163.com

Research of Electron Beam Deflection Scanning Coil Based on Helmholtz Coil

Lu Kaitong^{1,2}, Xu Haiying^{1,*}, Peng Yong²

1. High Energy Beam Generator Lab. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China

2. School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Abstract: Aiming at the problem of low scanning frequency of electron beam deflection and non-uniform magnetic field of scanning coil, the principle of electron beam motion in magnetic field is studied. The electron beam deflection scanning coil based on Helmholtz coil is designed and the corresponding driving circuit is studied. The scanning coil is designed by the structural dimensions of the electron gun and the basic principle of the Helmholtz coil. The required magnetic field strength is determined by the electron gun acceleration voltage, the working distance and the required deflection range, and the number of ampere turns is further calculated. A high frequency scanning drive circuit based on PID control is designed. The results show that the designed electron beam deflection scanning coil has high magnetic field intensity uniformity, and its driving circuit performance is stable, and the current flowing through the scanning coil 3A is as high as 30kHz.

Key Words: Helmholtz; electron beam; scanning; drive circuits; closed-loop control

Received: 2019-04-30; Revised: 2019-06-14; Accepted: 2019-06-20

*Foundation item: National Key R&D Program of China (2017YFB1103101);National Natural Science Foundation of China(5177052649)

*Corresponding author.Tel. :13911460829 E-mail: xhyxhy@126.com