

控制电子束高频偏转扫描的电磁系统仿真及设计

Simulation and Design of Electromagnetism System for Electron Beam Control With High Frequency Scan

中航工业北京航空制造工程研究所
高能束流加工技术重点实验室

杨波 代建辉 左从进 许海鹰

[摘要] 采用 ANSYS 模拟软件对多极靴偏转线圈结构及其参数进行了仿真,结果表明:极靴越多,线圈中间的空间磁场越均匀。综合考虑线圈的磁场分布、加工难度、制作成本等因素,设计了以铁氧体为磁芯材料的十二极靴偏转线圈,并检测了该偏转线圈的高频响应特性,试验结果表明,所研制线圈可以在 100kHz 以上的高频工作。

关键词: 电子束 偏转扫描 电磁系统 仿真

[ABSTRACT] The structure and parameters of the multiple-pole-shoe deflecting coil are simulated with ANSYS. And the consequence of simulation indicates that the magnetic fields in the center of coil are more symmetrically distributed while the number of pole shoes is increased. Taking into account the distribution of magnetic fields of the coil, difficulty of processes and fabricating cost, the twelve-pole-shoe coil with the magnetic core made of ferrite is designed. And its high frequency response character is tested. The result shows that the designed coil can be used in the high frequency situation of more than 100 kHz.

Keywords: Electron beam Deflection scan Electromagnetism system Simulation

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S1.087

当前,电子束高频偏转扫描技术已得到了广泛应用^[1-3],如多束流焊接、电子束“毛化”、电子束表面合金化等。电子束高频偏转扫描加工技术的核心是利用了磁场产生的洛伦兹力对电子束作用。电子束垂直穿过高频变化的磁场时,可使电子束流在工件表面的不同位置以极高的频率进行切换,由于材料的热惯性,通过束流与材料的相互作用,在这些位置就会同时产生冶金效果。电子束高频偏转扫描可精确控制电子束输入能量,提高加工质量。

国外一些著名电子束加工设备研制单位 CVE、

TWI、PTR 等均对高频电子束偏转扫描技术进行了深入研究,其中德国 SST 所研制的电子束偏转扫描控制系统的频率已经达到了 200kHz。相对而言,国内对电子束偏转扫描控制技术的研究还不够深入。受到所选用电路、偏转线圈结构材料的限制,目前国内所研制偏转扫描电路的工作频率徘徊在 1kHz,偏转角 $\pm 3^\circ$ 左右。

偏转线圈作为扫描电源的负载,其高频响应特性直接影响了扫描系统的性能,因此根据高频偏转扫描系统的需求,对多极靴线圈结构进行仿真,以获得能够高频响应且磁场均匀的线圈结构。

1 偏转线圈仿真

1.1 磁芯材料选择

偏转线圈是电子束高频偏转扫描系统的最终负载,也是直接影响系统性能的关键因素,其磁场的分布对束流的偏转效果影响很大,因此,需要对它的结构和特性进行深入的研究。偏转线圈工作时,随着扫描频率的提高,将引起铜线和磁芯中的能量损耗增大、工作温度上升,这会导致偏转线圈所用材料、元件的绝缘性能降低;温度升高,反过来又使磁芯损耗增大,从而对电磁性能产生不利的影响;当温度上升到磁性材料的居里点时,磁导率迅速下降将导致偏转失效^[4]。因此,磁性材料的选择是否优越对以偏转线圈为负载的扫描系统能否达到高频具有重要意义。

与坡莫合金、磁粉材料相比,铁氧体磁芯最大的特点是具有较高的电阻率,可以最大限度抑制涡流的产生,这使得铁氧体磁性材料在高频领域有着广泛的应用空间。铁氧体磁芯高频损耗低,具有满足偏转线圈要求的磁导率和磁饱和^[4-5],因此选用铁氧体磁芯作为偏转线圈的磁芯。

1.2 偏转线圈结构及其参数选择

为了获得均匀性较好的磁场,考虑采用多极靴结构的线圈。多极靴结构是在双极靴结构的基础上,参考其他行业的线圈结构(定子线圈)提出的一种可提高其产生磁场均匀性的结构方式^[5],其中极靴是放置在磁极处

* 科技重大专项(2010ZX04007-041)资助。

用来约束磁束的分布及改变其流向的磁性材料。图1是多极靴线圈结构的示意图。

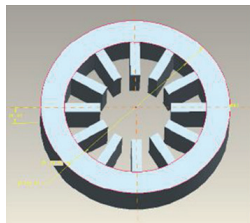


图1 多极靴线圈结构示意图

Fig.1 Diagram of multi-pole-shoe coil

多极靴结构的线圈由于结构形式较多,磁场分布比较复杂,单纯地通过手工计算确定相关的结构参数难度很大,以往都是凭经验或者给出足够的余量进行设计,更无法预测线圈磁场的分布。为了验证多极靴结构能否提高其产生磁场的均匀性,方便偏转线圈结构的设计及参数的优化,下面将针对四极靴、十二极靴以及二十四极靴的线圈,借助于 ANSYS 模拟软件对偏转线圈进行三维静态电磁场分析。

1.2.1 磁芯实体模型建立

根据电子枪内腔的实际尺寸,使用 AutoCAD 对偏转线圈建模。其中线圈的外环半径为 70mm,内环为 50mm,线圈厚度为 45mm,极靴长为 20mm,极靴宽为 8mm。通过选择三维实体的方式输出 .sat 文件,然后在 ANSYS 软件导入 .sat 文件。建立的偏转线圈结构模型如图 2 所示。

由于线圈并不是在完全真空条件下工作的,考虑到线圈在稀薄空气中的漏磁,因此要对空气进行建模。磁芯周围空气场模型如图 3 所示。

磁芯材料选用确定的铁氧体,设置材料参考编号为 1,相对磁导率为 1.00 的空气设置材料参考编号为 2。

1.2.2 单元选择及网格划分

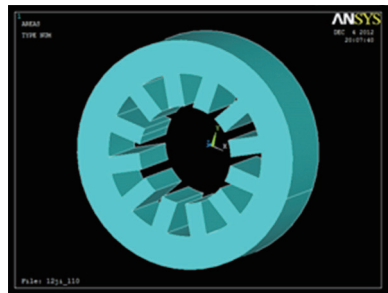
在图 3 中,空气场可以划分为近端空气场与远端空气场。与线圈接触的一薄层空气为近端空气场,可以选择适用于三维四面体,10 个节点,自由度为位移、电势、磁标量位、温度等耦合场的 SOLID98 作为单元类型;以外的单元为远端空气场,可以选择适用于三维四边形、自由度为磁标量位及温度的 INFIN47 作为单元类型。磁芯实体使用 SOLID98 单元进行划分,线圈单元则采用微元单元 SOURCE36 建模。网格划分后的线圈及空气如图 4 所示。

1.2.3 求解与仿真结构分析

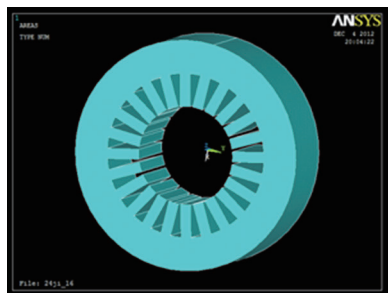
由于线圈在真空中的漏磁相对于磁芯内部小很多,到了边缘部分已经接近零,因此,边界垂直条件加载在空气表面上的效果与完全不加载边界条件一样。负载



(a) 四极靴结构模型



(b) 十二极靴结构模型



(c) 二十四极靴结构模型

图2 偏转线圈结构模型

Fig.2 Model for structure of deflection coil

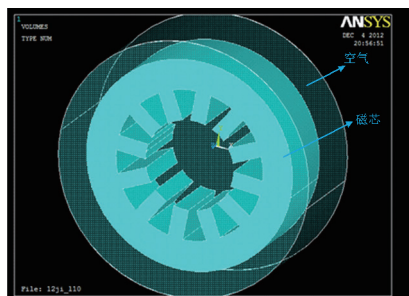


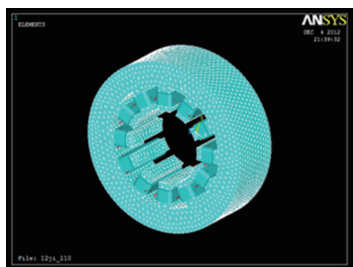
图3 磁芯周围稀薄空气场模型

Fig.3 Model of rare air surrounding the magnetic core

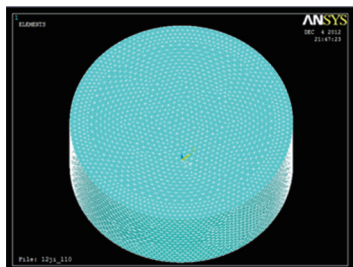
采用跑道型线圈加载,线圈通入电流为一恒定值。线圈为 30 匝,厚度 2mm,长度 10mm。

由于线圈中在某一时刻通入的电流为恒定值,因此选择 Static 静态求解;又因为本线圈不能为电流源所产生的磁通量提供闭合回路的铁区,所以是单连通,使用 DSP 法求解即可。

图 5 是对四极靴线圈、十二极靴线圈、二十四极靴



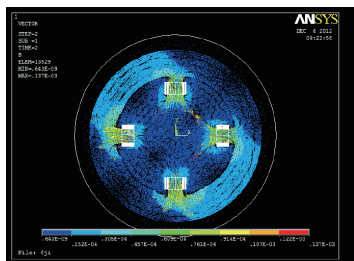
(a) 磁芯模型网络划分



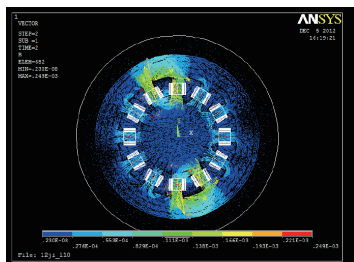
(b) 空气模型网络划分

图4 线圈模型及网络划分

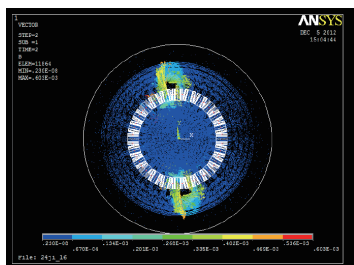
Fig.4 Coil model and mesh generation



(a) 四极靴线圈磁场分布



(b) 十二极靴线圈磁场分布



(c) 二十四极靴线圈磁场分布

图5 多极靴偏转线圈磁场仿真结果

Fig.5 Magnetic simulation consequence of multi-pole-shoe deflection coil

线圈进行静磁场仿真后得到的内部及空间的磁场分布状况。由仿真结果可以直观地看出包括空间磁场和磁芯内部的整个电磁场在内线圈磁场分布,其中线圈的外部环芯部分主要起形成磁场回路及磁场屏蔽的作用,而处于线圈中心位置的空间磁场主要由极靴产生。从图5中还可以看出分布在多极靴结构磁芯内部的磁场较强,而空间磁场(漏磁)则较弱。磁芯内部的磁场强度也并不一样,在最邻近的N极和S极处形成闭合回路,产生较强的磁场。其他的闭合回路相对较弱,而且每对磁极产生的磁场在线圈中心的空进行迭加,产生较为均匀的磁场。从仿真结果可以直观地看出,随着电磁线圈极靴数量的增加,线圈磁场越来越均匀,也就是说增加线圈极靴的数量可以使线圈中心空间磁场更均匀。

但是,随着线圈数目的增加,磁芯的加工难度也会大大增加,线圈成本也会增加。因此,通过对线圈磁场分布、加工难度、制作成本等因素的综合考虑,选择了十二极靴的磁芯作为所研制电子束高频偏转系统中线圈的磁芯。

2 偏转线圈设计

所设计的偏转线圈绕线方式如图6所示。设计的环形多极靴形偏转线圈共12个极靴,分为2组,即X方向线圈和Y方向线圈。每组6个极靴,N极3个,S极3个,相邻的同方向线圈绕法相同,与之相对应的极靴绕线方向相反,形成对应的S极。Y方向绕线方法和X方向完全相同。

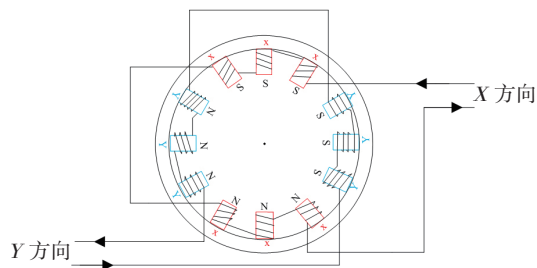


图6 线圈绕线方式示意图

Fig.6 Diagram for winding way of coil

据能量守恒定律和洛伦兹力公式可得最大磁感应强度:

$$B = \frac{\sin \theta \cdot \sqrt{\frac{2m}{q}} \cdot \sqrt{E_a}}{h} = 3.37 \times 10^{-6} \cdot \frac{\sin \theta \cdot \sqrt{E_a}}{h}, \quad (1)$$

式中, E_a 为电子加速电压,等于 150kV; θ 为电子束偏转角度,取 3° ; $\frac{m}{q}$ 为电子的荷质比; h 为磁场的有效厚度,取 45mm。计算所需最大磁感应强度: $B=2.5\text{mT}$ 。

对于带极靴的环形线圈,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^[6]:

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

式中, I 为电流强度; N 为线圈的匝数; H 为磁场强度; L 为磁路长度; B_x 为 X 向线圈的磁感应强度; k 为线圈的形状因子,对于特定的线圈为定值; α 和 β 为高度方向和水平方向的半张角; d 为线圈的内径; μ_0 为真空中的磁导率。

对于所设计的线圈,由于极靴数为 12,取 $k=1$, $\alpha=0$, $\beta=30^\circ$, $d=0.03\text{m}$,代入式(2)求解得 $NI=15B_x \times 10^5$ 。3 对极靴为一组,2 对与 X 轴成 30° 角的在 X 轴方向上的分量是 $2 \times \frac{B}{1+\sqrt{3}}$ 。当 $I=2\text{A}$ 时,偏转角度可达 3° ,此时 $N=68$ 匝,每个极靴上是 23 匝。

所设计偏转线圈允许通过的电流 $\leq 5\text{A}$,可以采用多根细导线并联使用的方法来代替单根粗导线。但是随着导线直径的减小,直流电阻有所增加,考虑到导线的集肤效应,设计线圈中采用 $2 \times 0.5\text{mm}$ 的 2 根导线并联使用。 X 方向线圈的电感为 $160.0 \mu\text{H}$,电阻为 0.70Ω , Y 方向线圈的电感为 $160.8 \mu\text{H}$,电阻为 0.70Ω 。线圈的外环半径为 70mm ,内环为 50mm ,线圈厚度为 45mm ;极靴长为 20mm ,宽 8mm 。

3 试验结果及分析

测试条件:工作电压 $+24\text{V}$ 电流采样传感器为 CHB-25NP,采样电阻为 200Ω ,变比 1:500,检测示波器 TPS2024。

采用研制的高频偏转线圈,结合所设计的电子束高频偏转电源,检测流过线圈中的电流波形。

从图 7 可以看出,在扫描频率 120kHz 时,所研制偏转扫描电路仍具有较高的电流变化率,但是受到工作电压等的限制,电流输出波形还未能实现理想的陡峭上升、下降沿输出。因此,还需要从电源设计角度入手,提

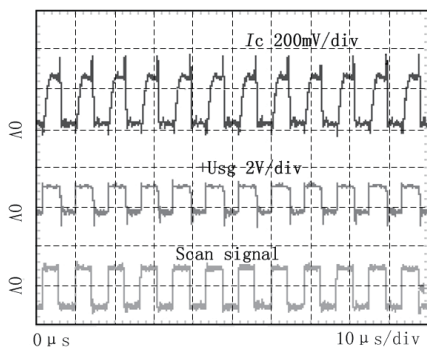


图7 扫描频率120kHz线圈中的电流

Fig.7 Current of coil in scan frequency of 120kHz

高频状态下的电流变化率。

4 结束语

(1)使用 ANSYS 软件对线圈进行三维静态电磁场仿真,结果表明:多极靴结构的偏转线圈中间可以产生较为均匀的磁场,而且极靴越多,线圈中间的空间磁场越均匀。

(2)所设计的十二极靴的高频偏转线圈可以在 120kHz 的高频工作。

参考文献

- [1] U. Clauβ, Neukirchen/D. Industrial electron beam applications. International Electron Beam Welding Conference, Aachen:2012:11-13.
- [2] Schultz H, Electron beam welding. England: Abington Publishing, 1993:2-4.
- [3] 王之康,高永华,徐宾.真空电子束焊接设备及工艺.北京:原子能出版社,1990:57-58.
- [4] 赵修科.开关电源中的磁性元器件[D].南京:南京航空航天大学自动化学院,2004.
- [5] 王西昌,赵海燕,左从进,等.多束电子束扫描线圈电磁场的数值分析,新工艺新技术,2008(10):15-18.
- [6] 胡虔生,胡敏强.电机学.北京:中国电力出版社,2007.

(责编 谷雨)

(上接第 79 页)

4 结论

实现装配工装参数化设计可以加快飞机装配仿真和装配工装设计的速度,缩短飞机装配仿真周期。本文利用 CATIA 实现了飞机装配仿真中装配工装的参数化设计,以面向飞机装配仿真验证为目的,提出了基于表格驱动的工装参数化方法,得到工装组件中各零件参数化需要的独立参数,通过输入几个关键参数,就可以在 CATIA 中自动生成装配工装的实体模型,用于进行装配仿真验证,这大大减轻了设计者的工作量,并且使设计者的效率明显提高,为飞机装配仿真验证后飞机工装的快速迭代与修改提供有利手段。

参考文献

- [1] 朱春生,廖文和,李迎光.飞机工装标准件库关键技术研究.机械制造与自动化,2007,36(1):71-73.
- [2] 鲁玉峰,周华锋.基于 UG/ CAD 工装设计参数化与模块化方法的研究.中国制造业信息化,2009,38(17):18-21.
- [3] 杨晓浪,曹增强,吴建军.基于 CATIA 的数字化标准工装库系统的开发.航空制造技术,2010(13):89-93.
- [4] 李庆利,安鲁陵.飞机装配工装组件库与快速装配设计技术.南京航空航天大学学报,2012,44:6-8.

(责编 谷雨)