

文章编号 : 1672-2892(2010)01-0101-05

## 用于 LIA 强流脉冲电子束能谱测量的磁分析器设计

杨国君, 李成刚, 张 卓, 李 勤

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 为了测量一台直线感应加速器输出的强流脉冲电子束的能谱宽度, 开展了磁分析器的设计研究工作。从磁分析器测试能谱的原理出发, 根据被测对象以及测试的一些基本条件提出了磁分析器的基本参数, 据此进行了磁铁的理论设计, 利用 Vector Fields 公司的 Opera3D/Tosca 软件对磁铁进行了三维仿真计算, 并对理论设计的结果进行了优化。设计得到的磁分析器为 C 型磁铁, 偏转半径 300 mm, 硬边近似后偏转角度  $60^\circ$ , 磁极间隙 30 mm, 好场区宽度 65.4 mm。磁分析器的设计结果很好地满足了物理需求。

**关键词:** 直线感应加速器; 强流脉冲电子束; 能谱; 磁分析器

中图分类号: TN14; TL501.5

文献标识码: A

## Design of a magnetic analyzer for the measurement of energy spectrum of pulsed intense electron beam

YANG Guo-jun, LI Cheng-gang, ZHANG Zhuo, LI Qin

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

**Abstract:** A magnetic analyzer was designed to measure the energy spectrum of the pulsed intense electron beam of a Linear Induction Accelerator(LIA). The principle of magnetic analyzer was described. The basic parameters were set based on the accelerator and some test conditions. The magnet was designed theoretically according to these parameters. 3-D simulation and optimization of this design were performed using Opera/Tosca software from Vector Fields Co. The final parameters of this magnetic analyzer were obtained. The magnetic analyzer was C-shape, with the bending radius of 300 mm and the bending angle of  $60^\circ$  after hard-edge approximation, and the width of good-field-region was 6.54 cm. Results of the design satisfy the physical requirement very well.

**Key word:** linear induction accelerator; pulsed intense electron beam; energy spectrum; magnetic analyzer

电子束的能谱宽度是表征加速器总体性能的重要参数, 在直线感应加速器(LIA)的研制中, 这个参数直接关系到加速器能否达到设计指标<sup>[1]</sup>。一般采用磁分析器系统测量电子束的能量和能谱宽度。为了建立磁分析器测量系统, 本文开展了磁分析器的设计研究工作。

### 1 能谱测量的要求

LIA 输出的强流脉冲电子束的能量约 20 MeV, 流强约 2.5 kA, 能谱宽度估计约为 1%~2%。能谱宽度测量设备的测量相对精度应该比束流实际能谱宽度高一个量级, 因此磁分析器本身的测量相对精度需要达到 0.1%量级。测量装置应该满足实验操作的要求。

### 2 磁分析器测试原理

电子在磁场中运动时, 满足以下运动规律:

收稿日期: 2009-08-19; 修回日期: 2009-09-14

基金项目: 国防科技基础研究基金资助项目

$$R = p / eB \quad (1)$$

式中： $p$  是电子动量； $e$  是电子电量； $B$  是磁感应强度； $R$  是偏转半径。

利用电子束在均匀磁场中的这种色散特性，可以测量电子束能谱。测量基本布置如图 1 所示<sup>[2]</sup>。

用狭缝预先对电子束进行准直。电子束经过磁场偏转后，由于色散特性，不同能量的电子将到达成像屏的不同位置，这样就可以实现能谱测量。

系统中狭缝位置为物平面，狭缝到磁铁边缘的距离  $l$  为物距；成像屏位置为像平面，成像屏到磁铁边缘的距离  $l'$  为像距。物距和像距满足一定的关系，一般可以根据 Barber 定则来确定，即物点、轨道偏转中心、像点满足三点共线的特征<sup>[3]</sup>。

在像平面上，不同能量的电子将具有不同的位置。为简化系统，考虑物距  $l$  与像距  $l'$  相等，利用漂移空间以及均匀磁场的传输矩阵进行计算，可以得到电子位置的表达式为：

$$\delta x = 2R(\Delta p / p) \quad (2)$$

式中  $\delta x$  是像平面上电子与标准能量电子的位置偏离。

能谱宽度的表达式为<sup>[1]</sup>：

$$\left( \frac{\Delta E}{E} \right)_{\max} = \pm \frac{\gamma_0 + 1}{\gamma_0} \frac{|x| + b/2}{2R} \quad (3)$$

式中： $b$  是准直狭缝宽度； $\gamma_0$  是标准能量电子的相对论能量因子； $|x|$  是电子在像平面相对于标准能量电子的位置偏离的最大值。

据此可以得到能量分辨率的表达式为：

$$\varepsilon = \Delta x / 2R \quad (4)$$

式中  $\Delta x$  是像平面上截面测量的绝对精度。

### 3 磁铁基本参数的确定

为便于能谱测量的实验操作，磁铁轮廓形状选择为 C 型。根据强流脉冲电子束诊断的工作经验，接收平面采用石英玻璃作为成像屏较为方便<sup>[4]</sup>。这种方法基于切伦柯夫辐射，其截面测量绝对精度大致为玻璃厚度的 2 倍。根据目前的加工工艺，面积较大时，石英玻璃厚度可以做到 0.3 mm。因此截面测量绝对精度为 0.6 mm。

已假定分析磁铁的测量相对精度为 0.1%，根据式(4)，磁铁偏转半径为 300 mm。假定能测量的最大能量为 25 MeV，设计磁铁中心平面的最大磁感应强度为 0.3 T。利用式(1)计算可知磁感应强度可以满足测试需求。

根据式(2)，分析磁铁的能量分辨率与偏角无关，可以缩小偏角，这样可以减小体积，方便使用。但是，根据 Barber 定则可见，偏角越小，物距和像距就越长，测量时需要增加漂移段长度，漂移段长度太大时实验操作十分不便，综合考虑两方面的因素，磁铁偏角设定为  $60^\circ$ ，磁极间隙取为 30 mm，可以满足电子束能谱测量的使用要求。

### 4 磁铁理论设计

一个有限长度的磁铁，其磁场在其端部不会立即终止，会向端部以外扩散，这样磁场在磁铁边缘有一定的延展。一般采用硬边近似，把延展的磁场等效为均匀磁场的一部分。

对于二极磁铁，等效长度定义为：

$$l_{\text{eff}} = \int B dl / B_0 \quad (5)$$

因此，磁铁机械长度比需要的磁场等效长度要短一些。根据大量磁铁研制的设计经验<sup>[5]</sup>，这个长度差别为  $\Delta l \approx (1.05 \sim 1.15)\delta$ ， $\delta$  即磁极间隙。这里初步取平均值  $1.10\delta$ ，得到  $\Delta l = 33 \text{ mm}$ 。实际取值将采用三维数值模拟的结果进行修正。

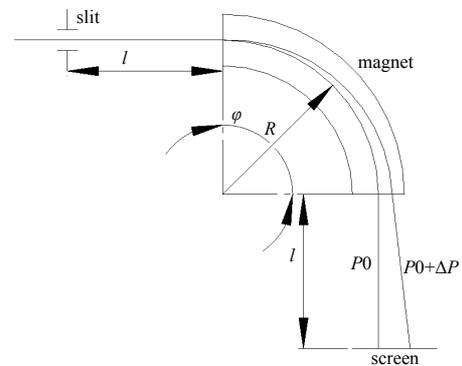


Fig.1 Simplified schematic of energy spectrum analysis  
图 1 能谱测量系统示意图

磁铁的两个磁极需要用磁轭加以连接,磁轭的截面积不能太小,以避免饱和。磁轭最少需要的截面积可以根据工作气隙磁通以及材料的磁特性进行估算,同时还需要考虑漏磁系数。根据经验,可以取磁轭中最大漏磁系数为 2.0。磁轭材料选用工业纯铁 DT4,根据 DT4 材料的磁特性曲线可知,当磁感应强度小于 1.6 T 时,铁芯工作在线性区,取磁轭最大工作磁感应强度为 1.4 T。

在保留余量的情况下,取磁轭的截面长度和宽度分别为 225 mm 和 100 mm。工作气隙消耗安匝数为:

$$NI = fB_0\delta / \mu_0 \quad (6)$$

式中: $f$ 为安培因子; $B_0$ 是磁感应强度; $\delta$ 是磁极间隙; $\mu_0$ 是真空磁导率。

根据经验,安培因子一般为 1.01~1.06。设计励磁安匝数为 6 400 A·Turn,可满足式(6)。

设计绕组总匝数为 1 000 匝,沿高度方向 50 匝,沿宽度方向 20 匝。计算得到绕组最大工作电流 6.4 A。

导线选用 A 级绝缘的双沙包线,裸铜线直径  $\Phi 2.63$  mm,绝缘后直径  $\Phi 2.96$  mm。根据经验,绕制时导线间隙的尺寸因子可以取为 1.09。这样可以得到绕组的总高度为 162 mm,宽度为 65 mm。容易计算得到导线的电流密度为  $1.24$  A/mm<sup>2</sup>。一般情况下如果自然冷却条件较好,电流密度在  $1.5$  A/mm<sup>2</sup> 以下时可以不加水冷<sup>[5]</sup>。此外本磁铁并非连续加载,因此不采用水冷措施。这样设计得到的磁铁三维模型如图 2 所示。

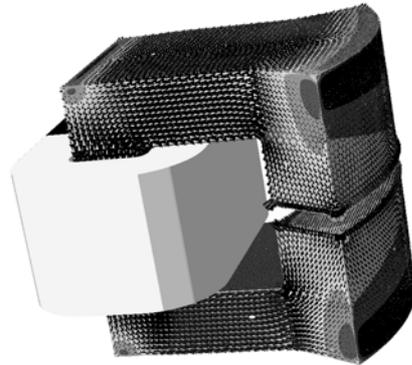


Fig.2 Three-dimensional model of the magnet and distribution of magnetic field  
图 2 磁铁三维模型及磁场分布

励磁线圈可以绕制在侧磁轭上,也可以绕制在磁极上。绕制在磁极上时,线圈的磁极内侧部分形成内弯的形状,线圈的绕制具有一定的工艺难度,如果把磁极内侧改成直边结构,又会影响磁铁的磁场分布。因此设计中把线圈绕制在侧磁轭上。

## 5 三维仿真计算结果

采用 Vector Fields 公司开发的 Opera 软件<sup>[6]</sup>对设计的磁铁进行了模拟计算,计算中使用三维静场计算模块 Tosca。在计算过程中,对磁铁的结构进行了精细的调整,使得磁场的分布满足设计要求。图 2 给出了最终模拟计算得到的三维磁场分布图。

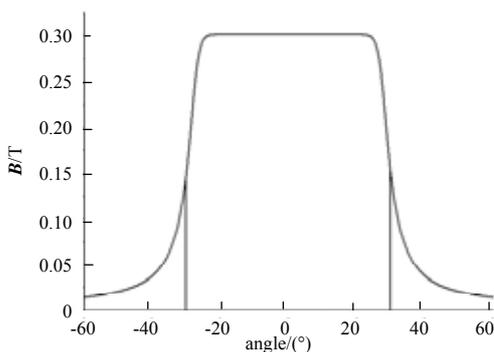


Fig.3 Distribution of  $B$  on the center orbit  
图 3 磁场沿中心轨道分布

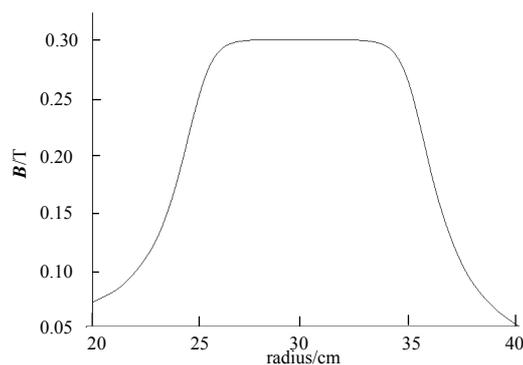


Fig.4 Distribution of  $B$  on the radius  
图 4 磁场沿径向的分布

图 3 给出了磁场沿半径为 300 mm 的中心轨道上的分布情况。在设计的偏转范围内,磁场分布符合理论设计的预期,在磁铁的边缘处,磁场延展到较宽的区域,采用硬边近似后,偏转角度为  $60^\circ$ 。

由图 4 可见,磁铁的好场区宽度是较宽的。以变化 1%作为标准,半径从 267.2 mm 到 332.6 mm 的区域都是好场区,好场区的宽度为 65.4 cm。

图 5 给出了磁场沿半径为 270 mm,300 mm,330 mm 的 3 条轨道上的分布情况的比较。从图可见,在磁场硬边范围内,3 条轨道磁场的分布情况重合得相当好。

实际操作中,如果磁铁的励磁曲线是线性的,实验的开展将十分方便。图 6 给出了磁铁的励磁曲线。可见励磁电流在 4 A 以下时,曲线是线性的。磁铁实际工作时,励磁电流大约在 3 A 左右,此时励磁曲线是几乎完全线

性的。

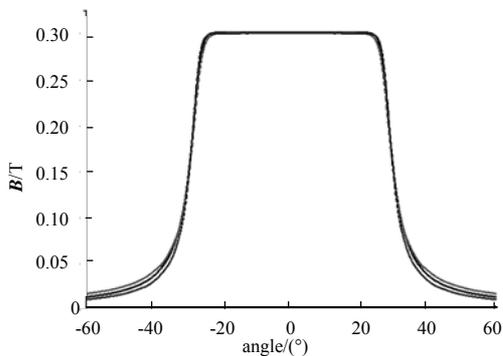


Fig.5 Distribution of  $B$  on different orbit  
图5 不同轨道的磁场分布

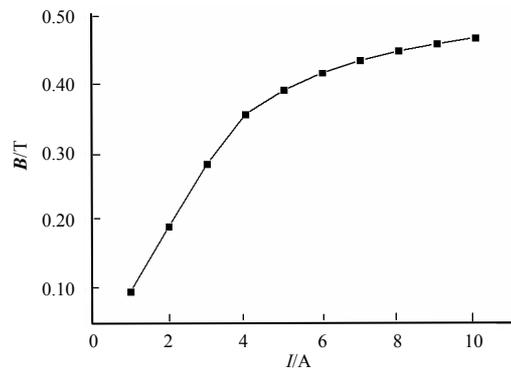


Fig.6 Linearity of the magnetic exciting  
图6 励磁的线性

## 6 设计结果讨论

根据经验,硬边近似情况下,二极磁铁等效长度比机械长度要长  $\Delta l \approx (1.05 \sim 1.15)\delta$ ,  $\delta$  即磁极间隙。磁极边缘不倒角时,采用中间值  $1.10\delta$  进行设计,三维模拟计算结果与理论设计的结果符合得很好。

磁极不倒角的情况下,由于尖角效应,磁力线向尖角处集中,导致这些地方提前饱和,影响磁铁的性能。模拟计算发现,倒角的作用十分明显,只需要倒角 3 mm,磁极尖角处的最大磁场就由 2.245 T 降低到 1.672 T,已经接近 DT4 材料的线性区。

倒角对磁场的硬边有一定影响。图 7 给出了磁铁机械长度一定时, Tosca 软件模拟得到的磁铁等效长度与倒角长度的关系。从图可见,当倒角长度较小时,倒角对磁场硬边的影响不大,倒角长度较大时,磁铁等效长度随倒角长度增加成线性减小。因此,为了维持设计的磁场硬边界,一般情况下倒角后需要增加磁极的长度。

倒角对磁铁的好场区也有一定的影响。图 8 给出了 Tosca 软件模拟得到的好场区宽度与倒角长度的关系。从图可见,好场区宽度随倒角长度增加线性减小。

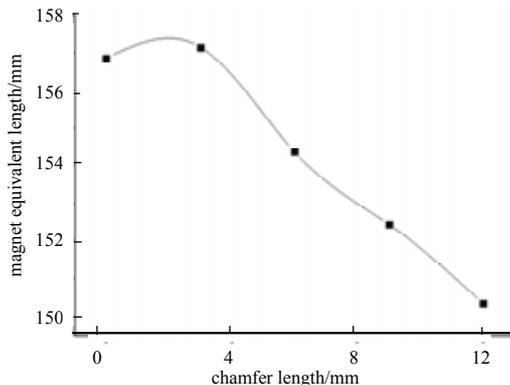


Fig.7 Equivalent length vs. chamfer length  
图7 磁铁等效长度与倒角长度的关系

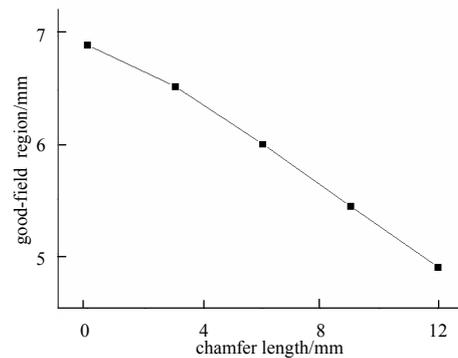


Fig.8 Good-field region vs. chamfer length  
图8 好场区宽度与倒角长度的关系

## 7 结论

为了满足一台直线感应加速器输出的强流脉冲电子束能谱测量的要求,设计了一台磁分析器。根据测试的需求进行了理论设计,并利用 Vector Fields 公司的 Opera3D/Tosca 软件对磁铁进行了三维仿真计算和优化设计。设计过程中分析了影响磁分析器性能的一些因素,得到了一些有用的结论。磁分析器的设计结果很好地满足了物理需求。

(下转第 117 页)