

# 磁靴开孔对磁场影响的 理论计算与实验研究

杜英歌 包成玉 王德武  
(清华大学工程物理系 北京市 100084)

[摘要]为满足实验要求,必须在产生均匀磁场的磁靴上开一个观察孔,这样磁场均匀度势必会受到影响。本文介绍了均匀磁场的设计方法并进行了具体设计,对开孔带来的影响进行了数值模拟。利用有限元法分析了磁场均匀性与边界条件之间的关系并给出了具体的磁场分布数据表图。在理论分析的基础上,进行了实验验证,最后得到了满足设计要求的均匀磁场。

关键词:均匀磁场 数值模拟 电子枪

蒸发金属产生原子束技术目前已经在很多科技领域获得了应用,清华大学工程物理系激光实验室目前正在进行金属原子蒸汽蒸发器的设计,该装置是由电子枪发射出电子束,在磁场作用下偏转,轰击金属靶产生金属蒸汽。电子束需要真空环境,考虑到真空腔体大小和实际需要,我们采用了图 1 的结构来产生使电子束偏转的均匀磁场<sup>[1]</sup>。

## 1 均匀磁场的设计

### 1.1 工作原理

根据 H 的环路定理有

$$H \cdot dl = NI \quad (1)$$

磁靴法原理如图 1 所示。在铁芯上开一切口,使它成为带有空气隙的磁路时,在磁极气隙边缘磁力线向外弯曲,即气隙处 B 线的截面  $S_0$  略大于铁心截面 S。若气隙长度  $l_0$  远小于铁心周长 l,则可近似认为  $S_0 = S$ ,如果不计漏磁并认为同一截面上 B 均匀,设气隙中磁感应强度为  $B_0$ ,则由磁通连续性方程可得

$$m = BS = B_0 S_0 \quad (2)$$

由上面假设,可得  $B = B_0$ ,所以,如果要设计 100Gs 的磁场,可以按下式计算:

$$Hl + H_0 l_0 = Hl + \frac{B}{\mu_0} l_0 = NI \quad (3)$$

2001 - 05 - 20 收

第一作者简介:杜英歌,男,29岁,清华大学工程物理系博士

可以在铁心材料的 B - H 曲线中查出  $H, \mu_0$  为一常量。通过调节  $N, I$  来满足设计的需要。实际过程中  $S$  需要分为几个阶段的分别计算。

### 1.2 参数的确定

实验中,电子枪阳极电压为 10KV,求得电子束速度远远小于光速,可以忽略相对论效应。考虑到真空室体积,将电子束回转半径  $r$  设定为 40mm,可以确定需要的磁场强度  $B = 84.2 \text{Gs}$ 。

### 1.3 磁靴的几何形状设计

考虑到漏磁以及边缘效应的影响,磁靴顶部和根部的磁通不同,使得磁场不能满足要求,影响电子束的成型。为了充分利用磁铁,应使得工作气隙中磁场的均匀度不随工作电流的变化而变化,使每一个磁靴横截面上的磁通密度为一常数。最常用的方法是利用罗高斯基理论公式进行边界设计,结构示意图见图 2。可以根据经验公式进行设计<sup>[2]</sup>。

$$D_0 = D_1 + 2a \tag{4}$$

$$D = (1.10 \sim 1.15) D_0 \tag{5}$$

$$\frac{a}{h} = 0.75 - 0.36 \ln(100 \times \frac{B}{B_0}) \tag{6}$$

$$\frac{x}{h} = \ln[\frac{z}{h} + \sqrt{(\frac{x}{h})^2 - 1}] \tag{7}$$

式中: $D_0$  为磁靴端部直径, $D_1$  为磁靴内好场区的宽度, $a$  为边缘宽度, $D$  为磁靴根部

直径, $\frac{B}{B_0}$  为好场区的精度, $2h$  为气隙宽度。由偏转半径  $r = 40\text{mm}$  可知好场区宽度  $D_1$  为 800mm,气隙宽度  $2h = 70\text{mm}$ ,可以确定其它参数。实际采用的磁靴外径  $D$  为 280mm,根据实际情况,工作时需要在磁靴壁上开直径为 4mm 的观察孔,观察孔的存在对磁场的均匀性会带来影响。我们对观察孔的影响做了计算,并给出计算结果。

## 2 计算机辅助设计

### 2.1 边界条件的确定

首先考虑到的是所计算圆柱体空间与外界空气之间的边界处理。计算中选取了内部场域部分进行计算,假定理想情况下(即不存在附加孔时)计算场域内磁场垂直于边壁分布,即场域侧边界上  $B_r = 0$ 。对于磁导边壁,由于固定轴与磁导盘面的材料相同,磁场由电磁铁传递至所计算圆柱体空间时,可以认为在有磁导的两端面部分轴向磁感应强度分布均匀,即  $B_z = \text{常数}$ ,如图 3 所示。

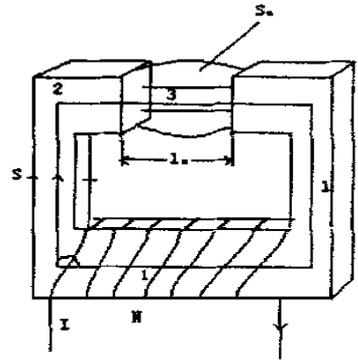


图 1 磁靴法产生的磁场

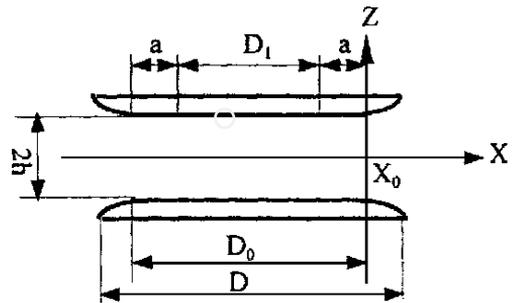


图 2 磁靴设计示意图

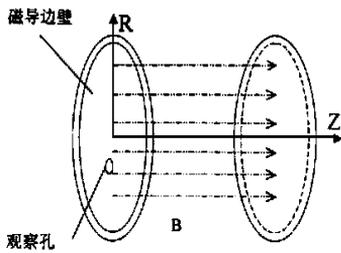


图 3 磁场分布示意图

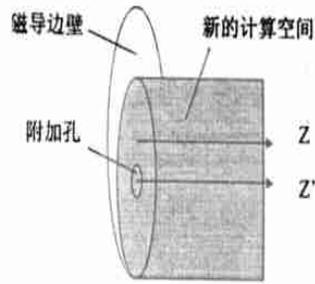


图 4 计算空间的变换

### 2.2 对于附加孔的处理

由于附加的观测孔存在,使边界条件分布不满足轴对称条件,而不得不采用三维坐标系,使计算量和结果的不确定性大大增加。为了解决这一问题,采用了简化技巧,使得计算的主要部分成为轴对称分布。除附加孔外,其余部分磁场分布完全均匀,因而计算时可以把 z 轴移动,而对结果没有影响。如图 4 所示。将 z 轴移动至 z' 处,计算空间相应变化。

这时可认为是完全的轴对称情况,将三维计算简化为二维计算。计算出此时的磁场分布后,将 z 轴移回 z 轴处,再通过数学变换得到整个要求场域内的磁场分布情况。

### 2.3 计算结果分析

用有限差分法计算<sup>[3]</sup>,可以较简便地求出所求场域内的磁场分布。模拟过程中调用 Matlab 绘制了磁场分布曲线。在图 4 阴影所示的区域中,按照设计要求,给定初值  $B_z$  84Gs,所开孔直径为 4mm。

图 5 为  $B_z$  的分布曲线。在观察孔的正上方,磁场强度急剧减小,但周围有一个明显增大的区域。在离观察孔 5mm 以外的地方,磁场均匀性非常好。

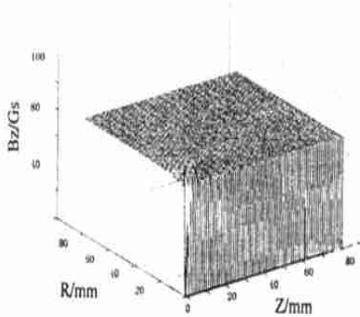


图 5  $B_z$  分布曲线

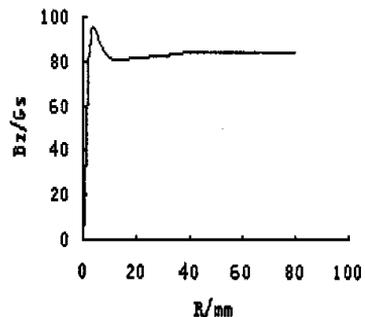


图 6  $z=0$  处的  $B_z$  理论值

在  $Z=0$  处的剖面图如图 6 所示。可以看出,在  $R=30\text{mm}$  处即使在磁道边壁上磁感应强度轴向分布也基本上相等。

同时也计算出  $B_R$  的分布, $B_R$  仅在  $R < 20\text{mm}$  的范围内存在,且值非常小,可以忽略不

计。由整个磁场区域内的数据分析可知,当  $Z = 10\text{mm}$ ,  $R > 5\text{mm}$  时,  $B_z$  大小基本稳定。

### 3 实验结果

实验中,在图 3 所示坐标下,圆形磁靴直径为  $280\text{mm}$ ,空气气隙为  $70\text{mm}$ ,线圈总匝数为  $1000$ ,线圈电流为  $1.91\text{A}$ ,探测半径为  $40\text{mm}$  经高斯计实测,数据记录于表。

表 3 磁靴内部磁场强度测量值

Z/mm	Bz/Gs				
	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 45^\circ$	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 135^\circ$	$\phi = 180^\circ$
10	85.4	84.6	84.6	84.6	84.5
20	85.0	84.6	84.5	84.5	84.5
30	84.6	84.6	84.5	84.5	84.5
40	84.5	84.5	84.6	84.5	84.5
50	84.5	84.5	84.5	84.5	84.5
60	84.5	84.5	84.5	84.5	84.5

$$B_{\max} = 85.4\text{Gs}, \quad \frac{\Delta B}{B} = 1.05\%$$

由上面的数据分析,误差比较大的点都分布在离观察孔近的区域,远离观察处 ( $B/B$ ) 约为  $1\%$ 。两个磁靴间的平行度,对中性以及电流的稳定性都会对磁场精度产生影响。

实验中,由于高斯计的限制,只能在观察孔正上方  $Z = 10\text{mm}$  处对磁场强度进行测量,数据如表 4 所示。

表 4 观察孔处磁场强度测量值

	Bz				
	R = 0mm	R = 10mm	R = 20mm	R = 30mm	R = 40mm
$\phi = 0^\circ$	68.0	85.2	84.8	84.5	84.5
$\phi = 95^\circ$	68.0	85.4	85.0	84.5	84.5
$\phi = 180^\circ$	68.3	85.4	84.9	84.5	84.5

可以看出在  $R = 30\text{mm}$  处,观察孔的影响可以忽略,与图 6 磁场强度变化的趋势完全符合。

### 4 结束语

通过计算  $B$  的大小和分布,可以帮助确定磁导边壁的大小、形状;还可以根据需要进行观察孔的位置,分析其大小和位置对装置的影响,合理设计使它既可以清晰地观察磁场内电子的情况和原子蒸发情况,又不影响磁场的分布,不影响电子偏转。在开孔附近,通过计算机辅助设计,我们对偏转磁场设计的合理性进行了分析,并完成了最终设计。通过计算可以看出附加的观察孔设计对磁场的正常运行没有影响,实测数据也证明了计算的结果。

## 参 考 文 献

- 1 张燕龙. 线性电子枪的设计与实验研究[D], 北京:清华大学工程物理系, 1997
- 2 李泉凤. 电磁铁设计[M], 北京:清华大学出版社, 1991
- 3 倪光正. 电磁场的计算机辅助分析基本方法入门[M], 西安:交通大学出版社, 1985

## Theoretical and Experimental Research of the Drilled Magnetic Field

Du Yingge, Bao Chengyu, Wang Dewu

(Department of Engineering Physics Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Received 2001 - 05 - 20

### Abstract

To meet the needs of experimental research, a hole must be drilled on the magnetic iron, which will affect the uniformity of the magnetic field. A uniform magnetic field is designed and theoretical analysis of the distribution of the magnetic field is presented. The relation between boundary condition and uniformity of the magnetic field is discussed in detail and plotted into graph. Available and new experimental data are discussed on the basis of this theoretical analysis. This treatment leads to an enhanced understanding of the drilled magnetic field.

Key Words: Uniform magnetic field, numerical simulation