

# 利用轴向磁化的永磁环制造轴向梯度磁场

彭全岭<sup>1</sup> 赵起<sup>2</sup>

1(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2(平顶山广播电视大学 河南平顶山 467000)

**摘要** 首先叙述了由单个轴向磁化环所产生的磁场,并就两个永磁环所产生的纵向磁场进行了分析.对于两个沿同一方向磁化的永磁体环,沿磁环中心线将会产生一个强度较为均匀的轴向磁场.如果两者的磁化方向相反,则在两磁铁间的区域将产生一个纵向的梯度磁场,其磁场强度介于  $-B_0$  到  $+B_0$  之间.设计制造了一个高梯度的轴向磁场,其磁场梯度为  $47.2\text{T/m}$ ,测量结果与计算结果非常一致.文中还讨论了产生变梯度磁场的方法.由于永磁环所产生的磁场和螺线管的磁场较为相似,磁铁外部空间将有较大的漏场,最后还讨论了屏蔽漏场的问题.

**关键词** 轴向磁化的永磁环 轴向梯度磁场 剩磁 镜像磁单元

## 1 引言

轴向梯度磁场,也就是沿轴向上磁场强度能在一定的范围内,如从  $-B_0$  到  $+B_0$  之间连续变化的磁场.它在磁性材料的相变研究、直线加速器速调管和行波管中有着广泛的应用.可通过以下方法获得轴向磁场:1) 通过螺线管磁场;2) 通过轴向磁化的永磁环;3) 通过沿径向磁化的永磁环等<sup>[1]</sup>.螺线管可产生轴向磁场,但产生同样大的场强需要较大的空间来排放螺线管线圈,并需要庞大的电源消耗和水冷却系统.利用径向磁化的永磁环也可获得轴向梯度磁场,但其会受到以下两方面的限制.一是沿径向磁化的永磁环实际难以制造,二是由于只有靠近永磁环端部的区域才能实现轴向梯度磁场,并且场梯度较弱.因此,利用轴向磁化的永磁环来实现轴向梯度磁场是最佳的选择.

## 2 轴向磁化的永磁环所产生的轴向磁场

内半径为  $R_1$ ,外半径为  $R_2$ ,长度为  $2l$ ,位于  $-l$  到  $+l$  之间沿轴向磁化的永磁环,沿磁环中心线的纵向磁场分布为

$$B(z) = \frac{B_r}{2} \left[ \left( \frac{z+l}{\sqrt{(z+l)^2 + R_2^2}} - \frac{z-l}{\sqrt{(z-l)^2 + R_2^2}} \right) - \left( \frac{z+l}{\sqrt{(z+l)^2 + R_1^2}} - \frac{z-l}{\sqrt{(z-l)^2 + R_1^2}} \right) \right] \quad (1)$$

这里  $B_r$  为永磁体剩磁,沿磁环中心线的最大场强为:

$$B_{\max} = B_r l \left( \frac{1}{\sqrt{l^2 + R_2^2}} - \frac{1}{\sqrt{l^2 + R_1^2}} \right) \quad (2)$$

图 1 为单个永磁环沿轴向的场分布,这里取  $B_r = 1.35\text{T}$ ,  $R_2 = 20\text{mm}$ ,  $R_1 = 6\text{mm}$ .从图中可以看到,

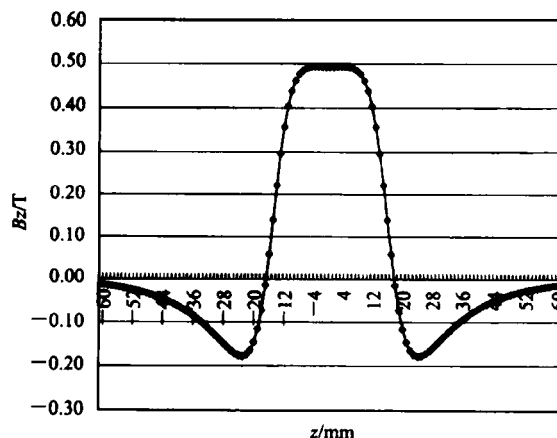


图 1 轴向磁化的永磁环沿磁环中心线的磁场分布

其磁场分布在永磁环两侧的端部符号发生了改变,它不同于螺线管的场分布.螺线管磁场,沿中心线的磁场将保持同一种符号不变.事实上,轴向磁化的永磁环沿中心线的场分布是由两层电流面密度为  $Br$  的薄壁螺线管场所叠加而成.其中一层位于半径为  $R_1$ , 电流面密度为  $Br$ ; 另一层位于半径为  $R_2$ , 电流面密度为  $-Br$ .

利用(1)式,沿轴线方向磁化,间隔为  $2d$  的两个轴向磁化的永磁环,其沿磁环中心线的场分布为

$$B(z) = \frac{B_r}{2} \left[ \left( \frac{z + 2l + d}{\sqrt{(z + 2l + d)^2 + R_2^2}} - \frac{z + d}{\sqrt{(z + d)^2 + R_2^2}} \right) - \left( \frac{z + 2l + d}{\sqrt{(z + 2l + d)^2 + R_1^2}} - \frac{z + d}{\sqrt{(z + d)^2 + R_1^2}} \right) \right] \pm \frac{B_r}{2} \left[ \left( \frac{z - 2l - d}{\sqrt{(z - 2l - d)^2 + R_2^2}} - \frac{z - d}{\sqrt{(z - d)^2 + R_2^2}} \right) - \left( \frac{z - 2l - d}{\sqrt{(z - 2l - d)^2 + R_1^2}} - \frac{z - d}{\sqrt{(z - d)^2 + R_1^2}} \right) \right]. \quad (3)$$

如果两永磁环的磁化方向相同,(3)式第二项取正号,两磁环间区域内将产生近似均匀的纵向磁场,相当于单个永磁环被加长了.如果两磁环的磁化方向相反,(3)式中第二项符号取负号,在两磁环间的区域内将产生一个轴向梯度磁场.

### 3 利用轴向磁化的永磁环制造轴向梯度磁铁

实际中,利用轴向磁化的两个永磁环来产生轴向梯度磁场.每个永磁环的长度为  $2l = 30\text{mm}$ , 内外半径分别为  $R_1 = 6\text{mm}$ ,  $R_2 = 20\text{mm}$ , 两永磁环间隔距离为  $2d = 11\text{mm}$ . 为了更有效地收拢磁环端部磁力线,分别在每一个磁环的两端加上一个内外半径分别为  $6\text{mm}$  和  $20\text{mm}$ , 厚度为  $5\text{mm}$  的铁环.图 2 是利用 PANDIRA 程序计算的二维磁场分布<sup>[2]</sup>.图 3 为沿磁铁中心线和沿半径为  $4\text{mm}$  的  $B_z(z)$  和  $B_r(z)$  的磁场分布.

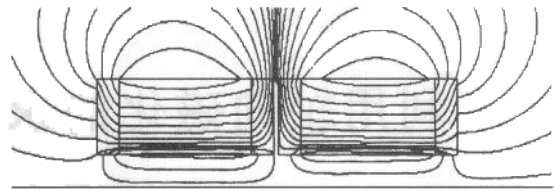


图 2 用 PANDIRA 程序计算的轴向梯度磁铁的场分布 (这里采用了柱坐标系进行计算).

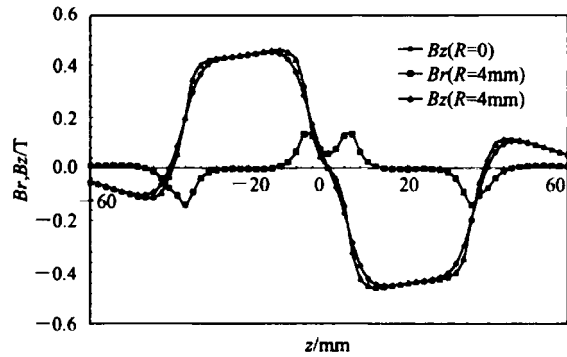


图 3 轴向梯度磁铁沿磁铁中心线和沿半径为  $4\text{mm}$  的  $B_z(z)$  和  $B_r(z)$  的磁场分布

图 4 为理论计算和实际测量到的磁场分布比较,两者比较结果非常接近.从图中可以看到,中心段的磁场为梯度均匀的轴向磁场,梯度值为  $G = 47.2\text{T/m}$ ,其磁场强度在  $11\text{mm}$  的长度内从  $-0.51\text{T}$  均匀变化到  $+0.51\text{T}$ .

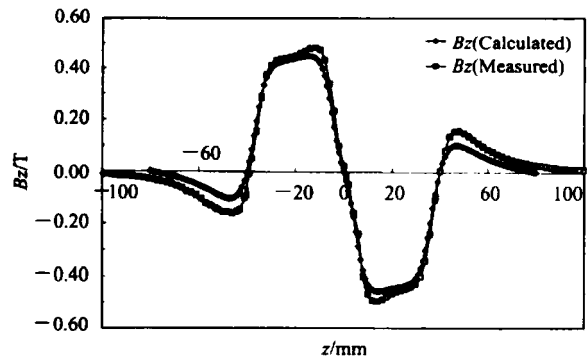


图 4 轴向梯度磁铁沿中心线的磁场分布 PANDIRA 计算值和实际测量值的比较.

在直线加速器的速调管及行波管中,利用沿束流方向的周期性的螺线管磁场对带电粒子束进行聚焦.永磁环同样可用来产生周期性的纵向磁场.由于其体积小,重量轻,不需电源和水冷,因此有较好的应用前景.永磁环的长度可随粒子能量的增加而加长,并可在永磁环间加上铁环作为活动极头来调整纵向磁场的强度和均匀度.它们将分别应用在美国 SLAC 的新一代直线对撞机 NLC 的 X 波段速调管

中和日本 JLC 直线对撞机的 X 波段的速调管中<sup>[3,4]</sup>. 沿磁铁中心线, 磁场无  $B_r(z)$  分量. 如图 3 所示, 在两磁环间的区域, 随着半径的增长,  $B_z(z)$  分量变化不大, 而  $B_r(z)$  分量有所增加. 直线加速器的速调管中, 在磁环端部和两磁环间的区域内,  $B_r(z)$  随半径的增加而增大, 从而使远离磁铁中心线的带电粒子受到较大的聚焦作用力<sup>[3]</sup>.

## 4 讨论

### 4.1 获得变梯度的轴向磁场

选择不同厚度的端部铁环可得到不同的场梯度, 从而满足不同的用途. 在可能的情况下, 通过改变两永磁环间的距离来获得变化的梯度磁场. 在磁性材料实验中, 观察在不同场强下的材料相变尤为重要. 它们可通过简单的机械装置来获得变化的梯度磁场. 在直线加速器中, 由于机械设计难度等原因, 使用螺线管通过调节电流大小来获得变化的梯度磁场要比使用永磁环更有优越性. 如果带电粒子在经过每段速调管时能量不变或变化幅度很小, 就可利用周期性的永磁环来对粒子聚焦, 并加适当的辅助绕组来增加在不同能量下调节的灵活性.

### 4.2 磁场屏蔽效应

同螺线管磁场相似, 如果外界无铁屏蔽, 轴向永磁环将在外界空间内产生较强的漏场. 我们可通过加铁屏蔽的方法来减小永磁环磁场对外界的影响.

铁屏蔽的作用可通过镜像效应进行分析. 象镜像电荷一样, 围绕在永磁环周围的铁屏蔽环也会产生镜像效应. 以二维情况为例, 以永磁环的圆心为坐标原点, 铁屏蔽内半径为  $R$ , 位于半径为  $r$  ( $r < R$ ) 处, 剩磁强度为  $B_r$  的单位永磁体元, 其镜像永磁体单元位于半径  $r' = \frac{R^2}{r}$  处, 镜像剩磁强度为  $B'_r = -B_r \left(\frac{r}{R}\right)^2$ . 对于永磁环来说, 位于永磁环内半径和外半径的薄壁螺线管将分别在铁屏蔽层中产生一个镜像螺线管. 其中一个镜像螺线管位于  $R_1' = \frac{R^2}{R_2}$  处, 电流面密度为  $B_{r1}' = B_r \left(\frac{R_2}{R}\right)^2$ , 另一个位于  $R_2' = \frac{R^2}{R_1}$  处, 电流面密度为  $B_{r2}' = -B_r \left(\frac{R_1}{R}\right)^2$ .

应该注意的是, 由于镜像永磁环的磁化方向和原永磁环相反, 如果铁屏蔽紧靠永磁环的外半径, 在有效地屏蔽了磁铁对外界影响的同时, 磁铁孔径内的磁场也将降低.

## 5 结束语

利用两个磁化方向相反的轴向磁化永磁环可在它们之间的中心区域内获得一个梯度磁场. 理论计算和实际测量结果非常相符. 可通过调节两永磁环间距和端面所附铁环的厚度来调节纵向磁场的场梯度. 通过外加铁屏蔽的方法可减小永磁环漏场对外界的影响.

## 参考文献 (References)

- 1 PENG Quan-Ling, McMurry S, Coey J M D. Cylindrical Permanent Magnet Structure Using the Images in An Iron Shield. Will be Published in IEEE Transaction On Magnetics, 2002
- 2 Poisson/Superfish Package. LA-UR-87-126, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos NM, 1987
- 3 Sprehn D, Caryotakis G, Jongewaard F et al. Periodic Permanent Magnet Development for Linear Collider X-band Klystrons. SLAC-PUB-7925, 1998
- 4 Chin Y H, Higo T, Urakawa J. Status of JLC Accelerator Development. KEK Preprint 2000-140

## Using Axial Magnetized Permanent Rings to Build Axial Gradient Magnetic Field

PENG Quan-Ling<sup>1</sup> ZHAO Qi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

<sup>2</sup>(Pingdingshan Television University, He'nan Pingdingshan 467000, China)

**Abstract** Axial field produced by an axially magnetized permanent ring was studied. For two permanent magnet rings, if they are magnetized in the same direction, a nearly uniform axial field can be produced; if they are magnetized in opposite direction, an axial gradient field can be produced in the region between the two permanent rings, with the field strength changing from  $-B_0$  to  $B_0$ . A high gradient axial magnetic field has been built by using two axially magnetized permanent rings, the measured field results agree with the PANDIRA calculation very well. It is desirable that the field gradient can be varied to match various requirements. A method to produce the variable gradient field is presented. Axial gradient field can also be used as a beam focusing facility for linear accelerator if axial periodic field can be produced. Its magnetic field is similar to that of a solenoid, in which, large stray field will leak to the outside environment. A method for shielding the outside stray field is discussed.

**Key words** axial magnetized permanent ring, axial gradient field, remnant field, imaged permanent element