

CNIC-01327

CAEP-0015

低横向磁场分量的螺线管线圈的设计

代志勇 刘承俊

(中国工程物理研究院, 成都, 610003)

摘 要

描述了为 20 MeV 闪光 X 光机预研而设计的螺线管线圈的设计原则、检验结果和实验使用过程。结果表明: 这种采用新设计的螺线管线圈具有很小的横向磁场分量, 从而大大提高了其磁准直精度。其磁轴倾斜 ≤ 1 mrad, 磁轴错位 ≤ 0.2 mm, 基本满足 20 MeV 闪光 X 光机的束流指标对束输运系统中的关键元件——螺线管线圈的要求。

Design of Solenoid Magnet with Slender Majority of Transverse Magnetic Field

(In Chinese)

DAI Zhiyong LIU Chengjun

(China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003)

ABSTRACT

The solenoid magnet design for a 20 MeV flash X-radiography is presented. Prototype solenoid magnets have been demonstrated that it has a magnetic axis tilt less than 1 mrad and magnetic axis offset 0.2 mm, respectively. The design features of the solenoid magnets, which are slender majority of transverse magnetic field and high precision of magnetic alignment, have been proved to meet the 20 MeV linear induction accelerator performance goals by the experiments of the 2 MeV injector.

引言

束流输运系统是为 20 MeV 闪光 X 光机的研制而进行预研的四项关键技术之一, 螺线管线圈又是束流输运系统的核心部件, 因此, 螺线管线圈的设计研制质量直接关系到加速器的束品质 and 束流脉冲聚焦打靶质量。

根据 20 MeV 闪光 X 光机项目建议书提出的有关设计指标, 原有的为 10 MeV 直线感应加速器束流输运系统设计的螺线管聚焦线圈显然已远远不能满足要求, 需要对束输运系统的这个核心部件重新设计。总的来说, 就是要设计一种能使螺线管线圈横向磁场畸变量大大减小的具有磁准直精度较高的新型螺线管线圈。

1 影响束品质的因素

1.1 非线性束空间电荷力的影响

空间电荷占优势的束在输运过程中, 非线性空间电荷力的影响将导致归一化发射度的增长^[1~3], 其部分原因是由于多余的空间电荷位能转变为横向有效热运动动能 ($\gamma m V_{\perp}^2/2$), 此处 γ 为相对论因子, m 为电子质量, 归一化发射度的增长可以粗略地表示为^[4]

$$\varepsilon_{n, \text{final}}^2 = \varepsilon_{n, \text{initial}}^2 + R^2 \langle V_{\perp}^2 \rangle \quad (1)$$

式中, R 为束半径; 空间电荷位能 $\langle V_{\perp}^2 \rangle$ 是束径向剖面的函数, 与 R 无关; $\varepsilon_{n, \text{final}}$ 为最终归一化发射度; $\varepsilon_{n, \text{initial}}$ 为初始归一化发射度。因此, 如果使束以尽可能小的半径输运, 归一化发射度的增长可减至最小, 因而必须采用强磁场而且其分布呈迅速上升趋势。

1.2 加速间隙场波动的影响

加速间隙场波动的出现造成的横向扰动也导致有效发射度的增长。Adler^[5]求出屏蔽源 (即阴极发射面磁场为零) 在长波长条件 ($K_c W < 1$) 下的径向扰动为

$$x = \frac{AK_c^3 W^3 R_b}{\pi^2} \cos(K_c Z/2) \quad (2)$$

式中, R_b 为束半径; W 为加速间隙宽度; Z 为轴向距离 ($|Z| < W$); $K_c = eB_z / (\sqrt{\gamma^2 - 1}mc)$ 为电子回旋波数, 式中 e 为电子电荷, c 为光速, γ 为相对论因子, m 为电子质量, $B_z = B_{z0}[1 + A \sin(\pi Z/W)]$ 为假设的磁场波动形式, A 为傅立叶基波, 代表场波动的大小。

由方程 (2) 可粗估单个间隙磁场波动造成的归一化发射度的最小增长为;

$$\varepsilon_n = \gamma R_b x' \quad (3)$$

式中, $x' = x K_c / 2$, ε_n 为归一化发射度。

则有如下关系式

$$\varepsilon_n \propto B^4 \gamma^{-4} W^3 R_b^2 \quad (4)$$

式中 B 为轴向输运磁场, 即加速间隙场波动导致的发射度增长同 B^4 , W^3 , R_b^2 成正比, 且在低能区表现得尤为明显。

1.3 束心横向运动发展的影响

初始偏心的束在 B_z 场中传播时, 由于脉冲期间能量不可避免存在随时间的变化, 束心不同时刻能量不同, 相应的回旋波长不同, 造成脉冲期间束心横向位移随时间的变化, 这就是 Corkscrew 运动。当 Corkscrew 运动的幅度最终可以与初始偏心量相比拟, 会激励加速腔的偶极子横磁模 TM_{1m0} 。该模具有轴向电场分量 E_z , 可以从束中抽取能量, 其横向磁场分量 $B_\perp$ 则给束施加横向振荡冲量造成束心横向位移增长, 最终导致束流损失, 这就是束流崩溃 (BBU) 不稳定性。

BBU 的指数增长因子与变量 $(I_b, N, W, Q, R_p^{-2}, B_z^{-1})$ 成正比^[6]。即

$$U = U_0 \cdot \exp \left(\frac{I_b N W Q}{R_p^2 \cdot B_z} \right) \quad (5)$$

式中, U_0 为初始 BBU 振幅值; I_b 为束流; N 为加速间隙数; W 为加速间隙宽度; Q 为加速腔的品质因素; R_p 为束管道半径; B_z 为输运磁场。

2 采取的技术措施

从以上的分析可以知道, 空间电荷效应是难以完全避免的。要抑制它的影响, 需采用强磁场小半径输运。对产生输运磁场的螺线管线圈来说, 其设计必须考虑使它具有能大范围调节磁场的能力。我们在设计中采用 $4.0 \text{ mm} \times 4.3 \text{ mm}$ 的扁形紫铜线绕制, 允许通过的最大电流约 500 A, 这样绕制成的螺线管线圈轴线对称点的磁场, 在通以 250 A/匝的电流 (恒流源的最高供电能力) 时能产生约 0.25 T 的强磁场。

加速间隙磁场波动影响的最根本的解决办法是减小加速间隙, 相应延长螺线管线圈的长度。还有另外一个措施是采取疏密不同的绕法, 以改善螺线管线圈端口的轴向磁场分布来达到减小加速间隙磁场波动的目的。在 10 MeV 直线感应加速器中, 采用两端密中间疏的绕法, 考虑到要保证螺线管线圈的磁准直精度, 还是采用均匀密绕方法。结合新加速腔的研究, 我们适当地延长了螺线管线圈的长度。

在束流输运中, 最重要的是如何抑制束心横向运动的发展。束心横向运动起源于束的初始偏心, 发展于加速器束输运过程中输运磁场的磁轴, 束管道几何轴以及束流轴线等三轴的对中状况及输运磁场的匹配状态。输运磁场的匹配可以通过以后的实验调试解决, 那么解决这个根本问题的方法反应到螺线管线圈设计上, 就必须采取措施保证螺线管

线管线圈的高磁准直精度要求螺线管线圈产生的磁场在横向(或径向)上的分量极其微弱,因此需要采取能切实减小横向磁场的措施而又不能对轴向磁场产生较大影响。

如何有效地减小横向磁场就成了螺线管线圈设计的焦点问题。因为轴向输运场中附加上的这一横向磁场能使束心产生横向扰动,导致所谓的“Corkscrew”模和 BBU 不稳定性的增长。其后果直接导致束斑的增大,影响闪光照相的精度。

横向场是由螺线管线圈绕线走向的不合理、绕组的某些形变、畸变以及导线引出头等杂散电流引起的。这部分电流总有部分分量不是螺线管线圈旋转对称轴的环流,因而会产生横向磁场。DARHT 的有关计算^[7]表明,线圈第一层绕线 0.17 mm 的偏差会导致约 1 mrad 的磁轴倾斜。

绕线的方式分为两种:均匀密绕和不均匀密绕,前者加工难度小、线圈横向场分量小、螺线管端口轴向场分布不理想,后者加工难度大、同场分量大、螺线管端口轴向场分布较好。在通盘考虑几种因素后,我们选择了密绕法。因为,理论模拟计算表明:横向场在束输运中的影响比加速间隙场波动的影响大,而且我们可以在加速腔的设计上减小加速间隙来获得对加速间隙处磁场波动的某种补偿。密绕也分几种:单线绕法,双线二象限绕法,四线四象限绕法等。一般来说,这几种绕法的精度依次增高,加工难度也依次增大。根据采取成熟的技术和工艺的原则,我们选用双线二象限绕法。

根据前面的讨论,BBU 的增长因子与束管道半径的平方成反比,我们在保证输运磁场强度的情况下,适当增大束管道的半径,也就是增大螺线管线圈的内径,有利于抑制 BBU 的增长。

绕线加工的关键工艺解决之后,我们还采取一个重大的措施,经过多方论证及调研,我们采用了一种磁性材料为软磁带作磁校直器,校直器是一种具有高磁导率的软磁带间隔地缠绕在线圈铝衬筒外表面的定位槽中,见图 1。其作用表述如下:校直器由高磁导率的圆片、圆带和非磁性垫片组成。在横向上是高磁导率 μ 的软磁片与 $\mu = 1$ 的非磁性垫片并联,因此横向磁导率的表达式为

$$\mu_T = 1 + k(\mu - 1) \quad (6)$$

轴向上是高磁导率 μ 与非磁性垫片串联,故其轴向磁导率 μ_Z 的表达式为

$$\mu_Z = \left[1 + k \left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

式中, $k = w/L$ 是软磁片的占空系数。

若定义一个校直器各向异性系数为 ξ , 则

$$\xi = \frac{\mu_T}{\mu_Z} = [1 + k(\mu - 1)] / \left[1 + k \left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) \right] \approx \mu k (1 - k) \quad (8)$$

通常 $k = 1/3 \sim 1/2$, μ 在数百以上,所以 $\mu_T \gg \mu_Z$, 故 $\xi \gg 1$ 。

校直器的各向异性系数愈大愈好, ξ 越大表示校直作用越好, 同时对轴向场的削弱作用亦可减小到最低程度。

校直器引入前后横向磁场分量之比用 Y_s 表示, 可推得

$$Y_s = 1 + \frac{\mu_T}{4} \left(1 - \frac{r_s^2}{r_a^2} \right) \quad (9)$$

考虑到校直器引入后, 会改变磁位分布, 因而引入一个修正系数 β_s , 即

$$Y_s = \beta_s \left[1 + \frac{\mu_T}{4} \left(1 - \frac{r_s^2}{r_a^2} \right) \right] = \beta_s \left[1 + \frac{1 + k(\mu - 1)}{4} \left(1 - \frac{r_s^2}{r_a^2} \right) \right] \quad (10)$$

参照 DARHT 在校直器上的设计^[7], 我们最后选定 $w = 5.2 \text{ mm}$ 、 $L = 13.3 \text{ mm}$ 、槽深 4.5 mm , 绕制软磁材料厚 4 mm 。代入有关参数后, 我们可以大致得出 Y_s 的值约为 75。由此可见, 校直器的引入对减小螺线管线圈的横向磁场具有相当的作用。

根据前面给出的设计原则和技术方案, 我们建立了数学模型进行理论模拟, 以模拟的结果选择修定最后的设计参数。最后加工出如图 2 所示的新型螺线管线圈。

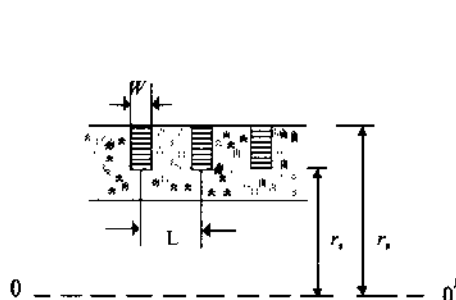


图1 磁校直器结构示意图

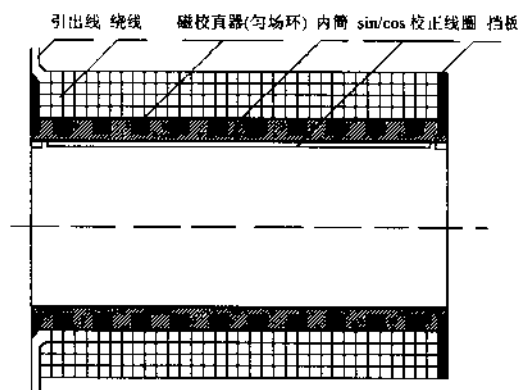


图2 新型螺线管线圈结构简图

3 实验检测及应用结果

依照上述设计思想和技术路线精心研制加工出来的新型螺线管线圈, 对其综合性能指标的检测采用了一种先进的脉冲紧线法^[8]。检测结果表明: 以此种方法设计的新型螺线管线圈, 其横向磁场分量比原有的螺线管线圈降低约两个数量级 (约 100 倍), 其磁轴倾斜 (tilt) $\leq 1 \text{ mrad}$, 磁轴错位 (offset) $\leq 0.2 \text{ mm}$, 最大轴向磁场达 0.25 T 。

在 2 MeV 注入器的应用证明: 这种新型的螺线管线圈运行可靠、调试方便, 能有效抑制束心横向运动的发展, 具有较高的磁准直精度。

4 结 论

从理论上入手,分析影响束品质的各种因素的作用机理,并以此作为螺线管线圈的设计原则。技术措施上采取减小加速间隙、相应延长螺线管长度,双线二象限密绕方法,适当增大束管道内径,尤其是引入软磁材料作磁校直器作匀场环,分析了其匀场机理,以及计算机模拟等手段,使螺线管线圈的综合性能达到一个新水平($\text{tilt} \leq 1 \text{ mrad}$, $\text{offset} \leq 0.2 \text{ mm}$),横向场分理弱小,磁准直精度提高,大大抑制了影响束流发射度增长、束流亮度降低的不利因素,为实现20 MeV 闪光X光机焦斑达到1.5 mm的目标而建立一个高质量的束流输运系统打下了坚实的技术基础,建立了良好的技术储备。

对于程念安研究员、王华岑副研究员、章林文副研究员的支持、指导和协助,以及谢恒家师付等人在工作中给予的具体帮助,在此一并致谢!

参 考 文 献

- 1 Zapostolle PM. IEEE Trans Nucl. Sci., 1971, 18: 1101
- 2 Lee EP, et al. Nucl. Fusion., 1981, 21: 961
- 3 Smuckmeier J, et al. Part. Accel., 1984, 15: 47
- 4 Caporaso GJ, Briggs RJ. High Current Electron-Beam Transport, Presented at the Beijing Institute of Modern Physics, Beijing China (August 1988)
- 5 Richard J A. 1987 IEEE, Particle Accelerator Conference, 1987, 1359
- 6 Neil VK, et al. Particle Accel., 1979, 9, 213
- 7 Michael Burns, et al. Magnet Design for the DARHT Linear Induction Accelerators, IEEE, May 1991, 2110
- 8 章文卫等. 聚焦磁场准直测量方法研究, 技术总结报告, 流体物理研究所, 1995