

微型韧致辐射光源磁铁和扰动器设计研究

戴建枰¹ 顾小冯^{1,2;1)}

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 基于韧致辐射原理的微型X射线光源体积小、成本低,同时又因相对论电子束可循环使用,所以具有亮度较高、能谱较宽、方向性较好以及光源为准点光源等特点,正逐渐成为一种新型的X射线光源,受到国内外的高度重视.本文利用电子轨迹跟踪方法和Poisson Superfish程序对该类型光源的两个难点——储存环磁铁和扰动器的设计进行了研究,并得到了一些有意义的结果:确定了磁铁和扰动器的设计方法;所设计的磁铁能较好地满足设计要求;扰动器能够更有效地实现电子注入.

关键词 微型韧致辐射光源 储存环磁铁 扰动器 电子轨迹跟踪 Poisson Superfish

1 引言

X光的利用对人类社会和科学发展发挥了巨大的作用,然而现有的X光光源亮度较低(X光管),或者规模较大(同步辐射光源),限制了X光的进一步应用.为更好地使用X光,目前世界许多国家都在进行着新型X光源的研究,其中微型X射线光源^[1]就是很有发展前景的一种X光光源.

微型X射线光源主要由注入器和微型储存环两部分组成,其基本原理是注入器产生能量为几MeV至几十MeV的相对论电子束并注入到微型储存环中,然后电子束在环中打靶,产生韧致辐射光.由于下述原因:(1)靶极细小,电子束打靶后性能变化很小,因而可循环使用;(2)储存环直径小,电子束回旋频率很高,因而电子束的平均流强较高;(3)辐射集中在 $1/\gamma$ 这一小角度内;(4)光源点即靶片很小,几乎是点光源,等等,微型X射线光源的亮度较高,方向性也好,可以接近第一代同步辐射水平,比X光管高2—3个量级.同时,由于是韧致辐射光源,其辐射光子最高能量可很容易地达到几百keV甚至几MeV,比同步辐射光源有较大优势——同步辐射光源产生100keV以上的X射线需能量几GeV的电子束.另外,微型X射线光源体积小、成本低、结构简单、维护方便.例如MIRRORCLE-6X^[1]储存环磁铁的外径仅60cm,高仅

28cm.

微型X射线光源的核心是微型储存环.大型储存环磁铁一般是由直线段、二极铁、四极铁、八极铁等部分构成,而微型储存环磁铁由一整块常梯度磁场圆柱形磁铁构成,它同时具有偏转和聚焦的功能.另外,由于电子轨道是半径仅为15cm左右的圆,传统的注入方式已不能够有效地注入电子^[1].为了有效地注入,需要一种特殊的辅助注入元件,即扰动器(Perturbator)^[2,3].因此,微型储存环磁铁和扰动器成为了微型X射线光源的两个关键部件.

本文利用解析公式和运用Poisson Superfish程序及自编程序,对下一步拟研制的微型韧致辐射光源样机的储存环磁铁和扰动器进行了设计研究,并取得了一些有意义的结果.

2 磁铁的设计

小型储存环磁铁最主要的参数是磁场指数 n 、束流注入能量 E 和束流轨道半径 r_0 .它们是小型储存环物理设计的基础,这3个参数基本决定储存环的其他参数和储存环中束流特性.

这3个参数的选取,可以结合理论和国外经验来选择.在设计中,注入的束流能量选为6MeV.这个能量的电子对物质的活化效应较小,不会产生太多的辐

2006-05-19 收稿

1) E-mail: xfgu@ihep.ac.cn

射污染, 有利于辐射防护, 有利于储存环设备的小型化和简单化. 设计的束流轨道半径选为 $r_o=15\text{cm}$, 可以降低储存环的体积. 选磁场指数 $n=0.72$, 以便更好地注入电子, 提供较强的轴向聚焦力. 根据这些参数, 可以得到储存环的其他相关参数, 如表1所示.

表1 储存环设计参数

磁场指数	$n=0.72$
电子能量	$E=6\text{MeV}$
束流周期	$T_o=3.153\text{ns}$
束流尺寸	$\sigma_z=1.84\times 10^{-7}\text{m}$
	$\sigma_x=5.245\times 10^{-5}\text{m}$
Twiss参数	$\beta_x=0.2835\text{m}$
	$\beta_z=0.1768\text{m}$
	$\alpha_x=0$
	$\alpha_z=0$
束流寿命	$\gamma_x=3.527\text{m}^{-1}$
	$\gamma_z=5.656\text{m}^{-1}$
束流半径	$t=0.6401\text{ms}$
中心轨道磁场	$r=15\text{cm}$
束流频率	$B_o=0.1442\text{T}$
自然色品	$f_o=317.154\text{MHz}$
	$\xi_x=-0.2646$
阻尼时间常数	$\xi_z=-0.4243$
	$\tau_x=19.24\text{s}$
	$\tau_z=49.8\text{s}$
色散函数	$\tau_e=1.155\text{s}$
每圈损失能量	$\eta_r=0.5357\text{m}$
振荡频率	$U_o=7.4646\times 10^{-7}\text{keV}$
	$\nu_x=0.529$
	$\nu_z=0.849$

储存环磁铁的设计应满足以下要求: 磁铁磁场指数 n 需在平衡轨道附近很大范围内为一常数, 这样才能保证电子能稳定在平衡轨道附近运动; 磁铁电流 I 要使得中心平面磁场强度符合理论要求值, 这样才能保证电子的平衡轨道半径为 $r_o=15\text{cm}$; 磁铁的体积和质量要尽可能的小.

设计方法是首先根据解析公式计算出磁铁极面形状、极面垫补尺寸、励磁电流绕组窗口尺寸和励磁电流大小, 之后利用 Poisson Superfish 程序优化磁铁尺寸, 得到一个最佳结果.

根据以上设计要求和设计方法, 设计得到的磁铁磁场参数如表2所示.

表2 磁铁设计参数

磁场指数	$n=0.72$	中心轨道磁场	$B_o=0.1442\text{T}$
总励磁安匝数	$NI_{\text{air}}=4293.6\text{AT}$	磁铁高度	$H=34\text{cm}$
磁铁内径	$r_1=6\text{cm}$	磁铁外径	$r_2=39\text{cm}$
磁轭厚度	$d=4\text{cm}$	电子平衡轨道半径	$r_o=15\text{cm}$

该磁铁1/4的截面图如图1所示. 它是以 z 方向为轴对称, 以 $z=0$ 平面为平面对称的一块圆柱形磁铁.

因为要在平衡轨道左右约 10cm 范围保持磁铁磁场指数 n 为常数, 所以磁极面曲线比较复杂.

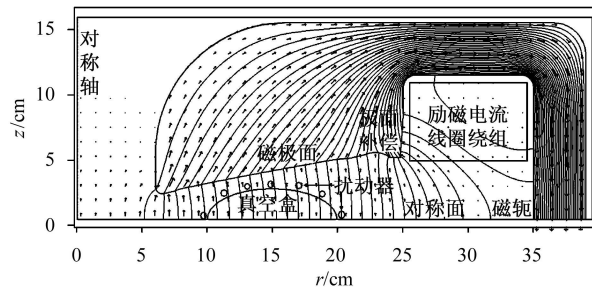


图1 磁铁截面设计图

图2、图3是 Poisson Superfish 模拟结果与设计要求的比较, 表明磁场分布和磁场降落指数 (Simulation 结果) 在平衡轨道左右约 10cm 范围内与设计要求的 (Design 值) 很好地符合, 能够提供聚焦和偏转的双重功能.

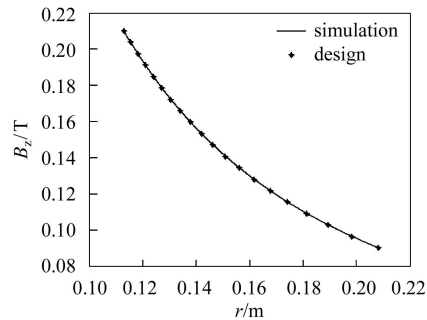


图2 磁场模拟结果与设计要求的比较

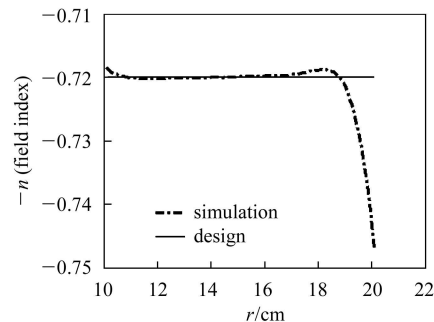


图3 磁场降落指数模拟结果与设计要求的比较

另外, 从优化过程中可知: 极面补偿对于磁场指数影响很大, 磁轭宽度对磁场指数也有影响; 为获得大范围平坦的磁场指数曲线, 需对磁极面、磁轭尺寸作多次修改和模拟; 如果使用更高饱和磁通的材料, 磁铁的尺寸可以进一步减小; 磁铁外边的磁轭具有传导磁通和辐射防护的双重作用; 磁轭立柱和其余地方的磁通道不能太狭窄, 否则会引起局部地区的磁通量增大, 使立柱向磁极的磁漏增大, 从而影响中心磁场分布.

得到Poisson Superfish磁场数据后, 根据带电粒子在常梯度场中的运动方程, 只要知道单个电子初始入射位置, 就可以计算出电子每一小段时间后的位置, 即得出电子的运动轨迹, 这称为电子轨迹跟踪法. 在下文中, 通过自编的程序, 用该方法对扰动器的设计进行了研究.

3 扰动器的设计

扰动器是用来把刚注入的电子从注入处踢向平衡轨道的一个附加磁场, 放在磁铁主磁场中, 与储存环有同样曲率半径. 它在电子注入期间使用, 注入之后关闭, 所以它的磁场和主磁场不能够相互影响, 同时扰动器的磁场还不能影响平衡轨道上的电子.

扰动器是一个新技术元件, 设计起来有一定难度. 从C. L. Hammer^[4], T. Takayama^[5]等比较少的一些参考资料中出发, 利用电子轨迹跟踪方法, 经过多次模拟计算, 最终找到了较合适的扰动器模型, 如图1所示. 它是放在真空盒外侧的几组空心直流线圈的联合体, 如扇形分布, 放置在 $210^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$ 内的真空盒外侧.

图4是设计扰动器中心平面不同磁感应强度分布图. 可以看出, 在平衡轨道 $r=15\text{cm}$ 处磁场几乎为0, 因而对中心轨道处的电子影响很小. 图5和图6是扰动器开启前后的电子径向振荡图以及电子的轨迹图.

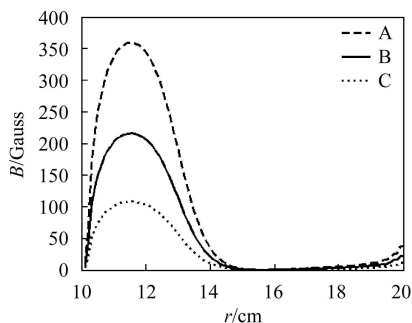


图4 扰动器磁场分布

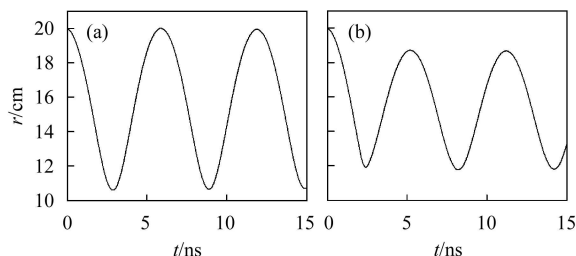


图5 扰动器启动前(a), 后(b)中心平面电子径向振荡图

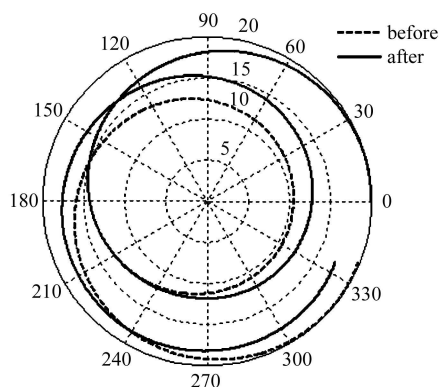


图6 扰动器启动前、后的电子轨迹

从图5中可以发现, 扰动器开启后, 电子的振幅很快减小; 从图6可以看出, 启动扰动器可避免因电子与真空盒内壁或外壁碰撞而导致的束流损失.

模拟计算结果还表明, 扰动器磁感应最佳的强度应该是图4中曲线B的强度. 当磁感应强度超过此值, 即使增加磁感应强度, 其振幅减小的效果也不明显. 图7是不同磁感应强度电子振幅随时间分布曲线, A, B, C分别对应图4中的磁感应强度. 电子从 $r=20\text{cm}$, $\theta=0^\circ$ 处开始注入, 注入时振幅为5cm.

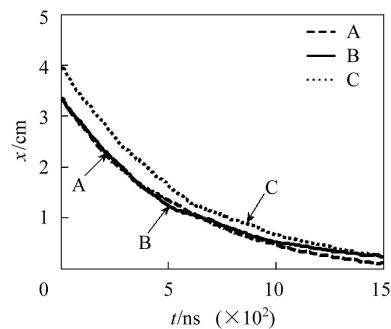


图7 扰动器不同磁感应强度电子振幅曲线

另外, 从图6的电子轨迹和图8的扰动器不同放置角度的电子振幅变化图可知, 扰动器放置的最佳位置应该是在 $210^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$ 范围, 而不是通常的 $60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ 范围^[2]内. 这样放置既可在电子靠近内壁前让其返回, 避免电子损失, 又可以快速减小振幅.

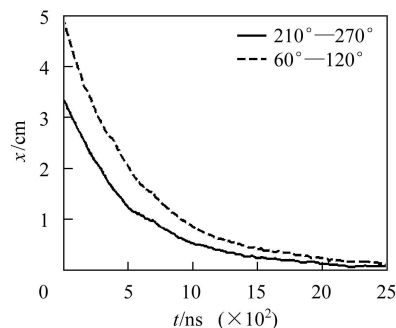


图8 扰动器不同放置角度振幅曲线

4 结语

本文利用 Poisson Superfish 程序设计的磁铁能很好地满足微型韧致辐射光源储存环的设计要求, 扰动

器磁场也满足不影响平衡轨道电子的条件. 用电子轨迹跟踪方法对扰动器进行研究的结果表明: 所设计的储存环扰动器放置在 $210^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$ 范围内效果更好; 扰动器磁场应在 200Gauss 左右; 电子入射位置应尽量靠近平衡轨道并且入射角度应尽量小.

参考文献(References)

- | | |
|--|---|
| <p>1 Yamada H. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003, B199: 509—516</p> <p>2 Yamada H, Kitazawa Y, Kanai Y et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2001, A467-468:</p> | <p>122—125</p> <p>3 Takeshi Takayama. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1987, B24/25: 420—424</p> <p>4 Hammer C L, Bureau A J. Rev. Sci. Instrum., 1955, 26: 594—600</p> <p>5 Takayama T. Rev. Sci. Instrum., 1989, 60: 1759—1962</p> |
|--|---|

Magnet and Perturbator Design for a Mini Bremsstrahlung X-Ray Source

DAI Jian-Ping¹ GU Xiao-Feng^{1,2;1)}

¹ (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

² (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A novel X-ray source based on tiny target Bremsstrahlung and tabletop synchrotron was introduced in this paper. It is advantageous in the simple size and low price, perfect in high brilliance and flat spectrum, and it can be used as quasi-point X-ray source. With the help of Poisson Superfish and electron trace program, this paper describes the design method and presents the essential design work for its storage ring and perturbator. The designed magnet satisfies the performance specification, and realizes an effective injection by use of the perturbator.

Key words bremsstrahlung X-ray source, storage ring magnet, perturbator, electron trace, Poisson Superfish