

合肥 800MeV 电子储存环波荡器的 设计和模型的研制

陈志诚 刘建扬 徐建铭
(中国科学技术大学) (中国科学院高能物理研究所)

摘 要

用于合肥 800MeV 电子储存环的永磁波荡器正处于建造中。本文对波荡器辐射特性及磁铁的设计考虑作了介绍,并报告了 10 周期混合型波荡器模型的设计、研制与磁场测量结果。

一、引 言

波荡器 (Undulator) 是一种周期性的磁铁装置,当插入到电子储存环直线节上时,能够提供比弯转磁铁产生的辐射具有更高亮度的准单色同步辐射光,因此成为储存环的重要插入元件,它的技术可靠性已由国外许多实验室的成功经验所证实^[1]。波荡器主要有以下三个特点: 1) 波荡器磁铁的特殊结构使循环的电子束不产生净的偏转或偏移,对电子束运动不产生严重的影响; 2) 电子束在弯转磁铁中辐射连续平滑的光谱,而在波荡器中,由于辐射的干涉效应使得辐射光在某些波长被抑制,而在某些特定的波长得到加强,辐射集中在几个狭小的波长间隔内,得到的光谱是几个狭窄的准单色峰; 3) 辐射集中在沿轴很小的空间立体角内,具有高的空间亮度和高准直性,使光束线元件的发热减小,辐射功率可得到更有效的利用。

当波荡器磁铁使用高磁性能的稀土金属永磁材料时,不需要激磁电流,没有功率消耗,能节省制造费用,并可大大减小磁周期长度,以获得短的辐射波长和充分利用有限的储存环直线节空间。永磁波荡器不需要其它附加设备,使磁铁建造的复杂性大大简化^[2]。

本文对合肥 800MeV 电子储存环的波荡器的磁铁设计和波荡器模型的机械结构及磁场测量结果作了介绍。

二、波荡器磁铁的设计

合肥储存环波荡器磁铁采用了混合型磁路设计方案^[3]。混合型是由钐钴 (SmCo₅) 永久磁铁和软铁相间排列,混合组成磁路 (图 1)。永久磁铁起着激发磁通的“源”的作用,磁

铁的磁化方向沿轴按 180° 交替变化, 软铁用作磁极, 磁铁的中心平面上将产生正弦形周期磁场即 $B_y = B_0 \sin 2\pi \frac{s}{\lambda_u}$, 式中 B_0 为峰值磁场, λ_u 为波荡器磁周期长度, s 为沿轴线长度。混合型磁铁具有以下二个有利特点: 1) 混合型磁铁的场分布主要取决于磁极的表面形状, 对永磁材料性能的均一性可不必严格要求; 2) 每对磁极所对应的峰值磁场可用调磁螺杆进行微调, 因而可获得较高的峰值场均匀性。

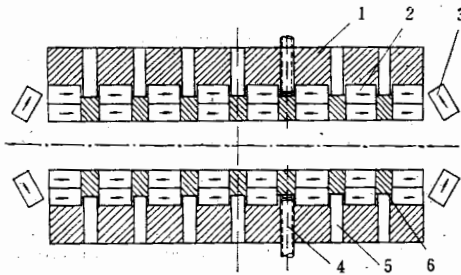


图 1 混合型波荡器示意图。

1. 托板, 2. 永久磁铁, 3. 旋转磁极, 4. 调磁螺钉, 5. 螺孔, 6. 软铁磁极

我们利用有限差分计算程序进行磁路设计, 同时也对混合型磁铁的场形分布做解析分析^[4]。峰值磁场的基波可表示为

$$B_0 = \frac{4B_r}{\pi} \left\{ \left(\frac{4\pi M_i}{B_r} \right) \left[1 - \frac{\lambda_u}{2\pi h_1} \left(1 - e^{-\frac{2\pi h_1}{\lambda_u}} \right) \right] \sin \frac{\pi l_1}{\lambda_u} + \left(1 - e^{-\frac{2\pi h_2}{\lambda_u}} \right) \sin \frac{\pi l_2}{\lambda_u} \right\} e^{-\pi g/\lambda_u} \quad (1)$$

其中 B_r 为永久磁铁的剩磁强度, h_1 、 h_2 和 l_1 、 l_2 分别为软铁磁极和永久磁铁的高度和长度, 其中 $h_1 = \frac{2}{3} h_2$,

$$\left(\frac{4\pi M_i}{B_r} \right) = \frac{\pi h_1 l_2}{K_f \pi l_1 l_2 / 2 + K_r \lambda_u h_1 t h(\pi g / \lambda_u)}$$

K_f 、 K_r 分别为漏磁系数和磁阻系数。

根据波荡器辐射特性, 当 $K^2 = 1.2$ 时, 辐射光的第一次谐波具有最高亮度, 第三、五次谐波也可获得较高亮度。波荡器辐射亮度和光谱线宽极大地取决于磁周期数, 即有

$$\frac{d^2 I}{d\omega / \omega d\Omega} \propto N^2, \quad \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \propto \frac{1}{N},$$

据此对合肥储存环波荡器进行了设计。当取 $\lambda_u = 4.8\text{cm}$, $l_1 = \lambda_u/6$, $l_2 = \lambda_u/3$, $h_2 = 2.7\text{cm}$ 时, 波荡器磁路较为理想, 可充分利用磁铁的磁性能。当 $g/\lambda_u = 0.5$ 时, 其峰值磁场可达 $B_0 = 0.29\text{T}$, 相应地有 $K = 1.3$, 磁场的第三次谐波分量小于 3.5%, 因此是一个近似性很好的正弦分布。合肥储存环的设计给波荡器留出的直线节自由空间允许波荡器长度取为 2.1m, 这样的长度至少可安排 40 个磁周期, 其辐射特性已在表 1 中给出。

1) K 是波荡器的磁偏转参数, 即 $K = 0.934 B_0 (T) \lambda_u (\text{cm})$ 。

波荡器磁铁的最小有用间隙受束流真空管道垂直孔径限制,在储存环上插入波荡器后应保证储存束流的寿命不受影响,为了获得足够长的束流寿命,减少束流损失,波荡器间隙至少要满足

$$g > 14\sigma_y \quad (2)$$

σ_y 为磁铁出口处束流的均方根半高度,考虑到束流可能的闭轨畸变,必须加上一定的安全系数.取平均垂直方向畸变量 $\langle \delta y_c \rangle \approx 6\text{mm}$, 计及真空管道壁厚和安装间隙,取最小间隙 $g = 2.4\text{cm}$.

在垂直方向上,波荡器相对于轨道中心平面对称,相对于中点,磁铁左右对称,并在中点处有一磁场最大值.电子束通过波荡器后,不能有净的轨道偏移或偏转,因此要求没有净的二极磁场.为了补偿净二极场的影响,需要在磁铁的两个终端设置可调磁极,通过调节边缘磁场使场沿轴的积分为零,即 $\int B ds = 0$. 但事实上要调节 $\int B ds = 0$ 是不容易的,因此我们给一限制 $\int B ds \leq 150\text{Gs}\cdot\text{cm}$, 使净二极场引起的闭轨畸变不重要.

当电子束通过波荡器时,垂直方向运动转换矩阵为

$$M_y = \begin{bmatrix} \cos K_{eq}s & \frac{1}{K_{eq}} \sin K_{eq}s \\ -K_{eq} \sin K_{eq}s & \cos K_{eq}s \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 $K_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{K}{\gamma} P_0$, $P_0 = \frac{2\pi}{\lambda_u}$. 因此,将会引起储存环对称性及工作点的变化.经过矩阵运算,可以给出垂直方向运动的相移、振荡数和局部 β_y 函数的改变量为

$$\begin{cases} \Delta\mu_y = -\frac{\beta_y K_{eq}^2 L}{2} \left(1 - \frac{L^2}{4\beta_y^2}\right) \\ \Delta\nu_y = \Delta\mu_y / 2\pi \\ \Delta\beta_y / \beta_{y0} = \left(1 + \frac{L^2}{4\beta_y^2}\right) \sin \mu_y / (\sin \mu_y + \Delta\mu_y \cos \mu_y) - 1 \end{cases} \quad (4)$$

储存环垂直方向运动的工作点为 $\nu_y = 2.58$, 根据前面所给的储存环和波荡器参数,可以得到 $\Delta\mu_y = 0.0152$, $\Delta\nu_y = 0.0024$, $\Delta\beta_y / \beta_y = 0.05$. 工作点的变化是在所允许的范围以内,通过调节其它聚焦参数,可使储存环对称性基本恢复到原来的状态.

水平分量 B_x 的四极效应将引起对储存环束流光学的修正,但对于弱场波荡器和高能电子束,磁场的四极效应影响很小.若磁场的最大相对误差为 $\frac{\Delta B}{B_0} = 5\%$, 则当 $K = 1.2$

时,束流水平横向运动的轨道偏移量和束流角散的增量分别为 $\Delta x = 2.7 \times 10^{-3}\text{mm}$, $\Delta x' = 2.8 \times 10^{-3}\text{mrad}$, 对束流的扰动很小.

合肥 800MeV 电子储存环波荡器插入段中心的基本参数如下(环的耦合系数为 0.1 时):

束流发射度	$\epsilon_x = 0.1215\text{mm}\cdot\text{mrad}$	$\epsilon_y = 0.0122\text{mm}\cdot\text{mrad}$
振幅函数	$\beta_x = 21.5481\text{m}$	$\beta_y = 3.4147\text{m}$
束流横向尺寸	$\sigma_x = 1.6184\text{mm}$	$\sigma_y = 0.2037\text{mm}$
束流角散	$\sigma'_x = 0.0751\text{mrad}$	$\sigma'_y = 0.0597\text{mrad}$

图

使
用
N

这样,一个 40 周期的波荡器安放在插入段,它的辐射亮度将比弯转磁铁高 10^3 以上。图 2 表示了波荡器和弯转磁铁中的辐射光谱。

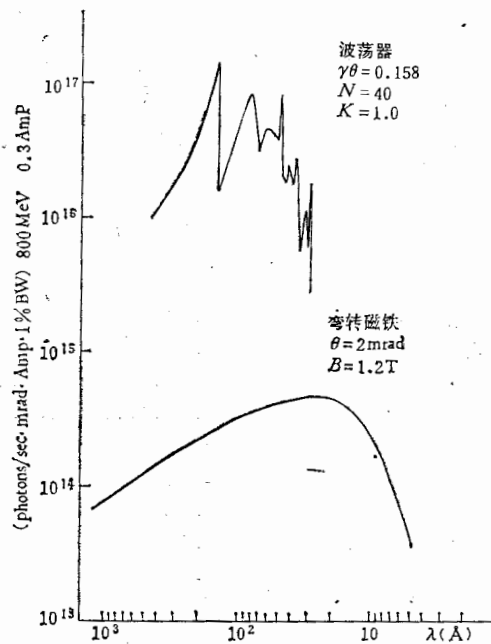


图 2 波荡器辐射和弯转磁铁辐射光谱。

调节波荡器磁场强度,便能调节辐射波长。当磁参数 K 在 0.1~1.2 之间调变时,通过使用 1、3、5 次谐波,可使用的工作波长范围为 20~168 Å。表 1 给出合肥同步辐射装置使用 40 周期波荡器的几组辐射特性参数的计算结果($\gamma = 1565.56$, $I = 0.3A$, $\lambda_u = 4.8cm$, $N = 40$)。

表 1

磁参数 K	谐波数 k	谐波波长 $\lambda(\text{Å})$	自然线宽 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}(\%)$	辐射亮度 (Phs/sec, mrad ² , A, 1%BW)	总辐射功率 (Watts)
0.4	1	106	2.5	5.1×10^{16}	2
	3	35	0.83	8.6×10^{14}	
	5	21	0.5	1.0×10^{14}	
0.8	1	129	2.5	1.3×10^{17}	8
	3	43	0.83	2.4×10^{16}	
	5	25	0.5	2.9×10^{15}	
1.2	1	168	2.5	1.6×10^{17}	18
	3	56	0.83	8.4×10^{16}	
	5	34	0.5	3.0×10^{16}	

三、波荡器模型及磁场测量

波荡器磁铁模型是为建造长 2.1m, 具有 40 个周期的波荡器而研制的, 目的是希望能从磁铁设计、机械结构和加工工艺上取得经验, 提供磁性能的实测参数。模型基本采用了前面所给的磁路参数, 但缩短了总长度, 减少了永久磁铁的用量。表 2 给出了该模型的基本参数。

表 2

材料	SmCo ₅ -软铁
永久磁铁剩磁强度 B_r	0.9T
磁周期长度 λ_m	4.8cm
永久磁铁规格	1.6cm (磁化方向) × 7.5cm × 1.8cm
软铁磁极规格	0.8cm × 7.5cm × 1.2cm
磁周期数 N	10
磁极数	19 对
模型总长度 L	0.6m
间隙可调范围 g	2.4~6.0cm
峰值磁场 B_0	0.22T ($g = 2.4\text{cm}$)

为了装卸和使用方便, 将波荡器模型设计成“c”形结构(图 3), 结构主要由上下托板及框架组成, 永久磁铁和软铁磁极粘接到铝“凹”形衔板里, 凹形衔板用螺钉固定到托板上, 上下磁极面相对。三个独立的手动调节系统分别用来调节间隙和终端旋转磁极。调间隙时, 上下托板相对于中心平面移动, 间隙大时磁场弱, 间隙小时磁场强。旋转磁极可调任意角度, 以便调节边缘磁场, 使磁场的沿轴积分 $\int B dz = 0$ 。最边缘处安有磁屏蔽, 其目的是消除磁铁对其它元件的影响, 并使边缘磁场迅速降到零。另外两端还分别安装了导向杆, 以减小调节时托板的晃动。

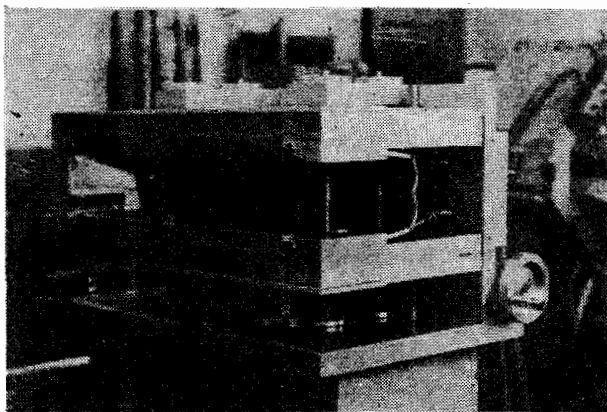


图 3 波荡器模型照片。

模型磁铁的每个周期需要 16 块永磁块, 包括终端旋转磁极, 共使用了 168 块永久磁

块。永久磁铁性能参数为 $B_r = 9065 \pm 288\text{Gs}$, $H_c = 7544 \pm 170\text{Oe}$, 磁能积 $\langle BH \rangle_m \approx 18\text{MOeGs}$ 。

磁铁是用固定在 $x-y-z$ 三维支架上的霍尔片 (Ge) 测量的, 霍尔片灵敏面积为 $1.5 \times 4\text{mm}^2$, 温度系数为 $5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, 测量时室温控制在 $26 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内。总的测量精度为 3×10^{-3} 。测量步长为 2mm , 现将磁场测量总结如下(测量结果见表 3):

1) 在波荡器中心平面上, 垂直场分量沿轴的分布是正弦形的, 图 4 给出了 $g = 2.4\text{cm}$ 时磁场的分布和不同间隙下一个周期的场分布, 磁场的第三次谐波分量小于 0.5% , 比预期的谐波量小得多。由于磁铁磁性能的差异及加工、装配等方面的原因, 初步测量时, 峰值磁场有一定的涨落, 使用调磁螺杆后, 峰值场的均匀性大大提高, 其均匀性好于 $\frac{1}{NK^2}$ 。

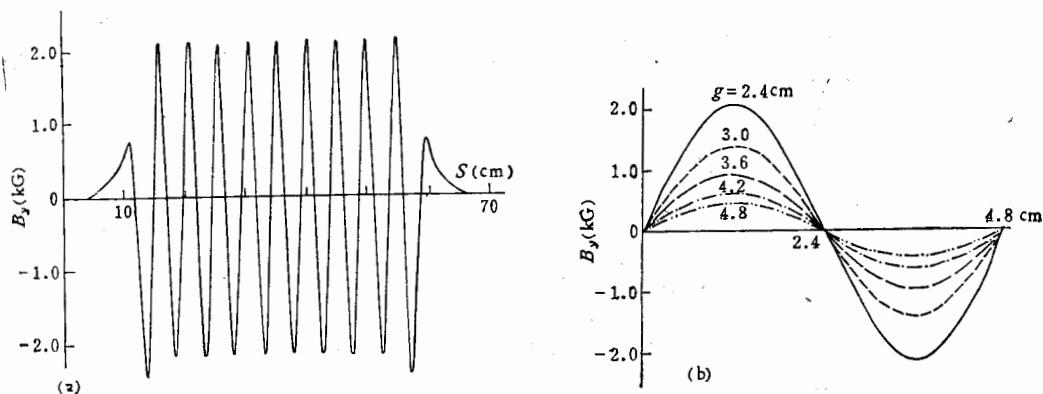


图 4 磁场分布曲线。

(a) $g = 2.4\text{cm}$ 时磁场的轴分布; (b) 不同间隙下一个周期的磁场分布

2) 终端磁铁可调任意角度, 以便使 $\int B ds = 0$ 。角度的调节依间隙的大小而变, 当 $g = 2.4\text{cm}$ 时, 终端旋转磁极在 90° 角范围内可调范围为 $1900\text{Gs}\cdot\text{cm}$ 。在不同间隙下, 对垂直场分量和水平场分量的沿轴积分进行了测量, 实际测量的结果均小于 $150\text{Gs}\cdot\text{cm}$, 满足设计要求。

3) 对于沿轴按正弦分布的垂直场分量, 在最大值处均匀区较小, 因此在峰值场点处所测得的均匀区可表征整个磁铁的均匀性。在不同间隙时, 对中心平面上偏离束轴 ± 1

表 3 波荡器模型的磁场测量结果

间 隙 (cm)	平均峰值磁场 (Gs)	峰值场均匀性 (Gs)	垂直场积分 (Gs-cm)	水平场积分 (Gs-cm)	$\pm 1\text{cm}$ 好场区相对 磁场偏差(%) $\frac{\Delta B}{B_0}$
2.4	2179	39	4.8	-93.4	0.2
3.0	1466	42	-19.9	-71.4	0.29
3.6	994	41	-78.1	-67.5	0.38
4.2	672	41	-67.8	-51.0	0.43
4.8	465	40	51.0	-70.1	0.58

cm 的横向场区进行了测量,并给出了相对于轴上峰值磁场的相对偏差。由所测结果可见偏差远远小于束流光学要求的 $\pm 5\%$ 。

该模型的机械结构较简便,调节系统灵活稳定。模型的磁路设计及所测磁场达到预期要求。

在混合型波荡器的场形分析方面,曾与高能所刘茂三、陈仁怀同志作了有益的讨论。在磁场测量方面得到了阎和平同志的大力协助,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] G. Brown, K. Halbach, J. Harrio and H. Winick, *N. I. M.*, 208(1983), 65.
- [2] M. W. Pool and R. P. Walker, Periodic magnets for undulators and free electron laser, the International Conference on Magnet Technology, 1981.
- [3] E. Hoyer et al, *IEEE Trans.*, NS-30(1983), 3118.
- [4] 刘茂三等, Proceedings of the Second China-Japan Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, 265, Institute of Modern Physics, 1983.

THE INVESTIGATION OF AN UNDULATOR FOR THE HEFEI 800 MeV ELECTRON STORAGE RING

CHEN ZHI-CHENG LIU JIAN-YANG

(University of Science and Technology of China)

XU JIAN-MING

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

In this paper, the design investigation and magnetic field measurement of a 10 period hybrid undulator are given.