

上海软 X 射线装置中纯永磁移相器的积分场垫补

王建军^{1,2} 张伟¹ 周巧根¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 张江园区 上海 201204)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 X 射线自由电子激光(Free-electron Laser, FEL)达到饱和功率输出时所需要的波荡器总长度为数十米甚至上百米,目前国内外研制的波荡器只能分段加工,且每段长度一般在 5 m 以内。为了保证两相邻波荡器间辐射光的相位相互匹配,通用的设计是在相邻波荡器之间增加移相器。移相器的加入不应电子束流产生影响,其产生的磁场沿束流方向的一二次积分必须达到技术要求。由于移相器较短,二次积分较小,可不予考虑。在不考虑永磁块非线性的基础上,导出了纯永磁移相器的磁场一次积分以及调整移相器中某些磁化块的高度和倾斜角度产生的磁场一次积分变化量的解析表达式。利用这种方法对上海软 X 射线自由电子激光装置中的 5 台移相器做积分场垫补,使得每台移相器的磁场一次积分在好场区内都小于 20 Gs·cm,满足工程设计要求。

关键词 移相器, 磁矩, 积分场

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.070102

Integral field shimming for pure permanent magnet phase shifter in SXFEL

WANG Jianjun^{1,2} ZHANG Wei¹ ZHOU Qiaogen¹

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Zhangjiang Campus, Shanghai 201204, China)

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

Abstract Background: As one of the most important equipment in free-electron lasers (FEL), undulator system is as long as tens meters or even hundreds meters. Due to the industrial technical constraints of the undulator manufacture, undulator system has to be segmented by 5-m length. In order to ensure that the phase of the radiation field between two adjacent undulators is matched with each other, conventionally, phase shifter components are inserted between the adjacent undulators. **Purpose:** This study aims to minimize the integral field error of the phase shifter for undulator linkage. **Methods:** Based on the factor that the nonlinearity of pure permanent magnet can be ignored, the first order integral term of magnet field is derivated. By shimming the height and tilt angle of vertically magnetization block in the phase shifter, its integral error can be reduced. Finally, a two-dimensional high-precision Hall probe is used in the experiment to measure the integral error of the phase shifter in different magnetic gaps. **Results:** After field correction, the integral error of the phase shifter is less than 20 Gs·cm both in the center line for all gaps and horizontal position x less than 2 mm at the minimum gap. **Conclusion:** This method has been applied for all the 6 phase shifters that satisfy engineering design requirements in Shanghai soft X-ray free electron laser (SXFEL).

Key words Phase shifter, Magnetic moment, Field integral

第一作者: 王建军, 男, 1991 年出生, 2014 年毕业于湘潭大学, 现为硕士研究生, 研究领域为移相器方向

通信作者: 周巧根, E-mail: zhouqiaogen@sinap.ac.cn

收稿日期: 2017-03-03, 修回日期: 2017-03-29

First author: WANG Jianjun, male, born in 1991, graduated from Xiangtan University in 2014, master student, focusing on phase shifter technology

Corresponding author: ZHOU Qiaogen, E-mail: zhouqiaogen@sinap.ac.cn

Received date: 2017-03-03, accepted date: 2017-03-29

上海软 X 射线自由电子激光(Shanghai Soft X-ray Free Electron Laser, SXFEL)实验装置主要建设内容包括建造由光阴极注入器、主加速器、两级高增益谐波放大振荡器系统以及加速器隧道、调束管长廊、中央控制室和公用工程配套设施等装置。波荡器系统分为调制段波荡器和辐射段波荡器两部分。调制段波荡器包括两台 U80 和一台 U40, 每台长度均为 1.5 m。辐射段波荡器有两种: 总长 6 m 的 U40 和总长 18 m 的 U23.5, 每台波荡器长 3 m, 共有 8 台^[1]。

波荡器分段会引起电子束的辐射光在下一段波荡器入口的相位变化。对于 SXFEL 装置, 由于波荡器气隙可调, 为了使辐射段波荡器内的辐射光相位相互匹配, 必须在波荡器段间放置移相器。SXFEL 装置中共有 5 台相同设计的移相器, 均采用了标准的 Halbach 磁铁结构^[2-3]。每台移相器都由上下各 7 块钕铁硼永磁体排列而成, 钕铁硼永磁体的型号为 N35SH, 剩磁为 1.23 T。所有磁化块横向尺寸设计一致, 每块磁化块的厚度设计是为了在保证移相器所产生磁场沿束流方向的一次积分达到最小, 并尽可能减小端部纵向漏磁场。移相器的最小间隙为 11 mm, 磁化块排列及尺寸如图 1 所示, 移相器在束流中心轴上产生的磁场分布如图 2 所示。

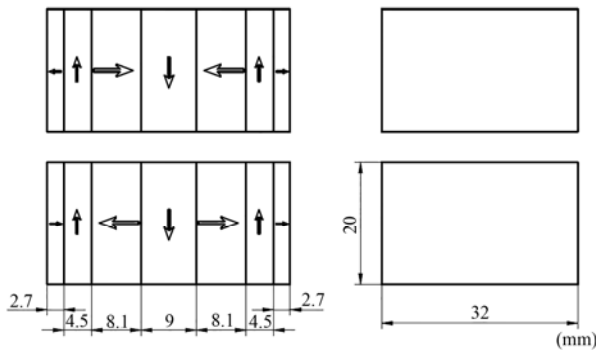


图 1 纯永磁移相器磁化块排列及尺寸示意图
Fig.1 Geometric model of pure permanent magnet phase shifter.

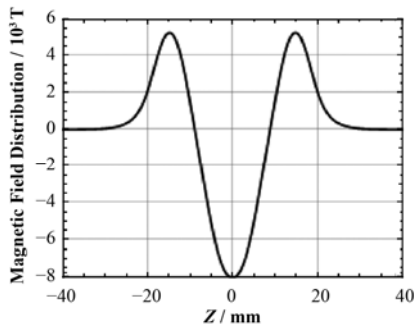


图 2 移相器所产生的磁场示意图
Fig.2 Magnetic field generated by the phase shifter.

图 3 为本实验室所组装的纯永磁移相器的实物照片, 其中永磁块被固定组件所固定。底座与固定组件之间留有缝隙, 用于垫补操作。磁体的布置具有高度的对称性。



图 3 纯永磁移相器实物图
Fig.3 Photograph of pure permanent magnet phase shifter.

1 移相器一次积分场的计算

1.1 移相器一次积分公式推导

由于源点在某一轴线上所产生的磁场的无穷积分等于源沿该轴的长度与沿该轴无穷长的源在轴线上任一点处产生的磁场的乘积。由该结论可简化求解均匀磁化长方体磁化块所产生磁场的一次积分。设场点的坐标为 (x, y) , 将磁化强度三个分量在空间任意一点产生的场沿 z 轴的一次积分写成矩阵形式^[4-5]:

$$\begin{bmatrix} I_x(x, y) \\ I_y(x, y) \\ I_z(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

由计算可得各系数分别为:

$$D_{xy} = -\frac{c}{2\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \ln(\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_j - y)^2})$$

$$D_{yy} = -\frac{c}{2\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \arctan \frac{x_i - x}{y_j - y}$$

$$D_{xy} = D_{yx}, D_{xz} = D_{zx}, D_{yz} = D_{zy}$$

$$D_{xz} = 0, D_{yz} = 0, D_{zz} = 0$$

$$D_{xx} + D_{yy} + D_{zz} = 0 \quad (\text{Point field outside magnet}) \quad (2)$$

式中: c 为相应磁化块在 z 方向(束流方向)上的尺寸宽度; $[x_1, x_2]$ 为相应磁化块在 x 方向上的区间; $[y_1, y_2]$ 为相应磁化块在 y 方向上的区间。其坐标轴示意图如图 4 所示。

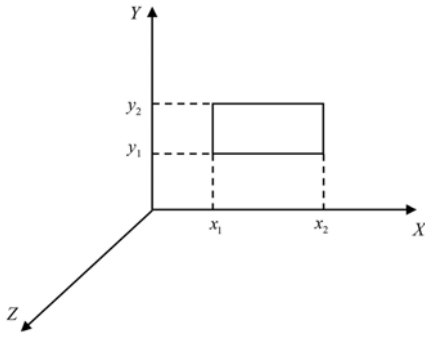


图 4 初始坐标示意图
Fig.4 Initial coordinate diagram.

则单个永磁块所产生磁场的一次积分可表示为：

$$\begin{aligned} I_x &= D_{xx}M_x + D_{xy}M_y \\ I_y &= D_{xy}M_x + D_{yy}M_y \end{aligned} \quad (3)$$

由上述可得整台移相器的一次积分可表示为：

$$\begin{aligned} I_x &= \sum_{k=1}^{14} (D_{xxk}M_{xk} + D_{xyk}M_{yk}) \\ I_y &= \sum_{k=1}^{14} (D_{xyk}M_{xk} + D_{yyk}M_{yk}) \end{aligned} \quad (4)$$

1.2 单块磁化块高度调节导致的一次积分变化

将式(2)中的 D_{xy} 、 D_{yy} 对 y 求偏导得：

$$\begin{aligned} \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} &= \frac{c}{2\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \frac{y_j - y}{(x_i - x)^2 + (y_j - y)^2} \\ \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} &= -\frac{c}{2\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \frac{x_i - x}{(x_i - x)^2 + (y_j - y)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

则根据式(5)，当沿 y 方向磁化的磁化块（此时 $M_x = 0$ 、 $M_z = 0$ ）高度变化为 Δy 时，所产生磁场的一次积分分量的变化量 ΔI_x 、 ΔI_y 分别为：

$$\begin{aligned} \Delta I_x &= -\Delta y \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} M_y \\ \Delta I_y &= -\Delta y \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} M_y \end{aligned} \quad (6)$$

1.3 单块磁化块倾斜导致的一次积分变化

当小角度转动单块磁化块时，一次积分场分量 I_x 、 I_y 随磁化块倾斜角度而变化，以下排磁化块为例，若磁化块沿上表面中心点的旋转角度为 α ，令上表面中心点的坐标标记为 (x_3, y_3) ，则：

$$x_3 = \frac{x_1 + x_2}{2}, y_3 = y_2 \quad (7)$$

为了计算简单，将坐标轴以坐标 (x_3, y_3) 为中心同样旋转 α ，旋转后的坐标系如图 5 所示。

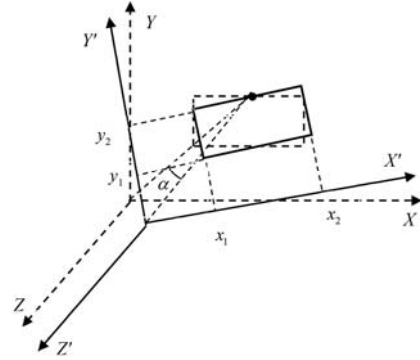


图 5 旋转后的坐标轴
Fig.5 Axis after rotation.

则旋转后相应的磁化块在新坐标系 X' 方向上的区间仍为 $[x_1, x_2]$ ，磁化块在新坐标系 Y' 方向上的区间仍为 $[y_1, y_2]$ ，此时场点在新坐标系下的坐标 (x', y') 变为：

$$\begin{aligned} x' &= (x - x_3) \cos \alpha + (y - y_3) \sin \alpha + x_3 \\ y' &= -(x - x_3) \sin \alpha + (y - y_3) \cos \alpha + y_3 \end{aligned} \quad (8)$$

此时根据式(3)求出旋转后的磁场沿束流方向的一次积分分量 I'_x 、 I'_y ，则最终变换后场点在初始坐标系下沿束流方向的一次积分 I_x 、 I_y 的值可用式(9)计算。

$$\begin{aligned} I_x &= I'_x \cos \alpha - I'_y \sin \alpha \\ I_y &= I'_y \cos \alpha + I'_x \sin \alpha \end{aligned} \quad (9)$$

同样，利用上述相同的方法对上排磁化块进行旋转计算，可以得到如式(8)-(9)相似的结果。

2 移相器的一次积分垫补

移相器组装完毕后，利用二维高精度霍尔探头可以对移相器进行磁场测试，测量得到不同磁间隙下移相器中心平面线上的磁场数据，通过计算可以得到移相器不同磁间隙下不同横向位置上的一次积分分布。本实验中移相器的垫补操作在磁间隙 11 mm 下进行，垫补前 11 mm 磁间隙下中心平面上不同横向位置 $(x = -\Delta x, 0, \Delta x)$ 上的一次积分值标注为 $I_{x-\Delta x}^{X,Y}$ 、 $I_x^{X,Y}$ 、 $I_{x+\Delta x}^{X,Y}$ ，其中：上标 X 或 Y 分别表示水平磁场和垂直磁场对应的积分。

从测量得到的磁场数据可知，垫补前移相器所产生磁场沿束流方向的一次积分分量 I_y 为较大负值。根据图 1 磁化块的磁化方向，我们理论上可以通过垫高厚度为 4.5 mm 的磁化块或降低厚度为

9 mm 的磁化块进行积分场垫补, 但实际安装时, 我们已将磁化块的固定组件与底座之间的间隙设为 0, 因而无法降低厚度为 9 mm 的磁化块, 所以只能垫高厚度为 4.5 mm 的磁化块。利用式(1)–(9), 对移相器下部磁排列中单块 4.5 mm 的磁化块进行模拟计算, 当($x = \pm 2, \pm 1, 0$)时, 单块磁化块所产生磁场沿束流方向的一次积分量随磁化块高变化量 Δy 或旋转角度 α 变化的趋势如图 6 所示。

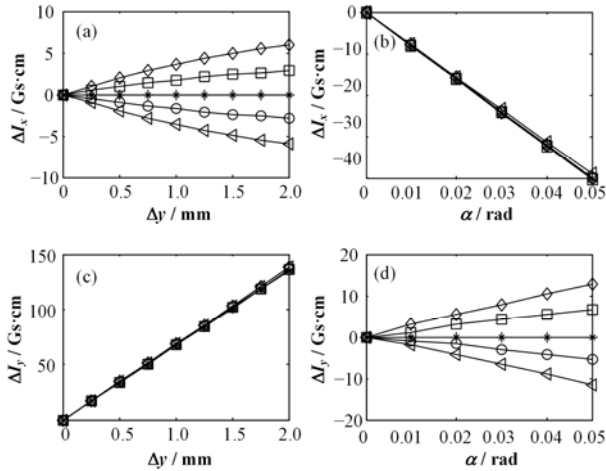


图 6 不同 x 坐标下一次积分量随磁化块高度或旋转角度的变化趋势

◇: $I_{-2}^{X,Y}$, □: $I_{-1}^{X,Y}$, *: $I_0^{X,Y}$, ○: $I_1^{X,Y}$, △: $I_2^{X,Y}$

Fig.6 First integral field with the magnetization block height or the rotation angle changes on the different x -coordinate.

◇: $I_{-2}^{X,Y}$, □: $I_{-1}^{X,Y}$, *: $I_0^{X,Y}$, ○: $I_1^{X,Y}$, △: $I_2^{X,Y}$

由模拟结果及图 6 可得, 当小角度旋转磁化块时, 中轴线上($x=0$)处的一次积分场分量 I_y 不变, 且不同 x 坐标下, Δy 与 ΔI_x 、 ΔI_y , 及 α 与 ΔI_x 、 ΔI_y 可以近似为线性关系, 因而我们可以通过求解方程组(10)寻找垫补最优解:

$$\begin{aligned} I_{x-\Delta x}^X &= I_{x-\Delta x}^X + (\alpha + \beta)K_{x-\Delta x}^X + (n-m)G_{x-\Delta x}^X \\ I_x^{X'} &= I_x^X + (\alpha + \beta)K_x^X \\ I_{x+\Delta x}^X &= I_{x+\Delta x}^X + (\alpha + \beta)K_{x+\Delta x}^X + (n-m)G_{x+\Delta x}^X \\ I_{x-\Delta x}^Y &= I_{x-\Delta x}^Y + (m+n)G_{x-\Delta x}^Y + (\beta - \alpha)K_{x-\Delta x}^Y \\ I_x^{Y'} &= I_x^Y + (m+n)G_x^Y \\ I_{x+\Delta x}^Y &= I_{x+\Delta x}^Y + (m+n)G_{x+\Delta x}^Y + (\beta - \alpha)K_{x+\Delta x}^Y \end{aligned} \quad (10)$$

式中: α 、 β 为上下梁磁化块所需要的倾斜角度; m 、 n 为上下梁磁化块所需要的高度调节量; $K_{x-\Delta x}^{X,Y}$ 、 K_x^X 、 $K_{x+\Delta x}^{X,Y}$ 为单位倾斜角度下不同横向位置 ($x = -\Delta x, 0, \Delta x$) 处水平或垂直磁场的一次积分变化量; $G_{x-\Delta x}^{X,Y}$ 、 G_x^Y 、 $G_{x+\Delta x}^{X,Y}$ 分别为单位高度变化时不同横向位置 ($x = -\Delta x, 0, \Delta x$) 处水平或垂直磁场的一次积分变化量。这些参数均可以由图 6 计算得到。根

据式(10), 可以得到目标函数:

$$F_{\min} = (I_{x-\Delta x}^{X'} - I_y)^2 + (I_x^{X'})^2 + (I_{x+\Delta x}^{X'})^2 + (I_{x-\Delta x}^{Y'} - I_x)^2 + (I_x^{Y'})^2 + (I_{x+\Delta x}^{Y'})^2 \quad (11)$$

优化前移相器在最小间隙下所产生磁场沿束流方向的一次积分随 x 坐标的变化如表 1 所示。

表 1 垫补前移相器一次积分场随 x 坐标的变化
Table 1 The first integral field of the phase shifter changes with the x -coordinate changes before shimming.

x 坐标	一次积分 I_y	一次积分 I_x
x axis / mm	First integral I_y	First integral I_x
	/ Gs·cm	/ Gs·cm
-2	-104.81	7.97
-1	-106.95	11.81
0	-109.84	22.37
1	-111.79	23.57
2	-107.08	30.81

通过求解式(11)得到目标函数最优解近似为 $\alpha=0.008$ rad, $\beta=0.016$ rad, $m=1.24$ mm, $n=0.36$ mm。根据所得数据取移相器上、下排列中各一块厚度为 4.5 mm 的磁化块分别进行角度调整。单块磁化块角度的调整是通过改变磁化块固定组件底部两端的垫片高度来实现的。在调整磁化块高度时, 由于所得 m 值较大, 实验中单块磁化块的移动量无法满足, 所以我们分别对移相器上排列中的两块厚度为 4.5 mm 的磁化块各向下移动 0.62 mm, 并取移相器下排列中未进行角度调整的厚度为 4.5 mm 的磁化块向上移动 0.36 mm, 垫补后再次进行测量。将最优解代入式(10)所计算的垫补后的期望值与实际垫补后一次积分的测量值随 x 坐标的变化如表 2 所示。

表 2 期望值与实际垫补后一次积分的测量值随 x 坐标的变化

Table 2 The expected value and the measured value of the first integral field after shimming on different x -coordinate.

x 坐标	期望值 I_y	测量值 I_y	期望值 I_x	测量值 I_x
x axis / mm	Expected I_y	Measured I_y	Expected I_x	Measured I_x
	/ Gs·cm	/ Gs·cm	/ Gs·cm	/ Gs·cm
-2	1.42	12.54	-8.80	14.05
-1	0.27	9.81	-6.29	-6.31
0	-1.74	3.52	3.03	-0.57
1	-2.61	-0.75	2.98	-0.27
2	3.02	-1.16	8.87	4.36

表 2 中明显可以看到垫补后最小间隙下, 一次积分 I_x 、 I_y 得到很大的改善, 在 $-2 \text{ mm} \leq x \leq 2 \text{ mm}$ 内,

均小于 15 Gs·cm。由于调节磁化块高度或旋转角度时均存在误差以及测量所存在的误差，使理论值与实验测量值存在差距。图 7 为垫补前后不同磁间隙下中心轴线上一次积分数值对比，在磁间隙 11-50 mm 范围内，垫补前一次积分 I_x 在 15-30 Gs·cm 之间，一次积分 I_y 在 -120- -20 Gs·cm 之间，垫补后各间隙下的 I_x 、 I_y 均小于 17 Gs·cm。

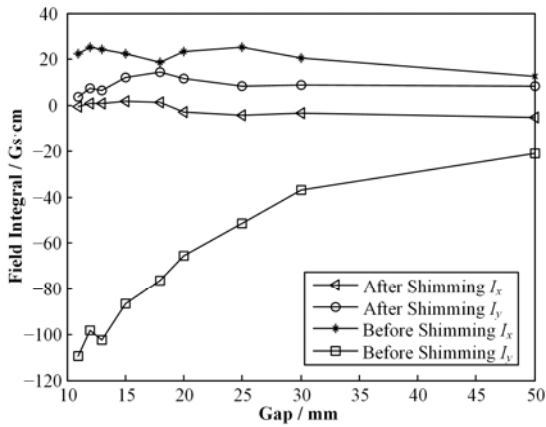


图 7 垫补前后不同磁间隙下中心轴线上一次积分数值对比
Fig.7 Field integral errors in center line for different gaps before and after shimming.

移相器的磁场测量数据来源于上海光源磁测实验室的霍尔探头测量装置，该装置利用两维霍尔探头的 On-fly 点测技术，可得到移相器气隙内任意沿束流方向的直线上的水平磁场和垂直磁场分布，通过对所测得的磁场分布进行数值积分获得两个方向的磁场沿束流方向的一次积分，积分范围为 $-40 \text{ cm} \leq z \leq 40 \text{ cm}$ ，其中 $z=0$ 为移相器中心点的 z 坐标。该装置的测量重复性好于 2 Gs。

3 结语

本文利用均匀磁化长方体磁化块所产生的磁场公式推导出移相器中任意一磁化块高度或倾斜角度变化所带来的一次积分变化量，并成功应用于

SXFEL 实验装置中移相器的垫补，使垫补后的移相器在不同间隙下及不同横向位置上的一次积分均满足技术要求。文中理论公式的推导是在假设磁化块并无非线性影响的前提下进行的，而实际采购的磁化块均具有一定的非线性，磁化块的非线性对本实验的影响本文并没有考虑。目前 SXFEL 实验装置中 5 台移相器已经全部研制结束，并顺利通过验收，现已完成隧道内的现场安装，预计不久将调束出光。

参考文献

- 1 赵振堂. X 射线自由电子激光试验装置初步设计报告[R]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2014.
ZHAO Zhen tang. Preliminary design report of X-ray free electron laser test device[R]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- 2 Diviaco B, Ferrando O, Tosi L, *et al.* Operational aspects of elliptical undulators at ELETTRA[R]. Shanghai: 25th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop (SSILS), 2001.
- 3 Ganter R. Swiss FEL phase matcher specifications[R]. Swiss: Paul Scherrer Institute, 2012.
- 4 郭硕鸿. 电动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 10-15.
GUO Shuohong. Electrodynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 10-15.
- 5 周巧根. 均匀磁化永磁块的磁化强度误差对磁场及其一二次积分的影响[R]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2008.
ZHOU Qiaogen. Influence of magnetization error of uniform magnetized permanent magnets on magnetic field and its first or second integral[R]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008.