

文章编号: 1001-4322(2005)10-1585-05

# 上海深紫外自由电子激光波荡器的端部磁结构设计<sup>\*</sup>

蔡根旺, 贾启卡

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

**摘 要:** 针对固定间隙的上海深紫外自由电子激光(SDUV-FEL)混合型波荡器的端部,用 Radia程序进行了模拟计算。在端部不加任何电磁线圈补偿的情况下,通过减小端部磁铁、磁极的体积和变动端部磁极位置的方法对波荡器磁场进行了优化,优化以后波荡器横向磁场的边缘场强度降到  $5 \times 10^{-4}$  T(距离端部磁块边缘 10 mm 处),边缘场波形没有了明显突起,优化后的横向磁场的一次积分曲线和二次积分曲线都有很大改善,端口处的一次积分值、二次积分值接近于零。

**关键词:** 混合型波荡器; 端部设计; 边缘场; 自由电子激光

**中图分类号:** TL503.8      **文献标识码:** A

波荡器是第三代同步辐射光源及自由电子激光的关键元件,自由电子激光的两个主要发展方向是高功率和短波长<sup>[1]</sup>。相应的用于自由电子激光的波荡器主要是向着短周期、强磁场方向发展。永磁型波荡器是比较常见的一种波荡器,它包括纯永磁型和混合型两种结构。混合型波荡器是磁块和磁极(材料主要是软磁材料)相间排列而成的<sup>[2]</sup>,在间隙周期比  $gap/period < 0.4$  时产生的峰值场强比纯永磁型高,同时也有易受磁极形状影响、谐波分量等问题,但是很多短周期的波荡器选用混合型结构。

当一束电子沿中心轴穿过一波荡器,若波荡器横向磁场的一次积分和二次积分不为零,则分别会引起电子束的方向改变和横向位移。如果电子穿过的是储存环波荡器,还将引起全环的闭轨畸变、工作点漂移、动力学孔径减小等<sup>[3]</sup>,因此对波荡器横向磁场的一次积分和二次积分的优化是很有必要的。一次积分、二次积分分别定义为

$$I_y = \int B_y(z) dz \quad (1)$$

角度偏差

$$x / \text{m rad} = \frac{30}{E / \text{MeV}} I / (\text{Gs} \cdot \text{m})$$

$$J_y = \int \left( \int B_y(z) dz \right) dz \quad (2)$$

轨迹偏差

$$x / \text{mm} = \frac{30}{E / \text{MeV}} J / (\text{Gs} \cdot \text{m}^2)$$

实际上使波荡器横向磁场的一次积分和二次积分不为零的因素有很多,比如各个磁块的磁化强度矢量的差异,安装时引起的各个磁块、磁极位置上的偏差等。这些误差在设计时是不可准确计算的,是随机的,因此在模拟设计时不予考虑。还有一种误差就是在波荡器的端部磁场的周期性遭到破坏,这样也会引起一次积分和二次积分不为零,并且该影响相当大,所以每个波荡器的端部都经过了特殊的优化设计<sup>[4]</sup>。

由上述可知,波荡器端部优化设计最主要的要求是横向磁场的一次积分和二次积分尽可能的接近于零,还有横向磁场整峰个数尽可能的多、峰峰值误差小等要求。另外具体的波荡器由于用途不同其端部设计的要求也有所不同,比如:因为一束电子通过波荡器的辐射波长与波荡器磁场的周期长度和峰值强度有关,通过改变波荡器的磁铁间隙(gap)可以实现准单色光波长的连续可调<sup>[3]</sup>,所以对于这种用途的波荡器要求一次积分、二次积分在一定的磁铁间隙范围内都要接近于零;对于多段的、段与段之间有聚焦结构的波荡器,为了使波荡器磁场和聚焦磁场不相互影响,要求波荡器的边缘场尽可能地短<sup>[5]</sup>。

目前国内外对波荡器的端部设计已经有很多研究,对纯永磁型波荡器端部设计已经有一定的磁场解析公式作为指导,并且有很成熟的经验模型可循<sup>[6]</sup>。而对于混合型波荡器的端部设计,由于磁极被两侧的磁块磁化

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2005-02-03; 修订日期: 2005-05-18  
基金项目: 国家 973 专项基金资助课题 (2002CB713607)  
作者简介: 蔡根旺 (1979—), 男, 硕士研究生, 从事混合型波荡器端部技术研究; E-mail: gcaiwang@ustc.edu.cn.

时存在着非线性效应和饱和效应,其磁场分析难度较大,对于具体的混合型波荡器的端部设计需要大量的程序计算。

### 1 端部的设计

用于上海深紫外自由电子激光(SDUV-FEL)的是工作在固定间隙(宽 10 mm)下的多段且段与段中间有聚焦装置的波荡器,所以要求边缘场足够短。每段波荡器是对称的(有奇数个磁极),有 60 个周期,周期长度为 25 mm,永磁块及磁极的材料尺寸如下<sup>[5]</sup>。

永磁块 材料是钕铁硼 NNF38SH,厚  $Z_m = 8.0$  mm,高  $Y_m = 45.0$  mm,宽  $X_m = 60.0$  mm;

磁极 材料是钴钒铁,厚  $Z_p = 4.5$  mm,高  $Y_p = 38.0$  mm,宽  $X_p = 45.0$  mm。

为降低磁极饱和效应,磁极比磁块向极间隙内突出约 0.5 mm,磁极与磁块相邻的棱均有倒角。

根据国内外的经验,混合型波荡器端部设计方案有很多种:如在端部加上电磁校正线圈,随波荡器间隙 gap 的变化动态地校正一次积分<sup>[7]</sup>;或者在端部加上两个球形的偏磁块,通过转动它们的易磁化轴来校正波荡器的一次积分<sup>[8]</sup>;还可以通过减小端部磁极的磁化强度,减小端部磁极的体积来校正波荡器的一次积分场<sup>[9]</sup>。在 SDUV-FEL 波荡器端部设计中,将选择改变端部磁块和磁极的体积及变动端部磁极位置的方法。磁块和磁极的宽度变化只是对波荡器磁场好场区的大小有影响,对其它影响不大,同时考虑到工艺技术的难度,主要有针对性地变化端部磁块磁极的高度和调节磁极的位置以使一次积分和二次积分尽可能地接近于零,并且在波荡器最外侧加屏蔽铁板使边缘场范围尽可能短。

可用来模拟计算磁场的 2 维程序包括 Opera2D, PANDIRA, POISSON 等,3 维程序有 Ansys, Opera3D, Radia 等。Radia 是一个专门用于磁场设计的程序<sup>[10]</sup>,简单实用,国际上很多插入元件的物理设计都选用 Radia 做模拟计算,比如德国 DESY 实验室用于 TESLA 工程的 XFEL 波荡器<sup>[11]</sup>,美国 APS 用于 LCLS 的波荡器<sup>[12]</sup>,欧洲同步辐射装置的一些插入元件<sup>[10]</sup>等。用 Radia 程序建立了一个 17 磁极的模型,计算坐标原点在波荡器的中心,以 Z 轴为长轴,模型关于 XOY 平面左右对称,关于 XOZ 面上下对称,图 1 是模型的端部示意图。

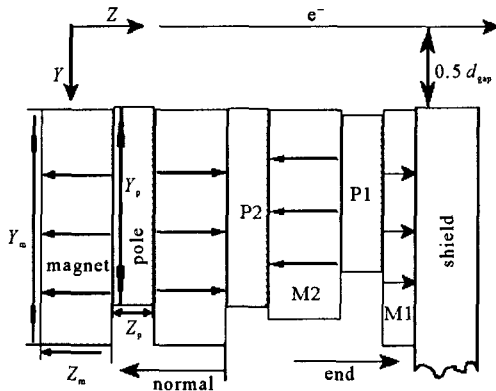


Fig. 1 End pole configuration, P1, P2 are the final two poles, M1, M2 are the final two magnets

图 1 模型端部计算的示意图,P1,P2 是优化后的端部磁极, M1,M2 是优化后的端部磁块

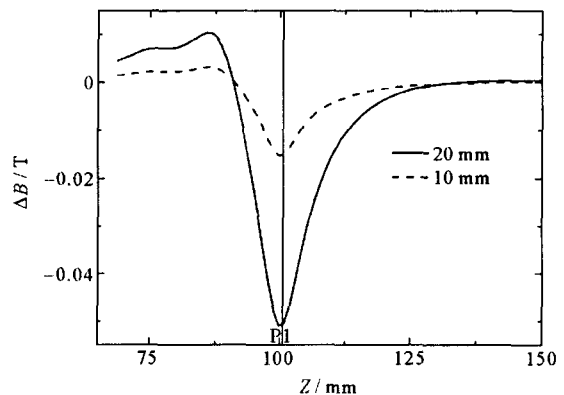


Fig. 2 Change ( $\Delta B$ ) on magnetic field after the height of the final pole P1 has been shortened by 10 mm and 20 mm separately

图 2 磁极 P1 高度  $Y_{p1}$  比标准高度 38 mm 分别减小 10 mm 和 20 mm 时对波荡器磁场的影响

分别改变端部磁极、磁块的长和高,以及磁极的位置,变化前后对波荡器磁场的影响各有不同。固定其它磁极、磁块的尺寸不变,只减小磁极 P1 的高度  $Y_{p1}$  时,对应波荡器的横向磁场造成的影响如图 2 所示,图中纵坐标是变化后的磁场 B 与变化前磁场  $B_0$  的差(即  $B = B - B_0$ ),横坐标是波荡器的纵轴 Z,标记 P1 处是端部磁极 P1 在 Z 轴上所对应的位置(以下类同)。只改变磁极 P1 处的位置时,也会影响波荡器的横向磁场,并且这个影响要比只减小磁极 P1 的高度  $Y_{p1}$  的影响明显,见图 3。当只改变磁极 P2 位置时,对波荡器横向磁场造成的影响如图 4 所示,与图 3 比较可以看出,磁极 P2 和 P1 的位置作相同改变时,磁极 P2 的位置改变对波荡器横向磁场造成的影响偏大。只减小磁块 M2 的高度时,对相邻两个磁极处的横向磁场都有影响,并且对两边的影响大致相同,见图 5。当只减小磁块 M2 的厚度时,对相邻两个磁极对应的横向磁场都有影响,见图 6,可以明显看出对磁极 P1 对应的磁场影响偏大。

SDUV-FEL 波荡器有奇数个磁极,对应磁场分布曲线有奇数个正负峰,原则上只要使端部磁极 P1 对应的

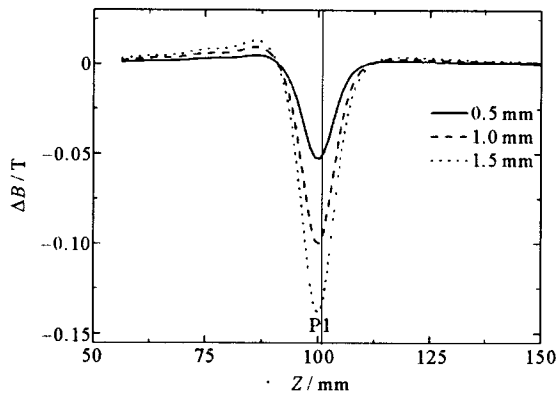


Fig. 3 Change ( $\Delta B$ ) on magnetic field after the final pole P1 has moved 0.5, 1.0 and 1.5 mm far away from axle separately  
图 3 磁极 P1 分别向远离轴的方向移动 0.5, 1.0 和 1.5 mm (即此处的间隙增大 1.0, 2.0 和 3.0 mm) 时对波荡器磁场的影响

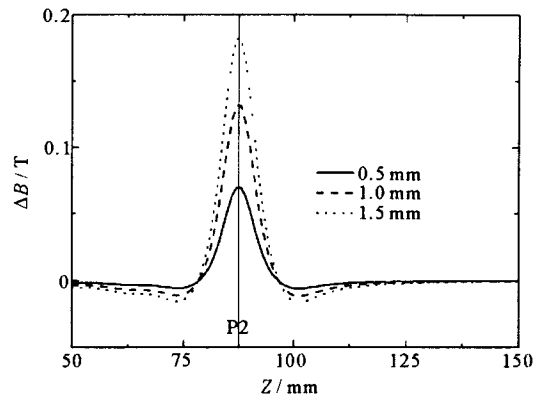


Fig. 4 Change ( $\Delta B$ ) on magnetic field after the final pole P2 has moved 0.5, 1.0 and 1.5 mm far away from axle separately  
图 4 磁极 P2 分别向远离轴的方向移动 0.5, 1.0 和 1.5 mm (即此处的间隙增大 1.0, 2.0 和 3.0 mm) 时对波荡器磁场的影响

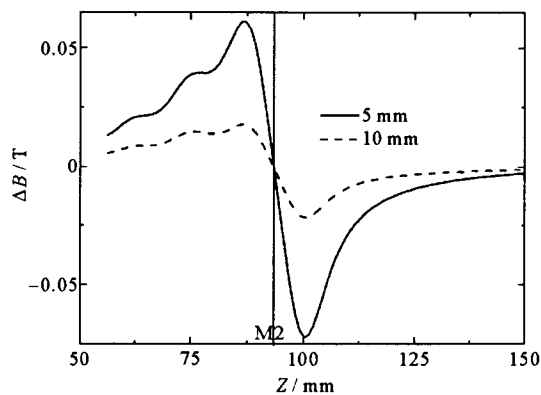


Fig. 5 Change ( $\Delta B$ ) on magnetic field after the height ( $Y_{M2}$ ) of the final magnet M2 has been shortened by 5 mm and 10 mm separately  
图 5 磁块 M2 的高度  $Y_{M2}$  比标准高度分别减小 5 mm 和 10 mm 时对磁场的影响

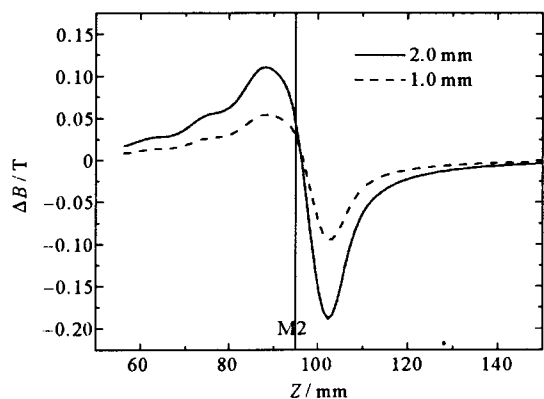


Fig. 6 Change ( $\Delta B$ ) on magnetic field after the thickness ( $Z_{M2}$ ) of the final magnet M2 has been reduced by 1.0 mm and 2.0 mm separately  
图 6 磁块 M2 的厚度  $Z_{M2}$  比标准厚度分别减小 1.0 mm 和 2.0 mm 时对磁场的影响

横向磁场峰的积分值等于波荡器中央磁极对应的横向磁场峰的积分值的一半, 就可以保证整个波荡器横向磁场的一次积分为零。最简单的方案有两种。方案 A, 只减小最端部磁极 P1 的高度 (到 17.4 mm), 使磁极 P1 对应的横向磁场峰减小, 波荡器横向磁场的一次积分、二次积分就会接近于零, 磁场分布和二次积分曲线如图 7 中虚线所示, 可以明显看出来, 除了磁极 P1 对应的峰值外, 磁极 P2 对应的峰值与中央峰值相差较大, 并且二次积分曲线也很不平整。方案 B, 除了消减磁极 P1 的高度 (减小到 12.5 mm) 以外还可联合调节端部磁块 M2 的厚度 (从 8.0 mm 减小到 6.8 mm), 使波荡器横向磁场的一次积分、二次积分接近于零。从图 7(b) 中可看出该方案除了磁极 P1 对应的峰值外, 其他峰峰值相差不大, 而横向磁场的二次积分曲线中心接近于  $Z$  轴, 但是采用这种方案的波荡器横向磁场的边缘场比较长 (离最端部磁块 30 mm 处磁场绝对值达到  $2.0 \times 10^{-3}$  T)。两种方案端部磁极 P1 的高度都很小, 并且改变磁块 M2 的厚度, 这在安装固定时有一定的工艺技术难度。

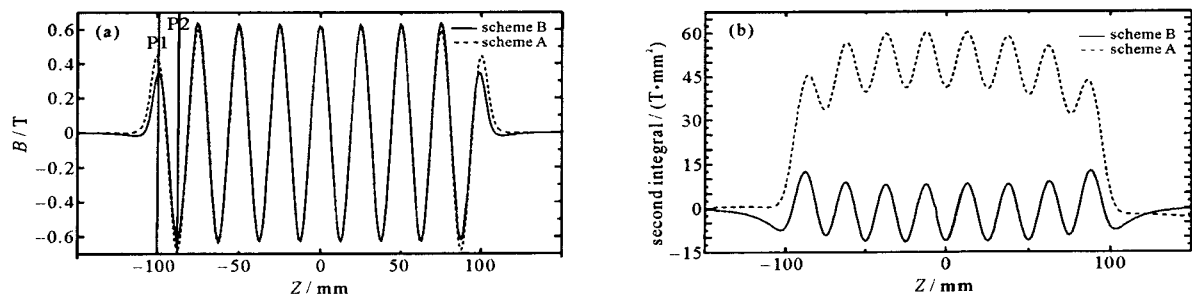


Fig. 7 Magnetic field (a) and second field integral (b) from scheme A and B  
图 7 方案 A 和 B 的磁场分布曲线 (a) 和二次积分曲线 (b)

根据大量的计算数据,有针对性地调节波荡器最端部磁极 P1 的高度 (大于等于 28 mm) 或位置使 P1 对应的横向磁场峰减小,整个波荡器横向磁场的一次积分会相应地减小到接近于零;联合调节磁块 M2 的高度和磁极 P2 的位置,以减少 P2 所对应的横向磁场绝对峰值,进而减小端部磁极 P2 所对应的横向磁场峰值与波荡器中央磁极对应的横向磁场峰值的偏差。文献 [5] 要求边缘场尽可能地短,因此在端部又增加了磁场屏蔽,屏蔽材料选用低碳钢,屏蔽的效果与屏蔽钢板的厚度和面积有关。最后选定了一种优化设计,如图 1 所示,屏蔽的厚度是 7 mm,面积是 80 mm × 80 mm;磁块 M1 的厚度  $Z_{M1} = 3$  mm;磁极 P1 的高度  $Y_{P1} = 30$  mm, P1 位置的磁极间隙比原来增大了 3.1 mm;磁块 M2 的高度  $Y_{M2} = 40$  mm;磁极 P2 位置磁极间隙比原来增大了 0.3 mm;其它尺寸不变。优化以后波荡器的磁场有了相当大的改善,横向磁场的整峰比优化前规整了很多,并且边缘场也短了很多 (横向磁感应强度为  $5 \times 10^{-4}$  T 时离端部磁块 M1 边缘的距离缩短到 10 mm),边缘场波形没有了突起 (图 8(a))。优化后比优化前的一次积分曲线波形平整了很多,一次积分值也小于  $4.0 \times 10^{-2}$  T·mm (图 8(b));相应的二次积分曲线有了很大改善,端口处二次积分值小于  $0.35$  T·mm<sup>2</sup> (图 8(c))。优化以后满足文献 [5] 中所提的设计要求。

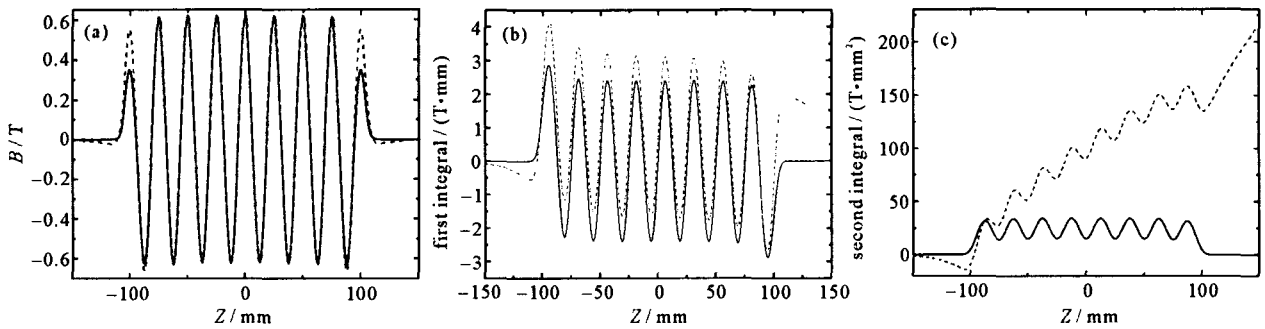


Fig 8 Magnetic field (a), first (b) and second field integrals (c) along the undulator's axis  
solid line and dotted line express magnetic field before and after optimization respectively

图 8 (a)波荡器磁场分布, (b)波荡器磁场一次积分曲线, (c)波荡器磁场二次积分曲线,  
图中虚线表示优化前的波荡器磁场,实线表示优化后的波荡器磁场

此外还对波荡器横向 Y 方向磁场一次积分沿 X 方向的分布作了计算。在 X 方向 - 8 mm 到 8 mm 的范围内横向磁场的一次积分值很小 (小于  $8.0 \times 10^{-2}$  T·mm),相应的波荡器的横向多极场也比较小,如图 9 所示。

## 2 结 论

本文主要根据实际要求对 SDUV-FEL 混合型平面波荡器的端部磁极结构进行了优化设计,虽然计算没有考虑实际各个磁块之间磁化强度矢量的差异以及磁块和磁极的机械尺寸、位置等差异,但优化结果给出的设计方案可以作为一个实施方案,对端部磁极位置影响的分析计算也可以为磁场调整时提供参考。在下一步工作中,将进行在一定磁铁间隙范围内的端部优化设计。

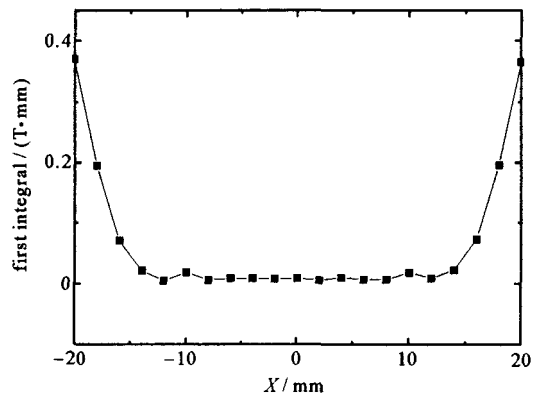


Fig 9 Distribution of first integrals along X

图 9 一次积分沿 x 轴的分布

## 参考文献:

- [1] 贾启卡. 用非对称光学速调管的相干谐波自由电子激光 [J]. 强激光与粒子束, 1994, 6(3): 450—453. (Jia Q K, Coherent harmonic generation using the non-symmetric optical klystron. *High Power Laser and Particle Beams*, 1994, 6(3): 450—453)
- [2] Papadichev V A, Rybalchenko G V. End field formation in planar hybrid undulators to ensure gap independence of the first and second field integrals [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2004, 532: 644—651.
- [3] 贾启卡. 插入元件简介 [R]. 合肥: 国家同步辐射实验室, 2003. (Jia Q K. Insertion device brief introduction. Hefei: National Synchrotron Radiation Laboratory, 2003)
- [4] Chavanne J, Elleaume P, Van Vaerenbergh P. End field structures for linear/helical insertion devices[A]. *Proceedings of the 1999 Particle Acceleration Conference*, 1999, 2: 1033—1035.

- ator Conference[C]. New York, 1999. 2665—2667.
- [5] 贾启卡. SDUV-FEL 波荡器初步设计 [R]. 合肥: 国家同步辐射实验室, 2004. (Jia Q K The preliminary design of SDUV-FEL undulator Hefei National Synchrotron Radiation Laboratory, 2004)
- [6] Walker R P. Insertion Devices: Undulators and wigglers[R]. CERN Rep 98-04. 129—190.
- [7] Marks S, Minamihara Y, Pipersky P, et al. Design of end magnetic structures for the advanced light source wigglers[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, CA94720 USA.
- [8] Chang L H, Wang C, Chang C H, et al. Passive end pole compensation scheme for a 1.8 Tesla wiggler[R]. Taiwan, Hsinchu: Synchrotron Radiation Research Center, 1996. 1450—1452.
- [9] Gottschalk S C, Quimby D C, Robinson K E. Zero-displacement end termination of undulators and wigglers[A]. Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference[C]. New York, 1999. 2674—2676.
- [10] Chubar O, Elleaume P, Chavanne J. A 3D magnetostatics computer code for insertion devices[J]. *J Synch Rad*, 1998, 5: 481.
- [11] Tischer M, Pfluger J. Magnet design of a prototype structure for the X-ray fels at Tesla[R]. DESY-TESLA-FEL-2000-12, 2000. 14.
- [12] Dejus R J. LCLS prototype undulator report[R]. APS 2004. 51.

## Design of end magnetic structures for Shanghai DUV-FEL hybrid undulators

CAI Gen-wang, JIA Qi-ka

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China,  
P. O. Box 6022, Hefei 230029, China)

**Abstract:** Design of end magnetic structures for a hybrid undulator is very complicated. In this article, magnetic field calculation was carried out using the "Radia" code, aimed to optimize the end magnetic structures for the Shanghai DUV-FEL hybrid undulator with a fixed gap. Without electromagnet correction, the first and second field integrals of the hybrid undulator were almost zero by reducing sizes of the two final magnets and positioning the two end poles. After the shield was added outside the final magnet, the fringe fields were lower than  $5 \times 10^{-4}$  T off 10 mm to the final magnet.

**Key words:** Hybrid undulator; Design of end magnetic structure; Fringe field; Free electron laser