

低能电子储存环 lattice 设计*

王琳, 徐宏亮, 冯光耀, 李为民, 刘祖平

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽合肥 230029)

摘要:描述了一台低能电子储存环的 lattice 设计, 包括线性光学参数设计和非线性动力学孔径优化. 该储存环有两种运行模式, 在低发射度模式下束流发射度接近软 X 射线衍射限制发射度, 光源亮度远高于合肥光源, 同时用于安装插入元件的直线节数目较多; 在等时性模式下线性动量紧缩因子连续可调, 能够较方便地调节束团长度.

关键词:储存环; lattice 参数; 发射度; 动量紧缩因子; 动力学孔径

中图分类号: TL501.2 **文献标识码:** A

Lattice design for a low energy electron storage ring

WANG Lin, XU Hong-liang, FENG Guang-yao, LI Wei-min, LIU Zu-ping

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract: The lattice design for a low energy electron storage ring was described in detail, including linear optical parameters and nonlinear dynamic aperture. There are two operation mode of this ring. First, with low emittance lattice configuration, beam emittance can be decreased approaching the diffraction limit of soft X-ray, which is very helpful to enhance brilliance, and the number of straight section for insertion device is greater than that of current Hefei light source. Secondly, with isochronous mode, the momentum compaction factor can be varied continuously, which is essential for bunch length adjustment.

Key words: storage ring; lattice parameters; emittance; momentum compaction factor; dynamic aperture

0 引言

低能电子储存环作为同步辐射光源在产生软 X 射线及真空紫外辐射方面以其小规模、造价低和弱辐射热负载具有独特的优势, 但对产生高亮度 THz 光源的研究一直是空白. 随着一些储存环上观测到高亮度相干 THz 辐射, 人们认识到短束团的相干 THz 辐射将成为新型光源之一^[1,2], 德国 BESSYII 光源发展了等时性模式向用户提供高功率 THz 辐射^[3,4], 美国 Berkeley 大学提出专用于产生相干 THz 辐射的低能储存环 CIRCE 物理设计^[5]. 光源

亮度主要取决于束流发射度, 如式(1)^[6],

$$\left. \begin{aligned} B &= \frac{\dot{N}_{\text{ph}}}{4\pi^2 \sigma_{t,x} \sigma_{t,x'} \sigma_{t,y} \sigma_{t,y'} d\omega/\omega}, \\ \sigma_{t,x,y} &= \sqrt{\beta_{x,y} \epsilon_{x,y} + (\eta_{x,y} \delta)^2 + \sigma_r^2/2}, \\ \sigma_{t,x',y'} &= \sqrt{\gamma_{x,y} \epsilon_{x,y} + (\eta'_{x,y} \delta)^2 + \sigma_r^2/2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, B 是光源亮度; \dot{N}_{ph} 是光子通量; $\epsilon_{x,y}$ 是电子束流水平和垂直发射度; $\beta_{x,y}$ 和 $\gamma_{x,y}$ 是 Twiss 参数; $\eta_{x,y}$ 和 $\eta'_{x,y}$ 是色散函数及其微分; δ 是束流能散; σ_r 和 σ_r' 是衍射限制光束尺寸和角散, 满足关系 $\sigma_r \sigma_r' = \lambda/2\pi$.

式(1)适用于插入元件辐射. 对弯铁辐射, 需用

* 收稿日期: 2006-12-25; 修回日期: 2007-05-01

基金项目: 国家自然科学基金(10575096)资助.

作者简介: 王琳(通讯作者), 男, 1972年生, 博士生/副研究员. 研究方向: 加速器物理与技术. E-mail: wanglin@ustc.edu.cn;

Tel: 0551-3602045

光束线水平接受角度 $\Delta\psi$ 代替 $\sigma_{t,x'}$. 第三代光源依靠降低束流发射度和应用插入元件产生高亮度辐射. 如果低能储存环物理设计能在降低束流发射度及增加插入元件数目产生高亮度软 X 射线和真空紫外辐射同时, 以兼用模式产生相干 THz 辐射, 那么光源性能和利用效率将大大提高. 多运行模式给储存环物理设计提出了新的要求, 即储存环不仅要性能良好, 而且要求 lattice 调节灵活.

本文介绍了一台低能电子储存环 lattice 设计. 该储存环有两种运行模式, 在低发射度模式下, 聚焦参数优化主要针对降低束流发射度, 希望接近软 X 射线辐射衍射限制发射度; 在等时性模式下, 聚焦参数优化主要针对动量紧缩因子, 能够连续调节动量紧缩因子变化束团长度.

1 聚焦结构选择

为使设计方案更具应用价值, 新储存环聚焦参数设计中增加两项限制: (I) 储存环周长在 66 m 左右; (II) 束流能量为 800 MeV. 这两项参数和目前合肥光源储存环相同.

设计中需要首先确定基本聚焦结构. 国际上多数光源采用 TBA (triple bend achromat) 或 DBA (double bend achromat) 聚焦结构, DBA 和 TBA 结构除了聚焦单元中弯转磁铁数目不同外, 能够达到的最小发射度也不同^[7,8], 如下式,

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{\text{METBA}} &= \frac{C_q \gamma^2}{4 \sqrt{15}} \frac{\theta_p^3}{40.707 J_x}, \\ \epsilon_{\text{MEDBA}} &= \frac{C_q \gamma^2}{4 \sqrt{15}} \frac{\theta_p^3}{8 J_x}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, γ 是相对论能量因子; J_x 是水平阻尼分配数; $C_q = 3.84 \times 10^{-13}$ m; θ_p 是每个周期偏转角度, $\theta_p = 2\pi/N_p$. 与 DBA 结构相比, TBA 结构最小发射度较小, 并且可以把中间弯转磁铁替换为超导磁铁以产生硬 X 射线, 而 DBA 结构的优点是安装插入元件的直线节数目更多. 但最小发射度不是选择聚焦结构的惟一决定因素, 在实际设计中还需考虑 Twiss 参数的合理性. 在出色的 lattice 设计中, 发射度应为最小发射度的 2~3 倍. 一些光源选择了 DBA 结构, 如 APS, Spring-8, ESRF, SSRF 等, 也有一些光源采用 TBA 结构, 如 ALS, SLS 等.

根据设计目标, 考虑到安装插入元件的需要(如合肥光源波荡器 U14 长度为 2.7 m)、束流测量元件空间、轨道校正系统空间及 lattice 可调节性, 新

储存环 lattice 采用 DBA 聚焦结构, 其直线节长度为 3.4 m, 单元布局见图 1. 储存环超周期数为 6, 总计有 12 块弯转磁铁和 60 块四极磁铁, 根据式(2)计算出消色散模式下此储存环理论最小发射度约为 $8.7 \text{ nm} \cdot \text{rad}$. 低发射度下储存环非线性效应很强, 为扩大动力学孔径需要多组谐波补偿六极磁铁. 由于空间限制, 决定采用日本 UVSOR 光源四-六极组合磁铁技术^[9], UVSOR 光源采用该技术成功地把束流发射度降低到 $27 \text{ nm} \cdot \text{rad}$. 全环总计有 5 组 60 块六极磁铁, 六极磁铁和四极磁铁位置相同. 注入系统采用分散式布局四冲击磁铁局部凸轨系统, 四块冲击磁铁分别安装在第六单元中第二块弯铁与 Q4 之间, 第一长直线节和第一单元第一块弯铁和 Q4 之间, 在不同聚焦模式产生理想局部凸轨所需冲击磁铁偏转角度小于 12 mrad , 在技术上容易实现, 详细注入过程的束流动力学将另文阐述.

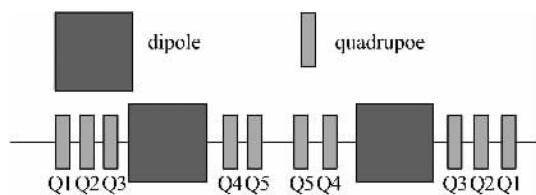


图 1 DBA 聚焦单元磁铁布局示意图

Fig. 1 Layout of double bend achromat (DBA)

2 低发射度模式

设计目标之一是降低束流发射度. 束流发射度表达式如下:

$$\epsilon = C_q \gamma^2 \langle \beta_x \eta_x'^2 + 2\alpha_x \eta_x \eta_x' + \gamma_x \eta_x^2 \rangle_B / (J_x \rho). \quad (3)$$

式中, ρ 是弯铁曲率半径, 其他符号意义同前. 匹配计算中主要调节弯转磁铁中 β 函数值和色散函数值. 此外, 还要求直线节垂直 β 函数值较小, 利于降低插入元件引入的聚焦扰动, 同时水平 β 函数值较大, 利于束流注入过程. 匹配计算比较繁琐, 文中不详细描述匹配过程, 仅给出主要计算结果.

在消色散低发射度模式 A (即长直线节水平色散函数值等于零) 设计中, 调节 Q4 和 Q5 可以得到消色散单元参数, 原则上色散函数值越小越利于降低发射度, 但实际上该值受到磁铁强度限制; 变化 Q1、Q2 和 Q3 调节直线节 β 函数值和储存环工作点, 该模式下束流发射度为 $15 \text{ nm} \cdot \text{rad}$, 其主要线性光学参数见表 1, β 函数值和色散函数值见图 2, 水平和垂直方向束流尺寸(耦合度为 0.05)见图 3.

表 1 新设计 lattice 的主要线性光学参数 (ELEGANT 和 MADX 程序计算结果)

Tab. 1 Main optical parameters of new designed lattice

模式编号	发射度 / (nm · rad)	工作点	自然色品	动量紧缩因子	自然能散	阻尼时间 / ms	平均 β 函数值 / m	直线节 β 函数值 / m	直线节色散函数值 / m
模式 A	15	5.78/3.85	-25.95/-11.53	0.0071	0.0005243	16.2/16.6/8.6	12.44/5.32	19.85/3.00	0
模式 B	7.8	5.70/4.26	-19.27/-15.51	0.0075	0.0005241	16.2/16.6/8.6	9.37/5.16	14.91/1.94	0.50
模式 C	95.3	4.44/3.27	-8.29/-7.81	0.00018	0.0005268	16.2/16.6/8.6	7.91/5.31	16.79/3.08	-0.33
模式 D	95.8	4.44/3.27	-8.31/-7.81	0.000014	0.0005269	16.2/16.6/8.6	7.92/5.31	16.82/3.08	-0.34
模式 E	96.1	4.44/3.27	-8.31/-7.81	0.000008	0.0005269	16.2/16.6/8.6	7.93/5.29	16.86/3.05	-0.34

用 MADX^[10] 程序完成线性光学参数设计后,用 OPA^[11] 软件进行非线性优化,六极磁铁纵向位置无法自由调节在一定程度上限制了非线性优化效果。

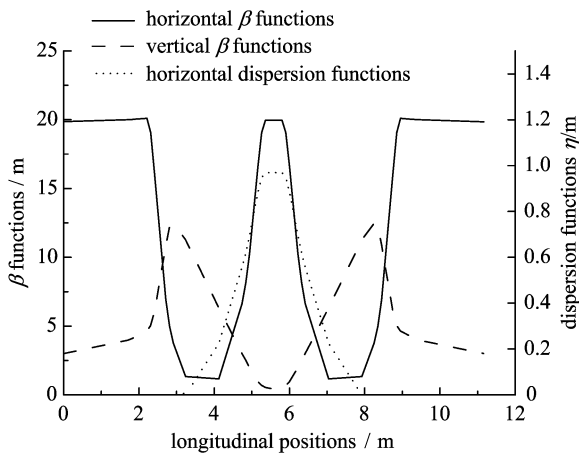
图 2 模式 A 的 β 函数值和水平色散函数值

Fig. 2 Betatron functions and dispersion functions of Mode A

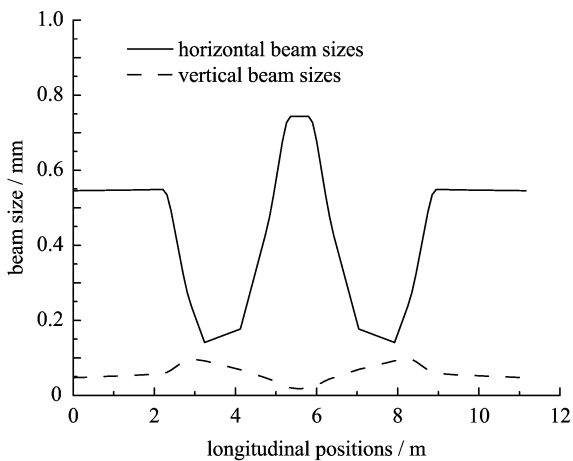


图 3 模式 A 的束流尺寸图

Fig. 3 Horizontal and vertical beam sizes of Mode A

图 4 是该模式无动量偏差、 $\pm 3\%$ 动量偏差时的动力学孔径 (用 ELEGANT^[12] 程序计算,动力学孔径跟踪起点位于直线节中点,跟踪时考虑了多极磁场公差),优化后动力学孔径充分大。

直线节不消色散会进一步降低束流发射度。对于 DBA 结构,非消色散模式下最小发射度是消色散模式最小发射度的 $1/3$ ^[7],这时一般直线节色散函数值大于零。在消色散模式基础上,调节 Q4 和 Q5 令直线节色散函数值大于零,然后调节 Q1、Q2 和 Q3 以调整储存环工作点、 β 函数值和色散函数值,匹配计算后得到非消色散低发射度模式 B,发射度为 $7.8 \text{ nm} \cdot \text{rad}$,具体光学参数见表 1, β 函数值和色散函数值见图 5,图 6 给出了该模式下束团尺寸 (耦合度为 0.05)。经过 OPA 非线性优化后动力学孔径大于储存环物理孔径 (30~40 mm),有无动量偏差时动力学孔径见图 7 (考虑多极场公差)。

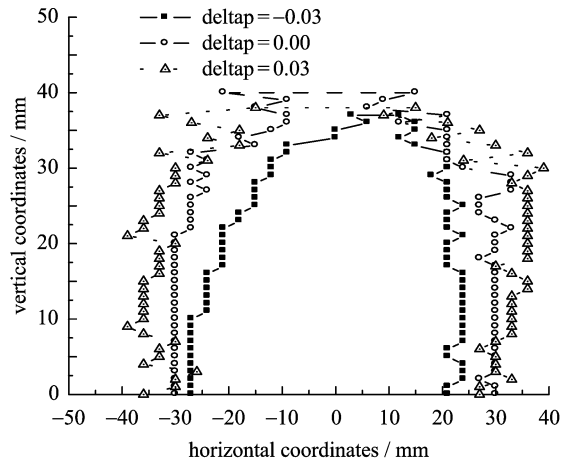


图 4 模式 A 有无动量偏差时 5 000 圈动力学孔径

Fig. 4 On- and off-momentum DA of Mode A with 5 000 turns

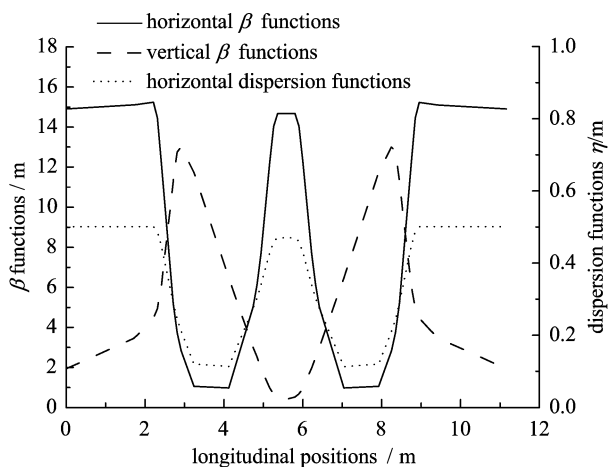


图 5 模式 B 的 β 函数值与水平色散函数值

Fig. 5 Betatron functions and dispersion functions of Mode B

表 1 中两种低发射度模式主要线性光学参数表明,用新设计的低发射度聚焦参数可以得到较小束流发射度(约 $8 \text{ nm} \cdot \text{rad}$),同时新设计中直线节总长度为 20.53 m ,占储存环总长 30.7% ,除了一个直线节用于安装注入系统外,可有 5 个直线节安装插入元件,比目前合肥光源储存环提高了 67% .在束流发射度和插入元件数目上达到或接近国际先进三代光源水平.

3 等时性聚焦模式

束团长度为亚毫米量级时可以产生相干 THz 辐射,辐射功率正比于束团中电子数目的平方,远远强于传统 THz 光源,是很有应用潜力的未来光源.储存环自然束团长度正比于动量紧缩因子平方根,减小动量紧缩因子可以得到短束团.等时性聚焦模式主要目的是降低储存环动量紧缩因子以得到短束团.由于 THz 辐射衍射限制发射度很大,该模式对束流发射度没有特殊要求.在该模式下希望动量紧缩因子连续可调,有些文献中称之为可调动量因子 lattice.

储存环动量紧缩因子表达式为

$$\alpha = \oint \frac{\eta_x(s)}{\rho(s)} ds / C. \quad (4)$$

式中, C 是储存环周长,其他符号含义同前.

为了兼顾低发射度聚焦模式和最大限度利用储存环空间,不能在聚焦单元中增加反方向(即负曲率半径)偏转二极磁铁来降低动量紧缩因子,只能利用直线节负色散函数使弯铁部分区域中色散函数值小于零来降低动量紧缩因子,这和利用直线节正色散函数降低发射度的做法相反.设计中,调节聚焦单元中 Q4 和 Q5 在直线节产生负色散,再调节 Q1、Q2 和 Q3 来调节储存环工作点、 β 函数值和动量紧缩因子.匹配计算可以得到各种聚焦参数(对应不同的动量紧缩因子),表 1 中模式 C、D 和 E 给出动量紧缩因子为 1.8×10^{-4} 、 1.4×10^{-5} 和 8×10^{-6} 时的线性光学参数,可见聚焦结构设计自由度比较充分,在调节动量紧缩因子时能保证 Twiss 参数合理.图 8 给出模式 E 下 β 函数值和色散函数值,图 9 是模式 E 下束团尺寸(耦合度为 0.05),图 10 给出模式 E 下有无动量偏差时动力学孔径(考虑多极场公差).在等时性模式下储存环横向聚焦不强,动力学孔径较大且对谐波补偿六极磁铁强度变化不敏感,可以通过变化谐波补偿六极磁铁强度来调节高阶动量紧缩因子.

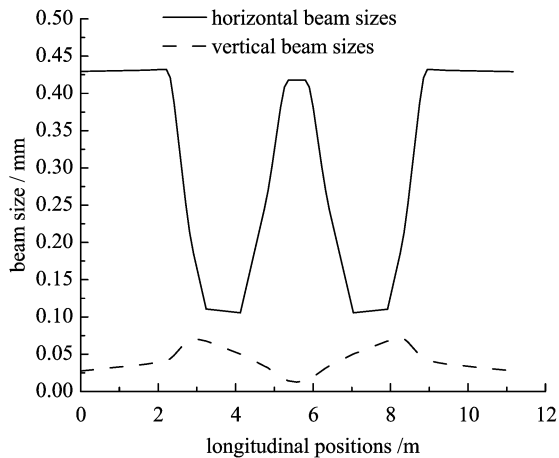


图 6 模式 B 的束流尺寸图

Fig. 6 Horizontal and vertical beam sizes of Mode B

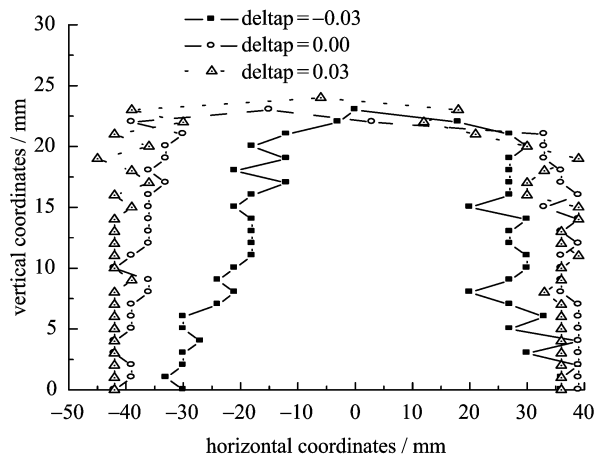


图 7 模式 B 有无动量偏差时 5000 圈动力学孔径

Fig. 7 On- and off-momentum DA of Mode B with 5000 turns

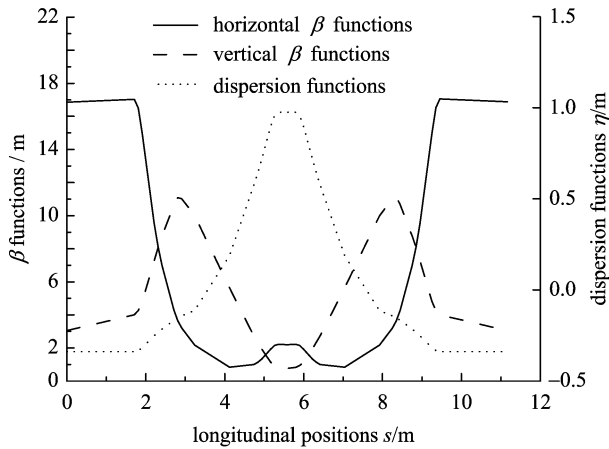


图 8 模式 E 的 β 函数值和水平色散函数值

Fig. 8 Betatron functions and dispersion functions of Mode E

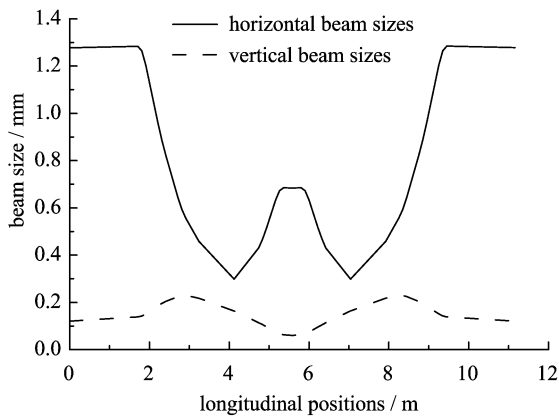


图 9 模式 E 的束流尺寸图

Fig. 9 Horizontal and vertical beam sizes of Mode E

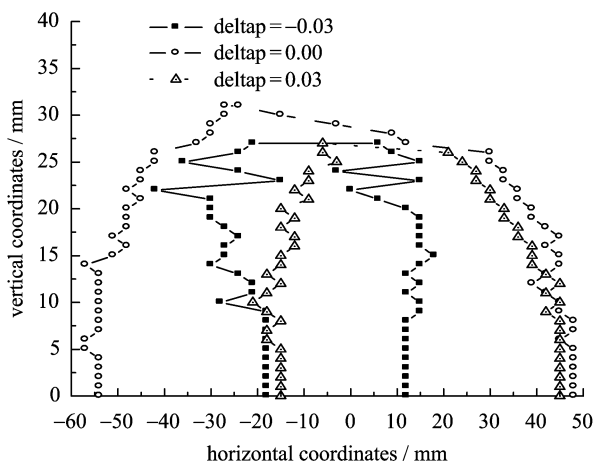


图 10 模式 E 有无动量偏差时 5 000 圈动力学孔径

Fig. 10 On- and off-momentum DA of Mode E with 5 000 turns

能量与合肥光源储存环相同)可以实现低束流发射度,同时可用于安装插入元件的直线节数目较多,光源主要指标达到或者接近三代光源性能参数,光源亮度能比现合肥光源提高几个数量级。

在该储存环等时性模式下,能够连续调节动量紧缩因子改变束团长度以产生高亮度相干 THz 辐射,大大拓展了光源应用范围,为开展 THz 辐射应用研究创造有利条件。

参考文献(References)

- [1] Carr G L, Martin M C, McKinney W R, et al. High power terahertz radiation from relativistic electrons[J]. Nature, 2002, 420(6912): 153-156.
- [2] Wang F, Cheever D, Farkhondeh M, et al. Coherent THz synchrotron radiation from a storage ring with high frequency RF system [J]. Physical Review Letters, 2006, 96: 064801.
- [3] Abo-Bakr M, Feikes J, Holldack K, et al. Brilliant, coherent far-infrared (THz) synchrotron radiation [J]. Physical Review Letters, 2003, 90: 094801.
- [4] Abo-Bakr M, Feikes J, Holldack K, et al. Steady state far infrared coherent synchrotron radiation detected at BESSY II [J]. Physical Review Letters, 2002, 88: 254801.
- [5] Barry W C, Baptist K M, Benjegerdes R J, et al. A dedicated storage ring for far-IR coherent synchrotron radiation at the ALS[C]// Proceedings of European Particle Accelerator Conference 2002, Paris, France. Geneva: CERN, 2002: 656-658.
- [6] Wiedemann H. Synchrotron Radiation [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- [7] Hirtzlin I, Tanaka H, Ando A. Minimum effective emittance in synchrotron radiation sources composed of modified Chasman Green lattice [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1996, 369: 312-321.
- [8] Lee S Y. Emittance optimization in three and multiple bend achromats[J]. Physical Review E, 1996, 54: 1 940-1 944.
- [9] Katoh M, Hayashi K, Honda T, et al. New lattice for UVSOR [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2001, 467-468: 68-71.
- [10] CERN. MADX User's Guide[EB/OL]. [2006-12-20]. <http://mad.web.cern.ch/mad/uguide.html>.
- [11] Streun A. OPA documentation [R]. Villigen, Switzerland: PSI, 1997.
- [12] Borland M. ELEGANT: A flexible SDDS-compliant code for accelerator simulation[R]. Chicago: Argonne National Laboratory, 2000: Advanced Photon Source LS-287.

4 结论

通过优化储存环磁铁布局、四极磁铁聚焦参数和六极磁铁强度,在一台低能电子储存环上(规模和