

强聚焦混合型扭摆器的优化设计^{*}

陆辉华¹⁾ 戴建枰

(中国科学院高能物理研究所 北京 100080)

摘要 扭摆器是自由电子激光装置的一个核心部件. 强聚焦混合型扭摆器具有结构紧凑等一系列优点, 但其结构复杂, 技术难度很高, 在国内还没有成功研制的先例. 本文描述该类型扭摆器研制的一个基础而关键性的工作: 一台 10 周期的强聚焦混合型扭摆器的优化设计.

关键词 高增益自由电子激光 强聚焦混合型扭摆器 磁结构优化 聚焦永磁四极透镜

1 引言

自由电子激光(简称 FEL)是一种以相对论优质电子束为工作媒介、在周期磁场中以受激辐射方式放大短波电磁辐射的强相干光源. FEL 能够覆盖远红外到 X 射线整个相干电磁波段, 其波长连续可调, 可以获得高亮度、皮秒到飞秒量级的超短激光脉冲, 在生物、材料、物理、化学等领域具有广阔的应用前景. 从 20 世纪 80 年代开始, FEL 的研究得到了全面展开. 特别是近年来, 在基于自放大自发辐射(简称 SASE)原理的真空紫外 FEL 获得成功后^[1], 基于 SASE 原理的 X 射线 FEL 被认为是新一代光源的代表, 美、德、日、意等发达国家均已加紧部署 X 射线 FEL 的发展计划, 我们国家对此也给予了高度重视.

在国家“973”计划支持下, 北京大学将在现有超导加速装置的基础上建成一台红外 SASE-FEL 实验装置(简称 PKU-SCAF-FEL), 用以研究 SASE 的基本物理问题和掌握相关的关键技术, 同时, 得到高功率、短脉冲、波长连续可调的 FEL 以开展应用研究. 该实验装置主要由直流-超导光阴极微波电子枪、主加速器、磁压缩装置、扭摆器、电子束诊断以及光束诊断设备等组成^[2]. 其中, 扭摆器为其核心设备之一, 它的研制是本文工作的一个直接推动力.

扭摆器按磁铁类型可分为电磁铁、永磁和混合型 3 种, 按聚焦方式又可分为自然聚焦、强聚焦和分离型等. 强聚焦混合型扭摆器因具有结构紧凑、对永磁块离散度要求较低、扭摆器分段长度没有限制等优点, 适合于 β 函数小于 1m 的 FEL 装置, 是实现 VUV, XUV FEL 的最佳途径. PKU-SCAF-FEL 经过调研决定选用这一类型的扭摆器.

然而, 强聚焦混合型扭摆器结构复杂, 技术难度很高, 目前在国内还没有成功研制的先例. 为探索该类型扭摆器的理论和设计方法, 考察国内磁材料性能和机加工精度是否能满足这类扭摆器的要求, 同时掌握这类扭摆器误差的控制、边缘场的补偿、磁结构的机械调整以及扭摆器机械结构在磁力和重力作用下的力学稳定性等技术, 我们将首先设计、加工和调试一台 10 周期的强聚焦混合型扭摆器.

2 强聚焦扭摆器结构的选择

强聚焦扭摆器是在扭摆器基础上通过叠加聚焦永磁场实现比自然聚焦强得多的聚焦场强以获得比自然聚焦更小的 β 函数. 它有多种结构, 图 1 是目前提出的几种代表性结构^[3]. 为了便于研究 SASE 的发展演变过程, 要求在扭摆器沿线插入各种电子束和光束诊断设备, 图 1(c)虽然也可满足要求, 但其扭摆器峰值磁场受外加的聚焦永磁块分离间隔距离

2004-01-06 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目 973 计划项目(2002CB713600)资助

1) E-mail: luhh@ihepa.ac.cn; 通讯地址: 北京 2732 信箱, 100080

影响大,而图 1(d)的结构没有这个问题,因此选用图 1(d)结构.

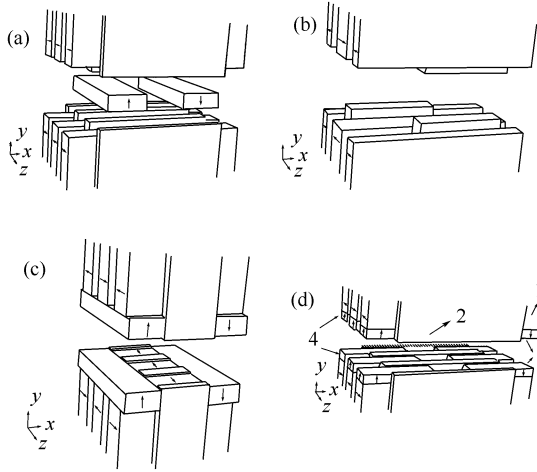


图 1 具有代表性的几种强聚焦结构示意图

- (a) Varfolomeev 聚焦结构(VU);(b)软铁交错型聚焦结构(SPU);
(c)边块聚焦结构(SMFU);(d)四极透镜式聚焦结构(4MFU,
其中 1 扭摆器的永磁块,2 软铁磁极,3,4 聚焦永磁块).

3 扭摆器结构的优化设计

10 周期的强聚焦混合型扭摆器设计依据是 PKU-SCAF-FEL 对扭摆器的要求、国外同类型扭摆器的研制经验以及国内磁材料、加工工艺的基本状况,目标是设计出具有高性价比的扭摆器结构参数.设计方法是,首先利用已有的经验公式,对扭摆器的主要参数进行计算,得到初步的结构参数,然后利用三维程序进行优化数值计算.在用程序优化时,则先分别对混合型磁结构和强聚焦结构进行优化,再进行综合优化,研究两者的相互关系,以得到最终的结果.

3.1 混合型磁结构的优化

计算混合型扭摆器磁参数的经验公式为^[3]

$$B_0 = 3.44 \exp \left[-5.08 \frac{g}{\lambda_w} + 1.54 \left(\frac{g}{\lambda_w} \right)^2 \right],$$

$$0.07 < \frac{g}{\lambda_w} < 0.7, \quad (1)$$

$$K = 0.934 \lambda_w [\text{cm}] B_0 [\text{T}], \quad (2)$$

式中 g , λ_w 分别为扭摆器间隙和周期长度,两者单位一致, B_0 为扭摆器峰值磁场,单位为特斯拉(T), K 为扭摆器参数.当扭摆器周期为 27mm,磁极间隙

为 11mm 时,由上式可知,峰值场为 0.56T,对应 K 值为 1.41.这些参数满足 PKU-SCAF-FEL 对扭摆器的基本要求.

与纯永磁扭摆器不同,混合型扭摆器中的磁极采用高磁导率材料,属非线性问题,因此需用三维模拟程序进行设计.由于磁结构的性能取决于一系列相互牵制的参数,因此,优化是个循环反复的过程.我们采用欧洲同步辐射中心(ESRF)编制的三维磁场计算程序 RADIA 进行数值模拟计算^[4].与常规三维磁场数值计算程序都采用有限元方法不同,该程序采用边界积分法(Boundary Integral Method),具有运算速度快,精度高的优点,同时该程序提供了精确的场积分功能,使得对端部结构设计等方面可以获得与实验一致性很好的理论模拟结果^[5].

模拟计算中永磁铁采用剩磁为 1.2T 的钕铁硼(NdFeB),磁极采用饱和磁化强度可达 2.34T 的钕钴铁合金.为避免磁极边缘饱和效应,磁极应比磁铁高出 0.5mm.另外,为能放置外加聚焦磁铁结构,以获得强聚焦效果,磁极比磁铁实际高出 0.5mm 再加上聚焦铁的厚度,因此优化的过程就是要在达到理论要求的峰值磁场及聚焦梯度的前提下找到磁结构尺寸、磁极比永磁铁高出的尺寸以及聚焦磁铁厚度等关系的最佳值.为保证能真实地反映扭摆器的整体性能同时又能满足在微机上进行数值计算的内存要求,所选取的网格步长经过多次调整.计算结果表明,与永磁铁相比,磁极网格必须更细密,因为外场对磁极的磁化更敏感.图 2 是计算所用模块及坐标示意图.

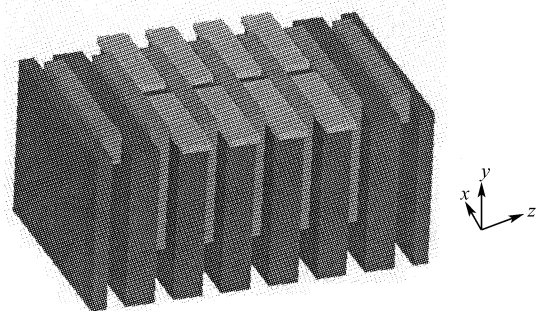


图 2 数值计算模型结构示意图

用三维程序进行优化时,首先固定永磁块的体积进行三维程序计算,优化结构参数,在获得初步结果后,再改变永磁块的体积作进一步优化,如此多次反复,以获得最佳的优化结果.主要的过程为:(1)在扭摆器周期确定的条件下,以获得最大磁场为判据,

优化磁极的长度(沿 z 轴方向), (2) 以满足好场区要求为判据, 优化永磁块和磁极的宽度(沿 x 轴方向), (3) 以磁极达到饱和为判据, 优化磁极和永磁块高度(沿 y 轴方向).

对于扭摆器的周期为 27mm, 磁间隙为 11mm 时, 磁极长度与峰值磁场关系的计算结果如图 3(a) 所示. 最大峰值场出现在磁极长度为 5.3mm 时, 相应永磁铁长度为 8.2mm.

扭摆器的好场区是以扭摆器横向磁场变化引起的谱非均匀加宽小于 FEL 均匀谱宽所对应的横向空间区域. 对 SASE-FEL 要求在扭摆器中电子束所在区域内的磁场变化应小于皮尔斯参数 ρ . 对于 PKU-SCAF-FEL 注入扭摆器电子束的性能参数, ρ 为 10^{-2} . 图 3(b) 显示了当磁铁体积恒定时, 对应不同的磁铁纵向长度, 磁铁的横向尺寸对峰值场的影响. 优化后, 选择永磁铁的横截面尺寸为 60mm × 40mm (宽度 × 高度), 对应磁极横截面尺寸为 43mm × 34mm, 其横向磁场均匀性即好场区在 $|x| \leq 1$ mm 范围内, 场偏离小于 0.004%. 该均匀性比 PKU-SCAF-FEL 的要求高得多, 这是在没有考虑磁结构的各种不可避免的公差条件下得到的结果. 在引入各种允许公差后, 场偏离量会增大, 但仍能满足用于短波长 (VUV, XUV 波段) FEL 的扭摆器的要求.

在 λ_w, g 及永磁铁体积确定的前提下, 计算得到峰值磁场 B_{Max} (T) 与磁极高度的关系如图 3(c). 在 λ_w, g 及永磁铁宽度、长度确定的前提下, 扭摆器的峰值磁场 B_{Max} (T) 与每周期永磁铁体积 (cm^3) 关系曲线(实际是与高度的关系曲线)的计算结果如图 3(d). 从图 3(d) 可以看出, 在饱和区内再增加永磁铁的高度是无益的.

综合上述模拟优化计算结果, 在性能达标的基础上, 考虑加工、成本等因数, 选择永磁铁尺寸为: 60mm × 45mm × 8.2mm (宽度 × 高度 × 长度); 磁极为 43mm × 36mm × 5.3mm. 同时在磁极的加工过程中在边缘处有 0.5mm × 45° 的倒锐角且磁极比永磁铁高出 2.5mm.

3.2 强聚焦结构的优化

当电子进入线性扭摆器后, 由于受扭摆器磁场中 B_y 的作用, 电子束将在 x 方向做扭摆运动, 其振荡周期等于扭摆器的磁周期. 与此同时, 由于存在 B_z 场分量的作用, 在 y 方向电子束还要做 Betatron 振荡, 它的振动周期很长. 在 y 方向, Betatron 振荡给束流以聚焦力, 称为扭摆器的自然聚焦, 而在 x 方

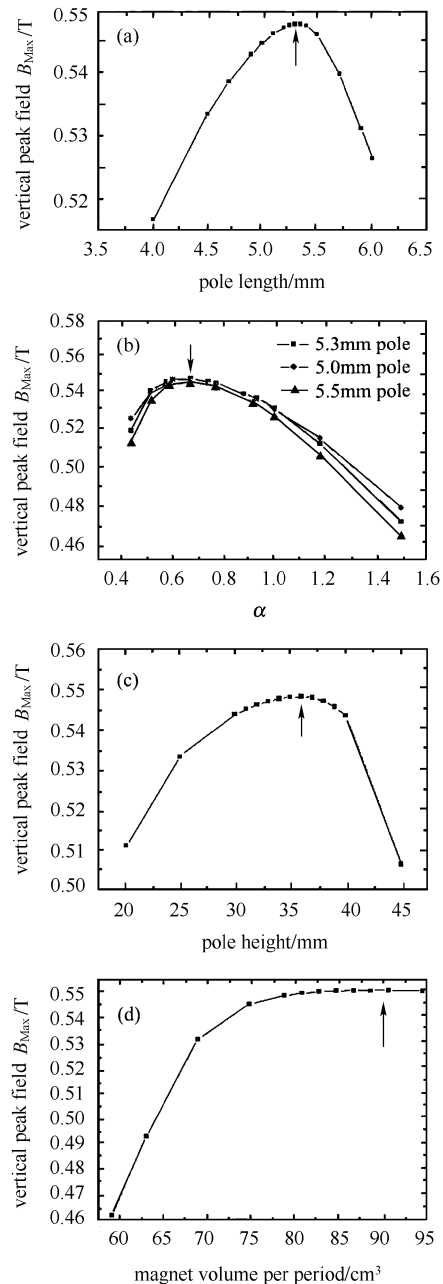


图 3 混合型磁结构优化结果

(a) 在 $\lambda_w = 27$ mm 及 $g = 11$ mm 确定的前提下, 峰值磁场 B_{Max} (T) 与磁极长度 (mm) 关系曲线; (b) 在 λ_w, g 及永磁铁体积确定的前提下, 峰值磁场 B_{Max} (T) 与 α (the ratio of magnet height to magnet width) 的关系曲线; (c) 在 λ_w, g 及永磁铁体积确定的前提下, 峰值场 B_{Max} (T) 与磁极高度 (mm) 的关系曲线; (d) 在 λ_w, g 及宽度、长度确定的前提下, 扭摆器的峰值磁场 B_{Max} (T) 与每周期永磁铁体积 (cm^3) 的关系曲线.

向没有聚焦功能. 采用曲线磁极可实现横向二维聚焦, 但这种自然聚焦力也是有限的. 对于短波长 SASE 机制下运行的 FEL, 需要很高能量的电子束,

动量很大,光靠这种自然聚焦很难获得高密度的电子束团(SASE 的增益与电子束团电流密度 $1/3$ 次方成比例),因此,还需外加强聚焦结构,来实现出光.

PKU-SCAF-FEL 的电子能量较低,但工作波长长,衍射损耗严重,为了在有限扭摆器长度内实现饱和出光,需外加磁聚焦场来减小作用区电子束斑的尺寸,提高作用区电子束团的电流密度,同时也使电子束与光束有很好地重叠,从而使系统的增益显著地增大.由于此时要求的 β 函数很小(理论要求平均 β 函数为 27cm),不能采用分离型强聚焦扭摆器结构(扭摆单元与聚焦单元分离,如 LCLS 所采用的,它适合于 β 值大于 1m 以上的情况),因此,采用强聚焦混合型扭摆器结构方案,如图 1(d)和图 2 所示.它是在扭摆器上叠加上用外加永磁垫片组成聚焦永磁四极透镜,具有在扭摆器插入探测元件的空间.这种结构在沿电子束方向(z 方向)扭摆器的所有永磁铁 y 向的高度比磁极高度凹进几毫米,用来放置聚焦永磁垫片,聚焦永磁垫片的磁化方向左右分别周期性的与 y 方向平行和反平行,形成四极磁透镜.图 1(d)是 1.5 周期带有这种四极透镜聚焦的扭摆器结构示意图,图中永磁垫片的磁化方向是顺时针,它对应磁透镜的一种聚焦态(F 或 D),反时针对应另一种聚焦态,通过同时改变上下永磁垫片的分离距离可改变场梯度,该结构还可对透镜磁轴位置进行调节.强聚焦扭摆器结构的特点是扭摆器和聚焦结构基本可线性叠加、结构紧凑,经济,但调节机构复杂,聚焦场梯度较低,适合于平均 β 函数较小($<1\text{m}$)的中、低能电子情况,如德国 DESY 实验室的 TTF-FELI 装置就采用这种结构,利用 300MeV 电子束实现了 VUV 的 SASE 饱和出光^[6].

对带上上述聚焦结构的扭摆器,其理想的场分布可表示为^[3]

$$\begin{aligned} B_x &= Qy, \\ B_y &= B_{\max} \cosh k_w y \sin kz + Qx, \\ B_z &= B_{\max} \sinh k_w y \cos kz. \end{aligned} \quad (3)$$

相应的场聚焦梯度可表示为

$$\frac{\partial B_x}{\partial y} = \frac{\partial B_y}{\partial x} = Q. \quad (4)$$

实际的场分布,除四极分量 Q 外,还可能存在高阶分量如八极分量等,尤其在离轴的情况下,且沿电子束方向, Q 不是恒定的,但具有周期性.因此,采用扭摆器周期的平均梯度来表征:

$$Q_{\text{ave}}(x, y) = \frac{1}{\lambda_w} \int_z^{z+\lambda_w} \frac{\partial B_y(x, y, z')}{\partial x} dz' =$$

$$\frac{1}{\lambda_w} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{z+\lambda_w} B_y(x, y, z') dz'. \quad (5)$$

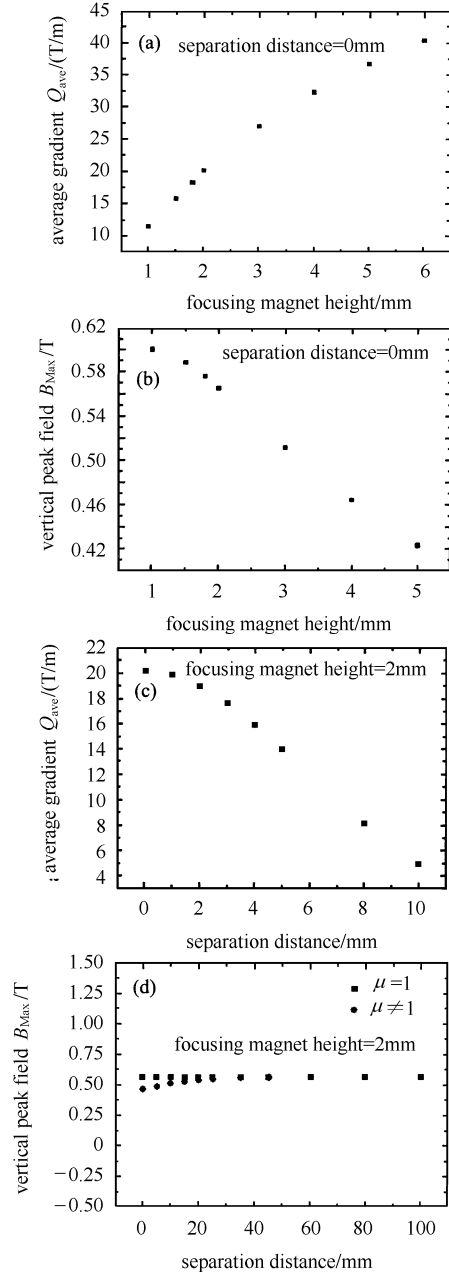


图 4 强聚焦结构的优化结果

(a) 聚焦梯度随聚焦铁厚度变化曲线; (b) 峰值磁场随聚焦铁厚度变化曲线; (c) 聚焦梯度随聚焦铁拉开距离的变化曲线; (d) 峰值磁场随聚焦铁拉开距离的变化曲线.

根据 PKU-SCAF-FEL 对电子在扭摆器中的 β 值的要求(平均 β 值为 27cm),利用上述解析式,确定了强聚焦结构的初步参数,然后利用三维程序对其进行了一系列数值计算和分析,得到了外聚焦结构的参数.从图 4(a)可以看到,当聚焦永磁块的厚度

增加时,平均场梯度随之增加,但从图 4(b)可看到此时扭摆器的峰值磁场随之下降.因此,如何找到一个最佳的平衡点是很重要的.经综合考虑,选择聚焦磁铁厚度为 2mm,相应的峰值磁场达到 0.55T,聚焦梯度达到 20T/m.

另外,对聚焦梯度的调整做了数值计算,得到了如图 4(c)所示的变化曲线.通过程序计算,还发现,聚焦结构的场分布与扭摆器的场分布是否独立是有条件的:只有在永磁材料的磁导率非常接近 1 时才可进行线性叠加.图 4(d)为数值计算时取永磁铁的磁导率为 1 以及磁导率不等于 1 时获得的聚焦梯度变化对峰值磁场的影响,从图中可见当永磁铁的磁导率为 1 时(理想状况),两者是独立的.

最后,综合混合型磁结构和叠加聚焦结构参数的优化设计结果,最后确定 10 周期强聚焦混合型扭摆器的总体设计参数如下表.

表 1 10 周期强聚焦混合型扭摆器设计参数

周期长	27mm	聚焦铁尺寸	30mm × 2mm × 8.2mm
峰值场	0.55T	梯度	~ 20T/m
磁极间隙	11mm	四极透镜长度	54mm
磁铁尺寸	60mm × 45mm × 8.2mm	FODO 周期长度	216mm
磁极尺寸	43mm × 36mm × 5.3mm	β 值	27mm

4 扭摆器总体设计的初步实验验证

在完成上述结构优化设计之后,制作了一个 3 周期的模型,用以掌握有关调节机构和了解由于永磁场凹进几毫米,对扭摆器的峰值磁场的影响.其初步测试结果如图 5 所示.从图中可以看到,单边的磁

场峰值达到 0.28T,基本达到了理论的预期值.在此基础上,完成了 10 周期强聚焦混合型扭摆器的总体设计结构和参数,其结构如图 6 示.

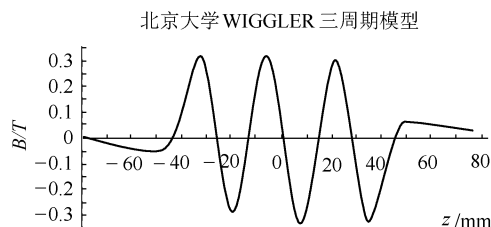


图 5 3 周期模型单边的场分布

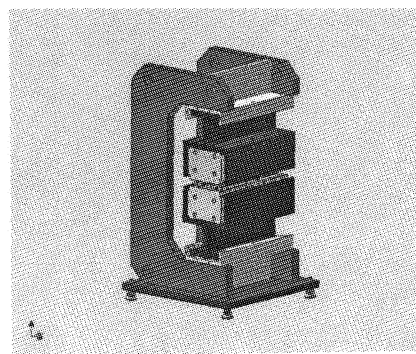


图 6 10 周期强聚焦混合型扭摆器

5 结论

通过本文工作,建立了强聚焦混合型扭摆器的计算功能模块,详细讨论了磁结构和强聚焦结构参数选取所应考虑的因素和选取原则,并在研制 3 周期扭摆器模型的基础上,完成了 10 周期扭摆器的总体设计,为该类型扭摆器的研制打下了良好的基础.

参考文献 (References)

- 1 Dattali G, Renieri A. Overview of Proposed VUV and Soft X-ray Projects in the World. FEL 2002 Conf., Argonne(USA), 2002, 9—13
- 2 DING Yuan-Tao et al. HEP & NP, 2004, **28**(4):441 (in Chinese)
(丁原涛等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(4):441)
- 3 Pflueger J, Nikitina Y M. Undulator Schemes with the Focusing Properties for the VUV-FEL at the TESLA Test Facility. DESY Print TESLA-FEL 96-02. 1996
- 4 Chubar O, Elleaume P, Chavanne J. A 3D Magnetostatics Computer Code for Insertion Devices. 1997
- 5 Elleaume P, Chubar O, Chavanne J. Proc. IEEE PAC-97, 9P27
- 6 Andruszkow J et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**(18):3825—3829

Design of a Hybrid Undulator with Superimposed Strong Focusing*LU Hui-Hua¹⁾ DAI Jian-Ping

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract Undulator is a key device of Free Electron Laser facilities. Hybrid Undulator with superimposed strong focusing is of many advantages, yet difficult to be developed. This paper describes the essential work for this kind of undulator, the magnetic design optimization of a ten period undulator.

Key words high gain free electron laser, hybrid undulator with superimposed strong focusing, magnetic design optimization, focusing quadrupoles with permanent magnets

Received 6 January 2004

* Supported by Major State Basic Research Development Program (2002CB713600)

1) E-mail: luhh@ihepa.ac.cn; mailing address: P. O. Box 2732, Beijing 100080