

超长波荡器系统相位匹配的理论研究*

陆辉华¹⁾ 陈森玉

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 波荡器是自由电子激光装置的核心部件, 如何实现超长波荡器段间相位的匹配是实现高增益X射线自由电子激光饱和输出的必要条件. 本文以北京大学973项目红外SASE自由电子激光实验装置波荡器的研制为模型, 给出了比较完整的相位匹配理论的描述, 进行了实现相位匹配的理论计算, 给出了实现段间相位匹配的具体端部结构和参数, 通过模拟计算表明, 当磁极调节范围为 $\pm 0.5\text{mm}$ 时可获得 $\pm 100^\circ$ 的相位调整量. 该理论工作为今后高增益X射线自由电子激光超长波荡器系统总体方案的确立奠定了基础.

关键词 X射线自由电子激光 超长波荡器 段间相位匹配 端部结构设计

1 引言

波荡器是自由电子激光(FEL)的核心部件. 在高增益X射线自由电子激光装置中, 需要长度在几十m到百m量级的波荡器来实现电子束与光束的能量交换, 最终实现激光的饱和输出. 如此长的波荡器在技术上必须采用分段的方式实现, 分段后如何实现段与段之间电子束和光束相位的匹配是实现出光的重要条件.

北京大学红外SASE-FEL实验装置(简称PKU-SCAF-FEL)^[1], 是在国家“973”计划支持下, 在现有超导加速装置的基础上将要建成的一台红外自由电子激光装置. 其建设的目的是用以开展基于超导加速器与ERL(能量回收加速器)技术的SASE-FEL的基本物理问题与关键技术的研究, 将建成能量为30—40MeV超导加速器和电子束返航能量回收聚焦运输系统, 以及5—6m长的外聚焦波荡器等装置, 从而实现红外波段SASE-FEL出光和电子束能量回收实验. 该装置用以实现出光的波荡器设计长度为5m, 分两段^[2]. 因此, 如何实现段间的相位匹配是要着重考虑的问题之一.

段与段之间相位匹配实现的方式可分为两类: 一是当波荡器的磁间隙固定不可调时, 可以通过精确控

制段与段之间的漂移距离来使电子束和光束的相位差为 2π 的整数倍, 从而确保不同段间二者相位的匹配. 在此种情况下, 依据理论计算确定段间漂移距离后, 为将磁场由于各种因素偏离理想状态所引起的附加相位偏差控制在容许范围内, 还需对波荡器每段的端部结构加以特殊设计, 来进一步校正这些附加的相位误差和漂移距离的误差. 二是当应出光波长可变的要求, 波荡器的磁间隙需在一定范围内调整, 从而使波荡器磁场在较大范围内变化, 此时就需要通过端部结构的特殊设计或者段间插入磁场可调变的相移器来校正电子束和光束相位的偏差. 相位匹配方案的确定主要取决于所需实现的相位匹配范围, 当要求波荡器实现的出光波长的调谐范围很大时, 一方面对磁铁本身质量要求高, 好场区范围要大, 另一方面则要求具备很宽的相位调整范围来适应不同的出光波段. 通过端部结构的特殊设计实现段间相位匹配的方式具有结构紧凑, 有利于提高超长波荡器系统的充满因子, 对电子束团性能影响小等特点. 相移器则具有调节方便、相位调整范围大等优点, 但这种方式降低了充满因子, 增加了装置的长度, 而且对电子束团的性能会带来较大的影响. 在设计中除了要满足相位匹配要求外, 还必须满足一般端部结构应具备的功能, 即满足电子绝热进入和引出波荡器的条件, 使段内场的一次、二次

2006-08-03 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@mail.ihep.ac.cn

积分都在误差容许范围之内. 在德国 DESY 实验室建造的 TTF I, II 项目上, 即是采用端部结构的特殊设计, 通过对相互关联的端部磁极高度的精细调整, 从而实现了段间相位的匹配, 其相位调整范围可达 $\pm 90^\circ$ ^[3]. 另外, 在美国已经开始建造的 LCLS 项目中, 也是采用端部结构实现相位匹配, 可实现 $\pm 38^\circ$ 的相位调整^[4]. 值得指出的是, 与 DESY 的方案不同, 该方案要求端部磁场为正常磁场值的一半, 需要利用烘烤, 通过控制温度以达到所需场强(它将伴随磁化矢量的旋转), 因此相比较而言, DESY 的方案具有技术上易于实施等优点. 而在德国柏林正在筹建中的 BESSY 软 X 射线自由电子激光装置中^[5], 因波长调整范围大, 拟采用 3 块或 4 块永磁型二极磁铁与空气线圈组成曲柄式的相移器设计, 通过使电子束与光束在段间所走路程及路程的不同来实现不同波荡器段之间的相位匹配. 另外, 即将在德国 DESY 实验室建造的欧洲 XFEL 项目中, 束线 SASE5 波荡器系统要求波长变化范围为 0.4—2.5 nm, 对应光相位变化约为 186° , 因此, 为实现大范围的相位校正也采用了曲柄式的相移器设计^[6].

本文主要针对 PKU-SCAF-FEL 项目在波荡器磁间隙固定的情况下, 在 TTF 型端部结构基础上, 提出了一种特殊设计的端部结构, 并首次利用数值模拟程序, 对其进行了详细的数值优化模拟计算, 从而获得总体方案中最终的端部结构和参数. 同时讨论了在磁间隙调变时, 通过在线遥控调节的方式可实现磁间隙小范围调变下段间的相位匹配, 从而有效的提高波荡器系统的填充因子, 减少装置长度, 和减少曲柄型相移装置对电子束品质的影响, 具有结构简单、易于实现、调相范围大等优点. 此种端部结构及其数值计算模型具有普适性, 可以从红外 FEL 推广到 X 波段 FEL, 因此也为下一步建造高增益 X 射线自由电子激光的波荡器打下了基础.

2 固定磁间隙波荡器的端部结构设计

2.1 端部结构的初步设计及基本功能的实现

对于一般 FEL 装置波荡器的端部结构设计, 其主要目标是如何使电子绝热进入和引出波荡器. 由于波荡器端部外侧是自由空间, 电子进入波荡器突然受到波荡器磁场很大扰动, 即电子不是绝热(寢变)进入, 在波荡器出口的情况也类似. 另一方面, 端部边沿场分布将给波荡器前后的输运元件的性能带来不利影响, 因此需要加磁屏蔽, 在外加磁屏蔽后, 端部内侧磁场变化很大, 电子的运动状态也将受到很大扰动. 这

些扰动使进入和引出波荡器的电子的运动轨迹很难控制, 因此, 需要通过端部的特殊设计, 使沿轴注入的电子出射时的横向位移和方向角为零, 即要求波荡器场分布的一次和二次积分为零. 另外, 在设计中还应以使整个波荡器的有效周期数最大为优选原则.

为了使电子能绝热进入波荡器可采用的方式是多种多样的, 早期较多采用所谓过渡段, 即使开始几个周期的磁场强度逐步提高到波荡器的设计场强值, 这将大大降低波荡器的有效长度. 目前普遍采用的设计方案有旋转磁块法、半块补偿法等, 以提高波荡器的有效长度. 其中旋转磁块法是在端部附加旋转磁块, 利用磁块旋转引起的场分布变化来保证场积分为零, 其缺点是旋转角度与磁间隙相关联, 即对不同的磁间隙必须调整不同的旋转角. 而半块补偿法是将入口端的第一块永磁铁的一半放置到出口端, 使整体波荡器的磁场对中央镜像对称, 从而达到电子入射和出射状态一致的目的, 此种方法简单易行, 而且其补偿作用与磁间隙无关. 对于 PKU-SCAF-FEL 装置, 它工作于红外波段, 考虑到技术上易于实施及波荡器全长有效周期数最大的原则, 采用在端部使用高度尺寸为正常尺寸一半的永磁铁即半块补偿的方法(而通常采用电子束方向长度是一半), 来实现电子绝热进出波荡器的基本功能. 利用三维程序对该结构进行数值模拟计算, 所得结果如图 1 所示, 达到理论设计对场分布的一次和二次积分即电子束偏角及轨迹偏移为零的要求.

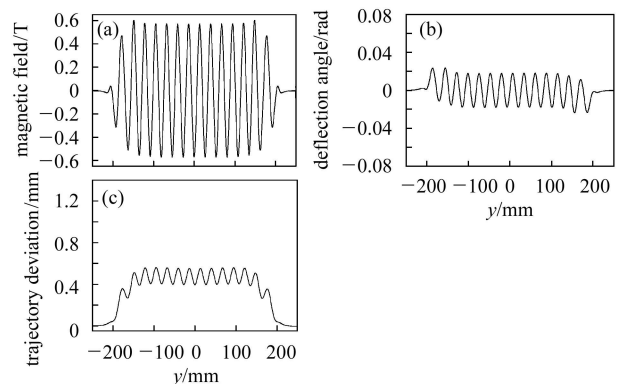


图 1 磁场积分数值计算结果

(a) 磁场; (b) 电子束偏角; (c) 电子束轨迹偏移.

2.2 相位匹配的实现

在高增益 FEL 装置中, 对于长度由十几 m 至百 m 的波荡器系统, 从制造工艺和束流控制及诊断等角度出发, 必须分段建造. 为实现电子束和光束持续地能量交换直至达到激光的饱和输出, 就必须使整个波荡器系统就像一台没有间断的装置, 这就要求电子束和

光束在通过各段波荡器时二者的相位必须匹配. 由自由电子激光的工作机理, 电子和光之间能持续发生能量交换的条件被称为共振条件, 它实际上可表述为电子每走过一个波荡器周期时辐射的电磁波相对于电子向前滑移一个光波长距离, 因此, 在理想状况下, 电子和光之间的相位应该始终保持 2π 的整数倍, 称之为相位匹配. 但在实际中, 磁场的非理想化、边缘场的存在、段间实际距离与理论值的偏差等一系列误差因素的影响, 将导致二者相位的失配, 当这种相位误差超出容许范围时, 就会导致增益显著地下降, 增加增益长度并影响激光的输出功率.

引起波荡器系统相位误差的因素主要包括 3 种^[7]:

(1) 波荡器均匀磁场区的相位变化, 其解析式可近似表达为 $\varphi_w \cong 2\pi \frac{L_w}{\lambda_w} \left(1 - \frac{\lambda - \lambda_s}{\lambda_s}\right)$, 式中 L_w 为波荡器均匀磁场的长度, λ_w 为波荡器周期长度, λ_s 为谐振波长, λ 为实际的辐射波长 (在谐振能量的电子束沿轴注入的条件下, 由波荡器的误差决定), 它与谐振波长存在偏差时, 会引起附加的相差. (2) 波荡器入口和出口边缘场即端部结构处磁场引起的相位变化, 可表示为 $\varphi_{\text{end}} \cong 2\pi \frac{2L_{\text{eff}}}{\lambda_w(1+K^2/2)}$, 其中 $L_{\text{eff}} = N_{\text{end}}\lambda_w(1+3K^2/16)$ 为边缘场的长度, N_{end} 为边缘场所包含的周期数. (3) 波荡器段与段之间的空间所引起的相位变化, 可表示为^[8] $\varphi_{\text{drift}} \cong 2\pi \frac{L_{\text{drift}}(1+k^2/2)}{\lambda_w(1+K^2/2)}$, 其中 L_{drift} 为段间距离, k 为段间平均偏转参数, 当段间无磁场时, $k=0$. 上述公式为理论估算提供了有效的手段, 但在波荡器实际研制过程中, 通常是依据磁场的实际测量值来校正各种误差以达到设计的容差要求, 下式即给出了与实测磁场数据直接关联的相位表达式, 可用于分析整个系统的相位误差及相位匹配问题^[9].

$$\varphi(y) = \frac{2\pi}{\lambda_s} \left(\frac{y}{2\gamma^2} + \frac{\int_{-\infty}^y x'^2(y') dy'}{2} \right) = \frac{2\pi}{\lambda_w(1+K^2/2)} \times \left[y + \left(\frac{e}{mc} \right)^2 \int_{-\infty}^y \left[\int_{-\infty}^{y'} B_z(y'') dy'' \right]^2 dy' \right],$$

式中 $y = ct$, λ_s 为谐振波长, γ 为电子以静止质量为单位的相对论能量因子, x' 为电子束偏角, λ_w 为波荡器周期长度, K 为波荡器无量纲参数, e 为电子电量, m 为电子质量, c 为光速, B_z 为波荡器中心磁场值.

在本文所讨论的问题中, 因磁间隙固定, 将着重考虑利用端部结构的特殊设计, 在总体方案确定段间距离后 (由于段间结构设计中不考虑使用相移器, 段间距主要是满足束诊断等要求), 为实现相位误差的校正, 将在 2.1 节端部初步设计实现电子绝热进出波荡器的基本功能后, 对其结构进行进一步的改进以实现段间相位匹配的功能. 为此, 如图 2 所示 (为与数值模拟计算程序所取坐标系保持相同, 本文的图例及公式中都取 y 向为电子束入射出射方向, z 向为高度方向, x 向为横向 (宽度方向)), 在半块补偿法的基础上, 首先使端部的半块永磁铁在 z 向高度方向上具有可精细调节的功能, 然后让与其他磁极尺寸相同的倒数第二个磁极在 z 向初始位置比其他磁极向 z 向凹进 2mm, 并和端部的半块永磁铁一样在 z 向也具有精细调节的功能. 在图示结构中还需要说明的是, 软铁部分 (soft iron) 的作用是磁短路的屏蔽材料, 阻止边缘场延伸, 同时在仔细优化结构尺寸后可以降低端部磁场与磁间隙的关联性^[10]. 此时端部结构的调整必须具备两个功能, 即在获得磁场一、二次积分为零的前提下, 获得不同的相移量以满足相位匹配的要求.

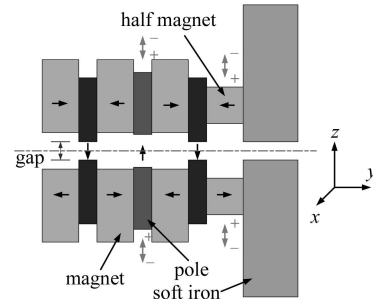


图 2 端部结构及计算坐标系示意图

利用为北京大学项目研制的 10 周期模型的实际结构参数, 并在端部采用图 2 所示结构, 建立起数值计算模型, 通过数值程序 RADIA 进行模拟计算. RADIA 程序是欧洲同步辐射中心 (ESRF) 编制的三维磁场计算程序, 它采用边界积分法 (boundary integral method), 具有运算速度快, 精度高, 场积分计算精确等优点^[11]. 北京大学项目 10 周期模型优化设计后的最终尺寸为永磁铁尺寸 $60\text{mm} \times 45\text{mm} \times 8.2\text{mm}$, 磁极尺寸 $43\text{mm} \times 36\text{mm} \times 5.3\text{mm}$, 端部半块永磁铁的尺寸为 $60\text{mm} \times 22.5\text{mm} \times 8.2\text{mm}$, 磁间隙为设计值 11mm . 以前一段的段间距中点到后一段的段间距中点为相位计算区间, 通过对称精细调节前后及上下端部对应可调部分的高度, 由数值计算结果可得到一系列即满足使电子束出射时的横向位置和方向与入射时

的位置和方向保持一致的基本要求, 又达到用于补偿相位变化的可调整磁极和半块永磁铁的位置参数, 还可以计算出通过这一方式可获得的相应的相位调整范围. 模拟计算时, 可调整磁极的初始位置为磁间隙增加2倍凹进量(2mm)值, 例如磁间隙为11mm时, 可调整磁极初始位置为15mm, 永磁铁半块位置以其机械中心位置为零初始位置, 正向调整量意味着向束流中心调整, 即磁间隙减小的方向, 负向反之, 如图2符

号调整方向所示. 在数值计算模型中, 由于模型沿 xy 和 yz 平面成镜像对称. 因此, 半块永磁铁及磁极 z 向高度的调整量都为单边调整量, 对磁间隙的影响实际是加倍的. 另外, 为了探索通过端部结构遥控调节而实现在磁间隙可调情况下的相位调整这一构想的可行性, 又分别计算了几组不同磁间隙取值下的磁极调整量. 通过数值计算获得的一系列结果如表1和图3所示.

表1 磁间隙固定时相位数值计算结果

可调整磁极 调整量/mm	Gap=11mm		Gap=10mm		Gap=12mm	
	半块永磁铁 调整量/mm	$\Delta\Phi(\delta(\text{end})-\delta(\text{start})) / (^\circ)$	半块永磁铁 调整量/mm	$\Delta\Phi(\delta(\text{end})-\delta(\text{start})) / (^\circ)$	半块永磁铁 调整量/mm	$\Delta\Phi(\delta(\text{end})-\delta(\text{start})) / (^\circ)$
0	-23.79	3660.71	-23.98	3455.21	-23.67	3853.09
0.25	-23.45	3702	-23.59	3496.54	-23.36	3893.35
0.5	-23.17	3750.09	-23.27	3545.14	-23.1	3939.99
0.75	-22.93	3804.9	-23.02	3601.46	-22.86	3992.3
1	-22.68	3864.27	-22.76	3662.54	-22.63	4049.99
1.25	-22.43	3928.93	-22.51	3730.06	-22.38	4111.2
1.5	-22.14	3997.86	-22.24	3798.77	-22.09	4177.53
1.75	-21.8	4065.54	-21.94	3863.16	-21.72	4244.36
2	-21.46	4125.41	-21.66	3918.41	-21.32	4308.16

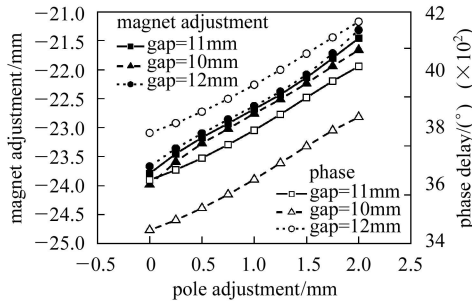


图3 相位数值计算结果

上表计算结果表明: 采用所提出的端部结构可以获得使场积分为零的磁极和永磁铁的相位匹配位置, 同时通过端部结构的调整还可实现单段相位的较大范围的调整, 当磁极机械结构调节范围为 $\pm 0.5\text{mm}$ ^[12], 相应的相位调整范围为 $\pm 100^\circ$, 在波荡器实际研制过程中, 应以综合了机械调整、测量设备等误差的相位实际测量调整范围为最终依据.

3 磁间隙调变波荡器的相位匹配

磁间隙改变引起光波长变化, 从而使波荡器系统中光相位发生变化, 这种变化同样可通过端部磁场调整实现对电子相位的校正, 最终实现光与电子相位的匹配. 依据北大项目参数, 我们在表2给出了磁间隙调整时所需校正的相位值.

表2 磁间隙调变下相位数值计算结果

磁间隙 /mm	出光波长 / μm	光相位 变化/ $^\circ$	电子校正 相位/ $^\circ$
11	6.59	2667.4	212.6
11.1	6.5	2704.3	175.7
11.2	6.41	2742.3	137.7
11.3	6.32	2781.3	98.7
11.4	6.24	2817	63
11.5	6.16	2853.6	26.4

由上表计算结果可以看出, 当整个波荡器磁间隙调整量为0.5mm, 出光波长变化范围为6.59—6.16 μm 时, 所引起的光相位变化为 186° , 对应的电子应调整相位范围为 26° — 213° , 从表1计算结果可以看出, 通过端部结构的遥控调节是可实现相位匹配的(因为在相移范围内). 另外, 从图3曲线可以看到, 函数关系基本为线性, 因此在研制过程中, 可以通过在实验室精确测量出类似曲线, 之后在在线实验中可根据对光信号的检测, 采用遥控调节上述结构中的高度, 参照曲线, 以获得最强的光信号为准, 调整相应高度, 即可实现在线小范围磁间隙调变时的相位匹配.

4 结论

本文所采用的端部相位调节结构通过理论计算表明: 该设计能很好的实现所需功能, 而且与LCLS所采

用的结构相比,它具有易于实现,而且相位调节量大等优点. 所获得的PKU-SCAF-FEL所需的结构参数为该项目的进一步开展创造了条件. 本工作可直接从红外波段推广至VUV或X射线波段,从而为其他项目

在此领域的研究工作的开展提供了一定的参考价值.

感谢德国DESY波荡器实验室的J.Pflueger博士的指导和多次有益的讨论.

参考文献(References)

- 1 DING Yuan-Tao et al. Nucl. Instrum. Methods, 2004, **A528**: 416—420
- 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 TESLA Technical Design Report. March 2001. <http://tesla.desy.de>
- 4 Linac Coherent Light Source(LCLS) Conceptual Design Report, April 2002. <http://www-ssrl.slac.Stanford.edu/lcls/>
- 5 The BESSY Soft X-ray FEL Technical Design Report, March 2004. <http://www.bessy.de>
- 6 Pflueger J et al. A Prototype Phase Shifter for the Undulator Systems at the TESLA X-ray FEL, TESLA-FEL 2000-08. <http://flash.desy.de>
- 7 Freund H P. Physical Review, 2004, **E70**: 015501
- 8 Elleaume P et al. Design Considerations for a 1 Angstrom SASE Undulator, TESLA-FEL 2000-16. <http://flash.desy.de>
- 9 Walker R P. Nucl. Instrum. Methods, 1993, **A335**: 328—337
- 10 Tischer M, Pflueger J. Magnet Design of a Prototype Structure for the X-ray FELs at TESLA, TESLA-FEL 2000-12. <http://flash.desy.de>
- 11 Elleaume P, Chubar O, Chavanne J. Computing 3D Magnetic Fields from Insertion Devices. Proc. IEEE PAC-97, 9P027, 3509—3511
- 12 Pflueger J et al. Nucl. Instrum. Methods, 2000, **A445**(II): 87—88

Theoretical Study of Segmented Undulator Phase Matching^{*}

LU Hui-Hua¹⁾ CHEN Sen-Yu

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract Phase matching between different undulator segments is a key condition for high gain Free Electron Laser facilities to gain saturation laser output. This paper develops theoretical study on phase matching, provides the scheme to realize it and gives the parameters of terminations structure. According to the simulation result, $\pm 100^\circ$ phase adjustment range can be achieved when the pole height can be adjusted in the range of $\pm 0.5\text{mm}$.

Key words X-ray free electron laser, undulator, phase matching, design of terminations

Received 3 August 2006

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

1) E-mail: luhh@mail.ihep.ac.cn