

# 用于 THz 源的混合型波荡器数值模拟

秦斌<sup>1,1)</sup> 熊永前<sup>1</sup> 谭萍<sup>1</sup> 裴元吉<sup>2</sup> 樊明武<sup>1</sup>

1 (华中科技大学 武汉 430074)

2 (中国科技大学 合肥 230029)

**摘要** 波荡器是基于自由电子激光的小型 THz 源关键器件, 其可调节的周期性磁场结构与两端的光腔配合, 使得穿越的电子束产生带增益的相干辐射, 最终达到 THz 源所需要的功率. 同纯永磁结构相比, 混合型波荡器通过软铁材料调节由永磁块磁化方向性差异导致的磁场分布误差, 同时可提供更高的场强. 本文针对小型 THz 源需求, 对混合型波荡器进行了相关物理设计. 在解析方法分析的基础上, 采用 OPERA3D/TOSCA 有限元分析软件, 对波荡器进行了三维磁场数值模拟和积分场优化. 通过对波荡器端部结构的调整, 优化后模型的一次场积分(导向误差)小于 0.01Gs·m, 电子轨迹偏移小于 0.02mm.

**关键词** THz 源 混合型波荡器 数值模拟 TOSCA

## 1 引言

THz 波通常是指频率范围在 0.1—10THz 的电磁波, 由于物质的 THz 光谱包含丰富的物理化学信息, 使得它在物理、化学、生物医学和军事等领域有着潜在的应用价值. 同使用微波电子器件或普通激光激励的 THz 波产生方式相比, 基于自由电子激光(FEL)原理的 THz 源能产生高亮度、高功率及波长连续可调的 THz 辐射波<sup>[1]</sup>. 我们提出一种基于 FEL 的小型 THz 源系统方案<sup>[2]</sup>, 图 1 为该系统示意图.

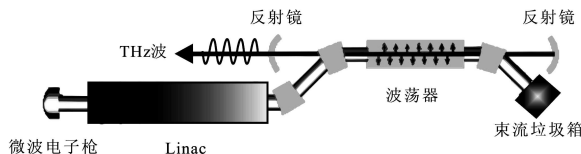


图 1 基于 FEL 的小型 THz 源系统示意图

波荡器通过周期磁场使得穿越电子束横向振荡, 发生相干电磁辐射, 是基于 FEL 的 THz 源关键器件, 其磁场品质直接影响到辐射增益. 波荡器根据磁结构分为电磁、永磁和超导三种类型. THz 源要求较短的磁场周期, 对场强要求不高, 因此采用永磁结构是一个较好的选择. 永磁型分为纯永磁型和混合型, 同纯永磁相比, 混合型波荡器在相同的间隙周期比条件下可以产生更高的峰值场强, 同时软铁材料也减弱了磁性材料磁化矢量差异所带来的影响. 在 THz 源系统中,

我们选择了混合型波荡器, 其周期长度 5cm, 周期数 25, 偏转参数  $K=1.0$ . 对于 5.7MeV 电子束, 相干辐射波长 0.3mm (1THz). 由于混合型波荡器磁场分布复杂, 缺乏成熟的理论公式, 本文基于对波荡器磁场一次和二次积分的要求, 采用 OPERA3D/TOSCA 三维静磁场分析软件, 对波荡器进行了数值模拟和积分场优化.

## 2 混合型波荡器参数设计

波荡器磁场垂直分量的一次积分  $I_{\text{first}}$  和二次积分  $I_{\text{second}}$  若不为零, 将对穿越的电子束分别产生方向偏移和位置偏移<sup>[3]</sup>:

$$\Delta x' [\text{mrad}] = 30 I_{\text{first}} [\text{Gs} \cdot \text{m}] / E [\text{MeV}], \quad (1)$$

$$\Delta x [\text{mm}] = 30 I_{\text{second}} [\text{Gs} \cdot \text{m}^2] / E [\text{MeV}], \quad (2)$$

根据 THz 源系统中电子束 5mm·mrad 归一化发射度的设计指标, 要求  $\Delta x < 0.1\text{mm}$ ,  $\Delta x' < 0.1\text{mrad}$ , 因此一次积分和二次积分应分别控制在 0.03Gs·m 和 0.03Gs·m<sup>2</sup> 范围之内.

波荡器偏转参数  $K$  由峰值场强  $B_0$  和周期  $\lambda_0$  决定,  $K=1.0$  时对应  $B_0=0.214\text{T}$ .

$$K = \frac{e B_0 \lambda_0}{2 \pi m c} = 93.4 B_0 [\text{T}] \cdot \lambda_0 [\text{m}]. \quad (3)$$

关于永磁材料的选择, 传统的 Sm-Co 材料具有较强的抗辐射损伤能力, 但目前 NdFeB 材料在这方

面已有较大提高, 能够满足THz源系统中低能电子束( $<12\text{MeV}$ )的辐射环境要求. 由于NdFeB具有更好的硬度, 剩磁Br也较高, 因此选择作为永磁块磁性材料; 磁极材料采用电工纯铁. 使用P.Elleaume给出的峰值磁场经验拟合公式<sup>[4]</sup>, 计算出磁极间隙约为3.5cm.

### 3 端部结构设计

由于波荡器磁场周期为奇数, 当端部磁极峰值为中部磁极峰值一半时, 理论上积分场为零. 因此控制一次和二次磁场积分的关键是优化波荡器端部永磁块和磁极的结构. 在文献[3, 5]介绍的变体积端部结构基础上, 给出了如图2所示的参数化端部模型. 通过调节校正磁极CP1和CP2的高度与校正磁块CM的厚度来调节端部磁极峰值; 改变外侧磁屏蔽距CM位置及其间隙使得边缘场最小化.

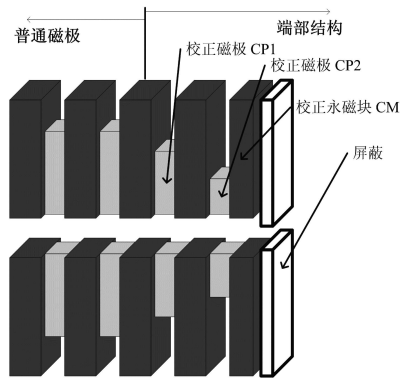


图2 波荡器端部结构参数化模型

### 4 OPERA3D/TOSCA 数值模拟

目前用于三维静磁场计算的程序主要有RADIA, ANSYS和TOSCA等. 我们采用了基于有限元分析的OPERA3D/TOSCA<sup>[6]</sup>程序对波荡器进行了建模和仿真. 经验表明, 对于三维磁场计算, 7个周期是一个较好的选择<sup>[5]</sup>, 增加周期数的计算结果对积分场几乎没有影响. 图3为建立的波荡器模型, 为了减少计算时间, 做了对称性处理.

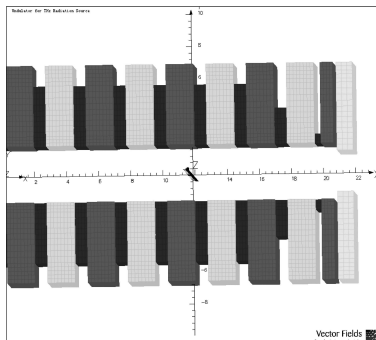


图3 TOSCA波荡器三维模型

在对端部结构各校正部件及磁屏蔽作了优化后, 磁场一次和二次积分满足设计要求. 图4为优化后波荡器中心轴垂直分量磁场分布, 普通磁极峰值磁场为2128Gs, 端部磁极峰值为1130Gs, 接近理论值, 磁场峰值均方根误差 $<0.7\%$ . 在波荡器出口600mm处, 磁场一次积分为 $8\text{e-}3\text{Gs}\cdot\text{m}$ , 二次积分为 $5\text{e-}3\text{Gs}\cdot\text{m}^2$ .

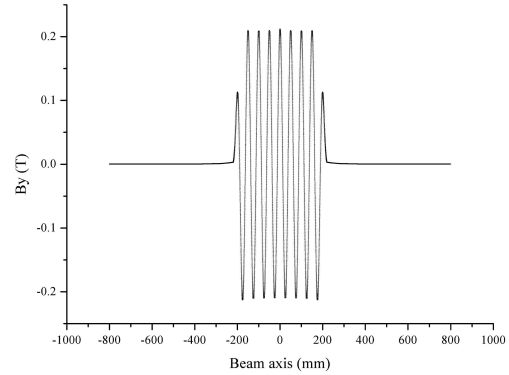


图4 波荡器中心轴垂直分量磁场分布

图5为使用我们开发的粒子跟踪程序PTP<sup>[7]</sup>对TOSCA模拟的7周期波荡器磁场进行计算得出的电子轨迹. 波荡器内部电子束最大横向偏移为2.4mm, 波荡器出口400mm处偏移小于0.02mm. 最终, 得出该波荡器优化物理参数, 见表1.

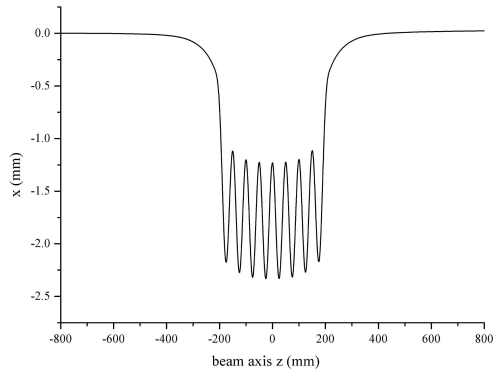


图5 跟踪计算的电子轨迹

表1 优化后波荡器参数

参数	数值	参数	数值
周期长度/mm	50	普通磁块尺寸/mm	17×75×50
周期数	25	普通磁极尺寸/mm	8×50×37.5
间隙/mm	35	CP1尺寸/mm	8×50×22.5
永磁材料	NdFeB	CP2尺寸/mm	8×50×6
Br/T	1.2	CM尺寸/mm	7.5×75×50
磁极峰值/T	0.213	屏蔽厚度, 间隙/mm	10, 23.8

### 5 结论

混合型波荡器能够满足小型THz源对空间和磁场的要求, 避免了纯永磁类型在安装所需要的大量

永磁块调整工作. 本文基于解析模型和经验选择了波荡器参数, 并使用 TOSCA 三维有限元计算程序, 针对其端部结构进行了三维分析与优化, 最终结果满足设

计要求.

感谢中国科技大学同步辐射国家实验室贾启卡研究员在波荡器设计方面给予的指导和帮助.

### 参考文献(References)

- 1 Krafft G A. Physical Review Special Topics — Accelerators and Beams, 2004, **7**: 060704
- 2 XIONG Yong-Qian et al. Chinese Physics C (HEP & NP), 2008, **32**(Supp. I): 301 (in Chinese)  
(熊永前等. 中国物理C, 2008, **32**(增刊 I): 301)
- 3 CAI Gen-Wang, JIA Qi-Ka. HPL & PB, 2005, **17**(10): 1585—1589 (in Chinese)
- 4 Elleaume P et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2000, **455**: 503—523
- 5 Papadichev V A et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004, **532**: 644—651
- 6 OPERA3D user manual. Vector Fields Ltd. 2006
- 7 QIN Bin et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2007, **261**: 56—59

## Numerical Simulation of a Hybrid Undulator Applied in THz Radiation Source

QIN Bin<sup>1,1)</sup> XIONG Yong-Qian<sup>1</sup> TAN Ping<sup>1</sup> PEI Yuan-Ji<sup>2</sup> FAN Ming-Wu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

<sup>2</sup> (University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract** The undulator is the key component in the compact THz radiation source based on FEL. By matching the adjustable period magnetic field of the undulator with the optical resonance cavity, the passing electron beam will generate coherent radiation with gain, and the radiation power required by THz source can be achieved finally. Compared with the pure permanent magnet type, the hybrid type undulator can decrease the field errors caused by non-homogeneous magnetization of magnetic blocks, and provide higher magnetic field. The conceptual design of a hybrid undulator used for THz radiation source is introduced. We use the FEM code OPERA/TOSCA to simulate 3D magnetic field of the undulator. After optimizing the end structure of the hybrid undulator, the first field integrals is controlled within 0.01Gs·m, and the deviation of the electron beam is less than 0.02mm.

**Key words** THz radiation source, hybrid undulator, numerical simulation, TOSCA