

永磁扭摆磁铁的同步辐射特性和结构分析^{*}

郭小云^{1)†} 石才士²⁾ 张久昶²⁾ 辛洪兵¹⁾

1) 北京工商大学机械自动化学院, 北京 100037)

2) 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

(2005 年 8 月 3 日收到, 2005 年 11 月 28 日收到修改稿)

简要分析了永磁扭摆磁铁所产生的同步辐射光的基本特性, 并得出永磁扭摆磁铁所产生的同步辐射光的辐射功率角分布和总功率. 介绍了永磁扭摆磁铁的基本结构, 并对起主要承载力的 C 型框架和整体结构进行了有限元分析, 从而得到磁铁结构在不同情况下的变形. 应用理论公式对 C 型框架的变形位移量进行了验证, 为永磁扭摆磁铁的结构设计和进一步改进提供了理论依据.

关键词: 扭摆磁铁, 同步辐射, C 型框架, 有限元分析

PACC: 2920, 29201, 2921

1. 引 言

作为第一代同步辐射光源的北京同步辐射装置, 现已有 3 台不同周期的多极永磁扭摆磁铁正在运行, 永磁扭摆磁铁的同步辐射光谱性能与弯转磁铁相比得到很大的改善和提高, 为同步辐射实验用户提供高通量和高能量的光源. 目前, 北京正负电子对撞机重大改造工程已进入全面升级阶段, 将储存环由原来的单环结构改造成高亮度的双环结构的对撞机. 由于正负电子轨道分开, 现有的生物大分子晶体学光束线因位于正电子环轨道而无法使用同步辐射兼用光, 因而要求在改造后的北京正负电子对撞机储存环第一象限外环新设计一台多极永磁扭摆磁铁(简称 1W2), 作为新扩建的生物大分子光束线的引出光源, 开展第二个生物大分子晶体学衍射实验.

扭摆磁铁称为插入件, 它主要安装在储存环的直线节上, 磁场极性正负交替呈周期性变化. 当电子通过扭摆磁铁时, 电子将随磁场发生周期性扭摆, 近似为正弦曲线的轨道运动. 并且当磁场强度沿插入件方向的一次和二次剩余积分值为零时, 电子通过扭摆磁铁后不改变其运动方向和位置, 所以不会干扰电子在环中的稳定运动. 由于扭摆磁铁设计的磁场强度高, 可使辐射的特征波长变短, 所以由扭摆磁

铁产生的同步辐射光, 其光亮度、光强度等性能远优于由弯转磁铁发出的光, 可扩宽同步辐射光的应用范围.

2. 同步辐射特性

根据同步辐射生物大分子晶体学衍射实验提出的要求, 以及永磁扭摆磁铁 1W2 在储存环中所安装位置的直线节长度, 永磁扭摆磁铁 1W2 的物理设计参数如表 1 所列.

表 1 永磁扭摆磁铁 1W2 的物理设计参数

物理参数	设计值
工作能量 E/GeV	2.5
电子束流强度 I/mA	250
直线节长度 L/mm	1800
磁铁周期数 N	7
周期长度 λ/mm	220
磁间隙范围 g/mm	35—200
中心峰值磁场 $\mu_0 H/\text{T}$	1.6—0.01
对应特征能量 ϵ_c/keV	6.65

插入件的性能由偏转因子 K 描述, 它表示电子偏转角的大小, 而电子偏转角的大小直接决定了插入件同步辐射的光谱性质, 偏转因子 K 和电子偏转

^{*} 中国科学院基础研究重大项目(批准号: Y1904)资助的课题.

[†] E-mail: guoxy@mail.ihep.ac.cn

角 δ 分别定义为

$$K = eB_0\lambda/2\pi mc, \quad (1)$$

$$\delta = K/\gamma. \quad (2)$$

式中, γ 是电子能量与静止质量之比, 周期长度 λ 单位为 m, 磁感应强度 B_0 的单位为 T. 根据永磁扭摆磁铁 1W2 的设计值, 计算可得 1W2 的偏转参数 K 为 32.8, 最大偏转角 δ 为 6.15 mrad.

扭摆磁铁的 $K \gg 1$ 因此各磁极之间的辐射不具有相干性, 但各磁极发出的辐射谱是连续谱. 扭摆磁铁的辐射光谱特性与弯转磁铁相同, 对于周期数为 N 的扭摆磁铁, 其辐射强度是各极辐射的 $2N$ 倍^[1]. 扭摆磁铁所产生同步光的辐射功率角分布和总功率分别表示为^[2]

$$\frac{d^2 P}{d\theta d\psi} = H(\psi) \left[I_{2/3}^2(\xi) + \frac{X^2}{1+X^2} I_{1/3}^2(\xi) \right], \quad (3)$$

式中,

$$H(\psi) = 2N \frac{3\alpha}{4\pi^2} \gamma^2 \frac{\Delta\omega}{\omega} \frac{I}{e} \gamma^2 (1+X^2)^{-2}, \quad (4)$$

$$P_T = 0.633 E^2 I B_0^2 L. \quad (5)$$

这里, θ, ψ 分别表示辐射方向与电子运动轨道的水平夹角和垂直夹角, $I_{2/3}(\xi), I_{1/3}(\xi)$ 为修正的贝塞尔函数,

$$\xi = \gamma(1+X^2)^{3/2}/2,$$

$$y = \omega/\omega_c = \epsilon/\epsilon_c,$$

$$X = \gamma\psi.$$

(3) 式中等号右端第一项表示平行于电子轨道平面的极化分量, 第二项表示垂直于电子轨道平面的极化分量, 当电子接近光速时辐射的水平极化分量比垂直分量大得多. 由 (5) 式可得出永磁扭摆磁铁 1W2 辐射总功率 P_T 约为 3.89 kW, 本文计算中电子工作能量 E 的单位为 GeV, 电流强度 I 的单位为 A, 长度 L 的单位为 m.

扭摆磁铁所产生同步辐射光的辐射功率角分布的另一表达式为^[2]

$$\frac{d^2 P}{d\theta d\psi} = P_T \frac{21\gamma^2}{16\pi K} G(K) f_k(\lambda\theta, \gamma\psi), \quad (6)$$

式中, 函数 $G(K)$ 随着 K 值的增大, 其值趋于 1, $f_k(\lambda\theta, \gamma\psi)$ 是归一化函数. 由于扭摆磁铁 $K \gg 1$, 所以 $G(K) \approx 1$, 这里取 $f_k(0, 0) = 1$, 则 (6) 式可表示为

$$\frac{dP}{d\theta d\psi} = 10.84 B_0 E^4 I N. \quad (7)$$

由 (7) 式计算得出永磁扭摆磁铁 1W2 辐射角功率分布为 $1.186 \text{ kW} \cdot \text{mrad}^{-2}$.

对于扭摆磁铁, 在不同的水平偏角内辐射的特

征能量可表示为

$$\epsilon_c(\psi) = \epsilon_{c, \max} \sqrt{1 - (\theta/\delta)^2}, \quad (8)$$

$$\epsilon_{c, \max} = 0.665 E^2 B_0. \quad (9)$$

由 (2) 式可知, 扭摆磁铁同步辐射的水平角范围在 2δ 之内. 永磁扭摆磁铁 1W2 的辐射角范围在 12.3 mrad 内, 其发出的同步光可被分成多条光束使用. 随着辐射的特征能量增高, 可使得谱向高能端扩展.

3. 结构分析

3.1. 1W2 结构简介

鉴于北京正负电子对撞机属“一机两用”, 它是以高能物理实验为主的第一代同步辐射装置, 故永磁扭摆磁铁 1W2 必须满足两种工作模式. 根据同步辐射对永磁扭摆磁铁 1W2 场强的要求、储存环直线节的长度、隧道的高度及磁铁结构设计的限定条件等, 1W2 采用 C 型结构, 设计外形总长为 1.8 m, 宽为 1.26 m, 高为 2.22 m.

由于扭摆磁铁的工作间隙越小磁感应强度就越大, 则磁极之间的吸引力越强. 永磁扭摆磁铁 1W2 工作在小间隙时, 磁感应强度可达到 1.6 T, 因此磁铁的结构必须有足够的刚性来保证正常工作. 永磁扭摆磁铁 1W2 的整体结构如图 1 所示, 主要有磁极头、2 个 II 型磁极大梁、C 型框架、上下碟簧减载系统、滚珠丝杠和滚珠导轨及传动系统等组成. 30 个

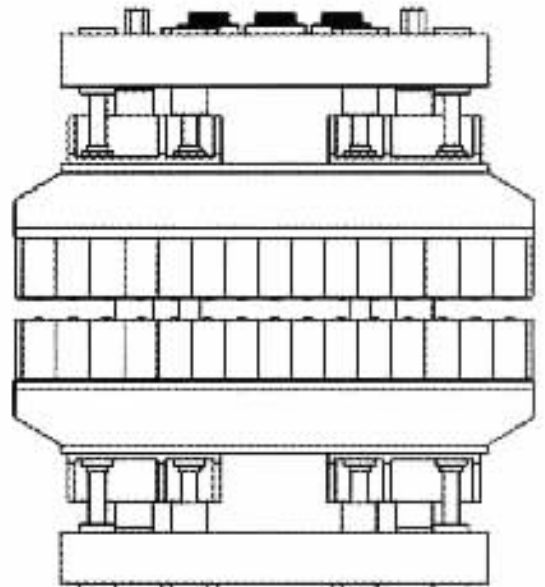


图 1 永磁扭摆磁铁 1W2 结构示意图

磁极头分别安装在上下 II 型不锈钢大梁上,在小间隙时产生大约 10 t 的吸引力.上下 II 型不锈钢大梁用 4 个可移动角板连接体连接到立柱导轨和滚动丝杠上,以便达到在不同工作间隙的开合动作.丝杠采用整体正反螺旋滚珠丝杠,导轨也采用滚珠导轨.这样设计的优点是结构承载能力大且不易变形.动力源由单个电机通过谐波减速器减速,再用链条带动丝杠,并保证运动的同步性.为了减轻丝杠和导轨的负荷,采用 8 组减载碟簧,分别安装在 C 型框架的减载悬臂梁和 II 型纵梁之间,减载与传动平行分开,减小了纵向空间占用,简化了机械结构.主要部件除必须使用无磁材料制作的大梁和连接体外,其他均采用钢板焊接结构.

3.2. 有限元分析

有限元分析方法是一种模拟设计载荷条件,并且在确定的载荷条件下对真实情况的数值近似^[3].本文采用有限元线性结构静力分析,计算的主要目的—是得到永磁扭摆磁铁 1W2 整体结构的位移量及应力分布,二是计算出 C 型框架在减载前后的位移量.因为在整个结构中,C 型框架起主要承载力作用,从而对其结构的分析是非常必要的.

3.2.1. 有限元模型建立

建立有限元模型首先对结构进行简化,既要使模型反映工程结构的主要特征,又要尽可能地缩小解题规模.整体建模时,C 型框架和 II 型纵梁之间的 8 组减载碟簧可简化为 8 个可承受拉压的直杆,分别与 C 型框架、II 型纵梁粘结.这样简化的优点是简化后的结构既符合实际情况,又能进行线性分析.减速器等各种传动系统在整个结构中起一种控制和调节作用,所承载力很少,有限元建模时可忽略.所有的倒角和圆角都用直角代替,各种准直孔和限位顶杆等对整体刚度不造成大的影响均不考虑.C 型框架内部由多种不锈钢板焊接而成,在建立有限元模型时采用布尔粘结,把各板粘结为一体,而且必须保证与实际模型相符,因为它们对 C 型框架的变形影响较大.为了保证有限元计算模型与实际结构相符,建模过程通过定义硬点、硬线和硬面来确保划分网格后这些关键点、线、面的完整性^[4].

3.2.2. 边界条件

边界条件包括位移约束和载荷约束.在永磁扭摆磁铁 1W2 实际工作情况下,1W2 的整体框架安装在有高度调节系统的底架上,底架安装在有水平纵

横向调节机构的大底板上,底板由地脚螺栓固定在水泥地面和外接的钢支架上.因此两个模型的边界条件如下:在计算永磁扭摆磁铁 1W2 整体结构的位移量及应力分布时,在 1W2 的高度和角度调好后,C 型框架的底部定义为约束面,按上下两极头产生 10 t 的吸引力计算,载荷加在 II 型纵梁的两个上底板表面上,两个上底板受面载荷是 242 kPa.在计算 C 型框架减载后的位移量时,定义框架两底板为约束面,载荷分别加在连接 8 组减载碟簧的套筒底面,每一底面所受面载荷均为 9 kPa,这与实际相符.在整个分析过程中,磁铁自身的重力被忽略.

3.3. 结果分析和校验

应用有限元静力分析,1W2 的整体结构和 C 型框架的有限元分析结果如图 2 和图 3 所示,图中不同的灰度表示不同的应力分布.图 2 为整体结构在受最大面载荷且无减载情况下的应力分布图,整体结构的最大位移量是 0.4319 mm.图 3 表示减载后 C

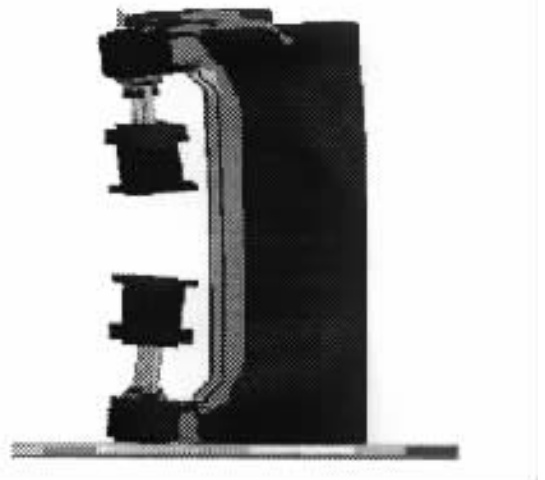


图 2 减载前 C 型框架整体结构的应力分布图

型框架的应力分布,分析结果显示 C 型框架最大位移量为 0.00703 mm.从分析结果可知,1W2 结构在减载前后的应力分布相同,都是在 C 型框架减载悬臂梁和立柱及吊架连接处所受应力最大.计算结果表明,最大位移量发生在 C 型框架两个立柱的顶端,形变主要由 C 型框架的减载悬臂梁位移所引起.主要的形变和应力都沿 Z 方向(即重力方向)和 X 方向,Y 方向的形变和应力都很小.减载碟簧对 1W2 结构的形变的位移量和应力值影响很大,且对减小形变量和降低最大应力起到很大的作用,其中对结构的形变量影响较大,减载前后 C 型框架的最

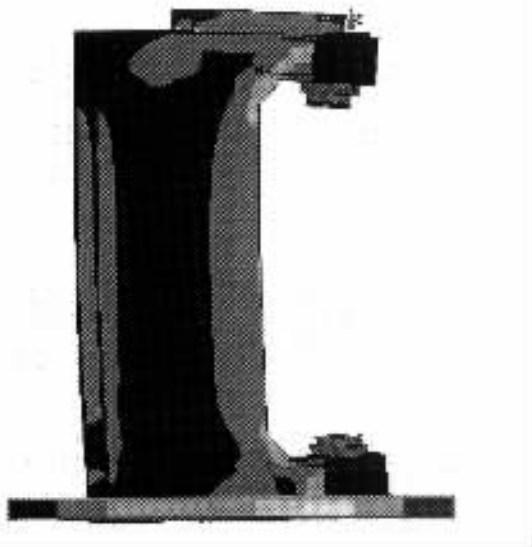


图3 减载后 C 型框架应力分布图

大位移量相差 1 个数量级,而对应力分布的影响较小.

利用有限元对结构进行分析时只是一种近似模拟实际情况,应用有限元分析所得出的结果需要通过理论和实验验证,本文应用理论公式计算了 C 型框架的减载悬臂梁的形变量.根据 C 型框架实际受力部位,在进行理论计算时,加载力 $P = 6 \times 10^5 \text{ N}$,悬臂梁的横截面长 $A = 250 \text{ mm}$,截面外框高 $H = 170 \text{ mm}$,内框高 $h = 130 \text{ mm}$,外框宽 $L = 120 \text{ mm}$,内框宽 $l = 80 \text{ mm}$,加筋板的惯性矩表示为

$$J = \frac{LH^3 - lh^3}{12}, \quad (10)$$

悬臂梁形变表示为

$$Y = -PA^3/3EJ. \quad (11)$$

将有效数值代入(10)(11)式,计算得 $J = 7.322 \times 10^5 \text{ m}^4$, $Y = -0.045 \text{ mm}$.通过有限元和理论计算比较,有限元分析的结果基本符合实际情况.

4. 结 论

根据永磁扭摆磁铁的物理设计所给出实际参数,计算了 1W2 扭摆磁铁所产生的同步辐射光的总功率和功率角分布,为同步辐射的前段区和光束线的设计提供参考依据.

在永磁扭摆磁铁 1W2 机械设计中,应用有限元对 1W2 的结构进行了分析,分析结果表明,1W2 的最大位移量是 C 型框架减载悬臂梁. C 型框架的上下减载悬臂梁在纵向向里偏移,同时减载悬臂梁的变形容易引起 II 型纵梁横向和纵向不平衡.从有限元分析结果和理论计算得到,磁铁结构在减载后形变位移量在 $0.00703\text{--}0.045 \text{ mm}$ 之间,远小于设计所要求的最大位移量,说明磁铁整体结构的强度能满足正常工作要求.由于永磁扭摆磁铁的变形会带来磁场分布的不均匀,为了消除 C 型框架减载悬臂梁变形带来的横向不平行,在 4 个连接角板上设置了一组顶丝调节机构,以保证上下大梁在横向的整体平行度,在 II 型纵梁上设置了对每一个极头进行调整的顶丝,以便消除大梁在纵向变形和极头间磁块场强不一致带来的磁场峰值误差.

- [1] Xiao X H 2002 *Ph. D. Thesis* (Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) p16 [肖向辉 2002 博士学位论文(北京:中国科学院研究生院)第 16 页]
- [2] Duke P J 2000 *Synchrotron Radiation: Production and Properties* (Oxford: Oxford University Press)
- [3] Gong S G 2003 *ANSYS Basic Application and Analysis of Examples*

- (Beijing: Mechanical Industry Press) pp16—19 [龚曙光 2003 ANSYS 基础应用及范例解析(北京:机械工业出版社)第 16—19 页]
- [4] Zhao J W, Wang H Y 2001 *Analysis of Finite Element of Structure* (Beijing: Science Press) pp86—101 [赵经文、王宏钰 2001 结构有限元分析(北京:科学出版社)第 86—101 页]

Characteristics of synchrotron radiation and the structure of the permanent magnetic wiggler^{*}

Guo Xiao-Yun^{1,2)†} Shi Cai-Tu²⁾ Zhang Jiu-Chang²⁾ Xin Hong-Bing¹⁾

1) *College of Mechanical Engineering and Automatization, Beijing Technology and Business University, Beijing 100037, China*

2) *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

(Received 3 August 2005 ; revised manuscript received 28 November 2005)

Abstract

The general characteristics of the synchrotron radiation of the permanent magnetic wiggler, and the angular distribution of power and total power radiated for the permanent magnetic wiggler are introduced briefly. After briefly describing the basic structure of the permanent magnetic wiggler, we report the procedure of applying the finite element analysis to the C-shape frame and the integral structure which are the main bearer of the load, in order to determine the displacement of structure of magnet under different conditions. The displacement of the C-shape frame is calculated by the theoretical formula to provide a theoretical basis for further structure design and improvement of the permanent magnetic wiggler.

Keywords : wiggler, synchrotron radiation, C-shape frame, finite element analysis

PACC : 2920, 29201, 2921

^{*} Project supported by the Major Program for the Basic Research of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. Y1904).

[†] E-mail : guoxy@mail.ihep.ac.cn