

# 多极永磁扭摆磁铁的设计与研制

石才土 王莫托 景毓辉 李大仕 陈绩 彭全岭

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 简要介绍了在北京正负电子对撞机上为提高同步辐射光源性能,设计和研制完成的两台永磁扭摆磁铁的概况,给出了相应的设计参数和机械结构照片,同时也给出了扭摆磁铁的光谱特性.

**关键词** 电子对撞机 同步辐射 扭摆磁铁 光谱特性

## 1 引言

北京正负电子对撞机(BEPC)是一台既做高能物理实验又能进行同步辐射应用研究的高能加速器. 鉴于同步辐射是 70 年代迅速发展起来的一种新型光源,具有通量大、亮度高、波长范围广、高准直性、高偏振性、脉冲时间结构和高稳定性等一系列优点,因而应用研究范围非常广泛,应用需求也日益提高.

同步辐射光一般从储存环上的弯转磁铁引出,由于其辐射光谱性能客观上受到加速器物理参数的限制. 为了提高和拓宽同步辐射光的强度和亮度,往往在储存环的直线段上增加一些带有周期性的极性交替变化的磁铁来提高性能要求. 对于这些磁铁通常叫做插入件(即 Insertion Device).

Wiggler(称为扭摆磁铁)是插入件的一种, BEPC 上已有一台 5 个周期的永磁扭摆磁铁在运行,其同步辐射光谱性能比储存环的弯转磁铁提高近一个数量级,大大扩展了实验范围. 考虑到多周期永磁扭摆磁铁的优越性,两台新的永磁扭摆磁铁于 2002 年建造完成,安装在 BEPC 储存环上,分别已从下游束线引出同步辐射光. 下面介绍这两台扭摆磁铁的概况.

## 2 安装位置与物理要求

针对 BEPC 储存环上的直线节位置和同步辐射实验大厅的现有布局,确定储存环的第一象限和第四象限的两个直线节作为扭摆磁铁的安装位置,即

分别称为 1W1 和 4W2,同步辐射光束线都引入 12 号实验大厅,如图 1 所示.

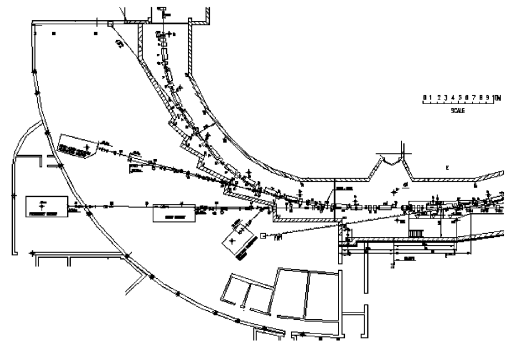


图 1 扭摆磁铁的位置和光束线的布局

根据同步辐射实验提出的对两台永磁扭摆磁铁使用能量不同的要求,1W1 使用能量稍低,要求可引出两条光束线,分别连接 XAFS 和漫散射两个实验站;而 4W2 希望辐射能量上限扩展到 50keV,引出一条光束线接高压衍射实验站. 基于给定的基本条件,分别对两台永磁扭摆磁铁进行物理和结构设计.

## 3 永磁扭摆磁铁的设计前提

对于永磁扭摆磁铁来说,磁铁的气隙不宜过大,或者是峰值磁场不能太高,这是利用永磁的优势. 因为建造一台插入磁铁(不管电磁还是永磁)必须考虑一个很重要的参数,这就是中心峰值磁场与磁铁气隙的乘积(即  $B_0 \times g$ ). 这个参数对永磁插入件来说,涉及到两方面的问题,一是衡量插入磁铁设计和制造的难易程度,二是决定着性能价格比. 鉴于

BEPC 是一台以做高能物理实验为主的兼用机器,其真空盒的孔径不可能很小,而同步辐射对磁场的要求相当高,因此对插入磁铁的设计和制造增加很大的难度. 所以进行磁路设计时,对永磁材料的性能要求,磁路结构,磁块高度和宽度的优化都非常至关重要.

永磁插入磁铁在磁路设计上一般采取两种形式,即纯(Pure)永磁型结构和混合(Hybrid)型结构. 选择哪一种结构主要看磁场的要求,也看磁铁气隙与磁周期的比值( $g/\lambda$ ). 对 Wiggler 来说,一般磁场都比较高,采用混合型结构,而 Undulator(称之波荡磁铁)磁场较低,大多数都选用纯永磁结构.

#### 4 1W1 永磁扭摆磁铁的设计和研制

1W1 永磁扭摆磁铁设计磁极在真空盒外工作,为了满足同步辐射实验提出的可引出两条光束线的要求,1W1 磁铁磁路采用混合型的结构. 设计磁铁间隙可变,变化范围为 35—200mm. 考虑到 1W1 直线节位置的长度 1.84m,磁铁优化设计为 7 个磁周期,周期长度 228mm,计算中心峰值磁场当磁间隙 35mm 时大于  $1.4\text{T}^{[1]}$ . 磁场测量工作间隙 39mm 时为  $1.28\text{T}$ . 采用 C 型的支架结构,以利于真空盒的拆、装和维修. 在磁铁两端部加辅助线圈绕组来调

补磁场,使得整个磁铁的可变间隙范围内的剩余积分磁场均尽可能趋于零,这是加速器物理上的要求.

选用 42H 型号的钕铁硼永磁材料,磁块尺寸为  $50\text{mm} \times 50\text{mm}$  的方块,磁化方向 38mm. 图 2 是组装完成的周期 1/4 结构的照片,磁极材料用电工纯铁,一个磁极共有 18 块钕铁硼磁块组成,整台磁铁实际使用钕铁硼材料约 420kg. 图 3 是程序计算的中心峰值磁场分布,图 4 是研制完成的 1W1 扭摆磁铁照片,图 5 给出了 1W1 实际测量的中心峰值磁场分布.

1W1 永磁扭摆磁铁设计制造的关键技术:(1)磁间隙大,磁场要求高(磁间隙与峰值磁场的乘积取决于难易程度和性能价格比),而且好场区范围宽. 为了尽可能满足好场区要求,采用了极面垫补(即在每个磁极面上洗去 0.8mm 深,90mm 宽的槽),有效地改善了好场区范围,但带来的损失是降低中心峰值磁场约 3%. (2)机械精度要求高,为便于真空盒的安装和维修,在支撑结构设计上采用 C 型,由于受磁吸引力的影响,往往造成不对称,因此给结构设计和制造上增加了难度. (3)组装工装和粘接工艺,1W1 扭摆磁铁设计混合型的磁路结构<sup>[5]</sup>,每个半周期有 18 块互相排斥的永磁块和一个磁极用环氧胶粘接而成. 所以,装配工装的设计和环氧胶的配方及粘接工艺至关重要.

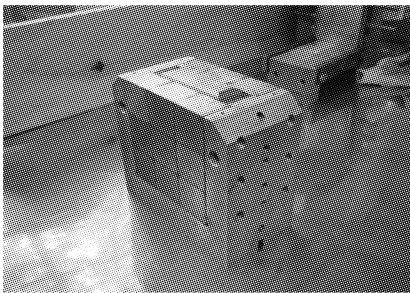


图 2 周期 1/4 磁极组合

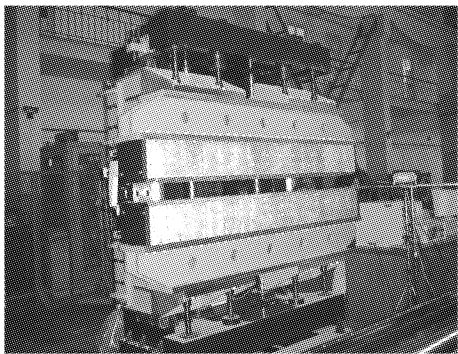


图 4 1W1 永磁扭摆磁铁

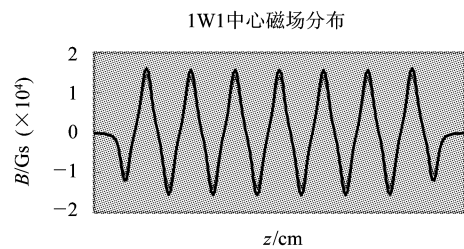


图 3 计算两种磁间隙下的中心峰值磁场分布

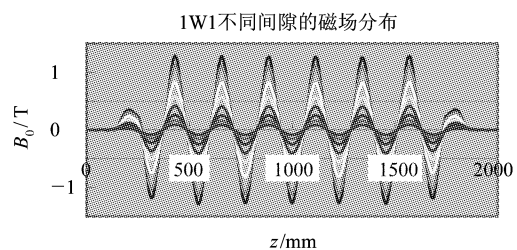


图 5 1W1 实际测量的中心峰值磁场分布

## 5 4W2 真空内扭摆磁铁的设计和研制

4W2 永磁扭摆磁铁根据同步辐射实验对使用光子能量高的要求,磁铁设计在超高真空室内工作,即称为 In-Vacuum Wiggler. 它的特点是两磁极之间没有真空盒,目的是为了尽可能地压缩磁铁气隙,提高磁场强度,保证有高的同步辐射光谱亮度和能量.

研制超高真空内的扭摆磁铁在国内外都是一个新的课题. 尽管超高真空内的波荡磁铁在日本已开展研制多年,并有多台真空内的波荡磁铁在不同的储存环上运行<sup>[3,4,6-8]</sup>. 但由于真空内的扭摆磁铁磁周期长,磁场高,使用的永磁材料体积大,造成真空室的体积和容量增大,相应的技术难度大大增加,因此国际上尚没有研制真空内的扭摆磁铁. 而对 4W2 来说,建成后工作在兼用的储存环上,其边界条件和内部环境更为复杂,因而就带来像束流阻抗,磁块表面镀层处理及装配,真空焊接与密封以及超高真空的实现,剩余积分场的补偿等一系列工艺上和技术上难度更大的关键问题.

4W2 经过关键技术的可行性研究,最后与上海交通大学合作,通过组织制造厂家的技术攻关,于 2002 年 10 月首次建成第一台高场强的真空内的永

磁扭摆磁铁,经专家小组测试和鉴定,磁场性能与静态真空要求都达到和好于设计指标,为同步辐射高压衍射实验站提供较高能量的光源.

4W2 扭摆磁铁的磁路设计原理上同 1W1 一样,采用混合型的结构,磁极选用高性能的铁钴钒(Fe-CoV)材料,钕铁硼材料选用 38SH,4W2 扭摆磁铁总用量约 280kg. 对每个磁极和磁块表面都经 TiN 镀层处理,然后进行真空放气试验.

4W2 磁铁设计有 11 个磁周期,周期长度 148mm. 磁铁间隙 12—120mm 范围可变. 设计最小磁间隙时,中心峰值磁场 1.8T,实际测得磁场 2.0T. 关于剩余积分场的补偿采用在磁铁外两端加校正磁铁来实现. 磁块组合的周期 1/4 结构如图 6 所示,图 7 给出了处于真空室内的磁铁照片,图 8,9 是计算的中心峰值磁场分布和实测结果,图 10 是实物照片.

## 6 结束语

综合两台永磁扭摆磁铁的设计和研制,主要设计参数汇总在表 1<sup>[9,10]</sup>. 图 11 是 BEPC 上扭摆磁铁和弯铁提供的同步辐射光谱特性比较,其同步辐射光谱性能得到了很大的提高.

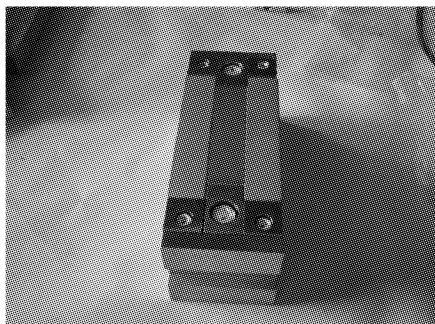


图 6 4W2 周期 1/4 磁极组合

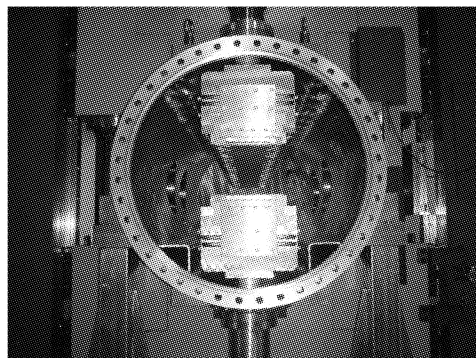


图 7 真空室内的 4W2 磁铁

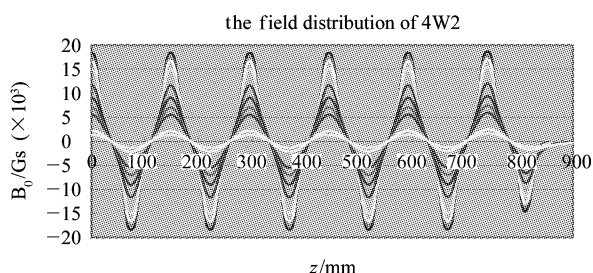


图 8 计算的中心峰值磁场分布(1/2)

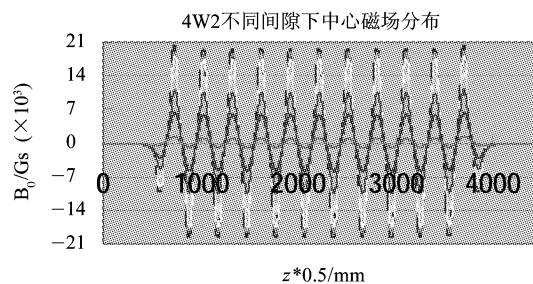


图 9 实际测量的 4W2 磁场分布

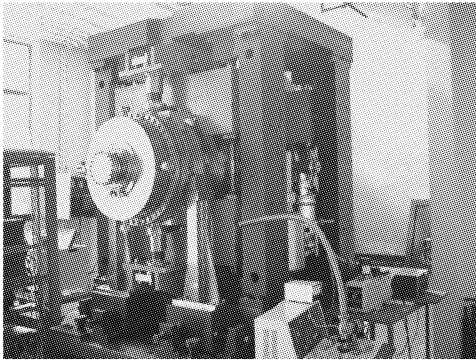


图 10 4W2 真空内扭摆磁铁

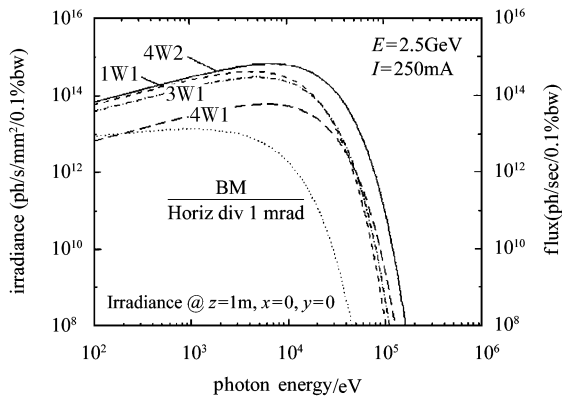


图 11 BEPC 上扭摆磁铁和弯铁提供的同步辐射光谱特性

表 1 1W1, 4W2 和 3W1 的主要参数

	1W1	4W2	3W1
直线节长度/m	~1.84	~2.275	~2.275
磁周期数	7	11	5
周期长度/cm	22.8	14.8	30
gap 变化范围/mm	35—200	12—120	39—220
工作磁场 $B_0$ /T	1.4	1.996	1.42
	(gap = 35 mm)	(gap = 12.1 mm)	(gap = 43 mm)
磁偏转系数/K	29.8	27	40
特征能量 $E_c$ /keV	5.82	8.14	5.9
NdFeB 性能	42H	38SH	33H
NdFeB 用量/kg	~420	~280	~650
磁极材料	DT4	FeCoV	FeCoV
磁铁支撑型式	C 型	H 型	H 型
辐射通量密度/ (Ph./s/mm)	$3.78 \times 10^{15}$	$7.25 \times 10^{15}$	$2.70 \times 10^{15}$
辐射总功率/kW	3.09	6.19	2.99

研制两台新的永磁 Wiggler 是同步辐射的改进项目之一, 该项目得到方守贤院士、冼鼎昌院士及加速器中心、同步辐射室领导的关心和支持, 同时也得到加速器中心物理组、机械组、真空组和同步辐射工程组及实验站的大力协助, 并与国内外有关专家进行有益的讨论, 在此, 表示衷心的感谢. 同时也非常感谢参与制造单位的大力合作.

## 参考文献 (References)

- LIU Mao-San et al. HEP & NP, 1984, **8**(1):59 (in Chinese)  
(刘茂三等. 高能物理与核物理, 1984, **8**(1):59)
- WANG Pei-Wei et al. HEP & NP, 1996, **20**(5):468 (in Chinese)  
(王培玮等. 高能物理与核物理, 1996, **20**(5):468)
- Chavanne J et al. 1999 Particle Accelerator Conference, New York
- Stefan P M et al. J. Synchrotron Rad., 1998, **5**:417—419
- Insertion Device Design Halbach K. Sixteen Lectures Presented from October 1988 to March 1989
- Hideo Kitamura. J. Synchrotron Rad., 1998, **5**:184—188
- Hara T et al. J. Synchrotron Rad., 1998, **5**: 403—405
- Mossbauer Photons Shigeru Yamamoto et al. Journal of Applied Physics (1993)
- SHI Cai-Tu et al. The Conceptual Design of the Permanent Insertion Device of BEPC, 2000, 10 (in Chinese)  
(石才土等. BEPC 上永磁插入件的概念设计, 第八届全国钨铁硼会议, 2000 年 10 月)
- SHI Cai-Tu et al. Design of an In-vacuum Multipole Wiggler for the BSRF. Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, 2001

## Design and Construction of Multipoles Wiggler in BEPC

SHI Cai-Tu WANG Mo-Tuo JING Yu-Hui LI Da-Shi CHEN Ji PENG Quan-Ling

(Accelerator Center, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** The paper brief introduces the general situation of two new permanent multipoles wigglers are designed and constructed in Beijing Electron Positron Collider (BEPC) as a part for the BSRF upgrade project. The magnetic and mechanical design of two wigglers be described in this paper. Also given are the design parameters and the characteristics of the synchrotron radiation for the wigglers.

**Key words** permanent wiggler, collider, design parameter, synchrotron radiation