

# 第一台真空内扭摆磁铁的设计与研制

石才土<sup>1,1)</sup> 景毓辉<sup>1</sup> 李大仕<sup>1</sup> 陈绩<sup>1</sup> 王莫托<sup>1</sup> 彭全岭<sup>1</sup>  
潘惠宝<sup>2</sup> 盛树刚<sup>2</sup> 曹云<sup>2</sup>

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2 (上海交通大学 上海 200030)

**摘要** 主要介绍了北京正负电子对撞机上为提高同步辐射光源性能而设计建造的第一台真空内扭摆磁铁的概况,论述了真空内扭摆磁铁的设计要求和参数,以及研制过程中的关键技术和难度,并且给出了相应的磁场测量结果.

**关键词** 同步辐射 真空内扭摆磁铁 磁场测量

## 1 引言

随着同步辐射应用的日趋广泛,实验用户对光源的要求也越来越高.在北京正负电子对撞机(简称 BEPC)上已运行的一台 5 周期永磁扭摆磁铁,其同步辐射亮度比储存环弯转磁铁提高近一个数量级,大大提高了同步辐射实验范围和效率.考虑到多周期扭摆磁铁的优越性,根据同步辐射提出的改进计划,需要在 BEPC 储存环上增加两台新的永磁扭摆磁铁,作为同步辐射的引出光源,扩建新的光束线和实验站,真空内的扭摆磁铁是其中的一台.目的是为了提高同步辐射光的性能,拓宽使用光子能量范围,做更多的同步辐射应用实验.

真空内插入件(In-Vacuum Insertion Device)的研究是国际上当前和今后同步辐射光源装置中的发展趋势之一<sup>[1]</sup>.由于真空内插入件磁极间没有真空盒,所以当磁铁的气隙拉开时,对于同步辐射专用环,可满足加速器束流的注入,运行时可以使工作间隙变得很小,以提高插入件的工作场强和同步辐射光的性能.而对于 BEPC 这样的兼用机器,为了解决高能物理与同步辐射真空盒孔径相互矛盾的问题,设计新建一台真空室内永磁扭摆磁铁不但是同步辐射高压衍射实验站的需求,也是跟踪掌握国际上插

入件这一高新技术领域的需要.

根据储存环直线节和实验厅的布局,它安装在储存环第四象限(称之为 4W2),光束线引入 12 号实验大厅,如图 1 所示.

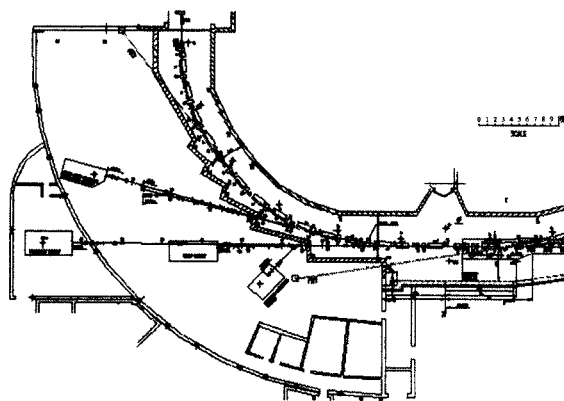


图 1 4W2 在环上的布局示意图

研制超高真空内扭摆磁铁在国内是一个全新的项目,在国外也属于新课题.因为国外普遍研制的是真空内的波荡磁铁(Undulator)<sup>[2-4]</sup>,它与扭摆磁铁(Wiggler)相比有很大的差别.原因是扭摆磁铁磁场高,磁周期长,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,因此在国际上尚没有研制真空内的扭摆磁铁.而对 4W2

真空内扭摆磁铁来说,建成后在兼用的第一代光源机器上运行,相对应的边界条件和环境更为复杂,因而带来像束流阻抗;磁周期结构和装配工艺;大块永磁体的表面镀层处理与放气实验;磁间隙变化范围的要求和连接波纹管的寿命;大容量超高真空室的焊接和密封,以及真空室内 RF-Finger 的设计和冷却;剩余积分磁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 真空内扭摆磁铁的研制在可行性研究的基础上 2001 年 9 月开始与上海交通大学合作,通过多家单位和企业联合进行技术攻关,于 2002 年 10 月建成,并顺利安装在 BEPC 储存环上运行,为同步辐射高温高压衍射实验提供高亮度的光源。

## 2 真空内扭摆磁铁的磁结构设计

根据加速器物理和同步辐射提出的要求,4W2 真空内扭摆磁铁的磁结构设计不但难度相当大,而且存在的风险也非常大。因为磁铁在超高真空条件下工作,在设计上面临 5 个关键技术问题:一是要解决束流阻抗;二是磁场要求高;三是横向好场范围宽;四是磁间隙变化大;五是超高真空内剩余积分磁场补偿困难。

考虑到上述的技术难度,周期磁结构为满足高磁场的要求,采用混合型结构<sup>[5-7]</sup>,由钕铁硼永磁块和 FeCoV 磁极组成,这是获得高场强的方法。由于横向好场区物理上要求  $\pm 50\text{mm}$ ,这必须要加宽磁块与磁极的尺寸。磁块的加宽,使得其磁块制造和充磁的均匀性带来问题。磁间隙的变化范围要求在 12—120mm,这在真空室外是较易实现的,而在超高真空室内因受客观条件的限制就很难,为了保证磁性能达到要求,设计的真空室很大。但当最小磁间隙时,计算磁吸力超过 14t,因而带来相应的支架结构和机械精度的高要求。

插入件设计的一个重要参数指标是剩余磁场积分值趋于零,对于常规的永磁插入件来说,最常用的方法是两端部加电磁线圈来进行积分场补偿。原因是设计简单,补偿范围大,非常容易达到补偿要求。而在超高真空内工作的扭摆磁铁,剩余磁场积分的补偿是一个技术难点之一。因为在超高真空室内应尽量减少放气元件和对外的连接件,若加入电磁线圈,会带来象放气,发热,连接线等许多问题。所以,4W2 的剩余磁场积分补偿采用独特的方式,通过综合优化物理设计,当大磁间隙时,无需补偿,在小间

隙时,扭摆磁铁外部两端波纹管上设计校正磁铁来解决剩余磁场积分补偿。

4W2 真空内扭摆磁铁的磁周期结构根据直线节的长度和磁场的要求综合考虑,经过多种方案的优化比较,最后设计为 11 个磁周期,磁周期长度 148mm,磁间隙变化范围在 12—120mm,计算相应的磁场变化为  $1.8-0.1\text{T}$ <sup>[8]</sup>。处于超高真空室内的磁块不能用环氧树脂粘结,只能采用整块磁体与机械固定的方法。选取的磁块尺寸为 25mm(厚度,磁化方向)  $\times$  140mm(宽)  $\times$  60mm(高),这是目前插入件中使用最大的永磁块,FeCoV 磁极尺寸为 24mm(厚度)  $\times$  110mm(宽)  $\times$  46mm(高)。

钕铁硼永磁块是由冶金粉末压制烧结而成,在超高真空室内,为了降低真空负载,减少放气率,对永磁块和磁极都需要进行表面镀层处理。根据日本研制 In-Vacuum Undulator 的经验<sup>[9]</sup>,TiN 镀层致密性好,利用离子溅射的方法进行 TiN 镀层。经 TiN 镀层后的永磁块都进行了真空抽气实验,保证放气率达到要求再进行充磁,筛选和组装。

图 2 为表面镀 TiN 的永磁块,图 3 准备真空抽气实验,图 4 给出了 4W2 永磁 Wiggler 半周期的磁块组合图,图 5 是计算的不同磁间隙下的中心峰值磁场分布,实际测量得到的磁场结果比设计值高,当最小间隙时,中心峰值磁场可达到 2.0T。

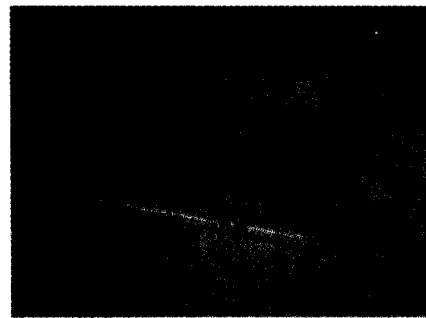


图 2 表面镀 TiN 的永磁块



图 3 准备真空抽气实验

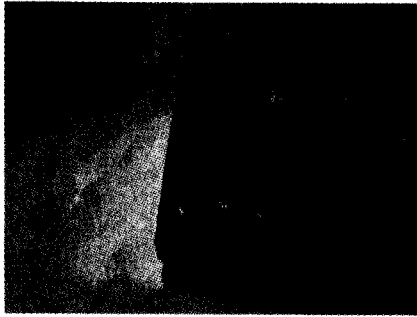


图4 4W2半周期磁块组合

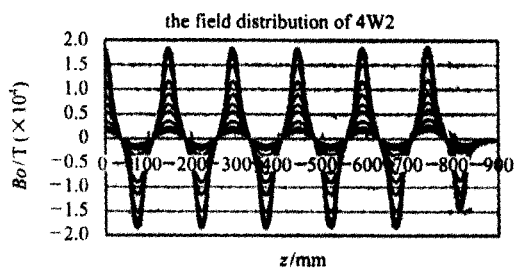


图5 计算不同磁间隙下的中心峰值磁场分布

### 3 真空系统与机械结构设计

真空内扭摆磁铁设计的另一个重要部分是它的真空系统与机架结构。它有一个相当大的真空室,包含如下的子系统:

1) 周期磁结构,工字梁及其传动系统;2) 内真空盒及传动系统;3) 真空泵系统(包括离子泵和NEG707泵及TSP泵);4) 水冷却系统;5) 电流馈入装置及热测量输出端子等。

4W2真空内Wiggler的真空室为圆形,直径 $\phi 600\text{mm}$ ,壁厚6mm,分为三段,磁铁位于中间段,两端各有一段长200mm的真空室,便于高频过渡通道的安装及与相邻部件的连接。大法兰采用铜丝密封,其他法兰采用CF标准法兰。真空室焊接后,经过时效处理,去除应力,最后精加工两端大法兰,以保证有好的同心度。真空室经过预抽试验,350℃烘烤除气,最后检测以保证其表面出气率优于设计求值。采用2台抽速为400l/s离子泵,加上两台NEG泵,每个NEG泵装两组NEG单元WP1250/2,每组对 $\text{H}_2$ 抽速为770l/s,两组为1540l/s,加上串联的400l/s离子泵,通过泵口法兰后有效抽速对 $\text{H}_2$ 为1600l/s,两台为3200l/s。加上1台TSP泵,采用 $\phi 200$

的法兰,升华泵芯用Varian灯丝式蒸发器,泵内抽速12000l/s,泵口有效抽速对 $\text{H}_2$ 为1000—4000l/s,则系统总抽速大于4000l/s,足够满足静态真空的要求。图6是真空室与真空系统。

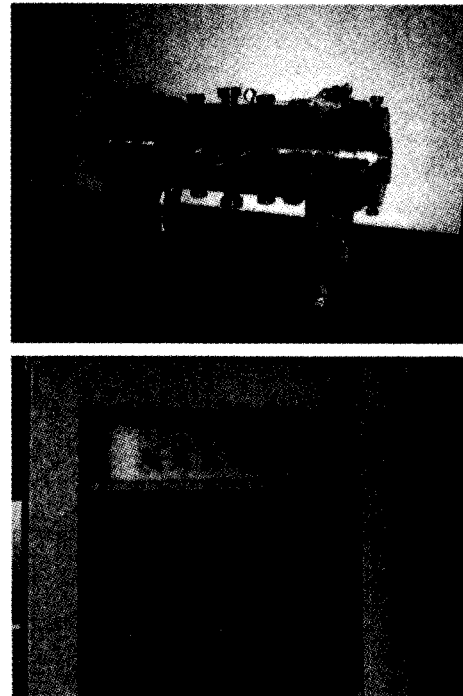


图6 4W2的真空室与真空系统

4W2真空内扭摆磁铁的大机架采用H型结构,如图7,它起着支撑磁结构和开合磁间隙的作用。由顶盖、底座、4件立柱组成一刚性框架,立柱上装有导轨,滚珠丝杠推动滑动托架移动。每根滚珠丝杠上有旋向相反的螺纹,当四根丝杠同步转动时,使外梁作开合运动。每件滑动托架上设有微调机构,以调整螺母的起始点,开合运动的精度由光栅检测。由于支撑结构承受高达14t磁力的负载,开合机构的重复定位精度要求 $\leq 20\mu\text{m}$ ,因此,支撑结构的刚度和开合机构的精度,直接影响着磁极表面的形位误差要求。

为了保证机械精度,结构设计考虑如下措施:1) 真空室内磁块的工字梁的支承点由2个增加到3个,减少了支承点的距离(由1260mm减为720mm),大大增加了主梁的刚性,提高了磁极面平行度,有利于保证磁场的均匀性;2) 大机架上下滑动托板采用分离式,总装时组合成一体,这样可简化安装调整程序,便于真空室内移动部件和机架的联接。3) 全部部件都固定在一个大底盘上,装入隧道时采用整体移动,并可在X, Y, Z3个自由度作精细调整,以便

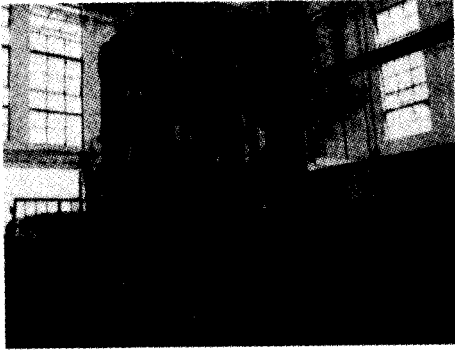


图 7 H 型结构大机架

真空室两端发兰进入规定位置和高度. 图 8 给出了磁铁大梁在不同间隙下的变形测量, 满足设计技术要求.

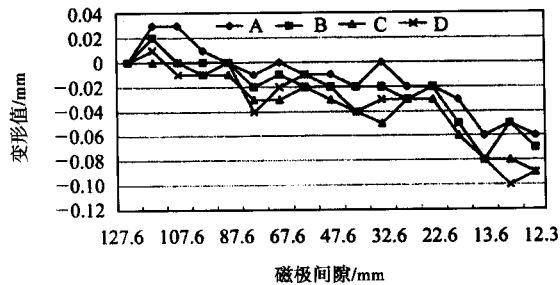


图 8 磁铁大梁在不同间隙下的变形

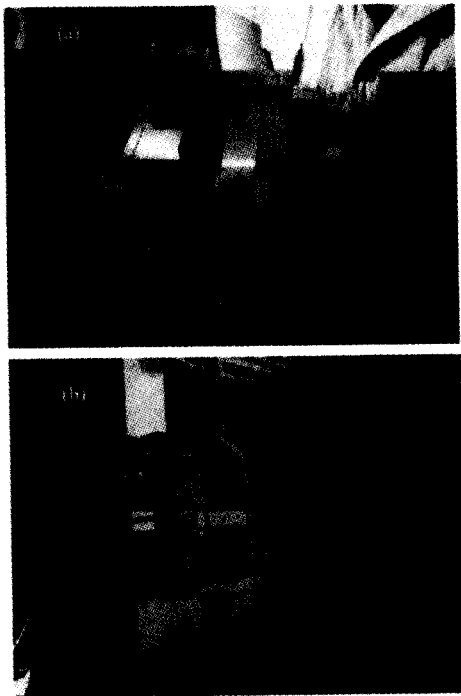


图 9 (a) 磁块组装; (b) 进行真空室内安装  
真空内扭摆磁铁的工装设计和装配工艺是研制

过程中的又一个关键技术和难点之一. 在磁铁半周期磁块组装和总体装配过程中, 为了保护永磁块与磁极表面的 TiN 镀层和人身安全, 设计制造了四套工装夹具. 通过实践证明, 这些工装设计合理, 操作安全可靠. 图 9(a) 是磁块组装工装, 图 9(b) 是进行真空室内安装.

## 4 磁场测量

4W2 真空内扭摆磁铁的磁场测量借用了上海原子核所的点测机装置及光学准直仪器, 并得到了原子核所磁铁组的大力合作. 该点测机的驱动采用日本进口交流伺服电机, 进口的精密滚珠丝杠和线性导轨作传动. 由一台工控计算机通过接口精确控制点测机的行程和数据采集, 使用高分辨率的角度编码器作计数脉冲, 位置分辨率可达 0.001mm, 因此定位精确.

测磁使用的霍尔探头是新西兰 Group3 公司生产的 MPT-141, 高斯计为 DTM-151, 测磁精度为 0.01%. 当采用 GPIB 接口时, 最大采样速率为 10 次/s. 有 4 个量程 0.3T, 0.6T, 1.2T 和 3.0T, 分辨率分别为 0.005mT, 0.01mT, 0.02mT 和 0.05mT.

扭摆磁铁安装在一个圆型真空室内, 因此用点测机进行测量时, 测量杆只能与点测机的长度方向平行即沿纵向运动. 测量前用精密框式水平仪先将点测机和扭摆磁铁调水平, 然后用经纬仪和电子水准仪反复多次将两者沿纵向上调直(平行). 由于磁铁的结构较特殊, 为了便于在真空室里测量磁铁, 测量杆进行了专门的设计, 选用碳纤维专门制做, 其外形像大写的英文字母 L, 总长度约为 2.5m.

4W2 磁场测量的数据量非常大, 允许测量的周期又短, 为了缩短测量时间, 数据采集只能是在运动中进行, 即磁场测量连续进行, 测量探头是一边行走一边取数. 经过多次试验, 测量探头移动速度为 2mm/s, 测量步长调整为 0.5mm/点. 考虑到磁铁端部边缘漏磁的影响, 测量的起始点远离磁铁边 255mm, 实际测量总长度为 2210mm.

探头定位的基准面是利用磁极的下极面和端部. 测量前先用经纬仪、电子水准仪和精密直尺确定霍尔探头相对磁极的机械位置, 然后将霍尔探头移动到测量起始点开始测量.

真空内扭摆磁铁装配完成后, 第一次磁场测量, 就得到了理想的结果. 中心峰值磁场当  $gap = 13.5\text{mm}$  已大于 1.8T, 达到和超过了设计要求. 剩余

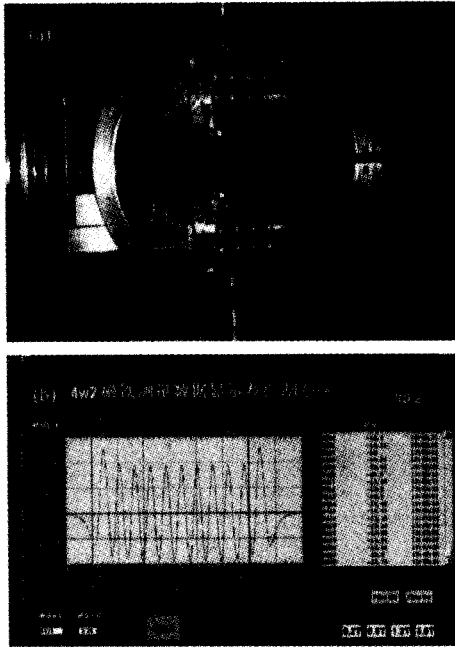


图 10 (a) 大间隙测量;(b) 大间隙的磁场分布

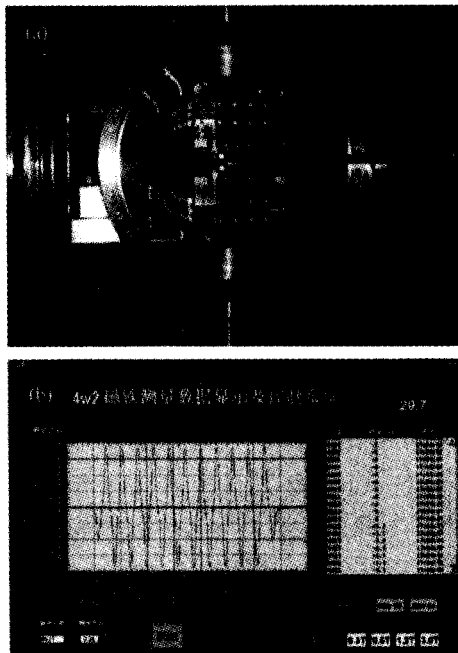


图 11 (a) 小间隙测量;(b) 小间隙的磁场分布

积分场在大磁间隙下小于  $0.001\text{T}\cdot\text{m}$ , 而最小磁间隙时小于  $0.005\text{T}\cdot\text{m}$ , 这与理论计算结果相符合。经过机械精度和磁铁端部与各个磁极的多次调整, 最后得到大磁间隙下, 剩余积分磁场已在  $0.0002\text{T}\cdot\text{m}$  左右, 横向  $\pm 50\text{mm}$  的好场区范围满足了不加校正电流的设计要求。当最小磁间隙时, 横向  $\pm 25\text{mm}$  的好场区范围剩余积分场已变成负值, 小于  $-0.002\text{T}\cdot\text{m}$ ,

可通过加校正磁铁补偿, 实际校正磁间隙的范围从  $12\text{--}40\text{mm}$  即可。图 10 和图 11 分别给出不同磁间隙时的测量, 图 12 是随间隙变化的中心磁场分布, 图 13 是剩余积分磁场随间隙的变化。

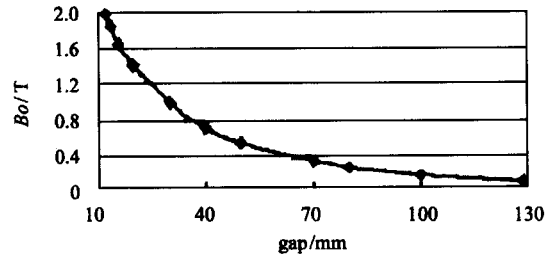


图 12 4W2 磁场随间隙变化的测量数据和曲线

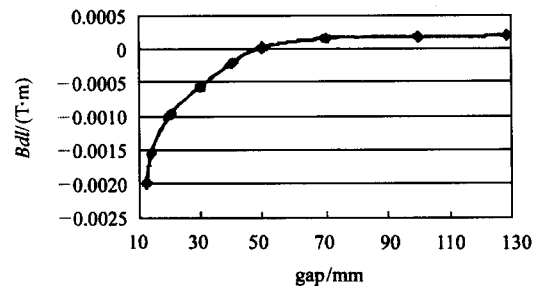


图 13 4W2 剩余积分场随间隙变化的数据和曲线

### 5 真空内扭摆磁铁的束流阻抗

BEPC 是做高能物理实验为主的兼用机器, 已进行改成双环(即 BEPC II)的二期工程, 如何减少和降低束流阻抗, 是加速器研究和改进的重要课题之一。在储存环上增加一台真空内扭摆磁铁, 由于真空室很大, 孔径与环上真空盒不一致, 会带来相应的束流阻抗。在 BEPC 单环运行时因其流强低, 阻抗不大明显, 而建成 BEPC II 双环后, 对撞流强将提高近 20 倍, 阻抗会很严重, 因此, 解决束流阻抗是关系到真空内扭摆磁铁能否继续运行的问题。

为了减少束流阻抗, 4W2 真空内扭摆磁铁原设计中考虑了一套内真空盒系统, 如图 14。利用这套系统, 通过控制连锁, 当加速器运行在对撞模式的大间隙 ( $gap = 120\text{mm}$ ) 时, 有一个和上下游真空盒截面相一致的内真空盒, 推入扭摆磁铁极面中间, 使得真空内扭摆磁铁的内真空盒与两端上下游真空盒相匹配, 其孔径是  $56\text{mm} \times 120\text{mm}$  的跑道型束流孔径。而同步辐射专用模式运行时, 推开内真空盒, 设计最小的磁间隙可压缩到  $12\text{mm}$ , 允许同步辐射专用模式在小间隙下工作。这绝对是独一无二的创新设计, 是

解决高能物理与同步辐射运行,其真空盒孔径矛盾的有效方法.

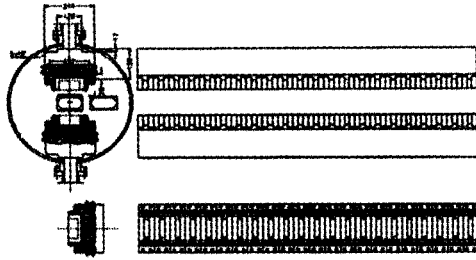


图 14 内真空盒结构图

磁极两端部是利用弹性薄金属片和真空盒法兰相连接,形成 Q 通道,叫作 RF Finger,使保持良好的电接触. 这套系统由于第一阶段制造周期紧张,设计难度较大,暂未能实现,已纳入 BEPC II 工程考虑.

图 15 为 4W2 设计平面图以及图 16(a)是目前状态的端部连接方式,当增加内真空盒时将进行适当改造,可保证真空内扭摆磁铁在 BEPC II 建成后运行.

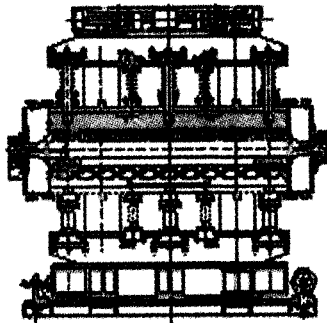


图 15 4W2 设计平面图

研制真空内的扭摆磁铁涉及到电磁场,精密机械,超高真空和自动控制等多学科,不但技术复杂,难度大,而且制造周期非常短. 在一年时间里,通过制造单位的大力合作,于 2002 年 10 月首次建成第

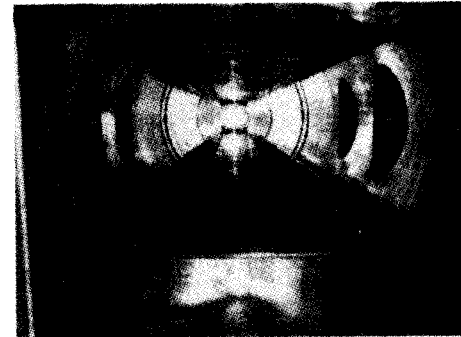
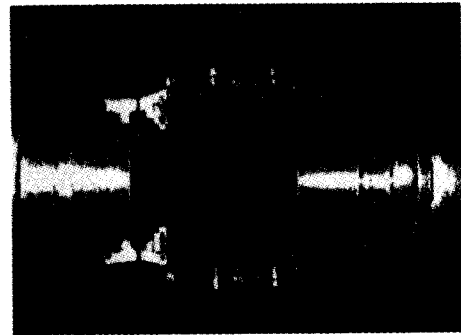


图 16 (a) 4W2 端部的 RF Finger 连接;  
(b) 磁周期表面铺设的 Cu 箔

一台真空内的扭摆磁铁. 这是一台目前磁场最高,磁间隙可调范围最大以及横向好场区最宽的真空内永磁扭摆磁铁. 经过专家小组测试和验收,磁场性能,机械精度和静态真空要求都好于和达到设计指标. 投入运行一年多来,工作情况良好.

在本项目的研制过程中得到了方守贤院士、冼鼎昌院士及高能所和加速器中心、同步辐射室领导的关心和支持,也得到有关课题组的大力协助,并与日本专家 H. Kitamura 博士和 S. Yamamoto 博士进行有益的讨论,表示衷心的感谢. 同时也非常感谢合作厂家及上海原子核所磁铁组阎和平研究员和赵玉彬先生等参与磁场测量工作.

## 参考文献 (References)

- 1 Walker R P, Diviacco B. Synchrotron Radiation News, 2000, 13(1)
- 2 Stefan P M et al. J. Synchrotron Rad., 1998, 5:417—419
- 3 Hideo Kitamura J. Synchrotron Rad., 1998, 5:184—188
- 4 Shigeru Yamamoto et al. Journal of Applied Physics, 1993
- 5 Halbach K. Sixteen Lectures Presented from October 1988 to March 1989
- 6 LIU Mao-San et al. HEP & NP, 1984, 8(1):59—68(in Chinese)  
(刘茂三等. 高能物理与核物理, 1984, 8(1):59—68)
- 7 WANG Pei-Wei et al. HEP & NP, 1996, 20(5):468—475(in Chinese)  
(王培玮等. 高能物理与核物理, 1996, 20(5):468—475)
- 8 SHI Cai-Tu et al. Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, China, 2001
- 9 Hara T et al. J. Synchrotron Rad., 1998, 5:403—405

## Design and Construction of the First In-Vacuum Wiggler

SHI Cai-Tu<sup>1,1)</sup> JING Yu-Hui<sup>1</sup> LI Da-Shi<sup>1</sup> CHEN Ji<sup>1</sup> WANG Mo-Tuo<sup>1</sup> PENG Quan-Ling<sup>1</sup>  
PAN Hui-Bao<sup>2</sup> SHENG Shu-Gang<sup>2</sup> CAO Yun<sup>2</sup>

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

2 (Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** The general features of the first in-vacuum wiggler designed and constructed in Beijing Electron Positron Collider (BEPC) as a part of the BSRF upgrade project are introduced. The measured magnetic field of the in-vacuum wiggler reaches 2.0 Tesla when operated at the gap of 12mm, which will provide high flux in the hard X-ray region and will be mainly used for the high temperature and high pressure diffraction experiments. The key technologies and difficulties for the magnetic and mechanical design of the in-vacuum wiggler are described. The main parameters and the requirements for the in-vacuum wiggler are given too. Also, the magnetic field measurement results are shown.

**Key words** synchrotron radiation, in-vacuum wiggler, magnetic field measurement