

BEPC II 工程磁铁设计与制造

石才土¹⁾ 倪淦林 孙献静 曹瓚 尹兆升 庞家标 陈宛 李藜
陈福三 彭全岭 尹宝贵 张卓 孙耀霖 王建力 张嘉菲

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 北京正负电子对撞机(BEPC)改造工程是将原来的单环升级为高亮度的双环对撞机(BEPC II), 即在现存的 BEPC 隧道里增加一个新的储存环. 使得 BEPC II 能够提供从 1.0GeV 到 2.1GeV 能量范围的高亮度对撞束流供高能物理实验用, 同时外环还要兼容 2.5GeV 能量 250mA 流强的同步辐射专用模式运行, 实际上相当于有 3 个储存环运行. 由于受到 BEPC 储存环隧道空间的局限, 物理上的高亮度要求, 以及 BEPC II 真空盒设计采用带前室(Antechamber)结构, 因此给各种磁铁设计与制造增加了相当大的难度. 着重介绍 BEPC II 储存环和对撞区中几种主要常规磁铁的设计、制造概况, 同时也给出了相应的磁场测量结果.

关键词 电子对撞机 储存环 常规磁铁 磁场测量

1 引言

北京正负电子对撞机(BEPC)于 2005 年 7 月停止运行, 开始升级改造. 将 BEPC 单环改成高亮度的双环对撞机(即 BEPC II). 在现存的隧道内增加一个新的储存环, 图 1 所示.

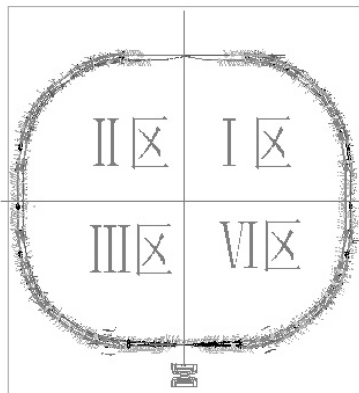


图 1 BEPC II 双环示意图

加速器物理给出的 Lattice 设计, BEPC II 双环对撞机储存环上需要各种不同类型的磁铁共计 387 台(包括对撞区磁铁 28 台), 除保留使用 BEPC 的 44 台弯转磁铁和 6 台大孔径插入四极磁铁以及 8 台校正磁铁外, 其余磁铁都要设计和研制. 而且为了励磁电源的统一和节省经费之目的, 有 32 台老环的四极磁铁保留

铁心, 进行线圈设计并替换.

BEPC II 工程的特点是各系统的工作同步进行. 随着物理上 Lattice 方案的不断优化以及总体布局的调整, 磁铁系统受到很大影响, 几乎所有磁铁的设计都几经反复.

弯转磁铁由初期的 C 型结构改成 H 型, 最后又回到 C 型. 而且为了节省空间长度, 四极磁铁磁长度由原来 400mm 缩短到 300mm, 梯度要求提高 30%. 六极磁铁与四极磁铁一样通过缩短磁长度提高强度, 并且由初始的带有垂直校正子方案改变为独立设计; 垂直校正磁铁单独设计后的磁场强度也比原先要求提高 50%.

总而言之, 总体方案的不断修改变化, 不但增加了大量反复的工作量, 而且带来磁铁设计和制造进度上的困难.

2 储存环磁铁设计与样机试制

BEPC II 储存环有 12 种磁铁需要设计制造, 2 种磁铁保留铁心, 进行线圈改造并更换, 磁铁设计任务相当繁重.

磁场计算使用 OPERA-2D/3D 和 Poisson 两种程序, 计算结果经比较基本一致.

磁铁设计完成之后, 各种磁铁都进行了样机试制. 样机经过仔细测量, 并组织专家小组评审合格后开始

批量生产. 储存环四极磁铁和六极磁铁因为孔径大, 磁铁短, 磁场好场区要求高, 分别试制了2台样机.

储存环二极磁铁, 四极磁铁和六极磁铁均采用叠片铁芯, 端板焊接工艺. 铁心采用冲制的超低碳硅钢片与DT4纯铁制成的实心端板一起叠装, 端板形状和冲片相同, 然后用结构钢制成的顶板和边板在其外围焊接成一体.

二极磁铁C型结构, 铁芯为整张冲片, 铁心的每个极头上套有两个主线圈和一个调补线圈.

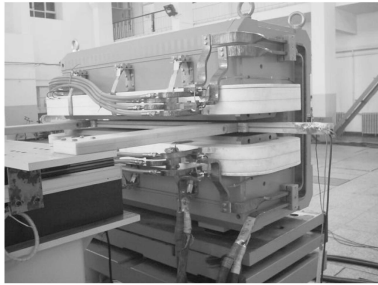


图2 二极磁铁样机测量

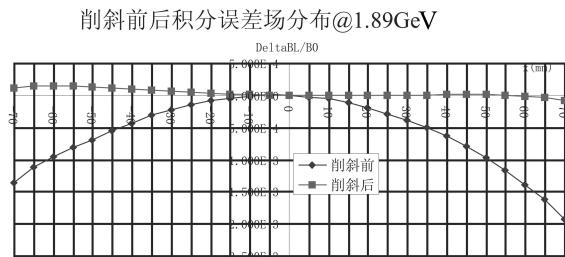


图3 二极磁铁样机削斜前后积分误差场

四极磁铁采用二合一冲片结构, 端板焊接工艺. 用 OPERA-2D 和 OPERA-3D 作了磁场计算, 设计铁长 256mm, 安匝数为 8118 时, 二维计算结果磁场梯度可满足 14.5T/m 的要求, 但由于采用 Antechamber 真空盒, 磁极和线圈尺寸受到限制, 磁铁产生饱和. 实际磁场梯度最高只能达到 13.13T/m, 与样机的磁测结果相一致. 因此有 8 台用于同步辐射专用模式的磁铁, 梯度达不到 14.5T/m 的要求, 采用加长 40mm 铁心长度, 修改线圈来解决. 而对撞模式四极磁铁梯度要求 12.6T/m, 饱和不算严重, 在线圈不做改变的前提下加长 10mm 铁心长度.

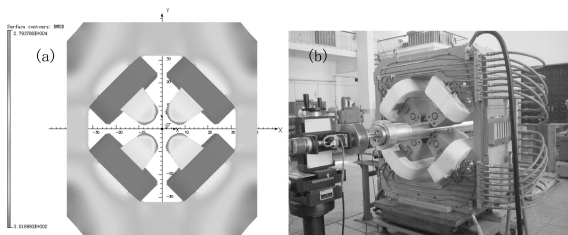


图4 BEPC II 四极磁铁

(a) 四极磁铁三位计算; (b) 四极磁铁谐波测量.

早期的六极磁铁设计是要求带有垂直校正子, 后来由于 Lattice 方案改变, 六极磁铁和校正磁铁分别独立设计. 六极磁铁采用三合一冲片铁心, 端板焊接工艺. 由于受到各种因素的制约, 尤其是 Antechamber 真空盒和外形尺寸的限制, 六极磁铁铁心短, 孔径大, 磁场高, 三维效应影响严重. 磁铁本身几乎没有优化设计的灵活性, 因此物理设计困难, 也给工厂制造带来麻烦. 原因磁扼比较单薄, 刚性差, 使得磁铁铁心组装时加不同的力会产生不同的变形, 对磁铁的高阶场质量有影响.



图5 六极磁铁进行谐波测量和点测量

垂直校正磁铁根据真空盒形状, 采用 C 形结构, 磁铁的尺寸受机械布局的严格限制, 中心到开口端部的尺寸不得超过 160mm, 两磁极之间不小于 70mm, 束流方向包括线圈尺寸不大于 162mm. 物理上要求沿束流方向的积分场强 0.009T·m, 且有较大范围的好场区. 在满足各种要求的前提下, 作了多种方案的优化设计, 进行了二维和三维的详细计算. 通过样机的测试试验, 很好的满足了设计要求.

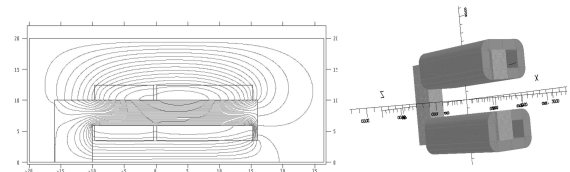


图6 垂直校正磁铁二维和三维计算

BEPC II 储存环 2, 4, 6 极和校正磁铁批量生产和磁场测量于 2005 年底全部完成. 2006 年 3 月开始储存环隧道安装, 2006 年 11 月 12 日 BEPC II 开机, 开始调束运行.

3 对撞区磁铁设计和研制

BEPC II 对撞区磁铁数量少, 种类多. 不但设计制造难度大, 而且磁场测量的工作量非常大. 对撞区需要设计、制造和测量的磁铁共 8 种 28 台.

BEPC II 中应用超导技术是提高高亮度的重大举措. 超导磁铁国内缺少经验, 由美国 BNL 实验室研制.

超导磁铁设计有 (SCQ, SCB, AS1, AS2, AS3, VDC 和 SKQ) 7 种磁铁组成, 是国际上结构最复杂的超导磁铁. 利用 Salamander, 张力线和谐波线圈三套装置完成了超导磁铁离线和在线联合测量.

ISPB 是直流切割二极磁铁, 由于该磁铁位置空间十分紧张, 而所要求的物理性能指标很高, 在技术上具有很大的挑战性. 磁铁设计制造完成后, 用 Hall 探头点测方法完成了 ISPB 的测量工作, 磁场性能通过垫补, 满足了加速器物理的要求.

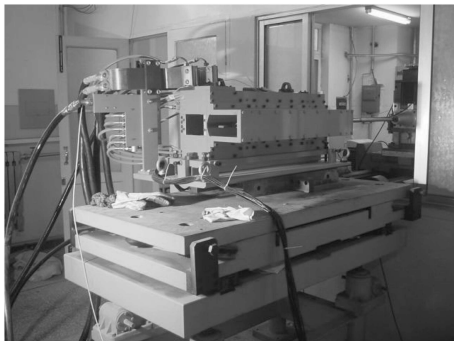


图 7 ISPB 进行磁场测量

对撞区双孔径四极磁铁的设计和研制对磁铁本身有极大的难度和挑战性. 磁铁要求的好场区范围宽而孔径间隔小、磁场梯度高使得线圈的电流密度极高, 以及相当严格的磁场质量要求等.

为了减轻设计难度, 经过反复地优化组合, 设计采用了将 Q1 整台磁铁 (0.6m 长) 分解成两台, 分别为 Q1a (0.2m) 和 Q1b (0.4m), 使得每台分解后的磁铁减小了对好场区宽度和电流密度的压力, 大大降低了磁铁的难度.

但是 Q1a 的设计难度仍然很大, 它的许多设计参数用到了极限. 主要技术难点有:

线圈空间窄小, 设计的电流密度高达 $52.2\text{A}/\text{mm}^2$, 为正常值的 10 倍. 由此引起的线圈水冷和过热保护困难.

水冷设计采用多水路 (共计 28 个水路) 以保证冷却所需的水流量和采用低水压差 ($2\text{kg}/\text{cm}^2$) 以限制水流速. 即便这样, 水流速仍然非常大, 达到 $4.54\text{m}/\text{s}$, 超过了正常设计的上限.

线圈过热保护难度大, 在断水情况下要求在 0.5s 内切断电源. 因此采用 (水流继电器、温控开关和水路电压快速巡检) 三重保护, 确保线圈安全.

磁铁“短”, 孔径与长度之比只有 58%, 磁铁端部效应严重, 引起较大的 12 和 20 极磁场.

不对称铁心结构. 每个四极部分结构都是不对称的, 必然引起较大的非系统高阶磁场. 导体位置精度要求高 ($\pm 0.5\text{mm}$). 线圈靠近好场区, 载流导体磁场直接影响孔径边缘的磁场分布.

磁铁结构非常复杂, 制造精度要求高, 加工难度大. Q1a 采用二合一实心结构, 极面设计采用无极头加极面边缘凸起垫补技术. 在空间狭小限制下最大限度地扩展了好场区范围, 这种极面结构使磁铁端部效应最小.

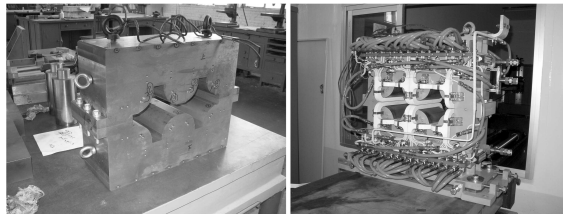


图 8 Q1a 双孔径四极磁铁

Q1a 测量得到的高阶磁场含量在 $B_n/B_2@R53.45\text{mm}(14\sigma+2)$ 范围均小于 3.64×10^{-4} .

不同场平下, 高阶磁场含量变化很小.

两个孔径之间高阶磁场的一致性好于 1×10^{-4} 非常好的满足了给定 $B_n/B_2 \leq 5 \times 10^{-4}$ 的设计要求.

Q1b 的设计与 Q1a 相比, 它的难度有所减轻, 但仍然存在技术难度. Q1b 设计的电流密度高达 $29\text{A}/\text{mm}^2$, 为正常值的 7 倍. Q1b 的设计思路和实验研究方法基本上与 Q1a 相同, Q1b 铁心采用二合一的叠片结构.

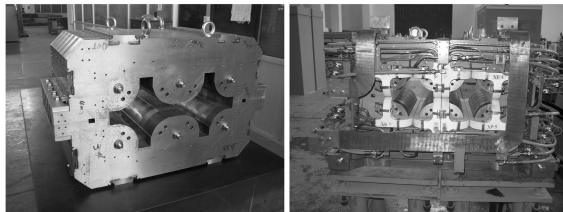


图 9 Q1b 双孔径四极磁铁

Q1b 测量得到的高阶磁场含量 $B_n/B_2@R61.21\text{mm}(14\sigma+2)$ 范围, 不同场平下均小于 3.19×10^{-4} , 高场下小于 2.7×10^{-4} . 两个孔径之间高阶磁场的一致性好于 1.5×10^{-4} 相当好地满足了给定的设计要求.

4 总结

BEPC II 改造工程是将 BEPC 的单环升级为高亮度的双环对撞机, 受边界条件的限制和物理上高亮度的要求, 给磁铁设计和制造带来难度.

储存环磁铁按计划完成制造和磁场测量, 磁铁质量满足物理要求. 保证了 BEPC II 顺利开机运行.

对撞区磁铁的设计和制造具有挑战性, 许多设计参数几乎用到了极限. 经过精心设计、精心制造和精心测量与实验研究, 攻克了一系列技术难点, 成功研制了世界上第一台常规双孔径四极磁铁 Q1a 和 Q1b. 解决了在极高电流密度下线圈水冷和过热保护问题. 磁场性能很好地满足了使用要求. 通过 BEPC II 的调束运行, 表明了磁铁的安全性和可靠性.

衷心感谢 BEPC II 工程磁铁制造中得到了高能所工厂, 上海应用物理所工厂和上海克林公司等单位的合作. 也非常感谢加速器中心物理、机械、电源、控制、真空和低温各相关系统的协助和支持.

参考文献(References)

- 1 The Primary Design of the Upgrade Project for Beijing Electron Position Collider BEPC II, 2003 (in Chinese)
(北京正负电子对撞机重大改造工程 BEPC II 初步设计, 2003)
- 2 Jack Tanabe. Iron Dominated Electromagnets Design, Fabrication, Assembly and Measurement, January 2005
- 3 YIN Z S et al. NIM in Physics Research A, 2007, **573**: 323—328

Design and Fabrication of the Magnets for BEPC II Project

SHI Cai-Tu¹⁾ NI Gan-Lin SUN Xian-Jing CAO Zan YIN Zhao-Sheng PANG Jia-Biao
CHEN Wan LI Li CHEN Fu-San PENG Quan-Ling YIN Bao-Gui
ZHANG Zhuo SUN Yao-Lin WANG Jian-Li ZHANG Jia-Fei

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

Abstract The BEPC II is the upgrade project of the Beijing Electron Positron Collider (BEPC). According to the BEPC II double ring design scheme, a new ring will be added in the existing BEPC tunnel. The machine will provide electron and positron beams with an energy range from 1.0GeV to 2.1GeV for high energy physics research, and an electron beam of 2.5GeV, 250mA for synchrotron radiation. So actually there are three storage rings for the BEPC II machine. Due to the limited space of the existing BEPC tunnel and the requirement of high luminosity, the antechamber type vacuum chamber is used, that makes the BEPC II magnets' design and fabrication very difficult. In the paper the general features of the design and fabrication of several kinds of main magnets for the BEPC II storage ring and its interaction region are introduced. And the magnetic field measurement results are presented.

Key words electron positron collider, storage ring, conventional magnet, magnetic field measurement