

# 中国散裂中子源磁铁系统和样机研制

邓昌东<sup>1)</sup> 陈福三 孙献静 陈宛 孙耀霖 石才土

(中国科学院高能物理研究所加速器中心 北京 100049)

**摘要** 中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)快循环同步加速器(Rapid Cycling Synchrotron, RCS)磁铁由24块二极磁铁、48块四极磁铁、16块六极磁铁和若干斜四极磁铁以及校正磁铁组成,其中二极磁铁和四极磁铁是带直流偏置的25Hz正弦交流励磁,铁芯和线圈导体将产生不可忽视的涡流效应.为了积累批量生产磁铁的制造经验,探索磁铁后期处理和磁场测量方法,已完成了中空水冷铝绞线试样线圈的研制,启动了二极磁铁和四极磁铁样机的研制.本文将对相关进展进行介绍.

**关键词** 中国散裂中子源 二极磁铁样机 四极磁铁样机 试样线圈

## 1 简介

中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)采用较低能量的直线加速器(LINAC)加较高能量的快循环质子同步加速器(Rapid Cycling Synchrotron, RCS)设计方案.图1给出了CSNS总体的布局结构.根据布局图1可以看出,CSNS磁铁系统分为三大主要的部分:直线段、两段输运线以及RCS环.

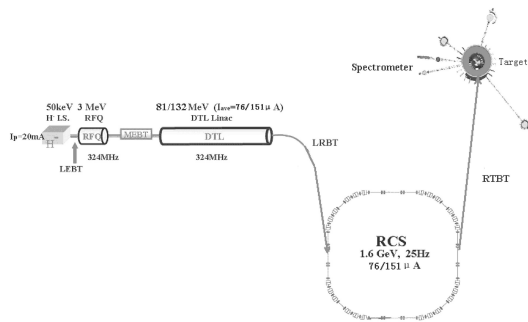


图1 CSNS总体结构

CSNS直线加速器由 $H^-$ 离子源、低能束流传输段(LEBT)、RFQ加速器、中能束流传输段(MEFT)、DTL加速器等组成.在DTL加速腔中,大约有200块孔径为15mm的小四极磁铁透镜,其线圈采用整体切削加工铜导体线圈的工艺制造,以0.5mm的硅钢片叠压成铁芯,工作在脉冲模式为25Hz,30%的工作比.在完成其加工的过程中,需要反复的进行磁场测量,特别是对磁中心的测量精度要求高.

CSNS输运线分为两段:LRBT传输从直线加速

器引出的束流到RCS加速器和废束站,共计6台二极磁铁,44台四极磁铁;RTBT传输从RCS加速器引出的束流到靶站和废束站,共计4台二极磁铁,30台四极磁铁.输运线的磁铁大多为直流励磁,采用常规的设计技术即可满足要求,只是在靶站附近的磁铁需要考虑更高的辐射防护要求.

CSNS的RCS环由四个弧区和四个直线段组成,全环超周期数为4,总体布局为四折对称的拓扑结构,周长230.8m. RCS环磁铁由24块二极磁铁、3组共48块四极磁铁、16块六极磁铁和若干斜四极磁铁以及校正磁铁组成. RCS环的磁铁具有孔径大、工艺要求复杂等特点,需要在前期预研和样机的建造中进行充分的研究.

## 2 CSNS/RCS环与样机研制

根据CSNS/RCS环的工作特点和物理要求,二极磁铁的磁场强度和四极磁铁的磁场梯度应按(1)式进行变化:

$$B_{full} = B_{dc} + B_{ac} \sin \omega t, \quad (1)$$

其中平均磁场水平即 $B_{dc}$ 由直流电源励磁,而正弦变化的部分由25Hz的交流电源励磁.

由于是带直流偏置的正弦交流励磁,铁芯和线圈导体将产生不可忽视的涡流效应,如果不采取特殊的线圈结构,涡流损耗导致的发热将使磁铁不能正常运行,根据国际上的经验<sup>[1]</sup>和技术发展,采用中空水冷铝

绞线线圈是最有效的方法. 为积累批量磁铁的生产经验, 探索生产工艺, 首先进行了中空水冷铝绞线试样线圈的研制, 然后启动了二极磁铁样机和四极磁铁样机的研制.

### 3 试样线圈的研制

中空水冷铝绞线线圈目前国际上只有日本的JAEA联合日立等多家公司, 研制成功了这种铝绞线及线圈, 并应用在建造中的J-PARC装置上<sup>[2]</sup>. CSNS加速器工程指挥部决定于2005年8月联合国内三家研发单位, 研制铝绞线二极磁铁试验线圈, 为CSNS主环磁铁的研制积累和探索经验.

在突破了种种技术难关后, 完成了试样线圈的成功研制. 经过厂家各自的初步检测以及在高能物理研究所的复测, 3个合作单位研制的试样线圈都基本满足设计要求. 图2是合肥等离子体所试制的线圈和导线剖面图, 其性能质量与J-PARC同类线圈接近.

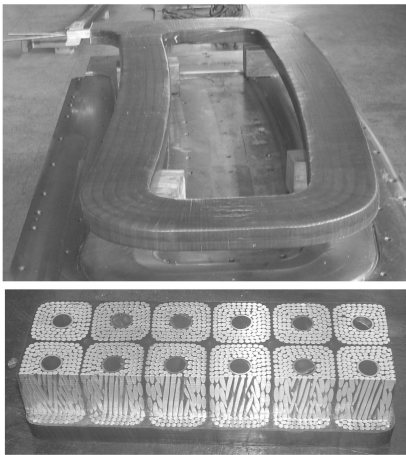


图2 CSNS试样线圈

在成功试制铝绞线线圈的基础上, 根据提出的物理要求, 进行了样机的设计和研制.

## 4 磁铁样机的设计

### 4.1 二极磁铁的特点和设计

二极磁铁具有如下一些特点: a) 由带直流偏置的25 Hz正弦交流激磁; b) 磁铁的磁通较大; c) 要求磁铁在高场下依然能保持较低的饱和度, 在整个磁场变化过程中电感量的变化较小, 使得在二极磁铁和四极磁铁之间的磁场跟踪比较容易.

针对磁铁以上的特点和工作时的特殊要求, 考虑了如下一些基本设计原则: 1) 磁铁总体采用H型; 2) 极面和铁轭的设计要留给足够裕量; 3) 采用0.5mm厚的无取向硅钢片粘结工艺叠装铁芯. 导线采用多股铝线绕制; 4) 磁铁端部进行开缝(梳状端板), 以减少端部

的涡流损耗和局部发热; 5) 铁芯端部采用阶梯形近似等B曲线, 以减小垂直于端部铁芯的漏磁场分量引起的发热; 6) 抗辐照的线圈和铁芯绝缘; 7) 尽量降低噪声和震动.

在物理设计的过程中, 为了了解磁铁非线性变化的情况, 计算了励磁电流从300A到2000A之间, 磁铁对应的电感变化情况. 最大值与最小值之间的绝对值差异小于1mH, 相对偏差小于1%, 平均值为54.5mH.

样机总体采用上下二合一结构. 同时为了方便进行端部的加工和涡流效应的研究, 样机在研制过程中, 要求能拆卸端部的组件. 总的机械图见图3.

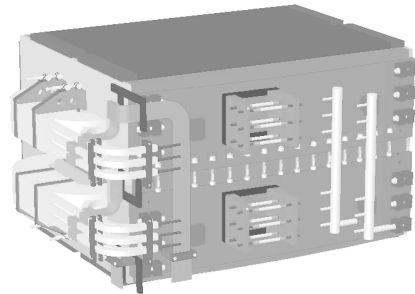


图3 二极磁铁样机总图

### 4.2 四极磁铁的特点和设计

考虑到四极磁铁是交流励磁和大孔径的主要特点, 磁铁在设计过程中着重在以下方面进行了优化: 1) 采用硅钢片作为铁芯材料, 加工工艺与二极磁铁样机相同; 2) 加大极头的夹角, 避免极身磁场饱和; 3) 压缩磁铁整体尺寸, 尽量减小磁铁储能, 从而减小电感; 4) 线圈尽量靠近极头根部, 以便减小线圈内涡流损耗; 5) 极面边缘垫补轮廓尽量避免比较突出的棱角, 避免磁场局部饱和; 6) 线规选择综合考虑涡流损耗、电流密度和电感大小.

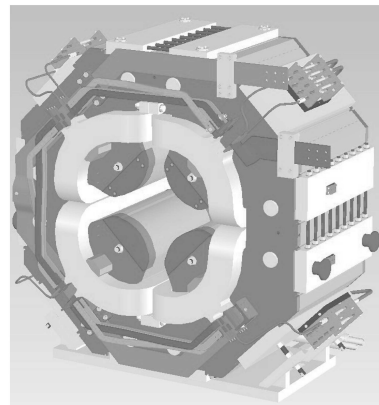


图4 四极磁铁样机总图

样机选择了无氧铜的中空铜导线作为磁铁的线圈导体, 每个磁极上有4个线圈一起叠绕, 引线端头形成四进四出结构, 最后进行真空环氧浇铸固化为一个线包.

样机总体为四分之一对称结构, 主要的部件有铁芯、线圈、水冷系统和底座等, 见图 4 所示.

## 5 总结

中国散裂中子源 RCS 环的磁铁, 特别是二极磁铁和四极磁铁, 由于是交流励磁, 交变磁场的测量、磁铁的绝缘处理等都是新的挑战. 样机的研制及其磁测系统的研发, 都需要充分的调研、广泛的合作, 不断的深入研究.

在样机生产之后, 还有许多的问题需要结合样机进行仔细的研究. 比如: 1) 磁铁端部或极头的涡流效应影响, 即如何降低磁场局部饱和以及涡流引起的局部过热; 2) 水冷系统的结构和流速的合理选择, 控制线圈的温升在一个合适的范围; 3) 磁铁的绝缘性能研

究; 4) 磁铁的机械震动大小及其影响的研究; 5) 二极磁铁与四极磁铁的联合测量和同步性研究; 等等. 另外, 其他磁铁的设计和研制生产也将很快启动.

感谢与 CSNS 工程项目里的许多专家的多次讨论, 特别是与物理组、电源组和机械组的讨论, 对完善磁铁的设计, 所起的作用是无可替代的.

与许多外国专家的讨论, 在检验设计的合理性、优化设计方案方面获益良多. 特别要感谢的有 J-PARC 的专家 Norio Tani, KEK 的专家 Izumi Sakai, BNL 专家 Joseph Tuozzole, 以及 Y.Y. Lee, Y. Irie, A. Jain 等.

感谢高能物理研究所加速器中心磁铁组的同事的大力协作, 众多新问题的研究和解决, 是与这个团队的努力工作分不开的.

## 参考文献(References)

- 1 Tani N et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(2): 421—424
- 2 Tani N et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(2): 409—412

# CSNS Magnet System and Prototypes Fabrication

DENG Chang-Dong<sup>1)</sup> CHEN Fu-San SUN Xian-Jing CHEN Wan SUN Yao-Lin SHI Cai-Tu  
(Accelerator Center, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

**Abstract** The 1.6GeV synchrotron of China Spallation Neutron Source (CSNS) project is a Rapid Cycling Synchrotron (RCS), which accelerates a high-intensity proton beam from 80MeV to 1.6GeV at a repetition rate of 25Hz. The RCS magnet system consists of 24 dipole magnets (main dipoles), 48 quadrupole magnets (main quadrupoles), 16 sextupole magnets, some tune shift quadrupoles and corrector magnets. All the magnets are of large aperture for a high beam power of 0.1MW, one design issue is the fringe field at pole end. And the main dipoles and main quadrupoles work at 25Hz repetition rate, the eddy current is an additional issue. In this paper the magnet design of the two kinds of main magnets will be described.

**Key words** CSNS, dipole prototype, quadrupole prototype, sample coil