

ADS 注入器 I 超导短磁铁研制及测试

彭全岭¹ 赖 嵘¹ 杨向臣¹ 徐风雨²

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (哈尔滨工业大学 哈尔滨 150006)

摘要 加速器驱动次临界系统(Accelerator Driven Sub-critical System, ADS)注入器 I 超导磁铁经过 2012 年模型磁铁(300 mm 长磁铁)阶段后,因加速器物理设计需要,磁铁机械长度缩短到 170 mm,截至到 2014 年共经过了三种结构类型的超导磁铁的研制。2014 年 7 月在哈尔滨工业大学进行短磁铁的低温垂直测试,磁铁的各项性能指标都满足了设计要求,同时也验证了失超探测和磁场测量设备的可靠性。本文主要介绍 170 mm 长短磁铁的物理及结构、电流引线、失超保护以及超导磁铁裸磁铁的低温垂直测试情况。目前有两块超导短磁铁,两个超导腔已装入到测试恒温器中,并实现了 2.1 K 下的低温运行,超导磁铁的运行平稳,电流引线常温端也无结霜现象。

关键词 螺线管,失超探测,垂直测试,持续电流效应

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.090202

加速器驱动次临界系统(Accelerator Driven Sub-critical System, ADS)是利用加速器所产生的高能质子轰击重靶核产生中子,并用其作为中子源来驱动次临界包层系统,使次临界包层系统维持链式反应,以便得到能量并利用多余的中子来嬗变核废物^[1]。图 1 为 ADS 注入器 I 的加速器结构,连续的质子束经过离子源、低能传输段(Low energy beam transport, LEBT)、射频加速和聚焦段(Radio frequency quadrupole, RFQ)、中能传输段 1 (Medium energy beam transport, MEBT),质子束到达第一节低温恒温器前端的能量为 3.2 MeV。质子束在第一节和第二节低温恒温器中,经过超导 Spoke 腔的加速,能量可以达到 10 MeV。经过偏转磁铁和中能传输段 MEBT2 后,质子束注入到主加速器中,再经过几节低温恒温器可进一步加速到 25 MeV、50 MeV 等不同的能量,并分别注入到不同的反应堆中来实现核废料的嬗变或增值。

图 1 中两节低温恒温器中加速器元件的布局,超导 Spoke 腔、束流位置探测器(Beam Position Monitor, BPM)和超导磁铁在低温恒温器中交替安装,每个 lattice 周期长度仅为 674 mm,分配给每块超导磁铁的机械长度仅为 170 mm,给磁铁的设计制造和安装带来很大困难。ADS 超导磁铁实际为一个磁铁包,包括一个超导螺线管、一个超导水平校正子和一个超导垂直校正子。螺线管的作用是对质

子束流进行聚焦,两个校正子的作用是对束流的轨道进行校正。

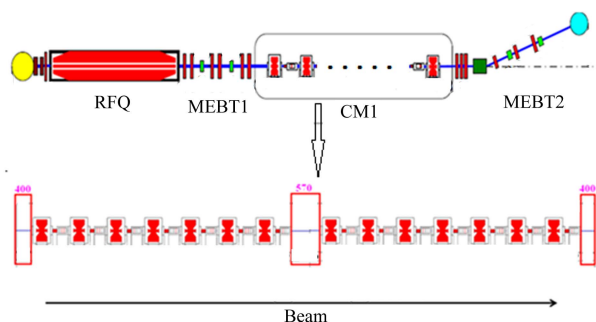


图 1 ADS 注入器 I 加速器结构
(放大部分为两节低温恒温器)

Fig.1 Schematic layout of ADS injection I (enlarged part: two cryomodules for the accelerator components).

1 短磁铁物理设计

注入器 I 中的超导短磁铁沿用了长磁铁的设计思想^[2],主要是在实现其积分场强的情况下,尽可能地减小其对上下游超导 Spoke 腔处的漏场,同时要尽可能降低磁铁运行峰值场强,减小磁铁的能量,确保超导磁铁的安全运行。为实现在 170 mm 长度下超导磁铁的物理及结构设计,需要省去原来长超导磁铁两端的刀口法兰,把磁铁前后两个端面变成实际的连接法兰。

中国科学院战略发展先导专项未来先进核裂变能(No.XDA03021101)资助

第一作者:彭全岭,男,1967 年出生,1998 年于中国科学院高能物理研究所获博士学位,研究员

收稿日期:2015-03-02,修回日期:2015-04-10

降低超导磁铁漏场主要是先通过主螺线管实现高于所需要的积分场强；再在主螺线管前后两侧分别加一个反螺线管以抵消主螺线管的尾场；最后在超导磁铁线圈的外侧用铁轭收拢磁场，用来更进一步地减小漏场。利用 Opera-2D 和 3D 程序^[3]对螺线管磁铁的物理设计进行了模拟，计算结果表明，在离磁铁中心上线游 270 mm 处的 Spoke 腔处的漏场均小于 1 G，能够满足设计要求。图 2、3 为超导螺线管物理设计计算结果，在 210 A 的设计电流下，前后端面的铁轭并没有出现饱和现象，纵向磁场 B_z 的一次积分为 $3.11 \times 10^6 \text{ G} \cdot \text{mm}$ ，二次积分为 $1.06 \times 10^{11} \text{ G}^2 \cdot \text{mm}$ ，均满足加速器物理设计要求。两侧的反螺线管受到的向外排斥力为 44 kN，给磁铁安全运行带来隐患。需要在磁铁组装的过程中，对磁铁线圈提供足够的预压紧力。螺线管所用超导线规格为 $1.32 \text{ mm} \times 0.86 \text{ mm}$ 、Cu:SC=4:1，两个二极校正子在螺线管线圈的孔径内，采用直径为 0.35 mm、铜超比为 0.67:1 的超导线。每个校正子线圈有一对线圈组成，线圈为马鞍型结构，只有一层，最大运行电流为 15 A，积分场强为 $16\,000 \text{ G} \cdot \text{mm}$ 。

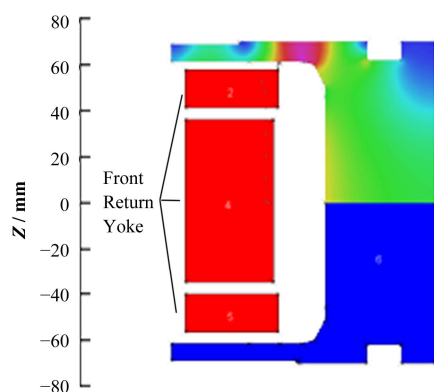


图 2 超导螺线管的物理设计
Fig.2 Physical design of the superconducting solenoids.

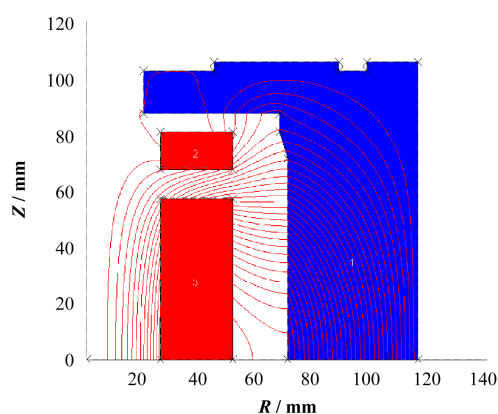


图 3 半长度螺线管磁场的磁力线分布图
Fig.3 Flux distribution of magnetic lines for the half solenoid.

2 短磁铁的结构设计

图 4 为超导磁铁本体的结构设计，束流真空盒也是实际磁铁液氮容器的内筒，同时也是超导磁铁线圈的支撑内筒。磁铁制造过程中，需要将平绕的校正子线圈扣在支撑筒上，以形成马鞍型的线圈结构，包绝缘后再绕制主螺线管和反螺线管。绕制螺线管线圈时，采用了 4 个活动的 G10 挡板来实现螺线管线圈之间和螺线管线圈与铁轭之间的隔离，最左侧的 G10 挡板还作为校正子超导接头连接骨架。为保证超导磁铁与其上下游 BPM 及超导 Spoke 腔的连接，需要在磁铁的前后端面的压紧法兰上预留连接螺钉孔，采用铝镁合金密封垫圈来实现束流真空盒的密封。图 4 中的压紧法兰的另外一个作用是在线圈与铁轭组装时提供预压紧力，以防止螺线管线圈在运行时因较大的排斥力而出现的失超。反螺线管线圈前后两个端面处的铁轭厚度仅为 7 mm，并且在 BPM 一侧，为适应连接大法兰需要，还挖出了一个直径 160 mm、深 1 mm 的圆形凹槽（图 2 的下端面铁轭）。

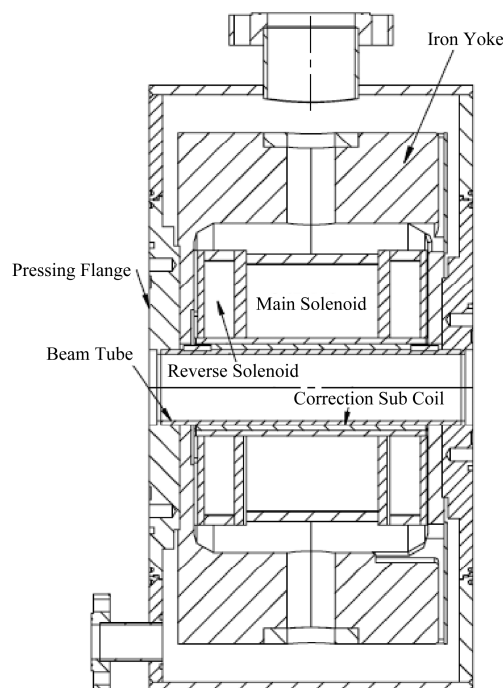


图 4 超导短磁铁本体结构图
Fig.4 Mechanical drawing of the body structure of the short magnet.

7 块超导磁铁、7 个超导 Spoke 腔和 7 个 BPM 共用一个低温恒温器，它们共用同一个真空腔体，因此超导磁铁本身不再需要液氮冷屏。为减少低温系统的复杂性，超导磁铁选用了与超导 Spoke 腔同样的液氮冷却方式，即采用 2.1 K、3 000 Pa 的浸泡式冷却，它是通过减压降温的方法将 4.2 K、 10^5 Pa

的液氮进一步冷却来实现的。在铁轭的外侧是由 5 mm 厚做成的不锈钢外壳作为液氮容器的外筒,在液氮容器的前端面有液氮预冷孔,而实际运行时的供液管路位于磁铁的上部。

因 2.1 K 液氮压力小,磁铁电流引线不能再采用传统的气冷电流引线,而是要采用类似于 LHC (Large Hadron Collider) 中超导校正子,以及德国电子同步加速器研究所 (Deutsches Elektronen Synchrotron, DESY) 欧洲 X 射线自由电子激光器 (European X-Ray Free-Electron Laser, XFEL) 超导四极磁铁的传导冷却式电流引线^[4]。为减少对低温端的漏热,需要对传导漏热和焦耳热进行逐级拦截。对于 ADS 低温系统设计,低温恒温器提供了 80 K 的液氮冷屏和 5 K 氦气冷屏,可以在磁铁电流引线的不同位置通过加热锚的方式来实现对电流引线漏热的逐级吸收。有关 ADS 超导磁铁电流引线的设计请参考文献[5]。图 5 为超导磁铁本体及电流引线的三维集成图,左下为超导磁铁本体,4 根弯管为电流引线及信号线,右上为储气罐及电流引线与电源的接线排,电流引线顶部有氦气储气罐,目的是为了更方便地将超导磁铁从低温恒温器中撤卸下来。

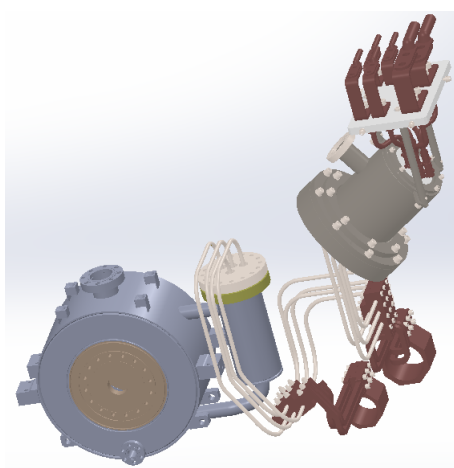


图 5 超导磁铁三维结构集成图

Fig.5 3D structural drawing of the superconducting magnet.

3 超导磁铁失超保护

ADS 超导磁铁的失超保护采用主动保护方式。根据文献[6]所提供的计算方法,确定在 50 ms 失超探测时间内,如果没有外部的泄能电阻,当磁铁能量全部释放到磁铁线圈上时,超导磁铁线圈内部的最高温度为 40 K。这是极端的情况,而实际中螺线管的储能不大,约为 4.1 kJ,选用 1 Ω 、2 kW 的泄能电阻足以对螺线管线圈进行保护。校正子选用了 1 Ω 、200 W 的保护电阻。每块磁铁只需要 6 个失超

探测通道,其中主螺线管线圈中点焊接有电压抽头,占用两个探测通道,两个反螺线管各有一个通道,两个校正子各有一个探测通道。

失超探测程序采用 VC++6.0 编写,包括初始化部分、自检部分、探测部分和通知电源的动作部分。图 6 是超导磁铁长磁铁做低温垂直测试时出现在 260 A 下的失超,曲线所记录的是磁铁切断电源前后电压信号的变化情况,每个点的采样时间间隔为 10 ms。而发现的一个奇怪现象是在磁铁电源关断时,每个通道的电压信号仅为 20 mV,只要电源打开,无论磁铁有无电流,干扰信号就会出现并最高达到 400 mV,并且干扰信号的幅值并不随电流而增加。经查明,这种干扰信号来自于电源中绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 所带来的尖峰干扰,频率为 25 kHz,它会影 响失超探测,并引起失超判断的误动作。通过加入移动平均的方法消除这种尖峰干扰信号,每个通道中以 5 个连续的采集数据作为一组进行求平均,并随着采集数据逐步向前移动。

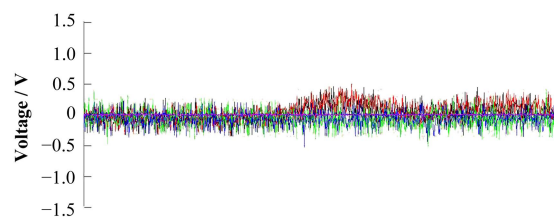


图 6 未经过移动平均处理的电压采集信号

Fig.6 Voltage signals before the moving average processing.

经过移动平均处理的信号比未处理的光滑平滑了许多。处理后所设定的失超探测电压信号阈值可以大大降低。图 7 为经过移动平均处理采集电压信号,并记录下螺线管在 308 A 下的一次失超。

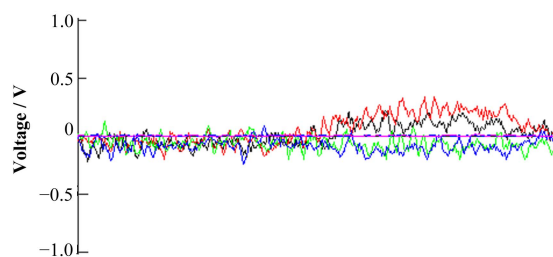


图 7 经过移动平均处理前后的采集电压信号

Fig.7 Voltage signals after the moving average processing.

4 低温垂直测试和磁场测量

超导磁铁的低温垂直测试,需要将没有焊接磁铁外壳的裸磁铁吊装到低温测试杜瓦的顶法兰上。图 8 是裸磁铁的吊装情况,从杜瓦顶部一直贯穿到

磁铁处是一个带有真空夹层的常温隔离筒, 为磁场测量提供常温的运动空间。在杜瓦顶法兰安装到杜瓦筒体内之后, 将磁场测量平台再安装在测试杜瓦的顶部。磁场测量平台上下移动的行程为 460 mm, 足以覆盖 ADS 超导磁铁的磁场。三维高斯计探头安放在测量管中, 测量管可以在常温隔离筒的内部上下移动。

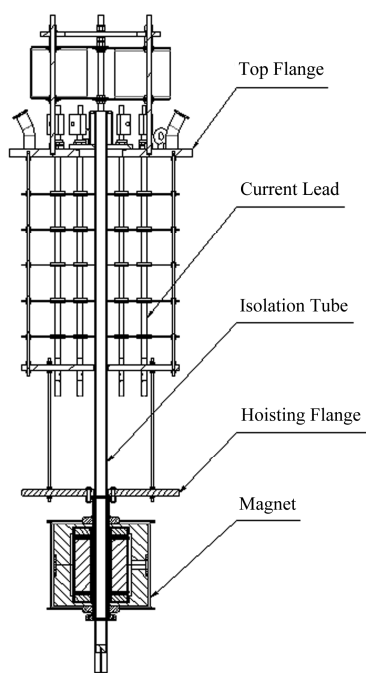


图 8 裸磁铁安装在杜瓦顶法兰下的吊装结构
Fig.8 Schematic structure of bare magnet hung on the top flange of the test dewar.

螺线管线圈的设计运行电流为 210 A, 螺线管经过 50 A、100 A、150 A、200 A、230 A 这 5 个升流台阶后到达了 260 A 并未出现失超。随着电流的升高, 螺线管与反螺线管之间的排斥力按照电流平方关系成比例增加, 必然会对磁铁带来不良影响, 因此停止了螺线管的升流, 并将两个校正子电流分别升至 20 A, 均未出现失超现象。在联合励磁维持 15 min 后, 利用电加热器对磁铁进行诱发失超, 失超探测如期启动并对超导磁铁进行了保护。对螺线管磁铁的三维磁场测量, 分别进行了在 100 A、150 A、190 A 及 230 A 电流下的磁场测量, 每个间隔步长为 2 mm。从测量结果来看, 螺线管不同电流下在 Spoke 腔处的漏场均小于 2 G, 比设计值略高, 是由高斯计的温度补偿系数存在的误差所致, 实际观测到测量隔离筒内的温度达到了 -60° 。图 9 为磁铁励磁后再将电流降为 0 A 后的本底磁场的磁场测量结果。可以看出, 在螺线管和反螺线管的同步区域有很大的剩磁, 但总的积分磁场接近于零。

这种现象是由于超导状态下, NbTi 超导丝所携带的持续电流所致^[2]。

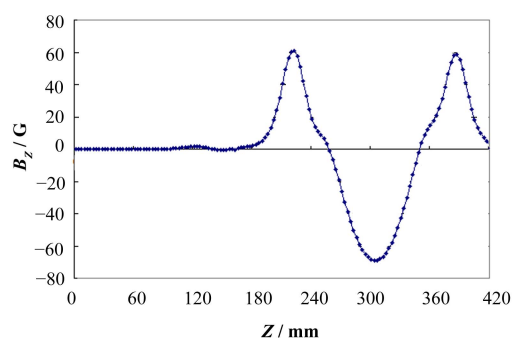


图 9 超导线持续电流效应所产生的剩磁场分布
Fig.9 Residual magnetic field distribution of the solenoid arisen from the persistent current effect.

5 结语

由于空间长度的限制, 加速器物理设计要求的 ADS 超导磁铁长度仅为 170 mm, 相比 300 mm 长磁铁的设计方案, 难度增加了很多。在积分磁场要求不变的情况下, 主反螺线管之间排斥力大大增强, 对磁铁的物理和结构设计提出了非常高的要求。对两块短磁铁的低温垂直测试结果表明, 其积分磁场和漏场均达到了设计要求, 并在其运行电流的 120% 状态下没有出现失超。2014 年底, 其中的两块短磁铁已经完成在测试低温恒温器中的组装。2015 年 1 月, 两块超导磁铁已经和超导腔一起分别实现了在 4.2 K 和 2.1 K 下的测试运行。在磁铁运行过程中, 由于 Spoke 腔馈功率引起了液氦液面的突然下降, 导致两次超导磁铁的失超, 失超探测系统及时地探测到了磁铁的失超并切断了磁铁电源, 对超导磁铁实现了及时的保护。

参考文献

- 1 Peng Q L, Wang B, Chen Y, *et al.* Physical design of superconducting magnet for ADS injection[J]. Chinese Physics C, 2014, 38(3): 037002. DOI: 10.1088/1674-1137/38/3/037002
- 2 Peng Q L, Xu F Y, Wang T, *et al.* Design and test of a superconducting magnet in a linear accelerator for an Accelerator Driven Subcritical System[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2014, A764: 220–226. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.07.034>
- 3 Opera manager user guide[R]. Version 14R1. Vector Fields Software, 2011
- 4 Barrarino A. Current leads for the LHC magnet system[J].

- IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2002, **12**: 1275
- 5 Wang B, Peng Q L, Yang X C, *et al.* Current leads for superconducting magnets of ADS injector I[J]. Chinese Physics C, 2014, **38**(6): 067004. DOI: 10.1088/1674-1137/38/6/067004
- 6 Green M A. Quench protection and magnet power supply requirements for the MICE focusing and coupling magnets[R]. Oxford Physics Engineering Report 15, LBNL-57580, 2005

Development and testing of the short superconducting magnets for ADS injection I

PENG Quanling¹ LAI Rong¹ YANG Xiangchen¹ XU Fengyu²

¹(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

²(Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

Abstract Background: The Accelerator Driven Subcritical System (ADS) uses a proton beam incident on a target to produce neutrons used in a nuclear reactor to process spent fuel in two ways: to accelerate its decomposition into non-radioactive waste, and to increase the rate at which it is recycled into nuclear fuel. Two cryomodels, each consisting of 7 superconducting spoke cavities, 7 superconducting magnets and 7 beam position monitors, are used to accelerate the proton beams from 3.2 MeV to 10 MeV. The superconducting magnet contains a solenoid for beam focusing and two correctors for orbit correction, it is a key component for ADS injection. **Purpose:** This study aims at a short superconducting magnet design to meet the required integral field strength and to reduce the leakage field at the nearby superconducting spoke cavities. The design current for the solenoid is 210 A. **Methods:** The main solenoid and two bucking solenoids plus the iron yoke were used to meet the leakage field requirements which is less than 1 G at a distance of 270 mm from the solenoid center. In order to shorten the magnet length to 170 mm, special design methods were taken for the magnet cryostat by removing two conflicts flanges and replacing them with the direct Al ring seal methods. A kind of conducted the current leads similar as that of Large Hadron Collider (LHC) corrector magnets was applied to the 2.1-K, 3 100-Pa cryogenic system. The small store energy magnet led to the introduction of active quench detected system, which is much more reliable. Two short magnets and two spoke cavities were installed inside a test cryomodel to test the online operation properties of the SC magnet and the SC spoke cavity. **Results:** A quench performance in the vertical test shows that the operating current of the solenoid magnet can reach above 300 A after natural quenching on three occasions during current ramping (260 A, 268 A and 308 A). Online operating test shows that two magnets can work at 4.2 K and 2.1 K, respectively. The quench protection system worked well when two quenches occurred as the liquid helium level decreased. **Conclusion:** The online operation for the two magnets confirms the physical and the mechanical design, the reliability of the quench detection technique.

Key words Bucking solenoid, Quench detection, Vertical test, Persistent current effect

CLC TL99