

Cooling Analysis of Quadrupole Magnetic Coil of Drift Tube for China Spallation Neutron Source

Bo Li^{1,2}, Huachang Liu^{1,2}, Xiaolei Wu^{1,2}, Keyun Gong¹, Ahong Li^{1,2}, Qiang Chen^{1,2}, Mengxu Fan^{1,2}, Yun Wang^{1,2}, Peihua Qu^{1,2}

¹Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing

²Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan Guangdong

Email: libo0910@ihep.ac.cn

Received: Jun. 26th, 2020; accepted: Jul. 7th, 2020; published: Jul. 14th, 2020

Abstract

In China Spallation Neutron Source, classical Alvarez structure is used for the drift tube linac; the linac consists of 161 drift tubes, each with an electric quadrupole magnet to achieve high and adjustable magnetic gradient for strong focus. Quadrupole magnetic coil adopted SAKAE structure, which was invented by Japan Proton Accelerator Research Complex with small volume, small beam aperture, high excitation current and with water cooling. Compared with the pulse working mode with 35% duty ratio of J-PARC magnet, CSNS magnet works in DC mode with max current 570A; in addition, the water cooling pipe section of CSNS magnet reduced by 35%. So, it is very important to analyze the cooling and stable operation of the magnet coil due to the high ohmic heating. In this paper, the temperature rise of the magnetic coil under the condition of the maximum excitation current of 570 A and the cooling water flow of 1 L/min is calculated by empirical formula and software Workbench, and 9-hour-test was done on the prototype magnet, the magnet operated stably, the temperature rise is basically consistent with the simulation results.

Keywords

Drift Tube Linac, Quadrupole Magnetic, SAKAE Structure, Water Cooling, Temperature Rise

中国散裂中子源漂移管四极磁铁线圈冷却分析

李波^{1,2}, 刘华昌^{1,2}, 吴小磊^{1,2}, 巩克云¹, 李阿红^{1,2}, 陈强^{1,2}, 樊梦旭^{1,2}, 王云^{1,2}, 瞿培华^{1,2}

¹中国科学院高能物理研究所, 北京

²散裂中子源科学中心, 广东 东莞

Email: libo0910@ihep.ac.cn

收稿日期：2020年6月26日；录用日期：2020年7月7日；发布日期：2020年7月14日

摘要

中国散裂中子源漂移管直线加速器采用Alvarez结构, 包含161台漂移管, 每台漂移管内装有一台电四极磁铁以达到磁场梯度高且可调的要求, 实现强聚焦。四极磁铁采用日本质子加速器研究中心研发的SAKAE结构, 实现小体积、小孔径、高励磁电流、水冷线圈的要求。相比较于日本J-PARC的在35%占空比脉冲模式下工作的四极磁铁, CSNS漂移管四极磁铁工作在直流模式下, 设计最高励磁电流570A, 而且CSNS四极磁铁线圈的水冷管道横截面减小了35%, 欧姆发热大, 磁铁线圈的冷却及能否稳定运行分析十分重要。本文利用经验公式和软件Workbench分别计算了在最大励磁电流570 A, 冷却水流量为1 L/min情况下, 线圈的温升情况, 并且对磁铁样机做了9小时的烤机实验, 线圈温升与仿真结果基本一致, 磁铁运行稳定。

关键词

漂移管加速器, 四极磁铁, SAKAE结构, 水冷, 温升

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)位于广东省东莞市中子科学城内(规划), 是迄今为止我国最大的大科学装置(国家为解决重大科技前沿、国家战略需求中的战略性、基础性和前瞻性科技问题, 谋求重大突破而投资建设的大型研究设施, 是国家基础设施的重要组成部分)。CSNS 的目标是成为世界主要脉冲散裂中子源科学研究中心之一, 为我国基础及应用研究提供一个先进的多学科创新研究平台[1]。

CSNS 直线段采用经典的 Alvarez 结构漂移管直线加速器(Drift Tube Linac, DTL), 如图 1 所示是其单腔结构图。DTL 总长约 36 m, 由 12 节腔筒和 161 台漂移管构成, 负责把 H⁻离子由 3 MeV 加速到 80 MeV [2] [3]。漂移管结构如图 2 所示, 由外壳和四极磁铁构成, 外壳为无氧铜材质, 通过电子束焊接成型[4], 内部含有一台 SAKAE 结构的电四极磁铁[5], 具有结构紧凑、体积和束流孔径小、磁场梯度高等优点。

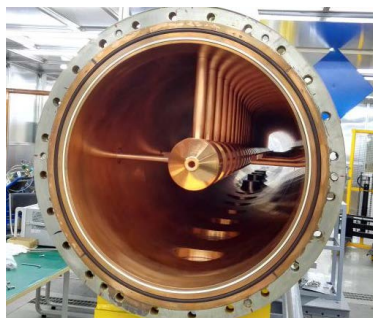


Figure 1. Structural of drift tube linac

图 1. 漂移管直线加速器实物图

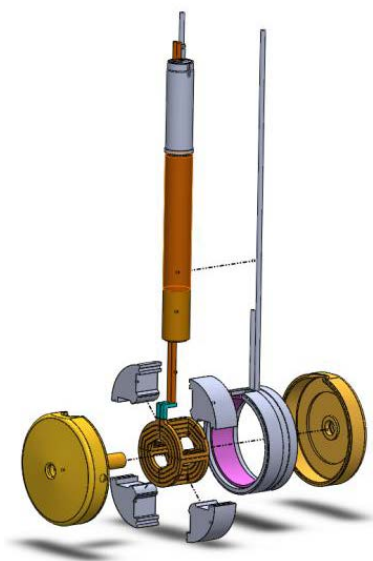


Figure 2. Structural exploded view of drift tube

图 2. 漂移管结构爆炸图

2. SAKAE 四极磁铁线圈

为了减小漂移管内四极磁铁的体积和束流孔径、提高磁场梯度、抑制束流纵向和横向的耦合共振、同时为了满足束流的可调节性[6],日本质子加速器研究中心(J-PARC)研发了 SAKAE 结构电四极磁铁线圈。SAKAE 电四极磁铁线圈采用线切割技术和反向周期电铸技术[7] [8],从一块无氧铜上切割并电铸出中空带冷却管道的四极磁铁线圈结构,实现体积小和束流孔径小、高磁场梯度的要求。中国散裂中子源漂移管加速器采用了这种小体积、小孔径、高磁场梯度的电四极磁铁,磁铁线圈结构如图 3 所示,磁铁的部分物理和几何参数如表 1 所示[9]。相比较于 J-PARC 的四极磁铁线圈结构,CSNS 漂移管四极磁铁线圈的水冷管道横截面减小了 35%,而且 J-PARC 的四极磁铁工作在占空比为 35%的脉冲模式下[5],CSNS 漂移管四极磁铁工作在直流模式下,最高励磁电流 570 A [10],产生较大的欧姆热,因此磁铁线圈冷却十分重要。

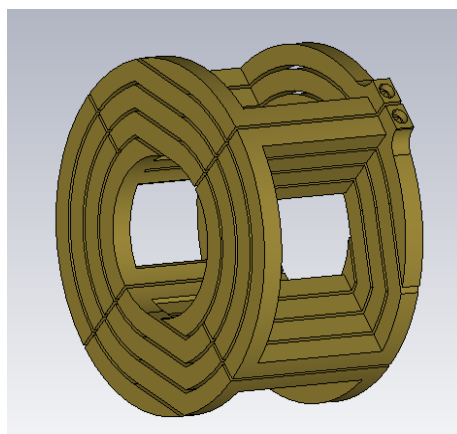


Figure 3. Model diagram of SAKAE quadrupole magnetic coil

图 3. SAKAE 四极磁铁线圈模型图

Table 1. Parameters of SAKAE quadrupole magnetic
表 1. SAKAE 四极磁铁参数

磁铁参数	值	磁铁参数	值
磁场梯度/T/m	55	匝数	3.5
有效长度/mm	40	电流/A	570
铁芯长度/mm	34	导线规格/mm ²	5 × 5, 2.5 × 3
铁芯外径/mm	108	截面积/mm ²	17.5
孔径/mm	19	铜的电阻/mΩ	2.4

由于线圈采用了电铸工艺，为了减小冷却水进出口压差和腐蚀效应，管道内流速限制在 2 m/s 以下，冷却水流量控制在 1 L/m，进出口压差 0.5 MPa。在此条件下，利用经验公式和软件 Workbench 对线圈的温升情况进行了分析，并且对磁铁样机做了 9 小时的烤机实验。

3. 四极磁铁线圈温升计算及仿真分析

DTL 漂移管磁铁在最高励磁电流 570 A，冷却工况为压差 0.5 MPa，水流量 1 L/min 下，利用公式(1)来近似计算磁铁线圈冷却水最大温升 ΔT ，进而得到线圈近似温升。

$$C \cdot m \cdot \Delta T = I^2 \cdot R \quad (1)$$

其中， C 是水的质量比热容， m 是单位时间冷却水量， ΔT 是线圈冷却水温升， I 是磁铁励磁电流， R 为线圈阻值，计算得到线圈冷却水温升为 11.1℃，线圈温升可近似为 11.1℃。

利用软件 Workbench 的稳态热分析模块对线圈进行发热冷却分析[11]，冷却水温设置为 25℃，仿真结果如图 4 所示，线圈冷却水入口处温度 26.84℃，冷却水出口处温度 40.14℃，线圈温升 13.3℃。Workbench 计算结果略高于公式(1)的计算结果，公式(1)计算的是冷却水介质的温升而 Workbench 计算的是线圈本身的温升，Workbench 计算的更加准确。

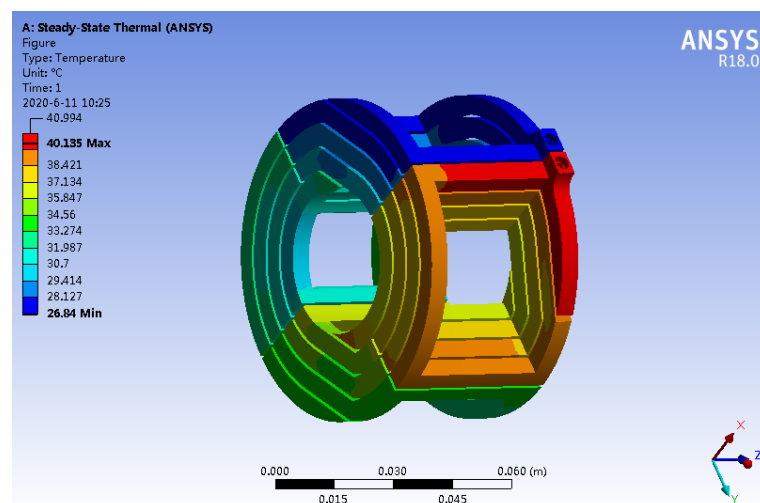


Figure 4. Temperature distribution of magnetic coil by simulating
图 4. 四极磁铁线圈仿真温度分布

4. 四极磁铁线圈温升测试

在高能所五号厅对磁铁线圈进行了长时间的最大额定电流 570 A 下进行运行测试，首先测量核准了

冷却水流量 1.0 L/min, 然后逐渐升高励磁电流至最高, 运行测试 9 个小时。用热成像仪测量线圈表面温度, 温度分布如图 5 所示, 表面最高温度在出水口, 约 41℃, 最低温度在进水口管道处。

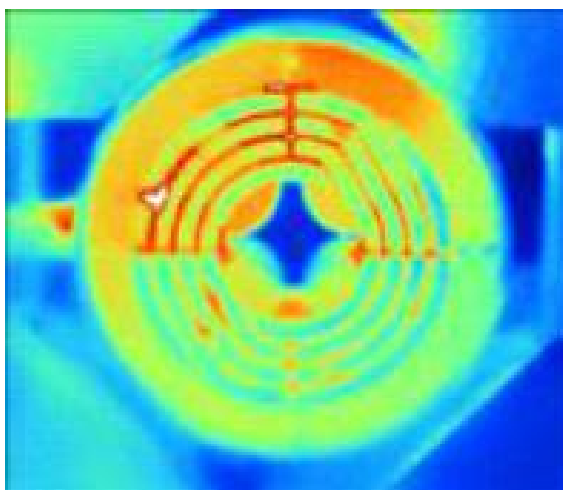


Figure 5. Temperature distribution of magnetic coil by measuring

图 5. 四极磁铁线圈实测温度分布

图 6 是 9 个小时内, 磁铁线圈进水处与出水处的温度变化及温差曲线, 出水端最大温度 41℃, 进水端最小温度 29℃, 温差最终稳定在 12℃, 与 Workbench 理论仿真值 13.3℃ 相比偏小, 这是因为仿真时没有考虑线圈外表面热辐射及磁铁极头带走的部分热量, 下一步可以优化边界条件, 更准确的得到仿真值。另外, 四极磁铁长期运行状况良好, 满足工程需求。

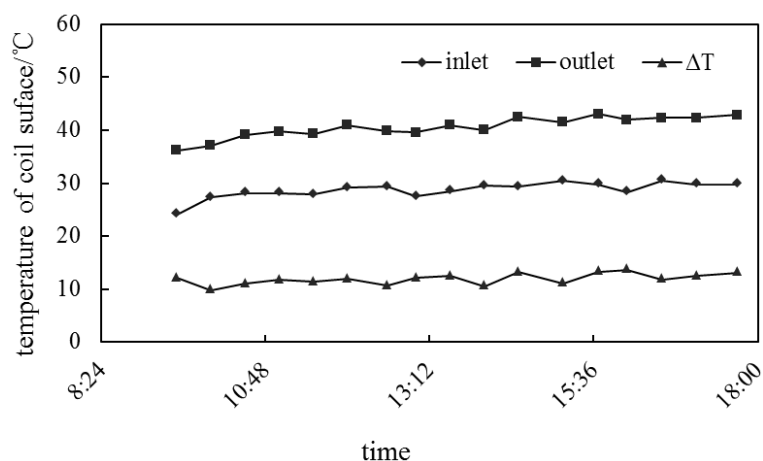


Figure 6. Temperature variation of magnetic coil for 9-hour-test

图 6. 磁铁 9 小时运行测试线圈温度变化

5. 总结与展望

对中国散裂中子源漂移管直线加速器及漂移管结构进行了介绍, 漂移管采用 SAKAE 结构线圈, 具有结构紧凑、体积和束流孔径小、磁场梯度高的优点, 缺点是冷却困难。在最大励磁电流 570 A 下, 经验公式计算的线圈近似温升 11.1℃, Workbench 计算线圈温升 13.3℃, 与磁铁样机实验结果 12℃ 基本一致,

且磁铁长时间运行稳定, 满足中国散裂中子源漂移管直线加速器的运行要求。下一步, 中国散裂中子源目前计划升级改造, 漂移管磁铁励磁电流要提高约 60%, 还需要分析更高励磁电流下线圈的温升及考虑脉冲工作模式下线圈的温升。

基金项目

项目名称: 中国散裂中子源漂移管直线加速器, 项目类别: 国家“十二五”项目子课题。

参考文献

- [1] 陈和生. 中国散裂中子源[J]. 现代物理知识, 2016, 28(1): 3-10.
- [2] Wang, S., Fang, S.X., Fu, S.N., *et al.* (2009) Introduction to the Overall Physics Design of CSNS Accelerators. *Chinese Physics C*, **33**, 1-3. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/33/S2/001>
- [3] Wei, J., Fu, S.N., Tang, J.Y., *et al.* (2009) China Spallation Neutron Source—An Overview of Application Prospects. *Chinese Physics C*, **33**, 1033-1042. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/33/11/021>
- [4] Sexton, I., Cherif, A., Cuvet, Y., *et al.* (2014) The Drift Tube Welding Assembly for the Linac4 Drift Tube Linac at CERN. *Proceedings of LINAC*, Geneva, 31August-5 September 2014, 929-931.
- [5] Yoshino, K., Takasaki, E., Naito, F., *et al.* (2000) Development of a DTL Quadrupole Magnet with a New Electroformed Hollow Coil for the JAERI/KEK Joint Project. *Proceedings of 20th International Linac Conference*, Monterey, CA, 21-25 August 2000, 569-571.
- [6] Liu, H.C., Peng, J., Gong, K.Y., *et al.* (2018) The Design and Construction of CSNS Drift Tube Linac. *Nuclear Instruments and Method in Physics Research*, **911**, 131-137. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.034>
- [7] Tajiri, K. (1999) Controllable Copper Electroforming for Mechanical Properties from Acid Copper Sulfate Bath. *Abstracts of the 195th Meeting of the Electrochemical Society*, Seattle, WA, 2-6 May 1999, No. 102.
- [8] Ino, H., Tajiri, K., Kabeya, Z., *et al.* (2000) Advanced Copper Lining for Accelerator Components. *Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting*, Monterey, CA, 21-25 August 2000, 308-310.
- [9] 孙献静. DTL 四极磁铁的初步设计[R]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2011: 5-6.
- [10] Yin, X.J., Peng, J., Gong, K.Y., *et al.* (2010) Design of the CSNS DTL. *Proceedings of Linear Accelerator Conference*, Tsukuba, 12-17 September 2010, 554-556.
- [11] 浦广益. ANSYS Workbench 12 基础教程与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 117-123.