

文章编号: 1007-4627(2014)04-0489-05

SECRAL 超导磁铁电源控制

周文雄^{1, 2, 3}, 王彦瑜¹, 周德泰¹, 宿建军^{1, 3}, 卢旺¹, 冯玉成¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 重庆大学, 重庆 400044;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 超导离子源 (SECRAL) 的超导磁铁电源的控制非常重要。为防止超导磁铁的失超, 需要对超导磁铁电源采用恰当的策略进行控制。在 SECRAL 系统中, 4 台电源分别为 4 个超导线圈独立供电, 供电的电流大小不同, 电流上升和下降的速率也不同。4 个线圈的电流不平衡, 将导致整个超导磁铁失超, 所以超导线圈的电流上升和下降过程必须协同完成。为了提升磁铁电源的安全性和稳定性, 设计并实现了一个远程控制系统。在硬件方面使用串口通讯服务器实现 TCP/IP 网络通讯与 RS232 串行通讯间的协议转换。软件使用 VC++ 直接对串口编程完成。该系统能够自动完成 4 台电源的同步操作, 简化了超导离子源 SECRAL 的调试过程, 提高了操作过程中的安全性。

关键词: 超导磁铁电源; 控制系统; SECRAL; 控制策略;

中图分类号: TL56 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.04.489

1 引言

超导离子源 (SECRAL) 专门为兰州重离子研究装置 (HIRFL) 提供强流离子束而设计^[1-2]。在 SECRAL 中, 等离子体产生后被超导磁铁产生的强磁场约束, 最后被高压引出形成束流。整个超导磁铁在运行的过程中需要使用液氮浸泡以提供低温环境, 这样才能使超导线圈能够正常运行。

超导磁铁是由 4 个超导线圈组成, 4 个线圈分别使用不同的电源进行供电。在超导线圈电流的上升与下降的过程中, 要求对 4 个线圈上的电流保持操作同步。如果操作不能同步, 将引起失超, 其结果将导致昂贵的液氮瞬间蒸发, 超导离子源无法正常运行。在本控制系统完成之前, 虽然能够对电源进行远程控制, 但是所有的同步操作均由操作人员完成, 如有不慎, 就有可能导致 4 台电源的控制不同步, 发生事故或操作失败。为了减小事故发生的概率, 减轻操作人员的负担, 提高操作过程中的安全性, 我们设计并实现了该自动控制系统。它能够严格保证 4 台电源的同

步运行。

2 控制要求和策略

SECRAL 的超导磁铁由 4 个浸泡在液氮中的线圈组成, 它们分别是注入线圈、中间线圈、引出线圈和六极线圈^[3]。每个线圈在运行时所要求的电流都不同, 而且在电流升降时所要求的速率也不同。如果在启动和停止的过程中, 4 个线圈的电流不能同步就很容易导致超导磁铁失超的事故。

在运行过程中发现, 当 4 个线圈上的电流均小于最大电流的 10% 时, 能够容忍较大幅度的不同步。因此, 在电流加载过程中, 需要将 4 个线圈的电流先以各自的速率加载到最大值的 10% 处。由于速率不同, 4 个线圈不能同时到达, 所有先到达的线圈需要停止加载、并等待。当 4 个线圈的电流均到达 10% 点后, 再一起以原来的速率上升。当各个线圈的电流均到达各自的速率变更后, 变更上升速率再继续增加, 直到同时到达目的点。各个过程的速率如表 1 所列。

收稿日期: 2013-12-20; 修改日期: 2014-03-20

基金项目: 中国科学院重大科学工程运行维护课题(06HIRLL100-5001)

作者简介: 周文雄(1987-), 男, 湖北仙桃人, 博士, 从事核技术及应用研究; E-mail: zhouwenxiong@impcas.ac.cn, zhouwenxiong@cqu.edu.cn

通信作者: 王彦瑜, E-mail: yanyu@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>

表 1 电流加载速率

过程	六极线圈/(A/s)	注入线圈/(A/s)	中间线圈/(mA/s)	引出线圈/(A/s)
0%至10%	0.042	0.064	8.4	0.054
10%至变更点	0.042	0.064	8.4	0.054
变更点至目标点	0.042	0.054	7.2	0.048

在电流控制过程中，各个线圈的电流加载速度根据经验必须为表 1 所列的值，速率变更点需要经过计算得到。图 1 所示为经过控制和未经控制时，线圈电流加载到 60% 目标点的过程对比图。其中六极磁铁线圈的电流没有进行控制，其他 3 种磁铁电源电流经过停机等待、多次变更速率等操作，最终实现了 4 台磁

导致的各个线圈电流的不平衡。在实际使用过程中，最常使用的两个目标点是最大电流的 60% 点和 80% 点。通常情况下，需要先将电流加载到这两个值，然后再进行微调。所以在目标点得知以后，根据各个线圈的电流都同时到达目标点的要求，可以使用下面的公式计算各个线圈的速率变更点：

$$\frac{I'_3 - I'_1}{V'} = \frac{I_2 - I_1}{V_1} + \frac{I_3 - I_2}{V_2}。$$

由于六极线圈在整个过程中的速率都不变，所以在公式中可以使用六极线圈的电流和速率作为参考点，来计算其他线圈的速率变更点。在公式中， V' 为六极线圈的电流加速速率， I'_3 为六极线圈的目标点电流， I'_1 为六极线圈的 10% 点电流。 V_1 为需求计算线圈的 10% 点到速率变更点的电流加载速度， V_2 为速率变更点到目标点的电流加载速度， I_3 为目标点的电流值， I_2 为速率变更点的电流值， I_1 为 10% 点的电流值。经过计算可以得到各个线圈的速率变更点和对应的其他重要点的电流值如表 2 所列。

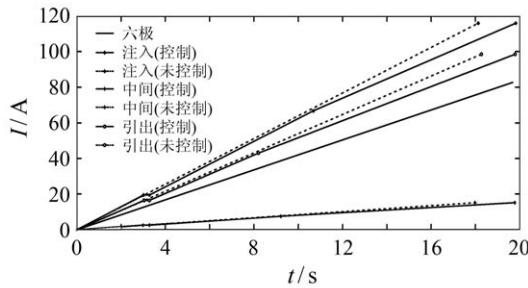


图 1 线圈电流加载过程对比

铁电源的电流在保证一定比例的平衡状态下同时到达目标点。避免了六极磁铁线圈电流先于其他磁铁线圈电流到达目标点，以及各个线圈电流上升速率不同而

表 2 各线圈的重要电流点

重要电流点	六极线圈/A	注入线圈/A	中间线圈/A	引出线圈/A
10% 电流	13.79	19.33	2.515	16.42
60% 电流	82.7	116.0	15.09	98.6
80% 电流	110.3	154.66	20.12	131.4
60% 电流的变更点		66.7	7.5	43.0
80% 电流的变更点		76.2	9.5	49.3

3 硬件

4 个线圈分别由 4 台数字电源进行控制，每个电源的控制接口均为 RS232。为了将 4 台电源同时进行

远程控制，我们使用了如图 2 所示的结构。使用一台串口服务器将 4 台电源的 RS232 协议转换成 TCP/IP 协议，然后在后台计算机上通过 TCP/IP 协议就能实现对 4 台电源的远程控制。

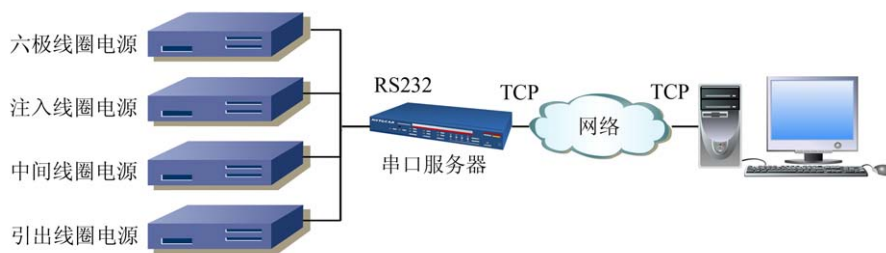


图 2 (在线彩图) 硬件结构图

4 软件

4.1 软件结构

在软件的设计中, 将得到的 TCP 数据使用相应的串口服务器的驱动程序转换成 RS232 数据, 这样就可以使用串口编程来完成对 4 台电源的控制, 简化了编程过程中的数据解析、命令打包等繁琐的过程^[4]。控制软件框图如图 3 所示, 软件对每个串口使用一个独立线程进行监视, 并管理该端口的所有数据的发送与接收^[5]。上层软件使用一个 600 ms 的定时器来定时地向电源发送回读命令, 用来监测各个电源的运行状态, 得到的数据用于状态显示和保存在数据库中。

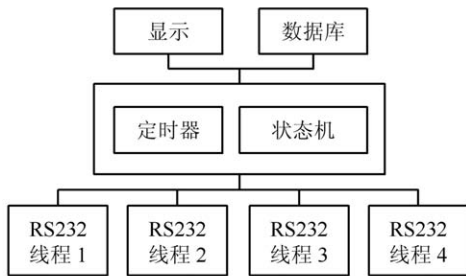


图 3 软件结构图

软件需要完成的功能分为两种: 一种是人工对电源进行操作, 包括开关机、升降电流等, 这样可以做到灵活控制; 另一种是自动完成电源从 0 加载到最大电流的 60% 或 80% 点, 或从 60% 和 80% 点降至 0 的全部过程。从本文前面所述的控制策略中可以看到, 这个控制过程比较繁琐, 需要使用状态机来完成过程控制, 如图 4 所示。程序中使用一个 1 s 的定时器来完成

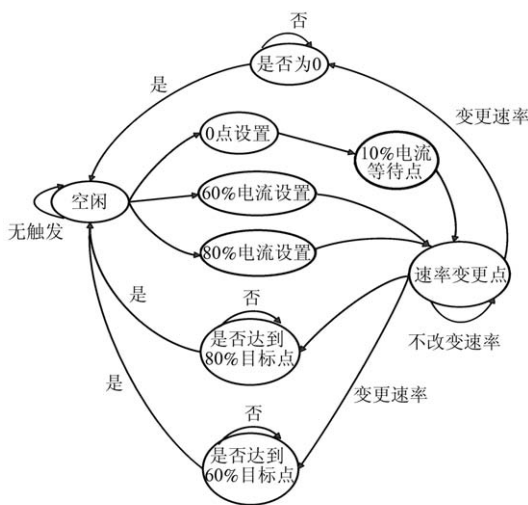


图 4 控制过程状态机

成这个状态机的驱动, 每次定时器到来时, 程序都会监测各个数据的变化情况, 从而完成向下一状态的跳转。

4.2 安全策略

在对电源的控制过程中, 如果对 4 台电源的任意一个操作没有成功执行, 就有可能导致 4 个线圈的电流不平衡, 最终就有可能导致超导失超。因此, 必须保证每条指令都能够顺利执行。每台数字电源在进行给定回读时, 都需要发送命令, 但是由于电源控制器的控制机制限制, 要求两条请求命令之间的间隔时间必须大于等于 600 ms, 所以对电源发送控制和回读命令的时间间隔必须进行严格的控制。在实际使用中, 需要不间断地发送回读命令, 这样才能得到电源的实时数据。对电源的其他操作有可能出现在任何时候, 这样就有可能导致两条命令之间的间隔小于 600 ms。为了解决这个问题, 在控制程序中实现了一个 600 ms 的定时器, 并使用了一个命令队列。每当定时时间标识到达后, 程序立即检查命令队列, 并发送队列中的下一条命令。回读命令会一直存在于命令队列中。同时, 当需要发送控制命令时, 先将控制命令存入命令队列, 再发送。这样可以保证对电源的控制命令间隔时间不会小于 600 ms。

在自动控制电源的电流升降过程中, 如果有一条命令没有执行都有可能导致 4 个线圈的电流不平衡最终导致失超。但是, 在这个自动控制的过程中, 操作人员又不能进行紧急操作, 所以在自动控制的过程中, 每发送一条命令, 都要通过对回读信息的判断来检查是否执行成功, 如果没有执行成功就需要再发送一次命令, 直到执行成功才会转入下一过程。

4.3 故障处理

控制系统的故障处理分为 3 种情况:

- (1) 在自动控制过程中, 如果出现紧急情况时, 可以单击控制界面上的“清除命令”按钮来安全停止当前的自动控制过程, 然后再停止各个电源。
- (2) 在操作过程中, 如果发生通讯中断, 软件会报警, 同时会触发声光报警通知工作人员进行处理。
- (3) 在操作过程中或者在电源正常运行过程中, 如果电源的电流值超过了设定的阈值, 控制系统就会进行连锁保护和报警。一方面通知工作人员进行处理, 另一方面会连锁关闭重要的设备, 保证设备不会

受到损坏。

5 结果

电源的控制界面设计如图 5 所示。分为两种操作模式，一种是自动控制，一种是人工操作。一般的用法是先使用自动控制模式将电源加载到 60% 或 80% 电流点，再手动操作进行微调。自动控制分为 6 种模

式：从 0 点上升到 60% 电流点、从 0 点上升到 80% 电流点、从 60% 电流点上升到 80% 电流点、从 80% 电流点下降到 60% 电流点、从 80% 下降到 0 点和从 60% 电流点下降到 0 点。在使用自动控制模式时，手动控制的所有按钮都不可用，防止误操作导致自动控制过程失败。



图 5 (在线彩图) 电源控制界面

6 结论

超导磁铁电源控制系统成功地实现了 4 台磁铁电源的自动控制。它在提高超导磁铁的安全性基础上减轻了操作人员的负担。同时在设计中对电源的控制进行了安全保护措施，防止操作过程中的意外发生，进一步增加了系统的稳定性和可靠性。目前该系统在加速器的调试中运行正常可靠，已经成功地地为多个物理实验提供了束流。

参考文献:

[1] XIA Jiawen, ZHAN Wenlong, WEI Baowen, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2008, **20**(11): 1787. (in

Chinese)

(夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 等. 强激光与粒子束, 2008, **20**(11): 1787.)

[2] ZHAO Hongwei, SUN Liangting, GUO Xiaohong, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 2007, **31**(Supp.1): 8. (in Chinese)

(赵红卫, 孙良亭, 郭晓虹, 等. 高能物理与核物理, 2007, **31**(增刊1): 8.)

[3] LU Wang, ZHAO Hongwei, FENG Yucheng, *et al.* San Sebastián: IPAC2011, 2011. (in Chinese)

(卢旺, 赵红卫, 冯玉成, 等. 圣塞瓦斯蒂安: IPAC2011, 2011.)

[4] GONG Jianwei, XIONG Guangming. Visual C++\Turbo C Serial Communication Programming Practice [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 16. (in Chinese)

(龚建伟, 熊光明. Visual C++/Turbo C串口通信编程实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 16.)

[5] ZHOU Wenxiong, WANG Yanyu, ZHOU Detai, *et al.* Nu-

clear Physics Review, 2012, **29**(4): 364. (in Chinese)

(周文雄, 王彦瑜, 周德泰, 等. 原子核物理评论, 2012, **29**(4): 364.)

Control of the Superconducting Magnet Power Supply for SECRAL

ZHOU Wenxiong^{1, 2, 3}, WANG Yanyu¹, ZHOU Detai¹, SU Jianjun^{1, 3}, LU Wang¹, FENG Yucheng¹

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *Chongqing University, Chongqing, 400044, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The control of the superconducting magnet power supply (SMPS) is very important for Superconducting Electron Cyclotron Resonance Ion source with Advanced design in Lanzhou(SECRAL). In order to improve the safety and the reliability of the SMPS, a remote control system was designed and implemented. There are four power supplies needed to be controlled with suitable strategy to avoid the quench of the superconducting magnet. These four power supplies are used to supply four superconducting solenoids. Because the value and the changing rates of the current for these four solenoids are different, the power supplies must be operated synchronously to keep the current of the solenoids balanced. In this paper, we provide a detailed description for the control strategy of the four power supplies and the architecture of the hardware and the software. A serial switch is used for protocol conversion between TCP/IP and RS232 in firmware. And the software is implemented using VC++. The system can operate the four power supplies automatically after it is triggered. With the help of the control system, operation of the SMPS gets easier and safer.

Key words: superconducting magnet power supply; control system; SECRAL; control strategy

Received date: 20 Dec. 2013; **Revised date:** 20 Mar. 2014

Foundation item: Operation and Maintenance Foundation for Major Scientific Project of Chinese Academy of Sciences(06HIRLL100-5001)

Corresponding author: WANG Yanyu, E-mail: yanyu@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>