

中国散裂中子源快周期同步加速器 磁铁电源系统

齐欣, 徐中雄

(中国科学院高能物理研究所加速器中心, 北京 100049)

摘要: 目前正在进行可行性研究的中国散裂中子源的主体结构是1台强流质子同步加速器。该加速器的一期目标为注入能量70 MeV、引出能量1.6 GeV、束流功率100 kW、循环工作频率25 Hz。文章阐述系统总体结构的设计原则以及二极磁铁(B)和四极磁铁(Q)磁场的跟踪误差要求。

关键词: 电源系统; 谐振网孔; 跟踪误差

中图分类号: TL503.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2006)03-0362-05

Magnet Power Supply System for Rapid Cycle Synchrotron of Chinese Spallation Neutron Source

QI Xin, XU Zhong-xiong

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

Abstract: The 1.6 GeV proton synchrotron proposed in the Chinese Spallation Neutron Source(CSNS) project is a high-intensity proton synchrotron. In the phase I of the project, the injection energy is 70 MeV and beam power is aimed to 100 kW at 1.6 GeV with repetition frequency 25 Hz. The main design principle of the power supply system is described in the paper, and some considerations for close dipole magnet(B) and quadrupole magnet(Q) field tracking during beam acceleration period are also discussed.

Key words: power supply system; resonant network; tracking error

目前正在进行可行性设计研究的中国散裂中子源(CSNS)是我国中子科学发展及中子科学研究平台建设的主要技术支撑之一。它的一期目标要求引出束流功率为100 kW、循环工作频率25 Hz。总体的结构设计选择了直线加速器加快周期同步加速器的构架。其中,快周期同步加速器(RCS)是中国散裂中子源的重要组成部分,它将 H^- 轰击剥离膜而得到的质子进

行积累和加速,提高束流的脉冲流强和能量,并在达到设计能量后将质子引出并轰击靶,从而得到实验所需的散裂中子。

快周期同步加速器在我国是首次设计,且目前在国外加速器实验室中,25 Hz以上的高能强流重离子加速器大多处在设计建造阶段,其磁铁电源系统尚有许多设计与建造的关键技术需要解决。

1 怀特电路型磁铁电源系统基本结构和选用原则

在 RCS 运行中,磁铁将产生巨大的无功能量吞吐。为避免无功能量存取对电网的扰动,RCS 磁铁电源系统通常采用怀特电路(White circuit)结构^[1]。怀特电路的主要特点是把电源设备、储能部件和磁铁组合成多元谐振电路,形成谐振型磁铁励磁结构,无功能量在磁铁和储能部件之间转换,电网和电源仅补充谐振过程中的有功损耗。

怀特型磁铁电源结构在最初的运用中,其谐振电路是把二极磁铁(B)和四极磁铁(Q)串联,组成一套怀特电路,用同一电流励磁,从而保证了 B、Q 磁场的同步运行。近年来,随着强流重离子快周期同步加速器的发展,其 B、Q 磁铁谐振时,所感应电压和所需功率已大幅提升,而且,为了满足加速器聚焦结构需要,往往把 Q 铁分成很多族组,因此,在工程应用中将它们串联在一套电路里并采用同一励磁电流的谐振结构已无法实现,必须采用多个电源谐振网络分别对各类磁铁独立供电。同步加速器在循环变化过程中必须保证各类磁场的精密跟踪,即各类磁场相位同步,磁场数值比例保持常数不变。为达到磁铁磁场精密跟踪的要求,对怀特谐振电路进行了改进研究。串联型供电怀特电路是其中的一种重要的改进型结构。图 1 示出原始的怀特电路并联型供电谐振和改进的串联型供电谐振各一单元的原理结构。图中: L_M 为磁铁电感; L_{ch} 为变压器-谐振电抗器次级电感; C_M 、 C_{ch} 为谐振电容; R_M 、 R_{ch} 为磁铁、电抗器等效电阻。

从原理上说,两种谐振网络结构是一致的,即磁铁和电容、谐振电抗器组成谐振回路,谐振

电抗器同时为直流电流提供通道,无功能量在磁铁和电容、谐振电抗器之间转换,电网和电源仅补充谐振过程中的有功损耗。从电源的角度看,二者最大的区别在于激励源的供电方式,即:1) 并联结构采用交流和直流分离供电,由两个电源分别控制来保障磁铁电流的精度,串联结构则由交流和直流组合供电,磁铁电流精度只由 1 台电源控制;2) 前者的磁铁是交流电源并联负载的 1 个分支,磁铁电流的精度不仅与电源输出有关,还与并联谐振元件参数有关,而后者结构中的磁铁直接与电源串联,磁铁电流仅取决于电源输出电流;3) 在并联结构中,直流源和交流源中只流过谐振网络有功损耗电流,电源容量小,而在串联结构中的电源电流则包括负载的有功和无功电流,电源容量很大。例如,日本 JPARC 的 RCS 的 1 组串联型四极磁铁电源达到 2 MVA^[2]。目前,在国内功率器件的条件下,这对电源设备的研制是个挑战。

基于上述分析,可得出 RCS 磁铁电源系统的设计原则如下:1) 在功率器件允许的条件下,多族磁铁的 RCS 中应尽量选用串联型怀特谐振电源网络结构,这样,易于保证磁铁电流精度和相位跟踪精度;2) 谐振电源网络结构的选择还需根据电源设备峰值功率考虑设备制造的可行性。

2 系统设计

中国散裂中子源 RCS 磁铁电源系统包括 1 套主二极磁铁(B)电源和 5 套四极磁铁(Q)电源。根据 RCS 的 25 Hz 循环工作要求,所有 B、Q 主磁铁的工作电流均采用带直流偏置的正弦波(图 2)。其波形表示为:

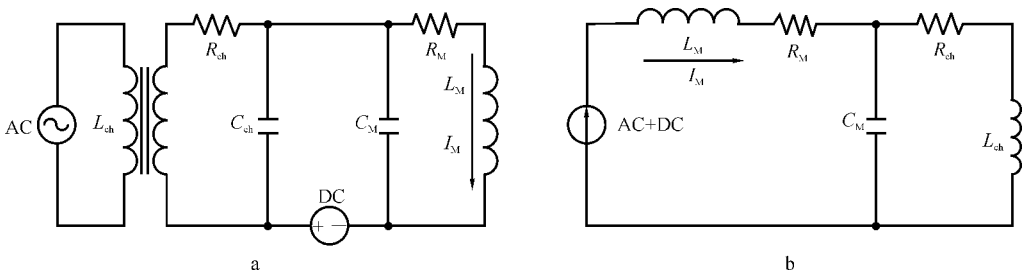


图 1 怀特电路典型谐振一单元结构

Fig. 1 One mesh of White circuit

a——并联型供电谐振单元;b——串联型供电谐振单元

$$I_M(t) = I_{DC} + I_{AC} \sin(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

式中： f_0 为 25 Hz。

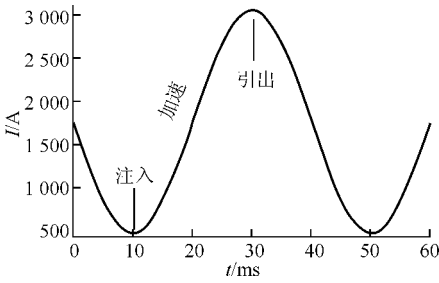


图2 RCS主B铁电流波形

Fig.2 B magnet current of RCS

RCS工作频率高,磁铁中的无功功率和有功功率的吞吐量巨大。为避免无功功率吞吐过程对电网和接地系统造成的严重扰动,设计采用怀特电路(White circuit)谐振磁铁电源系统,对主B、Q磁铁分别建立6个独立的怀特谐振网络,分离供电,并通过跟踪控制系统实现B、Q磁铁电流的同步运行精度要求。

为避免谐振单元的交流感应电压过高,往往把1个族组的磁铁分成若干组,形成多单元怀特电路电源网络(图3)。在多单元怀特电路中,各谐振单元元件参数一致,且首尾相接形成闭环。各单元中磁铁的谐振电压与电抗器和电容器的谐振电压相位相反,各单元工作电压形

成围绕地电位周期变化的闭合折线,对地的电压峰值为各单元谐振电压峰值的一半。谐振单元数目的选择原则是:适当选择每单元磁铁串联数目,使其谐振电压不要超过10 kV,否则,将引起磁铁、谐振元件造价大增。

根据B、Q磁铁参数和上述分析,对B铁采用并联型供电谐振网孔,对Q铁采用串联型供电谐振网孔(图3)。

表1列出B铁和Q铁谐振网络的参数。其中,元件参数应保持如下关系:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_M + L_{ch}}{L_M L_{ch} C_M}} = 25 \text{ Hz} \quad (2)$$

在谐振电容器的设计中需注意以下几点。

1) 过渡过程的冲击。每单元电容器组由许多电容器并联组成,各电容支路设有熔断器,失效电容使熔断器熔断,退出谐振电路,产生约-1%的参数变化,由此引起的电路谐振电压、谐振电流的过渡过程。电源设备、各部件额定容量应能承受这一过渡过程的冲击。

2) 谐振频率的调节和稳定。各单元电容器组均设计有可调电容,用于补偿由于电抗器电感量的误差、回路分布参数等因素导致的各单元谐振频率误差。另外,由于电容量的温度系数较大,在大电流工作条件下,应考虑温度系数相反的电容器件组合使用,以保证电容值的稳定。

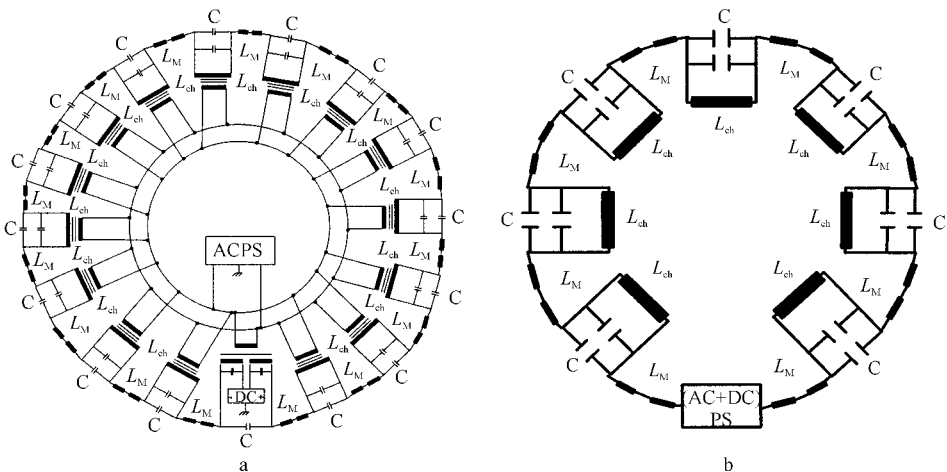


图3 B铁(a)和Q铁(b)谐振网孔

Fig.3 B (a) and Q(b) magnet resonant network

表 1 谐振网络的参数
Table 1 Parameters of resonant network

| 谐振网络参数 | B 铁 | Q 铁 | | | | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | QSF | QAS | QSD | QAF | QAD |
| 总磁铁数目(个) | 32 | 16 | 8 | 16 | 16 | 12 |
| 每单元磁铁数目(个) | 2 | 4 | 4 | 4 | 2 | 3 |
| 谐振单元数(个) | 16 | 4 | 2 | 4 | 8 | 4 |
| 每单元磁铁电感 L_M (mH) | 33.6 | 98 | 98 | 98 | 49 | 73.5 |
| 每单元磁铁谐振电容 C_M (μ F) | 2 412 | 827 | 827 | 827 | 1 654 | 1 103 |
| 每单元谐振电抗器电感 L_{ch} (mH) | 33.6 | 98 | 98 | 98 | 49 | 73.5 |
| 每单元谐振峰值电压 U_M (V) | 6 804 | 7 044 | 2 864 | 6 548 | 4 753 | 5 670 |

对于谐振电抗器,它的特性对回路特性影响最大。关于它的详细分析,本文从略。

此外,在加速器工作频率和磁铁电感量确定的前提下,谐振电抗器和谐振电容参数的选择主要依据部件的造价比^[1]。根据已有 RCS 设计建造经验,本设计取电抗器电感值等于磁铁电感值。

3 电源结构

如前文所述,由于 B 铁和 Q 铁网络各自的设计特点,电源的设计要求也各异。总体看,怀特电路中电源的基本作用有以下两点:1) 周期地向各谐振单元补充损耗;2) 与控制系统一起,实现同步跟踪激励。

对于并联型供电网络,交流损耗和直流损耗分别由 2 台相互独立的电源分别补充。其中,直流源属于电压源,采用成熟的相控稳流技术则可实现电源输出电压的稳定。在设计直流源时,有两个关键问题需要特别注意:1) 电源连锁保护系统,当直流电源插入在交流谐振电路中,一旦发生电路失谐,将有很大交流电流通过直流源,同时可能承受到近 10 kV 高压,造成设备破坏,因此,失谐检测和连锁保护系统的研制十分要紧;2) 在正常情况下,总有少量交流电流通过直流源,造成电源性能下降,需有源滤波器进行很好的补偿。该直流源的输出功率 $P_{DC} = \frac{1}{2} N I_{DC}^2 (R_{M-DC} + R_{ch-DC})$,其中: I_{DC} 为磁铁所需直流电流有效值; R_{M-DC} 和 R_{ch-DC} 分别为网孔中磁铁和谐振电抗器的直流阻抗; N 为网孔单元数。

目前,国外实验室用于并联型供电网络的交流源多使用单向脉冲电源,缺点是输出高次谐波成分大,可能难于满足 SNS 性能要求。因

此,近年提出的连续正弦波交流驱动电源方案可使输出谐波大幅降低。二者的主要区别在于,脉冲激励源的谐振负载为自由振荡,且脉冲电流 i_p 的引入时刻对谐振电感电压 U_{ch} 波形的幅值和相位的改变量有直接影响。而连续正弦波激励源的谐振负载为受迫振荡,它只需采用 1 个同步时钟来控制磁铁电流和其他谐振系统之间的相位同步。这种方式能大幅降低输出的高次谐波成分,有利于加速器性能的提高,但相对来说,电源结构复杂、技术难度较大,且失谐工作状态下对电源容量要求很高。交流源的输出功率 $P = \frac{1}{2} N I_{AC}^2 (R_{M-AC} + R_{ch-AC} + R_{M-DC} + R_{ch-DC})$,其中, I_{AC} 为磁铁所需交流电流有效值。

对于串联型供电网络,交流损耗和直流损耗由 1 台电源补充。因此,该电源的容量比分离形式的电源容量大得多,这将严重考验功率器件的承受能力。它的输出功率 $P = \frac{1}{2} N [I_{AC}^2 \cdot (R_{M-AC} + R_{ch-AC} + R_{M-DC} + R_{ch-DC}) + I_{DC}^2 \cdot (R_{M-DC} + R_{ch-DC})]$ 。其中, I_{AC} 和 I_{DC} 为磁铁所需交流电流有效值和直流电流有效值, R_{M-AC} 和 R_{ch-AC} 分别为网孔中磁铁和谐振电抗器的交流阻抗。

图 4 示出应用于不同谐振回路中的电源拓扑结构图。其中,前级的选择主要是考虑到目前随着电力电子设备的广泛运用,大量使用的不控整流和相控整流设备对电网的谐波污染相当严重,应用三相 PWM 整流技术不仅减少了电流波形的畸变,提高了功率因数,还能为后级 H 桥逆变提供具有快速响应、高效率的直流源。目前,本工作正在设计制造 1 台串联型供电谐振回路中交流激励源的小型模型,用于研究和优化交流激励源的工作模式和结构。

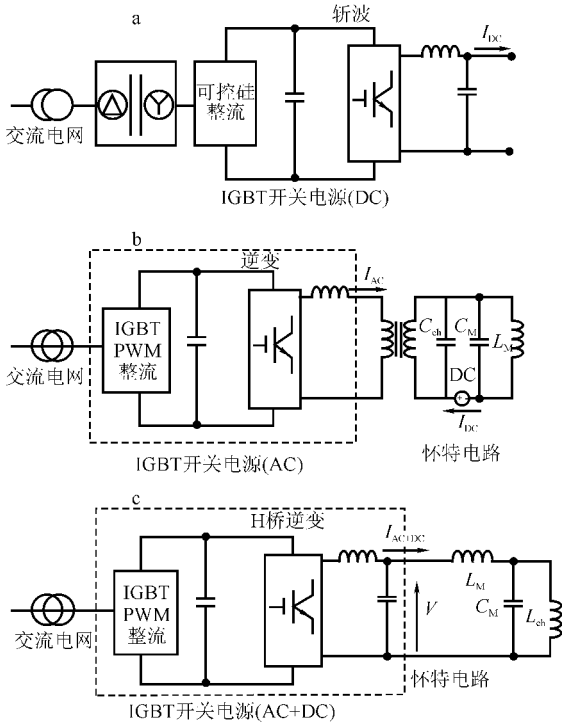


图 4 不同谐振回路中的电源拓扑结构图

Fig. 4 DC, AC, AC+DC power supply structures for PR

- a——并联供电模式中直流激励源；
- b——并联供电模式中交流激励源；
- c——串联供电模式中交流激励源

4 跟踪误差

RCS 磁铁电源包括 6 个独立的怀特电路，分别用于 B、弧区 FQ 和 DQ、直线区 FQ 和 DQ 等 6 类磁铁馈电。因此，为保证质子束流能稳定加速，必须考虑磁场跟踪的精度。否则，将导致严重的束流损耗。四极磁场的跟踪误差主要表现为四极场的梯度误差，即：

$$k = \frac{g}{B\rho} \tag{3}$$

其中： g 为四极铁磁场梯度； B 为二极铁磁通密度； ρ 为二极铁的弯转半径。

相位误差、幅值误差以及波形畸变均将导致四极铁的梯度误差 Δk ，从而引起工作点的偏移 $\Delta\nu$ (式(4))。且梯度误差可由式(5)计算。

$$\Delta\nu = \frac{1}{4\pi} \oint_c \Delta k \beta(s) ds = \frac{1}{4\pi} \oint_c \frac{\Delta k}{k} k \beta(s) ds \approx \frac{\Delta k}{k} \xi_{\text{natural}} \tag{4}$$

$$\left(\frac{\Delta k}{k}\right)_{\text{有效值}} = \left[\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} \Delta\theta^2 + \frac{1}{(1-\alpha)^2} \left(\frac{\Delta g_{\text{dc}}}{g_{\text{dc}}}\right)^2 + \right. \tag{5}$$

$$\left. \frac{\alpha^2}{(1-\alpha)^2} \left(\frac{\Delta g_{\text{ac}}}{g_{\text{ac}}}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

上两式中： $\beta(s)$ 为 betatron 函数； ξ_{natural} 为自然色品； $\alpha = I_{\text{ac}} / I_{\text{dc}}$ ； g_{ac} 和 g_{dc} 分别为四极铁磁场梯度的直流和交流成分； $\Delta\theta$ 为四极铁磁场梯度 g 相对于二极铁的磁通密度的相移。

在不考虑磁铁非线性影响的前提下，磁铁电流的跟踪精度即直接对应各类磁场跟踪精度。据此，对于 CSNS 的 RCS 磁铁电源系统的控制目标是：在加速器循环工作周期内使 6 类磁铁电流(磁场)之间相位相同，幅值的比例关系保持常数不变。

设计技术指标为：1) 6 类磁铁电流 I_M 的峰值和谷值稳定度好于 0.1%；2) 6 类磁铁的交流电流成分 I_{AC} 相位维持稳定，同步相位差 $\Delta t < 10 \mu\text{s}$ 。

应说明，磁铁电流的跟踪误差主要来源于各类磁铁电流相位误差和各类磁铁电流波形误差，而后者又包括数值控制精度和电流谐波影响两个方面。跟踪精度实现的首要前提是正确地设计磁铁电源谐振网络结构和电源励磁方式，其次是设计合理的电源控制系统(限于篇幅本文从略)。

5 总结

作为中国散裂中子源快周期同步加速器磁铁电源系统的可行性研究，给出了系统的总体结构概念设计，并对其其中的一些关键技术进行了设计研究。目前正在进行小型模型的实验研究，以为今后的预制研究奠定基础。

参考文献：

- [1] WHITE M G, SHOEMAKER F C, O' NELL G K. A 3-BEV high intensity proton synchrotron; CERN-symposium[R]. [S. l.]: CERN, 1956.
- [2] JAERI. Accelerator technical design report for J-PARC; JAERI-Tech 2003-044 [R]. Japan; Japan Atomic Energy Research Institute, 2003.
- [3] FOX J A. Resonant magnet network and power supply for the 4 GeV electron synchrotron nina [J]. IEEE, 1965, 112 : 1 107-1 126.