

# CSNS 引出冲击磁铁脉冲电源设计\*

池云龙<sup>1)</sup> 王玮

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

**摘要** 从脉冲电源参数计算, 电源整体设计, 脉冲形成网络(PFN)设计和优化等方面介绍了中国散裂中子源快循环同步加速器引出 Kicker 磁铁脉冲电源的初步设计情况, 提出一种新型的低阻抗 PFN 设计方法, 给出了脉冲电源和 PFN 的参数, 利用 PSPICE 程序仿真了充电电压为 36.5kV 情况下磁铁的励磁脉冲电流波形, 励磁电流脉冲幅值达到 5.8kA. 结合仿真结果, 分析了不同 PFN 节数和传输电缆长度对磁铁电流波形的影响.

**关键词** 冲击磁铁 脉冲电源 脉冲形成网络

## 1 引言

中国散裂中子源工程(CSNS)的快循环同步环(RCS)引出系统拟采用单圈快引出方式, 一次引出环中的两个束团, 引出能量为 1.6GeV, 引出频率为 25Hz. 整个引出系统将安放在环的一个直线段, 占据一个长度为 6m 的直线节的一部分和一个长度 9m 的直线节, 10 块 Kicker 磁铁中, 6 块放在 6m 的直线节中, 其它 4 块与 Lambertson 型切割磁铁放在 9m 的直线节中, 如图 1 所示. 束团引出期间, 两个束团之间的间隔为 310ns 左右, 所以在这个间隙内 Kicker 磁铁将建立起稳定的脉冲磁场, 要求磁铁励磁电流的上升时间控制在 250ns 左右, 最大不得超过 280ns<sup>[1]</sup>. 为了在

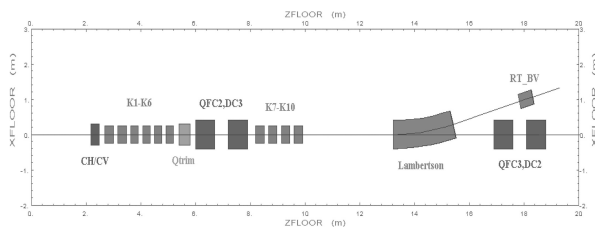


图 1 CSNS 的 RCS 引出系统

Lambertson 磁铁的入口处产生足够的偏转角和偏转距离, 要求磁铁产生的脉冲磁场峰值达到 0.0655T, 因此需要很大的磁铁励磁电流和很高的脉冲形成线(PFN)的充电电压.

## 2 主回路设计和参数

由于在加速器运行中, RCS 引出部分的辐射剂量比较大, 为了方便运行维护, 在隧道内放置的设备要尽可能少, 因此将充电电源柜和 PFN 放置在电源厅, 通过同轴电缆向磁铁传输所需要的电流. 脉冲电源的主要结构采用脉冲调制的方式, 如图 2 所示.

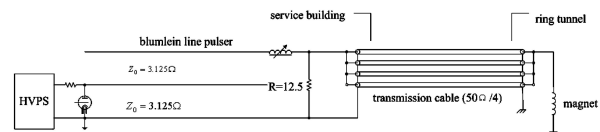


图 2 脉冲电源结构图

PFN 采用 Blumlein 结构(BPFN), 可以有效降低 PFN 的充电电压, 减少对充电元件耐压的要求, 提高电源的运行稳定性<sup>[2]</sup>. 在 PFN 的末端, 安置一个阻值为 12.5Ω 的低感抗电阻, 该电阻可以作为匹配电阻减少电路中脉冲电流的反射, 也可以作为吸收电阻吸收电路中的大部分能量. 脉冲充放电开关采用闸流管, 因为有反射电压的存在, 要求闸流管除了具有较快的导通速度之外, 还能承受较大的反压. 为了隔离束流加速时 PFN 和磁铁之间的耦合, 在 PFN 出口和匹配电阻之间放置一个饱和电感, 此电感也能有效锐化脉冲上升沿. 脉冲电源的设计参数如表 1 所示.

磁铁励磁电流的上升时间要求比较苛刻因此在可承受的工作电压内, 应尽量选择特征阻抗较大的传输

2008 - 01 - 07 收稿

\* 中国散裂中子源工程预研项目资助

1) E-mail: chiyl@ihep.ac.cn

线, 选择特征阻抗为  $12.5\Omega$  的传输线, 4 根  $50\Omega$  的传输线并联组成  $12.5\Omega$  的传输线.

表 1 脉冲电源参数表

工作电压	40	kV
运行电流	6000	A
传输电缆阻抗	12.5	$\Omega$
顶部脉冲宽度	>600	ns
脉冲上升时间	<250	ns
脉冲平顶度	<5	%

### 3 脉冲形成线的设计

为了降低脉冲形成线的充电电压, 设计采用 Blumlein 型脉冲形成线, 单根形成线阻抗约为  $3.125\Omega$ . PFN 放电产生的脉冲电流脉宽为  $T = 2n\sqrt{LC} > 600$  ns. 参考类似电源的设计和计算机模拟结果, 采用两根阻抗为  $6.25\Omega$  的 PFN 并联, 组成特征阻抗为  $3.125\Omega$  的 PFN. 这样既可使节电容  $C$  更小 ( $5\text{nF}$ ), 获得更高的平顶度; 也可使得节电感在  $195\text{nH}$  左右, 便于制造和调试. 但是由于这种方案使用了两倍数量的电容, 使系统运行的故障率提高, 因此必须对所使用电容进行严格检测, 并且并联的两根 PFN 要尽可能的对称, 避免放电不同步而引起的脉冲波形变坏. 电容规格如表 2 所示. 为了提高电流的上升时间和获得更规则的脉冲波形, 采用不均匀 PFN 的设计方法, 增大 PFN 放电端的节电容, 而且适当减少了 PFN 两端的节电感. 为了便于制造和调试, 放电端节电容为  $10\text{nF}$ <sup>[3]</sup>.

### 4 计算机模拟结果和讨论

使用 PSPICE 程序对本文电源主回路进行仿真, 分别计算了不同的 PFN 节数和传输电缆长度对磁铁电流波形的影响. 图 3 为采用 13 节 PFN 和 15 节 PFN 时的磁铁脉冲电流波形, 除了 PFN 节数不同, 其他参数均相同, PFN 的单元电容  $C = 5\text{nF}$ , 单元电感  $L = 193.5\text{nH}$ , 充电电压  $V_C = 36.5\text{kV}$ , 传输电缆的长度  $L_{cable} = 100\text{m}$ . 由图 3 可见, 不同的 PFN 节数对脉冲宽度有影响, 当采用 13 节 PFN 时, 脉冲的平顶时间为  $620\text{ns}$ , 采用 15 节 PFN 时, 脉冲的平顶时间约为  $800\text{ns}$ ; 而不同的 PFN 节数对脉冲上升时间没有影响, 图 3 中两个脉冲的上升沿波形大致相同. 虽然相同情况下, 采用较少的 PFN 节数会引起脉冲平顶度变差, 但是采用 13 节时仍能满足脉冲平顶度小于 5% 的要求.

表 2 人工线电容技术指标

电容量	5	nF
误差	$\pm 5$	%
额定电压	50	kV
峰值电流	25	kA
运行温度	-10—65	$^{\circ}\text{C}$
绝缘电阻	20000	M $\Omega$
寄生电感	15	nH
尺寸	$102 \times 203 \times 114$	mm

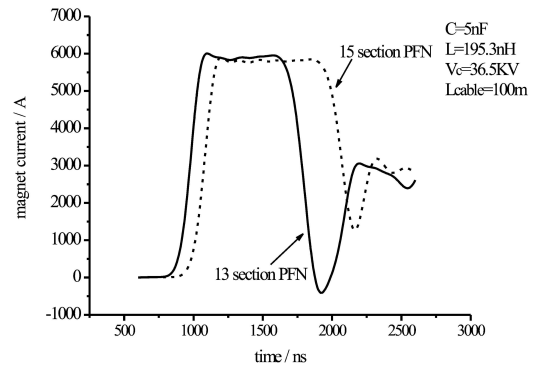


图 3 不同 PFN 节数的励磁电流波形

同轴电缆起着传输脉冲波形的作用, 为了获得更高的励磁电流, 磁铁接地采用了短路方式, 所以不可避免存在着反射电流. 对于反射电流来说, 由于传输线和 PFN 的连接阻抗是不匹配的, 会产生二次反射. 二次反射电流沿同轴电缆回到磁铁线圈. 如果传输电缆不够长, 二次反射电流就会影响主脉冲. 图 4 为传输电缆长度为  $70\text{m}$ ,  $100\text{m}$  和  $130\text{m}$  时的磁铁脉冲电流波形, 采用节数为 13 节的 PFN, 单元电容  $C = 5\text{nF}$ , 单元电感  $L = 193.5\text{nH}$ , 充电电压  $V_C = 36.5\text{kV}$ , 采用无传输损耗的电缆模型.

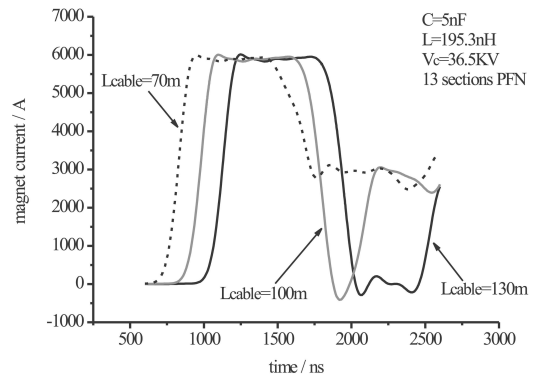


图 4 不同传输电缆长度的励磁电流波形

由图 4 可见, 当传输电缆的长度为  $70\text{m}$  时, 反射电流在主脉冲尚未结束时就到达了电缆末端, 和主脉冲的下降沿叠加, 影响了主脉冲波形; 当传输电缆长度为  $100\text{m}$  时, 反射电流就不会影响到主脉冲. 考虑到电缆的衰减因素, 本文的电缆长度选在  $110\text{m}$  左右比较合适.

由图 3, 4 可见, 当充电电压  $V_C = 36.5\text{kV}$  时, 磁铁电流的脉冲幅度  $I = 5.8\text{kA}$ , 满足了充电电压低于  $40\text{kV}$  和脉冲电流幅值达到  $5.8\text{kA}$  的设计要求. 脉冲电流在上升沿后都有一定的过冲, 这是为了保证脉冲上升时间足够短, PFN 放电端的电容都采用了两个  $5\text{nF}$  的电容并联, 并适当降低放电端的 PFN 单元电感. 仿真脉冲波形的上升时间小于  $240\text{ns}$ .

## 5 结论

本文介绍了CSNS的RCS引出Kicker磁铁脉冲电源的初步设计,提出了一种新型的BPFN方案,解决了低阻抗人工线由于节电感较低而难于制造调试的问

题.由于PFN和传输电缆的阻抗较低,电源可以通过低于40kV的PFN充电电压,获得5.8kA的磁铁脉冲电流.为防止二次反射电流影响主脉冲波形,磁铁和PFN之间的传输电缆长度不宜过短;但由于电磁波在同轴电缆中传输有一定的损耗,传输电缆也不宜过长.

### 参考文献(References)

- 1 TANG J Y, CHEN Y, CHI Y L et al. Extraction System Design for the CSNS/RCS[A]. Proceedings of 06 European Particle Accelerator Conference [C]. Edinburgh, 2006
- 2 ZHANG W, Sandberg J, Hahn H et al. SNS Extraction Fast Kicker Pulsed Power System[A]. Proceedings of 04 European Particle Accelerator Conference [C]. Lucerne, Switzerland, 2004
- 3 DONG C. Transmission Line Type Pulsed Modular Theory Foundation and Special Circuit[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1978 (in Chinese)  
(东冲. 线性脉冲调制器理论基础与专用电路[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978)

# Design of Pulse Power Supply for CSNS Extraction Kicker Magnet<sup>\*</sup>

CHI Yun-Long<sup>1)</sup> WANG Wei

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

**Abstract** A 40kV/6kA pulsed power supply was designed for the Rapid Cycling Synchrotron (RCS) extraction kicker magnet of the China Spallation Neutron Source. The calculation of the pulsed power supply's parameters, the design of power supply's system, the optimization of pulse forming network (PFN) are introduced in this paper. The magnet current pulse waveform is simulated by PSpice program in the situation of 36.5kV charging voltage. The simulation explains the influence of the PFN section number and the transmission cable length on the magnet current pulse.

**Key words** kicker, pulsed power supply, pulse forming network (PFN)

---

Received 7 January 2008

\* Supported by China Spallation Neutron Source

1) E-mail: chiyl@ihep.ac.cn