

文章编号: 1001-4322(2007)01-0121-04

电容放电式脉冲励磁电源研究*

李伟峰, 张开志, 韩 青

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 针对大型直线感应加速器单次工作的特点, 研制了一种电容放电式脉冲励磁电源。该电源利用电容器的储能特性, 取代常规电源的变压整流滤波部分, 先对其以小电流恒流充电, 然后再以大电流恒流放电来获得直线感应加速器励磁电流。对这种电源进行了理论分析和模拟计算, 模拟结果与实验结果基本一致。实验结果表明: 这种电源能够脉冲工作, 同时输入功率大幅度降低, 在输出电流 500 A, 持续时间 0.3 s 时, 输入功率 400 W, 输出功率 25 kW, 电流稳定度 0.2%, 谐波小, 电流纹波小, 所用电容器 100 块左右 (33 mF), 经济上也可承受, 是一种非常适合直线感应加速器的励磁电源。

关键词: 直线感应加速器; 脉冲励磁电源; 电容放电; 线性调整

中图分类号: TL506 **文献标识码:** A

一台大型直线感应加速器(LIA)需要几 MW 的电网功率, 其中 60%~70% 用于束运输系统的励磁电源。由于 LIA 单次工作、束流脉冲窄(不到 1 μs)的特点, 用于 LIA 的励磁电源需具备冲击式工作的能力, 即电流快速升到指定值, 持续十几 s 后, 迅速归零。国内从 20 世纪 80 年代开始研制大型 LIA, 先后研制出 12 MeV^[1-2], “神龙一号”加速器^[3]。同时也开展了适用于 LIA 的励磁电源的研究, 研制并生产了 12 MeV 恒流源^[4], 调压式恒流源^[5]。这些电源在使用过程中存在一些问题: 其一, 多台电源同时工作, 谐波大, 开机瞬间电流冲击大, 会干扰连接在电网上的其他设备; 其二, 输出电流时间过长, 线圈发热严重, 降低了加速器的工作效率; 其三, 由于 LIA 用电不均, 在大部分时间里, 供电设施的负荷很轻, 无功功率大, 浪费能源。本文对采用电容器小电流充电, 大电流恒流放电来产生束运输所需的励磁电流的可行性进行了研究。

1 工作原理

1.1 工作原理图

电容放电式脉冲励磁电源的工作原理如图 1 所示。首先, 小电流恒流源电源 E 通过 R_1 给电容器 C_1 充电, 当电容器 C_1 的电压达到额定值后, 停止充电, K_1 闭合, 电容器经过调整管、向负载线圈放电, 在负载上形成脉冲电流。由于调整管工作在线性区, 在调整管的负反馈调整的作用下, 在负载线圈上就能够得到稳定的电流。电容器的放电过程要经过 $C-R-L$ 放电和恒流放电两个阶段, 放电

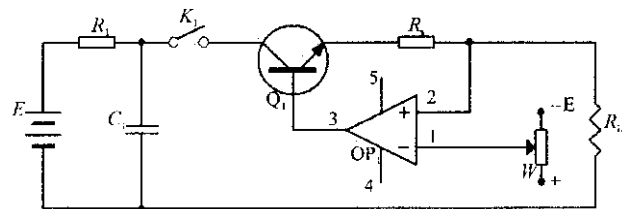


Fig. 1 Principle of the pulse constant-current source

图 1 脉冲励磁电源工作原理图

电流的宽度由电子开关 K_1 的闭合时间决定。当 K_1 闭合后的一段时间内, 调整管处于饱和状态, 放电电流从 0 开始上升, 当放电电流达到预定值时, 调整管进入线性状态, 负反馈开始起作用, 放电电流就保持稳定不变。

1.2 恒流放电

如图 1 所示, 当调整管进入线性工作区后, 电容器就处于恒流放电状态, 设刚进入恒流放电时的电容器电压为 V_1 , 恒流放电终止时的电容器电压为 V_2 , 恒流放电电流为 I , 恒流放电时间为 t , 则有

$$C(V_1 - V_2) = It \tag{1}$$

即

$$C/t = I/(V_1 - V_2) \tag{2}$$

(2) 式是恒流放电时间与电容量的关系式, 令 $I=500$ A, $V_1=100$ V, $V_2=35$ V, 可得

$$C/t = 7.7 \tag{3}$$

* 收稿日期: 2006-06-12; 修订日期: 2006-10-16

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 李伟峰(1966—), 男, 高级工程师, 主要从事 LIA 加速器电源研究; lwfcaep@yahoo.com.cn.

(3)式是电容器充电到 100 V,以 500 A 的电流放电,放电终止时的电压为 35 V 的情况下,恒流放电时间与电容量的关系。通过(3)式可计算出恒流放电时间为 10 ms,100 ms,1 s 时,所需电容量为 33 mF 电容器的数量及电容器的价格,结果如表 1 所示。从表 1 可知,当恒流放电时间大于 1 s 时,所需电容器数量大,价格昂贵。从工程角度来看,数量大,势必会降低可靠性。综合考虑到电容器的数量、价格以及电源的体积、加速器束流与励磁电源的同步控制等因素,电容器放电式脉冲励磁电源的输出电流脉冲宽度选为 0.1~1 s 为宜。

表 1 放电时间与电容量、电容器数量和价格的关系

Table 1 Relationship between the discharge time and capacitor

discharge time/s	C/F	number of capacitors	unit price/yuan	total price/yuan
0.01	0.077	3	95	285
0.1	0.77	24	95	2 280
1	7.7	240	95	22 800

1.3 饱和放电

脉冲励磁电源在输出电流上升阶段,调整管饱和,整个电路可以等效为如图 2 所示的回路。 R 是充电电阻, r 为放电回路总电阻, $R \gg r$ 。开关闭合时,电容器上的电压为 V_c ,可以得到负载电流 $i_L(t)$ 为

当 $r < 2\sqrt{L/C}$ (欠阻尼) 时

$$i_L(t) = \frac{V_c}{L\omega} e^{-\frac{1}{2\tau}t} \sin(\omega t) \tag{4}$$

式中: $\omega = \sqrt{-r^2/4L^2 + 1/LC}$; $\tau = L/r$ 。

当 $r > 2\sqrt{L/C}$ (过阻尼) 时

$$i_L(t) = \frac{V_c}{2\omega L} e^{-\frac{1}{2\tau}t} (e^{\omega t} - e^{-\omega t}) \tag{5}$$

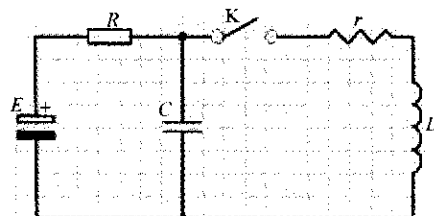


Fig. 2 Diagram of the transient equivalent circuit

图 2 瞬态等效电路图

可知输出电流以式(4)或式(5)的形式增加到预定值,如果调整管不进入线性区,放电电流的波形是一个没有平顶部分的电流脉冲,其幅值极易受到外界因素的影响,如电容充电电压、引线长短、温度、负载电阻等。

1.4 输出电流上升时间的 Pspice 仿真

电容放电式脉冲励磁电源的特点就是输出电流时间较短,如果输出电流的上升时间很长,将会严重影响到它的使用状况。利用 Pspice 软件的强大仿真能力,用图 2 所示的电路对电容放电式脉冲励磁电源的输出电流上升时间进行仿真,模拟计算出放电电流上升到 500 A 时所需的时间,即可认为是输出电流的上升时间,因为当放电电流达 500 A 时,调整管已经工作于线性区,放电电流受到线性调整,不再继续上升,而是保持稳定不变。由此得到了如图 3 所示的结果。

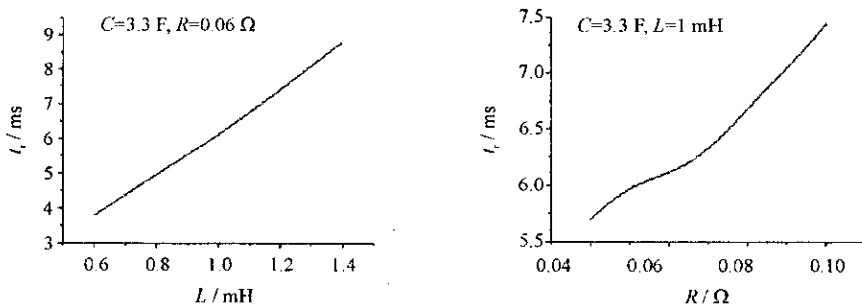


Fig. 3 The rise time of output current vs the load inductance(a) and the load resistance(b)

图 3 电流上升时间与负载电感、负载电阻的关系

从仿真结果来看,输出电流上升时间随负载电感、负载电阻的增加而增加。当负载电阻在 0.04~0.1 Ω ,负载电感 0.6~1.4 mH 之间变化时,输出电流上升时间没有超过 10 ms。根据目前“神龙一号”主线圈的情况,其电阻 $r = 0.06 \Omega$,电感 $L = 1 \text{ mH}$,因此可以判定:当脉冲励磁电源输出电流宽度为几百 ms 时,输出电流上升时间不会影响到其使用。

2 实验结果

2.1 实验样机原理图

用充电恒流源代替 12 MeV 励磁恒流源的整流滤波部分,改造成如图 4 所示的实验样机,在其上进行了验

证性实验。

用一个 100 V, 2 A 的小恒流源给电容器组充电, 电容器组由 48 个 33 mF, 24 个 10 mF, 5 个 22 mF 的电容器组成, 总容量为 1.934 F, 充电电流为 1.8 A。当电容器的电压达到 97 V 左右时, 停止充电, 开始脉冲放电, 放电时间由定时器 T 控制, 设定为 0.6 s; 用一个 4 mΩ 的标准电阻串接入负载回路测量输出电流, 负载为“神龙一号”的主线圈, 其电阻 $r = 0.06 \Omega$, 电感 $L = 1 \text{ mH}$ 。

2.2 实验结果

图 5 是输出电流波形, 从图中可看出, 当输出电流为 300, 400, 500 A 时, 电流上升时间几乎相同, 且较快, 上冲较小, 由于电容量不够, 在顶部形成了宽度不一的非常平滑的区域。在输出电流平顶部分, 电流非常平滑, 波动较小, 其电流稳定度为 0.2%, 因为测量系统的精度大约 0.2 A, 没有测到 50~500 Hz 的交流纹波, 说明纹波非常小。如果把加速器的出束时刻控制在输出电流的平顶部分, 采用电容放电式励磁电源和使用“神龙一号”的电源没有本质上的差别。图 6 是输出电流上升时间, 可知上升时间不到 10 ms, 与模拟的结果相符。

图 7 是调整管的管压降波形, 反映了调整管的工作状态。从图中可看到: 放电后, 开始时管压降突然降到接近 0 V, 延迟十几 ms 又很快上升到峰值, 最后才线性降低, 说明调整管先工作在饱和区, 然后工作于线性区。在调整管从饱和区向线性区过渡的瞬间, 管压降有个很大的尖峰, 虽然持续时间很短, 但是此时输出电流非常大, 调整管将承受很大的功率损耗, 危害很大, 要引起特别注意。产生电压尖峰的原因是: 当输出电流刚进入平稳阶段的瞬间, 输出电流变化率迅速下降为 0, 负载电感产生的自感电压也随之降到 0, 此时, 电容上的电压变化不大, 由于电容器调整管与负载串联, 原来负载自感电压将全部转移到调整管上, 造成管压降的突然增加。

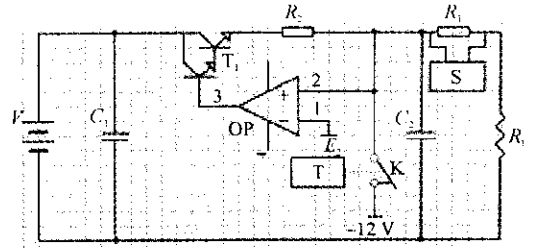
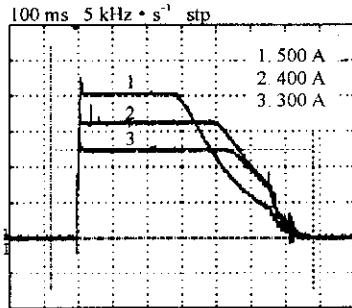


Fig. 4 Sketch of experimental setup

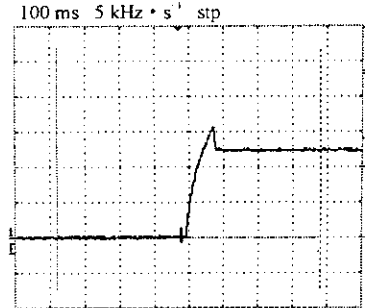
图 4 实验样机工作原理图



1:500 mV

Fig. 5 Waveform of output current

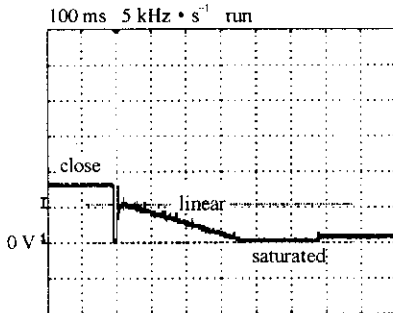
图 5 输出电流波形



1:500 mV

Fig. 6 Rise time of output current

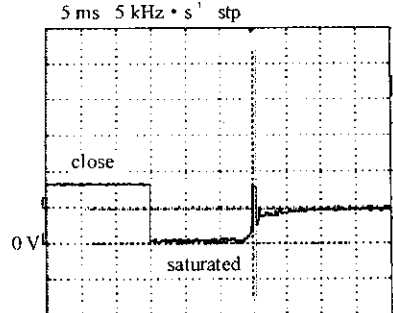
图 6 输出电流的上升时间



1:20 mV

Fig. 7 Voltage drop under regulating transistor

图 7 调整管压降波形



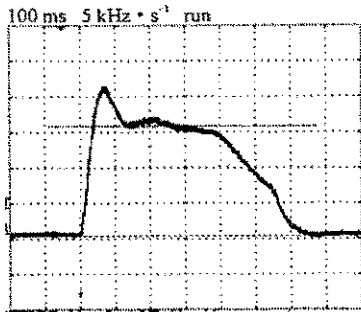
1:20 mV

2.3 抑制输出电流振荡

电容放电式脉冲励磁电源的输出电流上升非常快, 而放大回路的电流放大倍数高达 10^5 以上, 因此, 如果电路参数不合理, 输出电流将会出现严重的振荡, 如图 8 所示。可以采取两个措施来抑制输出电流的振荡: 一是优化放电回路的参数, 二是仔细调节反馈放大回路, 在运算放大器的负反馈回路中适当地增加小电容, 同时在电路中去耦电容, 得到如图 5 所示的电流波形。

2.4 与 12 MeV 主线圈电源参数比较

表 2 是电容放电式脉冲励磁电源的技术参数与 12 MeV LIA 加速器励磁电源的比较。从表中可知,电容器放电式脉冲恒流源技术参数接近、甚至部分优于 12 MeV 的电源,特别是电源的输入功率降低了将近 2 个数量级。



1: 500 mV, 2: 127 mV norm

Fig. 8 Output current waveform of circuit with unsuitable parameters

图 8 线路参数不合理时的输出电流波形

表 2 技术参数比较表

Table 2 Comparison of the parameters

technical parameter	constant-current source based on capacitor discharge	constant-current source in 12 MeV
input power/kW	about 0.4	30~40
output power/kW	25	25
Bias of output current/%	0.2	0.1
I_{pp} of ripple/%	—	0.1
duration of output current/s	0.3	more than 10
rise time of output current/ms	8	—

3 结 论

研究表明,电容放电式脉冲励磁电源的技术路线是可行的,与常规的线性恒流源比较,对电网供电没有特殊要求,几乎不会产生谐波,输出电流的纹波也非常小。在输出电流时间小于 1 s 时,所用电容器的数量不大,晶体管的个数也与 12 MeV 恒流源相当,造价低廉。它具有线路简单、维护方便的优点。同时该电源的输入功率大幅度降低,大大降低了 LIA 的电网功率。由于电源能够以脉冲方式工作,这将会缩短励磁电流的持续时间,减少线圈发热量,从而提高加速器的使用效率;结合精确的时间同步系统,电容放电式脉冲励磁电源将显著改善直线感应加速器的工作特性。

参考文献:

- [1] 石金水,刘承俊,邓建军,等. 10 MeV LIA 强流电子束的聚焦[J]. 强激光与粒子束, 1996, 8(2):209-214. (Shi J S, Liu C J, Deng J J, et al. Focusing of intense electron beams for the 10 MeV LIA. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, 8(2): 209-214)
- [2] 石金水,丁伯男,邓建军,等. 12 MeV 直线感应电子加速器[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(4): 599-604. (Shi J S, Ding B N, Deng J J, et al. 12 MeV linear induction electron accelerator. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, 9(4): 599-604)
- [3] 代志勇,章林文,邓建军,等. “神龙-I”直线感应加速器束流运输系统设计[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(6): 781-784. (Dai Z Y, Zhang L W, Deng J J, et al. Design of beam transport system for “SL-I”. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(6): 781-784)
- [4] 杨琼松. 10 MeV LIA 大功率高稳定恒流源的研制[C]//10 MeV 直线感应加速器会议文集. 1994. (Yang Q S. Development of high power constant-current source for 10 MeV LIA//Proceedings of 10 MeV LIA Conference. 1994)
- [5] 赵娟,曹科峰,邓建军,等. 调压式恒流源技术研究[C]//第八届高功率粒子束暨高压学术交流会议文集. 2001. (Zhao J, Chao K F, Deng J J, et al. Research of constant-current source based on regulating input voltage//Digest of the 8th High Power Beams and High Voltage Conference. 2001)

Pulse constant-current source based on capacitor discharge

LI Wei-feng, ZHANG Kai-zhi, HAN Qing

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-106, Mianyang 621900, China)

Abstract: A pulse constant-current source based on capacitor discharge was developed for LIA accelerator. Theoretic analysis and simulation for this source was proceeded. Numerical simulation has consistent result with experiment. The experiment result shows that this kind of source can work in pulse and its input power has reduced greatly. When the output current is 500 A and current duration is 0.3 s, this source has an output current of 0.2%, input power of 400 W and output power of 25 kW. This kind of source is very suitable for LIA.

Key words: LIA; Pulse constant-current source; Capacitor discharge; Serial regulation