

文章编号: 1001-4322(2010)03-0553-04

基于运算放大器的压控恒流源*

秦 玲, 赖青贵, 张 良, 王华岑

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 针对直线感应加速器校正线圈的供电需求, 用悬浮负载法和接地负载法研究了基于功率运算放大器的电压控制型恒流源。从理论计算、数值模拟和实验方面研究和对比了两种压控恒流源的工作原理、工作特性和输出结果。试验结果表明, 在两种恒流源上都能够得到预定的电流输出, 悬浮负载恒流源的输出更加稳定, 能够满足将来的工程运用要求。

关键词: 校正线圈; 功率运算放大器; 压控恒流源; 印制电路板; 纹波

中图分类号: TL506 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20102203.0553

恒流源(VCCS)的研究历经数十年, 从早期的晶体管恒流源到现在的集成电路恒流源, 恒定电流在各个领域的广泛使用激发起人们对恒流源的研究不断深入和多样化。稳恒电流在加速器中的使用是加速器结构改善的一个标志。从早期的单一依靠磁场线圈到加入匀场环, 到校正线圈的使用, 束流运输系统的改进有效地提高了束流的品质^[1]。校正线圈是光刻于印制电路板上的导线圈, 将其按照方位角放置在加速腔内, 通电后, 载流导线产生的横向磁场就可以起到校正偏心束流的作用^[2]。显然, 稳定可调的恒流源是校正线圈有效工作的必要条件。针对现在加速粒子能量的提高, 对校正线圈提出了新的供电需求, 本文就这一需求研究了基于功率运算放大器的两种压控恒流源, 为工程应用做技术储备。

1 设计思路

用于校正线圈的恒流源, 供聚焦和补偿时使用, 输出功率不大, 但要求调节精度高, 稳定性好, 纹波小。具体技术参数为: 输出电流 0~5 A; 调节范围 0.1~5.0 A; 调节精度 5 mA; 负载电阻 3.5 Ω; 纹波稳定度优于 1% (相对 5 A); 基准电压模块型号为 REF01。而常用作恒流电源的电真空器件稳定电流建立时间长, 场效应管夹断电压高、击穿电压低, 恒流区域窄。因此, 我们选取了体积小, 效率高, 电流调节范围宽的放大器恒流源作为研究方向。

实验基本的设计思路是通过电源板将市电降压、整流、滤波后送入高精度电压基准源得到直流电压, 输入功率运算放大器, 在输出端得到放大的电流输出, 如图 1 所示。

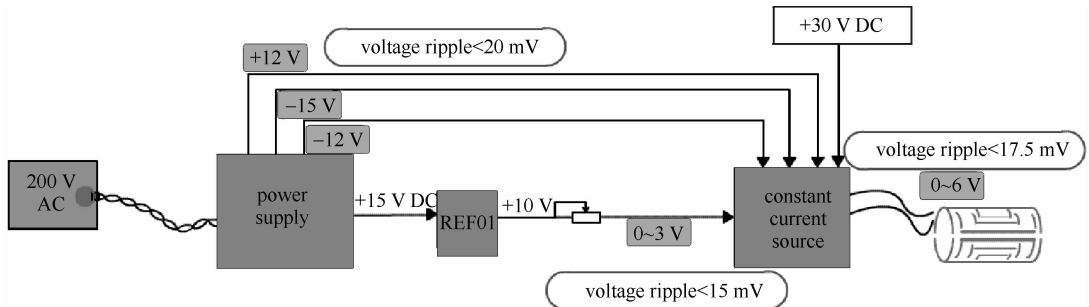


Fig. 1 Layout of holistic design

图 1 总体设计图

基于功率运算放大器的恒流源电路按其负载是否接地可分为悬浮负载恒流源(负载两端都不接地)和接地负载恒流源(负载一端接地)^[3]。下面分别对这两种电路进行模拟分析。

2 数值模拟

图 2 和图 3 分别是悬浮负载恒流源和接地负载恒流源的基本电路图。由图可见, 要得到相同的电流输出,

* 收稿日期: 2009-11-03; 修订日期: 2009-12-15

基金项目: 国防科技基础研究基金项目

作者简介: 秦玲(1979-), 女, 硕士研究生, 主要从事 LIA 电源研究; qiezi106@sina.com。

接地负载恒流源要求输入电阻和反馈电阻有较好的匹配^[4]。使用 PSpice 模拟两种电路的各项性能^[5]，得到了近似的结果。

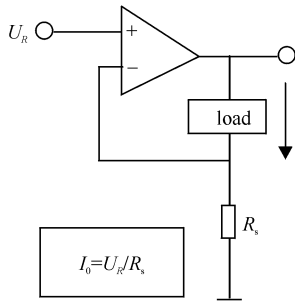


Fig. 2 VCCS for a floating load

图 2 悬浮负载恒流源电路图

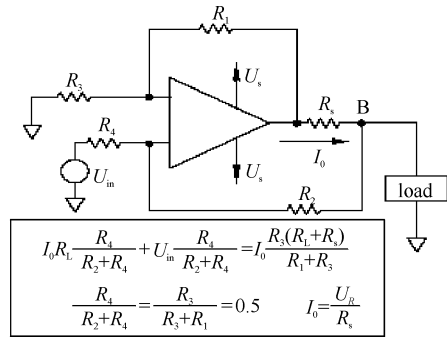


Fig. 3 VCCS for a grounded load

图 3 接地负载恒流源电路图

2.1 瞬态响应

模拟输入 0~2.5 V 直流电压时，两种电路的电流输出瞬态响应相同，见图 4。当功率运放的输入端电压为 0 时，输出的电流称为失配电流^[6]。模拟得到悬浮负载恒流源的失配电流为 0.55 mA；而接地负载恒流源的失配电流为 7.5 mA。

2.2 纹波

电路中的高频信号可以通过并联 RC 回路过滤掉^[7]，图 5 选取了 0.05 V/50 MHz 的高频信号进行模拟，稳定后的输出信号变化范围在 0.1‰。但低于 RC 阈值的工频信号一般难以滤除，只能通过降低输入信号幅度来达到要求。图 6(a)所示为输入 2.5 V 直流叠加 0.05 V/50 Hz 交流信号的输出交流曲线；图 6(b)所示为输入 2.5 V 叠加 0.001 V/50 Hz 交流信号的输出电流曲线，它的最大变化范围是 2 mA，满足 5‰纹波的要求。因此输入信号的工频干扰幅度要低于 1 mV。

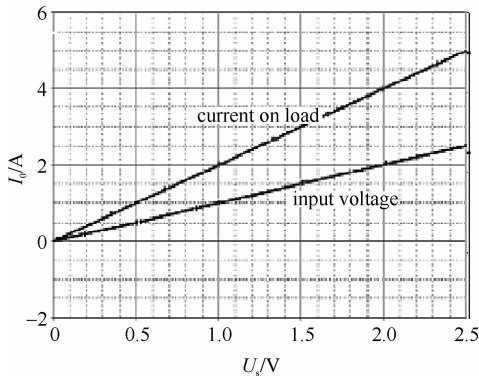


Fig. 4 DC output of VCCS

图 4 电路的直流工作曲线

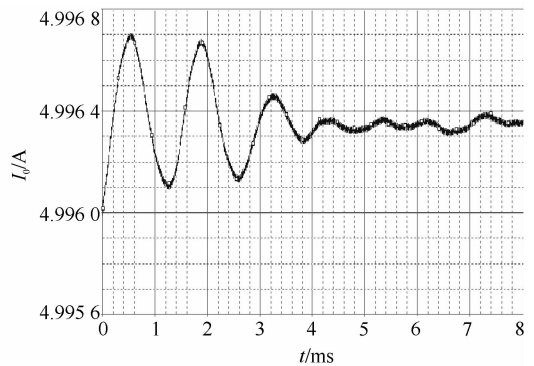
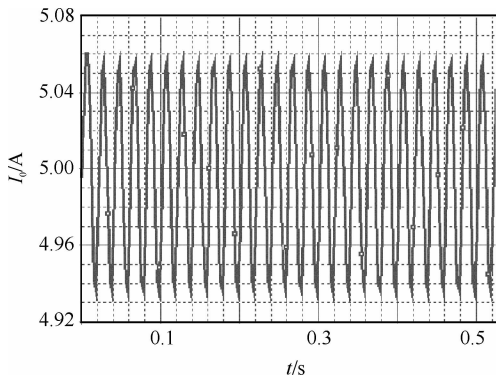
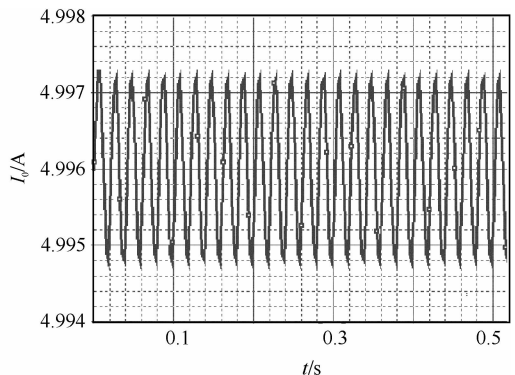


Fig. 5 Output current waveform of high frequency signal

图 5 高频信号的输出电流



(a) 0.05 V/50 Hz noise input



(b) 0.001 V/50 Hz noise input

Fig. 6 Contrast of output currents for different noise inputs

图 6 噪声输出对电流的干扰对比

2.3 温度漂移

模拟温度在 25,55,58,60,65,75 °C 变化时放大器的输出电流,如图 7(a)所示,图 7(b)所示为温度对线性度的影响。当输出电流超过 4 A 时,电路的线性度随温度升高而降低。

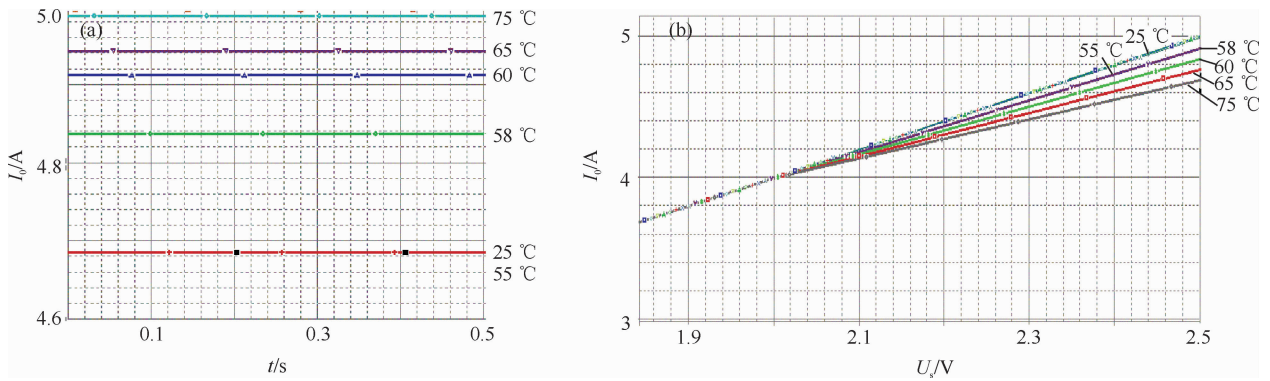


Fig. 7 Effect of temperature on output current of amplifier

图 7 温度对放大器输出电流的影响

3 实验结果分析

3.1 电压线性度

根据实验数据绘得放大器的线性度曲线如图 8 所示。两种电路的电流输出能力都在 5 A 以上,线性度较好。

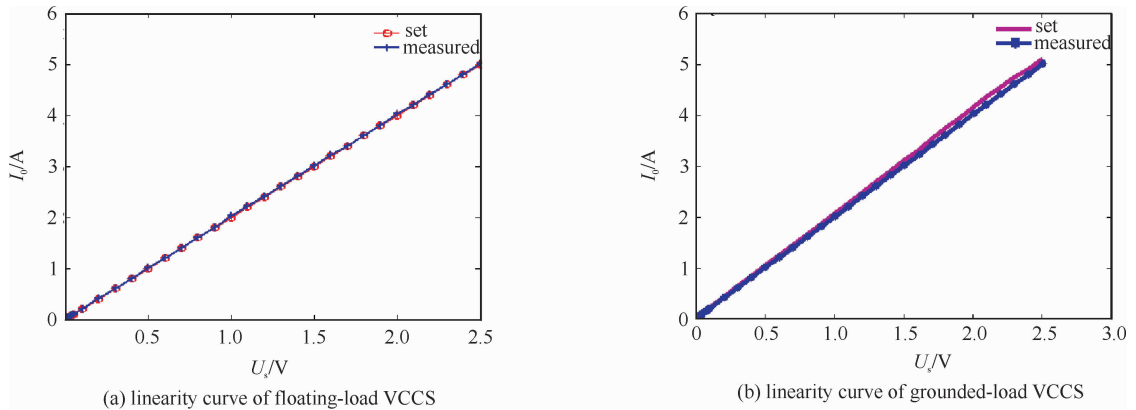


Fig. 8 Measured linearity curves of two VCCSs

图 8 两种恒流源线性度的测量曲线

3.2 纹波

图 9 所示为悬浮负载恒流源输出端的纹波, ch1 是采样电阻上的纹波, ch2 是负载上的纹波。可以测得纹波峰峰值之差约 2 mV(即 0.57 mA), 满足低于最大输出电流 1‰ 的要求。而接地负载恒流源的电压输出纹波较大, 且不稳定。输入电压在 6.5 V 之前的输出电压纹波约 10 mV(2.85 mA), 大于 6.5 V 之后纹波增长到最大 17 mV(5 mA)左右。图 10 所示为接地负载恒流源的输出电压纹波增长的过程。

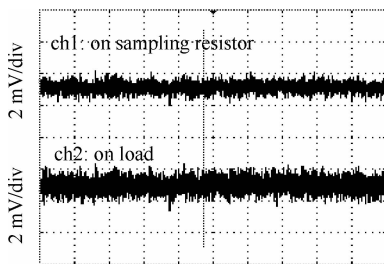
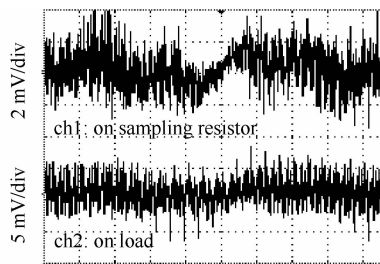
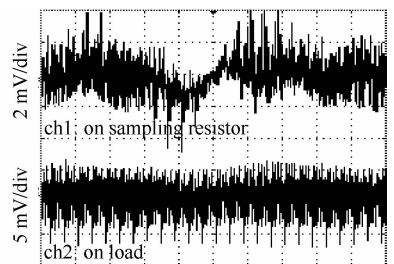


Fig. 9 Output voltage ripple of floating-load VCCS

图 9 悬浮负载恒流源纹波



(a) voltage wave before 6.5 V input



(b) voltage wave after 6.5 V input

Fig. 10 Growth process of voltage ripple for grounded-load VCCS

图 10 悬浮负载恒流源纹波

这是由电路自激振荡引起的,接地负载恒流源对于电阻的匹配度有较高的要求。通过实验发现当输入电阻和反馈电阻的个体阻值差异超过 5%时,由输入端耦合进的交流信号的相位变化会通过放大器扩大,从而引起振荡。电路的工作点选取不恰当也会使系统变成欠阻尼状态,形成振荡。因此,严格挑选匹配度高的电阻和计算外围电路的取值是解决接地负载恒流源自激振荡的重要手段。

4 小 结

两种方式的恒流源都能够输出满足要求的电流值正负 5 A,且纹波小于满量程的 1%。实验中,负载接地型恒流源的输出能力好,温度漂移小,但由于电阻匹配和工作点的问题,其线性度、纹波和稳定性等都不如悬浮负载恒流源。悬浮负载恒流源能够在安全工作区输出稳定的电流,并且保持较好的线性度,是将来工程应用的一个较理想的电路方式,但在输出大电流时需要注意功率运算放大器的散热问题。

参考文献:

- [1] Birx D. Induction linear accelerators[M]. New York: American Institute of Physics Press, 1992.
- [2] 代志勇,章林文,邓建军,等.“神龙-I”直线感应加速器束流输运系统设计[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(6): 781-784. (Dai Zhiyong, Zhang Linwen, Deng Jianjun, et al. Design of beam transport system for “SL-I” LIA. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(6): 781-784)
- [3] 陈凯良,竺树声. 恒流源及其应用电路[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1992. (Chen Kailiang, Zhu Shusheng. Constant current source and its applied circuit. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 1992)
- [4] 陈长兴,赵伟光. 电路分析基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. (Chen Changxing, Zhao Weiguang. Basic circuit analysis. Beijing: National Defence Industry Press, 2006)
- [5] 胡寿松, 自动控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994. (Hu Shousong. Automatic control theory. Beijing: National Defence Industry Press, 1994)
- [6] 曹作群,曹红,肖红清,等. 复合型精密恒流源[J]. 电测与仪表, 2002, **39**(443): 36-39. (Cao Zuoqun, Cao Hong, Xiao Hongqing, et al. Combined type of precise constant current source. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2002, **39**(443): 36-39)
- [7] 尉广军,朱宇虹. 几种恒流源电路的设计[J]. 电子与自动化, 2000, **19**(1): 45-47. (Wei Guangjun, Zhu Yuhong. Several kinds of constant current source design. *Electronics and Automation*, 2000, **19**(1): 45-47)

Voltage-controlled constant current sources with operational amplifiers

Qin Ling, Lai Qinggui, Zhang Liang, Wang Huacen

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

Abstract: In the linear induction accelerator, the power supply of rectifier loop is constant current sources. This article studied two kinds of voltage controlled constant current sources (VCCS) with operational amplifiers based on floating load and grounded load. From theory, simulation and experiment, their differences in configuration, operation character and output were comparatively studied. The results point out that the two kinds of VCCS can both produce the output in anticipation, and the floating-load VCCS can provide a more steady current output, fulfilling the future engineering requirements.

Key words: rectifier loop; operational amplifier; voltage controlled constant current source; printed circuit board; voltage ripple