

压控恒流源的动态性能研究

丁志杰 吕明召 赵志伟

(北京理工大学 信息与电子学院 北京 100081)

摘要: 研究了一种常用的恒流源电路的输出动态特性。研究发现:在负载及输出电流值不变的情况下,影响恒流源动态性能的主要因素是误差放大器积分电容的容值、反馈放大器的放大倍数等;在电路参数固定的情况下,在一定的输出电流范围内,影响系统动态性能的主要因素是负载阻值,而电流值影响很小。最后,根据实际电路设计指标,提出了改善系统动态性能的解决方案,仿真及实际电路测试证明了结论的正确性。

关键词: 放大器;恒流源;动态性能;测量

中图分类号: TP202 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Study on dynamic performance of voltage controlled constant current source

Ding Zhijie Lv Mingzhao Zhao Zhiwei

(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, the output dynamic performance of a voltage controlled constant current source based on the wide used model is researched. It is found that the main factors are integral capacitor and feedback amplification when the load resistor and output current is not changed; the main factor is the value of load resistor when the output current is in a certain range, while the current affection is very small. So the main factors are integral capacitor, feedback amplification and the load resistor. Finally, based on the design requirement of practical circuits, a solution is put forward that makes the dynamic performance better, and it proves the correctness of the conclusion by the simulation and test results of the practical circuit.

Keywords: amplifier; constant current source; dynamic performance; measurement

1 引言

恒流源是一种常用的能够向负载提供恒定电流的电路模块,被广泛应用于各种测量与控制系统中^[1-2]。通常情况下只需考虑其稳态的输出电流值是否精确,而不需要考虑其输出响应的动态性能(如上升时间、超调量等)。但在一些要求较高的场合,如火工品检测、试验中,不仅需要输出幅度恒定的电流,而且对其动态性能也提出了较高的要求,比如上升时间不超过 10 μs,超调量不超过 5%。因此有必要研究恒流源的动态性能及影响其动态性能的因素。

2 压控恒流源模型

2.1 恒流源电路

本文研究对象为图 1 所示的常用恒流源模型^[3-6],该模型由误差放大器、功率放大器、取样信号分压器及反馈放大器等组成。其中误差放大器由运放 A、电阻 R₂、R₃ 及积分电容 C 组成,其中积分电容 C 用于改善系统的动态特性;功率

放大器由 R₁、晶体三极管(功率管)T、取样电阻 R_s、负载电阻 R_L 组成;分压器为一由电阻组成的分压网络,用于调理取样信号,其分压比为 n : 1;反馈放大器的放大倍数为 G。

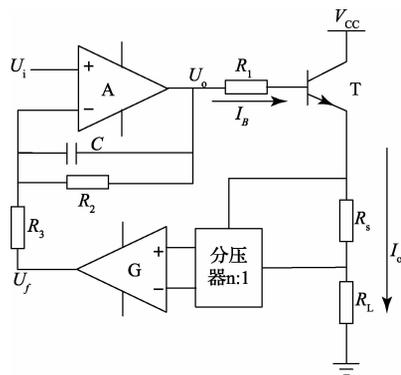


图 1 恒流源模型

2.2 恒流源电路静态响应

由图 1 所示电路模型,分析可得:

$$U_o = U_i(1 + R_2/R_3) - U_f(R_2/R_3) \quad (1)$$

$$U_f = R_1 I_o G/n \quad (2)$$

$$I_B = [U_o - U_{be} - I_o(R_s + R_L)]/R_1 \quad (3)$$

$$I_o = (1 + \beta)I_B \quad (4)$$

式中: U_i 、 U_o 为运放 A 同相输入端的电压和输出端的电压, U_f 为反馈放大器的输出电压, I_B 为晶体管 T 的基极电流, β 为晶体管的放大倍数, I_o 为输出电流。

解上述方程(1)~(4), 并取 $R_2 \gg R_3$, 可得:

$$I_o \approx U_i \cdot n / (G \cdot R_s) \quad (5)$$

可见, 输出电流与输入电压 U_i 、分压比 n 成正比, 与取样电阻、反馈放大倍数成反比^[6]。这与实际应用结果一致。

注: 分压器的引入是为了使反馈放大器能正常工作。

3 系统动态性能的影响因素

众所周知, 运算放大器和晶体三极管的模型中除阻性元件外, 还有寄生电容的存在^[7-8], 这就使得当输入阶跃信号时, 输出的动态响应呈现二阶响应特性。仿真结果表明, 当电路参数不同时, 输出响应会出现二阶响应的所有 4 种情况^[2]: 过阻尼、临界、欠阻尼、振荡。过阻尼时上升时间长; 临界时上升时间较短, 有一定超调量; 欠阻尼、振荡两种情况虽然上升时间更短, 但由于其衰减振荡或振荡特性, 一般情况下不允许出现, 应该避免。

图 2、图 3 分别是利用 Multisim12.0 进行的两组仿真结果, 其中负载 2Ω , 输出电流 2 A 。图 2 所示为过阻尼状态, 没有超调量, 但上升时间较长, 超过 $50 \mu\text{s}$; 图 3 所示为欠阻尼, 虽然上升时间较短(约 $1 \mu\text{s}$), 但其超调量超过 40% , 并伴有衰减振荡现象。在对上升时间、超调量都有严格要求的场合, 显然这两种情况都不符合要求。

因此有必要对恒流源的输出动态特性进行研究。以下采用单一变量法对可能影响恒流源动态性能的因素进行研究。

表 1 输出电流幅度的影响

输出电流/A	1	2	4	8	10	12	15
上升时间/ μs	1.74	1.55	1.48	1.43	1.08	0.96	0.80
超调量(%)	2.10	2.40	2.46	2.54	2.99	18.3	37.3

注: 上升时间是从稳态值的 10% 上升到稳态值的 90% 所需的时间。以下测试均采用相同标准。

由表 1 可以看出, 在电路参数不变的情况下, 随着输出电流的增加, 上升时间在逐渐减小, 超调量逐渐增加, 且在一定范围内变化都很小; 但当输出电流达到某个极限值(如 12 A) 后超调量变化明显加剧。这表明输出电流值是影响动态性能的因素。同时不难发现, 上升时间和超调量是一对矛盾, 这就要求在设计、调试电路时要根据实际需

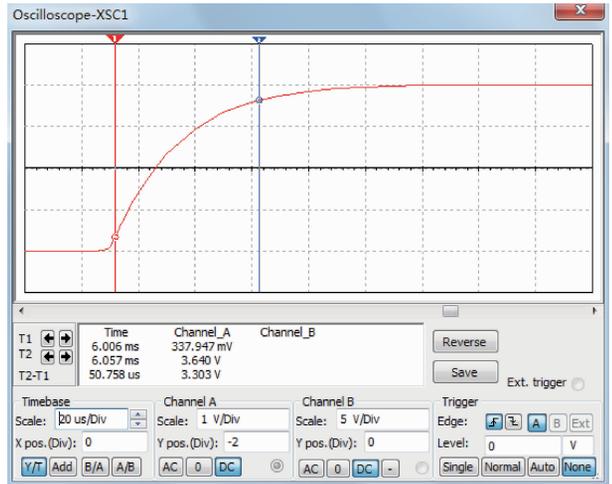


图 2 过阻尼: 上升时间过长

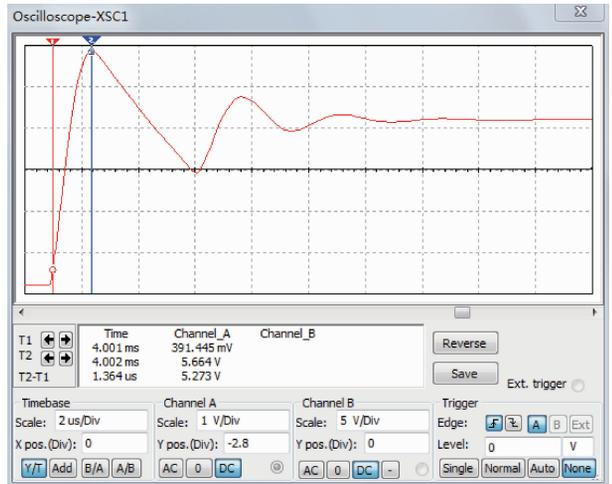


图 3 欠阻尼: 大超调量及衰减振荡

3.1 输出电流幅度对动态特性的影响

电路中各参数不变($R_s = 0.1 \Omega$, $R_L = 1 \Omega$, $C = 186 \text{ pF}$, $G = 20$, $n = 4$), 改变输出电流值(通过改变输入电压 U_i 实现), 仿真结果如表 1 所示。

求, 对参数进行综合调整。

3.2 负载电阻值对动态特性的影响

电路其他参数及输出电流值不变($R_s = 0.1 \Omega$, $I_o = 1 \text{ A}$, $C = 186 \text{ pF}$, $G = 20$, $n = 4$), 改变负载阻值, 测得数据如表 2 所示。

表2 负载电阻值对动态特性的影响

负载阻值/ Ω	1	2	4	8	10	16	20
上升时间/ μs	2.01	5.88	10.55	19.90	26.47	39.72	56
超调量(%)	2.8	1.01	0	0	0	0	0

表2显示,随着负载阻值的增大,上升时间逐渐增长,且增速比较快,而超调量则逐渐减小,直至为零。这表明负载电阻阻值是影响系统动态性能的一个重要因素。这要求在进行电路微调时,要注意最大阻值所对应的上升时间及最小阻值对应的超调量是否满足要求。

3.3 反馈放大倍数对动态特性的影响

仅改变反馈放大器的放大倍数,其他参数不变($R_s=0.1\ \Omega$, $R_L=1\ \Omega$, $C=186\ \text{pF}$, $I_o=2\ \text{A}$, $n=4$)时,测量负载端的上升时间和超调量,测得数据如表3所示。

表3 反馈放大倍数对动态特性的影响

反馈放大倍数 G	5	10	20	40
上升时间/ μs	10.83	5.20	1.78	0.68
超调量(%)	0	0	2.3	40.3(有振荡)

由表3可知,在反馈放大器的放大倍数由小变大的过程中,上升时间逐渐缩短,而超调量逐渐增加,直至有振荡的出现。可见反馈放大倍数及输入电压值(实验中为了保证输出电流恒为2A,输入电压需同反馈放大倍数做相应改变)是影响动态性能的一个重要因素。而通过表1可以看出在输出电流小于10A时,输入电压对动态性能的影响很小,这表明反馈放大器的放大倍数是影响系统动态性能的重要因素。

3.4 积分电容 C 对动态特性的影响

电路中其他参数不变($R_s=0.1\ \Omega$, $R_L=1\ \Omega$, $G=20$, $I_o=2\ \text{A}$, $n=4$),仅改变积分电容 C 的值,测得数据如表4所示。

表4 电容 C 对动态特性的影响

电容 C/pF	50	100	200	500	1 000
上升时间/ μs	0.45	0.76	1.6	6	12.5
超调量(%)	69.5 (有强振荡)	24.9	1.5	0	0

由表4可以发现,在积分电容不断增大的过程中,上升时间不断增加,超调量由强烈振荡到最终超调量变为0。可见积分电容的容值是影响输出响应的重要因素。这就要求在设计时要综合考虑上升时间和超调量两者,选择合适的电容值。

4 设计示例及解决方案

通过前面多组实验探究,找到了影响系统动态性能的

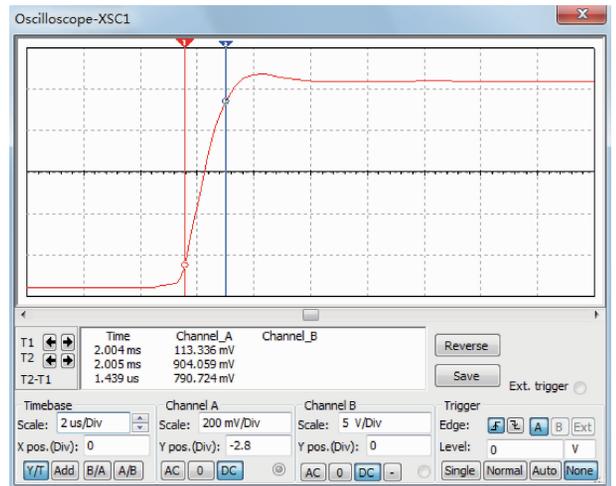
主要影响因素:积分电容、反馈放大器的放大倍数、负载阻值。输出电流值在一定范围内对动态特性的影响较小,甚至可以忽略。

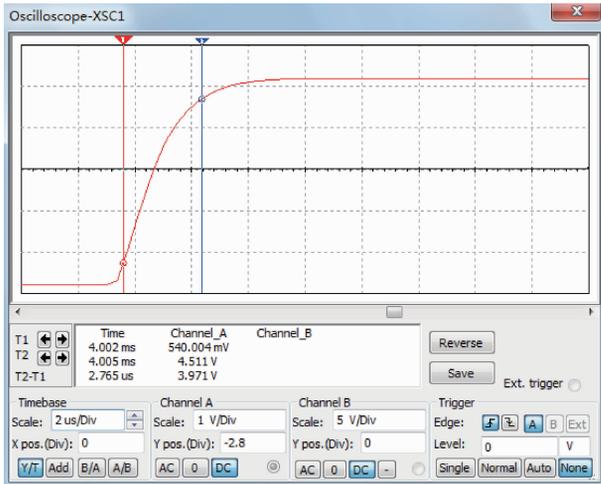
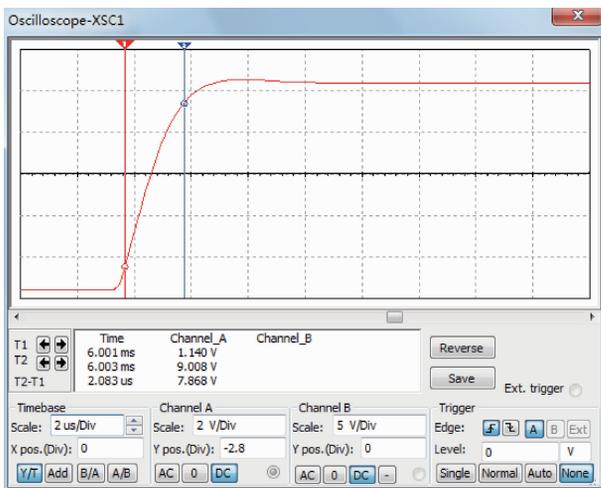
某测试系统的要求是:负载阻值范围为 $1\sim 20\ \Omega$,负载输出电流范围 $1\sim 10\ \text{A}$,最大输出电压($R_L \times I_o$) $16\ \text{V}$,恒流源上升时间小于 $10\ \mu\text{s}$,超调量小于 5% 。

根据设计要求,采用图1所示结构设计完后,通过调整电路参数^[9-10],测试发现当前设计并不能满足设计要求。通过分析知道,电流范围、负载电阻范围及反馈放大器的放大倍数在设计完成时已确定,无法改变,唯一可变的的就是积分电容。因此,改善恒流源动态特性的办法只能是改变积分电容的容值:根据负载电阻的阻值分组,每组阻值采用不同的积分电容就可以使整个工作范围内的动态响应符合设计要求。

设计时取 $R_s=0.1\ \Omega$, $G=20$, $n=4$,调试发现可将负载电阻根据阻值大小分为三档即可: $1\sim 3\ \Omega$ 一档, $3\sim 8\ \Omega$ 一档, $8\sim 20\ \Omega$ 一档。调节积分电容大小,当每档对应的电容值分别为 $186\ \text{pF}$ 、 $57\ \text{pF}$ 、 $20\ \text{pF}$ 时很好地满足了设计的要求。

图4、5、6分别给出了负载为 $1\ \Omega$ 、 $5\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 时,输出电流 $1\ \text{A}$ 的仿真结果,其分属不同的档位,可以看出此时上升时间很短,约 $2\ \mu\text{s}$,仔细观察会发现,图4、6处于临界欠阻尼状态,而图5处于过阻尼状态,鉴于每个档位负载阻值大小不同,不可能使得所有情况下的响应都处于临界欠阻尼状态。实验中多次改变负载大小及输出电流值,其动态性能均满足设计要求。故在实际电路中,可根据要求,先确定好分压比及反馈放大倍数,然后根据负载阻值的范围,更换不同值的电容,以达到设计要求。当然,负载阻值范围、设计要求不同,都会引起分档、积分电容值不同的情况^[11-12]。

图4 负载电阻 $1\ \Omega$, 输出电流 $1\ \text{A}$

图5 负载电阻 $5\ \Omega$, 输出电流 1 A图6 负载电阻 $10\ \Omega$, 输出电流 1 A

5 结 论

利用常用的恒流源模型,通过多组实验探究,找到了影响系统动态性能的因素:积分电容、反馈放大器的放大倍数、负载阻值,而电流值在一定范围内影响甚小。并结合实际案例提出了问题的解决方案:更换积分电容。经仿真及实际电路测试,所设计恒流源的动态性能均良好,满足了系统要求。现已作为恒流源模块集成在某个测控系统中。

参考文献

- [1] 丁志杰,李明勇,张小玢.基于数控电阻和恒流源的电阻测量仪[J].电子测量技术,2014,37(7):14-17.
- [2] 张玉宝,曹会云,张滨.基于单片机的数控恒流源的设计[J].电测与仪表,2011,48(6):75-78.
- [3] 黄静,何青.基于功率MOS管恒流源电路的研究[J].电力学报,2014,29(1):43-47.
- [4] 杨媛如,徐熙平.小电阻精密测量系统的设计[J].电子测量技术,2010,33(4):16-18.
- [5] 王晓俊,周杏鹏,王毅,等.一种宽量程高精度绝缘电阻测量仪设计[J].电子测量与仪器学报,2012,26(2):155-160.
- [6] 任士焱,丁颖欣,邵滨海,等.基于滞后相位校正的高精度直流大电流比较仪[J].电子测量与仪器学报,2013,27(5):415-420.
- [7] 丁志杰,张小玢.数控恒流源精度的研究[J].电子测量技术,2013,36(2):19-22.
- [8] 童诗白,华成英.模拟电子技术基础[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [9] 江进国,陈泽平,王嘉伟,等.基于功率管并联的恒流源设计与分析[J].电测与仪表,2013,50(6):115-118.
- [10] 张志文,王文举.基于ARM的二次直流电源参数测试系统设计[J].国外电子测量技术,2014,33(11):50-55.
- [11] 王彪.基于“时分复用”技术的阵列量子级联激光器驱动电源[J].仪器仪表学报,2013,34(12):55-58.
- [12] 唐享,滕召胜,黄强,等.脉宽调制式电子分析天平的漂移补偿方法研究[J].仪器仪表学报,2014,33(11):2466-2472.

作者简介

丁志杰,1960年出生,副教授。主要研究方向为电子技术的教学和电子技术应用。

E-mail: kaputt@bit.edu.cn

吕明召(通讯作者),1989年出生,硕士研究生。主要研究方向为恒流源的研究与设计,上位机的开发。

E-mail: lvmingz@126.com