

弹用伺服 PWM 驱动系统中 反馈电路的优化设计*

姚 鹏,张胜修,王道平,蔡 镔

(第二炮兵工程学院,西安 710025)

摘 要:弹用伺服系统是导弹控制系统的重要组成部分。针对基于功率放大器优化设计的问题,首先较详细地介绍了功率放大器 SA03 与其反馈电路的使用特点和应用技术,然后选用电压型负反馈电路拓扑结构,利用功率设计软件优化设计了弹用伺服 PWM 驱动系统的反馈电路,最后结合电路仿真的方式,分析和验证了本优化设计的有效性与可行性。

关键词:PWM;SA03;偏置电路;反馈电路;Multisim;功率设计软件

中图分类号:TJ760.2 **文献标志码:**A

Optimal Design of Feedback Circuit for PWM Servo Drive System in Vehicle

YAO Peng, ZHANG Shengxiu, WANG Daoping, CAI E

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract:Servo system is an important part of control system in vehicle. Focused on a problem on the optimal design of PWM power amplifier, the characteristics and the techniques about SA03 and its feedback circuit were introduced, and the negative feedback circuit topology of controlling output voltage was picked, the optimal design of feedback circuits for PWM servo drive system in vehicle was done by power design software, and the validity and feasibility of this optimal design were analyzed and proved by circuit simulation.

Keywords:PWM; SA03; bias circuit; feedback circuit; Multisim; power design software

0 引言

弹用伺服系统根据其应用需求,采用 SA03 作为功率放大器。要求其在 0~10V 的控制信号作用下,能够驱动 25V,20A 的电机负载,该负载可等效为 7Ω 与 0.1mH 的串联电路结构,因此 SA03 的工作稳定与效率对伺服系统的性能有着直接影响。SA03 是高度集成的 PWM 功率放大器件,若作为 PWM 驱动系统必须设计 SA03 外部反馈电路。反馈电路的优化设计要充分考虑到 SA03 的技术特点和该伺服系统的应用环境。

1 脉冲宽度调制放大器 SA03

1.1 SA03 内部结构

SA03 是一种脉冲宽度调制功率放大器,它

能提供给负载高达 3000W 的功率。SA03 采用 12 管脚的密闭性 MO-127 功率封装,在电路板上仅占居 3 平方英寸空间,如图 1 所示。由于其内部含带有 45kHz 的振荡器,若将 SA03 的时钟输出管脚与时钟输入管脚短接,就可将内部振荡频率(45kHz)进行二分频,从而提供 22.5kHz 的基准开关频率,若要降低开关频率或同步多个放大器,也可以将时钟输入管脚连接到外部振荡器上。SA03 内部含带有 H 电桥电路,若不考虑死区时间,当一个输出为高时,另一个输出总是低^[1-5]。

1.2 SA03 SPICE 模型

为了电路的设计与仿真,SA03 放大器可以使用两种宏模型,一种是带开关频率的脉冲触发激励模型,另一种是状态平均模型。为了提高设计的真实性与可靠性,本设计不选用状态平均模

* 收稿日期:2008-06-23

作者简介:姚鹏(1980-),男,四川人,讲师,硕士研究生,研究方向:精密仪器与机械。

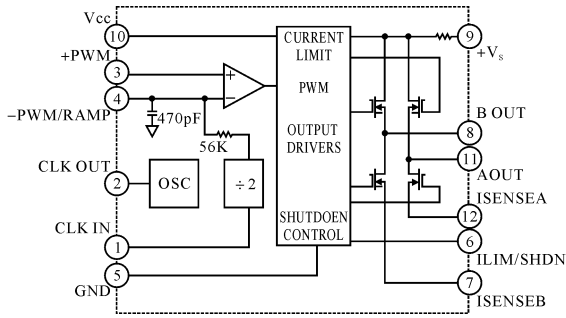


图 1 SA03 管脚定义及其内部结构图

型而选用了脉冲触发激励模型,该模型具有以下特性:[6]

- 1) 可进行脉冲激励下的时域性能分析
- 2) 构建输出电阻和电容
- 3) 精确模拟内部二极管伏安特性
- 4) 设置了精确的 R_{ON} 温度系数
- 5) 确定电源 V_S 的 I_Q 与频率的关系
- 6) 确定在开关状态下准确的死区时间
- 7) 明确电源 V_{CC} 的 I_Q 精确变化
- 8) 明确关断时 V_{CC} 上 I_Q 的变化
- 9) 构建 CLK IN 管脚内部 CMOS 缓冲器
- 10) 仿真 ILIM / SHUTDOWN 功能

2 PWM 驱动系统的控制电压型拓扑结构

该伺服系统的动力元件是永磁式直流电动机,因此反馈电路的设计是采用电压型负反馈拓扑结构。一般常用的输出电压型反馈拓扑结构主要有两种,如图 2 所示。图 2(a)为 V1 类型,是电压并联型负反馈拓扑结构,在反馈中附加了一个差分放大器,根据差分放大器通过单极性差分输入产生双极性输出的原理,仅用一个电阻就可以使它偏置到本系统的输入信号范围内。图 2(b)为 V2 类型,是电压串联型负反馈拓扑结构,相比 V1 类型虽然元件种类简单,尤其在反馈电路中都由无源器件组成,但 V2 类型的元件数量比 V1 要多。V2 的特点是当输入信号发生变化时,求和点也在变化,因此该类型与 V1 相比不能仅用一个电阻元件进行偏置。除此之外,为了形成偏置,需要用一个既能输出电流又能吸收电流的参考电源加到输入信号的相对位置上。

从稳定性的角度分析,理论上 V1 拓扑结构的稳定性要好于 V2 拓扑结构,但前提是必须选用符合设计要求的差分放大器,尤其是在差分放

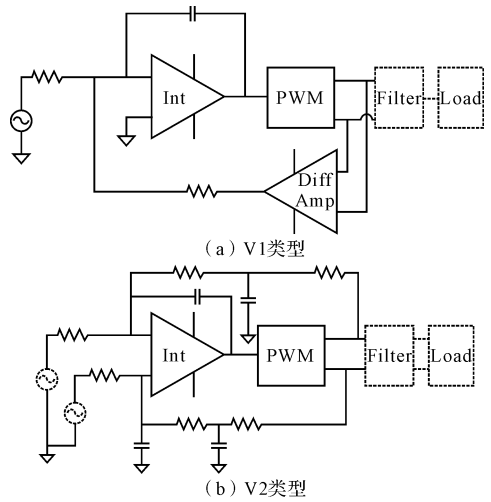


图 2 控制电压型拓扑结构示意图

大器最大共模电压输入的条件下,差分放大器能否达到设计所要求的输出范围是关键,而 V2 单凭电阻电容就实现了差分放大器的功能,V2 虽然结构简单、元件可靠性相对较高,但 V2 必须设置对称性一致的反馈电阻和反馈电容,否则会改变求和点的电压值,从而影响 PWM 驱动系统的稳定性。经过反复测试,决定采用 V1 拓扑结构。

3 V1 控制电压型拓扑结构

3.1 在 Power Design 下的设计

基于 SA03 提供的功率设计软件,根据弹用伺服系统的应用环境,对 V1 控制电压型拓扑结构的参数进行设定,如图 3 所示。

Type: V1	Schematic	SA03	Desired values	Operating points
			Zload	7
			Strat high V	25
			Strat low V	-25
			Vin high V	19
			Vin low V	9
			Vs V	25.5
			Ref1 V	10
			Ref2 V	15
			Ref3 V	10
			Diff V high V	15
			Diff V low V	0
			Diff poles/kHz	2.25
			Diff pole 2kHz	0.9
			Actual	Suggestions
			Rb1 kΩ	4.38596e-012
			Rb2 kΩ	51.8181
			Rb3 kΩ	51.8181
			Rc1 kΩ	51.8181
			Cc1 nF	13.651
			Cc2 nF	9.9756
			Cc3 nF	97.612
			Phase margin	25.773
			Peak gain dB	5.3558
			1.5% peak Hz	1154.8

图 3 V1 控制电压型拓扑参数的设定

3.1.1 几个重要的参数设定

1) PWM 输出端阻抗 Z_{load} 。由于之前所设计的功率滤波器、匹配网络和负载阻抗的波特图中没有出现很高的峰值,所以根据负载阻抗值可以将 Z_{load} 设定为 7Ω 。

2) 差分放大器极点频率 Diff poles。对差分放大器的高频共模电压有较大的影响,如果条件

允许的话,值尽可能的小,一般起始值设定为开关频率的十分之一,本次设定为 2.25kHz。

3)积分器极点频率 Int pole。该极点随着电源电压变化而改变,因此需要在最大电源电压时寻找其稳定值,一般起始值为 Diff pole 的 40%。若把极点频率设置得更低,虽然能够得到更大的相位裕度,但带宽可能难以满足要求,本次应用设定为 0.9kHz。

3.1.2 几个主要的参数及性能指标

1)偏置电阻 Rbias

$$R_{bias} = (ref1 - ref2) / [(V_{in} \text{ for Midout} - ref1) / R_i] = 5k\Omega$$

2)反馈电容 Cf

$$C_f = 1 / (2\pi * \text{int pole} * \text{Eff Rf} / 1000) = 97.619nF$$

3)PWM 增益 PWM gain

$$\text{PWM gain} = V_s * 2 / V_{ramp p-p} = 14.25$$

4)等效 PWM 增益 Eff PWM gain

$$\text{Eff PWM gain} = \text{PWM gain} * Z_{load} / (Z_{out} + Z_{load}) = 13.8$$

5)差分增益 Diff gain

$$\text{Diff gain} = R_{df} / (R_{di2} + R_{di1}) = 0.175$$

6)峰值 Peaking

Peaking, dB = 5.3558dB 发生在 1154.8Hz 的位置上

7)相位裕度 Phase margin

$$\text{Phase margin} = 50 - 5.63 * \text{peaking} + 0.223 * \text{peaking}^2 - 0.00305 * \text{peaking}^3 = 25.775^\circ$$

如图 4 所示,功率设计软件可以根据所设定的参数,自动分析生成相应的 1/F 波特图,F 即反馈放大系数,而 1/F 即 PWM 驱动系统在负反馈条件下的闭环增益。低频时 1/F 是正的,在高频时,积分器强迫 1/F 置于 0dB。如果设计环境不用考虑带宽,超调可以设置为零。但本设计环境的系统速度是有要求的,超调量是必须的,但缺点是牺牲了相位裕度,此时超调被定义为高于低频值的部分。

3.2 Multisim 环境下的 SPICE 仿真

如图 5 所示,根据 Apex 公司的功率设计软件所设定的参数和 SA03 的 SPICE 模型,利用 NI 公司的 Multisim 10 电路仿真软件,搭建相应的 V1 类型电路模型进行仿真分析。

如图 6(a)所示,+PWM 与 -PWM 在第十

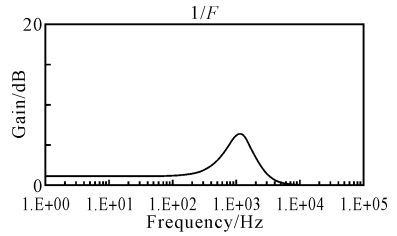


图 4 V1 控制电压型 1/F 波特图

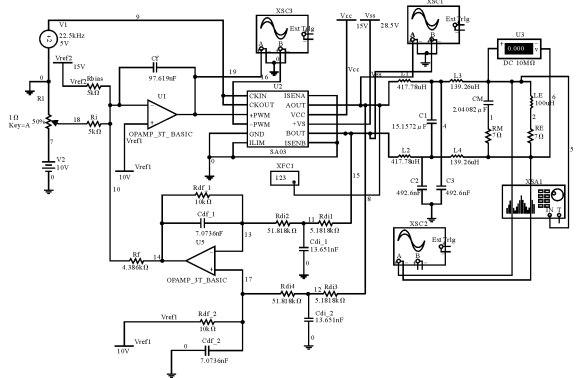
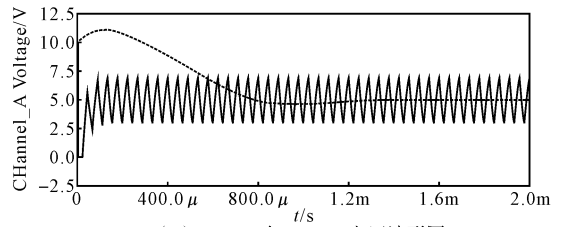
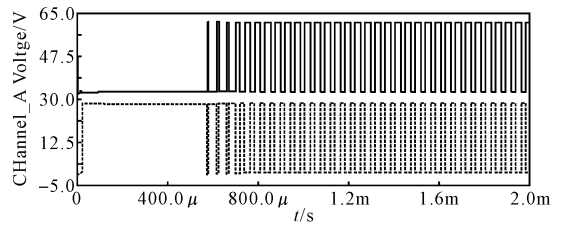


图 5 在 Multisim 环境下 V1 控制电压型电路模型图

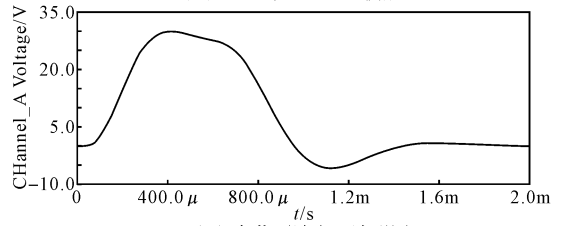
三个开关频率周期内开始交汇,在第二十九个开关频率周期内+PWM 误差已小于 0.05V,此时



(a) +PWM 与 -PWM 电压波形图



(b) Aout 与 Bout 电压波形图



(c) 负载两端电压波形图

图 6 调制设置为 50%,时间设置为 0~2ms 的波形图

可以认定输出信号已跟踪上输入信号。如图 6 (b)所示,为 40ms 附近的 Aout 与 Bout 电压波形,由于调制比为 50%,Aout 与 Bout 电压占空

比相等,但其相位差为 180° ,此时若缩小时间刻度值,可以用于分析 H 电桥输出 MOS 场效应管开断电压变化与死区时间之间的关系以及 H 电桥回环二极管压降效应。如图 6(c)所示,在电源开启后的 $414\mu\text{s}$ 处,负载两端电压峰值达 30.07V , 2ms 附近处经测量稳态误差为 $\pm 350\text{mV}$ 。

4 结 论

PWM 放大器是一个复杂的系统,系统的核心是高度非线性调制和解调,它包含了极点和零点以及高频谐波和次谐波,更复杂的是 PWM 模块的增益随着电源电压的变化而变化^[1],这些因素都使稳定性的考虑变得比较复杂,除此之外还包括测试标准的如何确定以及设备获取数据方法的选择,本次优化设计是在提高带宽的同时处理好了极点和零点的问题,从而避免了震荡,电

(上接第 223 页)

建理论就未必是最为有效的,因此,文中对建立在分数阶傅里叶变换基础上的插值重建理论作了进一步的分析和仿真,得到了有限数目卷积核的插值重建误差仿真分析结果,并给出了截断卷积核的归一化处理公式。为基于分数阶傅里叶变换的 SAR 数据处理算法实用化提供了部分理论依据。

参考文献:

- [1] L B Almeida. The fractional Fourier transform and time-frequency representations[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1994, 42(11): 3084—3091.
- [2] 陶然,邓兵,王越. 分数阶 Fourier 变换在信号处理领域的研究进展[J]. 中国科学(E 辑), 2006, 36(2):113—136.
- [3] T Erseghe, P Kraniuskas, G Cariolaro. Unified fractional Fourier transform and sampling theorem [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1999, 47(12): 3419—3423.
- [4] Ran Tao, Bing Deng, et al. Sampling and sampling rate conversion of band limited signals in the fractional Fourier transform domain[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2008, 56(1): 158—171.
- [5] 邓兵,陶然,杨曦. 分数阶 Fourier 域的采样及分辨

路仿真结果表明所做的优化设计是有效的、可行的。

参考文献:

- [1] 潘荣霖. 飞航导弹测高装置与伺服机构[M]. 北京:宇航出版社,1993.
- [2] 王兴梅,杨波. SA03 集成脉宽调制(PWM)放大器的应用[J]. 火炮发射与控制学报,2003(5):62—64.
- [3] 毕永利,刘洵,葛文奇. 脉宽调制型功放 SA03 在无人机载陀螺稳定平台中的应用[J]. 电子技术, 2003(2):49—51.
- [4] 张亚师,白新宁. 脉宽调制功率放大器 SA03 在电机控制中的应用[J]. 国外电子元件,2002(3): 56—57.
- [5] Apex Microtechnology Corp. SA03 Product Data Sheet[EB/OL]. 2006. 10
- [6] Apex Microtechnology Corp. SA03 SPICE RE-ADME [EB/OL]
- [7] 率分析[J]. 自然科学进展, 2007, 17(5):655—661.
- [6] 陶然,张峰,王越. 分数阶信号变换离散化的研究进展[J]. 中国科学(E 辑), 2008, 38(4):481—503.
- [7] 赵兴浩,陶然,邓兵,等. 分数阶傅里叶变换的快速计算新方法[J]. 电子学报, 2007, 35(6):1089—1093.
- [8] A S Amein and J J Soraghan. Azimuth fractional transform of the fractional chirp scaling algorithm (FrCSA) [J]. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(10):2871—2879.
- [9] A S Amein and J J Soraghan. Fractional chirp scaling algorithm:Mathematical model[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2007, 55(8): 4162—4172.
- [10] Liping du, Guangchuan su. Adaptive inverse synthetic aperture radar imaging for nonuniformly moving targets[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(3):247—249.
- [11] Ian G Cumming, Frank H Wong. 合成孔径雷达成像——算法与实现[M]. 洪文,胡东辉,译. 北京:电子工业出版社,2007.
- [12] A I Zayed. A convolution and product theorem for the fractional Fourier transform [J]. IEEE Signal Processing Letters,1998,5(4):101—103.