

伺服放大器设计与仿真分析

Design and Simulation Analysis of Servo Amplifier

李玲珑^{1,2} 霍良青^{1,2} 张奇峰¹ 孙 斌¹

(机器人学国家重点实验室中国科学院沈阳自动化研究所¹, 辽宁 沈阳 110016; 中国科学院研究生院², 北京 100039)

摘要: 阐述了电液伺服阀力矩马达工作原理及伺服放大器的性能要求, 设计了具有调零、反馈、限流功能的伺服放大器模型, 并运用仿真软件 OrCAD 对伺服放大器电路模型进行了性能分析和验证。在仿真的基础上研制了伺服放大器, 并对其进行了性能测试, 结果表明, 伺服放大器输出电流稳定、线性度好、响应迅速, 完全满足设计要求。

关键词: 伺服放大器 伺服控制 电压跟随器 电流负反馈 仿真

中图分类号: TH29 文献标志码: A

Abstract: The operational principle of the electro-hydraulic servo valve torque motor and the performance requirements of the servo amplifier are described. The servo amplifier model that possesses functions of zero adjustment, feedback and current limitation is designed, and the performance analysis and validation for circuit model of the servo amplifier are carried out by using simulation software OrCAD. On the basis of the simulation, the servo amplifier is fabricated, and the performance is tested. The results indicate that the servo amplifier features stable output current, good linearity, and rapid response, thus fully meets designing requirements.

Keywords: Servo amplifier Servo control Voltage follower Current negative feedback Simulation

0 引言

随着电液伺服控制技术的迅速发展, 作为辅助设备, 电液伺服阀的应用范围也不断扩展, 覆盖从民用机械到精密航天设备等关键国民经济领域^[1]。然而, 在实际的电液伺服控制系统中, 由于传感器采集的信号比较微弱, 导致控制器输出功率低, 不能直接驱动后续电液伺服阀, 因此, 在控制器与电液伺服阀之间需配用伺服放大器, 将弱电信号放大成强电信号来控制电液伺服阀。伺服放大器主要由两部分组成, 前置级为电压放大电路, 功率级为电流负反馈放大电路。伺服放大器的作用是将偏差电压信号(输入指令电压信号与系统反馈电压信号比较所得)加以运算和放大, 输出一个与偏差电压信号呈一定函数关系的控制电流; 将电流输入伺服阀力矩马达线圈, 以驱动电液伺服阀^[2], 从而控制阀芯开口度大小, 起到限幅保护作用。

1 伺服放大器设计

1.1 设计要求

伺服放大器是电液伺服控制系统的重要组成部分, 用以驱动和控制电-机械转换器, 改善电液控制元件或

系统的稳态和动态性能^[3]。其在性能上要求满足线性度好、精度高、动态响应快、频带宽、稳定性好等特点, 具有足够的输出功率和限幅特性^[1]。当出现大偏差信号时, 输出电流不超过电液伺服阀额定电流的 2 倍。本文设计了 FF102 电液伺服放大器, 相应的参数要求为: ①输入电压信号 $\pm 10\text{ V}$, 便于指令元件实现控制; ②阀电流输出 $\pm 10\text{ mA}$, 以适应力矩马达线圈驱动; ③非线性失真小于 4%; ④放大器频宽不小于 500 Hz, 以适应伺服系统高频响应。

1.2 电路设计

伺服放大器主要电路包括: 调零电路、前置放大电路、跟随电路、震颤信号发生电路和功率放大电路, 整个放大器的结构如图 1 所示。



图 1 伺服放大器电路结构框图

Fig. 1 Block diagram of the structure of servo amplifier circuit

① 调零电路。通过在前置端叠加可调电压, 调节电路基准电压^[4]。由于工作环境的变化, 当输入力矩马达线圈电流为零时, 电液伺服阀可能会产生一个较小的流量输出, 降低了伺服控制系统的稳态精度。通过调节电位计 R_1 进行零点补偿, 可以有效克服电液伺

修改稿收到日期: 2012-02-16。

第一作者李玲珑(1986-), 男, 现为中国科学院沈阳自动化研究所机械电子工程专业在读硕士研究生; 主要从事水下机器人技术的研究。

伺服零漂的影响,提高系统性能。

伺服放大器各功能模块的电路原理如图2所示。

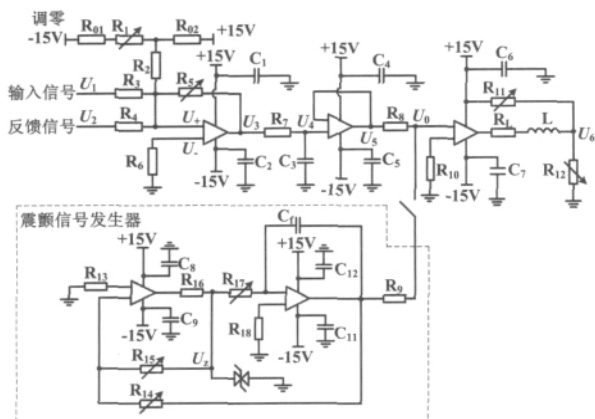


图2 伺服放大器电路原理图

Fig.2 Schematic diagram of the servo amplifier circuit

② 前置放大电路。将输入指令信号和反馈信号比较所得偏差信号进行运算放大。电路中 U_1 和 U_2 分别为输入信号和反馈信号。通过调节电位计 R_2 改变电路的电压增益,以适应后续功率放大电路的需要。

③ 跟随电路。由于电压跟随器的输入阻抗高、输出阻抗低^[5],因此,其对前置放大电路等效为开路,对功率放大电路等效为一个恒压源,有效实现了两级电路隔离,使得前置放大电路输出电压不受后级功率放大电路阻抗变化的影响,保持了电路的稳定性。即使出现大偏差信号,电压跟随器最大输出电压始终小于电源电压 15 V,确保了放大器输出电流始终小于 2 倍的电液伺服阀额定电流,实现了电路限流保护。

④ 震颤信号发生电路。由于电液伺服阀中阀芯与阀套间存在一定的静摩擦力^[2],使得电液伺服阀存在一定大小的分辨率。当输入电流的变化值小于电液伺服阀的分辨率时,阀输出流量不变。为了改善电液伺服阀的特性,在电液伺服阀的输入信号中叠加电流震颤信号^[6],信号频率为 100 ~ 400 Hz,峰-峰值为 10% ~ 20% 的阀额定电流。根据三角波信号发生器的原理分析^[5],该电路中信号频率 $f = (C_f R_{17} R_{14}) / (4U_Z R_{15})$,峰-峰值 $A = 4U_Z R_{15} R_{14}$,其中 U_Z 为稳压管稳定电压。这样便可以调节电位计 R_{14} 、 R_{15} 和 R_{17} 获得满意的震颤信号,减小摩擦力对阀的干扰,消除卡涩现象^[2]。该电路只在阀响应不稳定的情况下才接入电路。

⑤ 功率放大电路。功率级放大电路是伺服放大器的核心部分^[7],其将输入的电压信号转化为恒流电流信号输出,输出电流大小不受电液伺服阀线圈阻抗变化影响^[8],始终与偏差信号电压呈一定函数关系,保

证电路输出足够的功率,以驱动负载。

1.3 电路相关计算

如图2所示前置放大电路,设输入信号为 U_1 ,反馈信号为 U_2 ,输入电阻 $R_2 = R_3 = R_4$,根据理想运算放大器的反馈原理,有:

$$U_- = U_+ \quad I_3 + I_4 = I_5 \quad (1)$$

式中: $I_3 = (U_1 - U_+) / R_3$ 、 $I_4 = (U_2 - U_+) / R_4$ 和 $I_5 = (U_+ - U_3) / R_5$ 分别为通过电阻 R_3 、 R_4 和 R_5 的电流,从而可得:

$$U_3 = -R_5 (U_1 + U_2) / R_3 \quad (2)$$

根据跟随电路原理,输入阻抗无穷大,可得: $U_3 = U_4 = U_5$ 。对于功率放大电路部分,为了使功率级输出电流与输入电压信号呈线性关系,采用电阻 R_{12} 与电液伺服阀线圈串联,并将线圈上的电压经电阻 R_{11} 反馈到放大器的反相输入端。由于反馈电压是由电流产生的,因此该放大器被称为电流负反馈放大器^[6]。引入电流负反馈以后,相对负载变动,伺服放大器趋向于恒流源。输入电阻 $R_8 = R_9$,根据理想运算放大器的反馈原理可以得到:

$$U_6 = -R_{11} (U_5 + U_0) / R_8 \quad (3)$$

由基尔霍夫定律、欧姆定律可知:

$$I_L + I_{11} = I_{12} \quad I_{11} = -U_6 / R_{11} \quad I_{12} = U_6 / R_{12} \quad (4)$$

式中: I_{11} 、 I_{12} 和 I_L 分别为通过电阻 R_3 、 R_4 和负载线圈的电流,综合式(2)~(4)可以得到叠加输入信号与负载电流的线性关系式为:

$$I_L = \left[\frac{R_{11} R_5}{R_8 R_3} (U_1 + U_2) + U_0 \right] \left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} \right) \quad (5)$$

2 伺服放大器电路特性分析

2.1 OrCAD10.5 仿真软件介绍

Cadence 公司的 OrCAD 软件是世界上应用最广的 EDA 软件之一,它集成了电路原理图绘制、印制电路板设计、数字/模拟电路仿真、可编程逻辑器件设计等功能^[9-10]。它为用户提供了一个庞大的元器件数据库,利用库中元器件对设计的电路进行直流分析、交流小信号分析、瞬态分析和蒙特卡罗分析及最坏情况分析等仿真,结果与理论计算非常接近。

2.2 电路特性分析

根据电路原理图,在 OrCAD 软件中建立模拟电路模型,对设计电路进行仿真分析。为了减小放大电路电源电压的波动对阀的影响,提高阀的灵敏度,电液伺服阀的两组线圈采用差动工作方式^[8]。仿真时,线圈可以等效为由电阻 $R_L = 700 \Omega$ 和电感 $L = 3 \text{ H}$ 串联组成的感性阻抗。

2.2.1 线性特性

未加入震颤信号时,伺服放大电路输出 ± 10 mA 电流的直流扫描分析仿真示意图如图 3 所示。由图 3 可知,当偏差信号在 ± 10 V 范围内变化时,输入电压与输出电流呈严格的线性变化。

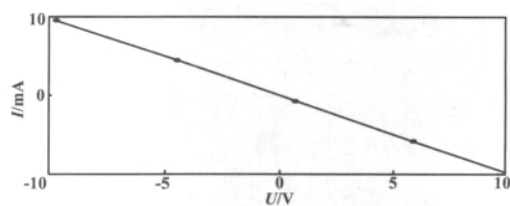


图 3 输入电压与输出电流直流扫描仿真

Fig.3 DC sweep simulation of input voltage and output current

2.2.2 频率特性

在未接入震颤信号下,分别进行输出 ± 10 mA 电流下的电路交流小信号分析,如图 4 所示。从图 4 可以看出,在一定的频率范围内伺服放大电路的输出恒定,当频率继续增大到一定值时出现峰值,而后迅速衰减。该电路频带较宽,对伺服阀的动态影响非常小,完全满足设计要求。

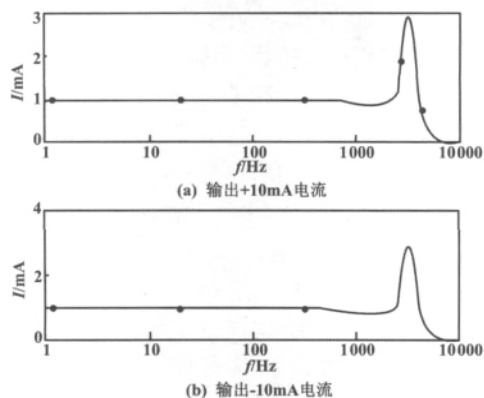


图 4 输出电流的交流小信号分析图

Fig.4 Current analysis of AC small-signal output

2.2.3 时域特性

对输出 ± 10 mA 伺服放大器电路进行瞬态分析。当输入电压为 ± 10 V 时输出电流的波形如图 5 所示。由图 5 可以看出,此放大电路响应迅速、电流稳定。

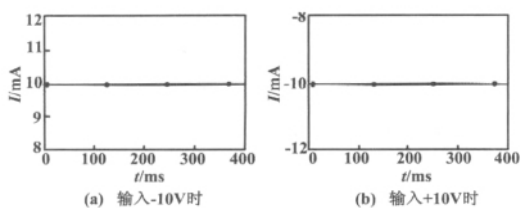


图 5 输出电流波形

Fig.5 Output current waveforms

3 伺服放大器电路特性分析

将伺服放大器电路制成 PCB 样板,在放大器输出端与电阻 R_L 之间连入电流表。输入 $-10 \sim +10$ V 之间的阶跃电压信号时,输出电流随时间有缓慢变化(运算放大器的温漂等因素影响)^[6],且与输入电压呈比例关系。测试结果与仿真计算完全符合。测试得到的电液伺服阀输入电压和输出电流数据如表 1 所示。

表 1 伺服放大电路输入输出数据

Tab.1 Input and output data of the servo amplifier

U/V	I_L/mA	U/V	I_L/mA
10	9.9	-1	-1.0
9	9.0	-2	-2.0
8	8.0	-3	-3.0
7	6.9	-4	-3.9
6	6.0	-5	-5.0
5	5.0	-6	-6.0
4	4.0	-7	-6.9
3	3.0	-8	-8.0
2	1.9	-9	-9.0
1	1.0	-10	-9.9
0	0.0		

4 结束语

采用电路仿真软件 OrCAD 对伺服放大器电路建模,并进行了线性特性、频域特性和时域特性分析,为电路的设计、元件的选择提供了理论依据,使得伺服放大器的研发周期缩短,性能得到改善。测试结果表明,系统输出电流稳定、线性度好、响应迅速,满足 FF102 电液伺服阀驱动的需要,具有实际的工程应用价值。

参考文献

- [1] 杨逢瑜. 电液伺服与电液比例控制技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [2] 梁利华. 液压传动与电液伺服系统[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [3] 董选明, 裘丽华. 基于 LH0041 的伺服电流放大器电路设计[J]. 电子技术应用, 1998(7): 30-32.
- [4] 周恩涛. 伺服放大器的设计及特性仿真[J]. 机床与液压, 2006(2): 113-115.
- [5] 秦曾煌. 电子技术[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [6] 谢小平. 伺服功率放大器的设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
- [7] 纪亚非, 钱康, 宋江斌. 多功能高品质伺服放大器的设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2006(1): 54-56.
- [8] 李言军. 电液伺服/比例放大器的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [9] 刘焱. Pspice 电路设计与实现[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [10] 卢云丹, 陈新元, 曾良才. 基于 Multisim 的伺服放大器的特性分析[J]. 仪表技术, 2007(10): 43-44.