

一种带库仑摩擦力补偿的模拟直流电机驱动器设计

杨天锡, 王伟国, 刘廷霞

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 为了用模拟电压控制直流电机, 设计了一种模拟直流脉宽调制 (PWM) 电机功率放大器。为了补偿机电控制系统中常见的库仑摩擦力, 利用加法电路从硬件上实现了库仑摩擦力补偿。试验表明, 补偿效果良好, 值得推广。

关键词: 模拟直流电机驱动器; 库仑摩擦力补偿; 绝对值电路; 三角波产生电路

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2010)07-0046-04

A Analog DC Motor Driver Design with Coulomb Friction Compensation

YANG Tian-xi, WANG Wei-guo, LIU Ting-xia

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: For purpose of using analog voltage to control DC motor, a analog PWM DC motor driver was designed. Adding circuit was used to compensate coulomb friction which commonly exists among many mechanical & electrical control system. Experimental results showed that compensation effect was good, should be promoted.

Key words: analog DC motor driver; coulomb friction compensation; absolute circuit; triangle wave generating circuit

0 引 言

在某些直流电机控制场合, 需要用模拟量去控制直流电机, 这就需要有能够接受模拟量输入的直流功率放大器。国外有不少厂家提供模拟直流功率放大器产品, 如美国 Copley 公司的模数混合输入电机驱动器, 以及美国 APEX 公司推出的 SA04、SA06 等^[1], 但这些产品价格昂贵。在精度要求不高的电机控制应用中, 采用这些昂贵的国外产品会使系统成本急剧增加。本文利用廉价的分立元件, 设计了一款低成本的模拟直流功率放大器。

在直流电机控制中, 库仑摩擦力是影响控制系统精度的重要因素之一^[2], 如果采用数字控制, 可以在软件中实现库仑摩擦力补偿; 但如果采用模拟控制方式, 则无法用软件实现库仑摩擦力补偿。本文利用加法电路, 在硬件上实现了库仑摩擦力补偿。

1 模拟直流脉宽调制电机驱动器整体设计

可以采用数字控制器和模拟电路两种方式设计模拟直流电机驱动器。第一种方法是采用带有 A/D 模块和脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 模块的数字信号处理器 (Digital Signal Processing, DSP) 或微控制单元 (Micro Control Unit, MCU), 用 A/D 转换模块采集模拟控制电压, 在程序里根据采集到的电压大小, 利用 PWM 模块产生相应占空比的 PWM 波去控制 H 桥; 第二种方法是用模拟电路直接产生 PWM 波去控制 H 桥。第一种方法思路简单, 实现容易, 但是 DSP 或 MCU 执行程序需要一段时间, 存在软件延时, 会有一定的相位滞后, 影响控制系统的相角裕度; 第二种方法由于全采用模拟器件, 不存在相位滞后, 但实现方法比第一种复杂些。本文采用第二种方法。

模拟直流 PWM 电机功率放大器主要由精密绝对值电路^[3]、三角波产生电路、电机辨向电路、H 桥功率放大电路等组成,如图 1 所示。精密绝对值电路把输入的模拟控制电压转换为正值;三角波电路产生 25 kHz 正负对称的三角波;加法电路把三角波加上一个偏移量以实现电机库仑摩擦力补偿;电机辨向电路用来判断电机的转向,当模拟控制电压 $u_i > 0$ 时,电机转向为顺时针,当模拟控制电压 $u_i < 0$ 时,电机转向为逆时针;H 桥功率放大电路把直流电源功率转换为直流电机功率。

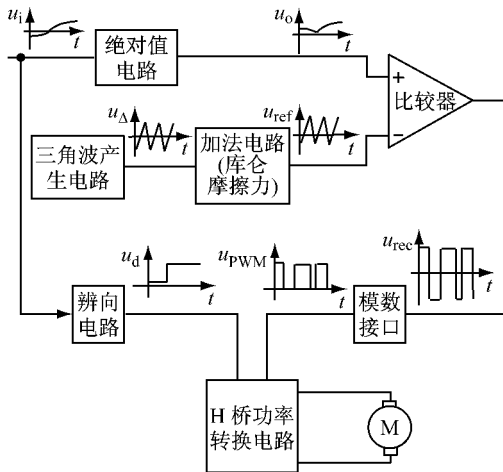


图 1 模拟直流电机驱动器整体结构图

2 模拟 PWM 直流电机功率放大器具体实现

2.1 精密绝对值电路

伺服控制器输出的模拟控制电压 u_i 有正有负,精密绝对值电路把幅值范围为 $-10 \sim +10$ V 的模拟控制电压 u_i 转换到 $0 \sim 10$ V 范围内,然后把转换后的非负电压 u_o 送入电压比较器一端,与三角波比较产生 PWM 波。本文采用两个运算放大器组成绝对值电路,如图 2 所示。

根据理想运算放大器“虚短”和“虚断”的特点,考虑到二极管导通压降及运算放大器死区,可以推出式(1):

$$\begin{cases} u_o = u_i - \Delta u, & u_i \geq \Delta u \\ u_o = 0, & u_i < |\Delta u| \\ u_o = -u_i + \Delta u, & u_i < -\Delta u \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 Δu ($\Delta u > 0$) 为二极管和运算放大器的

综合等效死区压降。从式(1)可以看出,在选择二极管时,其正向导通压降越小越好, D_1 和 D_2 的特性要一样;同时,二极管两端必须能够承受 15 V 电压。运算放大器采用 Slew Rate 大的高速运算(例如 TL082)。

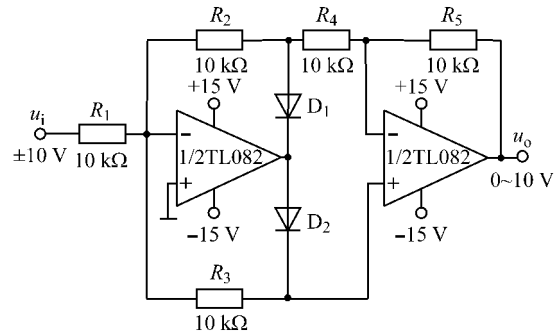


图 2 精密绝对值电路

2.2 三角波产生电路和库仑摩擦力补偿电路

有很多种产生三角波^[4-5]的方法,例如用专门的三角波集成芯片 ICL8038 或用 555 定时器产生三角波,但这些芯片都比较贵。在普通应用场合中,用迟滞比较器+积分器的方式产生三角波最为简单,调试也容易,如图 3 所示。图 3 中,方波幅值 $u_{o1} = \pm u_z$ ($u_z = 5$ V),三角波幅值为

$$u_{\Delta} = \frac{R_6}{R_7 + R_{w1}} u_z \quad (2)$$

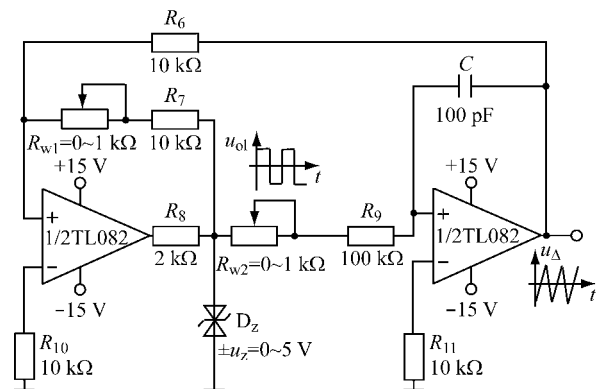


图 3 三角波产生电路

R_{w1} 用来微调三角波的幅值。三角波的频率为

$$f_{\Delta} = \frac{R_7 + R_{w1}}{4R_6(R_9 + R_{w2})C} \quad (3)$$

R_{w1} 、 R_{w2} 用来微调三角波的频率。图3产生的三角波幅值约为 $\pm 5\text{ V}$,频率约为 25 kHz 。图3中各个电阻采用精密电阻,电容采用高稳定性的瓷片电容。

理想情况下,把图3得到的三角波 u_{Δ} 加上一个 $+5\text{ V}$ 电压,得到幅值范围在 $0 \sim 10\text{ V}$ 的三角波 u_{ref} ,把绝对值电路的输出 u_o 和 u_{ref} 比较产生方波 u_{rec} (幅值不在TTL电平范围内),再通过模数转换接口,得到TTL电平的PWM波 u_{PWM} 。考虑到库仑摩擦力普遍存在于机电控制系统中,假设库仑摩擦力等效的电压为 u_f ,则当 $0 < u_i < u_f$ 时,电压比较器输出的PWM调宽波占空为0,电机不转。当 $u_i = [u_f, 10]$ 时,电压比较器输出的PWM调宽波占空为 $0 \sim 100\%$,为了补偿掉库仑摩擦力 u_{Δ} 应该加上一个小于 5 V 的电压,使三角波幅值 $u_{\Delta} = [-u_f, 10 - u_f]$ 。这样当 $u_i = 0\text{ V}$ 时,比较器输出一定占空比的方波电压,从而实现库仑摩擦力的补偿,如图4所示。图4为由反相加法和反相器构成的加法电路。从图4可知,

$-5\text{ V} \leq u_{\Delta} \leq 5\text{ V}$, $-2.5\text{ V} \leq u_f \leq 2.5\text{ V}$,因此:

$$u_{\text{ref}} = u_{\Delta} + u_f \quad (4)$$

调节 R_{w3} 就可以调节库仑摩擦力补偿的程度, $-2.5\text{ V} \leq u_{\text{ref}} \leq 2.5\text{ V}$ 。

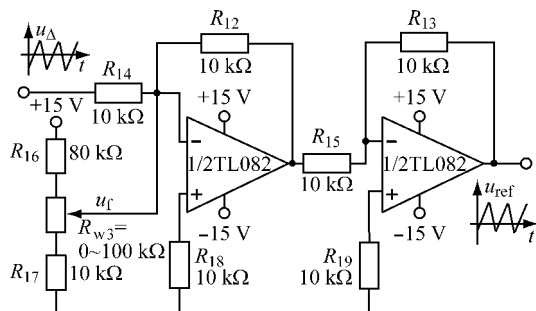


图4 库仑摩擦力补偿电路

2.3 模数接口电路和电机辨向电路

比较器的输出是方波,但方波幅值不在TTL电平之内。为了与数字PWM功率放大模块连接,必须有模数转换接口电路,采用一个普通三极管即可完成模数转换,如图5所示。

电机辨向电路由电压比较器和模数接口电路组成,如图6所示。PWM波产生电路和电机辨向电路都用到了电压比较器,采用的电压比较器灵敏度越高越好。为了防止电机在零位附近频繁换

向,方向信号应该用Schmidt触发器进行整形^[6]。

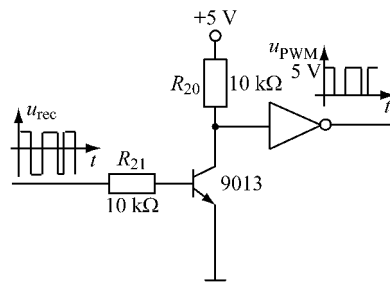


图5 模数接口电路

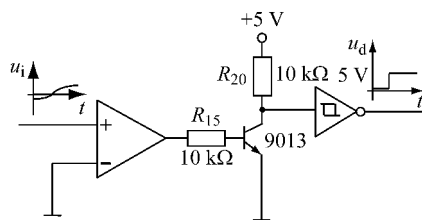


图6 电机辨向电路

2.4 H桥功率转换电路

从上文分析可知,从模拟控制电压 u_i 得到两个数字信号:数字PWM波 u_{pwm} 和电机方向信号 u_d ,用这两个信号去驱动智能功率模块(Intelligent Power Module, IPM) L6203(H桥集成芯片),辅以少量的外围数字电路,就构成了一个模拟直流电机功率放大器。TTL数字电路和L6203之间用高速光耦进行隔离。L6203外围数字电路设计比较简单,本文不作赘述。

3 试验结果

根据上面的思路进行设计,在制印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)时,合理处理好数字电路和模拟电路的电磁兼容性(主要是防止数字电路干扰模拟电路),根据具体要求调节三角波频率、三角波幅值、库仑摩擦力补偿电压。图7为电机辨向电路的输入输出波形。图8为绝对值电路的输入输出波形, Δu 为绝对值电路的死区,约为几十mV,如前所述, Δu 的大小与绝对值电路所用的二极管和运算放大器有关。图9为三角波加上库仑摩擦力补偿电压后产生PWM的波形图。图10(a)是输入为0,没有库仑摩擦力补偿的情况;图10(b)是输入为0,有库仑摩擦力补偿的情况。由图10可知,加上库仑摩擦力补偿电压

后,当输入为 0 时,输出也有 PWM 波,用来克服库仑摩擦力死区,补偿电压 u_f 越大,PWM 占空比越高。

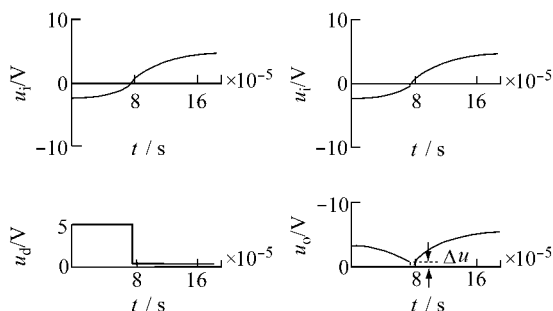


图 7 辨向电路输出波形 图 8 绝对值电路输出波形

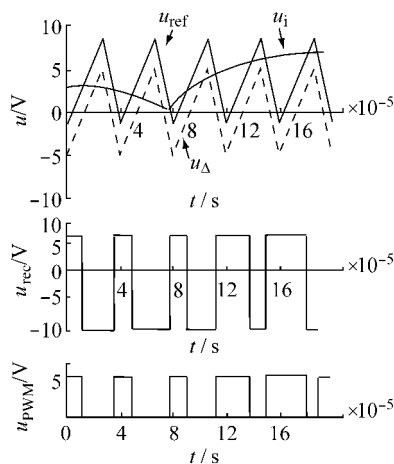
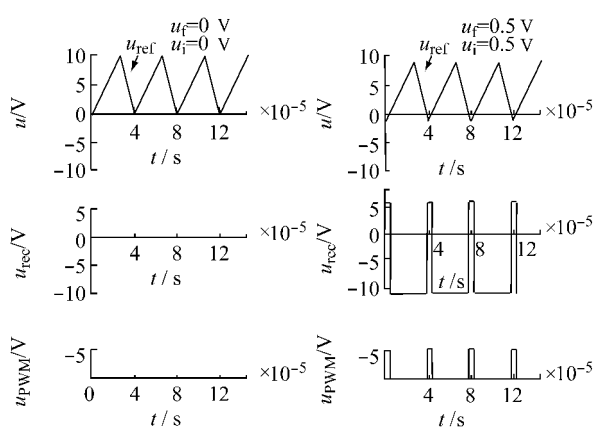


图 9 比较器产生 PWM 波

4 结 语

利用廉价分立元件设计了一种模拟直流电机



(a) 无库仑摩擦力补偿 (b) 有库仑摩擦力补偿

图 10 有无库仑摩擦力补偿 PWM 输出比较

驱动器,它能够进行库仑摩擦力补偿,具有较高的性价比,可以用在需要模拟电压控制直流电机的应用场合中。

参 考 文 献

- [1] Apex Microtechnology Corporation. Volume 11 Power Integrated Circuits Data Book [G]. 2007.
- [2] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] John D Lenk. 电路百科和故障找寻指南 (第一卷) [M]. 吕洪国, 南利平 译. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [4] 康华光, 陈大钦. 电子技术基础 (模拟部分) [M]. 4 版. 北京: 北京高等教育出版社, 1999.
- [5] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础 [M]. 3 版. 北京: 北京高等教育出版社, 2001.
- [6] 刘胜, 彭侠夫, 叶瑰昀. 现代伺服系统设计 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2001.

收稿日期: 2010-03-23

(上接第 5 页)

- [11] XuYing Lei, Li Qun Zhan, He Sheng Zhong. Simulation analysis of eccentricity of permanent magnet synchronous motor [C]// International Conference on Communications, Circuits and Systems, 2009. IC-CCAS 2009: 749-752.
- [12] JoonHo Lee, Dong Hun Kim, Il Han Park. Minimization of higher back-EMF harmonics in permanent magnet motor using shape design sensitivity with B-spline parameterization [J]. IEEE Transactions on

Magnetics, 2003, 39(3): 1269-1272.

- [13] 汤蕴璆, 史乃, 沈文豹. 电机理论与运行 (下册) [M]. 水利电力出版社 北京, 1983.
- [14] 王秀和, 杨玉波, 朱常青. 异步起动永磁同步电动机——理论、设计与测试 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [15] 刘国华, 包宏, 李文超. 用 MATLAB 实现遗传算法程序 [J]. 计算机应用研究, 2001: 80-82.

收稿日期: 2010-03-16