

位流 PID 控制器及其在直流电机中应用

谭子尤, 唐圣学, 孟凡斌, 向晓燕

(吉首大学 物理科学与信息工程学院, 湖南 吉首 416000)

摘 要: 提出了 $\Sigma\Delta$ 调制编码的一位位流信号 PID 控制器. 首先, 介绍了一个结构简单、性能高的内置 $\Sigma\Delta$ 调制器和一个位流加法器; 然后, 以它们为模块提出了位流乘法器、位流积分器和位流微分器, 进而用它们组成了位流 PID 控制器. 采用位流信号 PID 控制器, 可以避免在位流信号和多位信号之间的转换; 位流 PID 控制器具有比 Nyquist PID 控制器更少的硬件电路资源. 提出了电机的闭环位流 PID 控制系统, 并进行了仿真. 结果表明, 设计的电路可行, 效能高.

关键词: 位流; $\Sigma\Delta$ 调制器; PID 控制器; 直流电机

中图分类号: TN761

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)02-0041-04

Bit-stream PID Controller and Its Application in DC Motor

TAN Zi-you, TANG Sheng-xue, MENG Fan-bin, XIANG Xiao-yan

(College of Physics Science and Information Engineering, Jishou University, Jishou 416000, China)

Abstract: The paper presents a novel PID controllers by processing directly one-bit over-sampled $\Sigma\Delta$ coded data streams. A second-order digital $\Sigma\Delta$ modulation was introduced and used as remodulator embedded the circuit for its simple structure. The basic proposed bit streams modules, such as adder, integrator and derivative in the paper, are simple and easy to constitute the PID controllers. The loop-closed system with two PID controllers are presented and compared. The simulations are carried out and shown that the circuit complexity can be reduced efficiently and the design is feasible.

Key words: bit-stream; sigma-delta modulator; PID controller; DC motor

1 引言

PID 控制由于算法简单、鲁棒性好和可靠性高, 已广泛地应用于各类伺服系统和工业过程控制系统. 如直流电机控制^[1].

由于与 VLSI 工艺兼容和模拟元件的低灵敏度特性, $\Sigma\Delta$ 调制技术在模数转换器或者数模转换等接口电路中已经被广泛应用. 但是, 数字信号处理技术(DSP)是在 Nyquist 采样率下的多位数字信号的运算, 不能直接对 $\Sigma\Delta$ 调制的位流信号进行处理. 运用数字信号技术处理位流信号要经过抽取滤波器、DSP、插值滤波器和重新量化编码等处理过程. 直接处理位流信号则避免了这个复杂的过程; 另外, 直接处理位流信号还有减少信号连线、节约硬件资

源的优点^[2-4]. 实现直接处理位流信号要求位流处理电路在过采样率下运行.

文中提出了位流 PID 控制器及其在直流电机闭环系统中的应用. 介绍了嵌入式二阶 $\Sigma\Delta$ 数字调制器和基本位流模块, 提出了位流 PID 控制器, 给出了闭环电机 PID 控制系统的实例. 通过仿真证明了位流 PID 控制器的可行性和有效性^[5-6].

2 位流信号处理

2.1 嵌入式 $\Sigma\Delta$ 调制器

在控制系统中, 采用 $\Sigma\Delta$ 调制器将观察到的控制对象状态的模拟信号转换为数字信号, 然后经数字控制器进行处理得到数字输出控制信号, 由 $\Sigma\Delta$ DAC 转换后驱动执行器. 常用的 $\Sigma\Delta$ 调制器采用一

收稿日期: 2009-01-06; 修回日期: 2009-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677014); 湖南省自然科学基金项目(06JJ2024); 湖南省教育厅科学研究项目(08C715)

位编码信号,且有对数字和模拟信号编码功能,其输出的编码信号是位流信号. $\Sigma\Delta$ 调制器运用过采样率方法提高调制信号的信噪比,其基本原理是噪声整形技术.通过调整量化噪声在频率带中的能量分布,压缩信号带内的噪声能量,增加带外能量,从而提高带内信号的信噪比^[1].文中采用如图 1 所示的简单有效的二阶 $\Sigma\Delta$ 嵌入式编码器.

二阶数字 $\Sigma\Delta$ 调制器的传输函数为^[7]

$$Y = z^{-1}X(z) + \frac{(z-1)^2}{z^2}E(z) \quad (1)$$

式中, $Y(z)$, $X(z)$, $E(z)$ 分别是输出信号、输入信号和量化噪声.

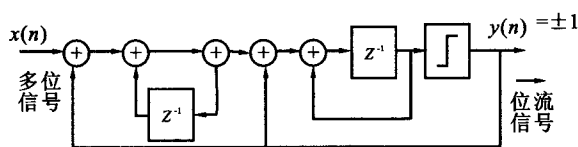


图 1 二阶 $\Sigma\Delta$ 编码器

2.2 位流加法器

位流信号是多位信号的编码信号,位流信号求和也就是两个多位信号的求和.文中采用由 P. Oleary 和 F. Malobetti 提出的位流加法器来构建其它的位流信号处理模块^[3],如图 2 所示.该结构只采用一个寄存器和一个多位的加法器组成,结构简单.

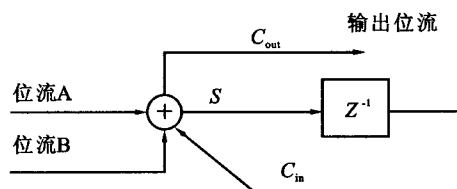


图 2 位流加法器

由图 2 可知,位流加法器的传输函数为

$$C_{out} = A(z) + B(z) - (1 - z^{-1})\text{sum}(z) \quad (2)$$

由式(2)可知,当频率较低时,输出位流信号为两个输入位流信号的和.

2.3 其他位流模块

位流乘法器、积分器和微分器是位流信号处理的基本模块.文中提出如图 3 所示的位流乘法器(a)、积分器(b)和微分器(c).它们由选择器、延迟寄存器、多位加法器和嵌入式 $\Sigma\Delta$ 调制器等组成.

结合图 3 的电路结构,可知各个模块的传输函数如下^[8]:

(1) 乘法器

$$Y(z) = kz^{-1}X(z) + k \frac{(z-1)^2}{z^2}E(z) \quad (3)$$

(2) 积分器

$$Y(z) = \frac{z^{-1}}{1-z-1}X(z) + \frac{(z-1)^2}{z^2}E(z) \quad (4)$$

(3) 微分器

$$Y(z) = z^{-1}(1-z^{-1})X(z) + \frac{(z-1)^2}{z^2}E(z) \quad (5)$$

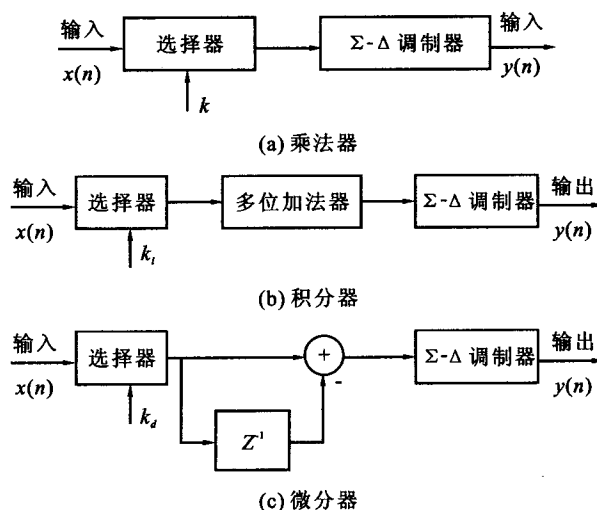


图 3 乘法器、积分器、微分器结构

由式(3)、式(4)和式(5)可知:当频率较低时,电路实现了相应的功能.由图可知,通过使用选择器和计数器,避免了多位乘法器,节约了硬件资源.

3 位流 PID 控制电机闭环系统

3.1 位流 PID 控制电机闭环系统

PID 是传统控制技术,技术成熟,稳定性好,控制精度高,仍是伺服电机最基本的控制形式.传统的 PID 控制电机闭环系统如图 4 所示.由图 4 可见,系统由 PID 算法模块、数模转换器、PWM 调制器、驱动模块、电机、光电检测模块和模数转换器组成.图 5 所示为文中提出的位流 PID 控制电机闭环系统.系统由位流 PID 算法模块、驱动模块、电机、光电检测模块和 $\Sigma\Delta$ 转换器组成.比较图 4 和图 5 可知,文中提出的闭环控制电机系统减少了数模转换器和 PWM 调制单元模块,有效节约了硬件资源.并且传统控制系统的 A/D、D/A 单元和 PWM 调制单元,集成非常困难,不利于闭环控制系统小型化、集成化的发展.

3.2 位流 PID 控制器

在当今电机控制系统中,PID 控制器是一种仍被广泛采用的方法.主要原因有 PID 控制算法简单,鲁棒性好,可靠性高,调整参数灵活;大多数的工程

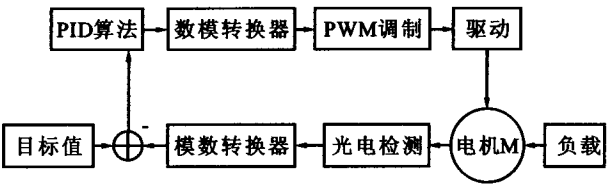


图4 典型的PID控制电机闭环系统

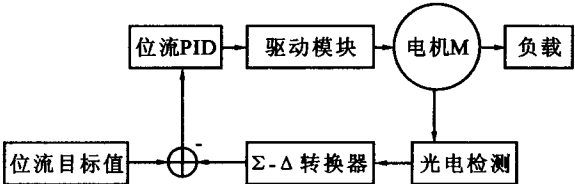


图5 位流PID控制电机闭环系统

师们都有丰富的实践操作经验. PID 控制的原理是由目标值 $R(t)$ 与实际输出值 $P(t)$ 之间的偏差 $E(t)$ 为观测量, 将它的比例(P)、积分(I)和微分(D)通过线性组合构成控制量对受控对象进行控制. PID 算法可由硬件或者软件来实现, 文中采用硬件来实现. PID 控制器连续时间的标准形式为

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

(6)

式中, $e(t) = y_r(t) - y(t)$ 是系统误差(参考输入与系统输出之间的差别), $u(t)$ 是控制变量, K_p 是比例增量常量, K_d 是微分时间常量, K_i 是积分时间常量. 显然 PID 控制器是由三部分组成, 即: 误差信号的比例乘法器、微分器和积分器, 它们的作用分别为提高反应速度、减少响应的毛刺噪声和增强系统稳定性. 离散形式的 PID 控制器可由相应的变换得到. 如果误差信号是位流信号, 那么也可以组成相应的位流 PID 控制器来完成多位的 PID 控制器的功能. 根据式(6), 并且结合式(3) ~ 式(5), 可得位流 PID 控制器标准形式为

$$u(z) = K_p z^{-1} e(z) + K_d \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} e(z) + K_i z^{-1} (1 - z^{-1})$$

(7)

式(7)是低频信号的 PID 控制器的离散时间形式. 由于位流 PID 输出信号是一种一位的编码调制信号, 也是一种类似于脉冲的调制信号, 因而在电机控制系统中不再需要进行 PWM 调制, 节约了资源.

4 仿真

以无刷直流为控制对象, 目标为对电机的速度进行控制, 在 Matlab Simulink 平台上对图4和图5所示的传统 PID 控制电机闭环系统和位流 PID 控制电机闭环系统建模并进行仿真^[5]. 仿真结果如图

6 所示, 虚线表示传统的 PID 控制结构的响应, 实线为位流 PID 控制结构响应. 比较两者可以看出, 差别很小, 说明在比较少的硬件资源下, 取得了理想的控制效果. 图7为1位PID控制器与多位PID控制器的响应差别. 图8为当电机运动系统的转动惯量突变为原来2倍时, 文中的位流PID和文献[5]中的位流PI控制下的系统响应曲线, 分别如图8(a)

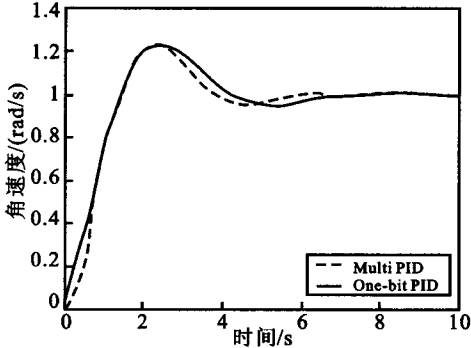


图6 直流电机的阶跃响应

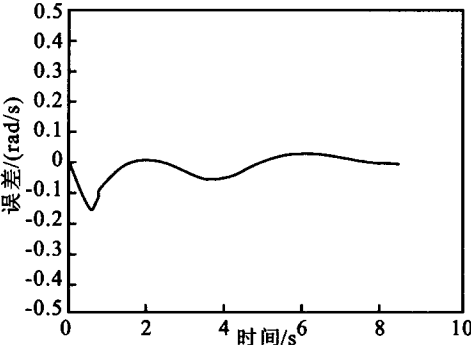


图7 1位与多位PID控制系统的响应差别

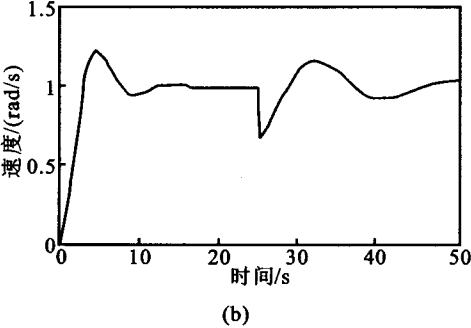
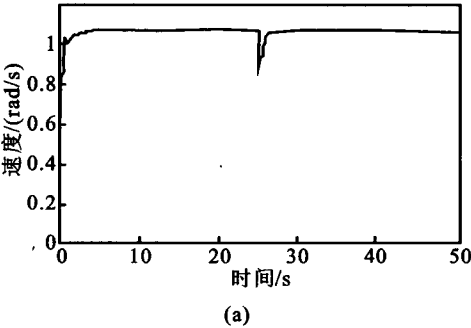


图8 转动惯量突变的响应曲线

和图 8(b)所示. 当转动惯量发生较大突变时, 在受参数限制的位流 PI 控制器的控制下, 系统有较大的超调, 调节时间也较长, 而文中 PID 控制器的控制效果则好的多.

5 结束语

文中首次提出了位流 PID 控制器, 并将其应用于闭环电机的速度控制. 所提的位流 PID 控制器具有如下优点: 避免了 D/A 转换器和 PWM 逻辑单元, 尽量少用多位乘法器和加法器, 从而节约了硬件资源. 对所提的控制系统进行了仿真, 仿真结果与理论一致, 说明方案可行.

参考文献:

- [1] Karray F, Gueaieb W, Al - Sharhan S. The hierarchical expert tuning of PID controllers using tools of soft computing[J]. IEEE Trans, 2002, 32(1): 77 - 90.
- [2] Tang K S, Kim Fung Man, Guanrong Chen, et al. An optimal fuzzy PID controller[J]. IEEE Trans, 2001, 48(4): 1 - 8.
- [3] Betin F, Pinchon D, Capolin C A. A time - varying sliding surface for robust position control of a DC motor drive[J]. IEEE Trans, 2002, 49(2): 47 - 52.
- [4] 唐圣学, 何怡刚. 位流信号处理及应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(27): 68 - 72.
- [5] Wu X, Goodall R M. One - bit processing for digital control[J]. IEE Proc - Control Theory Appl, 2005, 152(4): 403 - 410.
- [6] 褚子乔, 王东辉, 侯朝焕. 高性能连续时间 Sigma - Delta 调制器系统级设计[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(8): 45 - 47.
- [7] Fujisaka H, Kurata R, Sakamoto M, et al. Bit - stream signal processing and its application to communication systems[J]. IEE Proc. - Circuits Devices Syst., 2002, 149(3): 159 - 166.
- [8] David A, Johns, David M L. Design and analysis of delta - sigma based IIR filters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems - II: Analog and Digital Signal Processing, 1993, 40(4): 233 - 240.
- [9] 李罗, 洪纛. 一种高性能的 $\Sigma - \Delta$ A/D 转换器的设计[J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(1): 136 - 139.

作者简介:

谭子尤 男, (1976 -), 硕士, 讲师. 研究方向为高性能有源滤波器设计.

唐圣学 男, (1976 -), 博士, 副教授. 研究方向为集成电力电子器件.

(上接第 40 页)

- [3] James Bao Yen Tsui. Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach[M]. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [4] 陈鹤, 靳定蓉. 高动态扩频接收机中数字匹配滤波器的 FPGA 设计[J]. 通信与计算机, 2006(5): 85 - 87.
- [5] 沈业兵. 数字匹配滤波器的递归折叠实现[J]. 北京理工大学学报, 2006(8): 730 - 733.
- [6] 邹琼. 直扩系统折叠匹配滤波器设计[J]. 电子测量技术, 2006(2): 33 - 35.
- [7] 周平. 扩频数字接收机匹配滤波器的设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(9): 158 - 161.
- [8] 邢富领. 基于软件无线电的短波 OFDM - CDMA 通信系统的研制[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(2): 164 - 166.

作者简介:

赵慷慨 男, 硕士. 研究方向为 GPS 导航接收机.