

# 无刷直流电动机数字 PID 控制的研究

羊彦, 景占荣, 毕强, 韩星

(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 根据无刷直流电动机的特性, 讨论了数字 PID 控制系统的设计原理和实现方法。并以电梯拖动系统为例, 设计了一个以自适应数字 PID 为基本调节单元的无刷直流电机控制系统, 给出了仿真曲线。结果表明, 数字 PID 算法和模拟算法相比, 具有控制灵活、精度高、易于高度集成化等优点。

**关键词:** 无刷直流电动机; 数字 PID; 电梯拖动系统

中图分类号: TM33 文献标识码: A 文章编号: 1007-449X(2003)04-0299-04

## Study on the digital PID control of the brushless DC motor

YANG Yan, JING Zhan-rong, BI Qiang, HAN Xing

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The design principle and realization method of the digital PID control system are discussed according to the characteristic of DC brushless motor. Taking the elevator system as an example, the DC brushless motor control system, based on the digital adaptive PID adjusting is given, and the experimental curve is presented. Results show that the digital PID arithmetic is flexible, high precision and easy integration compared with analog arithmetic.

**Key words:** DC brushless electromotor; digital PID; elevator dragging system

## 1 引言

无刷直流电动机的驱动, 一直是这种电机值得探讨的课题。随着微电子技术的迅猛发展及大功率快关断器件的产生, 使该类电机的驱动技术日趋完善, 性能价格比越来越高。从而使这种机电一体化产品在起吊、曳引、电梯等高精度要求的应用场所显示出强大的生命力。特别是这类电机具有功率密度高, 无电火花及无线电干扰, 容量范围大(小到几瓦, 大到上万千瓦)等优点, 不但可以进入有刷直流电机的一切应用场所, 而且可以应用于一些特殊要求的场合, 如防爆、防腐、航天、航空等领域<sup>[1]</sup>。因此, 对这类电机如何进行最佳驱动, 仍是目前探索的热点课题。

收稿日期: 2003-05-06

作者简介: 羊彦(1970-), 女, 博士研究生, 研究方向为信号与信息处理、电工理论与新技术;

景占荣(1946-), 男, 教授, 研究方向为信号与信息处理、电工理论与新技术。

## 2 控制系统原理

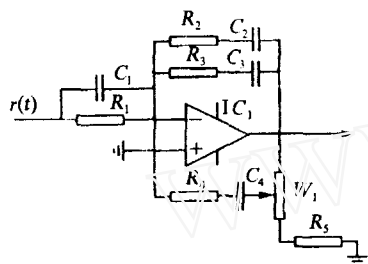
### 2.1 PID 控制器

PID 控制器是工业控制过程中应用最多的一种控制方式。其原因是: ① 由于 PID 控制器具有简单而固定的形式, 在很宽的工作范围内都能保持较好的鲁棒性; ② 给设计人员提供了一种简单而直接的调节方式。图 1(a) 是一种用于电梯系统的模拟 PID 调节电路图, 图中由  $R_1, C_1$  构成微分调节器,  $R_2, C_2, R_3, C_3, R_4, C_4$  分别构成不同增益和不同时间常数比例积分调节器。三种不同积分器的组合用来跟踪控制对象的不同变化速度, 增加了控制系统的带宽, 使调节系统的动态误差减小。

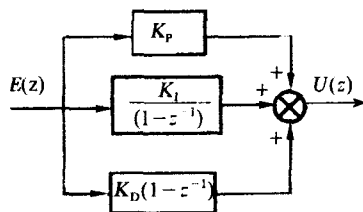
2.2 数字 PID 控制器

为了使这种经典的控制方法适应于更复杂的控制环境,提高它的精度和自适应性,出现了许多新的数字 PID 控制方法。例如自适应 PID 控制、智能 PID 控制等,把现代控制理论、模糊控制理论和神经网络理论应用于控制过程中的 PID 参数调节,使其控制效果达到最佳。图 1(b) 表示一个基本的数字 PID 控制器。

数字 PID 控制器的最大优点之一就是系统参数  $K_p, K_i, K_d$  的可变性,从而可以方便地将智能控制理论应用到系统中,例如模糊 PID 控制、神经网络 PID 控制等,也就提高了系统的最优性和灵活性<sup>[3]</sup>。



(a) 模拟 PID 控制电路



(b) 数字 PID 控制器结构

图 1 PID 控制原理

Fig. 1 PID control principle

3 无刷直流电机电梯控制系统的设计

3.1 无刷直流电动机的电气特性

为了满足电梯控制系统快速响应的要求,当控制信号改变时,要求电动机的转速变化能迅速跟上控制信号的变化,这就要求电动机的动态过渡过程越短越好。无刷直流电机的动态过程是一个复杂的机电瞬变过程,其动态特性框图如图 2 所示<sup>[4]</sup>。图 2 中外施电压  $U(s)$  和负载转矩  $T_L(s)$  为系统输入,  $\Omega(s)$  为输出。

无刷直流电动机的动态方程为<sup>[5]</sup>

$$u = e + i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (1)$$

$$e = C_e \Phi_n = K_e \Omega \quad (2)$$

$$T_{em} = T_L + R_a \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (3)$$

$$T_{em} = C_T \Phi i_a = K_T i_a \quad (4)$$

速度函数为

$$\Omega(s) = G_1(s)U(s) + G_2(s)T_L(s) \quad (5)$$

$$G_1(s) = \frac{K_t}{(K_t^2 + R_a R_a)(1 + s\tau_{em})}$$

$$G_2(s) = \frac{1 + s\tau_c}{R_a \left[ \frac{K_t^2}{R_a R_a} + (1 + s\tau_c)(1 + s\tau_m) \right]}$$

式中:  $L_a$  为绕线电感;  $R_a$  为绕线电阻;  $J$  为转子转动惯量;  $R_a$  为阻力系数;  $K_t$  为转矩系数;  $T_L$  为负载转矩;  $T_{em}$  为电磁转矩;  $\tau_c$  为电气时间常数,  $\tau_c = L_a/R_a$ ,  $\tau_m$  为机械时间常数,  $\tau_m = J/R_a$ ;  $\tau_{em}$  为机电时间常数。

由上可知: ① 无刷直流电动机的感应电动势引入了与电动机角速度成正比的负反馈信号,可以增加系统的有效阻尼,见式(1)、(2)<sup>[5]</sup>; ② 电机的电磁特性及电磁参数(如  $\tau_c, R_a, L_a$ ) 和电流的上升率有关,是控制系统内环电流上升率的依据; ③ 机械参数( $\tau_m, T_L, \tau_{em}$ ) 是决定速度环参数和稳定性的主要依据。

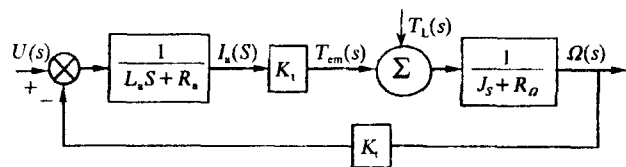


图 2 无刷直流电动机动态特性框图

Fig 2 The block diagram of DC brushless motor

3.2 控制系统的设计

3.2.1 总体设计

整个控制系统由三部分组成,如图 3 所示。图 3 中虚线框定部分是电流变化率和过电流控制回路,由硬件电路构成,以便提高响应速度。外环为速度环,用 PI 控制器构成,其中积分器用分离  $\beta$  控制。内环用 PID 控制。图 4 为整个系统硬件结构图。

3.3.2 系统工作过程

根据运行轨迹实时提供的给定速度信息  $V_g(k)$  与实测的  $V'_r(k)$  进行比较,求得误差信息  $e(k)$ 。  $e(k)$  经 PI 运算,输出  $e_0(k)$ ,再经过最大值限制电路,输出电流给定控制电压  $V_{ig}(k)$ 。考虑到积分环对大超调量的延迟性,为使系统有较快的响应,给回路中串联一个积分分离开关  $\beta$ ,其控制方法如图 3 所示,  $\beta=1$  表示开关闭合。  $V_{ig}(k)$  和电流反馈值  $V_{ir}(k)$  比较后形成电流环输入误差  $e'(k)$ 。该误差信号经 PID 运算,形成调整电压  $V_r(k)$ ,经过硬件组成的调整网络,输出驱动信号  $V'_r$ 。再由功率电路驱动电机运行。值得注意的是,在电流环中,采样速率比速度环高 10 倍,为 0.2 ms,相当于开关频率为 5 kHz。这是由于电机的  $\tau_c$  和  $\tau_m$  之

差异而确定的。同时该环的微分支路和传统用法不同的是  $K_D[e'(k) - e'(k-1)]$  取负号, 用来限制  $e'(k)$

大的阶跃形成的瞬上冲, 形成前沿消隐的效果, 保证电流环工作的可靠性。

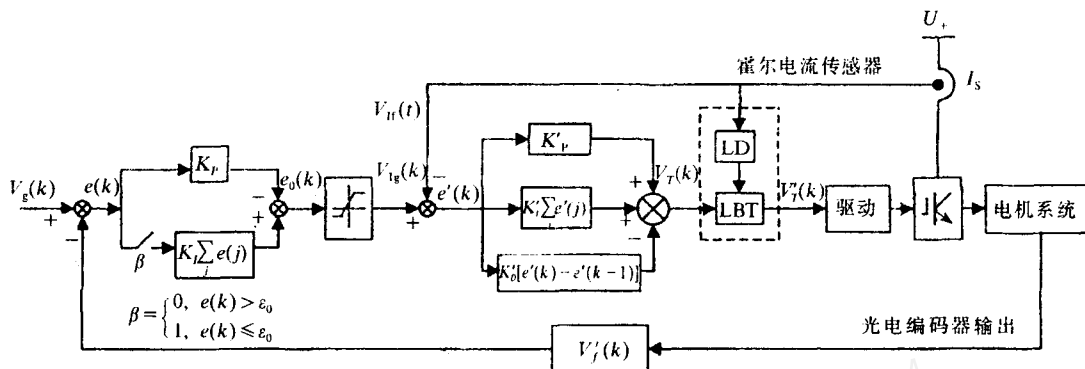


图 3 控制系统原理框图

Fig. 3 The principle block diagram of control system

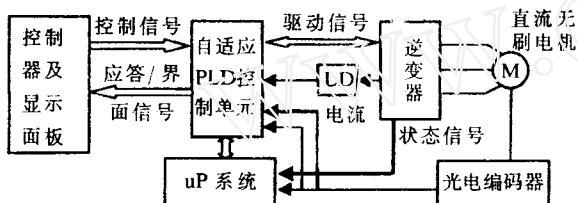


图 4 控制系统硬件结构图

Fig. 4 The hardware structure of control system

表 1 仿真主要参数表

Table 1 Simulation parameter

$\tau_m/s$	$\tau_c/s$	$T_{PWM}/s$	$T_v/s$	$R_a/\Omega$	$L_a/mH$
3	0.09	0.0002	0.002	0.047	4.5

### 4.2 系统仿真

由于串级 PID 中两级参数的不同, 先分别进行仿真, 然后进行整体仿真。在单级仿真过程中, 本着先比例、后积分、再微分的整定步骤: ① 首先加入比例部分。将比例系数由小到大调整, 并观察系统响应, 直至性能指标满足要求为止。② 然后加入积分环节。首先取较大的  $T_i$ , 并取  $K'_p = 0.8 K_p$ , 反复调整  $T_i$  和  $K_p$ , 使在较小的  $T_i$  下使系统有良好的动态特性和最小静差为止。③ 若响应速度仍不能满足要求, 例如上升速率等, 可调节微分环节。该环节根据取值的正、负, 将使前沿有不同的效果, 根据系统的要求, 选择最佳的参数。

## 4 系统的仿真

### 4.1 仿真参数的确定

#### 4.1.1 运行速度图

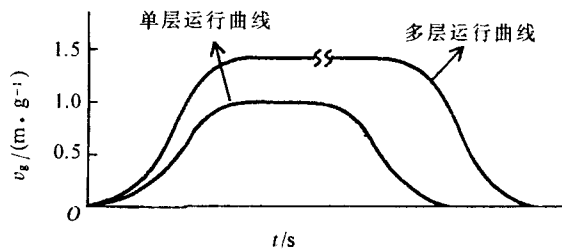
它是由计算机根据实际过行逐点计算出来的。根据楼层高度和每次连续运行层数的不同运行曲线各不相同。计算好的数据存于 ROM 中, 以备实时调用。图 5(a) 中的仿真实验是以运行比较复杂的单层运行曲线进行模拟的。

假设楼层距为 3.5m(实验层距), 在 1.6m 处设置位置传感器, 则形成具有图 5(a) 所示的单层运行速度曲线和图 5(b) 所示的加速度曲线。

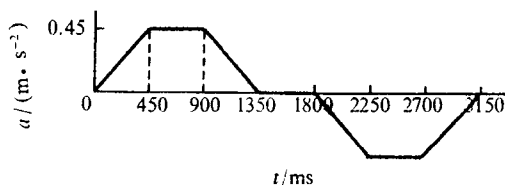
#### 4.1.2 参数确定方法

电机的参数  $L_a, K_t, J, R_a, R_\Omega$  等可以通过实测获得, 并由此求得  $\tau_m, \tau_c, \tau_{em}$  等参数, 用来对两级 PID 调节系统的  $K_p, K_i, K'_p, K'_i, K'_D$  (见图 3) 等参数进行计算和整定。本控制系统中使用 Ziegler-Nichols 设定方法<sup>[2]</sup>, 并将电机连同曳引系统近似为一阶惯性系统加纯延时环节来表示。从而可以按  $K_p = \frac{1.2T}{K\tau}$ ,

$T_i = 2\tau, T_D = 0.5\tau$  求得内、外环的 PID 控制参数, 并且构成了如图 6 所示的仿真系统。在用 MATLAB 语言对图 6 进行仿真时, 系统主要参数的设定如表 1 所示。



(a) 直流无刷电机运行速度图



(b) 单层运行的加速度曲线

图 5 电梯运行的速度和加速度曲线

Fig. 5 The speed and acceleration of elevator

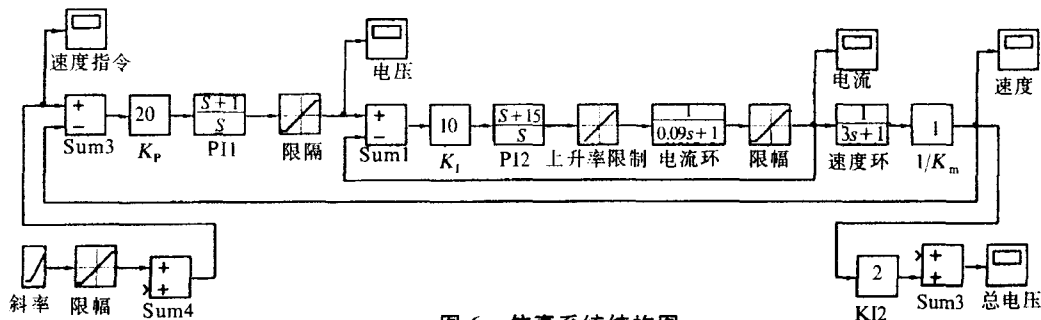


图6 仿真系统结构图

Fig. 6 The structure of simulation system

仿真的方法是,在分段仿真的情况下,使主要参数范围得以确定,然后按图 5(b) 给出的加速度曲线,产生各运行点的速度参数值如图 7 所示,其中图 7(a) 为给定速度曲线。当在  $(1 \pm 0.5)\tau_m$  范围内变化时,都能可靠跟踪,见图 7(b)。图 7(c) 示出了内环电流调节规律;图 7(d) 为当机械时间常数有偏差 ( $\tau_m = 1.2s$ ) 时的响应曲线,可以明显看出,单层运行时间缩短了 0.3 s,最高速度增加了 0.15 m/s,整个平层精度保持不变。

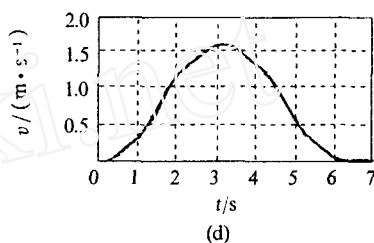


图7 系统仿真曲线

Fig. 7 The simulation waveform of control system

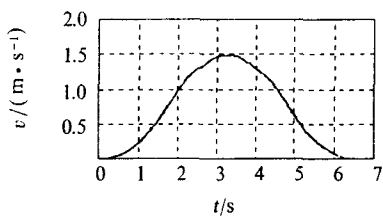
### 5 结论

对原系统进行数字化改造具有如下优点:①大大地简化了原控制系统的硬件开销。由于整个 PID 算法完全由一块专用单片机完成,使外围器件减少了 1/2,降低了成本;②引入了自适应 PID 参数修正算法,使跟踪性能及可靠性均明显提高,对不同  $\tau_m$  时的适应性有所提高<sup>[4]</sup>,并保证了在不同温度环境下的稳定性;③对于不同控制对象,只需通过改变 EEPROM 中的参数,即可改变软件中有关参数,因此增加了系统的通用性。

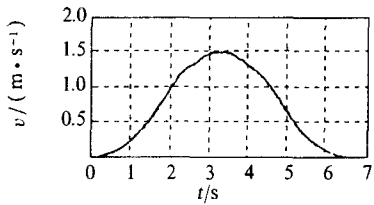
#### 参考文献:

[1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.  
 [2] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1998.  
 [3] 金雍. 电流型稀土永磁无刷直流电机控制系统设计[J]. 电力电子技术,2000:34(3)  
 [4] 符日曦,高磁场永磁式电动机及其驱动系统[M]. 北京:机械工业出版社,1997.

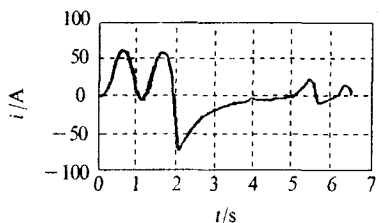
(编辑:徐兴华)



(a)



(b)



(c)