

文章编号: 1005—7277(2001) 02—0007—04

稀土永磁无刷直流电动机数字 PID 控制的研究

金 雍, 羊 彦, 崔继彬, 毕 强

(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘要: 根据直流无刷电机的特性, 讨论了数字 PID 控制系统的设计原理和实现方法, 并给出了实验曲线。结论表明数字 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: 直流无刷; 数字 PID

中图分类号: TP273⁺. 1; TM33

文献标识码: A

Study on digital PID control of the lanthanum eternal magnetism brushless DC electromotor

JIN Yong, YANG Yan, CUI Ji-bin, BI Qiang

(Northwest University of Technology, Xi'an 710072, China)

Abstract: The design principle and realization method of digital PID control system are discussed in terms of the characteristics of DC brushless electromotor, and the experimental curve is also presented. The conclusion shows that the digital PID arithmetic is flexible in control, high in precision and easy in high integration compared with analog arithmetic.

Key words: DC brushless; digital PID

1 引言

对于稀土永磁直流无刷电机的驱动, 一直是这类新型电机设计中值得探讨的课题。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。由于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。因此, 对这类电机如何进行最佳驱动, 一直是热点。国外从 80 年代就开始了这方面的研究, 国内这几年也有较大进展。

2 控制系统原理

2.1 PID 控制器

一般的受控对象可近似为一阶惯性加纯延时

环节来表示, 如图 1 所示, 可以用 PID 控制器进行无误差逼近。

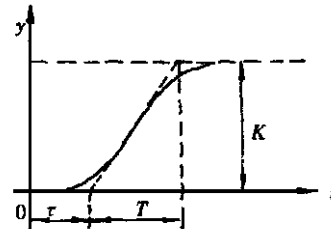


图 1 一阶延时系统图

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: 由于 PID 控制器具有简单而固定的形式, 在很宽的操作条件范围内都能保持较好的鲁棒性; 给设计人员提供了一种简单而直接的调节方式。如图 2 所示为一种用于电梯系统的具体调节电路图。图 2 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。3 种不同积分器的组合用来跟踪控制对象的不同变化速度, 使调节系统的动态误差更小。

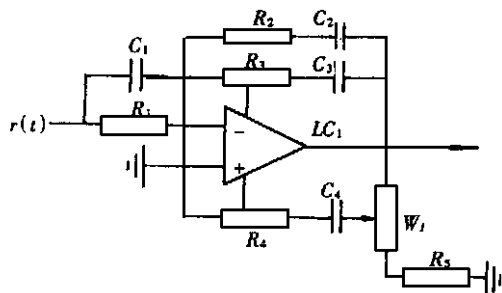


图 2 模拟 PID 控制原理图

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,并提高它的精度和自适应性,并用计算机技术实现,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该控制系统,根据控制效果不断对控制器参数进行校正,使其控制效果达到最佳。如图 3 所示为一个基本的数字 PID 控制器结构图。

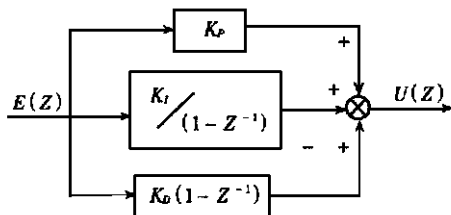


图 3 数字 PID 控制器结构图

该数字 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,从而保证了最佳控制理论的应用,也就提高了系统的最优性和灵活性。

3 直流无刷电机的控制系统的结构

3.1 无刷直流电机的电气特性

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。无刷直流电动机的动态过程是

一个非常复杂的机电瞬变过程。整个机电过渡过程中,电气过渡过程和机械过渡过程同时存在,又相互影响。因此,一个好的驱动系统,要兼顾两者的不同特性,才能使控制效果最佳。永磁直流电动机框图如图 4 所示。

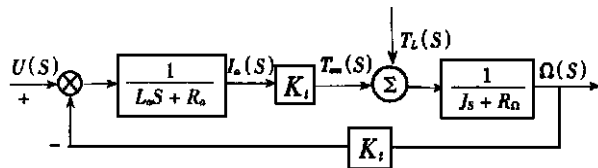


图 4 永磁直流电动机动态特性框图

永磁直流电动机的动态方程如下^[2]:

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

$$e = C_e n = K \quad (2)$$

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

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

速度函数为:

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

$$\text{其中: } G(s) = \frac{K}{(K^2 + R_a R)(1 + s \tau_{em})}$$

$$G_e(s) = \frac{1 + s \tau_e}{R \left[\frac{K^2}{R_a R} + (1 + s \tau_e)(1 + s \tau_m) \right]}$$

式中: L_a 为绕组电感; R_a 为绕组电阻; J 为转子惯量; R 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。 e 为电气时间常数 (s), $\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$; τ_m 为机械时间常数 (s), $\tau_m = \frac{J}{R}$; τ_{em} 为机电时间常数 (s)。

由上可知, 永磁直流电动机本身是一个闭环系统, 感应电动势引入了与电动机角速度成正比的负反馈信号, 增加了系统的有效阻尼, 见式 (1)、(2); 电机的电磁特性及电磁参数 (如 e 、

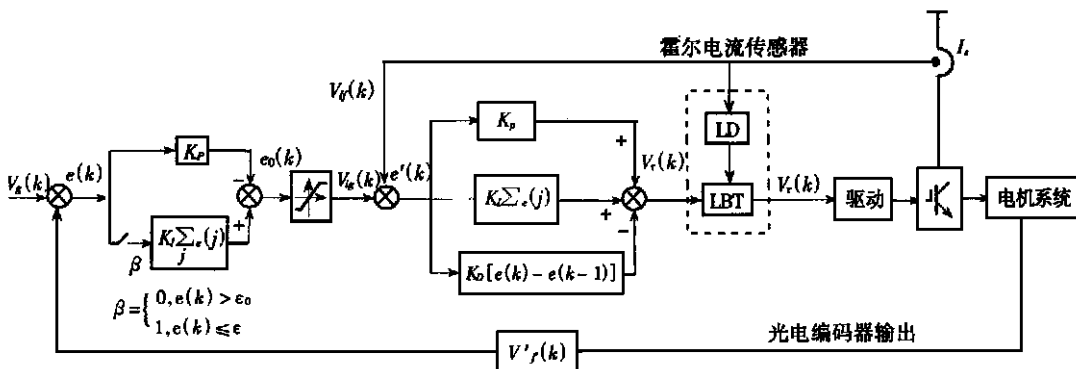


图 5 控制器原理框图

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; 机械参数 (J 、 T_L) 是决定速度环参数和稳定性的主要因素。

3.2 直流无刷电梯控制系统的设计

3.2.1 总体设计

整个控制系统由 3 部分组成, 如图 5 所示。图 5 中虚线框定部分是电流变化率和过电流控制回路。外环为速度环, 用 PI 控制器构成, 其中积分分离开关控制。内环用 PID 控制, 如图 6 所示为整个系统硬件结构图。

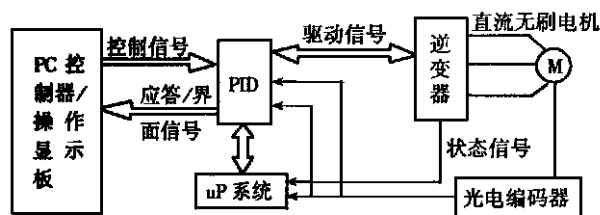


图 6 控制器硬件结构图

3.2.2 工作原理简介

根据运行轨迹实时提供的给定速度信息 $V_g(k)$ 与实测的 $V_f(k)$ 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, 其控制方法如图 5 所示, $\sigma = 1$ 表示开关闭合。 $V_{ig}(k)$ 和电流反馈值 $V_{if}(k)$ 比较后形成电流环输入误差 $e_c(k)$ 。该误差信号经 PID 运算, 开成调整电压 $V_{ir}(k)$, 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。在电流环中, 抽样速率比速度环高 10 倍, 为 0.2 ms, 相当于开关频率为 5 kHz。这是由于电机的 J 和 T_L 之差异而决定的。同时该环的微分支路和传统用法不同的是 $K_0[e(k) - e(k-1)]$ 取负号, 用来限制 $e(k)$ 大的阶跃形成的瞬时上冲, 形成前沿消隐的效果, 保证电流环工作的可靠性。

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运行逐点计算出来的。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。下面仿真实验是以运行比较复杂的单层运行曲线进行模拟的, 如图 7 所示。

假设楼层距为 3.5m(实验距), 1.6m 处设置位置传感器, 则形成具有图 7 单层运行速度曲线的加速度曲线如图 8 所示。

4.1.2 电机参数

通过计算和实测, 可求得电机的如上参数: L_a 、

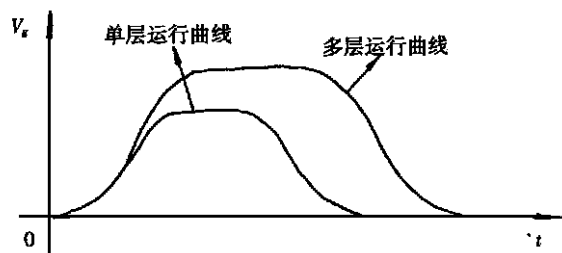


图 7 直流无刷电机运行速度图形

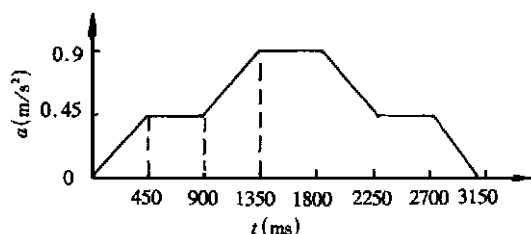


图 8 单层运行的加速度曲线

K_t 、 J 、 R_a 、 R , 以及 $J_m = 1.5$ s、 $\tau_e = 0.09$ s 等。用来对两级 PID 调节系统的 K_p 、 K_i 、 K_d 、 T_i 、 T_d 等参数进行计算和整定。本控制系统中使用 Ziegler—Nichols 设定方法^[1], 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, 如图 1 所示。从而可以按 $K_p = \frac{1.2 T}{K}$ 、 $T_i = 2$ 、 $T_d = 0.5$ 求得内、外环控制参数 K_p 、 K_i 、 K_{p1} 、 K_{i1} 及 K_d , 见图 5, 并且构成了图 9 所示的仿真系统。

4.2 系统仿真

仿真的基本方法是: 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: 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;

然后加入积分环节。首先取较大的 T_i , 并使 $K_p = 0.8 K_p$, 反复调整 T_i 和 K , 使在较小的 T_i 下系统有良好的动态特性和最小静差为止; 若响应速度仍不能满足要求, 例如上升速率等, 可加上微分环节。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。

根据图 5 的原理框图, 用 MATLAB 语言进行仿真, 仿真系统结构图如图 9 所示。根据实确定仿真

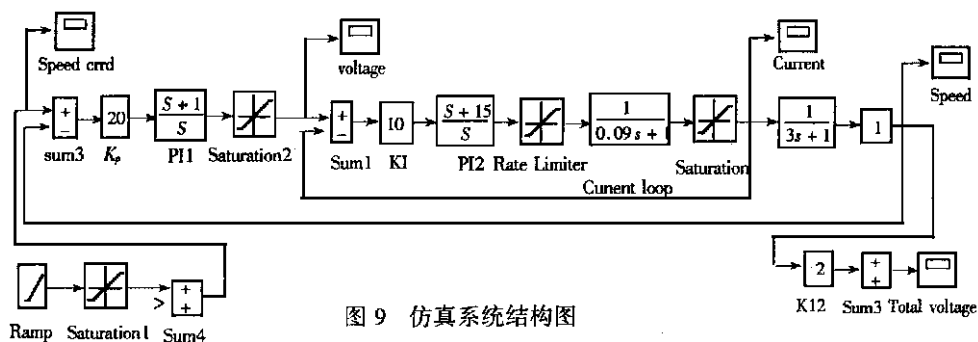


图 9 仿真系统结构图

系统的主要参数如表 1 所示。

表 1 仿真主要参数表

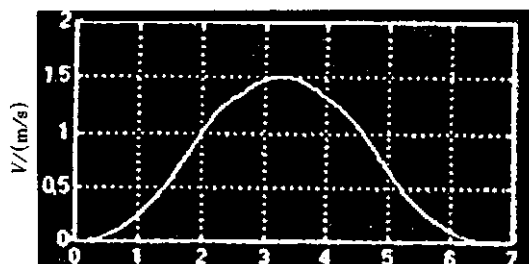
m (s)	c (s)	pwm (s)	v (s)	R ()	L (mH)
3	0.09	0.00002	0.005	0.047	4.5

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 8 给出的加速度曲线,产生各运行点的速度参数值如图 10 所示,其中图 10(a)为给定速度曲线;当在 $(1 \pm 0.5) m$ 范围内变化时,都能可靠跟踪,见图 10(b);图 10(c) 示出了内环电流调节规律;图 10(d) 为当机械时间常

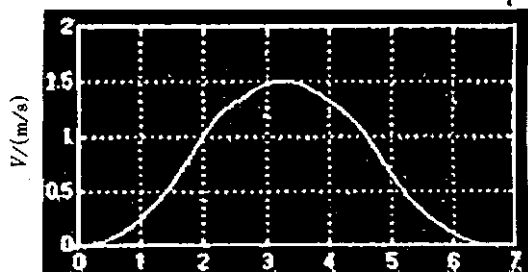
数有偏差 ($m = 1.2$ s) 时的响应曲线,可以明显看出,单层运行时间缩短了 0.3 s,最高速度增加了 0.15 m/s,整个平层精度保持不变。

5 结论

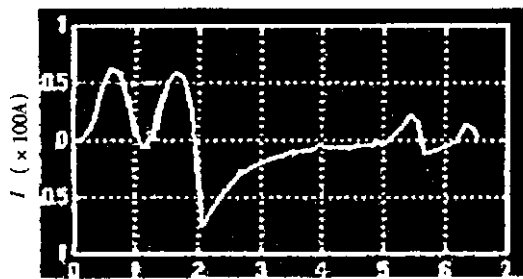
对原系统进行数字化改造具有如下优点:大大简化了原控制系统的硬件开销。由于整个 PID 算法完全由一块专用单片机完成,使外围器件减少了 1/2,降低了成本。引入自适应 PID 参数修正算法,使跟踪性能及可靠性均明显提高,对不同 m 时的适应性有所提高^[3],并保证了在不同温度环境下的稳定性。对于不同控制对象,只需改变软件中有关参数即可,因之增加了系统的通用性。



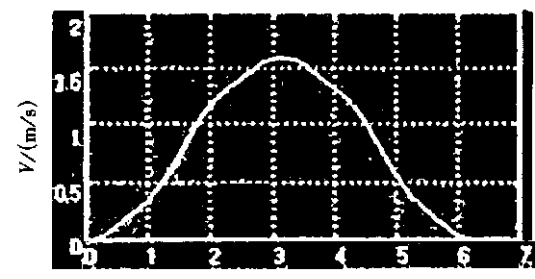
(a)



(b)



(c)



(d)

图 10 系统仿真曲线

参考文献:

- [1] 陶永华等. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 唐任远等. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [3] 金雍等. 电流型稀土永磁无刷直流电动机控制系统设

计[J]. 电力电子技术, 2000, 34(3).

作者简介:

金雍 (1946—), 男, 副教授, 多年从事雷达及通讯电源的教学与研究, 有多项成果与论文发表。现主要从事电力电子与电控系统的研究和产品开发。

收稿日期: 2000-09-18