

直流马达调速系统的变结构控制*

沈春林 潘树勋 庄心复 温旭升

(南京航空学院自控系)

摘 要

本文着重阐述直流马达调速系统的变结构设计。研究表明,这种系统不仅具有良好的静态和动态工作特性,系统本身还具有良好的“鲁棒”性,这是优于传统设计方法的。

一、引 言

Utkin, V. I. 和 Itkis, U. 等^[1,2]对 VSS (Variable Structure Systems) 理论进行了系统的研究和全面的阐述。其应用研究,例如在直流马达调速系统中的应用研究尚不多见,其传统的 PI 控制方法虽有许多论述^[3,4],系统的抗干扰能力不强仍然是一个问题。本文提出的变结构控制方法,系统的控制器不仅容易工程实现,而且系统对其结构参数变化和外界干扰具有不敏感性。

所描述的直流马达调速系统的变结构控制简图如图 1。

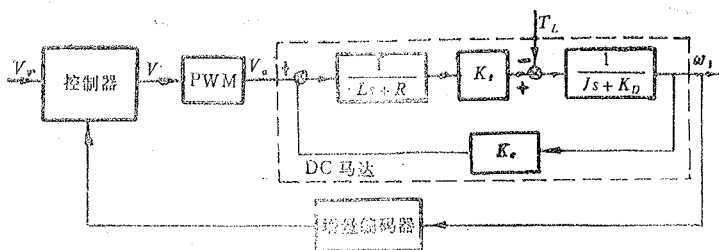


图 1 直流马达调速系统变结构控制简图

图中: ω_1 , 马达输出轴角速度; V_a , 外加电枢绕组端电压; R , 电枢绕组电阻; L , 电枢绕组电感; K_D , 阻尼系数; K_T , 马达转矩常数; K_e , 反电势常数; J , 马达和归化到马达转轴上的总转动惯量; T_L , 外加负载力矩; V , 控制器输出电压; V_r , 系统参考输入; PWM, 脉宽调制驱动器, 等值比例增益为 g 。

系统的状态方程

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} V + \begin{bmatrix} 0 \\ -d \end{bmatrix} T_L, \quad (1)$$

*此项研究系航空工业部科学基金资助项目。

本文于1987年5月21日收到,1987年10月21日收到修改稿。

式中,

$$a_1 = \frac{K_e K_T + R K_D}{L J}, \quad a_2 = \frac{K_D}{J} + \frac{R}{L},$$

$$b = \frac{g K_T}{J L}, \quad d = \frac{R}{J L}.$$

二、变结构控制器设计

首先说明两点。第一, PWM 驱动电路的输入信号来自控制器, 这是一个时间宽度小于或等于一个采样周期、幅值不变、极性可以相反的脉宽信号。只要选取控制器的采样周期远小于马达的机电时间常数, 则系统的输出角速度与输入脉宽是线性关系^[5]。第二, 变结构控制对系统结构参数的要求不是严格的^[2], 增量编码器的迟滞时间忽略不计。

对于单位阶跃输入, 期望系统输出轴角速度为 ω_1^* , 角速度误差为 x_1 , 得

$$x_1 = \omega_1 - \omega_1^*. \quad (2)$$

由 (1) 式写出系统的一般误差状态方程

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b \end{pmatrix} u + \begin{pmatrix} 0 \\ -d \end{pmatrix} T_L, \quad (3)$$

式中,

$$x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\omega}_1; \quad u = V - \frac{a_1}{b} \omega_1^*. \quad (4)$$

假设满状态滑动模态方程

$$\sigma = \frac{1}{T_c} x_1 + x_2, \quad (5)$$

式中, σ , 表征系统运行状态模量; T_c , 表征系统动态工作特性的待选参量。

设定系统的控制逻辑方程

$$u = -\phi_1 x_1 - \phi_2 x_2 - \delta_0 \text{sign}(\sigma). \quad (6)$$

变结构系统滑动线存在, 模态遇上滑动线, 并逼近原点的充分和必要条件是。对于所有的误差状态 x_1 、 x_2 存在^[1]

$$\sigma \dot{\sigma} < 0. \quad (7)$$

对 (5) 式微分, 代入 (3) 式和 (6) 式, 得

$$\sigma \dot{\sigma} = -(a_1 + b\phi_1) \sigma x_1 - \left(a_2 - \frac{1}{T_c} + b\phi_2 \right) \sigma x_2 - (b\delta_0 \text{sign}(\sigma) + dT_L) \sigma, \quad (8)$$

依据 (7) 式, 分析 (8) 式得

$$\phi_1 = \begin{cases} \alpha_1 > -\frac{a_1}{b} & \text{当 } \sigma x_1 > 0 \text{ 时} \\ \beta_1 < -\frac{a_1}{b} & \text{当 } \sigma x_1 < 0 \text{ 时} \end{cases}; \quad \phi_2 = \begin{cases} \alpha_2 > \frac{1-a_3T_c}{bT_c} & \text{当 } \sigma x_2 > 0 \text{ 时} \\ \beta_2 < \frac{1-a_2T_c}{bT_c} & \text{当 } \sigma x_2 < 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (9)$$

并且, $\delta_0 > \frac{d}{b} |T_{L\max}|$, (10)

式中, α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 , 控制器待选参数; δ_0 , 控制器修正外界负载扰动的标量。

由式(5)、(6)、(9)、(10)即构成直流马达调速系统的变结构控制器。其方块简图如图2。

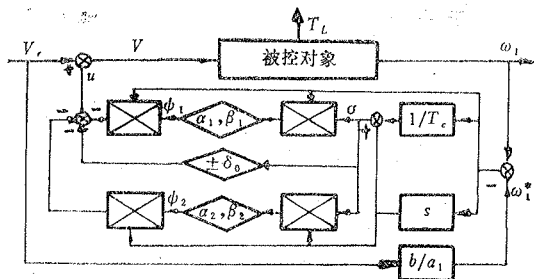


图2 直流马达调速系统变结构控制器原理图

三、仿 真 与 实 现

选用 S—CZK 直流马达。力矩, 1NM; 转速, 1500 rpm; 额定电压, 75 V; 额定电流, 3.3A; 转动惯量, $0.022\text{kg}\cdot\text{cm}^2$; 绕组电阻, 3.48Ω ; 绕组电感, 14.2mH ; 机电时间常数, 37.7ms 。

对于用微机实现的控制器, 为提高系统的品质, 采样周期应尽可能取小, 这主要受到运算速度的限制。我们采用 Intel 8051 单片机, 无论实现 PI 控制算法还是实现变结构控制算法, 采样周期 T 取 2 毫秒一般是可行的。显然, 电机的时间常数大于采样周期 18 倍以上。所以 PWM 驱动电路可以认为是一个比例环节, 取比例增益 $g=14$ 。另外, 对控制器输出电压适当限幅是必要的。以上所述是设计控制器、仿真与实现的基本依据。为用于性能对比, 我们首先设计一个 PI 控制器。通过计算机辅助设计, 选取比例常数 $K_P=8.9$, 积分常数 $K_I=75$, 和反馈系数 $K_{of}=0.95$, 系统的动态工作特性是比较好的, 见图 3。

对于变结构控制器。已知 $a_1=7864$, $a_2=245$, $b=7820$, $d=113986$ 。经过数字仿真比较, 选取参数如下: $T_c=0.005$; $\alpha_1=0$, $\beta_1=-3.5$; $\alpha_2=2$, $\beta_2=-7.5$; $\delta_0=1.3$ 。得

$$\sigma = 200x_1 + x_2, \quad (11)$$

$$u = -\phi_1 x_1 - \phi_2 x_2 - 1.3 \text{sign}(\sigma), \quad (12)$$

$$\text{式中, } \phi_1 = \begin{cases} 0 & \text{当 } \sigma x_1 \geq 0 \text{ 时} \\ -3.5 & \text{当 } \sigma x_1 < 0 \text{ 时} \end{cases}; \quad \phi_2 = \begin{cases} 2 & \text{当 } \sigma x_2 \geq 0 \text{ 时} \\ -7.5 & \text{当 } \sigma x_2 < 0 \text{ 时} \end{cases}. \quad (13)$$

根据变结构控制器方程(11)、(12)、(13)式设计软件,按工程实现设计信号输入输出、状态检测和主程序,再加必要的接口电路,即构成变结构控制器。

通过仿真研究,系统在两种控制方式下对单位阶跃输入和突加外界干扰的影响特性如图3、4所示。

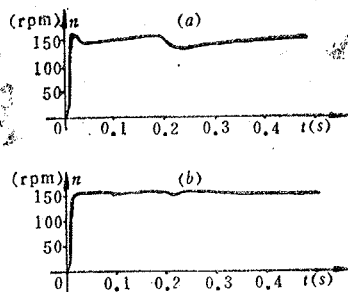


图 3 系统对阶跃输入和突加负载响应
(系统结构参数不变)

(a) PI 控制; (b) VSS 控制

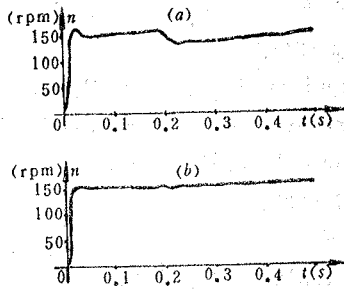


图 4 系统对阶跃输入和突加负载响应
(转动惯量 J 加倍)

(a) PI 控制; (b) VSS 控制

由 PI 控制器和 VSS 控制器分别构成的系统工作特性见下表。

系统结构	PI 控制				VSS 控制			
	起 动 特 性		突 加 负 载		起 动 特 性		突 加 负 载	
	T_1 (秒)	$\sigma_1\%$	T_2 (秒)	$\sigma_2\%$	T_1 (秒)	$\sigma_1\%$	T_2 (秒)	$\sigma_2\%$
参 数 不 变	0.14	9.5	0.26	17	0.01	0	0	<2
J 增 加 一 倍	0.147	13.2	0.263	18.8	0.013	0	0	<2

附注: $T_1, \sigma_1\%$: 系统对阶跃输入响应的调节时间和超调量。

$T_2, \sigma_2\%$: 系统对突加负载响应的调节时间和超调量。

由上表看出,直流马达调速系统的变结构设计,其系统具有一定的“鲁棒”性。而系统的 PI 控制,其工作特性易受系统本身结构参数变化和外界干扰的影响。实验研究已得到验证。

四、结 论

研究表明,直流马达调速系统的变结构设计,系统不仅有满意的静态和动态特性,

而且有一定的“鲁棒”性，其控制器的工程实现也比较容易。这种设计有良好的应用前景，其设计方法也可以应用到其他调速系统中。

参 考 文 献

- [1] Utkin, V.I., Variable Structure Systems with Sliding Modes, IEEE Trans. Auto. Control, AC-22, 2, (1977), 212-222.
- [2] Itkis, U., Control Systems of Variable Structure, Wiley, New York, (1976).
- [3] Stojic, M.R., Design of the Microprocessor-Based Digital System for DC Motor Speed Control, IEEE Trans. Ind. Electr., IE-31, 3, (1984), 243-248.
- [4] Nandam, P.K., Sen, P.C., Analog and Digital Speed Control of DC Drives Using Proportional-Integral and Integral-Proportional Control Techniques, IEEE Trans. Ind. Electr., IE-34, 2, (1987), 227-233.
- [5] Muir, P.F., Neuman, C.P., Pulsewidth Modulation Control of Brushless DC Motors for Robotic Applications, IEEE Trans. Ind. Electr., IE-32, 3, (1984), 222-229.

Variable-structure Speed Control of DC Motor

Shen Chunlin et al.

(Department of Automatic Control, Nanjing Aeronautical Institute)

Abstract

This paper describes the variable-structure speed control for a DC motor. The simulation reveals that this system is superior to the conventional system for better static and dynamic characteristics.