

两种自适应调速系统的实验研究

徐国凯 吴士昌

(东北重型机械学院自控系, 齐齐哈尔)

摘要 本文采用两种新方案设计自适应调整系统. 通过在一个2.2KW的系统上的实验来研究用自适应速度环取代常规的PI速度环以后, 调速系统的起动机能和抗负载扰动能力. 文中还提出了衡量自适应系统跟随能力的两个性能指标.

关键词: 速度控制器; 性能指标; 常规系统; 自适应系统

1. 引言

30多年来, 模型参考自适应控制(MRAC)理论的研究不断取得进展. 出现了不少有价值的设计方案. 但是, 在工程实践中真正成功地应用MRAC技术的例子尚不多见. 在目前, 利用实验来检验已有方案的性能, 为工程应用提供可靠依据, 仍然是一项很有意义的工作. 文献〔1—3〕先后报道了MRAC技术在可控硅直流调速系统上应用的实例. 从结构上看, 它们都采用了Landau方案^{〔4〕}. 本文采用与Landau方案不同的两种方案^{〔5,6〕}设计自适应直流调速系统(以下简称为自适应系统), 并将其起动机能和抗负载扰动能力与常规系统(指使用PI调节器的双闭环可控硅直流调速系统)做了比较.

2. 被控对象与参考模型

设计常规系统时, 一般都假设其动态参数是已知定常的. 如果以电流环及电动机做为被控对象, 采用文献〔7〕提供的方法, 用PI调节器对系统进行校正, 则以电流调节器给定电压 u_p 为输入、以电机转速 n_p 为输出的被控对象的传递函数就是^{〔2〕}

$$W_p(s) = \frac{n_p(s)}{u_p(s)} = \frac{1/\beta}{2T_{\alpha}S + 1} \cdot \frac{R}{C_e T_m S}, \quad (1)$$

其中 β 是电流反馈系数, R 是电枢回路总电阻, T_{α} 是电流环小时间常数, T_m 是机电时间常数.

下述原因会导致系数的动态参数在实际运行中发生变化: 1) 负载的变化; 2) 小导通角下, 电流不连续时, 可控硅整流装置放大倍数及时间常数的变化; 3) 激磁电流的变化. 这些变化有时是大范围的、快速的和不可测的. 下面仅就第2种变化说明之.

整流装置的放大倍数受其导电方式和电网电压幅值的影响很大. 断续导电时, 装置外特性变陡, 等效内阻大大增加, 致使其放大倍数大大降低, 最大可降为连续导电时的几分之一. 这极易引起系统的低频振荡. 另外, 断续导电时, 电流环等效时间常数近似为导电时间 θ 的倒数 $(1/\theta)$ 的指数函数. 此时即使忽略了电枢回路的时间常数, 也不能忽略电流环等

效的时间常数, 因为对于小的 θ 值, 该时间常数可能会显得与机电时间常数一样重要。

上述事实告诉我们, 在设计高性能的调速系统时, 应该考虑到动态参数的时变特点, 尤其是实施自适应控制时, 更应注意到这一点。所以, 被控对象的传递函数应写成下面的形式

$$W_p(s) = \frac{n_p(s)}{u_p(s)} = \frac{\beta(t)}{S[S + \alpha(t)]}, \quad (2)$$

其微分方程形式为

$$[P^2 + \alpha(t)P] n_p(t) = \beta(t)u_p(t), \quad (3)$$

其中 $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 均为时变参数, $P = d/dt$, 微分算子。分母不含零次项是式 (2) 的一个特点。

自适应系统的参考模型通常依给定的性能指标确定, 其微分方程为

$$(P^2 + a_1P + a_0)n_m(t) = bu_R(t), \quad (4)$$

其中 a_0 、 a_1 和 b 均是正的已知常数, $u_R(t)$ 和 $n_m(t)$ 分别是参考模型的输入和输出。

系统的输出误差定义为

$$e(t) = n_m(t) - n_p(t). \quad (5)$$

3. 设计方案 I

自适应系统就是用自适应速度环取代常规系统的 PI 速度环, 求出自适应速度控制器中的参数自适应律, 进而求出系统的反馈控制输入 $u(t)$ 或对象的控制输入 $u_p(t)$ 。

本方案利用对象的滤波状态综合自适应律, 其框图示于图 1。图中, $1/N_f(p) = 1/(\varphi p + 1)$, 是状态滤波器, $D(p)$ 是线性补偿器。

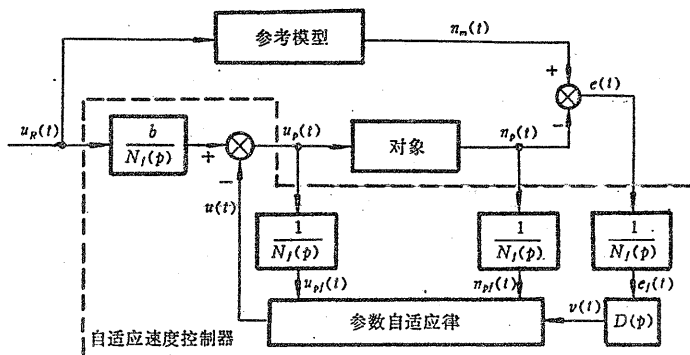


图 1 自适应系统 I

由式(3)—(5)并利用 $bu_R(t) = N_f(p)[u(t) + u_p(t)]$, 可推得

$$(P^2 + a_1P + a_0)e(t) = [\alpha(t)P - a_1P - a_0]n_p(t) + [\varphi P + 1 - \beta(t)]u_p(t) + (\varphi P + 1)u(t). \quad (6)$$

在式(6)两边同除 $(\varphi P + 1)$ 得

2期

$$(P^2 + a_1 P + a_0) e_f(t) = \{ [\alpha(t) - a_1] P - a_0 \} n_{pf}(t) + [\varphi P + 1 - \beta(t)] u_{pf}(t) + u(t), \quad (7)$$

这里, $e_f(t) \triangleq e(t) / (\varphi P + 1)$, $n_{pf}(t) \triangleq n_p(t) / (\varphi P + 1)$, $u_{pf}(t) \triangleq u_p(t) / (\varphi P + 1)$.

选择一阶线性补偿器^[4] $D(p) = d_1 P + d_0$ 来产生广义误差信号 $V(t)$:

$$V(t) = (d_1 P + d_0) e_f(t). \quad (8)$$

由(7)、(8)两式可得

$$\frac{P^2 + a_1 P + a_0}{d_1 P + d_0} V(t) = \{ [\alpha(t) - a_1] P - a_0 \} n_{pf}(t) + [\varphi P + 1 - \beta(t)] u_{pf}(t) + u(t). \quad (9)$$

取对象的反馈控制输入 $u(t)$ 为

$$u(t) = (k_1 P + k_0) n_{pf}(t) + (g_1 P + g_0) u_{pf}(t). \quad (10)$$

代式(10)入(9), 得到广义误差方程

$$V(t) = \frac{d_1 P + d_0}{P^2 + a_1 P + a_0} \{ [\alpha(t) - a_1 + k_1] P n_{pf}(t) + (k_0 - a_0) n_{pf}(t) + (\varphi + g_1) P u_{pf}(t) + [1 - \beta(t) + g_0] u_{pf}(t) \}. \quad (11)$$

由于 $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 是变化的, 故参数 k_1 和 g_0 需要自适应. 很显然, 参数 k_0 和 g_1 不需要自适应, 而只需取

$$k_0 = a_0, \quad g_1 = -\varphi. \quad (12)$$

对式(11)应用超稳定定理^[4], 如果

1) 保证 $(d_1 S + d_0) / (S^2 + a_1 S + a_0)$ 是严格正实的;

2) 取参数自适应律为

$$\left. \begin{aligned} k_1(V, t) &= -k_{11} \int_0^t V P n_{pf} d\tau - k_{12} V P n_{pf} + k_1(0), \\ g_0(V, t) &= -g_{01} \int_0^t V u_{pf} d\tau - g_{02} V u_{pf} + g_0(0), \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

则自适应系统是渐近超稳定的.

代式(12)、(13)入(10)就得到信号综合形式的反馈控制输入 $u(t)$:

$$u(t) = \left[-k_{11} \int_0^t V P n_{pf} d\tau - k_{12} V P n_{pf} + k_1(0) \right] P n_{pf} + a_0 n_{pf} - \varphi P u_{pf} + \left[-g_{01} \int_0^t V u_{pf} d\tau - g_{02} V u_{pf} + g_0(0) \right] u_{pf}. \quad (14)$$

式(14)右侧第三项为线性正反馈信号, 这是本方案与 Landau 方案的主要差别.

4. 设计方案 II

本方案与 Landau 方案的不同之处在于利用参考模型的状态综合自适应律, 而不是利

用对象的滤波状态综合自适应律, 其框图示于图 2.

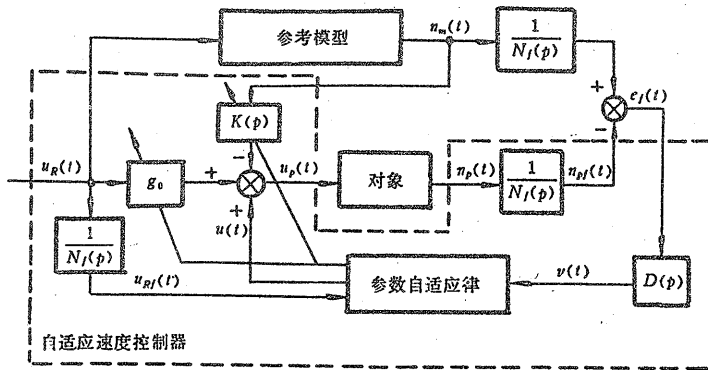


图 2 自适应系统 II

由式(3)–(5)可得

$$[P^2 + \alpha(t)P]e(t) = [\alpha(t)P - a_1P - a_0]n_m(t) + bu_R(t) - \beta(t)u_p(t). \quad (15)$$

由图2知,

$$u_p(t) = g_0 u_R(t) - (k_1 P + k_0)n_m(t) + u(t), \quad (16)$$

式中 g_0 、 k_1 和 k_0 均为自适应参数.

代式 (16) 入 (15), 消去 $u_p(t)$:

$$[P^2 + \alpha(t)P]e(t) = \{[\alpha(t) - a_1 + \beta(t)k_1]P + [\beta(t)k_0 - a_0]\}n_m(t) + [b - \beta(t)g_0]u_R(t) - \beta(t)u(t). \quad (17)$$

令

$$e_f(t) \triangleq e(t) / N_f(p), \quad n_{mf}(t) \triangleq n_m(t) / N_f(p),$$

$$u_{Rf}(t) \triangleq u_R(t) / N_f(p), \quad V \triangleq D(p)e_f,$$

由零状态等价关系^[4]可求出广义误差方程

$$V(t) = \frac{d_1 P + d_0}{P^2 + \alpha(t)P} \{ [\alpha(t) - a_1 + \beta(t)k_1] P n_{mf}(t) + [\beta(t)k_0 - a_0] n_{mf}(t) + [b - \beta(t)g_0] u_{Rf}(t) \} \quad (18)$$

和反馈控制输入 $u(t)$

$$u(t) = \varphi \dot{g}_0 u_{Rf}(t) - \varphi [\dot{k}_1 P + \dot{k}_0] n_{mf}(t). \quad (19)$$

对式 (19) 应用超稳定定理^[4], 如果下列条件得到满足, 则自适应系统是渐近超稳定的:

- 1) $(d_1 S + d_0) / [S^2 + \alpha(t)S]$ 是严格正实的;

2期

2) 参数自适应律为

$$\left. \begin{aligned} k_0 &= l_0 \int_0^t V n_{mf} d\tau + k_0(0), \\ k_1 &= l_1 \int_0^t V P n_{mf} d\tau + k_1(0), \\ g_0 &= -l_2 \int_0^t V u_{Rf} d\tau + g_0(0). \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

代式 (20) 入 (16) 即得对象控制输入 $u_p(t)$:

$$\begin{aligned} u_p(t) &= g_0(0)u_R - k_0(0)n_m - k_1(0)Pn_m - (l_0 \int_0^t V u_{mf} d\tau)u_R \\ &\quad - (l_0 \int_0^t V u_{mf} d\tau)n_m - (l_1 \int_0^t V P n_{mf} d\tau)Pn_m \\ &\quad - \varphi [l_2 V u_{Rf}^2 + l_0 V n_{mf}^2 + l_1 V (P n_{mf})^2]. \end{aligned} \quad (21)$$

由式 (21) 可以看出, 实现 $u_p(t)$ 根本没有用到对象状态或其滤波状态.

使 $(d_1 S + d_0) / [S^2 + \alpha(t)S]$ 为严格正实的条件为 $d_0 > 0$ 及 $d_1 > d_0 / \alpha(t)$. 由于 $\alpha(t)$ 是变化的, 故该条件变为 $d_0 > 0$ 及 $d_1 > d_0 / \alpha_{\min}$.

5. 实验结果

自适应系统的实验在一个 2.2KW 的可逆可控硅直流调速系统 ($I_{ed} = 12.5A$, $n_{ed} = 1500 \text{ r/min}$) 上进行. 本实验主要考察自适应系统低速时的起动性能和抗负载扰动能力.

实验中, 参考模型取作

$$(P^2 + 143P + 4225)n_m(t) = 4225u_R(t),$$

状态滤波器均取为 $N_f(p) = 0.03P + 1$. 自适应系统 I 的线性补偿器取为 $D(p) = 0.5P + 1$.

由文献 [8] 知, 对象的 $\alpha_{\min} = 75$, 故自适应系统 II 的线性补偿器取为 $D(p) = P + 7.5$.

为便于定量研究, 我们为自适应系统定义如下两个性能指标:

定义 1 假设系统在时刻 t_0 进入过渡过程, 如果从这期间内的某个时刻 t_1 开始, 总有

$$e(t) = n_m(t) - n_p(t) = 0, \quad \forall t \geq t_1 \geq t_0,$$

则称被控对象达到了对参考模型的完全跟随, 而将实现完全跟随所用的时间叫做跟随时间, 记为 T_f . 显然

$$T_f = t_1 - t_0.$$

定义 2 在系统达到完全跟随之前, 转速误差的绝对值中的最大者, 叫做最大逼近误差, 记为 ME , 即

$$ME = M_{ax} \{ |e(t)| \}, \quad t_f > t \geq t_0.$$

综合考虑上述两个性能指标, 就可以判断自适应系统的跟随能力和起动性能, 因为 T_f 反映了对对象跟随参考模型的快慢程度, 而 ME 则反映了曲线 $n_p(t)$ 与 $n_m(t)$ 的逼近程度. 参

考模型规定了被控对象应具有的动、静态性能，如果曲线 $n_p(t)$ 与 $n_m(t)$ 时刻重合，则自适应系统的跟随能力将被认为是最理想的。于是，人们希望 T_f 和 ME 越小越好。

图 3 中的 a)、b)和 c)分别表示常规系统、自适应系统 I 和自适应系统 II 的低速满载起动性能；d)、e)和 f)分别依次表示这三种系统的抗负载扰动能力(实验条件：在系统低速稳定运行时突加 1/3 的额定负载 4.1A)。表 1 给出了各种指标的实测值。在该表中，对常规系统也使用了 T_f 和 ME 这两个指标，这并不意味着常规系统具有跟随能力，而仅仅是为了便于比较研究。

表 1

指标	T_f (ms)		ME (r/min)		稳态速差 (r/min)
	起 动	反 转	起 动	反 转	
常规系统	700	700	100	150	50
系 统 I	600	600	40	130	0
系 统 II	500	500	50	100	0

在系统 I 的自适应速度控制器内，采用了比例、积分器。实验中，其比例系数整定为 1，积分时间常数整定为 1ms。系统 II 的自适应速度控制器中使用了积分器，其积分时间常数整定为 1ms。式 (14) 中规定的正反馈系数为 1，这在实际中难以准确实现。实验中发现，大于 1 的正反馈系数会引起系统振荡，而当其值取在 0.65—0.75 之间时，实验效果较好。

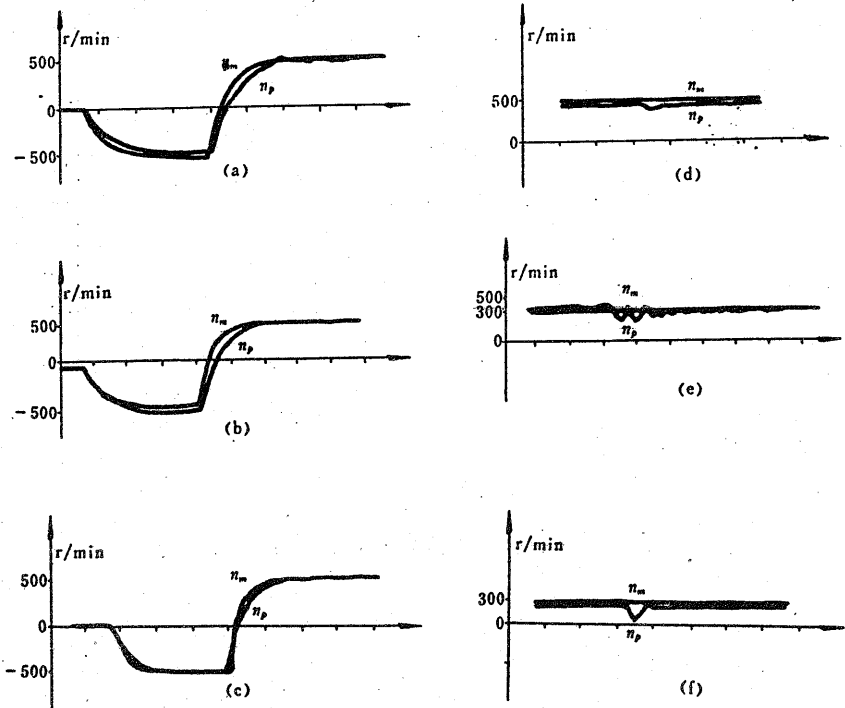


图 3 实验示波图 (横座标每格 300ms)

6. 结 论

- 1) 本文将两种结构简单、概念新颖的 MRAC 方案应用于自适应速度控制器的设计, 从而扩展了自适应调速系统设计方案的选择范围;
- 2) 实验数据证实, 自适应系统的起动性能和抗干扰能力均优于常规系统, 说明这两种设计方案具有实用价值;
- 3) 由本文提出的两个性能指标(T_r 和 ME)为定量考察自适应系统的性能提供了依据。一般的 MRAC 系统也可以采用类似的定义。

参 考 文 献

- (1) Courtiol, B. and I. D. Landau, High Speed Adaptation System for Controlled Electrical Drives, Automatic, 11, (1975), 119-127.
- (2) 英锐男、张茂青, 可控硅直流调速系统的模型参考自适应控制, 中国自动化学会电气自动化专业委员会控制理论与应用学术交流会论文, (1985.10) .
- (3) 王礼信, 一类模型参考自适应系统的工程设计方法, 电气传动, 3, (1987), 51-54. .
- (4) Landau, I. D., Adaptive Control—The Model Reference Approach, Marcel Dekker, New York, (1979).
- (5) Hang, C. C. and H. S. Tang, Model Reference Adaptive Control Using Only Input and Output Measurements, Int. J. Control, 34,5, (1981), 853-868.
- (6) 于红年, 模型参考自适应控制系统的设计方法及其应用, 东北重型机械学院硕士论文, (1984) .
- (7) 陈伯时, 自动控制系统, 机械工业出版社, 北京 (1981) .
- (8) 吴士昌、徐国凯, 改进的可控硅直流调速系统的模型参考自适应控制, 中国自动化学会电气自动化专业委员会青年暑期交流会论文, (1987.8) .

Two Adaptive Speed Regulating Systems —Study and Experiments

Xu Guokai, Wu Sichang

(Department of Automatic Control, Northeast Heavy Machinery Institute, Qiqihar)

Abstract: Two schemes were employed for designing adaptive speed regulating systems. In a system of 2.2KW, the conventional PI speed loop was replaced by adaptive speed loops, experiments were done to investigate the starting characteristics and load disturbance-rejection ability. Two performance index were defined to measure the tracking ability of adaptive systems.

Key words: speed controller; performance index; conventional system; adaptive system