

一种自动仿型铣床的自适应控制器

游林儒¹, 乔飞¹, 徐国凯²

(1. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640; 2. 大连民族学院 机电信息工程系, 辽宁 大连 116600)

摘要: 针对一类参数变化幅度大, 过渡过程频繁的运动系统, 提出了一种实用的自适应控制器方案. 基于这种结构简单, 鲁棒性强, 约束条件较少的方案, 为一种自动仿型铣床设计了自适应速度控制器. 数字仿真表明, 自适应调速系统的性能能够满足设计要求. 将仿真结果应用在某实际仿型铣床的控制器上, 结果与仿真结论相同.

关键词: 仿型铣床; 自适应控制器; 稳定性

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A

Adaptive controller for automatic profiling machines

YOU Lin-ru¹, QIAO Fei¹, XU Guo-kai²

(1. College of Automatic Science & Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Department of Electromechanical Information Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian Liaoning 116600, China)

Abstract: A practical adaptive controlling scheme is proposed for the movement system which has a high degree of parameter variation and high frequency of transient process. Based on such a scheme, simple in structure, high in robustness and small in constraint condition, an adaptive speed controller has been designed for automatic profiling machines. The digital simulation has showed that the adaptive speed-governing system can satisfy the design needs. Applied the simulation result to a profiling machine, it is proved to produce the same result in reality.

Key words: profiling machines; adaptive controlling; stability

1 问题的陈述(Problem statement)

自适应控制理论在运动系统上的应用已有不少报道^[1~4], 但在自动仿型铣床上的应用尚未见到. 自动仿型铣床是一种参数变化幅度大, 过渡过程频繁的运动系统, 其自适应控制器应具有结构简单, 鲁棒性强, 约束条件较少的特点.

设计便于实际应用的、鲁棒性强的模型参考自适应控制系统(MRACS), 将不可避免地要用到被控对象的各个状态. 但在许多实际问题中被控对象的状态并不是可以全部获取的, 故早些时候的 MRACS 设计方案都采用微分器来产生对象输出的各阶导数. 采用微分器会给系统引进噪声, 使得当信噪比较小时, 系统的自适应效果不佳^[4~6]. 于是人们开始设计不用微分器的 MRACS. 在这方面最早获得成功的是 Monopoli^[1], 他们采用增广误差信号或辅助信号发生器构造自适应机构. 这些方案的共同缺点在于, 当系统的阶次增高时, 自适应机构的复杂程度会成倍地增高^[7,8], 以至这些方案很难在实际中应用. 1981 年, Hang 和 Tang 在某种程度上较好地解决了这方面的问题^[3], 他们采用状态变量滤波器获取被控对象的滤波状态, 再用这些滤波状态和广义误差

v 来综合自适应律, 从而获得了比较满意的自适应效果. 但时它的结构比较复杂, 不适于在工程中的应用. 这里对文献[1~3]中的方案进行改进: 1) 利用参考模型与被控对象间的输出误差 e 代替经典方案中的广义误差来综合自适应律, 以避免单独选择状态变量滤波器的麻烦; 2) 合理地减少状态变量滤波器的数量和自适应律的数量, 以简化自适应系统的结构.

设被控对象方程为

$$D_p(p)y_p(t) = N_p(p)u_p(t). \quad (1)$$

这里, $D_p(p) = p^n + \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i p^i$, $N_p(p) = \sum_{i=0}^{m_1} \beta_i p^i$, $m_1 \leq n-1$; α_i 和 β_i 均为未知定常和慢时变系数; $u_p(t)$ 和 $y_p(t)$ 分别为对象的输入和输出; $N(p)$ 是 Hurwitz 多项式.

参考模型方程为

$$D_m(p)y_m(t) = N_m(p)u_R(t). \quad (2)$$

其中 $D_m(p) = p^n + \sum_{i=0}^{n-1} a_i p^i$, $N_m(p) = \sum_{i=0}^{m_2} b_i p^i$, $m_2 \leq n-1$, a_i 和 b_i 均为已知常数; $u_R(t)$ 和 $y_m(t)$

m_1 的那些项,不需要自适应,而只须取 $g_i = -f_i$,这样自适应环数目少了,系统结构进一步简化,实现起来较容易;第三,由于信号 $p^i y_{pf}$ 和 $p^i u_{pf}$ 均可从状态变量滤波器 $F(p)$ 获得,故实现式(11)的参数自适应律时,既不须使用微分器,也不须使用经典方案中的广义误差信号或辅助信号发生器,只要滤波完成了,自适应反馈控制输入 $u_a(t)$ 也就确定了。

由式(10)可看出, $F(p)$ 除用作状态变量滤波器外,还起着线性补偿器的作用。一旦依严格正实条件确定出了线性补偿器的系数,状态变量滤波器的系数也就随之确定了。这样就可避免单独选择滤波器系数的麻烦。

欲完成设计,必须求出 $u_p(t)$ 。

将式(11)代回式(9),得自适应反馈控制输入

$$\begin{aligned} u_a(t) = & (k_{n-1}p^{n-1} + k_{n-2}p^{n-2} + \cdots + k_0)y_{pf} + \\ & (g_{n-1}p^{n-1} + g_{n-2}p^{n-2} + \cdots + g_0)u_{pf} = \\ & [-\phi_{kn-1} \int e(p^{n-1}y_{pf})dt - \\ & \gamma_{kn-1}\phi_{kn-1}e(p^{n-1}y_{pf})](p^{n-1}y_{pf}) + \cdots + \\ & [-\phi_{k0} \int ey_{pf}dt - \gamma_{k0}\phi_{k0}ey_{pf}]y_{pf} + \\ & [-\phi_{gn-1} \int e(p^{n-1}u_{pf})dt - \\ & \gamma_{gn-1}\phi_{gn-1}e(p^{n-1}u_{pf})](p^{n-1}u_{pf}) + \cdots + \\ & [-\phi_{g0} \int eu_{pf}dt - \gamma_{g0}\phi_{g0}eu_{pf}]u_{pf}. \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)是自适应控制器的核心。由式(12)可以看出,直接使用误差 $e(t)$ 实现了控制器。将式(12)代入图1即可求得 $u_p(t)$ 。

3 自适应速度控制器设计与仿真 (Design and simulation of adaptive controller)

3.1 被控系统简介 (Introduction of the controlled system)

仿形铣床一般用于齿、槽和台阶类零件的加工,它能仿照样件自动加工出各种形状复杂的零件。自动仿形铣床的工作台经常要做快速而精密的位移,故其移动速度需要加以及时而精确的控制。控制系统的执行机构为 S-C2K160 型伺服机组,功率放大器为直流脉宽调速装置。

下面是直流电动机技术参数。

额定电压: 110 V; 额定电流: 6 A; 额定力矩: 0.5 kg·m; 最大转速 $n_M = 10000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$; 额定转速 $n_H = 1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$; 电机常数 $C_e = 0.1 \text{ V}/(\text{r} \cdot$

$\text{min}^{-1})$ 。

调速系统时间常数分别为:

电磁时间常数 $T_e = 0.00246 \text{ s}$; 机械时间常数 $T_M = 0.078 \text{ s}$ 。

3.2 要求的调速系统性能指标 (Required index of system performance)

1) 调速范围

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{10000}{1};$$

2) 转速超调量

$$M_p < 10\%;$$

3) 调节时间

$$t_s < 0.01 \text{ s} (\Delta = 0.05).$$

3.3 常规调速系统的传递函数 (Transfer function of the conventional speed control system)

常规控制系统采用了典型的电流-转速双闭环结构,电流环与速度环均采用 PI 调节器。

电流环与电机(速度环的等效被控对象)的传递函数

$$G(s) = \frac{N(s)}{U_{gl}(s)} = \frac{2377011.5}{s^2 + 2252.87s + 5747.23}, \quad (13)$$

这里, $N(s)$ 代表等效对象的输出,即电机反电势; $U_{gl}(s)$ 代表等效对象的控制输入,即速度调节器的输出。在实际运行中,式(13)中的系数可能会因系统参数老化或放大器漂移等因素发生某种形式的改变。

3.4 参考模型 (Reference model)

根据前述性能指标要求,为自适应调速系统选择如下的参考模型传递函数:

$$W(s) = \frac{Y_m(s)}{U_r(s)} = \frac{25 \times 10^6}{s^2 + 6 \times 10^3 s + 25 \times 10^6}. \quad (14)$$

这里, $Y_m(s)$ 代表期望的系统输出,即电机转速 $N(s)$; $U_r(s)$ 代表系统的控制输入,即速度给定 $U_s(s)$ 。计算可知,该模型的性能 ($M_p = 9.5\%$; $t_s = 0.01 \text{ s}$) 达到了系统要求。

3.5 自适应速度控制器设计与系统仿真 (Design of the adaptive controller and simulation)

现将常规调速系统改造成自适应调速系统,即用自适应速度环取代 PI 速度环,用自适应速度控制器取代 PI 速度调节器,系统电流环仍保持为常规电流环。按照式(12)进行自适应速度控制器设计。图 2

为仿真结果。

图2(a)的跟随误差曲线 $e(t)$ 反映了工作台的速度跟踪性能. 控制系统的输入 $u_r(t)$ 是一个幅度为 $1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的阶跃信号. 可以看到, 自适应调速系统的最大逼近速差^[5] $ME = 5.8 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 说明电机速度 $y_p(t)$ 较好地逼近了参考模型的输出 $y_m(p)$, 自适应调速系统的快速性和跟随性能是令人满意的. 图2(b)反映了自适应系统抗负载扰动的能力. 图中的 $y(t)$ 代表常规系统的电机转速. $T = 3.0 \text{ s}$ 时, 在系统输出端突加了一个幅度为 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 持续时间为 0.5 s 的等效负载扰动. 可以看到, 自适应系统在小于 0.01 s 的时间内即克服了干扰, 使电机转速恢复到了原来的稳态值, 其抗负载扰动的能力是很强的。

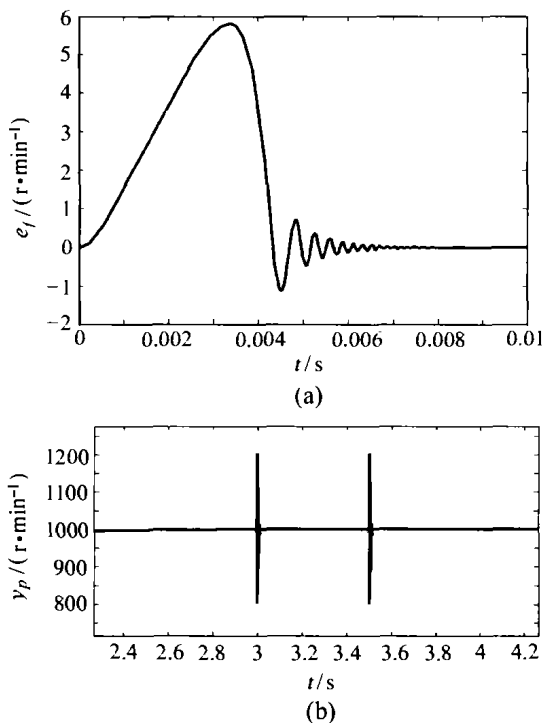


图2 仿真结果

Fig. 2 Result of simulation

以上事实说明: 1) 该系统自适应控制器的方案是可行的; 2) 采用自适应控制可使仿形铣床获得较高的技术性能。

参考文献(References):

[1] MONOPOLI R V, SUBBRARO V N. New algorithm for model ref-

erence adaptive control with variable adaptive gains [C] // *Proc of 1980 Joint Automatic Control Conference*. [s.l.]: [s.n.], 1980, 1: 85 - 101.

- [2] HANG C C, TANG H S. Model reference adaptive control using only input and output measurements [J]. *Int J Control*, 1981, 34(5): 853 - 868.
- [3] 朗道 I D. 自适应控制——模型参考方法[M]. 吴伯凡译. 北京: 国防工业出版社, 1985.
(LANDAU I D. *Adaptive Control-Reference Methods* [M]. Translated by WU Bofan. Beijing: National Defence Industry Press, 1985.)
- [4] 徐国凯, 吴士昌. 两种自适应调速系统的实验研究[J]. *控制理论与应用*, 1990, 7(2): 47 - 53.
(XU Guokai, WU Shichang. Experimental Research on two kind of speed control system [J]. *Control Theory & Applications*, 1990, 7(2): 47 - 53.)
- [5] 袁庆民, 陈国聪. 电火花线切割机床微机自适应控制系统研究[J]. *兵工自动化*, 1999, (2): 5 - 8.
(YAN Qingmin, CHEN Guocong. Adaptive control of wire EDM process [J]. *Ordannce Industry Automation*, 1999, (2): 5 - 8.)
- [6] 潘仲明. 汽车辅助车闸的自适应控制[J]. *国防科技大学学报*, 2001, (5): 112 - 116.
(PAN Zhongming. Adaptive control system for automotive braking aid [J]. *J of National University of Defense Technology*, 2001, (5): 112 - 116.)
- [7] 丁科, 侯朝桢. 车辆主动悬架的自适应控制研究[J]. *北京理工大学学报*, 2001, (6): 706 - 709.
(DING Ke, HOU Chaozhen. The research on adaptive control for active suspensions of vehicle [J]. *J of Beijing Institute of Technology*, 2001, (6): 706 - 709.)
- [8] 郭戈, 王燕, 刘积仁. 光盘驱动器伺服系统准滑模自适应控制[J]. *信息与控制*, 2002, (1): 79 - 83.
(GUO Ge, WANG Yan, LIU Jiren. Quasi-sliding mode adaptive control of optical disc drive [J]. *Information and Control*, 2002, (1): 79 - 83.)

作者简介:

游林儒 (1956 —), 男, 工学博士, 副教授, 主要研究领域为电力电子技术与电气传动控制、信号处理等, E-mail: aulryou@scut.edu.cn;

乔飞 (1980 —), 男, 硕士研究生, 现就读于华南理工大学自动化学院, 主要研究领域为电力电子技术与电气传动, E-mail: qiaofei-80@sohu.com;

徐国凯 (1956 —), 男, 教授, 主要研究领域为自适应控制、非线性系统理论等, E-mail: xgk@dlnu.edu.cn.