文章编号: 1000-8152(2007)05-0846-05

4M龙门刨床自适应速度控制器研究

徐国凯¹, 游林儒², 赵秀春¹, 宋 鹏¹, 刘长宏¹

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

摘要:本文对4M龙门刨床控制系统进行改造,以自适应速度控制器取代了常规速度调节器,构成了自适应调速 系统.所提出的自适应控制器方案具有抗扰能力强且不需被控对象先验知识的特点.实验表明,自适应调速系统的 方案设计是正确的,控制效果优于常规系统.

关键词: 调速系统; 自适应控制; 龙门刨床 中图分类号: TP273 文献标识码: A

A research on adaptive speed controller of a 4M gantry planning machine

XU Guo-kai¹, YOU Lin-ru², ZHAO Xiu-chun¹, SONG Peng¹, LIU Chang-hong¹

College of Electromechanical and Information Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian Liaoning 116600, China;
 College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: The control system of a 4M gantry planning machine is repacked in this paper. Firstly, the standard speed-regulator in the system is replaced with an adaptive speed-controller, an adaptive speed-control system is thus formed. The proposed adaptive controller has the strong anti-disturbing ability, and doesn't need the priori estimate about the plant. Experiment is performed to show that the proposed scheme of the adaptive speed-control system is effective and the control result of the adaptive system is better than the standard system.

Key words: speed-control system; adaptive control; gantry planning machine

1 引言(Introduction)

自1958年美国麻省理工学院(MIT)怀特克教授(Whitaker)首先提出飞机自动驾驶仪的自适应控制方案^[1](史称MIT方案)以来,自适应控制无论在理论上或在应用上都取得了很大的进展.

在过程控制领域,自适应控制技术的应用较广 泛,技术也较成熟,商品化的自适应控制器已有销 售.相比之下,在运动控制领域,自适应控制技术的 应用并不多,商品化的自适应控制器也很少见到.虽 然自适应控制技术在望远镜跟踪控制、超级油轮自 动驾驶、机器人运动轨迹跟踪和光盘驱动器寻迹等 系统中得到了成功应用^[1~4],但在龙门刨床上的应 用尚未见报道.

为促进自适应控制技术在运动控制中的应用,本 文以机械加工中常用的4M龙门刨床为对象,研究其 工作台电力拖动系统自适应速度控制器的设计方案 与控制性能,期望能够得到为实现此类控制器所必 须的结论.

可供工程应用的自适应速度控制器至少应该具备3个特点:一是结构简单,运算速度快;二是具有较强的抗扰动能力;三是较少或根本不依赖于被控对象的先验知识.

Monopoli^[5]方案是研究模型参考自适应控制(MRAC)理论的一大转折. 自他提出了使用增广误差信号来设计MRAC系统后,又涌现出了一些未采用对象输入输出微分导数的MRAC方案. 但是,这些方案多采用增广误差信号或辅助信号发生器来综合自适应律,使可调参数增加一倍,控制器结构比较复杂,故这些理论方案不适于工程应用. 本文对上述方案进行改进,给出的自适应控制器采用参考模型的状态综合自适应律,使控制器的结构简化;不仅解决了对象状态不可直接测量的问题,而且具有更强的抗噪声扰动能力. 另外,在自适应机构中引入了可调补偿器,使被控对象在先验知识不足时控制器的设

收稿日期: 2005-06-03; 收修改稿日期: 2006-09-27.

计成为可能.

2 被控对象(Controlled plant)

龙门刨床是一种大型金属切削机床,主要用来加 工大型工件的各种平面、斜面和槽,特别适用于加工 大型的、狭长的机械零件,如机床的床身、箱体、导 轨等.工件置于工作台上,主电动机带动工作台作往 复的变速直线运动.工作台调速系统的特点是:负载 波动大,调速范围广.

2.1 电动机及相关技术参数(The motor and its parameters)

额定功率60 kW; 额定电压直流220 V; 额定电流305 A; 额定转速1500 r/min; 电势系数 $c_{\rm e} = 0.137$ V/(r · min⁻¹); 电枢回路总电阻 $R_D = 0.05 \Omega$; $R_{\sigma} = 0.18 \Omega$; 电流反馈系数0.04 V/A; 转速反馈系数0.015 V/(r · min⁻¹).

2.2 技术要求(Index)

工作台调速范围1~80 m/min,转速超调量 $M_{\rm p} < 10$ %,调节时间 $t_s < 1.0 \, {\rm s}(\Delta = 0.05)$.

2.3 被控对象模型(The model of plant)

龙门刨床是一典型的运动系统,其工作台电力拖动控制系统的被控量是工作台的移动速度.工作台常规调速系统采用典型的双闭环结构^[6],内环是电流环,按典型I型设计;外环是速度环,按典型II型设计;调节器均为PI调节器.

电动机等效传递函数

$$G_{\rm d}(s) = \frac{R}{c_{\rm e}T_{\rm m}s} = \frac{0.18}{0.0133s}.$$

电流环等效传递函数

$$G_i(s) = \frac{1/\beta}{2T_{\Sigma_i}s + 1} = \frac{25}{0.0084s + 1}.$$

系统等效的被控对象是电流环与电机,其输入量 为电流调节器给定U_{gi}(s),亦即速度调节器输出;输 出量为电机转速N(s),相应的传递函数为

$$G(s) = \frac{N(s)}{U_{gl}(s)} = G_{d}(s)G_{i}(s) = \frac{40279}{s(s+119)}.$$
 (1)

常规调速系统的闭环传递函数为

$$G_B(s) = \frac{N(s)}{U_s(s)} = \frac{3.7s + 74.3}{s^3 + 100s^2 + 247.8s + 4956}.$$
 (2)

与式(1)对应的被控对象算子式微分方程为
$$(p^2 + 119p)y_p(t) = 40279u_p(t).$$
 (3)

这里: $y_{p}(t)$ 代表电机转速, $u_{p}(t)$ 代表电流调节器的 给定 $u_{ai}(t)$.

3 自适应速度控制器方案(Scheme of the adaptive speed controller)

为使该自适应控制方案具有普遍性意义,下面推 导自适应速度控制器的通用算法.

3.1 结构(Architecture)

构造自适应调速系统如图1所示,其中虚框内 为以算法为核心的自适应速度控制器;虚框外为 参考模型和等效被控对象;r(t)是系统的参考输 入; $y_m(t)$ 是参考模型的输出; $y_p(t)$ 是被控对象的输 出; $u_p(t)$ 是被控对象的控制输入; $u_1(t)$ 是控制器产 生的综合控制信号; $r_f(t), u_{pf}(t), y_{mf}(t)$ 分别是r(t), $u_p(t), y_m(t)$ 的滤波导数.





Fig. 1 Structure of the adaptive timing system

3.2 控制算法(Control algorithms)

设参考模型方程为

$$A_{\rm m}(p)y_{\rm m}(t) = K_{\rm m}B_{\rm m}(p)r(t). \tag{4}$$

式中:

$$A_{m}(p) = p^{n} + \sum_{i=0}^{n} a_{i}p^{i},$$

$$B_{m}(p) = p^{n} + \sum_{i=0}^{m} b_{i}p_{i}, m_{1} \leq n - 1,$$

 $a_i \pi b_i$ 均为已知常数; $r(t) \pi y_m(t)$ 分别为参考模型的输入和输出.

被控对象方程为

$$A_{\rm p}(p)y_{\rm p}(t) = K_{\rm p}B_{\rm p}(p)u_{\rm p}(t).$$
 (5)

式中:

$$A_{p}(p) = p^{n} + \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_{i} p_{i},$$

$$B_{p}(p) = p^{n} + \sum_{i=0}^{m_{2}} \beta_{i} p_{i}, m_{2} \ge m_{1}$$

 $y_{p}(t)$ 是被控对象的输出; $u_{p}(t)$ 是对象的控制输入; α_{i} , β_{i} 和 K_{p} 都是未知定常或慢时变参数, 且 $A_{p}(p)$ 和 $B_{p}(p)$ 都是Hurwitz多项式. 自适应调速系统的设计问题是:在对象参数变 化范围未知的条件下,对任意分段连续一致有界 的输入函数*u_r(t)*,找出对象的控制输入*u_p(t)*,使对 于任何初始条件,参考模型与被控对象间的输出误 差*e*(*t*)

$$e(t) = y_{\rm m}(p) - y_{\rm p}(t)$$
 (6)

渐近地收敛到零,即

$$\lim_{t \to \infty} e(t) = 0.$$

图1中

$$\begin{cases}
G(p) = \sum_{i=0}^{n-1} g_i p^i, \\
K(p) = \sum_{i=0}^{n-1} k_i p^i.
\end{cases}$$
(7)

k_c, g_i和k_i都是由自适应律调整的参数.

$$B_{\rm m}^*(p) = L(p)B_{\rm m}(p) = \sum_{i=0}^{n-1} b_i^* p^i.$$
 (8)

式中

$$L(p) = \sum_{i=0}^{n-m_1-1} l_i^* p^i.$$
 (9)

 l_i 是使参考模型传递函数分子多项式的阶数为n-1, 且使L(p)为Hurwitz多项式,并使L(p)与 $A_m(p)$ 互质 等条件所确定的补偿多项式系数.

1/N_f(p)为状态滤波器,其中

$$N_{\rm f}(p) = \sum_{i=0}^{n-1} f_i^* p^i + 1.$$
 (10)

由图1得

$$A_{\rm m}(p)y_{\rm m}(t) = K_{\rm m}B_{\rm m}^*(p)r'(t).$$
 (11)

这里 f_i 是人为确定的使 $N_f(p)$ 为Hurwitz多项式的正 值常数.

用式(11)减(5)得

$$A_{\rm p}(p)e(t) = [A_{\rm p}(p) - A_{\rm m}(p)]y_{\rm m}(t) + K_{\rm m}B_{\rm m}^*r'(t) - K_{\rm p}B_{\rm p}(p)u_{\rm p}(t).$$
(12)

上式两侧同乘
$$1/N_{\rm f}(p)$$
得

$$A_{\rm p}(p)e_{\rm f}(t) = [A_{\rm p}(p) - A_{\rm m}(p)]y_{\rm mf}(t) + K_{\rm m}\frac{B_{\rm m}^{*}(p)}{N_{\rm f}(p)}r'(t) - K_{\rm p}B_{\rm p}(p)u_{\rm pf}(t) + K_{\rm p}B_{\rm m}^{*}(p)u_{\rm pf}(t) - K_{\rm p}B_{\rm m}^{*}u_{\rm pf}(t).$$
(13)

式中: $e(t)/N_{\rm f}(p) = e_{\rm f}(t), y_{\rm m}(t)/N_{\rm f}(p) = y_{\rm mf}(t),$ $u_{\rm p}(t)/N_{\rm f}(p) = u_{\rm pf}(t).$ 由图1可见

$$\begin{cases} u_{\rm p}(t) = \frac{N_{\rm f}(p)}{B_{\rm m}^*} u_1(t), \\ r_{\rm f}(t) = \frac{B_{\rm m}^*}{N_{\rm f}(p)} r'(t). \end{cases}$$
(14)

$$A_{\rm p}(t)e_{\rm f}(t) = [A_{\rm p}(p) - A_{\rm m}(p)]y_{\rm mf}(t) + K_{\rm p}\frac{K_{\rm m}}{K_{\rm p}}r_{\rm f} + K_{\rm p}[B_{\rm m}^{*}(p) - B_{\rm p}(p)]u_{\rm pf}(t) - K_{\rm p}u_{1}(t).$$
(15)

取

$$u_1(t) = K_c r_f(t) - K(p) y_{mf}(t) - G(p) u_{pf}(t).$$
 (16)
将式(16)代入(15)得

$$A_{\rm p}(p)e_{\rm f}(t) = [A_{\rm p}(p) - A_{\rm m}(p) + K_{\rm p}K(p)]y_{\rm mf}(t) + K_{\rm p}[B_{\rm m}^{*}(p) - B(p) + G(p)]u_{\rm pf}(t) + K_{\rm p}(K_{\rm m}/K_{\rm p} - K_{\rm c})r_{\rm f}(t).$$
(17)

此时,若用线性补偿器
$$D(p) = \sum_{i=0}^{n-1} d_i^* p^i$$
来定义广
义误差 $v = D(p)e_f(t)$,得到
 $A_p(p)e_f(t) = [A_p(p) - A_m(p) + K_pK(p)]y_{mf}(t) + K_p[B_m^*(p) - B(p) + G(p)]u_{pf}(t) + K_p(K_m/K_p - K_c)r_f(t).$ (18)

在等价系统的前向方块中出现 $\frac{D(p)}{A_{p}(p)}$. 按照严格 正实性的要求,在确定系数 d_{i} 时,就应知道 $A_{p}(p)$ 的 系数 α_{i} 或其变化范围.这种关于被控对象先验知识 的需求限制了本方案的应用.

定理1 形如式(17)的误差系统, 若引入可调补 偿器

$$\hat{D}(p) = p^n + \sum_{i=0}^{n-1} d_i^* p^i.$$

式中d_i为自适应参数,且取广义误差为

$$v = \frac{\hat{D}(p)}{\tau p + 1} e_{\rm f}(t). \tag{19}$$

式中**7**为任意正常数,则式(17)对于对应的闭环系统 是渐近超稳定的,且自适应律与被控对象的先验知 识无关.

证 引入可调补偿器并定义广义误差后,系统 结构由图1改造成了图2.



图 2 具有可调补偿器的自适应调速系统的结构 Fig. 2 Structure of the adaptive timing system with adjustable compensator

在式 (17) 两边同时加上 $\hat{D}(p)e_{\rm f}(t)$, 并将 $A_{\rm p}(p)e_{\rm f}(t)$ 移项得

$$\hat{D}(p)e_{\rm f}(t) = [\hat{D}(p) - A_{\rm p}(p)e_{\rm f}(t)] + [A_{\rm p}(p) - A_{\rm m}(p) + K_{\rm p}K(p)]y_{\rm mf}(t) + K_{\rm p}[B_{\rm m}^{*}(p) - B_{\rm p} + G(p)]u_{\rm pf}(t) + K_{\rm p}(\frac{K_{\rm m}}{K_{\rm p}} - K_{\rm c})r_{\rm f}(t).$$
(20)

在上式两边同时除以
$$\tau$$
p+1,并考虑式(19),得
 $v = \frac{1}{\hat{D}(n)} - A_{\tau}(n) e_{\tau}(t) + t$

$$\tau p + 1^{[D](p)} - A_{\rm m}(p) + K_{\rm p}K(p)]y_{\rm mf}(t) + [A_{\rm p}(p) - A_{\rm m}(p) + K_{\rm p}K(p)]y_{\rm mf}(t) + K_{\rm p}[B_{\rm m}^{*}(p) - B_{\rm p}(p) + G(p)]u_{\rm pf}(t) + K_{\rm p}(\frac{K_{\rm m}}{K_{\rm p}} - K_{\rm c})r_{\rm f}(t).$$
(21)

式(21)为新的等价反馈系统方程. 其线性前向方 块的传递函数为 $\frac{1}{\tau p+1}$;大括号内为非线性反馈方 块.

因为前向方块中的 τ 为任意正的常数,所以 $\frac{1}{\tau p+1}$ 是严格正实的,即线性前向方块的传递函数 是严格正实的,故只需取如下参数调整律:

$$d_{i} = -\int \theta_{i1} v p^{i} e_{f}(t) dt - \theta_{i1} \theta_{i2} v p^{i} e_{f}(t),$$

$$i = 0, 1, \cdots, n - 1,$$

$$K_{c} = \int \gamma_{1} v r_{f}(t) dt + \gamma_{2} \gamma_{1} v r_{f}(t),$$

$$k_{i} = -\int \lambda_{i1} v P^{i} y_{mf}(t) dt - \lambda_{i2} \lambda_{i1} v P^{i} y_{mf}(t),$$

$$g_{i} = -\int \tau_{i1} v p^{i} u_{pf}(t) dt - \tau_{i2} \tau_{i1} v p^{i} u_{pf}(t),$$

$$i = 0, 1, \cdots, n - 1.$$
(23)

式中 $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \gamma_1, \gamma_2, \lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \tau_{i1}, \tau_{i2}$ 都是人为选定的 正值常数,所以可满足波波夫超稳定定理^[1],进而可 知式(21)的系统是渐近超稳定的. 证毕.

式(23)没有包含被控对象的先验知识,说明本文的控制器取消了被控对象先验知识的需求.

将式(23)代入式(16),可以写出*u*_p(*t*)的核心部分 *u*₁(*t*),供实现之用.

$$u_{1} = K_{c}r_{f} - [k_{n-1}(p^{n-1}y_{mf}) + k_{n-2}(p^{n-2}y_{mf}) + \dots + k_{0}y_{mf}] - [g_{n-1}(p^{n-1}u_{pf}) + g_{n-2}(p^{n-2})u_{pf} + \dots + g_{0}u_{pf}] = [\int \gamma_{1}vr_{f}(t)dt + \gamma_{2}\gamma_{1}vr_{f}(t)]r_{f} + [\int \lambda_{(n-1)1}vP^{n-1}y_{mf}dt + \lambda_{(n-1)2}\lambda_{(n-1)1}vp^{n-1}u_{pf}(t)] (p^{n-1}y_{mf}) + \dots + [\lambda_{01}vy_{mf}dt + \lambda_{02}\lambda_{01}vy_{mf}]y_{mf} + [\int \tau_{(n-1)1}vp^{n-1}u_{pf}(t)dt + \tau_{(n-1)2}\tau_{(n-1)1}vp^{n-1}u_{pf}(t)](p^{n-1}u_{pf}) + \dots + [\int \tau_{01}vu_{pf}dt + \tau_{02}\tau_{01}vu_{pf}]u_{pf}.$$
(24)

至于可调补偿器的输出信号v,可将式(22)代入式(19),即可得到

$$v = \frac{1}{\tau p+1} [d_{n1}(p^{n-1}e_{\rm f}) + d_{n2}(p^{n-2}e_{\rm f}) + \dots + d_{0}e_{\rm f}] = \frac{1}{\tau p+1} [\int \theta_{(n-1)1} v(p^{n-1}e_{\rm f}) dt + \theta_{(n-1)2} \theta_{(n-1)1} v(p^{n-1}e_{\rm f})(p^{n-1}e_{\rm f}) + \dots + (\int \theta_{01} ve_{\rm f} dt + \theta_{02} \theta_{01} ve_{\rm f})e_{\rm f}].$$
(25)

4 性能研究(Performance analysis)

现将工作台的PI调速系统改造成自适应调速系统,即像文[7]那样用自适应速度控制器取代PI速度调节器.系统的电流环仍保持为PI控制,与电机一同作为自适应速度环的等效被控对象.

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:

$$W(s) = \frac{Y_{\rm m}(s)}{U_r(s)} = \frac{10^2}{s^2 + 2 \times 0.6 \times 10s + 10^2} = \frac{100}{s^2 + 12s + 100}.$$
 (26)

这里: $Y_{\rm m}(s)$ 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($M_{\rm p} = 9.5$ %, $t_s = 0.5$ s)达到了系统性能指标要求.

与式(4)对应的参考模型的算子式微分方程为

$$(p^2 + 12p + 100)y_{\rm m}(t) = 100u_r(t).$$
 (27)

其中 $y_{\rm m}(t)$ 和 $u_r(t)$ 分别与式(4)的 $Y_{\rm m}(s)$ 和 $U_r(s)$ 相对应.

依图2及式(24)和(25)可绘出龙门刨床自适应控制系统的细化原理图(篇幅所限,略),以供数字仿 真或实验研究.其中: L(p) = 0.1p + 1, F(p) = 10p + 100.



Fig. 3 Experimentation result

图3为实验结果. 横轴为时间轴, 每单元格代 表250 ms, 纵轴为测速电机检测电压, 每单元格代 表1 V, 对应转速为400 r/min. 图3(a)首先给出了参考 模型的输出电压信号 $y_m(t)$. 图3(b)给出了测速电机 的输出电压 $y_p(t)$ 与参考模型的输出电压 $y_m(t)$ 的对 比情况. 可以看出, 系统的超调量为6 %; 当误差带取 为 $\Delta = 0.05$ 时的调节时间为0.7 s; 系统的稳态误差 满足要求.

5 结论(Conclusion)

 1) 经典自适应控制方案通常是用被控对象状态 综合参数自适应律,但实际中的被控对象状态往往 不能直接测量;即便能够测量得到,信号也不同程度 地受到了噪声污染,这显然对构造控制器不利.由于 参考模型的状态极少受到污染,故由式(26)给出的 只利用参考模型状态来综合自适应律的通用算法, 提高了系统的抗噪能力,因而更具有实用价值. 引入了可调补偿器, 避开了关于被控对象先 验知识不足的限制, 既可以节省一些检测装置, 降低 系统成本, 又可以简化系统的物理结构.

3) 图3表明 $y_{p}(t)$ 对 $y_{m}(t)$ 的跟踪状况及输出误差 收敛情况,满足了系统性能指标的要求,说明自适应 控制器的作用是有效的.

参考文献(References):

- LANDAU I D. Adaptive Control-The Model Reference Approach[M]. New York: Marcel Dekker, 1979: 1 – 101.
- [2] ASTROM K J, WITTENMARK B. Adaptive Control[M]. 2nd. MA: Addision-Wesley, 1995: 1 – 33.
- [3] MAURIZIO C, MARCELLO P. An MRAS-based sensorless highperformance induction motor drive with a predictive adaptive model[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2005, 52(2): 532 – 551.
- [4] 吴玉香, 王灏, 毛宗源, 等. 机器人轨迹跟踪的间接自适应模糊控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(5): 748 756.
 (WU Yuxiang, WANG Hao, MAO Zongyuan, et al. Fuzzy indirect adaptive controller for manipulator trajectory tracking applications[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(5): 748 756.)
- [5] MONOPOLI R V. Model reference adaptive control with an augmented error signal[J]. *Automaica Control*, 1974, 19(5): 474 – 484.
- [6] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版 社, 1999: 48 – 94.
 (CHEN Boshi. *Electric Drive Auto-control System*[M]. 2nd. Beijing: Mechanical Industry Press, 1999: 48 – 94.)
- [7] 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. The experiment research on two adaptive speed regulating systems[J]. *Control Theory & Applications*, 1990, 7(2): 47 53.)

作者简介:

徐国凯 (1956—), 男, 大连民族学院机电信息工程学院教授, 学校优秀教学带头人, 研究方向为自适应控制理论与应用, E-mail: xgk@dlnu.edu.cn;

游林儒 (1956—), 男, 华南理工大学自动化科学与工程 学院教授, 研究方向为电力电子技术与电气传动控制, E-mail: aulryou@scut.edu.cn;

赵秀春 (1979—), 女, 大连民族学院机电信息工程学院助教, 研究方向为自适应控制理论与应用, E-mail: zxc@dlnu.edu.cn;

宋 鹏 (1978—), 女, 大连民族学院机电信息工程学院工程 师, 研究方向为运动控制, E-mail: spony@dlnu.edu.cn;

刘长宏 (1968—), 男, 大连民族学院机电信息工程学院工程师, 研究方向为运动控制, E-mail: liuch@dlnu.edu.cn.