

基于力外环的模糊灰色预测力控制器

张广立 付莹 杨汝清

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200030)

摘要: 在基于位置环的显式力控制方案的框架内, 提出一种新型模糊灰色预测力控制策略。采用灰色预测器来预测将来的接触力, 通过模糊增益调节器将预测的接触力误差和实际测得的当前接触力误差进行合成形成一个综合接触力误差, 综合接触力误差作为 PID 或 PI 力补偿器的输入变量, 力补偿器生成位置控制系统的输入指令。这样该控制器可以利用过去、当前和将来的接触力信息来计算合适的控制校正量来对接触力误差进行预补偿, 使控制器可以同时获得超调量小和响应快速的性能。而且, 该控制器可以按照当前和将来的接触力状态来调节预测的接触力误差和实际测得的当前接触力误差的权值, 使控制器对机器人和环境之间的动态接触过程具有适应性。最后用仿真试验证明所提出的模糊灰色预测力控制器的有效性。

关键词: 力控制 显式力控制 灰色预测 模糊增益调整 机器人控制

中图分类号: TP24

0 前言

很多由机器人操作臂执行的自动任务要求机器人与环境接触, 例如推挤、刮削、去毛刺、锤击、抛光、扭绞加工、切削和雕刻等。所有这些任务都内在要求机器人可以进行力控制。关于设计完全的位置/力控制策略已经吸引了很多研究人员^[1~3]。总的来讲, 可以将机器人力控制算法划分为三类^[4]: 阻抗控制、混合力/位控制和显式力控制。显式力控制主要有两类^[5]: 基于力的和基于位置内环的。基于位置内环的显式力控制可以在不改动原有位控系统的基础上实现力控制, 具有广泛的应用。由于位置控制系统和操作臂机械部分的滞后, 当环境刚度高时, 基于位置的显式力控制方案易于产生超调或振荡。而且不同环境有不同的刚度, 有时会变化好几个数量级, 根据标称环境设计的力补偿器在不同环境下将导致不一致的动态响应, 甚至导致力控系统不稳定。

在基于位置内环的显式力控制框架内, 采用灰色预测和模糊原理开发一种简单实用的接触力控制方法。所提出的模糊灰色预测力控制, 采用模糊灰色预测控制器作为力补偿器, 可对接触力误差进行预补偿, 使控制器对接触动态过程具有适应性, 从而使常规显式力控制的性能和鲁棒性大大改善。

1 基于位控环的显式力控制

显式力控制直接控制和测量力的大小, 使输出尽可能跟踪输入。到目前为止最经常讨论的基于力的显式力控制方法通常采用 PID 控制的某种形式, 还有各种滤波的简单形式。基于位置内环的显式力控制中有一个力外环为一个内部位置控制器提供位置指令。实际上这两种控制方案是等价的^[5]。重点对基于位置内环的显式力控制进行研究。

因为操作臂位置控制系统保证了笛卡尔坐标下的轨迹跟踪, 内部位置控制器实际上实现了机器人动力学解耦, 所以为了分析方便, 可以将末端执行器位置矢量 \mathbf{X} 用标量 x 代替, 这里的标量 x 可以代表 \mathbf{X} 的任何一个元素。而且, 可以将每个位置控制的末端执行器坐标用一个二阶线性连续时间系统进行建模^[6,7], 因此对每个末端执行器坐标, 从指令位置到实际位置的标量传递函数为

$$G(s) = \frac{x(s)}{x_c(s)} = \frac{k_m}{m_m s^2 + c_m s + k_m} = \frac{b}{s^2 + as + b} \quad (1)$$

式中 m_m, c_m, k_m ——位控操作臂在笛卡尔空间的质量、阻尼和刚度

$$a = c_m / m_m$$

$$b = k_m / m_m$$

这个简单的模型可以充分考虑到运动学正解计算所带来的小时滞和位置控制伺服环的动力学, 特别适合采用高减速比的工业机器人。

通常可以在特定笛卡尔坐标轴的方向上用一个刚度为 k_{en} 的线性弹簧对环境进行建模。类似地, 因

为与补偿器和操作臂的时间常数相比传感器的动态特性可以忽略,所以位于末端执行器上的力/力矩传感器可以用刚度为 k_{sn} 的纯弹簧来建模。这样在某个笛卡尔方向,传感器加上环境的有效刚度为

$$k_e = \frac{1}{\frac{1}{k_{en}} + \frac{1}{k_{sn}}} \quad (2)$$

位控操作臂在笛卡尔空间的质量、阻尼和刚度需要通过系统辨识的方法获得。迄今为止,系统模型辨识方法可以分成两大类^[8~10],一类是非参数模型辨识方法,另一类是参数模型辨识方法。非参数模型辨识方法主要有频率响应法、阶跃响应法和脉冲响应法;而参数模型辨识方法有最小二乘法、梯度校正法和极大似然法。阶跃响应法和脉冲响应法对机电系统的冲击过大,同时它们不能给被辨识的机电伺服系统以持续的激励,从而降低了模型的辨识精度;频率响应法则没有冲击过大的缺点,但要得到足够精确的辨识精度则需要正弦输入激励信号足够宽的频率范围,造成模型辨识的工作量过大。由于程序编制简单并具有一定的精度,所以实际的辨识应用中往往选择最小二乘法方法,该方法是一次辨识法,可以大大降低辨识的试验和计算工作量。J. D. Schutter 等^[11]采用阶跃响应的方法来辨识操作臂在笛卡尔空间的质量、阻尼和刚度。参考文献[12]用逆 M 序列作为输入激励信号采用最小二乘法对位控系统的模型进行辨识。

设计一个基于位置环的显式力控制器的主要任务就是确定力补偿器,力补偿器给位置内环提供参考位置。衡量柔顺运动控制有效性的一个合适的度量标准是机械导纳 Z,定义为^[13]

$$Z = \frac{v_f}{F} \quad (3)$$

式中 v_f ——接触点处末端执行器的速度
 F ——末端执行器和环境的接触力
 力补偿器的传递函数 $F_C(s)$ 可以表达为

$$F_C(s) = \frac{x_f(s)}{e_f(s)} = \frac{1}{s} Z(s) \quad (4)$$

式中导纳 $Z(s)$ 将力误差 $e_f = F_r - F$ 与末端执行器速度扰动量 $v_f(s)$ 联系起来。如果选择 $Z(s)$ 为一个二阶导纳模型,可以得到一个 PID 力补偿器;采用一阶导纳模型将得到一个 PI 力补偿器。

2 模糊灰色预测力控制

提出一种模糊灰色预测力控制方案来增强常规基于位置环的显式力控制的性能和鲁棒性。该控制

方案采用模糊增益调整和灰色预测技术来综合利用过去、当前和将来的接触力信息来计算合适的控制校正量,以对接触力误差进行预补偿。

2.1 灰色预测

灰色预测方法最初由邓聚龙教授^[14,15]提出。灰色预测最明显的优点就是只需要少数几个数据就可以建立一个灰色模型。不像传统预测方法那样要求相当多的数据和很好的分布特性,灰色预测最少只需要 4 个数据,这使得灰色预测可用于实时控制系统中。随着近来灰色理论和微处理器的发展,灰色控制理论被越来越多地应用于工程各个领域。

尽管灰色预测的预测过程很简单,但是灰色预测存在一个缺点,它只能处理恒正数列^[14,15]。但是灰色预测用于控制系统时,因为系统的响应可能是正的,也可能是负的,所以必须将非恒正数列变换为恒正数列。就采用数列变换的方法来处理非恒正数列的灰色建模。采用的变换为

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp[(c-x)/d]} \quad f(x) \in (0,1) \quad (5)$$

$$f^{-1}(x) = c + d \ln \frac{x}{1-x} \quad d \neq 0 \quad (6)$$

S. C. Liaw 等^[16]指出,通过选择灰色常数 c 和 d ,基于数据变换的 GM (1,1)可得到比传统灰色模型更高的预测精度。这就需要根据给定的数据序列寻找合适的变换参数。式(5)所描述的变换,其基函数及其导数为

$$f_0(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad f_0(x) \in (0,1) \quad (7)$$

$$f_0'(x) = \frac{\exp(-x)}{[1 + \exp(-x)]^2} \quad (8)$$

$f_0'(x)$ 以 x 轴为对称轴,存在一个单峰,最大值在 $x=0$ 处取得,并且在 $|x|>0$ 时衰减为较小的值。所以从减小还原误差的角度考虑,应将原始序列变换到 $x=0$ 附近的区域,再通过 $f_0(x)$ 进行变换。式(6)中逆变换的定义域为(0, 1),如果变换序列的预测值不在(0, 1)的范围,则逆变换无意义。为了避免变换序列的预测值超出(0, 1)的范围,应将原始序列变换到区间(0, 1)的中间且尽量不要靠近区间两端,当预测步长较大时尤其应该注意这一点。由于 $f_0(0.1)=0.525$, $f_0(-0.1)=0.475$,两者离区间(0, 1)有一定距离,可以在很大程度上避免变换序列的预测值超出(0, 1)的范围。根据以上分析,取

$$\begin{cases} c = [\max(X^{(0)}) + \min(X^{(0)})]/2 \\ d = [\max(X^{(0)}) - \min(X^{(0)})]/0.2 \end{cases} \quad (9)$$

2.2 模糊灰色预测力控制器试验方案

由前文可知,基于位置的显式力控制通常采用

PID 或 PI 控制器作为力补偿器。传统的 PID 控制器是根据过去和当前输出信息进行后补偿。而灰色预测控制由于在每一步都用预测的输出来计算相应的控制校正量，具有误差预补偿的能力，具有较强的抗干扰能力。一般情况下灰色预测控制器的设计大多数是在说明如何整定灰色预测的预测步长^[17~18]。通过选择合适的预测步长，一般可以得到无超调的系统响应和良好的鲁棒性和抗干扰性，但同时会导致系统响应时间较慢。所以可以将普通 PID 控制器和灰色预测控制器结合起来形成一种混合控制器以达到更好的性能。

提出一种简单并有效的模糊灰色预测混合力控制方案，通过一个模糊增益调节器将普通 PID/PI 力补偿器与灰色预测结合起来，以增强力控制系统的动态性能和鲁棒性。采用灰色预测对将来的接触力进行预测。当前接触力误差和预测的接触力误差通过模糊增益调节器合成为一个综合接触力误差。模

糊增益调节器可根据当前接触力误差和预测的接触力误差的大小来调整两者在综合接触力误差中所占的比重。综合接触力误差作为 PID/PI 力补偿器的输入变量，力补偿器的输出作为位置控制系统的输入指令，由位置控制系统驱动机器人运动，从而实现所需的接触力。模糊灰色预测混合力控制器可以利用过去、当前和将来的接触力信息来计算合适的位置调整量，从而同时达到响应快速、超调量小和调节时间短的控制性能。

提出控制方案如图 1 所示。其中灰色预测用来估计将来的接触力。该控制方案采用了基于位置环的力控制方案，力控制器由三部分组成：PID/PI 力补偿器、灰色预测器和模糊增益调节器。综合接触力误差 $e_{fs}(k)$ 作为 PID/PI 控制器的输入变量。 $F_r(k)$, $F_r(k+p_s)$, $F(k)$, $\hat{F}(k+p_s)$, $e_f(k)$ 和 $\hat{e}_f(k+p_s)$ 分别为当前力设定值、超前 p_s 步的力设定值、当前接触力、当前接触力误差和超前 p_s 步的预测接触力误差

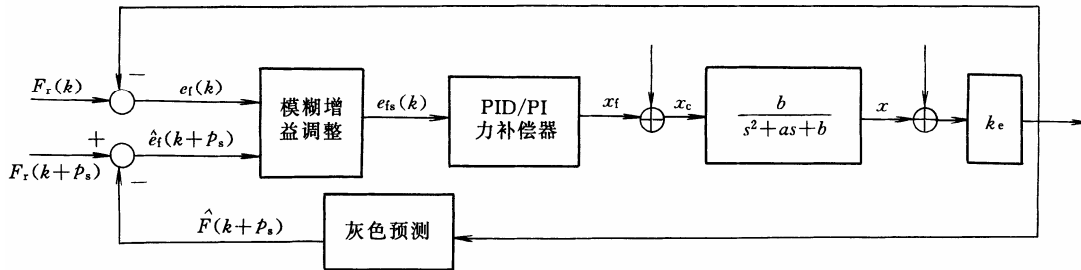


图 1 模糊灰色预测力控制器框图

$$e_f(k) = F_r(k) - F(k) \quad (10)$$

$$\hat{e}_f(k+p_s) = F_r(k+p_s) - \hat{F}(k+p_s) \quad (11)$$

模糊增益调节器的增益规则库可以表示为

$$R^{(l)}: \text{If } e_f(k) \text{ is } F_{F_1}^l \text{ and } \hat{e}_f(k+p_s) \text{ is } F_{F_2}^l$$

$$\text{Then } u^l = C_1^l e_f(k) + C_2^l \hat{e}_f(k+p_s) \quad l=1,2,\dots,n \quad (12)$$

式中 $R^{(l)}$ 是第 l 条规则， C_1^l 和 C_2^l 分别为 $e_f(k)$ 和 $\hat{e}_f(k+p_s)$ 的权值。按照加权平均解模糊方法，模糊增益调节器的输出为

$$e_{fs}(k) = \frac{\sum_{l=1}^m \mu_{F_1^l}(e_f(k)) \mu_{F_2^l}(\hat{e}_f(k+p_s)) u^l}{\sum_{l=1}^m \mu_{F_1^l}(e_f(k)) \mu_{F_2^l}(\hat{e}_f(k+p_s))} \quad (13)$$

从式(13)可以看到，通过 C_1^l, C_2^l 和语言变量的隶属函数可以改变综合接触力误差。这些参数可以通过经验方法确定。通过模糊增益调整，可以按照当前接触力误差和将来接触力误差来确定综合接触力误差 $e_{fs}(k)$ 。模糊增益调整的输出 $e_{fs}(k)$ 作为一个 PID/PI 力控制器的输入，力控制器根据 $e_{fs}(k)$ 来确定位置扰动量 x_f 。 x_f 相当于位置指令 x_r 的修正量，两

者相加形成位置控制系统的输入指令，从而实现力/位控制。

3 仿真研究

为了检验所提出的力控制方案的有效性，本节对常规导纳力控制和模糊灰色预测力控制进行了仿真研究。因为操作臂位置控制系统对机器人动力学进行了解耦，所以在仿真中只考虑一个位控末端执行器坐标，可以用一个二阶连续系统对其进行建模，其传递函数如式(1)。在仿真中式(1)中的参数取 $a=6, b=9$ 。传感器加上环境的有效刚度 k_e 为 2.6×10^4 N/m。在仿真中力补偿器为一个 PI 控制器。力控制环的采样频率为 0.002 s。首先用 Ziegler-Nichols 整定方法对 PI 控制器参数进行初步整定。PI 控制器的临界增益和临界振荡周期分别为 0.025 70 s 和 0.081 10 s。因为通过 Ziegler-Nichols 整定得到的参数导致接触力的阶跃响应出现较多振荡，在此基础上对参数进行了再整定，得到 PI 控制器的参数为 $k_p=0.000\ 085\ 65$ 和 $k_i=0.000\ 143\ 6$ 。PI 控制器的参数对两种控制方案都一样。在模糊灰色预测力控制方案中，采用 GM(1,1)模型进行建

模和预测, 预测步数为30。

模糊增益调整的规则和隶属度函数分别见表和图2。按照惯例, 这里模糊集的含义为, PL为正大,

PM为正中, PS为正小, ZR为零, NS为负小, 等。为了简化模糊增益调节器, $\hat{e}_f(k+p_s)$ 的论域为一个有三个等级的离散论域, 这里对应的模糊集含义分别为, P为正, ZR为零, N为负。

表 模糊增益调度的规则(C_1^i, C_2^i)

\hat{e}'	$e(k)$						
	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
N	1.0,0.6	0.9,0.7	0.7,0.8	0.4,1.6	0.2,1.2	0.1,1.4	0.1,1.6
ZR	0.1,0.9	0.2,0.9	0.2,1.0	0.3,1.4	0.2,1.0	0.2,0.9	0.1,0.9
P	0.1,1.6	0.1,1.4	0.2,1.2	0.4,1.6	0.7,0.8	0.9,0.7	1.0,0.6

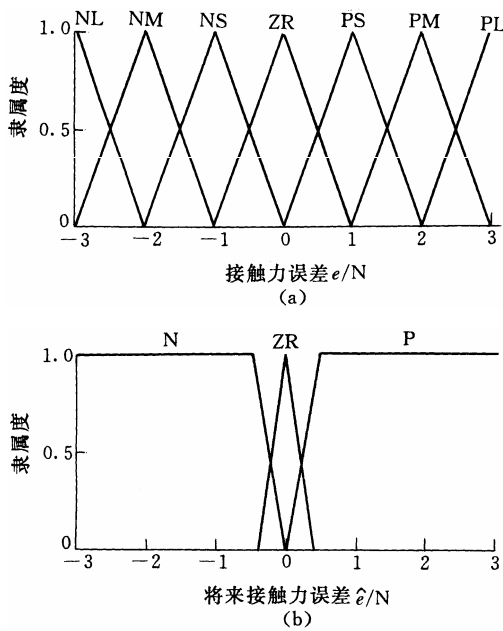


图2 模糊增益调节器语言变量的隶属函数

为了检验所提出的力控制方案的动态性能、抗干扰性和鲁棒性, 进行了两类仿真试验, 一种是动态性能试验, 一种是鲁棒性试验。

3.1 动态性能

基于位置环的PI力控制和模糊灰色预测力控制的阶跃响应如图3所示, 其中PI代表基于位置环的PI力控制, FGPC代表模糊灰色预测力控制。接

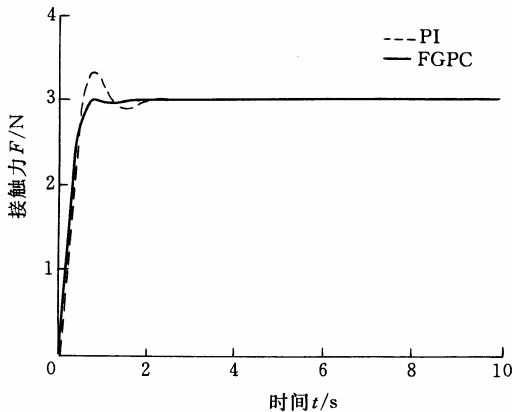


图3 两种控制方案的阶跃响应

触力设定值为3 N。从图3可以看出普通基于位置环的PI力控制的上升时间很短, 但超调量大, 调节时间长。而模糊灰色预测力控制可以同时达到上升时间短且超调量小, 这对常规基于位置的PI力控制来说比较困难。显然所提出的控制方案具有比普通基于位置环的PI力控制更好的动态性能。

3.2 鲁棒性试验

为了检验所提出的控制方案在各种环境刚度下的有效性, 将环境刚度 k_e 变为 $k_e=480\ 000\ \text{N/m}$, 这是原来刚度的20倍。两种控制方案的响应如图4所示。从图4可以看出, 在刚度变高的情况下, PI力控制在进入稳态前造成接触力产生更多的振荡, 并且超调量大大增加。而这里提出的模糊灰色预测力控制仍然保持了以前的控制性能, 即超调量小且上升时间短。

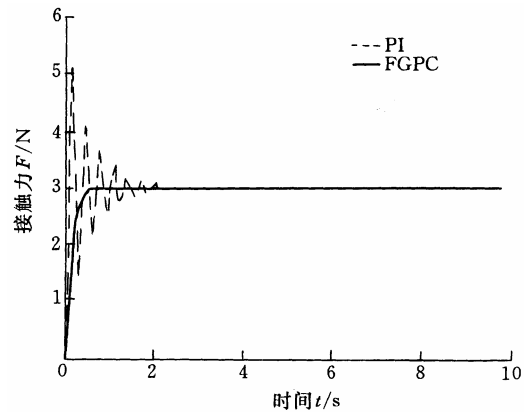


图4 $k_e=480\ 000\ \text{N/m}$ 时的阶跃响应

为了检验提出的控制方案对环境刚度出现意外变化时的鲁棒性, 在 $t=5\ \text{s}$ 时将环境刚度从 $k_e=24\ 000\ \text{N/m}$ 变到 $k_e=240\ 000\ \text{N/m}$ 。图5显示了在该任务中接触力的变化情况。从图5可以看出, 在 $t=5\ \text{s}$ 时由于环境刚度发生变化导致接触力出现扰动, 在两种控制方案下, 接触力随后都收敛到设定值。但是这两种控制方案的动态特性却不同。对模糊灰色预测力控制, 接触力在1 s内很快恢复到设定值。而对PI力控制, 接触力在收敛到设定值之前产生了很多

振荡, 并且收敛时间更长。

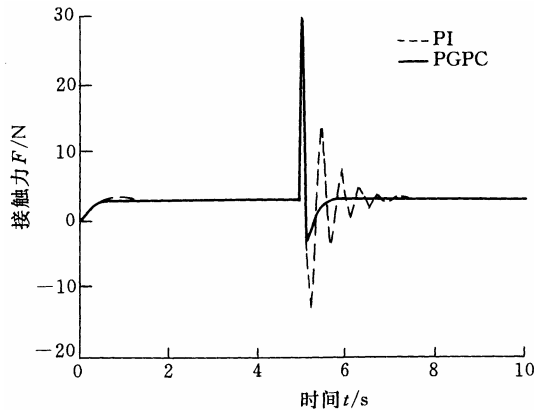


图 5 当环境刚度变化时接触力的变化

4 结论

讨论了基于位置环的显式力控制。在简要介绍基于位置环的显式力控制的框架之后, 在基于位置的显式力控制框架的基础上提出了一种新型模糊灰色预测力控制。所提出的控制方案采用模糊增益调整将预测的接触力误差和当前实际的接触力误差合成为一个综合接触力误差。而且, 所提出的控制器可以按照当前和将来接触力的状态来调整预测的接触力误差和当前实际的接触力误差的权值, 这样该控制器对机器人和环境之间的动态接触过程具有适应性。还提出了一种简单且有效的确定数据变换参数的方法, 消除了灰色预测对数据非负的要求, 从而扩大了灰色预测在控制系统中的应用。

仿真结果表明, 提出的控制方案具有比基于位置环的 PI 力控制更好的动态性能。而且当环境发生大的突然改变时, 所提出的控制方案仍然保持设定值调节和干扰抑制的特性, 从这点上来讲, 所提出的控制方案具有一定鲁棒性。

提出的模糊灰色预测力控制方案很简单且在计算上效率很高。因此该控制方案可以应用于高采样频率的实时力控制中。

参 考 文 献

- 1 Whitney D E. Force feedback control of manipulator fine motions. ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1977, 99: 91~97
- 2 Raiber M, Craig J. Hybrid position/force control of manipulators. ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1981, 102 (2): 126~133
- 3 Hogan N. Impedance control: an approach to manipulation. part I-II. Int. J. of Robotics Res. 1985, 107 (1): 1~24
- 4 Zeng G W, Ahmad H. An overview of robot force control. Robotica, 1997, 15: 473~482
- 5 Richard V, Pardeep K. A theoretical and experimental investigation of explicit force control strategies for

- manipulators. IEEE Trans. on Automa. Contr., 1993, 38 (11): 1 634~1 650
- 6 Homayoun S. Adaptive admittance control: an approach to explicit force control in compliant motion. In: Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, 1994: 2 705~2 712
- 7 Kazerooni H, Waibel B J, Kim S. On the stability of robot compliant motion control. ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1990, 112: 417~426
- 8 方崇智, 萧德云. 过程辨识. 北京: 清华大学出版社, 1988
- 9 Ljung L. System Identification-Theory for the User. Englewood Cliffs. NJ: Prentice Hall, 1987
- 10 梅志千. 机电伺服系统中的补偿技术研究: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2003
- 11 Schutter J D, Brussel H V. Compliant robot motion II: a control approach based on external control loops. Int. J. of Robotics Res., 1988, 7(4): 18~33
- 12 张广立. 开放式机器人力控制系统及先进力控制策略的研究: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2004
- 13 Newman W S. Stability and performance limits of interaction controllers. ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1992, 114: 563~570
- 14 Deng J L. Control problem of grey systems. System and Control Letters, 1982, 5: 288~294
- 15 Deng J L. Introduction to grey system theory. Journal of Grey System, 1989, 1(1): 1~24
- 16 Liaw S C, Chung H Y, Lee C J. Grey predictive current control for induction motor drives by space voltage vector PWM. In: Proceeding of the 1997 Automatic Control Conference, Taiwan, China, 1997: 529~534
- 17 Hong C M, Lin S C, Chiang C T. Control of dynamic system by fuzzy-based grey prediction controller. Journal of Grey System, 1995, 7(1): 23~44
- 18 Chen J Y. Tuning of prediction step in grey prediction controller using stochastic learning. Journal of Grey System, 1996, 8(4): 337~57

FUZZY GREY PREDICTION FORCE CONTROL SCHEME BASED ON OUTER FORCE CONTROL LOOP

Zhang Guangli Fu Ying Yang Ruqing

(下转第 186 页)