

# 基于 Fuzzy 推理的自调整 PID 控制器\*

李 卓 萧德云 何世忠

(清华大学自动化系·北京, 100084)

**摘要:** 本文提出一种新的基于 Fuzzy 推理的 PID 自整定控制器, 它利用 Fuzzy 推理, 对系统所处的不同状态实现 PID 参数的在线自动整定, 使系统在任何状态下, 都能得到比传统 PID 更好的控制效果和更强的鲁棒性. 仿真结果也证明了这一点.

**关键词:** Fuzzy 推理; PID 控制; 参数自整定

## 1 引 言

PID 控制器结构简单、工作稳定、鲁棒性较强, 但是对于静态与动态性能之间的矛盾、跟踪设定值与抑制扰动之间的矛盾、鲁棒性与控制性能之间的矛盾等方面还没能很好地得以解决. 通常采用折衷的方法, 系统不能获得最佳的控制效果.

对于 PID 控制存在的问题, 应该认为并不是 PID 本身引起的, 而是(线性)PID 控制中 P, I, D 的线性组合、系统特性变化与控制量之间的线性映射关系所造成的. P, I, D 三种控制作用, 对于获得良好的控制来说都是必要的, 但还不是充分的条件. 为了克服传统 PID 控制的缺陷、提高控制系统的性能, 本文提出一种新的 Fuzzy 自整定控制方案, 具体结构如图 1 所示. 它由一个标准 PID 控制器和一个 Fuzzy 自调整机构组成, Fuzzy 自调整机构根据输入信号(即偏差  $e$ ) 的大小、方向以及变化趋势等特征, 通过 Fuzzy 推理作出相应决策, 在线整定 PID 参数  $K_p, K_i, K_d$ , 以期获得满意的控制效果.

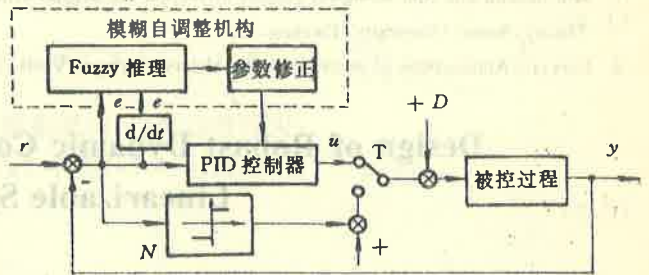


图 1 Fuzzy 自调整 PID 控制器

它由一个标准 PID 控制器和一个 Fuzzy 自调整机构组成, Fuzzy 自调整机构根据输入信号(即偏差  $e$ ) 的大小、方向以及变化趋势等特征, 通过 Fuzzy 推理作出相应决策, 在线整定 PID 参数  $K_p, K_i, K_d$ , 以期获得满意的控制效果.

## 2 PID 控制器参数与动态响应的关系

连续系统 PID 控制算式为

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]. \quad (1)$$

相应的增量式数字 PID 控制算式为

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)], \\ u(k) &= u(k-1) + \Delta u(k). \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $K_p, K_i, K_d$  分别为比例、积分、微分系数,  $K_i = K_p \frac{T}{T_i}, K_d = K_p \frac{T_d}{T}, T$  为采样周期.

采用传统 Ziegler-Nichols 规则(ZN 规则), 基于临界振荡方法提取特征值  $K_c, T_c$ , 控制器

\* 国家自然科学基金资助项目.

本文于 1995 年 4 月 6 日收到, 1996 年 4 月 19 日收到修改稿.

参数计算公式为

$$K_p = 0.6K_r, \quad T_i = 0.5T_r, \quad T_d = 0.125T_r. \quad (3)$$

按此公式求得的控制参数,相应的上升时间短,但超调大. Åström<sup>[1]</sup>在原来的 ZN 方法上引进一个继电器非线性元件,使被控系统很容易发生等幅的自激振荡,可方便地在线检测  $K_r$  和  $T_r$ . Hang and Åström<sup>[2]</sup>提出所谓 Refined ZN 公式(RZN 规则),在原 ZN 规则上增加了设定值权重系数和积分项修正系数.用适当的设定值权重系数克服上超调,积分项修正系数减小下超调及改善抗扰特性.但无论是 ZN 规则还是 RZN 规则整定的 PID 参数,一旦计算好以后在整个控制过程中就是固定不变的.这样的控制很难同时适应跟踪设定值和抑制干扰的作用,也无法适应过程特性的变化.那么,PID 参数又应以怎样的方式去适应系统的动态过程呢?

1) 首先应该指出,对于跟踪设定值和抑制扰动两种情况下的整定参数不应是一致的,原因在于积分作用.一个跟踪设定值和抑制扰动的动态过程示于图 2(a)(实线),同时给出了偏差  $e$  和偏差变化  $\dot{e}$  的变化曲线.可以看出,对于设定值响应,当设定值一发生变化,偏差就变大.而对扰动响应,在扰动变化引起过程开始偏离设定值之前,偏差始终为零.由于这个原因,  $\int e dt$  对设定值响应往往偏大,因此系数  $\frac{1}{T_i}$  相对于克服扰动就要偏小,即需要  $T_{i\text{扰动}} < T_{i\text{给定}}$ .实际上,

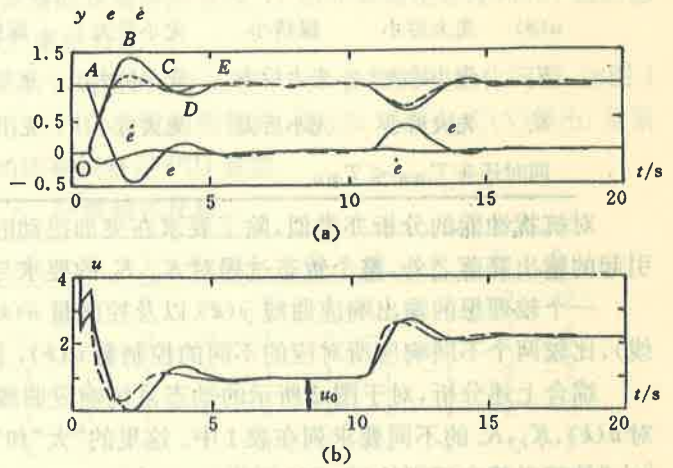


图 2 典型的动态过程

RZN 规则就是通过设置  $\beta T_i$  ( $\beta < 1$ ) 来减小积分时间常数以改善抗扰特性的,但这样做  $T_{i\text{给定}}$  也同时减小了;为了改进跟踪特性,又通过减小设定值权重来减小超调量,这样做的结果往往又会减慢响应速度.

2) 在跟踪设定值(或者抑制扰动)的暂态过程中,PID 参数也不应是固定不变的,即系统在不同的状态对于 P, I, D 控制作用的要求应该是不同的.图 2(b)(实线)示出了跟踪给定和抑制扰动暂态过程  $u(k)$  的变化情况.设维持系统输出与设定值相等的  $u(k)$  为  $u_0$ ,可以看出,  $y(k)$  在 AB 段的超调是由于 OA 段  $u(k)$  大于  $u_0$ ,而且过程存在惯性(或迟延)造成的. BC 段回调是由于 AB 段  $u(k)$  小于  $u_0$ ,同样 CD 下超调是因为 BC 段  $u(k)$  小和惯性的原因, DE 回升是因为 CD 段  $u(k)$  的升高.因此要想动态过程响应快,超调小,希望在  $u(k)$  在 OA 的开始段取较大值,以加快响应速度,而在不到 A 点时,  $u(k)$  就应小下去,以避免超调,即 OA 段  $u(k)$  应先大后小. AB, BC, CD 等其它各段对  $u(k)$  的要求可见表 1.

再从偏差  $e$ 、偏差变化  $\dot{e}$  以及 PID 增量算式来看

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) \text{ (暂不考虑微分作用),}$$

即

$$\Delta u(k) = K_p \dot{e} + K_i e. \quad (4)$$

OA 段 ( $\dot{e} < 0, e > 0$ ): 系统输出趋向稳态值的速度应越快越好,即应尽快消除偏差.由式 (4) 知,应加大偏差的权重,即  $K_i$  取较大值,  $K_p$  取较小值.当快接近 A 点时,为了减小超调,应

加大误差变化的权重,即增加  $K_p$  值,减小  $K_i$  值,这样反号的比例作用阻碍了积分作用,因而可避免积分超调及随之带来的振荡,有利于控制.  $AB$  段 ( $\dot{e} < 0, e < 0$ ): 系统输出值已超过稳态值,向偏差增大的方向变化. 在此阶段,控制作用应该尽力压低超调. 当刚刚离开  $A$  点时,应加大偏差变化的权重,即  $K_p$  取较大值  $K_i$  取较小值.  $BC, CD, DE$  等其它各段对  $K_p, K_i$  的要求可见表 1.

表 1 系统响应曲线不同阶段对  $u(k), K_p, K_i$  的要求

|                            | OA 段  | AB 段  | BC 段  | CD 段  | DE 段        |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $\dot{e}$                  | $< 0$ | $< 0$ | $> 0$ | $> 0$ | $< 0$       |
| $e$                        | $> 0$ | $< 0$ | $< 0$ | $> 0$ | $> 0$       |
| $u(k)$                     | 先大后小  | 保持小   | 先小后大  | 保持大   | 先大后小并逐渐趋于稳定 |
| $K_p$                      | 先小后大  | 先大后小  | 先小后大  | 先大后小  | 先小后大并逐渐趋于稳定 |
| $K_i$                      | 先大后小  | 先小后大  | 先大后小  | 先小后大  | 先大后小并逐渐趋于稳定 |
| 同时还有 $T_{i,扰动} < T_{i,给定}$ |       |       |       |       |             |

对抗扰性能的分析亦类似,除了要求在突加扰动时有  $T_{i,扰动}$  取较小值,以便尽快补偿扰动引起的输出降落之外,整个暂态过程对  $K_p, K_i$  的要求与跟踪设定值时的  $CD, DE$  段是相似的.

一个较理想的输出响应曲线  $y(k)$  以及控制量  $u(k)$  的变化曲线示于图 2(a) 和 (b) 中(虚线),比较两个不同响应所对应的不同的控制量  $u(k)$ ,上述分析便不难理解.

综合上述分析,对于图 2 所示的动态系统响应曲线的不同阶段,  $e, \dot{e}$  的特征以及动态过程对  $u(k), K_p, K_i$  的不同要求列在表 1 中. 这里的“大”和“小”是相对  $u_0$  而言的,  $K_p, K_i$  的“大”和“小”是基于某个规则的(如 ZN 规则).

### 3 模糊自整定 PID 控制器

前面定性分析得出的结论如何得到定量的表示,以便对系统实施有效的控制,作者的前期工作<sup>[3]</sup>为此提供了一个很好的借鉴方法. 在那里通过对模糊控制规则中修正因子  $\alpha$  的合理调整,来达到改善模糊控制器性能的目的. 在动态响应过程中,根据  $e$  和  $\dot{e}$  的特征信息由模糊推理产生了一个相应的、合理的  $\alpha$  变化曲线,如图 3 虚线所示<sup>[3]</sup>. 对照表 1 与图 3 可以发现,如果把  $\alpha$  函数按下式作用于  $K_p, T_i, T_d$ , 即

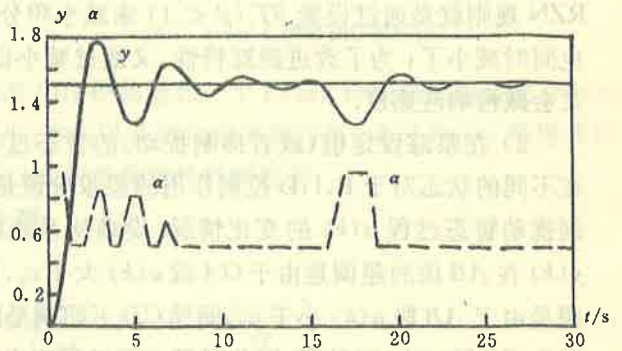


图 3 动态响应过程与  $\alpha(t)$  的关系

$$\begin{aligned}
 K_p &= K_{p0} \frac{1}{\gamma \alpha}, & \gamma &\in (1, 1.4), \\
 T_i &= T_{i0} \frac{\beta(1 + \alpha)}{2}, & \beta &\in (0.6, 1), \\
 T_d &= T_{d0}, & \alpha &\in (0.5, 1).
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

便可与动态过程中对  $K_p, K_i, K_d$  的变化要求相吻合. (5) 式中  $\gamma, \beta$  分别为比例增益和积分时间的调整系数,用以进一步调整控制效果,并经验地给出了它们的取值范围;  $K_{p0}, T_{i0}, T_{d0}$  为 PID 控制器的初始整定值. 如此作用下的 PID 参数既可满足对设定值跟踪的动态要求,又可兼顾

对抑制扰动性能的改善。

$\alpha(t)$  的产生:  $\alpha(t)$  的在线调整规律由一个 Fuzzy 推理生成. 根据当前的控制偏差  $\underline{E}$  和偏差变化  $\underline{EC}$ , 结合前面的分析以及具体受控过程的特点和实际经验推理产生出另一个模糊变量  $\underline{H}$ ,  $\underline{H}$  是反映  $\alpha$  在动态过程中应具有的变化趋势的模糊决策.  $\underline{H}$  经非模糊化处理得  $h(t)$ , 它被用于在线调整  $\alpha$ , 得到了下面的解析表达式

$$\alpha(t) = \alpha(t-1) + \eta h(t), \quad \alpha(t) \in (0, 1). \quad (6)$$

$\eta$  是一个正的常数, 用来调整  $\alpha$  的变化速度, 一般取  $\eta = 0.1, \alpha(0) = 1$ .

如果定义  $\underline{E}$  和  $\underline{EC}$  的模糊集为 {NB, NM, NS, O, PS, PM, PB},  $\underline{E}$  和  $\underline{EC}$  的论域为 {-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6},  $\underline{H}$  的论域为 {-2, -1, 0, 1, 2}, 则 Fuzzy mapping 的一个例子如表 2 所示.  $\alpha(t)$  的在线自调整即是简单的查表、 $\underline{H}$  的非模糊化处理和 (6) 式的修正运算.  $\alpha(t)$  生成后, 参数修正即按式 (5) 来进行.

由于该 Fuzzy 自整定 PID 控制器是基于规则的, 所以便有一个参数的初始化问题. 如图 1 所示, 其中 N 为继电特性非线性环节, 用于 PID 参数的预整定, 按 ZN 规则由式 (3) 得出. 当系统闭环运行后, Fuzzy 自调整系统就自动地在线整定 PID 参数.

表 2 非模糊化处理

| $\underline{E} \backslash \underline{EC}$ | -6 | -5 | -4 | -3 | -2 | -1 | 0 | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |
|---|----|----|----|----|----|----|---|----|----|----|----|----|----|
| -6  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 | -2 | -2 |
| -5  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 | -2 | -2 |
| -4  | 2  | 2  | 2  | 2  | 1  | 1  | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 | -2 | -2 |
| -3  | 2  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 | -2 | -2 |
| -2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 | -2 | -2 |
| -1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 | -2 | -2 |
| 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 1   | -2 | -2 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 2   | -2 | -2 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 3   | -2 | -2 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 2  |
| 4   | -2 | -2 | -1 | -1 | -1 | 0  | 0 | 1  | 1  | 2  | 2  | 2  | 2  |
| 5   | -2 | -2 | -1 | -1 | -1 | 0  | 0 | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  |
| 6   | -2 | -2 | -1 | -1 | -1 | 0  | 0 | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  |

## 4 仿真研究

仿真对象分别取

$$\text{过程 I} \quad \frac{e^{-ds}}{(1+s)^2}, \quad (7)$$

$$\text{过程 II} \quad \frac{1}{(1+s)^n}, \quad (8)$$

$$\text{过程 III} \quad \frac{1-ms}{(1+s)^3}. \quad (9)$$

扰动  $D = 60\%r$ , 采样周期  $T = 0.1s$ . 迟延过程(过程 I): 分别取  $d = 4$ (小迟延) 和  $d = 25$ (大迟延) 两种情况下的仿真结果分别示于图 4(a) 和 (b); 高阶系统(过程 II): 取  $n = 3$ , 仿真结果示于图 4(c); 非最小相位过程(过程 III): 取  $m = 1.5$ , 仿真结果示于图 4(d).

仿真结果表明, Fuzzy 自整定 PID 控制器较之 ZN, RZN 规则整定的 PID 控制器, 无论是在跟踪设定值还是抑制扰动方面, 控制效果都有很大改善.

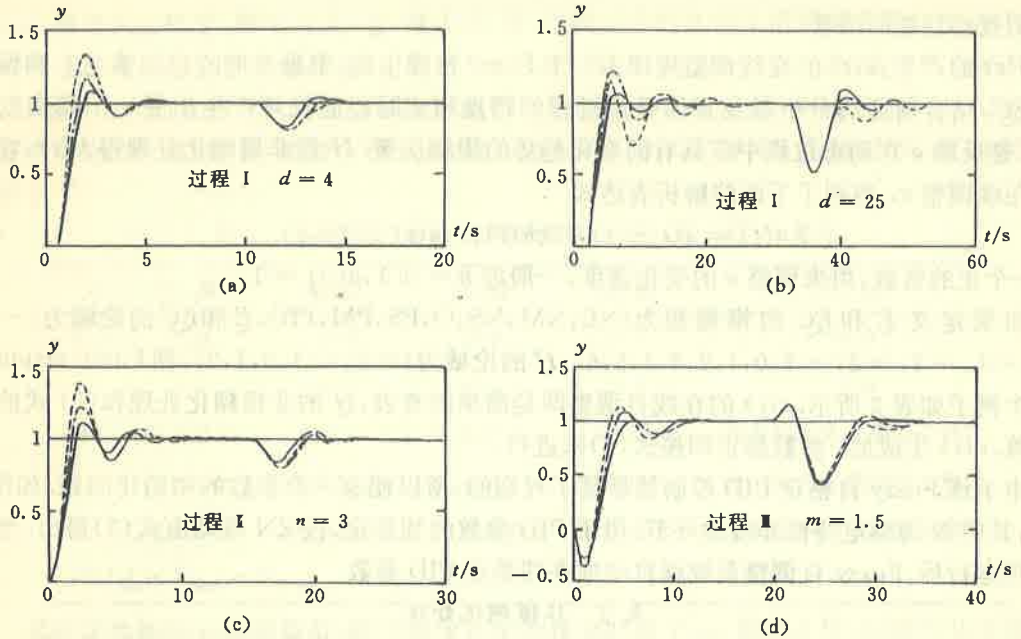


图4 (---)ZN规则(-·-)RZN规则(—)Fuzzy自整定

## 5 结 论

本文提出的模糊自整定PID控制器,在控制回路上仍保留PID调节器,同时采用Fuzzy推理方法作为常规PID控制器的自调整机构.实际上是对PID控制器进行了非线性处理,实现了系统特性变化与控制量之间的非线性映射关系.从这种意义上说,模糊自整定PID控制器是一种非线性PID控制器.仿真结果可以看出,PID算法与模糊推理控制相结合能较明显地提高最终的控制效果.这种混合系统把PID控制与Fuzzy控制的简便性、灵活性以及鲁棒性融为一体,发挥了传统控制与Fuzzy控制的各自长处.

## 参 考 文 献

- 1 Åström, K. J. and Hägglund, T. . Automatic tuning of simple regulators with specification on and amplitude margins. *Automatica*, 1984, 20(6): 645—651
- 2 Hang, C. C. and Åström, K. J. . Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula for PID autotuners. *Proc. of ISA 88 International Conf. and Exhibition, Houston X.*, 1988, 1021—1030
- 3 Li Zhuo, He Shizhong and Tan Shaohua. A refined on-line rule/parameter adaptive fuzzy controller. *Proc. of 3th IEEE International Conf. on Fuzzy Systems*, 1994, 1472—1477

## Self-Adjusting PID Controller Based Fuzzy Inferences

LI Zhuo, XIAO Deyun and HE Shizhong

(Department of Automation, Tsinghua University · Beijing, 100084, PRC)

**Abstract:** A new self-adjusting PID controller based fuzzy inferences is proposed in this paper. Using fuzzy inferences method, the PID parameters can be adjusted adaptively on line for the varying state of the system. This approach has more significant performance and robustness than conventional PID controllers in

any case. The simulation results show the effectiveness of the method.

**Key word:** Fuzzy inferences; PID control; Self-tuning

### 本文作者简介

**李卓女** 1961年生,副教授,1982年和1995年分别在鞍山钢铁学院机电系和清华大学自动化系获得学士学位和硕士学位,目前主要从事模糊控制、神经网络控制与计算机控制等方面的研究工作。

**萧德云** 1945年生,教授,1970年毕业于清华大学,主要从事过程控制系统、辨识建模、故障诊断、计算机应用和大型连续过程工业 CIMS 等的研究与教学工作。

**何世忠** 1945年生,教授,1970年毕业于清华大学,1982年获清华大学硕士学位,1989年赴新加坡国立大学从事科学研究三年,主要研究方向为过程控制、模糊控制等。

(上接第 227 页)

| Title   | 1998           | Place                 | Deadline        | Further Information  |
|---|----------------|-----------------------|-----------------|--|
| IFAC Symposium<br>Intelligent Autonomous Vehicles<br>- I A V 98                                 | March<br>25-27 | Madrid<br>Spain       | 16 May<br>1997  | IAV'98<br>Universidad Carlos III de Madrid<br>c/Butarque 15<br>E-28911 Leganes (Madrid), Spain<br>FAX+34 1 624 9430<br>e-mail: iav@ing.uc3m.es<br>www.uc3m.es/iav98  |
| IFAC/CIGR Workshop<br>Artificial Intelligence in Agriculture                                    | April<br>24-26 | Makuhari<br>Japan     | 1 Sept.<br>1997 | Prof. Y. Hashimoto<br>Dept. of Biomechanical Systems<br>Ehime University<br>Tarumi, Matsuyama 790, Japan<br>FAX+81 89 947 8748<br>e-mail: hasimoto@agr.ehime-u.ac.jp   |
| IFAC Workshop<br>Intelligent Assembly and<br>Disassembly  | May<br>21-23   | Ljubljana<br>Slovenia | 31 Oct.<br>1997 | Dr. D. Noe<br>Fac. of Mechanical Engg., Askercева 6<br>SLO-1000 Ljubljana, Slovenia<br>FAX+386/61/218567<br>e-mail: dragica.noe@fs.uni-lj.si   |
| IFAC Workshop<br>Control Applications in Post-Harvest<br>and Processing Technology<br>-CAPPT'98 | June<br>3-5    | Budapest<br>Hungary   | 15 Nov.<br>1997 | Prof. I. Farkas<br>Dept. of Physics and Process Control<br>University of Agriculture<br>H-2103 Gödöllő, Hungary<br>FAX+36 28 310804<br>e-mail: ifarkas@eng.gau.hu  |
| IFAC Symposium<br>Information Control Problems<br>in Manufacturing - INCOM'98                   | June<br>24-26  | Nancy<br>France       | 8 Sept.<br>1997 | INCOM'98/CRAN-GSIP<br>Faculté des Sciences<br>Université Henri Paincaré Nancy I, BP<br>239<br>F-54506 Vandoeuvre les Nancy, France<br>FAX+33/83 91 21 26<br>e-mail: incom98@cran.u-nancy.fr<br>www.gsip.cran.u-nancy.fr/incom98.html |

(下转第 253 页)

**Key words:** dynamic game; bargaining solution; incentive equilibria

### 本文作者简介

**祝世京** 1965年生,1993年于华中理工大学获博士学位,现为华中理工大学系统工程研究所副教授,主要研究方向为多人决策理论及人工智能。

**戴建设** 1953年生,1976年毕业于天津大学自动控制专业,1990年在华中理工大学获博士学位,现为华中理工大学系统工程研究所教授,所长,主要研究方向为分布式决策支持系统及人工智能。

**陈 丑** 1919年生,1946年研究生毕业于交通大学电信研究所,现为华中理工大学系统工程研究所教授,博士生导师,长期从事自动控制及系统工程的教学和科研,主要学术方向为决策分析。

(上接第 243 页)

| Title   | 1998                  | Place                 | Deadline        | Further Information   |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------|---|
| IFAC Symposium<br>Computation in Economics, Finance<br>and Engineering Economic Systems | June<br>29-<br>July 1 | Cambridge<br>UK       | *               | Dr. Sean Holly, Dept- of Applied Eco-<br>nomics<br>Univ. of Cambridge, Sedgwick Avenue<br>Cambridge CB3 9DE, UK<br>FAX: +44/1223/335475<br>e-mail: sean.holly@econ.cam.ac.uk            |
| IFAC Workshop<br>Linear Time Delay Systems  | July<br>6-7           | Grenoble<br>France    | 1 Oct.<br>1997  | Prof. Luc Dugard<br>Lab. d' Automatique de Grenoble<br>ENSIEG, BP 46<br>F-38402 St. Martin d' Heres-Cedex,<br>France<br>FAX+33 4 76 82 63889<br>e-mail:dugard@lag.ensieg.fr             |
| IFAC Conference<br>System Structure and Control   | July<br>8-10          | Nantes<br>France      | 1 Aug.<br>1997  | Prof. J. J. Loiseau<br>Lab. d' Automatique Nantes, 1, rue de<br>la Noe<br>F-44072 Nantes Cedex 03, France<br>FAX+33 40 37 25 22   |
| IFAC/(IMACS/IFIP)Symposium<br>Large Scale Systems: Theory and<br>Applications           | July<br>15-17         | Patras<br>Greece      | 15 July<br>1997 | IFAC-LSS'98<br>El. & Computer Engg. Dept.<br>Lab. for Automation & Robotics<br>University of Patras<br>GR-26500 Rion Patras, Greece<br>FAX+30 997 309<br>e-mail: groumpos@ee.upatras.gr |
| IFAC Symposium (14th)<br>Automatic Control in Aerospace                                 | Aug.<br>24-28         | Seoul<br>Korea        | 15 Oct.<br>1997 | The Secretariat IFAC 98 Aero<br>Automatic Control Res. Centre<br>Seoul National University, Seoul 151-<br>742 Korea<br>FAX: +82 2 825 1585<br>e-mail: ifac98aero@asri.snu.ac.kr         |
| IFAC Symposium<br>Mining, Mineral and Metal<br>Processing-MMM98                         | Sept.<br>1-3          | Düsseldorf<br>Germany | 15 Nov.<br>1997 | VDI-VDE GMA, POB 1011 30<br>D-40002 Düsseldorf, Germany<br>FAX+49/211/6214-161  |

(下转第 270 页)