

文章编号: 1001-0920(2009)07-1038-05

一种 PID 模糊控制器(fuzzy PI + fuzzy ID 型)

李庆春, 沈德耀

(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: 提出一种二维 PID 模糊控制器, 其结构形式简称为 fuzzy PI+fuzzy ID 型. 根据 fuzzy PI 和 fuzzy ID 控制器的图解说明, 确定该 fuzzy PI 和 fuzzy ID 控制器的模糊控制规则的相似性. 理论分析表明, 该 PID 模糊控制器除具有常规 PID 性能外, 还具有非线性等特点. 仿真结果表明, 与常规 PID 和 fuzzy PI 控制相比性能更优.

关键词: PID 控制; PID 模糊控制器; 非线性

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Brand-new PID fuzzy controller (fuzzy PI + fuzzy ID)

LI Qing-chun, SHEN De-yao

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. Correspondent: LI Qing-chun, E-mail: leqc@sina.com)

Abstract: A brand-new two-dimension PID fuzzy controller, fuzzy PI + fuzzy ID, is proposed. By comparing the illustration of the fuzzy PI and fuzzy ID, the similarity of the two corresponding fuzzy control rules is ensured. The theoretical analysis shows that the PID fuzzy controller possesses the feature of nonlinearity besides that of the traditional PID. The simulation research result shows that its control feature is better than that of the traditional PID and fuzzy PI.

Key words: PID control; PID fuzzy controller; Nonlinear

1 引言

20 世纪 90 年代以来, 一些学者开始分析和研究模糊控制器的数学表达式, 从理论上认真探讨模糊控制器的本质特性等一系列根本性的问题. 并与传统控制方法进行比较, 分析模糊控制器各设计参数对控制性能的影响, 成为模糊控制领域研究的一个热点, 形成了“模糊控制器的结构分析”这一新的理论研究方向, 并已取得了一些很有价值的研究成果.

PID 模糊控制器的结构形式一般分为一维、二维和三维. 三维以上的多维模糊控制器设计比较复杂, 因此很少采用. 二维模糊控制器在三类模糊控制器中适应性最好, 研究最广, 结构形式多样. 其中文献[1]对已有几种结构的 PID 模糊控制器进行了实验比较. 文献[2]提出一个基本的二维 PID 模糊控制器, 这是一种 fuzzy PI+fuzzy ID 型模糊控制器. 文献[3]分析了 PID 模糊控制器的结构, 并使用小增益理论分析了(BIBO)稳定性条件.

本文提出一种二维模糊控制器, 其结构形式简称为 fuzzy PI+fuzzy ID 型, 在控制规则数保持为二维控制器水平的同时达到三维模糊控制的非线性控制效果. 实验结果表明, 该控制器控制效果好.

2 传统控制器

传统 PID 控制器的增量表达式为

$$u(n) = K_P e(n) + K_I T_s e(n) + (K_D/T_s)^2 e(n),$$

$$u(n) = u(n-1) + u(n). \quad (1)$$

式中: $e(n)$, $e(n)$, $^2 e(n)$ 分别为误差、误差的变化率和误差变化加速度; K_P , K_I , K_D 分别为比例、积分和微分增益.

3 PID 模糊控制器

3.1 系统结构

根据式(1), 也可以写成如下结构:

$$u(n) = u(n-1) + u_1(n) + u_2(n),$$

$$u_1(n) = K_P e(n) + \frac{1}{2} K_I T_s e(n),$$

收稿日期: 2008-06-26; 修回日期: 2008-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60634020).

作者简介: 李庆春(1969-), 男, 湖南望城人, 博士生, 从事先进控制理论、微波应用的研究; 沈德耀(1936-), 男, 长沙人, 教授, 博士生导师, 从事先进控制理论及应用、智能系统等研究.

$$u_2(n) = \frac{1}{2} K_i T_s e(n) + (K_D / T_s)^2 e(n). \quad (2)$$

根据式(3)可构成如图 1 所示的 PID 模糊控制器,其由模糊控制器 FC1 和 FC2 组成.本文将该结构形式简称为 fuzzy PI + fuzzy ID 型. $r(kT)$, $y(kT)$ 分别为系统的设定值和输出;输入变量为偏差 $e(kT)$, 偏差变化率 $ec(kT)$ 和偏差变化加速度 $ed(kT)$;输出变量为控制量 $u(kT)$. 两个模糊控制器采用相似形式的模糊规则、隶属函数定义和模糊推理算法(其原因下一节分析),因此简化了模糊控制器的设计.

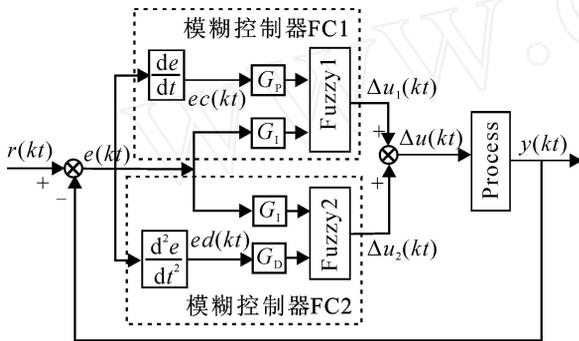


图 1 PID 模糊控制系统结构

3.2 输入变量及其模糊化

模糊控制器的输入变量为偏差 $e(kT)$, 偏差变化率 $ec(kT)$ 和偏差变化加速度 $ed(kT)$. 分别乘以量化因子 G_P, G_I, G_D 后,输入量为

$$\begin{aligned} G_I e(kT) &= G_I (r(kT) - y(kT)), \\ G_P ec(kT) &= G_P (e(kT) - e((k-1)T)) / T, \\ G_D ed(kT) &= G_D (ec(kT) - ec((k-1)T)) / T. \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $y(kT), r(kT)$ 为时刻 k 的系统输出和设定值. 偏差 $e(kT)$, 偏差变化率 $ec(kT)$ 和偏差变化加速度 $ed(kT)$ 量化后的论域取为 $[-L, L]$. 输入变量在其相应的论域上定义为参考模糊集: 负(N)、正(P), 相应的隶属函数如图 2(a) 所示.

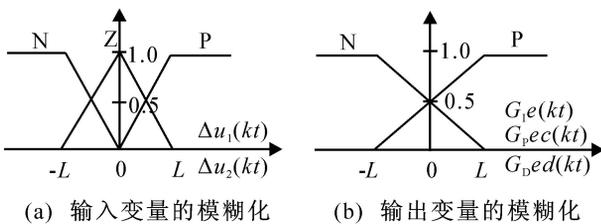


图 2 模糊控制器输入和输出变量的模糊化

3.3 输出变量及其模糊化

FC1 和 FC2 的输出变量分别为 $u_1(kT), u_2(kT)$; G_{u_1} 和 G_{u_2} 分别是它们的量化因子. 输出变量在其相应的论域上定义为 3 个参考模糊集, 分别是负(N)、零(Z)、正(P). $-L, 0, L$ 分别是其各自隶属函数的中心值, 相应的隶属函数如图 2(b) 所示.

总的输出为

$$U(kT) = G_{u_1} u_1(kT) + G_{u_2} u_2(kT). \quad (4)$$

3.4 模糊控制规则

FC1 的 4 条模糊规则的控制结构如图 3 所示. 其中: A) $e < 0, ec < 0$, 要求 $u_1 < 0$; B) $e < 0, ec > 0$, 要求 $u_1 = 0$; C) $e > 0, ec < 0$, 要求 $u_1 = 0$; D) $e > 0, ec > 0$, 要求 $u_1 > 0$.

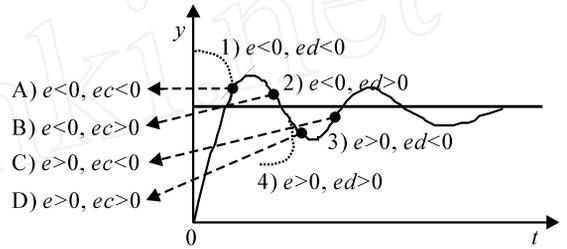


图 3 模糊规则分布区

FC2 的 4 条模糊规则的控制结构如图 3 所示. 其中: 1) $e < 0, ed < 0$ 时, 曲线发散, 误差进一步增加, 此时要求减少控制量输出, 减少误差, 即要求 $u_2 < 0$; 2) $e < 0, ed > 0$, 3) $e > 0, ed < 0$ 时, 曲线收敛, 误差正在逐步缩小, 2) 和 3) 情况下, 应该保持控制量输出不变, 使系统输出平滑, 即要求 $u_2 = 0$; 4) $e > 0, ed > 0$ 时, 曲线发散, 误差进一步增加, 此时要求增加控制量输出, 减少误差, 即要求 $u_2 > 0$.

综上所述, 两模糊控制器具有相似的模糊规则. 具体表示如下:

FC1 的模糊控制规则如下:

- R1: if $G_I e(kT)$ is N and $G_P ec(kT)$ is N, then $u_1(kT)$ is N;
- R2: if $G_I e(kT)$ is N and $G_P ec(kT)$ is P, then $u_1(kT)$ is Z;
- R3: if $G_I e(kT)$ is P and $G_P ec(kT)$ is N, then $u_1(kT)$ is Z;
- R4: if $G_I e(kT)$ is P and $G_P ec(kT)$ is P, then $u_1(kT)$ is P.

FC2 的模糊控制规则如下:

- R5: if $G_I e(kT)$ is N and $G_D ed(kT)$ is N, then $u_2(kT)$ is N;
- R6: if $G_I e(kT)$ is N and $G_D ed(kT)$ is P, then $u_2(kT)$ is Z;
- R7: if $G_I e(kT)$ is P and $G_D ed(kT)$ is N, then $u_2(kT)$ is Z;
- R8: if $G_I e(kT)$ is P and $G_D ed(kT)$ is P, then $u_2(kT)$ is P.

3.5 模糊推理与控制器输出

根据相平面图, 可分成 20 个区域(IC1-IC20), 其结构如图 4 所示, 其中区域 1-20 表示如下:

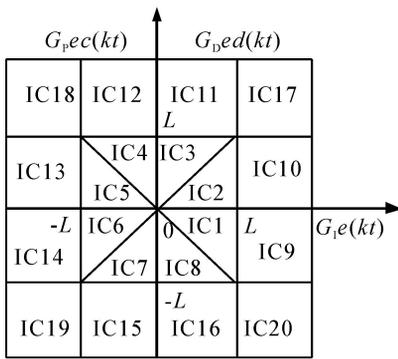


图 4 模糊控制器输入变量的区域

$$\left. \begin{aligned} & G_p / ec(kt) \mid G_d / ed(kt) \mid L \\ & G_d / ed(kt) \mid G_p / ec(kt) \mid L \\ & IC1, IC2, IC5, IC6; \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned} & G_d / ed(kt) \mid G_p / ec(kt) \mid L \\ & G_p / ec(kt) \mid G_d / ed(kt) \mid L \\ & IC3, IC4, IC7, IC8; \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned} & G_d / ed(kt) \mid = L \\ & G_p / ec(kt) \mid, G_d / ed(kt) \mid L \\ & IC9, IC10, IC13, IC14; \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned} & G_d / ed(kt) \mid L \\ & G_p / ec(kt) \mid, G_d / ed(kt) \mid = L \\ & IC11, IC12, IC15, IC16; \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned} & G_d / ed(kt) \mid = L \\ & G_p / ec(kt) \mid, G_d / ed(kt) \mid = L \\ & IC17, IC18, IC19, IC20. \end{aligned} \right\}$$

(5)

模糊推理过程采用 Larsen 乘积推理方法,“与”运算采用 Zadeh 模糊“与”的形式,“或”运算采用 Lukasiewicz 模糊“或”的形式. 根据这些方法分别在各个区域求出相应的激活度,如表 1 所示.

其中

$$\begin{aligned} \mu_{Pe} &= [G_d e(kt) + L] / 2L, \\ \mu_{Ne} &= [L - G_d e(kt)] / 2L, \\ \mu_{Pe} + \mu_{Ne} &= 1; \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \mu_{Pec} &= [G_p ec(kt) + L] / 2L, \\ \mu_{Nec} &= [L - G_p ec(kt)] / 2L, \\ \mu_{Pec} + \mu_{Nec} &= 1; \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \mu_{Ped} &= [G_d ed(kt) + L] / 2L, \\ \mu_{Ned} &= [L - G_d ed(kt)] / 2L, \\ \mu_{Ped} + \mu_{Ned} &= 1. \end{aligned} \tag{8}$$

模糊蕴涵运算,即由规则集和输入变量得到输出模糊集的推理过程,采用重心法解模糊公式

$$U = \frac{\mu_1 u_1 + \mu_2 u_2 + \mu_3 u_3 + \mu_4 u_4}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4} \tag{9}$$

将隶属函数值代入,整理得

表 1 8 条规则在不同区域的激活度

区域	R1/ R5 (μ ₁)	R2/ R6 (μ ₂)	R3/ R7 (μ ₃)	R4/ R8 (μ ₄)
IC1, IC2	μ _{Ne}	μ _{Ne}	μ _{Nec} / R3 μ _{Ned} / R7	μ _{Pec} / R4 μ _{Ped} / R8
IC3, IC4	μ _{Nec} / R1 μ _{Ned} / R5	μ _{Ne}	μ _{Nec} / R3 μ _{Ned} / R7	μ _{Pe}
IC5, IC6	μ _{Nec} / R1 μ _{Ned} / R5	μ _{Pec} / R2 μ _{Ped} / R6	μ _{Pe}	μ _{Pe}
IC7, IC8	μ _{Ne}	μ _{Pec} / R2 μ _{Ped} / R6	μ _{Pe}	μ _{Nec} / R4 μ _{Ned} / R8
IC9, IC10	0	0	μ _{Nec} / R3 μ _{Ned} / R7	μ _{Pec} / R4 μ _{Ped} / R8
IC11, IC12	0	μ _{Ne}	0	μ _{Pe}
IC13, IC14	0	0	μ _{Pe}	μ _{Pe}
IC15, IC16	0	μ _{Pec} / R2 μ _{Ped} / R6	0	μ _{Nec} / R4 μ _{Ned} / R8
IC17	0	0	0	1
IC18	0	1	0	0
IC19	1	0	0	0
IC20	0	0	1	0

$$\begin{aligned} u_1(kt) &= \\ & 0, IC18, IC20; \\ & L, IC17; \\ & -L, IC19; \\ & \frac{L[G_d e(kt) + G_p ec(kt)]}{2(2L - G_d |e(kt)|)}, IC1, IC2, IC5, IC6; \\ & \frac{L[G_d e(kt) + G_p ec(kt)]}{2(2L - G_p |ec(kt)|)}, IC3, IC4, IC7, IC8; \\ & [G_p ec(kt) + L] / 2, IC9, IC10; \\ & [G_d e(kt) + L] / 2, IC11, IC12; \\ & [G_p ec(kt) - L] / 2, IC13, IC14; \\ & [G_d e(kt) - L] / 2, IC15, IC16. \end{aligned}$$

(10)

同理,在 FC2 区域 1-20 中也可求得 $u_2(kt)$ 的结果,显然,形式是相同的. 故控制器的输出为

$$\begin{aligned} u_2(kt) &= \\ & 0, IC18, IC20; \\ & L, IC17; \\ & -L, IC19; \\ & \frac{L[G_d e(kt) + G_p ec(kt)]}{2(2L - G_d |e(kt)|)}, IC1, IC2, IC5, IC6; \\ & \frac{L[G_d e(kt) + G_p ec(kt)]}{2(2L - G_p |ec(kt)|)}, IC3, IC4, IC7, IC8; \\ & [G_d ed(kt) + L] / 2, IC9, IC10; \\ & [G_d e(kt) + L] / 2, IC11, IC12; \\ & [G_d ed(kt) - L] / 2, IC13, IC14; \\ & [G_d e(kt) - L] / 2, IC15, IC16. \end{aligned}$$

(11)

模糊控制器总的输出为

$$U(KT) = G_{u_1} u_1(kt) + G_{u_2} u_2(kt). \quad (12)$$

根据式(12), 有 $9 \times 9 < 81$ 种可能结果. 本文只对 IC1, IC2, IC5, IC6 与 IC3, IC4, IC7, IC8 区域进行组合分析, 则有:

1) 如果

$$\begin{aligned} G_P / ec(kt) / G_I / e(kt) / L, \\ G_D / ed(kt) / G_I / e(kt) / L, \end{aligned}$$

则

$$U(kt) = \frac{G_{u_1} L [G_I e(kt) + G_P ec(kt)]}{2(2L - G_I / e(kt) |)} + \frac{G_{u_2} L [G_I e(kt) + G_D ed(kt)]}{2(2L - G_I / e(kt) |)}; \quad (13)$$

2) 如果

$$\begin{aligned} G_P / ec(kt) / G_I / e(kt) / L, \\ G_I / e(kt) / G_D / ed(kt) / L, \end{aligned}$$

则

$$U(kt) = \frac{G_{u_1} L [G_I e(kt) + G_P ec(kt)]}{2(2L - G_I / e(kt) |)} + \frac{G_{u_2} L [G_I e(kt) + G_D ed(kt)]}{2(2L - G_D / ed(kt) |)}; \quad (14)$$

3) 如果

$$\begin{aligned} G_I / e(kt) / G_P / ec(kt) / L, \\ G_D / ed(kt) / G_I / e(kt) / L, \end{aligned}$$

则

$$U(kt) = \frac{G_{u_1} L [G_I e(kt) + G_P ec(kt)]}{2(2L - G_P / ec(kt) |)} + \frac{G_{u_2} L [G_I e(kt) + G_D ed(kt)]}{2(2L - G_I / e(kt) |)}; \quad (15)$$

4) 如果

$$\begin{aligned} G_I / e(kt) / G_P / ec(kt) / L, \\ G_I / e(kt) / G_D / ed(kt) / L, \end{aligned}$$

则

$$U(kt) = \frac{G_{u_1} L [G_I e(kt) + G_P ec(kt)]}{2(2L - G_P / ec(kt) |)} + \frac{G_{u_2} L [G_I e(kt) + G_D ed(kt)]}{2(2L - G_D / ed(kt) |)}. \quad (16)$$

对于情况 1), 该公式可表达为

$$\begin{aligned} u(n) &= K_P ec(kt) + K_I e(kt) + K_D ed(kt), \\ K_P &= \frac{G_{u_1} L G_P}{2(2L - G_I / e(kt) |)}, \\ K_I &= \frac{G_{u_1} L G_I + G_{u_2} L G_D}{2(2L - G_I / e(kt) |)}, \\ K_D &= \frac{G_{u_2} L G_D}{2(2L - G_I / e(kt) |)}. \end{aligned} \quad (17)$$

同理也可求得系统在其他工作区间的控制器输出计算公式.

3.6 PID 模糊控制器性能分析

1) PID 模糊控制器的非线性特性: 该模糊控制器具有和常规 PID 类似的结构, 由于 K_P, K_I, K_D 分别随着 $e(kt), ec(kt)$ 和 $ed(kt)$ 的不同而改变, 模糊控制器的比例、积分、微分系数是 $e(kt), ec(kt)$ 和 $ed(kt)$ 的非线性函数, 该模糊 PID 控制器本质上是非线性 PID 控制器.

2) 控制器的动态响应特性: $e(kt), ec(kt)$ 和 $ed(kt)$ 越大, 控制器的比例参数 K_P 越大, 输出控制量越大, 这样就加快了系统的调节过程, 因而具有更快的调节性能.

3) 控制器的稳态特性: $e(kt), ec(kt)$ 和 $ed(kt)$ 趋近很小的数值时, K_I 将趋近某一常值, 这样可以保持适当积分作用来消除稳态误差, 所以控制器具有很高的稳态精度. $e(kt), ec(kt)$ 和 $ed(kt)$ 的变化对控制器的比例、积分、微分环节参数变化的影响程度与这些环节的常数项系数选择有关, 因而可以在参数选择时加以控制.

3.7 仿真实验

为验证本文的设计方法, 通过几个典型对象的仿真算例给出本文方法与现有方法的比较.

1) 一阶滞后过程

标准的一阶滞后对象为

$$G(s) = \frac{1}{60s + 1} e^{-80s}. \quad (18)$$

图 5 为一阶滞后环节在控制器控制下的阶跃响应曲线. 由图可见, 所设计的 PID 模糊控制器的阶跃响应只有微小的超调, 并很快进入稳态. 而常规 PID 有 16% 的超调, 并伴有震荡. 模糊 PI 超调小但有震荡.

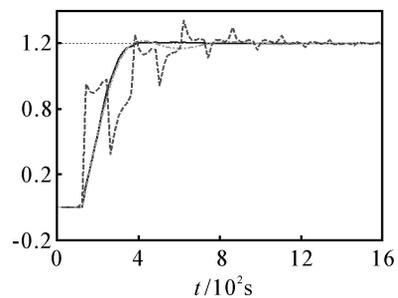


图 5 一阶滞后环节的响应曲线

本例的控制器参数为 $T_s = 20$. 常规 PID(虚线): $K_P = 0.3, K_I = 0.095, K_D = 2.1$. 模糊 PID(实线): $G_P = 0.20, G_I = 2.0, G_D = 2.8, G_{u_1} = 1, G_{u_2} = 1, L = 1$. 模糊 PI(点划线): $G_P = 0.43, G_I = 1.5, G_{u_1} = 1, L = 1$.

2) 三阶过程

标准的三阶对象为

$$G(s) = \frac{400}{s(s+10)(s+20)} \quad (19)$$

图 6 为阶跃响应曲线,所设计的 PID 模糊控制器与常规 PID 相比,系统快速的动态调节性能相同,但超调量非常小,并很快进入稳态.与模糊 PI 相比,3 个方面都很强.

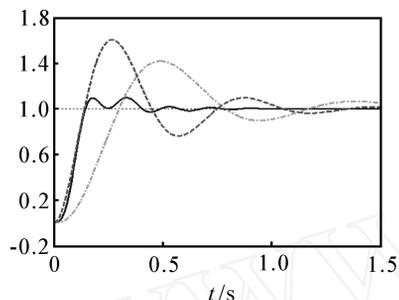


图 6 三阶环节的阶跃响应曲线

本例的控制器参数为 $T_s = 0.001$. 常规 PID (虚线): $K_P = 9$, $K_I = 40 T_s$, $K_D = 0.5 / T_s$. 模糊 PID (实线): $G_P = 1.6$, $G_I = 0.008$, $G_D = 90.0$, $G_{u_1} = 100$, $G_{u_2} = 100$, $L = 1$. 模糊 PI (点划线): $G_P = 0.1$, $G_I = 0.0001$, $G_u = 100$, $L = 1$.

4 结 论

本文提出一种 fuzzy PI+ fuzzy ID 型二维模糊控制器,其输入变量为偏差 $e(kt)$, 偏差变化率 $ec(kt)$ 和偏差变化加速度 $ed(kt)$. 本文对上述 PID 模糊控制器进行了详细的结构分析,运用相平面法解析模糊控制器的性能特点,求得系统在各工作区间的控制器输出计算公式,得出该模糊控制器具有与常规 PID 类似的结构,并具有非线性特性. 该 PID 模糊控制器控制精度高且过程简易,计算量小,该模糊控制器结构和算法简单,易于在线解析实现. 仿真结果表明了本文 PID 模糊控制器的实用性、有效性和优越性.

参考文献 (References)

[1] Golob M. Decomposed fuzzy proportional-integral-derivative controllers [J]. Applied Soft Computing,

2001, 1(3): 201-214.

[2] Kim J H, Oh S J. A fuzzy PID controller for nonlinear and uncertain systems [J]. Soft Computing, 2000, 4(2): 123-129.

[3] Mohan B M, Sinha A. Analytical structure and stability analysis of a fuzzy PID controller [J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 749-758.

[4] Kyoung Kwan Ahn, Nguyen Bao Kha. Modeling and control of shape memory alloy actuators using Preisach model, genetic algorithm and fuzzy logic [J]. Mechatronics, 2008, 18(3): 141-152.

[5] Yau-Tarng Juang, Yur-Tien Chang, Chih-Peng Huang. Design of fuzzy PID controllers using modified triangular membership functions [J]. Information Sciences, 2008, 178(5): 1325-1333.

[6] Iglesias E, Garc ía Y, Sanjuan M, et al. Fuzzy surface-based sliding mode control [J]. ISA Transactions, 2007, 46(1): 73-83.

[7] Amin Haj-Ali, Hao Ying. Structural analysis of fuzzy controllers with nonlinear input fuzzy sets in relation to nonlinear PID control with variable gains [J]. Automatica, 2004, 40(9): 1551-1559.

[8] Bhattacharya S, Chatterjee A, Munshi S. A new self-tuned PID-type fuzzy controller as a combination of two-term controllers [J]. ISA Transactions, 2004, 43(3): 413-426.

[9] Dragan D Kukulj, Slobodan B Kuzmanovi, Emil Levi. Design of a PID-like compound fuzzy logic controller [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2001, 14(6): 785-803.

[10] Jialiang Lu, Guanrong Chen, Hao Ying. Predictive fuzzy PID control: Theory, design and simulation [J]. Information Sciences, 2001, 137(1-4): 157-187.

[11] Li W, Chang X G, Wahl F M, et al. Tracking control of a manipulator under uncertainty by fuzzy P + ID controller [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 122(1/16): 125-137.

(上接第 1037 页)

[10] 龙涛, 孙汉昌, 朱华勇, 等. 战场环境中多无人机任务分配的快速航路预估算法 [J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(5): 109-113.

(Long T, Sun H C, Zhu H Y, et al. Fast route predicting algorithm for multiple UAVs task allocation in battlefield [J]. J of National University of Defense Technology, 2006, 28(5): 109-113.)

[11] 高晓光, 史建国. 变结构离散动态贝叶斯网络及其推

理算法 [J]. 系统工程学报, 2007, 22(1): 9-14.

(Gao X G, Shi J G. Structure varied discrete dynamic Bayesian network and its inference algorithm [J]. J of Systems Engineering, 2007, 22(1): 9-14.)

[12] Murphy K P. Dynamic Bayesian networks: Representation, inference and learning [D]. UC Berkeley: Computer Science Division, 2002.