

文章编号: 1001-0920(2006)04-0435-05

基于模糊解耦的火电单元机组负荷控制

王庆利^{1,2}, 王 丹¹, 井元伟¹

(1. 东北大学 教育部流程工业综合自动化重点实验室, 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2 沈阳工程学院 信息工程系, 沈阳 110000)

摘 要: 讨论了火电单元机组负荷控制问题. 根据火电单元机组工况多变的特点, 提出一种基于模糊解耦的火电单元机组负荷控制方案, 以提高控制系统适应负荷变化的能力. 针对 300 MW 仿真机的实测表明, 与传统的 PD 定值控制相比, 该方法改善了负荷控制性能, 是一种具有实用价值的火电机组负荷控制方法.

关键词: 负荷控制; 模糊控制; 单元机组; 解耦

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Load Control Based on Fuzzy Decoupling for Fossil-fired Electric Single Generating Units

WANG Qing-li^{1,2}, WANG Dan¹, JIN Yuan-wei¹

(1. Key Laboratory of Process Industry Automation of Ministry of Education, College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2 Department of Information Engineering, Shenyang University of Engineering, Shenyang 110000, China Correspondent: WANG Qing-li, E-mail: qingliwang@263.net)

Abstract: The load control problem of the fossil-fired electric single generating units is discussed. To the characters of the electric plant, a fuzzy decoupling based load control scheme of the fossil-fired electric single generating units is proposed to improve the adaptability of the control system. The simulation experiment results of 300 MW fired electric single generating units show that the control performances are improved compared with the traditional PD fixed value control, and the proposed method has more practical values in the fossil-fired electric single generating units.

Key words: Load control; Fuzzy control; Single generating units; Decoupling

1 引 言

火电厂单元机组由发电机、汽轮机和锅炉构成. 它是一个相互关联、强耦合的复杂多输入多输出的控制对象, 具有纯滞后、大惯性和非线性的显著特点, 其动态特性较为复杂.

火电厂单元机组的数学模型难以准确建立, 且由于电网波动等原因, 其数学模型随时间变化缓慢, 采用常规的 PD 调节控制, 其控制效果很难满足要求, 即使用 Smith 预估控制和 Dahlin 算法, 同样需知道被控制对象的精确数学模型, 所以很难取得较

好的控制效果^[1~8].

模糊控制是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型控制算法, 本质是一种非线性控制. 它不需要知道被控对象的数学模型, 具有比常规控制系统更好的稳定性和鲁棒性. 本文基于模糊控制的这些特点, 将其确定为对火电厂单元机组运行的基本控制策略^[9~11].

2 单元机组协调控制系统组成

单元机组的机炉协调控制系统如图 1 所示, 主要由锅炉、汽轮机和发电机组成. 控制回路主要有锅炉控制和汽轮机控制. 汽轮机控制回路通过输入信

收稿日期: 2004-11-30; 修回日期: 2005-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(60274009); 教育部博士点基金项目(20020145007).

作者简介: 王庆利(1960—), 男, 沈阳人, 副教授, 博士生, 从事电力系统稳定性分析与控制等研究; 井元伟(1956—), 男, 辽宁西丰人, 教授, 博士生导师, 从事复杂控制系统结构、通信网络控制等研究.

号完成对主蒸汽压力的调节,通过执行机构控制调节主蒸汽压力阀的开启度,以改变汽轮机输出功率 锅炉控制回路通过输入信号控制锅炉的燃烧率,改变锅炉的出力,以适应负荷变化的需要

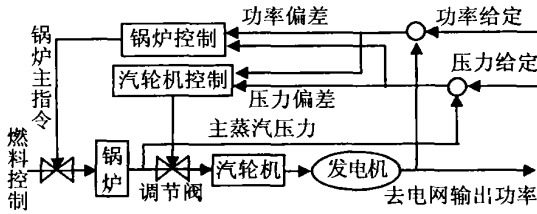


图 1 单元机组协调控制系统

为便于研究,用传递函数表示单元机组协调控制系统,如图 2 所示 其中: P_g 为功率给定值, P_E 为实发功率, $P_e = P_g - P_E$ 为功率偏差, N_g 为主蒸汽压力给定值, N_E 为主蒸汽压力, $N_e = N_g - N_E$ 为主蒸汽压力偏差, μ_r 为调节阀开度, U 为锅炉燃烧率, $W_{a1}(s)$ 为汽轮机调节器, $W_{a2}(s)$ 为锅炉调节器 本系统采用汽轮机调节器调节功率输出,当功率偏差功率发生变化时,汽轮机调节器通过改变调节阀的开启度 μ_r 来改变汽轮机的进汽量,使发电机输出功率迅速满足电网的负荷要求 汽轮机调节阀开度的改变会使机前压力发生变化,可通过锅炉调节器改变锅炉燃烧率来尽快恢复主蒸汽压力(机前压力)。在燃烧率调节的同时,锅炉其他调节系统也相应地改变送风量、引风量、给水量等

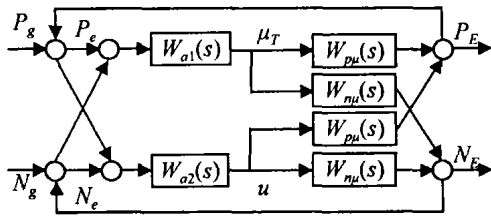


图 2 用传递函数表示的系统

功率偏差和汽压偏差信号同时送到 $W_{a1}(s)$ 汽轮机调节器和 $W_{a2}(s)$ 锅炉调节器 在稳定工况下,机组的实发功率等于给定功率,主蒸汽压力(机前压力)等于主蒸汽压力给定值 增加负荷时将出现一个正功率偏差信号,该信号通过汽轮机调节器开大汽轮机调节阀,增加机组的实发功率 此信号同时作用于锅炉调节器入口,以增加燃烧率,多产蒸汽

随着调节阀开度的增大,主蒸汽压力将立即随之下降 尽管此时锅炉已经开始增大燃烧率,但由于燃料量 - 主蒸汽压力通常存在较大惯性,负荷扰动出现初期仍会有正的压力偏差出现 该信号以正方向作用于锅炉调节器,继续加大锅炉的燃料量,以尽快恢复主蒸汽压力 同时,此信号反向作用于汽轮

机调节器入口,汽轮机调节器在正功率偏差和反方向压力偏差的共同作用下,会使调节阀开大到一定程度后停止动作 因为惯性作用,此时汽轮机的实发功率尚未达到给定值,所以这种状态是暂时的 随着锅炉燃烧率加大,主蒸汽压力逐渐恢复,压力偏差逐渐减小,汽轮机调节阀在正的功率偏差信号作用下会继续开大,以提高机组的实发功率,直至实发功率与机前压力均与给定值相等,机组重新进入稳定状态

3 模糊控制系统设计

3.1 模糊控制器的组成

根据以上分析可以看出,在单元制机组的机炉协调控制系统中,变工况运行为控制带来相当困难 当电网负荷变化时,汽轮机的功率应立即作出相应的变化 但是,汽轮机的机器时间常数一般只有 7~8 s,而锅炉从改变燃烧到蒸汽量改变,需长达 100~250 s 由于汽轮机和锅炉的动态响应时间这一动态特性相差太大,使汽轮机不能适应外界负荷的迅速变化,从而使得锅炉不能及时提供足够的蒸汽量 为此有必要将锅炉和汽轮机作为一个整体考虑,采用模糊的机炉协调控制 本文以图 1 所示的控制方式为研究对象,应用多变量模糊解耦的控制方法^[8],采用功率偏差和主蒸汽压力偏差调节汽轮机的进汽量 这样既能将部分锅炉蓄热量用于汽轮机迅速发出功率,又能使主蒸汽压力保持在允许的变化范围内 同时以功率偏差和主蒸汽压力偏差信号输入锅炉调节器系统来控制燃烧率,迅速改变锅炉的出力,以适应负荷变化的需要 模糊控制系统框图如图 3 所示

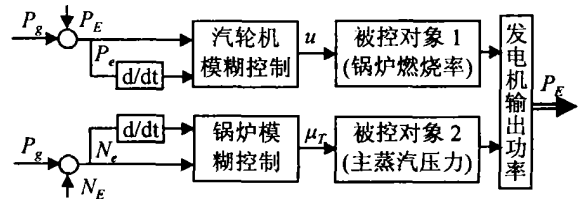


图 3 采用模糊控制的单元机组负荷控制系统

功率偏差 P_e 及其变化率和主蒸汽压力偏差 N_e 及其变化率作为模糊控制器的输入,控制器的输出为锅炉燃烧率 U 和控制主蒸汽压力的阀门开度 μ_r ,被控对象的输出为发电机输出功率 P_E 因为机炉协调控制系统是一个典型的多变量强耦合控制系统,所以系统设计的关键在于处理好解耦

3.2 单元机组负荷控制的解耦算法

设 $V_1 = P_e$ (功率偏差), $V_2 = CP_e$ (功率偏差变化率), $V_3 = N_e$ (主蒸汽压力偏差), $V_4 = CN_e$ (主蒸

汽压力偏差变化率), U 为燃烧率 (输出控制量), μ_T 为主蒸汽阀门开度 (输出控制量). 因此可将图 3 等效成图 4 所示的系统, 此系统为一个 4 输入 2 输出的多变量模糊控制器 (M VFC). 在实际工作中, 直接设计一个多变量模糊控制器相当困难, 因此首先想到的是如何利用模糊控制器本身的解耦性, 通过模糊关系方程分解, 在结构上实现解耦, 将一个 M M O 模糊控制器分解成若干个 M I S O 的模糊控制器, 将上述 4 输入 2 输出模糊控制器等效成两个 4 输入 1 输出的模糊控制器

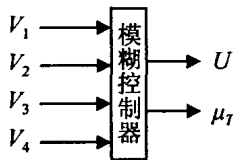


图 4 模糊解耦控制器

由前可知, 模糊控制器的输入为 V_1, V_2, V_3, V_4 , 输出为 U 和 μ_T , 其模糊关系可表示为

$$R_M = \{R_{M1}, R_{M2}, \dots, R_{ML}\}, \quad (1)$$

其中第 i 条规则为

$$R_M^i: \text{if } (V_1 \text{ is } \tilde{A}_{1i} \text{ and } V_2 \text{ is } \tilde{A}_{2i} \text{ and } V_3 \text{ is } \tilde{A}_{3i} \text{ and } V_4 \text{ is } \tilde{A}_{4i}), \\ \text{then } (U_1 \text{ is } B_{1i} \text{ and } \mu_T \text{ is } B_{2i}).$$

表示成模糊蕴含式为

$$R_M^i: (\tilde{A}_{1i} \times \tilde{A}_{2i} \times \tilde{A}_{3i} \times \tilde{A}_{4i}) \\ (U_1 + \mu_T).$$

式中: $+$ 表示并运算, \times 表示笛卡儿积

$$R_M = \left\{ \bigcap_{i=1}^l R_M^i \right\} = \\ \left\{ \bigcap_{i=1}^l [(\tilde{A}_{1i} \times \tilde{A}_{2i} \times \tilde{A}_{3i} \times \tilde{A}_{4i}) \\ (U_1 + \mu_T)] \right\} = \\ \left\{ \bigcap_{i=1}^l [(\tilde{A}_{1i} \times \tilde{A}_{2i} \times \tilde{A}_{3i} \times \tilde{A}_{4i}) \quad U], \right. \\ \left. \bigcap_{i=1}^l [(\tilde{A}_{1i} \times \tilde{A}_{2i} \times \tilde{A}_{3i} \times \tilde{A}_{4i}) \quad \mu_T] \right\} = \\ \{RB_{MS}^1, RB_{MS}^2\}, \quad (2)$$

式中 l 为规则总数

根据式(2) 计算结果, 4 输入 2 输出多变量控制器规则库 R_M 由子规则库 RB_{MS}^1 和 RB_{MS}^2 组成, 每一子规则库由 l 条模糊规则构成 其中子规则库 RB_{MS}^1 , RB_{MS}^2 中的第 i 条规则可表示为

$$RB_{MS}^i: \text{if } (V_1 \text{ is } \tilde{A}_{1i} \text{ and } V_2 \text{ is } \tilde{A}_{2i} \text{ and } V_3 \text{ is } \tilde{A}_{3i} \text{ and } V_4 \text{ is } \tilde{A}_{4i}), \\ \text{then } (U_1 \text{ is } B_i); \quad (3)$$

$$RB_{MS}^i: \text{if } (V_1 \text{ is } \tilde{A}_{1i} \text{ and } V_2 \text{ is } \tilde{A}_{2i} \text{ and } V_3 \text{ is } \tilde{A}_{3i} \text{ and } V_4 \text{ is } \tilde{A}_{4i}), \\ \text{then } (\mu_T \text{ is } B_i). \quad (4)$$

由式(3) 和(4) 可以看出, 一个多输入 - 多输出 (M M O) 可转化为多输入单输出 (M I S O) 模糊控制器的多变量组合结构, 也就是一个多输入 - 多输出 (M M O) 的模糊控制器可通过其本身的解耦性变成 n 个多输入 - 单输出 (M I S O) 模糊控制器 基于上述结论, 前述单元机组模糊控制器设计问题便可转变成两个 4 输入 - 单输出控制器的设计

因为多输入 - 多输出 (M M O) 模糊控制器可转变成多输入 - 单输出 (M I S O) 模糊控制器设计, 因此, 下面对多输入 - 单输出 (M I S O) 模糊控制器的设计问题进行讨论 多输入 - 单输出 (M I S O) 控制器的模糊关系定义为

$$R = \bigcap_{i=1}^l \{V_{1i} \quad V_{2i} \quad V_{3i} \quad V_{4i} \quad u\}. \quad (5)$$

式中: l 为模糊规则数; u 为控制系统的输出; R 的维数 $\dim R = d_1 \times d_2 \times d_3 \times d_4 \times d_u$, $d_1 \sim d_4$ 分别为输入 $V_1 \sim V_4$ 的论域量化等级数; d_u 为输出 u (本文 u 分别代表控制量锅炉燃烧率 U 和主蒸汽压力阀门开度 μ_T) 的论域量化等级数 所以控制量的输出可表示为

$$u = V_1 \circ V_2 \circ V_3 \circ V_4 \circ \tilde{R}.$$

设

$$u = V_1 \circ \tilde{R}_1 \Delta V_2 \circ \tilde{R}_2 \Delta V_3 \circ \tilde{R}_3 \Delta V_4 \circ \tilde{R}_4,$$

其中 $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_3, \tilde{R}_4$ 为二维模糊关系, 仅有 $(d_1 + d_2 + d_3 + d_4)d_u$ 个元素 在某些近似条件下, 可用 Δ 代替 Δ 运算表示, 即

$$u = V_1 \circ \tilde{R}_1 \quad V_2 \circ \tilde{R}_2 \quad V_3 \circ \tilde{R}_3 \quad V_4 \circ \tilde{R}_4$$

其中模糊关系定义为

$$\tilde{R}_k = \bigcap_{i=1}^l \{V_{ki} \quad U_i\}, k = 1, 2, 3, 4; \\ \tilde{R}_k = \bigcap_{i=1}^l \{V_{ki} \quad \mu_{Ti}\}, k = 1, 2, 3, 4$$

上式表示构成 M M O 模糊器的子控制器的关系矩阵算法 算法克服了式(1) 只用一个模糊关系 R_M 进行模糊控制器设计分析的困难, 实现了理论意义上的解耦, 增强了实现的可能性和实用性 实现解耦后可用 M I S O 系统构成解耦后的 M M O 系统, 其输出表达式为

$$U = V_1 \circ \tilde{R}_{11} \quad V_2 \circ \tilde{R}_{21} \quad V_3 \circ \tilde{R}_{31} \quad V_4 \circ \tilde{R}_{41}, \quad (6)$$

$$\mu_T = V_1 \circ \tilde{R}_{12} \quad V_2 \circ \tilde{R}_{22} \quad V_3 \circ \tilde{R}_{32} \quad V_4 \circ \tilde{R}_{42} \quad (7)$$

其中模糊关系为

$$\tilde{R}_{kj} = \bigcap_{i=1}^l \{V_{ki} \cup U_{ji}\},$$

$$k = 1, 2, 3, 4, j = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

根据上述结论,设计单元机组负荷控制的关键是确定模糊关系 $R_{11}, R_{21}, R_{31}, R_{41}, R_{12}, R_{22}, R_{32}, R_{42}$ 。模糊关系确定后,根据式(6)和(7)便可求出模糊控制器的输出

3.3 模糊关系的确定方法

下面仅以 R_{11} 为例来说明模糊关系的确定方法。本文中 R_{11} 为输入变量 V_1 (给定负荷与输出负荷的偏差即功率偏差) 到被控制输出 U (锅炉燃烧率) 的模糊关系,步骤如下:

Step 1: 将功率偏差变量 $V_1(P_e)$ 分为7级 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, 于是有功率偏差论域 $V_1 = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。取5个语言值 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 , 其含义分别为 PB, PS, O, NS, NB。 $A_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 是论域 V_1 上的模糊集

Step 2: 将功率偏差变量 $V_1(P_e)$ 进行模糊化。一般根据控制系统的实际情况和专家经验确定模糊集 A_i 的隶属度,如表1所示

表1 模糊集 A_i 隶属函数表

F 集	论 域						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
A_1					0.1	0.7	1
A_2					1	0.7	0.1
A_3		0.1	0.7	1	0.7	0.1	
A_4	0.1	0.7	1				
A_5	1	0.7	0.1				

Step 3: 确定模糊控制规则。当得到一个功率偏差变量 $V_1(P_e)$, 就应对锅炉燃烧率 U 进行调节。根据控制系统的实际情况和专家经验将 U 分为9级 $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$, 于是有锅炉燃烧率论域 $V_1 = \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ 。取5个语言值 B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 , 其含义分别为 PB, PS, O, NS, NB。 $B_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 是论域 U 上的模糊集。隶属函数根据控制系统的实际情况和专家经验确定,如表2所示

表2 模糊集 B_i 隶属函数表

F 集	论 域								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
B_1							0.1	0.7	1
B_2						1	0.7	0.1	
B_3			0.1	0.7	1	0.7	0.1		
B_4		0.1	0.7	1					
B_5	1	0.7	0.1						

按照现场运行人员经验和专家意见确定模糊控制规则为

if $V_1 = NB$, then $U = PB$;

- or if $V_1 = NS$, then $U = PS$;
- or if $V_1 = O$, then $U = O$;
- or if $V_1 = PS$, then $U = NS$;
- or if $V_1 = PB$, then $U = NB$.

如表3所示

表3 模糊控制规则表

if	A_5	A_4	A_3	A_2	A_1
then	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5

多重条件语句从 V_1 到 U 的模糊关系为

$$R_{11} =$$

$$A_5 \times B_1 \quad A_4 \times B_2 \quad A_3 \times B_3 \quad A_2 \times B_4 \quad A_1 \times B_5 =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.7 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.7 & 1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.7 & 1 & 0.7 \\ 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.1 \\ 1 & 0.7 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.7 & 1 \\ 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \\ 1 & 0.7 & 0.1 & 0.1 \\ 0.7 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据同样方法可求出 $R_{21}, R_{31}, R_{41}, R_{12}, R_{22}, R_{32}, R_{42}$; 然后根据式(6)和(7)便可求出控制量 U 和 μ_r 。

4 结 论

单元机组控制系统是非线性、大惯性、多变量、紧密耦合的控制对象。本文针对国产300MW单元机组运行中的负荷变化和汽轮机主蒸汽压力的控制提出了一种模糊控制方案。与原300MW仿真的负荷和主蒸汽压力采用PID型模糊控制器相比,该方案具有控制简单灵活、快速性好、可靠性高等优点,克服了负荷变化较大时系统的波动,提高了系统的稳定性。

参考文献 (References)

[1] Hwang C S, Kim W. A Design of Robust Two-degree-of-freedom Boiler-turbine Control System Using H_∞ Optimization Method [A]. Proc 34th SICE Annual Conf [C]. Sapporo, 1995: 1263-1268

[2] Mello O F P, Felbo O W. Dynamic Models for Fossil Fueled Steam Units in Power System Studies[J]. IEEE Trans on Power System, 1991, 6(2): 753-761.

[3] Shinohara W, Kodttschek D E. A Simplified Model

- Based Supercritical Power Plant Controller [A]. *Proc of 35th IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Kobe, 1996: 4486-4491.
- [4] 吕志来, 张保会. 基于 ANN 和模糊控制相结合的电力负荷短期预测方法[J]. *电力系统自动化*, 1999, 23(22): 37-39
(Lv Z L, Zhang B H. Short Term Load Forecasting Method Based on Combination of ANN and Fuzzy Control[J]. *Automation of Electric Power System*, 1999, 23(22): 37-39.)
- [5] Chen Y Q, Liu J Z, Zeng D L, et al. Design of a Self-learning Fuzzy-neural Networks and Application to a Boiler-turbine Coordinated Control System [A]. *Int Conf on Electrical Engineering* [C]. Jeju Island, 2002: 283-287.
- [6] Wen T. H. Control for a Boiler-turbine Unit [A]. *Proc of the 1999 IEEE, Int Conf on Control Applications* [C]. Hawaii, 1999: 910-914
- [7] 柳洪义, 马现刚, 朱树森. 微波催化连续反应实验系统的温度控制[J]. *东北大学学报*, 2003, 24(3): 256-259
(Liu H Y, Ma X G, Zhu S S. Temperature Control of Microwave Catalysis Continuous Reaction Experiment System [J]. *J of Northeastern University*, 2003, 24(3): 256-259.)
- [8] Wu Z Q, Mizumoto M. PD-type Fuzzy Controller and Parameters Adaptive Method [J]. *Fuzzy Set and System*, 1996, 78(1): 23-25
- [9] 魏毅新, 王新春. 燃煤锅炉蒸汽压力的模糊控制[J]. *包头钢铁学院学报*, 2002, 21(2): 162-164
(Wei Y X, Wang X C. The Fuzzy Control on Vapor Pressure of Coal-burning Boiler [J]. *J of Baotou University of Iron and Steel Technology*, 2002, 21(2): 162-164.)
- [10] 施海平, 吴征, 吴永海. 模糊控制技术在国产 200 MW 机组协调控制系统上的应用[J]. *中国电力*, 1999, 32(3): 47-53
(Shi H P, Wu Z, Wu Y H. Application of Fuzzy Control Technology in Coordinated Control System of Indigenous 200 MW Generating Units [J]. *Electric Power of China*, 1999, 32(3): 47-53.)
- [11] 陈彦桥, 王印松, 刘吉臻, 等. 基于 PD 型模糊神经网络的火电站单元机组协调控制[J]. *动力工程*, 2003, 23(1): 2219-2223
(Chen Y Q, Wang Y S, Liu J Z, et al. The Boiler-turbine Coordinated Control Based on the PD-type Fuzzy Neural Network in the Fossil-fired Power Station [J]. *Power Engineering*, 2003, 23(1): 2219-2223.)

(上接第 434 页)

- [2] 任焱, 陈宗海. 环境因素对多自主移动机器人系统的影响研究[J]. *计算机工程与应用*, 2005, 41(22): 61-63
(Ren Y, Chen Z H. Study on Effect of Environmental Factors on Multiple Autonomous Robot Systems [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, 41(22): 61-63.)
- [3] Balch T R. *Behavior Diversity in Learning Robot Teams* [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1998
- [4] 王坤, 陈卫东. 分布式多移动机器人系统中基于局部感知的排队协调策略研究[J]. *机器人*, 2002, 24(6): 540-544
(Wang K, Chen W D. Queue Coordination Strategy Based on Local Sensing in Distributed Multiple Mobile Robot Systems [J]. *Robot*, 2002, 24(6): 540-544.)
- [5] 陈卫东, 李振海, 席裕庚. 分布式多移动机器人系统冲突及其消解策略的实例研究[J]. *系统仿真学报*, 2002, 14(10): 1288-1301
(Chen W D, Li Z H, Xi Y G. Interference and Its Solving Strategy in Distributed Multiple Autonomous Robot System: A Case Study [J]. *J of System Simulation*, 2002, 14(10): 1288-1301.)
- [6] 张汝波, 顾国昌, 刘兆德等. 强化学习理论算法及应用[J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(5): 637-642
(Zhang R B, Gu G C, Liu Z D, et al. Reinforcement Learning Theory, Algorithms and Its Application [J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(5): 637-642.)
- [7] Moore A W, Atkeson C G. Prioritized Sweeping: Reinforcement Learning with Less Data and Less Real Time [J]. *Machine Learning*, 1993, 13(1): 103-130
- [8] Logan B, Theodoropoulos G. The Distributed Simulation of Multiagent Systems [J]. *Proc of the IEEE*, 2001, 89(2): 174-185
- [9] Mahadevan S, Connel J. Automatic Programming of Behavior-based Robots Using Reinforcement Learning [J]. *Artificial Intelligence*, 1992, 55(2-3): 311-365