

文章编号: 1001-0920(2001) 04-0425-05

具有多优先级多服务网络的激励价格控制

井元伟¹, 杨开阳², 金福德¹, Khosrow Sohraby³

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 浙江大学 控制科学与工程系, 浙江 杭州 310027; 3. 密苏里大学 堪萨斯城分校, 美国 64110)

摘要: 运用 Stackelberg 对策中的激励原理, 研究具有多优先级的多服务网络系统的价控问题。提出了具有管理者的两用户两优先级的激励模型, 给出了确定激励参数的方法。将此方法扩展到多优先级的情况, 推导出互联激励参数矩阵。通过数值例子说明了激励价控策略的有效性。

关键词: 对策论; 多服务网络; 优先级; 价控; 激励 Stackelberg 策略

中图分类号: TP 39 文献标识码: A

Inventive Pricing Problem of Multi-service Networks with Multi-priority-level

JING Yuan-wei¹, YANG Kai-yang², JIN Fu-de¹, Khosrow Sohraby³

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Department of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. University of Missouri-Kansas City, 64110, USA)

Abstract: The pricing problem of equilibrium of multi-service priority-based networks is studied by means of the principle of incentive strategy in Stackelberg game theory. The existing results on two-user two-level Nash problem are introduced briefly. One-leader multi-user multi-level incentive model is proposed based on the two-level one. The design of the incentive coefficient matrices is presented for both multi-user two-level and multi-user multi-level models. The numerical example shows the efficiency of the incentive pricing strategy.

Key words: game theory; multi-service networks; priority; pricing; incentive Stackelberg strategy

1 引言

以可接受的用户成本代价达到各种服务请求中对服务质量的不同要求, 是现代多服务网络系统研究的目标之一。近几年来, 通讯网络中通信量管理和通信量模型的研究已取得很大进展, 但关于价控方

面的研究工作仍处于初始阶段。网络服务中的价控问题不仅决定了商业网络的经济生存性, 而且通过对用户行为的影响在通信量管理中起着重要作用。DaSilva 等利用对策论中的 Nash 平衡点的概念, 研究了具有优先级的多服务网络系统中的价控问题^[1]。

收稿日期: 2000-04-11; 修回日期: 2000-12-15

基金项目: 高等学校骨干教师资助项目; 教育部留学回国人员科研启动基金项目

作者简介: 井元伟(1956—), 男, 辽宁西丰人, 教授, 从事复杂控制系统的对称性、相似性、稳定性等研究; Khosrow Sohraby (1954—), 男, 美国密苏里大学堪萨斯城分校计算机科学与通信系主任, 教授, 从事高速通信网络流量控制、计算机网络价控问题等研究。

有时用户与网络服务提供方的目标可能不一致, 价控便可作为一个手段来激励或引导用户采取对网络整体有益的行为。对策论中 Nash 平衡和激励 Stackelberg 平衡的概念可用于建立用户之间以及用户与服务方之间的模型。对策论原理在网络问题上的应用不仅包括价格问题, 还有拥塞控制和呼叫允许控制等^[2~4]。

本文着重研究激励引导策略。在此策略下, 用户表现为一个整体, 从而得到了对于整个网络系统合适的结果。

2 系统描述

考虑具有 M 个优先级的先入先出单队列模型。设给定时间内使用队列的顾客数为 N , 令 s_{ij} 为用户 i 使用第 j 优先级发送信息的百分比率, p_j 为支付价格。记 $S_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{iM}]^T$, 用户盈余函数 $C_i(s)$ 定义为

$$C_i(s) = U_i(q_i) - \sum_{j=1}^M p_j s_{ij} \lambda_i \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, N$

其中, $U_i(q_i)$ 是用户的获益函数, q_i 代表用户 i 从网络得到的服务质量程度, λ_i 为平均到达速率。

网络用户选定服务请求 $s^* = [s_1^*, s_2^*, \dots, s_N^*]$, 使其盈余函数值达到最大。若用户表现为一个整体, 则很容易得到一个价格平衡策略。然而在实际问题中, 消费者往往是非合作的。采用 Nash 平衡可使用户不会改变其策略以单方面增加自己的获益^[2]。在两用户两优先级情况下, 文献[1]研究了 Nash 平衡问题, 给出一个利用服务方和用户方的效益函数的价格差来寻求优先级系统平衡的方法, 并得到了若干结论。在一定价差范围内, 平衡点是稳定的, 超出该范围则不稳定。即至少有一个用户宁愿采取另一种使自己消费最优的策略组合。此时采用激励 Stackelberg 策略便可引导每个用户遵从某个恰当的策略组合。关于 Nash 平衡、激励 Stackelberg 策略和相关概念的精确叙述参见文献[5]。

3 两用户两优先级 Nash 问题

文献[1]利用带 Pareto 优化 Nash 平衡概念对两用户两优先级情况进行了研究。用户 i 的盈余函数为

$$C_i(s) = A_i - B_i W_i^{d_i} - p_H s_i \lambda_i - p_L (1 - s_i) \lambda_i \quad (2)$$

$i = 1, 2$

其中, 若 $d_i \neq 1$, 则 $A_i - B_i W_i^{d_i}$ 是 W_i 的一个非线性获益函数, 对每个用户而言, A_i 和 B_i 是常量, W_i 是在队列中的平均等待时间; p_H 和 p_L 分别是两个优先级的价格。

由于 $G/G/1$ 排队系统中的延时, 假设队列为泊松到达, 用 $t_i = (\lambda_i, \bar{x}_i, \bar{x}_i^2)$ 表示。这里 $\bar{x}_i$ 和 $\bar{x}_i^2$ 是用户 i 的信息长度的最先两段。利用已知的排队论的结论^[6], 并对所有的 i 假设 $\bar{x}_i = \bar{x}$, $\bar{x}_i^2 = \bar{x}^2$, $G/G/1$ 队列的平均等待时间 W_i 为

$$W_i = K \frac{1 - \bar{x} \lambda s_i}{1 - \bar{x} (s_1 \lambda_1 + s_2 \lambda_2)}, \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

其中, $K = \frac{\bar{x}^2 \lambda^*}{2(1 - \bar{x} \lambda^*)}$, $\lambda^* = \lambda_1 + \lambda_2$, 且与 s_i 无关。令

$$\frac{\partial C_i(s)}{\partial s_i} = B_i \frac{\partial W_i^{d_i}}{\partial s_i} - \Delta p \lambda_i = 0, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

其中 $\Delta p = p_H - p_L$ 。如果式(4)存在解, 则此解即为 Nash 平衡问题的最佳策略。假设通信量长度均值 μ 为指数分布, 文献[1]给出了隐式结果及数值例子。

引理1 两用户系统达到唯一的具有 Pareto 最优的 Nash 平衡, 当且仅当

$$(\min_{i=1,2} B_i) \Gamma < \Delta p < (\max_{i=1,2} B_i) \Gamma \quad (5)$$

其中 $\Gamma = \frac{2\lambda}{\mu(\mu - 2\lambda)(\mu - \lambda)}$

此引理给出了 Δp 的范围, 在该范围内存在 Pareto 最优的 Nash 平衡。如果 Δp 超出此范围, 即使存在 Nash 平衡, 也有可能发生偏离的情况。也就是说至少有一个用户会采取其它的策略组合, 使其盈余函数达到最大。该情况称为网络的不稳定性。当 Δp 为 $(\min_{i=1,2} B_i) \Gamma$ 或 $(\max_{i=1,2} B_i) \Gamma$ 时, 则不再存在唯一平衡点。因为此时从某个用户角度看, 某一簇中的策略组合都是等价的。此外, 当每一用户的 B_i 都相同时, Δp 变成一个确定的点, 而不再是保证整个充要条件满足的价格区间。在这种情况下, 两个优先级之间的价格差是一个定数, 没有可调控的余地, 从而不能控制整个网络。

为了克服不稳定性, 可采用激励 Stackelberg 策略来讨论价控问题。文献[7]对此进行了研究, 并给出了一个线性 Stackelberg 策略。在此竞争模型中, 网络提供者是具有管理能力的一方, 管理者代表整个系统的利益。考虑由 C_i 的线性组合作为管理者的网络效益函数, 即

$$C_0(s_0, s) = \alpha C_1(s_0, s) + \alpha C_2(s_0, s) \quad (6)$$

其中, s_0 为管理者的策略, 它是策略组合 s 的一个函数。对于一个两用户系统, s_0 是一个 2 维向量, 即 $s_0 =$

$(s_{01}, s_{02})^T$ 。如果用户 i 偏离了合理的解组, s_{0i} 就是其额外要付的价格, 故 s_{0i} 是非负的。 α 和 α 分别是用户 1 和用户 2 的权值, 且有 $\alpha_1 + \alpha_2 = 2$ 。

在式(6)中, $C_i(s_0, s)$ ($i = 1, 2$) 是 $C_i(s)$ 的扩展, 即

$$C_i(s_0, s) = A_i - B_i W_{i1}^{d_i} - p_{HSi} \lambda - p_{L1}(1 - s_i) \lambda + \xi_i s_{0i} \quad (7)$$

其中 $\xi_i < 0$ ($i = 1, 2$) 是线性函数的参数, 为计算方便, 通常令 $\xi_i = -1$ 。

引理 2 若 $\tilde{s}$ 是如下方程组的解

$$\frac{\partial C_0(s_0, s)}{\partial s_i} = 0, \quad i = 1, 2 \quad (8)$$

则 $\tilde{s}$ 是网络总体最优的策略组合。

若用户是合作的, 那么通过采用总体策略组合 $\tilde{s}$ 可使系统处于最优状态。但是网络用户通常不是合作的, 在这种情况下, 可在用户之间使用 Nash 策略, 并制定相应的激励策略来维护最优状态。Stackelberg 策略是达到该目的一个有效方法。管理者的激励策略可建立为

$$s_0 = \tilde{s}_0 + \begin{bmatrix} Q_1 & 0 \\ 0 & Q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 - \tilde{s}_1 \\ s_2 - \tilde{s}_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中 Q_1, Q_2 是针对用户的激励参数, 可由

$$Q_i = \Delta p \lambda / \xi_i - B_i K^{d_i} d_i \bar{x} \lambda \times \frac{(1 - \bar{x} \lambda r \tilde{s}_i)^{d_i-1} (1 - \bar{x} \lambda r \tilde{s}_j)}{\xi_i (1 - \bar{x} (\tilde{s}_i \lambda + \tilde{s}_j \lambda))^{d_i+1}} \quad (10)$$

得到。

管理者的策略(9)用式(10)的 Q_i 给出。以 Q_i 作为激励参数, 式(9) 恰是一个激励 Stackelberg 策略。此策略可使用户在 $\tilde{s}$ 点得到其最大盈余^[7]。

4 多用户多优先级激励问题

4.1 多用户两优先级问题

与两用户两优先级网络问题一样, 多用户两优先级网络系统管理者的效益函数可描述为

$$C_0(s_0, s) = \sum_{i=1}^N \alpha_i C_i(s_0, s) \quad (11)$$

其中

$$C_i(s_0, s) = A_i - B_i W_{i1}^{d_i} - p_{HSi} \lambda - p_{L1}(1 - s_i) \lambda + \xi_i s_{0i} \quad (12)$$

且 $\sum_{i=1}^N \alpha_i = N$ 。1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

网络中 N 个用户的互联关系通过平均等待时间描述为

$$W_i = K \frac{1 - \bar{x} \lambda r s_i}{1 - \bar{x} \sum_{j=1}^N s_j \lambda} \quad (13)$$

其中, $K = \frac{\bar{x}^2 \lambda r}{2(1 - \bar{x} \lambda r)}$, $\lambda r = \sum_{j=1}^N \lambda_j$, $\bar{x}$ 和 $\bar{x}^2$ 的意义同第 3 节。可推得

$$\frac{\partial C_0(s_0, s)}{\partial s_i} = \alpha_i B_i K^{d_i} d_i \bar{x} \frac{(1 - \bar{x} \lambda r s_i)^{d_i-1}}{\left(1 - \bar{x} \sum_{j=1}^N s_j \lambda\right)^{d_i+1}} \sum_{j=1}^N \lambda_j (1 - \bar{x} \lambda r s_j) - \Delta p \lambda + \sum_{k=1}^N \alpha_k B_k K^{d_k} d_k \bar{x} \lambda \frac{(1 - \bar{x} \lambda r s_k)^{d_k}}{\left(1 - \bar{x} \sum_{j=1}^N s_j \lambda\right)^{d_k+1}} \quad (14)$$

可见此为两用户模型到多用户模型的简单推广, 只是在式中出现了一些求和项。

引理 3 若 $\tilde{s} = (0, 1)^N$ 是下列方程组的解

$$\frac{\partial C_0(s_0, s)}{\partial s_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

则 $\tilde{s}$ 是网络总体最优的策略组合。

多用户问题的激励 Stackelberg 策略和两用户模型情况类似。同样选择线性函数作为激励策略, 即

$$s_0 = \tilde{s}_0 + \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Q_2 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Q_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 - \tilde{s}_1 \\ s_2 - \tilde{s}_2 \\ \vdots \\ s_N - \tilde{s}_N \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中 Q_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 是激励参数。可如下得到 Q_i , 使式(16) 具有激励性能。将式(16) 代入式(12) 得

$$C_i(s_0, s) = A_i - B_i W_{i1}^{d_i} - p_{HSi} \lambda - p_{L1}(1 - s_i) \lambda + \xi_i Q_i (s_i - \tilde{s}_i) \quad (17)$$

于是有

$$\frac{\partial C_i(s_i, s)}{\partial s_i} = B_i K^{d_i} d_i \bar{x} \frac{(1 - \bar{x} \lambda r s_i)^{d_i-1}}{\left(1 - \bar{x} \sum_{j=1}^N s_j \lambda\right)^{d_i+1}} \sum_{j=1}^N \lambda_j (1 - \bar{x} \lambda r s_j) - \Delta p \lambda + \xi_i Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

令式(18) 为零, 得

$$Q_i = \Delta p \lambda / \xi_i - B_i K^{d_i} d_i \bar{x} \lambda \times \frac{(1 - \bar{x} \lambda r s_i)^{d_i-1}}{\xi_i \left(1 - \bar{x} \sum_{j=1}^N s_j \lambda\right)^{d_i+1}} \sum_{j=1}^N \lambda_j (1 - \bar{x} \lambda r s_j) \quad (19)$$

4.2 多用户多优先级问题

由上所述,可见两用户到多用户的推广并不困难,但从两优先级到多优先级的推广则困难得多。在多优先级模型中,每个用户的盈余函数为

$$C_i(s) = A_i - B_i W_i^{d_i} - \sum_{h=1}^M p_h s_{ih} \lambda_i \quad (20)$$

其中 M 是优先级个数。较困难的问题是式中求和项的处理,并且 W_i 也更为复杂,即

$$W_i = K \frac{1 - \bar{x} \lambda_i \sum_{h=1}^{M-1} s_{ih}}{1 - \bar{x} \sum_{j=1}^N \sum_{h=1}^{M-1} s_{jh} \lambda_j} \quad (21)$$

注意到 $\sum_{h=1}^M s_{ih} = 1$, 将式(20) 重写, 得到

$$C_i(s) = A_i - B_i W_i^{d_i} - \sum_{h=1}^{M-1} (p_h - p_M) s_{ih} \lambda_i - p_M \lambda_i \quad (22)$$

记 $\Delta p_h = p_h - p_M, \Delta p = [\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_{M-1}]^T$, 则有

$$\frac{\partial C_0(s_0, s)}{\partial s_i} = \alpha B_i K^{d_i} d_i \bar{x} G_i - \Delta p \lambda_i + F_i \quad (23)$$

其中, $F_i = [f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{i, M-1}]^T, G_i = [g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{i, M-1}]^T, f_{ih}, g_{ih}$ 分别为

$$f_{ih} = \sum_{k=1}^N \alpha B_k K^{d_k} d_k \bar{x} \lambda_k \frac{(1 - \bar{x} \lambda_k s_{kh})^{d_k}}{\left(1 - \bar{x} \sum_{j=1}^N \sum_{h=1}^{M-1} s_{jh} \lambda_j\right)^{d_k+1}}$$
$$g_{ih} = \frac{(1 - \bar{x} \lambda_i s_{ih})^{d_i-1}}{\left(1 - \bar{x} \sum_{j=1}^N \sum_{h=1}^{M-1} s_{jh} \lambda_j\right)^{d_i+1}} \sum_{j=1}^N \lambda_j (1 - \bar{x} \lambda_j s_{jh})$$

引理 4 若 $\tilde{s} \in S = ((0, 1)^{M-1})^N$ 是如下方程组的解

$$\frac{\partial C_0(s_0, s)}{\partial s_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (24)$$

则 $\tilde{s}$ 是总体最优的策略组合。

现在考虑多级系统的激励策略问题。选择线性向量函数作为激励惩罚结构

$$s_0 = \tilde{s}_0 + \begin{bmatrix} Q_{11} & \dots & Q_{1, M-1} \\ \vdots & & \vdots \\ Q_{N1} & \dots & Q_{N, M-1} \end{bmatrix} (s - \tilde{s}) \quad (25)$$

其中

$$(s - \tilde{s}) = \begin{bmatrix} s_{11} - \tilde{s}_{11} & \dots & s_{N1} - \tilde{s}_{N1} \\ \vdots & & \vdots \\ s_{1, M-1} - \tilde{s}_{1, M-1} & \dots & s_{N, M-1} - \tilde{s}_{N, M-1} \end{bmatrix}$$

$Q_{ih}(i = 1, 2, \dots, N; h = 1, 2, \dots, M - 1)$ 是激励项,

用来控制整个网络系统以 $\tilde{s}$ 为策略组合运行。可得

$$Q_{ih} = \Delta p_h \lambda_i / \xi_i - B_i K^{d_i} d_i \bar{x} \times \frac{(1 - \bar{x} \lambda_i s_{ih})^{d_i-1} \sum_{j=1}^N \lambda_j (1 - \bar{x} \lambda_j s_{jh})}{\xi_i (1 - \bar{x} \sum_{j=1}^N \sum_{h=1}^{M-1} s_{jh} \lambda_j)^{d_i+1}} \quad (26)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N; h = 1, 2, \dots, M - 1$ 。于是有如下定理:

定理 1 若式(25) 中的 $Q_{ih}(i = 1, 2, \dots, N; h = 1, 2, \dots, M - 1)$ 取为式(26), 则由式(25) 给出的策略 s_0 可作为网络管理者的激励 Stackelberg 策略。

5 数值例子

为阐明所提出的 Stackelberg 策略, 考虑一个带非线性获益项的两用户的网络^[1]。在此例中, 令 $A_1 = 10, A_2 = 15, B_1 = 10, B_2 = 20, d_1 = d_2 = 2$ 。根据引理 1, 最优价格范围是 $0.9 < \Delta p < 1.3$ 。在此范围内, 根据每个用户对服务质量的要求灵敏度, 可充分利用网络结构的优势, 使所有用户受益。找到此范围内的平衡点为 $\tilde{s} = (0, 1)$, 得出结果为 $(C_1^{(0, 1)}, C_2^{(0, 1)}) = (7.64, 12.64)$ 。 Δp 变化时, 用户的盈余函数值不同, 当 $\Delta p = 1.1$ 时(在最优价格范围内), 用户的盈余值矩阵如下

	$s_2 = 0$	$s_2 = 1$
$s_1 = 0$	8.13, 12.50	7.64, 12.64
$s_1 = 1$	7.92, 11.53	7.58, 11.95

Pareto 最优 Nash 平衡是 $\tilde{s} = (0, 1)$, 两个用户都期望此平衡点, 并不想违反此策略。若 $\Delta p < 0.9$, 则 Δp 不在最优范围之内。例如 $\Delta p = 0.7$, 则用户的盈余值矩阵是

	$s_2 = 0$	$s_2 = 1$
$s_1 = 0$	8.13, 12.50	7.64, 12.89
$s_1 = 1$	8.17, 11.53	7.83, 12.20

可知 $\tilde{s} = (1, 1)$ 是 Nash 平衡, 但是由于 $C_i^{(0, 0)} > C_i^{(1, 1)}$, 它不是 Pareto 最优的。即作为用户, 会认为选择 $s = (0, 0)$ 对自己更有利, 于是出现了不稳定性。如果要使这个 Nash 平衡点稳定, 就必须采用激励 Stackelberg 策略。在激励 Stackelberg 策略下, 用户的盈余值矩阵如下

	$s_2 = 0$	$s_2 = 1$
$s_1 = 0$	6.02, 10.20	5.53, 12.89
$s_1 = 1$	8.17, 10.58	7.83, 12.20

显然 $s = (1, 1)$ 是 Pareto 最优 Nash 平衡解。

6 结 语

本文利用对策论中的激励 Stackelberg 原理, 改进了多服务网络中的价控问题已有的研究结果, 讨论了多服务网络中的价控模型。给出了一类线性激励 Stackelberg 策略, 通过激励参数来制定价控策略, 从而使管理者能将网络稳定地运行在期望的平衡点上。

参考文献:

[1] DaSilva L A, Petr D W, Akar N. Equilibrium pricing in multi-service priority-based networks [A]. IEEE GLOBECOM 97[C]. Phoenix, 1997.
[2] Cocchi R, Shenker S, Estrin D *et al.* Pricing in computer networks: Motivation, formulation and example [J].

IEEE/ACM Trans on Networking, 1993, 1(6): 614-627.
[3] Dziong Z, Mason L G. Fair-efficient call admission control policies for broadband networks——A game-theoretic framework [J]. IEEE/AMC Trans on Networking, 1996, 4(1): 123-136.
[4] Shenker S J. Making greed work in networks: A game-theoretic analysis of switch service disciplines[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1995, 3(6): 819-831.
[5] Fudenberg D, Tirole J. Game theory [M]. Cambridge: MIT Press, 1992.
[6] Kleinrock L. Queueing systems (): Computer applications[M]. John Wiley and Sons, 1976.
[7] 金福德, 井元伟, K Sohraby, 等. 基于优先权的多服务网络的最优价控策略[A]. 2001 中国控制与决策学术年会论文集[C]. 西安, 2001. 896-901.

(上接第 424 页)

参考文献:

[1] 韩京清. 非线性状态 误差反馈控制律——NLSEF[J]. 控制与决策, 1999, 10(3): 221-225.
[2] 韩京清. 自抗扰控制器 及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
[3] 韩京清, 张文革. 大时滞系统的自抗扰控制[J]. 控制与决策, 1999, 14(4): 354-358.
[4] 焦连伟, 陈寿孙, 王晓丰. 电力系统自抗扰控制器[J]. 清华大学学报, 1999, 39(3): 27-29.
[5] 冯光, 黄立培, 朱东起. 异步电机的新型非线性自抗扰控制器的研究[J]. 清华大学学报, 1999, 39(3): 30-33.
[6] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪-微分器[J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177-183.
[7] Charles W Anderson. Learning to control an inverted

pendulum using neural networks[J]. IEEE Contr Syst Mag, 1989, 9(3): 31-37.
[8] Kosko B. Neural network and fuzzy systems[M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1992.
[9] 李东海. 非最小相位系统的智能设计[R]. 北京: 清华大学, 1994.
[10] 李东海, 姜学智, 徐忠净, 等. 一类不可逆系统的非线性控制及预期动力学方程的选取[J]. 控制与决策, 1998, 13(6): 686-689.
[11] 王宁, 楼晶. 水轮发电机组的增量式神经元非模型控制[A]. 中国控制会议论文集[C]. 北京: 国防大学出版社, 1998. 626-630.
[12] 徐世许. X 鱼雷控制系统的研究[R]. 北京: 清华大学, 1989.