第 20 卷 第 1 期 控 制 与 决 策 2005 年 1 月
Vol. 20 No. 1 Control and Decision Jan. 2005

文章编号: 1001-0920(2005)01-0023-04

基于交叉干扰的多优先级网络线性激励价控

井元伟[1], 岳晓宁[1,2], 王玉琢[3], 沈晓军[4]
(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 沈阳大学 理学院, 辽宁 沈阳 110044;
3. 抚顺师范高等专科学校, 辽宁 抚顺 113006; 4. 密苏里大学 堪萨斯城分校, 堪萨斯城 64110-2499)

摘 要: 讨论了多优先级网络系统交叉干扰的线性激励价控问题. 针对多用户多优先级系统的通信量价控管理的数学模型, 利用对策论中的激励 Stackelberg 策略的概念, 建立了基于交叉干扰的线性激励价格策略. 通过对用户行为的激励, 调整网络系统通信量的分配, 使系统达到一个理想且稳定的状态, 且用户和网络管理者都达到最佳盈余. 同时讨论了激励参数的确定方法, 给出了一般的激励参数矩阵. 通过数值例子验证了该激励价控策略的有效性.

关键词: 优先级; 交叉干扰; 价控; 对策论; 激励 Stackelberg 策略
中图分类号: TP393 **文献标识码**: A

Linear incentive pricing based on crossing influences for multi-priority networks

JING Yuan-wei[1], *YUE Xiao-ning*[1,2], *WANG Yu-zhuo*[3], *SHEN Xiao-jun*[4]
(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. School of Science, Shenyang University, Shenyang 110044, China; 3. Fushun Teachers College, Fushun 113006, China; 4. School of Interdisciplinary Computing and Engineering, University of Missouri-Kansas City, Kansas City 64110-2499, USA. Correspondent: JING Yuan-wei, E-mail: ywjjing@people.com.cn)

Abstract: The linear crossing influences incentive pricing strategy for multi-service networks with multi-priority is dealt with. To the model of traffic pricing of the multi-user multi-priority networks, the linear crossing influences incentive strategies are proposed based on the concept of incentive Stackelberg strategy in the game theory. By means of the incentive scheme and the re-assignment of the traffic of the network system, the network users and the network manager can both get the best surplus and the system is made to get an ideal and steady state. The method of determining incentive parameters is discussed and the general incentive parameter matrix is given out. The numerical examples show the validity of the incentive pricing strategies.

Key words: priority; crossing influences; pricing; game theory; incentive Stackelberg strategy

1 引 言

近年来, 网络通信得到了迅速的发展, 大量的用户需求激励网络的普及与应用, 同时用户的大量增加也预示着在将来网络资源的缺乏[1]. 目前研究的中心工作已转移到利用潜在的网络基础结构, 调整网络通信量的合理分配, 激励服务网络的管理者提供高质量的服务. 为此, 许多学者做了大量的研究工作. 文献[2～5]研究了服务网络的价控问题, 并提出了价控策略. 利用价控可有效地影响用户的服务选择, 更好地利用网络资源. Dasilva 等[6]通过选择适当的策略, 使网络管理者对用户的服务需求选择能够提供必要的激励作用, 可改进网络的资源分配, 同时也间接地促进了服务质量的提高和对网络资源的需求. 文献[7]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, 在两用户两优先级情况下, 给出了一个利用服

收稿日期: 2003-12-31; **修回日期**: 2004-04-16.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60274099); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20020145007).
作者简介: 井元伟(1956—), 男, 辽宁西丰人, 教授, 博士生导师, 从事高速通信网络系统的控制、复杂控制系统等研究; 岳晓宁(1962—), 女, 辽宁沈阳人, 副教授, 博士生, 从事高速通信网络系统的控制等研究.

务方和用户方盈余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. 有时用户与网络服务方的目标可能不一致,价控可作为一个手段来激励和引导用户采取对网络整体有益的行为. 文献[8]在多优先级情况下,考虑调控用户价格对该用户盈余函数的影响,采用线性激励 Stackelberg 策略,使用户表现为一个整体,引导每个用户遵从某个恰当的策略组合. 激励价控仅仅是对策论原理在网络问题上的一个应用,还可用于对网络的延时差控制、拥塞控制、呼叫允许控制及通讯量控制等,使在平衡点处达到最佳. 文献[9～11]对此类问题进行了研究.

本文利用对策论中的 Nash 平衡和激励 Stackelberg 策略的相关概念,研究了多用户多优先级服务网络系统的交叉干扰价控问题. 为加强用户与用户之间、用户与网络系统管理者之间的合作关系,给出了基于交叉干扰的线性激励引导策略,以及激励策略中的激励参数矩阵的求法. 在此策略下,使用户与网络管理者的利益表现为一致性,以达到网络资源合理使用的目的.

2 系统描述

对于具有多优先级的先入先出单队列模型,考虑如下用户盈余函数[7,8]:

$$c_i(s) = a_i - b_i w_i^{d_i} - \sum_{j=1}^{M} p_j s_{ij} \lambda_i,$$
$$i = 1, 2, \cdots, N. \tag{1}$$

其中:$s = \{s_{ij}\}$, s_{ij} 为用户 i 在优先级 j 上的网络服务请求;$a_i - b_i w_i^{d_i}$ 为用户 i 的获益函数,w_i 为在队列中的平均等待时间,$d_i \neq 1$, a_i 和 b_i 为常数;λ_i 为平均到达速率;p_j 为占用优先级 j 所支付的价格.

网络用户选定的服务请求若为系统的平衡点处 s^*,则对系统最为合适. 若用户表现为一个整体,则很容易得到一个平衡策略. 文献[7]采用 Nash 平衡点的概念讨论了问题的可解性,并指出在一定的价差范围内,平衡点是稳定的,超出该范围则不稳定. 对于不稳定的情况,文献[8]采用激励 Stackelberg 策略讨论价控问题,给出了非交叉的线性激励策略,从而引导用户遵从网络期望的策略组合.

在网络管理者的干预下,网络用户的盈余函数扩展为

$$c_i(s, p_0) = c_i(s) + \xi_i p_0(s). \tag{2}$$

其中:$p_0(s)$ 可视为网络管理者的某种策略,是用户服务请求量 s 的函数,且有 $p_0(s^*) = 0$;参数 $\xi_i < 0$,为计算方便,通常令 $\xi_i = -1$.

网络管理者的盈余函数为

$$c_0(s, p_0) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i c_i(s, p_0), \tag{3}$$

其中 $\alpha_i > 0\ (i = 1, 2, \cdots, N)$ 分别为 N 个用户在管理者网络效益中的权数. 通常取 $s^* = \arg\max_s c_0(s, p_0(s))$,管理者的任务就是制定合适的策略,使得用户的服务请求亦为 s^*.

3 两用户两优先级问题

当 $M = 2, N = 2$ 时,用户 i 的盈余函数化为[7,8]

$$c_i(s) = a_i - b_i w_i^{d_i} - \Delta p s_i \lambda_i - p_l \lambda_i,$$
$$i = 1, 2 \tag{4}$$

其中:p_h 和 p_l 分别为占用高低优先级的价格;s_i 为用户 i 占用高优先级的服务请求,$1 - s_i$ 为低优先级的服务请求,且

$$w_i = k \frac{1 - \bar{x} \lambda_T s_i}{1 - \bar{x}(\lambda_1 s_1 + \lambda_2 s_2)}, \quad i = 1, 2$$

其中:$k = (\overline{x^2} \lambda_T)/(2(1 - \bar{x}\lambda_T))$, $\Delta p = p_h - p_l$, $\lambda_T = \lambda_1 + \lambda_2$. 文献[7,8]分别针对平衡点稳定和不稳定的情况对此问题进行了研究,得到了相应的价控策略. 但文献[8]的线性激励策略只针对单一用户发生偏离时产生激励作用,而没有考虑用户间的影响,即所得激励参数矩阵是对角形的. 本文的工作是将其推广为一般矩阵,将交叉干扰因素引入激励价控策略,从而使之更符合实际情况. 设

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}, \quad c(s) = \begin{bmatrix} c_1(s_1) \\ c_2(s_2) \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix},$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} w_1^{d_1} & 0 \\ 0 & w_2^{d_2} \end{bmatrix},$$

则用户的盈余函数可写成矩阵形式,即

$$c(s) = A - B^{\mathrm{T}} W - \Delta p S^{\mathrm{T}} \Lambda - (p_l, p_l) \Lambda \tag{5}$$

当用户偏离平衡点时,采用一个惩罚策略 $p_0(s)$. 于是得到 $c(s)$ 的一个扩展函数为

$$c(s, p_0) = c(s) - p_0(s). \tag{6}$$

考虑以 c_i 的线性组合作为管理者的网络盈余函数,可得管理者的网络盈余函数为

$$c_0(s, p_0) = (\alpha_1, \alpha_2) c(s, p_0). \tag{7}$$

其中:$\alpha_1 > 0$ 和 $\alpha_2 > 0$ 分别为用户 1 和用户 2 在管理者网络效益中的权数,且 $\alpha_1 + \alpha_2$ 为一个常数.

对于 Nash 平衡点 s^*, $s_i^* \in (0, 1)$,且满足

$$\left.\frac{\partial c_0(s, p_0)}{\partial s_i}\right|_{s^*} = 0, \quad \left.\frac{\partial^2 c_0(s, p_0)}{\partial s_i^2}\right|_{s^*} < 0,$$

则 s^* 为网络总体的最优策略组合. 当 Nash 平衡点为 $s_1^* = 0$(或 1),且 $\partial c_i / \partial s_i = -b_i(\partial w_i^{d_i} / \partial s_i) - \Delta p \lambda_i < 0$(或 > 0)时,s^* 也是网络总体的最优策略组合.

若用户是合作的,那么通过采用总体策略组合

可使系统处于最优状态 但用户通常是不合作的, 在这种情况下, 可采取如下策略:

$$p_0(s) = s_0^* + Q\begin{bmatrix} s_1 - s_1^* \\ s_2 - s_2^* \end{bmatrix}. \tag{8}$$

其中 Q 为二阶激励参数矩阵, 其元素为 Q_{ij}, $i, j = 1, 2$

将式(8) 代入(6), 令 $\left.\frac{\partial c(c, p_0)}{\partial s_i}\right|_{s^*} = 0$, 可得

$$Q_{11} = \frac{d_1\bar{x}\lambda_2 w_1^{d_1-1} w_2^2 b_1}{k(1-\bar{x}s_2\lambda_r)} - \Delta p\lambda_1,$$

$$Q_{12} = -\frac{d_1\bar{x}\lambda_2 w_1^{d_1+1} b_1}{k(1-\bar{x}s_1\lambda_r)},$$

$$Q_{21} = -\frac{d_2\bar{x}\lambda_1 w_2^{d_2+1} b_2}{k(1-\bar{x}s_2\lambda_r)},$$

$$Q_{22} = \frac{d_2\bar{x}\lambda_1 w_2^{d_2-1} w_1^2 b_2}{k(1-\bar{x}s_1\lambda_r)} - \Delta p\lambda_2.$$

易知, 由式(8) 给出的策略是一个激励 Stackelberg 策略, 可使两用户及网络得到最大盈余

4 多用户多优先级问题

4.1 多用户两优先级

多用户两优先级系统的用户盈余函数为

$$c_1(s) = a_i - b_i w_i^{d_i} - p_h s_i\lambda - p_l(1 - s_i)\lambda_i,$$
$$i = 1, 2, \cdots, N. \tag{9}$$

其中

$$w_i = k\frac{1-\bar{x}\lambda_r s_i}{1-\bar{x}\sum_{j=1}^{N}\lambda_j s_j},$$

$$k = \frac{\bar{x}^2\lambda_r}{2(1-\bar{x}\lambda_r)},$$

$$\lambda_r = \sum_{j=1}^{N}\lambda_j.$$

多用户问题的激励 Stackelberg 策略与两用户模型情况类似, 同样选择如下函数作为激励策略, 即

$$p_0(s) = s_0^* + Q\begin{bmatrix} s_1 - s_1^* \\ s_2 - s_2^* \\ \vdots \\ s_N - s_N^* \end{bmatrix}. \tag{10}$$

其中: Q 为 N 阶激励参数矩阵, 其元素为 Q_{ij}, $i, j = 1, 2, \cdots, N$.

$$Q_{ii} = d_i w_i^{d_i-1} b_i \sum_{j\neq i}^{N}\frac{w_j^2\bar{x}\lambda_j}{k(1-\bar{x}s_j\lambda_r)} - \Delta p\lambda_i,$$

$$\Omega_{ij} = -\frac{d_i\bar{x}\lambda_j w_i^{d_i+1} b_i}{k(1-\bar{x}s_i\lambda_r)}, i \neq j.$$

对于平衡点 s^*, 可知式(10) 给出的惩罚策略可作为多用户两优先级网络管理者的激励 Stackelberg 策略

4.2 多用户多优先级

在 N 个用户 M 个优先级模型中, 每个用户的盈余函数为

$$c_i(s) = a_i - b_i w_i^{d_i} - \sum_{j=1}^{M} p_j s_{ij}\lambda,$$
$$i = 1, 2, \cdots, N. \tag{11}$$

其中

$$w_i = k\frac{1-\bar{x}\lambda_r\sum_{j=1}^{M-1}s_{ij}}{1-\bar{x}\sum_{h=1}^{N}\sum_{j=1}^{M-1}\lambda_j s_{hj}},$$

$$\lambda_r = \sum_{i=1}^{N}\lambda_i, \sum_{j=1}^{M}S_{ij} = 1. \tag{12}$$

用户在网络管理者干预下的扩展盈余函数及网络管理者的盈余函数仍同前定义, 且平衡点 s^* 由下式确定:

$$\frac{\partial c_0(s, p_0)}{\partial s_{ij}} = 0, \frac{\partial^2 c_0(s, p_0)}{\partial s_{ij}^2} < 0,$$
$$i = 1, 2, \cdots, N, \ j = 1, 2, \cdots, M - 1. \tag{13}$$

选择如下线性矩阵函数作为激励惩罚结构:

$$p_0 = s_0^* + Q_1\begin{bmatrix} s_{11} - s_{11}^* \\ s_{21} - s_{21}^* \\ \vdots \\ s_{N1} - s_{N1}^* \end{bmatrix} + Q_2\begin{bmatrix} s_{12} - s_{12}^* \\ s_{22} - s_{22}^* \\ \vdots \\ s_{N2} - s_{N2}^* \end{bmatrix} + \cdots + Q_{M-1}\begin{bmatrix} s_{1M-1} - s_{1M-1}^* \\ s_{2M-1} - s_{2M-1}^* \\ \vdots \\ s_{NM-1} - s_{NM-1}^* \end{bmatrix}. \tag{14}$$

其中 Q_m $(m = 1, 2, \cdots, M - 1)$ 为 $N \times N$ 阶激励参数矩阵

令 $\partial c(s, p_0)/\partial s_{ij}\big|_{s^*} = 0$ $(i = 1, 2, \cdots, N,\ t = 1, 2, \cdots, M - 1)$, 得

$$Q_m = -\begin{bmatrix} \frac{\partial w_1^{d_1}}{\partial s_{1m}}b_1 + \Delta p_t\lambda_1 & \frac{\partial w_1^{d_1}}{\partial s_{2m}}b_1 & \cdots & \frac{\partial w_1^{d_1}}{\partial s_{Nm}}b_1 \\ \frac{\partial w_2^{d_2}}{\partial s_{1m}}b_2 & \frac{\partial w_2^{d_2}}{\partial s_{2m}}b_2 + \Delta p_t\lambda_2 & \cdots & \frac{\partial w_2^{d_2}}{\partial s_{Nm}}b_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial w_N^{d_N}}{\partial s_{1m}}b_N & \frac{\partial w_N^{d_N}}{\partial s_{2m}}b_N & \cdots & \frac{\partial w_N^{d_N}}{\partial s_{Nm}}b_N + \Delta p_t\lambda_N \end{bmatrix}_{s=s^*}. \tag{15}$$

其中

$$\frac{\partial w_i^{d_i}}{\partial s_{im}} = - d_i \bar{x} w_i^{d_i - 1} \sum_{j \neq i}^{N} \frac{w_j^2 \lambda_j}{k\left(1 - \bar{x} \sum_{h=1}^{M-1} s_{jh} \lambda_r\right)},$$

$$i = 1, 2 \cdots, N;$$

$$\frac{\partial w_i^{d_i}}{\partial s_{jm}} = \frac{d_i \bar{x} \lambda_i w_i^{d_i + 1}}{k\left(1 - \bar{x} \sum_{h=1}^{M-1} s_{jh} \lambda_r\right)}, \quad i \neq j,$$

$$i, j = 1, 2, \cdots, N;$$

$$\Delta p_m = p_m - p_M, \ m = 1, 2, \cdots, M - 1.$$

综上所述, 有如下定理:

定理 1 若式(14) 中的 Q_m $(m = 1, 2, \cdots, M - 1)$ 取为式(15), 则由式(14) 给出的策略 p_0 可作为网络系统管理者的激励 Stackelberg 策略

5 数值例子

以两用户两优先级网络系统为例, 考虑[7, 8]

$$c_i(s) = a_i - b_i w_i^{d_i} - p_h s_i \lambda - p_l (1 - s_i) \lambda_i, \ i = 1, 2$$

选取 $a_1 = 10, b_1 = 10, a_2 = 15, b_2 = 20, d_1 = d_2 = 2$, 用户获益函数的曲线如图 1 所示

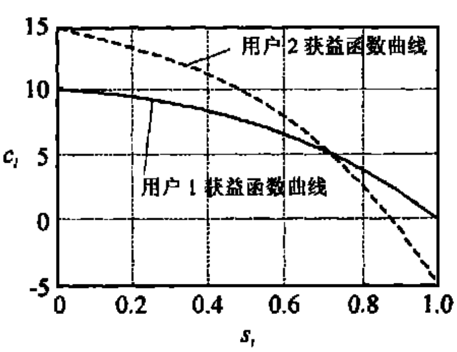


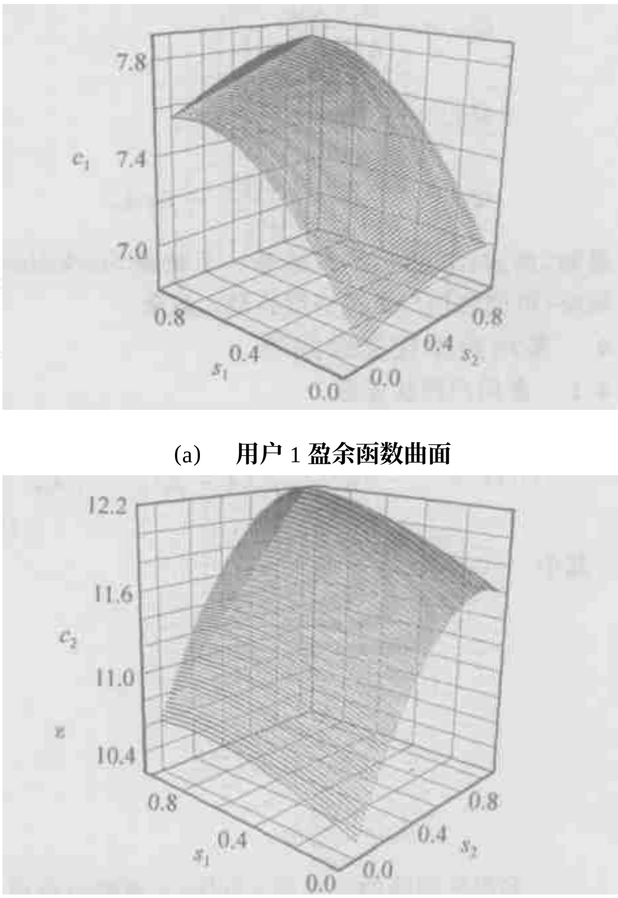
图 1 两用户获益函数图形

当 $0.9 < \Delta p < 1.3$ 时, 存在 Pareto 最优的 Nash 平衡[7]. 若假设 $\bar{x}_i = \bar{x}, \bar{x}_i^2 = \bar{x}^2, \lambda_1 = \lambda_2$, 分别取 $\Delta p = 0.7, \Delta p = 1.1$ 及 $\Delta p = 1.4$ 共 3 种情况, 则盈余函数值如表 1 所示

当 $\Delta p = 1.1$ 时, 很显然点(0, 1) 为平衡点, 且为 Pareto 最优的 Nash 平衡; 当 $\Delta p = 1.4$ 时, 其 Nash 平衡点不存在; 当 $\Delta p = 0.7$ 时, 存在 Nash 平衡点(1, 1), 但在该点处不稳定, 而在点(0, 0) 用户 1 和用户 2 的盈余都比点(1, 1) 处大 为追求更大盈余, 两用户选择点(0, 0) 的可能性较大 此时若对系统采用激励 Stackelberg 策略, 可得盈余函数值如表 2 所示

表 2 激励策略下的盈余函数值

s_1	$s_2(\Delta p = 0.7)$	
	0	1
0	6.89, 10.33	7.03, 11.64
1	7.47, 10.60	7.83, 12.20



(a) 用户 1 盈余函数曲面

(b) 用户 2 的盈余函数曲面

图 2 两用户盈余函数激励效应

图 2 是自变量为 s_1 和 s_2 的两用户盈余函数曲面图形 从计算结果及曲面图形可以看出, 平衡点(1, 1) 处是两用户的最大受益点, 而且无论 s_1 和 s_2 哪个变量偏离平衡点, 两用户在盈余上都要受到惩罚 所以此时该平衡点是稳定的

表 1 3 种情况下的盈余函数值

s_1	$s_2(\Delta p = 0.7)$		$s_2(\Delta p = 1.1)$		$s_2(\Delta p = 1.4)$	
	0	1	0	1	0	1
0	8.13, 12.50	7.64, 12.89	8.13, 12.50	7.64, 12.64	8.13, 12.50	7.64, 12.49
1	8.17, 11.53	7.83, 12.20	7.92, 11.53	7.58, 11.95	7.77, 11.53	7.43, 11.80

(下转第 31 页)

MA 过程的相关函数在 $i=2$ 处的值, 并注意 $B_{i0}=0$, 引出关系 $Q_{vi}Q_{\epsilon i}^{-1}=A_{in_{ai}}^{-1}D_{in_{di}}$, 将它代入增益公式 (10), 则由式(6), (10) 和(11) 可看到, 增益 K_{fi} 完全由 ARMA 新息模型(6) 的参数决定 故基于 ARMA 新息模型的在线辨识可引出自校正信息融合 Kalman 滤波器[6].

参考文献(References)

[1] Sun S L, Deng Z L. Multi-sensor optimal information fusion Kalman filter [J]. *Automatica*, 2004, 40 (6): 1017-1023.

[2] Kim K H. Development of track to track fusion algorithms[A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Maryland, 1994: 1037-1041.

[3] 邓自立, 祁荣宾 多传感器信息融合次优稳态 Kalman 滤波器[J]. *中国学术期刊文摘*, 2000, 6(2): 183-184.
(Deng Z L, Qi R B. Multisensor information fusion suboptimal steady-state Kalman filter[J]. *Chinese Science Abstracts*, 2000, 6(2): 183-184.)

[4] 孙书利, 崔平远 多传感器标量加权最优信息融合稳态 Kalman 滤波器[J]. *控制与决策*, 2004, 19(2): 208-211.
(Sun S L, Cui P Y. Multi-sensor optimal information fusion steady-state Kalman filter weighted by scalars [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(2): 208-211.)

[5] 邓自立 *卡尔曼滤波与维纳滤波 — 现代时间序列分析方法*[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.

[6] 邓自立 *自校正滤波理论及其应用 — 现代时间序列分析方法*[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.

[7] 邓自立, 马建为, 高媛 两传感器自校正信息融合 Kalman 滤波器[J]. *科学技术与工程*, 2003, 3(4): 321-324.
(Deng Z L, Ma J W, Gao Y. Two-sensor self-tuning information fusion Kalman filter [J]. *Science Technology and Engineering*, 2003, 3(4): 321-324.)

[8] 程云鹏 *矩阵论*[M]. 第二版 西安: 西北工业大学出版社, 2001.

(上接第 26 页)

6 结　语

本文利用主从对策方法讨论了一类多用户多优先级网络系统用户交叉影响的通信量价控问题, 定量分析了用户利益的影响因素 所提出的线性激励策略考虑了激励参数矩阵的一般性, 即从对角矩阵推广到普通矩阵 通过网络管理者对各用户之间交叉干扰的干涉, 加强了用户间的合作性以及用户与网络之间的利益统一性, 有利于网络服务质量的提高 当然对多网络激励策略的建立还需要考虑很多因素, 如网络系统的状态平衡问题等尚有待于进一步研究

参考文献(References)

[1] Devetsikiots F M, Lambadaris I An overview of pricing concepts for brodband IP networks[J]. *IEEE Communications Survey*, 2000, (9): 2-13.

[2] Cocchi R, Shenker S, Estrin D, et al Pricing in computer networks: Motivation, formulation and example[J]. *IEEE AMC Trans on Networking*, 1993, 1 (6): 614-627.

[3] Liang W, Shen X. Improved lightpath (wavelength) routing in large WDM networks[J]. *IEEE Trans on Communications*, 2000, 48(8): 1671-1579.

[4] Honig M L, Steiglitz K. Usage-based pricing of packet data generated by a heterogeneous user population[A]. *IEEE INFOCOM '95* [C]. Melbourne, 1995, 2: 867-874.

[5] Parris C, Keshav S, Ferrari D. A framework for the study of pricing in integrated networks[D]. Berkeley: Computer Science Institute, 1992.

[6] DaSilva L A, Petr D W, Akar N. Static pricing and quality of service in multiple service networks[A]. *The 5th Int Conf on Computer Science and Informatics (CS&I '2000)* [C]. Atlantic City, 2000, 1: 355-348.

[7] DaSilva L A, Petr D W, Akar N. Equilibrium pricing in multi-service priority-based networks [A]. *IEEE/Globecom 97*[C]. Phoenix, 1997, 3: 1373-1377.

[8] 井元伟, 杨开阳, 金福德, 等 具有多优先级多服务网络的激励价格控制[J]. *控制与决策*, 2001, 16(4): 425-429.
(Jing Y W, Yang K Y, Jin F D, et al Incentive pricing problem of Multi-service networks with Multi-priority-level[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(4): 425-429.)

[9] 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.

[10] 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.

[11] Jing Y W, Chen B, Dimirovski G M, et al On leader-follower model of traffic rate control for netwroks[J]. *Control Theory and Applications*, 2001, 18 (6): 817-822.