

文章编号: 1001-0920(2007)08-0939-04

## 基于动态调控的网络价格策略

井元伟, 何 凌, 杨木易, 朱海煜  
(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

**摘 要:** 针对目前网络定价中常用的平坦式计费策略下网络中存在的用户方与网络系统整体优化目标不一致的问题, 将资源占用率引入价格函数, 提出了两种动态调节的价格策略. 在第 1 种策略中, 将固定价格变为以资源占用率为变量的实时价格函数; 在第 2 种策略中, 引用对策论中的激励 Stackelberg 策略, 激励用户达到系统的目标值. 所提出的策略保证了用户与系统同时达到优化目标, 并促进了网络的合理分配. 数值例子和仿真证明了两种策略的有效性.

**关键词:** 拥塞; 动态调控; 价控; 资源占用率; 激励 Stackelberg 策略

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A

## Pricing strategy of network based on dynamic control

JING Yuanwei, HE Ling, YANG MUYI, ZHU Haiyu

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China.  
Correspondent: HE Ling, E-mail: heling1981@126.com)

**Abstract:** The variance of the optimized goal between the system and the users of network under the flat pricing strategy is discussed. The resource occupancy rate is introduced into the pricing function, and two dynamic pricing strategies are presented. In the first strategy, the fixed price is substituted by the real time pricing function which uses the resource occupancy rate as the variable. In the second one, the Stackelberg incentive strategy in game theory is introduced to prompt the users to achieve the system target value. The two strategies ensure that the users and the system achieve the optimized target value at the same time. And the network resource can be sufficiently used. The simulation example shows the effectiveness of the two pricing strategies.

**Key words:** Congestion; Dynamic control; Pricing; Resource occupancy rate; Incentive Stackelberg strategy

### 1 引 言

随着网络技术的发展, 网络的用户和应用需求急剧增大, 由此引发的网络拥塞问题引起了越来越多学者的关注. 对于用户而言, 往往希望自己获得的网络资源越多越好, 这就很容易引起网络拥塞, 使得服务质量(QoS)恶化. 为了提高网络资源的使用效率, 网络管理者除采取合适的流量控制策略, 还可以通过对不同业务制定不同的价格标准来引导用户合理利用网络资源. 目前, 国际上利用价格手段进行网络资源分配的研究主要有基于优先级定价<sup>[1]</sup>、基于市场定价<sup>[2]</sup>和基于边界定价<sup>[3]</sup>的资源分配等. 这些方法虽然从一定程度上提高了资源利用率, 但仍存在无法动态地反映不同应用的资源需求和系统资源的使用情况等问题, 从而无法使网络资源得到更充分的利用.

本文分析了在目前通用的平坦式计费策略下网络中存在的用户方与网络系统整体优化目标不一致的矛盾, 对此矛盾提出了两种能够动态反映系统资源使用情况的策略. 首先根据整个网络运行时的资源占用率构造价格函数, 控制和管理网络的运行. 在网络空闲时, 通过较低的流量单价吸引用户增加对资源的使用; 在网络繁忙时, 通过对流量单价抬高价格, 迫使一部分用户减少资源使用量, 从而减小网络的拥塞. 这样可使网络以比较平均的使用率达到资源的最佳分配. 近年来, 越来越多的学者开始使用对策论来解决网络中存在的问题<sup>[4-6]</sup>. 对策论的基础是冯·诺伊曼提出的效用论<sup>[7]</sup>. Ho 等人<sup>[8]</sup>将激励 Stackelberg 策略引入对策论中, 激励策略能够激励用户与系统总体优化目标相一致. 本文通过研究用激励参数来制定价控策略的方法, 力图使网络能够

收稿日期: 2005-11-25; 修回日期: 2006-11-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60274099); 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室开放课题项目.

作者简介: 井元伟(1956—), 男, 辽宁西丰人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统、通信网络控制的研究; 何凌(1981—), 女, 安徽阜阳人, 博士生, 从事高速通信网络系统的拥塞控制的研究.

更趋于稳定地运行在管理者所期望的平衡点上。

## 2 系统模型分析

网络资源大致可分为带宽、缓冲区、CPU 等几类。其中带宽是造成网络拥塞和延迟的最主要因素,而且最能反映用户的满意度。为减少计算的复杂性,本文主要以带宽资源为主。考虑一个具有  $N$  个用户的网络,网络的有限带宽容量为  $C$ 。集合  $N$  中的用户以  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  的发送速率使用网络,那么对于整个网络而言,资源负载为  $\sum_{s=1}^n x_s$ , 资源使用率为  $Y = \sum_{s=1}^n x_s / C$ 。对于每一个用户,其总体效用如下(本文用效用来衡量用户对网络所提供的服务的满意程度及其从中获得的收益):

$$\begin{aligned} \text{USER}_s &= U_s(x_s) - p_s x_s - D_s(Y), \\ \text{Over } x_s & 0, \sum_{s=1}^n x_s \leq C. \end{aligned} \quad (1)$$

其中:  $U_s(x_s)$  为用户  $s$  发送速率为  $x_s$  时得到的效用,用户的发送速率越大,获得效用越大,  $U_s > 0$ ,  $U_s(x_s) < 0^{(9)}$ ;  $p_s$  为用户  $s$  支付的流量单价;  $D_s(Y)$  为链路上产生拥塞时由于延迟死锁等而造成的拥塞成本;  $D_s(Y)$  为  $Y$  的函数,它随着带宽占用率增大而增大,在整个网络资源使用接近带宽容量  $C$  时,  $Y$  趋近于 1,  $D_s(Y)$  急剧增大,有  $D_s(Y) > 0$ ,  $D_s(Y) < 0^{(10,11)}$ 。

将网络 and 用户看作一个整体,那么整个系统的效用如下:

$$\begin{aligned} \text{SYSTEM} &= \sum_{s=1}^n (U_s(x_s) - D_s(Y)), \\ \text{s. t. } & H_y = x, A_y \leq D, \text{Over } x, y \geq 0. \end{aligned} \quad (2)$$

对用户而言,其效用最大化的条件是式(1)的一阶导数为 0,即满足

$$U_s(x_s) - p_s - \frac{1}{C} \frac{\partial D_s(Y)}{\partial Y} = 0. \quad (3)$$

假设使式(3)成立的解为  $(x_s^0, Y^0)$ ,即满足

$$U_s(x_s^0) - p_s - \frac{1}{C} \frac{\partial D_s(Y)}{\partial Y^0} = 0. \quad (4)$$

对系统而言,其满足最优的条件为

$$\frac{\partial}{\partial x_s} \sum_{s=1}^n (U_s(x_s) - D_s(Y)) = 0, s = 1, 2, \dots, n.$$

可以得到  $n$  个方程式

$$U_s(x_s) - \frac{1}{C} \sum_{s=1}^n \frac{\partial D_s(Y)}{\partial Y} = 0, s = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

假设式(5)的解为  $(x_s^*, Y^*)$ ,即下式成立:

$$U_s(x_s^*) - \frac{1}{C} \sum_{s=1}^n \frac{\partial D_s(Y)}{\partial Y^*} = 0, s = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

比较式(4)和(6)可以看出,在  $n$  足够大的情况下,用户达到最优时的速率  $x_s^0$  要大于系统达到最优时的单个用户的最优速率  $x_s^*$ ,也就是用户达到最优时整个网络的资源使用率  $Y^0$  要大于系统达到最优时整个网络的资源使用率  $Y^*$ 。从这里可以看出,如果每一个用户在使用资源时不考虑其个人资源使用的增加对整个系统造成的负面影响,就会造成整个系统的资源被过度使用,不能使网络发挥最佳效用。因此所面临的任务就是通过相应的价格策略,使得用户在使用资源时能够兼顾整个网络的效用,最佳控制结果是使得单个用户达到最佳效用时也能使得网络整个系统达到最佳效用。

## 3 价格策略

### 3.1 基于资源占有率的价格策略

在模型(1)中,用户  $s$  每增加发送一个流量,需要付出的价格为  $p_s$ ,  $p_s$  是固定的值,用户使用资源付出的价格总额仅与自己使用的资源总量有关。在实际情况下,用户在使用资源时所付出的价格应考虑整个网络,即付出的价格应由整个网络资源使用情况决定。在网络资源使用量较少时,网络比较通畅,由于延时和死锁造成的成本较小,用户使用单位流量所付出的价格就相应小一些;相反,在网络资源使用量较大时,网络发生拥塞,由于延时和死锁造成的成本急剧增加,相应的用户使用单位流量所付出的价格就应该增大。这样,根据资源使用率制定价格还可以鼓励用户选择网络比较空闲的时段,避免用户过多地拥挤于网络拥塞的时段,以达到网络资源的充分合理使用。

下面构造网络价格。规定在资源使用率为  $Y = \sum_{s=1}^n x_s / C$  时,价格为

$$p_s = F(Y), \quad (7)$$

其中  $F(Y)$  为  $Y$  的函数。于是用户的效用函数变为

$$\begin{aligned} \text{USER}_s &= U_s(x_s) - F(Y) x_s - D_s(Y), \\ \text{Over } x_s & 0, \sum_{s=1}^n x_s \leq C. \end{aligned} \quad (8)$$

其最大化条件变为

$$U_s(x_s) - \frac{\partial (F(Y) x_s)}{\partial x_s} - \frac{1}{C} \frac{\partial D_s(Y)}{\partial Y} = 0. \quad (9)$$

令式(9)与(5)的解相等,可以推出

$$F(Y) = \frac{\sum_{i=1}^n D_i(Y)}{x_s}, \quad (10)$$

则式(10)即是所求得的价格策略。可以看出,加入策略后的流量单价不是固定不变的,它与用户的瞬时发送速率及此时整个网络除用户本身外其他用户

使用网络发送数据对此用户造成的拥塞成本有关.

将  $F(Y)$  的值代入式(9),得

$$U_s(x_s) - \frac{1}{C} \sum_{i=1, i \neq s}^n \frac{\partial D_i(Y)}{\partial Y} - \frac{1}{C} \frac{\partial D_s(Y)}{\partial Y} = 0. \tag{11}$$

从式(11)可以看出,用户每增加发送一个单位流量,对其个人而言,其效应有了变化.用户在每增加发送一个单位流量时,负的效应变为由于增加这一单位流量而使得网络拥塞加剧对整个网络其他用户所增加的成本  $\frac{1}{C} \sum_{i=1, i \neq s}^n \frac{\partial D_i(Y)}{\partial Y}$  和使得网络拥塞加剧对单个用户本身所增加的成本  $\frac{1}{C} \frac{\partial D_s(Y)}{\partial Y}$ . 当一用户使用资源增加时,所需付出的价格将会随之急剧增大,从而限制其对资源的过度使用.

假设使式(11)成立的解为  $(x_s^0, Y^0)$ ,即满足

$$U_s(x_s^0) - \frac{1}{C} \sum_{i=1, i \neq s}^n \frac{\partial D_i(Y)}{\partial Y^0} - \frac{1}{C} \frac{\partial D_s(Y)}{\partial Y^0} = 0. \tag{12}$$

观察式(12)和(6)可以看到  $x_s^0 = x_s^*$ ,  $Y^0 = Y^*$ ,也就是用户达到最优时整个网络的资源使用率  $Y^0$ 等于系统达到最优时整个网络的资源使用率  $Y^*$ . 这样的结果是用户在使用资源时能够兼顾整个网络的效用,使得单个用户达到最佳效用时也能使整个网络系统达到最佳效用.

### 3.2 基于激励 Stackelberg 的价格策略

在激励策略中,分为主方和从方.在此网络模型中作为主方的网络发布激励策略,制定价格,使得系统中各个链路能够得到充分应用而不发生拥塞.这里的激励策略由两部分组成,一部分是正常价格,一部分是惩罚价格,它线性或函数依赖于通信量的变化.当作为从方的用户与网络服务提供方的目标不一致时,惩罚价格将激励或迫使用户采取对整个网络有益的行为.

允许网络方和用户方任意改变速率  $x_s, s = 1, 2, \dots, n$ . 如果主方要求用户达到它所要求的发送速率,那么它在对策中处于主导地位. 引入如下 Stackelberg 策略:

$$s(x_s) = s + p_s(x_s) - p_s(x_s^*), \tag{13}$$

其中:  $p_s(x_s)$  为  $x_s$  待确定的函数,  $x_s^*$  为使系统达到最大效用的值. 考虑以线性函数作为迫使用户达到点  $x_s^*$  的 Stackelberg 激励策略. 假设  $p_s(x_s)$  为线性函数,即

$$p_s(x_s) = q_s x_s, \tag{14}$$

其中  $q_s$  为惩罚价格,由主方确定. 在激励策略下,网络要求的最佳效用点即为用户以该策略取得最大效

用的点.

将式(14)代入(13),然后将式(1)中的  $s$  用式(13)中的  $s(x_s)$  代替,则问题 USER<sub>s</sub> 变为

$$\begin{aligned} \text{USER}_s = & U_s(x_s) - s x_s - q_s(x_s - x_s^*) x_s - D_s(Y), \\ \text{Over } x_s & 0, \quad \sum_{s=1}^n x_s \leq C. \end{aligned} \tag{15}$$

对式(15)关于  $x_s$  求导,令其为零,得

$$U_s(x_s) - s - 2q_s x_s + q_s x_s^* - \frac{1}{C} \frac{\partial D_s(Y)}{\partial Y} = 0.$$

将  $x_s = x_s^*$  代入上式,得

$$U_s(x_s^*) - s - q_s x_s^* - \frac{1}{C} \frac{\partial D_s(Y)}{\partial Y^*} = 0. \tag{16}$$

由式(6)知

$$U_s(x_s^*) - \frac{1}{C} \sum_{i=1}^n \frac{\partial D_i(Y)}{\partial Y^*} = 0,$$

代入式(16)得

$$q_s = \frac{1}{C x_s^*} \sum_{i=1, i \neq s}^n \frac{\partial D_i(Y)}{\partial Y^*} - \frac{q_s}{x_s^*}.$$

因此可将策略写为

$$\begin{aligned} s(x_s) = & s + \frac{1}{C} \left( \frac{x_s - x_s^*}{x_s^*} \right) \sum_{i=1, i \neq s}^n \frac{\partial D_i(Y)}{\partial Y^*} - \frac{(x_s - x_s^*)}{x_s^*}. \end{aligned} \tag{17}$$

USER<sub>s</sub> 变为

$$\begin{aligned} \text{USER}_s = & U_s(x_s) - s x_s - \frac{x_s(x_s - x_s^*)}{C} \sum_{i=1, i \neq s}^n \frac{\partial D_i(Y)}{\partial Y^*} + \\ & \frac{(x_s - x_s^*) x_s}{x_s^*} - D_s(Y), \\ \text{Over } x_s & 0, \quad \sum_{s=1}^n x_s \leq C. \end{aligned} \tag{18}$$

下面证明式(17)是满足激励条件的 Stackelberg 策略,即应满足如下两个条件:

条件 1  $s(x_s^*) = s$ ;

条件 2

$$\begin{aligned} \arg \max & (U_s(x_s) - s x_s - \\ & \frac{x_s(x_s - x_s^*)}{C} \sum_{i=1, i \neq s}^n \frac{\partial D_i(Y)}{\partial Y^*} + \\ & \frac{(x_s - x_s^*) x_s}{x_s^*} - D_s(Y)) = x_s^*. \end{aligned}$$

条件 1 可由式(18)中  $s(x_s)$  的表达式推出. 将条件 2 变形为

$$\begin{aligned} U_s(x_s^*) - s x_s^* - D_s(Y^*) \\ U_s(x_s) - s x_s - \\ \frac{x_s(x_s - x_s^*)}{C} \sum_{i=1, i \neq s}^n \frac{\partial D_i(Y)}{\partial Y^*} + \end{aligned}$$

$$\frac{-s(x_s - x_s^*)x_s}{x_s^*} - D_s(Y). \quad (19)$$

由上述策略的推导过程,证明了当  $x_s = x_s^*$  (系统最佳点) 时用户效用函数在该策略下取得最大值,即满足条件 1. 将式(18)对  $x_s$  求导,将  $x_s = x_s^*$  代入,可以看出整个式子为零,也就是当  $x_s = x_s^*$  时式(18)取得最大值,即满足条件 2,从而证明式(17)是满足激励条件的 Stackelberg 策略.

#### 4 数值例子

假设用户的效用函数为  $U_s(x_s) = m_s \log x_s$ , 拥塞成本  $D(Y) = 1/(1 - Y)^2$ . 设网络的有限容量  $C = 4\ 500$ , 有  $n = 300$  个用户. 当  $m_s = 10$  时,图 1 和图 2 分别给出了在  $s = 0.5$  的情况下, USER<sub>s</sub> 和 SYSTEM 结果. 由图可以看出,在平坦式计费下使得 USER<sub>s</sub> 达到最大值的  $x_s$  要大于使得 SYSTEM 达到最大值的  $x_s$ ,也就是说资源被过度使用了.

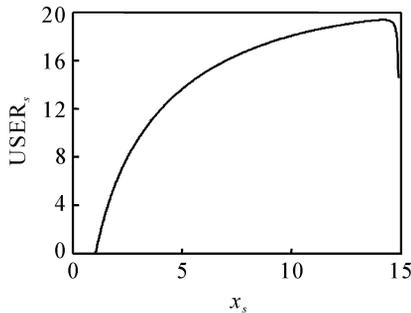


图 1 用户 USER<sub>s</sub> 的效用函数曲线

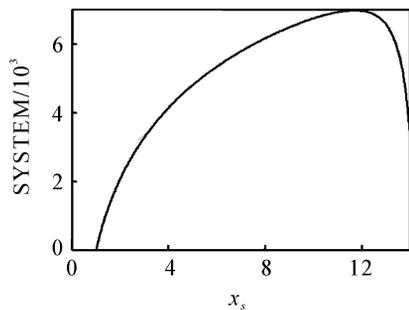


图 2 系统 SYSTEM 的效用函数曲线

图 3 为采取基于资源占有率的价格函数后的情况. 可以看出, USER<sub>s</sub> 与 SYSTEM 的图像保持一致,达到最大值时二者的  $x_s$  相同,都是 11.9.

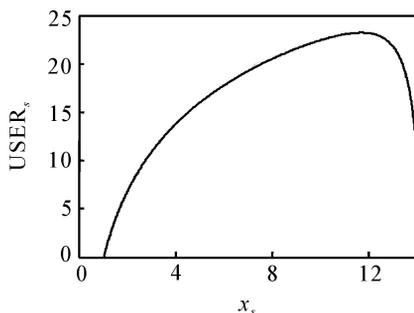


图 3 基于资源占有率的价格策略下用户效用函数曲线

图 4 是采取 Stackelberg 激励策略后 USER<sub>s</sub> 问题的等高线图,由图可见其最优点. 图上的曲线是 USER<sub>s</sub> 中用户效用函数的等高线,每一条等高线上各点的效用函数值均相等,各个等高线的值是沿着左上方向逐渐增加的. 直线是激励策略,可以看出,在激励策略下用户沿着直线在  $x_s = 11.9$  等高线取得最大值,也就是说在激励策略下用户与系统达到相同的优化目标.

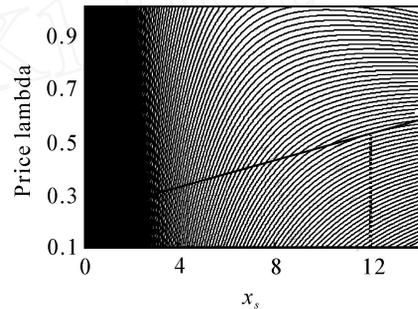


图 4 Stackelberg 激励策略下 USER<sub>s</sub> 问题的等高线图

#### 5 结 论

从上述两种价格策略的分析结果可以得到以下结论:两种策略的最终效果是一样的,都能达到预计的计费目的,使得单个用户达到最佳效用时也能使网络整个系统达到最佳效用,并能保证网络的充分使用. 基于资源占有率的价格策略较简单,便于计算. 但其缺点是范围变化大,难以确定其值的范围,不确定性大. 基于 Stackelberg 激励策略的价格函数的计算比第 1 种复杂,需要随时掌握的数据多且难度大,实际操作要比第 1 种策略麻烦. 其优点是以正常价格  $s$  为基础,可以事先由网络方指定参考单价,便于网络方整体运作.

在实际的网络定价中,网络商可根据实际需要及现有条件作出合适的选择.

#### 参考文献(References)

[1] Philippe Owezarski, Nicolas Larrieu. Coherent charging of differentiated services in the internet depending on congestion control aggressiveness [J]. Computer Communications, 2003, 26(13): 1445-1456.  
 [2] 傅晓明, 张尧学, 马洪军, 等. 一种基于市场模型的网络带宽分配方法 [J]. 电子学报, 1999, 27(9): 127-132.  
 (Fu Xiao-ming, Zhang Yao-xue, Ma Hong-jun, et al. A market-based approach to allocate bandwidth for computer networks[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(9): 127-132.)  
 [3] Shenker S, Clark D, Estrin D, et al. Pricing in computer networks: Reshaping the research agenda[J]. Computer Communications Review, 1996, 26(2): 19-43.

(下转第 950 页)

- 滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988.  
(Liu Zhuo. Optimization theory and its application in power system [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1988.)
- [5] Mariano C E, Morales E F. (1999a) MOAQ an ant- $Q$  algorithm for multiple objective optimization problems [C]. Proc of the Genetic and Evolutionary Computation Conf. San Fancisco, 1999: 894-901.
- [6] Van Veldhuizen D, Lamont G. Multiobjective evolutionary algorithms test suites [C]. Proc of Symposium Applied Computing. San Antonio, 1999: 351-357.
- [7] Schott J. Fault tolerant design using simple and multicriteria genetic algorithms [D]. Cambridge: Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [8] Deb K. Multiobjective genetic algorithms: Problem difficulties and construction of test problems [R]. Dortmund: University of Dortmund, Department of Computer Science/ XI, 1998.
- [9] Srinivas N, Deb K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms [J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248.
- [10] Van Veldhuizen D. Evolutionary algorithms: Classification, analysis and new innovations[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 1999.

## (上接第 942 页)

- [4] 魏蛟龙, 张驰. Internet 拥塞控制和资源分配中的对策论分析框架[J]. 电子学报, 2003, 31(10): 1452-1455.  
(Wei Jiao-long, Zhang Chi. A game theoretical framework for congestion control and resource allocation in the internet [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(10): 1452-1455.)
- [5] 陈惠民, 卢欣, 王普, 等. 对策论方法在信息网络资源分配中的应用[J]. 通信学报, 1999, 20(8): 63-68.  
(Chen Hui-min, Lu Xin, Wang Pu, et al. Using game theoretic approaches for resource allocation in information network [J]. J of China Institute of Communications, 1999, 20(8): 63-68.)
- [6] 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 Yuan-wei, Yang Kai-yang, Jin Fu-de, et al. Incentive pricing problem of multi-service networks with multi-priority-level [J]. Control and Decision, 2001, 16(4): 425-429.)
- [7] Shenker S. Fundamental design issues for the future Internet [J]. IEEE J on Selected Areas in Communications, 1995, 13(7): 1176-1188.
- [8] Ho Y C, Luh P B, Olsder GJ. A control theoretic view on incentive[J]. Automatica, 1982, 18(2): 167-179.
- [9] Varian H R. Microeconomic analysis[M]. 3rd ed. New York: Norton, 1992.
- [10] Stalling W. TCP/ IP and ATM design principles[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [11] Odlyzko A. The economics of the Internet: Utility, utilization, and quality of service [EB/OL]. (1998-07-07). AT & T Labs Research, <http://www.research.att.com/~amo>.

## (上接第 945 页)

- [3] Zhang Ling-bo, Mao Jian-qin. An approach for selecting weighting matrices of LQ of optimal controller design based on genetic algorithms [C]. Proc of IEEE Tencon '02. 2002: 1331-1334.
- [4] Broussard J R. A quadratic weight selection algorithm [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1982 27(4): 945-947.
- [5] Harvey C A, Stein G. Quadratic weights for asymptotic regulator properties [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1978, 23(3): 378-387.
- [6] Arar A S, Sawan M E, Rob R A. The inverse output feedback LQ problem [C]. Proc of American Control Conf. Ballimore Maryland, 1994: 2736-2737.
- [7] 王耀青. LQ 最优控制系统加权矩阵  $Q$  的一种数值算法 [J]. 控制与决策, 2000, 15(5): 513-517.  
(Wang Yao-qing. A numerical algorithm for the weighting matrix  $Q$  of LQ optimal control systems [J]. Control and Decision, 2000, 15(5): 513-517.)
- [8] 郑大钟. 线性系统理论 [M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 197.  
(Zheng Da-zhong. Linear system theory [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 197.)