

Internet 拥塞控制和资源分配中的对策论分析框架

魏蛟龙, 张 弛

(华中科技大学电子与信息工程系, 湖北武汉 430074)

摘 要: 本文从一个简单的, 适用性很强的对策论模型出发, 首先证明了当前 Internet 资源分配低效率的原因: 存在拥塞的外部效应. 进而提出了一个统一的对策论框架, 以目前最具代表性的三个支持多业务的资源分配方案: 综合服务、区分服务和基于使用的计费为例, 推导出这些方案在集中化控制和非集中化控制之下, Nash 均衡的存在性及其性质. 得到了每种方案中各方参与者的优化问题的解, 并给出了相应的物理解释.

关键词: 对策论; 拥塞控制; 综合服务; 区分服务; 基于使用的计费

中图分类号: TP393. 4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 10-1452-04

A Game Theoretical Framework for Congestion Control and Resource Allocation in the Internet

WEI Jiao-long, ZHANG Chi

(Department of Electronic and Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper we first prove the existence of congestion externality in current Internet which leads to inefficient resource usage under a game model. Then we present a universal game theoretical framework to deal with this problem, provide a comprehensive analysis of centralized and decentralized control problems in IntServ, DiffServ, usage-based pricing, which are the most representative schemes proposed in the literature to support multi-service in resource allocation, and give a complete characterization of Nash equilibria and their existence criteria. At last we show under what conditions the solutions are system optimal.

Key words: game theory, congestion control; IntServ; DiffServ; usage-based pricing

1 引言

所谓拥塞, 就是用户对网络资源的需求超过了网络的供给. 这时的资源分配有两种方式^[1], 一种是中心化控制 (centralized control): 由网络方根据用户的需求以某种先验目标来分配带宽, 其效果依赖于所有用户的信息. 另一种是非中心化控制 (decentralized control): 网络方并不直接限制用户的流量, 用户间为实际所使用的带宽而互相竞争, 网络方只是通过制定竞争规则 (game rule) 来影响竞争的结果. 这两种拥塞控制方式有共同的特点: 即网络方或用户所期望的结果并不仅仅只取决于自身的行为 (策略), 还取决于其他参与者的行为 (策略). 这种情形称之为“策略相互依存” (strategic interdependence), 在这种情形下研究各方应当如何决策, 采取何种行动所使用的最佳数学工具就是对策论 (game theory)^[2]. 一般认为, 中心化控制与非中心化控制分别是合作对策 (cooperative game) 与非合作对策 (non cooperative game) 问题^[3].

对策论的基础是冯·诺伊曼提出的效用论^[4]. 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. 在效用可加的假设下, 以所有用户的总效用作为评价网络整体性能的指标. 这种评价方法与传统的以网络工程量, 如平均分组延时、分组丢失率、资源利用率等为网络性能评价

方法不同. 文献[5]详细比较了以用户为中心和以网络为中心这两套评价方法, 认为通信网络是被设计出来满足用户需求的, 其好坏只能由用户评价. 我们赞成这一观点, 并进一步给出采用基于用户效用函数的网络评价方法的三个理由: 传统的网络工程指标间往往相互矛盾, 如提高服务质量与保持较高的资源利用率之间, 没有一个理论框架将其统一起来综合考虑, 而基于效用的方法不存在这个问题; 不同用户的不同业务对网络服务的要求差别很大, 很难用工程指标予以全面反映; 在以用户效用为基础的评价体系下, 以工程指标为基础的评价方法可作为一种特例推导出来.

当前的 Internet 拥塞控制主要是由用户端的 TCP 实现的. 它要求所有终端用户都是合作的 (cooperation), 即使用相同的 TCP 来控制流量. 由于网络没有任何针对个别流的控制功能, 使得其无法规范用户行为. 已提出的很多技术解决方案如综合服务模型 (IntServ), 区分服务模型 (DiffServ), 基于使用的计费 (usage-based pricing) 等, 在最初进行设计时并没有从对策论的角度予以考虑, 因而这些技术方案还有很多遗留问题, 甚至有根本性的缺陷. 目前, 国外已有不少文献针对某一具体方案, 运用对策论进行分析并予以改进^[6,7]. 本文从一个简单的, 适用性很强的模型出发, 在一个统一的对策论框架下分析了上述解决方案, 推导出这些方案在集中化控制和非集中

化控制之下, Nash 均衡的存在性及其性质. 得到了每种方案中各方参与者的优化问题的解, 并给出了相应的物理解释.

2 网络对策的基本模型

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与延迟的最主要因素, 而且最能反映用户满意度. 为减少计算的复杂性, 本文主要以带宽资源为主, 并将网络抽象为瓶颈带宽进行讨论.

考虑在某一时刻有 n 个用户的业务流 (flow) 在共享容量为 Q 的链路. 用户 i 使用资源. 非中心化控制时, x_i 是用户的分组发送速率 (packets sending rate) r_i ; 中心化控制时 x_i 是网络分给用户的带宽 Q_i . 所获得的效用为 $u_i(x_i, \dots)$, 称 $x = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ 为资源分配向量, 记 $x_{-i} = (x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)$, 我们给出如下定义:

定义 1 资源分配向量 x^* 是系统最优的, 当且仅当对于任意的 x , 有:
$$\sum_{i=1}^n u_i(x_i^*, x_{-i}^*) \geq \sum_{i=1}^n u_i(x_i, x_{-i})$$

定义 2 资源分配向量 x^* 构成 Nash 均衡, 当且仅当对于任意的 $i \in [1, n]$ 有: $\forall x: u_i(x_i^*, x_{-i}^*) \geq u_i(x_i, x_{-i}^*)$.

简而言之, 使用户效用之和达到最大的资源分配向量是系统最优的. 一个资源分配向量构成 Nash 均衡, 意味着没有用户有单方面改变自己策略 (所使用资源的数量) 的动机. 在非合作对策下, 一个资源向量只有构成 Nash 均衡, 才是在现实中可能存在的结果, 而系统最优, 既是合作对策中的优化目标也是在非合作对策中希望 Nash 均衡所具有的性质.

由于网络具有外部性, 以及可能对网络流量计费, 因而用户通过使用网络获得的实际收益并不完全等于效用函数. 用户的收益函数形式将在下面具体讨论时给出.

3 Internet 网络拥塞的外部性

3.1 基本模型及用户收益函数的假定

考虑在某一时刻有个用户的业务流 (flow) 在共享容量为 Q 的网络资源 (如带宽). 设用户 i 的分组发送速率为 r_i , 则资源的负载 (load) 为
$$\sum_{i=1}^n r_i$$
, 资源使用率 (utilization of the resource) 为:
$$Y = \sum_{i=1}^n r_i / Q.$$

定义用户 i 从网络的使用中获得的收益 (revenue) 为: $J_i(r_i, Y)$:

$$J_i(r_i, Y) = u_i(r_i, r_{-i}) - C_i(Y) \quad (1)$$

其中, $u_i(r_i, r_{-i})$ 为用户 i 的发送速率为 r_i 时所获得的效用. 用户的发送速率越大, 获得的效用越高, 但边际效用递减 (marginal utility decreasing). 因而有:

$$\frac{\partial u_i}{\partial r_i} > 0, \quad \frac{\partial^2 u_i}{\partial r_i^2} < 0 \quad (2)$$

边际效用递减是经济学中对效用的一个基本假设^[8]. Shenker^[4]系统地研究了网络上业务流的效用函数, 认为绝大多数 Internet 所承载的业务流符合这一假定, 并称效用函数处处为凹的流为弹性流 (elastic flow).

$C_i(Y)$ 为链路上产生拥塞时, 对分组的延迟和丢弃所造

成的拥塞成本 (congestion cost). Stalling^[9]和 Odlyzko^[10]的研究均指出: 随着链路利用率的增高, 分组的平均延迟急剧增大, 因而有:

$$\frac{\partial C_i}{\partial Y} > 0, \quad \frac{\partial^2 C_i}{\partial Y^2} > 0 \quad (3)$$

3.2 用户的单方优化行为及其产生的 Nash 均衡

目前的 Internet 并不控制每个用户所发送的数据量, 是一个非合作对策. 由于用户在作出最优决策时不知道其他用户的收益函数, 只能根据局部知识, 即自身的收益函数, 因而用户的单方优化体现为通过选择 r_i 最大化自己的收益 J_i . 设用户的单方优化行为 $\max_{r_i} J_i(r_i, Y)$. 最优化的一阶条件是:

$$\frac{\partial J_i}{\partial r_i} = \frac{\partial u_i}{\partial r_i} - \frac{1}{Q} \frac{\partial C_i}{\partial Y} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

即增加发送一个分组有正负两方面的效应. 正的效应是这个分组对于用户的价值 $\partial u_i / \partial r_i$, 负的效应是这个分组产生的拥塞使得其他被发送的分组价值下降 $(1/Q) (\partial C_i / \partial Y)$. 最优解满足边际效用等于边际成本的条件.

上述 n 个一阶条件 (4) 实际上给出了 n 个反应函数 (reaction function):

$$r_i^* = r_i(r_1, \dots, r_{i-1}, r_{i+1}, r_n), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

因为:
$$\frac{\partial^2 J_i}{\partial r_i^2} = \frac{\partial^2 u_i}{\partial r_i^2} - \frac{1}{Q} \frac{\partial^2 C_i}{\partial Y^2} < 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 J_i}{\partial r_j \partial r_i} = -\frac{1}{Q} \frac{\partial^2 C_i}{\partial Y^2} < 0 \quad (7)$$

故有:
$$\frac{\partial r_i^*}{\partial r_j} = -\frac{\partial^2 J_i / \partial r_j \partial r_i}{\partial^2 J_i / \partial r_i^2} \quad (8)$$

第 i 个用户的最优发送速率随其他用户发送速率的增加而减少. n 个反应函数的交叉点就是 Nash 均衡^[2]: $r^* = (r_1^*, \dots, r_n^*)$. Nash 均衡时每个用户的发送速率为 r_i^* , 满足:

$$\frac{\partial u_i}{\partial r_i^*} = \frac{1}{Q} \frac{\partial C_i}{\partial Y^*}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

3.3 系统最优及网络拥塞外部效应

系统最优的目标是最大化用户收益之和:

$$\max_{\{r_i\}_{i=1}^n} \sum_{j=1}^n J_j(r_j, Y).$$

最优化的一阶条件是:

$$\frac{\partial \left(\sum_{j=1}^n J_j \right)}{\partial r_i^*} = \frac{\partial u_i}{\partial r_i^*} - \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^n \frac{\partial C_i}{\partial Y^*} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

这里, Y^* 和 r_i^* 分别是系统最优时的链路利用率和用户的发送速率. 比较用户最优时达到 Nash 均衡的一阶条件 (9) 和系统最优时的一阶条件 (10) 有 $Y^* > Y^{**}$, 即链路资源被过度地使用 (overuse), 资源使用效率降低了.

观察用户的一阶条件, 可以发现, 尽管每个用户在决定增加发送速率时考虑了对链路上负载的负面效应, 但他考虑的只是对自己流的影响 (私人边际成本 - $(1/Q) (\partial C_i / \partial Y)$), 而没有考虑由于加剧了链路拥塞而加在别的用户流身上的额外成本 (社会边际成本 - $\frac{1}{Q} \sum_{i=1}^n \frac{\partial C_i}{\partial Y}$). 因此, 最优点上的个人边

际成本小于社会(系统)边际成本. 这种用户行为对其他用户收益产生负面影响的现象被称为网络拥塞的外部效应^[11].

在 Internet 上直接参与竞争带宽的并非用户,而是控制用户数据流量的软件协议,如 TCP 和 UDP 等. 在早期的 Internet 中,网络上所承载的业务都是很有弹性的传统数据传输业务,可以认为,不同用户的收益函数是相同的,用户都使用相同的 TCP 进行流量控制,因而这时是一个合作对策. 由于 Internet 并不能控制用户的流量,这种合作是非强制性的. 随着 Internet 上所承载业务的多元化,基于终端都使用 TCP 从而均分瓶颈资源的做法对于实施实时多媒体应用的用户极为不利,这使得用户有动机去使用诸如 UDP 等非 TCP 友好的传输控制协议. 这些非 TCP 友好流在与 TCP 流竞争带宽资源时占有绝对优势,这反过来又为其他用户在拥塞日益频繁的情况下为自身利益故意不采用拥塞控制提供了激励(incentive),这就大大增加了 Internet 上拥塞崩溃(congestion collapse)发生的概率.

4 综合服务模型及其优化问题

对上述问题的一种中心化控制解决方案为:假定网络方知道所有用户收益函数的信息,或者用户真实地向网络方报告自己的收益函数(1),网络方则根据这些信息进行系统最优的决策(10),再将资源分给不同的用户. IETF 提出的综合服务模型(IntServ)^[12]事实上反映了这种思路,下面讨论 IntServ 所采用的各种技术中的优化问题,并从对策论的角度分析其存在的问题.

4.1 流隔离

在 IntServ 中,网络方给用户 i 分配一定的带宽 Q_i . 但是用户 i 的发送速率 r_i 并不一定在 Q_i 内,为此需要将不同用户的业务流隔离开来,使其真正使用的带宽不超过 Q_i . IntServ 提供了多种技术实现:如在路由器上使用加权公平队列 WFQ 或流 RED(FRED),或者在网络边缘采用 RIO(RED with In/Out).

设用户 i 的收益函数为:

$$J_i(r_i, Y) = u_i(r_i, r_{-i}) - C_i(Y_i) \quad (11)$$

其中 $Y_i = \frac{r_i}{Q_i}$. 则用户的优化行为满足: $\frac{\partial u_i}{\partial r_i} = \frac{1}{Q} \frac{\partial C_i}{\partial Y_i}$. 也即在给定 Q_i 条件下,用户自己可以通过调整 r_i ,得到一个最优的 \tilde{r}_i ,因而 \tilde{r}_i 为 Q_i 的函数: $\tilde{r}_i(Q_i)$. 可以证明: Q_i 为 \tilde{r}_i 的增函数,且满足边际收益递减:

$$\frac{\partial \tilde{r}_i(Q_i)}{\partial Q_i} > 0, \quad \frac{\partial^2 \tilde{r}_i(Q_i)}{\partial Q_i^2} < 0 \quad (12)$$

4.2 接纳控制与 RSVP(资源预留协议)

用户端通过 RSVP 向网络方报告自己的收益函数 $\tilde{r}_i(Q_i)$,网络方据此分配资源:

$$\text{Max}_{i=1}^n \tilde{r}_i(Q_i) \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n (Q_i) \leq Q \quad (13)$$

用拉格朗日乘数法求解,设一拉氏函数 $L(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ 有:

$$L = \sum_{i=1}^n \tilde{r}_i(Q_i) + \left[Q - \sum_{i=1}^n Q_i \right] \quad (14)$$

式中 λ 为一特定的未知常数. 最优解应满足的条件为 L 对于各个未知数的偏导为零:

$$\frac{\partial L}{\partial Q_i} = \frac{\partial \tilde{r}_i}{\partial Q_i} - \lambda = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$\text{即} \quad \frac{\partial \tilde{r}_1}{\partial Q_i} = \dots = \frac{\partial \tilde{r}_i}{\partial Q_i} = \dots = \frac{\partial \tilde{r}_n}{\partial Q_i}$$

由于每个收益函数 $\tilde{r}_i(Q_i)$ 都是凹函数,因而式(15)存在唯一解. 网络通过 RSVP 给每个用户的业务流预留带宽 Q_i^* .

5 区分服务模型及其优化问题

研究表明,IntServ 为每一个用户的业务流提供其所需要的服务,在 Internet 上实施时在技术上过于复杂. 因而 IETF 提出了一种替代方案:区分服务模型(DiffServ)^[13],网络只提供几种有区分的服务类别(Service class),为每一个类别的流提供一个虚通路(Virtual Path,VP),将不同类别的流之间隔离开来.

5.1 区分服务的模型

区分服务暗含一种假定,即用户的收益函数只有几种可能,与每种服务类别一一对应. 给出如下模型:考虑一个 Diff-Serv 域,有 k 个类别,分给类别 i 的带宽为 Q_i . 显然有: $\sum_{i=1}^k Q_i = Q$. 类别 i 的 VP 中有 N_i 个流统计复用 Q_i ,则类别 i 中的用户收益函数为 $\tilde{r}_i(Q_i, N_i)$. 显然 \tilde{r}_i 是 Q_i 的增、凹函数,是 N_i 的减、凹函数. 则类别 i 的总收益为 $\tilde{r}_{ih} = N_i \tilde{r}_i(Q_i, N_i)$. 由于:

$$\frac{\partial \tilde{r}_{ih}}{\partial N_i} = \tilde{r}_i + N_i \frac{\partial \tilde{r}_i}{\partial N_i} \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{r}_{ih}}{\partial N_i^2} = 2 \frac{\partial \tilde{r}_i}{\partial N_i} + N_i \frac{\partial^2 \tilde{r}_i}{\partial N_i^2} < 0 \quad (17)$$

因而类别 i 的总收益是 N_i 的凹函数.

5.2 接纳控制中的优化问题

给定每个服务类别的带宽后,每个 VP 中的优化问题是找到最优的 N_i ,使得对 Q_i 的使用最有效率: $\max_{N_i} \tilde{r}_{ih} = N_i \tilde{r}_i(Q_i, N_i)$. 在给定带宽分配的情况下,不同类别的用户间不存在竞争,各个 VP 中的优化行为导致网络整体最优:

$$\max_{\{N_i\}_{i=1}^k} \sum_{i=1}^k N_i \tilde{r}_i(Q_i, N_i)$$

由式(16)、(17)知有唯一解 N_i^* ,满足:

$$\frac{\partial \tilde{r}_{ih}}{\partial N_i^*} = \tilde{r}_i + N_i^* \frac{\partial \tilde{r}_i}{\partial N_i^*} = 0 \quad (18)$$

则类别 i 的接纳控制算法为:当有一个新的连接要求到达时,若 $N_i < N_i^*$,接受之,否则,拒绝之.

5.3 不同级别间的带宽分配问题

假设我们已知 $N_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 的一些估计值(如长时间的平均值),那么问题就是如何在不同的 VP 间分配带宽,使得系统整体最优:

$$\begin{aligned} \max_{\{Q_i\}_{i=1}^k} \tilde{r}_{ih} &= \sum_{i=1}^k N_i \tilde{r}_i(Q_i, N_i), \quad i = 1, 2, \dots, k \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^k Q_i \leq Q \end{aligned} \quad (19)$$

5.3.1 非中心化控制下的分配 先考虑不同的 VP 间竞争带宽的情况,这时是一个非合作对策. 有

$$\frac{\partial \tilde{J}_{i1h}}{\partial Q_i^*} = N_i \left(\frac{\partial \tilde{J}_i}{\partial Q_i^*} \right) = 0 \quad (20)$$

若 $Q_i^* = Q$, 则 (Q_1^*, \dots, Q_k^*) 即为 Nash 均衡。

若 $Q_i^* > Q$, 则记

$$Q_i^{**} = \min \left[Q_i^*, Q - \sum_{j=1, j \neq i}^k Q_j^* \right], \quad i=1, 2, \dots, k \quad (21)$$

则 (Q_1^*, \dots, Q_k^*) 构成 Nash 均衡。注意此时 Nash 均衡不唯一。因而若由各 VP 竞争带宽, 可能不存在稳定的可预测的结果。

5.3.2 中心化控制下的分配 再考虑由网络方通过系统优化(19)来分配带宽。这时是一个合作对策。用 Lagrange 乘法, 式(19)的解 (Q_1^*, \dots, Q_k^*) 满足:

$$N_i \frac{\partial \tilde{J}_i}{\partial Q_i^*} = 0, \quad i=1, 2, \dots, k$$

$$\text{即: } \left(\frac{\partial \tilde{J}_i}{\partial Q_i^*} \right) \left/ \left(\frac{\partial \tilde{J}_j}{\partial Q_j^*} \right) = \frac{N_i}{N_j}, \quad i, j=1, 2, \dots, k \quad (22)$$

中心化控制下, 各个服务类别分得的带宽 (Q_1^*, \dots, Q_k^*) 满足式(22)时, 系统达到最优。

6 基于计费的拥塞控制

网络方并不控制用户 i 的流量 r_i , 只是对单位流量制定价格 p_r :

$$p_r = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^n \frac{\partial C_i}{\partial Y} \quad (23)$$

网络方据此计费后, 用户 i 的收益函数变为:

$$J_i(r_i, Y) = u_i(r_i, r_{-i}) - C_i(Y) - p_r \cdot r_i \quad (24)$$

最优化的一阶条件是:

$$\frac{\partial J_i}{\partial r_i} = \frac{\partial u_i}{\partial r_i} - \frac{1}{Q} \frac{\partial C_i}{\partial Y} - \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^n \frac{\partial C_i}{\partial Y} = 0 \quad (25)$$

若 n 足够大, 则 $\frac{1}{Q} \frac{\partial C_i}{\partial Y} < \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^n \frac{\partial C_i}{\partial Y}$, 这时式(25)与系统最优的一阶条件式(10)相同。也即: 用户端在有收费的情况下, 其优化行为将导致系统最优的结果^[11]。

问题在于网络方制定价格时仍需要用户的私有信息 $C_i(Y)$, 但网络方需要的是 $C_i(Y)$ 的和, 因而可以用长时间的统计平均 $C(Y)$ 来取代 $C_i(Y)$, 这时 $p_r = (n/Q) (\partial C(Y)/\partial Y)$ 。

文献[14]提出的基于 ECN 的计费方法就体现了这种思路。网络上的路由器以一定的概率 $P_M(Y)$ 对所到分组进行随机标记 (ECN bit)。在网络边缘, 网络方对用户的业务流进行计费, 对每个被标记的分组收取 P_e 。因而只要标记概率 $P_M(Y) = P_r(Y)/P_e$, 则系统就可达到最优, 由于 $C(Y)$ 是对用户端的 $C_i(Y)$ 的估计值, 因而标记算法的制定到目前仍是一个开放问题。

7 结束语

综合上面讨论, 可以得出以下几点结论:

- (1) 中心化控制中也有非合作对策问题, 因而非合作对策是整个 Internet 资源分配研究的理论基础;
- (2) 合理计费可以成为一种拥塞控制机制; 任何能保证对

稀缺资源使用有效率的拥塞控制必须包含合理的计费;

(3) 对策论是在“理性人”的假设下, 通过研究人与人之间的互动发展起来的。对策论一直受到一种批评, 认为: 人往往不是以自身利益最大化为行动目标, 而且其优化目标常常不确定; 人由于自身能力的限制, 对于一些复杂问题, 往往难以做出优化决策。而且常常犯错误^[2]。但是, 在网络对策 (network game) 中, 参与对策的往往不是人而是软件、协议等代理者, 这些代理软件, 都有明确的优化目标, 也能准确无误地进行优化计算。只要这些代理能够真正地最大化用户的利益, 用户也就没有动机去改变它。因而对策论更适合网络拥塞控制与资源分配这一领域的研究。

参考文献:

- [1] Nemo Semret. Market Mechanisms for Network Resource Sharing[D]. PhD thesis. New York: Columbia University, 1999.
- [2] D Fudenberg and J Tirole. Game Theory[M]. MIT Press, Cambridge, MA, 1991.
- [3] 陈惠民等. 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.
- [4] S Shenker. Fundamental design issues for the future Internet[J]. IEEE journal on selected areas in communications, 1995, 13(7): 1176-1188.
- [5] J K MacKie-Mason, L Murphy, J Murphy. The role of responsive pricing in the Internet[A]. MIT Workshop on Internet Economics[C]. MIT Press, Cambridge, MA, 1995.
- [6] K Park, M Stitharam and S Chen. Quality of service provision in noncooperative networks with diverse user requirements[J]. Decision Support Systems, 2000, 28: 101-122.
- [7] T Henderson, J Crowcroft and S Bhatti. Congestion pricing-paying your way in communication networks[J]. IEEE Internet Computing, 2001, 5(5): 85-89.
- [8] H R Varian. Microeconomic Analysis[M]. Norton, New York, third edition, 1992.
- [9] W Stalling. TCP/IP and ATM Design Principles[M]. Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [10] A Odlyzko. The economics of the Internet: Utility, utilization, and quality of service[R]. Technical report, AT&T Labs Research, 1998.
- [11] J K MacKie-Mason and H R Varian. Pricing congestible network resources[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(7): 1141-1149.
- [12] R Braden, D Clark and S Shenker. Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview[R]. IETF RFC 1633, 1994.
- [13] S Blake, et al. An Architecture for Differentiated Services[R]. IETF RFC 2475, 1998.
- [14] F Kelly, A Maulloo and D Tan. Rate control in communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability[J]. Journal of the Operational Research Society, 1998, 49: 237-252.

作者简介:

魏蛟龙 (见本卷第 6 期第 894 页)

张驰 (见本卷第 6 期第 894 页)