

基于多组博弈的新型网络流量控制模型

冯慧斌^① 张顺颐^① 刘超^① 刘觉夫^②

^①(南京邮电大学信息技术研究所 南京 210003)

^②(华东交通大学信息工程学院 南昌 330013)

摘要: 该文研究了具有强分布式特征和分层结构的通信网络流量控制问题, 借鉴多组博弈模型来研究新型的网络流量控制模型, 构造了基于网络流量速率和时延为参数的流量效用函数, 使之能适度地满足不同业务的用户流量 QoS 需求, 利用多组博弈优化模型建立了基于 Min-Max 的公平的网络流量控制博弈模型。理论上证明了提出的网络流量控制模型的非劣纳什策略存在性。数值仿真验证了模型的正确性, 仿真结果验证了用户流量在非劣纳什均衡点的效用值是帕累托占优的。

关键词: 网络流量控制; 多组博弈; 非劣纳什均衡; 最小最大化

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)02-0267-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01827

Novel Network Flow Control Model on Multi-Team Game Theory

Feng Hui-bin^① Zhang Shun-yi^① Liu Chao^① Liu Jue-fu^②

^①(Institute of Information Network Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

^②(Information Engineering College, East China JiangTong University, Nanchan 330013, China)

Abstract: This paper investigates the communication network flow control with strong distributed feature and hierarchical structure, a novel network flow control model is studied by using the multi-team game model, the utility function is built up on flow rate and delay to make user flow satisfy different flow proportional QoS requirement, thus the Min-Max fair flow control game model is constituted by multi-team game optimized model. The existence of the non-inferior Nash equilibrium of the proposed network flow control model is proved theoretically. The correctness of the proposed model is validated by numerical evaluation, simulation result validates the user flow utility value is Pareto optimal at the non-inferior Nash equilibrium point.

Key words: Network flow control; Multi-team game; Non-inferior Nash equilibrium; Min-Max

1 引言

随着网络新技术的不断出现及各种网络的不断融合, 网络的分布式和分层结构的特征越来越明显, 一方面由于强分布式的特性使得网络中流量试图非合作主动地最大化自己的效用从而忽略全网性能, 另一方面由于网络分层结构的特征使得网络中流量可以看成由大量底层流量汇聚的流量组构成, 因此网络流量控制模型可以描述为多流量组博弈模型, 流量组内用户相互合作的同时非合作地与网络中其它流量组相互竞争网络资源来实现流量组的效用最大化。针对如此复杂的流量控制问题, 多组博弈理论提供了相应的工具和数学理论来研究和分析诸如上所述竞争资源的场景。

国内外研究人员对网络流量控制进行了大量的研究, 研究主要是从控制论的角度来进行的。文献[1]研究 Internet 中基于会话信息反馈的流量控制问题并证明了该网络流量控制机制的稳定性。文献[2]研究了公平的网络流量控制问题并给出了基于用户往返时延的公平的分布式流量控制算法。文献[3]提出了一种基于随机估计的网络流量控制模型及算法, 仿真验证了该算法是稳定性和正确性。文献[4]提出了一种基于议价的网络流量控制算法, 并证明了该算法是稳定和收敛的。近年来博弈论广泛应用于研究网络流量控制问题, 文献[5]在假设网络存在自私流量情况下, 提出了一种基于发送窗口的分布式流量控制博弈模型来最大化网络效用。文献[6]研究了大规模用户的网络中流量控制策略, 并证明了该模型存在纳什均衡。但由于纳什均衡解通常并不是帕累托最优的且已有研究都是针对单个流量进行的并没有对多流量组的网络流量控制问题进行研究, 因此已有研究成果并不完全适应于强分布式和

2008-12-30 收到, 2009-06-25 改回

国家 863 计划项目(2006AA01Z232, 2005AA121620), 江苏省高新技术研究计划项目(BG2007045)和江苏省青年科技创新人才启动项目(BK2007603)资助课题

通信作者: 冯慧斌 huibinfeng@tom.com

层次结构特征的通信网络。

本文研究更符合现实场景的新型网络流量控制问题,在借鉴文献[7,8]的思想基础上,利用多组系统的博弈优化模型来研究新型的网络流量控制模型,建立了基于 Min-Max 的公平的网络流量控制博弈模型。证明了提出的网络流量控制模型的非劣纳什策略存在性,数值仿真验证了新型的网络流量控制模型正确性。

2 多组博弈系统的非劣纳什策略

假设系统存在多组且各组都由有限个成员组成,在本节定义中假设系统只存在两个分组: Team1 和 Team2, N 个分组的模型描述也可以此类推。假设组 $X \in [1,2]$ 有 m 个组成员,用向量 $(1,2,\dots,m_X)$ 表示。令 S_X^i 表示组 X 的第 i 个成员的博弈策略, $u_X(\overline{S}_1, \overline{S}_2)$ 表示组 X 的成本函数。则多组博弈问题可写成如下表达式:

$$\min_{X=1,2} \left(u_X^1(\overline{S}_1, \overline{S}_2) \quad u_X^2(\overline{S}_1, \overline{S}_2) \quad \dots \quad u_X^{m_X}(\overline{S}_1, \overline{S}_2) \right)^T \quad (1)$$

假设多组系统中每个组效用都是由组内所有成本函数决定,则组的成本函数写成所有组成员的成本函数加权线性组合,其表达式如下所示:

$$\left. \begin{aligned} u_X(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2) &= \sum_{i=1}^{m_X} w_X^i u_X^i(S_{w_1^i}, S_{w_2^i}) \\ W_X &= \left\{ w_X \in R^m : \sum_{i=1}^{m_X} w_X^i = 1, 0 < w_X^i < 1 \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

用非劣理性反应集合 $C_{\text{NRS}}^X(\mathbf{w}_X, \overline{S}_X)$ 表示多组系统优化问题式(2)解的集合,则可分别给出组 1 的 $C_{\text{NRS}}^1(\mathbf{w}_1, \overline{S}_1)$ 和组 2 的 $C_{\text{NRS}}^2(\mathbf{w}_2, \overline{S}_2)$ 的定义。

定义 1 组 1 的 $C_{\text{NRS}}^1(\mathbf{w}_1, \overline{S}_1)$ 是组 2 策略 \overline{S}_2 到策略 \overline{S}_1 的映射集 $\overline{S}_2 \rightarrow \overline{S}_1$, 当且仅当对于组 2 任一策略 $s_2 \in S_2$, 组 1 的策略 $s_1 \in C_{\text{NRS}}^1(\mathbf{w}_1, \overline{S}_1)[S_2]$ 满足以下条件:

$$\left. \begin{aligned} u_1^i(S_{1,w_1}, s_{2,w_2}) &\leq u_1^i(s_{1,w_1}, s_{2,w_2}), \quad \text{当且仅当} \\ u_1^i(S_{1,w_1}, s_{2,w_2}) &= u_1^i(s_{1,w_1}, s_{2,w_2}) \quad i = 1, \dots, m_1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

用同样方式可以给出组 2 的 $C_{\text{NRS}}^2(\mathbf{w}_2, \overline{S}_2)$ 定义。在上述基础上可以给出非劣纳什策略定义。

定义 2 给定一对加权向量 $(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2)$, 策略向量 $(\overline{S}_{1,w_1}, \overline{S}_{2,w_2})$ 是多组系统的非劣纳什均衡策略如果策略向量同时满足下述条件:

$$\overline{S}_{1,w_1} \in C_{\text{NRS}}^1(\mathbf{w}_1, \overline{S}_{2,w_2}), \quad \overline{S}_{2,w_2} \in C_{\text{NRS}}^2(\mathbf{w}_2, \overline{S}_{1,w_1}) \quad (4)$$

从上述定义可以看出,非劣策略向量对组内各成员的其它策略是非劣的,且对整个系统所有组来说非劣策略是最优策略(即纳什均衡)。称满足上述条件的策略为多组博弈系统的非劣纳什策略,非劣

纳什策略构成的解为多组博弈系统的非劣纳什均衡解。

3 基于分组的网络流量控制模型

假设网络中由 N 个结点和 L 条链路组成,用 $\mathbf{N} = \{1,2,\dots,N\}$ 和 $L = \{1,2,\dots,l\}$ 分别表示结点和链路集合,令 $C_l (l \in L)$ 表示网络中链路 l 的容量,且同时假设网络中有 $\mathbf{T} = \{1,2,\dots,G\}$ 个用户流量组,每组用户包括 $M_g = \{1,2,\dots,m_g\}$ 个用户流量。假设流量组 g 中的第 i 个用户流量的路径由网络所采用的路由算法来决定,路径集合由连接源结点和目标结点一系列链路集合 $l \in L$ 构成。因此可以定义用户流量路由矩阵表示流量组 g 中的第 i 个用户流量与网络链路 $l \in L$ 之间的对应关系为

$$R_{l,i}^g = 1 \text{ 或 } 0 \quad (5)$$

其中组 g 用户流量 i 使用链路 l 则 $R_{l,i}^g$ 值为 1, 反之则 $R_{l,i}^g$ 值为 0, 其中 $g \in \mathbf{T}, i \in M_g, l \in L$ 。

假设网络中能支撑 $\mathbf{K} = \{1,2,\dots,K\}$ 种不同的业务类型流量,假设业务流量类型 $j \in \mathbf{K}$ 对应的流速自适应调节参数和时延敏感参数分别为 $\alpha_j (0 < \alpha_j < 1)$ 和 $\beta_j (0 < \beta_j < 1)$, 且用户流量可以通过调整 α_j 和 β_j 来满足不同业务流 QoS 需求。根据上述定义可分别定义链路、用户流量组流量特征系数、用户流量 QoS 特征参数、用户流量速率等参数向量表达式:

$$\left. \begin{aligned} \overline{\mathbf{c}} &= [c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_L]^T, \quad \overline{\mathbf{x}}_i^g = [x_i^{g,1} \quad x_i^{g,2} \quad \dots \quad x_i^{g,K}] \\ \overline{\mathbf{x}}^g &= [\overline{\mathbf{x}}_1^g \quad \overline{\mathbf{x}}_2^g \quad \dots \quad \overline{\mathbf{x}}_{m_g}^g]^T, \quad \overline{\mathbf{f}}_g = [f_1^g \quad f_2^g \quad \dots \quad f_{m_g}^g]^T \\ \overline{\mathbf{f}} &= [\overline{\mathbf{f}}^1 \quad \overline{\mathbf{f}}^2 \quad \dots \quad \overline{\mathbf{f}}^G]^T, \quad \overline{\mathbf{R}}_i^g = [R_{1,i}^g \quad R_{2,i}^g \quad \dots \quad R_{L,i}^g]^T \\ \overline{\mathbf{Q}}_r &= [(\alpha_1) \quad (\alpha_2) \quad \dots \quad (\alpha_K)]^T \\ \overline{\mathbf{Q}}_d &= [(\beta_1) \quad (\beta_2) \quad \dots \quad (\beta_K)]^T \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中向量 $\overline{\mathbf{c}}$ 表示网络中链路的容量向量, 向量 $\overline{\mathbf{x}}_i^g$ 表示流量组 g 中用户流量 i 的所属 QoS 特征向量, 如果流量属于业务流量特征 K , 则该列值为 1, 否则该列值为 0。向量 $\overline{\mathbf{x}}^g$ 表示网络中的流量组 g 所属的流量特征矩阵, 该矩阵是由 m_g 维向量 $\overline{\mathbf{x}}_i^g$ 组成。 $\overline{\mathbf{f}}_g$ 表示流量分组 g 的流量速率向量, $\overline{\mathbf{f}}$ 是网络中所有流量组 $\overline{\mathbf{f}}_g$ 组成的流量向量。向量 $\overline{\mathbf{R}}_i^g$ 表示流量分组 g 中用户流量 i 路由路径向量。向量 $\overline{\mathbf{Q}}_r$ 和 $\overline{\mathbf{Q}}_d$ 分别是流量速度自适应调节参数和流量时延敏感参数向量。根据式(5)可以定义网络中流量分组 g 路由矩阵 $\overline{\mathbf{R}}^g$ 为

$$\overline{\mathbf{R}}^g = \begin{bmatrix} R_{1,1}^g & R_{1,2}^g & \dots & R_{1,G}^g \\ R_{2,1}^g & R_{2,2}^g & \dots & R_{2,G}^g \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{L,1}^g & R_{L,2}^g & \dots & R_{L,G}^g \end{bmatrix} \quad (7)$$

整个网络的路由矩阵 $\bar{\mathbf{R}}$ 可写成:

$$\bar{\mathbf{R}} = [\bar{\mathbf{R}}^1 \ \bar{\mathbf{R}}^2 \ \dots \ \bar{\mathbf{R}}^G] \quad (8)$$

4 基于 Min-Max 的网络流量控制博弈模型

用 $\Gamma = \{T, \{f_i^g\}, u\{\cdot\}\}$ 来表示由 N 个结点和 L 条链路组成的网络流量控制博弈模型, 其中 T 表示网络中有 $T = \{1, 2, \dots, G\}$ 个流量组, 每个用户流量组由 m_g 个用户流量组成, 即表示有 $G \times m_g$ 个博弈参与者。假设网络中的流量组 g 中的第 i 个用户流量采用的博弈策略是 f_i^g , 则流量组 g 的策略空间可以看成由组内的 m_g 个用户流量向量构成的一个混合策略空间, 假设用 $u(f_i^g)$ 表示流量组 g 中的第 i 个用户流量所采取策略 f_i^g 的效用函数, 在本文假设流量的速率与时延为效用函数两个主要 QoS 度量因素, 因此可定义流量效用函数为

$$u(f_i^g) = \sum_{l \in L} R_{l,i}^g \left(\frac{(f_i^g)^{x_l^g \bar{Q}_r}}{(D_l)^{x_l^g \bar{Q}_d}} \right) \quad (9)$$

效用函数的值是用户流量流过链路的所得效用之和, 流量在所经每一条链路的效用值则是由流量速率与所经历时延之比, 流量速率越大且时延越小则其效用值越高, 这就是式(9)的由来。式中 $x_l^g \bar{Q}_r$ 表示流量速率自适应调节参数, 流量根据自身承载业务的 QoS 需求对流速的需求自适应调节流量速率。 $x_l^g \bar{Q}_r$ 为流量的时延敏感参数, 流量根据自身承载业务对时延敏感程度自适应调节时延敏感参数满足流量的 QoS 需求。式中的 D_l 表示流量在链路 l 的平均传输时延, 假设流量经过每链路 l 的排队模型是 M/M/1 模型, 令 x_l 表示 $\bar{\mathbf{R}} \cdot \bar{\mathbf{f}}$ 的第 l 个分量, 其表示到达链路 l 的流量速率之和(即顾客到达速率), 用 c_l 表示链路的处理速率(服务速率), 可得 M/M/1 模型的平均等待时间(即流量平均传输时延), 其可写成如下表达式:

$$D_l = (c_l - x_l)^{-1} \quad (10)$$

由于网络中流量组由多个用户流量组成, 可定义流量组的效用函数如下:

$$\overline{u\{g\}} = w_1^g u(f_1^g) + w_2^g u(f_2^g) + \dots + w_{m_g}^g u(f_{m_g}^g) \quad (11)$$

其中 w_i^g 表示流量组 g 中的第 i 个用户流量加权因子且 $\sum w_i^g = 1$ 。组内的用户通过选择的流量速率向量 $\bar{\mathbf{f}}_g = (f_1^g, f_2^g, \dots, f_{m_g}^g)$ 来最大化式(11), 即 $\max_{\bar{\mathbf{f}}_g} \overline{u\{g\}}$ 。

但如果只最大化流量组的效用可能会导致流量组内用户的效用不公平, 为保证流量组内的公平性, 组内的管理者通过选择合适的加权向量 $\bar{\mathbf{w}}_g = (w_1^g, w_2^g, \dots, w_{m_g}^g)$ 最小最大化流量组的效用, 即建立了基于 Min-Max 的公平的网络流量控制模型, 其具体表达式如下:

$$\min_{\bar{\mathbf{w}}_g} \max_{\bar{\mathbf{f}}_g} \overline{u\{g\}} \quad (12)$$

5 网络流量控制模型的非劣纳什均衡

根据第 4 节建立的模型表达式(12), 通过变换可得问题的等价模型

$$\min_{\bar{\mathbf{w}}_g} \min_{\bar{\mathbf{f}}_g} -\overline{u\{g\}} \quad (13)$$

最小化流量组 g 中的第 i 个用户流量的成本函数, 对式(9)求关于 f_i^g 的一阶导数可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial f_i^g} = & -(\alpha_i \bar{\mathbf{R}}_i^g (f_i^g)^{\alpha_i - 1} (\bar{\mathbf{D}})^{-\beta_i} \\ & - \beta_i \bar{\mathbf{R}}_i^g (f_i^g)^{\alpha_i} (\bar{\mathbf{D}})^{-\beta_i - 1} \bar{\mathbf{R}}_i^{gT}) \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $\alpha_i = x_i^g \bar{Q}_r$, $\beta_i = x_i^g \bar{Q}_d$ 。根据式(10)可以把 $\bar{\mathbf{D}}$ 转换成如下表达式:

$$\bar{\mathbf{D}} = \bar{\mathbf{c}} - \sum_{g=1}^N \sum_{i=1}^{m_g} \bar{\mathbf{R}}_i^g f_i^g \quad (15)$$

把式(15)代入式(14)中, 令 $\partial u / (\partial f_i^g) = 0$, 可得如下等式:

$$\bar{\mathbf{R}}_i^g (f_i^g)^{\alpha_i - 1} (\bar{\mathbf{D}})^{-\beta_i - 1} (\alpha_i (\bar{\mathbf{D}}) - \beta_i (f_i^g) \bar{\mathbf{R}}_i^{gT}) = 0 \quad (16)$$

由于 $\bar{\mathbf{R}}_i^g (f_i^g)^{\alpha_i - 1} (\bar{\mathbf{D}})^{-\beta_i - 1} \neq 0$, 式(16)可写成如下表达式:

$$f_i^g = \frac{\alpha_i (\bar{\mathbf{D}}) (\bar{\mathbf{R}}_i^{gT})^{-1}}{\beta_i} \quad (17)$$

对式(9)求关于 f_i^g 的二阶导数可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial^2 f_i^g} = & -(\alpha_i (\alpha_i - 1) \bar{\mathbf{R}}_i^g (f_i^g)^{\alpha_i - 2} (\bar{\mathbf{D}})^{-\beta_i} - \bar{\mathbf{R}}_i^g (f_i^g)^{\alpha_i} \\ & \cdot (\bar{\mathbf{D}})^{-\beta_i - 2} \bar{\mathbf{R}}_i^{g2T} - \alpha_i \beta_i \bar{\mathbf{R}}_i^g (f_i^g)^{\alpha_i - 1} (\bar{\mathbf{D}})^{-\beta_i - 1} \\ & \cdot \bar{\mathbf{R}}_i^{gT} - \alpha_i \beta_i \bar{\mathbf{R}}_i^g (f_i^g)^{\alpha_i - 1} (\bar{\mathbf{D}})^{-\beta_i - 1} \bar{\mathbf{R}}_i^{gT} \\ & + \beta_i^2 \bar{\mathbf{R}}_i^g (f_i^g)^{\alpha_i} (\bar{\mathbf{D}})^{-\beta_i - 2} \bar{\mathbf{R}}_i^{g2T}) \end{aligned} \quad (18)$$

把式(18)最后两项变成 $-\beta_i \bar{\mathbf{R}}_i^g (f_i^g)^{\alpha_i - 1} (\bar{\mathbf{D}})^{-\beta_i - 2} [\alpha_i (\bar{\mathbf{D}}) - \beta_i (f_i^g) \bar{\mathbf{R}}_i^{gT}] \bar{\mathbf{R}}_i^{gT}$ 。因为 $0 \leq \alpha_i \leq 1$, 因此式(18)第 1 项为非正的, 而且可以看出式(18)第 2 项和第 3 项都为负数, 由式(16)可得第 4 项和第 5 项之和为零, 则可得 $\partial^2 u / (\partial^2 f_i^g) > 0$, 由于其 1 阶导数存在且其 2 阶导数大于零, 因而可得流量组 g 中用户流量 i 的最优值存在, 其值可由式(17)求得。由于对于流量组 g 中任一流量 i 的最优值存在, 假设加权向量 w_i 为已知常量, 则可得流量组 g 即为组内用户最优值的加权效用之和, 因此 $\min_{\bar{\mathbf{f}}_g} -\overline{u\{g\}}$ 存在最优解。

由于加权向量为已知向量可知 $\min_{\bar{\mathbf{f}}_g} -\overline{u\{g\}}$ 存在最优解。如果加权向量为可变量且其满足 $\sum w_i^g = 1$, 流量组 g 可以在 $\min_{\bar{\mathbf{f}}_g} -\overline{u\{g\}}$ 基础上选择加权向量 $\bar{\mathbf{w}}_g$ 最小化组内的用户流量效用即等价求

解等价模型式(13)。由于流量组 g 效用是组内所有流量效用加权之和, 因此可以把流量组 g 效用看作组内成员效用的线性组合, 由于 $\min_{\bar{f}_g} -\overline{u\{g\}}$ 存在最优解, 而式(13)是模型 $\min_{\bar{f}_g} -\overline{u\{g\}}$ 的加权向量线性组合, 因此可得式(13)存在着最优解。

给定网络中流量组特定策略 $(\bar{f}_1, \bar{f}_2 \cdots \bar{f}_{g-1} \cdots \bar{f}_{g+1} \cdots \bar{f}_G)$, 流量组 g 的最优解可通过求解模型式(13)获得, 因此存在一个映射关系 $M_{\bar{w}_g}^{\bar{f}_g}$: $(\bar{f}_1, \bar{f}_2 \cdots \bar{f}_{g-1} \cdots \bar{f}_{g+1} \cdots \bar{f}_G) \rightarrow \bar{f}_g$ 满足式(13), 该最优值为 $u_{\bar{f}_g, \bar{w}_g}^* = M_{\bar{w}_g}^{\bar{f}_g}(\bar{f}_1, \bar{f}_2 \cdots \bar{f}_{g-1} \cdots \bar{f}_{g+1} \cdots \bar{f}_G)$ 。映射关系 $M_{\bar{w}_g}^{\bar{f}_g}$ 代表流量组 g 使用加权向量 \bar{w}_g 时的非劣理性反应集合。用向量可以把上述映射关系表示如下:

$$\bar{f}_w = M_w(\bar{f}_w) \tag{19}$$

其中 $\bar{f}_w = (\bar{f}_w^1, \bar{f}_w^2, \cdots, \bar{f}_w^G)$, $M_w = (M_{w_1}^{\bar{f}_1}, M_{w_2}^{\bar{f}_2}, \cdots, M_{w_G}^{\bar{f}_G})^T$, $w = (w_1, w_2, \cdots, w_G)^T$ 。由于 $M_{w_i}^{\bar{f}_i}$ 是连续的因此映射 M_w 也是连续的, 且由式(19)可知 M_w 是自映射的且策略空间集合是完备的, 由角谷夫不动点定理^[9]可得必存在 $\bar{f}_w^* = (\bar{f}_w^{1*}, \bar{f}_w^{2*}, \cdots, \bar{f}_w^{G*})$ 使得满足式(19)。由于策略向量 \bar{f}_w^* 是所有流量组非劣理性集合的交集, 根据第 2 节定义可知 \bar{f}_w^* 是网络流量控制模型的非劣纳什策略。由于上节提出的模型和 $\min_{\bar{w}_g} \min_{\bar{f}_g} -\overline{u\{g\}}$ 是等价的模型, 因此网络流量控制博弈模型存在着非劣纳什均衡。

定理 1 假设 N 个结点和 L 条链路组成的通信网络中存在着 G 个流量组竞争资源的流量控制博弈模型, 流量组 g 中流量 i 效用函数如式(9)如示, 流量组 g 的效用函数如式(11)所示, 则网络流量控制模型必定存在着非劣纳什均衡。

6 数值仿真

本节将通过实验来验证本文提出的网络流量控制模型的正确性。首先假设网络的拓扑是固定且是

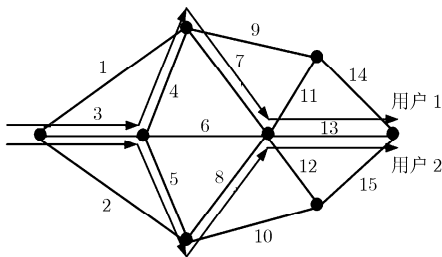


图 1 单分组网络拓扑及流量示意图

路由路径是根据指定的路由算法指定且相对固定, 网络中有 $l=1,2,\dots,15$ 条链路且所有链路的带宽 100 MB。用 Ω 表示所有用户流量的取值空间, 根据链路约束关系可知流量速率(即博弈参与者策略)取值空间为 $[0,100]$ 中任一实数。

6.1 单分组流量控制模型仿真实验

假设如图 1 所示的网络拓扑中, 只存在着单个分组用户流量, 该用户流量组由两个用户流量组成, 且假设流量的路由路径是固定的, 网络拓扑及各流量具体示意图如图 1 所示。为了验证模型正确性随机假设流量速率和时延特征向量分别为 $[0.6,0.4]^T$ 和 $[0.5,0.5]^T$ 。

图 2 给出了用户流量速率随加权因子变化示意图, 从图 2 可以看出当加权因子不断增大时, 用户 1 的流量速率也不断增大, 用户 2 的流量速率则不断减少。由于用户流量 1 和用户流量 2 具有相同的时延特性, 所以用户流量的变化趋势和用户有效值一样。

图 3 给出了流量的效用值随加权因子变化的示意图, 从图 3 可以看出当加权因子不断增大时, 用户 1 的效用值也不断增大, 用户 2 的效用值则不断减少。从图 3 可得当加权因子 W 取值在 $[0.261, 0.314]$ 区间时任一值时, 用户 1 和用户 2 的所获的效用值都是优于标准纳什均衡也即帕累托占优的, 由于系统存在一个分组, 处于上述区间任一解都是系统的非劣纳什均衡解, 从而也验证了非内劣纳什均衡解的存在性和非劣纳什均衡解是帕累托占优的。

6.2 多分组流量控制模型仿真实验

假设网络中存在着两个分组用户流量组 1 和组 2, 其分别由流量用户 1 与用户 2、用户 3 与用户 4 流量组成, 网络拓扑及流量示意图如所图 4 所示。且为了验证模型正确性随机假设流量组速率和时延特征向量分别为 $[0.5,0.5,0.8,0.6]^T$ 和 $[1,1,1,1]^T$ 。

图 5 给出了用户流量组 1 的效用值随着加权因子变化的示意图, 由于流量组 1 的用户流量特性参

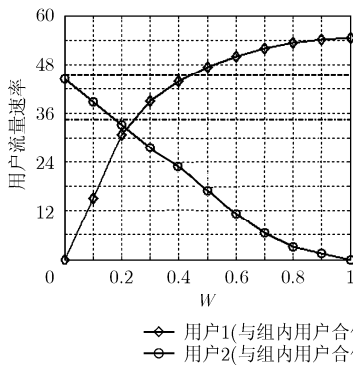


图 2 用户的流量速率变化示意图

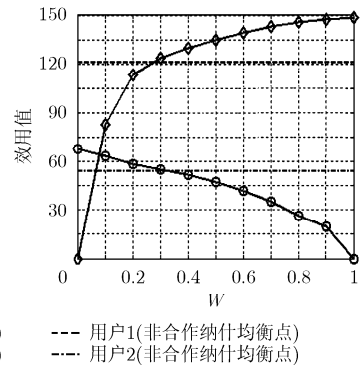


图 3 用户流量的效用值变化示意图

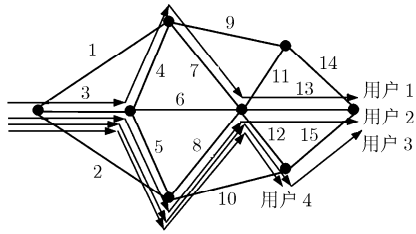


图 4 多分组网络拓扑及流量示意图

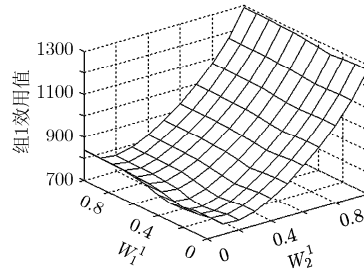


图 5 组 1 的效用值变化示意图

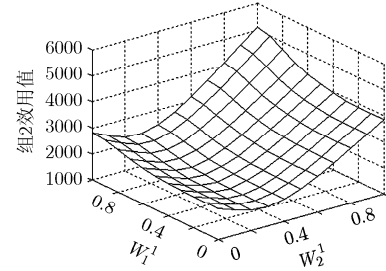


图 6 组 2 的效用值变化示意图

数相同，因此当加权因子不断增长时，组 1 的效用值也不断增长。

图 6 也给出了用户流量组 2 的效用值随着加权因子变化而变化的示意图，根据本文提出的博弈优化模型，可求得流量组 1 和组 2 的最优加权向量分别为 $(0.380, 0.620)$ 和 $(0.261, 0.739)$ 。用户在最优加权向量点可得模型最优解，在最优解处用户 1 与用户 2、用户 3 与用户 4 效用值分别为 1079.1, 619.9, 2449.4, 1621.0。在最优解处用户流量组 1 和用户流量组 2 的效用值分别为 792.54 和 1837.21。而假如所有用户都非合作地去竞争网络资源，在标准纳什均衡处用户 1 与用户 2、用户 3 与用户 4 效用值分别为 1067, 446.0036, 2447.4, 1537.9。通过对比可以看出，两个用户流量组在最优解点所获的效用值都优于标准纳什均衡所获的效用值，即解是帕累托占优的，因此根据第 2 节定义可得最优解即是非劣纳什均衡解，从而也验证了非劣纳什策略的存在性且非劣纳什均衡解也是帕累托占优的。

7 结束语

本文研究了具有强分布式特征和分层结构的通信网络流量控制问题，借鉴多组博弈模型来研究新型的网络流量控制模型，构造了基于网络流量速率和时延为参数的流量效用函数，使之能适度地满足不同业务的用户流量 QoS 需求，利用多组博弈优化模型建立了基于 Min-Max 的公平的网络流量控制博弈模型。理论上证明了提出的网络流量控制模型的非劣纳什策略存在性。数值仿真验证了模型的正确性，仿真结果验证了用户流量在非劣纳什均衡点的效用值是帕累托占优的。

参考文献

[1] Yang Yue-quan, Cao Zhi-qiang, Tan Min, and Yi Jian-qiang. Fairness and dynamic flow control in both unicast and multicast architecture networks[J]. *IEEE Transactions on*

Systems, Man, and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews, 2007, 37(2): 206–212.

- [2] Cho Jeong-Woo and Chong Song. Utility max-min flow control using slope-restricted utility functions[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(5): 963–972.
- [3] Abdulla M S and Bhatnagar S. Network flow-control using asynchronous stochastic approximation[C]. Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control, CDC, New Orleans, USA, December, 2008: 5857–5862.
- [4] Paganini F. A global stability result in network flow control[J]. *Systems and Control Letters*, 2002, 46(3): 165–172.
- [5] Jin Young-mi and Kesidis G. Charge sensitive and incentive compatible end-to-end window-based control for selfish users[J]. *IEEE Journal on Selected Area in Communications*, 2006, 24(5): 952–961.
- [6] Altman E, Basar T, and Srikant R. Nash equilibria for combined flow control and routing in networks: Asymptotic behavior for a large number of users[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(6): 917–930.
- [7] Sahin I and Simaan M A. A flow and routing control policy for communication networks with multiple competitive Users[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2006, 343(2): 168–180.
- [8] S S Askera. On dynamical multi-team cournot game in exploitation of a renewable resource [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2007, 32(1): 264–268.
- [9] Rosen J B. Existence and uniqueness of equilibrium points for concave N-person games[J]. *Econometrica*, 1965, 33(3): 520–534.

冯慧斌：男，1980 年生，博士生，研究方向为网络流量控制与认知网络。

张顺颐：男，1944 年生，教授，博士生导师，研究方向为计算机通信网与 IP 网络。

刘超：男，1977 年生，博士生，研究方向为无线传感器网络。