1000-9825/2002/13(12)2225-06 ©2002 Journal of Software 软 件 学 报 Vol.13, No.12

基于网络演算的流量整形模型*

张信明, 陈国良, 顾 钧

(中国科学技术大学 计算机科学与技术系,安徽 合肥 230027);
(国家高性能计算中心,安徽 合肥 230027)
E-mail: xinming@ah163.com; xinming@ustc.edu.cn
http://www.ustc.edu.cn; http://nhpcc.ustc.edu.cn

摘要: 流量整形对 QoS(quality of service)控制有着重要的影响.总结并优化了最近几年发展起来的能够深刻透视计算机网络业务流控制问题的网络演算技术,采用网络演算技术建立了包括贪婪无损失整形器、无缓冲区整形器及固定缓冲区长度整形器的一般性模型,获得了 3 种整形器的输入/输出特性以及整形器可提高 QoS 控制机制的效率等结果.

关 键 词: 流量;整形;服务质量;网络演算;Internet
中图法分类号: TP393 文献标识码: A

采用简单的尽力服务(best-effort)模型、FCFS(first come first served)调度算法的传统 Internet 虽然具有最好的可扩展性(scalablility),并非常适用于异构型网络及诸如电子邮件、文件传输等弹性(elastic)业务,但却不能保证实时多媒体等刚性(rigid)业务的 QoS.面对以 IPtel(IP telephony)为代表的实时多媒体业务的巨大需求,人们从调整应用行为到对服务模型的扩充等多方面对 Internet 作出改进[1,2].为了实现确定性 QoS 保证,必须指明流量(也称业务量,traffic)的特性规范(流量包络),并在网络入口处对业务流实施接纳控制;另外,业务流在通过路由器(或交换机)时其流量特性会产生变化,所以就需要整形器对流量特性进行监督和调节.最早的整形器是由 Turner 提出的漏桶算法(leaky bucket algorithm)[3],即由 Cruz 提出的 (σ,ρ) 整形器[4,5]. (σ,ρ) 整形器已被 IETF 采用为 IntServ(integrated services)[1]的流量特性规范 TSpec[6].随着人们对综合业务网络研究的不断深入,又发现了整形器在路由器调度机制中的重要作用[7~9].为解决 IntServ 可扩展性问题而出现的流量聚集(aggregation)及 DiffServ(differentiated services)[2]等方案对整形器又提出了新的要求,即整形器对聚集流量的缓冲是受到限制的,否则会产生延迟抖动(delay jitter).以 (σ,ρ) 整形器为基础的网络演算技术近年来取得了一些进展[8,10~16],尤其是最小加代数的引入[16],使得进入曲线、服务曲线等演算工具更具一般性,并且性能界限表示形式更加简洁.

本文研究了比 (σ,ρ) 更一般的整形器及其特性.出于完整性考虑,首先在文献[8,10~17]的基础上总结了网络演算技术的精髓,然后深入、系统地研究了贪婪无损失整形器(最优整形器)、无缓冲区整形器及固定缓冲区长度整形器.

1 网络演算技术

网络演算包括进入曲线、服务曲线及最小代数下的卷积、反卷积等.其中进入曲线限制了进入过程,而服务曲线则限制了网络节点的输入、输出行为.网络延迟的上界由进入曲线与服务曲线间的距离所决定.所以,网

* 收稿日期: 2001-04-27; 修改日期: 2002-04-10
基金项目: 国家重点基础研究发展规划 973 资助项目(G1998030403);中国科学院高水平大学建设资助项目(KYZ2706)
作者简介: 张信明(1964—),男,安徽天长人,博士,副教授,主要研究领域为计算机网络,操作系统;陈国良(1938—),男,安徽颍上人,教授,博士生导师,主要研究领域为并行算法及其应用,并行计算机体系结构;顾钧(1956—),男,江苏大丰人,教授,博士生导师,主要研究领域为 NP 难解问题高效算法及其应用.

络演算具备了从理论上分析 QoS 控制机制所必需的业务流的流量特性模型、路由器的调度策略及性能界限这 3 个基本要素.

1.1 基本术语

定义 1. 广义递增函数集合 F, F_0.

$$F=\{f(t)|f(0)\ge 0,\forall u\le t\ \ f(u)\le f(t),t\in[0,+\infty)\};$$

$$F_0=\{f(t)|f(t)\in F,f(0)=0\}.$$

$f(\cdot)$ 连续且存在一阶导数.

定义 2. 最小运算.

$$(f\oplus g)(t)=\min[f(t),g(t)],\ f,g\in F.$$

定义 3. 最小加卷积.

$$(f\otimes g)(t)=\min_{0\le u\le t}[f(u)+g(t-u)],\ f,g\in F.$$

定义 4. 突发延迟函数 $\delta_T(t)$.当 $0\le t\le T$ 时, $\delta_T(t)=0$,而当 $t>T$ 时, $\delta_T(t)=+\infty$.

引理 1. 对于 $\forall f\in F$, $f\otimes\delta_0=\delta_0\otimes f=f$ 成立,即 δ_0 为 $\otimes$ 运算的单位元.

引理 2. 对于 $\forall f\in F$, $f\otimes\delta_d=f(t-d)$ 成立.

定义 5. 子加.对于 $f\in F$,若 $f(t_1+t_2)\le f(t_1)+f(t_2)$ 成立,则称 f 满足子加性质.

定义 6. 子加闭包.对于 $f\in F$, f 的子加闭包 f^* 为

$$\begin{cases}f^*(0)=0,\\ f^*(t)=\min[f(t),\min_{0<u<t}[f^*(u)+f^*(t-u)]],t>0.\end{cases}$$

引理 3. f 的子加闭包 f^* 满足:① $f^*\in F_0$;② 子加性质;③ $f^*\le f$.

引理 4. 当且仅当 $f\in F_0$ 且 f 满足子加性质时,$f^*=f$.

定义 7. 反卷积运算. $f\varnothing g(t)=\sup_{u\ge 0}[f(t+u)-g(u)],\ f,g\in F$.

定义 8. 虚延迟. $d(t)=\inf\{T:T\ge 0\text{且}I(t)\le O(t+T)\}$.

定义 9. 水平偏差. $h(A,S)=\sup_{u\ge 0}\left[\inf\{T:T\ge 0\text{且}A(u)\le S(u+T)\}\right]$.

定义 10. 积压. $b(t)=I(t)-O(t)$.

1.2 基本工具:进入曲线与服务曲线

定义 11. 进入曲线.对于 $A\in F$,若使输入流量 $I(t)$ 满足 $I\le I\otimes A$,则称 $A(t)$ 为进入曲线或称 I 受限于 A .特别地,当 $A(t)=\sigma+\rho t$ 时,称 I 受限于 (σ,ρ).

引理 5. 当 $A\in F_0$ 并满足子加性质(否则以其子加闭包替代),若输入流量 $I(t)$ 受限于进入曲线 $A(t)$,则 $I=I\otimes A$ 与 $I=I\otimes A^*$ 同时成立.

推论 1. 若业务流 I 受限于 A ,则该业务流亦受限于 A^*.

推论 2. 进入曲线的最小值为 $I\varnothing I$ 并且 $I\varnothing I=(I\varnothing I)^*$.

定义 12. 服务曲线.对于输入流量为 $I(t)$,输出流量为 $O(t)$ 的网络节点 NE ,当且仅当 $O\ge I\otimes S$ 成立时,称 NE 提供了服务曲线 $S(t)$.其中 $I\in F$ (否则以其进入曲线替代), $S\in F$.

定理 1. 对于输入受限于 A 的业务流在经过服务曲线为 S 的网络节点后,其输出受限于 $A\varnothing S$.

定理 2. 当某业务流经过串接的两个网络节点,而第 $h(h=1,2)$ 个网络节点的服务曲线为 S_h ,则串接后的系统能够为该业务流提供的服务曲线为 $S_1\otimes S_2$.

定理 3. 端到端服务曲线 $S_{e2e}=S_1\otimes S_2\otimes\ldots\otimes S_h\otimes\ldots\otimes S_H$,其中第 $h(h=1,2,\ldots,H)$ 个网络节点的服务曲线为 S_h.

1.3 基本性能界限

定理 4. 当受限于 A 的业务流经过服务曲线为 S 的网络节点时,其虚延迟的上界为 $h(A,S)$.

定理 5. 当受限于的业务流经过服务曲线为 S 的网络节点时,其积压上界为 $\sup\limits_{u\ge 0}[A(u)-S(u)]$.

2 贪婪无损失整形器

整形器的基本功能是调节业务流的流量使之符合流量规范的要求.根据定理 1 可知,业务流在穿过网络节点后,其流量特性会发生改变(突发性增加),所以还可以对上游网络节点的输出进行整形,以减轻业务流对下游网络节点的缓冲区需求,并为下游网络节点的调度器提供满足一定流量规范的输入以简化调度.

定义 13. 整形器.它以对输入业务流进行缓冲的方式,保证输入能够遵循进入曲线的限制.

定义 14. 贪婪无损失整形器 GS(greedy lossless shaper).它是一种具有足够多缓存,能够保证被整形的业务流无任何损失,同时输出为其整形曲线最大允许值的整形器.

2.1 整形器的输入输出特性

定理 6. 若 GS 整形器的整形曲线为 A_s,则对于输入 I_s,整形器的输出 $O_{GS}=I_s\otimes A_s^*$.

证明:① 根据定义 6 可得

$$f^*=(\delta_0\oplus f)^*=\lim_{n\to\infty}(\delta_0\oplus f)^{(n)}=\lim_{n\to\infty}(\delta_0\oplus f\oplus f^{(2)}\oplus\ldots\oplus f^{(n)}),$$

其中 $f^{(1)}=f, f(n)=f(n-1)\otimes f$;

② 令整形器的输出为 O_s,则根据定义 14 可得 $O_s=I_s\oplus O_s, O_s\le O_s\otimes A$;

③ 重复应用②可得

$$O_s\le I_s\oplus(O_s\otimes A_s)\le I_s\oplus(I_s\otimes A_s)\oplus(I_s\otimes A_s^{(2)})\oplus\ldots\oplus(I_s\otimes A_s^{(n)})=I_s\otimes(\delta_0\oplus A_s^{(1)}\oplus\ldots\oplus A_s^{(n)});$$

④ 由①、③可得 $O_s\le I_s\otimes A_s^*$;故 GS 整形器的输出为 $O_{GS}=I_s\otimes A_s^*$. □

定理 7. 对于一个具有 A_s 整形曲线的 GS 整形器,若 A_s 满足子加性质且 $A_s(0)=0$,则整形器的服务曲线 $S_s=A_s$.

证明:根据定理 6 可得整形器输出 $O_{GS}=I_s\otimes A_s^*$;由于整形曲线 $A_s\in F_0$ 且满足子加性质,依据引理 4 可得 $O_{GS}=I_s\otimes A_s$,故整形器的服务曲线为 A_s. □

定理 8. 对于一个具有 A_s 整形曲线的 GS 整形器,若 A_s 满足子加性质且 $A_s(0)=0$,则其队列长度 $Q(t)=\sup\limits_{u\le t}[I_s(t)-I_s(u)-A_s(t-u)]$.

证明:由于整形曲线 $A_s\in F_0$ 且满足子加性质,依据引理 4 可得 $A_s=A_s^*$;根据定理 6 可得整形器输出 $O_{GS}=I_s\otimes A_s^*$,所以整形器队列长度 $Q(t)=\sup\limits_{u\le t}[I_s(t)-I_s(u)-A_s(t-u)]$. □

2.2 整形器特性

引理 6. 对于 $f\in F_0$ 且满足子加性质,则对任何 $g\in F$, $h(f,f\otimes g)=h(f,g)$ 成立.

证明:① 由 $f\in F_0$, $g\in F$ 可得 $f\otimes g\le g$,再由定义 9 可得 $h(f,f\otimes g)\ge h(f,g)$;

② 令 $h'=h(f,f\otimes g), h=h(f,g)$, $g'=f\otimes g$,则据定义 9 可得

$$h=\inf\{T\ge 0: f(t)\le g(t+T)\},$$

$$h'=\inf\{T\ge 0: f(t)\le g'(t+T)\};$$

对于 $0<\varepsilon<t+h'$,由 $h'=\inf\{T\ge 0: f(t)\le g'(t+T)\}$ 可得

$$f(t)>g'(t+h'-\varepsilon)=(f\otimes g)(t+h'-\varepsilon)=(f\otimes g)(t'), t'=t+h'-\varepsilon;$$

再由定义 3 即可得

$$f(t)>f(u)+g(t'-u), 0\le u\le t';$$

令 $v=t-u$,根据 f 满足子加性质及定义 5 可得

$$f(t)=f(u+v)\le f(u)+f(v)\Rightarrow f(u)+f(v)\ge f(t)>f(u)+g(v+h'-\varepsilon)$$

$$\Rightarrow f(v) > g(v+h'-\varepsilon) \Rightarrow h'-\varepsilon \le h \Rightarrow h(f, f\otimes g) \le h(f,g);$$

故由①②可得 $h(f, f\otimes g) = h(f,g)$. □

引理 **7**. 对于 $f_1, f_2 \in F_0$ 并均满足子加性质,若 $f_1 \le f_2$,则对任何 $g \in F$, $h(f_1, f_2\otimes g) = h(f_1, g)$ 成立.

证明:由 $f_1, f_2 \in F_0$, $f_1 \le f_2$, $g\in F$,可得 $f_1\otimes g \le f_2 \otimes g \le g \Rightarrow h(f_1, f_1\otimes g) \ge h(f_1, f_2\otimes g) \ge h(f_1, g)$;再根据 f_1, f_2 满足子加性质及引理 6,可得 $h(f_1, f_1\otimes g) = h(f_1, g) \ge h(f_1, f_2\otimes g) \ge h(f_1, g)$,故 $h(f_1, f_2\otimes g) = h(f_1, g)$. □

定理 **9**. 假定一个受限于进入曲线 A 的业务流依次经过网络节点 NE_1, NE_2,当将一个具有整形曲线 $A_s \ge A$ 的 GS 整形器置于 NE_1 与 NE_2 之间时,若 $A_s \in F_0$ 且满足子加性质,则整形器的引入不改变业务流延迟上界.

证明:根据推论 1 可知,受限于进入曲线 A 的业务流亦受限于进入曲线 A^*,而 $A^* \in F_0$ 并满足子加性质且 $A^* \le A$,所以视业务流的进入曲线为 A^*;令 NE_1, NE_2 的服务曲线分别为 S_1, S_2,当无整形器时,业务流依次经过网络节点 NE_1, NE_2 获得的服务曲线为 $S_1\otimes S_2$(据定理 2),此时业务流延迟上界为 $h(A^*, S_1\otimes S_2)$(根据定理 4);由定理 7 和 $A_s \in F_0$ 且满足子加性质可得,整形器的服务曲线为 A_s,这样将整形器置于 NE_1 与 NE_2 之间后业务流获得的服务曲线为 $S_1\otimes A_s \otimes S_2 = A_s \otimes S_1 \otimes S_2$,据此服务曲线可得,引入整形器之后的业务流延迟上界为 $h(A^*, A_s\otimes S_1\otimes S_2)$;由于 $A_s \ge A \ge A^*$,且 $A^*, A_s \in F_0$ 并均满足子加性质,故据引理 7 可得 $h(A^*, A_s\otimes S_1\otimes S_2) = h(A^*, S_1\otimes S_2)$,即整形器的引入不改变业务流延迟上界. □

注:当条件 $A_s \ge A$ 得不到满足时,显然整形器的引入会增加端到端延迟.然而当业务流经过的所有网络节点均采用相同的整形器时,则仅有第 1 个整形器会增加延迟,而其余整形器均不会再增加延迟.

定理 **10**. 对于一个受限于进入曲线 A 的业务流经过一个具有整形曲线 A_s 的 GS 整形器,若 $A_s \in F_0$ 且 A_s 满足子加性质,则整形器的输出仍受限于原进入曲线 A.

证明:根据定义 11,未经整形器的业务流 I 受限于进入曲线 A,即 $I \le I\otimes A$;由 $A_s \in F_0$, A_s 满足子加性质及定理 6 可得,整形器输出

$$O_{GS} = I\otimes A_s^* = I\otimes A_s \le (I\otimes A)\otimes A_s = (I\otimes A_s)\otimes A = O_{GS}\otimes A,$$

即 $O_{GS} \le O_{GS}\otimes A$. □

3 无缓冲区的整形器

定义 **15**. 无缓冲区的整形器 TC(traffic clipper).TC 是一种无缓冲区,但能将丢弃行为降到最低的整形器.

定理 **11**. 若 TC 整形器的整形曲线为 A_s,则对于输入 I_s,整形器的输出 $O_{TC} = (\hat{I}_s \oplus A_s)^*$.其中 $\hat{I}_s(u,t) = I_s(t) - I_s(u)(u \le t)$.

证明:令整形器的输出为 O_s,则根据定义 15 可得 $O_s \le O_s \otimes A_s$,

$$O_s(t) - O_s(u) \le I_s(t) - I_s(u) = \hat{I}_s(u,t)(\forall u \le t),$$

由 $O_s(t) - O_s(u) \le \hat{I}_s(u,t)$ 可得 $O_s \le O_s \otimes \hat{I}_s$.这样

$$O_s = O_s \oplus (O_s\otimes A_s) \oplus (O_s \otimes \hat{I}_s) = O_s \otimes (\delta_0 \oplus A_s \oplus \hat{I}_s) = O_s \otimes (A_s \oplus \hat{I}_s),$$

重复应用该式可得

$$O_s = O_s \otimes (A_s \oplus \hat{I}_s)^* = O_s \otimes (\hat{I}_s \oplus A_s)^*,$$

再由前式及 $O_s(0) = 0$ 可得 $O_s \le (\hat{I}_s \oplus A_s)^*$,而 $(\hat{I}_s \oplus A_s)^* \otimes (\hat{I}_s \oplus A_s)^* = (\hat{I}_s \oplus A_s)^*$,故 $O_{TC} = (\hat{I}_s \oplus A_s)^*$. □

定理 **12**. 若 TC 整形器的整形曲线为 A_s,则对于输入 I_s,整形器累积丢弃的数据为

$$L(t) = \sup_{\Gamma}[\textstyle\sum_{i=1}^{k}[\hat{I}_s(t_{i-1}, t_i) - \hat{A}_s(t_{i-1}, t_i)]^+],$$

其中 $\Gamma = \{t_0, t_1, ..., t_k \mid t_0 = 0 < t_1 < ... < t_k = t\}$,即 $\Gamma \subseteq [0,t]$;

$$\hat{I}_s(u,t) = I_s(t) - I_s(u)(u \le t);\ \hat{A}_s(u,t) = A_s(t-u);\ x^+ = \max(0,x).$$

证明:① 根据定义 6 可得 $f^*(u,u) = 0, f^*(u,t) = \min_{u \le v < t}[f^*(u,v) + f(v,t)]$;

② 令整形器的输出为 O_s,则根据定理 11 及①可得

$$O_s(t)=\min_{0\le u<t}[O_s(u)+\min[\hat{I}_s(u,t),A_s(u,t)]] =\min[\min_{0\le u<t}[O_s(u)+\hat{I}_s(u,t)],\min_{0\le u<t}[O_s(u)+A_s(u,t)]];$$

③ 根据定义 15 可得

$$O_s(t)-O_s(u)\le I_s(t)-I_s(u)=\hat{I}_s(u,t)(\forall u\le t)\Rightarrow O_s(u)+\hat{I}_s(u,t)=O_s(u)+\hat{I}_s(u,t_{k-1})+\hat{I}_s(t_{k-1},t_k)$$
$$\ge O_s(u)+O_s(t_{k-1})-O_s(u)+\hat{I}_s(t_{k-1},t_k) =O_s(t_{k-1})+\hat{I}_s(t_{k-1},t_k);$$

④ 由②、③可得

$$O_s(t_k)=\min[O_s(t_{k-1})+\hat{I}_s(t_{k-1},t_k),\min_{0\le u<t}[O_s(u)+\hat{A}_s(u,t)]];$$

⑤ $$L(t)=\sum_{i=0}^{k}[\hat{I}_s(t_{i-1},t_i)-(O_s(t_i)-O_s(t_{i-1}))];$$

故由④、⑤可得

$$L(t)=\sup_{\Gamma}\sum_{i=1}^{k}[\hat{I}_s(t_{i-1},t_i)-\hat{A}_s(t_{i-1},t_i)]^{+}.$$ □

4 固定缓冲区长度的有损失整形器

定义 **16**. 缓冲区长度固定的有损失整形器 SFB(shaper with finite buffer). SFB 是一种缓冲区长度固定且不能保证输入业务流不受损失,但输出为其最大允许值的整形器.

定理 **13**. 若 SFB 整形器的整形曲线为 A_s,缓冲区长度为 B_L,则对于输入 I_s,整形器的输出为

$$O_{SFB}=(\hat{I}_s\oplus(A_s+B_L))^{*}.$$

整形器累积丢弃的数据

$$L(t)=\sup_{\Gamma}\{\sup_{\Gamma}[\sum_{i=1}^{k}[\hat{I}_s(t_{i-1},t_i)-\hat{A}_s(t_{i-1},t_i)]^{+}]-kB_L\}.$$

其中 $\Gamma=\{t_0,t_1,...,t_k|t_0=0<t_1<...<t_k=t\}$,即 $\Gamma\subseteq[0,t]$; $\hat{I}_s(u,t)=I_s(t)-I_s(u)(u\le t)$; $\hat{A}_s(u,t)=A_s(t-u)$.

证明:由于整形曲线为 A_s,缓冲区长度为 B_L 的 SFB 整形器可视为整形曲线为 A_s+B_L 的 TC 整形器,故由定理 11 和定理 12 可得

$$O_{SFB}=(\hat{I}_s\oplus(A_s+B_L))^{*},$$
$$L(t)=\sup_{\Gamma}\{\sup_{\Gamma}[\sum_{i=1}^{k}[\hat{I}_s(t_{i-1},t_i)-\hat{A}_s(t_{i-1},t_i)]^{+}]-kB_L\}.$$ □

5 结束语

网络演算技术是近年来为在综合服务网络中提供确定性 QoS 保证而发展起来的一种数学工具,本文利用它研究了构成提供 QoS 保证重要部分的流量整形器的一般性模型.通过研究我们获得了贪婪无损失整形器、无缓冲区的整形器及固定缓冲区长度的整形器的一般形式、输入/输出特性,以及贪婪无损失整形器对业务流延迟上界不产生影响等结果.

References:

[1] Clark, D., Shenker, S. Integrated services in the Internet architecture: an overview. RFC1633, 1994.

[2] Blake, S., Black, D., Carlson, M., *et al* . An architecture for differentiated services. RFC2475, 1998.

[3] Turner, J.S. New directions in communications (or which way to the information age?). IEEE Communications Magazine, 1986,24(10):8~15.

[4] Cruz, R.L. A calculus for network delay, part Ⅰ: network elements in isolation. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(1):114~131.

[5] Cruz, R.L. A calculus for network delay, part Ⅱ: network analysis. IEEE Transactions on Information Theory, 1991,37(1): 32~141.

[6] Shenker, S., Wroclawski, J. General characterization parameters for integrated service elements. RFC2215, 1997.

[7] Zhang, H., Ferrari, D. Rate-Controlled service disciplines. Journal of High Speed Networks, 1994,3(4):389~412.

[8] Cruz, R.L. SCED+: efficient management of quality of service guarantees. In: Guerin, R., ed. Proceedings of the IEEE INFOCOM'98. San Francisco: IEEE Computer Society Press, 1998.625~634.

[9] Peris, V. Architecture for guaranteed delay service in high speed networks [Ph.D. Thesis]. University of Maryland, 1997.

[10] Sariowan, H. A service curve approach to performance guarantees in integrated service networks [Ph.D. Thesis]. San Diego: University of California, 1996.

[11] Le Boudec, J.Y., Thiran, P. Network Calculus. Berlin: Springer-Verlag, 2001.

[12] Chang, C.S. On deterministic traffic regulation and service guarantees: a systematic approach by filtering. IEEE Transactions on Information Theory, 1998,44(3):1097~1110.

[13] Chang, C.S., Cruz, R.L. A time varying filtering theory for constrained traffic regulation and dynamic service guarantees. In: Doshi, B., ed. Proceedings of the IEEE INFOCOM'99. New York: IEEE Computer Society Press, 1999. 63~70.

[14] Agrawal, R., Cruz, R.L., Okino, C.M., *et al*. Performance bounds for flow control protocols. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999,7(3):310~323.

[15] Okino, C.M. A framework for performance guarantees in adaptive communication networks [Ph.D. Thesis]. San Diego: University of California, 1998.

[16] Agrawal, R., Baccelli, F., Rajan, R. An algebra for queueing networks with time varying service and its application to the analysis of integrated service networks, Technical Report, ECE-98-2, ECE Department, University of Wisconsin-Madison, 1998.

[17] Zhang, Xin-ming, Chen, Guo-liang, Gu, Jun. On the computation of end-to-end delay bound in guaranteed service by network calculus. Journal of Software, 2001,12(6):889~893 (in Chinese).

附中文参考文献:

[17] 张信明,陈国良,顾钧.基于网络演算计算保证服务端到端延迟上界.软件学报,2001,12(6):889~893.

A Traffic Shaping Framework Based on Network Calculus*

ZHANG Xin-ming, CHEN Guo-liang, GU Jun

(*Department of Computer Science and Technology*, *University of Science and Technology of China*, *Hefei* 230027, *China*);

(*National High Performance Computing Center*, *Hefei* 230027, *China*)

E-mail: xinming@ah163.com; xinming@ustc.edu.cn

http://www.ustc.edu.cn; http://nhpcc.ustc.edu.cn

Abstract: Traffic shaping has an enormous impact on the provision of QoS (quality of service) guarantees. In this paper, the fundamentals of network calculus, a set of recent developments which provide a deep insight into flow problems encountered in computer networks are summarized and refined. By using network calculus, a general framework of traffic shaping is developed which includes greedy lossless shapers, traffic clippers and shapers with finite buffer to obtain, the input-output characterization of three traffic shapers, and how a traffic shaper can be used at all network elements to improve the efficiency of QoS mechanisms.

Key words: traffic; shaping; quality of service; network calculus; Internet

* Received April 27, 2001; accepted April 10, 2002

Supported by the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.G1998030403; the High-Level University Construction Foundation of the Chinese Academy of Sciences under Grant No.KYZ2706