

IP 网络传输控制的性能评价标准研究

林 闯, 周文江, 田立勤

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘 要: 性能评价标准是进行网络传输控制机制和算法研究的一个非常重要的问题. 由于传输控制本身的多目标性, 导致了性能评价标准也需要同时考虑多项内容, 即需要研究综合性能评价标准. 本文通过讨论包括服务质量、服务数量和公平性在内的性能评价指标、性能评价的时间尺度和评价粒度等几个基本问题, 针对不同的粒度, 分别从有效性和公平性两个方面提出了相应的性能评价标准. 在有效性方面, 定义了规格化性能函数这一概念, 把时延、丢包率等服务质量和数量统一在一起进行评价; 在公平性方面, 利用随机过程均值和方差的关系, 以及 Raj Jain 公平指数的改进公式进行评价.

关键词: 传输控制; 综合性能评价标准; 服务质量; 服务数量; 公平性; 规格化性能函数

中图分类号: TP302 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 12A-1973-05

Research on Performance Evaluation Criteria for IP Network Traffic Control

LIN Chuang, ZHOU Wen-jiang, TIAN Li-qin

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Performance evaluation criterion is one of the most important issues for design of network traffic control mechanisms and algorithms. Due to multiple performance objectives of network traffic control, performance evaluation criteria must include multiple performance metrics executed simultaneously; these are called integrated performance evaluation criteria, the research purpose of this paper. Based on the study of some basic issues such as evaluation objectives (including quality of service, quantity of service, and fairness), time scale, and granularity, this paper presents a set of performance evaluation criteria for the effectiveness and fairness respectively. Regarding the effectiveness, this paper puts forward a concept of Normalized Performance Function that integrates the quality of service (including the delay, loss rate, etc.) and quantity of service. Regarding the fairness, two methods are used. One is the relationship of expected value and variance of random process. Another one is the improvement of Raj Jain's Fairness Index.

Key words: traffic control; integrated performance evaluation criteria; quality of service; quantity of service; fairness; normalized performance function

1 引言

传输控制是实现计算机网络服务质量控制的核心机制. 传输控制的本质在于资源管理, 即控制缓冲队列、链路带宽等网络资源的分配和使用. 传输控制机制和算法的设计需要满足一定的性能要求, 比如系统资源利用率、用户的服务质量、用户之间的公平性等. 而系统性能的好坏是针对一定的性能评价标准而言的, 应用不同的评价标准往往会导致不同的评价结果和传输控制方案设计. 因此性能评价标准对于分析比较现有方案、优化原有方案以及设计新方案都非常重要. 近年来, 关于性能评价标准的研究开始受到越来越多的重视.

Power 公式描述了吞吐率和时延之间的关系^[1], 文献[10]给出了最初的定义, 文[11]详细讨论了其应用方法. 在文[2]

中, 作者比较了吞吐率和时延抖动对不同 IP 分组的影响, 并提出了一个非对称的尽力传送 (Best-effort) 服务模型, 该模型能够针对两类 IP 分组作不同的吞吐率和时延抖动控制. 文[3]对传统的强迫优化 (classical constrained optimization) 和遗传算法 (genetic algorithm) 在吞吐率、公平性和时间复杂度等方面的性能差别进行了深入探讨, 作者提出了一个折衷的方案, 但主要针对带宽的分配. K. Park 在文[4]中讨论了非协作网络 (noncooperative networks) 中进行服务质量控制的问题, 提出了一个基于网络系统优化的模型, 并在平均测量和考虑突发两种情况下分析了丢包率、时延及其抖动等多项 QoS 指标. 但主要问题是没有考虑公平性这一非常重要的指标. F. Kelly 在文[5]中提出了一个考虑成比例公平的速率控制方案, 该方案根据网络资源状态调节每个用户的速率以获得网络资源分配

收稿日期: 2002-06-06; 修回日期: 2002-08-30

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973 计划) 项目 (No. G1999032707); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 课题 (No. 2001AA112080); 国家自然科学基金 (No. 90104002 和 60173012); Intel 公司 IXA 大学研究项目 (No. 9077)

的优化和成比例公平.然而由于网络链路状态频频变化,使得这种对每个用户都要进行控制的方法由于复杂而难以实现.另外,F Kelly 的方案主要是控制用户速率,而没有考虑时延和分组丢失率.关于公平性,Raj Jain 提出了一个公平指数公式^[8],但该指标公式假定公平就是所有用户均等地占用资源,而忽略了系统状态和用户需求.在文[6]中,通过分析对 Web 服务器的实时性和吞吐率的综合要求,作者提出了一个基于随机 Petri 网的性能分析模型.在文[7]中,提出了一个在区分服务系统中将对时延和丢包率的控制结合在一起的综合方案.

从以上总结中可以看到,过去大部分有关性能评价标准的研究都只考虑了问题的单个方面或几个方面,是不够全面的.在文[9]中,作者对综合性能评价标准做了初步探索,提出了 power 公式的改进结果和一种成比例公平的评价标准,但问题是作者主要针对时延和丢包率分别进行 power 公式的改进和比例公平评价,而没有真正实现时延和丢包率的综合.本文则从服务质量、服务数量和系统公平性三个方面出发,提出了一种综合性能评价标准,有效的将系统吞吐率、时延、丢包率等指标统一在一起,并对时间尺度以及评价粒度等问题进行了讨论.

2 几个基本问题

2.1 性能评价的多指标 (multiple metrics)

评价计算机网络传输控制系统的性能,包含两个方面,有效性和公平性.从用户的角度来看,有效性是指端到端时延、时延抖动、分组丢失率等服务质量问题;从系统的角度来看,有效性是指吞吐率、接入的用户数等服务数量问题.服务质量和数量是矛盾的统一体,一般而言,当数量上升到一定程度,质量就会有所下降.公平性也是传输控制的一个重要性能指标.然而,对于公平性,不同的人有着不同的理解.有人认为,公平就是所有用户均等地占用资源,也有人认为,公平是相对而言的,与用户的需求和系统状态有关.本文定义了规格化性能函数这一概念,它包括规格化服务质量函数和规格化服务数量函数.并且认为用户间的公平性是指其规格化性能函数相等.

各种网络应用的服务要求是多种多样的.有的对时延和抖动有严格的要求而对分组丢失率比较宽松,有的则相反.为了表示这些性能指标之间的关系,可以把它们组成一个多维空间,每一维分别代表一项性能指标.具有不同性能要求的应用对应着空间中的不同坐标(区域).如图 1 所示.

同时满足多个性能指标的要求是非常困难的,因为在某些情况下有的指标之间可能存在着矛盾.比如,通过增加队列长度可以降低分组丢失率,但同时却可能增大了时延.因此,需要在具有矛盾性的指标之间寻求最佳的权衡(tradeoff).

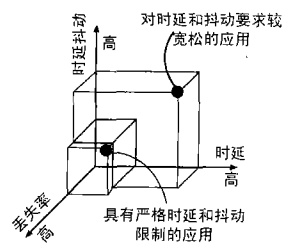


图 1 性能指标的多维空间

2.2 性能评价的时间尺度 (time scale)

进行系统性能评价,通常要选择一定的时间间隔 $\Delta t = t_2 - t_1$ 作为评价的时间尺度,而 Δt 的大小会影响评价结果.

如果 Δt 较大,评价结果代表了长期的平均性能(时间均值),可以反映相对稳定的变化趋势.

如果 Δt 很小,则其结果代表了瞬时性能,可以反映短期的变化状态(抖动情况).

只评价长期的平均性能或者短期的瞬时性能有时候并不能完整地反映系统的性能,尤其是当数据流存在突发性或者数据流是短连接时,系统的瞬时性能可能会偏离于平均性能,产生抖动.因此,需要同时考虑两个时间尺度.

2.3 性能评价的粒度 (granularity)

传输控制一般基于一定的系统服务模型,而不同的服务模型有不同的控制粒度.比如综合服务(InteServ)以流为对象,而区分服务(DiffServ)则以类(流的聚合,Aggregate)为对象.本文所研究的性能评价标准不以特定的服务模型为基础,而是考虑了一般性,对流、类等分别加以讨论.

流:本文中,流(或者叫微流)是指一串具有相同源 IP 地址、目的 IP 地址、协议和传输层端口号的分组.对于单个流而言,一般有确定的起止时刻.

流的聚合——类:关于类,有两种描述方法.一是统计性描述,表现为随机过程;二是确定性描述,表现为一种“宏”流,即把某些具有相同特征(比如相同的时延要求)的流会聚在一起,组成更一般的“宏”流.前者通过一定的数学模型可以较为精确地描述数据流的行为特征,因而比较适合用于理论钻研,但在实际使用中却有些困难;而后者则是通过捕捉某些可测量的参数来描述数据流,因而更适合于实践应用.

类的集合:在多队列单服务器的模型系统中,多个队列需要竞争服务器资源.比如在输出排队的实际系统中,每个端口一般对应着多个逻辑队列,每个逻辑队列中存放一个或几个类的分组,这些类竞争链路带宽.对于这些类的调度将会影响系统的性能,比如分组在该端口的平均排队时延.

3 综合性能评价标准

3.1 有效性的评价

A 针对流的评价

设类 Class_i 中流 Flow_j 的某项服务质量指标的目标值为,在时刻 t 获得的实际值为 $\phi_{i,j}(t)$.

定义 1 如果 $\phi_{i,j}(t)$ 的值越大代表该项服务质量越好,则定义规格化服务质量函数为:

$$\varphi_{i,j}(t) = \frac{\phi_{i,j}(t)}{\phi_{i,j}^+} \quad (1)$$

定义 1' 如果 $\phi_{i,j}(t)$ 的值越小代表该项服务质量越好(比如时延和分组丢失率),则定义规格化服务质量函数为:

$$\varphi_{i,j}(t) = \phi_{i,j}^{-1}(t) / \phi_{i,j}^{-1} \quad (1')$$

定义 2 在等式(1')中,如果 $\phi_{i,j}(t) = 0$,则等式无意义.为此,定义规格化服务质量函数的界:如果 $\phi_{i,j}(t) = 0$,或 $\phi_{i,j}(t) > M$,则令 $\varphi_{i,j}(t) = M$. M 称为该项规格化服务质量函数的界.

$\varphi_{i,j}(t)$ 可以用来表示用户的满意程度. 如果 $\varphi_{i,j}(t) < 1$, 则表示用户得到不满意的服务; $\varphi_{i,j}(t) = 1$, 则表示用户得到满意的服务; $\varphi_{i,j}(t) > 1$, 则表示用户得到非常满意的服务, 比如某用户获得了比其保证的时延界(delay bound)更小的时延.

对于 n 项服务质量指标, 有:

$$\varphi_{i,j}(t) = \sum_{k=1}^n w_k \times \varphi_{(i,j),k}(t) \quad (2)$$

其中 w_k 为服务质量指标函数 φ_k 的权重, 且有 $\sum_{k=1}^n w_k = 1$.

定义 3 设系统服务数量的目标值和和在时刻 t 获得的实际值分别为 $\Phi_{i,j}$ 和 $\phi_{i,j}(t)$, 则定义规格化服务数量函数为:

$$\vartheta_{i,j}(t) = \phi_{i,j}(t) / \Phi_{i,j} \quad (3)$$

服务质量和服务数量是矛盾的统一体. 虽然对规格化服务质量和规格化服务数量的期望是都能获得较高的值, 但一般而言, 当数量上升到一定程度, 质量就会有所下降. 因此单独考虑服务质量或者服务数量都是不全面的, 不能反映系统的整体性能. 为此, 本文定义规格化性能函数, 把服务数量和服务质量统一在一起.

定义 4 类 Class- i 中流 Flow- j 在时刻 t 的规格化性能函数为:

$$\delta_{i,j}(t) = \vartheta_{i,j}(t) \cdot \varphi_{i,j}(t) \quad (4)$$

如果服务质量代以时延 Delay, 服务数量代以吞吐量 Throughput. 则该规格化性能函数转化为 Power 公式^[1]:

$$\begin{aligned} \delta(t) &= \vartheta(t) \cdot \varphi(t) = \frac{\text{Throughput}(t) \text{Delay}^{-1}(t)}{T D^{-1}} \\ &= K \frac{\text{Throughput}(t)}{\text{Delay}(t)} \end{aligned} \quad (5)$$

可见, Power 公式是本文规格化性能函数的一个特例.

当满足下面的条件时, 认为在时刻 t 类 Class- i 中流 Flow- k 获得的综合性能优于流 Flow- j :

$$\delta_{i,k}(t) > \delta_{i,j}(t) \quad (6)$$

但以上反映的只是短期(或者说瞬时)性能, 是不够充分的, 还需要比较长期的平均性能(时间均值).

设流的起止时刻分别为 t_s 和 t_e , 则类 Class- i 中流 Flow- j 的平均性能为:

$$P_{\delta,(i,j)} = \frac{1}{t_e - t_s} \int_{t_s}^{t_e} \delta_{i,j}(t) dt \quad (7)$$

当满足下面的条件时, 认为类 Class- i 中流 Flow- k 获得的综合平均性能优于流 Flow- j :

$$P_{\delta,(i,k)} > P_{\delta,(i,j)} \quad (8)$$

B 针对类的评价

如果把类描述为随机过程, 则类 Class- i 的规格化性能函数可表示为该类中所有流的规格化性能函数的统计均值(集均值):

$$\bar{\delta}_i(t) = \bar{\delta}_i(t) = E[\delta_{i,j}(t)] \quad (9)$$

如果把类看作是“宏”流, 则类 Class- i 的规格化服务质量函数和规格化服务数量函数分别为:

$$\varphi_i(t) = \psi_i(t) / \Psi_i \text{ 或 } \varphi_i(t) = \psi_i^{-1}(t) / \Psi_i^{-1} \quad (10)$$

$$\vartheta_i(t) = \phi_i(t) / \Phi_i \quad (11)$$

其中 Ψ_i 、 Φ_i 、 $\psi_i(t)$ 和 $\phi_i(t)$ 分别为类 Class- i 的服务质量和数量目标值和获得的实际值.

则规格化性能函数为:

$$\delta_i(t) = \vartheta_i(t) \cdot \varphi_i(t) \quad (12)$$

当满足下面的条件时, 认为在时刻 t , 类 Class- k 获得的综合性能优于类 Class- j :

$$\delta_k(t) > \delta_j(t) \quad (13)$$

取时间间隔 $[t, t + \Delta t]$, 则类 Class- i 的平均性能为:

$$P_{\delta,i} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \delta_i(t) dt \quad (14)$$

当满足下面的条件时, 认为类 Class- k 获得的综合平均性能优于类 Class- j :

$$P_{\delta,k} > P_{\delta,j} \quad (15)$$

C 针对类的集合的评价

采用同前面 B 相似的方法, 可以分析类的集合的性能. 设其服务质量、服务数量函数和总体性能函数分别为 $\varphi(t)$ 、 $\vartheta(t)$ 和 $\delta(t)$, 则:

$$\delta(t) = \bar{\delta}(t) = E[\delta_i(t)] \quad (16)$$

或者由式(17)和(18)得出(19):

$$\varphi(t) = \psi(t) / \Psi \text{ 或 } \varphi(t) = \Psi^{-1}(t) / \psi^{-1} \quad (17)$$

$$\vartheta(t) = \phi(t) / \Phi \quad (18)$$

$$\delta(t) = \vartheta(t) \cdot \varphi(t) \quad (19)$$

3.2 公平性的评价

本文从规格化性能函数这一概念出发来分析系统公平性, 认为规格化性能函数相等即为公平, 此时也意味着用户的满意程度相等.

关于公平性的评价有两个层次:(1)把类(或类的集合)看作一个整体, 公平性是该整体的特性之一, 但不直接反映具体某几个流(或类)之间的公平性好坏;(2)比较具体某几个流(或类)之间的公平性. 实际上, 由于采用了规格化性能函数这一概念, 使得第二层次的评价非常简单: 当规格化性能函数相等时, 两个流(或类)之间是公平的; 否则不公平, 而且规格化性能函数值较大的流(或类)获得更好的服务. 这一点类似于文[9]中提出的成比例公平的评价方法. 因此, 本文主要讨论第一层次的公平性问题.

A 流之间的公平性

A.1 方法一: 利用均值和方差

在随机过程中, 方差表示随机变量的实际值对于均值(集均值)的偏离程度. 因此, 可以基于均值和方差的关系来研究公平性.

设类 Class- i 中流 Flow- j 的规格化服务质量函数、服务数量函数和总的性能函数分别为 $\varphi_{i,j}(t)$ 、 $\vartheta_{i,j}(t)$ 和 $\delta_{i,j}(t)$, 则类 Class- i 中所有流的均值(集均值)为式(9), 方差为:

$$\sigma_{\delta,i}(t) = \text{Var}[\delta_{i,j}(t)] \quad (20)$$

则类 Class- i 中所有流的公平系数为:

$$\eta_{\delta,i} = \sigma_{\delta,i}(t) / \bar{\delta}_i(t) \quad (21)$$

$\eta_i(t)$ 值越小, 表示类 Class- i 中所有流获得的性能差距越小, 则公平性越好.

由于不同类型的应用有各自适应的随机模型,而且难于验证一个数据流是否符合某种随机模型,因此在实践中计算均值和方差有一定的困难.这使得前面运用随机过程均值和方差间的关系来分析公平性的方法虽然适合于理论研究,但在实际使用中却有些困难.

下面将提出另外一种分析方法,与前者相比,该方法可基于系统测量,因而更适合于实际应用.

A.2 方法二:基于 Raj Jain 的公平指数(Fairness Index)

Raj Jain 提出了一个评价拥塞控制机制公平性的公式^[8].假定公平意味着所有用户均等的占用资源,又假定所有路径长度相等.若系统中有 n 个流,其吞吐率分别表示为 (x_1, x_2, \dots, x_n) ,则系统公平指数公式为:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 / n \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (22)$$

本文基于 Raj Jain 的公平指数公式,提出新的公平指数.根据我们公平即为规格化性能函数值相等这一假定,得出类 Class $_i$ 中所有流的公平指数为:

$$f_{\delta,i}(\delta_{i,1}, \delta_{i,2}, \dots, \delta_{i,n}) = \left(\sum_{j=1}^n \delta_{i,j} \right)^2 / n \sum_{j=1}^n \delta_{i,j}^2 \quad (23)$$

可以看出,当所有 $\delta_{i,j}$ 都相等时,

$$f_{\delta,i}(\delta_{i,1}, \delta_{i,2}, \dots, \delta_{i,n}) = \left(\sum_{j=1}^n \delta \right)^2 / n \sum_{j=1}^n \delta^2 = 1 \quad (24)$$

表示类 Class $_i$ 的公平性最好.而且 $f_{\delta,i}$ ($f_{\delta,i} \leq 1$) 的值越小,表示公平性越差.

假设某个流的规格化性能函数变为 $\delta + \Delta$, $\Delta > 0$, 则:

$$f'_{\delta,i}(\delta_{i,1}, \delta_{i,2}, \dots, \delta_{i,n}) = \frac{(n\delta + \Delta)^2}{n(n\delta^2 + 2\delta\Delta + \Delta^2)} = \frac{n^2\delta^2 + 2n\delta\Delta + \Delta^2}{n^2\delta^2 + 2n\delta\Delta + n\Delta^2} < 1 \quad (25)$$

表示类 Class $_i$ 的公平性较差.

或者,假设某个流的规格化服务质量为 $\delta + \Delta$, 而另外某个流的规格化服务质量为 $\delta - \Delta$, 则

$$f''_{\delta,i}(\delta_{i,1}, \delta_{i,2}, \dots, \delta_{i,n}) = \frac{n^2\delta^2}{n^2\delta^2 + 2n\Delta^2} < 1 \quad (26)$$

而且

$$\frac{n^2\delta^2}{n^2\delta^2 + 2n\Delta^2} < \frac{n^2\delta^2 + 2n\delta\Delta + \Delta^2}{n^2\delta^2 + 2n\delta\Delta + n\Delta^2} \quad (27)$$

即:

$$f'_{\delta,i}(\delta_{i,1}, \delta_{i,2}, \dots, \delta_{i,n}) < f''_{\delta,i}(\delta_{i,1}, \delta_{i,2}, \dots, \delta_{i,n}) \quad (28)$$

表示公平性更差.

以上反映的是短期(或者说瞬时)的公平性,下面分析长期(时间均值)的公平性.由于流一般都有比较短的持续时间,有确定的起止时刻.因此在较长的时间间隔 $[t, t + \Delta t]$ 内,可能会不断地有旧的流结束,有新的流产生.另外所谓公平性,应该是指同时处于活动状态的流之间的公平性.因为只有同时处于活动状态的流,才会竞争资源.所以,不能直接把流的平均性能代入公平指数公式.而采取如下方法:

类 Class $_i$ 在较长时间间隔 $[t, t + \Delta t]$ 内的公平指数为:

$$F_{\delta,j} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} f_{\delta,j}(\delta_{i,1}, \delta_{i,2}, \dots, \delta_{i,n}; t) \quad (29)$$

B 类之间的公平性

B.1 方法一:利用均值和方差

设类 Class $_i$ 的规格化服务质量函数、服务数量函数和总的性能函数分别为 $\varphi_i(t)$ 、 $\varrho_i(t)$ 和 $\delta_i(t)$, 则系统中所有类的均值(集均值)为式(16), 方差为:

$$\sigma_{\delta}(t) = \text{Var}[\delta_i(t)] \quad (30)$$

则系统中所有类的公平性系数为:

$$\eta_{\delta}(t) = \sigma_{\delta}(t) / \bar{\delta}(t) \quad (31)$$

$\eta(t)$ 值越小,表示系统中所有类获得的性能差距越小,则公平性越好.

B.2 方法二:基于 Raj Jain 的公平指数(Fairness Index)

系统中所有类的公平指数为:

$$f_{\delta}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n) = \left(\sum_{i=1}^n \delta_i \right)^2 / n \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \quad (32)$$

当所有 δ_i 相等时, $f_{\delta} = 1$, 则系统公平性最好.而且 f_{δ} ($f_{\delta} \leq 1$) 值越小,公平性越差.

4 应用

本文所提出的综合性能评价标准可用于两个目的:(1)比较现有网络传输控制方案的优劣,进行选择、优化,或设计新的方案;(2)判断网络状态,更新系统配置,进行反馈控制和调节.

比如,利用和文[11-14]中类似的方法,从很轻的网络负载开始,逐步提高注入网络的数据流量,测量并计算式(19)和式(32)的值.当式(19)到达峰值时,如果再继续增加网络流量,则网络会因为负载过重而性能下降.因此式(19)处于峰值时的网络负载是最佳的,网络管理者可以根据(19)的值的控制网络负载.另外,如果式(32)的值接近于1,则表明目前网络中各个数据类之间具有良好的公平性,即所获得的服务水平(满意程度)基本相等;反之,如果式(32)的值远小于1,则表明目前网络中各个数据类之间具有较差的公平性.

当网络处于不良状态(比如负载过重,出现拥塞,或者公平性较差)时,可采取短期的或长期的调节措施.作为短期措施,可以通过拒绝接纳新的流来限制网络流量;作为长期措施,可以更新系统配置比如改变队列的数量或容量、改变控制策略比如加入流量整形机制、改变队列管理算法或分组调整算法参数等.

5 结论

由于问题的复杂性,研究综合性能评价标准需要某种方法学的指导.一种方法是通过对现有的单独评价标准进行改进,或将几种单独评价标准结合在一起,形成综合标准.另外一种方法则是不完全依赖于现有的单独评价标准,而是从另外的角度设计新的标准.但无论采用何种方法,一般首先要定义一个合理有效的性能分析模型.该模型能够同时反映多项传输控制的性能指标以及这些指标间的内在关系.通过研究这些性能指标的内在关系,找出综合性能评价标准.本文主要采用了第二种方法,即通过定义系统规格化服务函数把各种

性能指标统一在一起。

本文主要贡献如下:(1)讨论了包括服务质量、服务数量和公平性在内的性能评价指标、性能评价的时间尺度和评价粒度等几个基本问题;(2)针对不同的粒度,分别从有效性和公平性两个方面提出了相应的性能评价标准。在有效性方面,引入了规格化性能函数这一概念,把时延、丢包率等服务质量和服务数量统一在一起进行评价;在公平性方面,则分别利用随机过程均值和方差的关系,以及 Raj Jain 公平指数的改进公式进行评价。

参考文献:

- [1] Peterson L L, Davie B S. Computer Networks: A System Approach, Second Edition[M]. Morgan Kaufmann Publisher, Inc, 2000. 454 - 456.
- [2] Hurley P, Boudec J L. A proposal for an asymmetric best-effort service [A]. Proceedings of IWQOS'99[C]. London, 1999. 129 - 132.
- [3] Pitsillides A, Stylianou G, et al. Bandwidth allocation for virtual paths (BAMP): investigation of performance of classical constrained and genetic algorithm based optimization techniques[A]. Proceedings of INFOCOMM'2000[C]. Tel Aviv, 2000. 1501 - 1510.
- [4] Park K, Sitharam M, Chen S. Quality of service provision in noncooperative networks with diverse user requirements[J]. Decision Support Systems, 2000, 28(1): 101 - 122.
- [5] Kelly F, Maulloo A K, Tan D K H. Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability[J]. Journal of the Operational Research Society, 1998, 49(3): 237 - 252.
- [6] Lin C, Shan Z, Yang Y. Integrated schemes of request dispatching and selecting in web server clusters[A]. Proceedings of WCC2000[C]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 922 - 930.
- [7] Lin C, Sheng L. An integrative scheme of differentiated services[A]. Proceedings of MASCOTS' 2000[C]. San Francisco CA, 2000. 441 - 448.
- [8] Peterson L L, Davie B S. Computer Networks: A System Approach, Second Edition[M]. Morgan Kaufmann Publisher, Inc, 2000. 456 - 457.
- [9] Jiang Yong, Lin Chang, et al. Integrated performance evaluating criteria for network traffic control [A]. Proceedings of IEEE Symposium on Computers and Communications 2001 (ISCC'01)[C]. Tunisia, 2001. 438 - 443.
- [10] Gessler A, Haanle J, et al. Free buffer allocation-An investigation by

simulation[J]. Computer Networks, 1978, 2: 191 - 204.

- [11] Kleinrock L. Power and deterministic rules of thumb for probabilistic problems in computer communications[A]. Proceedings of the International Conference on Communications[C]. June 1979. 43. 1. 1 - 43. 1. 10.
- [12] Paxson V. Measurements and analysis of end-to-end internet dynamics [D]. PhD thesis, Berkeley: University of California, April 1997.
- [13] Paxson V. End-to-end internet packet dynamics[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(3): 277 - 292.
- [14] Paxson V, et al. RFC 2330, Framework for IP performance metrics[S]. May 1998.

作者简介:



林 闯 男, 1948 年 7 月生于辽宁省, 博士, 清华大学计算机系教授, 博士生导师, 计算机网络研究所所长, 同时为《计算机学报》编委, 国家自然科学基金重大研究计划“网络和信息安全”的科学指导专家, 中科院网络中心和北京科技大学兼职教授, 主要研究领域为计算机网络, 系统性能评价, 随机 Petri 网, 逻辑推演和推理系统。曾在美国 Purdue 大学、美国 Texas 大学奥斯汀分校、香港科技大学、香港浸会大学和美国 Florida 大学长期做研究工作。已主持国家重点基础研究发展规划(973)、国家高技术研究发展计划(863)、国家自然科学基金、国家科技攻关和国际科研项目等 10 多项课题的研究, 并多次获奖。已在 IEEE Transactions on Computers, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, ACM Journal of Wireless Networks, International Journal of Intelligent Systems, IEICE Transactions on Fundamentals, Computer Networks Journal, 计算机学报, 软件学报、电子学报、通信学报等国内外一级期刊上和 IEEE Computer Society 的学术年会上发表论文 90 多篇, 并在国内出版专著 2 本。



周文江 男, 1975 年 5 月生于河北省, 清华大学计算机系 2002 级硕士研究生, 主要研究领域为计算机网络, 系统性能评价和分组调度算法。