

# QoS 路由的不确定信息研究:形式化描述与分析<sup>\*</sup>

桂志波 胡仲海

(南京邮电学院计算机科学与技术系 南京210003)

Research on Uncertain Information for QoS Routing: Formalization Description and Analysis

GUI Zhi-Bo HU Zhong-Hai

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Posts and Communications, Nanjing 210003)

**Abstract** In order to guarantee network quality of service (QoS), QoS routing algorithms try to find an optimal path that can provide sufficient resources to accommodate the performance requirements such as delay, jitter, bandwidth, loss rate and so on required by applications. According to unique or multiple metrics, most of the existing routing algorithms take bandwidth and propagation delay as routing metrics and find out the smallest propagation delay path among all widest paths and so on. Realistic networks are a kind of time-varying, dynamic and complex systems, so the network state information required by QoS routing is uncertain inherently. In this paper, formalization description of uncertain information for QoS routing is carried, and its emerging causes are analyzed. Then, the relevant analytical models and optimization algorithms and solutions for QoS routing with uncertain information are discussed based on bandwidth and delay. Moreover, further research on uncertain information for QoS routing is discussed.

**Keywords** QoS metrics, QoS routing, Uncertain information, Model, Optimization

## 1 引言

网络的服务质量(Quality of Service,简称 QoS),是指网络与用户之间以及网络上互相通信的用户之间关于信息传输与共享的性能的约定。IETF 提出了多种服务模型与机制,如,综合业务(IntServ)、区分业务(DiffServ)、多协议标签(MPLS)、流量工程(TE)及基于约束的路由(CBR)等,以满足对 QoS 的需求并用于 Internet 的 QoS 的控制与管理。

对于分组交换的 IP 网络,路由选择是影响网络性能的一个重要因素。为了保证诸如面向连续多媒体流的实时业务的通信质量,使网络资源获得最佳利用,降低成本,改善对用户的服务,基于约束的路由得到了广泛深入的研究。这些研究涉及基于策略的路由和基于 QoS 的路由两个方面,前者根据网络性能以及服务提供商所要求的安全、计费 and 路由偏好等进行路由选择;而后者则侧重于网络的全局性能和业务的 QoS 保证。

概要地说,QoS 路由选择就是为时间敏感的网络应用(如多媒体流的传输)寻找一条由源端到目的端、具有足够资源的路径,以满足端到端的 QoS 参数的约束并使某些性能得到优化,包括收集并不断更新网络的状态信息,以及根据现有的信息为新的连接请求选择一条合适的路由。一个路由算法的性能优劣很大程度上取决于反映网络可利用资源的精确性的有关信息是否收集得完备。

为新的连接请求选择一条符合约束条件的最佳路径时,路由计算必须依靠路由协议的消息机制和相关检测技术<sup>[1]</sup>来获取所需的计算参数,而这些参数并不总是精确的<sup>[2]</sup>,因此不得不考虑网络中可用信息的不确定性。有很多原因造成这些信息是不精确的。这些不精确状态信息对路由选择造成影响的大小往往依赖于所要求的 QoS 类型。当前研究的重点是寻

找“较优”的路径,如,有足够资源可以满足新的需求的路径,尽管拓扑数据库中的状态信息有可能不能精确地反映资源的实际可用情况。换句话说,评估一条路径好坏的标准是其有足够资源满足一条新流的可能性,也就是根据链路上 QoS 参数的概率分布来确定一条或几条具有最大可能满足 QoS 请求业务流的路径。可能性最大的路径也就是最有可能拥有所需资源的路径。为了评估这样一些路径的性能,应当把源端看成具有随机行为的节点,即与不同网络元素相关的性能度量具有其相应的概率分布函数(PDF)<sup>[3]</sup>。然而,需强调的是,这并不意味网络中的节点必须广播概率分布函数,并将其作为链路状态协议的一部分,而应理解为,源端需根据标准的广播参数、一些特征知识以及不精确参数的变化范围来构建 PDF。

## 2 不确定性信息及其产生原因

QoS 路由选择依赖于网络的节点与链路的可利用资源的状态信息,这些状态信息的不确定性一般源于:

(1) 可利用参数的获取机制。网络中有关系拓扑结构与可利用资源的信息一般通过路由协议收集。在现有的协议中,如 OSPF,节点并不广播所有与路由决策有关的参数<sup>[4,5]</sup>。因此,通过网络管理系统(如 SNMP)以及在特定链路上进行主动或被动的测量可以收集到更多的信息。然而,这些机制因网络动态变化只能提供部分的或不精确的信息,由此将造成路由信息的不确定性。

(2) 参数的不精确计算。链路状态参数的计算是基于业务流的测量和预测。所计算出的参数值通常为平均值或上限,这将导致信息的不确定性。比如,决定到邻接节点时延最直接的办法是发送一个特定的 echo 包,并且要求另一方立即回送这个包。通过测量来回的时间并将之除以 2,发送者就可以得到这个时延值。然而,这个值仅仅是个估计值,如果多次进行

<sup>\*</sup> 本项目得到江苏省自然科学基金(BK2001124)和江苏省教育厅自然科学基金(01KJB510001)资助。桂志波 博士后,副教授,主要研究方向为高性能通信网络的业务流建模与分析、QoS 实现技术。

这个测试,就会得到一些完全不同的值。

(3) 过时信息。动态参数,如时延或链路利用率,与网络状况密切相关。理想情况下,每个路由设备应该存有网络中其它节点和链路的当前的相关参数,这样就可以做出最准确的路由决策。但不幸的是,这需要非常频繁地更新因链路和节点的参数变化而改变的有关信息,这种方法在现实中是不可行的<sup>[5]</sup>。一般地,信息的更新频度和路由选择所依赖的网络状态信息的精确性之间存在着均衡问题。一些处理这种问题的链路状态更新策略已经被提出了,常用的有周期性更新策略。然而,这种策略,可能会使链路上参数的主要变化维持一整个周期。这类过时信息会导致路由计算的不精确性。

(4) 分层网络中的聚合信息。在大规模网络中,对于每个网络设备,如交换机和路由器,要求它们保持网络中所有节点和链路的详细信息是不实际的。因此,有人提出了一些办法,从可测量的观点进行网络拓扑与状态的研究。例如,在 PNNI 中,基于分层路由的概念研究可测量问题。每层节点和链路的信息都以递归的形式聚集到上一层,这样上层节点就可以表现为下层节点的聚合。然而,当聚合的层数增加时,详细信息的有效期就随之降低,从而也无法避免不精确性和不确定性<sup>[6~8]</sup>。

(5) 网络的互连。当所有的路由设备都在同一个网络监控下进行操作时,路由信息在节点之间进行正常的交换。互连的网络或许包括了多个操作者和私有网络,这些网络出于保密的需要,或由于不同的监管者使用不同的路由协议和业务工程系统,它们不会广播它们的信息,例如,Internet 的外部路由协议为保持连接性而交换可达信息。

### 3 QoS 路由问题

#### 3.1 QoS 度量

QoS 度量是对性能的测度,主要包括可用带宽、时延、丢失率、延迟抖动、差错率、跳数和代价等<sup>[9]</sup>。因此,可从网络负载、网络性能和传递方式三个方面描述网络的通信服务。路由选择时,端到端的约束通常被分解到相关的各个链路上,QoS 度量值应体现路由的选择标准<sup>[10]</sup>:(1)计算路径的算法必须是有效、可行的;(2)必须反映网络的基本特征以及节点与链路的 QoS 约束;(3)各度量之间应尽量正交。

给定图  $G$  中路径  $P = (a, b, c, \dots, f, g)$ ,用  $D(a, b)$  表示对应链路  $(a, b)$  的度量,则 QoS 度量按性质可分为以下三类<sup>[11]</sup>:

(1) 凸性 QoS 度量,即,若  $D(a, g) = \text{Min}\{D(a, b), D(b, c), \dots, D(f, g)\}$ ,则度量由传输链路中的瓶颈决定。这时,度量仅与路径上的某个瓶颈链路的 QoS 度量值有关,如剩余带宽、剩余缓存区、链路速率等;

(2) 加性 QoS 度量,即,若  $D(a, g) = D(a, b) + D(b, c) + \dots + D(f, g)$ ,则度量由传输通道中所有链路的特性,如时延、时延抖动、代价等共同决定;

(3) 乘性 QoS 度量,即,度量  $D(a, g) = D(a, b) \times D(b, c) \times \dots \times D(f, g)$ ,为各链路对应的度量的乘积,如连接可靠性等。若取  $D'(a, b) = \ln [D(a, b)]$ ,则乘性度量转换为加性度量。

#### 3.2 QoS 路由的基本问题

QoS 路由的基本问题可分为最优化问题和性能界约束问题。前者是寻找使 QoS 度量最优的路径;而后者则是寻找满足 QoS 度量约束的一条路径,可以是满足性能界约束的解

集合中任意一个。优化问题要求最优解,而约束问题则只需次优解。

对于凸性 QoS 度量,可以定义两种基本问题:链路优化路由问题,如,带宽优化路由(寻找一个路由使其瓶颈链路带宽最大);链路约束路由问题,如,带宽约束路由(寻找一条路由使其瓶颈带宽大于给定值)。后者可转化为前者,而前者可直接用改进的 Dijkstra 算法或 Bellman-Ford 算法来解决。

对于加性 QoS 度量,也可以定义两种基本问题:路径优化路由问题,如,最小费用路由(寻找一条路由使其所通过的所有链路的费用的和为最小);路径约束路由问题,如,时延约束路由(寻找一条路由使其传输时延小于给定的值)。它们均可以直接用 Dijkstra 或 Bellman-Ford 算法来解决。

大多数 QoS 路由问题都可以从上面的四种基本问题演化而来。但两个或两个以上具有相同运算的上述 QoS 度量的路由计算是 NP 完备的<sup>[4]</sup>。

## 4 分析模型与解决方案

不确定性对路由选择产生的影响取决于请求流所要求的 QoS 类型。在只有带宽需求的连接中,不确定性的影响相对来说是最小的,而在具端到端延迟需求的连接中,不确定性会对路由选择的复杂性产生显著的影响,而且路由选择过程中的处理难度也会显著增大。

目前对 QoS 路由的不确定性信息的分析与研究,主要基于如下的观点:提出的算法可以尽量减少网络状态信息的不确定性对路由选择产生的影响,使算法可以更好地适应随机动态变化的网络环境。基于此,有关研究可分为两类:(1)基于概率分布函数的最优化方案研究。对于链路状态的概率分布函数,可利用上次通过广播接收到的可用带宽值以及与基于这个值的可能偏移有关的一些信息(这些偏移是基于门限触发的)获得,并根据概率分布确定其满足 QoS 请求的成功概率<sup>[3,12]</sup>;(2)次优化方案研究。考虑到网络可用信息的不确定性,研究能容忍较高级别的不确定性的解决方案,从而提高算法的鲁棒性。

#### 4.1 基于概率分布函数的最优化方案研究

这类具有代表性的工作详见文[1]。该文提出了考虑不确定性参数的网络框架,着重研究基于带宽和延迟需求的 QoS 路由问题,并提出了以下三种分析模型。

用一个有向图  $G = (V, E)$  表示网络,考虑一个源节点和目的节点之间单播(unicast)的情况,  $N = |V|$ ,  $M = |E|$ ,  $|P|$  表示路径  $P$  上链路数,  $f_l(d)$  表示链路  $l$  保证时延绑定为  $d$  的概率,  $\pi_D(P)$  表示端到端时延绑定为  $D$  的概率,  $p_l(w)$  表示链路  $l$  能满足  $w$  单位带宽的概率。

(1) 基于带宽需求的流模型 有关的路由问题可形式化描述为:对于给定带宽需求  $w$ ,在网络  $G$  中找到一条路径  $P^*$ ,使得对于任何路径  $P$ ,存在:  $\prod_{l \in P^*} p_l(w) \geq \prod_{l \in P} p_l(w)$ 。

再借助 MRP(Most Reliable Path) 这一标准的最可靠路径算法,求解该路由问题:MRP 算法是通过计算所选中的链路的权重来计算最短路径,其权重是原来链路上权重的负对数;据此,基于带宽需求的流模型的路由问题就转化为一般的求路径长度的计算。因此,该问题的求解过程可表述为:

Step1 对于所有的链路  $l \in E$ ,使

$$w_l = -\log p_l$$

Step2 根据度量  $\{w_l\}$ , 搜寻最短路径。

这种方法能够以最大概率地满足带宽请求  $w$ , 但是, 不适用于基于速率或时延的模型。

(2) 基于速率的模型 该模型要求每个节点配置有特定的调度算法, 如加权公平队列 (WFQ) 或 RCEDF (Rate Controlled Earliest Deadline First), 则路径  $p$  上的  $n$  跳的端到端时延为:

$$d(p) = \frac{\sigma}{r} + \frac{\sum_{l \in p} c_l}{r} + \sum_{l \in p} d_l \quad (1)$$

其中,  $\sigma$  为网络突发的分组长度,  $r$  为最小保证速率,  $c_l$  为链路传输最大分组长度,  $d_l$  为链路传播时延。

当  $c_l \equiv c$  时, 令  $a_n = \sigma + nc$ , 则

$$d(p) = \frac{a_n}{r} + \sum_{l \in p} d_l \quad (2)$$

由上式可知, 在基于速率的模型中, 端到端的时延门限对网络资源的依赖仅与每条链路上的有效带宽即速率  $r$  有关。因此, 在这种设置中, 最明显的链路度量, 同以前一样仍是有效带宽。每条链路  $l$  相关的度量由链路传播时延  $d_l$  和用于新流的残余速率组成。传播时延并不受流波动的支配, 而残余速率是唯一可变的, 且受到不确定性因素的影响。对于具有带宽需求的流, 假设残余速率是一个带有概率分布函数  $p_l(r)$  (该函数表示在链路  $l$  上可分配到速率  $r$  的概率)。在此假设下, 我们可以描述这一不确定性。正如前面所提到的, 这个分布是基于上一次广播值以及围绕该值所做的一些可能估计。

在评估不确定性对路由选择造成的影响时, 应注意到, 式(1)中的两个时延参数的相对权重很大程度上依赖于路径长度、业务量特性以及速率的分配。但是在长距离的连接中, 比如跨国, 基于速率的条件就不应该被忽略。

(3) 基于时延需求的模型 在这个模型中, 端到端时延范围是通过每个节点的本地时延范围串联而得到的。因此, 一个节点当前需要广播的状态信息不涉及前述的残余速率和带宽, 而要反映其所能提供的时延保证的能力。这属于本地延迟信息, 与不确定性有关。因此有关问题可表述如下。

设  $D$  为一个新流在给定的源端和目的端之间所需要的最大时延,  $G=(V, E)$ ,  $N=|V|$ ,  $M=|E|$ ,  $p_l(d)$  是链路能提供最大时延为  $d$  的概率。与基于速率的模型一样, 重要的是确定本地链路时延的分布, 特别的是, 使  $\pi_D(p)$  为  $\sum_{l \in p} d_l \leq D$  的概率, 其中,  $p$  为路径。为此, 将有关路由选择问题划分为以下三类:

(1) MP (Most Probable Path) 问题 寻找一条路径  $p^*$ , 对于所有的路径  $p$ , 使得  $\pi_D(p^*) \geq \pi_D(p)$ 。那么, 给定路径  $P$  和时延  $D$ , 在路径  $P$  上的划分  $S_D(P) = \{D_l\}_{l \in P}$ , 满足

$$\pi(\{D_l\}_{l \in P}) = P_r \{d_l \leq D_l, \forall l \in P\} = \prod_{l \in P} f_l(D_l)$$

(2) OP (Optimal Partition) 问题 指在一条给定的路径上的节点之间划分端到端延迟需求。其形式化描述为: 给定一条路径  $P$  和时延  $D$ , 找到一个划分  $S_D^*(P) = \{D_l^*\}_{l \in P}$ , 使得  $\pi(S_D^*(P)) > \pi(S_D(P))$ 。

(3) OP-MP (Optimal Partition MP) 问题 在将端到端时延分解为本地时延约束时, 确定一条最有可能满足端到端时延需求的路径。其形式化描述为: 给定一个时延  $D$ , 找到一条路径  $P^*$  和一个划分  $S_D^*(P) = \{D_l^*\}_{l \in P}$ , 使得, 对于任何路径  $P$ ,  $\pi(S_D^*(P^*)) > \pi(S_D^*(P))$ 。该问题与 MP 问题的最大差别是, OP-MP 问题具有优化子结构特性, 而 MP 问题则不具有这个特性<sup>[13]</sup>。

研究表明, 尽管最优划分问题 OP 和 OP-MP, 在一般情况下是 NP 难的, 但是, 可以为多种概率分布, 如指数、正态和平均分布等, 找到有效且准确的解决办法。文[12]通过引入连续代价函数的方法对这类问题进行求解。文[3]分别提出了伪多项式方案、启发式方案以研究上述各问题, 试图给出解决上述问题的一般性框架。而文[14]针对延迟分解问题, 提出了引入离散代价函数进行求解的思路, 并针对不同的条件提出了精确解法和近似解法。

上述所及的各分析方法, 虽然可以在特定的分布条件下获得对问题的最优化解决方案, 但这也不可避免地会增加路由计算的代价。然而, 实际情况对解决方案的实时性要求严格, 这就存在计算的有效性与实时性之间的均衡问题。

因此, 解决方案, 只要能适应用户所能容忍的不确定性, 且具有较小的代价, 就不失为一个好的方案。这类次优化方案, 能容忍较高级别的不确定性, 从而提高了算法的鲁棒性。

#### 4.2 次优化方案研究

按所采用的路由计算策略, 次优化方案可分为两类: 多路由策略方案和分布式路由方案。

(1) 多路由策略方案 文[15~17]中所做的工作具有一定的代表性。这类方案的研究思路趋向于消除一些路径上的偶然发生的问题, 包括由不确定链路状态信息引起的问题。其形式化描述如下: 给定一个由有向无环图 (DAG)  $G(V, A)$  表示的网络, 每条链路的容量为  $b_{ij}$ , 节点  $S$  与  $T$  之间连接的带宽需求为  $B$ , 在节点  $S$  到节点  $T$  之间找到  $K$  条最优路径  $\{P_k^* \mid 0 < k \leq K\}$ , 且满足  $b(P_k^*) \geq B, \forall 0 < k \leq K$ , 其中  $b(P_k^*) = \min_{i,j \in P_k^*} b_{ij}$ , 被称为路径  $P_k$  的瓶颈带宽。此外, 还必须描述这  $K$  条路径的构建和选择策略。每次有新的可用链路状态信息时, 都要构建路径, 而路径选择只在每次连接请求时发生<sup>[15]</sup>。文[16]提出了基于跳数和基于带宽的两类  $K$  最短路由算法以及五种路径选择算法, 其研究结果表明, 多路径在阻塞率和负载平衡方面可以提供更好的路由性能。而文[17]指出, 基于跳数的算法优于基于带宽的算法, 并且网络的拓扑结构对路由算法有很重要的影响。

(2) 分布式路由方案 具有代表性的研究工作主要体现在文[18~20]中。文[18~20]所做的工作主要围绕 TBR (Ticket-based Routing) 及其改进算法 ETBR (Enhanced Ticket-based Routing) 的研究而展开。这些 TBR 类算法的基本思想是并行地搜索多条路径, 从中找到一条符合条件的路径。这种分布式路由方案使得路由的性能和代价之间保持一种动态的平衡, 中间节点的状态信息可用于引导路由选择沿着最有可能的路径进行, 以使成功率最大。TBR 与 ETBR 这两种算法不仅考虑了 QoS 需求, 也考虑代价的优化问题。仿真表明, 这两种算法可以容忍很高程度的不确定性<sup>[18~20]</sup>。

#### 5 进一步的工作

随着网络的急剧扩展和用户需求的日益增加, ISP 的区域性管理不能保证完整的端到端的全路径控制, 因此, 不确定性成为 Internet 不可避免的本征特性。

为 QoS 路由算法引入 QoS 性能参数的概率分布函数, 在概率空间里对路由问题进行求解, 获得最优化或次优化的方案。这是一个有效的思路, 也是一种有益的探索, 但如何获得一个有效的概率分布函数是其关键。这涉及到网络流量模型。精确的网络流量模型至今还是一个未解决的问题, 在用数学方法进行解析分析难以奏效时, 基于测量的统计分析是一种

较有效的经验方法<sup>[21]</sup>。如何选取合适的测量机制,如何利用相关的检测技术来获取相对准确而且及时的参数,是今后有关该方法的研究重点。

网络资源的分布式管理以及不同域之间路由的交织,使得不同的时间或空间的尺度上网络状态信息的精确度或不确定性是不同的<sup>[22]</sup>。而且,不同的时空尺度上 QoS 路由对网络状态信息的精确度有不同的要求,因此,必须在不同的时空尺度下研究不同的监控机制。在一种模型或算法中兼顾每个 QoS 性能指标的优化,是行不通的。一种可能的途径是,在路由的代价函数中体现网络全局的优化策略,结合不同服务模式对业务流的 QoS 保证的侧重程度,考虑数据传送所经过的路由域及其层数,再确定合适的性能优化目标函数进行路由选择<sup>[10,23]</sup>。

**结束语** 随着 Internet 技术的日益普及,基于网络状态信息的 QoS 路由问题能否得到顺利解决与 Internet 是否能提供令人满意的服务密切相关。因此, QoS 路由及其信息的不确定性问题,现已成为下一代 Internet 的 QoS 实现技术的研究重点之一,已经得到越来越广泛深入的研究。

### 参 考 文 献

- Bolot J C. End to end Packet Delay and Loss Behavior in the internet. In: Proc. ACM SIGCOMM, 1993. 289~298
- Anees S, Jennifer R, Kang G. Dynamics of Quality-of-service routing with inaccurate link-state information. Univ of Michigan, Ann Arbor, Technical Report CSE-TR-350-97, Nov. 1997
- Gu'erin R, Orda A. QoS routing in networks with inaccurate information: theory and algorithms. In: Proc. IEEE INFOCOM, Kobe, Japan, 1997. 75~83
- Apostolopoulos G, et al. QoS routing mechanisms and OSPF extensions. Internet Draft, 1997
- Apostolopoulos G, Guerin R, Kamat S. Implementation and performance measurements of QoS routing extensions to OSPF. In: Proc. IEEE INFOCOM, New York, 1999. 680~688
- Kleinrock L, Kamoun F. Hierarchical routing for large networks—Performance evaluation and optimization. Comput Networks, 1977, 1(1): 82~92
- Lee W C. Topology aggregation for hierarchical routing in ATM networks. In: Proc. ACM SIGCOMM, 1995. 82~92
- Gremmelmaier U, Puschner J, Winter M, Jocher P. Performance evaluation of the PNNI routing protocol using an emulation tool. In: Proc. ISS, Toronto, Canada, 1997. 401~408
- Shenker S, Partridge C, Guerin R. Specification of Guaranteed Quality of Service, Request For Comments (Proposed Standard). RFC 2212, Internet Engineering Task Force, Sept., 1997
- 冯径, 顾冠群. 基于不确定参数的 QoS 路由研究. 计算机研究与发展, 2002, 39(5): 533~539
- Wang Z, Crowcroft J. Quality of service routing for supporting multimedia application. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7): 1288~1234
- Lorenz D, Orda A. QoS routing in networks with uncertain parameters. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1998, 6(6): 768~778
- Lorenz D, Orda A. Optimal partition of QoS requirements on unicast paths and multicast trees. In: Proc. INFOCOM, New York, 1999. 246~253
- Raz D, Shavitt Y. Optimal Partition of QoS requirements with Discrete cost functions. In: IEEE INFOCOM, 2000. 613~622
- Wang J, Wang W. A randomized QoS routing algorithm on networks with inaccurate link-state information. Journal of Computer Science and Technology, 2002, 17(1): 38~46
- Korkmaz T, Krunz M. Multi-constrained optimal path selection. In: Proc. IEEE INFOCOM, 2001. 834~843
- Korach E, Ohayon R. Path selection in networks with non-deterministic information. In: Proc. IEEE INFOCOM, 2002. 2227~2231
- Chen S, Nahrstedt K. Distributed QoS routing with imprecise state information. In: Proc. IEEE INFOCOM, Kobe, Japan, 1997. 84~91
- Apostolopoulos G, Guerin R, Kamat S, Tripathi S. Improving QoS routing performance under inaccurate link state information. In: Proc. IEEE ITC, 1999. 1351~1362
- Xiao L, Wang J, Nahrstedt K. The Enhanced ticket-based routing algorithm. In: Proc. IEEE INFOCOM, 2002. 2222~2226
- Feldmann A, et al. Deriving traffic demands for operational IP networks: Methodology and experience. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2001, 6(3): 265~279
- Hao F, Zegura E. On Scalable QoS routing: performance evaluation of topology aggregation. In: IEEE INFOCOM, 2002. 147~156
- Rosen J B, Sun S Z, Xue G G. L. Algorithms for the quickest path problem. Computer Operation Research, 2001, 28(5): 579~584