

# QoS 供应体系中的新型网络改进算法\*

杨挺<sup>+</sup>, 孙雨耕, 胡华东, 孙永进

(天津大学 电气与自动化学院, 天津 300072)

## A New Network Improvement Algorithm in QoS Providing System

YANG Ting<sup>+</sup>, SUN Yu-Geng, HU Hua-Dong, SUN Yong-Jin

(Department of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-22-2789248, Fax: +86-22-27404500, E-mail: yangting12@eyou.com, http://www.tju.edu.cn

Received 2004-04-05; Accepted 2005-03-10

Yang T, Sun YG, Hu HD, Sun YJ. A new network improvement algorithm in QoS providing system. *Journal of Software*, 2005,16(7):1352-1358. DOI: 10.1360/jos161352

**Abstract:** This paper integrates traffic engineering (TE) in network planning (network improvement) to build high performance networks, which achieve traffic's multi-constrained quality of service (QoS). It is a NP complete problem that cannot be efficiently solved by traditional network improvement with extending equipments' capability. A new network improvement algorithm based on TE is proposed. A heuristic algorithm of graph's connectivity augmentation is presented to satisfy the topological constraint, a static routing algorithm based on multi-QoS requirements is adopted to satisfy TE constraints, and a genetic algorithm is used to globally search the network with minimum improvement cost and with its capacity of rational allocation. With the simulation analysis, while achieving network's multi-constraint, rebuilding networks by the new network improvement algorithm is only a traffic balancing, but not a local blocking of the existing high performance networks.

**Key words:** quality of service; network planning; network improvement; traffic engineering; genetic algorithm; reliability

**摘要:** 将流量工程技术应用于网络规划(网络改进)以构建满足业务流量多 QoS 需求的高性能网络,这是传统网络改进通过设备扩容方法难以有效解决的 NPC 问题,并在此基础上提出基于流量工程的新型网络改进算法. 算法采用网络连通扩充启发式算法保证拓扑约束,基于多 QoS 约束路由算法满足流量工程约束,并使用遗传算法策略全局寻求改进费用最小网络及容量分配.通过仿真研究表明,该算法构建的网络在满足各网络约束的同时,具有网络负载分配均衡,避免存在局域拥塞的较高网络运行性能.

**关键词:** 服务质量;网络规划;网络改进;流量工程;遗传算法;可靠性

中图分类号: TP393 文献标识码: A

\* Supported by the National Research Foundation for the Doctoral Program of Higher Education of China under Grant No.20030056007 (国家教育部博士点基金)

**作者简介:** 杨挺(1979-),男,河南信阳人,博士,主要研究领域为可靠通信网(含计算机网络)的优化设计,图论与系统优化,无线通信技术;孙雨耕(1940-),男,教授,博士生导师,主要研究领域为可靠通信网的优化设计,图论与系统优化;胡华东(1978-),男,博士,主要研究领域为通信网流量工程,QoS 体系;孙永进(1973-),男,博士,主要研究领域为可靠通信网的优化设计,无线通信技术.

传统意义的网络改进是指对现有网络的拓扑结构、容量进行改造,以便网络中有足够的设备和容量来满足现有或可预见的更多业务传输。

随着计算机网络应用的不断丰富,网络不仅限于尽力而为(best-effort)的数据传输,而且要求实时高效地混合或并发传输语音(如 IPphone)、图形、图像(如网络会议)等多项业务类型。现有网络越发难以适应用户对网络服务的需求,主要表现为网络规模狭小,服务类型单一以及服务质量没有保证等。这些问题仅依靠简单增加物理设备的传统改进网络方法是无法解决的。

20 世纪 90 年代后期,流量工程(traffic engineering,简称 TE)成为网络界的研究热点,其目的是将网络上流量合理地映射到网络物理拓扑上,以均衡负载,提高网络设备的利用率,从而最终改善网络的性能。因此在网络中实施 TE 保证了业务的服务质量(quality of service,简称 QoS)需求,有效地提高网络传输能力<sup>[1,2]</sup>。但流量工程的实施也只能缓解问题。随着网络业务量的急剧增长,现行网络必将达到其极限服务能力。因此,满足用户 QoS 需求的最终方法是基于流量工程的新型网络规划。

**定义 1.** 基于流量工程的新型网络规划是在运用流量工程技术的基础上以系统的方法对网络的结构、拓扑、容量、路由等进行设计和改进,以使网络健壮、自适应并满足业务多 QoS 需求。

本文旨在对新型网络规划中网络改进提出一种切实可行的方法——新型网络改进算法。基于流量工程的新型网络规划(网络改进)问题是 NPC 问题,本文采用网络连通扩充启发式算法保证拓扑约束,基于多 QoS 约束路由算法满足流量工程约束,并将两者运用在遗传算法计算过程中,以寻求具有强网络传输性能,低改进费用的全局最优解。并通过仿真表明,算法能够有效地构建业务负载分配均衡,运行健壮的网络。

## 1 相关工作及分析

传统的网络改进问题的另一种表述是可靠通信网络设计问题(RCND)——设计一个具有最小建设费用并满足可靠性约束的网络拓扑<sup>[3]</sup>。

**定理 1.** 网络设计、网络改进和计算网络可靠性问题均为 NP-hard 问题<sup>[3,4]</sup>。

为此,研究者设计了众多算法,试图解决该问题或其简化问题,如文献[5]使用贪婪修补启发式算法计算 RCND 问题。算法对网络进行修补使全部节点的度至少为 2,修补使用节点的度作为网络可靠性的衡量尺度,但这是一种伪可靠性衡量尺度。在此我们给出证明。

**命题.** 节点的度是网络可靠性的伪衡量尺度。

证明:由文献[6]给出图  $G$  的连通度  $k$  和最小顶点的度  $\delta$  的定义可知:

若  $G$  是不连通图,则  $k=0 \leq \delta$ ; 否则,与  $\delta$  度顶点相关联的连杆集构成了  $G$  的一个  $\delta$  边割,由此推知:  $k \leq \delta$ 。

在图 1 中,图  $G$  有  $k=1, \delta=3$ 。当链路  $l_{3,4}$  断裂时,图  $G$  分裂成两个互不相连的子图,所以拓扑为  $G$  的网络可靠性为 1。

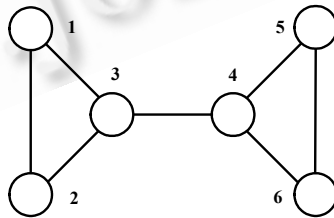


Fig.1 Topology  $G$

图 1 图  $G$

因此节点的度是一种伪可靠性衡量尺度。 □

Koh 和 Lee 在文献[7]中使用禁忌搜索算法进行通信网网络设计,算法需要预先设定各节点度数以满足可靠性约束,使其具有一定的局限性。由于遗传算法能够较好地解决组合优化问题,它也被应用与网络规划和网络改进研究中。文献[8]使用罚函数法在适应度函数中增加可靠性约束计算最小费用的网络改进问题。其适应度函数为

$$\begin{cases} C(G) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^{n-1} c_{ij} x_{ij} + \delta \times (c_{\max}(R(G) - R_0))^2 \\ \delta = \begin{cases} 0 & \text{if } R(G) \geq R_0 \\ 1 & \text{if } R(G) < R_0 \end{cases} \\ c_{\max} = \max_{c_{ij} \in E} (c_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

但由于将可靠性约束归入适应度函数中,使算法无法强制满足约束,通过实验证明,多数情况下,最小改进费用网络不满足可靠性约束,因此最优解是无效的,这时算法是无效的。

## 2 优化问题提出及其模型描述

### 2.1 问题提出

与传统意义的网络改进问题比较,新型网络改进所研究的优化问题是在运用流量工程技术满足多 QoS 需求的基础上,寻求满足网络结构、可靠性等拓扑约束的最小改进费用网络.问题包括基于多 QoS 约束的路由计算、网络改进和可靠性计算 3 方面。

随着网络应用的丰富,用户对网络的依赖型日益增加,因此要求网络具有更高的可靠性.在网络改进优化问题中有两种可靠性衡量标准——全端(all-terminal)可靠性和源宿点(source-sink)可靠性.全端可靠性是指网络中每一个节点都有  $K$  条不重复路径和其他节点连接.源宿点可靠性是指在特定的源宿节点对之间存在  $K$  条不重复路径.因此全端可靠性较源宿点可靠性更强。

**定理 2.** 不存在计算无向图两端和全端可靠性的多项式时间算法<sup>[9]</sup>.

新型网络改进将使用无向图全端  $k$  点连通的强可靠性约束代替传统网络改进中两端 2 点连通可靠性约束.由定理 2 可知,这也是 NP-hard 问题。

**定理 3.** 基于  $k$  种加法型约束和  $m$  种乘法型约束,当  $k+m \geq 2$  时的路由计算问题是 NPC 问题<sup>[1,10]</sup>.

由定理 1、定理 2 可知,网络改进和可靠性计算问题是 NP-hard 问题;由定理 3 可知,基于多 QoS 约束的路由计算问题是 NPC 问题;且由  $\text{NPC} \subset \text{NP-hard}$ <sup>[3]</sup> 可得如下推论:

**推论 1.** 基于流量工程的新型网络规划(网络改进)问题是 NPC 问题。

### 2.2 模型描述

实际的现有网络域运用图论抽象为无向赋权图  $G_0=(N_0, L_0, k_0, d_{\delta-uv}^0, H_0)$ .

$N_0$ :网络域中所有负责交换的路由器集合;

$L_0$ :任意两路由器之间通信链路集合;

$k_0$ :网络可靠性约束参数;

$d_{\delta-uv}^0$ :节点  $N_0(u) \rightarrow N_0(v)$  预架设  $\delta$  容量链路所需费用矩阵;

$H_0$ :链路  $l_0$  上量度函数集合.

$$\begin{cases} H_0 = \{Ca(l_0), Hp_+(l_0), Me_+(l_0), \mu_{\max}(l_0)\} \\ \text{s.t. } l_0 = (u, v) \in E_0, u, v \in N_0 \end{cases} \quad (2)$$

$Ca(l_0)$ : (带宽函数)链路  $l_0$  总带宽;

$Hp_+(l_0)$ : (跳数函数)经过链路  $l_0$  所增跳数;

$Me_{\max}(l_0)$ : (费用函数)经过链路  $l_0$  所消耗网络费用;

$\mu_{\max}(l_0)$ : (延时函数)经过链路  $l_0$  所需最大延时,当路由时使用加权公平队列算法(WFQ)时(如调度算法),其可转化为跳数函数<sup>[11]</sup>.

模型目标是将原网络  $G_0$  按拓扑需求以最小费用改进成为网络  $G=(N, L, d_{\delta-uv}, H, k)$ , 并合理配置流量需求矩阵  $Te^{n \times n}$  中各业务,优化网络结构和性能。

本文考虑网络改进约束  $C_{ni}(G) = \{C_{tp}(G), C_{te}(Te^{n \times n})\}$ .

拓扑约束:

$$C_p = \begin{cases} A_E & N_0 \rightarrow N \\ A_k & k_0 \rightarrow k \end{cases} \quad (3)$$

流量多 QoS 约束:

$$C_{Te}(Te^{n \times n}) = \begin{cases} \Delta_{Te} & Te^{n_0 \times n_0} \rightarrow Te^{n \times n} \\ \sum_{i \in Path(u,v)} Hops(i, i+1) \leq HopsLmt(Te_{u,v}^{n \times n}) \\ \min_{i \in Path(u,v)} \{Ca(i, i+1)\} \geq CaLmt(Te_{u,v}^{n \times n}) \\ \sum_{i \in Path(u,v)} Metric(i, i+1) \leq MetricLmt(Te_{u,v}^{n \times n}) \end{cases} \quad (4)$$

### 3 基于流量工程的新型网络改进算法描述

如定义 1 所述,基于流量工程的网络改进目标是 minimized 改进费用的同时使改进后的网络具有较优的传输能力,为 NPC 问题.这需要在网络改进中以系统的方法使用网络拓扑扩充算法和基于多 QoS 约束路由算法,并寻求问题的全局最优或次优解.

本文采用改进遗传算法策略解决.因为遗传算法适用于在复杂而庞大的搜索空间中寻找优化解或最优解,在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识,自适应地控制搜索过程,不断地缩小搜索空间,从而得到优化解,甚至最优解.因此将其与网络拓扑扩充算法和基于多 QoS 约束路由算法相结合,并应用于基于流量工程的网络改进,使算法具有鲁棒性强、易于并行分布处理以及全局较优性的优点.新型网络改进算法基本步骤如下:

- (1) 构造  $E$  节点  $k$  点连通无向 Harary 图作为初始解群  $P^0$ ,并编码;
- (2) 判断当前迭代解群  $P^j$  中个体  $P_k^j$  的网络拓扑性能是否满足改进需求,若否则,调用网络拓扑扩充启发式算法进行网络修补;
- (3) 根据改进流量需求矩阵  $Te^{n \times n}$  调用多约束静态路由算法计算路由,从而计算个体  $P_k^j$  的适应度函数值  $Fa_k^j$ ;
- (4) 根据遗传策略进行选择、交叉、变异等遗传操作;
- (5) 判断迭代终止条件;若满足,则终止,对解群  $P_j$  中最优解解码并生成实际网络,流程结束;否则,返回(2),继续迭代循环.

本文主要研究遗传算法策略中适应网络改进的初始解生成机制,适应度函数描述以及网络拓扑测试和修补策略、多约束静态路由算法.

#### 3.1 初始解生成

初始解的优劣与遗传算法的运行效率密切相关.传统方法是依据链路存在概率随机生成的拓扑,则各可行解的拓扑密度、连通性等指标各不相同.因此,降低初始解群质量,影响遗传算法优化效果.

本算法以 Harary 图为基础产生初始解群.由图论理论可知,Harary 图是满足点连通度  $k(G)$  的最小链路无向图<sup>[6]</sup>.因此初始解群是满足网络可靠性需求的最少边拓扑<sup>[8]</sup>.由此避免了传统方法产生大量无效初始解群以及对初始解群进行连通性测试和修补的缺点.

#### 3.2 适应度函数设计

网络改进算法的目标函数是最小化网络改进费用.因此,判断解群  $P^j$  中个体优劣性标准即计算该个体的适应度函数  $Fa_k^j$  为

$$\left\{ \begin{array}{l} Fa_k^j = \min \left\{ \sum_{u,v \in E} e_{uv} \varphi_{\delta_1-uv} d_{\delta_1-uv} - \sum_{u,v \in E_0} e_{uv}^0 \varphi_{\delta_2-uv}^0 d_{\delta_2-uv}^0 \right\} \\ e_{uv} = \begin{cases} 1 & l \in (u,v) \\ 0 & l \notin (u,v) \end{cases} \quad \varphi_{\delta-uv} = \begin{cases} 1 & Ca(l) = \delta, l \in (u,v) \\ 0 & Ca(l) \neq \delta, l \in (u,v) \end{cases} \\ \delta_1 \geq \delta_2 \end{array} \right. \quad (5)$$

### 3.3 网络连通扩充启发式算法

遗传操作将改变网络拓扑结构,破坏连通性,需要使用网络拓扑扩充算法对网络进行连通度测试和修补.根据 Menger 定理<sup>[6]</sup>,通过测试一个图中任意两相异节点之间的  $k$  点连通性,可以证明该图是  $k$  点连通图.本文使用改进最大流算法计算网络中各点对之间的连通度,并使用修补策略修补网络满足可靠性约束,基本步骤如下:

- (1) 构造连通度不满足约束的节点集合  $UNCON$ ,初始化  $UNCON=N$ ;
- (2) 计算  $d(x) \in UNCON$ ,置  $UNCON=\{x|x \in N, d(x) < d(G), d(x_i) \leq d(x_{i+1}), i=0,1,\dots,n\}$ ;
- (3) 依次连接  $x_0$  与  $x \in \{UNCON-x_0, N-UNCON\}$ ,直至  $d(x_0) \geq d(G)$ ,  $UNCON=UNCON-x_0$ .

判断  $UNCON=\emptyset$ ?若是,修补完毕;否则,返回(2)继续迭代循环.

### 3.4 多约束静态路由算法

传统路由选择计算(如 OSPF)采用 Dijkstra 算法寻求正费用网络中源-目的节点间最小费用路径,它是计算单一目标(如跳数)的多项式时间复杂度有效算法,算法复杂度为  $O(n^2)$ .但在多约束路由计算中,选择路径要同时满足多 QoS 需求,而由定理 2 可知,此为 NPC 问题.本文采用改进的多量度 Dijkstra 算法实现多约束路由计算.

由于实际路由选择中需考虑诸多约束,因此,路由算法如何满足各个业务 QoS 需求约束是至关重要的.本算法使用多量度复合目标函数在一次路由计算中满足配置流量的多项 QoS 需求.

算法将所需考虑的诸多业务约束属性值分为 Boolean 类(颜色、费用、带宽、跳数限制)和 Quantitative 类(残留带宽率、跳数、费用);并定义累加操作和比较选优操作.

**定义 2.** 节点的两类属性值与相关链路的相应资源作加法型运算,得到该节点的每个相邻节点各属性值的操作称为累加操作.

**定义 3.** 依多目标函数次序比较相异属性组,属性组分属不同节点或不同链路,并选取其中优者的操作称为比较选优操作.

路由计算以先 Boolean 类后 Quantitative 类的顺序进行路径选优:首先判断 Boolean 类属性值  $Cstr_b(l): \forall cstr(l) \in Cstr_b(l)$  不满足公式(4),则否定链路  $l$ .当 Boolean 类属性值全部满足,依多目标函数进行 Quantitative 类属性值的比较选优操作,算法可以根据不同业务类型制定其多目标函数.改进多量度 Dijkstra 算法的基本步骤如下:

- (1) 若  $Cstr_Q(l_j)_i$  优于  $Cstr_Q(l_k)_i$ ,选择链路  $j$ ,返回(其中  $Cstr_Q(l_j)_i$  表示链路  $l_j$  的第  $i$  个 Quantitative 类属性值);
- (2) 若  $Cstr_Q(l_k)_i$  优于  $Cstr_Q(l_j)_i$ ,选择链路  $k$ ,返回;
- (3) 若  $Cstr_Q(l_k)_i$  与  $Cstr_Q(l_j)_i$  相等,则顺延比较下一个属性值  $Cstr_Q(l_k)_{i+1}$ .

算法首先计算需配置业务可以使用的带宽并删除不可使用的链路.对象都是网络中所有链路,其时间复杂度均为  $O(e)$ .其中  $e$  为网络中的链路数.其后为算法的主体部分:Dijkstra 算法计算复杂度为  $O(n^2)$ <sup>[12]</sup>.改进 Dijkstra 算法计算路径采用多目标函数计算属性组策略替换原算法中复杂度为  $O(1)$  的权值计算,其计算复杂度为  $O(C)$ ,  $C$  为 Quantitative 类属性组元素个数;因此改进 Dijkstra 算法计算复杂度为  $O(Cn^2)$ .

## 4 基于流量工程的新型网络改进算法仿真研究

算法仿真将  $G_0=(E_0=10, N_0=15, H_0, k_0=3)$  网络(如图 2 所示),改进为  $G=(E=12, k=4)$ ,并合理配置新流量需求矩阵  $Te^{n \times n}$  中各业务.

遗传策略采用 CHC(cross generation elitist selection, heterogeneous recombination, cataclysmic mutation, 跨世代精英选择, 异物种重组, 大变异)遗传算法以保持算法本身的健壮性和遗传的多样性; 计算中初始解群规模选择  $Popsiz = n \times (n - 1)$ ; 选择操作采用轮盘赌选择策略; 交叉概率  $P_c = 0.5$ ; 变异概率  $P_m = 0.025$ .

本文从拓扑性能、链路流量分配、 $Te^{n \times n}$  流量路由分配和算法的进化品质 4 个方面分析新型网络改进算法的性能。

如图 3 所示, 新型网络改进算法生成拓扑拥有 29 条链路, 满足相同  $C_p(G)$  的 Harary 图拓扑拥有 24 条链路<sup>[8]</sup>, 如图 4 所示. 因此网络改进拓扑在满足  $k$  点连通度的基础上建立较少链路. 同时由分析可知, 改进后网络尽可能地利用原有链路, 从而保证既有的网络投资被有效利用。

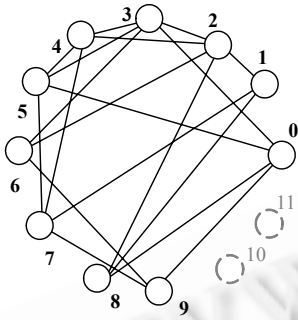


Fig.2 Original topology  $G_0$

图 2 原网络  $G_0$  拓扑

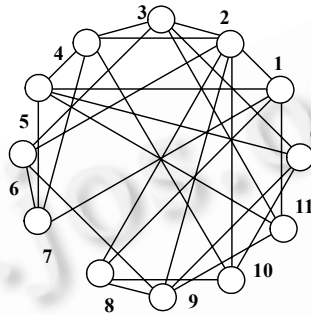


Fig.3 Topology  $G$  after network Improving

图 3 网络改进生成  $G$  拓扑

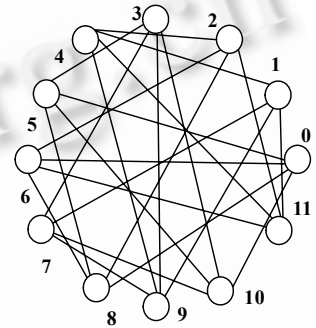


Fig.4 Harary topology (12 nodes, 4 node-connected)

图 4 Harary 图(12 节点, 4 连通)

由图 5 可得, 改进网络中各链路流量分配均衡, 未出现局部拥塞区域, 从而提高网络传输能力. 由图 6 可知, 经过网络改进计算出的流量配置方案使得多数具有较大带宽需求的业务经少跳数通过网络, 从而节省网络资源. 由此也充分显示了静态算法对于全局资源调配的有效性。

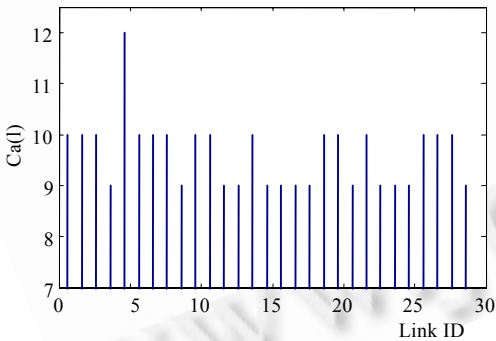


Fig.5 Capacity of each link

图 5 网络各链路流量分配

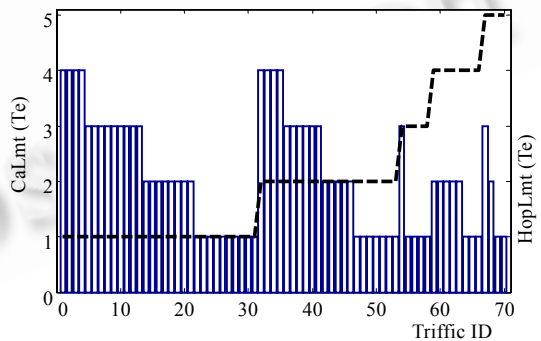


Fig.6 Configuration of each traffic (Bandwidth/Hop)

图 6 业务流量配置(带宽/跳数)

图 7 给出基于 CHC 遗传策略的算法进化曲线, 由图 7 可知, 随着迭代次数的增加, 网络改进费用递减, 且收敛速度较快. 当网络改进程度 ( $\Delta k, \Delta E$ ) 越大时, 改进效果越明显. 因为  $\Delta k, \Delta E$  的增大扩充了搜索空间, 使算法依靠流量工程技术和 CHC 遗传策略在全局范围内找到更有效的较优解. 因此, 基于遗传算法策略考虑流量工程的网络改进是有效的, 较优的。

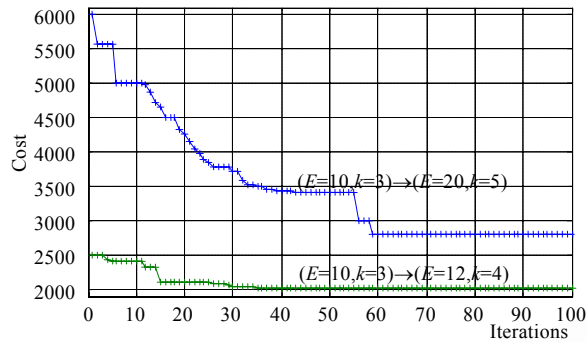


Fig.7 Evolutive curve

图 7 算法进化曲线

## 5 结论

基于流量工程的新型网络规划(网络改进)是最终解决网络服务滞后问题,满足业务多 QoS 需求的有效方法,这是一个 NPC 问题.本文将图论理论、多 QoS 约束路由技术相结合以满足网络改进的拓扑约束和流量工程约束,并使用 CHC 遗传算法策略全局寻求费用最小拓扑和合理的容量分配方案,使改进后的网络负载均衡,提高了网络性能.通过仿真研究表明,新型网络改进算法是可行的,有效的.

**致谢** 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的专家和同行,尤其是深圳市华为技术有限公司北京研究所的科研人员刘俊辉、黄韬等同志表示感谢.

## References:

- [1] Xiao XP. Providing quality of service in the Internet [Ph.D. Thesis]. Michigan: Michigan State University, 2000.
- [2] Xu YX, Zhang GD. Models and algorithms of QoS-based routing with MPLS traffic engineering. In: Proc. of the 5th IEEE Int'l Conf. on High Speed Networks and Multimedia Communications. Korea: IEEE Communications Society, 2002. 1281-132.
- [3] Gary MR, Johnson DS. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1979. 37-79.
- [4] Reichet D, Rothlauf F. Designing reliable communication networks with a genetic algorithm using a repair heuristic. In: Proc. of the 4th European Conf. on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. Coimbra: EvoWorkshops, 2004. 177-187.
- [5] Cheng ST. Topological optimization of a reliable communication network. IEEE Trans. on Reliability, 1998,47(3):225-233.
- [6] Bollobas B. Modern Graph Theory. Beijing: Science Press, 2001. 67-101 (in Chinese).
- [7] Koh SJ, Lee CY. A tabu search for the survivable fiber optic communication network design. Computers and Industrial Engineer, 1995,28:689-700.
- [8] Dengiz B, Altiparmak F, Smith AE. Local search genetic algorithm for optimal design of reliable networks. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 1997,1(3):179-188.
- [9] Provan JS, Ball MO. The complexity of counting cuts and of computing the probability that a graph is connected. Siam Journal of Computing, 1983,12(4):777-788.
- [10] Xiao XP. Internet QoS the big picture. IEEE Network Magazine, 1999,13(2):8-18.
- [11] Orda A. Routing with end-to-end QoS guarantees in broadband networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1999,7(3):365-374.
- [12] Xie JX, Xing WX. Optimizing Networks. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 119-140 (in Chinese).

## 附中文参考文献:

- [6] Bollobas B.现代图论.北京:科学出版社,2001.67-101.
- [12] 谢金星,邢文训.网络优化.北京:清华大学出版社,2000.119-140.