

## 路由选择的一种新遗传算法

吴传信<sup>1</sup>, 倪明放<sup>1</sup>, 陈鸣<sup>2</sup>

(1. 解放军理工大学通信工程学院 南京 210007; 2. 解放军理工大学指挥自动化学院 南京 210007)

**【摘要】**提出了应用于QoS路由选择的一种新遗传算法, 该算法给出了基于跳数优先原则的初始种群生成办法, 以及邻近交叉和前向变异两个关键算子。算法的主要优点表现为初始种群生成独立于网络拓扑的度量参数, 交叉产生了多样性新个体, 以及变异有效抑制算法退化等。对随机生成的不同规模的网络拓扑结构进行仿真, 结果表明该算法是有效的。

**关键词** 遗传算法; 路由选择; 服务质量; 多约束  
**中图分类号** TP393.02 **文献标识码** A

## A Novel Genetic Algorithm for Routing

WU Chuan-xin<sup>1</sup>, NI Ming-fang<sup>1</sup>, CHEN Ming<sup>2</sup>

(1. Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology Nanjing 210007;

2. Institute of Command Automation, PLA University of Science and Technology Nanjing 210007)

**Abstract** The most problems of multi-constrained QoS routing are NP-completeness. In this paper, a novel genetic algorithm is given which is applied to QoS routing. The principle of hop-prior is presented to generate an initial population. Simultaneously, two operators of vicinity crossover and forward mutation are brought forward. The primary advantages of this algorithm are shown as below: the population initialization is independent on the metrics in a network, the new personals born of crossover are diversified, and mutation depresses the algorithm devolutions effectively. At last, the simulations on differ-scale networks randomly created demonstrate that this algorithm is effective.

**Key words** genetic algorithm; routing; QoS; multi-constrained

QoS路由是选择满足QoS约束条件和优化目标的路由。当QoS约束为加性度量约束或乘性度量约束的多路径约束<sup>[1-2]</sup>时, QoS路由问题为NP完全问题<sup>[3]</sup>; 路径优化并含一个或多个路径约束问题时, 也是NP完全问题<sup>[1]</sup>。围绕NP完全路由问题, 文献[4-7]提出了启发式算法, 以求出问题的近似最优解; 文献[8-10]则提出用遗传算法求解QoS路由问题。

遗传算法是仿照“适者生存”的自然法则选择优质个体, 模拟生物遗传变异过程生成子代新个体的一种近似算法。文献[8]给出了一种基于遗传算法的时延受限代价最小组播路由选择方法, 该算法存在的主要问题是变异算子采用简单单位变异的办法, 无法保证变异新个体仍然是一棵树, 在单播问题中变异新个体会出现不是一条路径的情况。文献[9]的交叉办法是从父代种群中搜索有共同节点的一对个体作为交叉对象, 而后通过共同节点互换此节点之后的部分路径进行交叉。交叉办法有效解决了交叉后生成子代仍是一条通路的问题, 保证了交叉的成功率。但交叉办法也存在一些问题: (1) 每次交叉之前需要遍历所有父代个体, 增加了计算时间; (2) 由于交叉是选择链路上共同的节点互换剩余部分, 所以父代个体中没有经过的边不可能出现在交叉后的子代新个体中; (3) 没有被父代个体包含的节点也不会被交叉后的子代个体选择。这些问题限制了生成的子代新个体的多样性<sup>[11]</sup>, 使算法陷入局部最优解的可能性增大。

本文对加性度量的路径约束路径优化QoS路由问题提出一种新的遗传算法, 该算法采用稳态繁殖遗传方式, 更好地保护了优质个体; 提出跳数优先的原则, 使生成的初始种群独立于网络拓扑中的度量参数, 算法具有更好的一般性<sup>[1]</sup>。邻近交叉算子的特点使交叉新个体具有多样性, 提高了算法收敛到全局最优解的概

收稿日期: 2004-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90304016)

作者简介: 吴传信(1972-), 男, 博士, 主要从事通信网络优化方面的研究; 倪明放(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事路由优化与网络规划方面的研究; 陈鸣(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机网络方面的研究。

率;前向变异算子采取了保留路径后部、变异前部的办法,前向变异有效地抑制了算法的退化。实例仿真对随机生成的不同规模网络拓扑进行求解,结果表明该算法是有效的。

## 1 问题的数学表示

图  $G(V, E)$  表示网络拓扑,其中  $V$  为节点集合;  $E$  为链路集合。连接任意两节点  $v_1$  和  $v_2$  的任意一条初等路径  $p = (v_1, v_2)$  称为从  $v_1$  到  $v_2$  的一条路径。若  $p$  经过链路  $e$ , 记  $e \in p$ , 否则记  $e \notin p$ 。设  $w$  为某一加性度量, 链路  $e \in E$  的度量值为  $w(e)$ , 并定义路径  $p$  关于  $w$  的度量值为  $w(p) = \sum_{e \in p} w(e)$ 。

多约束QoS路由问题<sup>[4]</sup>表述为:已知链路费用度量  $c(e)$ 、其他  $K$  个度量  $w_k(e)$  及相应门限值  $t_k (k=1, 2, \dots, K)$ , 求一条从源点  $s$  到宿点  $d$  的路径  $p$  满足条件:(1)  $w_k(p) \leq t_k$ , 且  $k=1, 2, \dots, K$ ; (2)  $\min c(p)$ 。

约束条件(1)表示  $K$  个路径约束; 目标函数(2)表示路径优化。满足条件(1)的解称为多约束QoS路由问题的可行解, 否则称为不可行解; 同时满足条件(1)和(2)的解称为最优解。

## 2 遗传算法描述

本文的遗传算法对种群初始化、交叉实现和变异过程提出了新的设计思想,并引入了如下相关概念。

定义 1 图  $G(V, E)$  中, 连接两个节点的路径所需要最小跳数称为两点的距离, 并称距离不大于 2 的两个节点是邻近的, 连接两邻近点的最小跳数路径称为邻近路。由定义可知:

邻近包括相同、相邻和距离为 2 等 3 种情况; 若两邻近点为相同的点, 则邻近路退化为一个点。

定义 2 给定网络拓扑  $G(V, E)$ , 称到源点距离为  $n$  的节点集合为最小跳集  $H_n$ , 所有最小跳集统称为  $H$  集, 其中  $n$  称为  $H$  集  $H_n$  的半径。当  $|m-n|=1$  时, 称  $H_n$  和  $H_m$  是相邻的, 并称  $H_{n-1}$  为  $H_n$  的前向集。显然,  $H_0$  只有一个元素, 即源点。

### 2.1 编码方式

采用链式变长编码方式, 如源点为 0, 宿点为 9, 路径依次经过节点 1, 3, 5, 7, 则路径编码为 0 1 3 5 7 9, 编码和解码过程非常简单。

### 2.2 种群初始化

首先将网络  $G$  划分成  $H$  集, 而后按照跳数优先的原则, 从宿点到源点逆向随机生成不重复的无环路为初始种群。逆向生成的办法是, 从宿点开始依次选择前向节点, 直到选择到源点为止。选择前向节点的办法体现跳数优先的原则, 即首先计算当前节点所属  $H$  集, 而后搜索当前节点的所有相邻节点并去除路径上被选择过的节点, 再把这些节点分成前向集中节点和非前向集中节点两个集合  $A$  和  $B$ 。若  $A$ 、 $B$  都非空, 则以 0.60 的概率选择  $A$  中的点, 以 0.40 的概率选择  $B$  中的点作为当前节点的前向点加入路径; 若其中之一为空集, 则选择另一非空集中的点加入路径; 若两者均为空集, 则称发生一次迷路现象, 退回宿点重新开始。实验表明, 发生迷路现象的概率很低。由于选择前向节点的概率大于选择非前向节点的概率, 所以生成小跳数路径的概率大, 故称之为跳数优先的原则。

初始种群生成的跳数优先原则, 只依赖于网络拓扑结构, 独立于度量参数, 既保证了每次以很大概率找到一条从源点到宿点的路径, 又保证了初始种群的多样性和算法的通用性。

### 2.3 遗传操作

#### 2.3.1 个体选择

个体选择概率取决于种群中个体的适应度及其分布。为了简单有效地控制选择压力<sup>[11]</sup>、使个体选择表现更好的鲁棒性, 个体选择概率分配方法采用基于排序的适应度分配方法。排序的过程是, 先把种群划分成可行解和不可行解两个部分, 并把不可行解部分排序在可行解部分之前, 而后种群按照目标值从大到小的顺序分别对这两个集合排序。排序后, 适应度依照选择压力和个体在种群中的序位确定, 而不依赖于实际的目标值。设定  $N$  为种群大小,  $P_{os}$  为个体在种群中的序位,  $S_p$  为选择压力, 选择线性排序, 个体的适应度为:

$$Fit(P_{os}) = 2 - S_p + \frac{2(S_p - 1)(P_{os} - 1)}{N - 1} \quad S_p \in [1.0, 2.0]$$

依照上式计算所得适应度即为个体选择概率。

### 2.3.2 交叉算子

交叉算子的设计至少要保证交叉后仍是一条路径，同时考虑交叉后子个体具有多样性。本文提出了交叉处发生在邻近节点之间的交叉办法，即邻近交叉算子。两条路径交叉的条件是：从拓扑中去掉源点和宿点以及它们的关联边后，这两条路径中仍存在邻近节点。否则交叉不发生。交叉的过程是，随机选取两条路径中的一对邻近节点，这对邻近节点分别把两条路径分成前后两个部分，而后取其中之一的前半部分和另一的后半部分并结合这对邻近点间的邻近路形成一条路径，若生成的路径中产生环路，则经去环处理后得到的路径为子代新个体。

如前所述，邻近节点包括相同、相邻和距离为2等3种情况，交叉发生在这3种情况时，生成的子个体可能不同。下面以图1a所示简单网络拓扑为例，源点和宿点分别为0和9，示意两父个体0 1 3 6 8 9和0 2 4 6 7 9这3种情况的交叉过程。图1中符号 $\otimes$ 表示交叉。

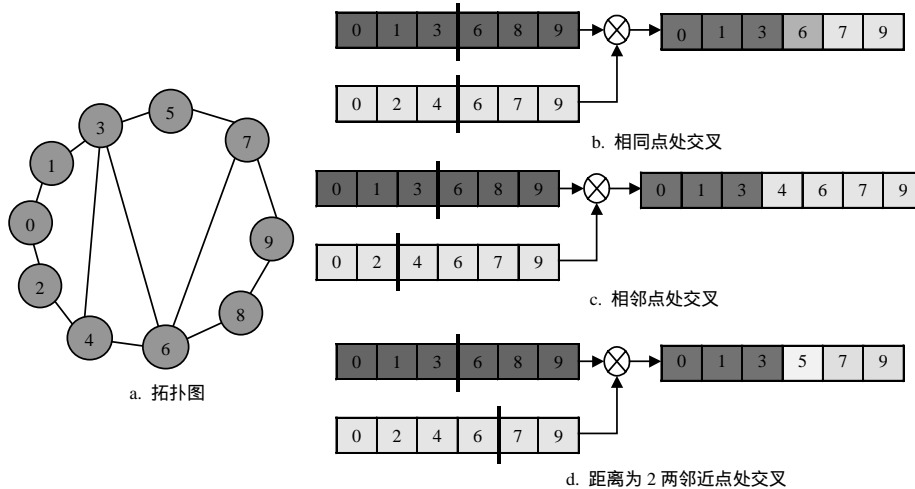


图1 邻近交叉示意图

拓扑中去掉源点和宿点后，节点1和节点2不是邻近的，交叉不可能在此处发生。两父个体中存在共同的节点6，所以交叉发生的情况如图1b所示；因节点3和4是相邻节点，所以也可能发生如图1c所示的交叉情况；节点3和7的距离为2，是邻近的，3 5 7是一条邻近路，所以交叉后也可得如图1d所示的情况。

另外，节点6和4是相邻的，当交叉发生在6 4处时，生成0 1 3 6 4 6 7 9，产生环路，去环后得0 1 3 6 7 9为新子个体。

### 2.3.3 变异算子

遗传算法的变异过程旨在抑制“近亲繁殖”现象产生的算法退化，带来的副作用是有可能破坏优质个体，所以变异概率的选择和变异算子的设计直接影响算法收敛到全局最优解的概率和速度。由于算法中采用稳态繁殖的方式，使算法具有较快的收敛速度，所以可以适当选取相对较大的变异概率。由交叉算子可知，交叉过程遗传了父代个体的前部分路由，所以变异过程采用保留路由后部、变异前部的办法。因此变异算子也称前向变异。前向变异的过程为，从路径中去掉源点和宿点后，随机选取路径中一关联边大于2的节点，若此节点存在不属于路径后部的相邻节点，则任选一节点后，保留路径后部，沿所选相邻节点开始按照初始种群的生成办法前向生成一条路径，即为变异后个体。

如图1所示，拓扑中路径个体0 1 3 5 7 9变异点选择节点3，则前向变异生成路径个体为0 2 4 3 5 7 9。

### 2.3.4 稳态繁殖

为了使优质个体以较大概率生存，算法中采用稳态繁殖方式，即当交叉生成的新子个体性能优于父个体时，则更新父个体进入下一代种群；否则以一定概率取代父个体。

## 2.4 终止条件

初始种群规模相对较大或者网络拓扑规模相对较小时, 算法收敛速度则相对较快。基于这一原因, 算法终止条件选定为“迭代达到最大世代数”或者“种群中半数以上位置被生成的最优个体占据”。

## 3 实例仿真

实例选用时延约束的最小费用路由模型, 随机生成节点个数、边数和度不同的网络拓扑, 而后随机生成费用和时延两个度量, 费用在[20, 300]中选取, 时延在[40, 500]中随机生成。随机网络生成后, 随机选取源点和宿点并用最短路算法求解最小时延路的时延 $D_1$ 和最小费用路的时延 $D_2$ , 取 $d=(D_2 - D_1)/4$ 。时延上界在区间 $[D_1+d, D_2+d]$ 中随机选取一值后, 即生成了时延约束的最小费用路由模型。

在生成的模型中, 用穷举法求出全局最优解, 比较遗传算法收敛到全局最优解的频率。遗传算法中选取压力为1.75; 变异概率确定为0.08; 最大迭代世代数为150。在上述条件下, 运算本文遗传算法若干次, 收敛到全局最优解的频率如表1所示。

表1中收敛频率表示遗传算法收敛到全局最优解的次数与总计算次数的比值。仿真结果表明本文遗传算法具有很好的收敛到全局最优解特性。随着节点数增大, 收敛频率有减小的趋势, 主要原因就是随机选取的两父个体交叉发生的概率下降, 所以边个数增大, 使交叉发生概率增大, 引起收敛频率上升。当度数较小时, 随着 $H$ 集半径的增大,  $H$ 集中节点个数增大的趋势减弱, 一定程度上也带来了交叉发生概率的增加, 表现为收敛频率的上升。

节点数/个	边数/条	度	种群大小	收敛频率/(%)
20	50	6	50	100
50	150	8	50	100
100	250	8	50	100
200	400	10	100	70
200	600	10	150	90
300	1 000	12	200	80
300	2 000	12	200	90
300	700	6	200	85

## 4 结论

本文提出了路由选择的一种新遗传算法, 该算法给出了基于跳数优先原则的初始种群生成办法, 以及邻近交叉和前向变异两个关键算子。跳数优先原则使初始种群生成独立于网络拓扑中的度量参数, 增强了算法的通用性; 邻近交叉的特点使产生的子代个体具有多样性, 保证了算法以较大概率收敛到全局最优解。另外, 前向变异办法保证变异个体仍为一条路, 并有效抑制了算法退化。仿真结果表明算法是有效的。

### 参考文献

- [1] 闵应骅. 计算机网络路由研究综述[J]. 计算机学报, 2003, 26(60): 6.
- [2] Chen Shigang, Klara N. An overview of quality of service routing for next-generation high-speed networks: problems and solutions[J]. IEEE Network, 1998, (6): 64-79.
- [3] Garey M R, Johnson D S. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness[M]. San Francisco: Freeman, 1978.
- [4] Turgay K, Marwan K. Multi-constrained optimal path selection[C]//IEEE INFOCOM 2001-The Conference on Computer Communications, Anchorage, 2001.
- [5] Feng Gang, Christos D, Kia M, et al. Performance evaluation of delay-constrained least-cost QoS routing algorithms based on linear and nonlinear Lagrange relaxation[C]//ICC 2002 - IEEE International Conference on Communications, New York, 2002.
- [6] 刘千里, 汪泽焱, 倪明放, 等. 一种基于多条件约束的QoS路由选择优化算法[J]. 计算机研究与发展, 2001, 138(2): 275-278.
- [7] 米志超, 郑少仁, 汪泽焱, 等. 一种交互式的Ad Hoc网络QoS路由算法[J]. 武汉大学学报(理学版), 2002, 48(1): 51-54.
- [8] 王新红, 王光兴. 基于遗传算法的时延受限代价最小组播路由选择方法[J]. 通信学报, 2002, 3(3): 112-117.
- [9] Ahn C W, Ramakrishna R S. A genetic algorithm for shortest path routing problem and the sizing of populations[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(6): 566-579.
- [10] 刘芳, 冯小军. 免疫组播路由选择算法[J]. 计算机学报, 2003, (6): 676-681.
- [11] 王小平, 曹立明. 遗传算法理论与应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.

编辑 熊思亮