

基于遗传算法的最短路径路由优化算法

孙宝林^{1,2}, 李腊元¹, 陈 华²

(1. 武汉理工大学计算机科学与技术学院, 武汉 430063; 2. 武汉科技学院数理系, 武汉 430073)

摘要: 论述了用启发式遗传算法解决最短路径路由的优化问题, 采用可变长度染色体(路由串)和它的基因(节点)应用于编码问题, 交叉操作在交叉点进行部分染色体(部分路由)交换, 变异操作维持种群的多样性。该算法采用简单维护操作维护好所有的不可行的染色体。交叉操作和变异操作相结合保证了最优解的搜索能力和解的全局收敛性。计算机仿真实验表明该算法快速有效、可靠性高。

关键词: 路由; 最短路径路由; 路由优化; 遗传算法

Shortest Path Routing Optimization Algorithms Based on Genetic Algorithms

SUN Baolin^{1,2}, LI Layuan¹, CHEN Hua²

(1. School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Science and Engineering, Wuhan 430063;

2. Department of Mathematics and Physics, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430073)

【Abstract】 This paper presents a heuristic genetic algorithmic to solve shortest path routing optimization problem. Variable-length chromosomes (routing strings) and their genes (nodes) are used for encoding the problem. The crossover operation exchanges partial chromosomes (partial-routes) at positional independent crossing sites and the mutation operation maintains the genetic diversity of the population. The algorithm can cure all the infeasible chromosomes with a simple repair operation. Crossover and mutation together provide a search capability that results in improved quality of solution and enhanced rate of convergence. Computer simulations have verified that the algorithm is efficient and effective.

【Key words】 Routing; Shortest path routing; Routing optimization; Genetic algorithm

近年来, 随着网络技术, 特别是Internet网络和移动Ad-hoc网络的飞速发展, 路由协议的设计理论与方法的研究已成为网络领域中一类重要课题^[1-5], 在进行分组传输特别是满足服务质量等方面更需要优化路由选择。一些传统的最短路径 (Shortest Path, SP) 搜索算法: 宽度优先搜索算法、Dijkstra算法、Bellman-Ford算法等, 它们在有基础设施的无线网络和有线网络方面在多项式时间内能较好地解决最短路径问题, 但在实时通信环境、高动态的拓扑结构以及QoS要求的网络结构下, 通常需要同时寻找出一组最短或次最短路径作为方案评价和选择的依据。

遗传算法是一种模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法, 已在组合优化、模式识别、神经网络、经济预测等领域得到广泛应用。遗传算法是一种启发式算法, 它的基本思想来源于遗传进化, 主要是借助于生物进化机制与遗传学原理, 按照自然选择和适者生存的原则, 利用简单的编码技术和繁殖机制, 模拟自然界生物群体优胜劣汰的进化过程, 实现对复杂问题的求解, 对于用遗传算法解决SP路由问题^[7,9]、多播路由问题^[5,6]、动态路由问题^[4,10]等都属于组合优化问题。文献[7]给出在有线或无线环境下的实现, 提出了可变长度的染色体编码, 是一个较好的编码方案, 但该算法不适合大型网络和实时性较强的网络。文献[8]采用整数队列组成的固定长度染色体编码, 每个基因代表一个节点ID, 但该算法的网络规模与最优解不一致, 算法的精度也不好。文献[9]结合了文献[7, 8]中的优点, 但容易出现遗传过早收敛的现象以及进化过程陷于停顿的状态, 难以找到全局最优解。为此, 本文通过对SP路由问题进行分析, 抽象出SP路由问题的网络模型, 采用可变长度的染色体的编码机制, 并优化交叉、变异等操作, 提出一种启发式SP路由遗传算法。

1 网络模型

在研究路由问题时, 一个网络可表示成一个加权图 $G(N, E)$, 其中 N 表示节点集, E 表示连接节点的通信链路集。 $|N|$ 和 $|E|$ 分别表示该网络中的节点数和链路数, C_{ij} 为链路 (i, j) 的代价, 代价矩阵为 $C=[C_{ij}]$ 。源节点和目的节点分别用 S 和 D 表示, 每个链路的连接用 I_{ij} 表示^[9], 定义如下:

$$I_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{如果从节点 } i \text{ 到节点 } j \text{ 的路径存在} \\ 0 & \text{如果从节点 } i \text{ 到节点 } j \text{ 的路径不存在} \end{cases}$$

显然 I_{ij} 的对角线的元素为0以及满足条件: 若 $I_{ii}=1$, 且 $I_{ik}=1$, 则 $I_{kk}=1$ 。使用这种定义, 则最短路径问题就可转化为求最小值的优化问题, 目标函数可表示为

$$\min \sum_{i=S}^D \sum_{j=D}^D C_{ij} \cdot I_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=S}^D I_{ij} - \sum_{j=S}^D I_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{if } i=S \\ -1, & \text{if } i=D \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$I_{ij} \in \{0, 1\}, \text{ for all } i \quad (2)$$

式(2)保证了源节点和目的节点之间的路径最短。

2 最短路径路由的遗传算法

2.1 遗传算法的编码表示

在标准遗传算法中, 如何将问题的解转换为编码表达的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60172035, 90304018); 湖北省自然科学基金资助项目 (2004ABA014); 湖北省高等学校教学研究基金资助项目 (20040231)

作者简介: 孙宝林 (1963—), 男, 副教授、博士生, 主研方向: 高性能网络技术及路由技术; 李腊元, 教授、博导; 陈 华, 硕士、讲师

定稿日期: 2004-03-05

E-mail: sun0163@163.com

染色体是遗传算法的关键问题。近几年来,针对特殊问题,提出了各种非0-1串的编码方法。如约束优化的实数编码,组合优化的整数编码等。选择适当的候选解的表达方法是遗传算法解决实际问题的基础。对于任何应用问题,都必须将解的表达方法和适于问题的遗传操作结合起来分析考虑。研究表明^[7,9,11],遗传算法对路径优化问题的求解非常有效,能在较短时间内,以较高的概率获得一组最优或次最优方案。

在该算法中,遗传算法的染色体由一系列的整数队列组成,即基于路径表示的编码方法,该方法是一种最自然、最简单的表示方法^[9]。该方法要求每个个体的染色体编码中不允许有重复的基因码,也就是说要满足任一个节点在路径中只能访问一次的约束。染色体的第一位置总是路径的源节点,最后一个位置是目的节点,染色体的长度是变化的,但不可能超过最大长度 N (N 为网络的节点数)。染色体编码即为从源节点到目的节点的队列组成,该信息在实时路由协议是容易获取和维护的。如从源节点 S 到目的节点 D 的一个染色体编码为“ $SN_1N_2\cdots N_kD$ ”,如图1所示。

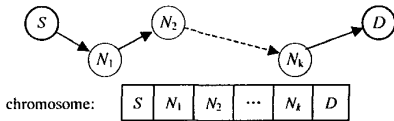


图1 路由路径和它的编码表示

染色体编码的第一位置基因(节点)是源节点,第二位置基因是从与源节点连接的其它节点中随机选择或启发式选择。选择的节点从结构信息库中删除,以避免重复选择。这个过程重复下去,直至到达目的节点。

2.2 适应度函数

由于遗传算法在进化搜索中基本不利用外部信息,仅以适应度函数为依据,利用种群中每个个体的适应度值来进行搜索,因此适应度函数直接影响到遗传算法的收敛速度以及能否找到全局最优解。假设初始种群的大小为 $H=\{h_1, h_2, \cdots, h_p\}$, $C(h_i)$ 为染色体 h_i (多播树)的总代价, $C(L)$ 为网络中链路的总代价,染色体 h_i 的适应度函数可以定义为

$$f(h_i) = 1 - C(h_i)/C(L) \quad (0 \leq f(h_i) < 1) \quad (3)$$

为了克服选择中^[9]出现收敛到局部最优解的情况,可以对适应度函数进行采用适应度函数尺度变换的方法解决,即设原适应度函数为 f ,变换后为 \bar{f} ,则线性变换可用下式表示:

$$\bar{f} = \alpha \cdot f + \beta \quad (4)$$

并且满足:(1)原适应度函数的平均值要等于变换后的适应度函数的平均值,即 $\bar{f}_{avg} = f_{avg}$; (2)变换后适应度函数最大值应等于原适应度函数的指定倍数,以控制适应度函数最大的个体在下一代中的复制数。研究表明^[11],指定倍数 λ 可在1.0~2.0之间。从而可确定线性比例的系数

$$\begin{aligned} \bar{f}_{\max} &= \lambda \cdot f_{avg}, & \alpha &= \frac{f_{avg}}{f_{avg} - f_{\min}}, \\ \beta &= \frac{-f_{\min} \cdot f_{avg}}{f_{avg} - f_{\min}} \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 选择操作

选择操作是用来确定交叉个体,以及被选个体将产生多少个子代个体。选择操作一般有两个过程:首先是计算适应度;其次是按照适应度值从大到小进行排序,即 $\bar{f}(h_1) \geq \bar{f}(h_2) \geq \cdots \geq \bar{f}(h_p)$,则适应度最大的就是最好的个体,将

最好的个体选作父个体。各个个体的选择概率和其适应度值成比例,个体适应度值越大,则被选择的概率就越高。如果产生相同的染色体,则只保留一个染色体,将其余的染色体删除,这个过程重复进行完成个体的选择。为了避免在种群中出现个别或极少数适应度相当高的个体,容易过早地产生收敛以及进化过程陷于停顿的状态,难于找到全局最优解,所以要对适应度函数采用适应度函数尺度变换的方法来解决,即式(4)的变换。经过上述的适应度函数的尺度变换就可以较好地保证收敛到全局最优解^[11]。

2.4 交叉操作

交叉操作是指按一定概率随机从亲代群体中选择两个个体,随机将两个亲代个体的部分结构相互交换,生成两个新的子代个体。交叉操作产生的两个子代个体,都包含两个亲代个体的遗传基因,但与亲代个体不同。因此,交叉操作能提高遗传算法的搜索能力,在适当选择策略下,通过交叉操作可提高向全局最优解的收敛程度。

在该算法中,交叉不同于传统的单点交叉,两个染色体选择一个公共的基因(节点)作为交叉点,交叉点不依赖于节点在路径中的位置,当有两个以上的公共的节点时,只需选择其中之一作为交叉点,通常选择第一个公共点进行交叉^[9]。图2中的节点 N_2 和 N_5 是两个公共节点,选择 N_2 作为交叉点。

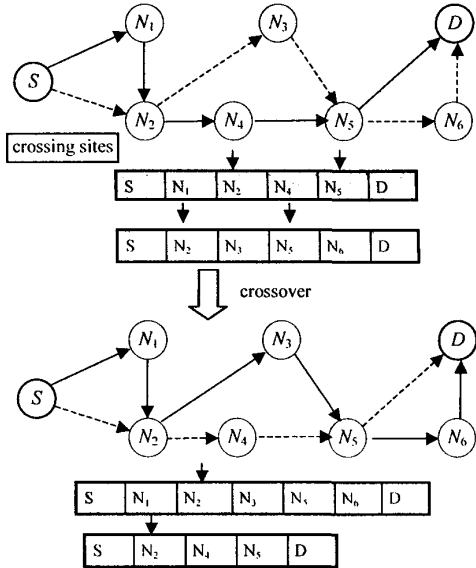


图2 交叉操作的处理过程

2.5 变异操作

选择操作之后是子代的变异操作,变异操作是一种基本操作,它在染色体上自发地产生随机的变化。在遗传算法中,变异操作可以提供初始种群中不含有的基因,或找回选择过程中丢失的基因,为种群提供新的内容。变异操作以一个很小的随机概率改变染色体上某些基因,找回较好的基因,与种群的大小无关。变异操作本身是一种局部随机搜索,与选择操作结合在一起,保证了遗传算法的有效性,使遗传算法具有局部的随机搜索能力;同时使得遗传算法保持种群的多样性,以防止出现非成熟收敛。图3所示为变异操作的处理过程,从染色体中随机选择一个基因(节点 N_2)为变异点,从源节点到变异点的基因(节点)保持不变,变异点之后的基因(节点)从连接的基因(节点)随机选择,直到目的节点。

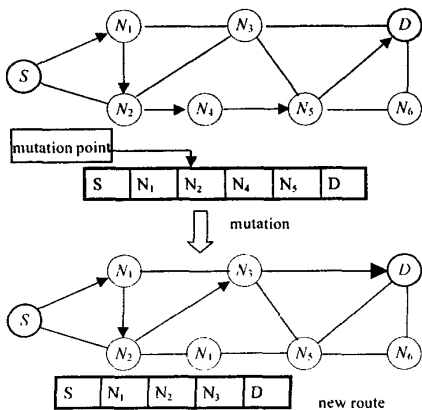


图3 变异操作的处理过程

3 算法分析和仿真实验

3.1 收敛性分析

定理 本文提出的遗传算法定能收敛到全局最优解。

证明 本文提出的遗传算法具有以下特点：(1)采用基于路径表示的变长染色体编码方法；(2)交叉概率在(0, 1)之间进行交叉；(3)变异概率在(0, 1)之间；(4)采用适度函数尺度变换的方法解决了在种群中出现个别或极少数适应度相当高的个体，导致这些个体在种群中迅速繁殖，容易过早地产生收敛以及进化过程陷于停顿的状态，难以找到全局最优解的问题。根据文献[11]中关于锦标赛选择法及变长染色体、交叉操作、变异操作等特点，本文提出的遗传算法可收敛到全局最优解。

对于具有NP难度的QoS路由问题，可以将此算法进行扩充，以适应具有NP难度的QoS路由问题，当网络规模很大时，求出全局最优解时间复杂性很大，这时可以通过限定遗传代数的方法，求出一个性能较好的次优解来。

3.2 仿真实验

该遗传算法通过计算机仿真实验与存在的遗传算法Munemoto^[7]算法、Inagaki^[8]算法和Ahn^[9]算法进行比较，所有仿真程序用C语言实现。为了较好地与这3种算法进行比较，其网络的节点和网络结构采用文献[9]的结构，即网络的节点数为20，网络结构如图5所示，选择采用锦标赛选择法（竞赛规模 $Tour=2$ ），交叉率设为0.9，变异率设为0.05。图4~图6所示为4个算法所求的一个源节点到目的节点的最短路径（粗实线表示）以及计算的最小代价，该算法计算的最小代价与Ahn算法的最小代价一致。图7为该算法与遗传算法Munemoto算法、Inagaki算法和Ahn算法的全局收敛性进行比较，说明该算法全局收敛性好，收敛速度明显优于其它3种算法，可靠性高。

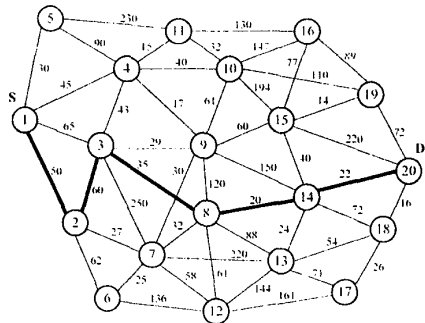


图4 Munemoto算法的计算结果

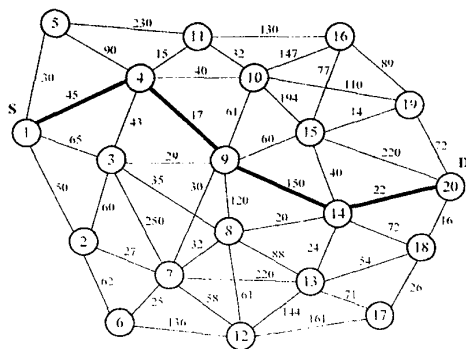


图5 Inagaki算法的计算结果

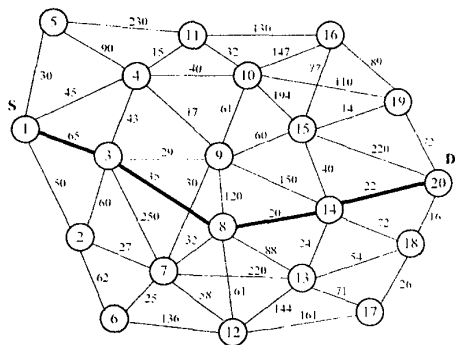


图6 该算法和Ahn算法的计算结果

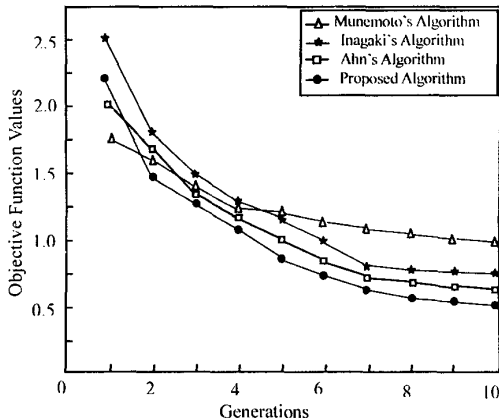


图7 4个算法的收敛特性

4 结论

本文主要研究了用遗传算法解决最短路径路由的优化问题，交叉操作和变异操作工作在可变长的染色体。交叉操作和变异操作的相结合保证了最优解的搜索能力和解的全局收敛性。实验表明，该算法收敛速度快，可靠性高，能满足在实时通信环境、高动态的拓扑结构以及QoS单播和多播路由的网络结构的需求。

参考文献

- 李腊元, 李春林. 计算机网络技术. 北京: 国防工业出版社, 2001
- Sun Baolin, Yin Xianhong, Li Layuan. Optimizing Fuzzy Controllers for QoS Improvement in DiffServ Networks. In: Proceedings of the 7th Joint Conference on Information Sciences (JCIS 2003), Cary, North Carolina, USA, 2003-09: 521-525
- Li Layuan, Li Chunlin. A Routing Protocol for Dynamic and Large Computer Networks with Clustering Topology. Computer Communication, 2000, 23(2): 171-176

(下转第162页)

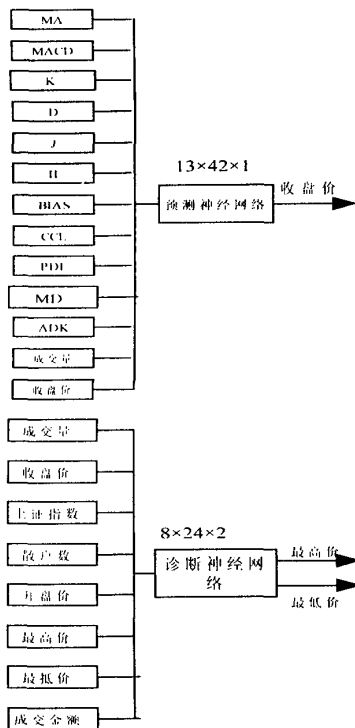


图3 双神经网络预测输出

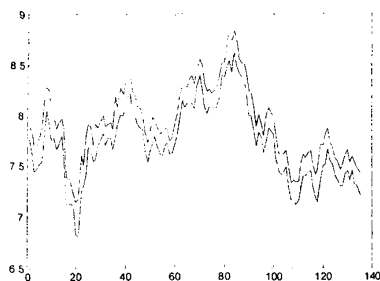


图4 诊断神经网络预测输出 (横轴为天数, 竖轴为股价(元))

3 仿真验证

选取长春燃气2003年10月份的数据来测试, 测试结果如表2所示。

从表2可以看出, 即使预测收盘价和真实值有些误差, 但只要预测值落在预测的最高和最低价范围内, 预测值仍然具有参考价值。

为了进一步验证它的可行性, 选取长春燃气2003年11月

(上接第144页)

- Li Layuan. The Routing Protocol for Dynamic and Large Computer Networks. Journal of Computers, 1998, 11(2): 137-144
- Xiawei Z, Changjia C, Gang Z. A Genetic Algorithm for Multicasting Routing Problem. International Conference Communication Technology Proceedings, WCC-ICCT 2000, 2000: 1248-1253
- Zhang Q, Lenug Y W. An Orthogonal Genetic Algorithm for Multimedia Multicast Routing. IEEE Trans. Evolutionary Computation, 1999, 3: 53-62
- Munemoto M, Takai Y, Sato Y. A Migration Scheme for the Genetic Adaptive Routing Algorithm. IEEE International Conference on Sys-

份数据来测试, 测试结果如表3。

表2 双神经网络2003年10月份的测试结果

预测最高价	7.702 6	7.807 4	7.867 1	7.679 1
预测最低价	7.502 2	7.509 4	7.672 6	7.510 1
预测收盘价	7.58	7.74	7.61	7.55
真实收盘价	7.58	7.78	7.74	7.61
预测最高价	7.605 1	7.658 2	7.532 3	7.589 9
预测最低价	7.418 6	7.452 7	7.357 9	7.450 7
预测收盘价	7.44	7.6	7.49	7.43
真实收盘价	7.43	7.49	7.43	7.47
预测最高价	7.568 0	7.552 2	7.464 7	7.512 4
预测最低价	7.394	7.3657	7.3009	7.3037
预测收盘价	7.55	7.48	7.47	7.39
真实收盘价	7.48	7.47	7.39	7.44
预测最高价	7.537 9	7.483 6	7.429 6	7.428 2
预测最低价	7.316 4	7.302 9	7.210 6	7.206 7
预测收盘价	7.47	7.5	7.4	7.22
真实收盘价	7.50	7.40	7.22	7.25

表3 双神经网络2003年11月份数据测试结果

预测最高价	7.369 0	7.580 5	7.381 1	7.180 3
预测最低价	7.201 3	7.299 7	7.139 4	6.789 5
预测收盘价	7.28	7.40	7.16	6.84
真实收盘价	7.33	7.46	7.22	6.87
预测最高价	7.062 5	7.067	7.03	7.12
预测最低价	6.877 6	6.93	6.85	6.80
预测收盘价	7.03	7.04	5.90	7.01
真实收盘价	7.06	7.02	6.86	7.02

从表3可以发现倒数第2列, 预测收盘价5.90元没有落在预测最高价7.03元和最低价6.85元范围内, 因而不具备参考价值。事实上, 预测值和真实值确实相差很大, 故该评估正确。

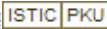
4 结论

基于历史会重演, BP神经网络具有自学习、自组织, 尤其是以任意精度逼近非线性有界函数的特点, 采用BP神经网络预测周期性箱体振荡股票, 效果很好, 在此基础上, 再引入诊断神经网络, 对预测进行诊断, 有效提高了预测的可信度。仿真试验说明该方案是可行的, 值得进一步研究和探讨。

参考文献

- 蔡自兴. 智能控制—基础与应用. 北京: 国防工业出版社, 1998
- 冯冬青. 模糊智能控制. 北京: 化学工业出版社, 1998
- 袁晓东. 神经网络在股票价格预测中的应用. 机械工业学院学报, 2003, 17(3): 70-74
- 许东, 吴铮. 基于MATLAB6.X的系统分析与设计—神经网络. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002-09
- tems, Man, and Cybernetics, 1998: 2774-2779
- Inagaki J, Haseyama M, Kitajima H. A Genetic Algorithm for Determining Multiple Routes and Its Applications. Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 1999: 137-140
- Ahn C W, Ramakrishna R S. A Genetic Algorithm for Shortest Path Routing Problem and the Sizing of Populations. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(6): 566-579
- Xiang F, Junzhou L, Jieyi W, et al. QoS Routing Based on Genetic Algorithm. Computer Communications, 1999, 22: 1392-1399
- 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现. 西安: 西安交通大学出版社, 2002

基于遗传算法的最短路径路由优化算法

作者: [孙宝林](#), [李腊元](#), [陈华](#), [SUN Baolin](#), [LI Layuan](#), [CHEN Hua](#)
作者单位: [孙宝林, SUN Baolin\(武汉理工大学计算机科学与技术学院, 武汉, 430063; 武汉科技学院数理系, 武汉, 430073\)](#), [李腊元, LI Layuan\(武汉理工大学计算机科学与技术学院, 武汉, 430063\)](#), [陈华, CHEN Hua\(武汉科技学院数理系, 武汉, 430073\)](#)
刊名: [计算机工程](#) 
英文刊名: [COMPUTER ENGINEERING](#)
年, 卷(期): 2005, 31(6)
被引用次数: 41次

参考文献(11条)

1. [李腊元; 李春林](#) [计算机网络技术](#) 2001
2. [Sun Baolin; Yin Xianhong; Li Layuan](#) [Optimizing Fuzzy Controllers for QoS Improvement in DiffServ Networks](#) 2003
3. [Li Layuan; Li Chunlin](#) [A Routing Protocol for Dynamic and Large Computer Networks with Clustering Topology](#) 2000(02)
4. [李腊元](#) [动态大型计算机网络的路由通信协议](#) [期刊论文]-[计算机学报](#) 1998(2)
5. [Xiawei Z; Changjia C; Gang Z](#) [A Genetic Algorithm for Multicasting Routing Problem](#) 2000
6. [Zhang Q; Lenug Y W](#) [An Orthogonal Genetic Algorithm for Multimedia Multicast Routing](#) 1999
7. [Munemoto M; Takai Y; Sato Y](#) [A Migration Scheme for the Genetic Adaptive Routing Algorithm](#) 1998
8. [Inagaki J; Haseyama M; Kitajima H](#) [A Genetic Algorithm for Determining Multiple Routes and Its Applications](#) 1999
9. [Ahn C W; Ramakrishna R S](#) [A Genetic Algorithm for Shortest Path Routing Problem and the Sizing of Populations](#) 2002(06)
10. [Xiang F; Junzhou L; Jieyi W](#) [QoS Routing Based on Genetic Algorithm](#) 1999
11. [王小平; 曹立明](#) [遗传算法--理论、应用与软件实现](#) 2002

本文读者也读过(10条)

1. [桂超. 汪波. Gui, Chao. Wang, Bo](#) [基于遗传算法的最短路径路由优化算法](#) [期刊论文]-[微计算机信息](#) 2005(35)
2. [康晓军. 王茂才. KANG Xiao-jun. WANG Mao-cai](#) [基于遗传算法的最短路径问题求解](#) [期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2008, 44(23)
3. [张永军. 高兰芳. 顾晚仪. ZHANG Yong-jun. GAO Lan-fang. GU Wan-yi](#) [一种最短路由问题的遗传算法研究](#) [期刊论文]-[北京理工大学学报](#) 2007, 27(11)
4. [刘汝正. LIU RUZHENG](#) [基于遗传算法的最短路径的计算](#) [期刊论文]-[微计算机信息](#) 2007, 23(15)
5. [徐庆征. 柯熙政. XU Qing-zheng. KE Xi-zheng](#) [求解最短路径的遗传算法中若干问题的讨论](#) [期刊论文]-[计算机工程与设计](#) 2008, 29(6)
6. [邹亮. 徐建闽. ZOU Liang. XU Jian-min](#) [基于遗传算法的动态网络中最短路径问题算法](#) [期刊论文]-[计算机应用](#) 2005, 25(4)
7. [祝延军. 胡纯德. 高随祥. Zhu Yanjun. Hu Chunde. Gao Suixiang](#) [最短路由问题的改进单亲进化遗传算法](#) [期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2005, 41(8)
8. [基于GIS与遗传算法最短路径问题的研究](#) [期刊论文]-[黑龙江科技信息](#) 2009(32)
9. [何瑞春. 李引珍. He Ruichun. LI Yinzhen](#) [最佳相异度相异最短路径的遗传算法](#) [期刊论文]-[兰州交通大学学报\(自然科学版\)](#) 2005, 24(3)

引证文献(35条)

1. 张建萍, 刘希玉 遗传算法在无源光网络中的应用研究—基于ONU与OBD的位置分配问题[期刊论文]-计算机技术与发展 2006(11)
2. 袁桂玲, 袁军强 基于GA算法的无线躯体传感网络的自适应优化研究[期刊论文]-计算机测量与控制 2011(05)
3. 张兆印, 李艳芳, 陈超 基于改进遗传算法的教学用时分配优化[期刊论文]-计算机时代 2009(11)
4. 孙宝林, 李腊元 基于遗传算法的QoS多播路由优化算法[期刊论文]-计算机工程 2005(14)
5. 吴静, 王鹏涛 基于遗传算法的无向网络路径优化[期刊论文]-天津师范大学学报(自然科学版) 2007(03)
6. 王谷, 过秀成 不确定网络路径优化模型及算法研究[期刊论文]-交通与计算机 2007(04)
7. 梁欢 基于混合遗传算法的移动ip路由选择[期刊论文]-计算机与数字工程 2006(07)
8. 李永先, 贾成松 基于遗传算法的动态最佳路径问题求解[期刊论文]-昆明冶金高等专科学校学报 2012(01)
9. 朱冬梅, 盛建瓴 遗传模拟退火算法在组播路由选择中的应用[期刊论文]-计算机工程与科学 2011(01)
10. 叶晋, 史有群, 杨学斌, 杜娟 遗传算法在轨道交通换乘路径求解问题上的应用[期刊论文]-电脑与信息技术 2009(04)
11. 温晓磊 基于混合算法的最短路径优化算法[期刊论文]-天津理工大学学报 2009(01)
12. 张强, 师军 基于遗传算法的分层路径寻优算法[期刊论文]-计算机工程与设计 2008(16)
13. 胡中华, 赵敏 求解最短路径路由由蚁群算法的改进[期刊论文]-石河子大学学报(自然科学版) 2010(02)
14. 温晓磊 混合算法在物流运输问题中的研究和应用[学位论文]硕士 2010
15. 许栋栋 区域电网黑启动路径优化研究[学位论文]硕士 2011
16. 别玉霞 移动多跳多链路多媒体网络的路由优化技术研究[学位论文]硕士 2007
17. 罗也 基于遗传禁忌算法的Ad Hoc网络路由技术[学位论文]硕士 2010
18. 温晓磊 混合算法在物流运输问题中的研究和应用[学位论文]硕士 2010
19. 耿俊 基于路径模式的对等网资源请求消息传播技术[学位论文]硕士 2006
20. 徐斌 多QoS约束的组播路由优化算法研究[学位论文]硕士 2011
21. 吴静 改进的智能算法及其在物流运输优化中的应用[学位论文]硕士 2008
22. 何松 电力通信网资源管理系统中配置管理和路由搜索的研究与实现[学位论文]硕士 2007
23. 张建萍 基于并行机制的免疫遗传算法的研究及应用[学位论文]硕士 2007
24. 金星 采用混合智能算法的三层光网络静态业务选路与资源优化算法研究[学位论文]硕士 2011
25. 刘会金 蚂蚁群算法在网络路由优化上的应用研究[学位论文]硕士 2008
26. 李帅 基于计算智能的无线传感器网络自组织方法研究[学位论文]硕士 2013
27. 马楠 基于ACO路由算法的研究[学位论文]硕士 2005
28. 张铭泉 粒子群算法在电力通信网网络管理中的应用研究[学位论文]硕士 2006
29. 梁欢 基于遗传算法和蚂蚁算法的移动IP路由选择[学位论文]硕士 2006
30. 乔连军 WebGIS中基于遗传算法的最短路径求解方法研究[学位论文]硕士 2006
31. 何松 电力通信网资源管理系统中配置管理和路由搜索的研究与实现[学位论文]硕士 2007
32. 王志强 基于遗传算法对山西工行QOS路由优化的研究[学位论文]硕士 2008
33. 孟学雷 突发事件条件下列车运行组织理论与方法研究[学位论文]博士 2011

34. [常钢](#) [民航机场停机位分配与优化技术研究](#)[学位论文]博士 2006
35. [孙宝林](#) [移动Ad Hoc网络QoS多播路由技术的研究](#)[学位论文]博士 2006

引用本文格式: [孙宝林](#), [李腊元](#), [陈华](#), [SUN Baolin](#), [LI Layuan](#), [CHEN Hua](#) [基于遗传算法的最短路径路由优化算法](#)[期刊论文]-[计算机工程](#) 2005 (6)