

基于 PSO 和 SA 混合优化的智能容错 QoS 路由机制

张卿祎¹, 王兴伟², 黄敏³

(1. 东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110169; 2. 东北大学 软件学院, 辽宁 沈阳 110169;
3. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 由于网络的异构性、移动性和不稳定性等特点导致网络在发生故障时连接的可靠性变差, 不能满足用户服务质量(QoS)需求, 因此网络需要具有保证 QoS 的容错路由能力. 为此提出基于粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)和模拟退火(simulated annealing, SA)混合优化的容错 QoS 路由机制. 考虑到网络环境的动态性, 引入模糊数学和概率论定量刻画网络模型, 采用共享风险链路组(shared risk link group, SRLG)分离和共享通路的预防式保护策略建立备份路径, 使其端到端可靠性、代价和路径 QoS 评价价值达到最优. 仿真结果表明, 所提出的容错路由机制具有良好的路由有效性、故障恢复率和资源利用率, 是可行和有效的.

关 键 词: 容错路由; 服务质量; 共享风险链路组; 粒子群优化; 模拟退火

中图分类号: TP 393.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)03-0325-06

An Intelligent Fault-Tolerant QoS Routing Mechanism Based on PSO and SA Hybrid Optimization

ZHANG Qing-yi¹, WANG Xing-wei², HUANG Min³

(1. School of Computer Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China; 2. School of Software, Northeastern University, Shenyang 110169, China; 3. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Xing-wei, E-mail: wangxw@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Network is vulnerable when failures happen due to its heterogeneity, mobility and instability, at the same time reliability and user QoS (quality of service) cannot be guaranteed. Therefore fault tolerance needs to be improved to guarantee the reliability of QoS routing. For this purpose, an intelligent fault-tolerant QoS routing mechanism was proposed based on PSO (particle swarm optimization) and SA (simulated annealing). Considering the network dynamics, network model was quantitatively described by introducing knowledge of fuzzy mathematics and probability theory. The SRLG (shared risk link group) disjoint and preventive shared-path protective strategy were adopted to find backup path, which optimized end-to-end reliability, cost and QoS parameters. Simulation results indicate that the proposed mechanism has good performance on the percentage of route validity, fault-restoring ratio and resource utilization and thus is feasible and effective.

Key words: fault-tolerant routing; quality of service (QoS); shared risk link group; particle swarm optimization; simulated annealing

各种新型网络应用的出现丰富并改善着人类的生活. 虽然通信技术和计算机网络的发展为新

收稿日期: 2015-10-28

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(61225012, 71325002); 国家自然科学基金资助项目(61572123); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金优先发展领域资助课题(20120042130003).

作者简介: 张卿祎(1990-), 男, 山西太原人, 东北大学博士研究生; 王兴伟(1968-), 男, 辽宁盖州人, 东北大学教授, 博士生导师; 黄敏(1968-), 女, 福建长乐人, 东北大学教授, 博士生导师.

型应用提供了有力支持,但是由于目前网络的异构性、移动性、不稳定性等特点,导致网络在发生故障时用户的连接可靠性得不到保证。而且新型应用对网络 QoS 的要求越来越高,客观上要求网络提高容错能力并兼顾 QoS 保证^[1]。容错 QoS 路由是有效方法之一。

容错路由是保证连接可靠性的重要方法,通常分为预防式和反应式两类。由于反应式策略的时间代价高,不能很好地满足用户 QoS 需求,因此,本文采用预防式策略,并通过共享路径保护和 SRLG 分离的策略一定程度上弥补预防式策略备份资源利用率低的缺陷。

实际通信中,由于网络参数是动态变化的,用户对 QoS 的需求难以定量地准确表达,且链路状态的测量也是不精确的^[2]。因此,本文通过采用模糊数学相关方法定量地描述不精确的网络参数和用户相关 QoS 需求。

容错 QoS 路由问题是多约束下求解可行路径的问题,属于 NP 完全问题,而用于解决此类问题的启发式算法往往具有很大的局限性。因此,本文采用结合 PSO 算法的全局寻优能力和 SA 算法较强跳出局部最优解能力的 PSOSA 智能优化算法解决此问题,该混合优化算法已被成功应用,具有较好的性能。

文献[3]提出划分网络失效独立恢复域的方法,保证域内恢复时间的上限。文献[4]提出共享备份路径恢复机制,分离的备份路径可共享同一链路上的带宽。文献[5]用模拟退火构造备份路由表来恢复网络中单链路故障。该方案只将故障点和受影响的邻居节点上的流量转移到备份路径上。文献[6]提出一种可调生存性生成树的机制来解决网络失效问题,该机制可量化任意生成树的生存性来提供灵活的路由选择,并同时考虑树的 QoS。文献[7]提出基于快速生成树重连接的以太网生成树,使用部分空间保护机制来提供不同的保护性,使用备份带宽来保护小部分链路,具有更少的信令开销、更快的恢复和更少的重路由次数。文献[8]使用通道和多址技术解决网络双链路或单节点失效。文献[9]提出概率相关失效的最小化链路失效的跨层模型。通过该模型,网络可以量化备份路径的可靠性,并基于此选择多个可靠备份路径来保证通信。文献[10]提出基于虚拟网络的容错机制,建立物理网络和虚拟网络映射关系,并通过机会弹性嵌入的方法反应式地保护虚拟链路。

从上述研究工作可以看出,已有研究成果很

少兼顾容错和 QoS 双重需要,并且没有考虑路由信息的模糊性。为此,本文在满足用户 QoS 条件的前提下综合考虑了路由信息的模糊性、备份资源利用率和故障恢复率。

1 问题描述

1.1 网络模型与用户需求

将真实的网络拓扑抽象成一个无向连通图 $G = (V, E)$, V 是节点集合, E 是链路集合^[11]。对于 E 中的每条链路 e_l , 设其可用带宽为 $[Bw_L, Bw_H]$ 、延迟为 $[Del_L, Del_H]$ 、出错率为 $[Los_L, Los_H]$ 。用户 QoS 路由由连接请求包括: 带宽需求 $[bw_{rq_L}, bw_{rq_H}]$ 、延迟约束 $[del_{rq_L}, del_{rq_H}]$ 、出错率约束 $[los_{rq_L}, los_{rq_H}]$ 。

1.2 链路参数与路径 QoS 评价

链路 e_l 能够满足用户带宽需求 bw 的概率 $S'_B(bw)$ 和延迟约束 del 的概率 $S'_D(del)$ 分别用式(1)、式(2)描述。

$$S'_B(bw) = \begin{cases} 0, & bw > Bw_H; \\ \varepsilon, & bw = Bw_H; \\ \left(\frac{Bw_H - bw}{Bw_H - Bw_L} \right)^k, & Bw_L < bw < Bw_H; \\ 1, & bw \leq Bw_L. \end{cases} \quad (1)$$

$$S'_D(del) = \begin{cases} \frac{1}{Del_H - Del_L}, & Del_L \leq del \leq Del_H; \\ 0, & otherwise. \end{cases} \quad (2)$$

其中 $k > 0, \varepsilon > 0$ 且 $\varepsilon \ll 1$ 。式(2)表明链路能够提供带宽 bw 的概率与带宽值负相关。

将占用的实际带宽定义为 UBw^l , 其中 $l \in P$, P 为路径, B_L 是瓶颈带宽, 值为 $\text{Min}_{l \in P}(UBw^l)$ 。实际占用带宽 g_B^P 定义如式(3)、式(4):

$$g_B^P = f_B^P(UBw^l) \cdot \prod_{l \in P} S'_B(UBw^l); \quad (3)$$

$$f_B^P(bw) = \begin{cases} 0, & bw < bw_{rq_L}; \\ \varepsilon, & bw = bw_{rq_L}; \\ e^{-\left(\frac{bw_{rq_H} - bw}{bw - bw_{rq_L}} \right)^2}, & bw_{rq_L} < bw < bw_{rq_H}; \\ 1, & bw \geq bw_{rq_H}. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $f_B^P(UBw^l)$ 表示用户在瓶颈带宽为 UBw^l 时的满意度函数; $S'_B(UBw^l)$ 表示链路能够保证提供带宽 UBw^l 的概率; 路径 P 可以满足用户带宽需求的概率为 P 上各个链路能够保证提供带宽的概率的乘积。

同样, 设用户使用路径 P 上的各段链路 l 的

延迟取值区间为 $[\text{Del}_L^l, \text{Del}_H^l]$, 令 $D_L = \sum_{l \in P} \text{Del}_L^l$, $D_H = \sum_{l \in P} \text{Del}_H^l$, 则路径 P 端到端延迟取值区间为 $[D_L, D_H]$. 故 P 上端到端延迟的概率 g_D^P 定义如下:

$$g_D^P = \frac{\int_{D_L}^{D_H} f_D^P(\text{del}) d(\text{del})}{\int_{D_L}^{D_H} d(\text{del})}; \quad (5)$$

$$f_D^P(\text{del}) = \begin{cases} 0, & \text{del} > \text{del_rq}_H; \\ \varepsilon, & \text{del} = \text{del_rq}_H; \\ 1 - e^{-\left(\frac{\text{del_rq}_H - \text{del}}{\text{del} - \text{del_rq}_L}\right)^2}, & \text{del_rq}_L < \text{del} < \text{del_rq}_H; \\ 1, & \text{del} \leq \text{del_rq}_L. \end{cases} \quad (6)$$

其中, $f_D^P(\text{del})$ 表示端到端延迟为 del 时的满意度函数. 链路延迟计算定义为对路径延迟值在变化区间积分.

对于链路 e_l 满足出错率约束 los 的概率 $S_L^l(\text{los})$ 的定义以及路径 P 的出错率评价函数 $g_L^P(\text{los})$ 的定义与延迟约束相关定义类似, 只需将 del 用 los 替换即可. 最后定义端到端路径的 QoS 评价函数:

$$W_P = \alpha_B \cdot g_B^P + \alpha_D \cdot g_D^P + \alpha_L \cdot g_L^P. \quad (7)$$

其中: α_B, α_D 和 α_L 分别代表带宽、延迟和出错率所占的权重; $0 \leq \alpha_B, \alpha_D, \alpha_L \leq 1, \alpha_B + \alpha_D + \alpha_L = 1$. 本文将出错率的权重设为 $1/2$, 带宽和延迟的权重各为 $1/4$.

1.3 SRLG 分离的路径保护

SRLG 是指共享同一失效风险物理资源的一组链路. 每个 SRLG 全局唯一, 每条链路可能属于一个或多个 SRLG. 对于预防式容错 QoS 路由机制而言, 若工作路径 wp_n 和保护路径 bp_n 同时失效 (n 为编号), 则故障无法恢复. 本文仅考虑单 SRLG 故障的情况.

基于 SRLG 分离的路径保护是在源和目的之间找到 1 条工作路径和 1 条不经过同一 SRLG 的保护路径. SRLG 条件故障概率定义为

$$\text{CP}(\text{srlg}) = P(l_j \text{ failure} | l_i \text{ failure}). \quad (8)$$

其中 $\text{CP}(\text{srlg})$ 表示当 SRLG 故障时, 共享该 SRLG 的 2 条链路 l_i 和 l_j 同时失效的概率. 若连接可靠性要求 (即路径可靠度) 为 RD , 则 wp_n 和 bp_n 同时失效的概率应小于 $1 - \text{RD}$, 即这 2 条路径需满足式 (9) 条件:

$$\text{Max}_{\text{srlg} \in \text{CSIS}} (\text{CP}(\text{srlg})) \leq (1 - \text{RD}) / P(\text{wp}_n \text{ failure}). \quad (9)$$

其中, CSIS 是 wp_n 和 bp_n 共享的 SRLG 的集合. 若对于 wp_n 中每个 srlg 有 $\text{CP}(\text{srlg}) < (1 - \text{RD}) / P(\text{wp}_n \text{ failure})$, 则称此 srlg 为不需要被保护的 SRLG; 否则, 称此 srlg 是需要被保护的 SRLG (protected-SRLG, PSRLG), 找到的保护路径须 PSRLG 分离.

1.4 优化模型

优化目标是以用户 QoS 需求为前提, 使端到端可靠性、代价和 QoS 评价价值达到最优目标值. 链路代价函数 c_l' 定义如下:

$$c_l' = \begin{cases} +\infty, & r_l + p_l < \text{tp}_l; \\ \varepsilon, & p_l \geq \text{tp}_l; \\ c_l, & \text{other}. \end{cases} \quad (10)$$

其中: p_l 为预留的备份资源; r_l 为剩余资源; tp_l 为恢复单 SRLG 故障所需的保护路由资源最大值; c_l 为基本代价. 优化目标及约束如式 (11) ~ 式 (16) 所示:

$$L_H \rightarrow \min(L_H), \quad (11)$$

$$\sum_{e_l \in P} c_l' \rightarrow \min\left(\sum_{e_l \in P} c_l'\right), \quad (12)$$

$$W_P \rightarrow \max\{W_P\}, \quad (13)$$

$$\text{s. t.} \quad B_L \geq \text{bw_rq}_L, \quad (14)$$

$$D_H \leq \text{del_rq}_H, \quad (15)$$

$$L_H \leq \text{los_rq}_H. \quad (16)$$

2 算法设计

2.1 解的表达和初始解的生成

PSOSA 算法的每一个解为一条路径, 采用向量表示: $\mathbf{P}(i) = (e_1, e_2, \dots, e_{\text{len}})$, e 为链路, 所有链路组成从源到目的的一条路径. 采用随机路径算法生成初始解.

2.2 适值函数

从工作和保护路径对中选择一对使端到端可靠性、代价和 QoS 评价价值达到最优的路径作为本次循环的当前最优解. 所以, 适值函数定义为

$$\text{fitness}(\mathbf{P}) = \text{JP} \cdot L_H / W_P, \quad (17)$$

其中 JP 为跳数. 式 (17) 表示适值越小, 路径质量越高.

2.3 路由容错质量评价

通过算法寻找到的同一连接请求的主从路径对需要符合下述两个条件:

- 1) 工作路径和保护路径需 PSRLG 分离;
- 2) 共享保护资源的工作路径间需 PSRLG 分离.

2.4 初始温度选择及退温函数选择

初始温度采用公式 $t_0 = k\delta$ 确定, $k = 10, 20, 100, \dots$ 等试验值; $\delta = f_{\max} - f_{\min}$, f_{\max} 和 f_{\min} 分别为初始解中最大和最小的目标函数值。

将粒子群变换的新解作为模拟退火算法等温过程的初始解。收敛准则采用 Metropolis 准则, 其中, 适值函数(17)即为能量函数。退温函数选用常用的 $t_{k+1} = \alpha \cdot t_k$ 形式, 其中 $\alpha = 0.9$ 。

2.5 粒子飞行速度和位置更新

i 时刻粒子当前位置用 $X(i) = (e_1^i, e_2^i, e_3^i, \dots, e_{\text{len}}^i)$ 表示, 迭代更新后的粒子位置用 $X(j) = (e_1^j, e_2^j, e_3^j, \dots, e_{\text{len}}^j)$ 表示, 粒子飞行速度为 $v(i)$, 于是有

$$X(i) + v(i) = X(j), \quad (18)$$

$$X(j) - X(i) = v(i). \quad (19)$$

将 $v(i)$ 定义为一组变换:

$$v(i) = (\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_{\text{len}}),$$

$$\Psi_k: e_k^i \rightarrow e_k^j, k = 1, 2, \dots, \text{len}. \quad (20)$$

变换 Ψ_k 将 $X(i)$ 中的一个分量(1 条边)变成 $X(j)$ 中的对应分量。其中式(18)表示将粒子位置“先作 $v(i)$ 变换, 再作 $v(j)$ 变换”。式(19)表示其逆向操作。

设粒子 id 在时刻 i 的位置为 $X_{\text{id}}(i)$, 速度为 $v_{\text{id}}(i)$, 则下一时刻 $i+1$ 的位置可以表示为

$$X_{\text{id}}(i+1) = X_{\text{id}}(i) + v_{\text{id}}(i+1), \quad (21)$$

$$v_{\text{id}}(i+1) = w \times v_{\text{id}}(i) +$$

$$c_1 \times \text{rand}()_1 \times [P_{\text{id}}(i) - X_{\text{id}}(i)] +$$

$$c_2 \times \text{rand}()_2 \times [P_{\text{gd}}(i) - X_{\text{id}}(i)]. \quad (22)$$

式(22)中, 从初始时刻到 i 时, id 历经过的最佳位置为 $P_{\text{id}}(i)$, $P_{\text{gd}}(i)$ 为全局最优位置。 w, c_1, c_2 是对应的偏差权重系数。 $c_1 \times \text{rand}()_1$ 和 $c_2 \times \text{rand}()_2$ 分别表示位置变换 $P_{\text{id}}(i) - X_{\text{id}}(i)$ 和 $P_{\text{gd}}(i) - X_{\text{id}}(i)$ 发生的概率。其中, 一般取 w 由大到小递减变化, 变化范围 0.9 到 1.2, 表示 PSO 算法从广泛到局部精细搜索变化。加速常数 c_1 和 c_2 取值为 2, $\text{rand}()$ 是随机数生成器(0 到 1)。

2.6 工作流程

算法 PSOSA.

输入:

$G = (V, E)$, bw_req_L , del_req_H , los_req_H , k, α, t_0 , NC_{\max} , RD , $\text{SRLG} - \text{list}$

输出: wp, bp

1. Initialize particle swarm P by Stochastic Path Method; /* Include N particles */
2. **For** 1 **to** i **do**
3. **While** P_i can't satisfy the s. t. (14) ~

(16) **do**

4. Regenerate P_i by Stochastic Path Method;
5. **End while**
6. Calculate the fitness value of P_i by (17);
7. **End for**
8. Select P_i with min fitness value as P_{gd} ;
9. **While** $\prod_{l_i \in P_{\text{gd}}} \text{Pr}(l_i) < \text{RD}$ **do**
10. Generate the SIS of P_{gd} ; /* SIS is srlg set of a path */
11. **For** 1 **to** j **do**
12. **If** $\text{CP}(\text{srlg}_j) \geq (1 - \text{RD})/P(P_{\text{gd}} \text{ failure})$ **then** add srlg_j into SIS_d ; /* SIS_d is srlg set that must be disjoint */
13. **End for**
14. Calculate the subgraph G' by delete the SIS_d ;
15. Find the suboptimal P'_{gd} in G' ;
16. **If** $\text{Sig of Al. 2} = 0$ **then** $\text{wp} \leftarrow P_{\text{gd}}$; $\text{bp} \leftarrow P'_{\text{gd}}$; Update $\text{SRLG} - \text{list}$;
17. **If** $\text{NC} > \text{NC}_{\max}$ **then** **Reject Request**;
18. Calculate the new position and new velocity by (21), (22) of each P_i ;
19. **While** P_i can't satisfy the s. t. (14) ~ (16) **do**
20. Regenerate P_i ;
21. **End while**
22. Update the P_{gd} with smaller fitness value;
23. **While** 1 **to** i **do**
24. **If** $\Delta E < 0$ of P_i **then** update the P_i ;
25. **Continue**
26. Accept the P_i by Metropolis Criterion;
27. **End while**
28. Annealing by $t_{k+1} = \alpha \cdot t_k$;
29. **End while**
30. **Return** $\text{wp} \leftarrow P_{\text{gd}}$; $\text{bp} \leftarrow P'_{\text{gd}}$; Update $\text{SRLG} - \text{list}$

算法 1 ~ 8 行的作用是生成满足约束的初始粒子群, 并选出当前全局最优粒子; 9 ~ 16 行的作用是为不满足可靠度要求的工作路径生成备份路径, 并输出符合容错质量评价条件的主从路径; 算法 18 ~ 22 行的作用是计算粒子更新后的新速度及新位置, 选择满足约束条件的新粒子; 算法 23 ~ 27 行的作用是更新满足约束条件的新粒子的适应值, 并根据 Metropolis 准则判断是否接受; 算法 28 行的作用是进行退温。

3 性能评价

基于 NS2 平台在 4 个实际的网络拓扑 (NSFNet、CERNET2、CERNET 和 GEANT) 上对本文设计的机制 (PSOSA) 进行仿真实验,并与采用基于多 Agent 进化算法的机制 (Multi-Agent), 文献[8]提出的机制 (FRuT) 和文献[12]提出的机制 (DRLR) 进行对比分析。

NS2 平台的相关仿真参数如表 1 所示. 每个 SRLG 的条件故障概率随机从 10% ,20% ,50% 选择. 请求到达速率和持续时间分别服从对应参数的泊松分布和指数分布。

表 1 仿真参数设置 Table 1 Simulation parameters	
参数名称	值
请求到达速率	β (泊松分布均值)
持续时间	$1/\mu$ (指数分布均值)
总负载	β/μ
通信时间/s	2
记录间隔/s	0.01
模拟连接次数	10^6

4 种机制的路由成功率对比如图 1 所示. 结果表明对于网络参数的动态性,PSOSA 和 Multi-Agent 有较强的适应性,FRuT 只考虑双链路失效,而 DRLR 考虑单链路失效且没有考虑网络参数的动态变化问题,因而性能较差。

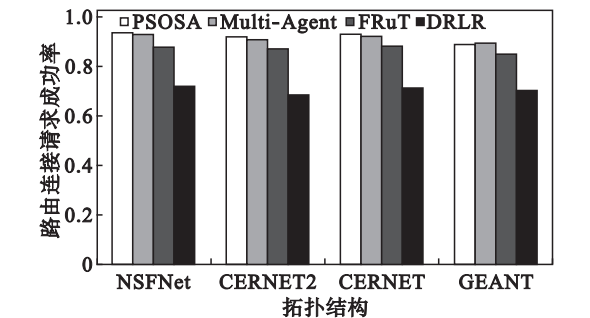


图 1 路由成功率的比较

Fig. 1 Comparison of percentage of route validity

图 2 给出在 CERNET 拓扑上 4 种机制平均资源占用量的对比. 结果表明随着负载的增加,4 种机制平均资源占用量逐渐减小,资源利用率都逐渐增高,但增高速率 PSOSA 较 DRLR 有较大提升. 这是因为 PSOSA 采用共享通路的保护策略,全局优化了资源配置,使其没有更多的冗余预留. 因为 Multi-Agent 算法缺乏全局信息,依赖

Agent 的自治行为实现进化,容易陷入局部最优解,所以增高速率不如 PSOSA. 而 FRuT 虽然同样采用共享通路的保护策略,但其多址技术增加了资源预留。

4 种机制的故障恢复率比较如图 3 所示. 结果表明 PSOSA 在 4 个拓扑中的故障恢复率性能在小型拓扑上较优,而在较大型的拓扑上和 Multi-Agent 相差无几. 因 PSOSA 可以处理单 SRLG 故障,容错能力较 DRLR 大大提高. 而由于 FRuT 可以处理单节点故障,所以 FRuT 稍逊于 PSOSA。

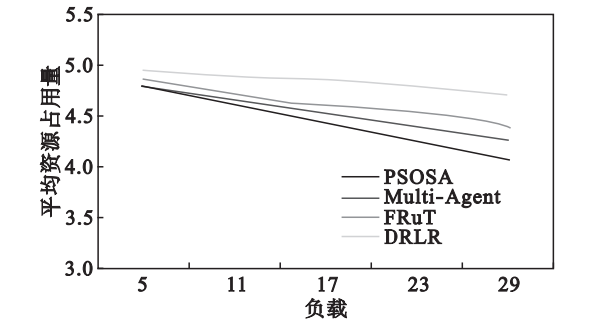


图 2 平均资源占用量随负载变化的情况

Fig. 2 Resource utilization per connection with load changes

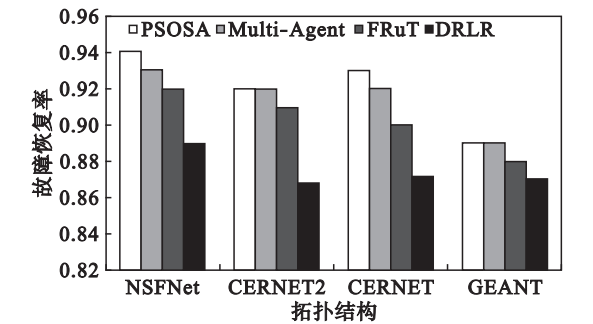


图 3 故障恢复率的对比

Fig. 3 Comparison of fault-restoring ratio

为了验证拓扑结构对算法的影响,在给定的 4 个拓扑上运行 4 个算法. 图 4 对比了 4 个算法在不同拓扑上获得最优解所需的平均迭代次数. 图 5 对比了 4 个算法相应的平均运行时间. 结果表明 4 个算法对于网络规模变化是敏感的,迭代次数和运行时间都会相应增加. 在拓扑规模和复杂度较小的网络中,平均迭代次数相差无几,但是 PSOSA 在平均运行时间上性能较 Multi-Agent 算法有较大提升,这是因为 PSOSA 只需要根据已有的信息进行分量的替换,而 Multi-Agent 算法中复杂的繁殖过程增加了时间开销. 虽然在算法性能层面本文 PSOSA 的表现与 FRuT 和 DRLR 相比提升不明显,但是提高了容错率、资源利用率和故障恢复率。

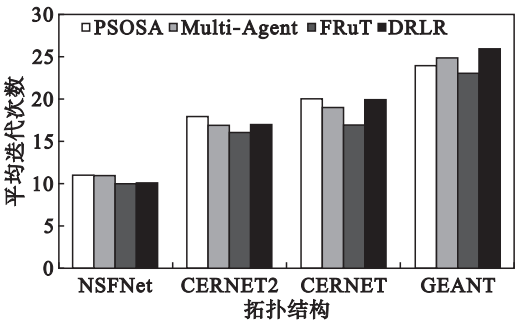


图 4 容错算法达到最优解的迭代次数对比
Fig. 4 Comparison of iterations when fault-tolerant algorithm achieves optimal solution

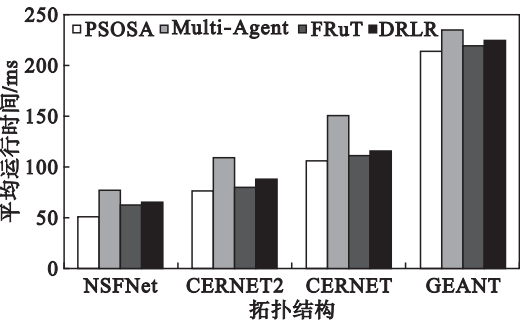


图 5 容错算法运行时间对比
Fig. 5 Comparison of runtime for fault-tolerate algorithms

4 结 语

本文采用模糊数学分析方法,定量刻画动态、不精确网络的环境,采用 SRLG 模型和共享路径保护提高预防式容错策略的资源利用率,提出一种优化的网络容错 QoS 路由模型,并结合 PSOSA 混合优化算法解决了预防式多约束下容错 QoS 路由问题。仿真结果表明,本文的机制可以在允许时间范围内找到优化的主从路径,具有较好的性能。今后的研究重点是如何使网络模型更加客观合理和如何使算法更加高效。

参考文献:

[1] Wang X W, Cheng H, Huang M. Multi-robot navigation based QoS routing in self-organizing networks [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, 26 (1): 262 – 272.

[2] 王兴伟,王军伟,黄敏. 基于狩猎搜索的可信 QoS 路由算法 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2012, 33 (10): 1385 – 1389.
(Wang Xing-wei, Wang Jun-wei, Huang Min. Hunting search based trustworthy QoS routing algorithm [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2012, 33 (10): 1385 – 1389.)

[3] Kuperman G, Modiano E. Network protection with guaranteed recovery times using recovery domains [C] // *Proceedings of IEEE INFOCOM*. Piscataway: IEEE, 2013: 692 – 700.

[4] Kodialam M, Lakshman T V, Orlin J B. End-to-end restorable oblivious routing of hose model traffic [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 19 (4): 1223 – 1236.

[5] Tseng P K, Chung W H. Joint coverage and link utilization for fast IP local protection [J]. *Computer Networks*, 2012, 56 (15): 3385 – 3400.

[6] Yallouz J, Rottenstreich O, Orda A. Tunable survivable spanning trees [C] // *Proceedings of ACM SIGMETRICS*. New York: ACM, 2014: 315 – 327.

[7] Shan D M, Kee C C, Gurusamy M, et al. Partial spatial protection for provisioning differentiated reliability in FSTR-based Metro Ethernet networks [J]. *Computer Networks*, 2013, 57 (1): 46 – 60.

[8] Kini S, Ramasubramanian S, Kvalbein A, et al. Fast recovery from dual-link or single-node failures in IP networks using tunneling [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2010, 18 (6): 1988 – 1999.

[9] Zheng Q, Cao G H, Porta T L, et al. Cross-layer approach for minimizing routing disruption in IP networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, 25 (7): 1659 – 1669.

[10] Oliveira R R, Marcon D S, Bays L R, et al. Opportunistic resilience embedding (ORE): toward cost-efficient resilient virtual networks [J]. *Computer Networks*, 2015, 89 (C): 59 – 77.

[11] 谢小民,王兴伟,温占考,等. 一种面向认知网络的 QoS 路由协议 [J]. *计算机学报*, 2013, 36 (9): 1807 – 1815.
(Xie Xiao-min, Wang Xing-wei, Wen Zhan-kao, et al. A QoS routing protocol for cognitive network [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36 (9): 1807 – 1815.)

[12] Kodialam M, Lakshman T V. Dynamic routing of locally restorable bandwidth guaranteed tunnels using aggregated link usage information [C] // *Proceedings of IEEE INFOCOM*. Piscataway: IEEE, 2001: 376 – 385.