

文章编号:1007-6735(2012)04-0337-06

一种物联网群体访问路由算法

章 刚¹, 陈庆奎^{1,2}

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093;
2. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对物联网群体访问互联网过于频繁,使得路由节点状态信息不断变化,不能在路由节点精确状态信息下选择路径,从而造成在非精确状态信息下选择无效 QoS 路由,本文提出了一种物联网群体访问路由算法(IOT_GR),该算法从基于群体智能的启发式算法角度解决问题,并对所涉及的协同代理进行描述,同时给出其相应的算法描述.实验表明,通过群体智能启发式算法可以有效减少不精确状态信息对 QoS 路由所造成的影响,使得 QoS 服务成功率较高.

关键词: 物联网; 群体智能; 启发式算法; QoS 路由

中图分类号: TP 393; N 94 **文献标志码:** A

Internet of Things Multi-group Accessing Internet Resource Routing Algorithm

ZHANG Gang¹, CHEN Qing-kui^{1,2}

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Recently, Internet of Things (IOT) multi-group users access Internet more and more frequently, which leads status information of route nodes to vary incessantly in real time and generates ineffective QoS routing under inaccurate status information of route nodes. A routing model for IOT multi-group accessing Internet resource IOT-GR was proposed. The model attempts to solve the problem on the aspect of the heuristic algorithm combining pre-computation with on-demand-computation. Experimental results show that the model effectively reduces the impact of inaccurate network status information on QoS routing by means of the heuristic algorithm and provides effective real-time QoS services to multi-group accessing internet resource in inaccurate information environment.

Key words: Internet of Things (IOT); swarm intelligence; heuristic algorithm; QoS routing

收稿日期: 2012-05-31
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60970012, 61003031); 上海市信息技术领域重点科研攻关资助项目(09511501000, 09220502800); 上海市重点学科建设资助项目(S30501)
作者简介: 章 刚(1981-), 男, 博士研究生. 研究方向: 网络计算. E-mail: zhanggang@pub.ss.pku.edu.cn
陈庆奎(联系人), 男, 教授. 研究方向: 并行理论与并行数据库、网络计算. E-mail: chenqingkui@usst.edu.cn

随着物联网(Internet of Things)用户数量的不断上升,请求服务种类不断地变化,群体用户对网络 QoS 路由提出了越来越高的要求,但目前 QoS 路由研究主要集中在针对单个源节点到单个目的节点下不精确状态信息的多约束 QoS 路由^[1-4]和精确状态信息的多约束 QoS 路由^[5-8],主要考虑单一请求下,在满足 QoS 约束要求时,选择合适路径,而本文考虑的是一种在约束条件下群体访问路由选择方式。

通常情况下,在 Internet 上存在两种传输流量区域,分别为黑色区域和白色区域。其中,黑色区域为所流过未知流量,而且不能监测区域;白色区域为能监测和控制流量区域,主要指可以通过白色区域上路由节点之间的协同监测,监测整个区域的有效带宽、延时和代价。在实际环境下,黑色区域和白色区域之间是相互影响的,而且两个区域是随时间的变化而动态地变化,两个区域所占的带宽也随时间的变化而变化。

本文以文献[9]所描述的带延迟约束群体访问策略为应用背景,通过对用户聚类,将大量用户根据兴趣分成多个群体(Group),所有群体通过智能代理访问网络上的资源,每个代理可以为多个群体提供服务。随着网络上流量的迅速增加,导致网络上路由节点状态信息时刻改变,那么,对于任意一个请求在延时约束范围内到达目的节点可能存在一条或多条可行路径,则本文所要讨论的问题可以描述为一种在白色区域内网络状态信息动态改变下带延时约束的群体多路径选择问题(D2CGMP),此问题是 NP (non-deterministic polynomial) 问题,因此,从启发式算法角度来解决此问题。

文献[10]从网络工程角度分析了网络再造工程对 QoS 路由的影响,基于文献[10]的思想,本文提出了一种群体访问路由算法(IOT_GR),该算法主要基于预计算方式选择路径,通过部署在 Internet 上的智能路由节点构建一块白色区域,在黑色区域动态影响下,利用算法中所定义的多种代理间的启发

$$\begin{cases} \bigcup_{j=1}^{m \& n} \left[\bigcup_{i=1}^N \left[\bigcup_{rst(i)_{s_j}^t \in (0, rst(i)_{s_j})} D_{rst(i)_{s_j}^t} [p'(s_j, d_k)] \right] \right] \leq \bigcup_{j=1}^{m \& n} \left[\bigcup_{i=1}^N \left[\bigcup_{rst(i)_{s_j}^t \in (0, rst(i)_{s_j})} D[rst(i)_{s_j}^t] \right] \right] \\ \text{s.t. } p' \in \bigcup_{j=1}^{m \& n} \left[\bigcup_{i=1}^N \left[\bigcup_{rst(i)_{s_j}^t \in (0, rst(i)_{s_j})} p_{rst(i)_{s_j}^t}(s_j, d_k) \right] \right] \end{cases}$$

式中, m 为源节点个数; n 为目的节点个数; N 为群体个数。

D2CGMP 问题中所有的解路径 p' 都属于白色

式协同路由过程,在网络状态信息不精确情况下,有效地提供 QoS 路由服务。

1 模型描述

1.1 概念描述

接入代理 AA: 一种面向群体的智能体代理,群体通过此代理访问 Internet 资源。

路由代理 RA: 一种连接 AA 与智能路由节点的智能体代理,主要为 AA 提供路由路径选择服务。

心跳代理 HA: 一种智能代理,主要负责智能路由节点之间状态信息的交换。

探测包 PP: 主要为路由代理 RA 预先探测各点之间的有效路径,由路由代理 RA 产生。

1.2 定义描述

定义 1 路由模型可行性. 本路由模型有效资源只在白色区域,同时又有黑色区域的动态影响,因此,本文只考虑当白色区域有足够的资源时,本路由模型才具有可行性,其余情况本文暂不考虑。

定义 2 D2CGMP 问题. 设网络 $G(V, E)$, 其中, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 为节点集合, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 为链路集合, 设 s_j 作为源节点, d_k 为目的节点, $p(s_j, d_k) = (s_j, v_1, v_2, \dots, v_i, d_k)$ 表示从源节点 s_j 到目的节点 d_k 的一条路由路径. 设 $rst(i)_{s_j}$ 为源节点 s_j 上第 i 个群体的一组请求, $rst(i)_{s_j}^t \in (0, rst(i)_{s_j})$ 表示为请求集合 $rst(i)_{s_j}$ 中第 t 个资源请求. 设 D 表示 QoS 延时度量, $D(e)$ 表示链路 e 上当前的延时, 令

$$Dv[p(s_j, d_k)] = \sum_{e \in p(s_j, d_k)} D(e)$$

表示请求 w 在当前路径 $p(s_j, d_k)$ 上每条链路 e 的 QoS 度量 D 值之和, 同时, 设 $D[rst(i)_{s_j}^t]$ 表示请求 $rst(i)_{s_j}^t$ 在 QoS 度量 D 下的约束量, $p_{rst(i)_{s_j}^t}(s_j, d_k)$ 表示第 t 个请求寻找到的一条从源节点 s_j 到目的节点 d_k 的可行路径, 则多群体多请求在满足约束条件下选择一组有效路径 p' 为

区域下解空间, 都是满足约束的一组有效可行路径集合. 由于白色区域时刻在变, 因此, 这组有效路径解也时刻在变。

定义3 互不相交路径. 虽然 D2CGMP 问题可以寻找到一组满足约束条件的有效路径,但是,对于一组具有公共路由节点或者公共链路的路径,依然会出现流量过载和可靠性低等问题,而互不相交 QoS 路由不仅能克服流量过载,实现信息分流,同时也提高了信息传输的可靠性,因此,本文考虑选择有效路径必须为互不相交路径,给定网络 $G(V, E)$, V 为节点集合, E 为链路集合,则对于任意从源节点 s_j 到目的节点 d_k 的两条路径 p_1 和 p_2 满足式(1)和式(2),说明 $p_1 \cap p_2 = \emptyset$.

$$\left. \begin{aligned} \sum_{v \in (s_j, d_k)} \left[\sum_{j=1}^M d(v) \right] &= 0 \\ \text{s. t. } v &\in (1, n) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)表示除源节点 s_j 和目的节点 d_k 外,对于任意一个中间节点 v ,出度数与入度数相等,参数 M 表示中间节点 v 上所有的链路数,同时,节点 v 的度 $d(v)$ 满足式(3).

$$\sum_{v \in (1, n)} n_{sv} - \sum_{v \in (1, n)} n_{vt} = 0 \quad (2)$$

$$d(v) = \begin{cases} 1, & v \text{ 的出度} \\ -1, & v \text{ 的入度} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

式中, n_{sv} , n_{vt} 分别表示源节点 s_j 到中间节点 v 有链路,中间节点 v 到目的节点 d_k 有链路,则整体表

示为从源节点 s_j 出来的链路数等于进入目的节点 d_k 的链路数.

证明 如果 p_1 与 p_2 为相交的两条路径,则在路径 p_1 与 p_2 上必然存在一个中间节点 v ,使得其所有的边数与其余所有中间节点的边数不一致,以至于不能满足式(1);如果 p_1 与 p_2 为相交的两条路径,但是没有公共的源节点与目的节点,则必然不能满足式(2);如果 p_1 与 p_2 为不相交的两条路径,有公共的源节点与目的节点,则对于任意一个中间节点 v ,其都满足式(1)和式(2). 证毕.

定义4 路由节点状态信息更新概率. 路由节点触发更新状态信息的条件在于,当路由节点上的负载量达到一个阈值 C 时,就触发更新机制. 在此 Q 设为队列,保存当前路由节点接收但没有处理的请求量,令 $\max Q$ 和 $\min Q$ 分别表示触发路由节点状态信息更新时 Q 的最大量和最小量,则路由节点 j 状态信息更新概率

$$p_j = \begin{cases} 0, & Q < \min Q \\ (Q - \min Q) \cdot (\max Q - \min Q), & \max Q > Q > \min Q \\ 1, & Q > \max Q \end{cases} \quad (4)$$

1.3 算法描述

定义5 群体访问过程示意图,如下图1所示.

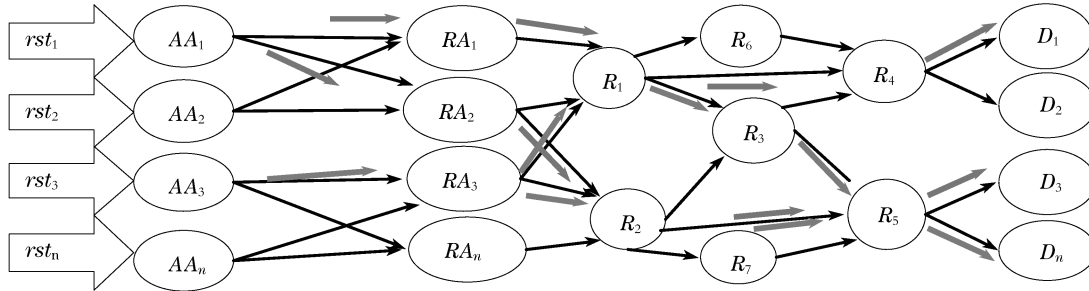


图1 群体访问网络过程示意图

Fig.1 Multi-groups accessing Internet process

图1中网络结构由智能路由节点构成,总共分为配置接入代理 AA 的节点、配置路由代理 RA 的节点、路由层路由节点 R_i 和目的节点 D_i , $i \in n$, rst_i 为群体提交一组资源访问请求,由图1可知,不同的 AA_i 为不同的 rst_i 提供服务,同时, rst_i 的一组请求由不同的用户请求组成,其目的节点可以相同,也可以不同,如 rst_1 向 AA_1 提交一组请求,但是,请求资源所在目的节点不相同,为图1中的橙色实线请求,在约束条件下分别寻找到两条有效路径 $AA_1 \rightarrow RA_1 \rightarrow R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow D_1$ 和 $AA_1 \rightarrow RA_2 \rightarrow$

$R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow D_3$. 同样, rst_3 向 AA_3 提交一组请求,同时,请求资源所在目的节点相同,为图1中的绿色实线请求,虽然目的节点相同,但是,由于要满足约束条件,因而产生两条有效路径分别为 $AA_3 \rightarrow RA_3 \rightarrow R_1 \rightarrow R_3 \rightarrow R_5 \rightarrow D_n$ 和 $AA_3 \rightarrow RA_3 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow D_n$.

定义6 全局代价表. 设三元组 $E_p = (s_j, d_k, \text{cost}(p))$ 为路径 p 所对应的全局代价表,其中, s_j 为源节点, d_k 为目的节点, $\text{cost}(p)$ 为从源节点 s_j 到目的节点 d_k 所在路径 p 的代价函数,网络中每个路由节点都需要计算出经过本节点的所有

路径代价值,并利用心跳代理 *HA* 进行路由节点间信息交互,发送给其相邻的路由节点,相邻路由节点在此基础上进行路由选择,从而能有效地减少预计算的时间,同时构成路由算法的协同策略基础.

定义 7 带延时约束的路径预计算策略. 设网络拓扑结构为 $G(V, E)$, 其中, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 为网络所有节点的集合, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 为网络链路的集合. 对于每个 *RA*, 每隔一段时间 *T* 会产生一个探测包 *PP*, 探测当前源节点到目的节点所有有效路径. 对于每条路径而言, 在时间 *T*, *PP* 从源节点 *i* 出发到目的节点 *j*, 经过路由节点 *k* 时, 查询全局代价表 E_p , 如果存在一条有效路径, 则根据全局代价表 E_p , 在加入路由节点 *k* 时, 重新计算路径代价, 如果满足约束条件, 则更新全局代价表 E_p , 并通过心跳代理 *HA* 发送到相邻路由节点; 如果不满足约束条件, 则根据式(5)计算一条从源节点 *i* 到目的节点 *j* 的有效路径, 其中, 延时分为传输延时和排队延时, 如果当前总延时 D_T^k 超过约束值, 则路径丢弃; 否则, 当前路由节点更新全局代价表 E_p , 并通过心跳代理 *HA* 发送到相邻路由节点, 则

$$\left. \begin{aligned} D_T^k &= D_T^{k-1} + D_T^k(e_k) + (1-p_k)D_T^k(v_k) \\ \text{s.t. } e_k &\in E, \quad 0 \leq p_k \leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, D_T^{k-1} 为从源节点到第 *k*-1 个节点的总延时; $D_T^k(e_k)$ 为当前路径下第 *k*-1 个节点与第 *k* 个节点之间的传输延时; $D_T^k(v_k)$ 为当前路径下第 *k* 个节点的排队延时; p_k 为第 *k* 个节点状态信息更新概率.

定义 8 路由节点状态更新下全局代价表更新策略. 当路由节点根据式(4)其概率 p_k 达到阈值时, 路由节点会广播其更新状态, 此时路由节点状态信息已经改变, 因此, 不能再根据更新前状态值去计算. 每个路由节点接收到其中路由节点状态更新广播后, 重新计算其全局代价表 E_p , 并更新 E_p . 如果更新后的状态对路径没有影响, 则此条路径依然有效; 如果更新状态后对路径有影响, 则从当前路径中删除此路由节点, 并把此路由节点的上跳节点指向其下跳节点, 最后更新 E_p .

2 实验与分析

2.1 实验环境

实验环境基于 NS2(network simulator version 2)网络仿真环境由仿真工具模拟大规模协同网络场景, 验证 IOT_GR 与当前一些重要算法间的差异, 通过 NS2 仿真平台, 产生模拟的物理拓扑结构, 在此

拓扑基础上建立节点之间的连接, 最后部署本路由模型, 按照模拟的物理拓扑分别创建了 100~500 个节点, 链路的带宽为 2 Mbps, 链路上的延时为 10~1 000 ms, 在网络拓扑结构上分别配置 IOT_GR 算法、MP-POC 算法^[3]、H_MCOP 算法^[6], 同时设置参数. 仿真测试硬件环境: 1 台 DELL 台式电脑, 配置 CPU Intel(R) Core(TM) 2 Duo E7400, 主频 2.8 GHz, 内存 2 G, 硬盘 173.0 G, 操作系统: 安装 Ubuntu 10.04 Kernel Linux-2.6.32-30-generic GNOME 2.30.2 操作系统.

实验主要从扩展性、算法执行时间和算法对资源的消耗量这 3 个方面测试 IOT_GR 算法与当前典型算法之间的差异, 现给出具体的实验结果与分析.

2.2 实验结果

2.2.1 扩展性测试

实验 1 实验分别模拟了两组拓扑结构分别为 100 个节点拓扑结构和 500 个节点拓扑结构, 同时模拟了 3 种算法在两种拓扑结构下其服务路由满意率 SRQoS 变化过程, 由此分别比较当拓扑结构增大和群体请求数增加时 3 种算法的服务路由满意率 QoS 的变化率. 其中, 服务路由满意率 SRQoS 为请求服务成功个数与请求服务总数之比. 图 2(a)描述了 100 个节点下服务路由满意率 *X*.

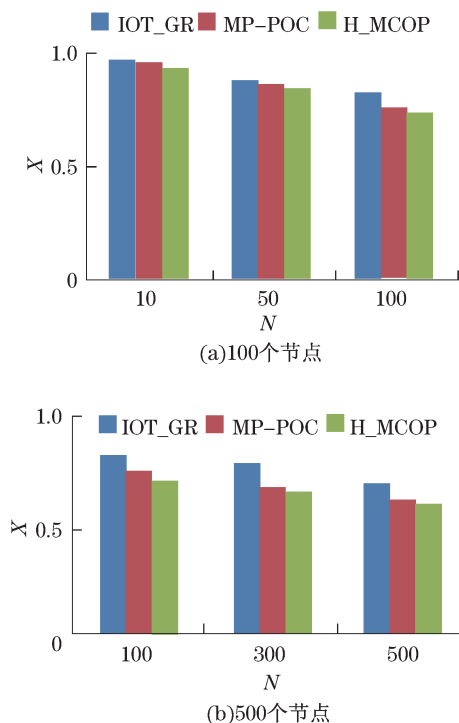


图 2 在各个节点下服务路由满意率

Fig.2 Satisfaction rate of server route under different nodes

由图 2(a)可知,当群体请求数比较少时,3 种算法的路由满意率比较接近,而且都超过 80%;当群体请求个数超过 50 以后,3 种算法的路由满意率有下降趋势,MP-POC 算法和 H_MCOP 满意率都低于 80%,而 IOT_GR 算法依然超过 80%。如图 2(b)所示,描述 500 个节点下服务路由满意率。由图 2(b)可知,当群体请求数超过 100 时,和图 2(a)相比,3 种算法的路由满意率都呈现下降趋势;当群体请求个数超过 300 以后,3 种算法的路由满意率均低于 80%;当群体请求个数达到 500 以后,MP-POC 算法和 H_MCOP 满意率都接近 60%,而 IOT_GR 算法依然超过 60%。由此可见,随着拓扑结构的扩大和群体个数的增加,IOT_GR 模型路由满意率始终在 80% 上下徘徊,满意率并没有发生较大的波动。

2.2.2 算法平均执行时间测试

实验 2 在拓扑结构为 100 个节点拓扑结构下进行实验,同时模拟 3 种算法在拓扑结构下,通过 3 组不同的群体个数,测试 3 种算法平均执行时间的变化过程。图 3 描述了 100 个节点下的算法平均执行时间 S 。

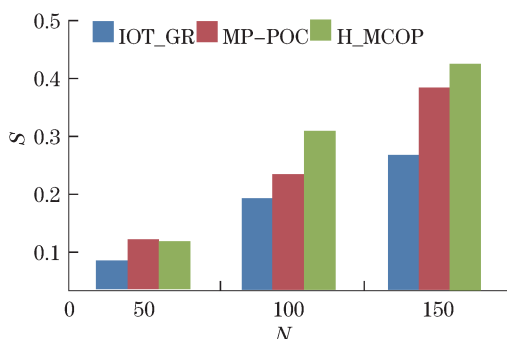


图 3 算法平均执行时间

Fig.3 Average execution time of algorithm

由图 3 可知,群体个数在 50 时,3 种算法的平均执行时间都比较少,均小于 0.1;当群体个数超过 100 时,3 种算法的平均执行时间都上升,尤其是 H_MCOP 算法上升最快;当群体个数超过 150 时,MP-POC 和 H_MCOP 平均执行时间都超过 0.3,但 IOT_GR 算法平均执行时间比较少。

2.2.3 算法对资源消耗量测试

实验 3 资源消耗量包括链路消耗和节点消耗,在此用归一化方式线性整合链路消耗和节点消耗,根据式(6)计算,其中, C 为资源消耗量, $C(e)$ 为链路消耗, $C(v)$ 为节点消耗, α 和 β 分别为链路和节点的权值,则

$$C = \sqrt{\left(\sum_{e \in E} \alpha C(e) + \sum_{v \in V} \beta C(v)\right)} \quad (6)$$

在拓扑结构为 100 个节点拓扑结构下进行实验,同时模拟 3 种算法在拓扑结构下,通过 3 组不同的群体个数,测试 3 种算法对资源消耗量的变化过程。图 4 描述了 300 个节点下的资源消耗量。 U 为单位消耗量。由图 4 可知,在群体个数不超过 100 时,3 种算法的消耗量都维持在 2 以下;当群体个数达到 200 时,3 种算法的消耗量都上升,MP-POC 和 H_MCOP 消耗量都超过 3;当群体个数达到 300 时, H_MCOP 消耗量超过 5,虽然 MP-POC 和 IOT_GR 都有上升,但是与 H_MCOP 相比都将近减少了一个消耗量,尤其是 IOT_GR 的消耗量最低。

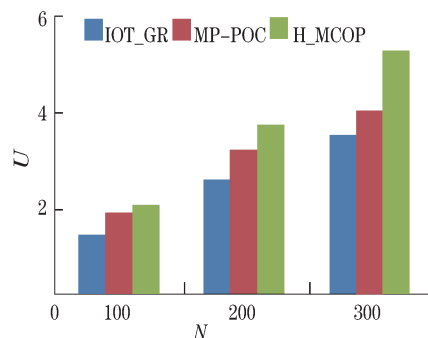


图 4 资源消耗量

Fig.4 Resource consumption level

3 结 论

针对路由节点状态信息不断变化,造成 QoS 路径选择无效性,本文提出了一种物联网群体访问路由算法(IOT_GR),给出了该模型的具体实验结果与分析。实验表明,IOT_GR 算法在扩展性、算法执行时间及资源消耗度等方面比传统的典型算法有一定的改善,但本模型并未过多地考虑数据安全、数据压缩和数据传输等方面,这是作者下一步要研究的工作。

参考文献:

- [1] Zheng Yanxing, Wang Xiaoqing. Normal measure based multi-constrained path selection [J]. Journal of Software, 2007, 18(3): 636-645.
- [2] Tian Jing, Zheng Yanxing. Pareto optimal path selection in the presence of inaccurate state information[J]. Journal on Communications, 2007, 28(3): 68-77.

- [3] Turgay K, Krunz M. Bandwidth-delay constrained path selection under inaccurate state information[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(3): 384 - 398.
- [4] Mieghem P, Kuipers F. Concepts of exact qos routing algorithms [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(6): 851 - 864.
- [5] Turgay K, Marwan K. Routing multimedia traffic with QoS guarantees[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2003, 18(8): 429 - 443.
- [6] Xiong Ke, Qiu Zheng ding. Link-disjoint routing algorithm under multiple additive QoS constraints[J]. Journal on Communications, 2010, 31(6): 127 - 135
- [7] Sawada N, Kaneko K. Pairwise disjoint paths in pancake graphs [C] // Proceedings of the Eighth International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies. 2007: 376 - 382.
- [8] Xu D H, Chen Y, Xiong Y Z, et al. On the complexity of and algorithm for finding the shortest path with a disjoint counterpart[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(1): 147 - 158.
- [9] Chen Qingkui, Jia He. Control Strategy of Group Behavior for Internet of Things[C] // Proceedings of 2011 IEEE Ninth International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC). 2012: 1167 - 1171.
- [10] Lin Chuang, Li Yin. Optimization approaches for QoS in computer networks: A survey[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(1): 1 - 14.

(上接第 336 页)

4 结 语

复杂系统可靠性优化是一个复杂的优化问题, 将万有引力搜索算法和 SQP 算法结合, 提出一种求解系统可靠性优化问题的混合算法. 将算法用于求解一类典型的复杂系统可靠性优化模型, 并与蚁群算法、微粒群算法、人工蜂群算法、基本万有引力搜索算法进行比较. 实验结果表明, 本文提出的算法具有较高的求解精度和较快的优化速度, 为该类问题的求解提供了一个新的有竞争力的方法. 将算法用于可靠性网络优化是下一阶段的研究工作.

参考文献:

- [1] 宋何维. 系统可靠性设计与分析[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [2] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] 肖人彬, 陶振武. 群集智能研究进展[J]. 管理科学学报, 2007, 10(3): 80 - 96.
- [4] Ravi V, Murty B S N, Reddy P J. Nonequilibrium simulated annealing algorithm applied to reliability optimization of complex systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1997, 46: 233 - 239.
- [5] 许传玉, 朱若男, 梁颖虹, 等. 遗传算法在复杂系统可靠性优化中的应用[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2000, 5(3): 90 - 93.
- [6] Shelokar P S, Jayaraman V K, Kulkarni B D. Ant algorithm for single and multiobjective reliability optimization problems[J]. Quality and Engineering International, 2002, 18: 497 - 514.
- [7] Rashedi E, Nezamabadi-pour H, Saryazdi S. GSA: a gravitational search algorithm [J]. Information Sciences, 2009, 179(13): 2232 - 2248.
- [8] Fletcher R. Practical methods of optimization [M]. New York: Wiley, 1987.
- [9] Boggs P T, Tolle J W. Sequential quadratic programming[J]. Acta Numerica, 1995, 4: 1 - 51.
- [10] Michael B B. Sequential quadratic programming[J]. Springer Optimization and Its Application, 2008, 19: 1 - 14.
- [11] 马良, 朱刚, 宁爱兵. 蚁群优化算法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [12] 刘士新, 宋健海, 唐加福. 蚁群最优化——模型、算法及应用综述[J]. 系统工程学报, 2004, 19(5): 496 - 502.
- [13] 曾建潮, 介婧, 崔志华. 微粒群算法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [14] Karaboga D, Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. Journal of Global Optimization, 2007, 39(3): 459 - 471.
- [15] Karaboga D, Basturk B. On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 687 - 697.