















```

19.   END FOR
20.   FOR  $j=1:m$ 
21.       生成随机数  $random \in (0,1)$ ;
22.       IF  $random < 0.9$ 
23.           随机选择抗体中间节点;
24.           IF 路径存在到达中间路径
25.               进行变异操作;
26.           ELSE
27.               变异操作失败;
28.           ELSE
29.               不进行变异操作;
30.       END FOR
31.       将  $a_{k2}$  并入抗体库,删除重复的路径和亲和力较低的路径;
32.   END FOR
33.   输出最优抗体即最优路径;
34.   END

```

### 3 性能评价与实验仿真

本文在 Windows 环境下,基于 OMNET++ 网络平台对 AISR 进行仿真实现,采用随机拓扑进行验证,随机拓扑参见图 3,考虑平均时延,丢包率及网络开销这 3 个性能指标,选取图路由(graph routing,简称 GR)和 PDGR 作为对比对象.实验结果表明,本文设计的 AISR 在平衡网络负载和降低时延及丢包率方面有一定的优势.本文通过分别观察在链路的失效概率和网络流量增大的情况下 3 种路由机制的运行情况分析对比 3 种路由机制.

随机拓扑参数设置见表 3.

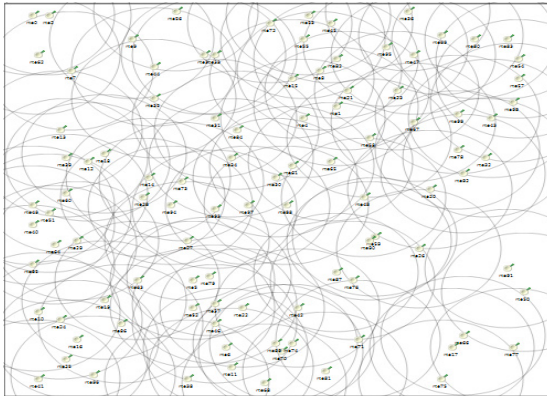


Fig.3 Random topology in simulation program

图 3 仿真程序中的随机拓扑图

Table 3 Random topology parameter settings

表 3 随机拓扑参数设置

参数名	参数值
仿真时间	600s
现场大小	200m×200m
设备数目	100
所分区域	10
设备通信半径	30m
转发时延	10ms
缓存大小	10
路径数目	3
周期通信节点	10

#### 3.1 丢包率

丢包率(packet loss,简称 PL)是指被丢弃的数据包占总数据包的比值.当数据包与路由表匹配失败或者节点的缓存队列已满时会进行丢包处理,丢包率越大,路由机制则越差;反之,丢包率越小,路由机制则越好.丢包率的计算公式如下:

$$PL = 1 - N_r / N_t \quad (17)$$

其中, $N_r$  表示未被丢弃的数据包的数目, $N_t$  表示网络中传输的数据包的总数.随着突发流量产生的时间间隔的增



加,网络流量逐渐减少,丢包率变化的趋势如图4所示.突发流量以均值为1s的指数分布的速率产生时,丢包率随着链路失效概率的增大的变化趋势如图5所示.

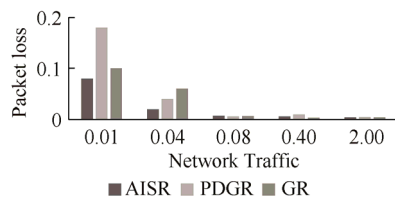


Fig.4 PL's change with the network traffic

图4 网络流量对丢包率的影响

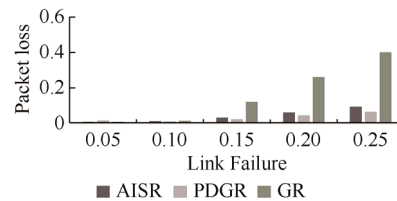


Fig.5 PL's change with the link failure

图5 链路失效对丢包率的影响

图4表明,当网络流量较小时,3种算法的丢包率都很小.当网络流量增大时,PDGR增加得最快,原因是它采用贪婪路由算法,流量集中在最优路径中,网络流量的增大必然导致丢包率的增加.GR优于PDGR的原因是设计了冗余路径来均衡网络负载.本文设计的AISR增加速度缓慢,原因是流量周期的预测,预防了节点流量过大的情况,从而减少了丢包现象,因此丢包率增大速度最慢.

图5表明,当链路失效概率较小时,3种算法的丢包率都很小.随着链路失效概率的增加,丢包率增大最快的是GR,原因是其主路径和冗余路径的失效概率同时增加了,无法找到合适的路径,因此丢包率很高.AISR有感知能力,当链路失效时,可通过域间路由重新选路,但增加了时延,导致丢包现象的产生,这也是它弱于PDGR的原因.

由分析可知,本文设计的AISR机制可应对网络流量增大的情况,此时丢包率最低;在链路失效概率增大的情况下,丢包率较低.

### 3.2 平均时延

平均时延(average delay,简称AD)是指所有成功传输的数据包到达目的节点的时间与源节点发送数据包时间差的平均值.平均时延越大,代表路由机制越差;反之,平均延迟越小,路由机制越好.平均时延的计算公式如下:

$$AD = \left( \sum_i^N DM_i \right) / N \quad (18)$$

其中, $DM_i$ 表示第*i*个成功传输数据包的时延, $N$ 表示网络中成功传输的数据包的总数量.随着网络流量的减少,平均时延变化的趋势如图6所示.突发流量以均值为1s的指数分布的速率产生时,平均时延随着链路失效概率的增大的变化趋势如图7所示.

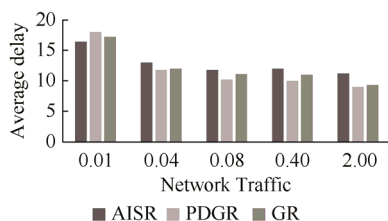


Fig.6 AD's change with the network traffic

图6 网络流量对平均时延的影响

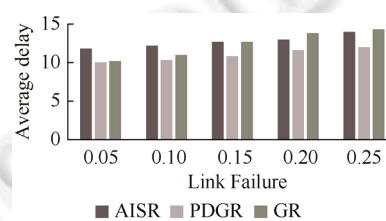


Fig.7 AD's change with the link failure

图7 链路失效对平均时延的影响

图6表明,当网络流量较小时,3种路由算法的平均时延相差不多.当流量逐渐增大时,PDGR增长速度最快,原因是它未考虑负载对平均时延的影响,只考虑了丢包率因素.GR与AISR平均时延较小的原因是采用多路径均衡了网络负载.AISR性能更好的原因是可以动态地感知网络变化.

图7表明,面对链路失效概率的增大情况,3种路由机制中,PDGR的平均时延最低,原因是链路的失效只影响其对路径的寻优,对平均时延影响较小.AISR的平均时延几乎未受到影响,AISR优于GR的原因是能够动态感知

域内路由变化,寻找最优从路径.而 GR 采用的是静态路由,效率低于其他两种路由算法,因此平均时延增长最快.

由分析可知,本文设计的 AISR 机制可应对网络流量较大的情况,此时平均时延最小;当链路失效概率增大时,平均时延较小.

### 3.3 网络开销

网络开销(network overhead,简称 NO)是指额外探测包占消息总数的比例,本文中用除数据包外的消息占消息总数的比例表示.网络开销越大,代表路由机制越差;反之,网络开销越小,代表路由机制越好.网络开销的计算表达式如下:

$$NO = M_{other} / M_{data} \quad (19)$$

其中, $M_{other}$ 表示额外探测消息的总数, $M_{data}$ 表示消息的总数.随着网络流量逐渐减少,网络开销变化的趋势如图8所示.当突发流量以均值为1s的指数分布的速率产生时,网络开销随着链路失效概率的增大的变化趋势如图9所示.

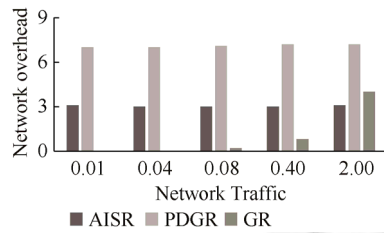


Fig.8 NO's change with the network traffic

图8 网络流量对网络开销的影响

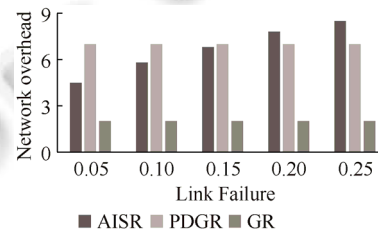


Fig.9 NO's change with the link failure

图9 链路失效对网络开销的影响

图8表明,PDGR和AISR的网络开销不受网络流量变化的影响.GR的网络开销随流量的增大逐渐减小,网络流量越大,发出的探测包越少,所以网络开销越来越小.

图9表明,PDGR和GR的链路失效的发生对网络开销没有影响,其中,GR的网络开销最小.当链路失效概率逐渐增大时,AISR的网络开销也逐渐增大,原因是链路失效时会产生更多的探测包去维护邻居表项,因此,为了实时地维护域内网络状态,使网络开销逐渐增大.

由分析可知,当本文设计的AISR机制面对链路失效概率的增大时,为了维护区域内邻居表项,网络开销逐渐增大,由于网络状态信息只在区域内进行传输,所以不会产生网络负载过重的现象.

## 4 结束语

工业互联网的出现促进了信息技术与工业产业的深度融合.根据工业无线网络的特点和需求,本文设计了基于人工免疫的工业认知无线网络路由机制,提出了基于链路成本的域内静态路由算法和基于多路径的域间动态路由算法.在路由机制中添加对认知循环的设计,使其可应用于大规模工业网络.为了验证该路由机制的可行性和有效性,本文基于OMNET++网络平台对该机制进行仿真实现,并与工业无线网络中经典的图路由和无线传感器网络中的组合定向地理路由进行对比分析,仿真结果表明,人工免疫路由可应对工业网络流量偏大、链路失效的情况,在平均时延、丢包率及网络开销这3个方面均表现出了较好的网络性能.在未来的工作中,将对工业网络设备的区别进行差异化处理,使其符合实际场景,并将网络节点的通信规律考虑在内,设计合适的划分区域的方式,提高网络的路由性能.

## References:

- [1] Li PN, Wan JB. Development of industrial network and deep integration of information and industrialization. Chinese Academy Journal of Sciences, 2014,29(2):215-222 (in Chinese with English abstract).

- [2] Wang SY, Wan JF, Zhang DQ, Li D, Zhang CH. Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer Networks*, 2016,101:158–168.
- [3] Han S, Zhu X, Mok AK, Chen D, Nixon M. Reliable and real-time communication in industrial wireless mesh networks. In: *Proc. of the IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symp.* 2011. 3–12.
- [4] Rabbachin A, Quek TQS, Shin H, Win MZ. Cognitive network interference. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011,29(2):480–493.
- [5] Zheng CY, Sicker DC. A survey on biologically inspired algorithms for computer networking. *Communications Surveys & Tutorials IEEE*, 2013,15(3):1160–1191.
- [6] Liu FR, Wang QL, Gao XZ. Survey of artificial immune system. In: *Proc. of the Int'l Symp. on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*. 2006:985–989.
- [7] Liu CX, Zhang Y, Xu E, Yang YQ, Zhao XH. A novel multi-path routing algorithm based on clustering for wireless mesh networks. *KSII Trans. on Internet & Information Systems*, 2014,8(4):1256–1275.
- [8] Gunopulos D, Das G. Time series similarity measures and time series indexing (abstract only). In: *Proc. of the ACM SIGMOD Int'l Conf. on Management of Data*. 2001. 624.
- [9] Cai H, Zhang Y, Yan HH. A delay-aware wireless sensor network routing protocol for industrial applications. *Mobile Networks & Applications*, 2016,1–11.
- [10] Weng H, Gao D. A wireless routing protocol for pumps monitoring in large industrial plant. *Research Journal of Applied Sciences Engineering & Technology*, 2013,5(9):2870–2877.
- [11] Wang JF, Zhang Y, Wang JL, Ma YJ, Chen M. PWDGR: Pair-Wise directional geographical routing based on wireless sensor network. *IEEE Internet of Things Journal*, 2015,2(1):14–22.
- [12] Xie XM, Wang XW, Huang M. A QoS routing protocol for cognitive networks. *Journal of Computer Science*, 2013,36(9):1807–1815 (in Chinese with English abstract).
- [13] Zhang YD, Guan JF, Xu CQ, Zhang HK. The stable routing protocol for the cognitive network. *IEEE Globecom Workshops*, 2012, 55(11):1090–1095.
- [14] Lü JH, Wang XW, Huang M. Ant colony optimization-inspired ICN routing with content concentration and similarity relation. *IEEE Communications Letters*, 2016,PP(99):1.
- [15] Sun JJ, Wang XW, Gao CX, Huang M. Resource allocation scheme based on neural network and group search optimization in cloud environment. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2014,25(8):1858–1873 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4555.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004555]
- [16] Lai YX, Gao CM. Industrial control network traffic characteristic analysis and modeling. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015,41(7):991–999 (in Chinese with English abstract).
- [17] Wang XW, Qu DP, Huang M, Li KQ, Sajal K. Das, Zhang JH, Yu RY. Multiple many-to-many multicast routing scheme in green multi-granularity transport networks. *Computer Networks*, 2015:225–242.

#### 附中文参考文献:

- [1] 李培楠,万劲波.工业互联网发展与“两化”深度融合. *中国科学院院刊*,2014,29(2):215–222.
- [12] 谢小民,王兴伟,黄敏.一种面向认知网络的 QoS 路由协议. *计算机学报*,2013,36(9):1807–1815.
- [15] 孙佳佳,王兴伟,高程希,黄敏.云环境下基于神经网络和群搜索优化的资源分配机制. *软件学报*,2014,25(8):1858–1873. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4555.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004555]
- [16] 赖英旭,高春梅.工业控制网络流量特性分析与建模. *北京工业大学学报*,2015,41(7):991–999.



刘岩(1994—),女,黑龙江佳木斯人,硕士生,主要研究领域为信息中心网络数据传输机制.



王兴伟(1968—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为未来互联网,云计算,网络空间安全.



李婕(1982—),女,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为认知网络,移动社会网络.



黄敏(1968—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为智能算法设计与优化,调度理论与方法.