

基于人工免疫的工业认知无线网络路由机制*

刘岩¹, 王兴伟², 李婕¹, 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)

通讯作者: 王兴伟, E-mail: wangxw@mail.neu.edu.cn

摘要: 工业互联网(industrial Internet)已成为第四次工业革命的代表技术.根据工业网络数据传输服务的需求,以及针对工业无线网络拓扑相对稳定、流量规律变化等特点,提出了一种基于人工免疫系统(artificial immune system, 简称 AIS)的工业认知无线网络路由机制,包含基于链路质量的域内静态路由算法和基于多路径的域间动态路由算法,以实现工业网络的可靠路由.根据人工免疫系统特点,将工业网络的拓扑结构进行区域划分:提出了基于链路质量的域内静态路由算法,采用软硬件结合的方式监视网络链路,并根据移动窗口指数加权平均法计算链路丢包率;提出了基于多路径的域间动态路由算法,根据模式距离对节点的流量周期进行预测,防止节点因流量过大而导致丢包.基于 OMNET++ 仿真平台进行仿真实验,结果表明,所提出的路由机制在应对突发流量时与组合定向地理路由算法相比,丢包率及网络开销分别降低 1 倍;应对链路失效的情况时与图路由算法相比丢包率降低 4 倍.

关键词: 工业认知无线网络;人工免疫系统;链路质量;丢包率;流量预测

中文引用格式: 刘岩,王兴伟,李婕,黄敏.基于人工免疫的工业认知无线网络路由机制.软件学报,2017,28(Suppl.(2)):19-29.
http://www.jos.org.cn/1000-9825/17015.htm

英文引用格式: Liu Y, Wang XW, Li J, Huang M. AIS-Based routing mechanism in the industrial cognitive wireless network. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2017, 28(Suppl.(2)):19-29 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/17015.htm

AIS-Based Routing Mechanism in the Industrial Cognitive Wireless Network

LIU Yan¹, WANG Xing-Wei², LI Jie¹, HUANG Min³

¹(School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China)

²(College of Software, Northeastern University, Shenyang 110169, China)

³(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The industrial Internet has become a representative technology in the fourth industrial revolution. According to the demands of data transmission service in industrial network, such as stable topology and traffic flow changes regularly, an artificial immune strategy-based routing mechanism in industrial cognitive wireless network is proposed to realize the reliable routing of industrial network, which includes the static routing algorithm in intra-domain based on link quality and the dynamic routing algorithm in inter-domain based on multipath. A static routing algorithm in intra-domain based on link quality is proposed, which combines the hardware and software to monitor the network link and calculates the link packet loss rate according to the moving window index weighted average method. A dynamic routing algorithm is proposed in inter-domain based on multipath. According to the model distance of the node to predict the traffic to prevent nodes from losing packet caused by excessive traffic. The simulation results from the OMNET++ simulation platform

* 基金项目: 国家自然科学基金(61572123, 61502092); 国家杰出青年科学基金(71325002); 教育部-中国移动科研基金(MCM20160201); 中央高校基本科研业务费专项资金(N151604001); 中国博士后科学基金(2016M591449)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61572123, 61502092); National Science Foundation for Distinguished Young Scholars (71325002); MoE and ChinaMobile Joint Research Fund (MCM20160201); Fundamental Research Funds for the Central Universities (N151604001); China Postdoctoral Science Foundation (2016M591449)

收稿时间: 2017-06-30; 定稿时间: 2017-10-20

show that compared with the pair-wise directional geographical routing algorithm, the proposed routing mechanism reduces the packet loss rate and network overhead respectively in response to the burst traffic. Compared with the graph routing algorithm, the packet loss rate is 4 times lower than that in the case of link failure.

Key words: industrial cognitive wireless network; artificial immune system; link quality; rate of packet loss; traffic prediction

互联网的发展促进了新一轮工业革命的产生——工业互联网。“两化”融合^[1]和工业 4.0^[2]等概念的提出体现了信息技术与工业产业的融合,通过信息技术可以减少工业的生产成本、提高生产力.工业网络与传统网络具有显著区别,工业网络的部署环境多为复杂的工业环境,网络的拓扑结构由工业流程以及设备部署位置决定,具有相对稳定性;网络流量往往具有一定的规律性;网络节点的存储能力有限、计算能力弱以及链路稳定性差等特点使得工业网络对时延、可靠性以及故障的及时处理等方面具有更高的要求.本文提出的路由机制是针对工业无线网络进行设计的.工业无线通信技术^[3]的应用降低了工业网络的布线成本,提高了网络的灵活性,但是降低了路由的可靠性,增大了时延和能耗.工业生产往往具有循环的特点,当在网络中添加认知能力时,让工业网络具备认知能力,即与认知网络^[4]一样具有自感知、自预测、自优化等特点,实现认知循环,更适合于大型工业网络的设计,提高网络的可扩展性.

由于工业网络的相对稳定的拓扑结构,可以通过对经验路径的改变获得丰富的路径进而找到最优路径,这与仿生算法^[5]中人工免疫算法^[6]通过变异、交叉操作产生新抗体的思想相符合;不相交性是评价多路径路由算法优劣的一个重要指标,而不相交性与人工免疫算法中抗体浓度的表示形式一致;此外,路由算法得到的具有多样性的较优路径除了应用在本次路由外还需在经验路径中存储,其中,经验路径可用人工免疫算法中的抗体概念描述,而人工免疫算法中亲和力的概念可表明路由选择的路径是否为最优.因此,本文设计了基于人工免疫的路由机制(artificial immune strategy-based routing mechanism,简称 AISR).

本文的贡献之一是对分区路由的设计,包括对基于链路质量的域内静态路由算法和基于多路径^[7]的域间动态路由算法的设计.其二是对认知功能的设计,包括实时监测链路的丢包率和预测流量周期,以下是详细介绍:由于工业网络的域内节点较少,因此采用静态路由的方法进行路由,域内路由算法利用节点的能量信息和链路的负载情况寻找最优的主路径以及与主路径不相交的从路径.当主路径失效后可迅速启动从路径,提高路由的可靠性,预计算的路径也可减少网络延时.域间路由算法利用历史信息来初始化路径,并对其进行变异、重组操作,从而得到不相交的多条路径.认知功能之一是采用软硬件结合的方法对链路丢包率进行实时感知,避免选择丢包率高的链路,保证路由的实时性和可靠性;另一个认知功能是通过模式距离方法^[8]计算流量周期,从而实现流量周期的预测,防止节点因负载过大而导致丢包.

本文开始部分介绍课题的研究背景、本文的解决思路及贡献.第 1 节介绍工业网络的相关工作,针对国内外现有工作的不足,讨论本文的优势.第 2 节介绍基于人工免疫的工业认知无线网络路由机制的相关设计.第 3 节为仿真实验与性能评价.第 4 节为结束语,对本文进行总结,并对未来工作进行展望.

1 相关工作

引起广泛关注的工业网络已成为目前研究热点之一.文献[9]利用节点物理位置信息和路由表信息为工业无线网络的移动传感器节点设计了实时路由算法,解决路径的寻优问题,通过找到最短路径减少路由跳数、降低传输时延、提升路由的有效性并解决网络节点的移动性问题.文献[10]将主动路由与按需路由相结合,提出了联系缓存路由机制,有效地减少了网络控制信息的数量.文献[11]提出了组合定向地理路由(pair-wise directional geographical routing,简称 PWDGR),适用于无线传感器网络,对贪婪路由进行改进,利用地理位置寻找到达目的节点的多条路径,可平衡网络负载,减少网络时延.文献[9-11]的设计各有优点,但是都没有考虑对认知循环的设计,只适用于小型无线网络.

对认知网络的设计,国内外的研究也相当成熟,文献[12]提出了面向认知网络(quality of service,简称 QoS)的路由协议,对节点进行智能化处理,节点间可进行经验路径的交换,从而提高网络的效率.文献[13]为了降低传输时延和丢包率,采用节点负载和链路质量对链路可用性进行预测,进而选择节点负载小、链路质量稳定的路径.

仿生算法以其自演化、自组织、协作、生存能力和自适应的特点,应用在多种场景,文献[14]根据蚂蚁生态系统与信息中心网络架构的相似性,将蚁群算法应用在信息中心网络路由中,利用蚁群的正反馈机制提高了检索最近内容副本的能力.文献[15]为解决资源分配问题,采用群搜索优化算法实现资源的高效分配.

从以上文章内容可知,认知网络及仿生算法的研究已经很成熟,但却没有对工业无线网络的认知循环的设计.本文设计的 AISR 添加了对认知循环的设计,包括对链路丢包率的实时感知和对流量周期的预测,考虑到了工业设备的智能性.

2 路由机制设计

2.1 工业网络模型

本文对 Mesh+星型拓扑进行改进,设计了基于 Mesh+Mesh 的工业网状拓扑,弱化网关节点(原簇首节点)的作用,去掉节点之间的从属关系,预设每个网络设备的功能是相同的,节点间不仅可通过边界路由节点进行跨区域通信,也可直接通信.这种网络拓扑提高了网络的可扩展性,适用于大型工业网络的场景.网络模型如图 1 所示.

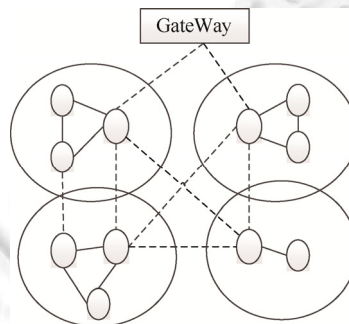


Fig.1 Network model

图 1 网络模型

2.1.1 节点模型

本文中节点由区域编号和节点编号唯一确定,仅考虑节点的能量与负载两个因素.节点模型为 $Node=(E_i, load_i)$.能量 E_i 用剩余电量与总电量的比值表示,取值范围是 $[0,1]$,其中,1 表示节点的满电状态或充电状态,0 表示节点已失效或断电状态.负载 $load_i$ 用缓存队列占总空间的比例表示,取值范围是 $[0,1]$,其中,1 表示缓存空间已满,0 表示无缓存队列.

2.1.2 链路模型

我们考虑链路的丢包率因素,由于工业无线网络的链路具有不对称性,链路的丢包率由正向丢包率和反向丢包率组成.链路模型为 $Link=(L_{ij}^r, L_{ij}^f)$, L_{ij}^r 是正向丢包率,代表源节点向目的节点发送数据的丢失情况, L_{ij}^f 是反向丢包率,代表目的节点向源节点回复确认消息的丢失情况.

2.1.3 流量模型

工业流量^[16]分为规律性数据和突发性数据.规律性数据包括时间周期型数据和事件驱动型数据.时间周期型数据是指流量数据周期性的发送到特定的目的节点;事件驱动型数据是指流量数据的产生受到其他节点的影响.突发性数据是指流量数据的通信节点和流量间隔具有不确定性.我们根据工业网络的特点,利用规律性数据,进行流量周期的预测,实现网络的认知循环功能.

2.2 基于人工免疫的路由机制

工业认知网络与人工免疫的对应关系如图 2 所示.其中,工业认知网络中的业务对应能够引起疾病的抗原,路由机制的目标是为了寻找业务所对应的路径,即人工免疫中的抗体,以维持整个网络的稳定.免疫性分为特异

性免疫和非特异性免疫.非特异性免疫作用范围比较广,具有相对的稳定性,这与工业网络中的域内路由相对应.

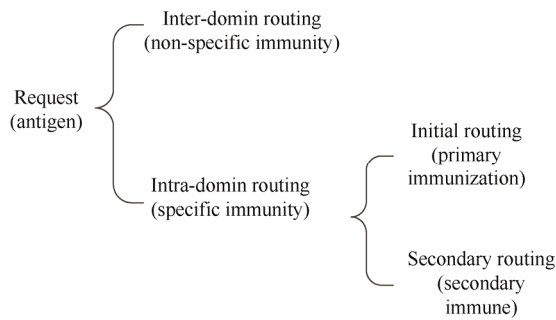


Fig.2 Corresponding relation

图 2 对应关系示意图

特异性免疫具有特异性,当初次接受抗原刺激时,机体发生响应,获得免疫后,机体恢复,并产生大量的抗体,当再次接受相同抗原刺激时,根据记忆细胞能够迅速反应.特异性免疫与工业网络中的域间路由相符合.

当有业务请求到来时,先判断业务的源节点和目的节点是否在同一区域,若在同一区域,则使用域内路由算法,对应人类免疫系统中的非特异性免疫,直接查找域内静态路由表进行域内路由,若找到目的节点,则查找路径成功;若没有找到目的节点的路径,则将业务作为域间路由来处理.域间路由为动态路由,对应人类免疫系统中的特异性免疫,如果到达特定目

的节点的业务是初次出现,节点未存储到达目的节点的信息,则需要使用域间路由算法,寻找到达目的节点的路径.数据成功传输之后,对传输的路径进行记忆存储,再次出现到达相同目的节点的业务时,就可以利用记忆信息直接进行业务的传输,这种方法能够有效地降低数据传输时延.

2.2.1 域内静态路由算法

域内采用静态路由^[13]方法对路径进行预计算,选择1条主路径和2条从路径.主路径的确定采用最短路径算法,最短路径是指本节点到域内其他节点的最小成本路径.路径的成本考虑节点能量与链路丢包率两个方面的因素.从路径的选择既要考虑路径成本,又要考虑与主路径的不相交性(域内路由算法引入的相关符号及含义参见表1).

Table 1 Symbols and meanings of intra-domain

表 1 域内引入的符号及含义

符号	含义
E_i	节点 V_i 的能量
L_{ij}^f	链路的反向丢包率
L_{ij}^r	链路的正向丢包率
$L_{ij}(t-1)$	链路在 $t-1$ 时刻的丢包率
C_{ij}	链路成本,并且 $i, j \in p$
TA_{ij}	链路的平均传输次数
E_{ij}	V_i 与 V_j 之间的链路能量
k	数据包的传输次数
$p(k)$	数据包经过 k 次传输才成功到达的概率
L_{ij}	链路的当前时刻的丢包率
L_{ij}^{k-1}	$k-1$ 次传输的丢包率
$D(p_m, p_s)$	值是 1 为两条路径不相交
$Rand(0, C_{ij})$	此值为 0 到 C_{ij} 的随机值

(1) 链路能量

链路能量为所经节点能量的最小值,链路能量 E_{ij} 描述为 $E_{ij} = \min(E_i, E_j)$.

(2) 链路质量评估

采用链路质量指标(link quality indicators,简称 LQI)监视网络,当有需要时,节点定期向邻居节点发送探测数据包,根据探测数据包的情况实时感知链路的丢包率情况.当 t 时间内节点 V_i 收到节点 V_j 发送的数据报文的数量为 r ,收到的第 1 个报文的编号为 n_1 ,收到的最后一个报文的编号为 n_2 时,链路的反向丢包率 L_{ij}^f 计算公式如公式

(1)所示(链路正向丢包率计算方法相同),链路在当前时刻的丢包率 L_{ij} 及在 t 时刻的丢包率 $L_{ij}(t)$ 计算公式如公式(2)和公式(3)所示(θ 为相关系数).

$$L_{ij}^f = 1 - r / (n_2 - n_1 + 1) \quad (1)$$

$$L_{ij} = 1 - (1 - L_{ij}^f) \times (1 - L_{ij}^f) \quad (2)$$

$$L_{ij}(t) = \theta \times L_{ij}(t-1) + (1 - \theta) \times L_{ij} \quad (3)$$

(3) 路径成本计算

路径 p 的路径成本 PC 计算公式如公式(4)所示,其中 $C_{ij} = TA_{ij} / E_{ij}$, $TA_{ij} = \sum_{k=1}^{\infty} k \times p(k)$, $p(k) = (1 - L_{ij}) \times L_{ij}^{k-1}$.

$$PC = \sum_{i,j \in p} C_{ij} \quad (4)$$

(4) 链路成本变动

判定主路径 P_m 与从路径 P_s 的不相交性 $D(P_m, P_s)$ 的公式如下:

$$D(p_m, p_s) = 1 - (p_m \cap p_s) / p_m \quad (5)$$

变动链路成本,以获得从路径变动后的链路成本 $C_{ij}(c)$ 计算公式如下,其中 ϕ 为调节因子.若要进行成本变动,根据公式(5)判断找到的路径与原路径是否相交,若不相交则找到从路径,否则选取不相交性最大的两条链路作为从路径.

$$C_{ij}(c) = C_{ij} + \phi \times \text{Rand}(0, C_{ij}) \quad (6)$$

域内路由算法见算法 1.

算法 1. 域内路由算法.

1. 输入:源节点 V_s ,目的节点 V_j
2. 输出:到达目的节点的路径集合
3. BEGIN
4. 设置 hello 数据包的间隔并收集邻居节点的 hello 数据包;
5. IF 时间到达设定阈值
6. 通过计算收集到的 hello 数据包计算反向丢包率 L_{ij}^f 及向邻居节点发送到达此节点的正向丢包率;
7. ELSE
8. GOTO Step 10;
9. 接收到邻居节点的正向丢包率,计算链路丢包率;
10. IF 链路丢包率改变
11. 节点发送 LinkState 数据包;
12. ELSE
13. GOTO Step 23;
14. 运行最短路径算法,求得主路径信息;
15. FOR $it=1:k$;
16. 进行链路成本变化,求得 $C_{ij}(c)$,运行 Dijkstra 算法,求得从路径信息;
17. IF 满足相交性
18. 成功找到从路径,迭代次数加 1;
19. ELSE
20. GOTO Step 16;
21. END IF
22. END FOR
23. END

2.2.2 域间动态路由算法

域间路由采用不相交多路径^[17]路由方法.路径成本考虑链路的平均传输次数和网络负载两个因素.路径的平均传输次数为源到目的的所有链路的平均传输次数之和,要满足路径的平均传输次数最小;网络的负载为链路上节点的最大负载,寻找最优时满足路径不相交约束条件(域间路由算法引入的符号及含义见表 2).

约束条件如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & petx_p = \sum_{ij \in p} TA_{ij} \\ \min \quad & load_p = \max_{ij \in p} load_{ij} \\ \text{s.t.} \quad & D(p_m, p_s) = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

Table 2 Symbols and meanings of inter-domain

表 2 域间引入的符号及含义

符号	含义
$petx_p$	路径的平均传输次数
TA_{ij}	链路的平均传输次数
$load_p$	路径 p 的负载
$load_{ij}$	链路的负载
$D(p_m, p_s) = 1$	链路不相交
F_{t-1}	$t-1$ 时刻内容的使用频率
$F_{\Delta t}$	Δt 时间内内容的使用频率
R	Δt 时间内内容被请求次数
t_i	第 i 个模式持续的时间
s_{1m}, s_{2m}	对应 S_1, S_2 的第 m 个模式
$petx$	路径的平均传输次数
$aff(a_k)$	抗体的亲和度
a_k	抗体
N_a	抗体个数
N_p	路径数量
$sim(p_i, p_j)$	任意两条路径的相似性
p_m	主路径
p_s	从路径

(1) 经验路径替换

完成一次成功路由后,在经验路径中存储本次使用的路径信息,为减少存储空间的使用并提供快速、灵活的路由方法,只存储区域编号及区域内的两个边界节点,例如 $M(3,5)N(7,9)$,这种存储方式有效地实现了路由的灵活性,经验路径的存储方便以后快速的路由.只有当邻居节点未存储此路径时才进行存储,同时经验路径可动态更新,当存储空间满时,将内容使用次数最少的经验路径替换. t 时刻内容的使用频率 F_t 计算公式如公式(8)所示,其中, $F_{\Delta t} = R/\Delta t$, α 和 β 为相关系数,本文设 $\alpha = \beta = 0.5$. β 的值越小,代表历史使用频率随时间衰减的程度越大,其影响力就越小.

$$F_t = \alpha F_{t-1} + \beta F_{\Delta t} \quad (8)$$

(2) 流量周期预测

将节点流量分为空闲、正常和繁忙状态,对应负载的模式为 $m = \{-1, 0, 1\}$,将负载与时间序列用二元组表示为 $S = \{(m_1, t_1), (m_2, t_2), \dots, (m_i, t_i)\}$,那么任意两个时间序列的模式距离 $D_M(S_1, S_2)$ 定义形式如公式(9)所示.

$$D_M(S_1, S_2) = (1/t_N) \times \sum_{i=1}^N t_i \times D_M(s_{1m}, s_{2m}) \quad (9)$$

$$(1/t_N) \times \sum_{i=1}^N t_i = 1 \quad (10)$$

(3) 人工免疫算法

在人工免疫算法中,抗体和抗原的匹配程度用抗体的亲和度刻画.本文利用抗体亲和力概念评价路径性能,最优路径为抗原,抗体是平均传输次数小且节点负载小的路径.抗体亲和力 aff 和平均亲和力 A 表达式如下,其中, aff 值越大,表示路径的性能越好.

$$aff = \{1/[1 + \ln(petx)]\} \times (1 - load) \quad (11)$$

$$A = [\sum_{k=1}^N aff(a_k)] / N_a \quad (12)$$

在人工免疫算法中,抗体之间的相似度用抗体浓度描述.本文利用抗体浓度的概念计算路径的相似度,目的是找到多条不相交的多路径.目的路径 p_i 与其他路径的相似度均值 $den(p_i)$ 计算公式如公式(13)所示.

$$den(p_i) = (1/N_p) \times \sum_{j=0}^{N-1} sim(p_i, p_j) \quad (13)$$

$$sim(p_m, p_s) = (p_m \cap p_s) / p_m \quad (14)$$

对抗体的选择由抗体亲和度和抗体浓度共同确定,抗体亲和度的值越大,代表选择的路径越接近最优路径,抗体的浓度值越小,表明路径之间的相似度越低,由此选择的路径性能就越好.选择抗体 a_k 的概率 $p(a_k)$ 计算公式如下(其中 β 为抗体浓度调节因子):

$$p(a_k) = aff(a_k) \times e^{-\beta \times den(a_k)} \quad (15)$$

对抗体进行交叉和变异操作.交叉操作分为单点交叉和多点交叉.根据域间路径特点,本文选用单点交叉方式,交叉的概率设为固定值 0.9.随机选择交叉的位置,对交叉后的路径进行重新组合,要注意尽量选取路径的中间节点进行交叉,因为当选择的节点在靠近源节点和目的节点时,交叉带来的效益会明显降低.变异操作表示对抗体进行随机变动.路径变异的概率与路径的亲和度有关,即与路径的性能有关.路径性能越好,发生变异的概率越小;反之,表示路径性能较差,发生变异的概率越大.本文定义变异操作为随机选择路径中间节点,利用经验路径中存储信息将源节点到中间节点的路径替换,若经验路径中未存储到达中间节点的路径,则变异失效.注意,将由交叉和变异操作产生的路径进行去环操作.抗体进行变异的概率 P_c 计算公式如下(其中, γ 为相似度调节因子):

$$P_c = 1 - \gamma \times aff(a_k) \quad (16)$$

域间路由算法见算法 2.

算法 2. 域间路由算法.

1. 输入:域间路由请求
2. 输出:域间最优路径集合
3. BEGIN
4. 接收流请求,进行种群初始化;
5. FOR $i=1:k$
6. 根据公式(11)计算抗体的亲和度,根据亲和度对抗体进行排序;
7. 根据公式(12)计算平均路径亲和度 A ,选择进行克隆的路径集合;
8. 根据路径亲和度和浓度进行克隆;
9. 根据公式(15)计算抗体的选择概率,选择亲和度高于平均值的抗体 a_{k1} ;
10. FOR $j=1:m$
11. 依据抗体的选择概率,采用轮盘赌选择的方法,生成 a_{k2} 中的抗体;
12. END FOR
13. FOR $j=1:m/2$
14. 随机选择 $random\ 1$ 和 $random\ 2 \in (1, m)$,并随机选择 $random \in (0, 1)$;
15. IF $random\ 1 = random\ 2 \parallel random > a_{k\ random}$
16. 不进行交叉操作
17. ELSE
18. 选择抗体相同节点进行交叉操作;


```

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.

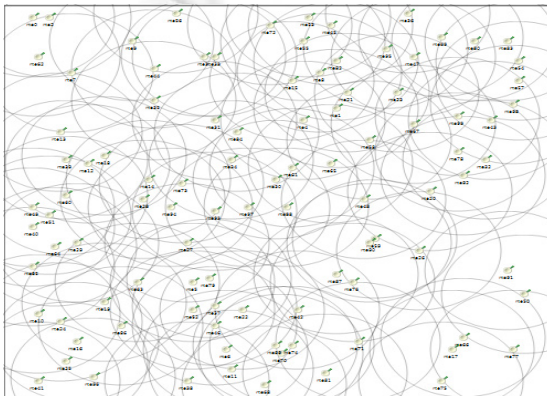


Fig.3 Random topology in simulation program

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.

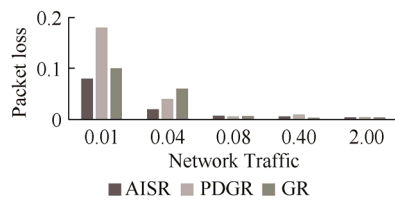


Fig.4 PL's change with the network traffic

图 4 网络流量对丢包率的影响

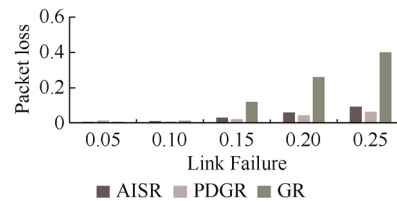


Fig.5 PL's change with the link failure

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.

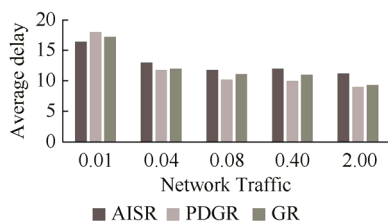


Fig.6 AD's change with the network traffic

图 6 网络流量对平均时延的影响

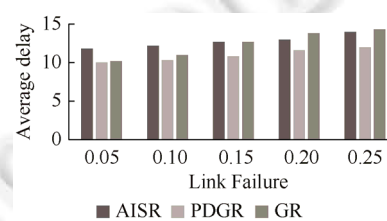


Fig.7 AD's change with the link failure

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.

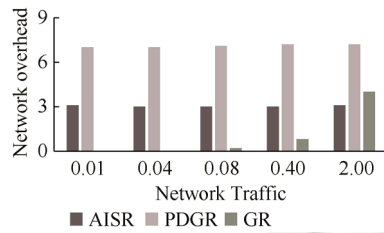


Fig.8 NO's change with the network traffic

图8 网络流量对网络开销的影响

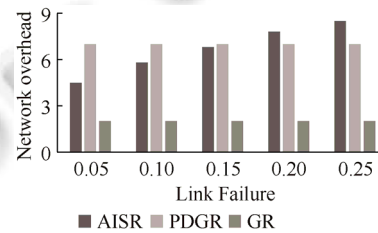


Fig.9 NO's change with the link failure

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.