

12-13-2019

## Intelligent Collaborative Networking Method for Workshop Emergencies

Kong Tao

*Jiangnan University, Engineering Research Center of the Ministry of Education of Internet of Things Technology Application, Wuxi 214122, China;*

Wang Yan

*Jiangnan University, Engineering Research Center of the Ministry of Education of Internet of Things Technology Application, Wuxi 214122, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Intelligent Collaborative Networking Method for Workshop Emergencies

### Abstract

**Abstract:** Due to the complex environment of intelligent manufacturing workshop, abnormal emergencies will cause huge security threats and economic losses to the workshop. It is difficult to transmit the abnormal event data continuously, quickly and completely in the workshop production site, and the fluctuation of abnormal event data is great with high requirements on the integrity and real-time of data transmission. In this paper, a multi-agent cooperative networking method for workshop emergencies is proposed. *Mobile robots are introduced as intermediary Sink nodes for data transmission between sensor networks and the Internet.* In case of emergencies, the intelligent node and cluster head node are jointly networked, which solves the problem that the current networking method can not deal with the unexpected incidents in the workshop in time and effectively.

### Keywords

Emergency, agent, collaborative networking, intelligent node

### Recommended Citation

Kong Tao, Wang Yan. Intelligent Collaborative Networking Method for Workshop Emergencies[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(12): 2606-2616.

# 面向车间突发事件的智能协同组网方法

孔涛, 王艳

(江南大学, 物联网技术应用教育部工程研究中心, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 由于制造车间作业环境复杂, 异常突发事件都会对生产车间造成巨大的安全威胁和经济损失。车间生产现场异常事件数据难以连续、快速、完整传输一直是车间突发事件感知过程中的突出问题。针对该问题, 提出一种智能协同组网方法, 通过模糊处理方法将异常事件分为不同警戒级别, 引入机器人智能体担任 Sink 智能节点, 基于事件优先级改进传统组网方法, 将智能节点和簇头节点协同组网, 解决了当前组网方法不能及时有效应对车间突发异常事件的问题。

**关键词:** 突发事件; 智能体; 协同组网; 智能节点

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 12-2606-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0265

## Intelligent Collaborative Networking Method for Workshop Emergencies

Kong Tao, Wang Yan

(Jiangnan University, Engineering Research Center of the Ministry of Education of Internet of Things Technology Application, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Due to the complex environment of intelligent manufacturing workshop, abnormal emergencies will cause huge security threats and economic losses to the workshop. It is difficult to transmit the abnormal event data continuously, quickly and completely in the workshop production site, and the fluctuation of abnormal event data is great with high requirements on the integrity and real-time of data transmission. In this paper, a multi-agent cooperative networking method for workshop emergencies is proposed. Mobile robots are introduced as intermediary Sink nodes for data transmission between sensor networks and the Internet. In case of emergencies, the intelligent node and cluster head node are jointly networked, which solves the problem that the current networking method can not deal with the unexpected incidents in the workshop in time and effectively.

**Key words:** Emergency; agent; collaborative networking; intelligent node

## 引言

随着智能设备和智能装备的不断发展, 无线传感器网协同各种智能装置组网, 深层次应用于国防军事、环境监测、反恐救灾、工业制造、农业生产

等诸多领域, 尤其是在工业制造领域, 生产环境的复杂性、生产过程的多变性、生产数据的海量性等都要求工业制造领域的车间数据监测水平急需提高。并且在大多数制造企业内部, 车间生产过程的复杂性、时变性和不可预测性导致车间生产停产, 严重时会引起断电、火灾、大量设备损坏等严重安全事故。面向车间的智能协同组网是一种全分布式网络, 并且网络中每个感知节点具有有限的感知周围环境、获得局部信息和计算的能力。同时, 车间异常事件任务量大并且根据事件紧急程度任



收稿日期: 2019-03-08 修回日期: 2019-06-30;  
基金项目: 国家自然科学基金(61973138);  
作者简介: 孔涛(1995-), 男, 江苏姜堰, 硕士生, 研究方向为制造物联的智能感知与处理模型; 王艳(1978-), 女, 江苏无锡, 博士, 教授, 博导, 研究方向为网络化制造系统全流程优化控制、人工智能。

<http://www.china-simulation.com>

• 2606 •

务具有不同的优先级,这就造成了组网中各网络节点负载量过高,任务量过大。从而就需要各个智能节点之间协同工作,完成感知任务和报告事件的需求。所以,智能节点之间协同降低网络能耗,提高数据传输速度,保证数据的完整性和实时性是关注的重点。

目前协同组网研究方法主要分为两类:一类是研究无簇情况下各传感器节点之间的协同工作来增强节点生存能力,此时无线传感网多采用节点之间信息传递来传输数据,但是此种情况通过节点之间的信息传输过程是相互影响的,任一节点出现了问题,都会影响数据传输完整性,不能满足车间异常事件数据传输完整性要求。同时无簇状态下,各节点在处理异常事件类优先级要求高的事件任务时,造成各节点负载量增大,且传输时间增加。所以此种情况下不适用于车间异常事件任务量大,任务优先级高的数据传输问题。

另一类则是通过研究分簇情况下各节点间的协同组网机制,各种分簇算法层出不穷,但各种算法只限于解决特定问题且未考虑到加入智能感知节点,现有方法无法满足异常数据实时传输需求。文献[1]提出移动节点路径规划方法,在采用单跳网络的基础上,合理地选择移动节点运动路径最低限度降低传感器节点能耗,此方法在路径改善方面有效控制了传感器节点能量消耗,但异常事件的复杂环境影响下,导致单节点传输稳定性变差,数据丢包率严重。文献[2]提出了最大熵的动态分簇算法,将邻簇间的公共节点作为簇与簇之间通信的网关,此种方法一定程度上可以保证数据传输完整性,但是面对海量数据,数据传输速度慢,不满足传输快速性要求。文献[3]提出了根据节点自身剩余能量和到邻节点平均传输路径损的综合权重考量之后的簇头选取方法。但仿真表明成簇周期更新频繁,数据丢失严重。

综合以上考虑,本文针对当前协同组网的研究问题,提出了一种针对智能制造业车间的紧急异常事件问题下的协同组网方法。不同于传统的协同组

网研究中的 Sink 节点为固定基站,通引入智能制造车间中的单个移动机器人作为移动 Sink 智能节点与各簇头传感器节点协同通信。在车间出现紧急异常情况时,通过优先规划智能节点移动路径,调整簇头选择机制,并且对消息队列作不同优先级处理,既能完整传输数据,又可及时传输数据。这些都是现有方法未能涉及的。下文主要从数据传输实时性和完整性两方面展开了研究,并通过 MATLAB 仿真验证理论有效性。

## 1 传感器网络体系结构

### 1.1 车间生产异常事件

#### 1.1.1 车间生产异常事件分类管理

通过对车间各异常事件进行分析归纳后,车间紧急异常事件按照异常产生原因可分为以下几类:设备异常、物料异常、质量异常、环境异常,如图 1 所示。

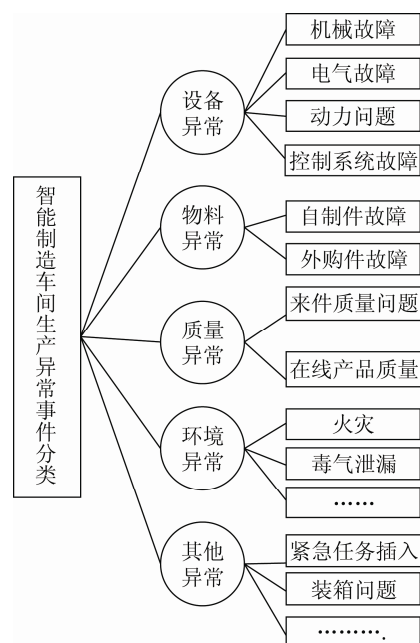


图 1 车间异常事件分类图

Fig. 1 Classification diagram of workshop abnormal events

根据这一事件图分类,其中环境异常事件类是造成安全问题、经济损失最严重的事件类,并且异常事件的影响因素也是多种多样的,针对多种复杂

异常情况, 传感器需要能够在不同情况下对数据做出实时、连续、完整监测。

### 1.1.2 车间生产异常事件性质描述

以上每种生产异常事件的紧急程度一般都会受到各种相关性因素的影响, 例如火灾异常的紧急程度与火灾现场是否存在相关易燃物品, 并且当前的通风状况会影响火势走势等。因此, 假设车间生产异常事件类型为  $m$  种, 相应的影响因素分别为  $n$  种, 异常事件类型  $\mathbf{Y}$  和影响因素  $\mathbf{X}$  可分别表示为:

$$\mathbf{Y}=(y_1, y_2, \dots, y_m), \quad \mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

车间生产异常事件每一影响因素都需要建立一个合适函数关系, 如(2)式所示:

$$u(\mathbf{X})=(u_1(x_1), u_2(x_2), \dots, u_n(x_n)) \quad (2)$$

车间的异常事件的监测具有以下特点: (1) 异常事件通常具有多种类型; (2) 异常事件产生过程中受到周围多种环境影响而存在多种不确定性。如何充分利用各种不确定性的环境因素的影响, 实现异常事件紧急程度的准确评价, 必须将这些相互影响的指标按照不同的属性划分为等级, 通过模糊评价方法作出评价。首先通过模糊关系矩阵确定异常事件类型和因素:

$$\mathbf{R}=\begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1m} \\ r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n r_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

式中: 行元素表示影响异常事件的因素, 列元素表示异常事件。元素  $r_{ij}(i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n)$  具体含义为第  $i$  种异常事件的影响因素中第  $j$  种影响因素的权重, 并通过如下方法提高准确性, 如式(5)所示:

$$\mathbf{R} = w_1 \mathbf{R}_1 + w_2 \mathbf{R}_2 + w_3 \mathbf{R}_3 + w_4 \mathbf{R}_4 \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3, \mathbf{R}_4$  分别表示 4 位专家的模糊关系矩阵, 并根据各位专家的可信度来确定权重。其中  $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$ , 则, 根据模糊数学原理可以建立  $X$  对于  $Y$  的综合评价模型为  $V(x) = u(x) * \mathbf{R}$ , 并且通过最终结果判断何种影响因素起关键作用。

最后, 我们通过参数值表征最终的评估结果, 根据综合值将异常事件紧急程度划分为 3 个部分,

对应评估指标的 3 个级别: 紧急级[1, 0.8], 预警级[0.8, 0.6], 正常级[0.6, 0.4]。

## 1.2 智能制造车间网络拓扑结构

基于以上异常事件分类, 在制造车间发生相应异常事件时, 为满足网内节点快速移动、通信、自主协同从而达到连续监测、高速传输要求, 传感器网采用全分布式自动体系结构, 在网络能耗、可扩展性、数据连续传输及时性等方面具有很大优势。

在实际智能制造车间内, 移动机器人作为重要载体的存在, 可以担任 Sink 节点, 各 Sink 节点可以协同通信, 并负责与每个簇头节点的通信与数据传输, 并且可以根据节点地理分布位置与能量剩余情况移动。

### 1.2.1 相关定义

在该拓扑结构中, 给出如下定义参量:

$L(x, y)$ : 位置  $x$  和  $y$  的空间距离

$p_i$ : robot 的位置坐标

moveD: robot 的最大运动距离

moveV: robot 的平均巡航速度

优化目标:

$$\min \bar{T} = \sum_{i=1}^n t_i / n \quad (6)$$

约束条件为:

$$p_i \notin \text{obstacle} \quad (7)$$

$$V_{\text{robot}} < \max V_{\text{robot}} \quad (8)$$

$$\sum_{k \in \text{Seq}_i} L(P_k, P_{k+1}) < \text{moveD} \quad (9)$$

$$\frac{\sum_{k \in \text{Seq}_i} L(P_k, P_{k+1})}{\text{moveV}} < \text{movetime} \quad (10)$$

优化目标保证了目标的传输时间最短, 约束条件式(7)表示了 robot 在运动时, 目标不能停留在障碍物区域; 式(8)表示了机器人运动速度受自身限制, 小于等于其最大运动时速; 式(9)表示 robot 运动不能超过其最远距离; 式(10)表示 robot 不能超过其最大运动时间。

### 1.2.2 网络拓扑结构

在引入智能体节点的网络拓扑结构中可以通

过移动 Sink 节点位置, 交换局部地理位置信息, 优化簇头节点到汇聚节点的跳数和距离, 以加速向汇聚节点发送紧急数据包。

图 2 中表示了网络组网的过程图, 当车间正常作业时, 单个机器人周期性地由静止位置运动, 进行车间内巡航, 当出现异常时, 如图 2(c)所示, 定位出异常区域位置, 再根据周围节点能量和位置分布状况计算出机器人移动目标位置坐标, 最终机器人改变原有的既定巡航路线, 向定位坐标移动。产生异常事件时, 巡航机器人根据异常事件信息和位置动态改变位置的组网方法, 快速地接收来自簇头传送的数据, 有效减少了簇头节点到 Sink 节点的传输能量损耗, 智能组网方法有效提高了数据传输效率。

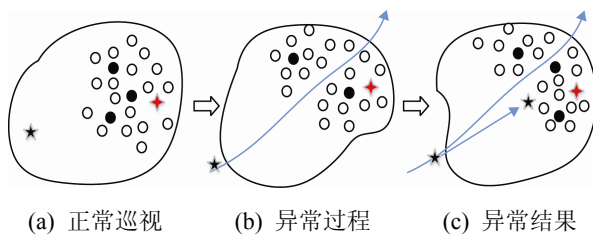


图 2 智能协同网络示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Intelligent Collaborative Network

## 2 智能体异常事件观测研究

### 2.1 传感器与智能体协同下车间异常突发事件协同观测策略总体设计

智能体协同下对智能制造车间内移动目标的连续观测涉及多个实体单元, 包含智能体机器人, 控制中心, 各传感器节点等, 一个完整的任务决策过程通常由观测、判断、决策、行动 4 部分组成, 在不断更新的周期中, 时间不断变化, 构成了一个动态循环过程。整体框架设计如图 3 所示。

图中描述了多传感器对车间内异常情况连续观测任务的总体框架: (1)由部署在车间内的各传感器节点对观测区域进行观测, 并将获取的区域信息上传至 Robot; (2)任务管理器控制中心接收来自机器人(Sink 节点)的观测信息, 识别区域内的异常

信息事件; (3)控制中心派遣 Robot 抵近观测, 设定 Robot 观测位置; (4)Robot 根据注入的指令信息, 前往指定位置, 对目标进行抵近观测。将上述 4 个步骤按照一定的顺序 1-2-3-4-1 构成一个动态循环的闭环过程, 从而可以有效地解决对智能制造车间内异常事件目标的连续观测问题。在图的基础上, 对图中各组成部分的功能、作用、性质进行详细讲解。

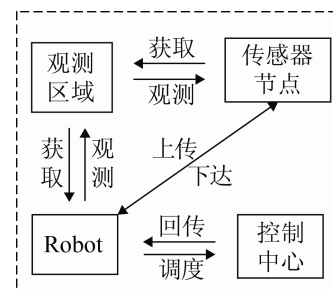


图 3 多智能体协同框架

Fig. 3 Multi-agent cooperation framework

(1) 传感器节点。传感器节点包括:传统传感器、RFID 等嵌入式设备、条形码设备等智能设备、视频采集终端等。传感器节点的主要任务为数据感知和数据传输。通过将不同感知节点所监测到的数据传输给执行器节点。再通过执行器节点传输给 Sink 节点, Sink 节点将数据统一传送给任务管理中心。

(2) Robot 单元。Robot 在监测过程中充当 Sink 节点作用, 它作为可移动的智能体单元, 需要根据整个监测区域的事件检测信息, 各节点的位置和能量问题作出相应移动, 达到保证监测区域事件能够连续、高效地传输效果。

(3) 控制中心单元。控制中心是智能制造车间的中枢神经。控制中心首先根据传感器节点传输的监测信息, 对监测区域内的目标进行判断、识别, 然后分析区域内事件的信息。最后根据相应数据信息综合决策得出 Robot 位置信息, 并最终派遣 Robot 运动到指定位置。

### 2.2 异常区域事件定位

#### 2.2.1 平均每跳距离计算

在智能制造工厂中, RFID 类型传感器具有定

位功能,我们将此类传感器节点定义为网络传感器中的锚节点。当在车间内发生异常事件时,我们则可以通过选取一组合适的锚节点组合,定位出异常事件故障区域,具体分析如下:如图 4 所示,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  为 RFID 传感器位置,即为锚节点, A 是异常区域节点。 $L_1$  与  $L_2$  欧氏距离为 40 m, 跳段距离为 2 跳;  $L_1$  与  $L_3$  欧氏距离为 100 m, 跳段距离为 6 跳;  $L_2$  与  $L_3$  欧氏距离为 70 m, 跳段距离为 5 跳。

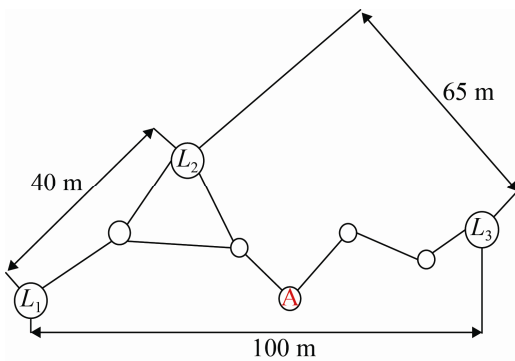


图 4 异常事件定位图  
Fig. 4 Exception event mapping

由此可以得到  $L_1$  的平均每跳距离  $C_1$ 。每个锚点在获得关于其它锚点位置和跳数信息之后,锚点计算平均每跳距离,如公式(11)~(13)。

$$c_1 = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{h_{12} + h_{13}} + \frac{\sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2}}{h_{12} + h_{13}} = \frac{100 + 40}{2 + 6} = 17.5 \quad (11)$$

$$c_2 = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{h_{12} + h_{23}} + \frac{\sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}}{h_{12} + h_{23}} = \frac{65 + 40}{2 + 5} = 15 \quad (12)$$

$$c_3 = \frac{\sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}}{h_{32} + h_{31}} + \frac{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}}{h_{32} + h_{31}} = \frac{100 + 65}{5 + 6} = 15 \quad (13)$$

通过未知节点周围的已知未知的节点校正值得来定位估算未知节点的位置信息。

### 2.2.2 位置估计

在计算出平均每跳距离之后,可以根据跳数信息和附近锚节点位置计算出节点与锚节点的欧氏距离。

$$D_i = hop * C_i \quad (14)$$

如图 4 所示,未知节点 A 距离  $L_1$  节点的最小跳数为 3,距离  $L_2$  的最小跳数为 2,距离  $L_3$  的最小跳数为 3,当 A 接收到锚节点  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  的平均每跳距离后,可以得到 A 与锚节点  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  的距离分别为:

$$\begin{aligned} d_1 &= C_1 \times 3 = 17.5 \times 3 \\ d_2 &= C_2 \times 2 = 15 \times 2 \\ d_3 &= C_3 \times 3 = 15 \times 3 \end{aligned} \quad (15)$$

当未知节点从 3 个锚节点获得距离时,通过最小二乘法计算未知节点的位置。如式(16)所示,  $d_i$  表示未知节点到锚节点  $(x_i, y_i)$  的距离,  $d_1, d_2, d_3$  分别为:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = d_2^2 \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (16)$$

对式(16)进行整理变化,得出未知节点  $(x, y)$  的坐标

$$\hat{x}_{ls} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (17)$$

其中:

$$A = -2 \begin{bmatrix} X_{2,1}, Y_{2,1} \\ X_{3,1}, Y_{3,1} \end{bmatrix}, \hat{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$b = \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - X_2^2 - Y_2^2 + X_1^2 + Y_1^2 \\ R_{3,1}^2 - X_3^2 - Y_3^2 + X_1^2 + Y_1^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

### 2.3 异常事件监测要求

基于以上车间内异常事件的类型和性质分析,在目标检测时要求传感网对数据检测具有实时性、优先性、连续性等特点,具体分析要求如下:

(1) 数据传输实时性:用  $T_a$  表示从节点  $a$  到 Sink 节点处理数据包的总时延;  $t_{(a,s)}$  表示数据包从节点  $a$  到节点  $s$  的传输时延;  $t'_{(a,s)}$  表示从节点  $a$  到

节点  $s$  的等待时延;  $t''_{(a,s)}$  表示从节点  $a$  到节点  $s$  的处理时延;  $t_s$  表示 Sink 节点处理数据包所需时间;  $t'_s$  表示数 Sink 节点等待处理数据包时间。所以总时延为公式(20)。

$$T_a = t_{(a,s)} + t''_{(a,s)} + t_s + t'_s \quad (20)$$

式中: 在计算数据包从节点  $a$  到 Sink 节点传输总时延时, 节点  $a$  到节点  $s$  的传输时延  $t_{(a,s)}$  具体表示为

$$t_{(a,s)} = t_{(a,c)} + t_{(c,s)} + \frac{d_s}{s_t} = t_a + \text{proc}(t) + \frac{d_s}{s_t} + \frac{d}{s_p} \quad (21)$$

(1) 每个节点接收大小相同的数据包时间  $t_a$  相同; (2) 数据固定的格式决定每个数据包大小相同, 且数据包在各执行节点上的处理时间  $\text{proc}(t)$  相同; (3) 数据包大小相同并且数据处理速率也相同, 所以处理时间也相同; (4) 假定感知节点到 Sink 节点的传输距离相同, 所以同速率情况下的传输时间也相同。

所以不同优先级数据包时间不同, 主要是两端的等待时间影响, 主要考虑数据包的等待时间。假设共有  $n$  个簇, 则对于优先级为  $pr_1$  的传感器节点数据, 等待时延为

$$t_1 = \sum_{i=1}^n k_{i,1} * t_{(c,s)} \quad (22)$$

式中: 假设该传感网内共有  $n$  个簇;  $k_{i,j}$  则表示优先级为  $j$ , 但是生存时间小于当前节点的节点数量。

对于优先级为  $pr_2$  的传感器节点数据包需要先等待优先级为  $pr_1$  的数据包, 同优先级时, 生存时间越短优先级越高。所以等待时延为

$$t_2 = \sum_{i=1}^n (k_{i,2} + N_{i,1}) * t_{(c,s)} \quad (23)$$

以此类推, 可得到优先级为  $pr_x$  的传感器数据等待时延为

$$t_x = \sum_{i=1}^n (k_{i,x} + N_{i,1} + \dots + N_{i,x-1}) * t_{(c,s)} \quad (24)$$

根据以上分析说明, 优先级为  $pr_1$  的数据包等待时间要远小于优先级为  $pr_x$  的数据包等待时间, 所以证明了此种方法可以保证紧急数据包实时性。

(2) 数据传输连续性: 数据传输连续性通过无

线传感网网络寿命来体现, 当无线传感网网络寿命长, 无线传感网传输数据时间长, 可最大程度保证数据传输时间。而延长无线传感网网络寿命综合考虑选择能量充足、到各邻居节点能量传输损耗小、地理位置合适的簇头节点。其中相关定义如下:

邻居节点: 在节点  $s_i$  的通信半径  $R$  范围内, 若节点  $s_i$  与节点  $s_j$  的欧氏距离  $d_{ij} < R$ , 则称  $s_j$  为  $s_i$  的邻居节点, 否则为非邻居节点。  $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$  为两节点之间的欧氏距离。

(3) 数据紧急性: 基于 1.1 节所提出的异常事件性质描述, 则根据异常事件的不同紧急程度可以相应划分为不同优先级的数据包。

如图 5 所示, 该紧急数据包信息包括: 数据包包头、优先级和剩余生存时间。

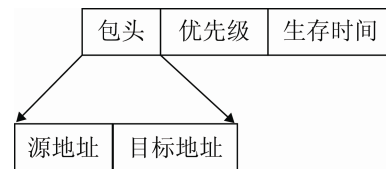


图 5 紧急数据包格式  
Fig. 5 Exception event mapping

定义  $pr_a$  表示: 一数据包从  $a$  节点发出且优先级为  $p$ ,  $dl_a$  则表示此数据包的生存时间。

(1) 不同警戒级别事件数据对应的优先级关系  
通过将车间异常紧急情况根据不同指标划分为不同警戒级别为: 警戒级[1, 0.8], 低警戒级[0.8, 0.6], 过渡级[0.6, 0.4], 基本安全级[0.4, 0.2], 安全级[0.2, 0]。设警戒级事件对应节点  $a$  数据包优先级为  $pr_a$ , 低警戒级事件对应节点  $b$  数据包优先级为  $pr_b$ , 过渡级事件对应节点  $c$  数据包优先级为  $pr_c$ , 基本安全级事件对应节点的  $d$  数据包优先级为  $pr_d$ , 安全级事件对应节点  $e$  数据包优先级为  $pr_e$ 。从而有对应的优先级顺序为  $pr_e < pr_d < pr_c < pr_b < pr_a$ 。

(2) 当  $L_{k-1}$  层数据包优先级不同时

目的节点在接收到数据包之后, 通过解析包头得到数据包优先级:  $pr_x < pr_y < \dots < pr_i$ , 根据此优先级依次处理  $Node_x \dots Node_i$  的数据包。



(3) 当  $L_{k-1}$  层数据包优先级程度相同时

目的节点在接收到数据包之后,若优先级相同  $pr_x = pr_y = \dots = pr_i$ , 则再比较生存时间的大小。生存时间越小, 优先级程度越高, 即  $dl_x < dl_y, \dots, dl_i$ , 则节点  $x$  的优先级最高。

### 3 基于移动 Sink 节点 LEACH 分簇路由改进算法

本文提出的 LEACH 分簇路由改进算法是基于典型 LEACH 路由基础上进行改进的一种层次路由协议。其典型处理方式是分簇, 根据车间内工作环境、节点状态, 将网络划分为多个簇(Cluster)和选取出每个簇内的簇头, 簇成员与簇头之间采用单跳信息直接传输, 簇成员与 Sink 节点之间采用以簇头节点为中继节点进行信息传输。基于簇的路由主要研究内容在于簇头与分簇问题, 本文结合异常事件紧急性、突发性特点, 基于簇路由问题研究, 提出改进的分簇路由机制。

#### 3.1 传感器协同探测流程分析

本算法主要是从以下方面进行了优化:

(1) 簇优化。紧急情况时, 为能够详细及时了解智能制造车间的现场情况, 数据的完整性、传输稳定性显得尤为重要。发生紧急异常情况时, 紧急启动新一轮簇头和簇成员更新机制, 新一轮簇成员的簇头节点的选择是综合考虑各节点之间距离和节点与 Sink 节点的能量和距离的权重选择。选出的节点是保证数据传输的稳定性和完整性的最优节点。

(2) Sink 节点位置优化。定位异常事件区域, 将信息反馈到移动 Sink 节点, Sink 节点结合簇头节点位置和能量情况调整自身位置。这样通过移动 Sink 节点位置, 可以减少各簇头节点到汇聚节点的总距离, 很大程度上减少了传输时间, 并降低了传输过程中所损耗的能量。具体如图 6 所示, 当制造车间运行状况正常时, 为保证网络节点寿命, 将不处于工作状态的节点设置为休眠状态来节省网络节点能量。在采集目标信息过程之中,

如果目标信息出现异常, 唤醒睡眠节点, 根据异常信息位置和簇相关信息, 结合簇头选取机制进行新一轮簇更新。

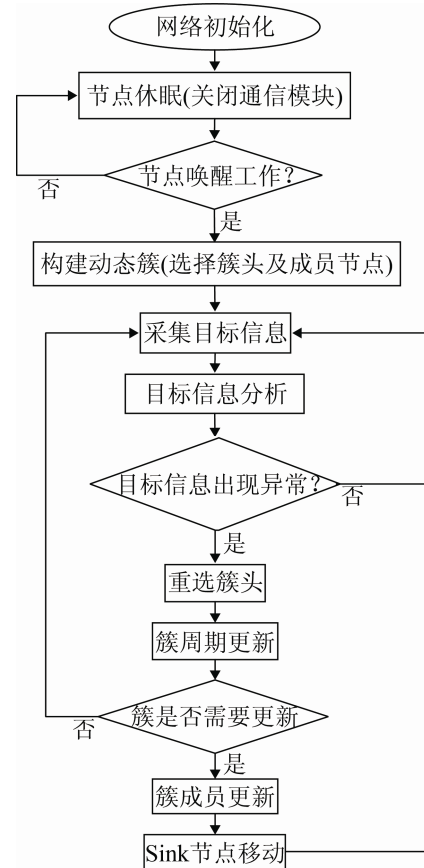


图 6 节点智能协同监测流程图

Fig. 6 Chart of Intelligent Collaborative monitoring of nodes

综合考虑簇信息和异常事件位置信息, 通过加权系数的方式综合考量出一个加权值, 然后将此加权值进行比较, 选出最合适的簇头节点。考虑以上基本情况, 得出基于智能制造车间紧急情况的改进 LEACH 算法步骤如下:

step 1: 初始化无线传感网, 假设此时出现异常情况, 则唤醒所有节点, 并且通过传感网中邻近区域位置的锚节点定位出异常事件位置。

step 2: 根据相应的簇头竞选机制选择出簇头节点, 并且计算得出相应的簇成员节点。并且根据紧急异常事件性质决定分簇周期。

step 3: 当新一轮簇头以及簇成员节点选取完成后, 根据相应节点位置、异常事件位置信息调整

Sink 节点到最佳位置。

### 3.2 竞选簇头方法

作为动态分簇的第一步, 需要进行簇头竞选, 簇头的合理选取直接影响分簇结构的网络性能。LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 算法是最早提出的分簇算法, 其选取簇头的过程为: 节点产生一个随机数  $x \in [0, 1]$ , 若  $x < T(n)$ , 则成为簇头, 再根据簇头信息组建簇。这种并未考虑实际节点情况, 从而导致下列问题, 问题 1: 未选择最合适的簇头节点, 从而导致节点能量多的越多少的越少; 问题 2: 簇头节点地理位置分布不均匀, 数据传输距离较远, 能量消耗过大, 导致数据不能完整传输。

所以本文提出一种面向智能制造车间紧急突发情况的簇头选择方法:

$$w_i = r \frac{E_i}{E_{\max}} - (1-r) \frac{\sum P_c}{h_i \times PL_{Gen}} + p \frac{1}{d_i^2} \quad (25)$$

本文综合考虑节点能量、邻居节点距离, 距离异常区域距离动态计算出节点对应权值, 通过权值获得局部最优节点, 并在此基础上逼近整体性能最优。节点通过交换信息获取的参数包括:  $E_i/E_{\max}$  节点剩余能量与最大储能比值,  $1/d_i^2$  节点与异常区域距离。其中,  $r+p=1$ , 若对节点能量要求较高, 则适当增加  $r$  系数比重, 若对传输距离要求较高, 则增加  $p$  系数比重。根据终值大小竞选簇头。式(19)中,  $E_i$  表示节点  $i$  当前剩余能量;  $E_{\max}$  表示节点的初始最大能量;  $h_i$  表示节点  $i$  的邻节点总数;  $PL_{Gen}$  表示节点之间的最大传输路径损耗值, 那么  $\sum PL / (h_i \times PL_{Gen})$  表示节点  $i$  与邻节点之间归一化之后的平均传输路径损耗;  $\gamma$  为常量调节参数, 取值范围为  $[0, 1]$ 。从公式(19)可以看出, 剩余能量越多, 传输路径越短的节点的权值  $w_i$  越大, 越可能当选为簇首。  $d_i$  表示为传感节点距离异常紧急信息定位处的距离(近似将此处等价于 Sink 节点移动的位置), 在发生紧急异常情况时, 各个相邻工作部分可能会相互影响, 所以我们总是希望簇头

选择能够相对靠近异常信息部分, 则若此距离越大, 则  $1/d_i^2$  越小, 当选簇头的概率也就越小。

### 3.3 簇更新周期研究

基于以上事件紧急程度的不同划分, 我们可以根据事件不同紧急程度决定簇的不同时间更新周期。当事件数据紧急程度较高、波动性较大时, 若频繁更新簇, 会造成能量消耗较大, 同时频繁更新簇时, 每一次更新簇都需要更新时间, 从而延长数据传输时间, 影响数据实时性。从而当事件紧急程度处于警戒级和低警戒级时, 事件传输实时性要求高, 则延长簇更新周期, 簇内节点根据能量分布、地理位置、与邻节点通信情况定期更新簇头节点; 当事件紧急程度处于过渡级时, 则在原来簇更新周期基础上, 稍微延长簇更新周期; 当事件处于基本安全级和安全级时, 则保持原有簇更新周期不变。将簇更新周期与时间紧急程度通过定性关系表示, 具体规则通过以下量度表示

$$\tau = \frac{2\Delta t}{1+(1-k')} \begin{cases} pr_b \leq k' \leq pr_a \\ pr_d \leq k' \leq pr_b \\ pr_e \leq k' \leq pr_d \end{cases} \quad (26)$$

式中: 当节点数据紧急性越高,  $\tau$  值越大即簇更新周期越大, 保证了簇更新周期不影响数据传输特性; 而当数据量基本不发生突变时, 簇更新周期缩短, 更新频率提高, 可以均匀利用每个节点的能量, 避免节点过早死亡。保证了每个节点能量处于均衡状态。与定周期分簇相比较而言, 此种分簇方法避免了额外的能量消耗, 并且降低了时间复杂度, 提高分簇算法能量效率。

### 3.4 Sink 节点的移动

按照改进的 LEACH 算法分簇算法对智能制造车间进行快速分簇组网后, 作为移动 Sink 节点的机器人还应根据与其相通信的簇头节点位置信息进行相应移动, 根据新一轮竞选簇头节点位置反馈信息, 机器人根据依据相应规则进行移动, 但个机器人在移动时同时与智能车间内多个簇头节点进行通信。因此, 在紧急情况时, 综合考虑到既要尽

满足异常事件位置区域节点信息传输,又要综合考虑其它传感器节点数据传输的完整性,还要考虑到距离等关系,综合考虑以上因素,移动 Sink 节点至合适的位置,则可以实现负载均衡。

在实际情况下,设  $t$  时刻机器人二维平面位置向量为  $x_{\text{robot}}(t)$ , 与之相连的簇头节点分别为  $M_1(t), M_2(t) \dots M_n(t)$ , 簇头节点向量位置分别为  $x_1(t), x_2(t) \dots x_n(t)$ 。假设机器人已经获得智能制造车间内簇头节点的位置、剩余能量、负载等信息,此时机器人根据这  $n$  个簇头节点信息计算出  $t$  时刻最优位置,即要满足该作为 Sink 节点的机器人到与之相连的簇头节点之间的距离平方的加权和以及距离与能量比值最小,如式 27 所示:

$$\min J = \sum_{i=1}^n w_i(t) \|x_i(t), x_{\text{robot}}(t)\|_2 + \sum_{i=1}^n p_i(t) \frac{\|x_i(t), x_{\text{robot}}(t)\|_2}{E_i} \quad (27)$$

同时还应满足如下约束条件

$$\|x_{\min}\| \leq x_{\text{robot}}(t) \leq \|x_{\max}\| \quad (28)$$

$$x_{\text{robot}}(t) \notin \text{obstacle} \quad (29)$$

式中:  $\|x_i(t), x_{\text{robot}}(t)\|$  为簇头节点  $M_i$  在  $t$  时刻与机器人的欧氏距离,  $x_{\min}$  与  $x_{\max}$  分别为机器人移动距离的边界,  $\text{obstacle}$  为机器人运动路径的规划避开障碍物,  $w_i(t)$  为  $t$  时刻簇头节点的权重值和  $p_i(t)$  表示为  $t$  时刻簇头节点能量所占权重值。且满足

$$\sum_{i=1}^n (w_i(t) + p_i(t)) = 1 \quad (30)$$

对其求导,令其等于零,化简得:

$$x_{\text{robot}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ w_i(t) + \frac{p_i(t)}{E_i} \right] x_i(t)}{\sum_{i=1}^n \left[ w_i(t) + \frac{p_i(t)}{E_i} \right]} \quad (31)$$

在实际应用中,如果每一周期 Sink 节点位置随着簇头节点和簇的位置和能量值更新,会造成 Sink 节点能量损耗过大,同时也会延长数据信息传输时间。设定一个阈值  $\varepsilon$ , 当本次 Sink 节点位置与上次节点位置之差满足如式(32)所示。

$$x_{\text{robot}}(t) - x_{\text{robot}}(t-1) \leq \varepsilon \quad (32)$$

即本次 Sink 节点位置与上次节点位置之差小于某个

阈值时,则 Sink 节点位置不发生改变,当不满足上式条件时,根据实际位置值对 Sink 节点位置调整。

## 4 仿真结果分析

### 4.1 仿真环境与参数

本文利用 MATLAB 研究平台对本文提出的面向车间突发事件的多智能体紧急协同组网方法进行仿真实验,一个动态 Sink 节点(移动机器人)和 100 个静态的传感器节点随机部署在  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  方形目标监测区域内(区域可被节点全部覆盖)。主要仿真参数如表 1 所示。

表 1 主要实验参数

Tab. 1 Main experiment parameters	
参数名称	参数值
$E_{\text{r-init}}$	0.5 J
网络大小	100 m×100 m
节点数量(N)	100
数据包长度(l)	4 000 bits
$E_{\text{elec}}$	50 nj/bit
$\varepsilon_{\text{fs}}$	10 (pj/bit)/m <sup>2</sup>
$E_{\text{amp}}$	0.013 (pj/bit)/m <sup>4</sup>
$t_{\text{deadline}}$	200 ms
接收包耗时	5 ms/包
发送包耗时	5 ms/包

### 4.2 网络性能对比分析

#### (1) 节点分布情况对比分析

相同仿真条件下,模拟监测区域内智能节点、感知节点以及簇头节点分布情况,图 7 为 LEACH 算法对监测区域内随机部署的 100 个节点进行簇头选择的节点分布图,忽略了节点的实际地理位置,每轮产生的簇头位置分布不均匀,有的区域簇头过于密集,有的区域则没有簇头,有的簇头则距离 Sink 节点位置较远。当出现异常情况时不能根据异常情况调整簇头节点位置,比如,有的数据波动大的节点距离簇头节点较远,则导致发送数据能耗较大;簇头密集区域则会导致采集数据冗余,同时数据融合能耗增加,这样会使得传感器节点因为能量耗尽而过早失效。

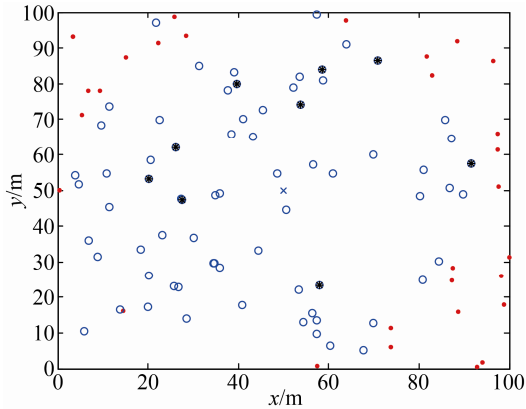


图 7 LEACH 算法节点分布  
Fig. 7 LEACH algorithm node distribution

图 8 则为改进 LEACH 算法情况下的节点分布, 从图中可以看出此种方法下簇头分布更有规律性, 簇头主要分布在以故障节点为中心, 半径约为 30 m 的圆的边缘附近。这种分布方式有效减少了故障区域范围内的节点能量传输和数据融合能量损耗, 延长了故障区域范围内的节点寿命。同时, 移动 Sink 节点根据相应规则移动至使各簇头节点数据传输能量损耗最小的位置。如图 8 所示。

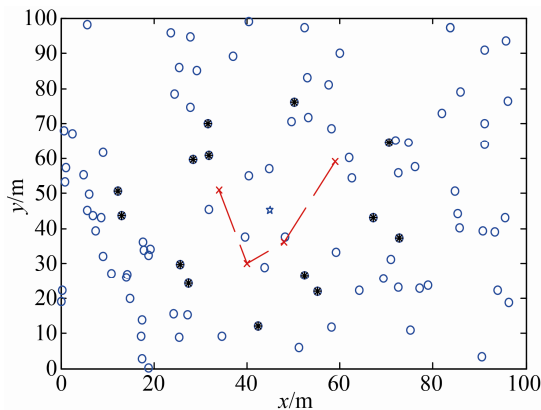


图 8 本文算法节点分布  
Fig. 8 Algorithm node distribution

## (2) 网络延时比较

通过计算传感器节点传送数据包到 Sink 节点的时间来衡量网络延迟的程度。本次实验将本文算法与传统的 LEACH 算法, 经过 K-means 分簇后的 LEACH-KPP 算法进行对比, 对比分析优先级为  $pr_1$  的数据包传输数据到 Sink 节点所需要的时间。通过控制不同优先级数据包产生的比例为

$pr_1 : pr_2 : pr_3 = 5 : 3 : 2$ , 来模拟紧急事件。本文算法与其它算法的网络延时对比如图 9 所示。数据包产生速率增加, 各算法的网络延时均有明显增加。通过对高优先级、短生存时间优先处理, 并且根据时间不同优先级来调整簇更新周期, 提高了节点数据处理和传输速度, 这是其他算法未能解决的问题。

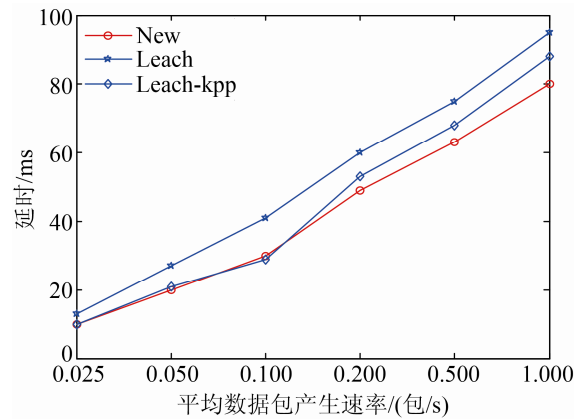


图 9 网络延时  
Fig. 9 Network delay

## (3) 网络寿命时间比较

图 10 对比分析了 LEACH 算法和本文算法对应的存活节点数目节点数随时间变化的对比曲线。

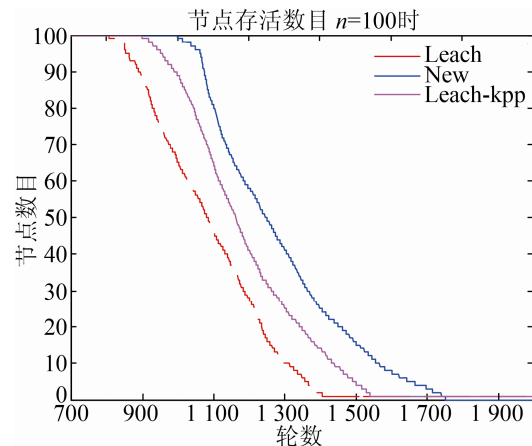


图 10 网络寿命对比  
Fig. 10 Network life comparison

从图 10 可看出, 本文提出的算法出现死亡节点的轮数相比 LEACH 算法延长了约 200 轮的时间。并且随着时间延长, 节点死亡速率逐渐放缓, 尤其是故障区域附近节点生存时间长。这说明相应簇机制的改善, 使得簇分布更加合理, 有效保证了异常事

件区域的节点寿命,保证了数据能够传输的完整性。

## 5 结论

本文针对车间异常事件发生时所面临的数据完整性、实时性、网络能量消耗过快等挑战,提出了改进 LEACH 算法的协同组网方法。首先根据异常事件性质划分为不同警戒程度的事件,节点组网过程中根据不同警戒程度对簇头选择机制、簇更新机制、簇更新周期进行调整;然后根据簇头地理位置分布和能量状况将 Sink 节点移动至最优位置,最优位置即保证各簇头数据传输数据到 Sink 节点消耗能量最小的位置。最后,借助于 MATLAB 仿真平台验证了本文方法通过对簇头和簇的更新机制优化,达到了降低网络能耗和延长故障区域节点寿命的目标;同时紧急数据传输实时性大大提高,网络延迟大大降低,满足了异常事件时的数据传输要求。

## 参考文献:

- [1] Ma M, Yang Y. SenCar: An Energy-Efficient Data Gathering Mechanism for Large-Scale Multihop Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (S1558-2183), 2007, 18(10): 1476-1488.
- [2] 王沁飞, 南建国, 黄金科, 等. 基于加权的无人机集群组网分簇算法[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(5): 1500-1514.  
Wang Qinfei, Nan Jianguo, Huang Jinke, et al. Weighted Clustering Algorithm for UAV Cluster[J]. Computer application research, 2019, 36(5): 1500-1514.
- [3] Guo S, Wang C, Yang Y. Joint Mobile Data Gathering and Energy Provisioning in Wireless Rechargeable Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing (S1558-0660), 2014, 13(12): 2836-2852.
- [4] 李朋飞, 李志华, 尹熙, 等. 基于能量等级的分簇拓扑控制算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(3): 96-99.  
Li Pengfei, Li Zhihua, Yin Xi, et al. Clustering Topology Control Algorithm based on energy level[J]. Computer Science, 2014, 41(3): 96-99.
- [5] Konstantopoulos C, Pantziou G, Gavalas D, et al. A Rendezvous-Based Approach Enabling Energy-Efficient Sensory Data Collection with Mobile Sinks[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems (S1558-2183), 2012, 23(5): 809-817.
- [6] 梁智强, 林丹生. 基于电力系统的信息安全风险评估机制研究[J]. 信息安全, 2017, 8(4): 86-90.  
Liang Zhiqiang, Lin Dansheng. Research on Information Security Risk Assessment Mechanism based on Power System[J]. Information Network Security, 2017, 8(4): 86-90.
- [7] Al-Qadami N, Laila I, Koucheryavy A, et al. Mobility Adaptive Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks with Mobile Nodes[C]. International Conference on Advanced Communication Technology. IEEE, 2015: 121-126.
- [8] 陈友荣, 陆思一, 刘半藤, 等. 移动无线传感网的移动感知路径选择算法[J]. 传感技术学报, 2019, 32(1): 121-130.  
Chen Yourong, Lu Siyi, Liu Banteng, et al. Mobile Sensing Path Selection Algorithms for Mobile Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Sensing Technology, 2019, 32(1): 121-130.
- [9] Zhezhuang X, Liquan C, Ting L, et al. Balancing Energy Consumption with Hybrid Clustering and Routing Strategy in Wireless Sensor Networks[J]. Sensors (S1424-8220), 2015, 15(10): 26583-26605.
- [10] 王艳, 潘琛. WSANs 中基于生物免疫机制的 A-A 智能协同方法[J]. 信息安全, 2018(8): 8-16.  
Wang Yan, Pan Chen. A-A Intelligent Collaboration Method Based on Biological Immune Mechanism in WSANs[J]. Information Network Security, 2018(8): 8-16.
- [11] Hao X C, Wang L Y, Yao N, et al. Topology Control Game Algorithm Based on Markov Lifetime Prediction Model for Wireless Sensor Network[J]. Ad Hoc Networks (S1300-3446), 2018, 10(18): 2231-2239.
- [12] 卫岚宁, 林海, 王磊. 基于改进近邻传播算法的无线传感网分簇与节能[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(5): 196-201.  
Wei Lanning, Lin Hai, Wang Lei. Clustering and Energy Saving of Wireless Sensor Networks Based on Improved Nearest Neighbor Propagation Algorithms[J]. Computer Applications and Software, 2018, 35(5): 196-201.
- [13] Tan J, Liu W, Wang T, et al. An Adaptive Collection Scheme-based Matrix Completion for Data Gathering in Energy-harvesting Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Access (S2169-3536), 2019, 32(6): 15-23.
- [14] 文伟平, 郭荣华, 孟正, 等. 信息安全风险评估关键技术研究与实现[J]. 信息安全, 2015, 8(2): 7-14.  
Wen Weiping, Guo Ronghua, Meng Zheng, et al. Research and Implementation of Key Technologies of Information Security Risk Assessment[J]. Information Network Security, 2015, 8(2): 7-14.