

面向 WIA-PA 工业无线传感器网络的 确定性调度算法

王 恒, 陈鹏飞, 王 平

(重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室, 重庆 400065)

摘 要: WIA-PA(Wireless Networks for Industrial Automation-Process Automation)是我国自主制定的工业无线传感器网络标准,确定性调度技术是其中一项关键技术.但目前已有的确定性调度算法主要集中在通用传感器网络或 WirelessHART,ISA100.11a 等遵循国外标准的工业无线传感器网络中,未能针对 WIA-PA 网络进行优化设计.鉴于此,本文提出了一种适用于 WIA-PA 网络的基于回溯法的最优确定性调度算法,能够获取调度解的最大成功率;并以此为基础,进一步提出了一种基于最小时间裕度优先的时分多址调度算法(Least Slack First on Time Division Multiple Access,LSF-TDMA).仿真实验结果表明,所提出的 LSF-TDMA 算法能够满足 WIA-PA 网络端到端数据传输的确定性需求,在调度解获取成功率接近于最优的同时,有效降低了算法复杂度.

关键词: 确定性调度;时间裕度;工业无线传感器网络;WIA-PA 网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)01-0068-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.010

Deterministic Scheduling Algorithms for WIA-PA Industrial Wireless Sensor Networks

WANG Heng, CHEN Peng-fei, WANG Ping

(Key Laboratory of Industrial Internet of Things & Networked Control (Ministry of Education),
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Wireless Networks for Industrial Automation Process Automation (WIA-PA) is China's national standard for industrial wireless sensor networks. Deterministic scheduling is one of the key technologies for WIA-PA networks. However, current deterministic scheduling algorithms mainly focus on the common wireless sensor networks or WirelessHART and ISA100.11a networks, and they are not optimized for WIA-PA networks. Therefore, an optimal backtracking scheduling algorithm is proposed and achieves the optimal schedulable ratio for WIA-PA networks. And based on this, another deterministic scheduling algorithm called Least Slack First on Time Division Multiple Access (LSF-TDMA) is further presented. Simulation results demonstrate that LSF-TDMA algorithm can meet the deterministic demand of end-to-end data transmissions in WIA-PA networks. It obtains a near-optimal schedulable ratio while effectively reducing the algorithm complexity.

Key words: deterministic scheduling; slack; industrial wireless sensor networks; WIA-PA networks

1 引言

工业无线传感器网络是一种部署在低成本、高可靠和高灵活性等特殊需求的工业现场环境中的无线网络^[1].目前,业界出现了三个面向工业无线传感器网络的标准,分别是 HART(Highway Addressable Remote Transducer)基金会制定的 WirelessHART 标准、国际自动化协会制定的

ISA100.11a 标准和我国自主制定的 WIA-PA(Wireless Networks for Industrial Automation-Process Automation)标准^[2],三个标准均已被 IEC(International Electrotechnical Commission)批准为正式的国际标准.其中,WIA-PA 标准相比于其它标准,具有如下特点:①采用如图 1 所示的星型网络与网状网络相结合的两层拓扑结构;②各设备间的数据通信基于 WIA-PA 超帧结构,分为信标、竞争接入期、非竞争接

入期、簇内通信、簇间通信和休眠 6 个阶段;③从现场设备到网关设备的路径中,端到端数据流主要经过两个阶段:簇内通信阶段和簇间通信阶段。

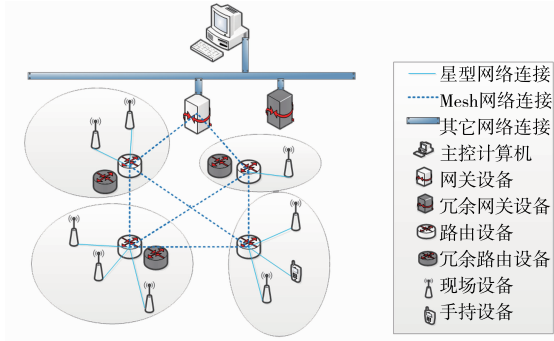


图1 WIA-PA网络拓扑结构

在工业无线传感器网络中,确定性调度技术是一项关键技术,旨在为全网各数据流传输合理地分配时隙和信道资源,以满足数据传输的端到端时延需求。但是,面向工业无线网络的确定性调度问题,已被证明是 NP(Non-deterministic Polynomial) 问题^[3]。为解决此类问题,普遍采取的研究措施有两种。一种是考虑基于候选解的搜索遍历法,比如回溯法和分支定界法^[4]。另一种是启发式算法,比如贪心算法^[5]、图着色法^[6]、模拟退火法和粒子群优化算法等^[7,8]。

目前,现有的确定性调度算法主要集中在通用无线传感器网络或者 WirelessHART 与 ISA100.11a 网络中^[9~15]。其中,文献[12~15]针对 WirelessHART、ISA100.11a 等工业无线传感器网络进行了时隙调度算法的研究。但这些方法由于没有考虑上述端到端数据流涉及的 WIA-PA 网络拓扑结构与超帧结构特征,不宜直接应用于 WIA-PA 网络。而在工业无线 WIA-PA 网络中,相关的确定性调度算法则比较少见。尽管文献[16~18]的调度算法与 WIA-PA 网络有关,但其研究目标在于最小化通信超帧长度和信道数量,不是专门针对确定性要求的调度算法。在确定性调度方面,文献[19]分析了 WIA-PA 协议栈的 MAC 层和网络层,设计了一种实时通信协议,不过该协议并没有指明网络各设备时隙和信道资源的分配情况,不能充分满足确定性需求。

本文针对中小规模 WIA-PA 网络 and 大规模 WIA-PA 网络,分别提出了基于回溯法的确定性调度算法和基于最小时间裕度优先的确定性调度算法。其中,前者通过搜索能获得存在的可调度解,后者能以接近最优的调度成功率快速获取调度解。

2 模型建立与可调度性分析

2.1 数据流模型建立与假设

WIA-PA 网络可以用一个有向图 $G = (V, E)$ 表示。

其中, V 代表网络中的设备集合,构成图的顶点; E 代表设备间的通信链路,构成图的边。对于有向图中的一条边 e 与两个顶点 v_i, v_j , 即 $e \in E, (v_i, v_j) \in V$, 如果 $e = (v_i, v_j)$, 则表示节点 v_i 和 v_j 能够正常通信; 如果发生一次数据传输 $\tau = v_i v_j$, 则节点 v_i 是发送设备, 节点 v_j 是接收设备。假设网络中存在 N 条端到端数据流 $F = \{F_1, F_2, \dots, F_N\}$, 其中一条数据流 $F_i \in F$ 在时隙 k 源节点 v_1 产生数据, 并在截止时间内于时隙 j 抵达目的节点 v_n 处, 则端到端时延为 $L_i = j - k + 1$, 如图 2 所示。

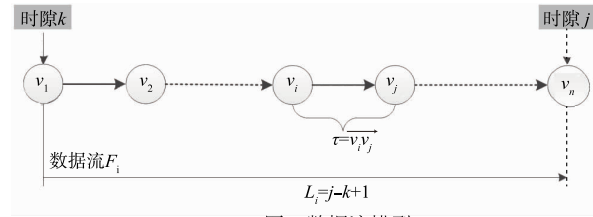


图2 数据流模型

考虑到 WIA-PA 网络的特殊性, 为便于研究, 对 WIA-PA 网络端到端数据流的模型提出如下几个假设: ①WIA-PA 网络管理者已知全网络的拓扑结构信息; ②由于 WIA-PA 网络端到端数据流主要工作在簇内通信和簇间通信阶段, 本文主要针对 WIA-PA 超帧的这两个阶段进行调度; ③本文调度的 WIA-PA 网络端到端数据流具有周期性, 主要考虑从现场设备到网关设备的上行汇聚路径, 但设计的确定性调度算法同样适用于从网关设备到现场设备的下行数据。此外, 对于现场设备到现场设备之间的调度, 所提算法将根据网络管理器所给出的点到点数据流传输路径进行调度计算, 算法的执行过程类似。

2.2 确定性调度问题的公式化描述

在 WIA-PA 网络中, 假设 $s_t(v_i, v_j)$ 表示时隙 t 的有向传输链路 $\tau = v_i v_j$ 。如果节点 v_i 在时隙 t 发送数据给节点 v_j , 则 $s_t(v_i, v_j) = 1$; 反之, 节点 v_i 在时隙 t 并未发送数据给节点 v_j , 则 $s_t(v_i, v_j) = 0$ 。用 $I(v_i)$ 和 $O(v_i)$ 分别表示节点 v_i 的接收链路和发送链路的集合。 $p_t(v_i)$ 表示节点 v_i 在时隙 t 结束时的缓存空间, 并设初始时 $p_0(v_i) = 1$ 。 g_i 表示以 R_i 为簇首的一个簇在一个超帧内的数据包数目。 L_i 为端到端数据流的传输延时。 D_i 为需要进行传输的数据的截止时间。 T 表示超帧的长度(时隙数目)。 WIA-PA 网络数据流满足端到端时限要求的确定性调度问题可用公式表示为:

目标:

$$L_i \leq D_i, \quad \forall i \in [1, N] \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{(v_i, v_j) \in O(v_i)} s_t(v_i, v_j) + \sum_{(v_i, v_j) \in I(v_i)} s_t(v_j, v_i) \leq 1 \quad (2)$$

$$\forall v_i \in V, \forall v_j \in V, \forall t \in [0, T]$$

$$p_{SF}(GW) = \sum_i g_i \quad (3)$$

$$p_t(v_i) = p_{t-1}(v_i) + \sum_{(v_i, v_j) \in I(v_i)} s_t(v_j, v_i) - \sum_{(v_i, v_j) \in O(v_i)} s_t(v_i, v_j) \quad (4)$$

$$s_t(v_i, v_j) \in \{0, 1\}, \quad s_t(v_j, v_i) \in \{0, 1\} \quad (5)$$

上述公式中,式(1)为确定性调度的目标,即端到端数据流的时延不超过截止时间.约束条件(2)是工业无线网络设备半双工通信特性的要求,即限制节点不能在同时隙进行数据的发送和接收,避免产生链路冲突;约束条件(3)保证网关设备最终接收到来自所有簇的数据包;约束条件(4)指的是数据包缓存的更新情况;约束条件(5)表明了传输链路在当前时隙的占有状态.

2.3 端到端数据流的可调度性分析

设定 WIA-PA 超帧长度为 T , P_i 为数据流 F_i 的更新周期, $p_{i,j}$ 为数据流 F_i 的第 j 个数据包 (j 为正整数), 则数据包 $p_{i,j}$ 的产生时隙为:

$$R_{i,j} = P_i * j + 1 \quad (6)$$

如果数据包 $p_{i,j}$ 的截止时隙为 D_i , 则绝对截止时隙为:

$$D_{i,j} = R_{i,j} + D_i - 1 \quad (7)$$

在当前时隙 t , 数据包虽然已经到达数据流所在路径的节点, 但是数据包传输链路的实际释放时间并不确定, 而是在一个可调度的范围内变动. 设 $\tau_k = \overrightarrow{uv}$ 为数据包 $p_{i,j}$ 在当前时隙的传输链路, 假设这时节点 v 距离目的节点还剩余 post_k 个跳数, 则传输链路 τ_k 的释放不晚于时隙 $D_{i,j} - \text{post}_k$, 并且应不早于当前时隙 t , 如图 3 所示.

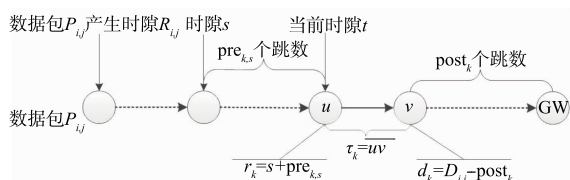


图3 传输链路 τ_k 释放时隙的时间窗口示意图

基于以上讨论, 传输链路 τ_k 释放的时隙上界值为:

$$d_k = D_{i,j} - \text{post}_k \quad (8)$$

对传输链路 $\tau_k = \overrightarrow{uv}$ 而言, τ_k 对应的释放时隙满足:

$$t \leq \tau_k \leq d_k \quad (9)$$

式(9)表明传输链路 τ_k 的实际释放时隙具有一定的选择范围, 在可选时间窗口 $[t, d_k]$ 内, 数据包 $p_{i,j}$ 在传输链路 τ_k 至少需要一个时隙, 也就是 $t = d_k$ 的情况, 这种情况是传输链路 τ_k 在时间窗口内满足数据包能够在截止时间内成功达到目的节点的极限情况. 因此有:

$$d_k \geq t \quad (10)$$

结合式(8)和式(10), 得:

$$D_{i,j} - t \geq \text{post}_k \quad (11)$$

不等式(11)可以说明, 数据流产生的数据包 $p_{i,j}$, 在当前时隙 t 的剩余时隙 $(D_{i,j} - t)$ 不小于所在数据流路径的剩余跳数 post_k . 不等式(11)也是数据传输在进行调度时所需的必要条件. 本文在下文所提出的调度算法将充分考虑这一必要条件, 减少不必要的调度步骤.

3 调度算法设计

3.1 基于回溯法的确定性调度算法

回溯法是一种对候选解进行系统搜索排查的精细方法, 以解空间树的形式表示所求问题. 每当对解空间树进行搜索时, 首先判断当前步骤是否包含了问题的解, 若包含则继续探索, 否则逐步向其前一步回溯, 尝试其它选择.

3.1.1 调度数据流的解空间树

图 4 所示的是用于搜索每个周期性数据流调度的解空间树. 解空间树的层数或深度代表时隙号, 在第 1 层子结点对应的首个时隙开始进行簇内通信阶段和簇间通信阶段调度, 从是否安排链路的角度可看作是二叉树. 解空间树的每个结点对应两种选择, “0”值表示当前时隙不安排链路, “1”值表示安排链路. 安排时从 M 个可用信道中选取一个信道. 因此, 从 M 个可用信道安排链路的角度可把二叉树进一步细分为 $M+1$ 的多叉树, 分叉支路总是以链路调度的信道偏移量 $0, 1, 2, \dots, M-1$ 和无链路调度的情况排列, 共 $M+1$ 种情况, 因而解空间树又可看作 $M+1$ 叉树.

3.1.2 可调度性判定

数据流在当前时隙满足可调度性的条件有: ①当前时隙不超过截止时间; ②满足时隙的可调度必要条件, 即式(11); ③簇内通信和簇间通信两个阶段的顺序不能颠倒或错乱; ④当前时隙如果安排链路, 该链路不与其它已有链路存在冲突.

3.1.3 算法流程

在已知网络拓扑信息 $G = (V, E)$ 、时隙个数 T 、可用信道个数 M 、数据流集合 $F = \{F_1, F_2, \dots, F_N\}$ 、簇内与簇间通信阶段对应时隙 INTRA 与 INTER 的情况下, 通过进行如算法 1 所描述的基于回溯法的确定性调度算法步骤, 最终返回调度结果 $S[1 \cdots T][0 \cdots M-1][1 \cdots N]$.

算法 1 基于回溯法的确定性调度算法

- (1) 根据所给 T 与 M , 构建回溯法的解空间树.
- (2) 对所有 $t \in [1, T]$ 、 $c \in [0, M-1]$ 与, 初始化调度结果 $S[t][c][n] = 0$.
- (3) 选择一条未被调度的数据流 F_n , 在簇内通信阶段首个时隙 $t = \text{INTRA}$ 开始从空间树根结点搜索调度解.
- (4) 选择支路时, 优先考虑前 M 条支路进行链路安排, 从信道偏移量


```

/* 初始化时隙  $t$ , 信道  $c$ , 簇编号  $i$  和数据流编号  $n$  */
(4) while( $t < T$ ) do
(5)    $t \leftarrow t + 1$ ;
(6) if 当前时隙  $t$  处于簇内通信阶段 then
(7)   for 各簇的数据流  $F_k$  do
(8)     计算各簇的整体时间裕度值  $\Delta_t$ , 并从小到大进行排序;
(9)     if ( $d - t - r_t < 0$ ) then return 不可调度结果;
(10)    end
(11)  end
(12) for 全网各个簇  $C_i \in C$  do
(13)    $i \leftarrow$  时间裕度最小的簇编号;
(14)    $c \leftarrow 0$ ;
(15)   for 时间裕度最小的簇内各数据流  $F_k \in C_i$  do
(16)    while( $c < M$ ) do
(17)      $n \leftarrow$  时间裕度最小的数据流编号;
(18)      $S[t][c] \leftarrow$  时间裕度最小的数据流  $F_n$  编号  $n$ ;
      /* 优先调度编号最小的数据流 */
(19)      $c \leftarrow c + 1$ ;
(20)    end
(21)   end
(22)  end
(23) else if 当前时隙  $t$  处于簇间通信阶段 then
(24)   for 该阶段各数据流  $F_k$  do
(25)    计算各数据流的时间裕度值  $\Delta_t$ , 并从小到大进行排序;
(26)    if ( $d - t - r_t < 0$ ) then return 不可调度结果;
(27)   end
(28)  end
(29)  for 该阶段各数据流  $F_k$  do
(30)   while( $c < M$ ) do
(31)     $n \leftarrow$  时间裕度最小的数据流编号;
(32)     $S[t][c] \leftarrow$  时间裕度最小的数据流  $F_n$  编号  $n$ ;
      /* 优先调度编号最小的数据流 */
(33)     $c \leftarrow c + 1$ ; /* 在另一可用信道继续调度时间裕度次
      小的数据流 */
(34)   end
(35)  end
(36) end
(37) end

```

与基于回溯法的确定性调度算法相比, LSF-TDMA 算法执行时间的复杂度为 $O(N * T * (M + 1))$, 而前者的复杂度在最差情况下为 $O((N!) * (M + 1)^T)$, 其执行时间复杂度大于 LSF-TDMA 算法. 特别地, 当随着网络规模增大, 数据流数目增加时, LSF-TDMA 算法在执行时间方面的优势将越来越明显.

4 实验与分析

本节对所提出的两种调度算法进行仿真, 并与传统的调度算法进行对比分析. 仿真实验包括调度解获取成功率测试和调度算法执行时间测试两部分内容. 确定性调度算法采用 C++ 语言进行编程实现. 仿真实

验针对不同规模的网络展开, 节点个数分别设置为 10、20、40 和 60. 在每种网络实现中, 各条数据流从簇成员设备发起, 经过不同的路径到达网关设备. 系统按预定条件输入各条数据流, 同时设定其截止时间、传输路径等参数, 运行调度算法并最终判断所有数据流是否都调度成功. 在同一节点数目下, 通过人工随机构造多次不同的网络实现, 统计各种算法调度解获取的成功率. 在仿真实验中, 网络参数设定如下: 可用信道数为 8 个; 超帧长度为 1280ms (128 个时隙, 每个时隙长度为 10ms); 簇首设备固定为 4 个, 簇成员设备依网络节点总数的不同尽量均匀的分布在各个簇中; 簇内通信时隙数取各个簇成员个数中的最大值; 各个数据流的截止时间均为 500ms. 在拓扑结构上, 簇内采用星型网, 各个簇首直接与网关相连接, 并假定节点间存在的发送或接收链路能够可靠传输. 运行环境参数设置如下: 采用 Intel Core 2 双核处理器, 2.8GHz 主频, 3GB 内存, Windows 7 操作系统.

根据式(11), 输入的数据流参数满足首个时隙可调度必要条件的情况控制在 98%, 其它 2% 数据流的参数则超出了该首个时隙可调度必要条件的范围. 为进一步对比, 进一步测试了所有时隙可调度的必要条件通过率以及传统的速率单调 (RM, Rate Monotonic) 调度算法调度解获取成功率, 其结果如表 2 所示. 其中, RM 调度算法以数据流的更新周期安排优先级, 优先调度周期较小的数据流^[20].

表 2 调度解获取成功率

类型	对比项目	10 节点	20 节点	40 节点	60 节点
测试基准	必要条件	98%	96%	89%	72%
调度算法	回溯法	98%	94%	85%	68%
	LSF-TDMA	98%	94%	85%	66%
	RM	98%	83%	61%	32%

调度结果表明, 作为测试基准的确定性调度必要条件的通过率最高, 但随着网络规模的增长, 链路冲突数量越来越多, 确定性调度必要条件通过率也变得越低. 在回溯法、LSF-TDMA 和 RM 调度算法中, 回溯法具有最高的调度解获取成功率, LSF-TDMA 调度算法有着接近于回溯法的调度成功率, 基本能够满足全网数据流确定性要求. RM 调度算法由于只根据数据流的更新周期大小进行调度, 不能较好地满足确定性要求, 其调度的成功率随着网络规模的增加而迅速下降. 四者的调度成功率变化趋势如图 5 所示.

下面进一步测试所提的回溯法与 LSF-TDMA 调度算法在主控计算机上的执行时间. 测试时保持了与调度解获取成功率测试项目相同的环境参数, 但仅在调

度算法可成功获取调度解的情况下进行,其结果如表 3 所示.

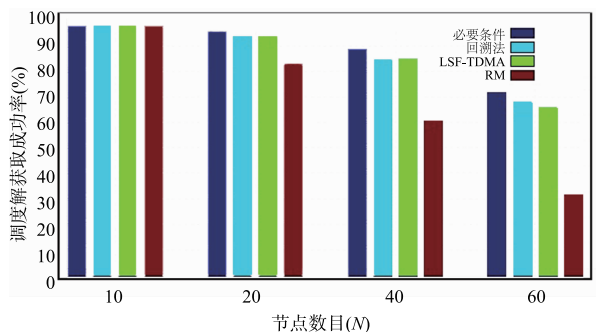


图5 调度成功率变化趋势

表 3 调度算法执行时间

调度算法	10 节点	20 节点	40 节点	60 节点
回溯法	27 μ s	287 μ s	4ms	113ms
LSF-TDMA	12 μ s	14 μ s	27 μ s	36 μ s

实验结果表明,在网络规模较小的情况下,两种算法都具有较快的运算执行速度;在网络规模较大的情况下,回溯法执行时间迅速变长,LSF-TDMA 调度算法却变化很小.这是因为前者的可调度解遍历搜索需要耗费大量的时间,而后者能够根据数据流调度优先级一次性安排完成所有数据流的通信资源,受网络设备节点的数量影响较小.两种算法的执行时间变化趋势如图 6 所示.

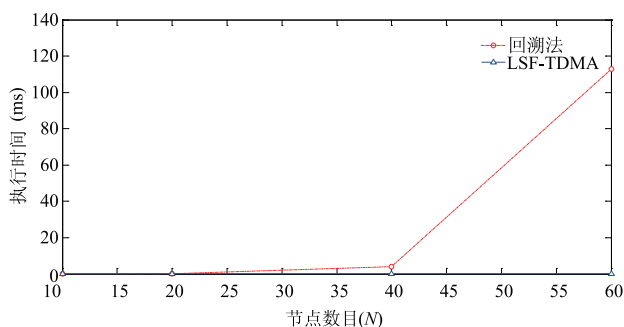


图6 调度算法执行时间变化趋势

从仿真结果可以看出,所提的两种调度算法分别在调度解获取的成功率与执行时间上各有优势,可在不同应用场景进行选择.当网络规模较小,数据流数目不多时,基于回溯法的确定性调度算法是首选,以保证获取调度解的最优成功率;相反,当网络规模较大,数据流数目较多时,优先考虑 LSF-TDMA 确定性调度算法,使其以较高的成功率尽快获得可调度解.

需要说明的是,以算法 1 和算法 2 的具体描述及伪代码为基础,本文所提出的两种调度算法易于在实际的 WIA-PA 网络管理器中进行编程实现.此外,很多

WIA-PA 网络管理器运行在嵌入式平台上,所提算法能够方便的移植到该类平台进行实现.在执行速度上,即使考虑到嵌入式平台与 PC 平台处理速度存在一定差异,所提算法仍然能在基于嵌入式平台的网络管理器中较快的完成调度任务.

5 总结

本文提出了两种面向 WIA-PA 网络的确定性调度算法,分别是面向中小规模 WIA-PA 网络的基于回溯法的确定性调度算法和面向大规模 WIA-PA 网络的基于最小时间裕度优先的确定性调度算法.前者取得了最优的调度成功率;后者能够在快速获取调度解的同时,又能够以接近最优的调度成功率获取调度解.论文下一步工作将考虑在真实的物理场景中对调度算法进行实验,并分析干扰、遮挡等因素导致的路由变化对调度方法的影响,进一步增强调度方法的环境适应性.

参考文献

- [1] 高汉荣,冯冬芹.工业无线网络的现状及发展趋势[J].中国仪器仪表,2008,(S1):87-89,95.
GAO Han-rong, FENG Dong-qin. The situation and future development of wireless industrial networks[J]. China Instrumentation, 2008, (S1): 87-89, 95. (in Chinese)
- [2] LIANG W, ZHANG X, XIAO Y, et al. Survey and experiments of WIA-PA specification of industrial wireless network[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2011, 11(8): 1197-1212.
- [3] CHOI H, WANG J, HUGHES E. Scheduling on sensor hybrid network[A]. Proceedings of International Conference on Computer Communications and Networks[C]. San Diego: IEEE, 2005. 503-508.
- [4] SAIFULLAH A, XU Y, LU C, et al. Real-time scheduling for WirelessHART networks[A]. Proceedings of 31st IEEE Real-Time Systems Symposium[C]. San Diego: IEEE, 2010. 150-159.
- [5] LI Q, NEGI R. Greedy maximal scheduling in wireless networks[A]. Proceedings of 2010 Global Telecommunications Conference[C]. Miami: IEEE, 2010. 1-5.
- [6] KANG H, ZHAO Y, MEI F. A graph coloring based TDMA scheduling algorithm for wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 72(2): 1005-1022.
- [7] 王沁,赵金东. WIA-PA 网络中的无冲突资源调度算法[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(9): 1726-1730.
WANG Qin, ZHAO Jin-dong. Non-collision resources scheduling algorithm for WIA-PA networks[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2010, 31(9): 1726-1730. (in Chinese)

- [8] KIM Y, LEE M. Scheduling multi-channel and multi-time-slot in time constrained wireless sensor networks via simulated annealing and particle swarm optimization[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(1): 122 – 129.
- [9] VITTURI S, TRAMARIN F, SENO L. Industrial wireless networks: the significance of timeliness in communication systems[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, 7(2): 40 – 51.
- [10] 贾杰, 代恩亮, 陈剑, 等. 无线传感器网络中联合路由优化的高能效链路调度[J]. 电子学报, 2014, 42(6): 1118 – 1124.
JIA Jie, DAI En-liang, CHEN Jian, et al. Energy-efficient link scheduling combined with routing optimization in wireless sensor network[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(6): 1118 – 1124. (in Chinese)
- [11] 任俊亮, 邢清华, 李龙跃, 等. 分布式传感器调度模型与自适应概率粒子群优化算法[J]. 电子学报, 2015, 43(9): 1756 – 1762.
REN Jun-liang, XING Qing-hua, LI Long-yue, et al. A model of distributed sensors' scheduling and self-adaptive probability particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(9): 1756 – 1762. (in Chinese)
- [12] HUANG J, LIN C, CHENG B. Energy efficient speed scaling and task scheduling for distributed computing systems[J]. Chinese Journal of Electronics, 2015, 24(3): 468 – 473.
- [13] SOLDATI P, ZHANG H, JOHANSSON M. Deadline-constrained transmission scheduling and data evacuation in WirelessHART networks[A]. Proceedings of 2009 European Control Conference[C]. Budapest: IEEE, 2009. 4320 – 4325.
- [14] DOBSLAW F, ZHANG T, GIDLUND M. End-to-end reliability-aware scheduling for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(2): 758 – 767.
- [15] NHON T, KIM D. Real-time message scheduling for ISA100.11a networks[J]. Computer Standards & Interfaces, 2015, 37: 73 – 79.
- [16] ZHANG X, LIANG W, YU H, et al. Optimal convergecast scheduling limits for clustered industrial wireless sensor networks[J/OL]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012, [http://dx. doi. org/10. 1155/2012/891321](http://dx.doi.org/10.1155/2012/891321), 2012 – 11 – 27.
- [17] YANG Y, ZHANG X, LUO Q, et al. Dynamic time division multiple access algorithm for industrial wireless hierarchical sensor networks[J]. China Communications, 2013, 10(5): 137 – 145.
- [18] ZHANG X, LIANG W, YU H, et al. Optimal convergecast scheduling for hierarchical wireless industrial systems: performance bounds and two-stage algorithms[J]. IET Communications, 2015, 9(1): 88 – 100.
- [19] TANG Z, CHENG M, ZENG P, et al. Real-time communication in WIA-PA industrial wireless networks[A]. Proceedings of 2010 3rd Computer Science and Information Technology[C]. Chengdu: IEEE, 2010. 600 – 605.
- [20] BUTTAZZO G. Hard Real-time Computing Systems: Predictable Scheduling Algorithms and Applications (Third Edition)[M]. Virginia: Springer, 2011. 79 – 117.

作者简介



王 恒(通信作者) 男, 1981 年 6 月出生, 河北新乐人. 博士、教授、博士生导师. 主要研究方向为工业物联网、协作通信等.
E-mail: wangheng@cqupt.edu.cn



陈鹏飞 男, 1990 年 2 月出生, 湖南邵阳人. 重庆邮电大学自动化学院硕士研究生. 主要研究方向为工业物联网.



王 平 男, 1963 年 2 月出生, 重庆黔江人. 博士、教授、博士生导师. 主要研究方向为网络化控制、工业物联网等.