

基于排队论的工业无线传感网超帧结构研究

许浩然,刘广钟

(上海海事大学 信息工程学院,上海 201306)

摘要:随着无线传感器在工业场景中的大量应用,对于工业无线传感器网络的研究变得更加重要。针对目前工业无线传感器网络中数据传输采用的 IEEE 802.15.4 标准超帧结构在数据包排队方式的不足,为了满足工业应用场景中的实时性要求,更加精确地评估数据延迟与占空比等网络指标,提出一种优化排队方式的超帧结构。首先,利用排队论为 IEEE 802.15.4 标准超帧结构中的竞争访问控制阶段(CAP)与非竞争访问控制阶段(CFP)建立数学模型,更加合理地分析超帧数据延迟;然后,根据排队论的性能分析,提出一种单队列排队超帧结构,相对于原始超帧结构,单队列排队结构能有效降低数据包的传输延迟,提高网络利用率。仿真结果验证了延迟模型的合理性和优化超帧结构的正确性,能满足工业物联网应用中的实时性要求。

关键词:工业无线传感器网络;超帧;排队论;单队列;数据延迟

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2019)01-0006-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2019.01.002

Research on Super-frame Structure of Industrial Wireless Sensor Network Based on Queuing Theory

XU Hao-ran, LIU Guang-zhong

(School of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: With the application of wireless sensor in industrial environment, the research on industrial wireless sensor network becomes more important. Aiming at the deficiency of packet queuing mode of IEEE 802.15.4 standard super-frame structure in data transmission in industrial wireless sensor network at present, in order to meet the real-time requirements in industrial application environment and accurately evaluate network indexes such as data delay and duty cycle, we propose an optimized queuing super-frame structure. Firstly, the queuing theory is used to establish a mathematical model for the contention access period (CAP) and the contention-free period (CFP) in the IEEE 802.15.4 standard super-frame structure and analyze the super-frame data delay more reasonably. Then, according to the performance analysis of queuing theory, a single-queue queuing super-frame structure is proposed. Compared with the original super-frame structure, the single-queue queuing structure can effectively reduce the transmission delay of packet and improve the network utilization rate. The simulation results verify the rationality of the latency model and the correctness of the optimized super-frame structure, which can meet the real-time requirements in the application of industrial IoT.

Key words: industrial WSN; super-frame; queuing theory; single-queue; data latency

0 引言

工业物联网是物联网架构的基础,连接了物理世界中的各种信息和信息处理系统。工业无线传感器层位于最底层,负责数据的采集和实施等,中间是逻辑控制层,负责数据传输,最上层是互联网层,负责将采集到的数据进行语义分析并返回处理结果^[1]。

工业物联网与传统物联网的区别在于,工业物联网需要考虑更多的紧急情况 and 安全性,一些实时闭环控制和开环控制,开环控制包括人工的控制,信息的上传和下载等,闭环控制则是完全的机器控制。所以工业物联网对数据包的实时性和准确性要求很高。不同的工业应用场景的数据采集周期不同也会造成数据包

收稿日期:2018-03-09

修回日期:2018-07-11

网络出版时间:2018-11-15

基金项目:国家自然科学基金(61202370);中国博士后科学基金资助项目(2014M561512);上海市教委科研创新项目(14YZ110);上海海事大学创新基金资助项目(2017ycx064)

作者简介:许浩然(1995-),男,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络、水声通信等;刘广钟,博士,教授,CCF 高级会员(E200006996S),研究方向为水声传感器网络、高性能网络等。

网络出版地址: <http://cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20181114.1558.058.html>

的传输延迟和信道占空比不同^[2]。

文献[3]提出了一种基于 WIA-PA 工业无线传感器网络的自适应调度型 MAC 协议,该协议通过对 WIA-PA 超帧结构进行改进,使设备在接入网络的过程中,网络管理器根据网络中数据吞吐量的实时变化情况,自适应地调整超帧结构中各阶段的长度,合理地分配通信资源。文献[4]研究了排队论模型预测局部路由由节点的最佳休眠时间,从而增强了路由节点的低功耗性能。文献[5]研究了排队论在数据包延迟模型中的应用,将延迟分为三部分,第一部分是从数据包产生到节点本地缓存队列头的延迟,第二部分是队列头到竞争得到时隙时的延迟,第三部分是数据包的传输延迟。文献[6]使用 OPNET 仿真软件建立了带 GTS 机制的分析仿真模型,分析了在不同超帧级数 SO 下,帧传输速率和缓冲容量对 GTS 机制下的网络吞吐量和延时的影响,结果表明对于低传输速率和低缓冲容量的工业无线传感器网络,选取合适的 SO 值(SO=2 或 3),带 GTS 的分配时隙机制更适合用来提升网络利用率和系统实时性响应。文献[7]详细说明了三种工业物联网超帧结构(WirelessHART^[8]、WIA-PA^[9]、ISA100.11a^[10])的区别,并使用排队论为三种超帧结构建立统一数学模型,开发了仿真实验工具。实验证明在不同实验设备下,GTS 时隙数目不同延迟也不同。在没有 GTS 时隙时延迟最低。

针对 IEEE802.15.4e 中的 WIA-PA 超帧,文中详细分析其结构,并利用排队论为超帧中的 CAP 和 CFP 阶段建立模型,使用仿真工具模拟实验,分析数据包延迟原因,以及如何降低数据包延迟。

1 超帧模型

在 IEEE802.15.4e 中,针对工业物联网提出了三种超帧结构:WirelessHART、WIA-PA 和 ISA100.11a。WIA-PA 是最常用且最具代表性的超帧结构,如图 1 所示,其原理类似于时分复用技术(TDMA)^[11]。但不同的是超帧分为两个时间段:活跃期和非活跃期。在非活跃期内,协调器进入低功耗模式(即睡眠模式)。节点仅在活跃期间通信,在活跃期内分为两个阶段:竞争区(contention access period, CAP)、非竞争区(contention-free period, CFP)。在竞争区中,因为时隙数目有限,无法保证所有节点都能分配到一个时隙,所以每个时隙都被所有的设备共享,设备都需要通过竞争的方式来获取该时隙的使用权限,但是该时隙并不保证数据发送的成功与否;如果失败,则使用载波监听多点接入与冲突避免(CSMA/CA)机制重传数据。在非竞争区中,划分若干个确保时隙(GTS),每个设备需要申请使用确保时隙(GTS),可以是一个或多个时

隙,具体数目在申请使用时确定。非竞争区通常被用来发送比较紧急的数据,满足数据包的延迟要求。

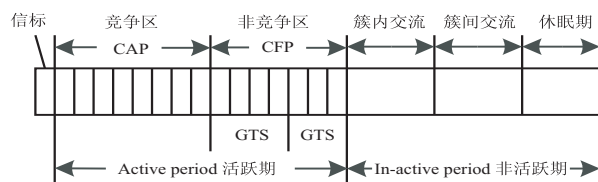


图1 WIA-PA 超帧结构

超帧中规定非竞争时段必须跟在竞争时段后面^[12]。竞争时段的功能包括网络设备可以自由收发数据,域内设备向协调器申请 GTS 时段,新设备加入当前 PAN 网络等。非竞争阶段由协调者指定的设备发送或者接收数据包。如果某个设备在非竞争阶段一直处在接收状态,那么拥有 GTS 使用权的设备就可以在 GTS 阶段直接向该设备发送消息^[13]。

CAP 和 CFP 合在一起称为活跃期,该活跃期被平分为 16 个时隙,信标帧总是开始于第一个时隙的开头,CFP 中有最多 7 个 GTS。超帧结构由协调器定义并且在网络层中使用请求原语进行配置,两个连续信标间的持续时间(BI),由数值 macBeaconOrder(BO)属性和 aBaseSuperframeDuration 常量决定。

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO} \quad (1)$$

在一个信标使能的网络中,BO 可以是 0~14 中的任何值,如果 BO 的值被设置为 15,网络将被认为是非信标使能,并且不使用任何超帧。

超帧活跃时间段的时间叫做超帧持续时间(SD),由式 2 计算得出。

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO} \quad (2)$$

其中,SO 是 macSuperframeOrder 属性的值。超帧持续时间 SD 不能超出信标间隔 BI,因此,SO 的值总是小于或等于 BO。上述常量数值由 IEEE 802.15.4 standard document 提供。

在工业无线传感器网络中,底层传感器节点感知信息产生数据包,通过向协调器发送请求竞争使用超帧的 CAP 或者 CFP 来发送数据,申请成功则立刻发送数据,如果没有申请成功,则放在节点本地的缓存中排队,等待下一轮申请,所有节点都遵循该规则。

超帧的结构与普通的排队不同,每个超帧的周期都会有不同数目的时隙用来发送数据,相当于在排队论中的服务台,但又不是同时运作,在超帧的结束有一段睡眠期,这段时期可以看作是服务台的轮转调度期。文中采用数学工具排队论来为超帧建模,评估超帧系统性能,降低数据传输延迟,提高信道利用率。

2 排队论模型

根据实际情况,假设共有 m 个传感器节点,并且

每个节点数据包的产生服从参数为 λ 的泊松分布。根据相关研究背景,假设数据包的平均服务时间服从参数为 μ 的负指数分布(服务时间=等待时间+发送时间)^[14],传感器节点本地缓存有限,即队列长度有限,数据包采用先来先服务的原则(FCFS),有 c 个时隙用来发送数据($0 \leq c \leq 16$),即有 c 个服务台,这种模型记为 $M/M/c/N/\infty/FCFS$ 排队模型。

m 个传感器节点所产生的数据都需要竞争来使用 CAP 或者等待协调器安排使用 CFP 中的 GTS 来发送。如果申请使用 CAP 成功,则进入数据包发送阶段,延迟由数据包传输速度决定,如果没有申请成功,则需要在本地图存中等待下一轮竞争,直到数据包得到时隙,或者时效时间过期丢弃该数据包,将数据包从本地缓存清除^[15]。另外一些符号在表 1 中详细给出相应含义。

表 1 符号含义

符号	意义
L_s	系统中的数据包数量
q	所有在队列中的数据包总和
W_s	数据包在系统中的停留时间
W_q	数据包在队列中的等待时间
n	系统中有 n 个数据包的概率
ρ_s	系统服务强度
c	时隙数目
\bar{c}	系统中平均正在发送的数据包数
m	节点数目
λ	每个数据包平均产生率
μ	每个数据包平均发送率

传感器节点、协调器、缓存、数据包等综合称为一个系统,整个系统能平稳运行是要满足一定条件的,即系统不能产生无限长的等待队列。

因为假设 CAP 数据包的产生服从泊松分布,而 CFP 的数据包所占比例是比较少的,并且 CFP 的数据包传输不需要排队,所以 CFP 中的数据包延迟仅包含数据包在超帧中的传输时间。在 CAP 阶段还存在数据包发送不成功的情况,延迟模型采用 CSMA/CD 技术来保证发送失败数据的重发。

在延迟分析时加入 CFP 段的数据传输部分延迟,更加全面合理地模拟超帧延迟。系统中的总数据包数量记为 L_s ,所有在节点本地缓存排队的数据包数量和记为 L_q ,那么就有 $L_s = L_q +$ 超帧中的数据包,这里超帧中的数据包包含 CAP 和 GTS 的数据包。

数据包从产生到发送完成的总时间记为 W_s ,数据包从产生到获得时隙延迟时间记为 W_q ,那么就有 $W_s = W_q +$ 数据包在超帧中的时间,数据包在超帧中的时间即是数据包发送延迟, W_s 称为等待延迟。

关于 ρ_s 的说明:记 $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$,系统服务强度 $\rho_s = \frac{m\lambda}{c\mu} = \frac{m}{c}\rho$ ($\rho_s < 1$),表示系统中数据包的产生率与发送率的比值, $\rho_s < 1$ 时表示系统数据包平均到达率小于数据包的平均发送率,这时系统才不会产生无限长的队列, $\rho_s = 1 - \rho_0$ 表示系统中至少有一个数据包的概率,也就是超帧处于工作状态的概率,反映系统的繁忙程度,故称为系统服务强度。

p_n 表示系统中有 n 个数据包的概率,需要满足:

$$\sum_{n=0}^{\infty} p_n = 1 \tag{3}$$

采用时齐的马氏链来分析状态转移过程,若满足 $P\{X_{n+m} = j | X_n = i\} = P_{ij}(m)$,则称 $\{X(n), n = 0, 1, 2, \dots\}$ 为时齐马氏链, $P_{ij}(m)$ 是系统 i 经过 m 个时间间隔(或 m 步)转移到状态 j 的转移概率。文中假设超帧系统 p 服从齐次马氏链过程,以下过程均基于此假设。

整个系统的状态转移图如图 2 所示,根据此图可得该状态转移方程为:

$$\begin{cases} \mu p_1 = m\lambda p_0 & n = 0 \\ (n+1)\mu p_{n+1} + m\lambda p_{n-1} = (m\lambda + n\mu)p_n & 1 \leq n \leq c \\ c\mu p_{n+1} + m\lambda p_{n-1} = (m\lambda + c\mu)p_n & n > c \end{cases} \tag{4}$$

此状态转移方程表示系统中的数据包产生和发送平衡。 $n = 0$ 表示初始状态的平衡方程, $1 \leq n \leq c$ 表示系统中的数据包还没有到达时隙的上限,数据包的发送率根据 n 的变化而变化, $n > c$ 表示系统中请求使用时隙的数据包已经超过时隙本身的限制,新产生的数据包很大部分可能需要排队来等待竞争使用时隙,所以这时的节点发送率均为 $c\mu$ 。而数据包的产生率则一直为 $m\lambda$ 。

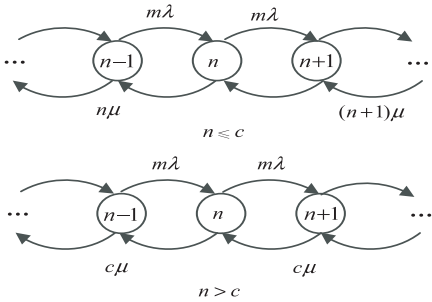


图 2 状态转移图

使用递推法解此差分方程得:

$$\begin{cases} p_0 = \left[\sum_{k=0}^{c-1} \frac{m^k \rho^k}{k!} + \frac{1}{c!} \frac{(m\rho)^c}{1-\rho} \right]^{-1} \\ p_n = \begin{cases} \frac{(m\rho)^n}{n!} p_0, n \leq c \\ \frac{(m\rho)^n}{c! c^{n-c}} p_0, n > c \end{cases} \end{cases} \tag{5}$$

其中, p_0 表示系统中没有任何数据的概率; p_n 表示系统中有 n 个数据包的概率。

当系统中的数据包数目大于时隙数目 c , 则新产生的数据包必须等待, 节点产生的数据包必须等待的概率为:

$$p(n \geq c) = \sum_{n=c}^{\infty} p_n = \frac{(m\rho)^c}{c! (1 - \rho_s)} p_0 \quad (6)$$

系统中平均正在发送的数据包数等于正在使用中的超帧时隙数 (\bar{c}):

$$\bar{c} = \sum_{n=0}^{c-1} np_n + c \sum_{n=c}^{\infty} p_n \quad (7)$$

系统中的平均队长为:

$$\begin{cases} L_s = L_q + \frac{m\lambda}{c\mu} = L_q + \rho_s \\ L_q = \sum_{n=c+1}^{\infty} (n - c)p_n = \frac{\rho^c}{c! (1 - \rho_s)^2} p_0 \end{cases} \quad (8)$$

可以证明, W_s 是服从 $c\mu - m\lambda$ 的负指数分布, 并根据排队论中的 Little 公式, 数据包在系统中的停留时间和在队列中的等待时间分别是:

$$\begin{cases} W_q = W_s - \frac{1}{c\mu} \\ W_s = \frac{1}{c\mu - m\lambda} \end{cases} \quad (9)$$

上述指标是根据排队论来建立的超帧系统模型, 在实验分析过程中会对比理论延迟和实际延迟之间的差别。文中把数据包产生到本地缓存队列头的延迟和到达队列头再到竞争得到时隙时的延迟合起来称为等待延迟, 并加入了数据包在超帧中的发送延迟, 因为数据包在超帧中的延迟并不是忽略不计的, 如果数据包发送失败, 数据包则会重新排队产生较大延迟。文中详细给出了数据包必须等待的概率、队长、正在发送的数据包数目等重要指标。

3 单队列超帧结构

上述模型是基于每个节点都有自己的缓存队列, 文中根据此模型提出一种优化的单队列超帧传输方式, 每个节点产生的数据包发送到协调器上的缓存来排一个队列, 节点自身只有数据包的备份, 如果规定时间内没收到确认到达回复, 源节点重新发送该数据包; 收到确认数据包, 则发送成功。理论上该方法只会增加协调器的工作能耗, 但是会提高整体网络的利用率, 降低数据包的延迟, 因为竞争使用超帧的队列只存在于协调器上, 单队列的运行原理如图 3 所示, 利用排队论来分析两种模型的差别。

与上一节中的多队列模型相比, 单队列结构更加简单高效, 可引用排队论中的 $M/M/1$ 模型分析计算系统的延迟。由 p_0 和 p_n 分别为:

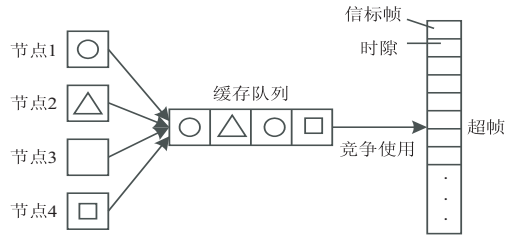


图3 单队列模型

$$\begin{cases} p_0 = \left[\sum_{k=0}^m \frac{m!}{(m-k)!} \rho^k \right]^{-1} \\ p_n = \frac{m!}{(m-n)!} \rho^n p_0 \end{cases} \quad (10)$$

数据包的逗留时间为:

$$W_s = \frac{m}{\mu(1 - \rho_0)} - \frac{1}{\lambda} \quad (11)$$

队列中的等待时间为:

$$W_q = W_s - \frac{1}{\mu} \quad (12)$$

对比多排队模型, 单排队模型减少了队列数目, 提高了数据发送率, 在节点数目较多时降低了数据传输延迟, 并且减少了节点的成本, 把每个节点的自身缓存降到最低, 使得节点能更加高效地将有限的处理能力用到数据采集和处理上面。再者有的节点处于复杂环境中, 或者本身采集的数据周期长, 导致自身缓存大量浪费, 此时这种优化模型就可以提高缓存的利用率。

4 实验与分析

文中利用 MATLAB R2014a 工具来模拟实验, 首先对比理论计算得到的延迟和实际测出的延迟差别, 统一假设 $\lambda = 5$, 数据包处理速率 $\mu = 5$, CAP 为 12 个, 2 个 GTS, 每个 GTS 占用 2 个时隙, GTS 段的延迟时间忽略不计, 因为仅有少量的传播延迟没有排队延迟^[16], 所以不是实验的评估重点。

为了证实单队列模型确实优于多排队超帧结构, 利用第三节中的延迟模型来对比两种排队模型数据包的延迟。使用 MATLAB 计算实验结果的数据, 根据控制变量法, 首先对比在不同的节点数目下, 相同的数据包产生频率 ($\lambda = 5$, 为了使结果的对比性更加完整, 数据包处理速率取 $\mu = 5$, CAP 为 12 个, 2 个 GTS, 每个 GTS 占用 2 个时隙)。多队列模型每个节点的缓存大小是 3 个时隙, 优化后模型的单队列大小是 $3m$ 个时隙, 这是为了比较两种模型在排队方式不同外, 其余条件都相同下的平均数据包延迟。

通过图 4 可以看出, 在节点数目为 14 以前, 优化前的模型与优化后的模型延迟相差不大, 但是从 16 个节点数目开始, 优化后的模型明显比优化前的模型延迟低, 理论上分析为节点数目较少时, 多队列与单队列

的效果并不明显,相差不大。但是在节点数目增加时,多队列的延迟明显增加,因为每个队列在竞争不到超帧时隙的时候都会形成一个等待队列,当所有的队列都在等待时,协调器需要为每个队列根据需求来分配时隙。但是在单个队列中,协调器会提前根据需要在队列中竞争分配时隙,效率比所有的队列单独申请时隙高,所以在节点数目增加后,多队列的线性模型斜率比优化前多队列的斜率低,所以在节点数目较多的情况下,优化后的单队列模型做到了降低延迟。

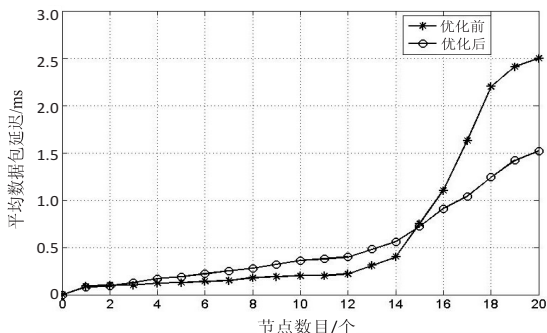


图 4 不同节点数目对比

其次固定其他数据,只改变时隙数目,观察时隙数目 c 从 1 到 16 时的延迟变化,设置 $m=15$, $\lambda=5$, $\mu=5$ 。实验结果如图 5 所示。可以看到,在时隙数目比较少时优化前后的差别不大,因为在只有少数几个时隙的时候,队列的多少并不影响整体的延迟,而在时隙数目增加时,就可以看出优化后的单队列模型延迟低于优化前的多队列模型延迟。

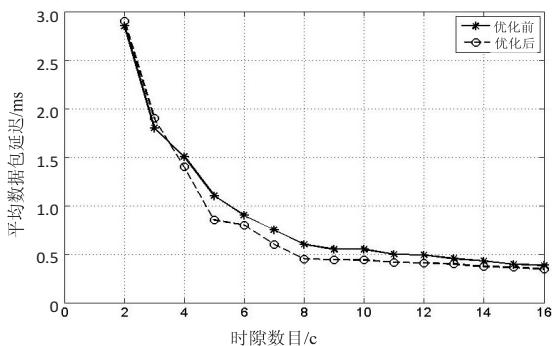


图 5 不同时隙数目对比

在文献[7]中得到的结果是没有 GTS 时隙时,整体网络的延迟是优于 GTS 和 CAP 同时存在时的混合模型,文中实验也验证了这一结果,时隙数目较少时延迟较高。所以 CAP 的时隙数目越多,网络延迟越低。

5 结束语

文中利用排队论为工业无线传感器网络中的超帧结构建立了新的数学模型,根据该数学模型,提出了一种优化的单队列超帧结构,在节点数目较多时降低排队延迟,并通过分别设置节点数目和时隙数目为自变

量进行模拟实验。通过实验结果对比,验证了优化模型的正确性,提升了超帧数据的传输效率,满足了工业无线传感器网络的实时性要求。

参考文献:

- [1] 万跃辉. 基于无线传感器网络的 MAC 层协议研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2013.
- [2] 谢跃. 工业无线传感器网络高可靠与实时通信方法的研究与实现[D]. 北京:北京工业大学,2016.
- [3] 王平,李华松,王恒,等. 基于 WIA-PA 工业无线传感器网络的自适应调度型 MAC 协议[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版,2013,25(2):143-147.
- [4] 王志繁,叶庆卫,周宇,等. 基于排队论的低功耗无线传感技术及其应用[J]. 计算机工程,2016,42(8):39-45.
- [5] 闵明慧,杨志家,李中胜,等. 工业物联网应用中多时隙帧调度算法研究[J]. 计算机工程,2016,42(11):15-21.
- [6] 李清博. 基于 IEEE802.15.4 的工业无线网络结构设计与实时性分析[D]. 天津:河北工业大学,2011.
- [7] YAN Hairong, ZHANG Yan, PANG Zhibo, et al. Superframe planning and access latency of slotted MAC for industrial WSN in IoT environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1242-1251.
- [8] CHEN Deji, NIXON M, MOK A. WirelessHART: real-time mesh network for industrial automation[M]. [s. l.]: Springer Publishing Company, Incorporated, 2010.
- [9] TANG Zhong, CHENG Mengjin, ZENG Peng, et al. Real-time communication in WIA-PA industrial wireless networks[C]//IEEE international conference on computer science and information technology. Chengdu, China: IEEE, 2010: 600-605.
- [10] PHAM T L, KIM D S. Routing protocol over lossy links for ISA100.11a industrial wireless networks[J]. Wireless Networks, 2014, 20(8): 2359-2370.
- [11] 向碧群,李艳体,王小平,等. 基于 IEEE 802.15.4 的无线传感器网络性能分析[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(12): 4684-4687.
- [12] 万静. 信标模式下 802.15.4MAC 协议研究[D]. 成都:电子科技大学,2012.
- [13] 王欣. 信标模式下 IEEE 802.15.4 星型网络性能评估[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
- [14] 刘建明,王瑞,张良,等. Markov 调制服务时间的单服务台排队近似分析[J]. 计算机仿真, 2010, 27(1): 119-123.
- [15] JURCĂ K P, KOUB A, ALVES M, et al. A simulation model for the IEEE 802.15.4 protocol: delay/throughput evaluation of the GTS mechanism[C]//International symposium on modeling, analysis, and simulation of computer and telecommunication systems. Istanbul, Turkey: IEEE, 2007: 109-116.
- [16] 李翠. 基于网络演算与 GTS 机制的 WSNs 性能分析[D]. 西安:长安大学,2013.