

工业以太网实时通信过程建模与仿真

王忠锋, 于海斌, 王 宏, 徐绝冬
(中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016)

摘要: 简要介绍了一种工业以太网实时通信原理, 为验证其正确性, 在 OPNET 仿真平台下建立了其通信过程的进程模型、节点模型和网络模型。在 OPNET 仿真平台下进行了仿真实验, 仿真结果表明了该工业以太网实时通信原理的正确性; 分析了不同网络规模、不同网络负载对网络利用率的影响。

关键词: 现场总线; 工业以太网; 实时通信

Modeling and simulation of real-time communication process of industrial ethernet

Wang Zhongfeng, Yu Haibin, Wang Hong, Xu Aidong
(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: A kind of industrial Ethernet real-time communication mechanism is introduced in this paper. For verifying its validity, its communication process is modeled under OPNET simulation platform, including the process model, the node model and the network model. The simulations confirm the validity of this industrial Ethernet communication mechanism. The effect on network utilization is analyzed under different network scale and network load.

Key words: fieldbus; industrial ethernet; real-time communication

1 引 言

长期以来, 由于现场总线争论不休, 互通与互操作问题很难解决^[1]。随着信息技术的发展, 以太网+TCP/UDP/IP 技术已广泛应用于商业、办公、家庭等领域, 其技术成熟度和造价方面的优势, 使得其具有了应用于自动控制领域的可能。将以太网+TCP/UDP/IP 技术与现场总线技术相结合, 并对其进行改进, 由此产生了工业以太网。

工业以太网的最初目的是用以太网连接现场控制网络和管理层的信息网络^[2]。根据 IEC SC65C 的定义, 工业以太网是用于工业自动化环境, 符合 IEEE802.3 规范, 按照 IEEE802.1D 介质访问控制网桥规范和 IEEE802.1Q 局域网虚拟网桥规范, 对其没有进行任何实时扩展的以太网^[3]。对于非实时数据的传输, 以太网所采用的载波监听/冲突检测 (Carrier

Sense Multiple Access With Collision Detection, CSMA/CD) 介质访问控制 (Media Access Control, MAC) 协议是适用的。但对于实时数据的传输, 工业以太网需解决实时通信问题, 才能满足工业控制系统的实时性要求^[4]。

本文介绍了一种工业以太网实时通信原理, 并在 OPNET 仿真平台下对其通信过程进行建模与仿真。

2 工业以太网实时通信原理

基于竞争的以太网通信协议 CSMA/CD 在本质上是非实时的, 具有通信不确定性, 成为将以太网用于工业自动化控制网络的主要障碍^[5]。因此需要在以太网的数据链路层之上对数据的传输进行控制, 以使以太网技术能够满足工业控制系统实时性需求。

2.1 实时通信模型

在基于工业以太网的控制系统中, 不同现场设备

之间的任务通过网络传递信息达成交互。为满足实时任务对时间的要求,信息的传递必须在一定的通信时延内完成。因此,任务的实时性要求可以映射为任务间实时数据交互的通信时延是否满足系统的实时性需求。而实时任务即用户层的功能块应用进程,属于周期性任务。为满足控制系统的实时性要求,针对工业控制系统的特点,在工业以太网通信模型的应用层和数据链路层之间建立实时通道,直接对来自应用层的实时数据进行封装。在数据链路层和网络层之间增加实时通信实体,对设备发送的信息进行调度,从而避免不同设备在网络上发送信息时所导致的冲突,解决以太网所固有的通信不确定性问题。工业以太网实时通信模型如图1所示。

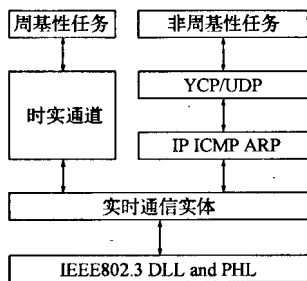


图1 实时通信模型

由周期性任务所产生的周期性信息,直接通过实时通道按照以太网的数据格式进行封装后,经由实时通信实体按照配置的周期性通信时间调度表发送到网络上,因此减少了TCP/UDP/IP通信栈的处理时间。

而非周期性任务所产生的非周期信息,由传输层和网络层处理后,经由实时通信实体按照动态生成的非周期通信调度表发送到网络上。实时通信实体的通信机制能够确保在同一时刻,只有一个现场设备向网络上发送数据。

2.2 实时通信机制

针对工业控制系统中周期性任务所产生的实时数据具有固定时间间隔的特点,实时通信实体按照设定的周期性通信时间调度表发送周期性信息,同时动态生成非周期通信调度表,对网络所有节点非周期信息的发送进行调度,从而避免通信冲突。该实时通信机制所涉及的通信过程详见文献[6]。

3 工业以太网实时通信过程的仿真建模

本文基于OPNET仿真平台对工业以太网实时通信过程进行建模,在此基础上通过仿真实验对其进行验证和性能分析。

3.1 实时通信过程进程模型

OPNET中的Modeler提供了三层建模机制:最底层为进程(Process)模型,采用基于事件触发的有限状态机对协议中的不同部分进行精确描述;中间层为节点(Node)模型,节点模型中包括多个模块,分别对应一个进程模型,以从总体上反映设备特性;最上层为由多个节点模型构成的网络模型^[7]。采用OPNET仿真平台建立的实时通信过程进程模型如图2所示。

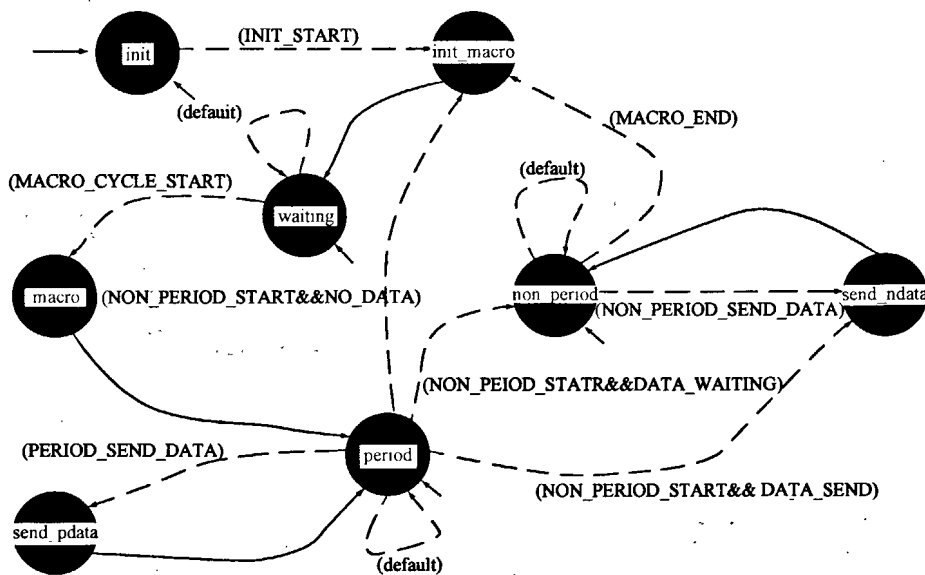


图2 实时通信过程进程模型

在图2中,斜箭头所指的状态表示非强制(Unforced)状态,其它状态表示强制状态(Forced)。其中

非强制状态表示转移到该状态后,执行完入口代码后将控制权转回仿真核心,等待处理下一个事件;强制状态表示转移到该状态后,执行完入口代码和出口代码立即无条件转移到其它状态。

3.2 基于 OPNET 的单节点模型

工业以太网的单节点模型如图 3 所示,分为 6 个模块:周期性信息生成模块(gen_period),非周期信息生成模块(gen_distribution)、实时通信模块(real_comm_entity)、以太网 MAC 模块(ethernetmac)、总线接收器模块(bus_receiver)、总线发送器模块(bus_transmit)和延迟模块(defer)。各模块之间通过数据流线或统计线相连,箭头表示数据流向。

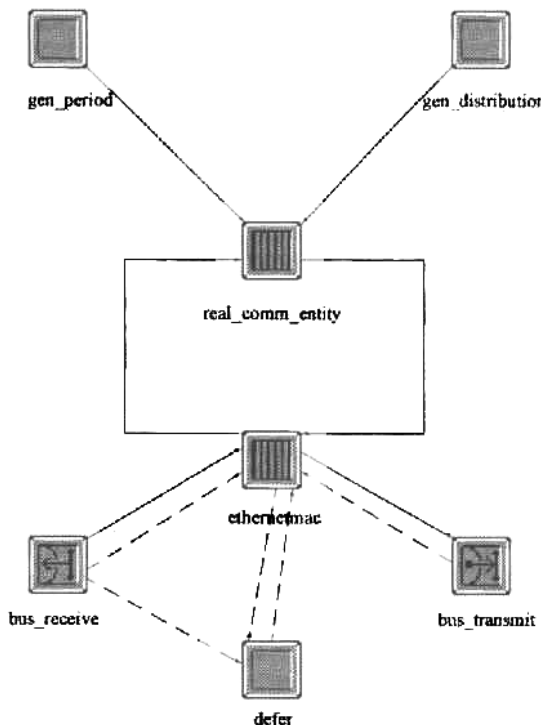


图 3 单节点模型

周期性信息生成模块按照一定的周期产生周期性信息,通过数据流线将产生的周期性信息传递给实时通信模块;非周期信息生成模块在一定的区间内随机生成非周期性信息,通过数据流线传递给实时通信模块;实时通信模块按实时通信机制,调度周期性信息和非周期信息的发送,通过数据流线传递给以太网 MAC 模块;以太网 MAC 模块按照标准的 CSMA/CD 机制,通过总线发送器模块向网络发送来自实时通信模块的信息;总线接收器模块将从网络上接收的信息通过以太网 MAC 模块传递给实时通信模块进行处理,同时对网络上是否发生冲突进行检测,通过统计

线将冲突信息传递给以太网 MAC 模块;另外,总线接收器将自身的忙状态传递给延迟模块;总线发送器负责信息的发送,同时将自身的忙状态通过统计线传递给以太网 MAC 模块;从以太网 MAC 模块流向延迟模块的统计线,表示一旦有信息帧等待发送,则将等待信息传递给延迟模块;延迟模块对网络是否空闲进行检测,一旦发现网络空闲,则通过流向以太网 MAC 模块的统计线通知其可发送信息,否则通知其继续等待。

3.3 基于 OPNET 的网络模型

将单节点模型通过总线连接起来,组成工业以太网网段的网络模型。为便于进行分析和比较,分别建立了具有 10 个节点规模和 20 个节点规模的单网段模型。限于篇幅,本文只给出了 10 个节点规模的网络模型,如图 4 所示。

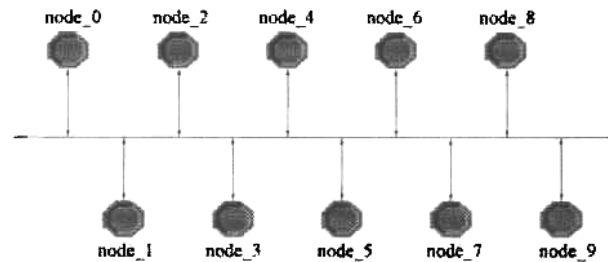


图 4 10 节点规模的网络模型

根据控制系统中周期性信息一般比较短的特点,将周期性信息、非周期信息声明以及非周期信息结束声明的长度设定为以太网最小帧长度,即 64 个字节。非周期信息的长度设定为 256 个字节。网络通信速率设定为 10 Mbit/s,网络拓扑为总线型结构。

4 仿真结果

性能指标是对系统进行性能分析与评价的基础。在仿真中引入了性能指标的统计量,如通信冲突率、网络利用率以及周期性信息通信时延等。

表 1 分别为 10 个节点(非周期信息数量的随机分布区间为 20)、20 个节点(非周期信息数量的随机分布区间为分别为 30 和 40)情况下的仿真结果。

从表 1 中的仿真结果可以看出,周期性信息的平均时延与网络规模、网络负载的大小无关。通信冲突率和信息重传次数均为 0,表明在仿真过程中,网络中没有出现冲突现象,从而验证了本文所提出的实时通信机制能够有效避免以太网的通信冲突,证明了该通信机制的有效性和正确性。

表1 仿真结果

性能指标	仿真结果 node=10, pk=20	仿真结果 node=20, pk=30	仿真结果 node=20, pk=40
通信冲突率	0	0	0
信息重传次数	0	0	0
网络利用率	14.12%	31.55%	37.90%
周期性信息通信时延	57.6 μ s	57.6 μ s	57.6 μ s

5 性能分析

定义 $RealComm_i_node_j_npackets$ 表示 i 个节点、非周期信息数量的随机分布区间为 j 的网络模型。

5.1 通信冲突率

由表1可知,网络规模和网络负载的大小对网络的通信冲突率没有影响。其原因在于本文所提出的实时通信机制在周期窗口内,采用分配时间的方式避免了通信冲突;而在非周期窗口内,采用按照动态生成的非周期通信调度表对网络上的所有节点发送的信息进行调度。在某一时刻,只有一个节点拥有通信信道的使有权。所有节点根据地址的大小和所要发送非周期信息的优先级进行排队,从而避免了通信冲突。

5.2 周期性信息通信时延

通过表1可知,在不同的网络规模和网络负载条件下,各节点所统计出的周期性信息通信时延是固定的,均为 57.6 μ s。

在仿真中,周期性信息的信息帧长度 $Ppacket$ 固定为 64 个字节,在网络通信速率为 10 Mbit/s 的情况下,每个周期性信息的通信时延为:

$$d_p = \frac{len(Ppacket)}{rate} + \tau^{p_realque} + \tau^{macque}$$

式中: d_p 表示周期性信息通信时延; $len(Ppacket)$ 表示周期性信息的长度; $rate$ 表示以太网通信速率; $\tau^{p_realque}$ 表示周期性信息在实时通信实体队列中的等待时间; τ^{macque} 表示周期性信息在 MAC 层队列中的等待时间。

周期性信息生成模块按照周期性通信时间调度表中设定的时间生成周期性信息,因此 $\tau^{p_realque}$ 等于 0。由于不存在通信冲突, τ^{macque} 等于 0。因此,周期性信息通信时延理论值为 51.2 μ s。统计得出的时延相对于理论值多了 6.4 μ s,其原因在于以太网上的每个信息帧前面都增加了 64 位前导码,因此增加了 6.4 μ s 的发送时间。

5.3 网络利用率

不同网络规模和网络负载下的网络利用率如图5所示。

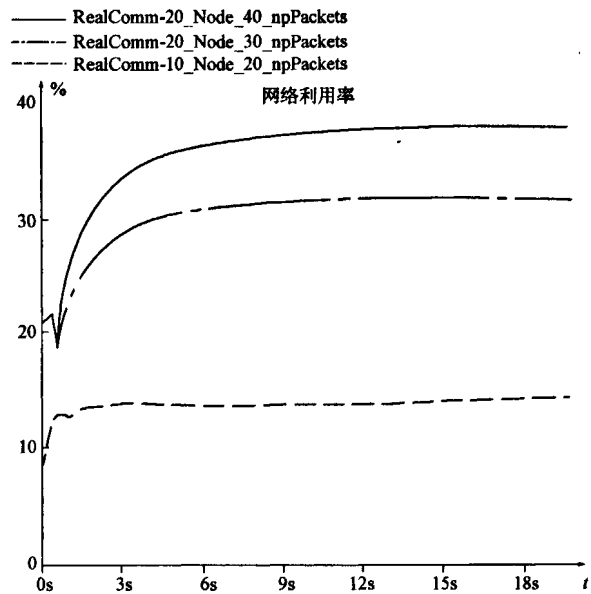


图5 网络利用率

可见,网络利用率随着网络规模和网络负载的增加而增加,并且会趋于饱和。但考虑到连续周期性信息之间存在一定的时间间隔,比如在本仿真过程中因考虑实际系统中时钟同步误差而设置的最小 200 μ s 的时间间隔,以及 MAC 通信机制中定义的帧间隙时间,因此网络利用率不会达到 100%。随着网络节点和非周期信息的增加,网络负载随之增加,从而使得网络利用率增加。

6 结 论

为验证实时通信机制的有效性和正确性,在 OP-NET 仿真平台下,为其通信过程建立了有限状态机模型,并在模型的基础上进行了仿真实验。通过仿真结果,如通信冲突率、周期性信息通信时延,证明了实时通信机制的正确性。通过对比不同网络规模和网络负载条件的仿真结果,分析了网络负载对网络利用率的影响。

本文的工作为验证工业以太网实时通信机制的正确性和有效性提供了理论基础,为基于我国自主知识产权工业以太网标准的控制系统的推广应用提供了理论依据。

参考文献

- [1] 缪学勤. 论六种实时以太网的通信协议[OL]. <http://www.supcon.com>
- [2] MAX F, THILO S. Standardization of industrial ethernet-the next battlefield[C]. Proceedings IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, 2004; 413-420
- [3] IEC/SC65c/306/NP. Profiles for ISO/IEC 802.3 based communication network in real time application [Z]. 2003.
- [4] 冯冬芹, 金建祥, 褚健. Ethernet与工业控制网络[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(1): 23-26
- [5] LOBELLO L, LOREFICE M, MIRABELLA O, et al. Performances analysis of Ethernet networks in the process control [J]. Proceedings IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2000, 2: 655-660.
- [6] 王忠锋, 于海斌, 王宏, 等. 工业以太网确定性通信实现方案. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 491-492
- [7] 陈敏. OPNET网络仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004