

智慧协同工业无线传感器网络

杨 冬, 马 剑, 张宏科

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

摘 要: 本文研究将智慧协同网络理论用于工业无线传感器网络(Industrial Wireless Sensor Network, IWSN), 提出一种新型智慧协同工业无线传感器网络构架 Smart-IWSN. Smart-IWSN 能够为多样化的工业服务适配必须的网络资源, 满足工业服务对网络性能的苛刻需求, 为工业无线传感器网络的研发和应用节省大量的时间和成本. Smart-IWSN 已成功应用到大规模焊机群监控系统, 解决了恶劣工业射频环境下大量焊机多任务并行通信的技术难题.

关键词: 智慧协同网络; 工业无线传感器网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2017)06-1537-08

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.06.037

Smart and Cooperative Industrial Wireless Sensor Network

YANG Dong, MA Jian, ZHANG Hong-ke

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper introduces our practical application of the smart and cooperative network paradigm to industrial wireless sensor network (IWSN). An architecture Smart-IWSN is proposed for researchers and developers. Smart-IWSN platform provides more controllable network resources for complicated industrial applications, which could satisfy network performance requirements for industrial applications and reduce the time and cost for research and application of IWSN. Smart-IWSN has been applied to welder machine monitoring and control application, which can solve the problem of multi-task parallel communication in harsh industrial environment.

Key words: smart and cooperative network; industrial wireless sensor network

1 引言

工业无线传感器网络^[1]是应用于恶劣工业射频环境下的新型无线传感器网络技术. 相比于传统的工业总线网络, 工业无线传感器网络具有更强的灵活性, 包括自组织、快速布网和智能处理, 同时极大降低了布线成本. 目前, 包括艾默生、霍尼韦尔、通用电气、ABB 以及西门子等工业自动化巨头都参与到该领域的研究当中. 工业无线传感器网络标准有 WirelessHART、ISA100.11a、WIA-PA 以及 IEEE 802.15.4e. 同时, 国际互联网工程任务组 IETF 于 2014 年成立了一个新的工作组 6TiSCH, 研究基于 IEEE 802.15.4e 的大规模工业无线传感器网络应用.

随着工业 4.0^[7]、工业互联网^[8]等重大战略的推进, 工业无线传感器网络市场空间巨大. 然而, 由于工业现场射频环境的恶劣以及工业服务对网络性能的苛刻

需求, 工业无线传感器网络在可靠性、实时性、服务质量以及生存时间等方面还面临挑战^[2-6]. 除以上传统挑战以外, 本文作者在工业无线传感器网络的研究和应用过程中发现, 随着大规模应用的开展, 工业无线传感器网络在网络架构、网络管理和网络操作等方面将面临更大挑战, 其中包括: 1) 由于无线传感网络在不同的工业应用中具有不同的网络规模、网络拓扑、可用信道以及是否支持设备移动等需要, 因此网络具有多样性; 2) 工业服务多种多样, 包括联锁控制、应急警报、应急措施执行、闭环控制、闭环监测、开环监控、环路参数配置、生产环境监测、常规诊断以及事件驱动的维护和追踪. 3) 在工业自动化公司当中, 大多数的工业无线传感器网络用户对于无线网络的知识有限, 同时, 相比于现有的单跳工业总线网络, 多样化的无线网络具有更加复杂的管理和操作需求.

2013 年, 针对未来互联网“高效”、“可靠”和“智

慧”等通信需求,科技部资助了国家 973 项目“智慧协同网络理论基础研究”.该项目提出一个“两域”、“三层”为典型特征的智慧协同网络体系,解决未来互联网体系结构难题^[9-10].作为一个普适的网络架构,智慧协同网络理论已在车载网络等领域取得了重大突破^[11].本文介绍智慧协同网络理论在工业互联网领域的应用.

2 智慧协同工业无线传感器网络

2.1 智慧协同网络原理

互联网原始设计的两个重要理念是:横向结构(网络分层结构的某一层内)紧耦合设计和纵向结构(网络分层结构的各层之间)松耦合设计.横向紧耦合设计将多样的对象隐藏化,纵向松耦合设计将复杂的系统隔离化,两者都极大简化了互联网开发难度,促进了互联网早期的快速发展.然而,随着互联网的发展,“横紧纵松”的设计逐渐成为制约互联网规模和应用领域的主要瓶颈.横向紧耦合使得网络静态僵化,难以实现网络智能化和虚拟化等.纵向松耦合使得上层服务和底层网络缺乏感知和协作,造成网络的用户体验和服务质量差等弊端.

针对以上“横紧纵松”问题,智慧协同网络提出如图 1 所示的“两域:实体域、行为域”、“三层:智慧服务层、资源适配层、网络组件层”的体系及总体架构.“两域”解耦设计使得现有横向结构紧耦合问题得到根本性解决.“实体域”指各种各样的网络对象,是相对静态的,既包括硬件网络资源,也包括软件协议参数,本质上指实际运行的网络.“行为域”指对实体域网络对象的处理逻辑和策略,是相对动态的,便于智能、适配、协同和决策等.通过“实体域、行为域”两域的智慧感知、博弈协同,易于实现“控制与数据分离”和网络的智慧化,有效解决现有网络静态僵化问题,极大提高了网络安全性和资源利用率.“三层”适配模型使得现有纵向结构松耦合问题得到有效解决.“智慧服务层”主要负责服务的标识、描述、智慧查找与动态匹配等;“资源适配层”通过感知服务需求与网络状态,动态地适配网络资源并构建网络族群;“网络组件层”主要负责数据的传输、存储与处理等实际操作,以及网络组件的行为感知与聚类.

2.2 Smart-IWSN 原理

Smart-IWSN 继承了智慧协同网络构架,其核心思想是对通信资源的精细划分和合理适配,从而实现工业服务需求和现场网络设备运行的适配,保障工业通信的确定性(可靠性和实时性);通过分离“控制与数据”绑定,解决了网络静态、僵化的问题,灵活支持工业服务的多样性和定制性,满足规模化柔性生产的工业互联网发展需求.

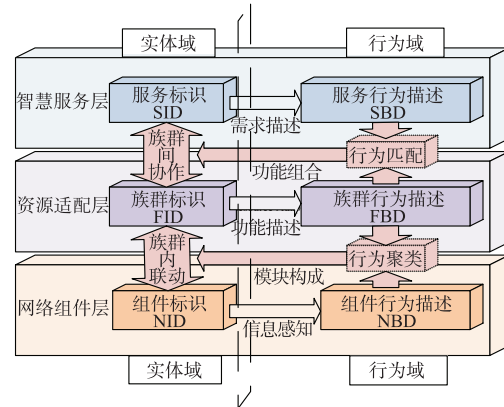


图1 智慧协同网络体系

智慧协同工业无线传感器网络主要功能模块如图 2 所示.智慧服务层负责工业服务的标识和描述,工业数据主要分为周期性采样、突发事件监测和闭环控制三类,根据数据对工业生产的影响进行优先级的划分,服务的优先级将最终体现在数据传输的可靠性和实时性上.网络组件层主要由嵌入无线传感器网络节点功能的工业现场设备组成,负责完成数据传输任务.为了保证通信的可靠性和实时性,将时间、信道、路由等大量网络资源组件化,根据服务层的需要进行组件的分配,实现优化配置.作为整个网络架构的核心,资源适配层负责合理适配网络资源以保证可靠性、实时性、安全性等通信质量,网络资源的统一适配不仅便于资源的优化利用,还减少了能力受限的传感器节点的运算负担和能量消耗.初期的网络运行状况也许都是正常的,但是随着后期网络组件的增加,新的业务需求出现,对网络资源的适配要求也会越来越高,安全的等级也需要相应的策略去保障.

2.3 Smart-IWSN 网络组成

Smart-IWSN 网络组成如图 3 所示,整个网络由工业设备、无线传感器节点、接入网关、控制单元以及用户组成.

无线传感器网络节点一般嵌入在工业设备上,实现工业设备数据和无线数据的转化.无线传感器网络节点具有无线中继功能,组成多跳 Mesh 网络.接入网关通过以太网与控制单元连接,接入网关上的无线接入点 AP 实现无线传感器网络节点数据的汇聚.控制单元分为 Smart-IWSN 控制单元和工业服务控制器. Smart-IWSN 控制单元包括 Smart-IWSN 控制器、Smart-IWSN 管理服务器和 Smart-IWSN 安全服务器. Smart-IWSN 控制器是整个网络的逻辑集中控制实体,它负责将工业服务的需求映射至网络底层组件,并且能够为服务提供实际物理网络组件的抽象. Smart-IWSN 的管理服务器和安全服务器实现搭建网络、配置管理以及实施安

全协议等功能. 工业服务控制器和工业设备都是工厂已有设施. 为了保护工厂现有设施并减少 IWSN 部署的复杂性, Smart-IWSN 设计与当前已有工业服务透明整合的接口. 通过修改 Smart-IWSN 接口配置, 可避免升级已有的硬件和软件. Smart-IWSN 使用网络虚拟化技术使得不同工业服务可以同时使用一套网络组件.

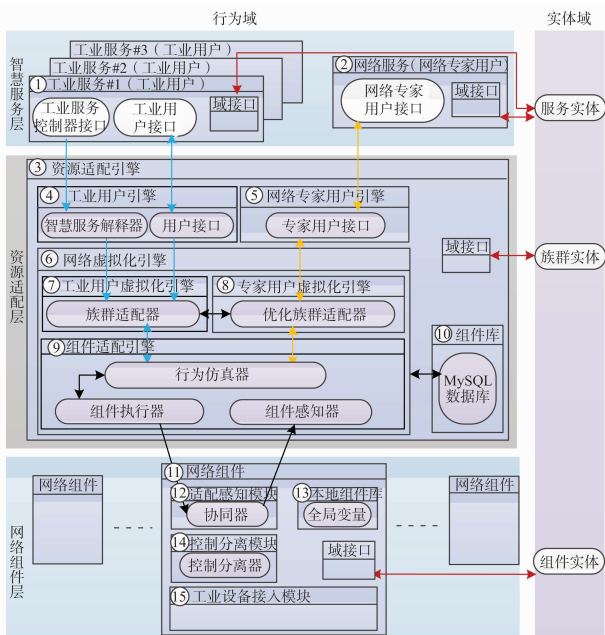


图2 Smart-IWSN 构架及核心功能模块

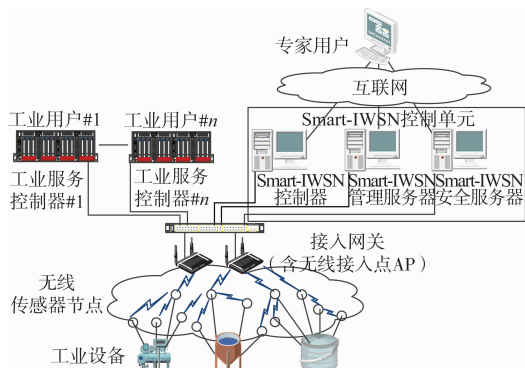


图3 Smart-IWSN 网络组成

2.4 Smart-IWSN 功能模块

图 2 中的三层体系结构与图 3 中的网络组成具有以下对应关系: 智慧服务层涉及工业服务控制器、普通工业用户、Smart-IWSN 网络专家用户; 资源适配层主要功能在 Smart-IWSN 控制器完成; 网络组件层涵盖接入网关和嵌入无线传感器节点的工业设备等. 三层结构的每层都有一些功能模块和其内部子模块. 实体域和行为域内的元素对应, 行为域内的运算和逻辑更加复杂, 是体现智慧协同网络的关键, 本文主要介绍行为域的工作原理.

智慧服务层将服务分为两大类: 工业服务和网络服务. 工业服务就是 Smart-IWSN 所应用的行业服务, 主要操作者是工业用户. 网络服务是针对首次实施的工业服务、超复杂工业服务、网络组件受限等情况下, 为网络专家用户提供的操作接口.

资源适配层根据底层组件和配置管理策略等建立信息模型, 为工业应用提供服务. 在 Smart-IWSN 中, 实现信息模型的功能模块被称为资源适配引擎^③. 其主要工作为接收服务定制的需求; 验证这些需求能否被分配相应的策略和族群; 将需求转换为相应的底层组件. Smart-IWSN 资源适配引擎能够使用同一套物理设备为不同的工业服务提供不同的信息模型. 一个 Smart-IWSN 工业服务至少有两个基本适配引擎: 工业用户引擎^④和网络专家用户引擎^⑤. 工业用户引擎为工业服务控制器和工业用户服务. 工业用户引擎中的智慧服务解释器能够自动的解释来自工业服务控制器的需求, 通过工业用户虚拟化引擎^⑦能够为工业用户提供更多的网络服务和网络配置, 由大量组件组成的族群完成. 所有工业服务控制器和工业用户的需求都会被提交至工业用户虚拟化引擎中的族群适配器, 先尝试按照自动资源适配规则进行资源适配. 如果自动的资源适配规则无法满足服务需求, 那么将会通告专家用户虚拟化引擎^⑧中的优化族群适配器, 网络专家用户^②将会通过网络专家用户引擎^⑤进行适配. 上述两类引擎的设计能够清晰的为不同工业用户提供服务和资源, 降低了普通工业用户对网络专业知识的要求, 同时为复杂问题预留了专家服务接口.

资源适配层的另一项重要设计是在组件适配引擎^⑨引入行为仿真器. 工业服务需求到达组件适配引擎后需要提交到行为仿真器, 验证其适配的族群及策略是否能够满足服务的需求. 对于工业用户来说, 根据仿真验证后的反馈能够决定该服务是否需要提交至专家用户进行优化适配. 另一方面, 对于专家用户来说, 相应的反馈有助于更快的设计和优化适配规则. 最重要的是, 行为仿真器能够有效的避免将不适宜的网络配置直接用于实际工业生产当中带来的危害及损失. 行为仿真器中所有用到的网络资源和状态都是从网络组件层的物理网络实体中抽象出来的. 这些参数都是组件感知器通过周期采样存储到组件库^⑩当中. 最后, 验证后的配置通过组件执行器映射到网络组件层.

网络组件层的适配感知模块^⑫完成适配层和组件层的交互. 网络组件层最重要的创新设计是将系统配置从协议逻辑中分离出来. 协议逻辑是在基本网络组件中运行的 IWSN 协议栈 (例如: 路由协议、MAC 协议等); 而系统配置是针对不同协议栈层需要的具体配置 (例如: 路由协议的度量值、MAC 协议容许的最大重传

次数等).为了能够抽象出更细粒度的网络组件,Smart-IWSN 通过以下两个创新设计实现从协议逻辑中提取出尽可能多的系统配置参数.首先,我们设计了一个专门的控制分离模块^⑭,能够为系统配置参数的存储、提取和变更提供统一接口.基于此,其它系统模块就不需要添加额外更新配置的逻辑.该设计使得系统参数能够简单、快速、低开销的管理和配置.其次,我们尽量将系统配置参数定义为外部变量,保存在本地组件库^⑬中,并且在组件库^⑩中保持变量同步指针.该设计使得系统支持运行时修改系统配置参数,提高了网络灵活性,易于实现控制与数据分离.

由于无线传感器网络节点嵌入到工业设备中,因此,工业设备既作为数据的产生者又具有交换机一样的转发功能.工业设备接入模块^⑮作为无线传感器节点与工业设备的接口,实现以下三项功能:首先它能够实现工业总线与 IWSN 之间的协议转换来保证工业设备和 Smart-IWSN 的透明一体化;其次,它能够实现工业服务知识与网络知识整合,使得网络性能得到更好的优化;最后,可以从工业设备上抽象封装出更多组件.

2.5 行为域和实体域间接口参数

实体域提取尽量多的网络组件实体,进行抽象化后与行为域的功能参数对应.目前,Smart-IWSN 支持的基本网络组件如表 1 所示.

表 1 Smart-IWSN 支持的网络组件

协议栈	网络组件	
	静态; 可读写	动态; 只读
物理层	发送功率, CCA 模式, 发送速率, 黑/白信道名单	电池电量, 处理器利用率, 设备占空比
MAC 层	最大队列长度, 最大重传次数, 最大邻居数, 包最大存活时间, 时隙中的定时器, 友好邻居门限, 重入网门限, 入网代理开关, 邻居表, 超帧表, 链路表, 共享时隙退避指数, 路径失效警告, 设备离线警告	队列利用率, 邻居监控状况, 链路通信统计, 包重传数据统计
网络层	源路由失效警告, 图路由失效警告, 包汇聚开关, 包转发开关, 图路由表, 源路由表	路径利用率, 网络稳定性, 网络拓扑
应用层	设备入网优先级, 包优先级, 设备定时重启开关, 设备重入网开关	节点入网报告

在网络组件层,网络组件实体与行为域的参数一一对应.例如实体域的时隙、信道等,在行为域都有相应的超帧表、信道名单等对应.

在资源适配层,多个网络组件实体通过聚类后与行为域的复杂族群参数对应.例如,路由协议和 MAC 协

议作为能够保证工业服务可靠实时需求的重要功能,在行为域被抽象出来. Smart-IWSN 控制器通过为不同的服务定制不同的图路由,并将相应图路由颁布给相关设备以完成路由功能,同样,不同的时隙调度功能也需要根据不同工业服务和路由方案进行专门定制.

在智慧服务层,网络组件实体通过行为匹配后与行为域的抽象服务参数对应.这些功能参数基本都是工业用户可以理解的行为.例如,实时性、可靠性、运行时间、关闭时间等,这些实例功能需要多个网络组件实体聚类完成.上述设计大大减小了工业用户的操作,使得工业用户并不需要具有大量的 Smart-IWSN 知识.

2.6 工业数据与网络数据分离

工业服务数据需要保障实时性,而网络控制数据强调可靠性.针对资源受限的工业无线传感网,Smart-IWSN 构架可以灵活实现基于时间维度区分工业数据通道和网络控制数据通道分离的方法.

为了保证工业无线数据通信确定性,IWSN 在 MAC 层使用时分多址接入技术 TDMA^[12],将时间轴划分为周期重现的超帧,每个超帧由相应数量的时隙组成.按照类型划分,时隙分为两类:一类是专用时隙,预先为一对通信设备分配非竞争时隙;另一类是共享时隙,允许多个设备同时竞争该时隙的信道资源.超帧的长度与数据的采样速率相关.为了将网络控制与工业数据分离,本文将超帧划分为两部分,分别是管理时隙部分和工业数据时隙部分,同时,本文还通过定义最小超帧和复用因子灵活有效的管理时隙资源的分配.

本文通过图 4 所示的网络场景来介绍该分离的设计,该网络最多支持 90 个无线节点,工业数据采样速率为 0.5Hz.单个时隙的长度为 10ms,每个最小超帧由 100 个时隙组成,周期为 1s.其中,本文划分 0~39 时隙为 Smart-IWSN 管理时隙,而 40~99 时隙为工业数据时隙.由于工业数据采样速率为 0.5Hz,所有节点的采样数据应该在两个最小超帧内提交到接入网关,因此复用因子 RF2 的值为 2.

另一方面,Smart-IWSN 管理时隙分为管理广播时隙、管理共享时隙和管理汇聚时隙,如图 4(b)所示.所有节点和接入网关通过管理广播时隙周期广播用于网络的组网、同步及全局命令的配置,并且周期的将 Smart-IWSN 组件信息通过管理汇聚时隙周期的汇报到组件数据库中.最后,管理共享时隙用于所有管理数据的双向传输,包括上行数据和下行数据的传输.所有的管理共享时隙在网络初始化时首先用于所有节点的入网通道,随着节点的入网,将会给每个节点对称的分配一个管理广播时隙和管理汇聚时隙.综上所述,总共至少需要 180 个管理广播时隙和管理汇聚时隙分配给 90 个节点,因此,对于管理周期来说,其超帧的复用因子

RF1 为 5 如图 4(a) 所示.

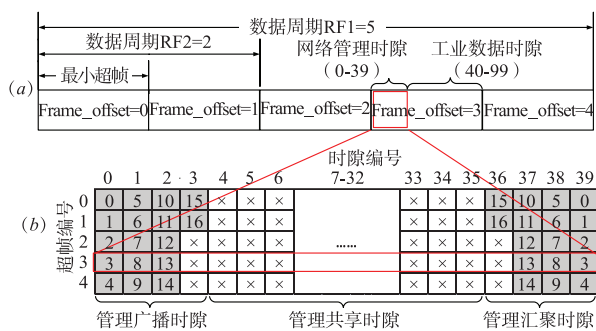


图4 基于时域的网络控制与工业数据分离

3 Smart-IWSN 应用案例

通过与国内顶级的焊机制造企业合作, Smart-IWSN 已成功应用于大规模焊机群无线监控系统^[6,14]. 该企业原有的焊机监控系统由每个焊机设备(welder machine, WM)通过 CAN 总线与焊接生产管理器(welding production manager, WPM)相连接组成. 为了降低布线成本并且提高焊机使用的灵活性, 引入无线通信技术已成为焊机监控系统的迫切需求.

该监控系统需要并发支持监听、请求和配置三种服务. 监听服务是周期发生事件, WPM 每隔 500ms 发送广播请求, 所有收到的 WM 向 WPM 回复焊机的工作状态; 请求服务是突发事件, WPM 向某台 WM 突发请求, 该 WM 向其回复自己的详细工作状态; 配置服务也是突发事件, WPM 向某台 WM 突发配置指令, 该 WM 修改配置后向 WPM 回复. 监听服务对于实时性要求较高, 而请求和配置服务为突发的状态参数请求和配置, 这些服务要求通信必须具备较高的可靠性. 同时加之对于网络中不同的管理数据也具有不同的服务质量需求, 例如管理广播、链路状态汇报以及邻居汇报等. 因此, 上述焊机群监控系统存在多个对网络性能要求各异的并发服务, 给现有的 IWSN 系统的实际部署带来非常大的困难.

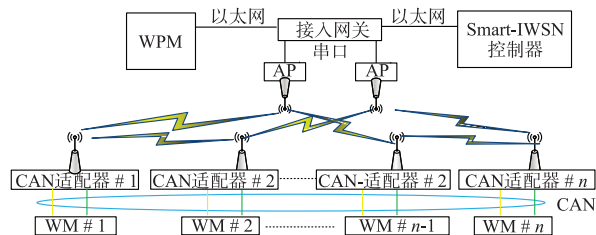


图5 基于Smart-IWSN的焊机群监控系统

由于 Smart-IWSN 可以将多样化的服务与网络组件进行适配, 可有效解决以上焊机群通信问题. 基于 Smart-IWSN 的焊机监控系统如图 5 所示. 其中 CAN 适

配器是集成了 CAN 协议转换的无线传感器节点, AP 为网关上的无线接入点.

系统已经在实际生产中部署, 如图 6(a) 所示. 同时该系统也在世界最大焊接切割展览会(第二十届北京埃森焊接与切割展览会)中展出, 成为唯一支持大量焊机同时无线实时监控的参展焊机企业, 如图 6(b) 和 6(c) 所示.



图6 焊机系统应用

4 Smart-IWSN 优势分析

本节通过 3 组实验来说明 Smart-IWSN 构架对支持多样化工业服务和复杂工业网络环境的优势, 以及快速、灵活部署 IWSN 的先进性.

4.1 网络虚拟化

Smart-IWSN 构架可以使得 IWSN 很好支持网络虚拟化^[17]的功能, 快速实现不同服务需求在同一物理网络上搭建多重虚拟网络. 在工业生产当中工业设备种类繁多, 对于不同类型工业设备的监控具有不同的要求. 然而, 传统工业网络针对不同工业服务需求搭建多个物理网络实体, 造成设备冗余浪费、网络固态僵化等问题. Smart-IWSN 通过同一套网络基本设备搭建多虚拟网络可以有效的解决以上问题.

本文通过 Smart-IWSN 控制器基于相同的网络组件搭建了两套虚拟网络以验证 Smart-IWSN 对网络虚拟化功能的支持. 两套虚拟网络运行于由 30 个无线传感器节点组成的物理网络上. 第一套由 3 个虚拟子网组成, 分别是 A: 10 个节点基于 CSMA 组成的星型网络; B: 10 个节点基于 TDMA 组成的三跳树形网络; C: 10 个节点基于 CSMA 组成的三跳树形网络. 第二套由 2 个虚拟子网组成, 分别是 D: 10 个节点基于 CSMA 组成的三跳网络; E: 20 个节点基于 TDMA 组成的三跳网络. 通过专家用户接口在 Smart-IWSN 控制器修改相应网络组件, 使得同一个节点可以运行两种协议逻辑, 不同协议使用多信道接入以避免相互干扰. 通过行为仿真器验证这两种协议逻辑并不会相互冲突和干扰. 两套系统中的无线传感器节点均允许支持两个协议逻辑, 被部署两类网络的节点将每秒产生两个数据分别使用不同的协议逻辑在 1s 内传输至接入网关, 只被部署一类网络的节点每秒只产生一个数据.

如图 7 和图 8 所示分别为两套虚拟网络的实时性能。可以看出,第一套系统中 A 网络和 C 网络按时到达数据包的时延都低于 B 网络,而 B 网络的稳定性与可靠性相比于 A 网络较高,因此我们可以同时在具有突发数据服务或规模较小的工业设备群上部署 A 类网络或 C 类网络,而具有周期数据服务、对数据可靠性要求较高的工业设备群上部署 B 网络。同样从第二套系统的性能图中可以看出当设备规模较大时,D 网络不适用于支持多跳工业设备网络通信的可靠性,而 E 网络可以保证多跳工业设备群监控系统的时延确定性和可靠性。从所有网络时延可以看出,不同类型的网络共用接入网关和服务器并不会影响网络的性能。基于此,针对大规模工业设备群监控系统,Smart-IWSN 支持灵活的多类型虚拟网络部署,根据不同工业服务的要求部署相应类型的网络以减少网络组件的冗余,使得网络组件的效率最大化。

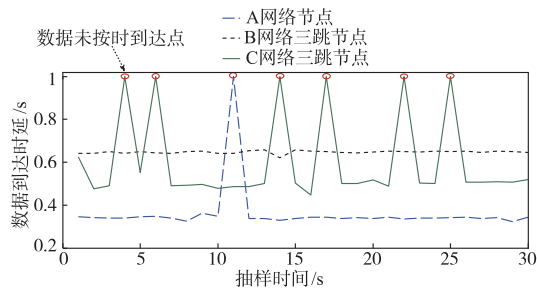


图7 第一套虚拟网络实时性能

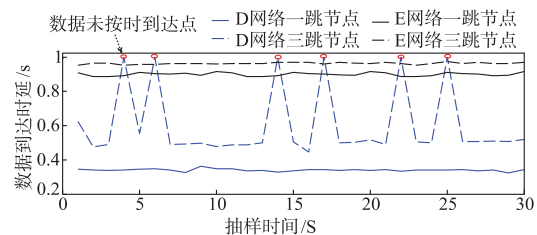


图8 第二套虚拟网络实时性能

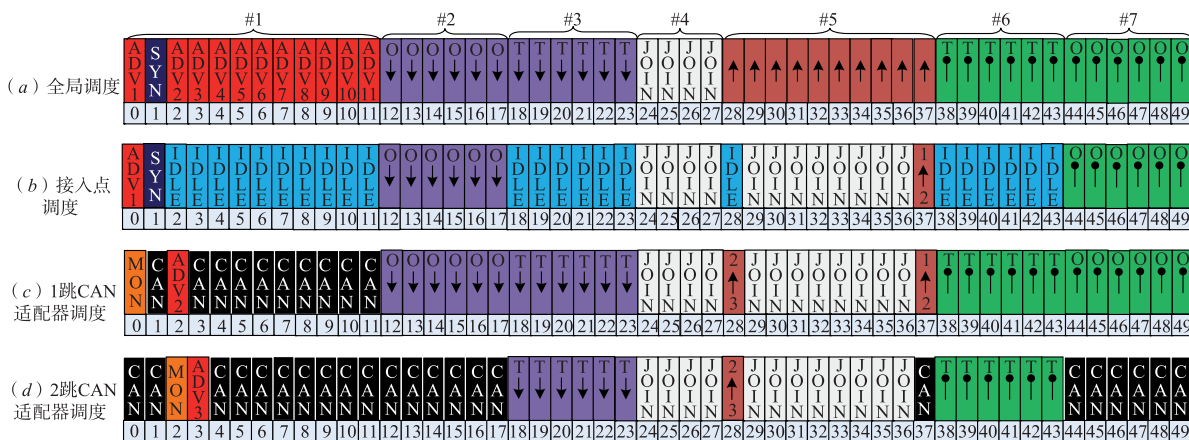


图9 焊机群多任务并发组件适配

4.2 多任务并发组件适配

Smart-IWSN 可灵活将不同任务部署在同一网络中,快速实现多任务并发组件适配。本节通过一个中等规模焊机群为例说明这一特点,包括 10 台嵌入 CAN 适配器的焊机设备,支持两跳无线通信。基于 Smart-IWSN 平台,可快速开展灵活的时隙调度,同时支持焊机与 WPM 之间监听、请求和配置三种服务并发。对于监听服务,每个节点设备以 500ms 的采样速率在有 50 个时隙组成的一个超帧内将采样数据汇集至接入点。整个网络的时隙调度资源如图 9(a)所示,将一个超帧的时隙划分为七部分:#1 为广播时隙,每个加入网络的节点将会分配一个广播时隙。第一个入网的接入点将作为网络中所有节点和接入点的时钟同步源,#1 中的同步时隙则用于接入点之间同步;#2 和#3 时隙块分别用于一跳节点和二跳节点请求和配置任务的下行数据传输;#4 是为所有节点加入网络或离开网络的共享时隙;

#5 为每个节点分配的用于周期监听任务的专用时隙,当未分配某个节点之前,这些时隙同样作为与#4 相同功能的共享时隙以提高节点的入网速度;与#2 和#3 类似,#6 和#7 时隙块分别用于二跳节点和一跳节点请求和配置任务的上行数据传输。图 9(b)给出了当第一个接入点加入网络后接入点的时隙调度,其中 IDLE 时隙用于接入点与网关通信。图 9(c)和 9(d)分别给出了一跳节点和二跳节点的时隙调度,其中 CAN 时隙用于 CAN 适配器通过 CAN 接口与电焊机设备进行通信。

系统通过 WPM 每 500ms 向焊机设备广播请求数据包来实现监听服务。当 CAN 适配器收到来自 WPM 的广播请求,需要对焊机设备进行状态请求,并在当前超帧将状态信息回复至 WPM,同时将该请求命令集成于自己本身的广播中以实现多跳网络的广播请求。接入点通过 USB 虚拟网卡技术与接入网关实现相互的通信,由于使用了 USB 中断功能,接入点可以在任何空闲时间与网关通信。对于请求和配置业务的实现,WPM

通过#2 和#3 时隙资源向选定的焊机设备发送 20 ~ 30 个请求数据包,收到请求的焊机设备将每个请求的数据通过#6 和#7 时隙资源回复给 WPM.

4.3 多种重传策略部署

数据包的重传是保证可靠性最为广泛使用的机制,在现有网络中重传策略往往是固定不变的.然而由于工业服务的多样性和工业网络的不稳定性,灵活可变的重传策略可以有效提高网络性能.如图 10 所示为三种重传机制的时隙调度.第一种方法为 WirelessHART 标准所定义的纯 TDMA 机制[16],所有节点的数据传输都预先分配好专用时隙,剩余资源都将设置成为共享时隙以供所有节点重传时竞争,该机制的优点在于容易配置,但对于共享时隙使用的效率较为低下.第二种方法为 ISA100.11a 标准所支持的 TDMA 与 CSMA 邻接的时隙调度方案.第三种方法为在 Smart-IWSN 平台上可灵活实现的 TDMA 与 CSMA 混合调度方案.

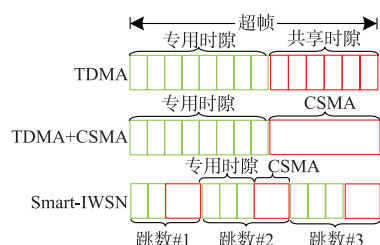


图10 不同重传策略

如图 11 所示为这三种方法的性能对比柱状图,本文定义 P 为将采样数据在当前超帧内传输至工业控制器的成功率.该实验通过外置干扰节点提供 10% 丢包率的条件下,由 40 个节点周期向工业控制器发送数据.实验结果充分说明三种时隙调度方案的性能依次递增.性能越好的算法,调度和维护的代价越大,在传统的 IWSN 中,缺乏有效的机制根据服务需要快速实现各种算法,并进行灵活调度和维护.通过控制与数据的分离,Smart-IWSN 支持运行时调度甚至不同调度算法的快速切换.

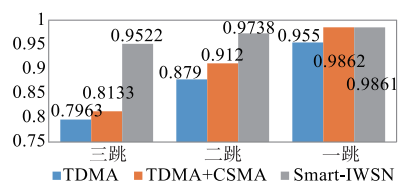


图11 不同重传策略性能

5 结束语

本文介绍了将智慧协同网络技术应用到工业无线传感器网络的理论、实践和应用.设计并实现了智慧协同工业无线传感器网络系统 Smart-IWSN,为工业无线传感器网络的研发和应用节省大量的时间和成本.然

而,作为一种全新的网络设计理念,未来将智慧协同网络技术应用到包括有线/无线在内的大规模工业网络场景时还将面临以下挑战.

5.1 跨领域知识融合

在将网络技术应用到工业领域时,工业用户由于技术保密或者认知不足,往往难于向网络设计人员提供真正有意义的工业领域信息.一个应用 Smart-IWSN 到焊机监控系统替代 CAN 总线的例子如下:对于 Smart-IWSN,一个时隙的长度是 10ms,在这段时间里可以传输的最大包长是 133 字节.然而一个 CAN 总线帧非常短,只有 8 字节.因此简单的使用 Smart-IWSN 时隙传输 CAN 帧会造成巨大的带宽浪费.因此,在将网络技术应用到工业系统时,跨领域深度知识融合才能设计出真正优化的网络.

5.2 兼容性

兼容性问题存在于两个不同的阶段.阶段一:考虑到保护原有投资和减少对生产的影响,不可能将所有的工业设备强行升级为兼容智慧协同网络.因此,第一阶段的任务是如何透明地将智慧协同网络技术应用到不兼容的设备.这一阶段的成功与否决定了智慧协同网络技术是否能真正应用到工业领域. Smart-IWSN 已给出几种有效的解决方案,并且已在焊机群监控服务得到证明.阶段二:当孤立的工业设备已经兼容智慧协同网络,如何充分发挥智慧协同网络技术优势实现设备之间的智慧协同是第二阶段考虑的问题.这个阶段决定了智慧协同网络在工业领域的应用规模.解决的方式是定义统一的针对行业应用的智慧协同网络组件接口.

5.3 智能的 Smart-IWSN 控制器

Smart-IWSN 控制器的主要功能是将服务层应用的需映射到底层的网络组件.为了减小在工业应用中引入智慧协同网络带来的影响(例如需要对原有工业服务控制器进行软件升级),需要设计一个智能的 Smart-IWSN 控制器,可以实现将工业服务的需求智能的感知并解释为网络可处理格式.然而这种解释技术实现非常复杂,涉及到多个流程甚至流程的反复,包括采样、决策、编解码、有效性验证和优化等,是一个跨学科的系统性工程.

5.4 异常恢复

智慧协同网络能够提供更加精细粒度的控制和全局的网络资源调度.在大部分情况下,这种控制和调度实现并不复杂,但是由于恶劣工业网络环境造成的网络重传、重调度、重入网等异常将使以上问题复杂化,导致需要大量的带宽和时间来同步和收敛网络.这一过程会极大得影响工业网络的稳定性和持续性.

5.5 与其他新工业网络技术的融合

近几年,工业界涌现了许多新技术,旨在实现统一

通信和一体化管理,例如面向服务构架 SOA^[15]和现场设备集成 FDI^[13]等,这些新技术主要工作在服务层面.智慧协同网络技术面向底层网络,将彻底实现自顶向下的技术融合,提升工业网络效率.然而,这些技术的完全融合涉及到大量标准化工作和各界的共同努力,已经超出了技术本身.

参考文献

- [1] V C Gungor, G P Hancke. Industrial Wireless Sensor Networks: Applications, Protocols, and Standards [M]. FL, USA: CRC Press, Inc, 2013.
- [2] C Lu, A Saifullah, B Li, et al. Real-time wireless sensor-actuator networks for industrial cyber-physical systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(5): 1013 – 1024.
- [3] V C Gungor, G P Hancke. Industrial wireless sensor networks: challenges, design, principles, and technical approaches [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 4258 – 4265.
- [4] A Ajith Kumar S, Knut Ovsthus, L M Kristensen. An industrial perspective on wireless sensor networks—A survey of requirements, protocols, and challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3): 1391 – 1412.
- [5] J Ma, et al. Challenges: from standards to implementation for industrial wireless sensor networks [J/OL]. International Journal of Distributed Sensor Networks, <http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2016/3898535>, 2016. 1 – 13.
- [6] D Yang, et al. Assignment of segmented slots enabling reliable real-time transmission in industrial wireless sensor networks [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3966 – 3977.
- [7] 工业 4.0 [OL]. <http://www.plat-i40.de/I40/Navigation/EN/home/home.html>, 2017.
- [8] 工业互联网 [OL]. <http://www.iiconsortium.org/>, 2017.
- [9] H K Zhang, W Quan, et al. Smart identifier network: a collaborative architecture for the future internet [J]. IEEE Network, 2016, 30(3): 46 – 51.
- [10] 张宏科, 罗洪斌. 智慧协同网络体系基础研究 [J]. 电子学报, 2013, 41(7): 1249 – 1255.
Zhang Hongke, Luo Hongbin. Fundamental research on theories of smart and cooperative networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1249 – 1254. (in Chinese)
- [11] H K Zhang, P Dong, W Quan, B Hu. Promoting efficient communications for high speed railway using smart collaborative networking [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(6): 92 – 97.
- [12] S Petersen. Wireless HART versus ISA100. 11a; the format war hits the factory floor [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2011, 5(4): 23 – 34.
- [13] FDI [OL]. <http://www.fdi-cooperation.com/>, 2017.
- [14] D Yang, H Wang, T Zheng, H Zhang, M Gidlund, Y Xu. Demonstration abstract: applying industrial wireless sensor networks to welder machine system [A]. Proceedings of ACM/IEEE IPSN [C]. Berlin, Germany: ACM/IEEE, 2014. 319 – 320.
- [15] G Candido, A W Colombo, J Barata, F Jammes. Service-oriented infrastructure to support the deployment of evolvable production systems [J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2011, 7(4): 759 – 767.
- [16] S Han, X Zhu, A K Mok. Reliable and real-time communication in industrial wireless mesh networks [A]. Proc 17th IEEE RTAS [C]. Chicago, IEEE, 2011. 3 – 12.
- [17] B Han, V Gopalakrishnan, L Ji, et al. Network function virtualization: challenges and opportunities for innovations [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(2): 90 – 97.

作者简介



杨冬男, 1980年12月出生, 山西大同人, 北京交通大学副教授, 博士生导师. 目前主要从事未来网络体系及关键技术、工业互联网和无线传感器网络的研究工作.
E-mail: dyang@bjtu.edu.cn



马剑男, 1991年6月出生, 宁夏银川人, 北京交通大学博士研究生. 目前主要研究方向为工业互联网和工业无线传感器网络.
E-mail: 14111026@bjtu.edu.cn



张宏科男, 1957年9月出生, 山西大同人, 北京交通大学教授, 博士生导师, 下一代互联网络互联设备国家工程实验室主任. 目前主要从事下一代信息网络关键理论与技术的研究工作. 国家973项目“一体化可信网络与普适服务体系基础研究”、“智慧协同网络理论基础研究”首席科学家.
E-mail: hkzhang@bjtu.edu.cn