

## CPS 网络体系结构及关键技术

胡雅菲 李方敏 刘新华

(武汉理工大学信息工程学院 武汉 430070)

(huyafei007@163.com)

## CPS: Network System Framework and Key Technologies

Hu Yafei, Li Fangmin, and Liu Xinhua

(School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070)

**Abstract** Cyber-physical system (CPS) is an important developing direction of future communication networks. As a comprehensive system with physics, biology, engineering, etc., CPS has the characteristics of local operating and global administration. These emerging networks provoke researchers' great concerns. Based on brief introduction of CPS networks and their application fields, this paper analyzes hot points about the framework of CPS, and describes the future work of CPS networks.

**Key words** CPS; framework; network convergence

**摘要** Cyber-physical system(CPS)是未来通信网络的一种重要发展方向.CPS是集合物理、生物及工程学的综合性系统,具有局部操控、全局控制的特点.这种新兴的网络系统引起了研究界极大的兴趣.在简要介绍CPS网络与其应用领域的基础之上,分析了CPS系统在网络体系结构的研究热点问题.最后进行总结并展望了CPS网络未来的研究方向与重点.

**关键词** CPS;体系结构;网络融合

中图法分类号 TN915.01;TP393

随着无线网络技术、嵌入式开发水平、控制理论与实时系统技术的日新月异,CPS(cyber-physical system)将彻底改变人类与物理世界的感官与交互.分布在任意位置的集成有传感器、数据处理单元和通信模块等多种模块的CPS节点通过有线或无线的方式构成单级或多级网络.借助于CPS节点采集的传感信息、音视频信息,探测包括环境指标、生物体生命体征、移动物体运动指标等众多用户需要的物质实体,用户可以观察、改变甚至制定物理世界中曾经遥不可及的方面.

未来的CPS系统应用前景广阔,目前研究方向侧重于医疗健康与救治、航空导航、交通智能、环境监测等国民生产生活重要领域.然而,CPS系统目前仅

仅处于发展的初期阶段,它的局部操控、全局控制的概念,高度的自适应性、自主性、高效性、功能性、可靠性、安全性等特点,以及多学科交叉应用的特点吸引了各学科研究机构与技术人员的极大兴趣,CPS系统已经成为科学新技术研究的前沿阵地.美国的NSF资助的多个工作组如HCMDSS,HCPS-CPS,HCMDSS-MD PnP已经对CPS系统展开了研究.

当前发展迅速的传感器技术、微电子技术、无线通信技术以及计算机技术为CPS系统成为现实奠定了理论基础.尤其是近年来发展迅速的移动Ad Hoc网络、mesh网络、传感器网络,融合传统的有线网、蜂窝网络,构架新的网络模型能够为CPS系统网络方面的研究带来新的方向与策略.在CPS系统

收稿日期:2010-09-08

基金项目:国家自然科学基金项目(60970019);湖北省自然科学基金重点项目(2009CDA132);中央高校基本科研业务费专项基金项目(2010-II-004)

中,网络架构与组网方式是影响 CPS 系统实用性与效率的关键因素之一. 为了深入理解 CPS 网络的概念和发展趋势,并促进国内在该方向上的研究,综述 CPS 网络研究进展及其网络体系结构十分有意义.

1 CPS 系统概念和理论基础

CPS(cyber-physical system)是集合物理、生物及工程学的分布式综合性系统,其所有操作、监测、

控制都由计算核(computer core)完成. 物理组件能够以任意规模组网,计算处理核心通过嵌入到每一个物理组件中进行实时反馈、分布式处理. CPS 系统是完全集成的逻辑与物理的计算行为. 图 1 描绘了一个 CPS 系统的应用例子——个人医疗与救治系统. 放置在固定位置的内置多种传感器以及具有摄像功能的节点实时监测被监测者的各项生命体征. AP 通过个域网(如蓝牙)采集有效信息,借助主干网络将信息发送至健康监测中心.

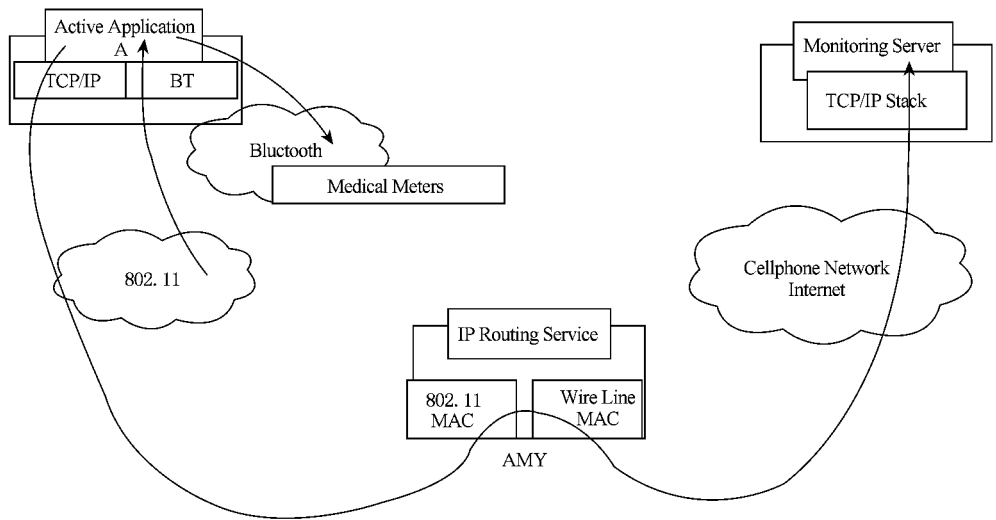


图 1 个人医疗与救治系统

CPS 网络的部分概念来源于车载自组网网络研究. 车载自组网(VANET)定义为<sup>[1]</sup> 为一种快速移动户外通信网络,在一定通信范围内的车辆可以相互交换各自的车速、位置等信息以及车载传感器感知的数据,并自动地连接建立起一个移动的网络. 此外,CPS 网络也有无线传感器网络的理论基础. 典型的无线传感器网络系统利用传感单元、处理单元、通信单元和电源结构,通过大量部署在被感知对象内部或者附近的节点,以自组织的方式构成无线网络,以协作的方式实时感知、采集和处理网络覆盖区域中的信息,并通过多跳网络将数据经由 Sink 节点链路将整个区域内的信息传送到远程控制管理中心;反之,远程管理中心也可以对网络节点进行实时控制和操纵.

但是,CPS 网络与传统的网络有着不同的设计目标,它不完全相同于现有的传感器网络、自组织网络等. CPS 网络具有更广泛意义的标准与意义. CPS 系统中每一个物理元件都具有联网能力,多层次多规模联网,能够动态重组与重识别. CPS 更具有高自主性以及新颖的计算与物理底层. 因此,总结和研

究 CPS 网络的构架成为 CPS 系统实现的关键问题.

CPS 网络作为 CPS 系统的一个重要组成部分,参与系统的感知、决策、执行这个闭环运行. 并且,所有运行可以在不同的时间或空间级别完成. CPS 网络革新了数据处理与传输的方式. 未来的 CPS 网络能够连接每一个具备网络模块的物理部件,实时处理,异步运行,将信息的延迟减少到最短的时间.

2 CPS 网络的应用

CPS 网络在未来的基础建设、交通运输发展、个人服务等众多领域必将占有举足轻重的地位,由于 CPS 网络应用领域还在不断发展之中,本节仅列举一些典型的应用.

2.1 个人医疗救治

在对居住在偏远地区的病患或独居老年人的个人医疗救治应用中,CPS 网络颠覆传统救助模式,由被动呼救到主动监测,更能突破传统模式中救助不及时、监测不能做到实时性、无法监测反馈的局限. 伊利诺伊大学计算机科研所的研究人员为独立

生活的老年人辅助生活的应用无线的 cyber physical space 是一个典型例子<sup>[2]</sup>. 该系统由一个叫 AMY 的授权管理器和称为“管家”的家用电脑以及一系列辅助设备组成. AMY 通过“管家”管理周围的无线设备, 同时作为网关通过因特网向附近的监测中心传送相关数据信息. 图 2 描述了该医疗救治系统的基本结构.

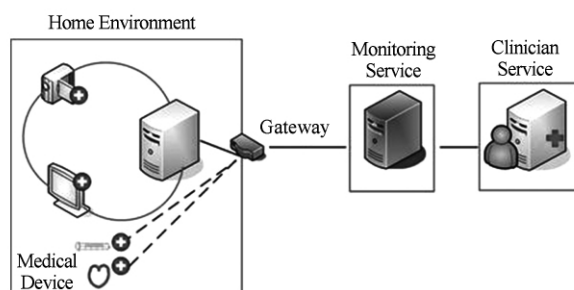


图 2 University of Illinois 个人医疗救治系统结构图

## 2.2 智能交通

随着配备短距离无线接口车辆的增多, 行驶在道路上的车辆形成车载 CPS 网络. 这种网络在交通事故预警、路况监测、拥塞预报等交通安全应用中具有巨大的潜力, 此外, 利用车辆与路边接入点的机会通信可以提供因特网访问和商业应用等.

CarTel<sup>[3]</sup> 是 MIT 开发的基于车辆传感器的信息收集和发布系统, 能够用于环境监测、路况收集、车辆诊断和路线导航等. 安装在车辆上的嵌入式 CarTel 节点, 使用 Wi-Fi 或 BlueTooth 等通信技术, 在车辆相遇时可以直接交换节点采集的数据, 同时, CarTel 节点也可以通过路边的无线接入点将数据发送到主干网上的服务器.

加州大学伯克利分校的 Work 等人于 2008 年 2 月在学校附近的公路上做个名为“移动世纪”的实验<sup>[4]</sup>. 100 辆配置有 GPS 模块移动电话的车辆沿加利福尼亚的环形公路行驶 10 个小时. 数据采集则依靠专门设备完成, 对结果的分析和反馈通过因特网广播. 该实验虽然处于研究的初级阶段, 但强调了新型车载 CPS 网络的可实现性, 探索了现阶段的实验平台与方法.

## 2.3 航空导航

随着飞机智能程度的提高, 未来的飞机在全局信息网络中扮演着智能节点的角色. 利用 CPS 系统的实时性、持续性以及实时监控的优势, 未来的航空运输能在安全性与运输能力上有极大的提高.

## 2.4 电力控制

传统电力控制与运输系统例如 UPFC, FACTS

设备结合嵌入式网络运算即 CPS 系统能够电力控制与运输超越以往的集中控制转向电力网的主动、分布控制. Arizona State University 的研究人员提出利用无线传感器网络技术监控电力运输过程中传导错误、电塔倒塌、热点问题以及极端机械环境等问题. 该应用利用电塔预装的无线传感器组网, 实时采集电力系统中完整的物理与电力图像, 以确定适当的控制方法从而达到在特殊条件下系统的自动调节.

## 2.5 环境监测

现实的恶劣环境如偏远山区、海洋、有毒物质覆盖区域, 人类往往无法涉足. CPS 网络可以承担在恶劣环境中采集数据、上传及反馈信息的任务. ORNL(Oak Ridge National Lab)设计的能够侦查、识别和追踪化学以及放射性物质的 DITSCN 网络<sup>[5]</sup>. DITSCN 能够侦查放射性物质的存在并且识别放射源、跟踪放射速度. 未来可应用到一些重要设施及高速公路旁用于低水平的放射性物质侦测.

# 3 CPS 网络关键技术

目前, CPS 网络体系结构研究的关键技术主要包括: 网络融合、节点接入与管理、CPS 网络安全等.

## 3.1 网络融合

CPS 网络作为一种新一代网络, 是不同接入技术到不同用户终端的水平通信, 物理世界中种类繁杂的系统需要基于一个统一、灵活和大容量的公共平台在无线(或有线)环境下完成最佳路径选择来满足不同的业务需求. 在不同的接入系统之间, CPS 应该提供同一网络间的水平通信和不同网络之间的垂直通信. 基于 CPS 网络的无缝业务的服务协议, 包括业务质量、安全性和移动性必须保证人们能随时随地地与任何人在任意时间、任意点进行任意种类的信息交换与反馈. CPS 网络集成了过去成熟网络的研究与应用, 如因特网, 无线传感器网络, Ad Hoc 网络, WLAN, Wi-Fi, WiMAX, 蜂窝网等. 传统的单一网络承担业务简单, 应用领域不具备多样性特点, 因而无法实现 CPS 网络的复杂应用. 多种网络融合为 CPS 网络的发展具有指示性意义. 将现有研究的成果引入 CPS 系统将带来许多新特性以及更好的扩展性. 但在混合网络模型的研究中, 面临网络节点接入、信道切换、业务的无缝切换等难题. 因而, 基于混合网络模型的研究对 CPS 网络研究更加重要. 图 3 说明了 CPS 网络的网络结构模型.

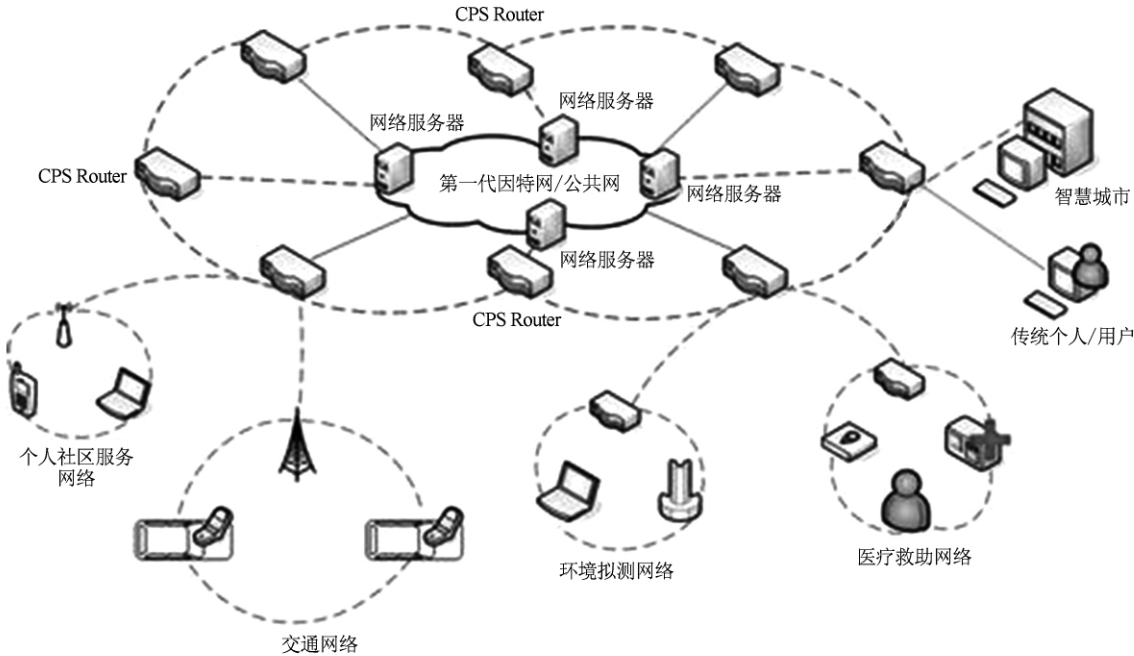


图 3 CPS 网络结构

3.1.1 网络融合技术研究现状

Ad Hoc 网络自组织和移动的特点使其网络具有很高的生存能力和灵活性,可以广泛应用于不易建设固定通信设施的环境中. Ad Hoc 网络与因特网的互联可以丰富 CPS 应用范围. 进一步扩大 CPS 网络的服务领域. 文献[6]在研究基于 MANET 与因特网的混合网络方面,针对 MANET 与因特网的结合过程中最重要的因特网网关问题,在现有路由协议中路由发现机制的基础上,提出一种高效的 MANET 节点网关发现策略,改进了现有混合网关发现策略,在保持低开销的同时提高了网络的连接性能. MANET 与 IP 网的交互不仅局限于单播协议,多播协议日益成为研究的热点. 文献[7]提出利用 MANET 边界路由协同 MANET 的 SMF 区域与 IP 网的 PIM-SM 区域的工作,使多播数据包能顺利在两种不同的网络中转发并且实现了动态的切换,如图 4 所示. 但是这种边界路由必须保留 MANET 网内通信主机不变,并且骨干网难以调试,通常需要传统路由器及相关协议协助转发. MANET 结合全局 IPv6 网络能够利用 IPv6 的 IP 地址配置机制. 以往的研究集中于 IPv6 与 MANET 的全局接入方式,MANET 节点需要通过因特网网关获得全局 IPv6 地址,并且也需要通过网关接入. 而文献[8]为支持 IPv6 网络与 MANET 的互联,提出了基于 IPv6 的 MANET 协议. 该协议实现了节点的自动加入并且自动配置其全局 IPv6 地址. 此外,基于最长

前缀匹配和软状态路由高速缓存的新颖单播及多播路由协议,使得该协议支持节点在 MANET 网络与其他网络的自由移动. 然而该协议适用于规模小、MANET 节点移动性低的混合网络. 针对移动性较强的 MANET 网络,利用联合陌生代理的 MANET 结合因特网的混合网络如图 5 所示.

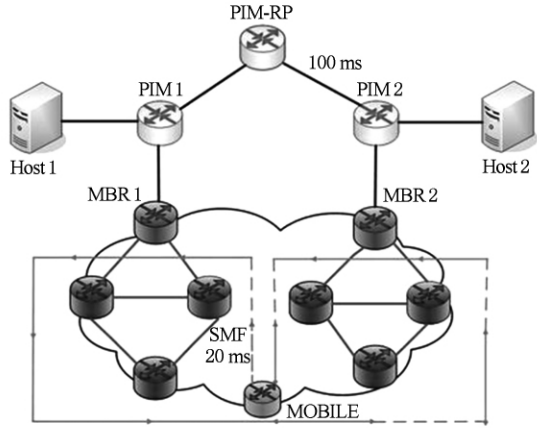


图 4 基于 MBR 路由的混合网络结构图

Ad Hoc 网络与因特网的融合,数据流通过的传输媒体各不相同,这些差异会严重影响 TCP 性能. 主要表现在:1)无线信道与有线信道丢包率不同;2)不对称的传输信道;3)无线网络存在隐藏终端和暴露终端问题;4)网络拓扑动态变化;5)无线网络路由失败频繁;6)能量限制. MANET 与有线网络混合网络中 TCP 流主要涉及两个问题:如何区分路由丢包与拥塞丢包以及路由频繁失败对 TCP 性能

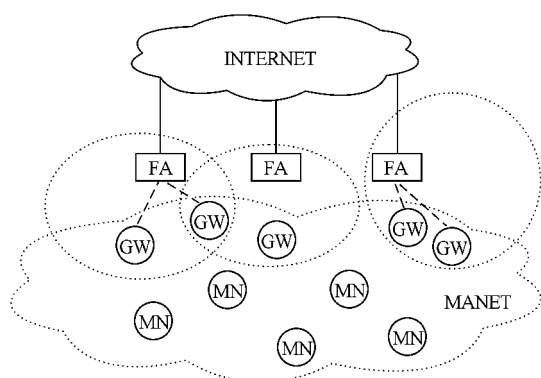


图5 基于移动IP的MANET-INTERNET混合网络

的影响。TCP-F发送者<sup>[9]</sup>基于网络层路由失败反馈信息区分路由丢包和拥塞丢包，TCP-BUS<sup>[10]</sup>使用可靠的控制信息传输机制，并在中枢节点上采用缓存技术暂存因路由失败而聚集的数据包。但是多跳TCP连接会因节点移动而引起路由频繁失败。Split TCP<sup>[11]</sup>把TCP连接分成若干段的局部TCP段。段间的路由代理根据代理间距离参数决定节点是否有代理任务。文献<sup>[12]</sup>提出抢先路由算法，讨论了如何通过减少路由失败次数解决此问题，同时该方法可以减少路由重建延迟。若当前链路基于能量监测到路由失败就切换到新路由。

蜂窝移动通信具有覆盖范围广、便于对移动用户管理（包括认证、授权、计费）等优点。但是在CPS网络中提供满足用户需求的无缝服务，蜂窝移动通信需向用户提供高速接入主干网并支持移动多媒体等业务。这就需向每个移动用户提供高速的无线传输速率。另外，由于无线电波的衰耗和阴影遮挡，在城市中蜂窝网络存在较多的通信盲区，影响蜂窝网络的覆盖。在蜂窝网中引入Ad Hoc技术可以提高蜂窝网络的数据传输容量和覆盖范围。其中，正在发展中的融合技术包括：UCAN<sup>[13]</sup>，A-GSM<sup>[14]</sup>，ODMA，SOPRAMO<sup>[15]</sup>，iCAR<sup>[16]</sup>等。融合蜂窝网和Ad Hoc联合网（UCAN）<sup>[13]</sup>是具有多种通信模式的混合网络模型。每个节点同时具备支持两种标准接口，路由协议通过选择好的接口转发数据包以提高设备的性能。iCAR系统通过在小区间使用Ad Hoc中继站（ARS），用于转发移动终端和基站之间的数据流，从而降低热点小区的拥塞程度，有效平衡蜂窝间的通信负载，提高链路建立的成功率<sup>[17]</sup>。

光纤接入方式以其巨大的带宽优势获得研究人员的关注。在未来的CPS网络中，能够进一步提高比特率以实现更高带宽，有效缓解IP带宽激增。波分复用技术WDM在提高传输能力的同时，具有无

可比拟的联网优势。利用WDM技术并采用全光纤联网成为一种全新的光因特网<sup>[18]</sup>。但是传统的点对点WDM光网络扩展性差、单位比特成本高、搭建复杂。以成熟的光交叉连接技术OXC为基础的加载具有智能控制功能的GMPLS技术是构筑因特网的较佳选择。网络配置成网状（mesh）结构，可以满足多对多点属性的网络业务，并且，当网状网络的传送容量不断增加时，所需设备并不增加，一个网孔可能会被安排在若干个逻辑结构里，便于灵活配置，以支持各种业务，保证业务能通过大型网络<sup>[19]</sup>。

采用微蜂窝混合网络技术扩展了CPS网络室内通信的能力和灵活性。微蜂窝采用蜂窝无线组网方式，在终端和网络设备之间通过无线通道连接实现用户在活动中相互通信。微蜂窝技术具有越区切换和跨本地网自动漫游功能。结合射频或红外的微蜂窝技术能够是室内通信更灵活、稳定。适合实际CPS网络的需求。

### 3.1.2 现有网络融合技术的不足

目前研究的重点集中在解决少数几种网络的融合技术，同时研究着重于网关选择与网络切换。但是，CPS网络具有异构性、嵌入型、承载业务量大等特点。不同网络占用频段、链路速度存在巨大的差异。目前的研究还无法解决上述问题。在未来的研究中，统一的物理及MAC底层及其协议是发展的趋势。上层应用对底层是“透明的”。改进或提出新的底层硬件和协议能够存进网络融合技术的发展，使CPS网络能够得到广泛的应用。

### 3.2 节点接入与管理

CPS网络节点接入与管理研究主要集中在信道分配和节点的移动切换。CPS网络异构性、网络层次复杂等特点必须在对CPS网络节点接入与管理的研究中重点考虑。

节点在异构网络中自由移动带来节点的跨区切换问题。目前，已实现的漫游技术包括基于数据链路层的蜂窝技术如GPRS和3G以及基于IEEE 802.11/16的WLAN等<sup>[20]</sup>。但是，GPRS和3G需要获得政府颁发的运营牌照，并且，其MAC层的转发速率低，尤其当节点在高速运动时，数据传送的质量下降明显。WiMAX，IEEE802.16e，同样支持漫游<sup>[21]</sup>，但是WLAN仅支持低速运动的节点，无法支持高速漫游通信<sup>[22]</sup>。此外，802.11f，设备能够在链路层漫游，但不能漫游于异构网络中<sup>[23]</sup>。在网络层漫游独立于其他的网络技术，传统的解决方法是改变移动节点的IP地址，例如特殊主机漫游，移动IP（MIP），蜂窝IP（CIP）等。但是，特殊主机漫游，移动

IP(MIP)不适用于大型网络.此外,CIP也是基于IP路由的,支持较低移动性的协议.区域注册的MIP(MIP-RR),分级的MIP(HMIP),以及域内管理协议(IDMP)都是基于隧道的,支持较低移动性的协议,并且,这些协议重点关注移动节点的注册、管理和网内的平滑切换.

节点的拓扑控制是CPS网络体系结构待解决的关键技术之一,在网络融合中,网络内拓扑变化导致链路断裂成为网络设计的瓶颈.分簇技术可以很好缓解由于无线网络中由于节点的移动带来的拓扑的变化.然而分簇算法强调同构性,扩展性差.最近的研究将重点集中在异构网络中的分簇算法.文献[24]提出基于权重的自适应分簇算法WACHM,通过计算节点联合权重选取簇头.但是拓扑的变化速度快于节点聚合速度,端到端传输性能会受到极大的影响,网络变相变大,距离变长.改进路由协议能够提高网络的扩展性和灵活性.Ryu等人提出放弃IEC链路层重传机制,并通过增加少量冗余换取更高的稳定性[25].

节点的定位管理使CPS网络能够发现移动节点当前网络连接点,以便信息传递.节点位置管理由2个互补的操作组成:位置注册或者位置更新以及呼叫传递.同时,准确定位CPS网内节点位置才能实现对外部目标的定位和追踪,提高路由效率,实现网络的负载均衡以及网络拓扑的子配置[26-31].传统的基于自组网的节点定位算法依赖外部目标的定位,如GPS或者节点自主定位.常见的节点自主定位算法又可分为基于距离的算法如欧几里德算法[32]、通用定位算法[33]、鲁棒定位算法、N跳复合定位算法等,以及与距离无关的算法如质心算法、凸规划算法、距离矢量算法和APIT算法等.此外,节点的定位算法还可以分为集中式算法与分布式算法.集中式计算的优点在于从全局角度统筹规划,计算量和存储量几乎没有限制,可以获得相对精确的位置估算;其缺点则在于通信开销大导致耗能过大;而分布式算法的优点是通过使用锚节点,实现分布式计算,便于系统扩充,缺点是需要大量的锚节点支持.

值得注意的是,目前对节点接入与管理的研究大部分集中于同构网络.CPS网络作为一种融合性网络,节点本身具有异构的特点,同时在异构的网络环境下进行切换是研究节点接入与管理的难点.目前还没有较好的解决方法.

### 3.3 CPS网络的其他研究热点

从CPS网络构建角度看,还有许多问题值得探讨,包括CPS网络安全与隐私问题、网络上层与底层协调问题以及学科交叉在CPS网络中的应用等.

#### 1) 安全和隐私问题

网络安全是CPS网络RAS(可靠性、可用性、生存性)的关键部分,保证网内敏感数据不被恶意窃取、攻击是CPS网络安全问题研究的重点.CPS网络的安全问题对CPS网络节点的灵活性和鲁棒性做出了要求.动态实时具有容错性的构件simplex architecture(SA)旨在支持可靠的实时系统运行及更新.SA能够在控制构件出错时保持系统的稳定性,同时,SA包含的时空错误保护、运行监测以及实时公告、订阅机制允许控制端在出错时被强制关闭或更替.基于SA的系统有JSF,SAFECode<sup>[34-37]</sup>.

常见的安全性问题来自2个方面:网络威胁与物理威胁.网络威胁是基于网络攻击与软件漏洞的安全性问题,利用统计学方法对网络攻击建模在解决这方面问题有一定效果,但是无法解决复杂及灵活的网络威胁.针对对通信链路的物理威胁,结合数学、统计学、概率论等理论将网络与物理威胁联合建模,建立统一、安全与可靠的通信与计算结构.

#### 2) 交叉学科在CPS网络中的应用

CPS是多学科、多理论的集合所称.交叉学科是CPS网络研究的重要尝试.例如,控制理论、游戏理论、网络计算、渗滤理论、经济学和排队理论等.利用数学在“时间”等级上融合物理与网络,可以解决当物理组件连入网络带来的传输时延、拥塞以及丢包问题.一个名为“human transport vehicle”的车载项目通过仿真计算和真实环境实验,融合传感器技术、机械技术,并利用PDA设备建立无线连接用以监测和记录该运输工具使用中的各项关键参数.DIRC(dependability interdisciplinary research collaboration)的时间分级理论,把时间定量的定义为时间带,将物理组件的动态行为分为多个等级.CPS网络按时间带宽分成不同层次.系统根据不同层次提供不同的服务.

#### 3) 网络组件与物理组件的集成

CPS网络局部操控、全局控制的需要带来物理底层与网络层接口的重要问题,系统地定义边界与接口成为CPS目前遇到的难题.考虑目前CPS系统中物理组件、上层软件分离设计导致的松散结构,从语义学角度提出基于组件的CPS网络的设想,其中最重要的设计抽象包括了组件、性能与平台.生物学方法(system biology, SB)是CBSD的典型应用.

## 4 总结与展望

CPS 网络是一种全新的局部操控、全局控制,具有多学科交叉应用的混合网络,利用放置在任意位置的 CPS 节点(静止或移动)传输数据及反馈控制信息.作为一种全新的组网方式,CPS 网络在众多领域如个人医疗救助、智能交通、环境监测等具有巨大应用潜力,并对未来人们生活方式带来深远的影响与深刻的变化.

本文对 CPS 网络目前的研究进展进行了综述,期望本文的介绍能够推动相关领域学者对这一新兴技术的关注与研究.我们预计 CPS 网络领域未来一段时间内研究的重点方向包括:

### 1) 网络控制与中间件

在 CPS 网络中,数据需要长期传输,新的带宽分配协议、排队策略以及路由协议可以使减少网络实验、拥塞、丢包带来的实时性损失.此外,网络中间件<sup>[16]</sup>能够提供 CPS 网络实时的资源配置、分发,同时,可以监测网络的 QoS.

### 2) 网络连接向多层次发展

CPS 网络中,基于传统网络的度量如网络时延、拥塞、稳定性等并不适合.提出适合 CPS 网络的度量是研究 CPS 网络的支撑问题.传统的度量标准会给 CPS 网络带来限制并且减少了潜在的潜能,同时不利于交叉学科在 CPS 网络中的研究.建立能够表现系统整体性能的度量是解决方法之一.例如,ITU 标准为 VoIP 提供了包括时延、拥塞、失真率以及带宽权重的 MOS(mean-opinion score),旨在将网络度量翻译为用户对某一级别声音质量的满意程度.未来的研究着力于将不同的性能指标用同一套可共享的度量表示.

随着计算速度的加快,逐渐突破摩尔定律,人类的信息搜集能力进化相对变慢,人类信息搜集与计算性能的不对称成为 CPS 性能的瓶颈.未来的信息采集设备不仅趋于自动化同时嵌入能力更强,拥有与环境交互的完整方式,从而避免了人类操作带来的速度瓶颈.

### 3) 网络层次模型多样化

CPS 网络部分节点处于 Ad Hoc 状态,参与网络的节点随时加入或离开感兴趣的区域,也可能失败及恢复.这样的网络环境导致研究人员难以编写、调试及验证网络应用.因此,网络模型中添加清晰、良好定义的抽象层能够屏蔽网络失败及拓扑变化.例如目前广泛研究的 P2P 会话层,是通信抽象层的典型应用.但是仅有通信抽象层仍然无法满足现实

物理世界环境.

### 4) 可供实验的完整网络实验平台

目前,CPS 面临的最大挑战在于没有为研究人员提供完整的网络实验平台,验证系统设计的可行性.CPS 网络实验平台必须是可靠的、安全的、高效的、可以实时运行的可扩展平台.文献[11]就完整的可实验的平台提出设想:未来某领域的专家,可以通过简单的 CPS 工具,从设计抽象模型开始到根据设定环境实现具体系统直到最终实验成品的成型.而这一切都可以通过仿真以及在灵活的 CPS 硬件平台上建模实现.

### 5) 完整可实现的 CPS 系统

目前 CPS 网络乃至 CPS 系统仅限于简单系统的模拟,各国研究人员纷纷提出自己对于未来的 CPS 系统的建议与可能会应对的挑战.但是到目前为止,完整可实现的 CPS 系统仍然停留在理论设想与简单模拟的阶段,例如简单的远程医疗网络和 VANET 网络等.所以,完整可实现的 CPS 系统是将来我们研究的目标与方向.

## 参 考 文 献

- [1] Christian C, Moretti L, Tian J. Communication architecture of CarTalk //Proc of the 10th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Service. Madrid, Spain: ITS, 2003: 132-138
- [2] Jennifer C Hou, Liu Sha. A reference architecture for building cyber physical space for independent/assisted living // NSF Workshop on Cyber-Physical Systems. Austin, USA, 2006
- [3] Hull B, Bychkovsky V, Zhang Y, et al. CarTel: A distributed mobile sensor computing system //Proc of the 4th Int Conf on Embedded Networked Sensor Systems. New York: Association for Computing Machinery, 2006: 125-138
- [4] Work D, Alexandre Bayen, Quinn Jacobson. Automotive cyber physical systems in the context of human mobility //Proc of National Workshop on High-Confidence Automotive Cyber-Physical Systems. Troy, USA, 2008
- [5] David K Y Yau, Jennifer C Hou, Shankar Mallikarjun, et al. Systems support for traditional plume detection, identification, and tracking sensor-cyber networks //Proc of the 6th Int Conf on Information Processing in Sensor Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 541-542
- [6] Lin Zhuang. A hybrid internet gateway discovery scheme in mobile ad hoc networks //2009 WASE Int Conf on Information Engineering. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 367-370
- [7] Ian D Chakeres, Danilov Claudiu, Henderson Thomas R, et al. Connecting MANET Multicast //Proc of IEEE Military Communications Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 807-812

- [8] Wand Chiungying, Li Chengying, Hwang Renhung, et al. Global connectivity for mobile IPv6-based ad hoc networks // Proc of the 19th Int Conf on Advanced Information Networking and Application. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 807-812
- [9] Chandran K, Raghunathan S, Venkatesan S, et al. A feedback based scheme for improving TCP performance in ad-hoc wireless networks //Proc of the Int Conf on Distributed Computing System. Piscataway, NJ: IEEE, 1998: 472-479
- [10] Kim D, Toh C, Choi Y. TCP-Bus: Improving TCP performance in wireless ad hoc networks. Journal of Communication and Networks, 2001, 3(2): 175-186
- [11] Kopparty S, Krishnamutry S, Faloutous M, et al. Split TCP for mobile ad hoc networks //Proc of IEEE GLOBECOM. Piscataway, NJ: IEEE, 2002: 138-142
- [12] Goff T, Abu-chazaleh N, Phatak D, et al. Preemptive routing in ad hoc network //Proc of ACM MOBICOM. New York: ACM, 2001: 43-52
- [13] 何雪云, 周克琴. Ad hoc 与蜂窝网络融合技术的讨论. 江苏通信技术, 2005, 21(3): 5-8
- [14] Aggelou G, Tafazolli R. On the relaying capacity of next-generation GSM cellular networks. IEEE Personal Communication, 2001, 8(1): 40-47
- [15] Zadeh A, Jabbari B, Pickholtz R, et al. Self-organizing packet radio ad hoc networks with overlay (SOPRANO). IEEE Communication Magazine, 2002, 40(6): 149-157
- [16] Hu W, Qiao C, De S, et al. Integrated cellular and ad hoc relaying systems: i CAR. IEEE JSAC, 2001, 19(10): 2105-2115
- [17] Gao Xia, Wu Gang, Miki Toshio. QoS framework for mobile heterogenous networks //2003 IEEE Int Conf on Communication. Piscataway, NJ: IEEE, 2003: 933-937
- [18] Rosberg Z. Circuit allocation in All optical networks with average packet delay cost criterion. Automatic Control, 2006 (5): 862-867
- [19] Nadarajah N, Wong E. Protection switching and local area network emulation in passive optical networks. Lightwave Technology, 2006, (5): 1955-1967
- [20] Etoh M. Next generation mobile systems 3G and beyond. River Edge, NJ: Wiley Press, 2005
- [21] IEEE. IEEE Std. for local and metropolitan area networks, IEEE 802.16e, Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2005
- [22] IEEE. IEEE 802.11b-1999. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band. Piscataway, NJ: IEEE, 2000
- [23] IEEE. IEEE Std. 802.11f, IEEE trial-use recommended practice for multi-vendor access point interoperability via an inter-access point protocol across distribution systems supporting. Piscataway, NJ: IEEE, 2003
- [24] Wang Yi, Chen Hairon G, Yang Xinyu, et al. WACHM: Weight based adaptive clustering for large scale heterogeneous MANET //2007 Int Symp on Communication and Information Technology. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 936-941
- [25] Bo Ryu, Zhang Zhensheng, David Tang, et al. A coding-based routing for scalable MANET //Proc of IEEE Military Communications Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 1-7
- [26] Rabacy J J, Ammer M J, Da Silva JR JL, et al. Picoradio supports ad-hoc ultra-low power wireless networking. Computer, 2000, 33(7): 42-48
- [27] Savarese C, Rabaey J M, Beutel J. Locationing in distributed ad-hoc wireless sensor network //Proc of the 2001 IEEE Int Conf on Acoustics, Speech, and Signal. Piscataway, NJ: IEEE, 2001: 2037-2040
- [28] Acpkun S, Hamdi M, Hubaux J P. GPS-free positioning in mobile ad-hoc network. Cluster Computing, 2002, 5(2): 157-167
- [29] Doherty L, Pister K S J, Ghaouil E. Convex position estimation in wireless sensor networks //Proc of the IEEE INFOCOM 2001. Piscataway, NJ: IEEE, 2001: 1655-1663
- [30] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing //Proc of the 7th Annual Conf on Mobile Computing and Networking Rome. New York: ACM, 2001: 70-84
- [31] Alberto Cerpa, Deborah Estrin. Ascent: Adaptive self-configuring sensor network topologies. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2002, 32(1): 62-71
- [32] (西) Go'mez G, Sa'nchez R. 蜂窝网络的端到端服务质量和用户体验质量: 概念、架构以及性能优化. 北京: 机械工业出版社, 2006: 180-185
- [33] Halonen T, Romero J, Melero J. GSM, GPRS and EDGE Performance. England: Wiley, 2003: 169-173
- [34] Dinakar D, Sumant K, Vikram A. SAFECODE: Enforcing alias for weakly typed languages //Proc of the 2006 ACM SIGPLAN Conf on Programming Language Design and Implementation. New York: ACM, 2006: 144-157
- [35] Dinakar D, Vikram A. Efficiently detecting all dangling pointer uses in production servers //Proc of Int Conf on Dependable Systems and Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 269-280
- [36] Dinakar D, Vikram A. Backwards-compatible array bounds checking for very low overhead //Proc of the 28th Int Conf in Software Engineering. New York: ACM, 2006: 162-171
- [37] Dinakar D, Vikram A. Memory safety without garbage collection for embedded applications. ACM Trans in Embedded Computing Systems, 2005, 4(1): 73-111

胡雅菲 女,1984年生,博士研究生,主要研究方向为无线 Mesh 网络。

李方敏 男,1968年生,博士生导师,中国计算机学会高级会员,主要研究方向为网络服务质量、新型网络体系结构、嵌入式系统。

刘新华 男,1974年生,博士,副教授,主要研究方向为计算机网络通信、无线传感器网络及嵌入式系统。