

# 综合交通信息物理系统研究

龚 葵<sup>1</sup> 李苏剑<sup>1</sup> 邢恩辉<sup>2</sup>

(北京科技大学机械工程学院 北京 100083)<sup>1</sup> (佳木斯大学机械工程学院 佳木斯 154007)<sup>2</sup>

**摘要** 为了给综合交通发展提供参考,针对综合交通系统的设计需要,确定了相关理论、方法和技术。考虑到信息物理系统在交通系统结构、运输方式和技术上的应用,提出了综合交通信息物理系统。分析综合交通发展面临的主要问题。针对综合交通各问题,对信息物理系统特性进行分析研究,同时对信息物理系统在综合交通上应用的可行性进行理论探讨。为给未来综合交通信息物理系统的设计及研究方向提供参考,提出综合交通信息物理系统内涵、框架及 4 大技术难题。研究结果表明:信息物理系统在解决综合交通问题方面有广泛的应用前景。

**关键词** 交通工程,信息物理系统,综合交通,可行性,内涵,框架,技术难题

**中图分类号** U491 **文献标识码** A

## Comprehensive Transportation Cyber-physical System

GONG Yan<sup>1</sup> LI Su-jian<sup>1</sup> XING En-hui<sup>2</sup>

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)<sup>1</sup>

(School of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In order to provide references for the development of comprehensive transportation, according to design of comprehensive transportation system, theory, method and technology were determined. Considering the application of cyber-physical system on traffic system structure, mode and technology of transportation, a comprehensive transportation cyber-physical system was proposed. We analyzed the main problems facing the development of comprehensive transportation. In order to solve the problems of traffic, the characteristics of cyber physical systems was analyzed. At the same time, the feasibility of the application of information system on the comprehensive transportation was theoretical studied. In order to provide reference for the design and research direction for the future comprehensive transportation cyber-physical system, connotation, framework and four technical problems of comprehensive transportation cyber-physical system were proposed. The results show that cyber-physical system has a wide application prospects on comprehensive transportation problems.

**Keywords** Traffic engineering, Cyber-physical system, Comprehensive transportation, Feasibility, Connotation, Framework, Technical problems

随着交通运输的发展,技术先进、网路布局和运输结构合理的集公路、铁路、水路、管道和航空等各种运输方式与系统功能于一体的综合交通运输系统(Comprehensive Transportation System, CTS)逐步形成。文献[1]提出了城市群一体化交通系统的思路和发展对策。CTS是对现有交通系统结构上的调整、运输方式上的整合、技术上的发展和创新。目前,CTS研究的主要问题是:基于什么理论构建CTS的体系;采用什么方法进行多式联运;应用什么技术达到CTS目标。

现代交通运输系统是一个典型的信息物理系统(Cyber-Physical System, CPS)<sup>[2]</sup>。新一代交通系统的发展趋势是基于CPS的智能交通系统。针对交通系统结构问题,文献[3]以智能交通系统为例,构建了包含物理层、网络层和应用层的3层CPS体系结构框架。文献[4,5]指出目前CPS在交通领域的研究侧重于公路和航空两种运输方式。针对技术问题,

文献[6]对交通CPS的关键技术进行了研究探讨。

综上所述,以CPS在交通系统结构、运输方式和技术上的当前研究成果为基础,CPS在CTS理论、方法和技术上存在一定程度的理论和实践基础。

本文通过分析CTS发展的主要问题和CPS特性,对CPS在CTS上应用的可行性进行理论探讨,并提出综合交通信息物理系统(CTCPS)内涵、框架和标准。进一步提出CTCPS面临的4大技术难题及解决方案。

## 1 CTS的主要问题、CPS特性及可行性分析

### 1.1 结构及模式

#### 1.1.1 CTS的结构及模式问题

从单一运输方式到CTS是一个巨大的理论创新,根据概念,CTS强调公路、铁路、水路、管道和航空等各种运输方式

本文受国家自然科学基金项目(50908101)资助。

龚 葵(1984—),女,博士生,主要研究方向为智能交通诱导与控制,E-mail:yongyan0608@126.com;李苏剑(1959—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为交通诱导与控制、物流;邢恩辉(1974—),男,博士,副教授,主要研究方向为道路交通安全。

的集成一体化发展。各种运输方式在空间上分属不同区域,技术水平有差距,结构及模式不一致。为达到多式联运等目标,CTS需要构建包含各种运输方式的一体化结构及模式。CTS按照功能划分,子系统过多,各部分功能不同,这可能导致功能冲突或资源浪费,且各部分间协调问题难以解决。CTS结构应按照技术层面进行划分,将各运输方式及系统功能在CTS构架中模糊化,以消除各种运输方式的区域、技术水平、结构及模式的不均衡问题。

#### 1.1.2 CPS的构架模式及研究现状

CPS是通过计算技术、通讯技术、控制技术,将计算、网络和自然/人工物理世界融合为一体的复杂系统<sup>[5]</sup>。以智能交通系统为例,文献[3]构建了包含物理层、网络层和应用层的3层CPS体系结构框架;文献[6]给出了更具体的交通信息物理系统的基本架构,包含感知、通信、计算、控制和服务5个层次。文献[7]针对智能交通系统的核心部分交通诱导与控制,提出了基于CPS理论的框架,按照通信、计算、控制和物理世界进行划分。

#### 1.1.3 构架及模式可行性分析

为解决CTS的结构及模式问题,基于CPS理论将CTS按照技术层面划分为:感知、通信、计算、控制和服务5个层次。

### 1.2 新技术

#### 1.2.1 CTS的新技术问题

原交通系统按照功能进行划分,针对各部分分别进行研究。CTS对交通系统整体进行研究,大幅度扩大了研究范围,是更加复杂的系统。CTS的复杂性体现在:CTS设备的种类及数量、设备间通讯的次数及数据量、CTS计算次数及计算量等均大幅提高。为解决这些问题,CTS在控制、通信、计算3方面的新技术作用不容忽视。

#### 1.2.2 CPS的新技术及研究现状

CPS以通信、计算、控制(3C)技术为核心。3C新技术的应用是解决CPS服务对象复杂性的关键。文献[7]对CPS用于交通诱导与控制的3C技术要求进行探讨:计算技术要求包含数据处理和采用新计算技术降低计算量;通讯技术要求信息无冗余降低数据存储量;控制技术要求执行机构分布式管控且通过动态重组协同完成工作任务。文献[6]讨论了交通信息物理系统的若干关键技术:海量信息资源的安全共享与管理技术、信息传输时间和空间分离技术、交通信息系统和交通物理系统深度融合技术、交通系统的广域多维协同优化技术。

#### 1.2.3 新技术的可行性

CPS的多种设备的协调运作技术、海量信息的传输通讯及数据挖掘技术,以及云计算等新技术适用于解决CTS新技术问题。

### 1.3 制定标准

#### 1.3.1 CTS制定标准问题

CTS包含各种运输方式。目前,各种运输方式的工程标准、产品标准和服务标准差异较大。根据各种运输方式难以制定统一的CTS标准。CTS标准的制定对CTS的设计实施和长足发展是不可或缺的。在结构上,CTS标准应重新划分为模式标准、技术标准和人机服务标准。模式标准依据CTS结构及模式。技术标准依据CTS技术。人机服务标准依据

CTS人机服务特性。

#### 1.3.2 CPS的标准制定

CPS和CTS的研究均处于起步阶段。两者均尚未形成明确的标准制定体系。CPS侧重从技术层面解决问题,强调人机系统特性,在构架及模式上比现有交通系统明确。

#### 1.3.3 制定标准的可行性

将CPS应用于CTS,有利于CTS模式标准、技术标准和人机服务标准的制定。

### 1.4 可持续发展

#### 1.4.1 CTS的可持续发展问题

CTS研究的目标主要是实现各种运输方式的集成一体化发展,使CTS的研究超前于实际交通运输需求的可持续发展。发展的超前性要求CTS具有可扩展性和开放性,能够根据实际交通运输需求的增加实时(或短时期)地做出有效调整。

#### 1.4.2 可扩展性和开放性研究现状

在3C技术上,CPS具有可扩展性。随着CPS新技术的发展,CPS的可扩展性不断突显。中国科学院的何积丰院士对CPS的定义体现了其可扩展性<sup>[8]</sup>。文献[9]从嵌入式网络技术角度体现了CPS的可扩展性。文献[10]针对道路交通控制系统,提出CPS在开放性控制方法上的研究价值。

#### 1.4.3 可持续发展的可行性

1.2.2节指出的CPS的新技术在CTS中的应用,使CTS的计算、通讯及控制能力具有大幅度提高的潜力,进而利于CTS的可持续发展。

### 1.5 人机服务特性问题

#### 1.5.1 CTS的人机服务特性

区别单一运输方式的交通系统,CTS更具有人机服务特性,更加需要考虑人机因素作用,它采用了具有人机系统特性的理论方法、设计理念及应用指标。特别是关于用户满意度评价的各因素应贯穿CTS的设计及应用。

#### 1.5.2 CPS的人机系统特性及研究现状

CPS的人机系统特性是其优于其他理论方法的最主要特性之一。文献[7]指出CPS的人机系统特性体现在:CPS服务对象多是人机系统;人通过主动调控,成为CPS及其服务对象系统中的执行者或维修人员;人是3C技术的设计者。文献[11]指出CPS各层都存在人的干预,人机接口是CPS各层都有的部件。文献[12]通过人机交互界面将人机系统特性在CPS抽象结构中直观地表现出来。文献[13]根据CPS交通系统的人机特点,提出了考虑驾驶员对调度的影响的启发式算法。

#### 1.5.3 人机服务特性的可行性

CPS的人机系统特性使CPS应用于CTS利于解决CTS人机服务特性问题,同时利于符合人机服务标准。

### 1.6 绿色环保

#### 1.6.1 CTS的绿色环保问题

交通系统的绿色环保主要是指交通的节能减排问题。文献[14]指出未来交通CPS利于节能减排目标。CTS是一体化大范围复杂系统,优化一体化(将系统各部分融合)的作用应以节能减排作为目标之一。

#### 1.6.2 CPS的融合性及研究现状

CPS的融合性除避免系统各部分结构和功能上的重复

外,同时强化了系统各部分间的联系,避免系统各部分不协调导致的能源浪费。文献[7]指出采用 CPS 理论将交通控制与诱导深度融合解决了两者目标冲突问题。文献[6]指出交通信息系统和交通物理系统深度融合的技术提高了交通信息物理系统的运行效率等指标,交通信息物理系统根据驾驶人需求,设计多目标的分层系统,通过交通信息识别及预测,协调各子系统,实现车辆的燃油经济性和低排放。文献[4]指出充分运用 CPS 理论和设计方法,能够提高目前交通系统的通行能力,减少交通拥堵,降低燃料消耗,使交通系统更加安全可靠。

### 1.6.3 绿色环保的可行性

CPS 的融合性是 CTS 达到节能减排目标的理论保障,消除了 CTS 各部分目标、结构、技术方法等不同带来的环保问题。

## 1.7 安全及可靠性

### 1.7.1 CTS 的安全及可靠性问题

CTS 的安全性和可靠性是其实际应用的重要前提。CTS 区域协调、技术差异、系统复杂度、人机因素等增大了 CTS 安全及可靠性保障的难度。CTS 的研究需采用安全及可靠性相对较高的理论方法及技术。

### 1.7.2 CPS 的安全、可靠性及研究现状

安全性和可靠性是 CPS 设计应用的最重要指标之一<sup>[15,16]</sup>。CPS 的可靠性包含对服务对象和自身可靠性的保证、各技术的可靠性及各子系统连接的可靠性。文献[7]对 CPS 的可靠性做了一定分析。文献[17,18]等对 CPS 的安全性做了一定研究,提高了 CPS 安全措施对安全威胁的应对能力。文献[19]提出将 CPS 用于交通系统中,通过通信对车辆提供交通信息来对车辆进行控制,以提高交通安全。

### 1.7.3 安全及可靠性的可行性

CPS 是高可靠度的复杂系统,适用于解决 CTS 的安全性和可靠性问题。

## 1.8 节约资源

### 1.8.1 CTS 节约资源问题

CTS 扩大了区域范围,占据了更多的技术资源和设备资源。为节约资源,CTS 需对资源进行整合,去除技术、信息及设备的冗余部分。

### 1.8.2 CPS 的无冗余性及研究现状

CPS 的融合性及多种设备的协调运作技术能够保证系统设备的无冗余。文献[6]指出 CPS 的海量信息资源的安全共享与管理技术对海量数据中大量冗余信息进行处理。文献[7]提出通讯技术要求无冗余。文献[5]指出 CPS 的自治性和自主协调性包含计算技术的无冗余性。

### 1.8.3 节约资源的可行性

CPS 服务与大型复杂系统具有无冗余性,适用于解决 CTS 节约资源的问题。

## 1.9 信息输出

### 1.9.1 CTS 的信息输出问题

CTS 需要将部分信息输出,即提供物流信息服务和出行信息服务。CTS 的信息平台建设应使信息输出部分透明化,同时保证其他信息的安全保密性。

### 1.9.2 信息平台建设及研究现状

CPS 即是信息与物理世界深度融合的系统。某种程度

上,CPS 的设计过程即是融合物理世界的信息平台建设。优化 CPS 的设计需要参考物理世界(服务对象)的运行规律、目标、标准及操作环境等因素,优化 CPS 自身的信息平台建设,并考虑两者融合作用。文献[20]指出 CPS 在信息平台建设上的优势:CPS 能够实现对大系统的信息采集和行为感知;通过通信网络将物理实体和信息设备相互连接,以实现信息在系统内的流动和共享;根据物理设备与信息设备相互协同和相互影响,共同决定整个系统的功能和行为特征。文献[21]提出了用于交通系统的 CPS 信息数据处理方法。文献[22]指出 CPS 通过人机服务接口进行服务信息数据传输。

### 1.9.3 信息输出的可行性

CPS 的信息平台建设符合 CTS 的信息输出要求。

## 1.10 无缝连接

### 1.10.1 CTS 的无缝连接问题

CTS 内部及 CTS 与其他行业(金融、制造业等)系统间应为无缝连接状态,以保证 CTS 在未来的顺利发展。无缝连接主要体现在理论方法、技术设备和模式结构上。

### 1.10.2 技术连接及研究现状

CPS 侧重从技术角度构建系统模式结构。实现系统的无缝连接重点在于系统内部及与其他系统的技术连接。文献[23]指出 CPS 通过设备和技术使传感器、网络、计算单元和控制单元无缝集成。

### 1.10.3 无缝连接的可行性

CPS 以技术为手段,易于实现 CTS 的无缝连接。

## 2 CTCPS 内涵、框架及标准

### 2.1 CTCPS 内涵

CTCPS 内涵是通过 3C 技术将 CTS 和计算、网络融合为一体的复杂系统。CTCPS 运用 CPS 理论方法解决 CTS 问题,核心方法是运用 CPS 的 3C 技术来突破 CTS 作为大型复杂系统在技术上的瓶颈。CTCPS 模式结构侧重从技术层面划分 CTS,以避免按照功能划分导致的问题,消除 CTS 中各种运输方式的不均衡问题。需要强调的是,CPS 实质上是强调技术的方法。在设计过程中,CPS 更应加强考虑其设计的目的性及特性。CTCPS 的设计理念应保证在设计过程的每一步均充分考虑 CTS 面临的问题、CPS 特性和 CTS 特性。

### 2.2 CTCPS 框架

根据文献[6],T-CPS 中包含感知、通信、计算、控制和服务 5 个层次;T-CPS 主要由大量的物理感知和计算设备组成,且这些设备又通过网络实现互连;T-CPS 基本框架是一个物理域-信息域-物理域的结构。实质上,CTCPS 是一个物理域-信息域的状态信息反馈至控制信息运用的过程,因为作为信息感知来源的 CTS 和作为信息服务对象的 CTS 广义上是同一个 CTS<sup>[6]</sup>。

根据文献[6],将 T-CPS 的基本构架简述为:T-CPS 通过感知层对 CTS 的交通数据信息(物理域属性)进行感知;再将这些交通数据信息通过通讯层传输给计算层;T-CPS 计算层包含所有对交通数据信息的处理和存储过程,再将结果提供给控制层;T-CPS 控制层通过控制执行器对 CTS 控制节点进行控制;T-CPS 服务层应用控制层的控制,为用户终端提供实时的 CTS 服务;通过服务层的作用,CTS 的物理属性发生变化,T-CPS 重新通过感知层对 CTS 的物理域属性进行感知。

理论上,借鉴文献[6]中 T-CPS 的基本架构,构建 CTCPS 框架,如图 1 所示。具体地说:

CTCPS 框架服务层包含公路、铁路、水路、管道、航空等各种运输方式的服务内容,通过人机接口与所服务的物理世界相连接。针对多式联运等问题,服务层增加各种运输方式间在时间、空间等方面的协调性。

CTCPS 框架控制层包含系统评价指标、控制中心和控制子系统。根据计算层提供的数据和系统评价指标要求,控制中心对控制任务进行协调,将具体任务提供给控制子系统。子系统再通过执行器执行具体任务。

CTCPS 框架计算层包含信息处理与信息存储。信息处理的主要目标是去除冗余或错误信息,补充遗漏信息,计算有效信息,通过计算将有效信息转换为控制任务提供给控制层。信息存储将有效信息进行存储,用于查询服务和其他服务。

CTCPS 框架通讯层包括网络和接入设备,将感知层感知的原始数据传输至计算层,同时保证所有需要通讯的设备间的及时、有效、可靠及安全通信。

CTCPS 框架感知层针对各种运输方式的感知设备而有所不同。感知设备间的异构性可以通过通讯层、计算层和控制层的协调来消除。

CTCPS 框架与文献[5]中 T-CPS 的基本架构基本相同,主要区别在于:(1)前者感知层包含用于感知 CTS 物理状态的感知设备;后者感知层仅包含用于感知智能交通系统的感知设备。(2)前者服务层包含关于 CTS 的用户服务;后者服务层仅包含关于智能交通系统的用户服务。(3)与后者相比,前者通讯层、计算层和控制层的服务对象系统范围及复杂程度高倍增加。

根据两者的区别,前者的技术能力需要大幅度地提高。目前,CPS 技术的研究应用能力有限。

实践上,一种有效的方法是:首先,将 CTS 根据区域进行划分。按照同一 CPS 模式结构,根据同一 CPS 标准、设计理念和设计目标,采用相同的 CPS 技术,分别建立各区域 CTCPS。再通过 CPS 技术连接,构建包含多区域 CTCPS 的上一层 CTCPS。

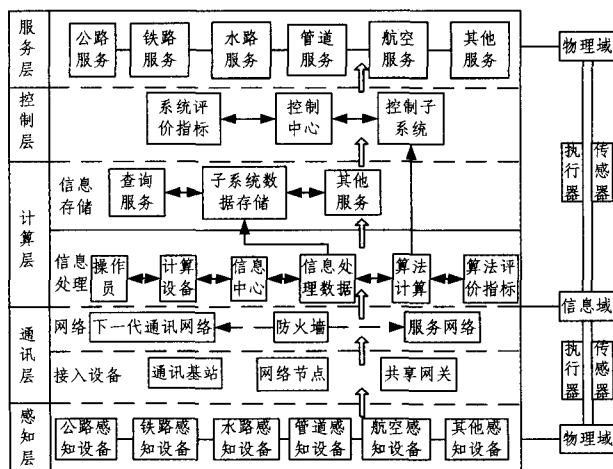


图 1 CTCPS 框架图

### 2.3 CTCPS 标准

根据 1.3 节,CTCPS 需要制定模式标准、技术标准和人机服务标准。CPS 具有 3 大特性:融合性、技术性和人机性。

模式标准应符合 CPS 融合性要求。CTCPS 模式标准主

要体现在 3 方面:(1)突显 CPS 结构模式,将 CTS 功能融合于 CPS 结构模式。(2)结构模式各部分技术上的融合性。(3)结构模式各部分目标上的融合性。

技术标准应符合 CPS 技术性要求。CTCPS 技术标准主要体现在 3 方面:(1)技术独立完成任务能力,包括各技术的可操作性、实时性、可靠安全性、自主性、可扩展性、适应性、兼容性、稳定性、容错性等其他特性。(2)各技术间的协调能力和多技术协作完成任务的能力。(3)同一系统内同类技术的差异较低。

人机服务标准应符合 CPS 人机性要求。CTCPS 人机服务标准主要分为 3 部分:(1)与 CTS 服务目标相应的人机服务标准。(2)CTCPS 中人的可参与性标准:人的设计、执行、维修及改造系统的可行性。(3)人的参与对 CTCPS 的影响的可调控标准。

## 3 CTCPS 技术难题

### 3.1 技术兼容

新技术间的异构性将成为 CTS 新技术发展的瓶颈之一。技术兼容是 CTCPS 面临的重大技术难题。CTCPS 是个超乎寻常的复杂系统,包含技术前沿、设备种类多、设备数量庞大等。系统内相同或相关技术间微小的差异性带来的不兼容问题很可能导致灾难性后果。技术兼容是 CTCPS 其他所有特性得以实现的前提。要保证技术兼容,除根据技术标准确定设定技术范围外,还应在技术设计、维护、升级等各时期消除技术差异性带来的不兼容问题。

### 3.2 技术成本

CTCPS 面临的技术瓶颈还包括技术成本问题。节约技术成本的方法主要有:节约新技术开发及应用成本;在一定时期内,尤其是起步阶段,在已有的 CTS 基础上进行改进,尽量选用正在运行的技术及设备;CTCPS 的设计应发挥其作为 CPS 的无冗余性,减少技术和设备等的数量及规模;CTCPS 通过其融合性提高其技术及设备协调作用,使部分技术和设备“身兼多职”参与完成多种技术任务;CTCPS 通过运用新技术提高 CTS 效率,同时通过人机交互提高 CTS 的用户满意度,以提高 CTCPS 的性价比。

### 3.3 区域协调

目前,我国各区域间交通系统在技术、结构及经济能力等各方面差异较大。在起步阶段,同时改进各区域内交通系统,构建相同的各区域 CTCPS 是不现实的。先后建立各区域 CTCPS 会导致各区域 CTCPS 之间技术、结构、功能、设备等差异过大,无法协调。根据 2.2 节,采用同一 CPS 模式结构、标准、设计理念、设计目标和技术,通过 CPS 技术连接,能够基本保证各区域 CTCPS 的区域协调性。经深入分析,CTCPS 的区域协调性还包涵区域间数据、资源、功能等的协调。

### 3.4 项目划分及集成

CTS 将各运输方式集成一体化,扩大了研究范围,增加了系统复杂性,引发了 CTS 的项目划分及集成的问题。CTCPS 从技术层面将 CTS 进行划分,再通过技术将 CTS 集成。同理,CTCPS 的项目划分方式及集成也应该通过技术手段实现。从技术层面划分出的 CTCPS 各子项目必须遵照技

(下转第 50 页)

- [3] 庄健,王孙安. 基于人工免疫网络机器人路径规划算法的进一步研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 1017-1019
- [4] 袁明新,王孙安,吴灿阳,等. Baldwin效应的自适应免疫网络规划算法[J]. 西安交通大学学报, 2009, 23(5): 85-90, 113
- [5] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98
- (上接第 46 页)
- 术标准、模式标准和人机服务标准,以保证未来从技术上进行集成的可行性。
- 结束语** CTS的形成与发展本身即是交通运输面临的前所未有的挑战。CTS带来的一系列问题,决定了其研究伊始就困难重重。本文针对这些问题,分析了CPS相应的特性。通过分析可知,CPS适于解决这些问题。根据CPS在CTS中应用的可行性分析,提出了CTCPS的概念,构建了其框架,并制定了其标准。CTCPS的提出是CPS研究领域拓展的又一例证,也是CTS理论研究的一个新方向。本文对未来CTCPS研究将面临的4大技术难题进行探讨,期望未来CTCPS研究在这些方面有所突破。作为一个新课题,CTCPS需要更深入的研究来实现实际应用。
- ### 参 考 文 献
- [1] 董治,吴兵,王艳丽,等. 中国城市群交通系统发展特征研究[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 83-88
- [2] Cartwright R, Cheng A, Hudak P, et al. Cyber-physical challenges in transportation system design [C]// Poovendran R. National workshop for research on high-confidence transportation cyber-physical system; automotive, aviation and rail. Washington D. C. : National science foundation, 2008; 220-224
- [3] 陈丽娜,王小乐,邓苏. CPS体系结构设计[J]. 计算机科学, 2011, 38(5): 295-300
- [4] 林峰,舒少龙. 赛博物理系统发展综述[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(8): 1243-1248
- [5] 王中杰,谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述[J]. 自动化学报, 2011, 37(10): 1157-1166
- [6] 孙棣华,李永福,刘卫宁,等. 交通信息物理系统及其关键技术研究综述[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 144-155
- [7] 龚葵,李苏剑. 基于CPS理论的城市交通控制与诱导融合框架[J]. 公路交通科技, 2012, 29(05): 114-120
- [8] 何积丰. Cyber-physical systems[J]. 中国计算机学会通讯, 2010, 6(1): 25-29
- [9] Tan Ying, Goddard S, Perez L C. A prototype architecture for Cyber-physical systems[J]. ACM SIGBED Review, 2008, 5(1): 26
- [10] Sengupta R, Fallah Y P. The rise of the mobile internet: what dose it mean for transportation[C]// Poovendran R. National workshop for research on high-confidence transportation cyber-physical system; automotive, aviation and rail. Washington D. C. : National science foundation, 2008; 190-194
- [11] Kang W, Son S H. The design of an open data service architecture for cyber-physical systems [J]. ACM SIGBED Review, 2008, 5(1): 3
- [12] Bestavros A, Kfoury A, Lapets A, et al. Safe compositional network sketches: formal framework[C]// Proceedings of the 13th ACM International Conference on Hybrid Systems; Computation and Control. New York, USA: ACM, 2010; 231-241
- [13] LI Xu, YU Xue-gang, WAGH A, et al. Human Factors aware Service Scheduling in Vehicular Cyber-Physical Systems [C]// IEEE INFOCOM 2011-IEEE Conference on Computer Communications. New Jersey: IEEE, 2011; 2174-2182
- [14] 赵俊华,文福拴,薛禹胜. 电力CPS的架构及其实现技术与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 1-7
- [15] National Science Foundation of the United States. Cyber Physical System(CPS) program solicitation [EB/OL]. [2009-08-16]. <http://www.nsf.gov/pubs/2010/nsf1015/nsf10515.htm>
- [16] Rajkumar R, Lee I, Sha L, et al. Cyber physical systems: The next computing revolution on[C]// Proc of DAC. New York: ACM, 2010; 731-736
- [17] Pham N, Abdelzaher T, Nath S. On bounding data stream privacy in distributed cyber-physical systems[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing. Newport Beach, USA: IEEE, 2010; 211-218
- [18] Chong S, Skalka C, Vaughan J A. Self-identifying sensor data [C]// Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Stockholm, Sweden: ACM, 2010; 82-93
- [19] Madden J, Mcmillin B, Sinha A. Environmental Obfuscation of a Cyber Physical System: Vehicle Example [C]// IEEE 34th Annual Computer Software and Applications Conference Workshops (COMPSACW 2010). New Jersey: IEEE Computer Society, 2010; 176-181
- [20] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 1-8
- [21] Wang A, Li Xu, Wan Jing-yan, et al. Human Centric Data Fusion in Vehicular Cyber-physical Systems [C]// 2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops. New Jersey: IEEE Computer Society, 2011; 684-689
- [22] 王鹏,向阳,宗宇伟,等. 基于时空 $\pi$ 演算的信息物理融合系统组件可替换性判定[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(10): 2494-2500
- [23] 王小乐,陈丽娜,黄宏斌,等. 一种面向服务的CPS体系框架[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(增刊): 299-303