

基于时空事件驱动的信息物理系统架构

冯玉伯^{1,2}, 丁承君¹, 赵兴华¹, 高 雪¹, 李宗奎¹, 田军强¹

(1. 河北工业大学 机械学院, 天津 300130; 2. 泰华宏业(天津)机器人技术研究院有限责任公司, 天津 300401)

摘 要: 信息物理系统能够实现信息进程与物理进程的协调与协作, 可用于完成大型工程系统的实时感知、动态控制和信息服务。为此, 提出一种信息物理系统的架构实现方式, 研究系统的组成、架构及运行机制, 对运行的核心机制即时空事件模型使用形式化语言进行论证。结果表明, 该模型从理论上保证了系统运行的可靠、高效和实时性。

关键词: 信息物理系统; 时空事件; 系统架构; 运行机制; 形式化描述

中文引用格式: 冯玉伯, 丁承君, 赵兴华, 等. 基于时空事件驱动的信息物理系统架构[J]. 计算机工程, 2018, 44(10): 64-68.

英文引用格式: FENG Yubo, DING Chengjun, ZHAO Xinghua, et al. Architecture of cyber physical system based on spatio-temporal event driven[J]. Computer Engineering, 2018, 44(10): 64-68.

Architecture of Cyber Physical System Based on Spatio-temporal Event Driven

FENG Yubo^{1,2}, DING Chengjun¹, ZHAO Xinghua¹, GAO Xue¹, LI Zongkui¹, TIAN Junqiang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Taihua Hongye (Tianjin) Robot Technology Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300401, China)

【Abstract】 The Cyber Physical System (CPS) can realize the coordination and cooperation between the information process and the physical process. It realizes real-time perception, dynamic control and information service of large-scale engineering system. So this paper puts forward an architecture implementation mode of CPS, focusing on the composition, structure and operation mechanism of the system. The core mechanism of system operation mechanism, named spatio-temporal event model is demonstrated by using formal language. The results show that the formal model time can guarantee the reliability, efficiency and real-time performance.

【Key words】 Cyber Physical System (CPS); spatio-temporal event; system architecture; operating mechanism; formal specification

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0047859

0 概述

物理系统具有时间一维特性并不可逆转, 且某一时刻物理事件的发生具有并发性的特点。而当前的计算模型和网络模型不能很好地反映物理系统的这 2 个特性, 为此, 提出了信息物理系统 (Cyber Physical System, CPS) 的概念。

CPS 是在物理系统中深度融合计算、通信与控制技术以实现信息进程与物理进程的协调与协作的智能系统^[1-2]。未来 CPS 将广泛应用于重要基础设施的监测与控制、环境监测、国防武器系统、航天与

空间系统等诸多领域, 将深刻改变人与物理世界的交互方式^[3]。CPS 本质上属于大规模异构网络, 其主要由分布式传感器、执行器、嵌入式计算传输系统、服务器、网络构成, 具有全局虚拟性、局部物理性、时间驱动性、以数据为中心、时间关键性、安全关键性等一系列特性^[4-5]。随着对 CPS 研究的不断深入, 出现了越来越多的 CPS 相关的研究热点, 这些热点主要集中在系统建模与验证、中间件技术、网络技术、CPS 安全技术等。在系统架构与建模方面, 文献[6-7]从理论上提出了 CPS 的原型架构, 指出 CPS 架构需要的特性, 如具有统一的全局参考时间、事

基金项目: 天津市科技支撑计划项目 (15ZXHLGX00210, 14ZCDZGX00811, 13ZCZDZX01200); 天津市产学研合作项目 (14ZCZDSF00025); 天津市国家高新技术研究发展计划成果转化项目 (13RCHZGX01116, 14RCHZGX00862)。

作者简介: 冯玉伯 (1974—), 男, 高级工程师、博士, 主研方向为体系结构、机器学习、数据挖掘; 丁承君, 教授、博士后、博士生导师; 赵兴华, 副教授; 高 雪、李宗奎、田军强, 硕士研究生。

收稿日期: 2017-07-06 **修回日期:** 2017-09-26 **E-mail:** fyb927@126.com

件/信息驱动机制、置信度量化、发布/订阅模式等。文献[8]针对CPS建立了时空事件形式化模型,通过建立CPS分层结构分析了不同层事件之间的时空关系。文献[9]以环境、行为、目标为要素,提出以人机交互为基础的CPS架构。文献[10]提出实时通信自配置CPS,从而保证系统的灵活性和可扩展性。文献[11]基于网络和嵌入式系统技术分层设计了CPS体系架构,对CPS的每层进行了详细描述,但对架构的整体特性描述略显不足。文献[12]提出了信息物理网的概念,并在原有计算机网络5层体系结构的基础上增加了CPS层。文献[13]给出了一种基于服务的CPS体系架构,融合了计算和物理进程,但未涉及时空特性。通过对CPS研究现状的分析发现,国内外对于CPS体系架构还处于研究阶段,尚未形成统一的认识,特别是对CPS的时空特性。

CPS系统要求物理系统在某一时空点状态的改

变能够以规定的时间和空间精度反映到信息系统上。本文将用户所关注的物理系统时空状态和物理属性的改变称为时空事件,而将CPS依据事件所产生的输出称为行为,将CPS的设计目标可以表示为“事件-行为”关系。在此基础上,针对CPS所应具备的特性,从实际应用的角度提出一种基于时空事件驱动的信息物理系统架构。

1 系统架构及运行机制

1.1 系统架构

CPS由物理层、网络层和决策层组成,如图1所示。物理层由物理系统、传感器、执行器和嵌入式计算传输单元组成。网络层由Internet网络、Web服务、数据库服务、消息队列遥测传输(Message Queuing Telemetry Transport, MQTT)服务、配置文件服务、计算决策控制单元组成。决策层由CPS终端、用户定义语义获取单元、数据传输单元、系统状态监测单元组成。

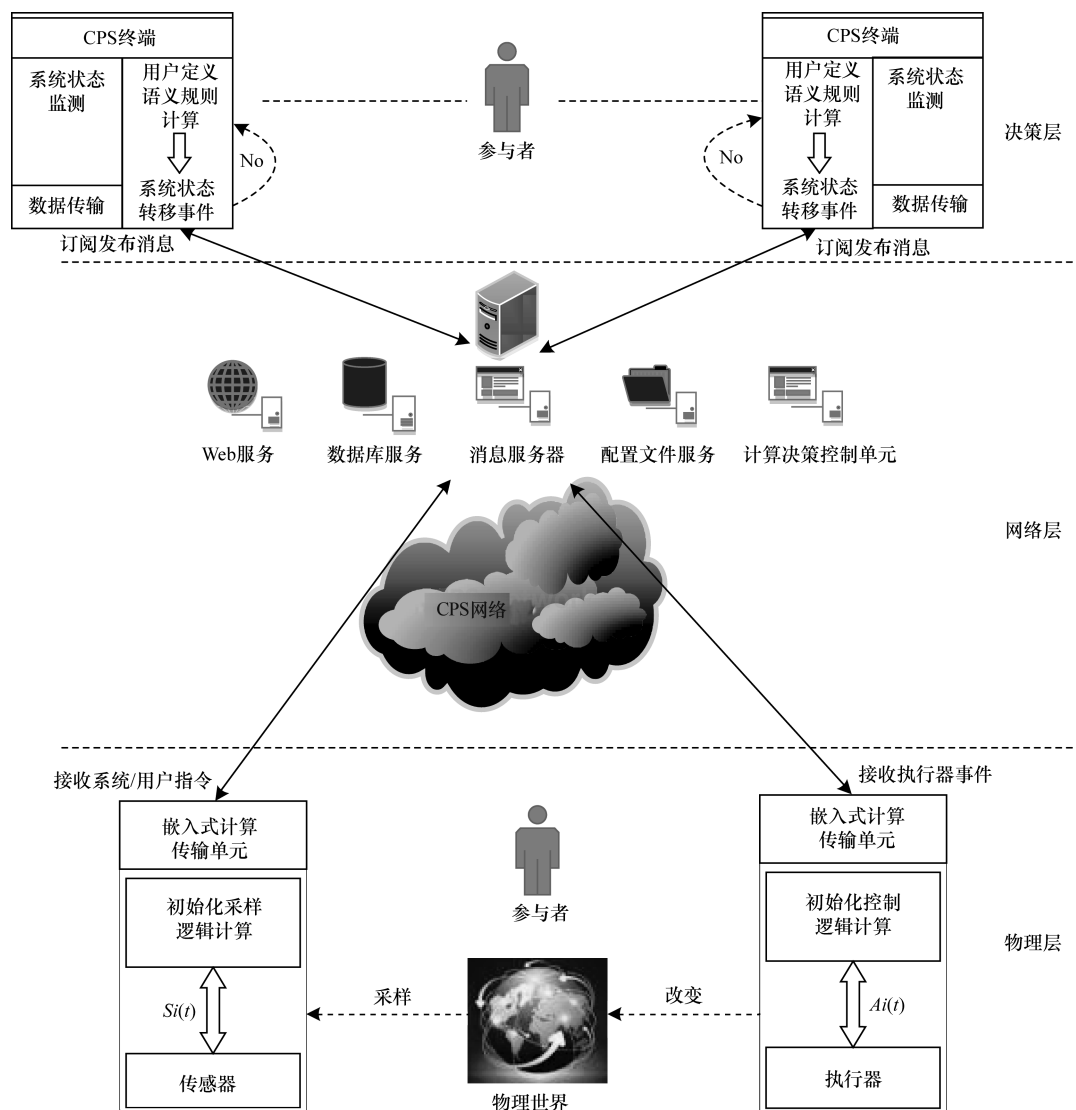


图1 CPS系统架构

传感器 (Sensor, SR) 与执行器 (Actuator, AR) 是物理系统和信息系统的接口, 传感器负责对物理系统属性进行监测, 如温度、湿度、压力、振动等, 并以信号形式传递给信息系统。执行器如电机、泵、阀、开关等用于对物理系统施加某种作用, 以改变物理系统的状态。从局部连接上看, 这两者和嵌入式计算单元相连接, 并以边缘计算为核心构成本地控制系统, 以满足实时性高的应用场景。

嵌入式计算传输单元 (Embedded Computing Transmission Unit, ECTU) 是靠近物理系统或者数据源头的网络边缘设备, 它是融合网络、计算、存储、应用等的开放平台, 就近提供边缘智能服务和控制, 满足 CPS 中的敏捷连接、实时业务、数据优化、应用智能、安全隐私保护等方面的关键需求。在本架构中, 从信号采集的角度来看, ECTU 按采样逻辑 (如周期性、中断等方式) 获取传感器数据 (物理系统特定属性), 同时生成采样时间戳和空间位置标识 (通过计算单元完成)。如果采样时间戳、空间位置标识以及传感器数据满足时空物理事件触发条件, 则触发传输单元, 将上述信息组成一个监测事件传输到 MQTT 服务器。从消息传递的角度来看, 嵌入式计算传输单元从服务器订阅消息, 并依据消息内容产生控制逻辑控制执行器的执行, 进而对物理系统施加改变。此外, ECTU 也从远程服务器下载相应的计算模型 (计算模型是由位于云端服务器的计算决策单元从大数据中依照数据挖掘、神经网络、统计分析等算法生成的模型或控制逻辑), 按照该模型进行边缘计算, 实现分布式系统各个节点的局部感知、控制和数据处理。ECTU 的系统结构如图 2 所示。

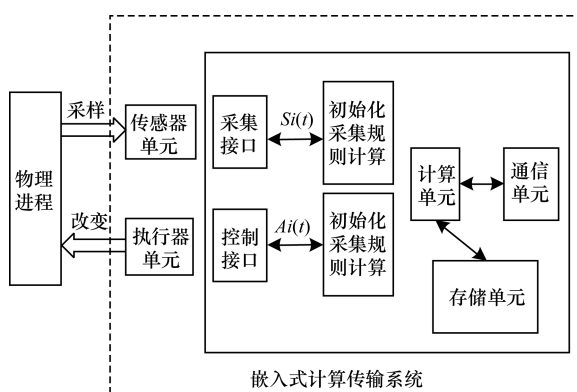


图 2 嵌入式计算传输单元结构

MQTT 服务器是 CPS 各个分布式子系统进行数据交换的中枢。MQTT 是 IBM 公司开发的一种即时通信协议, 该协议采用发布/订阅消息模式, 提供了一种一对多的消息发布模式, 从而使系统不与应用程序解耦; 使用 TCP/IP 提供网络连接; 具有“至多一次”“至少一次”“只有一次”3 种消息发布质量; 小型传输, 开销很小; 使用 Last Will 和 Testament 特性

通知系统中的各方关于客户端中的异常。MQTT 的这些特性使得 CPS 各个分布式子系统构成了松散连接。ECTU 采用 MQTT 协议将数据发布到 MQTT 服务器, MQTT 服务器支持 ECTU 以及其他各模块以订阅方式获取控制信息。

数据库服务用于存储接收到的时空事件实例以及用户定义的语义规则, 其中时空事件可作为后继查询分析和依照大数据建立数学模型的基础, 而用户定义的语义规则可作为知识库存在, 用于推理规则和控制规则的产生。在系统的实际构建中, 可以使用 Hadoop、Spark 等分布式数据库对数据、资源、规则等进行分布式存储和管理, 以便降低数据传输代价, 提高系统的可靠性、灵活性和可裁剪性。

Web 服务器通过提供 Web 终端, 实现用户和 CPS 的交互, 用户通过 Web 终端 (计算机、手机、PAD 等设备) 对 CPS 的控制语义规则进行定义, 并将这种规则以事件方式通知 CPS。CPS 正是通过这种方式将“人”这一因素融入到系统中, 实现了人在时间、空间等方面对物理系统的监测和控制。以 Web 服务为核心所设计的人机交互软件应该满足状态迁移架构约束条件和原则, 从而将 Web 服务器与 Web 客户端 (浏览器) 的无状态传输变为有状态传输。

配置服务器用于存储传感器、执行器, 嵌入式计算传输单元的相关辅助信息。配置服务器可以通过 ECTU 和传感器、执行器进行交互, 实现终端设备的远程配置。

CPS 终端包含 3 个主要功能模块: 1) 用户定义语义规则输入, 用户获取用户定义的关于系统的决策控制规则; 2) 系统检测模块, 用于显示 CPS 各部分的状态; 3) 传输模块, 用于传输用户定义的规则以及 CPS 各个模块的状态。CPS 终端一般采用终端软件形式或是通过 Web 浏览器形式和远程系统进行交互。

1.2 系统运行机制

嵌入式计算传输单元通过传感器和执行器与物理系统深度融合, 根据采样逻辑 (定时采样、时间触发、中断处理、状态改变等) 获取物理系统状态, 当所采集到的物理状态满足时空事件触发条件时, 嵌入式计算传输单元调用传输单元, 使用 MQTT 协议, 将该事件发布到 MQTT 服务器相应的监测主题上。运行在服务器上的计算决策控制进程从主题订阅消息, 并从知识库中检索到相应知识, 经过控制推理逻辑后, 将控制结果以时空事件形式发布到控制主题上。嵌入式计算传输单元订阅该主题, 依控制逻辑控制执行器运行对物理系统施加作用, 进而改变物理系统的状态和行为, 如图 3 所示。

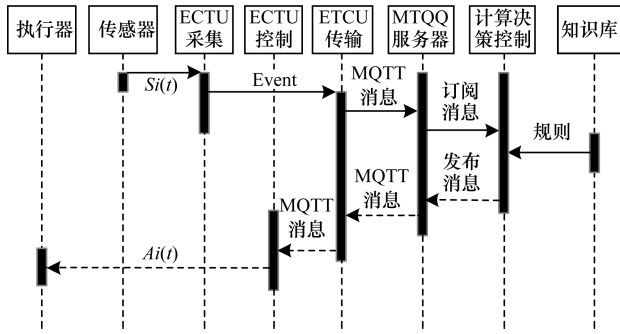


图3 CPS系统监测控制运行机制

用户在CPS终端(以Web浏览器)输入语义规则(如报警规则、控制规则、设备信息、设备状态等),将数据传输单元传输到远程的数据库中。此外,用户CPS终端的系统状态监测单元对分布式CPS的各个监测执行单元进行监测。

在ECTU中并行运行着3个进程和1个计算单元,分别是采集进程、控制进程、传输进程与计算单元。其运行机制如图4所示,采集进程用于周期性地获取传感器数据,并将该数据传输到计算单元,计算单元产生时间及空间数据,将三者进行融合,如果满足时空事件触发条件,则将该事件通知给传输进程。传输进程将该事件进行编码,依据MQTT协议将该事件发布到远程MQTT服务器,并通知计算决策控制单元进行相应处理,处理结果仍要发回到MQTT服务器。ECTU中的传输进程以回调方式接收MQTT服务器发布的控制事件,解码后经由计算单元传输给控制进程,由控制进程控制执行器的执行,这一过程构成了CPS子系统控制的外部循环。ETCU中的计算单元也可以从远程服务器获取控制和计算模型,并按该模型实现CPS子系统的局部控制,这一过程构成了子系统控制的内部循环。ECTU通过上述2个循环过程,完成对物理对象的控制决策和状态改变。

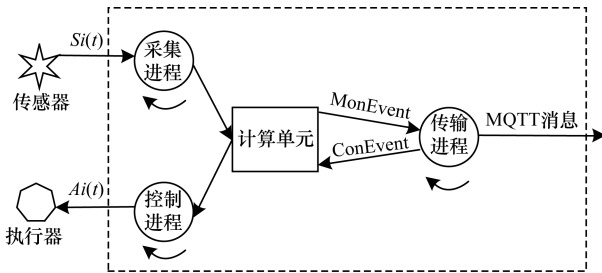


图4 ECTU运行机制

2 时空事件

CPS分布式子系统通过感知外部环境信息、采集物理系统状态信息并进行融合后获取相应决策,对外部请求或控制对象作出快速响应,同时能与其他CPS子系统进行协调并进行冲突消解,规划行为,

共同完成任务以准确控制物理对象。系统状态行为的改变可以看作一个事件,而任何事件都可以与相应的时间、空间进行绑定,具有时空属性的多个事件之间可以很容易地判断出它们之间的时态逻辑和空间逻辑关系。事件的时间和空间特性是体现CPS各个分布式子系统交互融合的本质特征之一^[14],CPS的时空特性具体体现在物理系统与计算实体之间在时间和空间上的相关性上,通过时间和空间位置关系可以确定事件的执行顺序并保证系统状态和行为正确性^[15]。因此,需要对CPS的时空事件进行定义并对事件的时空逻辑进行相应描述。

在上述CPS架构中,信息系统和物理系统的交互分为两类,一类是ECTU采用定时机制从传感器获取物理状态,并将该状态传给计算单元,由计算单元融合时间和空间信息,并形成监测时空事件。监测时空事件的形式化描述为:

$$ConEvent(ECTU_id, AR_id, SEQ_i, time, loc, p) \quad (1)$$

其中, $ECTU_id$ 是嵌入式计算传输单元的唯一标识, $dom(ECTU_id) \in \{1, 2, \dots, N\}$, N 为正整数,其依赖于CPS系统规模。 SR_id 是连接到嵌入式计算传输单元的传感器的唯一标识, $dom(SR_id) \in \{1, 2, \dots, M\}$, M 是正整数,其依赖于嵌入式传输控制单元提供的输入接口数。 SEQ_id 是时空物理事件的发生序列号, $dom(SEQ_id) \in \{1, 2, \dots, K\}$, K 是正整数。 $time$ 是事件发生的时间, loc 是事件发生的位置, p 是采集到传感器值的标量或向量。

另一类是ECTU的传输单元通过订阅机制(实现过程中采用函数回调方式)不断地从MQTT服务器获取决策控制信息,并将该信息发送给计算单元,由计算单元对信息进行解码后,发送给控制进程,控制执行器的运行状态。控制事件的形式化描述为:

$$ConEvent(ECTU_id, AR_id, SEQ_i, time, loc, p) \quad (2)$$

其中, $ECTU_id$ 是嵌入式计算传输单元的唯一标识, $dom(ECTU_id) \in \{1, 2, \dots, N\}$, N 为正整数,其依赖于CPS系统规模。 AR_id 是连接到嵌入式计算传输单元的控制器的唯一标识, $dom(AR_id) \in \{1, 2, \dots, M\}$, M 是正整数,其依赖于嵌入式传输控制单元提供的输入接口数。 SEQ_id 是时空物理事件的发生序列号, $dom(SEQ_id) \in \{1, 2, \dots, K\}$, K 是正整数。 $time$ 是事件发生的时间, loc 是事件发生的位置, p 是控制值。

通常的嵌入式系统传感器数据采集机制采用的是定时采样机制。

基于属性的事件触发机制表示为:

$$\|p(t) - p(t-1)\| > C_p \quad (3)$$

其中, $p(t)$ 表示 t 时刻ECTU获取的传感器采样值,

$p(t-1)$ 表示 $t-1$ 时刻 ECTU 获取的传感器采样值, 当两者差值的范数大于常数 C_p (C_p 由传感器精度或者用户定义确定) 时, 则触发观测事件。

基于时间周期的事件触发机制表示为:

$$\|loc(t) - loc(t-1)\| > C_p \quad (4)$$

其中, t_k 表示 ECTU 获取传感器采样值的当前时刻, t_{k-1} 是 ECTU 上一次获取传感器采样值的时刻, 当两者的差值大于 C_t (C_t 为常数且大于进程的运行周期) 时, 则触发观测事件。

基于位置的事件触发机制表示为:

$$\|loc(t) - loc(t-1)\| > C_p \quad (5)$$

其中, $loc(t)$ 表示 ECTU 在 t 时刻获取的传感器空间位置, $loc(t-1)$ 表示 ECTU 在 $t-1$ 时刻获取的传感器空间位置, 当两者差值的范数大于常数 C_p (C_p 由用户定义确定) 时, 则触发观测事件, 在某些应用中, 由于传感器的空间位置相对固定, 则该事件可被忽略。

时空事件触发机制表示为:

$$(\|p(t) - p(t-1)\| > C_p) \text{OP}(t_k - t_{k-1} > C_t) \text{OP}(\|loc(t) - loc(t-1)\| > C_p) \quad (6)$$

OP 表示为 AND、OR 或者 NOT, 当式 (6) 为真时, 触发时空事件, 由 ECTU 的传输单元采用 MQTT 协议进行数据传输, 即将数据发布到制定的主题。

3 结束语

本文从应用的角度提出一种信息物理系统的架构并阐述其运行机制, 定义了作为信息物理系统运行机制的时空事件的形式化模型。该模型具有可扩展性, 能保证信息物理系统在某一时空点状态的改变以规定的时间和空间精度反映到信息系统上。

参考文献

- [1] LEE E A. Cyber physical systems: design challenges [C]//Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-time Distributed Computing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2008: 363-369.
- [2] 李伯宇, 高飞, 朱建平, 等. 信息物理系统研究与应用综述 [J]. 成都信息工程学院学报, 2014, 29(4): 388-393.
- [3] RAJKUMAR R, LEE I, SHA L, et al. Cyber-physical systems: the next computing revolution [C]//Proceedings of Design Automation Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 731-736.
- [4] WANG Hongpeng, LIU Jingtai, HAN Jianda. RS-CPS: a distributed architecture of robotic surveillance cyber-physical system in the nature environment [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 1287-1292.
- [5] LI He, ZHANG Hong, LI Dapeng. Review on simulation methods of cyber-physical complicated distribution system [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Information Engineering for Mechanics and Materials. [S. l.]: Atlantis Press, 2016: 250-255.
- [6] TAN Ying, GODDARD S, REZ L C. A prototype architecture for cyber-physical systems [J]. ACM SIGBED Review, 2008, 5(1): 1-2.
- [7] 王浩云, 刘佼佼, 侯思宇, 等. 信息物理系统时空建模方法及在温室控制中的应用 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 183-190.
- [8] TAN Ying, VURAN M C, GODDARD S. Spatio-temporal event model for cyber-physical system [C]//Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009: 44-50.
- [9] QUINTAS J, MENEZES P, DIAS J. Information model and architecture specification for context awareness interaction decision support in cyber-physical human-machine systems [J]. IEEE Transactions on Human Machine Systems, 2017, 43(3): 323-331.
- [10] JATZKOWSKI J, KLEINJOHANN B. Self-reconfiguration of real-time communication in cyber-physical systems [J]. Mechatronics, 2014, 15: 54-61.
- [11] 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.
- [12] ABAD F A T, CACCAMO M, ROBBINS B. A fault resilient architecture for distributed cyber-physical systems [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Embedded and Real-time Computing Systems and Applications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 222-231.
- [13] YU Chengyuan, JING Song, LI Xuan. An architecture of cyber physical system based on service [C]//Proceedings of International Conference on Computer Science and Service System. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 1409-1412.
- [14] 赵红专, 孙康华, 程森林, 等. 一种离散连续混成的时空事件驱动的 CPS 体系架构 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9): 170-175.
- [15] 张晶, 陈垚, 范洪博, 等. 信息物理融合系统任务调度权限控制策略 [J]. 计算机工程, 2017, 43(4): 60-66.

编辑 顾逸斐