

基于事件驱动 CPS 体系架构的层级模型

赵 新,尹忠海,周 诚,刘 斌,李明杰

(空军工程大学 理学院,西安 710051)

摘 要: 为了提高信息物理融合系统(CPS)的灵活性,提出 CPS 体系架构的层级模型。阐述 CPS 系统的本质和特性,描述事件驱动在 CPS 系统中的实现过程,以 CPS 系统中的模块化功能为个体,设计 CPS 系统的层级结构。以事件为基础,构建实现 CPS 系统层级模型的语义模式。实际应用结果表明,该模型结构清晰、灵活性高,且便于应用理解。

关键词: 信息物理融合系统;体系架构;事件驱动;层级模型;智能家居

中文引用格式:赵 新,尹忠海,周 诚,等. 基于事件驱动 CPS 体系架构的层级模型[J]. 计算机工程,2018,44(4): 81-88.

英文引用格式:ZHAO Xin, YIN Zhonghai, ZHOU Cheng, et al. Hierarchical Model of CPS Architecture Based on Event Driven[J]. Computer Engineering, 2018, 44(4): 81-88.

Hierarchical Model of CPS Architecture Based on Event Driven

ZHAO Xin, YIN Zhonghai, ZHOU Cheng, LIU Bin, LI Mingjie
(College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

[Abstract] In order to improve the flexibility of Cyber-Physical System(CPS), the hierarchical architecture model of CPS is put forward. The essence and characteristics of CPS are described. The process of event driven is described in CPS. The modular of CPS is taken as an individual, and the hierarchical structure of CPS and the architecture are constructed. Based on the event, the semantic of the hierarchical model is constructed. The results of the practical application show that the model has a clear structure and high flexibility, which is easy for application to understand.

[Key words] Cyber-Physical System(CPS); architecture; event driven; hierarchical model; smart home

DOI:10.3969/j.issn.1000-3428.2018.04.013

0 概述

在传统的有关计算系统和物理系统的观念中,信息世界与物理世界是分开的,因此,各领域中信息基础设施建设与物理基础设施建设是相互独立的。随着信息化和网络化的飞速发展,现有的技术已不能满足人们的需求,因而人们对技术提出了更高的要求。物理世界正朝着人们期望的物理世界与信息世界相互融合和统一的方向发展,在这样的驱动下,信息物理融合系统(Cyber-Physical System, CPS)技术应运而生。CPS 从广义上理解,就是一个在环境感知的基础上,深度融合了计算、通信和控制能力的可控可信可扩展的网络化物理设备系统,它通过计算进程和物理进程相互影响的反馈循环实现深度融合和实时交互来增加或扩展新的功能,以安全、可靠、高效和实时的方式监测或者控制一个物理实

体^[1]。CPS 的最终目标是实现信息世界和物理世界的完全融合,构建一个可控、可信、可扩展并且安全高效的 CPS 网络,并最终从根本上改变人类构建工程物理系统的方式”^[2-4]。CPS 将改变人与物体、物体与物体的交互方式,其应用领域非常广泛,包括智能电网系统、智能交通系统、航空航天电子系统、智能医疗系统、信息家电系统、环境监测、智能建筑、工业控制、国防系统、武器系统等^[5]。如何将这个复杂系统搭建起来,引起越来越多的学者研究。

文献[6]根据 CPS 的概念和特性,构建了 CPS 的三层体系架构,分别为包含实体的物理层、将资源互连互通的网络层和为用户服务的应用层。文献[7]提出了 CPS 的典型逻辑的体系架构,其中包括感知执行层、数据传输层和应用控制层。文献[8]中指出 CPS 体系架构主要由基于系统视图的、基于功能视图的和基于技术视图的组成。

基金项目:国家自然科学基金(61472443)。

作者简介:赵 新(1993—),男,硕士,主研方向为智慧城市、人机交互;尹忠海,教授;周 诚、刘 斌,博士;李明杰,硕士。

收稿日期:2017-04-17 **修回日期:**2017-06-11 **E-mail:**zhaoxin_zx2016@163.com

本文对 CPS 体系结构进行研究,针对 CPS 的本质和特性,提出基于事件驱动的 CPS 体系架构层级模型。

1 本质特性

CPS 系统是将物理世界与信息世界高度融合的系统,是一个大规模、复杂的异构系统。不同于因特网和物联网,存在着自己独特的特征。下文从系统的本质和特征两方面来描述 CPS 系统。

1.1 系统本质

根据 CPS 的定义,以及文献[9]中的描述,将 CPS 系统的本质分为 4 个方面,即深度融合、智能感知、泛在互联和交互协同。4 个方面存在着相应的关系,智能感知是基础,泛在互联是特性,交互协同是方法,深度融合是目的。

1) 深度融合。深度融合有两方面的含义:一方面,CPS 是信息世界和物理世界的深度融合,通过 CPS 实现人机之间的交互,从而改变人与物体、物体与物体交流的方式;另一方面,CPS 是计算系统、通信系统、感知系统和控制系统的紧密融合,最终形成一种感知——控制系统,来实现与物理世界之间的互动。

2) 智能感知。对于物理世界的感知是 CPS 系统实现的基础,通过传感器感知得到物理世界的变化信息,经过处理器生成控制指令来反作用于物理世界。而 CPS 系统的感知并不是对所有的物理世界的变化都要生成信息传递给系统,它只是根据系统现有的状态感知相应需要的变化信息,再将信息传递相应的处理单元,达到智能感知的目的。

3) 泛在互联。CPS 系统是大规模的、多子系统的、异构的系统,实现这些子系统之间的互联互通,是实现 CPS 系统的基础。利用有线、无线、4G 等类型的通信网络实现 CPS 的大规模的泛在互联,只有系统之间互连互通,才可以实现 CPS 的另一个特性——交互协同。

4) 交互协同。CPS 系统不仅要实现人与物理世界的互动,还要实现个体之间的交互协同。泛在互联实现的是互连互通,而交互协同实现的是个体之间的互操作,也就是某个个体可以控制另一个个体实现相应的指令,而不需要经过控制个体的处理器来做决策。个体之间的交互协同的实现,不需要每个个体都掌握全局的信息,从而节省大量的资源。

1.2 系统特性

系统的本质是区别于其他系统不一样的方面,而系统的特征是该系统必须具备的。将系统的特性分为复杂性、异构性(多样性)、混杂性、灵活性、时间关键性、自治性、海量性^[10-11]。

1) 复杂性。文献[1]指出 CPS 是一个多维度的、动态的、大规模的非线性系统,具有高度的复杂性,通过计算进程和物理进程相互影响的反馈循环,

实现深度融合和实时交互来增加或扩展新的功能,具有复杂系统的“涌现”特质。CPS 系统是将通信、计算和控制功能于一身的网络化的智能系统,每个组件都具有通信、计算和控制的能力,而将所有组件统筹起来,就会存在许许多多的复杂问题,因此,复杂性就是系统的重要特性。

2) 异构性(多样性)。CPS 又是一个异构的分布式系统,分布异构性是 CPS 的一种组成特性。其异构性表现为以下 3 个方面:(1)传感器、执行器及通信网络部件的异构,系统由异质的物理设备构成;(2)内部信息的异构,系统涉及多样的异构数据需要传输和处理,表现为数据的多模多态性;(3)系统内部处理进程的异构,同时包含计算进程、物理进程及其相互影响的反馈循环,同时包含时空两方面的因素。CPS 的异构性导致系统的混杂性,是系统构建与建模的最大挑战。

3) 混杂性。混杂性是 CPS 的一种内在组织机制特性,CPS 系统通过计算进程和物理进程相互影响的反馈循环实现深度融合,通过实时交互来扩展新的功能,这导致了系统的处理对象既有数字的变也有模拟的,既有离散的也有连续的,既有从静态的也有动态的,是一个多模、多态计算对象并存的系统。在微观方面,CPS 系统在某个时间片内表现为连续性的演化,是一种基于因果模型的演变,在宏观方面,在整个生存期内则又表现为离散状态的迁移,而且两者交替演进,形成复杂的动态过程并生成新的功能。这种计算进程和物理进程深度耦合所带来的混杂性是 CPS 系统重要特征,混杂性也构成了 CPS 研究的关键挑战,CPS 的混杂系统建模是一个重要研究方向。

4) 灵活性。CPS 的目标是完成各种任务,那么各种资源要能够根据任务的需要,动态的重组和重配置。系统中的组件应该具有根据具体需要,随时随地地加入或退出的能力。再加上系统中某部分组件的毁坏,系统要能够自由的补充。如感知设备电池耗尽,要能够自动组织其他的设备或资源来确保感知设备的正常运行。

5) 时间关键性。时间关键性是 CPS 的一种内在本原特性,CPS 系统必须对物理世界动态演变做出响应,时间敏感性取决于应用的实际要求,计算组建需要实时掌握物理设备的运行状态参数,相关决策控制指令需通过网络由物理设备执行,信息获取和提交的实时性也会影响感知精度和决策的准确性,这对计算进程的时间有效性要求很高,对网络实时性要求也非常高,新一代网络是建立高性能 CPS 的关键。因此,时间关键性是 CPS 的一种内在本原特征,不能保证时间关键性的系统从本质上不能称为 CPS 系统。

6) 自治性。由于 CPS 系统是网络化的智能系统,因此自治性是必须满足的。CPS 系统是物理世界和信息世界的高度融合,物理世界产生的变化被

智能感知,形成相应的指令传递给处理器,处理器进行处理,生成控制指令控制执行器反作用于物理世界,进而形成反馈的感-控系统。而整个过程中应该是系统的自我决策、自我控制,人在整个过程中的作用是相对较小的。

7)海量性。海量信息性来源于 CPS 的复杂性、分布异构性、时间关键性等,由于 CPS 可视为一组物理设备组合而成的智能网络,网络中的智能设备需要进行实时数据采集和交互,CPS 中有海量多源异构信息需要实时处理和传输,如何传输、处理、存储系统中的海量信息是决定 CPS 性能的关键因素,信息融合是构建高效 CPS 关键技术。

2 事件驱动

如何实现物理世界与信息世界的完全融合成为实现 CPS 系统的重大挑战^[12]。文献[13]提出事件可以很好地将物理世界与信息世界连接起来,用来实现 CPS 系统。事件是实现混杂的、大规模的、异构的、多维的非线性的 CPS 系统一种较好的模型,并且事件模型是表示物理世界变化的一种较为自然的模型。

2.1 事件

事件是动作发生的指示符,用来指示什么导致了模型中状态的变化。事件可以包含一个或者多个参数,这些参数用来描述事件的属性、属性值、事件可信度和事件发生的组件标识^[14-15]。

假设事件一般用四元组来表示事件:

$$Event = \{ Id_{Event}, Att_{Event}, Att-val_{Event}, Time_{Event}, Space_{Event}, Con_{Event} \}$$

其中, Id_{Event} 表示事件 $Event$ 发生在组件上,此组件的名字,用来标识, Att_{Event} 表示事件 $Event$ 的属性集, $Att-val_{Event}$ 表示事件 $Event$ 的属性对应的属性值集, $Time_{Event}$ 表示与事件 $Event$ 相关的时间信息, $Space_{Event}$ 表示与事件 $Event$ 相关的空间信息, Con_{Event} 表示事件 $Event$ 的可信度。

例如,事件 A 表示有关卧室的环境温度,如 $A = \{ sen, Tem, 30\text{ }^{\circ}\text{C}, PM(3:00), bedroom, 0.9 \}$ 表示,事件 A 发生在组件 sen 上,温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,发生时间为下午 3:00,地点为卧室,该事件的可信度为 90%。

2.2 事件驱动流程

物理环境和对象状态的逐渐变化构成系统状态的演变,这种状态的渐变达到一定程度则触发具体的 CPS 事件,控制命令的执行也会触发事件,形成如下图所示的计算进程与物理进程的交互过程。CPS 的事件驱动性来自于系统的时间关键性、自主性及异构性等,事件驱动性也带来了 CPS 系统网络在传输机制上的变革,在 CPS 内部,信息的传输不再仅基于请求/应答或发布/订阅机制,更主要的一种机制是主动推送,实现按任务、角色、权限、状态的信息与事件直接即时单/组/广播推送。

如图 1 所示,传感器智能感知物理世界的变化生成未经处理的 CPS 事件,然后经过事件处理得到处理后的事件交给计算单元,计算单元综合处理生成决策事件,决策单元根据事件的优先级等,形成控制事件传递给执行器,执行器执行控制事件触发的状态转移后反作用于物理世界,物理世界发生相应的变化。这样,整个事件驱动的过程形成了 CPS 系统的反馈控制环。

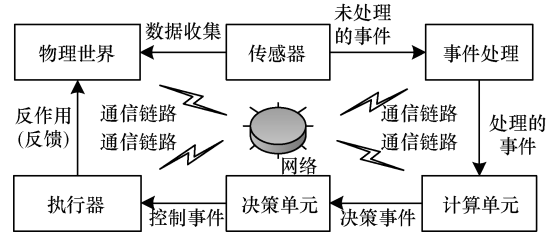


图 1 CPS 事件驱动流程

3 体系架构

CPS 是高效能的网络化的智能信息系统,通过一系列计算单元和物理对象在网络环境下的高度集成与交互提高系统在信息处理、实时通信、远程精准控制以及组建自主协调等方面的能力,是时空多维异构的混杂自治系统^[16]。因此,CPS 的体系架构是 CPS 系统的核心技术,是实现 CPS 系统的基础。好的体系架构可以节省大量的资源,可以更加高效地达到系统实现的需要。

CPS 系统既不是简单的分布式系统,也不是简单的集中式系统,CPS 是多子系统异构下的混合系统。实现异构子系统之间的泛在互联和交互协同是 CPS 系统实现的关键,基于此,提出 CPS 体系架构的金字塔模型。

3.1 个体

CPS 中的个体是整个体系架构的基础,建立好 CPS 中的个体,将决定整个系统的功能和灵活性。CPS 系统是深度融合、智能感知、泛在互联和交互协同的复杂系统,根据系统的特性,将 CPS 体系架构中的个体设计如图 2 所示。

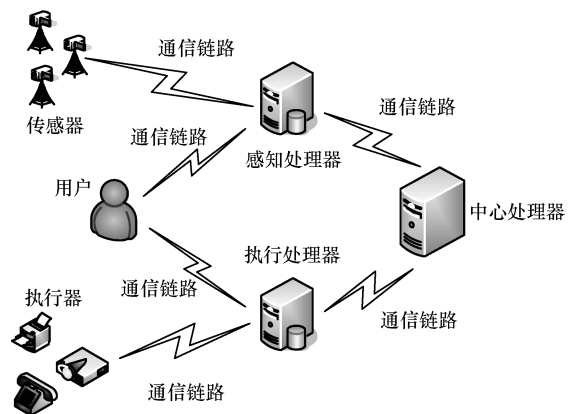


图 2 体系架构中个体示意图

处理器的处理效率决定了 CPS 体系架构中个体的感知、执行和处理信息的效率,因此,将处理器分为感知处理器、中心处理器和执行处理器三部分。这样既可以提高系统效率,也可以更好地实现 CPS 系统中个体之间交互。

定义 1(感知处理器) 将所有被动采集和主动采集的信息进行处理,得到中心处理器需要的信息。信息的来源可以是传感器,也可以是用户,或者是其他处理器。

定义 2(中心处理器) 处理由传感器采集的信息,或者是由其他中心处理器传递过来的信息。经过中心处理器对信息的处理,可以得到要进行的执行的指令或者命令等。

定义 3(执行处理器) 对由中心处理器或者其他中心处理器传递过来的指令或者命令等进行响应,实现对物理世界的控制作用,形成控制的闭环回路,更好地实现 CPS 系统。

如图 3 所示,传感器采集物理世界的的数据或信息交给感知处理器进行处理后,得到系统所需要的感知事件,在经过中心处理器的处理器生成决策事件,传递给执行处理器,执行处理器对决策事件进行优先级等的判断生成最后的控制事件,控制事件经过执行器的响应作用于物理世界,形成 CPS 系统的感控系统。与此同时,用户可以向感知处理器发送数据或信息,来优化、丰富信息的内容,便于更好地实现对物理世界的感知,形成感知事件。此外,用户也可以直接发送控制事件给执行处理器进行控制事件响应的先后顺序的判断,而不需要经过中心处理器的处理,来减少对中心处理器的占用,提高实时

性。同样,用户也可以发送感知事件、决策事件和控制事件给中心处理器,用中心处理器来实现某些相关的功能等。

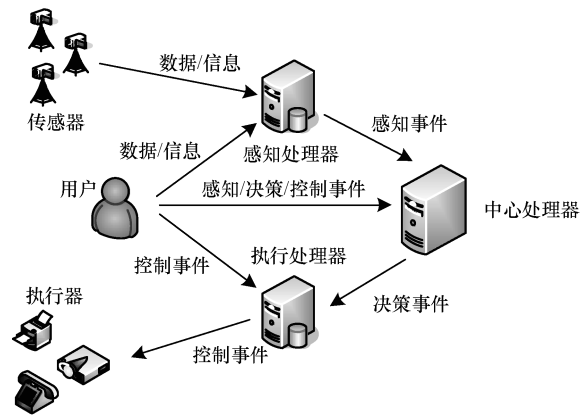


图 3 个体中事件驱动的示意图

3.2 层级

CPS 中的层级是整个体系架构的关键,层级关系是集中式优点的体现,因此,也应是混合式系统的优点。层级是构成庞大系统的基础,不能将任何事情都让最低层的处理器进行处理,这样得到的决策考虑的不够全面,会影响系统的稳定性和精准性;同时,也不能将所有的事情交给中央处理器进行处理,这样不利于系统实时、高效的实现。

中心处理器和代表处理器之间的层级关系如图 4 所示,代表处理器可以直接控制属于该代表处理器下的所有中心处理器。中心处理器不能处理的信息或指令可以通过通信链路传递给代表处理器处理,得到结果后返回给中心处理器做响应。

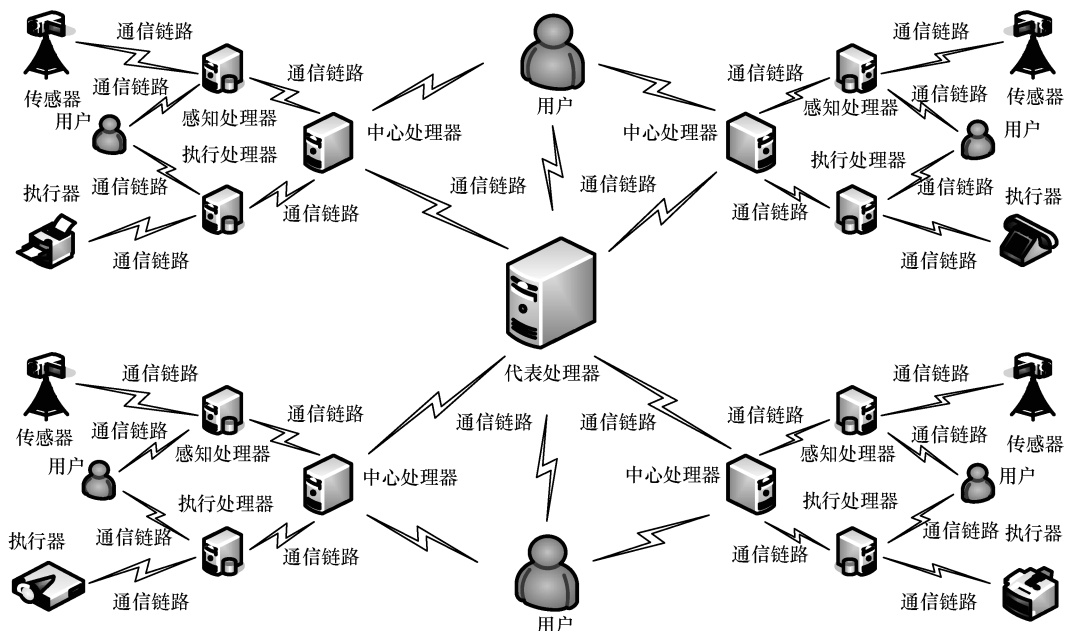


图 4 最低层的层级结构示意图

定义 4(代表处理器) 中心处理器的代表,可以处理中心处理器不能进行处理的信息和控制,可以提供中心处理器不能获得的数据或信息。

定义 5(低级代表处理器) 构成金字塔模型中层级关系的基础,低级代表处理器受到同级处理器和比其高级的代表处理器的控制,低级代表处理器可以控制比其低级的处理器。

定义 6(高级代表处理器) 构成金字塔模型中层级关系的基础,同理,高级代表处理器受到同级处理器和更高级代表处理器的控制,高级代表处理器可以控制低级代表处理器。

如图 5 所示,低级代表处理器和高级代表处理器构成金字塔模型中最为重要的层级关系。层级关系是集中式的代表,但同级处理器之间的互连互通互操作又是分布式的典范。其中,低层代表处理器可能是比其更低级处理器的高级代表处理器,如中心处理器;而高级代表处理器会是更高级代表处理器的低级代表处理器,如中央处理器。最低层的事件驱动示意图如图 6 所示。

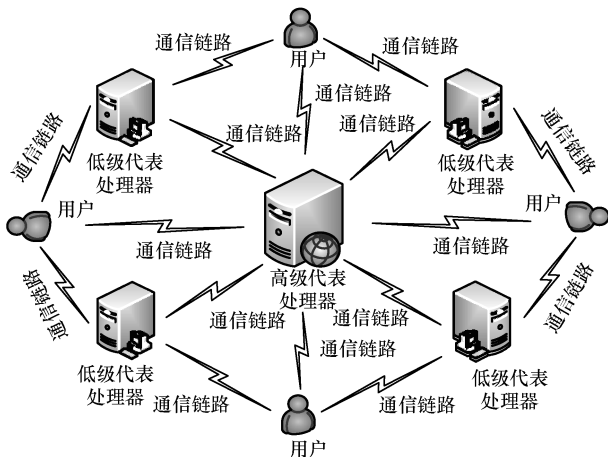


图 5 层级结构示意图

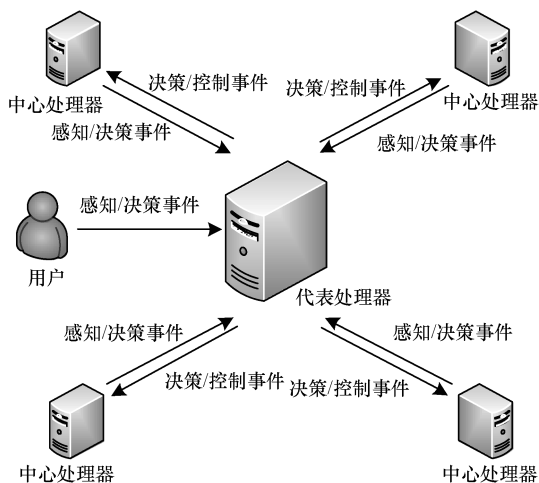


图 6 最低层的事件驱动示意图

如图 6、图 7 所示,各级代表处理器传递感知、决策和控制事件给高级代表处理器处理,经过高级代表处理器的处理,将所得的控制事件和决策事件有返回到相应的较为低级的代表处理器处理响应。并不是将所有的事件都要传递给更高级的处理器来处理,而是将自己处理不了的事件或级别较高的事件交由更高级的处理器来处理。

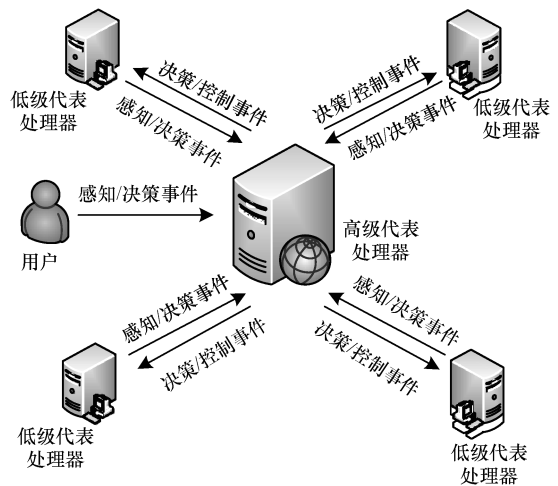


图 7 层级中的事件驱动示意图

3.3 总体

个体的设计体现系统中单独组件功能,层级体现了个体与个体之间的关系,以及层级与层级之间的关系。而总体的设计是复杂系统设计的重点,关系着系统整体运行的稳定性和效率,也是 CPS 系统中总体特性的体现。

定义 7(中央处理器) CPS 系统中层级最高的处理器,可以处理系统中的所有信息和控制指令,并且不会成为其他代表处理器的低级代表处理器。中央处理器可以控制该系统中所有的层级和所有的个体。

层级模型如图 8 所示,层级模型中的事件驱动示意图如图 9 所示,在 CPS 的体系架构中,高级的代表处理器可以直接传递决策事件和控制事件给较为低级的代表处理器,中心处理器是最低级的代表处理器,而中央处理器是最高级的代表处理器。与此同时,较为低级的代表处理器向比其高级的代表处理器的传送感知事件和决策事件。比如,属于同一个代表处理器下的个体,它们可以相互操作。而不属于同一个代表处理器下的个体,如果要进行相互控制必须经过这些个体对应的代表处理器之间的联系,从而实现互操作。此外,高级处理器可以控制所有下属的个体或层级间的代表处理器,中央处理器可以控制所有的代表处理器。

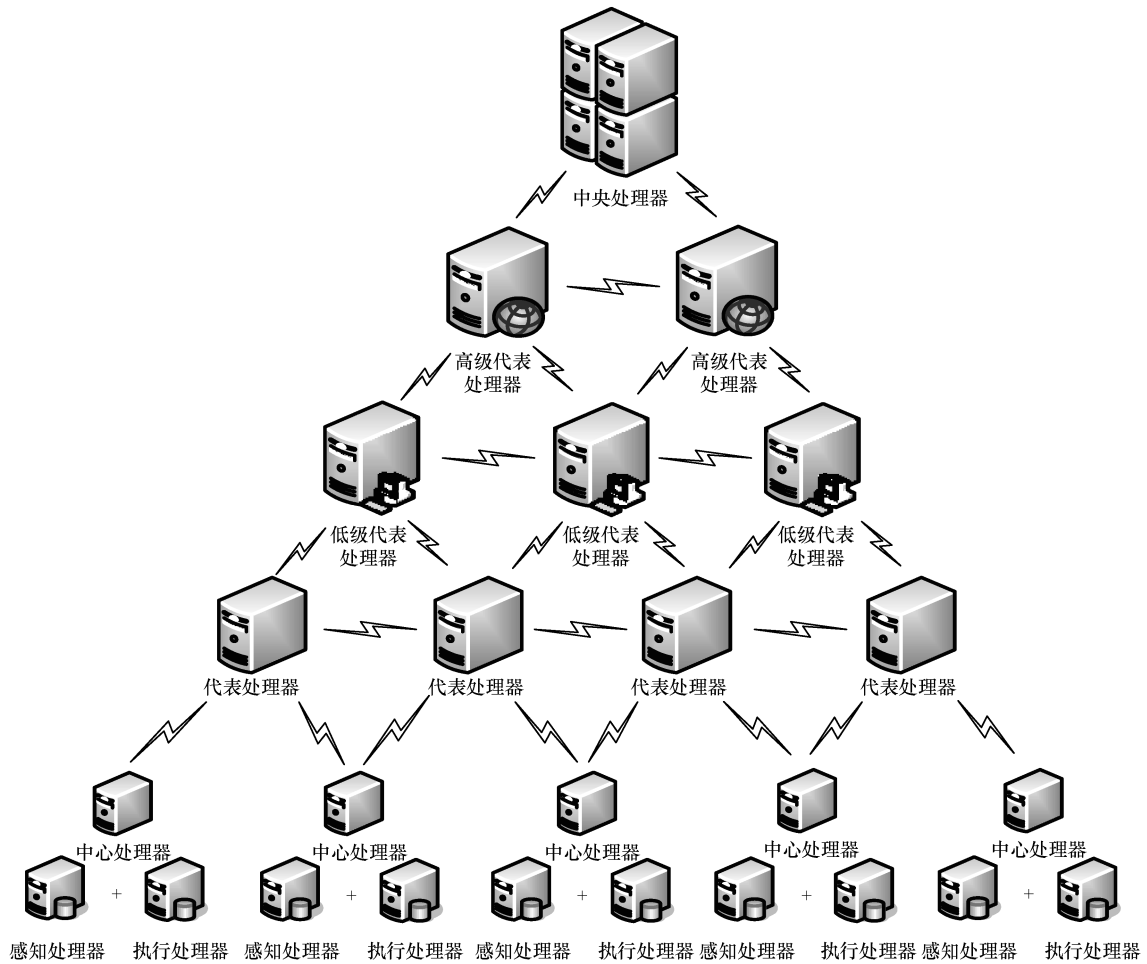


图 8 层级模型

A事件：感知/决策事件
 B事件：决策/控制事件
 C事件：感知/决策/控制事件

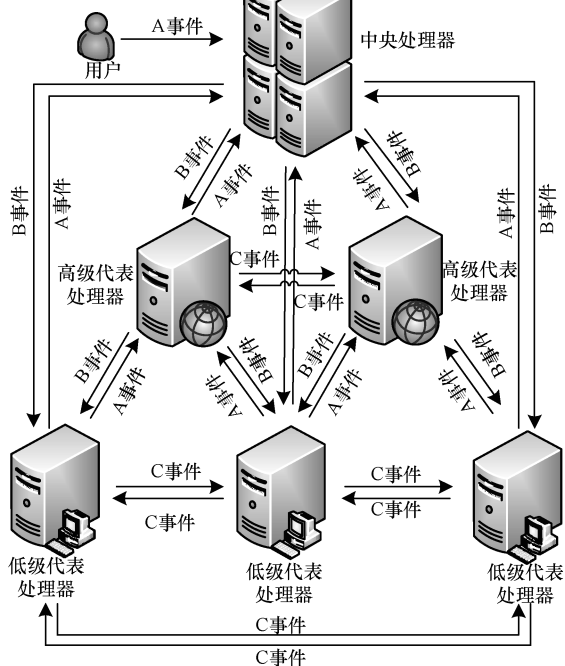


图 9 层级模型中的事件驱动示意图

层级与层级之间是集中式处理,而层级内部是分布式处理,高级的代表处理器可以直接控制最底层的中心处理器,但是不能控制其感知处理器和执行处理器。这样就形成了层级之间集中式、层级内部部分布式的混合式的体系架构。

4 应用举例

智能家居系统利用先进的计算机技术、网络通信技术、综合布线技术,将与家居生活有关的子系统有机结合在一起,通过统筹管理,使家居生活更加舒适、安全、有效。智能家居系统是一种具体的 CPS 系统,本文以卧室、客厅中的照明系统、空调系统、遮阳通风系统为例,验证 CPS 体系架构的层级结构模型^[17-19]。

4.1 个体应用举例

本文以卧室的照明系统、空调系统、遮阳系统和客厅的照明系统、空调系统、遮阳系统作为 CPS 体系架构中的个体。这些个体的结构类似,如图 2 所示,只是每个个体的感知的变化和控制指令不尽相同。比如,卧室的照明系统,如果人们进入了睡眠状态,其应该调整其灵敏度,不会因为各种小声音使灯打

开,影响人的休息。而在书房中的照明系统与卧室的照明系统是不一样的,客厅中的照明系统会根据人看书的时间以及外部环境的亮度,调节灯的明亮程度,使人们进行舒适的阅读。其他几个个体之间也存在类似的不同,而不同性能的个体之间的不同是比较大的。

4.2 层级应用举例

将卧室的照明系统、空调系统和遮阳通风系统作为一个代表处理器下的 3 个个体,同样,客厅的

3 个子系统形成各自的代表处理器下的单独个体,如图 10 所示。照明系统可以直接控制空调系统和遮阳通风系统,同样,其他 2 个系统也可以控制照明系统,都不用经过代表处理器的处理,可以直接传递控制指令给相应的响应部件。比如,空调要进行升温操作,可以直接控制遮阳通风系统关上窗户,这时不用将信息传递给遮阳通风系统的处理器,直接传递给执行处理器即可。实现物体和物体直接的互操作,节省大量的资源。

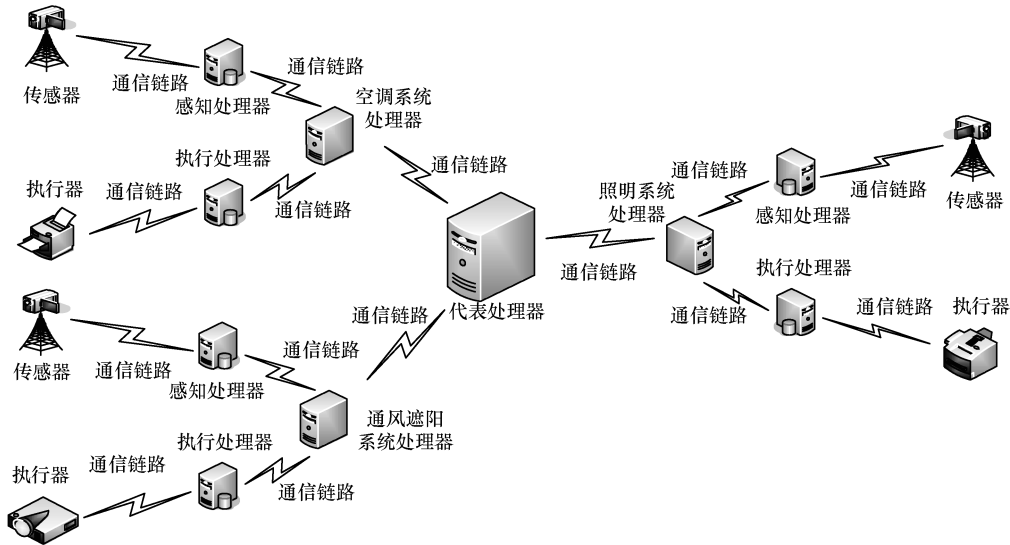


图 10 智能家居中卧室层级结构示意图

4.3 总体应用举例

针对卧室和客厅中的照明系统、空调系统和遮阳通风系统会形成如图 11 所示的体系架构的层级结构。

比如,人从卧室到客厅,卧室照明系统发送指令给自己的代表处理器,然后在传递给客厅的代表处理器控制客厅的灯亮。此外,个体要控制另一个代表处理器下的所有个体,也是要通过同样的过程进行控制。

经过对智能家居系统的体系架构的设计,可以验证 CPS 体系架构的层级结构模型的有效性,并继承了集中式和分布式相对应的优点,得到的效果也表明了该体系架构既优于集中式的系统架构,又优于分布式的系统架构。

智能家居体系架构的语义,如图 12 所示,处理器之间相互传递相关的事件,这里将事件分为 3 类: A 类事件为感知或决策事件, B 类事件为决策或控制事件和 C 类事件为感知、决策或控制事件。同层级之间相互传递的事件为 C 类事件,因为同层级之间可以不经上一级级的允许实现互操作,而不同层级之间是不可以传递 C 类事件。较高级别可以传递 B 类事件给较低层级,这说明较高级别的代表处理器可以实现对较低层级的控制,而较低层级只能传递 A 类事件给较高级别,因为较低层级只能为较高级别的决策和控制提供相应的事件,而不能实现较低层级对较高级别的控制。

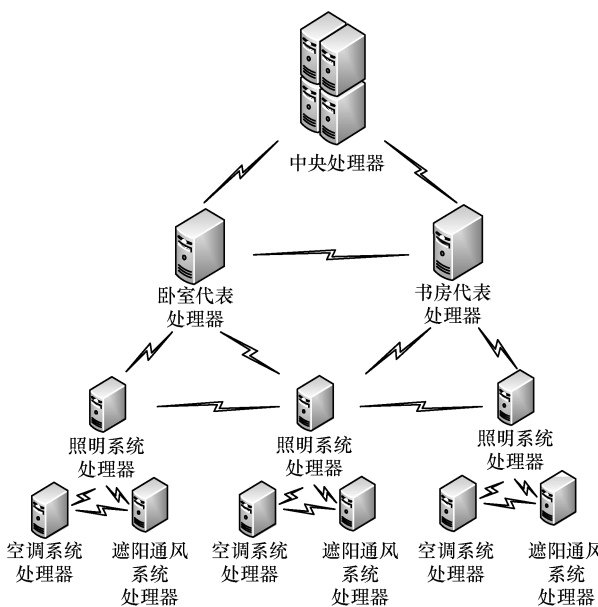


图 11 智能家居系统总体的层级模型

如果卧室里的照明系统要控制客厅里的照明系统,要经过其相应的代表处理器之间的交互来实现。

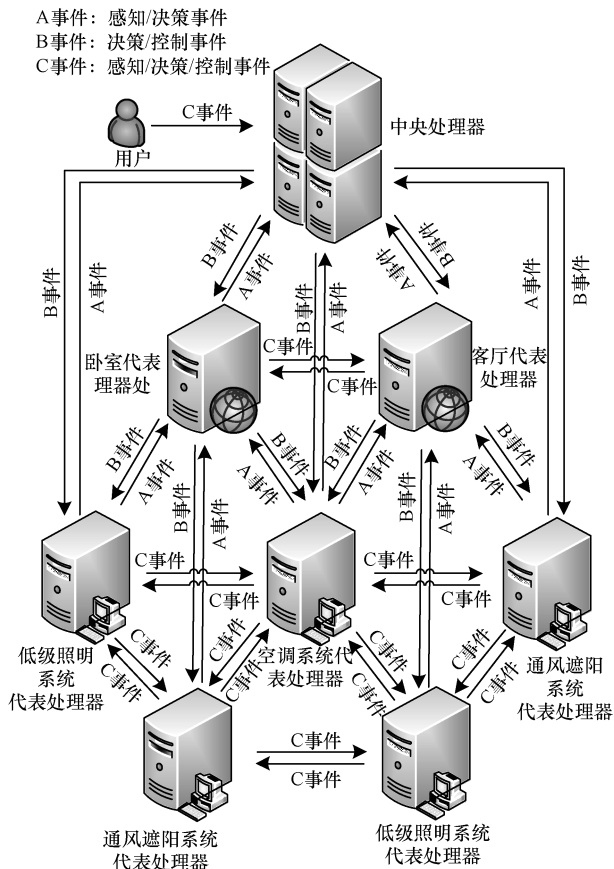


图12 智能家居中事件驱动示意图

文献[6-7]中所提出的CPS体系架构的模型从整体方面将CPS系统分为3层,即物理层、网络层和应用层,并没有详细说明用什么驱动该系统的运行。文献[20]提出的基于数据驱动的事件模型,将离散系统和连续系统联系起来。通过文献中提出的体系架构模型,不能方便地构建具体的CPS系统。

本文提出的基于事件驱动的CPS的体系架构模型,既可以很好地继承数据驱动所带来的优势,也可以在实现上减少系统的负担,因为事件是系统感兴趣的数据,所以对数据进行了进一步筛选。可以在通信、计算和存储以及理解上带来很大的便利,符合人类的思考习惯。此外,本文提出的层级模型可以很好地构造CPS系统,比如智能家居、智能交通以及智慧城市等。并且,通过系统中语义在层级模型中的语义,可以很好地为计算机提供清晰的流程和思路。

5 结束语

CPS是物理世界和信息世界深度融合的大规模、异构的系统,设计好的体系架构,有利于系统的实现。本文提出基于事件驱动的CPS体系架构的层级模型。对系统的本质和特性进行分析,给出事件驱动下CPS系统的事件语义模型,并以智能家居系统为例验证了该系统的有效性。下一步将在此体系架构下,分析整个事件的驱动过程,具体细化事件驱动的各个步骤,从而实现CPS系统。

参考文献

- [1] BAHETI R, GILL H. Cyber-physical systems [J]. The Impact of Control Technology, 2011, 12: 161-166.
- [2] 景博, 周伟, 黄以锋, 等. 信息物理融合系统及其应用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2014, 15(2): 1-6.
- [3] LEE E A. Cyber physical systems: design challenges [C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Object Oriented Real-time Distributed Computing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2008: 363-369.
- [4] RAJKUMAR R, LEE I, SHA L, et al. Cyber-physical systems; the next computing revolution [C]// Proceedings of Design Automation Conference. New York, USA: ACM Press, 2010: 731-736.
- [5] WOLF W. Cyber-physical systems [J]. Computer, 2009, 42(3): 88-89.
- [6] 李仁发, 谢勇, 李蕊, 等. 信息-物理融合系统若干关键问题综述 [J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(6): 1149-1161.
- [7] TAN Yin, GODDARD S, REZ L C. A prototype architecture for cyber-physical systems [J]. ACM Sigbed Review, 2008, 5(1): 1-2.
- [8] 何明, 梁文辉, 陈希亮, 等. CPS系统体系结构顶层设计研究 [J]. 计算机科学, 2013, 40(11): 18-22.
- [9] RAJKUMAR R, LEE I, SHA L, et al. Cyber-physical systems; the next computing revolution [J]. Adream, 2010, 14(6): 731-736.
- [10] 黎作鹏, 张天驰, 张菁. 信息物理融合系统CPS研究综述 [J]. 计算机科学, 2011, 38(9): 25-31.
- [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): 295-299.
- [12] DERLER P, LEE E A, VINCENTELLI A S. Modeling cyber-physical systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1): 13-28.
- [13] TALCOTT C. Cyber-physical systems and events [J]. Software-intensive Systems and New Computing Paradigms, 2008, 5380: 101-115.
- [14] TAN Y, VURAN M C, GODDARD S, et al. A concept lattice-based event model for cyber-physical systems [C]// Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-physical Systems. New York, USA: ACM Press, 2010: 50-60.
- [15] 钟智, 罗大庸, 樊晓平, 等. 基于事件驱动的无线传感器网络数据收集协议 [J]. 计算机工程, 2012, 38(11): 69-72.
- [16] 曹科宁. 面向大规模CPS系统的复杂事件处理技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [17] 吕莉, 罗杰. 智能家居及其发展趋势 [J]. 计算机与现代化, 2007(11): 18-20.
- [18] 李晓华, 赵现纲. 一种基于多Agent的智能家居系统研究与设计 [J]. 计算机工程, 2006, 32(21): 233-234.
- [19] DAVIDOFF S, MIN K L, YIU C, et al. Principles of smart home control [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 4206: 19-34.
- [20] 杨帆, 刘彦, 李仁发, 等. 一种基于数据驱动的CPS建模方法研究 [J]. 计算机学报, 2016, 39(5): 961-972.

编辑 刘冰