

信息—物理融合系统中建模方法综述

李仁发, 杨帆, 谢国琪, 黄晶, 段梦琴

(湖南大学嵌入式与网络计算省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要: 信息—物理融合系统 (CPS) 不仅包含离散的计算过程、网络通信, 还涉及处理连续的物理事件。从 CPS 所涉及的离散系统和连续系统 2 个方面出发, 分别介绍了当前存在的一些建模理论及基于该理论的开发工具, 并概括总结了它们在 CPS 领域的应用。对 CPS 亟需解决的问题做了简单介绍, 并在此基础上提出了解决 CPS 建模问题可能存在的 4 种可行的方法, 为 CPS 建模研究者提供参考。

关键词: 信息—物理融合系统; 建模理论; 建模工具; 离散系统; 连续系统

中图分类号: TP301; TP391

文献标识码: A

Survey of modeling methods in cyber-physical system

LI Ren-fa, YANG Fan, XIE Guo-qi, HUANG Jing, DUAN Meng-qin

(Key Laboratory for Embedded and Network Computing, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Cyber-physical system (CPS) not only contains the discrete calculation process and network communication, but also involves in the handling of continuous physical events. Based on discrete system and continuous system, some existing modeling theories and development tools were introduced, and their applications in CPS were summarized, and a brief introduction on how to solve the problem was given. Finally, on the basis of the difficulty to be solved in CPS, four practical ways for researchers were put forward to solve the CPS modeling problem.

Key words: cyber-physical system, modeling theories, model tools, discrete system, continuous system

1 引言

传统的计算机系统和控制系统在科学世界中得到了广泛的应用, 但它们将信息世界与物理世界分开处理^[1], 不仅加大了融合的难度也导致针对两者研究思维模式的不一致。信息物理融合系统^[2] (CPS, cyber-physical system) 自被美国国家自然科学基金委在 2006 年提出以来, 获得了全世界范围内的广泛关注, 被认为有望在计算机、互联网之后掀起一股新的科技浪潮^[3]。CPS 是计算与物理过程的统一, 嵌入式计算机与网络监测控制物理过程, 而物理世界则反馈、影响计算进程, 通过反馈循环实现计算与物理世界的深度融合与实时交互^[4]。关于 CPS 的具体定义, 国内外研究学者尚存在一定的争议。总之在 CPS 中, 虚拟的计算和网络不只是在物理过程中的简单嵌入; 同样在

物理过程中, 不再简单地认为虚拟的计算和网络是其组成部分, CPS 是虚拟的计算和网络与物理过程在各种不同系统规模和各个系统层次上的紧密集成, 它的开发过程必须具有良好的理论基础和可靠性保证。CPS 既不是今天的嵌入式或实时系统, 也不是现有的传感器网络, 它一般具有资源受限、实时响应、容错、高安全性等特点, 对实时性、可靠性等非功能性属性有较高的要求^[5], 由于融合了各种复杂因子, 包括计算机、网络、物理世界等, 使系统规模趋于庞大, 如何设计与实现高质量的 CPS 系统, 并有效地控制开发与时间与成本, 是学术界与工业界共同面临的难题。

2 CPS 特点及其开发方法

2.1 CPS 的特点

CPS 的核心概念如图 1 所示。Cyber-physical

收稿日期: 2015-06-24; 修回日期: 2016-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61173036)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61173036)

system 中 cyber 代表传统的计算机及网络通信等所组成的信息系统，包括信息化的计算过程、逻辑的通信网络和来自物理世界的反馈等^[2]。Cyber 中体现的问题多为现在计算机科学、信息科学等专业领域所面临的问题，它采用的是一种离散的思维方式，即考虑将问题转化为原始的计算机能够处理的二进制问题，进而做下一步的分析与处理。Physical 代表客观存在的物理世界，如人、自然现象、事物等按照一定的自然规律在物理时空特性下进行有序或无序的运动。现阶段此类问题的研究多集中在化学土木、工程机械、地理气候等领域模块。CPS 提出将之前很少结合但关联甚多的 2 个部分实现一种深度融合及交互，使物理设备具有计算、通信和自主控制的能力，在当今社会具有重大意义。

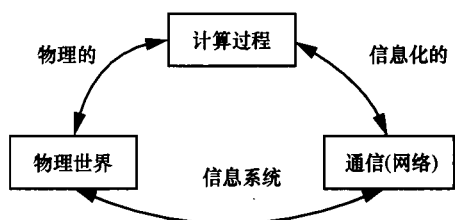


图 1 CPS 的核心概念

国内对于 CPS 的研究紧随欧美步伐，也做了初步探索。华东师范大学何积丰院士认为 CPS 的核心概念可以总结为 3C^[6] (computation, communication, control)，即 CPS 是深度融合了计算、网络通信及控制设备的复杂系统，使客观存在的事物具有自主计算的能力，其主要特点可以归纳为以下几个部分^[7]。

- 1) CPS 追求计算过程与物理世界的深度融合，实现两者之间的互通互信互控。
 - 2) CPS 必须具有时间和空间的概念。流逝的时间、物体所处的地理位置是物理事件存在的必要条件，也是所有事物的本质特征。
 - 3) CPS 不仅涉及计算过程，而且需要面向复杂的物理环境及事件，通过网络通信将两者联系起来，需要处理的数据较之前传统的嵌入式系统呈倍增长，那么对于海量数据的处理是不可避免的。
 - 4) CPS 系统必须能随着环境的变化而自主地进行动态调整，具备自适应、重配置的能力。
 - 5) CPS 普遍要求系统具有实时性、安全可靠、稳定性等特征。
- 总之，CPS 强调将物理设备联网，实现现有的计算系统与物理过程的融合，最终实现 CPS 系统计

算、通信、精确控制、远程协作和自治五大功能。这种具有全新意义的系统必将给信息科学，尤其是对 CPS 开发方法的研究带来很大挑战。

2.2 CPS 开发方法

传统的软件开发方法或嵌入式系统开发方法都采用直接使用编程语言的方式来进行设计与实现：面向过程的设计模式，将数据与操作分开处理，使系统设计与分析成为 2 个独立的模块，不能实现自然的衔接，其模块重复利用率也较低，加大了开发难度；而结构化和面向对象方法虽然解决了数据与操作相分离的问题，但在系统开发阶段的早期不能对其进行宏观整体上的把握，在系统的分析阶段，一旦发现存在问题，则可能引起反复修改。总而言之，使用编程语言直接开发对具有复杂功能且非功能性属性要求极高的 CPS 系统而言，将会变得繁琐而复杂，系统出错甚至失败的可能性陡增。一种可行的方案是采用分层理论，即将大且复杂的系统逐一分解成小问题然后一一解决。基于模型驱动的开发方法 (MDD, model driven development) 是分层理论在系统开发过程中的实际应用，它能在宏观上把握系统，并在设计阶段分析验证，减少后期错误所带来的反复修改，提高系统开发质量，并有效控制开发与成本^[8]。因此，基于模型驱动的设计与开发方法 (MDD) 成为 CPS 系统的重要研究内容。图 2 给出了 MDD 的基本流程。

整个 MDD 开发方法都是在模型的基础上对系统进行设计、分析、开发与验证。模型是系统的抽象描述与解释，提供了系统的整体框架^[9]。无论是物理世界的化学反应、动力学规律、自然现象、进化规律还是计算世界中的状态转变、数据传输、系统抽象等，模型都可以过滤系统非本质的细节信息，而抽象出待处理的基本问题，使之更容易理解。具体来说，采用基于模型驱动的开发方法能使设计者从宏观、整体的角度把握系统的设计及非功能性属性的描述；加强开发与设计人员之间的沟通，有利于尽早发现问题；精确的模型可以帮助设计者在开发前对系统进行可视化，便于在设计前验证分析，缩短开发周期及成本；代码自动生成技术的成熟，为开发人员提供了模块化的代码生成接口，实现后的代码规范易懂。总之，随着现实的迫切需求及 CPS 系统的复杂化，采用基于模型驱动的开发方法来研究 CPS 问题成了众多研究者共同关注的问题。

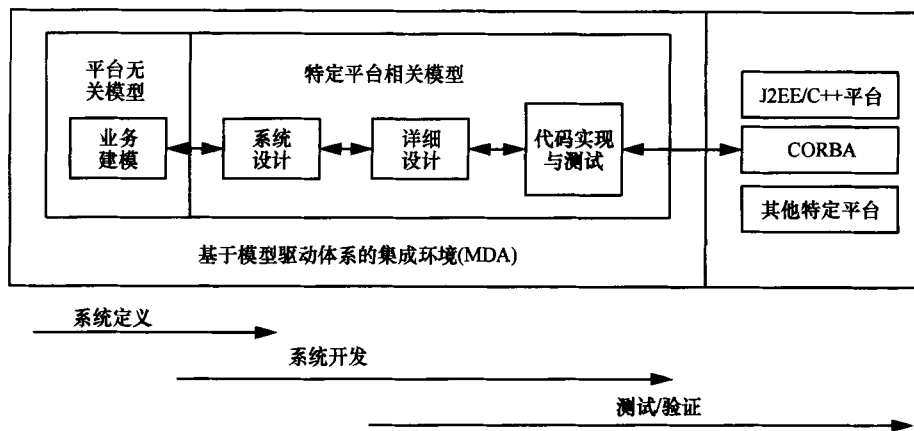


图 2 MDD 开发基本流程

3 现有建模方法介绍

CPS 建模的对象包括计算过程、网络通信、物理事件 3 个方面，而计算通信与物理过程采用的建模方式存在本质上的差异，前者采用的是面向离散状态的使计算机能够处理的离散模型，而后者通常使用微积分方程的方式来描述，面向 CPS 系统的建模必将统一上述 2 种建模方式^[10]。因此本文将从离散建模、连续建模、混合建模 3 个方面来分析概括现有的一些建模方法及其各自的应用领域。

3.1 离散系统建模方法

3.1.1 形式化建模方法

形式化建模方法是以数学理论为基础在整体或局部上对系统进行抽象，提取所关注的系统属性，模拟系统行为，通过明确定义状态和操作来建立系统模型，在此模型基础上对系统行为进行分析验证。目前，主流的形式化建模方法主要包括：形式化推理、Petri 网、时间自动机等，另外也可以通过扩展或自定义新的建模语言与工具来建模。

1) 形式化推理方法

推理证明通过数学逻辑描述系统某一方面的特性，其逻辑形式由公理和推论组成的形式化规则给出。无论选择哪种推理方式，都必须有定理证明器的支撑。现存的定理证明器有：检验证明器、复合证明器、用户推演推算工具。较为常用的检验证明器包括 HOL、Coq、LCF 和 LEGO^[11]；复合证明器包括 PVS^[12]、Analytica（将符号代数和定理证明复合）和 Step（将决策过程和交互式推理验证复合），用户推演推算工具包括 RRL、LP、ACL2、Eves 等^[13]。

形式化推理在早期的电路设计及网络协议中取得了巨大的成就，但将其应用到 CPS 系统中却存

在问题：CPS 系统远比电路系统和网络协议复杂，前者是后者的超集，它不仅需要描述系统本身的行为及属性，还应对其存在的自然属性给予定义，如时间的流逝、所处的物理空间等。之前的嵌入式系统研究人员也发展了多种推理语言来定义较为复杂的系统，包括自动机、状态机、线性逻辑、进程代数、一阶/高阶逻辑、计算树、命题逻辑、微积分等。所有这些推理形式的发展为形式化描述 CPS 系统奠定了基础，但正式的推理过程是比较复杂的，需要研究者具有很强的数学知识且逻辑性很强。

2) Petri 网建模

Petri 网适合描述系统的并发与异步行为，是计算机领域比较传统的模型分析及验证方法，应用非常广泛。通常情况下，将扩展信息引入 Petri 网能够增大描述能力，且不会对 Petri 网结构的描述以及同步和并发的表达造成破坏。基于 Petri 网的验证工具目前比较通用的是 EXSPECT。

CPS 系统一般具有强实时、高可靠、安全可信等特点。针对系统非功能性属性的验证，一些研究人员也发展了不同的 Petri 理论。文献[14]针对 CPS 高可信及 Petri 网本身面临的系统状态空间爆炸问题，提出了面向对象的 Petri 网 (OPN) 模型，OPN 采用灵活的方式应对 CPS 中复杂的物理环境，并扩展了一些描述语义以更好地抽象 CPS 的基本属性。文献[15]针对 CPS 面临安全入侵情况时，系统能做出可靠性的回复及响应，采用随机 Petri 网 (SPN) 理论来对系统进行分析验证，更好地保证了系统面临未知攻击时的安全可靠特征。另外，在 CPS 实时性的验证、系统设计领域，Petri 网理论也得到了广泛的应用。

传统的 Petri 理论不包含概率、时间、可靠度等

属性，只支持对系统的活性、是否死锁以及有界性等定性分析，不能满足 CPS 复杂的过程定量及非功能性属性的描述。一般的做法是扩展分析验证所需的因子，如时间、概率、通信开销等。然而 Petri 网对于处理连续的物理事件缺乏相关方面的研究，虽然有学者研究连续因子的扩展，但其本质是将连续因子离散化，对于复杂物理事件的描述缺乏理论基础及相关工具。

3) 时间自动机建模

基于时间自动机的模型验证已成为一种公认有效的系统验证方法，并得到了广泛应用。国内外学者在 Alur 时间自动机的基础上发展理论^[4]，开发验证工具，提出各种有效的验证系统实时性的算法，使时间自动机理论发展很快，且取得了长足进步。其主要的仿真工具是 UPPAAL。

对于时间的分析处理是 CPS 不可避免的问题，时间自动机理论在这方面发挥了很重要的作用。文献[16]采用一种可扩展的混合时间自动机理论来对 CPS 系统建模，将带有通信实体的 CPS 系统描述为并行通信原子实体；在行为模式上，将带有行为的个体实体描述为分层的顺序模型。该扩展模型能更好的反映 CPS 系统中的分层、并行及网络延迟等特征。文献[17]提出了面向一维线性空间的时空混合自动机模型 (LISTHA)，每一个变量在给定的时间与空间点上都有一个确定的值与其对应，用来预测一定误差范围内系统可能到达的状态。

时间自动机在 CPS 中的应用，主要用于时间分析，但面向对象都是离散系统。连续事件作为 CPS 中不可或缺的部分，运用时间自动机来验证其实时性还存在很多问题。也有学者考虑在时间自动机的基础上扩展连续事件，但需要与其他的建模语言或形式化方法相结合，其过程相当复杂。

形式化建模方法都是偏向底层的应用，许多高级建模语言都需要结合底层的这些方法才能完成对整个系统的分析与设计。上面所介绍的形式化推理、Petri 网、时间自动机模型在 CPS 中的应用各有所长，其相关特性对比如表 1 所示。

3.1.2 高级语言建模方法

1) AADL

AADL(architecture analysis & design language) 体系结构分析与设计语言，提供了验证系统实时可靠等非功能性属性的方法。它不仅定义了用于描述系统软硬件体系结构的构件，用于描述系统特性的特征、属性等语义，另外还支持用户自定义附件及属性来支持 AADL 的可扩展性^[18]。针对 AADL 不同的应用层次，发展了各种仿真工具，包括：集成开发工具 OSATE、可调度分析工具 Cheddar、自动代码生成工具 Ocarina 等^[8]。

AADL 建模理论及方法学的应用，为 CPS 模型提供了新的研究方向，国内外众多专家学者投入了大量的精力从事相关方面的研究。文献[19]将 CPS 模型中时间的流逝运用 AADL 流的定义来描述，在此基础上对系统的时间信息做进一步的分析验证。文献[20]则通过扩展 AADL 语义语法及描述方式用于 CPS 的建模，扩展了包含上下文环境的物理实体和控制实体用来描述物理事件以及它们之间的交互，在离散的计算系统与连续的物理系统中加入传感器组件和执行器组件 2 种交互实体。文献[21]将 AADL 与面向对象的 modelica 语言相结合对汽车 CPS 系统 (ACPS) 建模，信息部分采用 AADL 和 UML 建模的方式，物理部分则使用 modelica 语言进行描述。另外文献[22~24]也从不同的出发点采用了 AADL 建模理论对 CPS 系统进行建模。

综上所述，在 CPS 系统中应用 AADL 建模理论主要采用以下 2 种方式：1) 扩展 AADL 相关语义及属性，但 CPS 所包含的物理与计算系统不存在统一的标准，且处理方法各异；2) 运用 AADL 与其他语言相结合，充分应用现有的建模理论及开发工具，这样处理则会为语言的统一化标准化提供障碍，也加大了系统融合的复杂度。

2) SystemC

软硬件协同设计建模语言 SystemC 由 OSCI (open SystemC international) 负责开发及维护，以 C++ 语言为基础扩展了一些基本类库，如硬件建模

表 1 形式化建模方法类比

建模方法	应用范围	可扩展性	状态空间爆炸问题	处理连续事件能力	适用工具
形式化推理	较窄	一般	不存在	强	PVS 等
Petri 网	广	优	存在	弱	EXSPECT 等
时间自动机	广	良好	存在	弱	UPPAAL 等

库和仿真核等。其仿真工具主流采用 Synopsys 公司所推出的 CCSS，支持基于 SystemC 的系统设计、仿真及验证，为研究人员提供了统一的系统级开发环境，SystemC 在 CPS 的建模领域也得到了研究人员的广泛关注。文献[25]将时间触发的 CPS 系统分为物理层、网络层和软件层，SystemC 针对信息部分（包括网络层和软件层）建模，其良好的设计连续性，实现了物理系统与信息之间的交互。文献[26]应用 SystemC 对包含电子系统层的无线传感网络建模，并设计交互层模型和混合信号模型。文献[27]则使用 SystemC 创建 CPS 虚拟原型，包括物理环境的虚拟模型和软硬件混合模式下的虚拟原型。

SystemC 支持软硬件协同设计且具有良好的设计连续性等特点为其在 CPS 中的应用提供了基础。现有的基于 SystemC 的研究一般使用合适的物理模拟器或微积分方程描述 CPS 的物理模型，而 SystemC 则负责信息部分的建模及设计，最后利用自定义的接口实现 2 个部分的结合。实际上这只是充分利用了 SystemC 对于信息系统强大的描述能力，其接口的定义方式及选择何种物理事件描述工具都将对最终的设计及实现产生影响，另外 SystemC 不能描述流逝的时间，且在可扩展性及与其他建模语言的兼容性方面也存在着缺陷。

3) Ptolemy

Ptolemy 是加州大学伯克利分校 Edward A.Lee 团队开发的一种设计并发、实时的嵌入式系统建模理论，它致力于集中处理异构系统，最小化不同领域之间语法、语义和模型之间的差异，最大化的实现不同领域设计之间的互操作性，其最大的特点是定义了各种组件之间的交互。其开发工具是所推出的同名开发工具集，目前的版本为 Ptolemy II。

Ptolemy 的设计初衷是面向大型的、复杂的 CPS 系统。文献[28]利用 Ptolemy 支持多计算模型的整合这一特点，在系统级实现了分层混合系统的仿

真，使用状态机与连续系统建立了系统的 Ptolemy 模型，在此基础上做事件检测与变量监控。文献[29]采用 Ptolemy 基于组件的技术，给出了一种包含离散和连续动态系统的建模方法。它利用分层的概念，对其他组件隐藏自身的执行细节，并实现分层计算模型之间的交互，能同时处理连续时间、离散时间和有限状态机模型等。

另外随着科学技术的发展，各种建模语言应运而生。它们从各自的侧重点出发，对基础语法语义甚至图形化的设计方式都进行了明确定义，也应用到了不同场合。但这些建模方法大多集中于某一问题，或面向对象，或面向层次化，或侧重验证分析。为了解决 CPS 带来的新问题，一些研究学者也尝试在这些建模方法上进行相应的扩展。表 2 给出一些高级建模语言及相关特性的对比。

3.2 连续系统建模方法

上述一系列的建模方法都侧重于计算与信息系统中的应用，而物理系统作为 CPS 不可或缺的部分，其动态建模技术必须加以研究。物理世界随着时间的流逝而千变万化，表面上看来其变化规律难以捉摸，杂乱无章，但通过之前物理学家及其他自然科学工作者的研究可以得知物理过程中存在一些普遍性的规律，通过这些定义定理不难建立物理事件的模型，从而在此基础上进行分析验证。如果不考虑 CPS 中的离散—连续结合问题，对于连续的物理事件建模主要分为牛顿力学和参量模型 2 种。

3.2.1 牛顿力学建模

牛顿力学建模方法^[30]顾名思义，即运用牛顿创造的几大定律来分析验证物理过程，建立其系统模型。它包括广义和狭义 2 个方面的理解：狭义的理解即单纯运用牛顿力学知识，建立物理事件的微积分方程；而广义的理解则包括运用所有自然科学知识，如遗传学、化学方程式、几何图形学等，来建立物理系统的模型，并在此基础上做进一步的分析验证。

表 2 部分建模方法类比

建模语言	分类	形式化语义完善性	可扩展性	兼容性	适用工具
Simulink	面向层次化	欠缺	一般	一般	SCADE Suite
SystemC	面向系统结构	欠缺	欠缺	欠缺	CCSS
SmartC	面向层次化	一般	一般	一般	SmartOSEK
AADL	面向系统结构	一般	良好	良好	OSATE
UML	面向层次化	一般	良好	良好	Enterprise Architect
Ptolemy	不同领域的整合	欠缺	一般	一般	Ptolemy

对于连续系统的建模问题，一般的做法是初步建立系统的简单运动方程，以微积分方程 (ODE, ordinary differential equation) 的方式进行描述，并给出系统的属性特征及参量模型在微积分方程中的体现，接下来考虑此类模型的特性，如线性、因果关系和时不变性等，并考虑操作模型时上述特性的变化。图 3 给出了一个飞行器实例。

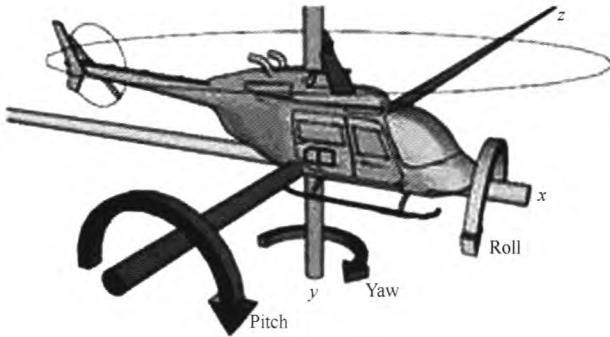


图 3 飞行器模型

物理空间的运动可以表示为 6 个自由度，如图 3 所示。其中 3 个表示三维空间中的位移(x,y,z)，另外 3 个表示三维空间的方向($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)。

空间中物体的位置通过 6 个 $f: R \rightarrow R$ 形式的函数来表示，其中定义域为时间，值域表示 xyz 轴的长度和各个角度的大小，形如此类函数称之为连续时间信号 (continuous time signal)。位移或方向的变化符合牛顿第二定律 (Newton's second law)，与力和加速度有关，速度是位移的一阶导数，而加速度则是位移的二阶导数。其位移、速度、加速度模型根据牛顿定律分别为

$$\text{加速度: } x''(t) = \frac{F(t)}{M}$$

$$\text{速度: } \forall t > 0, X'(t) = X'(0) + \frac{1}{M} \int_0^t (\tau) d\tau$$

$$\begin{aligned} \text{位移: } X(t) &= X(0) + \int_0^t X'(\tau) d\tau \\ &= X(0) + tX'(0) + \frac{1}{M} \int_0^t \int_0^\alpha F(\alpha) d\alpha d\tau \end{aligned}$$

以上是牛顿力学对物理系统建模的一个实例，从表述方式上 (微积分方程) 不难看出建立的是一个基于时间信息的连续系统模型。另外，Verhulst 种群模型、Logistic 模型、Feigenbaum 常数模型等也在不同的领域发挥了不同的作用。

3.2.2 参量模型

3.2.1 节介绍的是从自然科学的角度来处理物理过程，建立输入信号与输出信号之间的关联方程

式，如何从计算机科学的角度来描述这些模型，也成了当前的研究热点之一，其中参量模型提供了一种很好的表述方式。一个基于时间的连续系统可以利用一个具有输入端口和输出端口的盒子来建模^[30]，如图 4 所示。

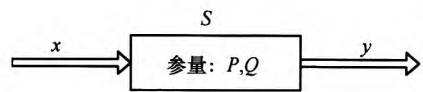


图 4 输入输出参量模型

其中，输入信号 x 和输出信号 y 是基于以下形式的函数：

$$x: R \rightarrow R, \quad y: R \rightarrow R$$

图 4 中的输入部分表示时间 (time)，输出部分则表示在特定时刻的参数值。如果想要明确地建立一个能够实现并在某个特定时刻开始运行的系统模型，则输入部分可用非负实数 R_+ 来替代。则系统模型是一个函数，形如

$$S: X \rightarrow Y$$

图 4 模型形如一个盒子，内部处理在盒子中自行定义，称为参量模型。从计算机的角度来看则面临许多问题。众所周知，计算机只能处理离散的二进制单元，如何处理连续事物或许是计算机体系结构需要考虑的问题，只能适应这种方式，然而计算机的处理已经达到了亿万级的速度，如对连续系统进行无穷级的微分后交给计算机处理也不失为一种可行的方式。

3.3 混合系统建模方法

现实存在的一些系统，不可避免地需要同环境进行交互，以实现智能上的控制，如恒温器、自动导向车、自动水位控制器等。这些系统不仅涉及状态上的转换，也时刻需要传感器、摄像头等获得外界环境数据。

混合系统的应用范围非常广泛，最常见的如家用热水器水位控制及加温系统、车用探测系统、制造业中的制造系统等。对于这类系统的建模比较自由，可以选择各种建模方式，如时间自动机、Petri 网、时段演算 (duration calculus)，也可以采用各种带扩展机制的建模方式。但不可避免的是必须选择合适的连续系统描述方式，并能正确地刻画系统随时间流逝而产生的状态转换及变化。

为了说明混合系统建模方法的应用，考虑一个

弹力球，在时刻 $t=0$ 时，从高度为 $y(0)=h_0$ 的地方开始做自由落体运动，其中， h_0 为初始高度，单位为 m。球在理想环境下自由下落，在 t_1 时刻以 $y'(t_1)<0$ m/s 的速度撞击地面，在球撞击地面时产生输出事件 bump，假设撞击是无弹性的，然后球以 $ay'(t_1)$ 的速度弹回，其中， a 是一个大于 0 小于 1 的常数，球上升到一定高度后又重新落回地面。

这个弹力球的行为可以用图 5 所示的混合系统来描述，它只具有一个模式，即 free。当球没有和地面接触时，其运动符合牛顿定律即如下二阶微分方程

$$y''(t) = -g \quad (1)$$

其中， $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ，即重力加速度。

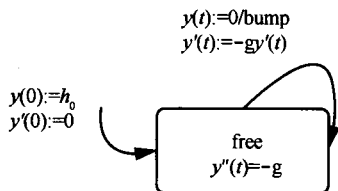


图 5 弹力球基于时间的连续状态图

初始条件为 $y(0)=h_0$ 和 $y'(0)=0$ ，将式(1)改写为对应函数 f 的一阶微分方程

$$s'(t) = f(s(t)) \quad (2)$$

在 t_1 时刻球第一次撞击地面时，满足判定式 $y(t)=0$ 。并在此时，发生自循环转移，产生输出 bump，输出动作集 $y'(t):=-ay'(t)$ 将 $y'(t_1)$ 变为值 $-ay'(t_1)$ 。当判定式为真，则式(1)成立。因此，对于所有的 $t \in (0, t_1)$ ，可得

$$y'(t) = -gt \quad (3)$$

$$y(t) = y(0) + \int_0^t y'(\tau) d\tau = h_0 - \frac{1}{2}gt^2 \quad (4)$$

因此，当 $y(t_1)=0$ 时， t_1 是以下方程的解

$$h_0 - \frac{1}{2}gt^2 = 0 \Rightarrow t_1 = \sqrt{\frac{2h_0}{g}} \quad (5)$$

混合系统的建模需同时处理离散与连续系统的动态特征，这不可避免地要求解决 3 个问题，即离散系统的表示、连续事件的描述及其相互之间的作用。之前的研究经验表明，对于混合系统的描述及建模，最好采用离散系统和连续系统相结合的方式，充分利用现有建模语言的特点，根据需求的不断变化，对现有经典模型进行相应的扩展，或者将

连续动态系统的模型嵌入到离散行为中，或者将离散行为表示在连续的动态系统中。

4 CPS 建模亟需解决的问题

CPS 建模需要掌握已有的信息系统与物理系统两方面的科学与技术，在此基础上发展新的方法学或对已有方法进行扩展，以适应 CPS 的最新需求。CPS 可以建模成一个混合系统，物理过程用连续时间的动力学方程来表示（连续系统），而计算模型描述为状态机（离散系统）。对于连续时间模型的求解，现存的方法众多，如数值逼近，求微积分方程的解等，只需设计相应的求解器。而离散模型及如何实现两者之间的融合虽然有很多存在的工具来进行设计，但一致性问题是不容忽视的，这也成了现阶段研究的一大重点难题。另外现阶段存在的建模方法都忽略了时间对于系统行为的影响^[19]，或只是简单的认为时间是一种非功能性属性。现有的许多服务尤其是网络通信这方面采用的大多是“尽力而为”的思想，这与 CPS 的强实时、高可靠^[31, 32]等特征是存在冲突的。最后，CPS 的分布式特性^[33]使 CPS 组件分布在不同的空间位置上，对于分布式系统的建模，这就需要解决时间同步、网络延迟、统一的系统标识等问题。

国际 CPS 研究的领军人物 Edward A. Lee 指出目前 CPS 系统建模亟需解决的六大问题^[34]。

1) CPS 被建模成一个混合系统，其中物理过程用连续模型表示；计算则被描述成状态机、数据流模型或者离散事件。如何准确表达模型的不确定性、参数的未知性、系统的动态性等行为。

2) CPS 包含众多的子模型，它们在成为复杂 CPS 系统的一个组件或单元之后，如何保持这些同质组件或单元的一致性。

3) 如何处理 CPS 各组件所产生的歧义，包括单元、语义和转换的不一致等。

4) CPS 建模过程中，计算与物理过程的功能性建模都假定数据被实时地计算或传输，实际上所有这些都是需要时间的。如何准确定义 CPS 模型的时间特性。

5) CPS 的分布式特性需要进行分布式行为的建模，如何在 CPS 模型中处理时序上的不一致、网络延时、不完全通信、系统状态的一致性等现象。

6) 如何应对 CPS 所带来的网络异构和子系统异构等问题。

5 解决 CPS 建模问题可能存在的方法

CPS 通过网络通信实现计算系统与物理系统的深度融合, 其建模繁琐而复杂, 根本原因在于过去很长一段时间计算机科学研究人员的思维始终围绕着图灵机理论和冯若依曼体系结构, 他们认为计算只是对数据的处理与转化, 忽略了系统本身的一些自然属性, 如时间、温度、湿度等。而且现有的计算系统都是基于二进制理论来处理离散事件, 对于 CPS 所涉及的物理系统以及离散与连续系统的融合则缺少相关方面的基础研究, 作者在前人研究的基础上, 将 CPS 建模问题的解决方法总结归纳为统一模型理论、扩展模型理论、混合模型以及基于数据驱动的建模 4 类。

5.1 统一模型理论

既然 CPS 涉及离散的计算系统与连续的物理过程, 那么可以考虑采用一定的方式及方法建立一种统一的模型理论体系架构^[35], 在这种模型理论基础上, 既可以分析物理事件对整个系统所带来的影响又可以在不改变现有计算机体系结构的基础上实现智能控制。这种方式是复杂且有效的, 要实现这样一种理论目前也存在很多的困难, 但不失为一个研究方向, 国内外许多研究者也正从事这方面的研究。

在时序统一方面, 文献[36]认为时间是 CPS 非常重要的元素, 但现有的计算系统的逻辑时间与物理世界的连续时间是 2 个不同的概念, 这对了解系统的动态属性是非常不利的, 保持两者之间的同步并设定一个统一的时钟标准成了关键问题。为了解决这一问题, 文献[37]引入了混合进程代数的概念来描述时钟属性并将其命名为 \mathcal{X} 机制, 在这种机制下所有事件都是通过一个统一的时钟来描述其时间特性, 并以一定的方式组织起来, 事件的次序严格遵照相对于该时钟的优先级来执行。另外, Abdelwahed 等在文献[38]提出了一种基于 CPS 的高可信软件建模方法。在构建计算模型的同时尽可能保证 CPS 的内在特性, 如高复杂、动态性、不可预知的环境因素等。然而这种设计方式更多的是从设计层面来考虑 CPS 建模, 在时间、空间上的考虑还存在缺陷。文献[39]在此基础上提出了基于服务的建模方法, 使用面向服务及云计算的概念, 提出将模型分为环境层、控制层、服务层 3 个层次。基于服务的建模方法充分考虑了现存系统的特点, 运用分而治之的思想处理问题, 是一种值得研究的方向,

但目前基于服务的建模方法对 CPS 的时间约束还缺少有效的验证理论。

另外, 模糊理论^[40]自 1965 年提出以来受到广大控制工程及计算机科学研究者的广泛关注。它将控制对象总结归纳为一系列形如“if...then...”的控制规则, 通过模糊推理总结出控制作用集, 作用于被控对象及过程。假设以“if 离散事件发生 then 引起连续事件的发生”或“if 连续事件发生 then 引起计算系统的操作”的模式来发展一种新的建模理论与方法, 在一定条件下, 将连续系统与计算系统融合在统一的框架之下, 在此基础上对 CPS 设计与验证也不失为一种好的方式, 但如何实现离散事件的“语言”信息映射过来的“if-then”模糊规则和连续动态的数据信息映射过来的“if-then”模糊规则的统一, 是研究者必须解决的关键问题^[41]。

5.2 扩展模型理论

现有的计算系统建模方法大多基于离散事件, 如果从根本上改变这种建模方式, 那么之前的建模理论及应用工具都将被抛弃, 浪费了大量资源。如果考虑在原有建模理论或方法学的基础上扩展相应的语义及描述能力, 既能保证对已有系统进行建模描述, 又能应对 CPS 建模所带来的挑战, 不失为一种有效的方式。

Petri 网作为一种有效的建模理论发展了很长时间, 为了应对日益复杂的系统, 之前有许多研究者在 Petri 网的基础上进行了相关方面的扩展, 进而引申得出了各种不同应用的面向不同方面的扩展 Petri 网, 如时间 Petri 网、着色 Petri 网、随机 Petri 网等。如果需要在 Petri 网中引入物理时间的概念, 从 Petri 网的基本定义(由 5 个要素组成), 可以考虑将时间信息扩展到库所^[42]、变迁^[43]、(前、后)弧^[44, 45]和托肯^[46]上, Balbo 在文献[47]中总结得出了 Petri 网的 4 种扩展时间的方法。

时间自动机在扩展模型中也得到了广泛的应用, 在 CPS 建模中, 时间自动机大多作为混合系统的一种建模方式, 在此基础上进行相关方面的扩展, 将连续因子以一定的方式融合在离散的状态之上, 建立系统的混合模型, 这种方式只是离散—连续系统的简单应用, 其理论基础及语义描述还有待进一步的研究, 也缺乏相应的支持工具。

体系结构分析与设计语言(AADL)^[48]既用来建模与分析已上线的系统也可以设计整合新的系统。它定义了一个附件库, 允许用户自定义描述

语义,并对其进行扩展。附件使用户能够扩展AADL语言,允许在AADL标准模型中包含特殊的符号。例如,扩展一些CPS建模时需要的形式化的语言建立离散—连续之间的联系,并定义相应的接口,AADL这种开放式的建模语言,为其在CPS建模中的应用打下了基础。

5.3 混合模型理论

Lee E A 等^[30]认为CPS与传统的嵌入式系统存在本质上的差别,继而提出了混合系统的概念,考虑在计算的离散模型中融入连续事件的影响,并以此为基础建立系统的混合模型。

将离散事件与连续系统统一是一个比较复杂的系统过程,但又是CPS不得不解决的问题。以上2种建模理论都是基于统一的思想,将之前的计算科学与物理过程通过网络通信结合在一起,继而建模与验证。如果换一种思维方式,继续将计算与连续事件分开处理,但恰当地实现它们之间的接口,两者各自关注本身所面临的问题,通过接口实现它们之间的统一,相辅相成互相监督控制也是一种良好的解决途径。

图6为混合模型的基本思路,先分开处理CPS中的物理事件与计算系统,分别利用各自的建模方法建立对应的分析模型。针对物理过程的建模方法有微积分方程、差分方程、牛顿力学等,计算系统则采用状态机、Petri网、UML等描述方式,模型接口则包含一系列的形式化转换规则,实现2种模型之间的统一。模型接口在适应物理过程的连续性、并发性,计算系统的离散性、顺序执行等基本特征的同时,需考虑计算过程所依赖于物理环境的参数选择,避免有限的时间间隔内发生无穷多个事件。另外,通过离散模型与连续模型之间的关联,分析其存在的差异,实现两者之间的反馈控制,以建立更精确的模型。

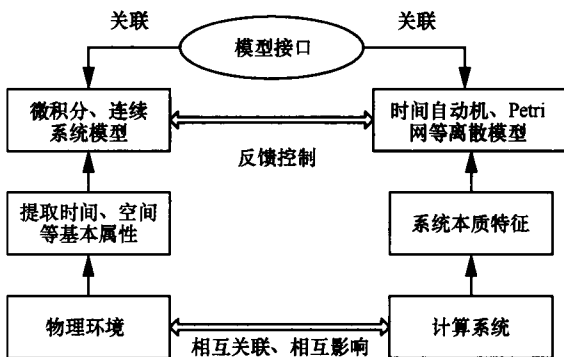


图6 混合模型框架

5.4 基于数据驱动的建模

之前所有提出的CPS建模都建立在一定的经验知识上。在构建系统框架或分析系统时都要求设计人员对系统有一定的了解,熟悉CPS所面临的外界环境、系统将要经历的状态变化、变化所持续的时间等,另外一些研究人员则从不同的角度出发。文献[49, 50]使用经验数据来对CPS通信过程中的主要属性(自相似、非平稳性)进行描述,从CPS所具有的这些复杂特征出发,提出了一种与分形几何相似的统计物理启发式模型,根据系统特征从数据中找出普遍规律并建立模型。CPS这一数据建模的方式,不失为一个好的研究方向。

以汽车CPS(ACPS)为例^[51],其建模过程如图7所示,首先通过传感器、摄像头等外部设备捕获ACPS的相关数据信息,使用特征提取删除部分冗余数据,提取有利于系统建模的能反映系统本质特征的数据;接着根据一定的数学方法从离散数据出发建立系统的连续模型,最后通过反馈控制不断缩小离散数据与连续系统之间的误差。

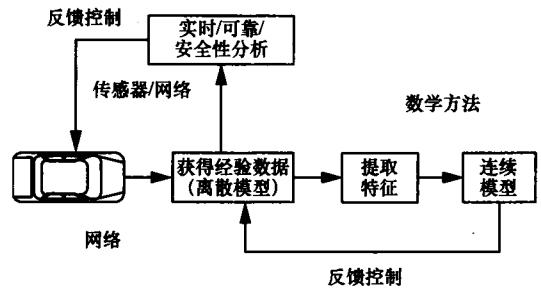


图7 基于数据驱动的车CPS建模

基于数据驱动的CPS建模目前还处于初步研究阶段,随着大数据及CPS的发展,这种客观式的通过真实数据反映系统本身的方式将有着广阔的应用前景。

6 结束语

自信息—物理融合系统提出以来,国内外大量专家学者都给予了很高的重视,如何开发面向实际的CPS系统,也成了众多专家学者追求的目标。本文在详细总结归纳CPS的特点之后,提出基于模型驱动的开发方法适合CPS建模。

在自然科学领域,目前存在的基于模型驱动的开发方法多种多样。本文从CPS的特点出发,分别从离散系统、连续系统、混合系统的角度总结概括了目前存在的建模方法学,这些方法都是面向各自

领域,对包含计算过程、物理系统、网络通信三大要素的 CPS 系统并不适用。最后就 CPS 的建模必须解决的问题提出了 4 种可能的解决途径,希望通过本文的介绍能使 CPS 领域相关的科研人员对建模有所了解,为将来研究工作的开展提供参考。

参考文献:

- [1] 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.
LI R F, XIE Y, LI R, et al. Survey of cyber-physical systems[J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(6):1149-1161.
- [2] PAUL B, RADU M. Towards a science of cyber-physical systems design[C]//Second International Conference on Cyber-Physical Systems. Chicago, USA, c2011: 99-108.
- [3] LUCA P, NIRAJ T, BRUNO S, et al. A cyber-physical systems approach to energy management in data centers[C]//The 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems. Stockholm, Sweden, c2010: 168-177.
- [4] KIM G L, LI S, BRIAN N, et al. Scenario-based analysis and synthesis of real-time systems using uppaal[C]//The Conference on Design, Automation And Test in Europe. Dresden, Germany, c2010: 447-452.
- [5] PATRICIA D, LEE E A, ALBERTO S V. Addressing modeling challenges in cyber-physical systems[R]. UC Berkeley: The Center for Hybrid and Embedded Software Systems, 2011.
- [6] 何积分. 信息-物理融合系统[J]. 计算机学会通讯, 2010, 6(1): 25-29.
HE J F. Cyber-physical systems[J]. Communication of the CCF, 2010, 6(1): 25-29.
- [7] SHA L, SATHISH G, LIU X, et al. Cyber-physical systems: a new frontier[C]// International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing. China, c2008: 1-9.
- [8] 杨志斌, 皮磊, 胡凯, 等. 复杂嵌入式实时系统体系结构设计与分析语言: AADL[J]. 软件学报, 2010, 21(5): 899-915.
YANG Z B, PI L, HU K et al. AADL: an architecture design and analysis language for complex embedded real-time systems[J]. Journal of Software, 2010, 21(5): 899-915.
- [9] GEORG G, RAY I, ANASTASAKIS K, et al. An aspect-oriented methodology for designing secure applications[J]. Information and Software Technology, 2009, 51(5): 846-864.
- [10] LEE E A. Cyber physical systems: design challenges[C]//The 11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC). Orlando, USA, c2008: 363-369.
- [11] GORDON M. From LCF to HOL: a short history [M]. Boston: MIT Press, 2000: 169-186.
- [12] CHEN G, LUO L, GONG R, et al. Dependability analysis for AADL models by PVS[C]//2009 Eighth IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing. Chengdu, China, c2009: 19-24.
- [13] GORDON M, REYNOLDS J, HUNT W A, et al. An integration of HOL and ACL2[C]//Formal Methods in Computer Aided Design. San Jose, USA, c2006: 153-160.
- [14] MA Z Q, FU X, YU Z H. Object-oriented Petri nets based formal modeling for high-confidence cyber-physical systems[C]//2012 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Shanghai, China, c2012:1-4.
- [15] ROBERT M, CHEN I R. Effect of intrusion detection and response on reliability of cyber physical systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2013, 62(1): 199-210.
- [16] YANG Y L, ZHENG X S. Cyber-physical systems modeling based on extended hybrid automata[C]//2013 5th International Conference on Computational and Information Sciences (ICIS). Shiyang, China, c2013: 1871-1874.
- [17] BANERJEE A, GUPTA S K S. Spatio-temporal hybrid automata for safe cyber-physical systems: a medical case study[C]//2013 ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs). Philadelphia, USA, c2013: 71-80.
- [18] ZHANG L. An integration approach to specify and model automotive cyber physical systems[C]// 2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE). Las Vegas, USA, c2013: 568-573.
- [19] ZHU Y, DONG Y, MA C, et al. A methodology of model-based testing for AADL flow latency in CPS[C]// 2011 5th International Conference on Secure Software Integration & Reliability Improvement Companion (SSIRI-C). Jeju, South Korea, c2011: 99-105.
- [20] SUN Z, ZHOU X. Extending and recompiling AADL for CPS modeling[C]// 2013 IEEE International Conference on and IEEE Cyber, Physical and Social Computing. Beijing, China, c2013: 1225-1230.
- [21] ZHANG L. Specifying and modeling automotive cyber physical systems[C]// 2013 IEEE 16th International Conference on Computational Science and Engineering (CSE). Sydney, Australia, c2013: 603-610.
- [22] ZHANG L. An integration approach to specify and model automotive cyber physical systems[C]// 2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE). Las Vegas, USA, c2013: 568-573.
- [23] GUAN T, YANG G. Integration-oriented modeling of cyber-physical interactive process[C]//2013 IEEE International Conference on Cyber, Physical and Social Computing. Beijing, China, c2013: 1492-1495.
- [24] ZHANG L C. Multi-dimensional analysis and design method for aerospace cyber-physical systems[C]// 2013 12th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering & Science. Los Alamitos, USA, c2013: 197-201.
- [25] ZHANG Z K, EMEKA E, GABOR K, et al. Co-simulation framework for design of time-triggered cyber physical systems[C]//2013 ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs). Philadelphia, USA, c2013:119-128.
- [26] JAVIER M, MARKUS D, JAN H, et al. Unified and comprehensive electronic system level, network and physics simulation for wirelessly networked cyber physical systems[C]//2012 Forum on Specification and Design Languages (FDL). Vienna, Austria, c2012: 68-74.
- [27] MUELLER W, BECKER M, ELFEKY A, et al. Virtual prototyping of cyber-physical systems[C]// 2012 17th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC). Sydney, Australia, c2012: 219-226.
- [28] LIU J, LIU X, KOO T K J, et al. A hierarchical hybrid system model and its simulation[C]//The 38th IEEE Conference on Decision and Control. Phoenix, USA, c1999: 3508-3513.
- [29] LIU J, LEE E A. Component-based hierarchical modeling of systems with continuous and discrete dynamics[C]// International Symposium on Computer-Aided Control System Design. Anchorage, USA, c2000: 95-100.
- [30] LEE E A. Introduction to embedded systems-a cyber-physical systems approach[M]. UC Berkeley, 2014: 79-200.
- [31] ASHFAQ H, FAROO Q, FARRUKH A, et al. Security requirements for a cyber physical community system: a case study[C]//The 4th International Symposium of Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies. Barcelona, Spain, c2011:1-5.

- [32] MA L, YUAN T, XIA F, et al. A high-confidence cyber-physical alarm system: design and implementation[C]//The 2010 IEEE/ACM Int'l Conference on Green Computing and Communications & Int'l Conference on Cyber, Physical and Social Computing. New York, USA, c2010: 516-520.
- [33] DYLAN P, ANDREAS G, JONATHAN V. Dynamic resolution in distributed cyber-physical system simulation[C]//The 2013 ACM SIGSIM conference of Principles of Advanced Discrete Simulation. New York, USA, c2013: 277-284.
- [34] LEE E A. CPS foundations[C]//The 47th Design Automation Conference. New York, USA, c2010: 737-742.
- [35] 周兴社, 杨亚磊, 杨刚. 信息-物理融合系统动态行为模型构建方法[J]. 计算机学报, 2014, 37(3): 1-12.
ZHOU X S, YANG Y L, YANG G. Modeling methods for dynamic behaviors of cyber-physical system[J]. Chinese Journal of Computers, 2014, 37(3): 1-12.
- [36] XU B Q, HE J F, ZHANG L C. Specification of cyber physical systems by clock[C]//The 8th International Workshop on Automation of Software Test. San Francisco, USA, c2013: 18-19.
- [37] MAN K L, SCHIFFELERS R R. Formal specification and analysis of hybrid systems[M]. Berlin, 2006: 119-128.
- [38] ABDELWAHED S, KANDASAMY N, GOKHALE A. High confidence software for cyber-physical systems[C]//The 2007 Workshop on Automating Service Quality held at the International Conference on Automated Software Engineering (ASE 2007). Atlanta, USA, c2007:1-3.
- [39] HYUN J L, SOO D K. A service-based approach to designing cyber physical systems[C]//The 9th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science. Yamagata, Japan, c2010:895-900.
- [40] ALAJMI B N, AHMED K H, FINNEY S J, et al. Fuzzy-logic-control approach of a modified hill-climbing method for maximum power point in microgrid standalone photovoltaic system[J]. IEEE Trans on Power Electron, 2011, 26(4): 1022-1030.
- [41] LEE H J, PARK J B, CHEN G. Robust fuzzy control of nonlinear systems with parametric uncertainties[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2001, 9(2): 369-379.
- [42] RAMCHANDANI C. Analysis of asynchronous concurrent systems by timed Petri nets[D]. London: Univ. of Cambridge, 1974: 14-67.
- [43] MERLIN P M, FARBER D J. Recoverability of communication protocols Implications of a theoretical study[J]. IEEE Trans on Communications, 1976, 24(9): 1036-1043.
- [44] ZUBEREC W M. Timed Petri nets and preliminary performance evaluation[C]//7th Annual Symposium on Computer Architecture. La Baule, France, c1980: 88-96.
- [45] HERZOG U. Formal methods for performance evaluation[M]. Berlin, 2001: 1-38.
- [46] SIFAKIS J. Petri nets for performance evaluation[C]//Intern Symp IFIP. London, England, c1978: 75-93.
- [47] BALBO G. Introduction to stochastic Petri nets[M]. Berlin: Springer, 2001: 84-155.
- [48] FEILER P H, GLUCH D P, HUDAK J. The architecture analysis & design language (AADL): an introduction[R]. Carnegie-Mellon University, The Software Engineering Institute, 2006.
- [49] PAUL B, RADU M. Towards a science of cyber-physical systems design[C]//The Second International Conference on Cyber-Physical Systems. Chicago, USA, c2011: 99-108.
- [50] BOGDAN P, MARCULESCU R. Cyber-physical systems: workload modeling and design optimization[J]. IEEE Design & Test of Computers. 2011, 28(4): 78-87.
- [51] 杨帆, 李仁发, 段梦琴, 等. 一种基于数据驱动的 CPS 建模方法研究[J]. 计算机学报, 2015, 38(136):1-15.
YANG F, LI R F, DUAN M Q, et al. A modeling method research based on data in cyber-physical system[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(136):1-15.

作者简介:



李仁发 (1957-), 男, 湖南郴州人, 博士, 湖南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为嵌入式计算、无线网络、网络与数字媒体。



杨帆 (1985-), 男, 湖南益阳人, 湖南大学博士生, 主要研究方向为嵌入式系统、建模语言及系统验证。



谢国琪 (1983-), 男, 湖南长沙人, 湖南大学博士生, 主要研究方向为嵌入式计算、并行计算。



黄晶 (1986-), 男, 湖南娄底人, 湖南大学博士生, 主要研究方向为机器学习、模式识别。



段梦琴 (1989-), 女, 湖南怀化人, 湖南大学硕士生, 主要研究方向为机器学习。