

CPS研究热点概述

关键词：模型融合 建模语言 模型检验

陈铭松 黄赛杰 李 昂
华东师范大学

随着嵌入式系统发展的日新月异，嵌入式系统在许多高精尖领域发挥着巨大的作用。但是由于人们对计算世界与物理世界缺乏全面认识，导致目前的嵌入式系统还不能对物理世界实现高效的“感、执、传、控”。因此，新一代嵌入式系统必须将计算世界和物理世界作为一个紧密交互的整体来进行认知，实现一个集计算、通信与控制于一体的深度融合的理论体系与技术框架，这就是信息—物理融合系统 (cyber physical system, CPS)^[1,2]。

作为新一代的信息技术热点，CPS 自从诞生之日起就得到了各国政府的关注。美国、欧盟乃至日本、韩国等均已在相关领域投入大量人力、物力进行科研攻关。相关的重要学术会议，例如实时系统会议 (Real Time Systems Symposium, RTSS)、嵌入式软件国际会议 (International Conference on Embedded Software, EM-SOFT)、设计自动化会议 (Design Automation Conference, DAC)、欧洲设计自动化与测试会议 (Design, Automation & Test in Europe

Conference, DATE)、分布式计算与系统国际会议 (International Conference on Distributed Computing Systems, ICDCS)、决策与控制会议 (Conference on Decision and Control, CDC) 等，近年来连续开展关于 CPS 的专题讨论。而新诞生的 CPS 领域国际会议——信息物理融合系统国际会议 (International Conference on Cyber Physical Systems, ICCPS) 更是热门，在短时间内已成为学术界重点关注对象，呈现出蓬勃的生命力。

热点基础研究

物理系统与计算系统存在着巨大的差别，使用传统方法实现两种系统的有机融合非常困难。照搬传统嵌入式的技术与方法设计出的 CPS 除了效率低下外，安全性和可靠性也难以保证。因此，针对 CPS 的特性，学术界和工业界对 CPS 设计与开发进行了广泛而又深入的研究。

CPS建模

CPS 建模需要刻画计算进程

与物理进程之间如何交互以及它们融合时所表现出来的行为^[3]。基于模型的分析可以更好地认识 CPS 的行为，通过模型驱动的设计可以提高设计自动化程度与减少精化过程中的错误。

典型的 CPS 建模通常需要考虑到物理环境、软硬件平台和网络的模型。此外，在这些模型中还需要进一步考虑软件调度、网络延时、功耗能耗等一系列功能与非功能的因素。如何设计一个统一的建模框架，以便准确刻画开放环境下控制和计算的有机融合，是 CPS 领域面临的一个挑战。学术界正在尝试从模型融合、建模语言、模型语义扩充等多个角度完善信息—物理融合系统的建模机制。目前在理论与工具方面已取得了一些突破，具体如下：

模型融合 由于 CPS 既包含物理部件又包含计算部件，因此该系统牵涉到多种不同类型的计算模型。如何在统一的框架下使用多种计算模型来同时对 CPS 进行建模，是 CPS 领域的一大难点。经过多年的研究，目前

CPS 在时间与事件融合以及连续与离散融合两个方向取得了一些成果。

时间与事件是通用的同步手段，然而在计算进程与物理进程中时间与事件的含义却有所不同。计算进程采用的是离散的逻辑时间，而物理进程采用的是连续的物理时间；计算世界里的事件通常指的是消息、异常或者中断，而物理世界的事件可能指的是位置、形状以及状态等物理属性的变化。

目前针对 CPS 连续时间与离散事件融合的模型有很多种，例如时间自动机、时间转换系统、实时佩特里 (Petri) 网等。这些模型都包含时间的概念，同时也支持通信事件的描述，可以用于 CPS 时间属性的分析或者事件间的时序分析。

混成系统 (hybrid system) 是一种有机融合连续与离散的系统。在描述混成系统连续的物理行为时，通常采用常微分方程等计算模型。而在描述离散的计算行为时，其通常采用的是差分方程、有限状态自动机等离散的计算模型。在混成系统的形式化建模方面，混成自动机、混成输入 / 输出自动机、概率混成自动机已经被广泛研究。然而由于引入连续概念，混成系统变得非常复杂，刻画起来十分困难，直接建模极易出错。如何自动综合出满足给定属性的混成系统模型已经成为了一个研究热点。目前已有很多基于不动

点求解、数值计算等方法来支持混成自动机的自动综合^[4]。

建模语言 目前在学术界和工业界出现了一批针对 CPS 特性的建模语言。例如，由加州大学伯克利分校爱德华·李 (Edward Lee) 等人设计开发的 Ptolemy II 就是一种针对异构系统离散与连续行为可视化建模的框架。它所采用的角色模型 (actor model) 支持离散的自动机与连续的模态建模。另外，MathWorks 公司开发的 Simulink 和 Stateflow 作为 Matlab 的重要组成部分，提供了一个动态混成系统建模、仿真、分析与综合的集成开发环境。其离散控制部分由 Stateflow 描述，连续动态部分则依靠各种线性、非线性求解器。Modelica 协会开发的开源工具 OpenModelica 已被成功运用在机械、热力、控制、电力和其它面向过程的复杂系统建模中。在电子设计自动化领域，SystemC 广泛用于系统级设计，支持软硬件系统早期的体系结构探索与协同设计。由于引入了对模拟器件的仿真功能，SystemC AMS 标准支持对混成系统进行建模。在大规模 CPS 级协同设计与仿真方面，SystemC AMS 有着较强的优势。PTIDES^[5] 是爱德华·李等人提出的一种基于离散消息模型的语言，它被认为是一种有效的分布式 CPS 建模语言。PTIDES 基于时间戳进行通信，利用网络时间同步来提供全局一致的时序。

模型语义的扩充 CPS 建

立在传统的嵌入式技术之上。传统的建模方式在计算部件的建模方面有着较强的优势，因此目前有相当数量的一批研究人员正在尝试扩充已有领域模型的语义，在原有模型的基础上支持针对 CPS 特性的建模。例如，UML 及其变种 SysML 与 MARTE 已被成功建模。通过重新定义模型元素的 Profile, SysML 和 MARTE 可以精确地对 CPS 建模。目前已提出了多种支持 CPS 特征的 UML 模型^[6]。

由传感器、执行器以及通信网络所产生的误差与数据包丢失等问题引起的不确定性是目前研究的一个热点^[7]。为了描述 CPS 的不确定性，许多研究工作扩展了原来模型的语义，添加了随机执行的概念。例如，随机混成自动机在原有混成自动机的基础上引入了随机语义，支持对不确定行为进行分析与评估^[8]。

CPS 集成

由于缺少相关的理论基础，集成是目前 CPS 设计的最大障碍之一^[9]。虽然 ad hoc 的集成方法能够使 CPS “正常运转”，但是当系统越来越复杂时，这种方法带来的问题会越来越多。这对安全品质要求极高的 CPS 来说是不能容忍的。

CPS 的设计牵涉到多个层次，每个层次以及层次之间都需要考虑组件的集成。此外，还需要研究相关的技术、方法与工具来支持 CPS 的一体化设计与无缝

连接, 如图 1 所示。

CPS 集成主要分为 :

组件的集成 异构部件间最大的问题是不兼容。如何设计灵活的接口, 支持不同组件的即插即用模式, 以及如何支持组件间的自适应组合是研究热点。另外, 由于尚无有效的确认方法, 目前还缺乏支持对集成后的 CPS 进行稳定性、一致性、安全性、可靠性等性能预测与评估的手段。

计、开发与部署。

目前只有为数不多的工具支持模型驱动的 CPS 设计开发, 例如 Simulink, Modelica 和 Ptolemy 等。但是这些工具还只是涵盖了 CPS 设计开发流程的部分内容, 全面支持以上三种不同层次 CPS 集成的框架屈指可数。美国范德堡大学开发了一套基于嵌入式建模语言 ESMoL 的工具链^[10], 支持模型驱动下安全攸关的 CPS 开发。ESMoL 语言与

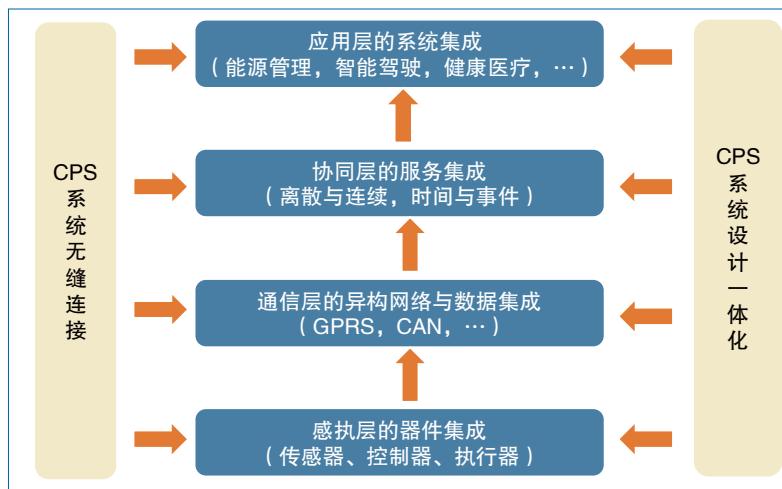


图1 CPS集成示意图

方法的集成 CPS 涵盖许多领域。由于每个领域都有自己自成体系的一套模型、语言与方法, 提取他们之间的共性技术用于 CPS 的开发非常困难。因此需要有一套理论、方法与机制将这些技术有效地组合在一起支持 CPS 各阶段的开发。

工具的集成 CPS 的设计与开发需要一套完整的工具链, 来全面支持 CPS 的建模、分析、综合以及各计算与通信组件的设

体系架构语言 AADL 类似, 然而语法相对简单。它可以用来约束组件间的交互, 保证系统的安全与容错等性质。这个工具链支持基于 Simulink/Stateflow 子系统模块的 C 代码生成、平台相关的运行任务的代码生成以及基于时间触发的网络通信代码生成。ESMoL 工具链支持显式的体系结构建模, 允许在设计时针对物理资源进行计算与通讯任务的调度与分配。

CPS的运行支撑

CPS 的运行通常需要各种技术与设备的支撑, 例如网络、实时操作系统以及中间件等软硬件平台。然而, 目前已有的技术与运行支撑手段还不能很好满足 CPS 对系统安全与性能的要求, 所以现有的支撑技术和方法还需要进一步改进与加强。

网络 在 CPS 领域, 网络作为通信的基本手段被广泛研究。除了无线传感器网络用于 CPS 的感知外, 由于无线控制网络具有易调度、计算成本低等特性, 目前在 CPS 领域广受关注^[11]。由于处于开放环境, 网络间通信的延迟、抖动以及计算任务运行时的调度算法, 都会影响到 CPS 的效率与性能。因此, 目前有很多的研究通过优化实时任务调度算法与网络协议来降低网络的不确定性^[12]。

实时操作系统 CPS 的运行牵涉时间攸关的计算任务、安全攸关的控制任务。时间攸关的任务需要在指定时间内完成, 虽然控制任务对时间要求不高但是对控制的质量要求非常高。传统的实时操作系统能够保证在规定的时间内完成任务, 但是很少牵涉到控制的优化问题。如何在保证实时约束下实现控制性能最优, 成为目前研究的热点^[13]。另外, 模型驱动的实时系统生成也是广受关注。例如, 在分布式实时系统方面, 爱德华·李等人开发出了一种基于 PTIDES 模型的轻量

级的实时操作系统 PtidyOS^[14]，该操作系统已被成功的用于多个分布式的 CPS 应用领域。

中间件 部件的异构性使得 CPS 在运行时变得极其复杂。中间件技术能够有效地隐藏底层的细节，实现异构系统无缝的连接。美国弗吉尼亚大学的科研人员开发了一个面向服务的中间件 Physicalnet，支持基于捆绑式(bundle)^[15] 的开发。采用捆绑式机制，可以有效地集成多种异构设备，同时支持动态的成员更新与需求重构。但是，目前大多数中间件更关注的是计算与通信的异构性，很少有中间件能够有效地管理与控制物理进程。这将是未来 CPS 中间件发展的方向。

CPS的验证与测试

不同异构组件的组合使得 CPS 的行为极为复杂。作为使命攸关与安全攸关的系统，CPS 需

要经过充分的验证与测试，以确保系统设计满足各方面的要求。图 2 是一个自顶向下的 CPS 的设计与验证流程。通常，提升 CPS 的抽象层次，能够有效地降低 CPS 的验证复杂度^[16]。因此，目前 CPS 的验证主要集中在模型与规约层次。由于 CPS 设计的自动化程度较低，综合过程不可避免地会引入错误，因此 CPS 的实现层需要再次验证。在 CPS 中，除了要求计算组件功能正确外，被控物理组件的稳定性以及其它非功能性也需要关注。目前保证 CPS 功能与非功能是否满足的方法主要有以下几种：

形式化验证 基于数学方法，形式化验证能够自动化或半自动化地证明系统是否满足某个给定的性质。由于底层实现非常复杂，直接对其做形式化的验证非常困难。目前，形式化方法主要还是针对系统的模型或者系统

级规约进行验证^[17]。

模型检验能够自动验证模型是否满足给定的性质。目前针对 CPS 领域流行的模型检验工具有 UPPAAL, HyTech 和 CHARON 等，它们可以用来对时间自动机与混成自动机进行检验。在验证模型的安全性方面，目前通常采用的方法是基于可达性的分析。但是由于 CPS 牵涉到连续的时间与行为，容易导致状态空间爆炸问题。因此如何提高模型检验的效率是 CPS 的研究热点之一。在混成系统验证方面，南京大学开发了一套面向线性混成自动机的验证工具 BACH^[18]，能够有效降低线性混成自动机组合验证的复杂度。另外，由于 CPS 的不确定性，基于概率的验证也已成为 CPS 验证领域的一个研究热点。目前，英国牛津大学开发的概率模型检查工具 PRISM 以及丹麦奥尔堡大学开发的概率时间自动机，已成功应用于 CPS 验证中^[19]。

除模型检验外，定理证明也被应用在 CPS 的分析与验证中。美国卡耐基梅隆大学的安德烈·普拉泽 (André Platzer) 系统地提出了针对混合系统验证的微分动态逻辑与微分不变式，并开发了定理证明器 KeYmaera^[20]。该工具已成功运用于轨道交通与航空等多个 CPS 领域的模型与协议的形式化证明上。

仿真测试 由于形式化验证的可扩展性不高，因此大量 CPS 的验证还是采用基于仿真测试的方法。如何对 CPS 的连续

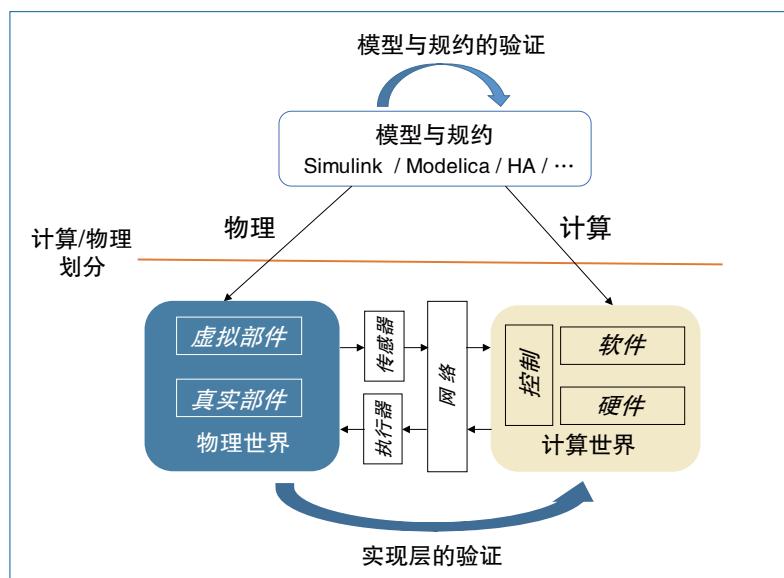


图2 自顶向下CPS设计的验证示意图

性进行测试是当前的研究热点。为了验证混成系统模型的安全属性并且提高仿真的覆盖率，美国宾夕法尼亚大学的拉杰夫·奥勒 (Rajeev Alur) 等人提出了一种结合数值仿真与符号执行的方法来计算状态集，对 Simulink 进行仿真测试^[21]。该方法通过计算等价的初始状态的覆盖率，来检验测试仿真的充分性。英国牛津大学的丹尼尔·科宁 (Daniel Kroening) 等人在白盒测试与形式化分析方法的基础上，提出了一套基于 mutant 的方法对 Simulink 模型产生的测试用例^[22]。通过挖掘 mutant 之间的相似性，他们的方法能够产生一个紧凑的测试用例集合，并得到了很好的功能覆盖。另外，虚实结合的仿真测试也在 CPS 领域被广泛运用。例如，美国加州大学的弗兰克·瓦希德 (Frank Vahid) 等人提出了一种基于交互环境数字实体模型的虚实结合的测试自动化方法来缩短测试时间，提高了测试的效率^[23]。

在线验证 由于处于一个开放的环境，CPS 的实现层异常复杂。在很多情况下，CPS 的控制参数是在线产生的。这就使得针对实现层的形式化验证与仿真测试的工作难以开展。为了保证 CPS 实现层的安全性，需要对复杂系统的时序性质进行监控。运行时验证 (runtime verification) 作为模型检验与测试仿真的一种扩充，已成为 CPS 运行时监控的重要研究内容。与模型检验相比，

运行时验证中的监控器生成过程与自动机理论的属性自动机生成的过程类似，但是运行时验证不需要考虑所有的状态空间，因此没有空间爆炸问题。与测试相比，运行时验证类似于基于预言的测试 (oracle-based testing)，其监控器接近于测试预言，运行时验证不需要考虑测试充分性与覆盖率等问题。目前，已有多种在线的验证方法成功用于 CPS 的相关领域^[24]。

CPS的隐私与安全

隐私与安全与我们的经济安全与生活质量息息相关，在 CPS 中更是如此^[25]。由于物理部件处于一个开放的环境，信息能够隐藏的程度有限，容易造成潜在的信息—物理攻击。

CPS 通常会产生海量数据，这使得隐私问题变得敏感。CPS 中的设备极易暴露位置信息与时间信息，同时个人信息也会通过物理设备泄漏出去。此外，目前先进的推理技术与数据挖掘技术也使得海量数据的隐私保护变得更加困难。如何保障实时感知数据的隐私与安全，是目前的一个研究热点。为了防止以上各种情况出现，需要研究 CPS 中上下文相关的可信模型 (trust model)，定义相关的信息与物理部件的互信机制。

开放环境中的 CPS 存在受到攻击的风险。在 CPS 的框架下，可以利用物理空间的部件来对信息空间进行攻击。例如，可

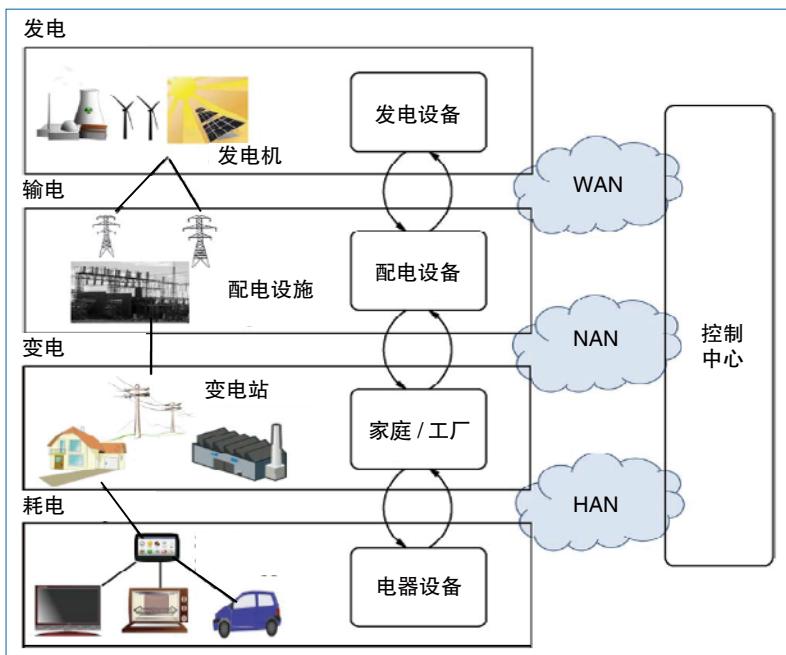
以通过电磁干扰影响计算部件的运行。同样，可以利用信息世界的部件来对物理世界进行攻击。可以通过修改汽车系统的软件，使汽车出现故障。不间断的大规模信息攻击可以引发大规模精确的物理攻击，其破坏力远远大于目前的计算机与网络攻击。目前各国军方已经开始或者准备开始研究如何免于来自物理空间与信息空间的双重攻击。美国军方已经投入了大量财力和美国著名高校联合研究设计具有攻击性的 CPS。

热点应用领域

CPS 技术之所以成为研究的焦点并应用于多个关键领域，主要原因有：

- 计算、网络与感知执行部件的成本不断下降，使计算机与网络成为连接整个世界的万能连接器。
- 经济发展要求我们高效安全地使用基础设施，提高利用率同时降低不必要的维护开销。
- 环境的压力需要我们利用技术来改进能源的利用效率，减少污染。
- 需要有更方便、更人性化的医疗保障系统。

在 2012 年 PI 会议 (Principal Investigators' Meeting) 上，来自美国工业界与学术界的代表花费了一天的时间，对能源、交通、医疗三个目前最热门的 CPS 应用领域进行了集中讨论^[26]。

图3 基于CPS技术的能源管理图^[35]

能源管理

随着全球能源危机日益加剧，如何提高能源利用效率，已经成为一个世界各国关心的话题。由于 CPS 技术能够高效地分配与调度能源（如图 3 所示），这为解决能源问题带来了新的契机。目前，CPS 技术在电力资源管理中有着广泛的应用，主要包括：

智能电网 由于电网系统的复杂性与异构多样性，管理部门很难全面监控管理整个电网。CPS 技术为管理人员提供了对整个电网进行监控的有效手段，支持电网运行的在线分析、动态调度与负载平衡^[27]。

数据中心 作为网络服务与云计算的基础设施，数据中心对电能的消耗巨大，需要进行优

化。CPS 技术支持对数据中心的控制策略的建模，对不同策略下能源使用效率的评估，并针对相应的策略进行优化^[28]。

智能建筑 目前大多数建筑的加热制冷系统对能源的使用效率很低。许多研究正尝试对空调设施的使用情况进行建模与分析，利用 CPS 技术对空调进行有效地调度，降低电能的消耗^[19,29]。

电池管理 电池系统是电动汽车最重要的组成部分。一个电池系统通常包含了成百上千块电池，如何有效规避电池故障并且保证汽车电力的持续稳定供应是目前的一个研究热点^[30]。

使用 CPS 技术能够降低能源的消耗，给人们带来方便，但 CPS 能源管理技术也增加了系统设计与实现的复杂程度，带来了许多新的问题，例如安全问题、可持续问题等。因此未来需要在建模、分析与理解整个能源管理系统方面投入更多的精力，预防可能出现的问题^[27,35]。

智能驾驶

CPS 中涉及到多种智能驾驶，例如无人驾驶飞行器、轨道列车等。汽车正成为 CPS 研究热点^[31]。随着用户对汽车功能要求的不断提高，汽车需要使用更多不同种类的传感器来实时收集车辆与环境的信息，需要更大的网络带宽来传输数据，更强的电子控制单元来计算，以及对汽车实施控制。汽车 CPS（如图 4 所示）



图4 基于CPS技术的汽车驾驶网络图

技术在智能驾驶中的应用提高了整车的安全性、可靠性、节能性和舒适性。同时，通过智能调度，还可以有效减轻城市交通拥堵。

目前，汽车 CPS 的研究主要集中在单辆汽车的感知与控制上。大多数系统缺乏车辆之间进行实时感知和精确控制的能力，缺乏处理全局环境信息的能力。CPS 技术对整个车辆网络的安全提醒、路线规划、基于位置的服务与人们的预期仍有较大差距。如何确保敏感信息（例如车辆位置信息和驾乘人员信息等）不被随意窃取将是一项严峻的挑战。

健康医疗

医疗 CPS 是以保障生命安全为重要前提的网络化、智能化的医疗设备系统，涵盖了计算机、临床医学、控制等多个学科的知

识和技术^[32]。在传统的临床医学场景中，医务人员扮演着控制中心的角色，医疗设备则充当传感器和执行单元，如图 5 所示。CPS 实现了各部件之间的网络化通信与协同操作，并加入了额外的决策与控制部件来辅助医务人员实施控制行为，是临床控制的一种全新设计理念。

安全性分析是医疗 CPS 的一个研究热点。宾夕法尼亚大学的因素普·李 (Insup Lee) 等人对闭环医学设备系统的安全性提出了一套新的验证方法^[33]，他们通过将包含有患者信息的具体模型（例如可植入心脏的起搏器模型）进行仿真分析，并基于时间自动机的模型检验方法，来确保安全分析的高度可信。在工业界，人体传感器网络 (body sensor network) 正成为 CPS 一个热门方

向^[34]。有多家公司正在进行人体传感器网络相关产品的开发，例如 Human Recorder 和 LifeSync 公司正在研发和销售无线心电图设备，FaceLake 和 NatureSpirit 公司正研发血氧计产品，包括 Wellcore 和飞利浦在内的许多公司正在研发能监测病人摔倒行为的系统。

健康医疗是性命攸关的领域，医疗 CPS 必须采取有效手段来论证系统的可靠性。当前医疗系统的开发通常将验证工作放在设计的末期进行，这容易导致设计变更过晚，代价巨大。如何设计一套有效的方法来验证 CPS 各设计阶段的正确性与可靠性，是目前研究人员面临的一个挑战。另外，医疗 CPS 要求医疗设备之间能协同执行临床任务，这对各部件通信接口提出了极高的技术要求。同时由于人体结构十分复杂，生理参数实时变化，如何保证零延迟、零误差的信息交换，依然面临着不小的困难。网络化使医疗设备有了更丰富的功能，但由此也产生了一些潜在问题，其中安全和隐私问题最为突出。不法分子入侵医疗 CPS 后，可以改变设备原先的程序与设定，这种行为极有可能对患者人身安全造成威胁。同时医疗 CPS 中医疗数据收集和管理的问题也十分突出，未经授权的访问或篡改信息的行为都可能造成病人隐私的泄露，由此产生歧视以及心理伤害等一系列社会问题。

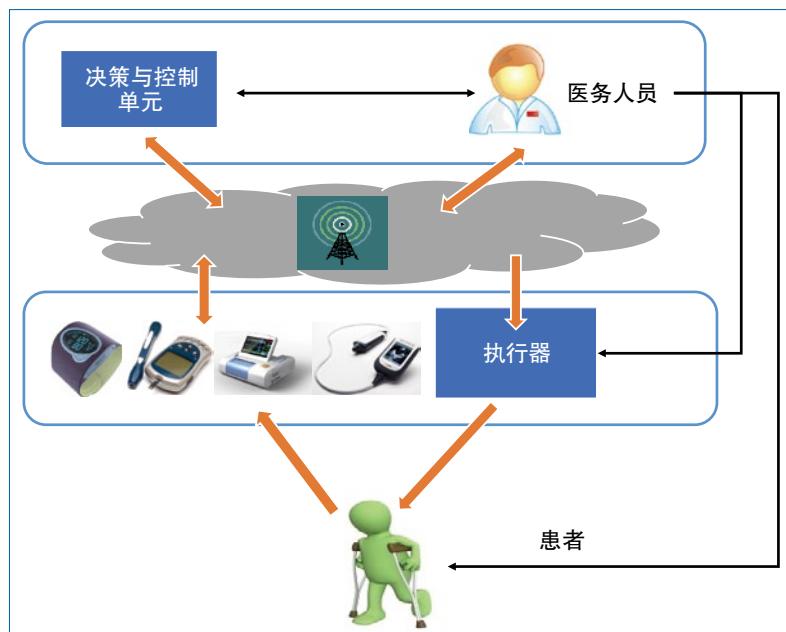


图5 基于CPS技术的健康医疗关系图

结语

随着人们认识世界、改造世界的需求日趋迫切，在可预见的未来，CPS 技术与产品将被广泛应用于各个领域。基于 CPS 理念的系统在降低成本、提高效率的同时，还将提高人们的生活品质。然而，由于 CPS 自身的复杂性，建立一套完整的科学与技术体系还需要一个漫长的过程。希望本文能够帮助读者了解 CPS 的研究与应用现状，并对今后的研究有所启发。■

陈铭松



CCF会员。华东师范大学副教授。主要研究方向为嵌入式系统、EDA、形式化验证。
mschen@sei.ecnu.edu.cn

黄赛杰



华东师范大学硕士研究生。主要研究方向为信息—物理融合系统、软件测试。
simonhsj@gmail.com

李 昂



华东师范大学硕士研究生。主要研究方向为嵌入式系统的形式化验证。
lesley0124@hotmail.com

参考文献

- [1] E. A. Lee. Cyber Physical Systems: Design Challenges. ISORC, 363~369, 2008
- [2] 何积丰, Cyber-Physical Systems. 中国计算机学会通讯, 6(1): 25~29, 2010
- [3] P. Derler, E. A. Lee and A. L. Sangiovanni-Vincentelli. Modeling Cyber-Physical Systems. Proceedings of the IEEE, 100(1):13~28, 2012
- [4] S. Jha, S. Gulwani, S. A. Seshia and A. Tiwari. Synthesizing switching logic for safety and dwell-time requirements. ICCPS, 22~31, 2010
- [5] J. C. Eidson, E. A. Lee, S. Matic, S. A. Seshia and J. Zou. Distributed Real-Time Software for Cyber-Physical Systems. Proceedings of the IEEE, 100(1):45~59, 2012
- [6] Z. Liu, J. Liu, J. HE and Z. Ding. Spatio-temporal UML Statechart for Cyber-Physical Systems. ICECCS, 137~146, 2012
- [7] D. Goswami, R. Schneider and S. Chakraborty. Re-engineering cyber-physical control applications for hybrid communication protocols. DATE, 914~919, 2011
- [8] A. David, D. Du, K. G. Larsen, A. Legay, M. Mikucionis, D. Poulsen and S. Sedwards. Statistical Model Checking for Stochastic Hybrid Systems. HSB, 122~136, 2012
- [9] J. Sztipanovits, X. D. Koutsoukos, G. Karsai, N. Kottenstette, P. J. Antsaklis, V. Gupta, B. Goodwine, J. S. Baras and S. Wang. Toward a Science of Cyber-Physical System Integration. Proceedings of the IEEE, 100(1): 29~44, 2012
- [10] J. Porter, G. Hemingway, H. Nine, C. vanBuskirk, N. Kottenstette, G. Karsai and J. Sztipanovits. The ESMoL language and tools for high-confidence distributed control systems design - Part 1: Language, framework, and analysis. Tech. Rep. ISIS-10-109, ISIS, Vanderbilt Univ., 2010
- [11] G. J. Pappas. Wireless control networks: modeling, synthesis, robustness, security. HSCC, 1~2, 2011
- [12] A. Masrur, D. Goswami, S. Chakraborty, J. Chen, A. Annaswamy and A. Banerjee. Timing analysis of cyber-physical applications for hybrid communication protocols. DATE, 1233~1238, 2012
- [13] R. Schneider, D. Goswami, A. Masrur and S. Chakraborty. QoC-oriented efficient schedule synthesis for mixed-criticality cyber-physical systems. FDL, 60~67, 2012
- [14] J. Zou, S. Matic and E. A. Lee. PtidyOS: A Lightweight Microkernel for Ptides Real-Time Systems. RTAS, 209~218, 2012
- [15] P. Vicaire, E. Hoque, Z. Xie and J. A. Stankovic. Bundle: a group based programming abstraction for cyber physical systems. ICCPS, 32~41, 2010
- [16] P. S. Duggirala and S. Mitra. Abstraction Refinement for Stability. ICCPS, 22~31, 2011.
- [17] M. Chen, X. Qin, H. Koo and P. Mishra. System-Level Validation: High-Level Modeling and Directed Test Generation Techniques. Springer, 2012
- [18] L. Bu and X. Li. Path-oriented bounded reachability analysis of

- composed linear hybrid systems. STTT, 13(4): 307~317, 2011
- [19] A. David, D. Du, K. G. Larsen, M. Mikucionis and A. Skou. An evaluation framework for energy aware buildings using statistical model checking. SCIENCE CHINA Information Sciences, 55(12): 2694~2707, 2012
- [20] A. Platzer. Logical Analysis of Hybrid Systems - Proving Theorems for Complex Dynamics. Springer, 2010
- [21] R. Alur, A. Kanade, S. Ramesh and K. C. Shashidhar. Symbolic analysis for improving simulation coverage of Simulink/Stateflow models. EMSOFT, 89~98, 2008
- [22] N. He, P. Rümmel and D. Kroening. Test-case generation for embedded Simulink via formal concept analysis. DAC, 224~229, 2011
- [23] B. Miller, F. Vahid and T. Givargis. MEDS: Mockup Electronic Data Sheets for automated testing of cyber-physical systems using digital mockups. DATE, 1417~1420, 2012
- [24] L. Bu, D. Xie, X. Chen, L. Wang and X. Li: Demo Abstract: BACHOL - Modeling and Verification of Cyber-Physical Systems Online. ICCPS, 222, 2012
- [25] A. Banerjee, K. K. Venkatasubramanian, T. Mukherjee and S. K. S. Gupta. Ensuring Safety, Security, and Sustainability of Mission-Critical Cyber-Physical Systems. Proceedings of the IEEE, 100(1): 283~299, 2012
- [26] 2012 CPS PI Meeting Agenda. <http://cps-vo.org/group/pimtg12/program>
- [27] J. Taneja, R. H. Katz and D. E. Culler. Defining CPS Challenges in a Sustainable Electricity Grid. ICCPS, 119~128, 2012
- [28] L. Parolini, B. Sinopoli, B. H. Krogh and Z. Wang. A Cyber-Physical Systems Approach to Data Center Modeling and Control for Energy Efficiency. Proceedings of the IEEE, 100(1): 254~268, 2012
- [29] A. Aswani, N. Master, J. Taneja, D. E. Culler and C. Tomlin. Reducing Transient and Steady State Electricity Consumption in HVAC Using Learning-Based Model-Predictive Control. Proceedings of the IEEE, 100(1): 240~253, 2012
- [30] F. Jin and K. G. Shin. Pack Sizing and Reconfiguration for Management of Large-Scale Batteries. ICCPS, 138~147, 2012
- [31] Y. P. Fallah, C. Huang, R. Sengupta and H. Krishnan. Design of cooperative vehicle safety systems based on tight coupling of communication, computing and physical vehicle dynamics. ICCPS, 159~167, 2010
- [32] I. Lee, O. Sokolsky, S. Chen, J. Hatcliff, E. Jee, B. Kim, A. L. King, M. Mullen-Fortino, S. Park, A. Roederer and K. K. Venkatasubramanian. Challenges and Research Directions in Medical Cyber-Physical Systems. Proceedings of the IEEE, 100(1): 75~90, 2012
- [33] D. Arney, M. Pajic, J. M. Goldman, I. Lee, R. Mangharam and O. Sokolsky. Toward patient safety in closed-loop medical device systems. ICCPS, 139~148, 2010
- [34] B. H. Calhoun, J. Lach, J. A. Stankovic, D. D. Wentzloff, K. Whitehouse, A. T. Barth, J. K. Brown, Q. Li, S. Oh, N. E. Roberts and Y. Zhang. Body Sensor Networks: A Holistic Approach From Silicon to Users. Proceedings of the IEEE, 100(1): 91~106, 2012
- [35] Y. Mo, T. H. Kim, K. Brancik, D. Dickinson, H. Lee, A. Perrig and B. Sinopoli. Cyber-Physical Security of a Smart Grid Infrastructure. Proceedings of the IEEE, 100(1): 195~209, 2012