

智能化信息物理系统中非确定性的分类研究



杨文华^{1,2,3} 许畅^{3,4} 叶海波¹ 周宇¹ 黄志球¹

1 南京航空航天大学计算机科学与技术学院 南京 211106

2 高安全系统的软件开发与验证技术工信部重点实验室(南京航空航天大学) 南京 211106

3 南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210023

4 南京大学计算机科学与技术系 南京 210023

(ywh@nuaa.edu.cn)

摘要 信息物理系统呈现出日趋智能化的特征,而非确定性又是系统中普遍且固有的特性。例如,系统通过传感器感知环境时,会不可避免地存在误差。非确定性若未被妥当处理,往往会影响系统的正确运行,并带来一系列的问题。因此,对信息物理系统中的非确定性进行处理是至关重要的,也是促进信息物理系统进一步智能化的关键。对非确定性进行处理的前提是需要对其有充分的理解和认识,然而现有工作对信息物理系统中非确定性的研究尚处于探索阶段。针对这一问题,研究了信息物理系统中的非确定性分类。具体而言,根据信息物理系统中被广泛认可的5C技术架构对非确定性进行了分类,详细介绍了该架构每一层次上可能存在的非确定性,并结合典型的信息物理系统应用进行了举例说明;同时,总结了当前的相关研究工作,并展望了未来信息物理系统在应对非确定性方面的智能化研究方向。

关键词: 信息物理系统;智能化;非确定性;分类;5C架构;非确定性处理

中图法分类号 TP311

Taxonomy of Uncertainty Factors in Intelligence-oriented Cyber-physical Systems

YANG Wen-hua^{1,2,3}, XU Chang^{3,4}, YE Hai-bo¹, ZHOU Yu¹ and HUANG Zhi-qiu¹

1 College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

2 Key Laboratory of Safety-Critical Software (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics), Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing 211106, China

3 State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210023, China

4 Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract Cyber-physical systems are increasingly presenting the characteristic of intelligence, while uncertainty is pervasive and intrinsic in them, e.g., the sensors contain inevitable errors when the systems sense the environment through them. If the uncertainty is not properly handled, it will affect the correct running of the systems and bring a series of problems. Therefore, it is critical to study how to deal with uncertainty in cyber-physical systems. The premise of handling uncertainty is that we first need to understand and recognize it comprehensively. However, the existing work on the uncertainty of cyber-physical systems is still in its infancy. To address this issue, this paper studied the taxonomy of uncertainty in cyber-physical systems. Specifically, this paper classified the uncertainty based on the widely recognized 5C technology architecture in cyber-physical systems and introduced the possible uncertainties at each level of the technology architecture with illustrating examples in typical cyber-physical systems. Meanwhile, to help understand the current research status of uncertainty handling in the field of cyber-physical systems, this paper summarized the current research work and presented an outlook of future research directions for intelligence-oriented cyber-physical systems.

Keywords Cyber-physical systems, Intelligentize, Uncertainty, Taxonomy, 5C architecture, Uncertainty handling

到稿日期:2019-10-07 返修日期:2019-12-09 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB1001801);国家自然科学基金(61802179,61932021,61972197);南京大学计算机软件新技术国家重点实验室开放课题(KFKT2018B02);江苏省“青蓝工程”项目

This work was supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB1001801), National Natural Science Foundation of China (61802179,61932021,61972197), Open Fund of State Key Laboratory of Novel Software Technology (KFKT2018B02) and Qing Lan Project.

通信作者:许畅(changxu@nju.edu.cn)

1 引言

现代软件逐步向“人-机-物”三元融合的模式演进,软件泛在化和智能化的特征愈益明显。许多软件需要管理大量的硬件设备资源和数据。例如,近期被广泛关注的以机器人、无人机、智能制造为代表应用的信息物理系统(Cyber-Physical Systems,CPS)就越来越呈现出泛在化和智能化的特征。信息物理系统涵盖了人、机、物的融合,它借助技术手段将人的控制延伸至信息与物理世界。在运行过程中,CPS涉及信息世界中的计算、通信及控制,还与物理世界中的实体有着紧密的交互。随着人工智能的快速发展,智能化技术在CPS中扮演的作用也愈加明显,如它们可被应用于机器人与无人机应用中的数据分析和挖掘以及决策和控制等许多重要方面。

为了管理与之相关的资源,CPS需要融合传感器、嵌入式计算、云计算、网络通信与软件等各类信息技术,因此其往往比较复杂。开发人员对复杂系统认知的局限性、物理环境的固有复杂性以及系统中所用设备的不完美性,导致非确定性广泛存在于CPS中。例如,开发者在提取用户需求时可能会出现偏差,系统感知环境变化时传感器难免会存在误差,CPS各部件通过网络进行通信时也可能会出现不同程度的延时,执行器在执行具体的控制行为时亦会突然失效或不能达到预期的效果等。这些非确定性是CPS中固有的,在CPS的设计与实现过程中需要对其进行考虑与处理,若未对其进行适当处理,非确定性很可能会影响CPS的正确运行,进而导致系统出现各种问题。例如,在2007年的DARPA城市挑战赛中,加州理工学院开发的一辆自动驾驶车由于忽略了控制模块与物理环境之间交互的非确定性,一次没有预见的交互直接导致汽车违反安全需求^[1]。

可以看出,非确定性对信息物理系统有着显著影响,涉及了许多方面。而用户期望的CPS应当可以处理尽可能多的外界情况与非确定性,并能对各种情形智能地做出合理的决策和控制。因此,在CPS进一步智能化的过程中,对非确定性的处理不容忽视。换言之,正确和有效处理非确定性,是CPS智能化发展的前提。

然而,CPS涉及信息世界与物理环境,其中非确定性的表现形式很多,且会出现在系统开发与运行等多个阶段。虽然近期非确定性被软件工程领域的研究者广泛讨论和研究^[2-3],而且越来越多的研究者已经认识到了对CPS中非确定性进行研究的重要性^[4-5],但当前对CPS领域中非确定性的研究仍处于探索阶段,相关工作依然较少。针对这一现状,本文将通过探讨CPS中非确定性的分类与处理,来帮助研究者和开发者更好地认识与理解CPS中的非确定性,为设计并实现更加智能、能有效应对非确定性且安全可靠的信息物理系统奠定基础。

本文第2节回顾了CPS的起源和概念,重点讨论了CPS中被广泛认可的5C技术架构,并介绍了3类典型的CPS应用;第3节参考其他学科领域对非确定性的定义,探讨了我们对CPS中的非确定性的理解;第4节基于前面介绍的5C技术架构,对CPS中的非确定性进行了详细分类,阐述了5C技术架构中每个层次上可能存在的非确定性,并以3类典型的

应用为例进行了说明,帮助理解CPS智能化过程中需要处理的非确定性;第5节介绍了目前对CPS中的非确定性进行处理的相关工作,包括非确定性的建模、考虑非确定性的决策与控制,以及非确定性的验证与确认;最后总结全文,并展望信息物理系统智能化在非确定性应对方面的未来研究方向。

2 信息物理系统

信息物理系统的概念最先是由美国国家科学基金会提出的^[6]。信息物理系统自提出就得到了广泛关注,也被美国国家科学基金会列为了重点研究项目。为了深入理解信息物理系统的内涵,许多学者从CPS的理论方法和系统设计等多个方面开展了研究。但CPS自身比较复杂,其融合了计算、通信与控制等不同技术,同时研究人员关注的角度不同,因此研究人员对CPS的理解和阐述也略有不同。主导著名信息物理系统Ptolemy项目的Lee认为信息物理系统是一系列计算进程和物理进程的紧密集成,通过计算核心来监控物理实体的运行,而物理实体又借助网络和计算组件来实现对环境的感知和控制^[7]。Baheti等将CPS定义为系统中各种计算元素和物理元素之间紧密结合并在动态非确定事件作用下相互协调的高可靠系统^[8]。中国工业和信息化部出版的《信息物理系统白皮书(2017)》提到,CPS通过集成先进的感知、计算、通信、控制等信息技术和自动控制技术,构建了物理空间与信息空间中人、机、物、环境、信息等要素相互映射、适时交互、高效协同的复杂系统,实现了系统内资源配置和运行的按需响应、快速迭代和动态优化。

从已有工作的探讨中可以看出,CPS是一个跨学科领域,涉及嵌入式系统、网络技术与控制理论等。但嵌入式系统往往将重点放在计算组件上,而较少关注计算组件与物理组件之间的紧密联系。与CPS类似的物联网虽然常共享底层基础架构,但CPS在物理和计算组件之间提供了更高的组合和协同。因此,本文将CPS理解为基于嵌入式设备的高效能网络化智能信息系统,同时CPS具有高度自主感知、自主判断、自主调节和自治的能力,能够实现虚拟信息世界和实际物理世界互联与协同的下一代智能系统。作为一种新兴的技术,CPS具有广阔的应用前景,因此对它进行研究具有重大意义。近期,随着人工智能技术的发展,CPS的智能化受到了更加广泛的关注。CPS的内涵丰富,实现它的技术架构包含多个层次。下文将介绍一种被广泛认可的CPS架构,并以此为基础来讨论CPS中非确定性的分类。

2.1 技术架构

信息物理系统通过一系列计算单元和物理实体在网络环境下的高度集成与交互,来提高系统在信息处理、实时通信、远程精准控制以及组件自主协调等方面的能力。CPS具有一些典型的特征:1)构成CPS的各部分都具备泛在的连接能力,可以实现跨网络、异构多技术的融合,保障数据的自由流通;2)CPS是数据驱动的,环境感知的结果、实时分析的对象、科学决策的基础都是数据;3)CPS能够将异构硬件、异构软件、异构数据、异构网络集成起来,实现数据在信息部分与物理部分的流通和交互;4)CPS能够根据感知到的环境变化

信息,在信息空间进行处理分析,自适应地对外部变化做出有效响应。

CPS的技术架构需要考虑以上功能和特性。Lee等提出的5C架构^[9]由于充分考虑了这些因素,因此被业界广泛认可。5C技术架构代表了5个层次,自底向上分别代表感知连接层(Connection)、数据转换层(Conversion)、网络层(Cyber)、认知层(Cognition)以及配置层(Configure)。感知连接层主要负责数据的采集与信息的传输,是直接 with 物理世界交互的一层,实现环境的实时智能感知。数据转换层将采集的原始数据进行转化、分析与挖掘,为上层决策分析提供支持,在数据中捕获信息。网络层是CPS中信息的集散中心,也是网络结构与节点设备的关键层,通过分析实体相关数据,可以产生支撑决策的知识,实现信息到知识的加工。认知层以协同优化为目标,综合前面产生的信息,提供所监控系统的完整信息。该层需要对系统进行实时监控,并对系统形成一个抽象的模型认识,以提供对系统性能、故障和设备维护的最优决策支持,进而将获得的知识转化为最优的决策。配置层是网络空间对物理空间的反馈,依据智能决策优化建议进行控制与协同优化,以最优的决策为用户创造新的价值。

2.2 典型应用

典型的CPS应用通常是基于传感器的通信自治系统。例如,监视环境的无线传感器网络将处理后的信息传输到中央节点。本节将简单介绍3类典型的CPS应用案例,以帮助研究者和开发者进一步了解CPS可能的应用场景,这3个案例分别是医疗CPS、交通CPS以及智能家居CPS。后文也将利用这些案例来介绍CPS中非确定性的具体表现。

医疗设备行业正在经历一场由嵌入式软件以及网络连接所驱动的快速变革。现有的医疗设备越来越多的是能同时控制患者生理多个方面的分布式系统,而不是仅独立治疗病人的医疗设备。医疗CPS是由一组可感知情景的网络化的医疗设备组成的系统,这些系统在医院中日益普及,为复杂临床情况下的患者提供高质量的持续关怀^[10]。医疗CPS中的设备根据功能不同主要可以分为两类:1)监控设备,如床边心率、氧量监测仪等监测设备,其为患者提供不同种类的临床相关信息;2)输送设备,如输液泵、呼吸机及可进行手术操作的设备,这些设备可以启动能够改变患者生理状态的治疗。医疗CPS中相互连接的监控设备可以将收集到的数据用于决策支持,例如医务人员可以分析这些设备提供的信息,然后使用输送设备开始治疗;或者,决策实体可以使用智能控制器分析从监控设备接收的数据,以此估计患者的健康状态,并通过向输送设备发出命令自动启动治疗(如药物输注)。大多数医疗设备依靠软件来完成其任务,因此确保这些设备及其相互操作的安全至关重要。

目前的交通系统包括汽车、航空和铁路系统,在维持社会正常功能方面发挥着至关重要的作用。这些交通系统彼此互连,形成了结构复杂的交通网络。交通网络易受交通堵塞、地震、飓风、洪水和袭击等事故的影响。在信息网络的帮助下,交通系统比以前更容易检测出故障。传统交通系统与信息网络的整合,为交通信息物理系统的诞生奠定了基础^[11]。现有各种交通工具、轨道以及道路都可以配备形式多样的传感器,

它们融合成了庞大的交通信息物理系统。利用这些设备采集的数据可以有效控制交通系统的调度,减少事故的发生,提高交通系统的安全性和可靠性。以列车调度系统为例,该系统包括地面设备、车载设备、司机及通信网络等模块。轨道可以分为若干区域,每一区域由本地控制器与通信系统控制,本地控制器和区域内的列车等子系统保持连续的双向通信。列车从一个控制区域进入下一个区域的移交,是通过相邻区域控制器之间的通信实现的。在系统的运行过程中,需要所有的组成模块共同参与和协作才能保证列车的安全运行。

CPS中通常包含物联网设备(例如传感器)和智能设备(例如智能手机),它们能以实现共同目标的方式协作。智能家居是应用前景最为广阔的信息物理系统之一^[12]。智能家居中的家用电器可以通信互联,很多时候用户可以使用笔记本电脑或者智能手机轻松控制家用电灯、开关、门、相机和其他大多数电器。例如,智能家居可以协调诸如温度传感器和智能灯之类的智能设备,不仅改善了生活质量,还能降低功耗。为了更好地控制这些设备,用户可以预先定义一些基本规则^[13],如传感器感知到房间温度高于某个值时则打开空调,或者一氧化碳监测器发现一氧化碳浓度超过某个阈值时产生警报并打开智能风扇和窗户。智能家居的使用令人兴奋,但其中也存在一些问题。1)安全是在维护智能家居时需要重点关注的问题,因为黑客在不前往目标家庭的条件下就可以轻易接近并攻击智能家居。2)个人隐私问题,如果智能家居系统没有得到充分保护,黑客可能会利用智能设备获取用户个人隐私并做出违法行为。

3 非确定性的理解

非确定性的概念在许多其他学科中都被广泛研究过,如物理学、经济学、心理学以及决策理论。由于非确定性也存在于信息物理系统中,因此CPS的研究者可以重用和精化这些学科中已有的与非确定性相关的知识来开发可靠的系统。从CPS的角度去研究非确定性,建立对非确定性的共识和分类,可以使研究CPS的群体能够利用来自其他学科的现有结果,并促进研究人员之间更加一致的对话。此外,对非确定性的共识和分类也有助于分析,可以通过比较并整合不同的技术和方法来处理非确定性。而对非确定性的处理是CPS智能化所必须面对的一个问题。本文将首先回顾其他学科中提出的非确定性的定义,再从CPS的角度提出对非确定性的理解和分类。

3.1 各领域中的非确定性

非确定性是经济学中经常研究的主题,通常与风险、预期效用和理性决策相关^[14]。在经济学领域,非确定性通常用于描述具有随机或概率性质的过程或情况。例如,天气不可预测的性质(如飓风)可以通过破坏一个国家的农业产出而给经济带来非确定性。因此,在经济学领域,非确定性的概念被解释为不能确定一个事件或决策的发生带来的结果。此外,经济学的非确定性也可能包括事件或结果的概率在任何客观意见上既不可知也不可计算的情况^[15]。相比之下,经典物理学认为非确定性是由不完美测量引入的假象^[16]。物理实体或现象的每个测量由于测量设备的限制或者应用了Ad-hoc的

实验技术,而固有地存在非确定性。通常,测量设备受到精度和准确度的限制。物理测量中缺乏数值精度或不准确性时可能会导致模糊性,即使使用精确的测量工具,采用 Ad-hoc 的实验技术进行实验也会限制结果的再现性,从而导致不一致的结论。非确定性也是日常心理学和人类行为所固有的,最明显的是决策任务。在心理学中,非确定性常常指人类在不完整信息存在的情况下做出判断的能力^[17]。一般来说,不完全的信息发生于数据的某个维度(例如动作的结果)在当前是未知的时候。即使缺乏足够和可靠的信息,人类也通常能够基于过去的经验做出合理的判断。

非确定性也是决策理论中的一个重要概念。决策理论研究的根本问题中就包含如何在非确定性存在的情况下做出好的决策,这与 CPS 中的情况有不少相似之处,因为 CPS 中也涉及控制决策与非确定性。在决策理论中,非确定性是通过确定性(Certainty)间接定义的。确定性被定义为了解如何选择结果最优的行动方案所必需的一切条件^[18],这意味着在确定的情况下决策者知道每个可能的行动和结果。非确定性被定义为确定性与决策者当前可用于决策的信息状态之间的差距^[18]。图 1 描述了确定性与非确定性之间的关系。当完全未知时,非不确定性是最大的,在这种状态下,决策者不知道任何动作结果的可能性。信息知识可以降低非不确定性,它能帮助决策者选择动作,以便增加获得最期望的结果的概率。当信息对决策者可用时,非不确定性被减少,这就是图 1 中“当前信息”的状态。根据目前的信息知识,有些非不确定性是可以被减少的,也就是已知的未知(Known unknowns)^[2];还有一些非不确定性由于目前知识局限是不能减少的,这部分对应着未知的未知(Unknown unknowns)。

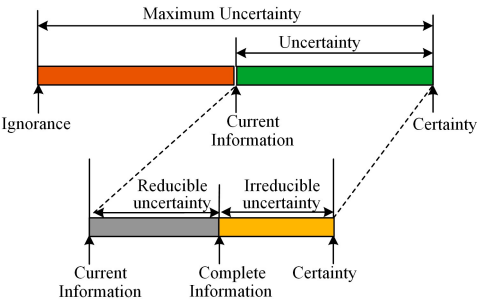


图 1 确定性与非确定性的关系^[19]

Fig. 1 Relation between certainty and uncertainty^[19]

3.2 CPS 中的非确定性

上文讨论了不同但相关的非不确定性概念,也就是说,非不确定性是随机过程、测量工具的精度与准确性以及决策任务的复杂性所固有的。CPS 也面临这些情况。例如,一个信息物理系统可能会尝试满足不可行的要求,与不可预测和不利的环境交互,使用不可靠的传感器来测量环境的属性,利用不完全和不一致的信息执行决策控制任务。基于上述讨论以及相关工作^[4,20],本文认为 CPS 中的非不确定性是一种由不完整或不一致信息所导致的系统无法确定其在一个特定点所处环境或配置的实际情况的一种系统状态。

以 CPS 感知环境的过程为例,不可靠的传感器会导致非确定性。具体来说,由于传感器的物理特性,其在感知的过程

中不可避免地存在误差。我们可以意识到这个误差的存在,甚至可以通过现实中的统计大概给出一个误差的分布(对应到已知的部分),但在某次实际的感知中,我们无法确定具体的误差值(对应到未知的部分)。这就是一种信息物理系统与环境交互的非不确定性。

信息物理系统的许多方面都存在非不确定性,尽管它们的程度可能不同。例如,用户难以准确表达他们的质量偏好、用于监测的传感器具有不可控的噪声、用于定义与评估系统的分析模型可能过于简化而与实际不符等,这些因素都是非确定性的来源。一般来说,非不确定性根据来源的产生阶段,可以分为以下 3 个层次:需求层的非不确定性,设计层的非不确定性和运行时的非不确定性。信息物理系统的开发从用户给定功能性与非功能性的需求开始,而这常常受到非不确定性的影响。比如,由于用户缺乏经验,提出的需求可能不完整、模棱两可,甚至丢失了真实需求,这些是需求层的非不确定性。即使需求已经完全明确,在系统的设计和实现阶段也可能会出现非不确定性。例如,在设计阶段,开发者不可能考虑到满足给定要求的所有可能的设计方案,设计实现存在多种可能,并且也可能出现与需求无关的不可追踪的设计实现。运行时的非不确定性主要来自信息物理系统与环境之间的交互,这种非不确定性出现在信息物理系统与环境之间的共享边界上。信息物理系统使用传感器来监控和测量其环境中的可观察事件。然而,由于传感器的自身属性以及外界环境的影响,它可能会出现无法预期的不精确性,甚至失效。再如,信息物理系统通过执行器来负责执行动作,而执行器也不能保证完全按预期完美地完成动作,它也会受非不确定性的影响。

这些非不确定性会影响到 CPS 的设计、开发和运行,需要进行妥当处理,使其智能地进行决策。理解非不确定性是处理的前提,根据非不确定性的产生阶段可以简单地将其划分到需求、设计和运行时这 3 个层次。这种划分可以帮助理解非不确定性在 CPS 生命周期中不同阶段的表现形式。但美中不足的是,这 3 个层次是软件系统所共有的,依此对 CPS 中的非不确定性进行分类难免过于笼统,没有体现出 CPS 的特点,如 CPS 复杂的架构与非不确定性之间的关系就难以对应起来。因此,本文将从另一个新的角度来对 CPS 中的非不确定性进行分类,即按照 5C 技术架构对非不确定性进行分类,并探讨在 5C 架构的每个层次中有哪些非不确定性。相比按照需求、设计及运行时 3 个层次的划分,新的分类标准更为具体,也更贴近 CPS。我们相信这样的分类可以更好地帮助研究者和开发者理解 CPS 中的非不确定性。

4 非确定性的分类

智能化是 CPS 的发展趋势,也是用户的期望。若要开发一个智能、可靠的 CPS,则对系统中非不确定性的处理无法忽视,因为它们广泛存在于 CPS 中,且可能会影响 CPS 的正确运行。本节将以信息物理系统中广泛采用的五层技术架构(Connection, Conversion, Cyber, Cognition 及 Configure, 5C)为信息物理系统中非不确定性的分类基础,来介绍信息物理系统不同技术架构层次中的非不确定性。图 2 展示了其中的部分示例,左边简述的是信息物理系统中各层的一些主要功能,右

边给出的是每层中可能存在的一些非确定性,中间的金字塔展示的是 5C 架构的 5 个层次^[9]。

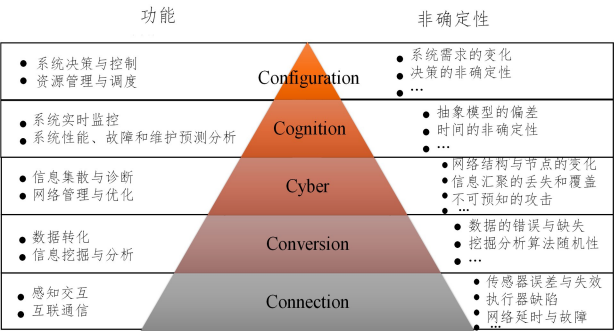


图 2 CPS 五层技术架构中各层的非确定性
Fig.2 Uncertainty in each layer of CPS's 5C architecture

4.1 感知连接层中的非确定性

感知连接层主要负责数据的采集与信息的传输,是直接
与物理世界交互的一层。该层的非确定性主要存在于系统与
环境的交互过程及各组件互联互通的过程中。系统会通过传
感器和执行器与外界环境进行交互。由于设备自身的不完美
性,传感器不可避免地存在误差,也可能会偶然失效;同时,执
行器在执行具体的动作行为时,也不能保证完全按预期执行;
另外,网络传输会存在非确定的延时或者偶然的故障,协议中
也可能存在非确定性。由于信息物理系统的基础架构中使用了大量的传感器和网络设备,因此感知连接层中的这些非确定性都普遍存在于信息物理系统中。

以第 2 节中提到的 3 类典型应用为例,医疗 CPS 中使用
的心率、氧量监测仪可能存在误差;另外,用于治疗输液泵
和呼吸机等设备也不能保证完美执行预期的行为,有缺陷医
疗设备导致的事故也屡见不鲜^[21]。交通 CPS 中的传感器使
用得更多,如 GPS 传感器、各种速度及距离传感器,这些传感
器往往存在误差。例如,2019 年 3 月埃塞俄比亚航空公司的
波音 737MAX 飞机发生了坠毁,调查结果显示^[22]该机坠毁
的根本原因是飞机上的机动特性增强系统(作用是让飞机在
高迎角进入失速坠毁时自动压低机头,脱离失速状态,从而拯
救飞机)设计失误,但触发原因则是飞机上用于检测迎角的传
感器误差太大,导致飞机误以为迎角太大而触发了机动特性
增强系统,使其自动压低机头而最终坠毁。另一方面,在自动
驾驶汽车执行动作时,执行器也可能存在非确定性,例如控制
汽车执行转弯动作时并不能保证达到预期的转弯角度。

4.2 数据转换层中的非确定性

数据转换层将采集的原始数据进行转化、分析与挖掘,为
上层决策分析提供支持。该层的非确定性来源包含在进行数
据转化分析时可能产生的数据错误与缺失,以及数据挖掘分
析算法自身的随机性。下层提供的原始数据将在本层被进一
步加工处理,从而将数据转化为信息。在这一过程中,原始数
据的转化由于精度的关系可能会出现缺失;另外,数据的转化
也可能受到人为错误的影响。另一方面,用于挖掘分析数据
的算法(如分类及聚类算法)由于自身的随机性也会引入非
确定性,导致针对相同的数据每次获取的信息可能存在差别。
例如,医疗 CPS 中往往存在病情或生理状况预判这一环

节。系统中的预判组件会依据收集的原始数据进行处理,这
一过程中可能会用到分类算法,但根据不同的分类算法得到
的分类结果可能不是确定的,从而导致预判的结果包含非确
定性。

4.3 网络层中的非确定性

网络层是 CPS 中信息的集散中心,也是网络结构与节点
设备的关键层。系统中网络结构与节点的变化,以及信息汇
聚时的丢失和覆盖,都可能会包含非确定性。首先,系统中的
网络设备可能会动态调整,包括网络设备的增加和减少,但这
种变化可能并不如预期,即增加和减少操作都可能失败,网络
设备也可能偶然失效。其次,网络层还可能遭受到不可预知
的攻击,不可预知体现在发生的时间以及攻击的类型方面。
另外,在 CPS 中可能会存在多个分布的子系统,从这些分布
式的系统中了解全局的状况也存在非确定性。最后,在信息
的汇聚过程中,丢失和覆盖也难以预料。

智能家居系统中的物联网设备和智能设备繁多。例如,
用户使用的智能手机就属于其中的一部分。用户在家庭环境
中常会从一个区域走到另一个区域,在这个过程中用户随身
携带的智能手机也会移动。假如用户的手机通过蓝牙可以连
接不同的设备(如音箱和空调),在移动的过程中智能手机需
要经常切换连接的设备,但切换蓝牙连接的设备时,由于距离
的关系,连接的设备可能并不如预期。

4.4 认知层中的非确定性

认知层将综合前面产生的信息,提供所监控系统的完整
信息。该层需要对系统进行实时监控,并对系统有一个抽象
的模型认识,以提供对系统性能、故障和设备维护的分析支
持。但在抽象系统时使用的抽象模型与实际系统可能会有偏
差。例如,使用控制理论去构建 CPS 时,需要先抽象出系统
中的控制变量与系统状态之间的关系,目前很多工作使用的
都是线性模型,但在实际的系统中它们之间的关系很多都是
非线性的。这种模型抽象上的简化带来了非确定性。另外,
在对系统进行实时控制和全局时钟管理时,时间的非确定性
也是存在的(如任务执行时间的非确定性)。

以交通 CPS 中的列车调度系统为例,调度系统需要了解
每个区域内的地面情况和车辆情况。系统中每个区域的本地
控制器会与区域内的列车等子系统保持通信,调度系统也会
对整个区域有一个全局的认识,例如会将其抽象成每个区域
内列车的数量以及相互之间的距离。但系统对区域的认识以
及本地区域对自己区域的抽象认识都可能与实际不符(如子
系统出现故障没有更新本区域情况时,会导致系统了解的整
个区域内的车辆数量与实际不一致)。在设计系统时,出于通
用性和重用性的考虑,元系统和子系统之间的耦合需要松散,
但元系统又需要利用子系统的情况进行决策,因此元系统会
对子系统有一个抽象表示,但该表示可能不是子系统的准确
表示。另一类重要的非确定性是时间的非确定性,认知层会
提供所监控系统的完整信息,因此 CPS 会用到很多实时嵌
入式系统,但这些系统执行具体任务的时间有时也是非确定
的。

4.5 配置层中的非确定性

配置层是网络空间对实体空间的反馈,用户或者控制系
统将要对设备实体进行干预。相比传统软件系统仅用作部署

在计算机上的数据处理实体,CPS 由于其自动和智能的特性越来越多地渗透到各个领域,包括医疗及工业自动化等。但是 CPS 仍然需要依赖人的正确行为,因为人是定义系统需求以及使用系统的用户。但人的行为本质上是非确定的,例如描述需求时可能不够准确并且可能会变化,在使用系统时行为可能非常不可预测。另一方面,系统会在配置层进行决策,决策方法的不同导致针对相同的条件可能会产生不同的决策,像用于决策的马尔可夫决策过程本身就具有概率性和非确定性。

仍以智能家居为例,用户在使用智能家居系统时可以定义好一些基本规则用于系统的决策。但由于用户不是专业人士,其先后定义的规则之间可能会相互冲突^[13],描述的需求也可能并非本意。

5 CPS 中非确定性的处理

开发一个智能、安全且可靠的 CPS 往往面临着严峻的挑战,而非确定性的存在愈发加剧了这一挑战。近年来,CPS 中非确定性的处理问题得到了越来越多的关注。研究者开始从不同的角度对非确定性的处理进行研究,有从概念与需求的角度去探讨非确定性建模与描述的工作,有探讨如何在非确定性存在的情况下更好地进行决策与控制的工作,也有从质量保障的角度去探究非确定性给信息物理系统带来的影响的工作。由于目前针对信息物理系统中非确定性的研究仍处于探索阶段,因此本节将仅从以上 3 个角度对现有信息物理系统中非确定性处理的工作进行简单梳理,以便了解信息物理系统中非确定性处理的研究现状。

5.1 非确定性的建模

正如第 3 节中提到的,非确定性是一个在很多领域都有使用的术语,因此在不同领域中有许多模型被提出用于建模非确定性。例如,在能源领域,信息间隙决策理论(Information Gap Decision Theory)就被用于建模非确定性^[23]。本文主要关注的是 CPS 领域中的非确定性。CPS 中很重要的一部分是决策与控制^[24],而自适应系统关注的恰恰是如何让复杂系统适应各式各样的环境变化,因此自适应系统被认为是 CPS 的重要子类^[25]。例如,卡内基梅隆大学软件工程研究所的研究人员就将自适应系统中的很多技术推广到了 CPS 中。

为了概念化 CPS 中的非确定性,Zhang 等^[4]通过回顾各领域中非确定性的已有工作,得出了一个非确定性的概念模型。该概念模型被映射到 CPS 的 3 个逻辑层次:应用层、基础架构层和集成层。他们使用 UML 类图以及 OCL 约束来表示该模型。为了确认该模型,作者在两个不同的工业案例上对非确定性进行了识别与描述。而 Cheng 等^[26]提出了一种需求语言 RELAX,通过软件工程师明确指定系统需求中的非确定性来对其进行处理。该语言是一种带布尔表达式的结构化自然语言形式,使用威胁建模的一种变体来识别非确定性,其中威胁是在开发时带来非确定性的各种环境条件。在 RELAX 的基础上,Ahmad 等^[27]从需求的角度出发,进一步处理了 CPS 中环境的非确定性。

在技术方面,现有 CPS 中非确定性的建模工作使用的技术大体可以分为两类:概率理论(Probability Theory)以及可

能性理论(Possibility Theory)。例如,文献[28]就使用误差区间以及概率分布建模系统与环境交互的非确定性,利用可能性理论去建模非确定性对系统的正面和负面影响。但是,理论上可以使用的非确定性建模方法仍有很多,并不局限于概率理论以及可能性理论,如文献[29]探讨了使用可信度理论(Credibility Theory)和机会理论(Chance Theory)用于建模更普遍意义上的非确定性的可能。

5.2 考虑非确定性的决策与控制

非确定性会导致系统无法确定其在一个特定点所处环境或配置的实际情况,而 CPS 最重要的一个功能就是控制各个组件,响应环境的变化,以做出最好的决策。显然,非确定性会加剧系统决策与控制的难度。因此,如何在非确定性存在的情况下进行更好的决策与控制是一个重要的问题。

非确定性的种类很多,它们可能出现在各个层次,而现有 CPS 中考虑非确定性的决策与控制工作大多都是针对某类非确定性的。例如,为了设计一个能应对网络层存在不可预知的攻击此类非确定性的 CPS,让系统面对意外或前所未有的事件时保持可接受的操作或服务水平,文献[30]提出了一套设计框架,该框架考虑了系统鲁棒性与弹性之间的权衡,并将该框架成功应用到了一个电力系统。为了让系统能应对动作执行存在延时这类非确定性,文献[31]提出了一种基于概率模型检验的自适应控制方法,使得系统能在非确定性存在的情况下进行前瞻决策,以提高适应决策的有效性。

CPS 中的软件组件可能会随机出现故障,此类非确定性若未被妥当处理,很可能会将一个软件组件的故障传播下去,导致其他组件出现混乱,从而影响系统的安全性。Crenshaw 等提出了一个 Simplex 参考模型用于设计部署 CPS,该模型可以限制不可靠组建的故障传播^[32]。最初的 Simplex 架构旨在为实时系统提供容错和动态升级,它由两个用于平衡倒立摆的控制器组成:第一个是安全、简单且可验证正确的;第二个提供了理想的功能,但有时不正确。Simplex 的基本思想是当软件组件发生故障时,控制器从第二个切换到完全认证的第一个控制器,以确保系统安全、稳定地运行。Simplex 架构有许多原型系统,如潜水控制器和模拟自动驾驶仪。Wang 等进一步扩展了 Simplex 架构^[3],使得按扩展后架构设计的 CPS 既能限制软件组件的故障传播,也能限制物理组件的故障传播。

5.3 非确定性的 V&V

非确定性会影响信息物理系统的运行,通过对系统的验证和确认(Verification and Validation,V&V)可以探究非确定性对信息物理系统的实际影响,例如可以探究系统在非确定性存在的情况下是否更易出错。非确定性的 V&V 问题也已经引起了研究人员的关注。

项目 U-Test(近期由欧盟 Horizon2020 计划资助的一个项目)的目标就是采用基于模型与基于搜索的方法来测试受非确定性影响的 CPS,以提高其可靠性^[33]。基于该项目,Zhang 等提出了一套框架用于测试非确定性影响下的 CPS^[34]。具体而言,他们采用了基于模型的方法对 CPS 进行测试。为了有效开展测试,他们提出了测试就绪模型(Test Ready Model),该模型包含 CPS 预期行为以及系统执行环

境,并可以用于直接生成测试用例。最初的测试就绪模型由测试建模人员给出,其中包含了他们对CPS预期行为的假设以及预期的物理环境,因此这些模型包含了特定建模人员的主观非确定性。同时,该框架支持测试就绪模型的演化,演化是基于实际操作数据的,这些数据中蕴含了系统中存在的客观非确定性。最后,他们在一个实际的医疗保健领域的CPS案例上确认了该测试方法。

与测试和运行时监控不同,文献[5]通过形式化的方法对受环境交互非确定性影响的信息物理系统进行了验证。首先,通过误差区间对信息物理系统与环境交互过程中的非确定性(如传感器感知误差)进行建模,之后借助约束求解器对系统进行验证,验证时将非确定性对系统感知变量的影响也纳入考虑范围。通过在验证过程中考虑系统与环境交互的非确定性,我们发现了已有验证方法不能发现的但系统实际运行中却存在的错误情况。同时,我们提出了一套基于搜索的模型校准方法来校准可能不精确的非确定性模型,以获取更准确的验证结果。已有工作中还有不少针对信息物理系统的测试与确认,但非确定性这一因素往往被忽略,因此不再赘述。

6 未来研究方向

CPS涉及信息世界与物理世界,又涵盖了感知、计算、通信及控制决策等一系列技术,其中非确定性的来源和种类非常多。已有工作只是关注并尝试处理了CPS中某些非确定性(如传感器与网络相关的非确定性),还有许多非确定性亟待处理。另外,非确定性会影响CPS运行过程中的各个方面,但已有研究工作对此关注较少。因此,CPS智能化在非确定性应对方面仍有许多研究挑战和机遇。

1)非确定性的识别和描述。CPS中非确定性有多种类型,可以来源于系统的需求阶段、设计与实现阶段以及系统运行时。识别非确定性是处理的基础,本文以“5C”架构为基础讨论了一些非确定性,但仍需要发现CPS中存在的其他更多的非确定性。其次,在描述非确定性时,现有方法大多利用概率理论,不能较好地描述所有非确定性。在未来的工作中,可以尝试寻找其他的描述方法来更准确地建模非确定性。

2)非确定性与系统质量保障。CPS的使用场景很多都是安全攸关的,对系统的质量有着较高的要求。而非不确定性会影响到CPS运行的方方面面,若未对其进行妥当处理,很可能对系统质量产生极大的负面影响。通过测试、验证与模拟等手段研究非确定性对CPS质量的影响,可以及早发现其中的问题,以便后续进行解决。因此,研究非确定性对系统质量的影响是一个重要的问题。

3)非确定性与系统可演化性。CPS规模大且复杂度高,构造时无法一蹴而就,往往都是在不断适应环境和需求的变化过程中持续演化。系统可演化性涉及感知环境、智能决策以及动态演化。CPS中的非确定性在系统演化时的影响更为明显。例如,演化的一个动机就是需求的改变,为了适应需求改变,系统的设计与实现也需要相应地改变。改变可以是更新现有的决策部分,增加或者删除一个组件等。这些变化显然会加剧现有非确定性,甚至引入新的非确定性。因此,非确定性与系统的可演化性之间关系紧密,对非确定性的研究也

关乎系统的可演化性。

结束语 信息物理系统将计算、通信与控制技术紧密结合,以实现信息世界与物理世界的融合与协调。而CPS需要应对的实际环境往往复杂多变,如何应对这些环境进行智能的决策和控制是CPS开发过程中不可避免的问题。随着人工智能技术的发展,CPS的进一步智能化愈加成为一种趋势,这也是用户对CPS的期望。

但系统的复杂性,使得非确定性广泛存在于CPS中,这些非确定性会影响系统的方方面面。因此,在CPS的智能化过程中,对非确定性的正确和有效处理是必不可少的。但现有工作对CPS中非确定性这一重要问题的研究仍不够深入与全面,还处于发轫之始。为了更好地理解CPS中的非确定性,识别系统中的非确定性,并方便非确定性的后续处理以及CPS的进一步智能化,本文按照5C技术架构对CPS中的非确定性进行了分类,介绍了架构中各层次上可能存在的非确定性,并展望了未来信息物理系统在应对非确定性方面的智能化研究方向。

参考文献

- [1] MITRA S, WONGPIROMSARN T, MURRAY R M. Verifying cyber-physical interactions in safety-critical systems[J]. IEEE Security & Privacy, 2013, 11(4): 28-37.
- [2] ELBAUM S, ROSENBLUM D S. Known unknowns: testing in the presence of uncertainty[C]// Proceedings of the 22nd ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering - FSE 2014. New York, USA: ACM Press, 2014.
- [3] WANG X, HOVAKIMYAN N, SHA L. L1Simplex: fault-tolerant control of cyber-physical systems[C]// 2013 ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs). IEEE, 2013: 41-50.
- [4] ZHANG M, SELIC B, ALI S, et al. Understanding uncertainty in cyber-physical systems: A conceptual model[M]// Modelling Foundations and Applications. Cham: Springer International Publishing, 2016: 247-264.
- [5] YANG W H, XU C, PAN M X, et al. Improving verification accuracy of CPS by modeling and calibrating interaction uncertainty[J]. ACM Transactions on Internet Technology, 2018, 18(2): 1-37.
- [6] WOLF W. News briefs[J]. Computer, 2007, 40(11): 104-105.
- [7] LEE E A. Cyber physical systems: design challenges[C]// 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC). IEEE, 2008: 363-369.
- [8] BAHETI R, GILL H. Cyber-physical systems[J]. The Impact of Control Technology, 2011, 12(1): 161-166.
- [9] LEE J, BAGHERI B, KAO H G. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems[J]. Manufacturing Letters, 2015, 3: 18-23.
- [10] LEE I, SOKOLSKY O. Medical cyber physical systems [C]// Proceedings of the 47th Design Automation Conference on - DAC '10. New York, USA: ACM Press, 2010: 743-748.
- [11] DEKA L, KHAN S M, CHOWDHURY M, et al. Transportation

- Cyber-Physical System and its importance for future mobility [M] // *Transportation Cyber-Physical Systems*. Elsevier, 2018: 1-20.
- [12] DO Q, MARTINI B, CHOO K K, et al. Cyber-physical systems information gathering: a smart home case study [J]. *Computer Networks*, 2018, 138: 1-12.
- [13] BU L, XIONG W, LIANG C J M, et al. Systematically ensuring the confidence of real-time home automation IoT systems [J]. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 2018, 2(3): 1-23.
- [14] NICODANO G. The Economics of Uncertainty and Information by J. -J. Laffont [J]. *Giornale Degli Economisti E Annali Di Economia*, 1989, 48(3/4): 183-184.
- [15] GILBOA I, POSTLEWAITE A W, SCHMEIDLER D. Probability and uncertainty in economic modeling [J]. *Journal of Economic Perspectives*, 2008, 22(3): 173-188.
- [16] TAYLOR B N. Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results [R]. National Bureau of Standards, 1994.
- [17] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Judgment under uncertainty: heuristics and biases [M] // *Uncertainty in Economics*. Elsevier, 1978: 17-34.
- [18] AUGHENBAUGH J M. Managing uncertainty in engineering design using imprecise probabilities and principles of information economics [D]. Georgia Institute of Technology, 2006.
- [19] ESFAHANI N, KOUROSHFAR E, MALEK S. Taming uncertainty in self-adaptive software [C] // *Proceedings of the 19th ACM SIGSOFT Symposium and the 13th European Conference on Foundations of Software Engineering (SIGSOFT/FSE'11)*. New York, USA: ACM Press, 2011: 234-244.
- [20] RAMIREZ A J, JENSEN A C, CHENG B H C. A taxonomy of uncertainty for dynamically adaptive systems [C] // *2012 7th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS)*. IEEE, 2012: 99-108.
- [21] Networking and Information Technology Research and Development Program. High-Confidence Medical Devices; Cyber-Physical Systems for 21st Century Health Care [OL]. <http://www.nitrd.gov/About/MedDevice-FINAL1-web.pdf>.
- [22] Faulty sensor led to Boeing 737 Max crash [OL]. <https://www.latimes.com/business/la-fi-ethiopian-airlines-crash-report-20190404-story.html>.
- [23] AIEN M, HAJEBRAHIMI A, FOTUHI-FIRUZABAD M. A comprehensive review on uncertainty modeling techniques in power system studies [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 1077-1089.
- [24] MUCCINI H, SHARAF M, WEYNS D. Self-adaptation for cyber-physical systems [C] // *Proceedings of the 11th International Workshop on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS'16)*. New York, USA: ACM Press, 2016: 75-81.
- [25] BURES T, KNAUSS A, PATEL P, et al. Software engineering for smart cyber-physical systems [J]. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 2017, 42(2): 19-24.
- [26] CHENG B H C, SAWYER P, BENCOMO N, et al. A goal-based modeling approach to develop requirements of an adaptive system with environmental uncertainty [M] // *Model Driven Engineering Languages and Systems*. Berlin: Springer, 2009: 468-483.
- [27] AHMAD M, GNAHO C, BRUEL J M, et al. How to handle environmental uncertainty in goal-based requirements engineering [C] // *Proceedings of the 40th International Conference on Software Engineering Companion Proceedings (ICSE'18)*. New York, USA: ACM Press, 2018: 368-369.
- [28] YANG W H, XU C, LIU Y P, et al. Verifying self-adaptive applications suffering uncertainty [C] // *Proceedings of the 29th ACM/IEEE international conference on Automated software engineering (ASE'14)*. New York, USA: ACM Press, 2014: 199-210.
- [29] LIU B D. Uncertainty theory [M] // *Uncertainty Theory*. Berlin: Springer, 2010: 1-79.
- [30] ZHU Q Y, BASAR T. Robust and resilient control design for cyber-physical systems with an application to power systems [C] // *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*. IEEE, 2011: 4066-4071.
- [31] MORENO G A, CÁMARA J, GARLAN D, et al. Proactive self-adaptation under uncertainty: a probabilistic model checking approach [C] // *Proceedings of the 2015 10th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE 2015)*. New York, USA: ACM Press, 2015: 1-12.
- [32] CRENSHAW T L, GUNTER E, ROBINSON C L, et al. The simplex reference model: limiting fault-propagation due to unreliable components in cyber-physical system architectures [C] // *28th IEEE International Real-Time Systems Symposium (RTSS 2007)*. IEEE, 2007.
- [33] ALI S, YUE T. U-test: evolving, modelling and testing realistic uncertain behaviours of cyber-physical systems [C] // *2015 IEEE 8th International Conference on Software Testing, Verification and Validation (ICST)*. IEEE, 2015: 1-2.
- [34] ZHANG M, ALI S, YUE T, et al. Uncertainty-wise evolution of test ready models [J]. *Information and Software Technology*, 2017, 87: 140-159.



YANG Wen-hua, born in 1990, Ph.D., lecturer, is member of China Computer Federation (CCF). His main research interests include self-adaptive software systems and intelligent software systems.



XU Chang, born in 1977, Ph.D., professor, is senior member of China Computer Federation (CCF). His main research interests include big data software engineering, and intelligent software testing and analysis.