

信息科学技术学术著作丛书

信息物理融合 系统导论

李必信 周颖 编著



科学出版社

信息科学技术学术著作丛书

信息物理融合系统导论

李必信 周 颖 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从信息物理融合系统的建模和验证两个方面着手,系统全面地介绍了信息物理融合系统开发和使用过程的基础知识和基本原理,介绍了如何利用微分动态逻辑进行信息物理融合系统建模与验证的基本理论和方法。全书共分12章,其中,第1~6章是关于信息物理融合系统基本知识简介,包括基本概念、基本原理、典型案例和存在问题分析等;第7章讨论了信息物理融合系统一般的建模和验证思路,以及常用的建模和验证方法;第8~11重点介绍如何利用微分动态逻辑、微分代数动态逻辑、微分代数时序动态逻辑以及量化的微分动态逻辑进行信息物理融合系统的建模和验证问题;第12章为工作的总结与展望。

本书适用于计算机、通信等学科专业的教师、研究生和高年级本科生,以及从事信息物理融合系统相关系统建模和验证的工程技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

信息物理融合系统导论/李必信,周颖编著. —北京:科学出版社,2014

(信息科学技术学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-041247-8

I. ①信… II. ①李… ②周… III. ①信息技术-应用-物理学-研究
IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 128602 号

责任编辑:孙伯元 魏英杰 / 责任校对:傅秋红

责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2014年6月第一次印刷 印张:19 3/4

字数:365 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



《信息科学技术学术著作丛书》序

21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代,一场以网络科学、高性能计算和仿真、智能科学、计算思维为特征的信息科学革命正在兴起。信息科学技术正在逐步融入各个应用领域并与生物、纳米、认知等交织在一起,悄然改变着我们的生活方式。信息科学技术已经成为人类社会进步过程中发展最快、交叉渗透性最强、应用面最广的关键技术。

如何进一步推动我国信息科学技术的研究与发展;如何将信息技术发展的新理论、新方法与研究成果转化为社会发展的新动力;如何抓住信息技术深刻发展变革的机遇,提升我国自主创新和可持续发展的能力? 这些问题的解答都离不开我国科技工作者和工程技术人员的求索和艰辛付出。为这些科技工作者和工程技术人员提供一个良好的出版环境和平台,将这些科技成就迅速转化为智力成果,将对我国信息科学技术的发展起到重要的推动作用。

《信息科学技术学术著作丛书》是科学出版社在广泛征求专家意见的基础上,经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播网络科学和未来网络技术,微电子、光电子和量子信息技术、超级计算机、软件和信息存储技术,数据知识化和基于知识处理的未来信息服务业,低成本信息化和用信息技术提升传统产业,智能与认知科学、生物信息学、社会信息学等前沿交叉科学,信息科学基础理论,信息安全等几个未来信息科学技术重点发展领域的优秀科研成果。丛书力争起点高、内容新、导向性强,具有一定的原创性;体现出科学出版社“高层次、高质量、高水平”的特色和“严肃、严密、严格”的优良作风。

希望这套丛书的出版,能为我国信息科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时,欢迎广大读者提出好的建议,以促进和完善丛书的出版工作。

中国工程院院士

原中国科学院计算技术研究所所长



前 言

近年来,有关信息物理融合系统(cyber-physical system,CPS)的课题研究越来越受到各国政府的重视。美国政府于2006年2月发布《美国竞争力计划》,将CPS列为重要的研究项目;同年,美国国家科学基金会(national science foundation,NSF)把CPS列为关键的研究领域之一,并与美国其他联邦机构合作举办了一系列关于CPS的研讨会。另外,美国总统科学技术顾问委员会(president's council of advisors on science and technology,PCAST)在2007年7月发布的题为《挑战下的领先——竞争世界中的信息技术研发》(*Leadership under challenges: Information technology R&D in a competitive world*)的报告中列出了八大关键信息技术,其中CPS列在首位,其他依次是软件、数据、数据存储与数据流、网络、高端计算、网络与信息安全、人机界面、NIT与社会科学。同时,很多著名高校和研究机构全力配合政府的CPS发展规划,开展了一系列针对CPS的研究,也取得了一些创新性的代表成果。代表性的有麻省理工学院的分布式智能机器人花园、宾夕法尼亚工程学院的汽车导航软件GrooveNet,卡内基梅隆大学的智能电网等。欧盟计划于2007~2013年在嵌入式智能与系统的理论研究和技术开发(advanced research and technology for embedded intelligence and systems,ARTEIS)中投入54亿欧元,以期在2016年前后成为智能电子系统的世界领袖。2009年四位院士向国务院提交了一份“有质量的GDP”报告,提出将CPS作为我国未来信息技术发展方向的提议,该提议得到了国务院相关领导的充分肯定。国家自然科学基金、973计划和863计划近年来已经把CPS的相关研究作为重要支持方向。2010年,国家863计划信息技术办公室和专家组在上海举办了信息-物理融合系统发展战略论坛,2012年4月将在北京举办CPS Week,来自国内外的专家学者均对CPS的研究和发展给予高度关注和热烈讨论。另外,中国香港、中国台湾、日本、印度、巴西等国家与地区也相继提出把CPS作为未来5~10年信息技术领域的关键技术而展开研究。由于各国(或地区)政府的高度重视,掀起了全世界研究CPS的热情,也引起了学术界、科技界、工业界甚至商业界对CPS研究和应用的普遍关注和史无前例的重视。

什么是CPS,一般来说,CPS是一个综合计算、网络和物理环境的多维复杂系统,通过3C(computation、communication、control)技术的有机融合与深度协作,实现大型工程系统的实时感知、动态控制和信息服务。根据Wikipedia的解释,CPS就是能够使得计算元素和物理元素组合和协同更加紧密的系统。按照何积

丰院士的话说：“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。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。”

在未来若干年中,CPS将会越来越普遍地应用到社会生活的各个方面,CPS的兴起将给各行各业,如智能交通、智慧医疗、智能电网、智能农业、工业自动化、国防现代化等,带来了许多机遇与挑战,被认为是继计算机、互联网之后信息技术的第三次浪潮,谁掌握了CPS的核心技术和理论,谁就占据了下一个五年、十年甚至更长时间信息领域的制高点。先看看几个典型的行业CPS案例。①交通CPS,以智能交通系统为例,随着当前经济的飞速发展,各种交通工具数量的激增,带来的交通事故、拥堵、环境污染等诸多负面问题也越来越引起人们的关注。如何利用计算机、通信、控制等技术建立新型智能的交通体系,以解决或减轻日益增加的车辆对城市造成的压力,成为包括中国在内的很多国家交通建设面临的新挑战。通过交通CPS的建立与使用,可以有效利用基本道路设施和运输能力,减轻对环境的影响,降低事故发生率和发生拥堵的可能性。②医疗CPS,2009年初IBM成立医疗行业解决方案实验室,从此,智慧医疗成为医疗CPS的代名词。智慧医疗一个很重要的作用就是实现医疗服务的互联互通和互操作,以及医疗信息和资源的共享,使可以跨医疗机构进行双向转诊,积极发挥上层大型医疗机构人才、技术及设备方面的优势,结合各底层中小型医疗机构的服务功能和网点资源,促使基本医疗逐步下沉,合理利用医疗资源。保障医疗信息和资源实时、可靠地进行资源的共享交换是设计智能医疗系统的一个基本要求,它涉及通信、传感和实时控制等关键技术领域,是对系统开发设计的重大挑战。随着智能化医疗系统的建立健全,传统就医看病难的问题将会得到逐步改善,医疗成本也会越来越低。③电力CPS,智能电网(smart power grid)是一种面向电力系统的CPS,作为一种具有重要战略意义的高新技术已引起政府的高度重视。智能电网是以双向数字科技创建的输电网络,通过侦测电力供应者的供应状况和使用者的电力使用状况不断调整输电以达到节省能源、减轻成本和提高输电系统可靠性的目的。智能的输电网络不但传输能量而且还有信息流的传递,相比于传统输电网更加依赖于通信和控制技术,其最关键的地方是在保障整个输电系统的信息、物理安全的前提下进行正常应用。

近年来,世界各国对CPS的关注是史无前例的,关于CPS的很多问题受到学术界和科技界的高度关注并成为当前的热点研究问题。从国内外公开发表的各种文献来看,研究内容主要集中在如下几个方面:①关注典型的CPS应用实例;②关注CPS的发展历程、基本概念和基本原理;③关注CPS的设计和开发问题;④关

注 CPS 的规约与建模方法和技术;⑤关注 CPS 安全性和可靠性;⑥关注 CPS 的时间问题、时态问题和空间问题;⑦关注 CPS 可信性问题;⑧关注 CPS 的数据管理问题;⑨关注 CPS 的属性验证和确认问题;⑩关注 CPS 的 QoS 管理与评价问题。

国际两大学术机构 IEEE 和 ACM 从 2010 年起每年联合举办专门的 CPS 国际会议 (IEEE /ACM International Conference on Cyber-Physical System, IC-CPS),也标志着 CPS 在未来若干年将仍然是学术界关注的热点领域,而且是重要领域。在 ICCPS 历年的 CFP(call for papers)中,理论基础、建模、分析和综合技术、CPS 的架构、CPS 的基本组成结构、CPS 抽象、CPS 评价和度量以及新型的 CPS 应用和详细的实例分析是关注的热点主题。从中不难体会到,在未来几年,CPS 的主要发展趋势如下:①支持 CPS 的基础理论需要集成计算机、通信、控制、生物、交通、军事、基础设施建设等诸多领域的智慧,是在多学科基础理论的综合运用和融合基础上发展起来的,目前还不够成熟,需要进一步完善和发展;②建立在对 CPS 行为机理准确理解的基础上,完善 CPS 的抽象和规约理论和方法;③完善 CPS 体系结构(architecture)和组成模块(building block),使其能够很好刻画和描述 CPS 的整体架构和组成部件;④目前还没有一套完整的、统一的、系统的、集成的针对 CPS 的建模和分析理论、方法和语言,未来应该研究和开发相应的建模理论、方法和语言;⑤研究各种行之有效的验证和确认技术、测试手段、评价方法和度量机制,保障 CPS 功能属性和各种非功能属性的可满足性、有效性和正确性,以便进一步提高 CPS 系统的 QoS;⑥关于 CPS 安全性、可靠性、可信性、自治性、实时性的研究还处在初级阶段,需要进一步丰富和完善;⑦如何实现信息(cyber)组件和物理(physical)组件在异构环境下的集成和综合,实现信息层和物理层的深度耦合;⑧探索各种新型的 CPS 应用,无论是小到纳米级生物机器人,还是大到全球能源协调与管理系统等涉及人类基础设施建设的复杂大系统,均是 CPS 应用的开发对象,也是未来针对 CPS 研究的重要问题。

也正是在这样的背景之下,2009 年 12 月,我们很荣幸地邀请到国际著名的软件形式化和逻辑学专家、中国科学院院士周巢尘先生来东南大学讲学,与周先生的两天相处,我深深地被先生的随和和豁达感动,也被先生的知识面和洞察力所吸引。周先生关于 CPS 的独到见解以及他对 CPS 重要性的相关阐述,使得我立即决定应该投入全身的力量去从事 CPS 的研究。研究过程中,首先遇到的最大问题是有关 CPS 的资料零碎而且混乱,不便于团队内部的交流,也不便于与团队之外的人们交流,撰写一本关于 CPS 的书已经势在必行。然而,由于才疏学浅,自觉很难写出合适的书籍以答谢同仁。于是想到,即便在所有前人工作之上,写一篇调查报告,总结前人有价值之成果,归纳其中有规律之结论,也不失做了一件有意义的事情。于是,我规划了 22 个题目,发动选修《软件开发方法与技术》课程的 40 多位研究生花了一个学期的时间进行调研,通过对这些调查报告的整理和分析,编写了

本书的上篇,取名为《信息物理融合系统现状与分析》。本书的下篇是我们三年来的研究积累,详细介绍了如何利用混合 UML 和微分动态逻辑进行 CPS 的建模和属性验证,主要内容涵盖了朱敏、翟小祥、陈乔乔、李加凯和吉顺慧几位研究生的硕士和博士论文相关内容,这部分内容取名为“信息物理融合系统建模与验证”。

至此,我应该向参加本书编写的东南大学计算机科学与工程学院 2011 级的部分研究生们表示感谢,感谢他(她)们的辛勤劳动和付出,他们分别是王金明、翁国庆、王勇、姚盛强、刘文菊、王远方、张毅、曹清、张娇、黄威力琪、严善春、王辉、赵兴楼、靳博、刘虎、徐欢、赵沐为、卞坤、安贞巧、黄虹影、周书湘、蒋雨露、陈莉莉、姜杉、李伟、舒晴、毛辉杰、刘莹、徐敏杰、党万春、陈杰、谢世光、庄志昆、蒋锟、马骏驰等。另外,我还要感谢东南大学软件工程研究所的周晓宇、戚晓芳、廖力和周颖,正是因为他们的支持,我们这个软件工程团队才会变得越来越强大,因为他们的付出,我们这个团队才会有越来越好的明天。还要感谢参加本书编写和修订过程的博士生孙小兵、王璐璐、邱栋、谢春丽、文万志、刘飞、陶传奇和张慧等,硕士生吴晓娜、宋锐、刘翠翠、张前东、齐姗姗、孔祥龙、李超、刘力、耿国清、司静文等,正是他(她)们带来了活力、朝气和干劲,才使得我在最困难的时候,也能潜心学习和研究,是他(她)们伴随我都过了无数快乐的时光。

感谢我的恩师,南京大学教授郑国梁,没有郑老师的培养,就没有我今天的一切。感谢南京大学教授徐家福先生,有幸在过去的几年中多次倾听徐先生的演讲、多次与徐先生交流。先生对科学研究的坚持不懈的追求和孜孜不倦的探索永远是吾辈楷模,先生的谆谆教诲,时时鞭策吾辈要踏踏实实、戒骄戒躁。还要感谢南京大学副校长吕建教授,正是吕教授的关照,我有机会参加了 2000 年在南京举行的全国第四期高技术培训班,并最终获得优秀学员称号而有机会获得国家 863 青年项目资助,这是我首次获得国家级科研项目资助,给了我莫大的鼓舞,点燃了我从事科研事业的热情,于是我毅然地放弃了去高薪企业工作的机会,踏上去欧洲列国进行深造的征途;2004 年回国之后,吕建教授领导的计算机软件新技术国家重点实验室给了我一定的经费支持,支撑我度过起步的几年时光。我还要感谢中国科学院院士,北京大学梅宏教授,很荣幸于 2006 年访问了北京大学软件研究所,多次还与梅宏院士、王千祥教授、张璐教授等进行了广泛的交流,从他们那里学习到很多从事尖端科学研究的方法、从事科学研究应有的态度和培养学生的经验。梅宏院士 2011 年还亲自来东南大学对我院软件学科的发展提出了很多建设性的宝贵建议,也给我们软件工程团队很多的鼓励和指引。我还要感谢香港理工大学的梁金能博士、中科院软件所张健研究员、清华大学向东教授、上海交通大学赵建军教授和南京大学周毓明教授,感谢他们为 2012 年在东南大学举办的软件工程新思维新技术研讨会所做的贡献。感谢中国计算机学会软件工程专委会、系统软件专委会和容错计算专委会的所有委员,每次与这些中国顶尖的科学家们交流都受益

匪浅,每次短暂的聚会都是人生最快乐的时光。

南京大学李宣东教授、陈家骏教授、赵建华教授、聂长海教授、周毓明教授和王林章教授对书稿提出了许多宝贵的建议。科学出版社的魏英杰编辑热情关照、精心审校。在此一并深致谢忱。

由于才疏学浅,精力有限,书中难免有错漏之处、敬请各位读者批评指正。也欢迎读者们针对书中观点与我们展开学术交流和讨论,将感激不尽。

李必信

2013年8月于南京九龙湖

目 录

《信息科学技术学术著作丛书》序

前言

上篇：信息物理融合系统现状与分析

第 1 章 CPS 简介	3
1.1 CPS 概述	3
1.2 CPS 与物联网、嵌入式系统、混成系统	5
1.2.1 CPS 与物联网	6
1.2.2 CPS 与嵌入式系统	8
1.2.3 CPS 与混成系统	9
1.3 CPS 的特点和挑战	10
1.4 国外研究现状	11
1.4.1 CPS 模型	11
1.4.2 CPS 数据传输与管理技术	13
1.4.3 CPS 能源管理	13
1.4.4 CPS 安全	14
1.4.5 CPS 软件设计技术的研究现状	15
1.4.6 CPS 控制技术的研究现状	15
1.4.7 面向具体应用的 CPS 研究现状	16
1.5 国内研究现状	19
1.6 本章小结	20
参考文献	21
第 2 章 CPS 软件开发基础	25
2.1 引言	25
2.2 各种主流的 CPS 建模方法	26
2.2.1 基于信道和面向参与者的 CPS 建模	26
2.2.2 基于模态模型 CPS 建模	27
2.2.3 基于格本体的 CPS 建模	28
2.2.4 基于关联顺序的 CPS 建模	28
2.3 CPS 规约方法	29

2.3.1 面向方面的规约方法	29
2.3.2 语义时间自动机	31
2.3.3 Hilbertean 代数规约	32
2.4 CPS 系统集成	33
2.4.1 CPS 系统集成面临的问题	33
2.4.2 CPS 系统集成方法	34
2.5 CPS 设计和开发方法	36
2.5.1 CPS 设计的挑战	36
2.5.2 CPS 设计需求	36
2.5.3 CPS 开发方法	37
2.6 本章小结	39
参考文献	40
第 3 章 CPS 关键属性分析	43
3.1 CPS 的安全性	43
3.1.1 CPS 安全需求	43
3.1.2 CPS 安全的潜在威胁	44
3.1.3 CPS 信息安全方案的主要机制	45
3.1.4 CPS 安全性解决方案	47
3.1.5 CPS 安全关键技术	48
3.2 CPS 的可靠性	49
3.2.1 可靠性的定义	49
3.2.2 可靠性与安全性的区别	50
3.2.3 可靠性解决方案	51
3.3 CPS 的可信性	53
3.3.1 CPS 数据的可信性	53
3.3.2 CPS 网络的可信性	54
3.3.3 CPS 软件的可信性	55
3.3.4 CPS 模块间的可信性	55
3.3.5 CPS 中人的可信性	56
3.3.6 CPS 可信性研究的重要性	56
3.3.7 电力 CPS 的可信性	57
3.4 本章小结	58
参考文献	58
第 4 章 CPS 测试与验证	61
4.1 白盒测试	61

4.1.1	面向 CPS 硬件的白盒测试	61
4.1.2	面向 CPS 软件的白盒测试	62
4.1.3	面向 CPS 网络的白盒测试	63
4.1.4	面向 CPS 系统的白盒测试	64
4.2	黑盒测试	66
4.2.1	计算机系统测试	66
4.2.2	嵌入式系统测试	66
4.2.3	物联网和无线感知设备测试	67
4.2.4	实时性测试	68
4.2.5	CPS 测试技术的现状	68
4.2.6	CPS 测试技术面临的困难	69
4.3	CPS 验证	70
4.3.1	验证的必要性	70
4.3.2	验证方法概述	71
4.3.3	验证模型	71
4.3.4	定理证明	73
4.3.5	模型检验	73
4.3.6	验证工具	76
4.4	本章小结	76
	参考文献	76
第 5 章	CPS 典型案例分析	80
5.1	智能交通系统	80
5.1.1	体系结构	81
5.1.2	智能交通 CPS 的主要构成	81
5.1.3	智能交通所涉及的关键技术	83
5.1.4	智能交通应用	83
5.1.5	面临的挑战	84
5.2	自动驾驶汽车	85
5.2.1	汽车 CPS 原理介绍	85
5.2.2	汽车 CPS 的实现	86
5.2.3	汽车 CPS 架构与应用	86
5.2.4	汽车远程信息服务系统	87
5.2.5	汽车导航	88
5.2.6	汽车安全系统	89
5.3	高速铁路安全监控系统	90

5.3.1	系统需完成的相关工作	90
5.3.2	系统的体系结构	90
5.3.3	安全监控系统的关键技术	92
5.3.4	未来的研究方向	93
5.4	智能电网	94
5.4.1	智能电网的产生背景	94
5.4.2	智能电网的含义	94
5.4.3	智能电网的特点与目标	95
5.4.4	智能电网的研究现状	97
5.4.5	智能电网的关键技术	100
5.5	智慧医疗	102
5.5.1	智慧医疗的现有基础架构	103
5.5.2	CPS 推动医疗服务智能化	105
5.5.3	智慧医疗案例	109
5.6	本章小结	110
	参考文献	111
第 6 章	CPS 主要问题浅析	113
6.1	CPS 信息流问题	113
6.1.1	信息流	113
6.1.2	CPS 信息流的特殊性	114
6.1.3	CPS 信息流模型	115
6.1.4	CPS 中的信息流	116
6.1.5	信息流安全验证方法	118
6.2	离散和连续问题	119
6.3	时间同步问题	119
6.4	抽象体系问题	119
6.5	环境感知	120
6.6	多源、异构、海量数据的传输与处理	120
6.7	CPS 的可验证性	121
6.8	软件工程方面	122
6.9	系统的安全性及可预测性	122
6.10	其他问题	123
6.11	本章小结	123
	参考文献	124

下篇：信息物理融合系统建模与验证

第 7 章 CPS 建模与验证研究概述	129
7.1 研究背景	129
7.2 研究现状	130
7.2.1 CPS 建模相关研究	130
7.2.2 相关验证技术研究	131
7.3 存在的问题以及解决方法	137
7.4 本章小结	139
参考文献	139
第 8 章 微分动态逻辑与 CPS 验证	145
8.1 概述	145
8.2 微分动态逻辑	146
8.2.1 基本语法	146
8.2.2 HP 元模型	149
8.2.3 微分动态逻辑验证方法	151
8.3 HybridUML 建模	154
8.3.1 HybridUML 语义基础:CHARON	154
8.3.2 HybridUML 数学元模型	155
8.3.3 HybridUML 规约补充	159
8.3.4 利用 HybridUML 建模过程	162
8.4 从 HybridUML 模型到 HP 模型转换	163
8.4.1 静态结构转换规则	164
8.4.2 动态行为转换规则	166
8.4.3 模型转换规则应用的模板	171
8.4.4 KeYmaera 输入代码生成	172
8.5 模型转换一致性	173
8.6 实例分析	174
8.6.1 建模	174
8.6.2 模型转换与属性规约	176
8.7 属性验证	177
8.8 本章小结	181
参考文献	181
第 9 章 微分代数动态逻辑与 CPS 验证	185
9.1 微分代数动态逻辑	185

9.1.1	微分代数程序	185
9.1.2	DAL 公式	187
9.1.3	基于 DAL 的属性规约与验证思想	188
9.2	基于 HybridUML 的 CPS 建模	190
9.2.1	HybridUML	191
9.2.2	扩展的 HybridUML 多元组	195
9.2.3	CPS 建模	198
9.3	HybridUML 模型向 DAP 转换	202
9.3.1	基本语义转换	203
9.3.2	系统模型转换	208
9.4	实例分析	213
9.4.1	空中防撞系统描述与建模	213
9.4.2	模型转换	217
9.4.3	DAL 属性规约及推理验证	219
9.5	本章小结	221
	参考文献	222
第 10 章	微分代数时序动态逻辑与 CPS 验证	226
10.1	微分代数时序动态逻辑	226
10.1.1	dTL 和 DAL 公式比较	226
10.1.2	dTL 和 DAL 语义比较	228
10.1.3	dTL 和 DAL 相继式演算比较	232
10.2	CPS 建模与属性验证	236
10.2.1	CPS 建模	237
10.2.2	CPS 属性规约	240
10.2.3	微分代数时序动态逻辑的语义	241
10.2.4	微分代数时序动态逻辑的相继式演算	245
10.3	实例分析	252
10.3.1	飞机防撞系统建模	252
10.3.2	飞机防撞系统安全性规约	255
10.3.3	飞机防撞系统安全性验证	255
10.4	本章小结	257
	参考文献	257
第 11 章	QdL 与 CPS 自适应性验证	261
11.1	概述	261
11.2	量化微分动态逻辑	262

11.2.1 基于 QdL 演算的属性验证	263
11.2.2 操作模型——QHP	264
11.2.3 QHP 元模型	265
11.2.4 QHP 代码格式	267
11.3 层次 mode 模型到 QHP 代码的转换	267
11.3.1 基于语义一致性的模型转换	268
11.3.2 QHP 模型到 QHP 代码的转换	273
11.4 实例建模与验证	276
11.4.1 实例描述	277
11.4.2 HybridUML 建模及 QHP 代码生成	278
11.4.3 自适应属性规约及验证	280
11.5 本章小结	284
参考文献	285
第 12 章 结束语	292
12.1 工作总结	292
12.2 工作展望	293
附录 缩略词表	294

上篇:信息物理融合系统现状与分析

这部分内容主要目的是介绍 CPS 的基础知识,涵盖了 CPS 基础、CPS 需求分析与设计、CPS 关键属性、CPS 测试与验证、典型 CPS 案例和 CPS 存在问题和挑战等 6 章内容。初学者通过这些章节的学习可以很好地了解 CPS 的基本概念和基本原理,CPS 的起源和发展轨迹、国内外的研究现状,CPS 系统开发过程中各种需求分析方法、设计方法、建模和规约方法,CPS 的安全性、可靠性和可信性,CPS 的质量保证技术和方法,典型的 CPS 应用案例与分析,CPS 在发展过程中存在的问题和面临的挑战等。其中,第 1 章首先讨论了 CPS 基本原理、基本概念、发展历程介绍;其次讨论了 CPS 国内外研究现状;最后讨论了 CPS 与物联网、嵌入式系统、混成系统的区别与联系等。第 2 章首先讨论了各种 CPS 建模方法,其次讨论了现有的各种 CPS 规约手段,再次讨论了 CPS 系统集成发的各种方法,最后还讨论了 CPS 系统架构的研究现状。第 3 章首先讨论了 CPS 的安全性解决方案,其次讨论了 CPS 的可信性问题的各种案例及解决方法,最后讨论了 CPS 的可靠性问题解决方案。第 4 章首先讨论了 CPS 的 QoS(quality of service)问题及现状,然后讨论了 CPS 黑盒测试和白盒测试问题,最后讨论了各种常用的 CPS 的验证技术与方法。第 5 章主要介绍了汽车 CPS、火车 CPS、智能电网和智慧医疗等几个典型的 CPS 案例,并进行了分析。第 6 章讨论了 CPS 存在问题与挑战等。