

2018 届硕士专业学位论文

分类号: _____

学校代码: 10269

密 级: _____

学 号: 51151500146



華東師範大學

基于 MARTE 和随机混成自动机的
智能建筑能耗建模与分析方法研究

院 系: 计算机科学与软件工程学院

专 业 名 称: 软件工程

研 究 方 向: 可信软件

指 导 教 师: 杜德慧 副教授

学位申请人: 咎慧

2017 年 11 月

Dissertation for master degree in 2018
(Professional)

University Code: 10269
Student ID: 51151500146

EAST CHINA NORMAL UNIVERSITY

Research on Modeling and Analysis of Energy Consumption for Smart Buildings Based on MARTE and Stochastic Hybrid Automata

Department:	School of Computer Science and Software Engineering
Major:	Software Engineering
Research Direction:	Trustworthy Software
Supervisor:	Associate Professor Dehui Du
Candidate:	Hui Zan

Nov, 2017

华东师范大学学位论文原创性声明

郑重声明：本人呈交的学位论文《基于 MARTE 和随机混成自动机的智能建筑能耗建模与分析方法研究》，是在华东师范大学攻读硕士/博士（请勾选）学位期间，在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确说明并表示谢意。

作者签名：_____

日期： 年 月 日

华东师范大学学位论文著作权使用声明

《基于 MARTE 和随机混成自动机的智能建筑能耗建模与分析方法研究》系本人在华东师范大学攻读学位期间在导师指导下完成的硕士/博士（请勾选）学位论文，本论文的研究成果归华东师范大学所有。本人同意华东师范大学根据相关规定保留和使用此学位论文，并向主管部门和相关机构如国家图书馆、中信所和“知网”送交学位论文的印刷版和电子版；允许学位论文进入华东师范大学图书馆及数据库被查阅、借阅；同意学校将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于（请勾选）

☐ 1. 经华东师范大学相关部门审查核定的“内部”或“涉密”学位论文*，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

☐ 2. 不保密，适用上述授权。

导师签名：_____

本人签名：_____

年 月 日

* “涉密”学位论文应是已经华东师范大学学位评定委员会办公室或保密委员会审定过的学位论文（需附获批的《华东师范大学研究生申请学位论文“涉密”审批表》方为有效），未经上述部门审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权）。

答 慧 硕士专业学位论文答辩委员会成员名单

姓名	职称	单位	备注
李国强	副教授	上海交通大学	主席
张民	副教授	华东师范大学	
李鑫	副研究员	华东师范大学	

摘 要

能量信息物理融合系统 (Cyber-Physical Energy System, CPES) 是一类具有随机和混成特点的复杂系统。智能建筑 (Smart Building) 是一种典型的 CPES, 它通过对系统中各种功能构件的智能控制来改变室内环境参数, 从而为人类提供舒适的生存环境, 并且力求减少系统的总体能耗。

传统的系统开发方法在设计、开发完成后才进行测试, 测试完成后再对系统进行修改往往成本过高且耗时过长。为了在开发过程的早期发现系统设计的错误与缺陷, 模型驱动开发 (Model-Driven Development, MDD) 方式具有重要意义。然而, 使用 MDD 方法对智能建筑这一类复杂的 CPES 建模面临的挑战是: 1) 针对 CPES 的特性, 结合智能建筑领域的特征, 如何有效地重用该领域的知识, 指导构建系统的设计模型? 2) 如何扩展标准建模语言 MARTE/UML 以构建系统的设计模型? 3) 如何建模 CPES 的可执行模型, 并实现关于系统能耗等性质的验证与分析? 针对以上问题, 我们提出了一种智能建筑能耗的建模与分析方法, 主要贡献包括以下内容:

首先, 基于建筑信息模型、参照本体构造方法的基本步骤, 给出了智能建筑的领域本体, 包括智能建筑中的基本概念、概念间的关系和约束, 并指出了如何利用领域本体指导建模系统初步模型。

其次, 针对智能建筑等 CPES 的能耗感知、随机和混成特性, 提出扩展的 MARTE/UML 建模规范: 1) 定义了 CPES 中两种典型的随机行为; 2) 扩展了 MARTE 中的数据类型和表达式以完善其建模能力; 3) 扩展了 UML 的类图、顺序图和状态图的元模型以支持对能耗、随机和混成的建模。

虽然 MARTE/UML 模型能够以直观的形式实现系统的多视图建模, 但由于其

半形式化的特性，无法对模型的属性进行验证、评估。针对此问题，我们以能耗为中心扩展了随机混成自动机，定义了能耗随机混成自动机的语法、语义，并给出从扩展的 MARTE/UML 状态图到能耗随机混成自动机的映射规则，以实现模型的自动转换。基于我们的 Modana 工具和模型验证工具 UPPAAL-SMC，可实现本文所提的智能建筑能耗建模与分析方法。

最后，利用我们所提的智能建筑能耗建模与分析方法，针对一个具体案例——智能温控系统进行了研究。实验证明该方法不仅支持对智能建筑系统的完整建模，而且可以借助统计模型检测技术分析、评估系统的能耗等性质。

关键词：智能建筑，领域本体，MARTE，随机混成自动机，统计模型检测

ABSTRACT

Cyber-Physical Energy System(CPES) is a kind of complex system with stochastic and hybrid features. Smart building is a typical CPES, which changes the indoor environment parameters through the intelligent control of functional components, to provide a comfortable living environment for human beings. Also, it strives to reduce overall energy consumption of the system.

In the process of traditional development methods, systems are tested after designed and developed, and it is often too costly and time-consuming to modify systems. Thus, it is of great importance to use Model-Driven Development(MDD) method in order to find errors and inconsistencies in systems in the early stage. However, the modeling of complex CPESs such as smart buildings faces many challenges: 1) In view of the characteristics of CPES, combined with the features of smart buildings, how to effectively reuse the knowledge in this field, and guide the construction of design models? 2)How to modify the standard modeling language MARTE/UML to build system design models? 3)How to construct the executable models of CPES, and to analyze energy consumption and other properties? To address the above problems, we propose a modeling and analysis method for energy consumption of smart buildings. The main contributions of this paper are as follows:

First of all, ontology of smart buildings is given based on the building information model and the main steps of ontology construction methods. The domain ontology includes the basic concepts of smart buildings, the relationships among concepts and the constraints. Besides, we also point out how to use it to guide system modeling.

Secondly, in view of CPES's energy-aware, stochastic and hybrid features, we extend

the MARTE/UML modeling language: 1)Two typical stochastic behaviors are defined; 2)Data types and expressions in MARTE are extended; 3)The meta model of extended class diagrams, sequence diagrams, and state charts are presented to support modeling of energy consumption, stochastic, and hybrid behaviors.

Although MARTE/UML can realize the multi-view modeling of systems in an intuitive way, it is almost impossible to achieve model validation and evaluation because of its semi formal attributes. To solve this problem, we extend the Stochastic Hybrid Automata to Energy Stochastic Hybrid Automata(ESHA) based on energy consumption, and define its syntax and semantics. Besides, mapping rules from MARTE/UML state charts to ESHA are given, and the automatic model transformation is implemented. Based on our Modana tool and model verification tool UPPAAL-SMC, we present the implementation of the proposed method.

Finally, we study a specific case – intelligent temperature control system with our proposed method. The experimental results show that the method not only supports the complete modeling of smart buildings, but also can analyze system energy consumption and other properties with stochastic model checking technology.

Keywords: *Smart Building, Domain Ontology, MARTE, Stochastic Hybrid Automata, Stochastic Model Checking.*

目录

第一章 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	2
1.3 相关理论与技术	3
1.4 本文工作与主要贡献	5
1.5 本文组织结构	7
第二章 智能建筑领域本体	9
2.1 智能建筑领域本体	9
2.1.1 基本术语	10
2.1.2 关系	11
2.1.3 约束和规则	13
2.2 领域本体指导建模初步模型	14
2.3 本章小结	16
第三章 面向 CPES 的 MARTE 扩展	17
3.1 MARTE 中的能量、随机和时钟	17
3.2 MARTE 建模元素的扩展	19
3.2.1 CPES 中的随机行为	19
3.2.2 数据类型	20
3.2.3 表达式	21
3.3 MARTE/UML 模型的扩展	23
3.3.1 MARTE/UML 类图的扩展	24

3.3.2	MARTE/UML 顺序图的扩展	25
3.3.3	MARTE/UML 状态图的扩展	31
3.4	本章小结	35
第四章	能耗随机混成自动机的验证	36
4.1	能耗随机混成自动机	36
4.1.1	ESHA 的语法	36
4.1.2	ESHA 的语义	38
4.2	MARTE 模型到 ESHA 的转换	41
4.2.1	模型映射规则	41
4.2.2	模型转换伪代码	43
4.3	建模与分析方法的实现框架	46
4.4	本章小结	48
第五章	案例研究	49
5.1	场景描述	49
5.2	系统建模	50
5.2.1	初步模型	50
5.2.2	精化模型	53
5.3	模型验证与分析	59
5.3.1	ESHA 模型	59
5.3.2	模型验证与分析	62
5.4	本章小结	65
第六章	总结与展望	66
6.1	总结	66
6.2	下一步工作	67
参考文献	68
致谢	73
发表论文和科研情况	74

插图

1.1	智能建筑能耗建模与分析方法	6
2.1	智能建筑基本术语的概念层次	10
2.2	智能建筑领域本体概念间的交互关系	13
3.1	扩展的 MARTE 变量和表达式	21
3.2	<i>HWPowerSupply</i> 衍型的扩展	24
3.3	扩展的类图元模型	25
3.4	扩展的顺序图元模型	28
3.5	扩展的顺序图示例	29
3.6	扩展的状态图元模型	33
3.7	扩展的状态图示例	34
4.1	扩展的 MARTE/UML 状态图-ESHA 模型的映射规则	43
4.2	扩展的 MARTE/UML 状态图-ESHA 模型的映射示例	44
4.3	Modana 体系结构	47
4.4	基于 Modana 和 UPPAAL-SMC 的实现框架	47
5.1	智能办公建筑的类图	50
5.2	智能办公建筑的顺序图	51
5.3	物理环境、加热器和室内环境的初步状态图	51
5.4	精化后的物理环境状态图	55
5.5	精化后的加热器状态图	55
5.6	精化后的室内环境状态图	56

5.7	工作/出差模式状态图	57
5.8	策略 <i>I</i> 的状态图	58
5.9	智能办公建筑的布局	59
5.10	案例参数实例化	60
5.11	四种物理环境模式的 ESHA 模型	60
5.12	加热器和室内环境的 ESHA 模型	61
5.13	三种用户行为模式 ESHA 模型	61
5.14	三种策略的 ESHA 模型	62
5.15	实时电价的 ESHA 模型	62
5.16	系统仿真结果	63
5.17	三种策略对用户不舒适度、系统能耗、电费的影响	64
5.18	三种用户行为模式对用户不舒适度、系统能耗、电费的影响	65

表格

2.1	智能建筑领域本体概念间的结构关系	12
2.2	智能建筑领域本体概念-MARTE/UML 模型的映射规则	16
4.1	迁移能耗的计算	39

第一章 绪 论

1.1 研究背景

能量信息物理融合系统

信息物理融合系统（Cyber-Physical Systems, CPS）[1, 2] 是一种综合了计算、网络和物理环境的多维复杂系统，它通过计算、通信和控制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。

现今，人们对能源的需求处于高速增长中。各个国家尤其是像我国这样的发展中国家为了发展经济，存在大量的能源需求。目前，人类约 80% 的能源都是从煤炭、石油和天然气中获得，并且预计在接下来的二十年中，能源的需求量还将增长约一半。然而，地球资源是有限的，日益增长的能源需求与资源有限的现状引发了人们对能源危机（Energy Crisis）爆发的担忧，系统能耗越来越受到学术界和工业界的重视。能量信息物理融合系统（Cyber-Physical Energy System, CPES）[3, 4]——一种结合了网络基础设施与物理基础设施来对能量进行有效管理和控制的现代能量系统应运而生。除了密切关注系统能耗外，与 CPS 相同，CPES 存在于复杂的物理环境中，与外界的各种随机行为存在交互，且系统中连续行为和离散行为共存，因此，系统具有随机和混成的特点。更高级的 CPES 控制器设计不仅要求能够节约系统的整体能耗，而且会要求保证一定的服务质量 [5]。

智能建筑

智能建筑（Smart Building）[6, 7] 作为智能电网（Smart Grid）技术 [8] 的重要组成部分逐渐在国内外兴起。智能建筑是一种典型的嵌入式传感和网络信息处理深度耦合的 CPES，它与外界环境——包括物理环境和用户进行频繁交互，并利用

调度器对功能构件实行智能控制，在节约能耗的基础上为人类提供适宜的室内环境，是新一代建筑设计的趋势。据调查统计，建筑相关能耗已占全社会总体能耗的 47%[9]，解决能源成本上升问题、确保环境可持续性，降低新建筑物和现有建筑物的能源消耗已成为所有利益攸关者——包括政府、建筑开发商、业主、经营者、租户和用户的迫切需求。由于人们大部分时间都是在建筑物中度过的，一个健康又舒适的环境对于人类生活和社会生产力来说是至关重要的。智能建筑通过智能控制保证了人们生活的舒适性、安全性和效率，其系统设计具有重要意义。

1.2 研究现状

能量信息物理融合系统包含了物理变量和信息技术变量，诸如电池寿命、功率、计算过程和网络限制等。由于能量利用率在 CPES 的设计中起着重要影响，目前为止，大部分的研究都关注在系统的能耗方面。例如，在 [10] 中，Marija 等学者基于微分代数等式（Differential Algebraic Equations, DAE）提出了一个建模电力系统的通用方法。他们所提的基于 DAE 的模型被时间间隔简化和分割，以捕捉感兴趣的系统行为；在 [11] 中，Ilic 等学者提出了一种针对未来 CPES 的动态模型，模型背后的数学描述是物理环境相关的计算机技术。

而关于智能建筑的建模与分析，国内外许多学者也已经做出了诸多研究贡献。在 [12] 中，Alexandre David 等学者提出了利用统计模型检测技术分析能耗感知建筑的框架。他们利用基于蒙特卡洛模拟的统计模型检测技术，在模型验证工具 UPPAAL-SMC 中构建了智能建筑不同模块对应的模板，实现了对系统特定性质的高效验证；在 [13] 中，陈铭松等学者针对智能建筑中空调的调度问题，设计了不同的调度策略，并分析不同策略下用户的舒适度和大厦的能耗；陈小红等学者在 [5] 中给出了一种基于环境本体的能量信息物理融合系统的分析方法，将系统元素分为环境和控制器两类，给出了环境本体的自动机模板和利用上下文图构建控制器模型的方法；在智能建筑的能耗评估方面，Mendes 等学者 [14] 提出了一种数学模型并将其应用于建筑的热分析和控制系统设计，用集中式方法建立了房

间空气温度模型和建筑围栏多层模型，对室内空气温度进行瞬时分析。他们使用 MATLAB/Simulink 作为支持工具设计智能建筑的控制系统，对智能大厦进行热性能分析。

然而，以上的研究都是研究人员基于自身的专业知识，直接构建系统的可执行模型，进而实现模型的验证和分析。这种形式化的方法逻辑严谨、理论性较强，但不利于系统研发人员的学习和理解，在实际应用中，会给项目组成员的沟通带来困扰。因此，提供一种从需求出发，将设计模型和可执行的形式化模型相结合的方法是必要的。这种方式不仅有利于研究者之间的交流与沟通，且能够实现模型的属性验证，从而保证系统模型的质量。

1.3 相关理论与技术

本体论

本体 (Ontology) 的概念起源于哲学，它是一个解释客观存在系统的抽象本质的哲学术语，它提供了一个分类体系，且这个体系不依赖任何特定的语言。上个世纪 80 年代，本体概念从哲学领域被引领到计算机领域，并和知识工程信息技术相结合延伸到了人工智能领域 (Artificial Intelligence, AI) [15]。人工智能领域的学者 Neches 赋予其新的定义，即：本体是构成相关领域词汇的基本术语和关系，以及利用这些术语和关系构成的规定这些词汇外延的规则的定义。经过时间的发展，虽然本体的定义在发生演变，但其概念的定义均包括四个最基础特点：概念化、明确化、形式化和共享化。

根据本体对领域的依赖程度，可将本体细分为顶级 (Top-level)、领域 (Domain)、任务 (Task) 和应用 (Application) 四类。其中，领域本体 (Domain Ontology) 的目标是捕获相关的领域知识，确定该领域内共同认可的概念，并从不同层次的形式化模型上给出这些概念和概念之间相互关系的明确定义，提供该领域中发生的活动以及主要理论和基本原理。

近些年，本体论被本广泛应用于不同学科和领域，并已经产出了一些显著的成功

果：在化学领域，Plinius Ontology[16]是关于陶瓷物质化学成分的本体，Chemical-Elements[17]是关于化学元素周期表的本体；在知识领域，已经成熟的本体包括SENSUS[18]、WordNet[19]、CYC[18]等。除此之外，我国近几年也出现了如知网、国共合作历史领域本体等。

MARTE 与 UML

模型驱动式开发（Model Driven Development, MDD）是一种以模型为中心，根据不同抽象层次或视图构造不同模型的开发方法。MDD可以有效控制系统的复杂度，保证系统质量，同时，也是提高系统开发复用性的重要手段。统一建模语言（Unified Modeling Language, UML）[20]是支持MDD的常用建模语言之一，它始于1997年的一个OMG（Object Management Group）标准，是一种支持模型化系统开发的图形化语言。UML为开发的所有阶段提供了模型化和可视化支持，包括由需求分析到规格、构造和配置。它基于面向对象的思想，支持系统的多视图建模，其主要模型包括：用例图、类图、活动图、状态图、顺序图、部署图等。

UML的profile是一个包含了为特定领域和目的定制模型元素的衍型(stereotype)包，它利用衍型、标记值(tagged-value)和约束(constraint)等元素来扩展模型。其中，衍型用于扩展UML的词汇，以创建新的构造块；标记值扩展了UML衍型的特性，用来详细描述衍型的性质和定义等信息；约束则通过增加新的规则或修改现有的规则，扩展了UML的语义。

MARTE[21, 22]作为UML的一个重要profile，提供了对实时嵌入式系统建模的诸多规范，并利用值描述语言(Value Specification Language, VSL)来描述UML模型的非功能属性。MARTE主要包括基础模型包、设计模型包和分析模型包三个部分。

基础模型包主要定义了实时和嵌入式系统中的基本概念，如优先级、响应时间、执行周期和受限资源等。基础模型包中的许多基本概念都在设计和分析模型包被复用，是对系统进行设计和分析的基础，因此也是规范中的核心部分；

设计模型包提供了具有较高抽象级别的建模元素，用来对实时和嵌入式系统

中的并发行为和实时活动主体进行建模，如具有独立控制能力的实时功能模块、受限资源保护模块以及响应并发或实时调用的服务和动作等；

分析模型包封装了用于分析系统的性能和可靠性的建模元素，如能量消耗、内存占用以及系统的可用性、可靠性和安全性等。

随机混成自动机

虽然 UML 结合 MARTE 等 profile 能够增强领域建模能力，但是，由于其半形式化的特性，MARTE/UML 模型不能够实现系统属性的验证和分析。而自动机是一种应用广泛的系统模型，它不仅可以描述系统的动态特性，而且已存在众多基于自动机的模型检测（Model Checking）[23] 方法，可以实现对系统模型的定性、定量分析。

随机混成自动机 [24–26]（Stochastic hybrid automata, SHA）是混成自动机加入了随机语义的扩展版本，它的主要元素为位置和迁移。SHA 的随机语义主要体现在两方面：1) 系统位置之间的迁移可定义离散的概率分布；2) 系统位置上可定义停留时间的概率分布。随机混成自动机能够准确地建模混成系统中的随机行为。

UPPAAL[27] 是一个针对实时系统的建模、验证集成工具，它将系统定义为时间自动机网络，并扩展了其数据类型。UPPAAL-SMC[27, 28] 是 UPPAAL 系列工具中利用统计模型检测（Statistical Model Checking, SMC）进行模型验证的工具，其理论基础为随机混成自动机。SMC 主要使用统计方法分析复杂系统的模拟执行路径，优点是效率高、执行速度快，该项技术的关键点在于：首先，对仿真产生的系统模拟路径进行伯努利实验，判断模拟路径是否满足给定的系统约束；其次，对模拟路径的样本空间进行统计分析，评估系统满足属性的概率区间。因此，使用 UPPAAL-SMC 能够实现基于随机混成自动机模型的系统属性分析。

1.4 本文工作与主要贡献

智能建筑等 CPES 融合了不同学科的知识，且系统具有混成和随机的特点，是一种复杂系统。对于这类系统的开发，使用 MDD 方法至关重要。由国内外研究现

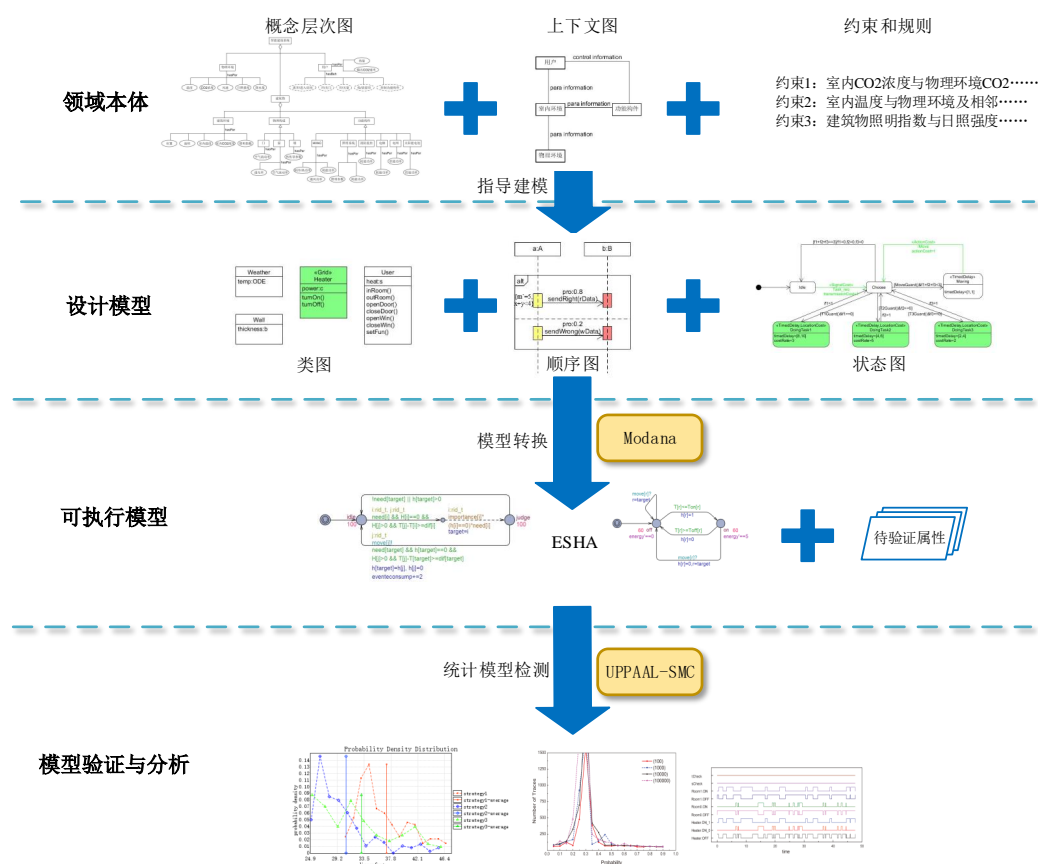


图 1.1: 智能建筑能耗建模与分析方法

状的分析可知，针对智能建筑，现有的建模方法大多直接给出系统的可执行模型，再对模型进行验证、分析。可执行模型抽象程度较高，不利于系统设计、研发人员之间的交流，因此，设计模型和可执行模型相结合的建模方式具有重要意义。这种方式又引入了两个新问题：1) 如何根据需求从复杂的 CPES 系统中确定建模元素，指导建模系统设计模型？2) 如何将设计模型和可执行模型连接起来？基于 MDD 的思想，本文提出了一种智能建筑能耗的建模与分析方法，并解决了上述问题。

如图1.1所示，本文的主要贡献包括：

1. 基于建筑信息模型和本体构造方法的基本步骤，给出了智能建筑的领域本体，帮助明确系统中的概念及概念间的关系和约束，指导建模系统的初步模型；
2. 针对如何建模、描述 CPES 系统的问题，扩展了 MARTE/UML 的基本元素，

以及类图、顺序图和状态图的元模型，以支持能耗、随机和混成的建模；

3. 针对如何评估、分析 CPES 系统能耗的问题，定义了能耗随机混成自动机的概念，并给出从 MARTE/UML 状态图到能耗随机混成自动机的转换规则和算法。基于我们的 Modana 工具和模型验证工具 UPPAAL-SMC，给出了本文所提的建模、分析方法的实现框架；

此外，结合一个具体的智能温控系统场景，我们实现了该系统的领域本体指导建模初步模型、模型设计和模型分析的全过程，验证了所提方法的可行性和有效性。

1.5 本文组织结构

全文共包括六章，组织结构如下：

第一章首先介绍了研究背景，即能量信息物理融合系统和智能建筑，其目前的研究现状以及研究热点。接着介绍了国内外对 CPES 和智能建筑进行系统建模、验证的相关工作，以及本文涉及到的相关理论与技术基础。最后总结了本文的主要工作与贡献，并给出了本文的组织结构。

第二章将本体论的知识引入智能建筑能耗的建模与分析方法。首先，基于建筑信息模型和本体构造方法的基本步骤，给出了智能建筑的领域本体，包括智能建筑中的基本概念、概念间的关系和约束，接着，介绍了如何基于领域本体指导建模 MARTE/UML 初步模型。

在根据系统需求明确了建模元素之后，第三章介绍了基于 MARTE/UML 建模语言的系统模型设计理论。针对 CPES 的能耗感知、随机和混成特性，扩展了 MARTE/UML 建模语言：1) 定义了两种典型的随机行为；2) 扩展了 MARTE 中的数据类型和表达式；3) 扩展了 UML 的类图、顺序图和状态图以支持对能耗、随机和混成的建模。

由于 MARTE/UML 模型为不可执行模型，只能用于系统的设计，为了实现对系统模型中能耗等属性的分析和评估，在第四章，本文定义了能耗随机混成自动

机的概念，可以显式建模系统中的能耗，并给出了从扩展的 MARTE/UML 状态图到能耗随机混成自动机的转换规则。最后，基于我们的 Modana 平台和模型验证工具 UPPAAL-SMC，给出了本文所提的建模与分析方法的实现框架。

第五章针对一个具体案例——智能温控系统，给出了领域本体指导建模初步模型、模型精化为 MARTE/UML 模型、模型转换为 ESHA 模型和模型验证与分析的全过程。通过统计模型检测技术对系统属性进行验证，分析了不同的调度策略和用户行为模式对系统能耗的影响。

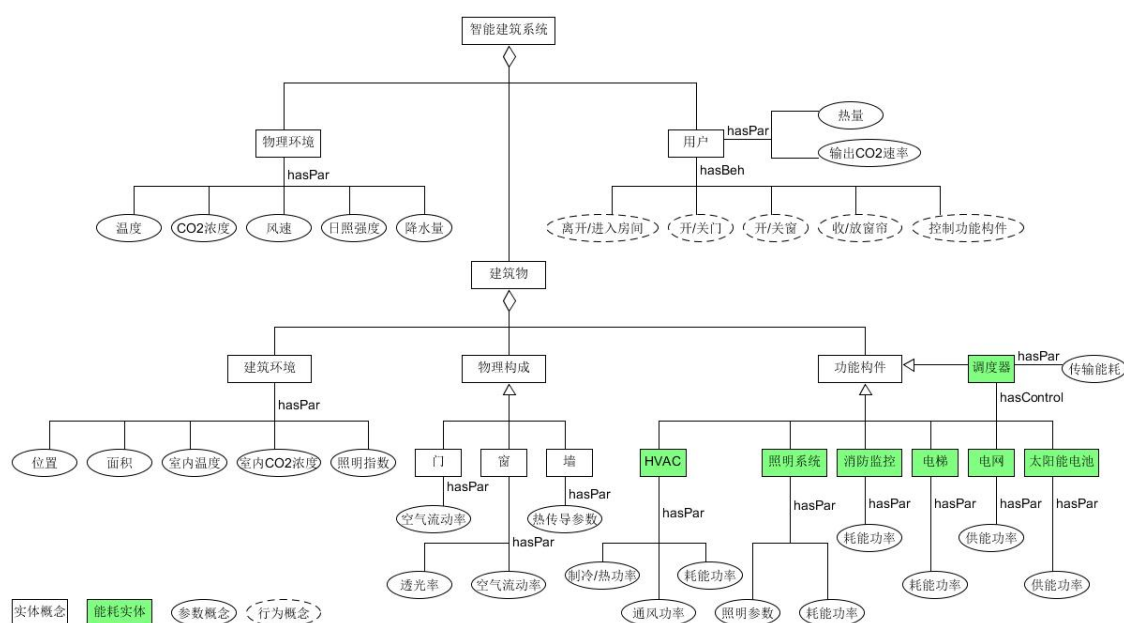
最后，总结了全文，并提出下一步工作的方向。

第二章 智能建筑领域本体

智能建筑是一种典型的能量信息物理融合系统 (Cyber-Physical Energy System, CPES), 它密切关注系统中能量的产生与消耗, 且融合了复杂的物理行为和计算机网络。由于系统涉及多学科, 且具有混成、随机的特点, 对智能建筑进行建模、分析的第一步是明确系统中的诸多概念及它们之间的关系, 从而确定研究范围, 为开展后续系统设计和分析环节做准备。而领域本体能够构建领域内共同认可的概念、概念间的关系以及约束。因此, 建立智能建筑的领域本体能够根据系统需求, 帮助梳理系统概念和逻辑, 对于开展系统的建模与分析具有必要性。基于建筑信息模型和本体构造方法的基本步骤, 本章给出了智能建筑领域本体, 并介绍了如何利用领域本体来指导构建系统的 MARTE/UML 初步模型, 明确影响系统能耗的直接、间接因素, 实现从需求分析到系统设计的过渡。

2.1 智能建筑领域本体

1991 年, 人工智能领域的学者 Neches 等人给出本体的定义, 即: 本体是构成相关领域词汇的基本术语和关系, 以及利用这些术语和关系构成的规定这些词汇外延规则的定义 [29, 30]。常见的本体构造方法有骨架法、TOVE 法和七步法 [31] 等, 参考这些构造方法, 可总结得出本体构造的主要步骤为: 1) 确定领域本体的专业领域和范畴; 2) 考虑能否复用现有的本体; 3) 列出本体涉及领域中的重要术语; 4) 定义分类概念和概念分类层次; 5) 定义概念之间的关系和约束。本文针对的是智能建筑领域, 重点关注智能建筑系统中的能耗。虽然暂无可复用的领域本体, 但可利用建筑信息模型为本体构造提供帮助, 下面, 我们将按照本体构造步骤, 依次给出智能建筑领域的基本术语、概念间的关系, 约束和规则。



2.1.1 基本术语

建筑信息模型（Building Information Model, BIM）[7] 是建筑物的数据信息化模型。从通用工业的角度来看，一个 BIM 由建筑物的所有共享数据以及物理特性、功能特性构成。BIM 促进了不同的利益相关者在该建筑生命周期的各个阶段进行有效的协作，为建筑的整个生命周期的决策提供了可靠的依据 [31]。

参考 BIM 对建筑物信息分类的思想，本文将智能建筑视作物理环境、建筑物和用户三部分的组合。图2.1给出了智能建筑中基本术语的概念层次图，其中，矩形表示实体概念，实线椭圆表示参数概念，虚线椭圆表示行为概念，参数和行为是依附于实体的。绿色标注的实体为直接产生或消耗能量的实体。

- **建筑物**：1) 除了位置、面积这类基本参数外，由于智能建筑为人提供服务，建筑环境参数应包含建筑物室内环境中对人有影响的参数： CO_2 浓度、室内温度，照明强度；2) 物理构成则包含对上述室内参数有影响的建筑实体——门、窗和墙，这些物理构成对应应有各自的具体参数；3) 建筑物的功能构件是指为人类生活提供各种服务的实体，这些功能构件在使用时往往伴随着能

量的产生与消耗，如太阳能电池可以将物理环境中的太阳能存储起来，为整个建筑物生产能量；而照明系统的工作会消耗一定的系统能量。功能构件也对应各自的具体参数，来表示其功能作用的影响和能耗速率。一个建筑物最基本的功能构件是暖通空调（Heating, Ventilation and Air Conditioning, HVAC）和照明系统，它们可以保证用户生存环境中最基本空气质量、温度和照明要求。调度器是一种特殊的功能构件，它负责控制其他功能构件，并且，调度器在控制其他功能构件时会传送信号，消耗系统能量。

- **物理环境**：对于智能建筑系统而言，系统的外部环境包括物理环境和用户。物理环境主要包含能够影响智能建筑室内环境的各种环境参数，例如， CO_2 含量、温度，风速和日照强度，这些参数的取值与时间相关，其变化过程是连续的。且这些物理环境参数只能被智能建筑系统监测，不能被控制，是系统中的不可控因素。
- **用户**：用户存在各种行为，在此，我们考虑的是那些对系统产生影响的行为。用户行为可以触发系统的控制决策，例如在某个夏季的夜晚，用户进入房间会触发智能建筑的照明系统、暖通空调的开关；同时，用户行为也可以直接控制系统的功能构件，如开/关空调。用户自身对应的参数也会对智能建筑的室内环境造成影响 [32]——人体产生的热量会影响温度， CO_2 的输出速率会影响室内 CO_2 浓度。用户行为是一种随机行为，也是系统中的不可控因素。

2.1.2 关系

智能建筑领域本体中的概念不是孤立存在的，它们之间存在各种各样的联系，这些概念以及概念间的关系构成了智能建筑的概念体系。具体来说，这些关系可分类为结构关系和交互关系。

- **结构关系**：在图2.1中标注了不同概念之间的结构关系，参考文献 [33] 中使用的方法，可以利用表格（表2.1）详细解释这些关系。

表 2.1: 智能建筑领域本体概念间的结构关系

Association	Formation	Meaning
组合	物理环境、建筑物、用户 → 智能建筑系统	智能建筑系统由物理环境、建筑物和用户构成
hasPar	物理环境 → 温度、 CO_2 浓度、风速、日照强度、降水量	物理环境包含的参数有温度、 CO_2 浓度、风速、日照强度、降水量
组合	建筑环境、物理构成、功能构件 → 建筑物	建筑物由建筑环境和各种物理构成、功能构件组成
hasPar	建筑环境 → 位置、面积、室内温度、室内 CO_2 浓度、照明指数	建筑物环境包含的参数有位置、面积、室内温度、室内 CO_2 浓度、照明指数
继承	门、窗、墙 → 物理构成	门、窗、墙都是一种具体的物理构成
hasPar	门 → 空气流动率	门的开/关会对室内温度和空气的流动产生影响
hasPar	窗 → 透光率、空气流动率	窗的开/关会对室内温度和空气的流动产生影响；窗玻璃的透光率影响了室内照明情况
hasPar	墙 → 热传导参数	墙的热传导参数决定了外界温度对室内温度的影响
继承	HVAC、照明系统、消防监控、电梯、电网、太阳能电池 → 功能构件	HVAC、照明系统、消防监控、电梯、电网、太阳能电池都是一种具体的功能构件
hasPar	HVAC → 制冷/热功率、通风功率、耗能功率	HVAC 系统的参数包括制冷/热功率、通风功率、耗能功率
hasPar	照明系统 → 照明参数、耗能功率	照明系统的参数包括照明参数、耗能功率
hasPar	消防监控/电梯 → 耗能功率	消防监控/电梯这类耗能构件对应的参数是耗能功率
hasPar	电网/太阳能电池 → 功能功率	电网/太阳能电池这类供能构件对应的参数是供能功率
hasControl	调度器 → HVAC、照明系统、消防监控、电梯、电网、太阳能电池	调度器可以控制其他功能构件
hasPar	调度器 → 传输能耗	调度器在通过信号控制其他功能构件时，会产生传输能耗
hasBeh	用户 → 离开/进入房间、开/关门、开/关窗、收/放窗帘、控制功能构件	用户具有的行为包括离开/进入房间、开/关门、开/关窗、收/放窗帘、控制功能构件

- 交互关系：上下文图能够显式系统不同实体之间的信息交互关系，类似门、窗、墙这种物理构成，虽然它们的物理属性特征会对室内环境参数造成影响，但这些属性是恒定的，因此，只需记录这些实体的特定属性，无需在交互关系中创建对象。由图2.2可以知道，虽然智能建筑中的功能构件是系统的主要能耗来源，但其他实体通过信息交互影响调度器对功能构件的控制，从而间接影响系统能耗。

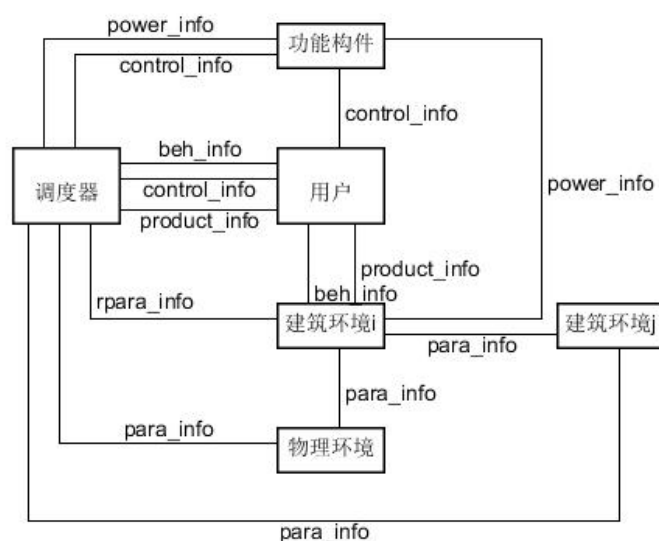


图 2.2: 智能建筑领域本体概念间的交互关系

2.1.3 约束和规则

在定义了智能建筑领域本体的概念层次和概念之间关系的基础上，为了准确建模这些元素，还有必要说明某些概念之间的相互约束以及某些实体对应的规则。室内环境参数约束定义了某个具体的室内环境参数所受影响来源，这些来源为实体的参数或实体的行为。正如上文提及，在日常场景中，对人类生活影响最大的是温度、空气质量和照明情况，下面给出关于这三个参数的约束：

室内环境参数约束

1. 室内的 CO_2 浓度与物理环境 CO_2 浓度、用户的离开/进入房间、开/关门行为、开/关窗行为、人的 CO_2 输出速率、通风系统的作用以及调度器的控制有关。
2. 室内温度与外界温度（物理环境温度 and 相邻空间温度）、墙的热传导性能、用户的离开/进入房间、开/关门行为、开/关窗行为、人的散热、暖通空调的作用以及调度器的控制有关。
3. 建筑物照明指数与日照强度、窗玻璃的透光率、用户的离开/进入房间、开/关窗行为、收/放窗帘行为、照明系统的作用以及调度器的控制有关。

智能建筑中的功能构件不仅可以被系统控制，也可以被人为操纵；且智能建筑中存在各种功能构件，既包括暖通空调、照明系统和电梯这些基本功能构件，也包含电视、烤箱等非基本需求的特定功能构件。下面对于功能构件的控制优先级和用能优先级给出定义。

功能构件的操作规则

1. 控制优先级：智能建筑通过计算机网络控制系统，可实现对功能构件自动化控制。但是，当用户有特定需求时，应当可以直接控制这些构件，即用户对构件控制的优先级大于智能建筑系统控制。
2. 构件用能优先级：系统的基本功能构件的用能优先级大于特定功能构件，当系统出现供能不足的情况时，应当优先维持对基本功能构件的供能。

2.2 领域本体指导建模初步模型

定义智能建筑领域本体帮助我们理清了系统中的概念间的关系，也为后续的模型设计奠定了基础。下面介绍在实际建模过程中，如何利用智能建筑领域本体的概念、关系，约束和规则来指导构建 MARTE/UML 初步模型：

1. **选择室内环境参数**：在智能建筑领域本体概念层次图（图2.1）中选择期望控制的室内环境参数。
2. **确定相关概念**：根据室内环境参数约束，确定与选定室内环境参数相关的所有参数概念、行为概念，并将这些概念间的关系形式化为公式，可用 UML 参数图来记录这些公式。
3. **构建类图**：在智能建筑领域本体概念间的关系表（表2.1）中找到所有相关参数概念、行为概念依附的实体，为每个实体创建一个类，且其参数概念映射为类的属性，其行为概念映射为类的操作，并明确系统直接能耗来源的相关类；

4. **构建顺序图**：根据上下文图中定义的不同实体概念之间的交互关系，将涉及的每个实体概念映射为对象，交互信息映射为消息事件。

5. **构建状态图**：顺序图中的一个对象对应一个状态图，不同类型的实体概念存在各自的状态图模板：

- 物理环境：我们关心的是物理环境中的各种环境参数，这些参数的值随时间连续变化，系统只能监测这些参数，却无法控制它们，即物理环境不会由于任何系统事件的触发而改变状态。因此，在状态图中，用表达式来描述物理环境参数的变化过程。
- 功能构件：一个功能构件的状态图中至少包含两个状态：开启状态和关闭状态。在处于开启状态时，功能构件将根据其功率参数对系统产生影响，并且以特定的能耗功率消耗能量；在处于关闭状态时，功能构件不再耗能，也无法对系统产生任何作用。
- 建筑环境：建筑物的室内环境参数受到不同因素的影响，因此，应当在状态上添加对应的参数公式刻画这些因素的影响；同时，在具体的场景中，环境参数的数值可能作为判断条件触发系统的执行动作。
- 用户：用户的每一个行为都可能对系统造成影响，从而改变系统的状态。因此，在状态图中，用户行为应建模为迁移的触发事件，每一个用户行为发生后，将判断系统是否迁移到新的状态。
- 调度器：调度器的调度策略是人为设计的，调度器应当基于对所接收的参数判断来向功能控件发出控制信号，且信号传输会耗能。

表2.2中列举了领域本体中的概念到 MARTE/UML 模型的基本映射规则，通过这些规则和上述的步骤，可以指导研究人员建模。值得一提的是，由于领域本体并没有过多描述系统的动态行为逻辑，利用智能领域本体构造的模型只是系统的初步设计模型。若要实现系统行为的完整描述和模型验证，还需要基于本文四、五章提出的扩展模型定义，实现模型的进一步精化。

表 2.2: 智能建筑领域本体概念-MARTE/UML 模型的映射规则

Concept	Model	Element
物理环境	类图	类
物理环境参数	类图	类的属性
物理环境参数	状态图	表达式
功能构件	类图	类
功能构件参数	类图	类的属性
功能构件	顺序图	对象
功能构件参数	状态图	表达式
建筑环境	类图	类
建筑环境参数	类图	类的属性
建筑环境	顺序图	对象
建筑环境参数	状态图	表达式
用户	类图	类
用户参数	类图	类的属性
用户行为	类图	类的操作
用户	顺序图	对象
用户行为	顺序图	消息
用户行为	状态图	迁移事件

2.3 本章小结

由于智能建筑系统的复杂性，对其直接进行建模往往存在无法直接罗列系统中的概念、分辨概念间关系等困难，在以往的研究中，研究人员往往凭借自己的经验和专业知识直接给出智能建筑的模型，却没有阐明建模的思路。本章构建了智能建筑领域本体，介绍了系统中的基本概念、概念间的关系以及约束和规则，并介绍了如何利用领域本体指导建模系统的初步模型，能够帮助对于智能建筑领域尚不熟悉的研究人员进行初步的模型设计，并明确系统中的耗能因素。

第三章 面向 CPES 的 MARTE 扩展

对于智能建筑这类 CPES，能量是关注的重要元素。只要系统在运作，就会造成能耗 (Energy Consumption)。不同情境下，能耗的速率可能不同，如汽车的加速行驶比匀速行驶在单位时间内更加耗能。除此之外，系统也可能会产生能量 (Energy Harvesting)，能量的来源多种多样，包括热能、声能、动能、生化能 [34] 等。

与一般系统相比，除了密切关注能量，CPES 还具有以下两个典型特征：

- 混成是 CPES 的一个重要特性，由于 CPES 处于物理环境中，系统必然是连续行为和离散行为、连续变量和离散变量共存的。
- 开放的物理环境中存在各种随机行为，如天气的变化、用户行为等都是典型的随机事件。

因此，为了完整建模 CPES，至少需要明确以下三个问题：1) 如何建模系统中的能量？2) 如何描述系统的混成特性？3) 如何建模系统中大量存在的随机行为？

本章面向 CPES，提出了包含能量、混成和随机信息的扩展 MARTE/UML 建模规范：首先，定义了 CPES 中两种典型的随机行为；接着，对 MARTE 原有的数据类型和表达式进行了扩展，以完整建模 CPES 中的元素；最后，对 MARTE/UML 类图、顺序图和状态图进行了扩展，给出了这三种模型的元模型定义和语法、语义规范，为实现后续对 CPES 进一步的形式化研究提供了基础。

3.1 MARTE 中的能量、随机和时钟

MARTE 是针对实时嵌入式系统定义的 UML profile，在 MARTE 的众多包中，已经定义了一些能量、时钟和随机相关的描述——1) 关于能量：Generic Resource

Modeling (GRM) 包定义了 *NFP_energy* 类型, 表示由于使用而从资源中永久消耗的能量。Hardware Resource Modeling (HRM) 包定义了硬件系统能量的消耗和补给等属性; 2) 关于时钟: 基础模型包中的 Time 包陈述了关于时钟的结构、获取和使用规则; 3) 关于随机: 在 Generic Quantitative Analysis Modeling (GQAM) 包中, 基于与行为有关的 *GQAM* 衍型, MARTE 进一步定义了 *GaStep* 衍型, 它通过标记值 *prob* 来描述离散概率, 其取值范围为 $[0, 1]$ 上的实数。在 Non-functional Properties Modeling (NFPs) 中, 概率分布被定义为 NFP 类型的操作。

综上可知: 1) 虽然 MARTE 中存在能量、时钟和随机的相关描述, 但并没有对连续变量和连续行为作阐述, 也没有考虑到事件发生概率和时间的相关性 (见 3.2.1), 即利用 MARTE 不能完全支持 CPES 的建模; 2) MARTE 只是 UML 的一个 profile, 没有明确提供在模型中对以上三种元素进行建模的具体做法。

为了支持 CPES 的完整建模, 在 MARTE/UML 中, 至少需要扩展以下三方面的信息 [35]:

1. 数据类型: 数据类型必须涵盖系统中所有涉及到的变量, 相对于一般系统, 除了离散变量, CPES 还涉及物理环境中的连续变量, 系统能耗就是一种典型的连续变量。
2. 表达式: 表达式是变量和操作符的组合, 用以描述系统的性质、约束等。考虑到混成和随机因素, 以及变量类型的扩展, 对表达式需要作出相应的扩展。
3. 模型: 在 UML 中存在多种模型。从模型驱动的思想出发, 在明确需求后, 建模设计一个系统既需要考虑系统的静态结构, 也需要考虑系统的动态行为。因此, 多种模型结合的方式最为合理。在本章, 我们将给出扩展的类图、顺序图和状态图的元模型定义, 并阐明在这些模型中如何建模能量、混成和随机信息。

3.2 MARTE 建模元素的扩展

3.2.1 CPES 中的随机行为

开放的物理环境中存在大量随机行为，这些随机行为可以总结为两类，一类是**离散概率选择行为**，例如今天下雨的可能性是 80%，不下雨的可能性是 20%，可对事件标注对应的发生概率值来描述这种随机现象；另一类随机事件的发生与时间相关，即事件在某一时刻发生对应于特定的概率，被称作**时延随机行为**。本文定义了**时延概率分布**来描述时延随机行为：

Definition 1. 时延概率分布

时延概率分布可以描述事件发生的概率与时间的相关性，它定义了事件在某个时刻发生的概率： $time \rightarrow [0, 1]$ 。本文以两种最常见的概率分布——均匀分布和指数分布来描述某个事件的发生概率与时间的关系。

均匀分布（Uniform Distribution）是概率统计中的重要分布之一，它表示事件在某个区间 $[a, b]$ 内，相同长度间隔的分布概率是等可能的。在实际问题中，并不存在严格的均匀分布，但很多问题可以近似看作均匀分布。

指数分布（Exponential Distribution）是一种常见的连续概率分布，它的一个重要特征是无记忆性，指数分布可以用来表示独立随机事件发生的时间间隔。生活中存在很多指数分布的规律，例如电子产品的寿命分布一般服从指数分布。指数分布的概率密度函数为 $f(x) = \lambda e^{-\lambda x} (x > 0), 0 (x \leq 0)$ 。其中 $\lambda > 0$ 是指数分布的率参数（rate parameter），即每单位时间该事件发生的次数。

将时钟 c 作为以上两种概率分布的横轴，时延概率分布可以表示为：

$$\phi_{distr} ::= c \sim [type, a, b] \quad (3.1)$$

其中， $type$ 用来指明概率分布的类型——当 $type$ 取值为 $Unif$ 时，代表均匀分布， a 和 b 分别表示均匀分布的左、右区间；当 $type$ 取值为 Exp 时，代表指数分布， a 表示指数分布的率参数 λ ， b 默认取值为 0。

3.2.2 数据类型

MARTE 的模型库 Normative MARTE Model Libraries 中定义了六种基本数据类型, 以及它们在实时嵌入式系统中常用的基本操作。这六种基本数据类型是: Real、Integer、Unlimited Natural、Boolean、String 和 DateTime。其中, Real、Integer 和 Unlimited Natural 的 $diff()$ 函数定义了 n 阶求导操作, 但 MARTE 没有明确定义连续变量的概念。为了完整建模 CPES 中的元素, 对物理环境中变量的连续变化过程进行描述, 本文将 MARTE 的数据类型扩展为以下三种:

- 离散变量: 离散变量的值不依赖于物理环境时间的变化, 它包括 MARTE 原有的数据类型——Real, Integer, Unlimited Natural, Boolean 和 String。
- 连续变量: 其值依赖于时间的变化。一个连续变量 x 可由微分表达式 (见 3.2.3) 来刻画它随时间变化的速率。时钟可视作一种特殊的连续变量。
- 事件变量: 一个事件变量的取值为 1 或 0, 表示事件发生或没有发生。事件变量的定义, 可以描述在某一时刻, 某个事件是否被触发, 有助于对 UML 模型语义的描述。

Definition 2. 事件执行顺序

事件 (event) 是对一个在时间和空间上占有一定位置的有意义的发生的规约 [20]。CPES 存在于现实物理环境中, 系统具有实时性, 因此在这里有必要定义 CPES 中事件的执行顺序。本文定义了四种操作符来描述事件执行的顺序关系, 定义如下:

- $evn_x \prec evn_y$ 表示事件 evn_x 先于事件 evn_y 执行;
- $evn_x \succ evn_y$ 表示事件 evn_x 晚于事件 evn_y 执行;
- $evn_x \approx evn_y$ 表示事件 evn_x 和事件 evn_y 同时执行;

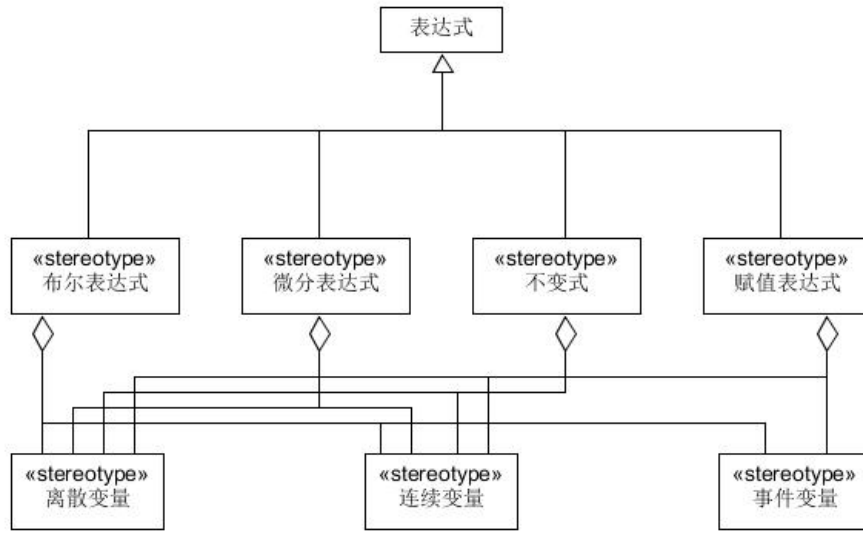


图 3.1: 扩展的 MARTE 变量和表达式

- $evn_x \sim evn_y$ 表示事件 evn_x 和事件 evn_y 之间为 interleaving[36] 关系，即二者相互独立，其执行先后顺序无法判定；

连续变量数据类型的增加使得 MARTE 可以描述物理环境中的连续变化行为（包括能量的变化），从而适用于能耗感知的混成系统；而事件变量的定义可以描述在某个特定时刻事件是否发生，且有助于对 MARTE/UML 模型的语义解释。

3.2.3 表达式

结合上述扩展的数据类型和 MARTE 原有表达式的基础，针对 CPES 的混成和随机两个特征，将表达式扩展为以下四种：布尔表达式、微分表达式、不变式和赋值表达式。其中，布尔表达式主要在控制语句中作为控制触发的监护条件，其值为 *TRUE* 或 *FALSE*，对应于监护条件的真和假；微分表达式用于描述系统中连续变量随时间的变化率；不变式可以定义系统中的特定约束；赋值表达式用于系统中变量的更新。四种表达式及其对应的组成元素如图3.1所示。

Definition 3. 布尔表达式

布尔表达式（Boolean Expression）由变量和逻辑运算符按一定语法规则组成。

从最基本的层次来说, 所有的布尔表达式, 不论它的长短如何, 其值只能是 *TRUE* 或 *FALSE*。布尔表达式中所包含的变量可以是上述的扩展数据类型的任意一种。

$$\phi_{bol} ::= A(x) \mid \phi_1 \bowtie \phi_2 \mid \neg \phi \mid \phi_1 \vee \phi_2 \mid \phi_1 \wedge \phi_2 \mid \forall x \cdot \phi(x) \mid \exists x \cdot \phi(x) \quad (3.2)$$

- $A(x)$ 表示关于变量 x 的任意代数表达式, 包括最基本的算术运算符和常用函数。
- \bowtie 为关系运算符, 其值可以为 $<$ 、 \leq 、 $=$ 、 \geq 、 $>$, 表示对前后两个布尔表达式 ϕ_1 和 ϕ_2 的比较
- \neg 、 \vee 、 \wedge 为最常见的逻辑运算操作。
- $\forall x \cdot \phi(x)$ 和 $\exists x \cdot \phi(x)$ 分别表示对于任意变量 x , 关于 x 的表达式 $\phi(x)$ 均满足, 存在变量 x 使得关于 x 的表达式 $\phi(x)$ 满足。

Definition 4. 微分表达式

微分的中心思想是无穷分割, 对于 CPES 中的连续变量, 为了表示其随时间流逝的变化规律, 本文使用微分表达式 (Differential Expression) 来描述连续变量的变化规律。

微分表达式可以表示为:

$$\phi_{diff} ::= F(x, dx/dt) = 0 \quad (3.3)$$

它的语义可以解释为: 设 $m(t)$ 为一个连续变量, 当 $m(t)$ 是微分方程 $F(x, dx/dt) = 0$ 的解时, 该微分方程被满足, 且连续变量在其定义域上连续变化。

Definition 5. 不变式

不变式 (Invariant) 表示在系统运行过程中关于某些变量的约束。例如, 对于一个电梯系统, 不变式 $y < 800$ 表示在电梯运行过程中载重量应当始终小于 800 千克。不变式的形式化定义如下:

$$\phi_{inv} ::= A(x) \mid \phi_1 \bowtie \phi_2 \quad (3.4)$$

其中 $A(x)$ 表示关于变量 x 的任意代数表达式，包括最基本的算术运算符和一些常见的函数； \bowtie 表示关系运算符，即 $<$ 、 \leq 、 \geq 、 $>$ ， $=$ 和 \neq 。

Definition 6. 赋值表达式

当 x 和 a 对应的数据类型相同时，赋值表达式 (Assignment Expression)

$$\phi_{assig} ::= x := a \quad (3.5)$$

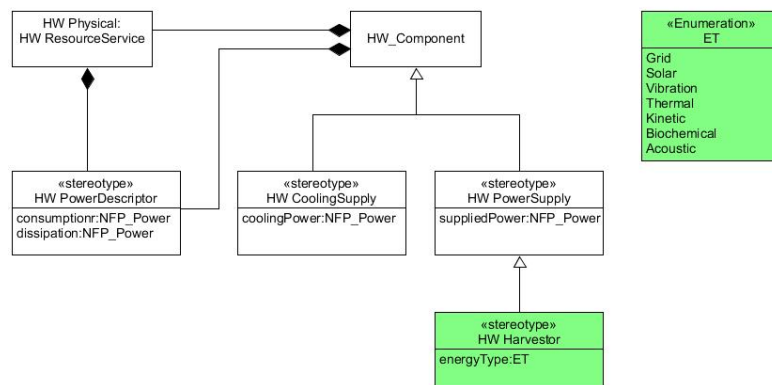
表示将表达式 a 的值赋给变量 x 。在系统建模中，赋值表示变量的更新，即系统中的事件对变量造成的影响。

3.3 MARTE/UML 模型的扩展

UML 中的模型可分为静态视图和动态视图，静态视图用于刻画系统的拓扑结构，动态视图用于描述系统的动态行为。静态视图包括类图、构件图、部署图等，动态视图包括用例图、顺序图、活动图、状态图等，使用者可以根据需要选择合适的模型。在继承了 UML 多视图建模特性的基础上，本文扩展了以下 MARTE/UML 模型：

- 静态视图：类图
- 交互视图：顺序图
- 行为视图：状态图

类图通过描述系统中存在的类以及类之间的关系来确定系统元素，类可以实例化为顺序图中的对象；顺序图展示了系统不同部分之间的控制流，包括可能存在的消息同步机制；状态图通过状态和迁移来描述某一对象的内部行为，顺序图中对象的内部活动可以由状态图来建模。

图 3.2: *HWPowerSupply* 衍型的扩展

本文在类图、顺序图和状态图中添加了建模 CPES 所需要的能量、混成和随机信息，给出了其对应的元模型以及语法、语义的定义。

3.3.1 MARTE/UML 类图的扩展

类是面向对象系统中最重要构造块，是对一组具有相同属性、操作、关系和语义的对象的描述。类图可以帮助界定系统中的元素，是系统建模设计的基础。

CPES 中存在着大量能耗实体，即系统中那些运作耗能的部件，如空调、照明系统等。同时，系统中又存在一些部件，能够为系统提供能量，如太阳能电池、电网等。因此，在对 CPES 进行建模时，对这些实体添加合适的信息描述其对系统能量的影响是必要的。此外，一个 CPES 中，能量的来源可能多种多样，对能量来源进行分类标注可以帮助观测到不同能源对系统的重要性。

在 MARTE 中，*HW_Power* 包中定义了 *HW_PowerSupply* 衍型来描述能量补给，但仅仅将 *HW_Battery* 作为唯一补给来源。事实上，能量的补给来源多种多样，包括热能、动能、生物能等等。在这里，对 *HW_PowerSupply* 衍型进行如图 3.2 的扩展，即能量补给来源可分为：电网、太阳能、振动产能、热产能、运动产能、生化能和声波产能。

扩展的 MARTE/UML 类图元模型如图 3.3 所示：1) 类的属性中可以包含连续变量，用微分表达式来表示；2) 类可以分为两种——耗能类和供能类。MARTE 定

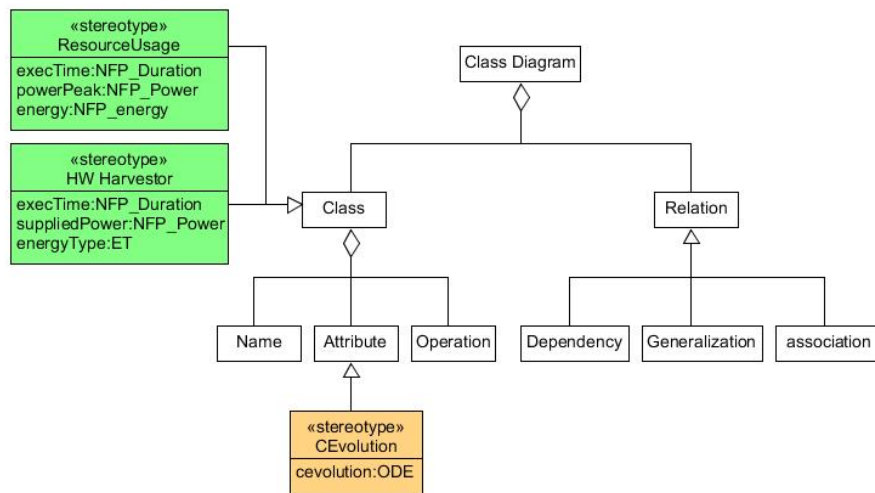


图 3.3: 扩展的类图元模型

义的 *ResourceUsage* 衍型可以定义耗能类，其属性包括耗能功率、工作时间和总能耗。结合上述定义的 *HW Harvester* 衍型，可以定义供能类，并利用 *energyType* 标记值来描述能量的来源。

3.3.2 MARTE/UML 顺序图的扩展

在一个待开发的系统中，任何对象都不是孤立存在的，系统中的这些对象通过消息进行交互，顺序图 (Sequence Diagram) 可以对系统中的交互行为进行建模，并以图形化的方式展现。

顺序图用二维的方式来显示交互：其中，横轴代表参与交互的每个对象，纵轴表示每个对象的生命线 (lifeline)，即参与交互的时间。对象间的水平箭头代表它们之间消息的传递。当一个对象发送或者接收消息时，即被触活，在模型中用一个瘦高的矩形表示，被称作控制焦点 (execution occurrence)。与 UML1.x 相比，UML2.0 顺序图增加了很多可以表达各种分支、循环等情况的组合片段 (combined fragments)，使得顺序图建模的语义更加丰富。

在 CPES 中，由于物理环境的开放性，不同对象之间消息的传递可能存在随机性，例如，在某个场景中，用户这个对象有一定的概率将空调度数设置得更高，也

有一定概率将度数设置得更低，即在 3.2.1 节中定义的离散概率选择行为。除此之外，在对象的执行过程中，可能会要求系统满足某些约束，如电梯在上升的过程中要求电梯内的人不超过规定的承载量。

一个扩展的 MARTE/UML 顺序图可以用以下六元组表示：

$$\text{Sequence Diagram } SD = \langle \text{Obj}, \text{Msg}, \text{Exec}, \text{Frag}, \text{Point}, \text{Evn} \rangle \quad (3.6)$$

其中，

- *Obj* 是有穷对象的集合，可用字符串标识对象名及其所属类名，例如：*printer : Appliance*。
- *Msg* 是顺序图中所有消息内容的集合，它由标识符和发送对象、接受对象组成： $\text{msg} = (\text{ctn}, \text{src}, \text{tgt})$ 。消息标识符 *ctn* 通常为 *operation(parameters)* 的形式，如 *sendTempData(td)* 表示消息内容为传递温度数据，参数为 *td*。
- *Exec* 是控制焦点的集合，表示对象执行一个动作所经历的时间段，对于每一个 $\text{exec} \in \text{Exec}$ 对应于自己所属的对象 $\text{exec.obj} \in \text{Obj}$ 。
- *Frag* 是所有组合片段的集合。顺序图的各基本构成元素，可以通过组合片段封装起来，以表达不同的语义。组合片段包括：循环 (*loop*)、分支 (*alt*、*opt*)、中断 (*break*)、临界区 (*critical*)、并行 (*par*) 和引用 (*ref*) 等。一个 $\text{frag} \in \text{Frag}$ 是一个三元组： $\text{frag} = (\text{name}, \text{type}, \text{area})$ ，包含组合片段的名称、类型和操作域。
- $p \in \text{Point}$ 称为位点，是顺序图中所有对象生命周期上时间点的集合，代表了消息发送和接收的顺序。一个位点 *p* 是一个四元组： $(\text{exec}, \text{frag}, \text{rs}, \text{order})$ ，其中 *exec* 表示位点属于哪一个控制焦点，*frag* 代表位点所属的组合片段，*rs* 是收发标志位，代表在该位点是接收消息还是发送消息，其取值为 $\{0, 1\}$ ，0 代表接收消息，1 代表发送消息。顺序图中对象的生命线并不表示精确的时间关系，但同一条生命线上的位点的先后顺序是固定的，*p.order* 是位点值，

其取值范围是非零自然数，代表该位点在所属对象上按时间先后顺序的排列序号。

- 对于每个消息 $m \in Msg$ ，与两个事件相关联：消息的发送事件 $!m$ 和消息的接收事件 $?m$ 。 $!m$ 和 $?m$ 为同步事件。 $Evnt$ 为顺序图中所有消息事件的集合。一个消息事件 $evnt$ 包含消息内容和消息所处的位点： $evnt = (msg, p)$ ，位点的收发标志位决定该消息事件的类型。即根据消息事件 $evnt$ 的位点的标志位 $evnt.p.rs$ 的值，可以将消息事件划分为发送消息事件 SE 和接收消息事件 RE ，且 $SE \cap RE = \emptyset$ 。

下面，重点解释顺序图中消息事件执行顺序和组合片段的含义。

消息事件执行顺序：顺序图中对象的生命线并不表示精确的时间，不同对象间的消息事件执行的时间顺序无法比较，但同一个对象生命线上的消息事件存在事件执行的先后顺序，因此，消息事件的执行顺序默认为偏序关系，也就是弱序列。这种弱序列关系的具体含义是：1) 消息执行的最终结果是不可改变的；2) 同一生命线上的不同消息事件按照先后顺序依次发生；3) 不同生命线上的不同消息事件的发生顺序无法确定。

组合片段：在图形中，组合片段表示为一个生命线上的矩形区域，其左上角有一个小五边形，其中的文字被称作标签，表示组合片段的类型。UML2.0 顺序图中定义了 12 种组合片段，下面对常用的几种组合片段作出解释：

- 可选执行：标签为 *opt*。用一个方括号括起来的布尔表达式表示进入 *opt* 组合片段的监护条件，当布尔表达式为真时，执行组合片段内的消息交互内容。
- 条件执行：标签为 *alt*。组合片段内部用虚线分割成几个区域，每个区域有自己的执行监护条件，这些监护条件的交集为空。若所有监护条件均不满足，则不执行组合片段，否则执行监护条件满足的那一个区域。
- 并行执行：标签为 *par*。同样使用虚线把组合片段内部划分为几个分区，每个分区表示一个并发执行。当进入组合片段时，同时执行所有分区，但每个

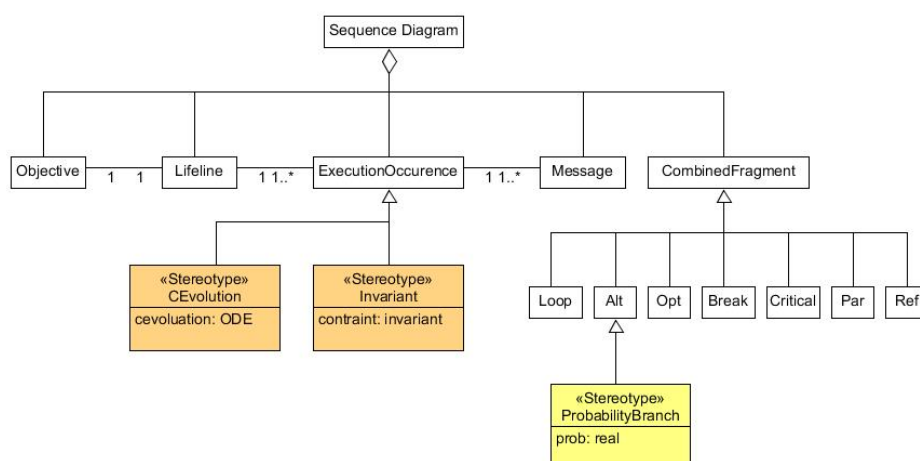


图 3.4: 扩展的顺序图元模型

分区内部的消息序列是顺序执行的，而不同分区的信息执行则存在交替的关系。这种并行执行的方式在现实生活中很常见。

- 循环执行：标签为 *loop*。在组合片段内部区域中，设置执行的监护条件，若条件满足，则循环执行 *loop* 中的序列，不满足则跳出。在标签中还可以设置区间参数来表示循环执行的最少和最多次数。如 *loop*(1, 10) 表示最少执行 1 次，最多执行 10 次。

扩展的顺序图元模型如图3.4所示，下面对 MARTE/UML 顺序图中扩展部分作出具体阐述。

在 CPES 中，离散概率选择随机行为普遍存在，对 *alt* 操作符进行扩展可以使其描述这种随机行为——即不同分区的选择不是由监护条件决定，而是由每一分区的执行概率决定。系统执行哪一个分区是不确定的，按照概率随机选择。每一个分区 $area_i$ 对应于一个取值为 $[0, 1]$ 的 $prob_i$ 表示该分区被选择的概率。如图3.5所示，在对象 *a* 发送消息时，有 80% 的概率发送正确的消息 *sendRight(rData)*，20% 的概率发送错误消息 *sendWrong(wData)*。

CPES 是一个混成系统，在某个对象处于执行阶段时，系统可能会存在某些特定的约束，或者某些连续变量的变化率可能维持不变。在对象的控制焦点上，可以

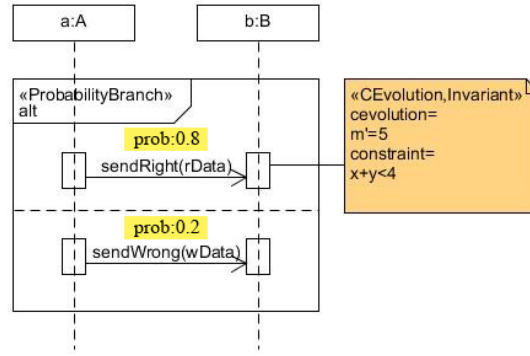


图 3.5: 扩展的顺序图示例

通过添加不变式和微分表达式来描述这些信息。如图3.5所示，在对象 b 的第一个控制焦点执行过程中，连续变量 m 的变化率始终为 5，且变量 x 和 y 之和始终小于 4。

消息事件是顺序图中的重要元素，消息的执行即代表了顺序图的动态逻辑语义。下面结合 3.2.2 节中定义的事件执行顺序，使用逻辑推导的方式来形式化定义顺序图中**消息事件执行顺序**的含义：

- $evn_x.p.exec.obj == evn_y.p.exec.obj \wedge evn_x.p.order < (>)evn_y.p.order \implies evn_x \prec (>)evn_y$

如果消息事件 evn_x 和 evn_y 的位点同属于一个对象，且 evn_x 的位点值小于（大于） evn_y ，则消息事件 evn_x 先于（晚于） evn_y 发生。

- $evn_x.msg == evn_y.msg \wedge evn_x.p.rs \oplus evn_y.p.rs \implies evn_x \approx evn_y$

如果消息事件 evn_x 与 evn_y 所包含的消息内容相同，且消息对应的位点收发位相异，即一个为消息发送事件，一个为对应的消息接收事件，则 evn_x 和 evn_y 同时发生。

- $\neg(evn_x.p.exec.obj == evn_y.p.exec.obj) \implies evn_x \sim evn_y$

如果消息事件 evn_x 与 evn_y 不属于同一个对象，则它们的执行顺序不可判定。

消息事件执行顺序比较的是单个消息事件之间的时间先后顺序。而**消息事件执行序列**是相对于整个顺序图而言的，它将消息事件按照执行顺序依次排列，并用逗号隔开（本文定义的消息事件是同步事件，执行序列里可以仅列出所有发送事件或所有接收事件），形如： $ES = \{evn_1, evn_2, \dots\}$ 。

一个顺序图的消息执行序列是不确定的，原因如下：1) 不同生命线上消息的执行顺序不能确定；2) 组合片段 *opt*、*alt* 中消息执行的不同选择让消息事件执行序列的结果具有不确定性，使得顺序图产生语义分歧。下面，针对 *opt* 和 *alt* 操作符对消息事件执行序列的影响作出形式化解释：

- $evn_x.p.frg.type == opt \implies \{ES_1, evn_x, ES_2\} | \{ES_1, ES_2\}$

如果消息事件 evn_x 属于一个 *opt* 组合片段，设 ES_1 是 *opt* 组合片段之前的消息执行序列， ES_2 是 *opt* 组合片段之后的消息执行序列。由于条件满足时，*opt* 操作域内的消息事件才会被执行，所以顺序图的消息执行序列为 $\{ES_1, evn_x, ES_2\}$ 或者 $\{ES_1, ES_2\}$ 。

- $evn_x.p.frg.type == alt \wedge evn_y.p.frg.type == alt \wedge evn_x.p.frg.name == evn_y.p.frg.name \implies \{ES_1, evn_x, ES_2\} | \{ES_1, evn_y, ES_2\}$

如果消息事件 evn_x 和 evn_y 同属于一个 *alt* 组合片段，设 ES_1 是 *alt* 组合片段之前的消息执行序列， ES_2 是 *alt* 组合片段之后的消息执行序列。由于 *alt* 选择的互斥性，则顺序图的消息执行序列为 $\{ES_1, evn_x, ES_2\}$ 或 $\{ES_1, evn_y, ES_2\}$ 。

- $evn_x.p.frg.type == alt \wedge evn_y.p.frg.type == alt \wedge evn_x.p.frg.name == evn_y.p.frg.name \wedge evn_x.p.frg.area.prob == p_1 \wedge evn_y.p.frg.area.prob == p_2 \implies \{ES_1, evn_x, ES_2\}_{p_1} | \{ES_1, evn_y, ES_2\}_{p_2}$

如果消息事件 evn_x 和 evn_y 同属于一个 *alt* 组合片段设 ES_1 是 *alt* 组合片段之前的消息执行序列， ES_2 是 *alt* 组合片段之后的消息执行序列。由于 *alt* 选择的互斥性，则顺序图的消息执行序列有 p_1 的可能性为 $\{ES_1, evn_x, ES_2\}$ ， p_2 的可能性为 $\{ES_1, evn_y, ES_2\}$ 。

上述推导过程考虑的是单个事件的情形，对于可选片段区域中包含多个事件的情形，所得消息执行序列的结果是类似的。

3.3.3 MARTE/UML 状态图的扩展

顺序图提供了控制流随时间推移的可视化轨迹，但它无法表现单个对象内部的状态变化。而在系统的建模、设计中，这些动态细节的刻画是必需的。因此，需要状态图来对单个对象的生命周期进行描述。

状态图 (State Chart) 用来表示一个对象在它的生命周期中对外部事件的响应、状态的变化、生命周期的变迁，以及对过去行为的依赖。它将对象与其外部世界分离开来，从局部视角出发，独立考察其行为。

一个扩展的 MARTE/UML 状态图定义如下：

$$State\ Chart\ SC = (State, s_0, Inv, Diff, Distr, \tau, Evn, Grd, Prob, Act, Eng) \quad (3.7)$$

其中，

- $State$ 为研究对象所有状态的集合。
- s_0 为初始状态。
- Inv 代表所有状态上的约束，以不变式的形式描述。
- $Diff$ 是微分表达式的集合，描述了在某个状态下连续变量随时间变化的速率。
- $Distr$ 是时延概率分布，描述了在某个状态下每个时刻发生迁移的概率。
- τ 是从一个状态到另一个状态的迁移的集合。
- Evn 是所有触发事件的集合，UML 中允许没有触发事件的迁移，被称作完成迁移。
- Grd 为所有监护条件的集合，以布尔表达式的形式描述。

- $Prob$ 对应于 $[0, 1]$ 上的实数，代表概率值。
- Act 是迁移发生后带来的效应，通常由赋值表达式组成。
- Eng 表示系统的能耗函数，根据能耗在状态图中产生的位置不同，可以分为： $S \rightarrow R$ 和 $\tau \rightarrow R$ 两种。能耗值为正代表系统消耗能量，为负代表系统产生能量。

状态和迁移是状态图中最重要的两个元素，下面分别对它们进行更为详细的解释。

状态：对于每一个 $s \in State$ ，有 $s = (sname, \phi_{inv}, \phi_{diff}, \phi_{distr}, \phi_{eng})$ ，其意义是：对于一个系统状态 s ，具有唯一的字符串型状态名 $sname$ ，且在该状态下，系统中的连续变量的变化率满足 ϕ_{diff} 。同时，系统变量满足约束 ϕ_{inv} ，当 ϕ_{inv} 违背且迁移尚未发生时，系统进入终止状态。 ϕ_{distr} 为状态的迁移赋予了随机的特性，即系统在状态 s 停留多久取决于时延概率分布 ϕ_{distr} ，它定义了系统在每一个时间点发生迁移的概率，即刻画了时延随机行为。 ϕ_{eng} 是能量的微分表达式，定义了在该状态 s 上能量的变化率。

迁移： $\tau : State \times Evn \times Grd \times Prob \times Act \times Eng \rightarrow State$ 。即迁移是系统由一个源状态 src 向目标状态 tgt 的转变。在触发事件发生的情况下，迁移必须满足一定的监护条件才能发生。 $prob \in [0, 1]$ 定义了迁移从源状态到某个目标状态的概率值，对于状态 s ，在相同的触发事件和监护条件下，若其对应于 N 个目标状态，则其到所有目标状态的概率之和为 1，即 $\sum_{i=1}^N prob_i = 1$ 。若在某触发事件和监护条件下，不存在概率分支情况，则迁移是确定的。 $Eng : \tau \rightarrow R$ 定义了迁移 τ 造成的能耗。

图3.6为扩展状态图的元模型，通过元模型，可以更直观地体现本文所做的扩展：

- 针对 CPES 的混成特性，对状态增加了 $CEvolution$ 衍型，用微分表达式来刻画系统中连续变量随时间的变化速率；

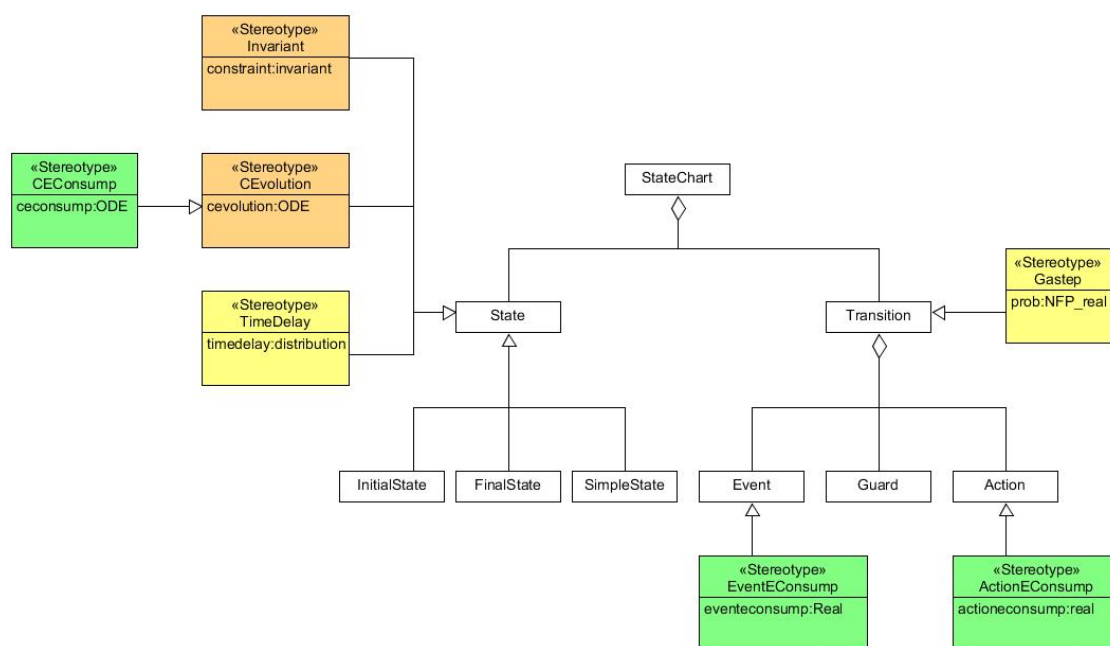


图 3.6: 扩展的状态图元模型

- 针对 CPES 中存在的两种随机行为，在状态上添加了 *TimeDelay* 衍型，并使用时延概率分布来描述时延随机行为；而迁移上则利用 MARTE 原有的 *Gastep* 衍型刻画了离散概率选择行为；
- 在状态图中，根据产生的位置不同可将能耗分为两类：1) 在状态上产生的能耗，此时能量是以连续变量的形式通过微分表达式来定义其随时间变化的速率，并结合实际在状态上的停留时间计算而得；2) 在迁移上产生的能耗，迁移的触发事件和动作事件的执行可能伴随能量的产生与消耗，与状态上的能量不同，迁移是不耗时的，因此用一个离散的实数值来记录迁移造成的能耗。

图3.7为扩展的 MARTE/UML 状态图的简单示例，其中，*state1* 为 *CEvolution* 衍型的状态，在该状态下，连续变量 *s* 随时间的变化率为 2；*state1* 在 *event* 事件的触发下，有 80% 的可能性迁移至 *state2* 状态，20% 的可能性迁移至 *state3* 状态，同时，*event* 事件会带来两个单位的能耗；在 *state2* 状态下，系统每单位时间耗能为 5，在 *state3* 状态下，系统每单位时间耗能为 10。

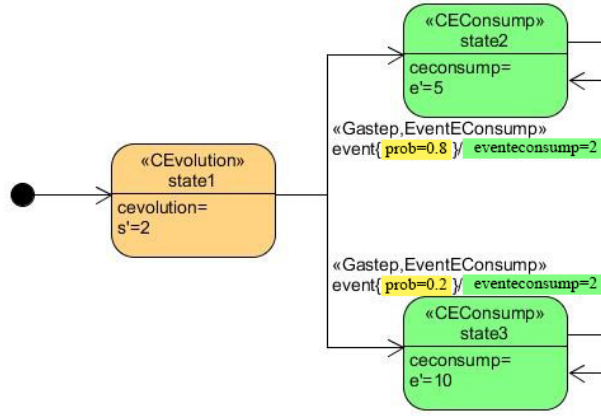


图 3.7: 扩展的状态图示例

同样地，为了准确定义状态图的动态语义，这里使用逻辑推导规则对状态图中的两种迁移作出语义解释。

顺序图中的主要对象是消息事件，其动态逻辑语义可以由消息执行序列表示，而状态图中最重要的元素是状态和迁移，由于本文定义的迁移已经包含了对应的源状态和目标状态的信息，因此，迁移序列 $TS = \{\tau_1, \tau_2, \dots\}$ 即可描述状态图由初始状态发生迁移、逐步演化的过程。对于一个状态图而言，由于离散概率选择和状态上时延概率分布的存在，迁移序列是不确定的。

- 离散迁移：

$$\tau_i.src == \tau_j.src \wedge \tau_i.evn == \tau_j.evn \wedge \tau_i.grd == \tau_j.grd \wedge \phi_{grd_i} == TRUE \implies \{TS_1, \tau_i \dots\}_{\tau_i.prob} | \{TS_1, \tau_j \dots\}_{\tau_j.prob}$$

设 TS_1 为 τ_i 之前的迁移序列，当迁移 τ_i 和 τ_j 所对应的源状态、触发事件和监护条件均相同，且触发事件发生、监护条件满足时，它们被触发的概率由各自的迁移概率值 $prob$ 决定，即系统的迁移序列有 $\tau_i.prob$ 的概率为 $\{TS_1, \tau_i \dots\}$ ，有 $\tau_j.prob$ 的概率为 $\{TS_1, \tau_j \dots\}$ 。对于包含多个概率选择的迁移情况，结果类似。

- 时延概率迁移：

上述离散迁移仅仅考虑了迁移的概率选择对系统迁移序列的影响，并没有考虑状态上时间延迟的随机性。 $\tau_{i_c_i}$ 表示迁移 τ_i 在其源状态 $\tau_i.rs$ 上停留的时间为 c_i 。设 $TS_{1_C_1}$ 为 τ_i 之前的迁移序列，即系统执行迁移序列 TS_1 的耗时为 C_1 ，则 $\{TS_{1_C_1}, \tau_{i_c_1} \dots\}_{\tau_i.rs.\phi_{distr}(c_1)} | \dots | \{TS_{1_C_1}, \tau_{i_c_i} \dots\}_{\tau_i.rs.\phi_{distr}(c_i)}$ 表示对应的时延概率迁移序列。

3.4 本章小结

UML 是最常用的系统建模语言之一，MARTE 是针对实时嵌入式系统的 UML profile，MARTE/UML 模型提供了强大的实时性、嵌入式方面的建模能力。但对于智能建筑等 CPES 的混成、随机和能量感知特性，MARTE/UML 建模方式仍然存在一定的局限性。针对此问题，本章首先定义了 CPES 中的两种随机行为；接着给出了 MARTE 元素的扩展，包括数据类型和表达式；最后结合 MARTE，扩展了 UML 的类图、顺序图和状态图，给出了其元模型和语法规则，以支持 CPES 系统的建模。本章给出了扩展模型的简单示例，关于扩展模型的实际应用，可参考第五章案例部分。

第四章 能耗随机混成自动机的验证

MARTE/UML 采用多视图的方式对系统进行设计、描述，但由于其半形式化的特性，无法实现模型的定性、定量验证。自动机不仅可以刻画系统的行为，且目前已存在很多基于自动机的模型检测方法。本章首先基于随机混成自动机的概念，给出了能耗随机混成自动机的形式化语法和语义，支持显式建模系统中能量的产生与消耗。接着，提出了从 MARTE/UML 状态图到能耗随机混成自动机的映射规则和转换算法，实现了不可执行模型到可执行模型的自动转换。最后，基于我们的建模、仿真、验证平台 Modana[37, 38] 和模型验证工具 UPPAAL-SMC[27, 28]，给出了本文所提的智能建筑能耗建模与分析方法的实现框架。

4.1 能耗随机混成自动机

4.1.1 ESHA 的语法

随机混成自动机 (Stochastic Hybrid Automata, SHA) [24–26] 可以被视作添加了随机语义扩展后的混成自动机 (Hybrid Automata) [39]。根据 SHA 的定义，系统可以由位置 (location) 和位置间的迁移 (transition) 描述。在每一个位置上，连续变量随时间的变化速率可能不同，每次迁移可能伴随着系统变量的重新赋值 (valuation)。SHA 具有混成的语义：在位置上可以利用速率向量 (rate vector) 来定义连续变量随时钟的变化率；而在位置间的迁移过程中，可以对变量进行重新赋值；同时，SHA 也具有随机的语义：位置上可以用时延函数来描述系统在该位置时间延迟的概率；位置之间的迁移可以定义离散的概率值来表示从某个位置发生某个迁移的特定概率。

为了能够显式地描述 CPES 中的能耗变化，我们在 SHA 上添加能耗的信息，

并且针对能耗产生的不同方式,进行了分类。能耗随机混成自动机的定义如下:

Definition 7. 能耗随机混成自动机

一个**能耗随机混成自动机** (Energy Stochastic Hybrid Automata, ESHA) 是一个九元组 $ESHA = (L, l_0, X, \Sigma, T, R, I, F, E)$ 。

- L 是位置的有限集合;
- $l_0 \in L$ 代表初始位置;
- X 是所有变量的集合,包括离散变量、连续变量以及时钟,且时钟的取值范围为 \mathbb{R}^+ ;
- $\Sigma = \Sigma_i \cup \Sigma_o$ 是动作的有限集合,分为输入动作 (Σ_i) 和输出动作 (Σ_o);
- $T \subseteq L \times \Phi(X) \times Prob \times \Sigma \times 2^X \times L$ 是迁移的有限集合,即一个从 l 到 l' 的迁移在输入动作和变量的约束条件下以一定的离散概率发生,并伴随着输出动作和变量的重新赋值;
- $R : L \rightarrow \mathbb{N}^X$ 为每一个位置赋予了一个速率向量来刻画在该位置上连续变量的变化率;
- $I : L \rightarrow Inv$, 其中 Inv 描述了 ESHA 中位置上的变量约束, I 定义了这种映射关系;
- 对于每一个位置 $l \in L$, $f(l)$ 为该位置上的时延函数。
- $E : T \cup L \rightarrow \mathbb{R}$ 代表 ESHA 所描述的动态行为过程中的能耗,它将自动机中的每个位置和每条迁移映射到一个实数,来记录相应的能耗,即

$$E = E_t \cup E_l \quad (4.1)$$

其中, $E_t : T \rightarrow \mathbb{R}$ 将每个迁移映射到实数上,表示迁移带来的能耗; $E_l : L \rightarrow \mathbb{R}$ 将每个位置映射到实数上,以记录在位置上产生的能耗。迁移和位置上的能耗值均可正可负,能耗值为正代表系统消耗能量,为负代表系统产生能量。

4.1.2 ESHA 的语义

SHA 的语义可以用一个标签迁移系统描述，在解释 ESHA 的语义之前，先介绍如下定义。

Definition 8. 标签迁移系统

一个**标签迁移系统** (Labeled Transition System, LTS) [40] 是这样一种结构: $\langle S, A, \longrightarrow \rangle$, 集合 S 包含系统所有的状态, 集合 A 包含所有标签, 迁移关系 $\longrightarrow \subseteq S \times A \times S$. $(s, a, s') \in \longrightarrow$ 通常表示为 $s \xrightarrow{a} s'$ 。

时钟标签迁移系统是一种标签为时钟集合的标签迁移系统。对于每一个状态, 最多有 2^n 条对外的迁移, 其中, $n = |C|$ 表示时钟的数目。每个迁移都可能伴随着时钟的重置。

Definition 9. 时钟标签迁移系统

一个**时钟标签迁移系统** (Clock-labelled Transition System, CLTS) 是这样一种结构: $\langle S, C, \longrightarrow \rangle$, 其中 $\langle S, 2^C, \longrightarrow \rangle$ 是一个标签迁移系统。

Definition 10. 能耗随机时钟标签迁移系统

基于 CLTS, 在 [41] 中我们定义了 Probabilistic CLTS 的概念, 进一步地, 可以扩充定义能耗随机时钟标签迁移系统 (Energy Stochastic Clock-labelled Transition System, ESCLTS)。ESCLTS 是一个特殊的时钟标签迁移系统, 其中, $\longrightarrow \subseteq (S \cup F \cup E_l) \times 2^C \times Prob \times E_t \times (S \cup F \cup E_l)$ 。

F 表示状态 S 处的时延函数, 即描述了状态 S 处迁移发生与时间的概率分布关系; $Prob \subseteq \mathbb{R}$ 是一个 $[0,1]$ 上的实数, 对于一个给定的迁移 $t = (s \cup f \cup e_l, \Gamma, prob, e_t, s' \cup f' \cup e'_l)$, $\pi(t) = prob$ 表示此迁移被触发的概率为 $prob$ 。 $E_{t(l)}$ 中的元素 $e_{t(l)}$ 代表了某个特定迁移 (位置) 产生的具体能耗数值。 $e_{t(l)} > 0$ 代表系统消耗了能量, $e_{t(l)} < 0$ 代表系统产生了能量。

Definition 11. 迁移能耗

表 4.1: 迁移能耗的计算

Type	Update	λ
sync	true	$e_t.sync + e_t(update)$
sync	false	$e_t.sync$
guard	true	$e_t(update)$
guard	false	0

迁移能耗代表自动机在进行位置迁移时，随之产生的能耗。它由一个三元组来表示： $E_t = (Type, Update, \lambda)$ ，其中， $Type$ 和 $Update$ 分别表示迁移触发的原因和迁移触发后的后果（包括对系统某些变量的改变）。

- $Type ::= sync|guard$ ，其中， $sync$ 表示自动机与另一个自动机之间存在消息交互，即由消息触发了迁移； $guard$ 表示迁移的触发仅仅是由于某个位置上不变式约束条件的违背而造成的。
- $Update ::= true|false$ ， $true$ 代表此迁移造成了系统某些变量的重新赋值，而 $false$ 意味着不改变系统的任何变量。

现在，我们给出 λ 的定义，它是系统某次迁移产生的能耗的计算值—— $\lambda : Type \cup Update \rightarrow \mathbb{R}$ 。在 $Type$ 和 $Update$ 值的不同组合下， λ 的值将有四种计算方式，具体规则如表4.1所示。

根据迁移触发原因的不同，我们来分析 ESHA 中不同类型迁移所带来的能耗。现实世界中系统不同模块间的信息传递在自动机中被建模为模型间的同步信号。对于特定环境下的系统而言，这种信息传输产生的能耗由线路的物理特性和系统的消息传递机制决定，而与消息的内容无关。因此，可以将每次消息传输的能耗视为一个固定值，记作 $e_t.sync$ 。值得注意的是，在 ESHA 中，一次消息传递被建模为一个模块的信号接收事件和另一个模块的信号发送事件，为了避免能耗的重复

计算，可以限定只计算发送事件能耗或只计算接收事件能耗。由于不变式条件的违背而产生的迁移，仅仅代表了系统中某些变量值的演化触发了系统的状态迁移，并没有实际动作发生，因此不会带来任何能耗。

迁移上的 $Update$ 代表对系统中某些变量的赋值，在实际中，这往往意味着系统需要采取一些措施来改变某些变量的值。例如，在一个汽车系统中，“ $acceleration = acceleration + 2$ ”意味着汽车引擎需要加大马力来使得加速度增加两个单位，这一动作会带来额外的能耗。另外，在某些时刻，系统可能需要补充能量，如利用太阳能产生能量，能耗值为负即表示能量的补给。迁移上的赋值操作带来能耗值由具体的动作所决定，故记作 $e_t(update)$ 。值得一提的是，在对 CPES 建模时，由于系统的实时性，常使用时钟来控制某些事件的发生。迁移上可能会伴随着时钟的重置，这实际上是为了建模系统控制而人为设定的，并不耗能。

正如表4.1所呈现的，一个离散迁移所产生的能耗为触发事件执行的能耗和动作效应的能耗之和。对于一个能耗随机时钟标签迁移系统 $\langle S \cup F \cup E_l, 2^C \cup E_t, \longrightarrow \rangle$ ，我们把 $e_t(t) = e_t \cdot \lambda$ 叫作离散迁移 $t \in \longrightarrow$ 的能耗值。

Definition 12. 位置累积能耗

位置之间的迁移表示的是系统的离散行为，然而，由于时间的流逝以及系统处于不同位置时能量随时间的变化速率不同，在系统的不同位置，会累积特定的能耗，这种在位置上产生的能耗被称作**位置累积能耗**。

位置累积能耗可以通过公式 $e_l(l) = \int r(t)dt$, s.t. $(l, T) \rightarrow (l, T + \Delta T)$ 计算而得，其中， ΔT 代表了时间流逝的长度， $r(t)$ 代表在某个位置上能耗随时间的变化率， $(l, T) \rightarrow (l, T + \Delta T)$ 意味着在某个位置上停留的时间必须使得系统变量满足该位置上的不变式约束。

Definition 13. 能耗链

一条从位置 loc_1 到位置 loc_n 的能耗链是由位置和迁移的交替排列组成的有向序列， $\gamma = loc_{1, \Delta T_1} \xrightarrow{t_1} loc_{2, \Delta T_2} \xrightarrow{t_2} \dots \xrightarrow{t_{(n-1)}} loc_{n, \Delta T_n}$ 。尤其需要注意序列的方向，

$loc_1 \xrightarrow{t_x} loc_2$ 和 $loc_2 \xrightarrow{t_y} loc_1$ 是不同的, 因为迁移具有方向性, 且不同的迁移带来的能耗不同。一条能耗链的总能耗值是所有迁移能耗和位置累积能耗之和, 即

$$E(\gamma) = \sum_{i=1}^{n-1} e_{t_i} \cdot \lambda + \sum_{i=1}^n \int r(t) dt \quad (4.2)$$

最小迁移能耗链: 从位置 loc_1 到位置 loc_n 通常具有不止一条迁移能耗链, 其中, 能耗值最小的被称作最小迁移能耗链, 即 $\forall \gamma_{l_1 \rightarrow l_n}, E(\gamma_{l_1 \rightarrow l_n}^{min}) \leq E(\gamma_{l_1 \rightarrow l_n})$ 。

4.2 MARTE 模型到 ESHA 的转换

MARTE/UML 类图定义了系统的静态元素; 顺序图描述了系统为实现某个功能, 不同对象之间的交互关系; 状态图则更详尽地刻画了对象内部发生的状态变化。状态图与随机混成自动机本质上描述的都是单个对象的动态变化过程, 因此, 可以基于语义将扩展的 MARTE/UML 状态图的元素映射为 ESHA 的元素, 实现设计模型到可执行模型的转换, 进而对转化得到的模型实现仿真和验证。

4.2.1 模型映射规则

转换的依据

从建模的基本思想来说, 模型是对现实世界的抽象。针对同一个系统, 观察的角度和重点不同以及建模的方法不同, 都会得到不同的系统模型。但是, 当关注的角度相同、针对同样的性质时, 不同的建模方法构建出来的系统模型只是表达方式上存在差异, 本质上其逻辑语义是一致的 [42]。

元素的映射

根据前述对扩展的 MARTE/UML 状态图和 ESHA 的定义, 我们给出了如图4.1所示的元素映射规则, 其中, ESHA 以 UPPAAL-SMC 工具中的图形化形式表示。UPPAAL-SMC 是一个常用的统计模型检测工具, 其理论基础是随机混成自动机。本文定义的 ESHA 可以视作 SHA 添加了能耗的扩展版本, 我们通过自定义特定变量来表示迁移能耗和位置累积能耗。此外, 在 UPPAAL-SMC 中, 离散概率选择迁移需要添加 Branch 节点, 且每条迁移的触发概率以比值 *ProbabilityWeight* 表示。

- 状态映射: 初始(终止)状态对应于初始(终止)位置; *Invariant* 衍型的状态, 其 *constraint* 标记值的不变式表达式对应于位置上的不变式约束; *CEvolution* 衍型的状态, 其 *cevolution* 标记值的微分表达式对应于位置上的微分等式; *CEConsume* 衍型的状态, 其 *ceconsume* 标记值的能耗微分表达式对应于位置上的能耗微分等式; 对于 *TimeDelay* 衍型的状态, 若其 *timedelay* 标记值的时延概率分布为指数分布, 则对应于位置上的时钟迁移约束; 若时延概率分布为均匀分布, 则由位置上的约束和迁移上的监护条件组合表示;
- 迁移映射: 状态图中迁移的源状态和目标状态分别对应于 ESHA 中的源位置和目标位置, 触发事件、监护条件, 迁移概率以及执行效应也都一一对应; 在状态图中, 一个 *EventEconsume* 衍型的迁移, 其触发事件的能耗在 ESHA 中被定义为 *eventeconsume* 变量的重新赋值; 一个 *ActionEconsume* 衍型的迁移, 其执行效应的能耗在 ESHA 中被定义为 *actioneconsume* 变量的重新赋值。

由图中的映射关系可知, 扩展的 MARTE/UML 状态图元素和 ESHA 模型元素在表达含义上具有一致性, 为实现模型转换提供了依据。

示例

图4.2所示为一个简单的模型映射示例: 一个加热器初始处于空闲状态, 当接收到 *on?* 信号后, 有 50% 的概率进入 *heat1* 状态, 50% 的概率进入 *heat2* 状态, 且接收信号这一事件会产生 2 个单位的能耗; 当加热器处在 *heat1* 状态时, 每单位时间的能耗值为 5, 提供的加热功率为 2, 且加热 4 至 5 个单位时间后会再次返回空闲状态; 当加热器处在 *heat2* 状态时, 每单位时间的能耗值为 10, 提供的加热功率为 5, 同样地, 在加热 4 至 5 个单位时间后会再次返回空闲状态。图4.2(a)为该示例对应的扩展 MARTE/UML 状态图, 图4.2(b)为按照元素映射规则转换后的 ESHA 模型。

4.2.2 模型转换伪代码

下面我们给出从扩展的 MARTE/UML 状态图到 UPPAAL-SMC 的 ESHA 模型转换的伪代码。转换的输入为扩展的 MARTE/UML 状态图，通过前述的元素映射规则，将状态图中的元素一一映射为 ESHA 模型的元素：对于一个迁移 τ_i ，首先，对其源状态和目标状态进行类型判断，映射为对应的位置（若该状态已经转换为位置，则无需重复操作，从位置数组 L 中找到对应位置即可）；接着，对迁移的 $prob$ 进行判断，若 $prob$ 值不等于 1，说明此迁移为离散概率迁移，为该迁移设置一个

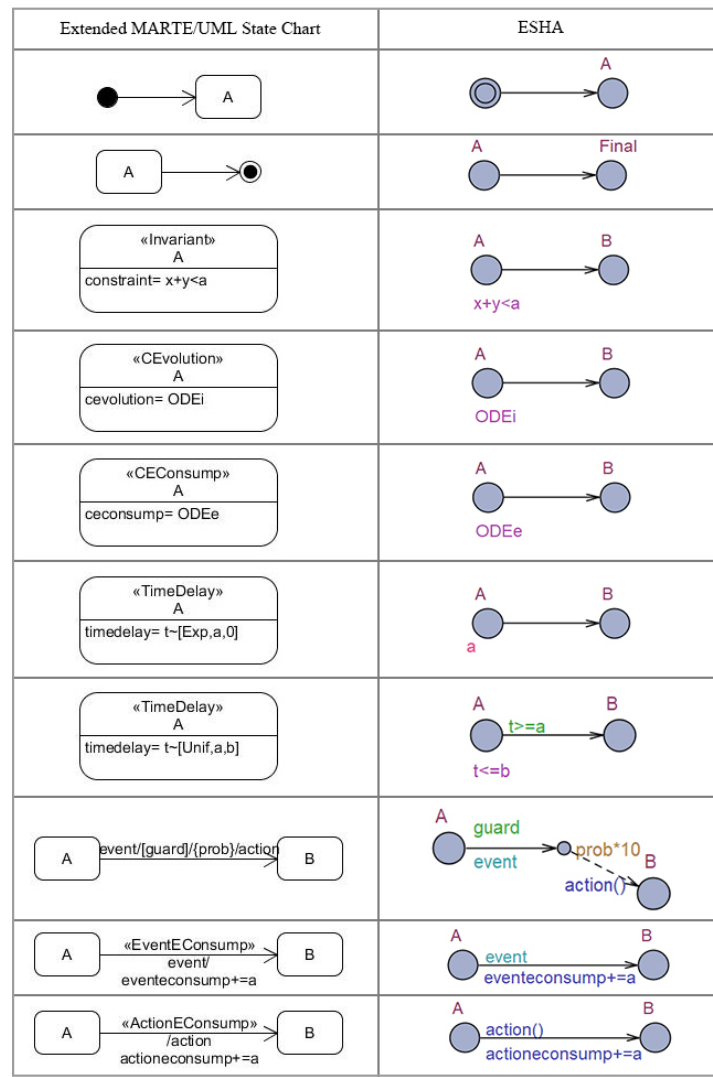


图 4.1: 扩展的 MARTE/UML 状态图-ESHA 模型的映射规则

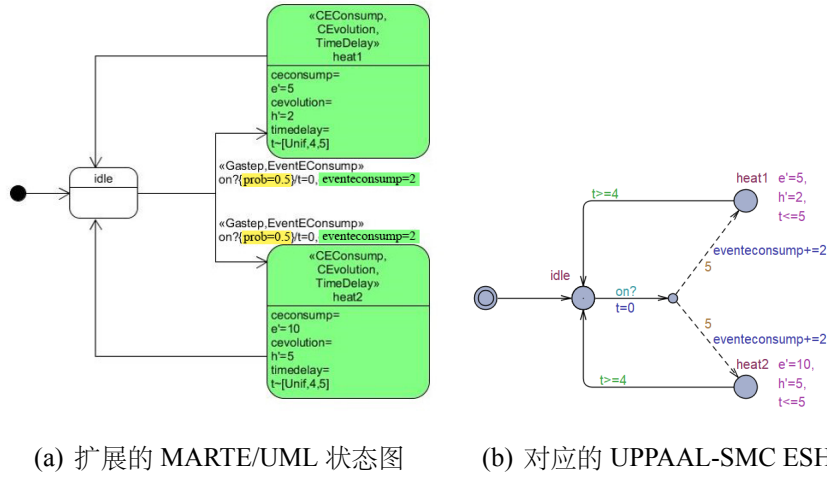


图 4.2: 扩展的 MARTE/UML 状态图-ESHA 模型的映射示例

Branch 节点（若已设置则无需重复操作，从分支节点数组 **B** 中找到对应节点即可），并从迁移的源位置态到分支节点设置边 $Edge_{i1}$ ，将触发事件、监护条件和概率对应到 $Edge_{i1}$ 上， $prob \times 10$ 对应于 *ProbabilityWeight*。从分支节点到目标位置设置边 $Edge_{i2}$ ，将执行效应和能耗函数对应到 $Edge_{i2}$ 上。若 $prob$ 值等于 1，说明此迁移不存在概率选择，无需设置分支节点，从源位置到目标位置设置边 $Edge_i$ ，并将迁移上的元素一一映射；对于源状态，按照映射规则将状态上的元素一一映射为位置上的元素。以下为模型转换的伪代码：

输入： 扩展的 MARTE/UML 状态图 SC

输出： UPPAAL-SMC ESHA 模型

- 1: 数组 L: 已添加的 location 集合; 数组 S: 记录状态 s 是否已添加对应的 location
- 2: 数组 B: 已添加的 Branch 节点结合;
- 3: 数组 REC: 记录 $prob \neq 1$ 的 (s, evn, grd) 是否已添加对应的 Branch 节点
- 4: 数组 E: 已添加的 Edge 集合
- 5: **for** τ_i in SC **do**
- 6: **if** $S[\tau_i.src] == 1$ **then**
- 7: FIND l_i for $\tau_i.src$ in L {若源 location 已添加，则找到对应 location}
- 8: **else if** $typeof(\tau_i.src) == initial$ **then**
- 9: SET $\tau_i.src \rightarrow$ initial location l_i
- 10: **else if** $typeof(\tau_i.src) == final$ **then**
- 11: SET $\tau_i.src \rightarrow$ final location l_i
- 12: **else**

```

13:   SET  $\tau_i.src \rightarrow$  location  $l_i$ 
14:   end if
15:   if  $S[\tau_i.tgt] == 1$  then
16:     FIND  $l_j$  for  $\tau_i.tgt$  in L    {若目标 location 已添加, 则找到对应 location}
17:   else if  $typeof(\tau_i.tgt) == initial$  then
18:     SET  $\tau_i.tgt \rightarrow$  initial location  $l_j$ 
19:   else if  $typeof(\tau_i.tgt) == final$  then
20:     SET  $\tau_i.tgt \rightarrow$  final location  $l_j$ 
21:   else
22:     SET  $\tau_i.tgt \rightarrow$  location  $l_j$ 
23:   end if
24:   if  $\tau_i.prob \neq 1$  then
25:     if  $REC[\tau_i.src, \tau_i.evn, \tau_i.grd] == 1$  then
26:       FIND Branch  $b_i$  in B    {若存在概率分支且 Branch 节点已添加, 则找到对应 Branch 节点}
27:       FIND Edge  $Edge_{i1}$  in E
28:     else
29:       SET Branch  $b_i$     {若存在概率分支且 Branch 节点未添加, 则添加对应 Branch 节点}
30:       SET Edge  $Edge_{i1}$  FROM  $l_i$  TO  $b_i$ 
31:     end if
32:     SET  $Edge_{i2}$  FROM  $b_i$  TO  $l_j$ 
33:     SET  $\tau_i.prob \times 10 \rightarrow Edge_{i2}.ProbabilityWeight$     {状态图中的 prob 表示概率, UPPAAL-SMC 中的 Probability Weight 表示比率}
34:     SET  $\tau_i.evn \rightarrow Edge_{i1}.sync$     {离散概率分支下, 迁移元素的对应转换}
35:     SET  $\tau_i.grd \rightarrow Edge_{i1}.guard$ 
36:     SET  $\tau_i.act \rightarrow Edge_{i2}.update$ 
37:     SET  $\tau_i.eng \rightarrow Edge_{i2}.update$ 
38:   else
39:     SET  $Edge_i$  FROM  $l_i$  TO  $l_j$ 
40:     SET  $\tau_i.evn \rightarrow Edge_i.sync$     {无离散概率分支下, 迁移上元素的对应转换}
41:     SET  $\tau_i.grd \rightarrow Edge_i.guard$ 
42:     SET  $\tau_i.act \rightarrow Edge_i.update$ 
43:     SET  $\tau_i.eng \rightarrow Edge_i.update$ 
44:   end if
45:   SET  $\tau_i.src.sname \rightarrow l_i.name$     {状态上元素转换为 location 上元素}
46:   SET  $\tau_i.src.inv \rightarrow l_i.invariant$ 

```

```

47:  SET  $\tau_i.src.diff \rightarrow l_i.invariant$ 
48:  SET  $\tau_i.src.eng \rightarrow l_i.invariant$ 
49:  if  $typeof(\tau_i.src.distr) == Exp$  then
50:      SET  $\tau_i.src.distr.a \rightarrow l_i.RateofExponential$     {指数时延概率分布, 在 UPPAAL-
        SMC 中直接设置比率}
51:  else if  $typeof(\tau_i.src.distr) == Unif$  then
52:      SET  $\tau_i.src.distr.a \rightarrow Edge_{i(i1)}.guard$     {均匀时延概率分布, 在 UPPAAL-SMC 中
        通过 location 上的 invariant 和迁移上的 guard 表示}
53:      SET  $\tau_i.src.distr.b \rightarrow l_i.invariant$ 
54:  end if
55: end for

```

4.3 建模与分析方法的实现框架

Modana[37, 38] 是我们自己设计、开发的建模和分析平台, 意为“modeling”和“analysis”的融合, 旨在提供一套完整的 CPS 建模、分析方法。Modana 的核心思想在于: 通过集成的方式实现不同模型间的协作, 其中既包含同层模型, 也包含跨层模型。同层异构模型, 如可执行的 PRISM[43] 与 Modelica[44] 模型, 可以通过协同仿真技术 [45] 实现异构模型间的仿真; 跨层模型, 如设计模型 (UML/MARTE) 与可执行模型 (马尔科夫链 (Markov Chain, MC)[46]、随机混成自动机等), 可以通过模型自动转换实现设计模型的仿真、验证。

图4.3所示为 Modana 平台的体系结构, 左侧为概念框架, 从软件工程的角度, 将 MDD 的系统设计方法归纳为四个抽象模块: 图形化建模模块、模型转换模块, 协同仿真模块及分析与验证模块。右侧为对应的平台实现, 图形化建模支持本文提出的扩展 MARTE/UML 状态图、SHA, MC 及 Modelica 模型; 设计模型需要经过 Modana 模型转换器转换, 才能执行仿真, 而可执行模型 SHA、MC、Modelica 则直接进入仿真器。Modana 集成了 3 种仿真器: UPPAAL, PRISM 和 JModelica, 并实现了部分模型的协同仿真。最终, 由 Modana 调用外部仿真器生成模拟路径, 进入 Modana 统计模型检测器, 并利用我们之前的工作——自适应统计模型检测方法 [38] 进行模型的属性验证和分析。

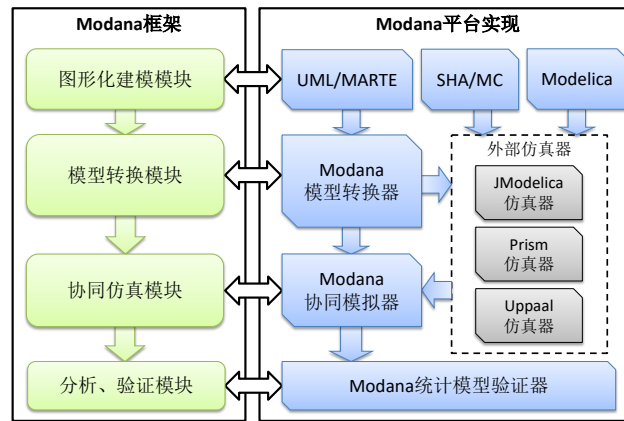


图 4.3: Modana 体系结构

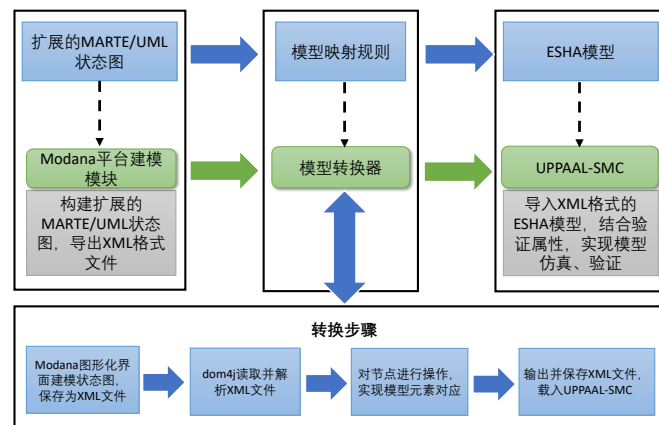


图 4.4: 基于 Modana 和 UPPAAL-SMC 的实现框架

基于 3.3.3 节中扩展的 MARTE/UML 状态图定义和 4.1.1 节中的 ESHA 定义, 以及模型映射规则, 在 Modana 平台的基础上, 我们实现了扩展 MARTE/UML 状态图到 ESHA 的自动转换。利用 Modana 前端建模模块, 可以实现扩展的 MARTE/UML 状态图的建模, 并导出 XML 格式的模型文件。而 UPPAAL-SMC 的能耗随机混成自动机模型文件格式也为 XML 形式, 模型转换实质上为两种 XML 文件对应节点的转换, 这为实现扩展的 MARTE/UML 状态图到 ESHA 的转换提供了技术基础。

如图 4.4 所示, 基于 Modana 和 UPPAAL-SMC 工具, 可以实现本文提出的智能建筑能耗的建模与分析方法。

在模型转换过程中, 我们使用了 dom4j 来操作模型文件。dom4j 是 Java 的一

个 XML API, 可以用来读写 XML 文件。它可以实现建立 XML 文档, 添加、修改、删除节点, 以及格式化输出等功能。dom4j 具有性能优异、功能强大且简单易用的优点, 同时它也是一个开源库。本文基于 Modana 前端建模模块, 使用 dom4j 读取扩展的 MARTE/UML 状态图 XML 文件, 查询文件中的元素, 通过序列化 XML 文档生成对应的 ESHA 模型文件, 最后, 载入 UPPAAL-SMC 中实现模型验证。具体步骤如下:

- 通过 Modana 前端建模模块绘制扩展的 MARTE/UML 状态图, 并存储为 XML 文件;
- 使用 dom4j 读取扩展的 MARTE/UML 状态图的 XML 文件, 查询 XML 节点, 筛选出模型元素;
- 通过模型映射规则, 修改 XML 节点, 实现对应元素映射;
- 导出序列化 XML 文件, 载入 UPPAAL-SMC 中, 输入验证属性实现模型仿真、验证。

4.4 本章小结

尽管 MARTE/UML 模型可以实现系统的多视图建模, 但由于其半形式化的特点, 无法实现系统的仿真、验证。因此, 为了对系统模型进行进一步分析, 本章在随机混成自动机的基础上, 提出了能耗随机混成自动机的概念, 支持系统能耗的显式建模, 且可以利用统计模型检测方法对其进行系统属性的高效验证。为了将 MARTE/UML 模型和 ESHA 联系起来, 我们给出了扩展的状态图到 ESHA 的映射规则和算法, 并基于我们的 Modana 工具和模型验证工具 UPPAAL-SMC, 给出了本文所提的智能建筑能耗建模与分析方法的实现框架。

第五章 案例研究

温控系统是智能建筑的重要组成部分之一，在本章，我们以一个智能办公建筑为例，研究该智能建筑中温控系统的作用，以验证本文所提方法的可行性和实用性。案例改编自 Ansgar 等学者在 [47] 中提出的 Room Heating Benchmark，与之前的研究 [5, 12, 13] 相比，本案例考虑了更多实际因素：物理环境温度变化的实际模型、办公场景下用户行为的各种模式、人的散热对室内温度的影响以及实时电价的差异。此外，在 [5, 12, 13] 中，研究人员根据自己的专业知识，直接给出了系统的可验证模型。而本案例展示了利用领域本体指导构建系统初步模型、模型精化、借助模型转换技术得到系统的 ESHA，实现有关系统能耗等性质的验证与分析的完整过程。

5.1 场景描述

一个智能办公建筑中包含一定数目的办公室、会议室和加热器。加热器的数量比房间少，且每个房间最多只能使用一个加热器。由于墙的热传导性，不断变化的外界环境温度以及相邻房间温度会对某个房间的室内温度造成影响。同时，办公建筑中的用户行为也会间接影响室内温度。加热器由一个简单恒温器控制，当房间温度低于某个特定阈值时，加热器打开；当房间温度高于某个特定阈值时，加热器关闭。在智能温控系统中，能耗主要来源于加热器的工作以及系统中的信号传输。

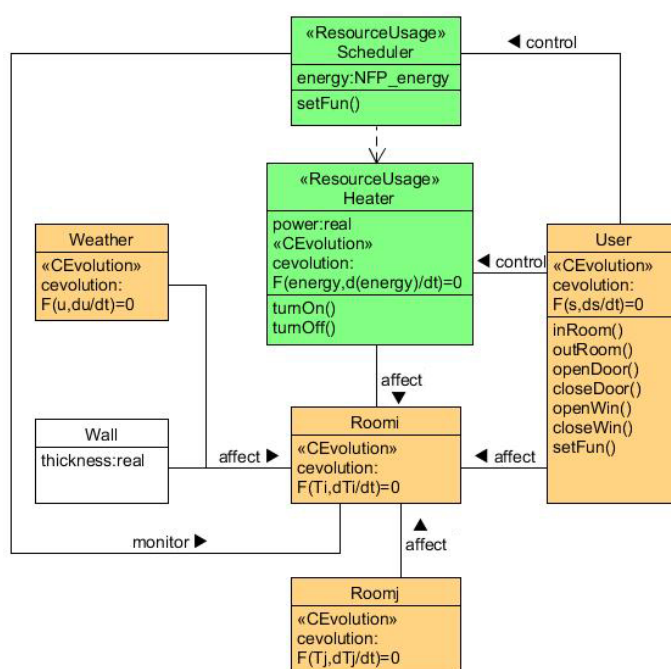


图 5.1: 智能办公建筑的类图

5.2 系统建模

5.2.1 初步模型

依照第三章给出的智能建筑领域本体，我们首先对系统进行需求分析，并指导建模系统的扩展 MARTE/UML 初步模型。

- 首先，易知，在本案例中，我们研究的建筑环境参数是室内温度；
- 结合 2.1.3 节中定义的室内环境参数约束的第二条，可以找到相关的概念有：物理环境温度、相邻房间温度、墙的热传导性能、用户的离开/进入房间行为、开/关门行为、开/关窗行为、人的散热、加热器的作用以及调度器对加热器的控制；
- 根据概念间的相关关系，可以确定，涉及到的系统实体概念有：物理环境、加热器、房间室内环境、墙、用户和调度器，利用扩展的 MARTE 类图的定义，为它们分别创建如图5.1所示的类图，前述的参数概念和行为概念对应各自类

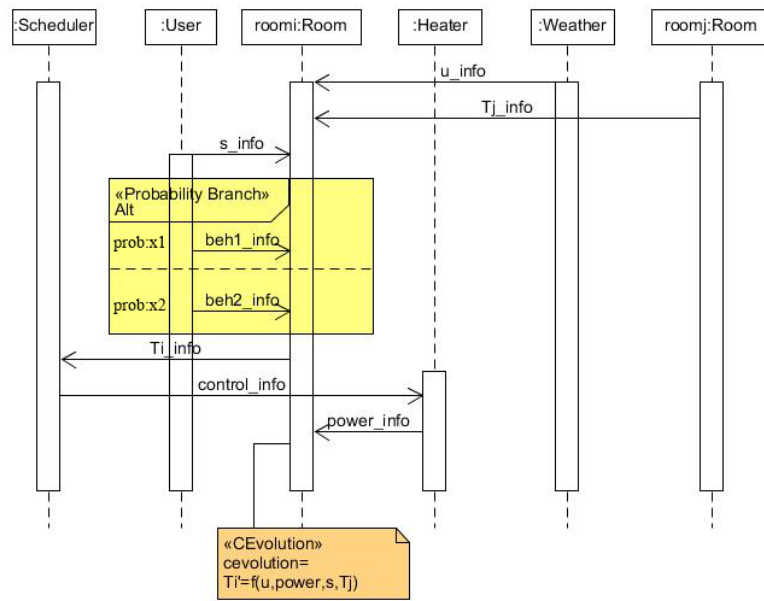


图 5.2: 智能办公建筑的顺序图

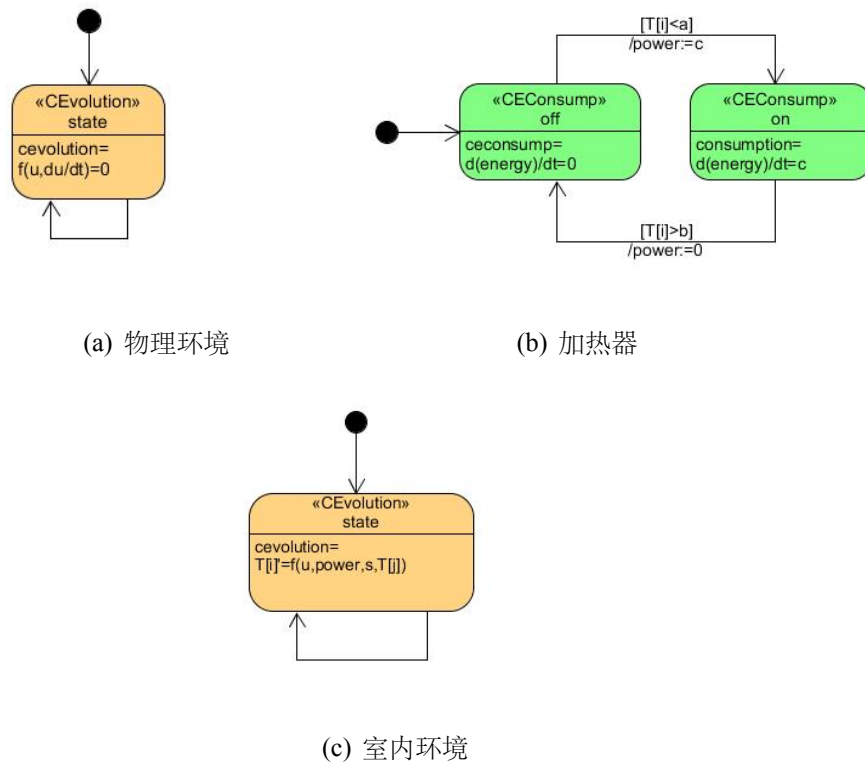


图 5.3: 物理环境、加热器和室内环境的初步状态图

的属性和操作。易知，在智能温控系统中，耗能类是加热器和调度器，在之后的状态图建模中，我们将密切关注能量在对象内部的产生与消耗情况；

- 根据概念的上下文图（图2.2），可知：物理环境和相邻房间的实时温度参数会影响室内环境；用户的散热和随机行为也会影响室内环境；加热器受调度器的控制，且其作用会对室内环境造成影响。而墙这种物理构成的参数是一个固定值，无需对其创建对象。基于上下文图，可建模如图5.2所示的扩展 MARTE/UML 顺序图。首先，物理环境和相邻房间的温度信息会传递给当前房间 $room_i$ ；用户自身的散热会影响室内温度，同时，用户有一定的概率执行随机行为 $beh1$ ，一定的概率执行随机行为 $beh2$ ，且其行为也会对室内温度造成影响；调度器以一定频率监测 $room_i$ 的温度，并按照某种调度策略来控制加热器；加热器的加热功率直接影响室内温度；在 $room_i$ 的控制焦点上，我们添加了 *CEvolution* 衍型来定义室内环境与其他因素的函数关系；
- 依照 2.2 节中给出的不同实体概念的模板构建状态图：对于物理环境，由于系统无法对其产生控制和影响，即它的状态不会被改变，因此，在状态图中，可以用表达式来描述物理环境参数的变化；对于加热器，在不考虑异常情况时，它通常应该在开启和关闭两个状态间切换，关闭时不耗能，开启时以一定速率耗能，且开启时其对室内环境的作用为其功率参数；对于用户，其行为是随机的，且每一个行为的发生会改变其状态；对于调度器，在一定的判断准则下，对加热器进行控制，且控制信号的传输会带来能耗；对于室内环境，它的温度参数受到以上几个实体的作用而变化。通过以上分析，可以得到物理环境、加热器和室内环境的初步状态图，如图5.3所示。以上模型的状态变化符合一定的规则，可以抽象为固定模板，而用户行为具有较强的随机性，系统调度器的判断逻辑较为复杂，在下一节，我们将通过深入分析，给出办公场景下几种常见的用户行为模式和调度器的几种不同策略。

5.2.2 精化模型

在智能温控系统中，物理环境温度、室内温度和系统能耗的连续变化体现了系统的混成特性；而系统的随机性主要体现在用户行为的不确定；系统能耗的产生主要来源于两方面——加热器的工作、调度器和加热器之间的信号传输，其他对象通过影响调度器对加热器的决策间接影响能耗。

在智能建筑领域本体中，我们已经定义了：室内温度与外界温度（物理环境温度和相邻空间温度）、墙的热传导性能、用户的离开/进入房间、开/关门行为、开/关窗行为、人的热量、暖通空调的作用以及调度器的控制有关。在本案例中，为了简化模型，对于用户行为仅考虑其离开/进入房间的影响。参考文献 [47]，本案例中房间 i 的室内环境温度可以由以下公式定义：

$$T'_i = \sum_{j \neq i} a_{i,j}(T_j - T_i) + b_i(u - T_i) + c_i h_i + s(T_i)N_i \quad (5.1)$$

其中，变量 T_i 和 T_j 分别表示房间 i 和房间 j 的室内温度，变量 u 代表物理环境温度。 h_i 是一个布尔类型的变量，其值为 1 时代表加热器被房间 i 使用，其值为 0 时代表房间 i 并未使用加热器。常量 $a_{i,j}$ 称作房间 i 和房间 j 的热交换系数，由墙的热传导性能和房间之间的相互位置决定。热传导系数具有对称性，即 $a_{i,j} = a_{j,i}$ ，若房间 i 和房间 j 不相邻，则 $a_{i,j} = 0$ 。常量 b_i 和 c_i 分别表示房间 i 与物理环境的热传递系数和加热器对房间 i 的加热功率。 $s(T_i)$ 是指在室内温度为 T_i 的情况下人体产生的热量， N_i 代表房间 i 内的人数。之前关于智能建筑温控系统的研究中均没有考虑到人的散热，实际上，在人数较多的办公环境中，对于室内温度而言，人的散热会带来不可忽略的影响。

按照一个成年人的平均体重为 68 公斤的标准，结合 [48] 中人在不同温度下散热的数据，我们使用 MATLAB 工具进行仿真拟合，得到了人体散热与房间温度的关系为：

$$s(T) = 98.62e^{-(\frac{T-14.03}{17.41})^2} \quad (5.2)$$

每个加热器由一个“bang-bang controller”控制：当房间 i 的温度 T_i 低于预设的

开启温度 on_i 时, 加热器开启, 并将变量 h_i 置为 1; 当房间 i 的温度 T_i 高于预设的关闭温度 off_i 时, 加热器关闭, 并将变量 h_i 置为 0。调度器可以将加热器从一个房间切换到另一个房间。当有超过两个房间同时需要加热时, 调度器将使用某种策略来对加热器进行配置。通过这种方式, 加热器得以被不同的房间共享使用, 来保证室内用户的舒适度。当房间 i 的温度低于 get_i ($get_i < on_i$) 时, 代表它需要加热器。用户在房间的温度低于 low_i ($low_i < get_i$) 时, 会感到不舒服。调度器的智能控制需要保持室内温度在用户舒适度的范围内且尽量优化能耗。关于 on_i 、 off_i 、 get_i 和 low_i 的详细定义可以参考文献 [5]。

在本案例中, 我们考虑三种参数维度:

1. 物理环境温度: 我们设计了四种不同的温度模拟方式, 包括恒温、简单正弦函数模拟、复杂正弦函数模拟和高斯函数模拟;
2. 调度策略: 我们使用了三种调度策略, 主要差异在于加热器使用权移动的判断方式不同;
3. 用户行为模式: 考虑到实际智能建筑中常见的办公情形, 我们设计了三种用户行为模式, 分别为日常工作模式、工作/出差模式和会议模式。在不同的用户行为模式中, 用户行为通过改变上述的预设值—— on_i 、 off_i 、 get_i 和 low_i 和公式 5.1 中的系数, 来影响调度器的调度, 从而影响系统能耗。

1、精化后的物理环境模型

对于物理环境, 不同于初步模型中直接将温度模拟公式附在状态上的方式。考虑到实际情况中, 智能建筑的传感器按照一定频率对物理环境温度进行监测, 我们将模型进行调整: 将温度模拟公式添加到迁移上, 并为状态设置一个指数型的时延概率分布, 表示系统以每个时间单位 60 次的频率监测物理环境温度。

如图 5.4 所示: 图 a 表示物理环境恒定温度为 -2 摄氏度; 图 b 表示一个简单的正弦函数模拟的温度; 图 c 中的参数 A 和 B 为自定义值, 可以更准确地模拟温度的实际情况; 图 d 中的温度由高斯函数模拟, 是我们根据上海 2-3 月份的

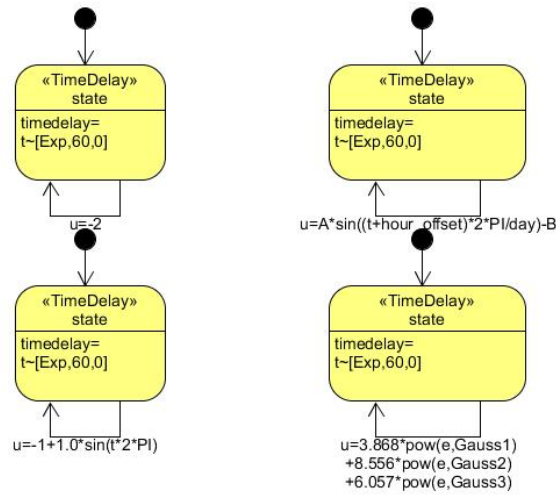


图 5.4: 精化后的物理环境状态图

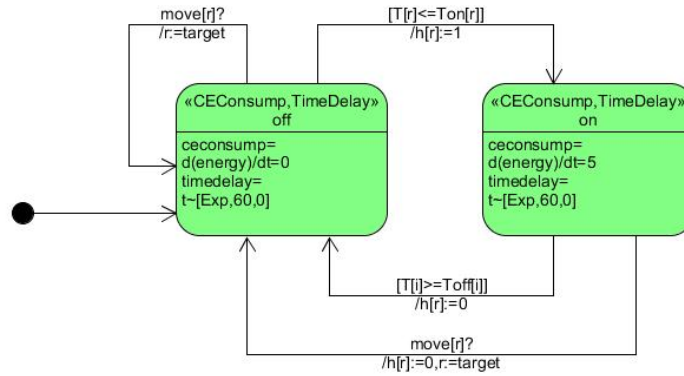


图 5.5: 精化后的加热器状态图

实际温度情况在 MATLAB 工具中模拟后计算所得，最终的高斯曲线拟合结果为 $u = 3.868e^{gauss1(t)} + 8.556e^{gauss2(t)} + 6.057e^{gauss3(t)}$ ，其中 $gauss1(t) = -(\frac{t-23.16}{11.58})^2$ ， $gauss2(t) = -(\frac{t-14.24}{6.194})^2$ ， $gauss3(t) = -(\frac{t+1.212}{5.069})^2$ 。

2、精化后的加热器模型

在考虑了调度器的调度策略后，加热器在开启和关闭状态时必须接收来自调度器的信号，以确认是否转移作用的房间。当加热器关闭时，接收到调度器发送的 $move[r]?$ 信号时，将变量 $target$ 的值赋给 r ，即锁定将要判断的为房间 r 的温度；当加热器开启时，需要先将加热器使用权从当前的房间 r 夺走，再将 $target$ 的值赋

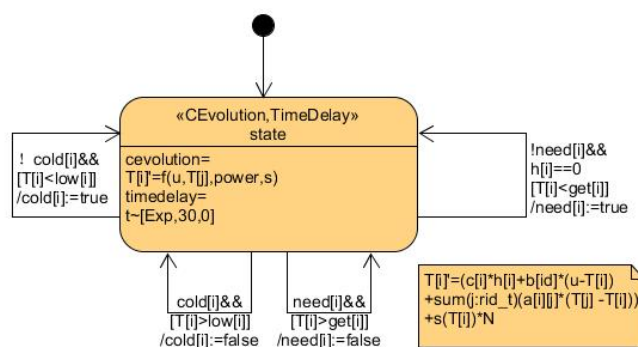


图 5.6: 精化后的室内环境状态图

给 r 。此外，设置布尔型标记 $h[i]$ 来表示房间 i 是否占有加热器， $h[i] \times c[i]$ 表示加热器对房间 i 的作用，则无需在开关状态切换时对加热功率 $power$ 进行重新赋值。精化后的加热器状态图如图5.5所示。

3、精化后的室内环境模型

对于室内环境来说，结合前述关于 on_i 、 off_i 、 get_i 和 low_i 的介绍，我们将对室内温度的判断加在室内环境状态图中，并通过设置一些标记值来供调度器判断。如图5.6所示，当房间 i 室内温度 $T[i]$ 低于预设值 $low[i]$ 时，代表室内温度已经不满足人的舒适度要求，将标记变量 $cold[i]$ 置为 $true$ ，反之为 $false$ ；当 $T[i]$ 高于预设值 $get[i]$ 时，代表在当前的室内温度下，已经不需要加热器了，将标记变量 $need[i]$ 置为 $false$ ，反之为 $true$ 。

4、用户行为模型

在领域本体中，我们介绍了用户可以执行的行为，如离开/进入房间、开/关门、开/关窗等。之前的研究仅考虑了用户进入/离开房间这样的简单动作行为，本案例更贴合实际，考虑了办公场景中，职工的上班、下班、出差和开会这些常见的行为，并设计了三种用户行为模式：1) 日常工作模式：用户早晨来到办公室上班、进行上午的工作、离开办公室去吃午饭、进行下午的工作，最后下班离开办公室；2) 工作/出差模式：除了正常工作外，职工在下午可能会出差拜访客户等，由此可以设置工作/出差模式；3) 会议模式：在某个项目刚开始的时期，为了确定项目方案，

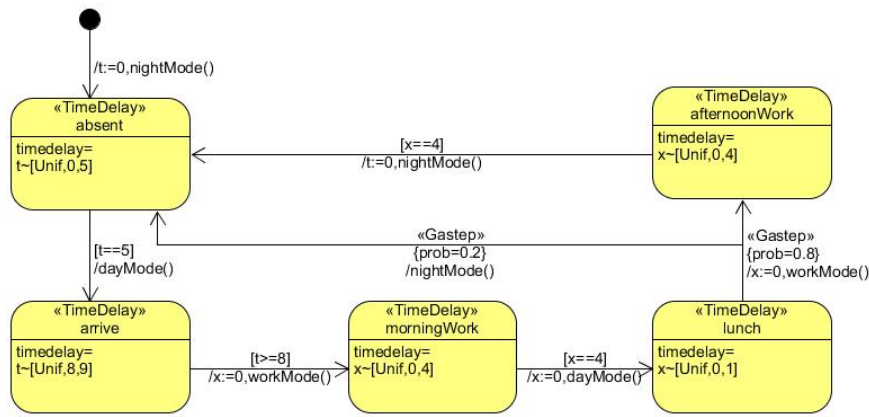


图 5.7: 工作/出差模式状态图

职工可能早上、下午均需要去会议室参加会议商讨方案。

图5.7展示了工作/出差模式的状态图。最初，在凌晨至上午5点，办公建筑处于夜间模式，此时的 on_i 、 off_i 、 get_i 数值均处于预设的较低值；上午5点之后，办公建筑进入预热状态，即被 on_i 、 off_i 、 get_i 被设定为更高的值，开启白天模式；职工可能在上午8点至9点间的任意时刻来到办公建筑，当职工到达后，办公建筑被配置为工作模式，即对于室内环境来说，需要考虑办公室中人群的散热情况；之后，职工开始上午的工作，工作4小时后，他们会出去吃午饭，此时办公建筑再次被配置为白天模式，即不考虑人的散热情况；午饭时间为 $[0,1]$ 时内的均匀分布，午饭回来后，职工有80%的可能性继续下午的工作，20%的可能性出去见客户，即直接离开办公建筑；若职工继续下午的工作，将连续工作4小时后下班，并离开办公建筑。

5、调度器模型

对于何时将房间 j 占有的加热器分配给房间 i ，即房间之间的竞争条件，我们考虑以下三种调度策略：

1. 策略 I: 房间 i 的温度小于 get_i ，即 $T_i < get_i$ ，且房间 j 和房间 i 的温差大于一定值，即 $T_j - T_i \geq dif_i$ ；
2. 策略 II: 房间 i 的温度小于 get_i ，即 $T_i < get_i$ ，且房间 j 的温度大于 on_j ，即

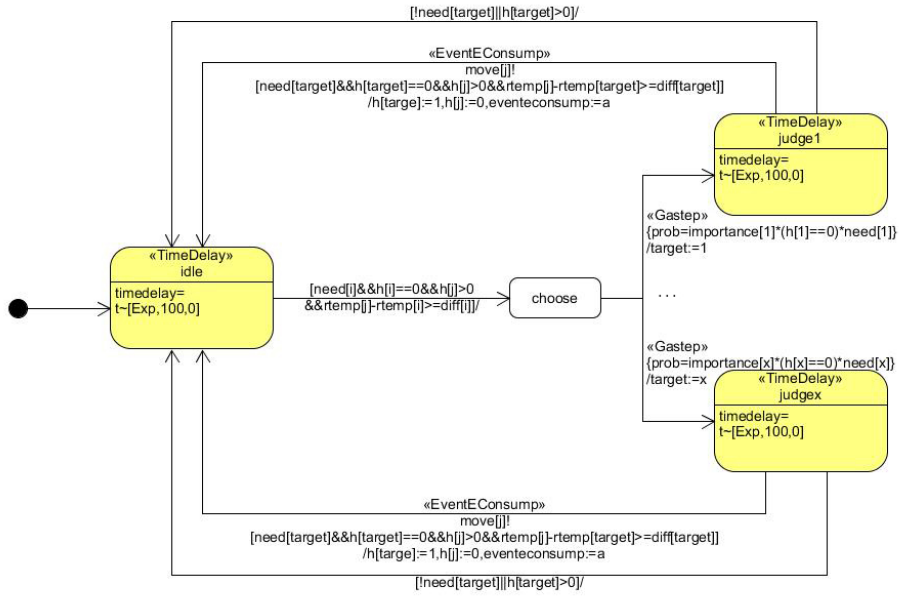


图 5.8: 策略 I 的状态图

$$T_j \geq on_j;$$

3. 策略 III: 房间 i 的温度小于 get_i , 即 $T_i < get_i$, 且房间 j 的温度大于 get_j ($get_j < on_j$), 即 $T_j \geq get_j$;

下面, 以策略 I 为例, 我们将分析并给出调度器的扩展 MARTE/UML 状态图。

如图5.8所示, 当调度器处于空闲状态时, 其以每单位时间(小时)100次的频率来监测室内环境的状态, 这一随机行为由指数时延概率分布描述; 当调度器监测到有房间需要加热且不占用加热器, 同时存在另一个房间与其温差大于预设值 $diff$ 时, 调度器将发生状态迁移, 进入选择状态; 随后, 调度器将对所有需要加热且不占用加热器的房间按照其重要性系数 imp 进行离散的概率选择; 若调度器选择了房间 x , 则进入判断状态并将 x 设为加热器将要移动的目标 $target$; 随后, 调度器判断此时是否仍存在一个占有加热器的房间, 且其与房间 x 的温差大于 $diff$, 若成立, 则将该房间的加热器赋予房间 x , 否则不执行任何操作。值得注意的是, 在判断需要将某房间的加热器赋予房间 x 时, 调度器会向该加热器发送信号, 此时的信号传输需要消耗一定能量。

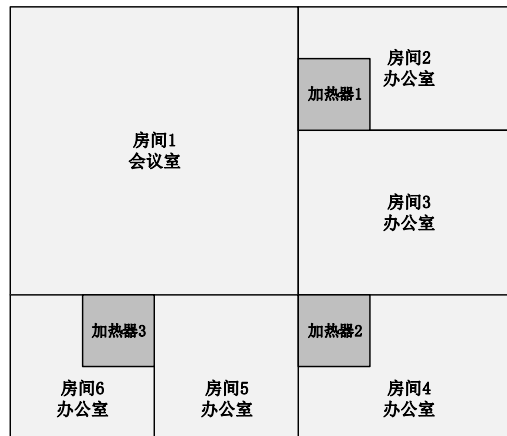


图 5.9: 智能办公建筑的布局

5.3 模型验证与分析

在前面的系统建模步骤中，我们已经得到了系统的设计模型，但若要对系统进行验证，除了利用前述的转换算法将扩展的 MARTE/UML 状态图转换为 ESHA 模型外，还需要进行参数实例化，以验证特定参数组合下系统的性质，并分析系统的能耗。

我们考虑一个具体的应用场景，某智能办公建筑的平面图如图5.9所示，共包含一个会议室、五个办公室和三个加热器，且初始状态加热器 1、加热器 2、加热器 3 分别供房间 2、房间 4 和房间 6 使用。

在本案例中，参考文献 [12] 中的数据，房间热交换系数、不同房间与物理环境的热交换系数和加热器对不同房间的加热功率设置如图5.10。

5.3.1 ESHA 模型

对于本案例，完整的 ESHA 网络模型包括：物理环境模型、加热器模型、室内环境模型、用户行为模式模型、调度器模型和实时电价模型六部分。

利用 Modana 模型转换器，我们将前述的 MARTE/UML 模型转换为 UPPAAL 工具可识别的 ESHA 模型，并使用 UPPAAL 工具载入该模型文件以图形化显示，

$$\begin{pmatrix} 0 & 40 & 30 & 0 & 30 & 40 \\ 40 & 0 & 30 & 0 & 0 & 0 \\ 30 & 30 & 0 & 35 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 35 & 0 & 30 & 0 \\ 30 & 0 & 0 & 30 & 0 & 35 \\ 40 & 0 & 0 & 0 & 35 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.5 & 0.35 & 0.15 & 0.3 & 0.15 & 0.25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 15 & 10 & 9 & 11 & 10 & 9 \end{pmatrix}$$

(a) 房间热交换系数 (b) 物理环境热交换系数 (c) 加热器功率

图 5.10: 案例参数实例化

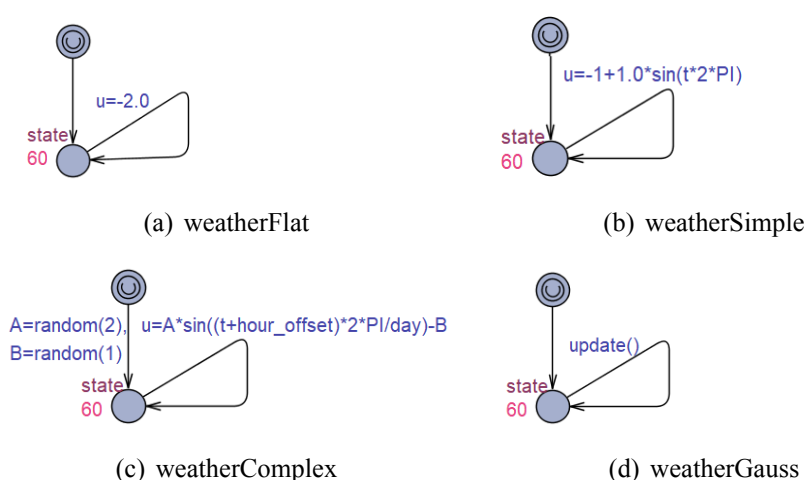


图 5.11: 四种物理环境模式的 ESHA 模型

为了模型的美观性，我们手动对模型进行了适当的修改（主要是将一些计算公式进行了函数封装）。

图5.11为四种物理环境模式的 ESHA 模型。其中, *weatherGauss* 模型在 *update()* 函数中定义了如何利用高斯函数来模拟温度的具体公式。

图5.12为加热器和室内环境的 ESHA 模型。

如前文所述，用户模式分为日常工作模式、工作/出差模式和会议模式，三种用户模式的 ESHA 模型如图5.13所示。

在上一节，我们已经介绍了调度器的三种策略，并给出了策略 *I* 的状态图，图5.14为三种策略的 ESHA 模型。

在现实生活中，为了鼓励人们错开用电高峰期，不同时段的电价是不相同的，

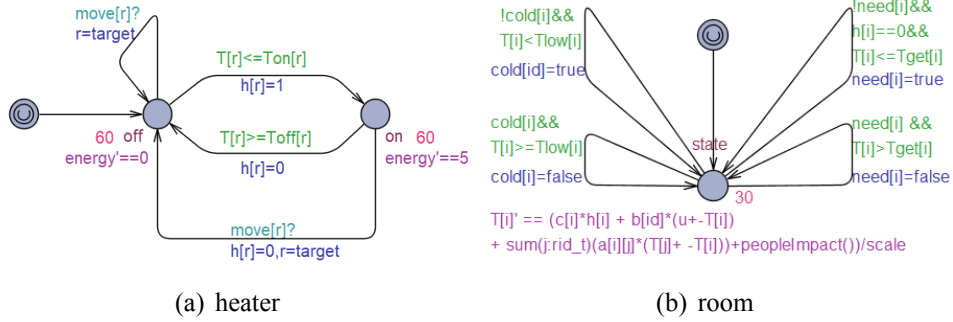


图 5.12: 加热器和室内环境的 ESHA 模型

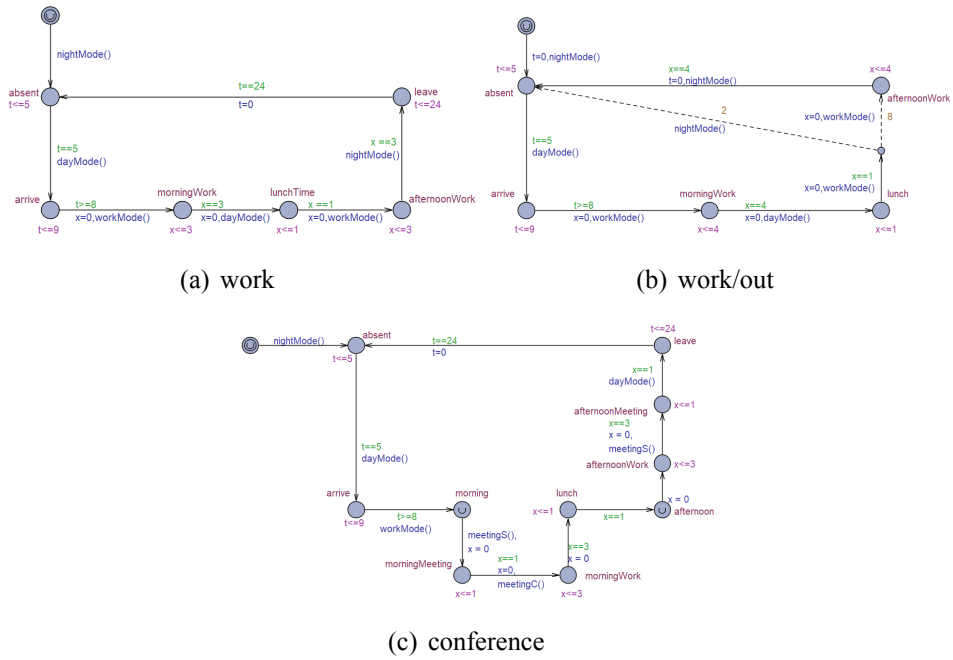


图 5.13: 三种用户行为模式 ESHA 模型

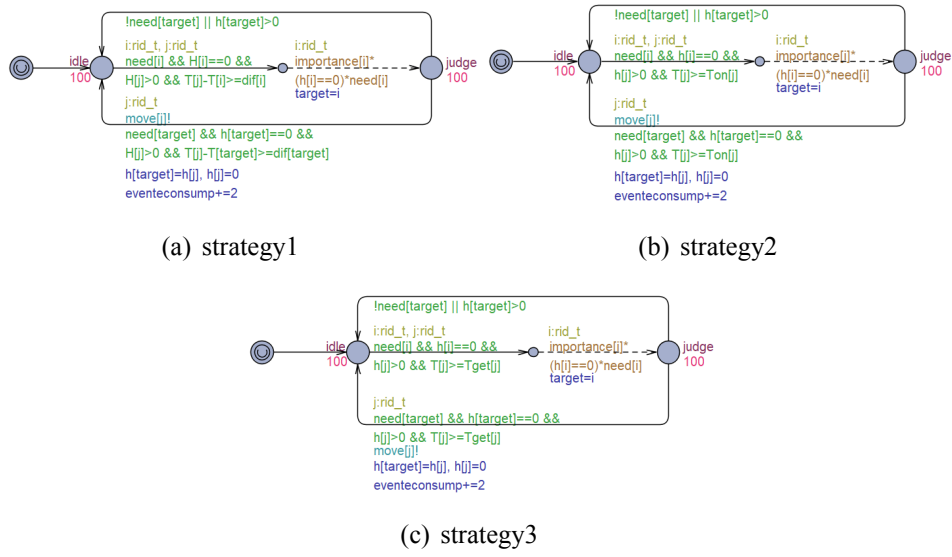


图 5.14: 三种策略的 ESHA 模型

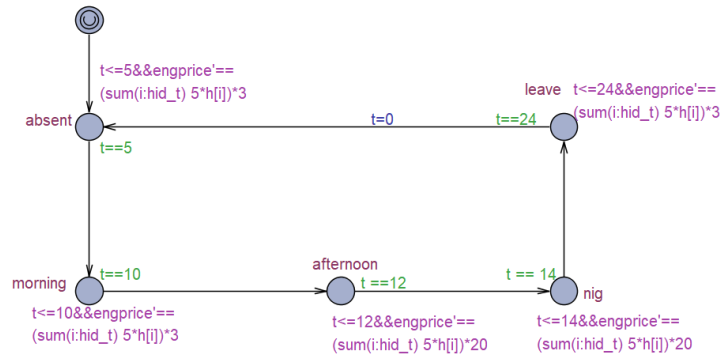


图 5.15: 实时电价的 ESHA 模型

对此，参考 [49] 我们构建了如图5.15所示的实时电价 ESHA 模型。对于办公建筑，10 点至 14 点是用电高峰期，此时的电价高于其他时间。

5.3.2 模型验证与分析

1、模型仿真

由于在本案例中，共有 4 种不同的物理环境模型、3 种不同的调度策略和 3 种不同的用户行为模式，因此共有 $4 \times 3 \times 3$ 种组合情况。首先，我们采用固定配置 (*weatherGauss*, *strategy1*, *work/out*) 对模型进行仿真，来探究系统的能耗等性质。图5.16(a)为某次仿真 48 小时内六个房间室内环境温度变化情况。从图中可以看出

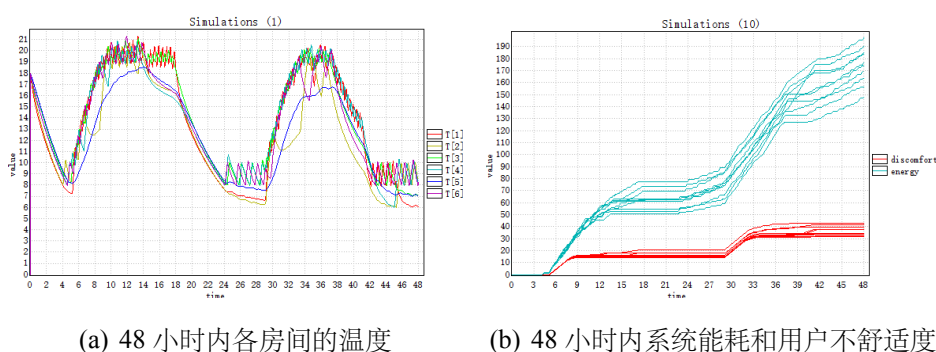


图 5.16: 系统仿真结果

在 8(32) 到 14(38) 时之间, 各房间的温度均维持在 16 度以上, 这说明调度器的智能控制起了作用, 使得不会有房间的温度过低。在 38 到 42 时房间的温度有所下降, 是由于用户出差离开了办公室, 导致办公建筑开启夜间模式所致。图 5.16(b) 为 10 次仿真下 48 小时内能耗和用户不舒适度情况。受到外界环境的影响, 在 0 到 12 时和 24 到 36 时, 由于物理环境温度过低, 需要加热器大量耗能来对办公建筑进行加热, 因此在这两个阶段, 能量消耗较快。而用户的不舒适度同样也是在上述两个夜间阶段增幅较大, 其余时间较为稳定, 说明调度器的调度有效, 在白天办公场景中, 为用户提供了一个较舒适的环境。

2、模型验证与分析

在以下情形中, 我们将物理环境固定为 `weatherGauss` 模式, 以探究不同调度策略和用户模式对系统能耗、用户不舒适度和电费的影响。

不同策略:

为了验证不同策略对系统变量的影响, 我们固定用户行为模式为工作/出差模式。图 5.17 所示为调度器的三种不同策略下, 用户不舒适度、系统能耗和电费的概率密度图。由图 (a) 可知, 在 48 小时内关于用户不舒适度的平均值, $strategy2 < strategy3 < strategy1$, 即策略 II 能为用户提供一个更为适宜的温度环境; 由图 (b) 可知, 在 48 小时内关于系统能耗的平均值, $strategy2 < strategy3 < strategy1$, 即策略 II 更加节能; 由图 (c) 可知, 在 48 小时内关于电费的平均值, $strategy1 < strategy2 < strategy3$, 即策略 I 能够使得电费总额最小, 但是三种策略的差异并

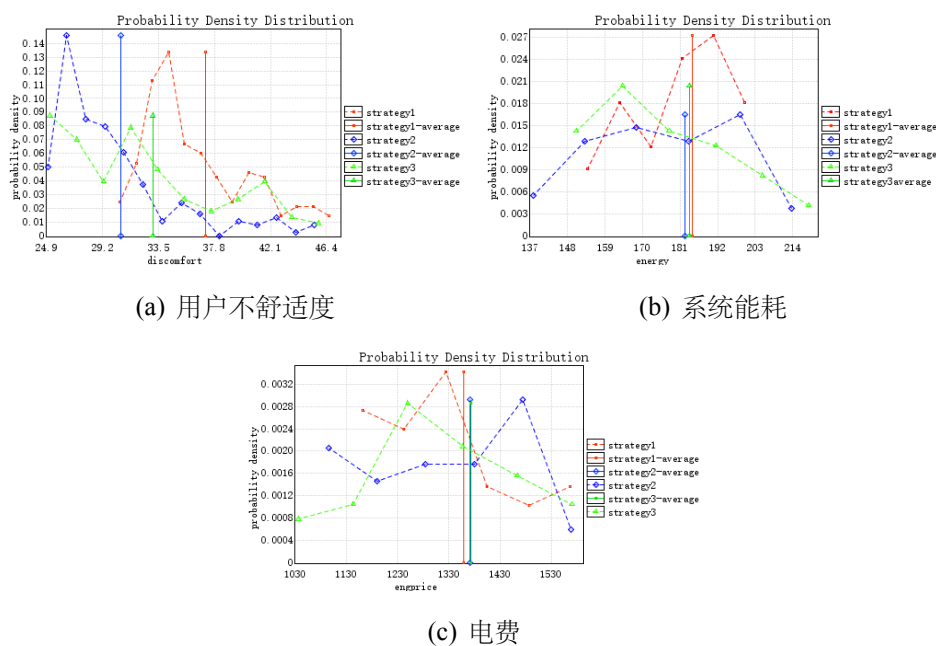


图 5.17: 三种策略对用户不舒适度、系统能耗、电费的影响

不明显；综合以上三点考虑可知，策略 *II* 在能够在使得系统能耗和电费较少的情况下，提供更好的用户舒适度，其性能最优。

不同用户行为模式：

为了分析不同的用户行为模式对系统变量的影响，我们将调度器策略固定为 *strategy1*，在此配置下验证了三种用户行为模式对用户不舒适度、系统能耗和电费的影响，实验结果如图5.18所示。由图 (a) 可知，会议模式的用户不舒适度均值最低，工作/出差模式下的用户不舒适度均值最高，这是由于会议室的权重最高，调度器会优先维持会议室的温度，而工作/出差模式下用户的随机行为给调度器的智能控制带来了障碍；由图 (b) 可知系统能耗与用户的工作时间密切相关。在会议模式下，用户的工作时间为 8 小时，日常工作模式下用户的工作时间为 6 小时。对于工作/出差模式，用户的工作时间为 $4 + 4 \times 0.8 = 7.2$ 小时。图 (b) 所示与上述分析一致，会议模式下系统能耗最高，日常工作模式下系统能耗最低；由图 (c) 可知，关于电费总额，工作/出差模式 < 日常工作模式 < 会议模式，这是由于电费与能耗值密切相关，会议室的能耗速率最高，且下午召开会议时，实时电价最高。

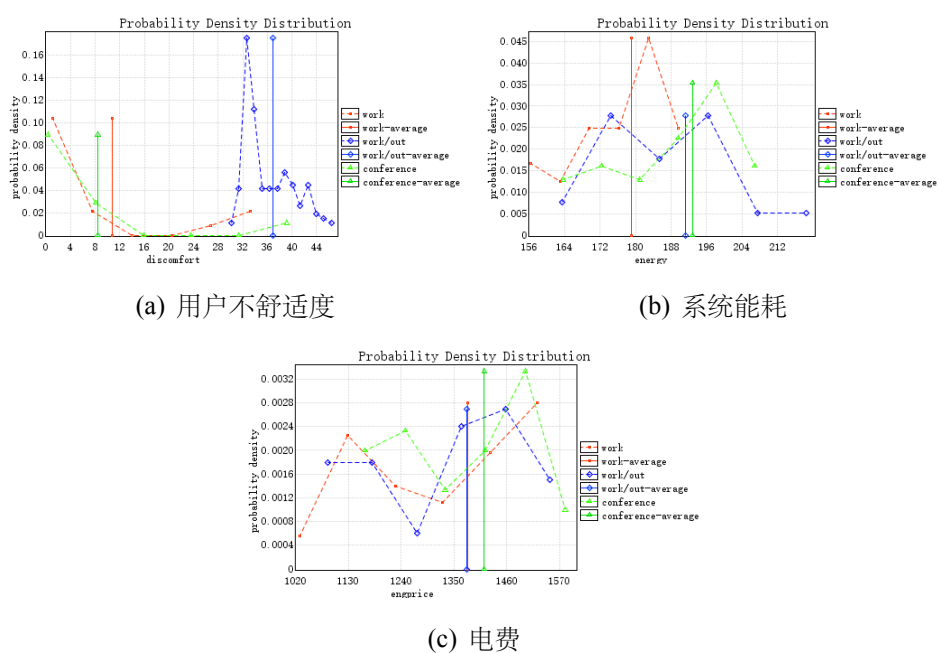


图 5.18: 三种用户行为模式对用户不舒适度、系统能耗、电费的影响

5.4 本章小结

智能建筑中的一个典型实例是智能温控系统, 本章基于一个温控系统的 **benchmark**, 设计了一个更符合实际情境的实验案例, 并将本文提出的智能建筑的能耗建模与分析方法进行了应用: 从系统的需求出发, 利用领域本体辅助构建扩展的 MARTE/UML 模型, 模型转换为 ESHA, 最终利用 UPPAAL-SMC 工具实现了系统能耗等性质的验证与分析, 探究了不同的调度策略和用户随机行为对系统能耗的影响。

第六章 总结与展望

6.1 总结

智能建筑是一种典型的能量信息物理融合系统，除了密切关注系统能耗之外，还具有混成和随机的特性。对于这一类复杂系统，使用模型驱动的系统开发方法可以有效控制系统的复杂度、提高系统质量和系统开发复用性。针对智能建筑的建模与验证问题，本文给出了利用领域本体指导建模系统的扩展 MARTE/UML 模型、模型转换为能耗随机混成自动机并实现模型验证与分析的集成方法。具体来说，本文的主要工作如下：

- 由于智能建筑等 CPES 的复杂性，很难明确系统中的概念结构以及概念间的关系，针对此问题，本文给出了智能建筑的领域本体，定义了系统中的基本术语、概念间的关系以及特定的约束和规则。利用智能建筑领域本体，可以辅助构建系统的初步设计模型；
- 现有的 MARTE/UML 模型在对 CPES 建模时，存在一定的局限性，为了解决这一问题，本文定义了 CPES 中广泛存在的两种随机行为，扩展了 MARTE 的元素，并给出了 UML 类图、顺序图和状态图的扩展定义；
- 虽然 MARTE/UML 模型能够实现系统的多视角建模，但由于其半形式化的特性，无法对模型进行验证。为此，本文扩展了随机混成自动机模型，使其能够显式建模系统中的能耗，并给出了扩展的 MARTE/UML 模型到能耗随机混成自动机的映射规则和转换算法，以实现模型自动转换。最终得到的系统能量随机混成自动机模型可以利用现有的统计模型检测算法进行系统的定

性、定量验证，从而分析系统的能耗等性质。基于我们研发的 Modana 平台和模型检测工具 UPPAAL-SMC，我们给出了本文所提的建模、分析方法的实现框架；

- 为了验证本文所提的智能建筑能耗建模与分析方法的可行性和有效性，我们以智能温控系统为例，实现了领域本体指导建模初步模型、模型设计和模型验证的全过程，并通过实验数据分析了系统能耗与不同的调度策略和用户行为模式的关系。

6.2 下一步工作

本文基于领域本体、MARTE/UML 和随机混成自动机理论，提出了智能建筑能耗建模与分析方法，并基于 Modana 平台和 UPPAAL-SMC 工具给出了所提方法的实现框架。关于利用智能建筑领域本体指导建模系统的初步模型，可考虑设计更为用户友好的模型设计界面，提供不同的设计模板以方便研究人员实现快速建模；关于智能建筑系统的能耗随机混成自动机的验证，可考虑将常见的验证属性设计为特定的属性模板，展现在工具中，以支持对于常见的系统能耗属性的验证、分析。此外，目前的 ESHA 模型是借助 UPPAAL-SMC 工具实现建模的，通过自定义特定的变量来建模系统的能耗，下一步可考虑在 Modana 中开发专属的 ESHA 模型建模模块，定义能量这种特殊的变量类型。

参考文献

- [1] 谭朋柳, 周乐, 冒苏敏. 面向医疗的 CPS 研究 [J]. 信息通信, 2017(1): 75–76.
- [2] LEE E A, SESHIA S A. Introduction to Embedded Systems: A Cyber-physical Systems Approach[M]. [S.l.]: Lee & Seshia, 2011.
- [3] der Meer VAN A A, PALENSKY P, HEUSSEN K, et al. Cyber-Physical Energy Systems Modeling, Test Specification, and Co-Simulation Based Testing[C] // The Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems. 2017.
- [4] STAMATESCU G, STAMATESCU I, ARGHIRA N, et al. Building Cyber-Physical Energy Systems[J]. CoRR, 2016, abs/1605.06903.
- [5] CHEN X, GU F, CHEN M, et al. Evaluating Energy Consumption for Cyber-Physical Energy System: An Environment Ontology-Based Approach[C] // IEEE Computer Software and Applications Conference. 2015: 5–14.
- [6] KLEISSL J, AGARWAL Y. Cyber-physical Energy Systems: Focus on Smart Buildings[C] // Design Automation Conference. 2010: 749–754.
- [7] OCK J, ISSA R R A, FLOOD I. Smart Building Energy Management Systems (BEMS) Simulation Conceptual Framework[C] // Winter Simulation Conference. 2017: 3237–3245.
- [8] JACOBSEN H A, KATZ R H, SCHMECK H, et al. Smart Buildings and Smart Grids[J]. Dagstuhl Reports, 2015, 5(2): 128–175.

- [9] LI W T, THIRUGNANAM K, TUSHAR W, et al. Optimizing Energy Consumption of Hot Water System in Buildings with Solar Thermal Systems[C] // Smartgreens 2017 : International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems. 2017.
- [10] ILIĆ M. From Hierarchical to Open Access Electric Power Systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(5): 1060–1084.
- [11] ILIC M D, XIE L, KHAN U A, et al. Modeling of Future Cyber – Physical Energy Systems for Distributed Sensing and Control[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, 2010, 40(4): 825–838.
- [12] ALEXANDRE D, LARSEN K G, MARIUS M, et al. An Evaluation Framework for Energy-aware Buildings Using Statistical Model Checking[J]. Science China, 2012, 55(12): 2694–2707.
- [13] 陈铭松, 顾璠, 徐思远, et al. 不确定环境下智能大厦空调系统调度策略评估 [J]. 软件学报, 2016, 27(03): 655–669.
- [14] MENDES N, OLIVEIRA G H C, ARAÚJO H X D. Building Thermal Performance Analysis by Using Matlab/Simulink[J], 2001 : 473–480.
- [15] 王向前, 张宝隆, 李慧宗. 本体研究综述 [J]. 情报杂志, 2016, 35(6): 163–170.
- [16] VET P E, SPEEL P H, MARS N J I. The Plinius Ontology of Ceramic Materials[C] // European Conference on Artificial Intelligence. 1994 : 8–12.
- [17] LÓPEZ M F, GÓMEZPÉREZ A, SIERRA J P, et al. Building a Chemical Ontology Using Methontology and the Ontology Design Environment[J]. IEEE Intelligent Systems and Their Applications, 1999, 14(1): 37–46.
- [18] CRANOR L F, CYTRON R K. Sensus: A Security-conscious Electronic Polling

- System for the Internet[C] // Thirtieth Hawaii International Conference on System Sciences. 2002 : 561 – 570 vol.3.
- [19] FELLBAUM C, MILLER G. WordNet:An Electronic Lexical Database[M]. [S.l.] : MIT Press, 1998.
- [20] BOOCH G. UML 用户指南 [M]. [S.l.] : 机械工业出版社, 2001.
- [21] MALLET F. UML Profile for MARTE: Time Model and CCSL[C] // ICTERI. 2014 : 289 – 294.
- [22] LOUATI N, BOUAZIZ R, DUVALLET C, et al. A UML/MARTE Profile for Real-Time Databases[C] // Ieee/acis International Conference on Computer and Information Science. 2012 : 663 – 668.
- [23] CLARKE E M, GRUMBERG O, PELED D A. Model Checking[M]. [S.l.] : Springer Berlin Heidelberg, 1997 : 54 – 56.
- [24] HU J, LYGEROS J, SASTRY S. Towards a Theory of Stochastic Hybrid Systems[C] // International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control. 2000 : 160 – 173.
- [25] DAVID A, LARSEN K G, LEGAY A, et al. Statistical Model Checking for Networks of Priced Timed Automata[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2011, 6919 : 80 – 96.
- [26] 程贝. 基于抽象和学习的统计模型检测研究 [D]. [S.l.] : 上海: 华东师范大学, 2016.
- [27] BEHRMANN G, DAVID A, LARSEN K G, et al. Developing UPPAAL over 15 years[J]. Software—practice and Experience, 2011, 41(2) : 133 – 142.

- [28] BULYCHEV P, DAVID A, LARSEN K G, et al. UPPAAL-SMC: Statistical Model Checking for Priced Timed Automata[J]. Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science, 2012, 85(Proc. QAPL 2012).
- [29] 王乐. 基于本体的垂直搜索引擎研究 [D]. [S.l.]: 西安: 西北大学, 2008.
- [30] NECHES R, FIKES R, FININ T, et al. Enabling Technology for Knowledge Sharing.[J]. Ai Magazine, 1991, 12(3): 36–56.
- [31] 张文秀, 朱庆华. 领域本体的构建方法研究 [J]. 图书与情报, 2011(1): 16–19.
- [32] LIBRARY W E. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 2(3): 56–57.
- [33] 陈小红, 尹斌, 金芝. 基于问题框架的需求建模: 一种本体制导的方法 [J]. 软件学报, 2011, 22(2): 177–194.
- [34] SAIDA R, KACEM Y H, BENSALAH M S, et al. A UML/MARTE Extension for Designing Energy Harvesting in Wireless Sensor Networks[M]. [S.l.]: Springer International Publishing, 2016.
- [35] YAO L, LIU J, ZHANG Y, et al. Hybrid MARTE[C] // Software Engineering Conference. 2016: 174–181.
- [36] HOARE C A R. Communicating Sequential Processes[M]. [S.l.]: Prentice Hall International, 1985: 666–677.
- [37] CHENG B, WANG X, LIU J, et al. Modana: An Integrated Framework for Modeling and Analysis of Energy-Aware CPSs[C] // 39th IEEE Annual Computer Software and Applications Conference. July 2015, Taichung, Taiwan.
- [38] 杜德慧, 咎慧, 姜凯强, et al. 一种面向 CPS 的自适应统计模型检测方法 [J]. 软件学报, 2017, 28(5): 1128–1143.

- [39] HENZINGER T A. The Theory of Hybrid Automata[C] // 11th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science. July 1996, New Jersey, USA.
- [40] TRYBULEC M. Labelled State Transition Systems[J]. Formalized Mathematics, 2009, 17(2): 163 – 171.
- [41] DU D, HUANG P, JIANG K, et al. MARTE/pCCSL: Modeling and Refining Stochastic Behaviors of CPSs with Probabilistic Logical Clocks[J], 2016: 111 – 133.
- [42] 彭大天. 基于 UML 和 UPPAAL 的 FAO 系统典型运营场景的建模与验证 [D]. [S.l.]: 北京: 北京交通大学, 2013.
- [43] KWIATKOWSKA M, NORMAN G, PARKER D. PRISM: Probabilistic Symbolic Model Checker[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2002, 2324: 200 – 204.
- [44] ELMQVIST H. Modelica —A Unified Object-oriented Language for Physical Systems Modeling[J]. Simulation Practice and Theory, 1997, 5(6): p32.
- [45] BLOCHWITZ T, OTTER M, ÅKESSON J, et al. Functional Mockup Interface 2.0: The Standard for Tool Independent Exchange of Simulation Models[C] // International Modelica Conference. 2012: 105 – 114.
- [46] 施仁杰. 马尔科夫链基础及其应用 [M]. [S.l.]: 西安电子科技大学出版社, 1992.
- [47] FEHNER A, IVANČIĆ F. Benchmarks for Hybrid Systems Verification[J], 2004, 2993: 326 – 341.
- [48] CARRIER CORPORATION. Handbook of Air Conditioning System Design[M]. [S.l.]: McGraw-Hill Book Co, 1965.
- [49] 刘经浩, 贺蓉, 李仁发, et al. 一种基于实时电价的 HEMS 家电最优调度方法 [J]. 计算机应用研究, 2015, 32(1): 132 – 137.

致 谢

在此论文完成之际，我首先要感谢我的导师杜德慧。她严肃的科学态度，严谨的治学精神以及精益求精的工作作风深深地感染和激励着我。从课题的选择到项目的最终完成，杜老师都始终给予我细心的指导和不懈的支持。两年来，她不仅在学业上给我以精心指导，同时还在思想、生活上给我以无微不至的关怀与照顾，在此谨向杜老师致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

感谢在研究生学习期间给我诸多教诲和帮助的软件学院的各位老师和同学、以及和我一起生活两年的室友，你们的执着、勤奋、以及对生活的态度，值得我学习。特别的，我要感谢辅导员张炜帆对我思想以及生活上的帮助，给我带来了莫大的帮助。

最后感谢我的家人，你们不仅给我经济上的支持，同时还在我成长道路上无私地给予莫大支持与鼓励，让我独立地选择自己的人生道路。

二〇一七年十月

在学期间所取得的科研成果

■ 已完成学术成果

- [1] 杜德慧, **咎慧**, 姜凯强, 程贝. 一种面向 CPS 的自适应统计模型检测方法 [J]. 软件学报, 2017, 28(5): 1128-1143. (导师一作)
- [2] Kaiqiang Jiang, Ping Huang, **Hui Zan**, Dehui Du. AL-SMC: Optimizing Statistical Model Checking by Automatic Abstraction and Learning[J]. International Journal of Software & Informatics, 2016, 10(4).
- [3] 软件著作权: 基于抽象和学习的统计模型验证器软件 V1.0. 登记号: 2017SR420485.
- [4] 国家专利: 基于抽象和学习的分布式统计模型检测方法. 专利号: 201710506978.9.

■ 参与的科研课题

- [1] 信息物理融合系统的随机行为建模与验证方法研究 (国家自然科学基金面上项目, 61472140)
- [2] 基于统计模型检测的信息物理融合系统的验证方法研究 (上海市自然科学基金项目, 14ZR1412500)