

不确定环境下智能大厦空调系统调度策略评估*

陈铭松, 顾 璠, 徐思远, 陈小红



(上海市高可信计算重点实验室(华东师范大学), 上海 200062)

通讯作者: 陈小红, E-mail: xhchen@sei.ecnu.edu.cn

摘要: 近年来,智能大厦的概念在国内外受到了高度的关注.相比于传统的建筑,智能大厦更加节能、舒适、易维护,已成为未来建筑的发展趋势.作为智能大厦空调通风系统的关键部分,空调系统及其调度策略决定了大厦整体的节能效果以及大厦中用户的舒适度.然而,由于智能大厦所处的环境具有许多不确定因素,极大地增加了空调系统调度策略设计与评估的复杂程度.因此,如何设计与评估不确定环境下空调系统的调度策略成为了智能大厦设计者面临的一大挑战.已有的方法主要针对智能大厦空调系统进行能耗与性能等方面的分析,但尚未有方法针对调度策略本身进行分析与评估.提出一种基于价格时间自动机的调度策略评估框架,支持对不确定环境下的智能大厦进行精确建模与定量评估.该框架使用 UPPAAL-SMC 作为属性查询引擎对模型进行随机模拟运行,根据模拟结果对不同调度策略下大厦的能耗及用户的舒适度进行定量分析.实验结果表明,该方法能够有效地帮助设计者进行策略的制定和选取.

关键词: 不确定环境;智能大厦;价格时间自动机;策略评估

中图法分类号: TP311

中文引用格式: 陈铭松,顾璠,徐思远,陈小红.不确定环境下智能大厦空调系统调度策略评估.软件学报,2016,27(3):655-669.
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/4987.htm>

英文引用格式: Chen MS, Gu F, Xu SY, Chen XH. Formal evaluation of scheduling strategies for smart building air-conditioning systems under uncertain environment. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016,27(3):655-669 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4987.htm>

Formal Evaluation of Scheduling Strategies for Smart Building Air-Conditioning Systems under Uncertain Environment

CHEN Ming-Song, GU Fan, XU Si-Yuan, CHEN Xiao-Hong

(Shanghai Key Laboratory of Trustworthy Computing (East China Normal University), Shanghai 200062, China)

Abstract: In recent years people have witnessed an increased worldwide attention to the concept of smart buildings. Compared with traditional counterpart, smart buildings are more energy efficient, comfortable and maintainable. Hence, smart buildings are becoming the mainstream of future building construction. As a key part of smart building ventilation systems, air conditioners highly impact the overall energy consumption of smart buildings as well as the experience of their occupants. Therefore, how to design and evaluate feasible scheduling strategies of air conditioning systems becomes a major challenge in the design of smart buildings. Especially when many uncertain factors caused by physical environment are involved, the complexity of strategy evaluation increases drastically. Although existing approaches allow the evaluation of smart buildings from the perspectives of energy consumption and performance, few of them consider the evaluation of the scheduling strategies themselves. Based on priced timed automata, this paper proposes an efficient

* 基金项目: 国家自然科学基金(91418203, 61202103, 61202104); 上海市教委创新项目(14ZZ047); 上海市知识服务平台(ZF1213)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (NSFC) (91418203, 61202103, 61202104); Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (14ZZ047); Shanghai Knowledge Service Platform (ZF1213)

收稿时间: 2015-07-28; 修改时间: 2015-10-20; 采用时间: 2015-11-27; jos 在线出版时间: 2016-01-05

CNKI 网络优先出版: 2016-01-05 16:40:00, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20160105.1640.013.html>

framework that enables accurate modeling and evaluation of scheduling strategies of smart building air-conditioning systems with uncertain environment. This framework utilizes the statistical model checker UPPAAL-SMC as the engine to quantitatively analyze user-specified performance queries in the form of properties. Based on the underlying random simulation runs monitored by UPPAAL-SMC, the framework can automatically report the quantitative analysis results of energy consumption and user satisfaction under uncertain environment. Experimental results show that the proposed approach can effectively help smart building designers to make their decisions in the selection and optimization of scheduling strategies.

Key words: uncertain environment; smart building; priced timed automata; strategy evaluation

智能大厦作为智能电网(smart grid)技术^[1]的重要组成部分逐渐在国内外兴起.智能大厦依赖于现代建筑科技、计算机技术、控制技术以及通信技术的发展,能够根据不断变化的内外部环境进行调整,内部系统高度集成,资源管理更加高效,同时也更加节能舒适,是未来建筑的发展趋势.在智能大厦的内部系统中,楼宇自动化系统负责为用户提供健康舒适的使用环境,同时保证大厦的经济运行和智能化管理,是智能大厦的核心支柱系统.作为楼宇自动化系统的子系统,除了使用环保的建筑材料以及先进的设备之外,空调系统通过对大厦内外环境中变化的温湿度进行监测并根据适当的策略合理调度空调机组及通风设备,在保证用户舒适度的前提下最大限度地降低智能大厦的能耗.因此,调度策略在智能大厦的空调系统中占有十分重要的地位.

在理想条件下,人们对控制系统中的调度策略进行分析评估时通常会遇到难以定量分析、评价方法不够准确等问题.而物理世界存在固有的动态性,因而智能大厦所处环境的这种不确定性极大地增加了调度策略的评估难度,目前也缺少可靠有效的方法.在设计系统时,如何考虑不确定环境对智能大厦的影响,制定出合理的调度策略以满足智能大厦在节能和舒适度方面的需求,是空调系统设计者面临的一大挑战.

现有的评估方法更多的是侧重在系统的能耗和性能等方面.比如,David 等人^[1]提出的一种对智能大厦的能耗评估框架,我们以前工作^[2]提出的信息物理融合能源系统的能耗评估,以及 Bouyer^[3]等人对实时系统的性能进行的定量的分析评估.但是这些方法都没有脱离系统针对调度策略进行定量评估,尤其是在不确定环境下.针对不确定环境中的系统设计评估,我们的前期工作^[2,4-6]提出使用基于价格时间自动机^[7](priced timed automata,简称 PTA)进行定量地评估,但也依然存在没有脱离系统对调度策略进行评估的问题.

因此,基于前期工作,本文提出了一种基于价格时间自动机的调度策略评估方法.该方法考虑了智能大厦所处环境中的不确定因素,对不确定环境建模,并且独立出调度策略和控制器建模,从而构建系统模型.通过对模型进行随机模拟运行,可以得到空调系统采用不同调度策略时智能大厦的能耗和舒适度数据,便于系统设计者进行定量分析评估,选取优秀策略或对策略进行修改.

本文第 1 节对价格时间自动机理论及支持工具 UPPAAL-SMC 进行介绍.第 2 节分析智能大厦所处的不确定环境.第 3 节阐述智能大厦空调系统的调度策略评估框架.第 4 节对智能大厦空调系统进行详细的建模.第 5 节通过一个具体的实验说明本文方法的有效性.第 6 节比较相关工作并对全文进行总结.

1 价格时间自动机及统计模型检验工具 UPPAAL-SMC

与传统的时间自动机^[8,9]不同,价格时间自动机(priced timed automata,简称 PTA)^[7,10]中的时钟能够以不同速率(clock rate)进行变化.假设 X 是时钟变量的集合, X 上时钟值的映射关系可以由 $v: X \rightarrow R_{\geq 0}$ 表示,其中 $R_{\geq 0}$ 是非负实数集.我们将时钟集合 X 上值的集合记作 $R_{\geq 0}^X$. X 中时钟对应的卫式(guard)采用的是以多个格式为 $x \sim n$ 的公式的合取形式表示,其中 $x \in X, n \in R_{\geq 0}, \sim \in \{<, \leq\} (\sim \in \{>, \geq\})$. 我们用 $Up(X)$ 和 $Lo(X)$ 分别表示 X 对应的上界卫式和下界卫式的集合,用 $v \models g$ 表示时钟值 v 满足卫式 g .令 Σ_i 为输入动作集, Σ_o 为输出动作集, Σ_i 与 Σ_o 互斥^[7].

为了支持不确定环境下智能大厦空调系统调度策略的定量评估,我们扩展了传统 PTA 的语法与语义,使其支持复杂时钟速率的建模,即时钟的速率可以由时钟的函数表示.本文采用 PTA 的形式化定义如下.

定义 1(价格时间自动机). 价格时间自动机是八元组 $(L, l_0, X, \tau, \Sigma, E, R, I)$, 其中, L 是状态(location)集合; $l_0 \in L$ 为初始状态; X 为有限的时钟集合; $\tau \in X$ 为系统时钟,其速率为 1 且在运行过程中不会被重置; Σ 可以被划分为互斥的输入动作集 (Σ_i) 和输出动作集 (Σ_o) ; $E \subseteq L \times Lo(X) \times \Sigma \times 2^X \times L$ 代表有限的转换集;令 F 为系统时

钟的函数集合, $R: L \rightarrow F^X$ 给每一个状态(location)指定一个速率函数向量,用以表示每个时钟的值在不同状态的变化; $I: L \rightarrow Up(X)$ 定义了每个状态的不变式.

不同 PTA 之间可以通过广播信道和共享变量进行同步^[10],组成价格时间自动机网络(networks of priced timed automata,简称 NPTA)^[7,11].NPTA 可以看作是一个时间标记转移系统^[7],该系统的状态为 $(l, v) \in L \times R_{\geq 0}^X$, 其中 $v \models I(l)$.假设 $Y \subseteq X$,我们用 $v[Y]$ 表示时钟集合 Y 的重置操作,当 $v[Y]$ 发生时,如果 $x \in Y, v(x)$ 被重置为 0,否则 $v(x)$ 值不变.NPTA 的转换有两种形式:(1) 基于延时的转换,对于延时 $d \in R_{\geq 0}$, 状态转移可以表示为 $(l, v) \xrightarrow{d} (l, v')$, 其中状态不变,时钟赋值变为 $v' = v + \int_{v(\tau)}^{v(\tau)+d} R(l) \cdot d\tau$, 这里 $v(\tau)$ 表示进入状态 l 的系统时间;(2) 基于动作的转换,如果存在一个转换 (l, g, a, Y, l') 使得 $(l, v) \xrightarrow{a} (l', v')$, 我们可得到 $v \models g, v' = v[Y]$.

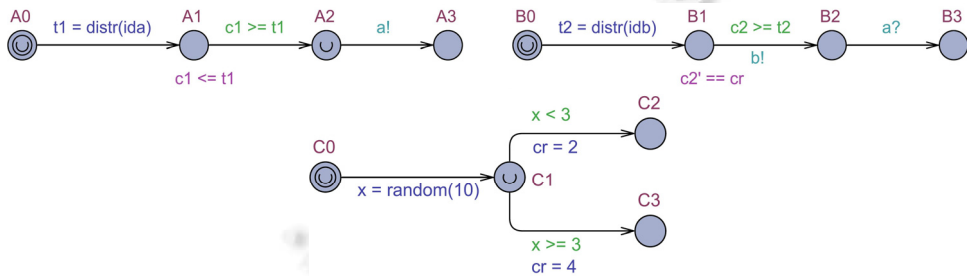


Fig.1 An NPTA instance (A|B|C)

图 1 一个 NPTA 实例(A|B|C)

图 1 为 NPTA 实例,由 A, B, C 这 3 个 PTA 组成. A 和 B 的 id 分别为 ida 和 idb ,分别包含 $A_0 \sim A_3, B_0 \sim B_3$ 这 4 个状态,其中, c_1, c_2 分别为 A, B 中的局部时钟, C 包含 $C_0 \sim C_3$ 这 3 个状态.图中带“U”的状态为 urgent 状态,这种状态不消耗时间.该 NPTA 实例中, C_0 不消耗时间跳转到 C_1 状态,同时调用随机函数生成 x 的值. C_1 状态同样立即跳转,若 $x < 3$ 则跳转到 C_2 ,否则跳转到 C_3 ,跳转到 C_2 和 C_3 的概率比例为 3:7. C_1 跳转的同时将设置变量 cr 的值,若跳转到 C_2 ,则 cr 被置为 2,若跳转到 C_3 ,则 cr 被赋值为 4.这种从 C_1 跳转到 C_2 或 C_3 状态的不确定行为使得该实例存在不确定性.假设 $t_1=3, t_2=4$.在 A_1 状态下, c_1 以默认速率进行变化,局部时钟限制为 $c_1 \leq t_1$,跳出该状态的条件为 $c_1 \geq t_1$;而 B_1 状态下, c_2 每个时间单位的变化量为 cr 的值,离开 B_2 状态的条件为 $c_2 \geq t_2$.这里 b 被定义为紧急广播信道,一旦 B_1 到 B_2 的边上的条件被满足, B_1 到 B_2 的跳转就立刻发生^[12].

根据 C 的跳转的结果,该 NPTA 存在不唯一的状态迁移序列,即当最终跳转到 C_2 时,图 1 中 NPTA 的状态迁移序列为

$$\left. \begin{aligned} &((A_0, B_0, C_0), [c_1 = 0, c_2 = 0]) \xrightarrow{0} ((A_1, B_1, C_2), [c_1 = 0, c_2 = 0]) \xrightarrow{2} ((A_1, B_2, C_2), [c_1 = 2, c_2 = 4]) \\ &\xrightarrow{1} ((A_2, B_2, C_2), [c_1 = 3, c_2 = 5]) \xrightarrow{a!} ((A_3, B_3, C_2), [c_1 = 3, c_2 = 5]) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

在序列(1)中, $((A_0, B_0, C_0), [c_1 = 0, c_2 = 0])$ 即为该 NPTA 实例的一个状态,而 $((A_2, B_2, C_2), [c_1 = 3, c_2 = 5]) \xrightarrow{a!} ((A_3, B_3, C_2), [c_1 = 3, c_2 = 5])$ 为一个基于动作的转换.当最终跳转到 C_2 时,该 NPTA 的状态转移序列为

$$\left. \begin{aligned} &((A_0, B_0, C_0), [c_1 = 0, c_2 = 0]) \xrightarrow{0} ((A_1, B_1, C_3), [c_1 = 0, c_2 = 0]) \xrightarrow{1} ((A_1, B_2, C_3), [c_1 = 1, c_2 = 4]) \\ &\xrightarrow{2} ((A_2, B_2, C_3), [c_1 = 3, c_2 = 6]) \xrightarrow{a!} ((A_3, B_3, C_3), [c_1 = 3, c_2 = 6]) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

组合状态 (A_3, B_3, C_2) 及 (A_3, B_3, C_3) 在 3 个时间单位内可达.

从上述分析可以看出,PTA 中支持两种方式的不确定性建模.一种是状态上的跳转延迟,如状态跳转延迟服从均匀分布、指数分布和正态分布等.图 1 的 A 和 B 中包含一个正态分布函数 $distr()$, A, B 两个 PTA 从 urgent 状态 A_0, B_0 分别立即跳转到 A_1, B_1 ,并调用 $distr()$ 函数生成符合正态分布的 t_1, t_2 .随机值 t_1, t_2 决定了 A_0, B_0 状态的跳转延迟.第 2 种方式是状态间迁移的概率.图 1 中 C 的状态跳转体现了这种特性, C_1 跳转到 C_2 的概率为 30%, 跳转到 C_3 的概率为 70%.

为了提供方便使用的接口以实现复杂随机系统的定量分析,支持对 NPTA 进行随机模拟运行并生成属性

查询结果,David 等人对 UPPAAL^[13]进行了随机性和统计模型检验^[14]方面的扩展,开发了 UPPAAL-SMC^[11,15]. 为便于对系统进行定量分析以评估调度策略^[4],本文拟使用 UPPAAL-SMC 作为支持工具进行建模,并使用加权度量时序逻辑(weighted metric temporal logic,简称 WMTL)表示 NPTA 的查询属性^[11],以此作为查询语言描述系统设计者提出的设计约束,支持调度策略的分析评估.

2 不确定环境分析

遵循我们以前的工作^[16],本文将软件的环境定义为与该软件交互的实体集合.在智能大厦的空调系统中,控制器就是我们要开发的软件.智能大厦内部有许多房间,用户在这些房间中活动.每个房间都有各自的用户进入房间上班或者下班离开房间.根据房间内用户的特征,空调系统通过控制器对每个房间进行温控配置.当用户进入房间时,系统控制器根据调度策略选择房间,控制加热器进行供暖以达到房间内用户所要求的温度;当用户离开房间后,控制器控制加热器对该房间停止供暖.空调系统设备为房间调节温度,大厦内部设有房间温度监测器,用于监测各个房间的温度.空调系统的控制器将与外界天气环境以及大厦内部的房间、用户、空调设备、温度监测器等实体进行交互.根据上述描述,我们得到空调系统的上下文图,如图 2 所示.

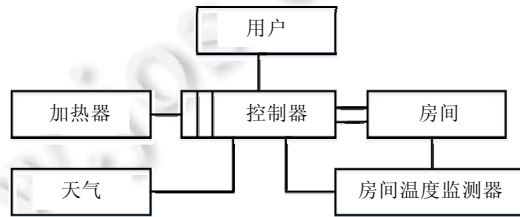


Fig.2 Context diagram of air-conditioning system
图 2 空调系统的上下文图

大厦空调系统环境的这些实体中,很多实体本身的属性总是处于不断变化的状态,难以准确描述,我们称其为环境的不确定性.具体来说,智能大厦所处环境的不确定性主要体现在:

(1) 天气实体的室外温度

智能大厦内部与外界环境通过大厦外墙进行热传递,因此外界气温的变化会影响大厦内部的温度.而自然天气本身具有不确定性,在不同季节(如夏季或冬季)或不同天气下(如晴天或雨天)下,大厦外界的平均气温不同;而在一天之中,外界环境的温度也随着时间推移按照一定规律不断变化,服从温度变化函数 $T_{outside}(t) \rightarrow DIST_{outside}$.

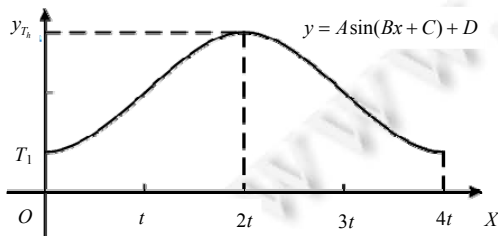


Fig.3 The change of ambient temperature
图 3 环境温度变化

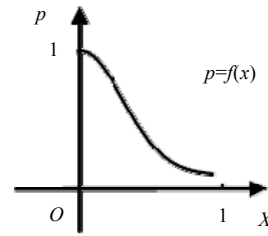


Fig.4 Output power distribution of device
图 4 设备的输出功率分布

图 3 展示了采用正弦函数模拟不同天气情况下室外环境温度的变化情况,从图中可见一天中 0 时刻温度最低,2t 时刻温度最高.图中 T_1 为一天中的最低温度, T_n 为最高温度.

(2) 加热器实体的功率输出

由于交流电本身具有不稳定性并且空调设备进行调度切换时会发生负载变化,空调系统的设备在工作时,

实际功率总是与额定功率存在偏差,服从功率分布 $PD: P_{heater}(t) \rightarrow DIST_{power}$,因而不能提供恒定的功率输出.空调设备的不确定性使得各个房间在加热时的效果存在差异,而这些微小的差异经过长时间的积累也会影响到智能大厦整体的能量消耗.

对于设备的不确定性,本文按标准正态分布规律模拟设备的实际功率输出.通过使用 Box-Muller 转换算法^[5,6],我们利用 UPPAAL-SMC 的内建 random()函数(均匀分布),由(0,1]间的随机数生成了其正态分布,结果如图4所示.

(3) 用户实体的行为

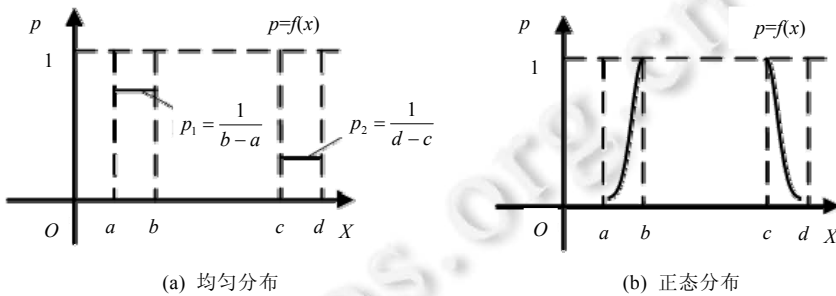


Fig.5 Distribution of users' commuter time

图5 用户上下班的时间分布

作为智能大厦的服务对象,大厦中的用户行为具有最大的不确定性.例如,用户在大厦中的分布会影响系统的调度决策,即用户多的房间在调度时需要分配更多的资源.本文考虑的是用户上下班进出大厦内房间的时间的不确定性.受天气条件、交通状况以及用户身体条件、个人习惯等因素的影响,用户每天上下班进出房间的时间并不固定.假设用户每天上午 b 时刻上班,在 $a \sim b$ 间的某一时刻进入房间;下午 c 时下班,在 $c \sim d$ 间的某一时刻离开房间.

本文分别按照均匀分布和正态分布模拟用户到达房间和离开房间时间的概率分布.用户行为呈均匀分布时,其概率分布如图5(a)所示,到达房间概率 $p_1 = \frac{1}{b-a}$,离开房间的概率 $p_2 = \frac{1}{d-c}$;当用户行为呈正态分布时,其概率分布如图5(b)所示,每天上午越接近 b 时刻,用户进入房间上班的概率越高,而下午离 c 时刻越近,用户越可能下班离开房间.

3 基于价格时间自动机的策略评估框架

在不确定性环境分析的基础上,我们设计了智能大厦空调系统调度策略评估框架,如图6所示.首先,对环境进行环境建模、控制器建模以及调度策略建模.之后我们可以得到该空调系统的 NPTA 模板,对于相同的软件环境该 NPTA 模板通用.其中,环境建模包括智能大厦所处的不确定环境及可配置环境,根据第2节的分析,不确定环境具体为室外天气、设备功率输出以及用户的行为,可配置环境为房间实体及房间温度监测器模型实体.控制器建模设定了系统中控制器的工作方式,控制器中写有房间的调度策略,系统设计者可以自行设计,调度策略建模即对写入的策略进行建模.后台参数配置包括不确定环境参数及可配置参数.其中不确定环境参数主要为可配置的概率分布类型,而可配置参数指房间温度需求、加热器功率输出等随着具体情境的变化而修改但较为固定的参数.在生成 NPTA 模板并配置好相应参数后,系统建模完成.

接下来需要将设计者的需求即设计约束转化为具体的查询属性.在得到查询属性后,使用 UPPAAL-SMC 作为查询引擎即可对所建的模型进行随机模拟运行.运行生成的结果数据可以被用于绘制直观的图形和表格,以进行定量分析和策略评估.

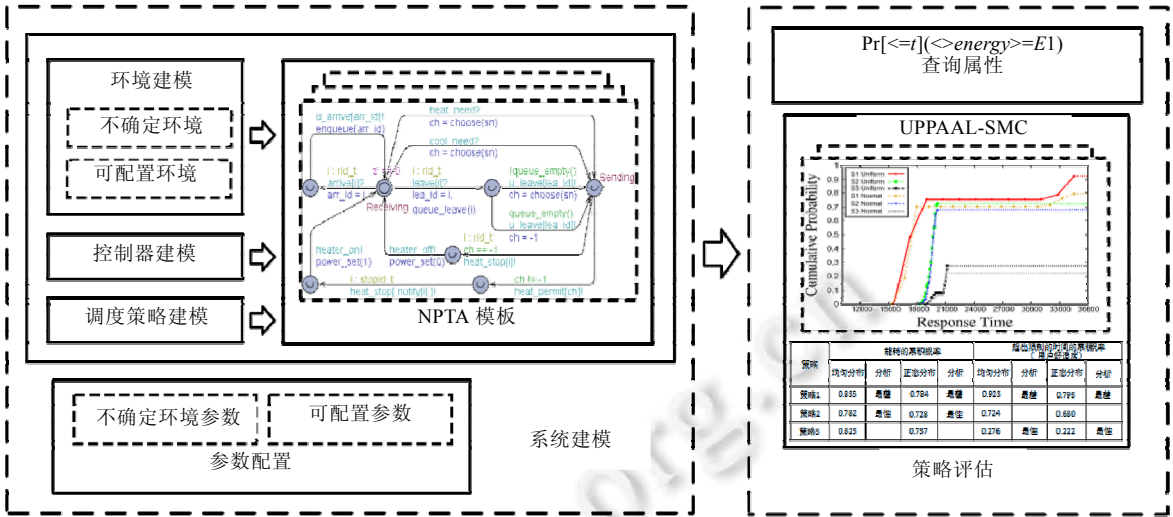


Fig.6 Framework for strategy evaluation

图 6 策略评估框架

3.1 系统建模

对空调系统的建模主要包括环境建模、控制器建模、调度策略建模以及后台的参数配置.对于空调系统所处的不确定环境来说,大厦外的气温在一天之中总在不断变化,并且这种变化存在规律,可由相关函数(如正弦函数)进行模拟,而根据天气的不同,气温的整体水平也有浮动.由于负载变化等原因,加热器的输出功率并不能一直维持在额定功率,而是会与额定功率存在一定的偏差,这种现象可以使用正态分布函数进行模拟.大厦中的用户行为也存在不确定性,不同用户每天上下班的时间不相同,即使是同一个用户,也会由于实际情况使得每天进出大厦房间的时间不一致.对于这种情况,本文设置了两种概率分布对用户行为进行模拟.

除了不确定环境外,本文还对房间实体及房间温度监视器实体进行建模.房间实体模拟了各个房间内温度状态的变化,房间会根据当前温度向控制器发出不同请求,要求提高或降低自身温度.房间温度监视器实体则对各个房间的温度进行监测并统计超出房间温度需求的时间.

空调系统的控制器为要设计的软件,它与软件的环境即智能大厦的环境进行交互.控制器有许多接口,可以接收来自于各个实体的控制流消息或从实体中读取数据流信息.在做出决策之后,控制器会向相应的实体发送控制消息,进行房间的调度及加热器的开关控制.

调度策略作为配置被写入到控制器中,它独立于控制器,这是因为控制器建模仅仅规定了控制器的行为模式,具体的调度策略决定了什么时候控制器采取这些行为动作.空调系统的调度策略可以根据系统设计者的需求进行设计、定制,以控制器读取到的实体数据为依据进行决策.

我们将环境中的每个实体、控制器分别建模成 PTA 模板,这些 PTA 之间通过同步形成系统模型,其结果是生成的 NPTA 模板(具体过程及结果见第 4 节),该模板对于相同的软件环境都是通用的.除 NPTA 模板以外还需要进行参数配置.在后台的参数配置中,不确定环境参数主要指的是天气模型、用户模型以及加热器模型中所设置的概率分布函数,不同的概率分布函数的设置会影响环境的不确定性.可配置参数指的是根据具体情况所配置的较为固定的参数,如房间的温度需求和加热器的输出功率等.

3.2 策略评估

为了评估上述调度策略在节约能耗和提供智能大厦内用户舒适环境方面的表现,本文使用 UPPAAL-SMC 作为查询引擎对使用不同策略的 NPTA 模型进行属性查询.能耗和用户舒适度的设计约束被转化为查询属性.本文中用的查询语句有:

Pr[<= t]((< energy >= E)

$$\Pr[\leq t](\langle range_{out}[rid] \rangle \geq t_{out}) \tag{4}$$

其中,energy 为消耗的能量,range_{out}[rid]为超出 rid 号房间要求温度的时间,t 为时间约束,E 为能耗约束,t_{out} 为超出温度限制的时间约束.公式(3)所示查询属性的具体含义为在给定的时间约束 t 中,该智能大厦能耗达到 E 的概率,而公式(4)含义为在时间约束 t 以内,房间 rid 超出温度限制的时间达到 t_{out} 的概率.根据查询属性,UPPAAL-SMC 对 NPTA 模型进行大量的随机模拟运行,最后生成运行结果数据.根据结果数据可以进行定量分析,同时绘制出直观的图表,便于系统设计者对空调系统的调度策略进行选取或改进.

4 智能大厦空调系统模板建模

本文考虑智能大厦所处的不确定环境,对智能大厦的空调系统的模板进行建模.大厦房间与外界环境存在热传递,同时房间内的温度也受相邻房间的影响.为了描述这一复杂的物理情景,我们引入了 RC 模型^[17,18]对该温度系统进行建模.需要注意的是,该模型描述的是理想情况下的多房间温度系统,并未考虑不确定因素,而本文将该温度系统模型与上文所分析的智能大厦所处环境的不确定因素进行了融合,对智能大厦建模.

智能大厦的房间集合为 ROOM = {r₀, r₁, ..., r_{n-1}}, 其中房间数量为 n,模型中的每个房间使用 rid 进行区分.根据该 RC 模型,经过推导可以得到各个房间内的温度变化遵循:

$$T'_i = \frac{1}{C_i} \left[p - \left(\frac{T_i - T_{i-1}}{R_{i,i-1}} + \frac{T_i - T_{i+1}}{R_{i,i+1}} \right) \right] \tag{5}$$

其中,T_i 为 i 号房间内的温度,C_i 为 i 号房间的热容(thermal capacitance),R_{i,i+1} 为 i 号房间与 i+1 号房间之间的热阻(thermal resistance),P 为加热器的功率.在模型的后台配置中,外界环境温度 T_{amb} 通过 T₋₁ 及 T_n 被编入温度矩阵中,且 T₋₁=T_n=T_{amb}.

每个房间都有各自的用户进入房间上班或者下班离开房间.由于房间内用户特征不同,因此空调系统对每个房间的温控配置不同.当用户进入房间时,系统控制器根据调度策略选择房间,控制加热器进行供暖以达到房间内用户所要求的温度;当用户离开房间后,控制器控制加热器对该房间停止供暖.

根据第 2 节的分析,智能大厦空调系统模型包含 6 个部分:用户(user)、天气(weather)、房间(room)、加热器(heater)、房间温度监测器(room temperature monitor)以及控制器(controller),每个部分建模成一个 PTA,PTA 间通过广播信道进行通信,并利用共享变量进行数据获取,形成智能大厦空调系统 NPTA,我们将它们之间的通信关系建模,得到的智能大厦空调系统结构模型如图 7 所示.

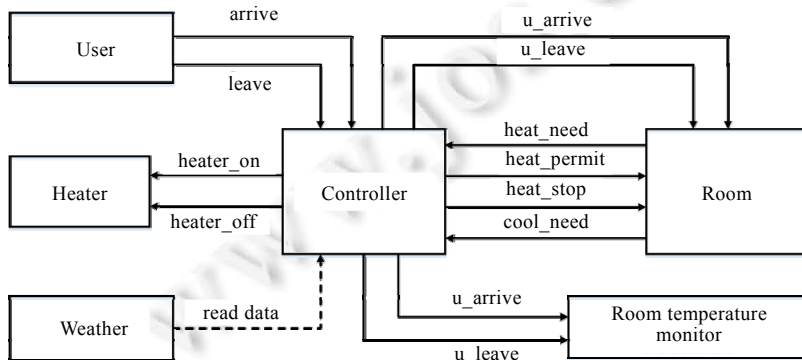


Fig.7 Model structure

图 7 模型结构

图中实线箭头表示广播信道,虚线箭头表示共享变量的读取.具体的,天气 PTA 的温度数据被设置为共享变量被控制器 PTA 读取(read data),控制器 PTA 根据用户 PTA 通过广播信道发送来的状态消息(arrive 或 leave)调整房间队列,同时将用户 PTA 的状态(u_arrive 或 u_leave)通过广播信道通知各个房间 PTA 以及各个房间的温度监测器 PTA.房间 PTA 根据自身温度情况向控制器 PTA 发出加热请求(heat_need)或降温请求(cool_need),控

制器 PTA 根据具体策略进行调度后选择出适当的房间发送允许消息(heat_permit),同时通知其他房间不允许加热(heat_stop).若当前有房间正在加热,则控制器通知加热器工作(heat_on);若当前没有房间进行加热,则控制器通知加热器关闭(heat_off).

4.1 空调系统环境建模

4.1.1 用户模型(user)

每个房间中的用户对象对应于所处的房间,也使用变量 rid 进行区分.用户模型从 Start 开始,不消耗时间跳转到 Wait 状态,同时调用 u_init()函数将用户到达和离开房间的时间以及用户所在房间的设备信息进行初始化.传入函数的参数 u_mode 用于指定用户的行为模式.用户行为服从分布 $USER(t) \rightarrow DIST_{user}(u_mode)$,当 u_mode 值为 0 时用户行为呈均匀分布,u_mode 为 1 时用户行为呈正态分布.当用户在 a 时刻到 b 时刻间以指定模式的概率进入房间时,模型从 Wait 状态跳转到 Arrive 状态,同时发出 arrive[rid]消息,表明房间号为 rid 的房间有用户到达.当用户在 c 时刻~d 时刻间离开房间时,模型发出 leave[rid]消息并从 Arrive 状态进入 Leave 状态.图 8 即为得出的用户行为模型.

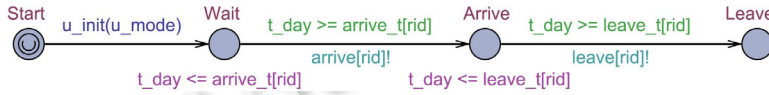


Fig.8 Model of user behavior

图 8 用户行为模型

4.1.2 天气模型(weather)

模型中带 U 的状态为 urgent 状态,这种状态不消耗时间,即 PTA 在该状态下不作停留,立刻跳转.该智能大厦模型中考虑的天气包括晴天和雨天两种.系统开始运行后,室外天气从 Init 状态立即跳转到 Tmp 状态并利用随机函数生成 x 的值,然后立即从 Tmp 状态根据 x 值的大小跳转到不同的天气即 Sunny 状态或 Rainy 状态,模型中的晴雨天比例为 7:3,晴天的概率为 70%,雨天的概率为 30%,跳转的同时设置这两种天气的初始温度.外界环境温度服从温度变化函数 $T_{outside}(t) \rightarrow DIST_{outside}$,即外界温度随时间变化服从分布 $dist_{outside}$.模型中采用正弦函数模拟一天的温度变化,具体为每天 0 点时温度最低,12 点温度最高,根据分析可以得到如图 9 所示的室外天气模型.后台配置中包含记录房间及室外温度的温度矩阵,矩阵元素为时钟类型.Sunny 状态和 Rainy 状态下标记的为局部时钟的变化率,由于外界温度按正弦曲线变化,因此外界温度变量 T_{-1} 及 T_n 的变化率为余弦函数, $T(-1, t) = T(n, t) = T_{outside}(t)$.

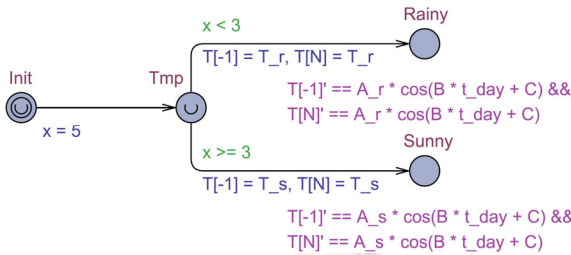


Fig.9 Model of outside weather

图 9 室外天气模型

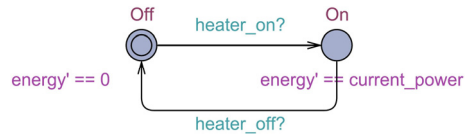


Fig.10 Model of heater

图 10 加热器模型

4.1.3 加热器模型(heater)

空调系统为大厦内的各个房间供暖.本文设计的空调加热器模型可以统计大厦各个房间的总能耗.加热器初始时处于 Off 状态,当接收到控制器发出的 heater_on 消息时跳转到 On 状态,根据当前加热器的实际功率 current_power 统计消耗的能量.当接收到控制器发出的 heater_off 消息时,加热器跳转到 Off 状态停止工作.加热器功率服从功率分布函数 $PD: P_{heater}(t) \rightarrow DIST_{power}$,即加热器的实时功率 $P_{heater}(t)$ 服从分布 $dist_{power}$.加热器消耗的能量由公式 $energy(t) = \int_0^t P_{heater}(t)dt$ 计算得出.具体的加热器模型如图 10 所示.

4.1.4 房间模型(room)

智能大厦中,每个房间根据房间内用户的特点有不同的温度配置,即温度上限和下限以及一个舒适温度需求.房间内温度变化遵循温度函数 $T: \{P_{heater}(t), T(r_{i-1}, t), T(r_{i+1}, t)\} \rightarrow T(r_i, t)$, 即房间 r_i 在 t 时刻的温度 $T(r_i, t)$ 受 $T(r_{i-1}, t), T(r_{i+1}, t)$ 以及 $P_{heater}(t)$ 的影响.

根据分析得出房间温度模型如图 11 所示.系统开始运行后,房间在接收到控制器发出的 $u_arrive[rid]$ 消息后从 Start 状态跳转到 Cooling 状态,同时将加热标志位 $need$ 置为 $true$,并将房间内温度初始化为与外界温度相等.当房间内温度低于该房间温度上限 $temp_upper$ 时,该房间向控制器每隔 2s 发出一次加热请求 $heat_need$,并将 $need$ 置为 $true$.当加热请求被控制器允许后,该房间接收到 $heat_permit$ 消息,从 Cooling 状态跳转到 Heating 状态,房间开始加热.当房间处于 Heating 状态时:若温度 $T[rid]$ 超过了其温度上限 $temp_upper$,则房间向控制器发出 $cool_need$ 消息要求停止加热,并将 $need$ 置为 $false$;若房间收到 $heat_stop$ 消息,则跳转到 Cooling 状态停止加热.在 Cooling 状态和 Heating 状态下,房间温度会根据相应的变化率公式而变化,具体见公式(6)、公式(7).

$$T_{cool} = -1/c[rid] \cdot ((T[rid] - T[rid - 1])/r[rid][rid - 1] + (T[rid] - T[rid + 1])/r[rid][rid + 1]) \quad (6)$$

$$T_{heat} = 1/c[rid] \cdot (power[rid][weather] - ((T[rid] - T[rid - 1])/r[rid][rid - 1] + (T[rid] - T[rid + 1])/r[rid][rid + 1])) \quad (7)$$

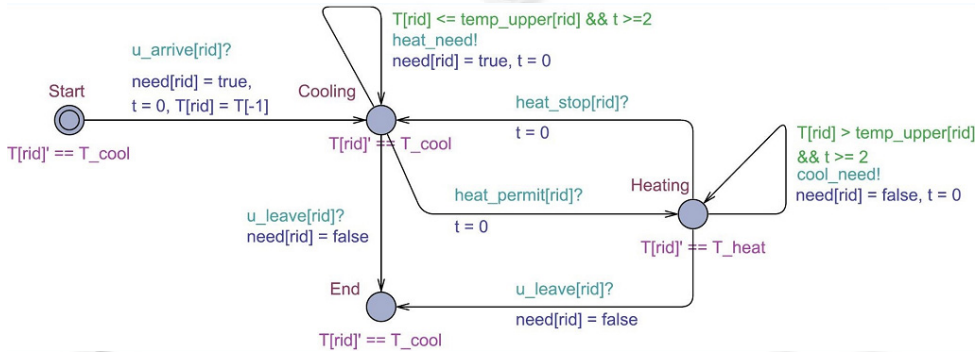


Fig.11 Model of room

图 11 房间模型

当房间内用户下班离开时,则该房间接收到控制器发出的 u_leave 消息,模型从 Cooling 或 Heating 状态跳转到 End 状态,同时将加热标志位 $need$ 设置为 $false$.

4.1.5 房间温度监测器模型(room temperature monitor)

大厦的每个房间对应一个温度监测器,监测器计时函数为 $Range_out: T(r_i, t) \rightarrow trange_out(r_i)$, 即根据房间温度 $T(r_i, t)$ 统计超出所要求温度范围的时间 $trange_out(r_i)$. 具体地,温度监测器模型用于统计各房间温度超出其要求的温度范围的时间,若某房间内的温度不在其需求的温度范围内,房间内用户会感觉“过冷”或“过热”,这种情况下用户的舒适度较差,因此房间温度监测器模型反映出房间内用户的舒适度.根据分析可得模型如图 12 所示.

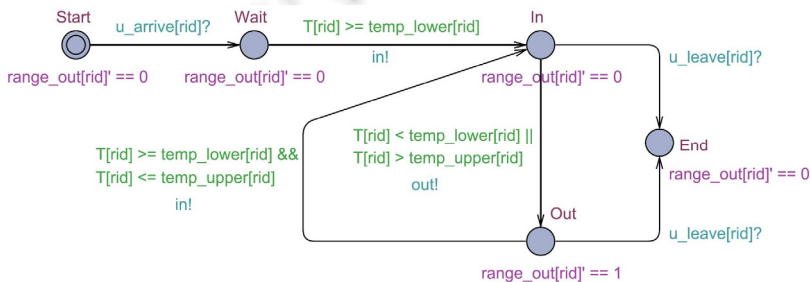


Fig.12 Model of room temperature monitor

图 12 房间温度监测器模型

模型中的 in 和 out 被定义为紧急广播信道,当这种信道所处边上的条件被满足时,跳转立刻发生.接收到

u_arrive 消息后,模型从 Start 状态跳转到 Wait 状态.当房间温度上升首次超过温度下限时,模型跳转到 In 状态,表明房间温度在所要求的范围之内.当房间温度变化低于温度下限 temp_lower 或超出温度上限 temp_upper 后,模型从 In 状态跳转到 Out 状态;当房间温度再次回到所要求的温度范围内时,模型从 Out 状态跳转到 In 状态.若温度监测器模型接收到控制器发出的消息 u_leave 则说明用户离开了房间,模型跳转到 End 状态停止工作.

4.2 空调系统控制器建模(controller)

控制器模型负责根据某种调度策略选择房间供暖,具体的策略由运行时使用策略号指定.控制器中包含一个由各个房间形成的优先级队列 $Q = \{q_i, q_j, \dots, q_k\}$. 控制器初始处于 Receiving 状态,在该状态下控制器可以接收各个模型发来的消息.当接收到用户模型发出的 arrive 消息时,控制器调用 enqueue()函数将该房间号加入到队列中,同时向其他模型广播 u_arrive 消息,通知用户到达.这里的队列是一个优先级队列,隐含了各个房间的优先级,同时也能根据房间是否在队列中说明该房间中是否有用户.当控制器接收到房间发出的加热请求 heat_need 或停止加热的 cool_need 请求后,会根据当前的策略号 sn 调用 choose()函数选择一个合适的房间(选择结果保存到变量 ch 中)进行加热,并跳转到 Sending 状态.或者当有用户下班离开房间时,控制器接收到用户模型发出的 leave 消息,先调用 queue_leave 函数将该房间号从队列中移除,再判断当前队列情况:若当前队列不为空,则调用 choose()函数选择房间;若队列为空,则将选择结果 ch 置-1.选择合适的待加热房间后,控制器向各个房间发出

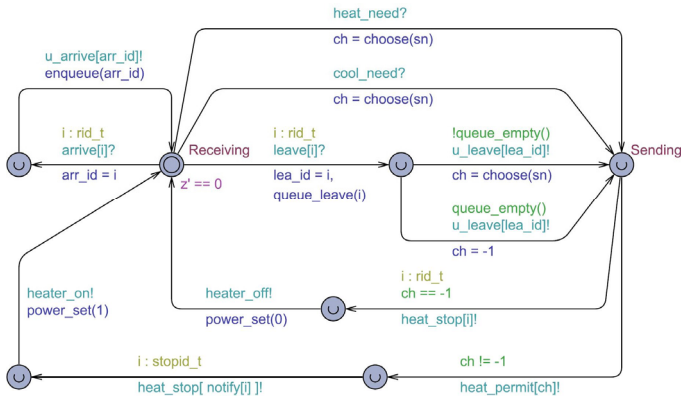


Fig.13 Model of controller
图 13 控制器模型

控制信息.若有房间需要供暖,则控制器向该房间发出 heat_permit 消息通知其加热请求被允许,同时给其他房间发出 heat_stop 消息停止这些房间的供暖,最后通知加热器工作并调用 power_set()函数根据概率分布函数设置当前加热器的实际功率;若没有房间需要供暖,控制器则通知所有房间停止加热,并通知加热器关闭并调用 power_set()函数进行功率设置.图 13 所示即为上述分析所得到的控制器模型,模型的行为模式固定,但根据所选策略以及从其他模型读取数据的不同,会产生不同结果.

4.3 空调系统调度策略建模

为了使智能大厦节能、舒适,空调系统的控制器后台配置中需要写入适当的策略,控制器根据配置中的策略调度加热器对各个房间供暖.调度策略需要房间队列 Q 以及各个房间的温度数据等信息,而模型中的控制器可以从其他模型轻松获取到这些信息.系统设计者可以根据具体环境设计出适当的策略并将其写入控制器中.多个策略可以被同时写入,控制器根据策略号 sn 调用 choose()函数中的具体策略进行房间的选择.本文提出了 3 种策略作为示例,策略内容具体如下.

策略 1. 优先级队列 Q 中的元素的顺序隐含了各个房间的优先级,即房间的默认优先级为房间被加入队列的先后顺序,也就是说,房间中的用户越早到达,该房间的优先级越高.在队列 $Q = \{q_i, q_j, \dots, q_k\}$ 中, q_i 默认优先级最高, q_k 优先级最低.策略 1 在调度时,每次均取优先级队列的队首房间号 q_i 进行供暖,该房间号被选中后从队首移出,放入队尾,队列变为 $Q = \{q_j, \dots, q_k, q_i\}$.

策略 2. 该策略每次选择房间时,先按照温度从低到高的顺序将队列中的房间进行排序,然后选择队列中第 1 个加热标志位 need 的值为 true 的房间,即选择需要加热的房间中温度最低的房间供暖.排好序的队列为 $Q = \{q_i, q_j, \dots, q_k\}$, 若 need[i] 的值为 true,则选择 i 号房间供暖;若 need[i] 的值为 false 而 need[j] 的值为 true,则选择

j 号房间.需要注意的是,该策略中,刚刚获得供暖权的房间有可能在短时间内发生的新一次调度时被剥夺加热权,策略 2 可能会出现房间切换过于频繁的现象.

策略 3. 该策略对策略 2 进行了改进.同样地,每次将房间按温度从低到高排序,并选择温度最低的需要加热的房间供暖.与策略 2 不同的是,该策略中获得供暖权的房间在未达到其舒适温度前加热权不可被剥夺,即发生新一次的调度时,若当前正在加热的房间未达到其舒适温度,则该房间不会被剥夺供暖权,将继续加热.假设排好序的队列为 $Q = \{q_1, q_k, \dots, q_m\}$, 且正在加热的房间号为 i .若 $T[i] > temp_need[i]$, 且 $need[j]$ 的值为 true, 则选择 j 号房间供暖;若 $T[i] \leq temp_need[i]$, 则 i 号房间继续加热.图 14 为这 3 种策略的活动图.

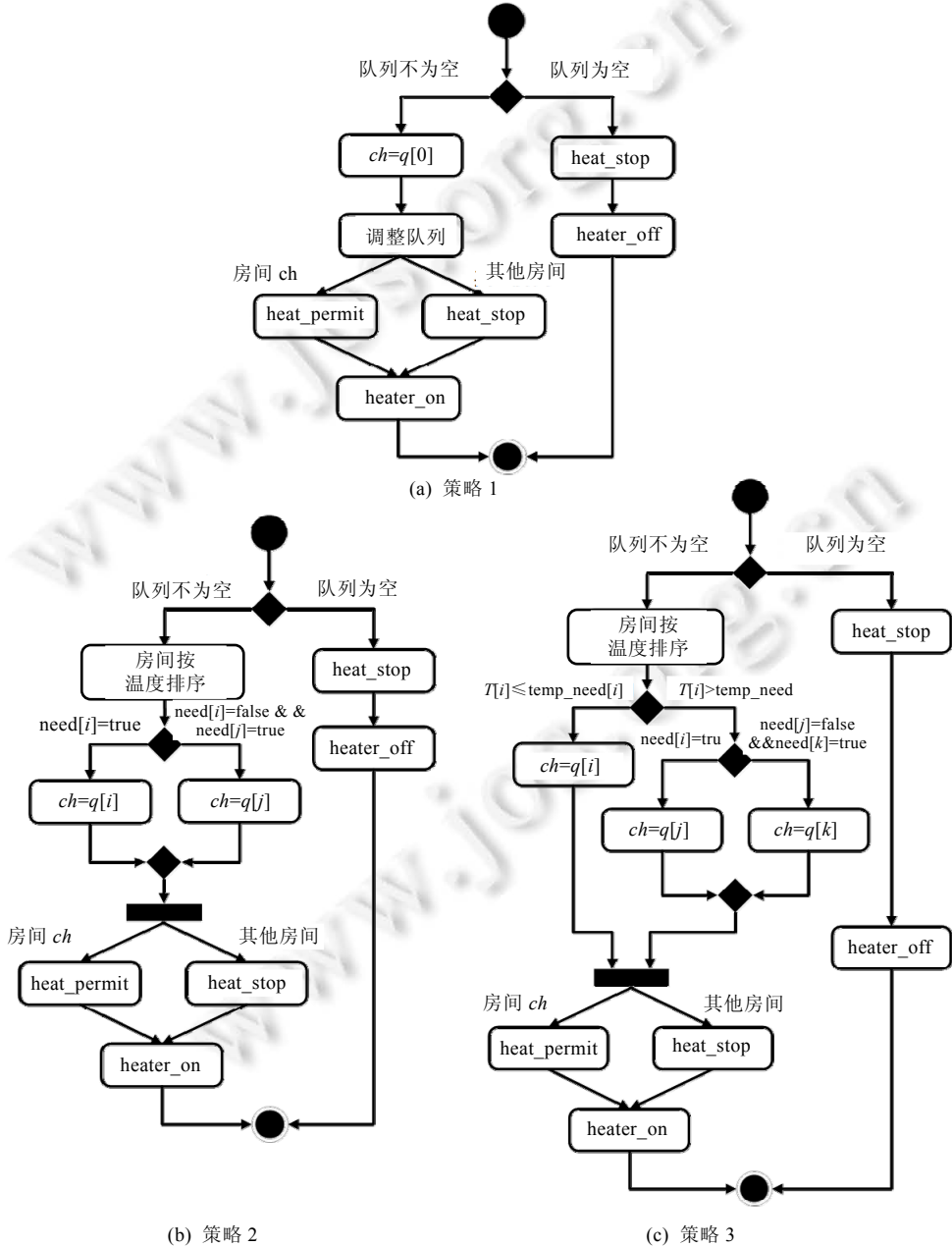


Fig.14 Activity diagrams of three strategies

图 14 3 种策略的活动图

5 实验分析

本文对空调系统采用不同调度策略时大厦的能量消耗情况以及用户舒适度进行了实验分析.由于智能大厦所处环境具有外界环境温度、设备功率输出以及用户行为等方面的不确定性,且上文所述 3 种策略本身也具有不同特性,因此大厦在能耗及用户舒适度方面的表现不尽相同.

本文取华东师范大学理科大楼作为实验对象.该大厦每层楼分为 4 个区域,冬季时每个区域有一台加热器负责对该区域房间供暖,该区域内有 5 个完全相同的房间沿走廊一侧依次分布.这里不考虑楼层间的热传递以及房间内用户分布的影响,除 1 号和 5 号房间受外界温度影响外,其他 3 个房间只受相邻房间温度的影响.模型中采用开尔文温度,晴天时外界温度变化范围为[278,282],雨天时外界温度变化范围为[276,288].用户每天上午 8 点~9 点间进入房间,下午 5 点~6 点间离开.各个房间的温度参数及加热器的功率参数,见表 1.所有实验均在一台 AMD FX8350(4GHz) CPU 的 Linux 计算机上完成,UPPAAL 版本为 4.1.19,用于实验的模型文件及属性查询文件可详见 <https://github.com/ranger34/uppaal-smc/>.

Table 1 Parameter configuration of the model

表 1 模型参数配置

实体	参数
天气	$T_s=283.5, T_r=280.5, A_r=0.00014, A_s=0.00042, B=0.00007, C=0.262$
用户	$u_mode=\{0,1\}, arrive_t=[0,3600], leave_t=[32400,36000]$
房间	$N=5, rid=\{0,1,2,3,4\}, temp_lower[rid]=\{288.0,286.0,290.0,289.0,287.0\}, temp_upper[rid]=\{300.0,298.0,302.0,301.0,299.0\}, temp_need[rid]=\{294.0,293.0,296.0,295.0,294.0\}, c=\{42.0,44.0,47.0,46.0,45.0\}, r=\{0.033,0.024,0.027,0.029,0.026,0.034\}$
加热器	$power[rid][2]=\{\{630,830\},\{610,810\},\{650,850\},\{640,840\},\{620,820\}\}, power_variation_arg[rid][2]=\{\{0.13,1.0\},\{0.11,1.0\},\{0.15,1.0\},\{0.14,1.0\},\{0.12,1.0\}\}$

(1) 3 种策略的能量消耗

该实验中用于对 3 种策略下大厦能耗表现进行属性查询的查询语句为 $Pr[<=day](\langle energy \rangle = 20000000)$, 具体含义为一天时间中,大厦消耗能量超过 20 000 000 个能量单位的概率.图 15 的两张图为不同的用户行为模式下 3 种策略的能耗的累积概率分布,其中图 15(a)中的用户以均匀分布概率到达或离开房间,图 15(b)中的用户行为模式呈正态分布.图中 S1,S2,S3 分别表示策略 1,策略 2,策略 3;Uniform 和 Normal 则分别表示均匀分布和正态分布.

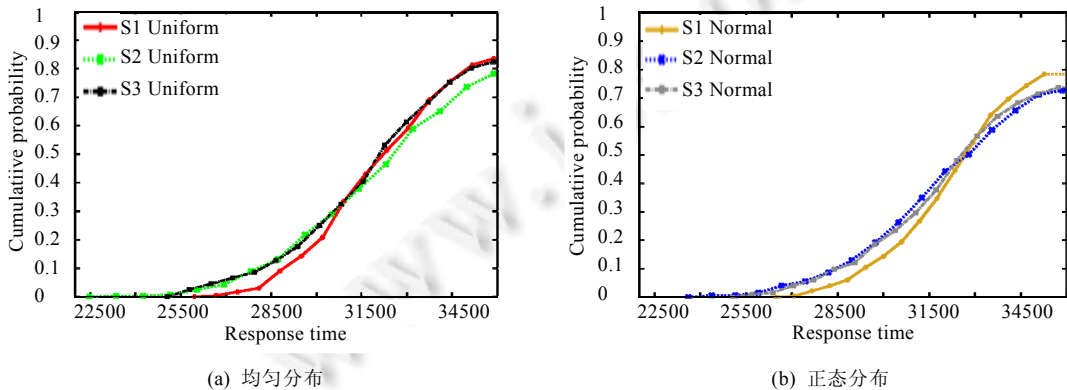


Fig.15 Cumulative probability distribution of energy consumption of three strategies

图 15 3 种策略的能耗的累积概率分布

在图 15(a)中,最终策略 1 的累积概率值最高,约为 0.835,策略 3 次之,策略 2 最低,约 0.782.联系该图所对应的查询属性,我们可以得出:在规定的一天时间内,策略 1 消耗能量超过 20 000 000 个能量单位的概率最高,策略 2 的概率最低,即在用户行为模式为均匀分布时,策略 2 消耗的能量最少.图 15(b)中用户的行为模式为正态分布,与图 15(a)类似,策略 1 最终达到了最高的累积概率 0.784,策略 2 的累积概率最低,约 0.728.图 15(b)同样说明策

略 2 最为节能,策略 1 能耗最高.如果比较图 15(a)和图 15(b)则可以发现,图 15(a)中 3 种策略的累积概率整体高于图 15(b),这说明,用户的行为模式会影响到调度策略的表现,系统设计者在设计调度策略时需要考虑用户的行为特点.

(2) 3 种策略的用户舒适度

图 16 为采用 3 种策略时,不同用户行为模式下超出房间温度限制的时间的累积概率分布,所使用的查询语句为 $Pr[\leq \text{day}](\langle \text{range_out}[1] \rangle \geq 11500)$,即在一天中,1 号房间超出所要求温度范围的时间大于 11 500 个时间单位的概率.

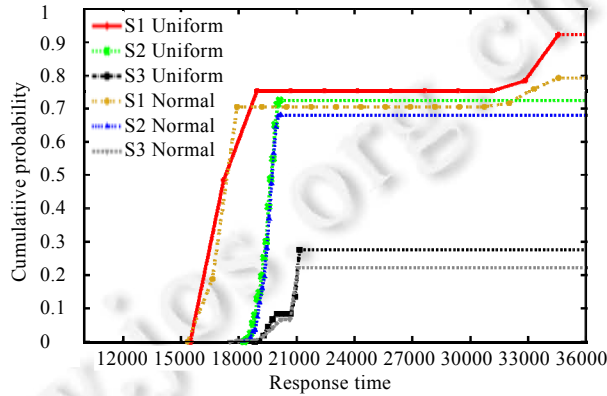


Fig.16 Cumulative probability distribution of time which beyond the temperature limit of three strategies

图 16 3 种策略超出温度限制的时间的累积概率分布

累积概率越高的策略超出温度限制的时间越长,用户的舒适度越差,因此该图可反映出不同策略对用户舒适度的影响.实验中,我们选择 1 号房间为观察对象,该图说明的是一天中 1 号房间温度超出限制的时间大于 11 500 个时间单位的概率.图中总体来看,策略 1 的累积概率最高,策略 2 次之,而策略 3 的概率明显低于其他两种策略,因此策略 3 的用户舒适度较高,这与策略 3 对策略 2 的改进有着直接关系.而比较同种策略可以发现,均匀分布下策略的累积概率均高于正态分布,当房间内用户行为呈正态分布时,用户舒适度较高.综合来看,该图说明在使用策略 3 时用户舒适度最佳,而房间内用户的行为也对房间的舒适度有着影响.

整理两个实验的数据分析后可以得到表 2,结合图 15 和图 16 可以看出:3 种策略中,最简单的策略 1 在能耗和用户舒适度方面的表现均为最差;策略 3 在用户舒适度方面的表现远优于其他两种策略,在能耗上也仅仅略逊于策略 2.综合两条属性查询的实验结果进行定量分析后,可以得出对于所构建的模型,调度策略 3 最优,能获得较好的节能和温度控制效果.

Table 2 Experimental result comparison of three strategies

表 2 3 种策略实验结果对比

策略	能耗的累积概率				超出限制的时间的累积概率(用户舒适度)			
	均匀分布	分析	正态分布	分析	均匀分布	分析	正态分布	分析
策略 1	0.835	最差	0.784	最差	0.923	最差	0.793	最差
策略 2	0.782	最佳	0.728	最佳	0.724	最佳	0.680	最佳
策略 3	0.823		0.737		0.276	最佳	0.222	最佳

6 相关工作和结束语

使用 PTA 等建模,基于统计模型检验的方法现在已经广泛用于定量地评估不确定环境的系统设计中.例如, Bouyer^[3]等人使用 PTA 对实时系统的性能进行了定量的分析评估,David^[1,14]等人扩展了 UPPAAL-SMC 的随机语义以对多个研究领域中的对象进行建模和评估,具体的对象包括生物学以及能量感知的大厦.在文献[6]中,Chen 等人提出了基于 UPPAAL-SMC 的方法来对云计算中的资源分配策略进行定量分析.在文献[5]中,Chen

等人采用了基于 SMC 的方法来定量地推究任务分配及调度策略的性能.在文献[4]中,Du 等人采用 UPPAAL-SMC 来实现考虑人力资源的变动时项目调度的定量评估.与本文工作相比,这些工作使用了相同的建模方式,但是它们都不是针对智能大厦空调系统的调度策略的建模,没有充分考虑不确定环境下的空调系统调度策略的建模.

在智能大厦系统的研究上,David^[1]等人使用统计模型检验^[14]的方法基于 UPPAAL-SMC 提出了一种框架,对智能大厦的能耗进行评估分析.我们以前工作也提出的一种基于环境本体的信息物理融合能源系统^[19]的能耗评估方法^[2],其中环境本体是用来使用存储领域知识,比如智能大厦系统的环境知识,由此来辅助生成智能大厦系统.与本文工作相比,这些工作都是针对系统的能耗进行分析,他们针对的是系统建模,而本文将调度策略与控制器模型分开,使得论文侧重在智能大厦空调系统的调度策略的定量分析,而且可以设立不同的评价标准,比如除了能耗,我们还考虑用户舒适度等因素.

针对如何对不确定环境下智能大厦空调系统的调度策略进行定量分析评估这一问题,本文提出了一种基于价格时间自动机的调度策略评估方法.该方法根据价格时间自动机理论对不确定环境下的智能大厦进行建模,并使用工具 UPPAAL-SMC 对模型进行随机模拟运行,分析空调系统采用不同调度策略时大厦在能耗及舒适度方面的表现.根据实验结果可以看出,不同的策略在能量消耗以及用户舒适度方面表现各异,智能大厦空调系统的设计者可以使用这种评估方法对不同策略进行定量分析,根据具体的需求,采用适当的策略使智能大厦更加节能舒适.

作为智能大厦的使用者和服务对象,用户的体验是最为关键的,但现有的对用户的建模仅局限在上下班进出智能大厦的时间分布上,较为单一.未来我们将考虑更多关于用户的不确定性,如用户在房间内的活动、分布等进行更为复杂的不确定环境建模.

References:

- [1] David A, Du DH, Larsen K, Mikucionis M, Skou A. An evaluation framework for energy aware buildings using statistical model checking. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2012,55(12):2694–2707. [doi: 10.1007/s11432-012-4742-0]
- [2] Chen XH, Gu F, Chen MS, Du DH, Liu J, Sun HY. Evaluating energy consumption for cyber-physical energy system: An environment ontology-based approach. In: *Proc. of the Int'l Computer Software and Applications Conf.* 2015. 5–14. [doi: 10.1109/COMPSAC.2015.114]
- [3] Bouyer P, Fahrenberg U, Larsen K, Markey N. Quantitative analysis of real-time systems using priced timed automata. *Communications of the ACM (CACM)*, 2011,54(9):78–87. [doi: 10.1145/1995376.1995396]
- [4] Du DH, Chen MS, Liu X, Yang Y. A novel quantitative evaluation approach for software project schedules using statistical model checking. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Software Engineering.* 2014. 476–479. [doi: 10.1145/2591062.2591132]
- [5] Chen MS, Yue DA, Qin XK, Fu X, Mishra P. Variation-Aware evaluation of MPSoC task allocation and scheduling strategies using statistical model checking. In: *Proc. of the Design, Automation, and Test in Europe.* 2015. 199–204. [doi: 10.7873/date.2015.0448]
- [6] Huang SJ, Chen MS, Liu X, Du DH, Chen XH. Variation-Aware resource allocation evaluation for cloud workflows using statistical model checking. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Big Data and Cloud Computing (BDCloud).* 2014. 201–208. [doi: 10.1109/BDCloud.2014.48]
- [7] David A, Larsen K, Legay A, Mikucionis M, Poulsen D, Vliet J, Wang Z. Statistical model checking for networks of priced timed automata. In: *Proc. of the 9th Int'l Conf. on Formal Modeling and Analysis of Timed Systems.* 2011. 80–96. [doi: 10.1007/978-3-642-24310-3_7]
- [8] Alur R, Dill D. A theory of timed automata. *Theoretical Computer Science*, 1994,126(2):183–235. [doi: 10.1016/0304-3975(94)90010-8]
- [9] Bengtsson J, Wang Y. Timed automata: Semantics, algorithms and tools. *Lectures on Concurrency and Petri Nets*, 2003. 87–124. [doi: 10.1007/978-3-540-27755-2_3]
- [10] Behrmann G, Larsen K, Rasmussen J. Priced timed automata: Algorithms and applications. In: *Formal Methods for Components and Objects.* 2004. 162–182. [doi: 10.1007/11561163_8]

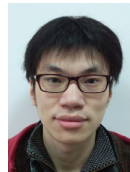
- [11] Bulychev P, David A, Larsen K, Mikucionis M, Poulsen D, Legay A, Wang Z. UPPAAL-SMC: Statistical model checking for priced timed automata. In: Quantitative Aspects of Programming Languages and Systems. 2012. 1–16. [doi: 10.4204/ EPTCS.85.1]
- [12] Behrmann G, David A, Larsen K. A tutorial on uppaal. In: Formal Methods for the Design of Real-Time Systems, 2004. 200–236. [doi: 10.1007/978-3-540-30080-9_7]
- [13] Bengtsson J, Larsen K, Larsson F, Pettersson P, Wang Y. UPPAAL—A tool suite for automatic verification of real-time systems. In: Hybrid Systems. 1995. 232–243. [doi: 10.1007/BFb0020949]
- [14] David A, Du DH, Larsen K, Legay A, Mikucionis M, Poulsen D, Sedwards S. Statistical model checking for stochastic hybrid systems. In: Proc. of the Theoretical Computer Science. 2012. 122–136. [doi: 10.4204/EPTCS.92.9]
- [15] David A, Larsen K, Legay A, Mikucionis M, Wang Z. Time for statistical model checking of real-time systems. In: Computer Aided Verification, 2011. 349–355. [doi: 10.1007/978-3-642-22110-1_27]
- [16] Yin L, Chen XH, Liu J. Consistency analysis of timing requirements for cyber-physical system. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014,25(2):400–418 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4540.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004540]
- [17] Thermal System. <http://ipsa.swarthmore.edu/Systems/Thermal/SysThermalIntro.html>
- [18] Deng K, Barooah P, Mehta P, Meyn S. Building thermal model reduction via aggregation of states. In: Proc. of the American Control Conf. 2010. 5118–5123. [doi: 10.1109/ACC.2010.5530470]
- [19] Chen MS, Huang SJ, Li A. Overview of research hotspot in CPS. Communications of China Computer Federation, 2013,9(7):8–16 (in Chinese).

附中文参考文献:

- [16] 尹玲,陈小红,刘静.信息物理融合系统的时间需求一致性分析.软件学报,2014,25(2):400–418. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4540.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004540]
- [19] 陈铭松,黄赛杰,李昂.CPS 研究热点概述.中国计算机学会通讯,2013,9(7):8–16.



陈铭松(1982—),男,江苏泰兴人,博士,副教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为信息物理融合系统,嵌入式系统设计自动化,软件工程.



徐思远(1991—),男,硕士,主要研究领域为嵌入式系统设计自动化,模型验证.



顾潘(1990—),男,硕士,主要研究领域为模型检测,计算机体系结构.



陈小红(1982—),女,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为信息物理融合系统,需求工程.