

基于时间自动机的温室环境监控物联网系统建模

邓雪峰¹ 孙瑞志^{1,2} 聂娟¹ 王文狄¹ 史银雪¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 由于温室环境的复杂性,系统设计的不合理会直接导致数据的不确定和系统的不稳定。基于体系结构的物联网层次模型对物联网的实施具有指导意义,但是体系结构模型没有提供系统建模工具和模型验证的方法。基于时间自动机理论的建模与模型验证方法是一种对物联网系统建模的有效手段,能在系统设计时提高系统的稳定性,保证系统设计的正确性。通过对智能温室监控物联网系统的分析,从系统实施的角度重新对温室环境监控物联网系统进行了层次划分,利用时间自动机理论对系统中的相应组件进行建模,在对各个子系统分别建模的基础上形成了时间自动机网络模型。最后利用时间自动机建模工具 UPPAAL,对已经建立的形式化模型进行了系统逻辑正确性验证与系统执行时序验证。结果表明,利用时间自动机理论及其建模工具 UPPAAL 可以对智能温室监控物联网系统进行建模及模型验证,可以在系统设计时对系统进行准确的模型分析,避免系统设计错误,降低系统设计缺陷,在系统投入运行中规避设计风险,从而提升系统的稳定性与可靠性,确保系统设计的正确性。

关键词: 温室; 物联网; 时间自动机; 建模; 模型验证

中图分类号: TP393; S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0301-08

Greenhouse Environment Monitoring IOT System Modeling Based on Timed Automata

Deng Xuefeng¹ Sun Ruizhi^{1,2} Nie Juan¹ Wang Wendi¹ Shi Yinxue¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture,
China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: As an emerging technology, internet of things (IOT) has been widely used in the greenhouse environment monitoring. Because of complexities of greenhouse environment, unreasonable system design can lead to data incorrectness and system un-stability. Hierarchical model based on the architecture is instructive to the implementation of IOT. However, the architecture model does not provide a system architecture modeling tool and a model validation method. In comparison, modeling and model validation method based on timed automata theory are effective means for IOT modeling. It could improve the stability of the system and ensure the correctness of the system during system design. Based on the analysis on the intelligent greenhouse monitoring IOT system, from the perspective of system implementation, the hierarchical re-division was made based on the greenhouse environment monitoring IOT system. Continuously, the corresponding components of different layers were modeled by using timed automata theory modeling. On the basis of subsystem model, the timed automata network model was formed. Ultimately, the system logic correctness verification and system implementation timing verification were made based on the established formalized model by use of UPPAAL, the timed automata modeling tool. The results show that UPPAAL and timed automata theory can realize modeling and model

收稿日期: 2016-02-05 修回日期: 2016-03-06

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAK04B01)

作者简介: 邓雪峰(1975—),男,博士生,主要从事农业信息化和物联网研究,E-mail: dxf75@sohu.com

通信作者: 孙瑞志(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事农业信息化技术和计算机支持的协同工作研究,E-mail: sunruizhi@cau.edu.cn

validation of the intelligent greenhouse IOT system. Moreover, the correct model analysis in system design can avoid design errors, reduce the design defects and avoid risk in system operation. Thus, it can enhance system stability and reliability to ensure the correctness of the system.

Key words: greenhouse; internet of things; timed automata; modeling; model verification

引言

智能温室环境监控系统是实现温室智能化、网络化管理的有效手段^[1],有助于提升温室管理的效率、降低农业工人的劳动强度^[2]。物联网作为一种技术手段已经广泛应用于智慧农业系统中^[3],但还存在很多具体问题^[4]需要解决。智慧农业系统是典型的复杂系统^[5],保证系统的稳定性及正确性是系统的基本需求,系统设计的不合理会直接导致数据的不确定^[6]及数据不可用。

物联网体系结构模型对于物联网系统的实施具有指导意义,如 USN^[7]、Physical-net^[8]、IOT - A^[9]模型等。但是体系结构模型没有提供系统设计及实施过程中检验系统稳定性、安全性等特性的方法。形式化方法^[10]在系统建模及验证方面能够保证系统设计的正确性,已在工程实践中得到了广泛的应用。时间自动机^[11]理论作为一种形式化方法,可以对物联网系统进行建模与验证^[12-13],如在交通^[14]、铁路^[15]等领域已经应用于实际的系统建模。

本文就智能温室环境监控物联网系统进行分析,依据系统实施的特点进行层次划分。对各个层次利用时间自动机进行建模。利用基于时间自动机理论的 UPPAAL^[16]建模工具对系统进行建模及验证,在系统设计的过程中避免由设计产生的缺陷,提升系统设计时的安全性及正确性。

1 温室环境监控系统分析

伴随着物联网概念的产生,物联网的体系结构模型不断地被提出。随着物联网研究的深入,物联网的模型在层次结构模型的基础上进一步抽象形成物联网服务^[12,17]模型,服务模型将物联网看作物联网服务的组合,通过对各种物联网服务集成,形成广泛互联的物联网系统。作为一种通用的技术手段,虽然抽象模型框架已经在理论上得到广泛认可,但是在对具体工作场景时,还需要针对系统的特点进行重新建模与分析。

物联网系统被公认的3层结构为感知层、网络层及应用层。但是一个完整的温室环境监控物联网系统在设计与实施中应包括环境控制执行设备。将物联网感知层中的环境感知设备与环境控制执行设备合并成一个层次,命名为感执层。因此本文将系

统划分为感执层、网络层和应用层。感执层包括感知温室环境信息的智能传感器和温室环境控制执行设备。网络层包括物联网网关汇聚节点及通信网络等网络传输设备。应用层包括现场对环境信息处理的智能控制模块及云端物联网服务等。

组成智能温室监控系统的主要功能组件系统构建如图1所示,图1中数字1、2、3分别指明图中相应的部分所属层次,1代表感执层,主要包括传感器和执行器等;2代表网络层,主要包括近距离通信设备、物联网网关及互联网相关设备等;3代表应用层,主要包括现场控制系统及云端物联网服务等。感执层组件由于直接与温室环境接触,对温室环境起到监测与控制作用,此层设备按系统架构置于温室空间内;网络层组件在物联网系统中分布于各个网络连接中,在温室内常用的通信设备有无线网络汇聚节点、物联网网关节点等,而通信网络分布于系统与互联网相连通部分,示意图中的网络层分散存在于系统的网络通信部分,用于连接各个功能组件;应用层组件包括环境控制模块以及物联网服务组

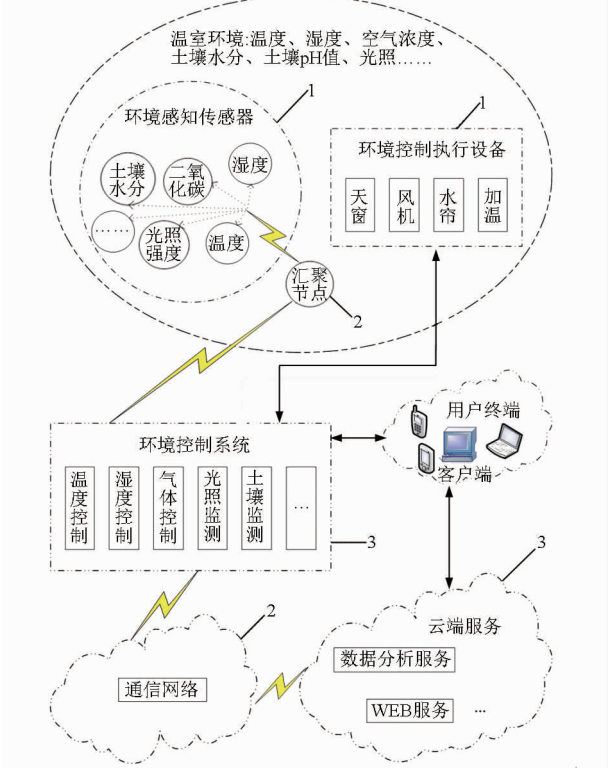


图1 智能温室物联网示意图

Fig.1 Schematic diagram of intelligent greenhouse IOT

1. 感执层 2. 网络层 3. 应用层

件,现场环境控制模块可以在现场布置小型控制系统或多个温室通过中心机房集中控制,而物联网数据服务常用的功能包括数据分析、存储、发布等服务,这些服务可以由云端物联网处理分析平台提供。

图 1 中各部分通过通信网络连接,为了方便说明问题,此处简要用连接线表示。智能温室物联网系统运行情况过程为:传感器获取的环境数据信息通过通信网络传输至现场控制系统,同时传送至远程的云端服务器,进行数据存储、分析、展示等操作;现场控制系统在接收到数据后,根据控制逻辑发送控制指令,通过网络层将控制指令发送给执行设备,对温室环境进行控制调节;远程的云端进行数据处理与分析,完成物联网的其他服务,经过智能处理后可以对当前的控制逻辑进行修改,发送控制指令至现在控制系统,完成智能控制功能。

通过对智能温室运行过程分析,一般的温室监控系统在运行中简化了物联网部分功能,感执层执行设备一般功能简单,传感器主要包括温度、湿度、二氧化碳浓度、土壤含水率等环境探测器件;网络层利用近距离通信技术完成信息采集及控制指令传送的功能,由物联网网关至现场控制系统均可采用近距离通信技术,由于温室处于野外与云端的连接一般采用移动通信技术;在应用层,智能温室物联网系统主要完成数据分析、数据存储以及数据可视化工作。

2 温室环境监控系统建模

对智能温室监控物联网系统进行建模分析,利用时间自动机理论及 UPPAAL 工具分别对系统各个层次进行建模,最后形成时间自动机网络模型。

2.1 时间自动机及 UPPAAL 工具

时间自动机是由 ALUR 和 DILL 提出的一种基于自动机理论的自然扩展,用来建立实时系统模型,时间自动机是一个六元组 $A = \langle L, L_0, \Sigma, X, I, E \rangle$, 其中, L 是有穷状态集合; L_0 是初始状态集合; Σ 是有穷符号集合; X 是有穷时钟集合; I 为状态节点上的时钟限制映射,即对 L 中每个状态节点指定一个 $\Phi(X)$ 中的时钟约束 $L \rightarrow \Phi(X)$; E 为一个转换关系,有 $E \subseteq L \times \Phi(X) \times \Sigma \times 2^X \times L$ 。时间自动机定义中的 $\Phi(X)$ 是时钟约束的集合,时钟约束 $\phi \in \Phi(X)$ 对于时钟变量集 X 中的元素 $x (x \in X)$ 有定义: $\phi := x \leq c \mid c \leq x \mid x < c \mid c < x \mid \phi_1 \wedge \phi_2$ 。其中 c 是有理数集 Q 中的一个常量。由多个时间自动机复合组成的时间自动机网络称为积自动机。

UPPAAL 是由瑞典 Uppsala 大学与丹麦 Aalborg 大学联合开发的实时系统验证工具。作为一种建模

与验证工具,UPPAAL 采用了 on-the-fly 技术^[18],使 UPPAAL 在时间自动机模型验证上性能优越。UPPAAL 工具包括编辑器、模拟器及验证器,能对时间自动机网络进行可达性分析,进而可以对系统的安全性、可达性、受限活性进行验证。UPPAAL 对时间自动机进行完整的描述,并增加了部分语法,如 chan 变量同步事件信号。其采用一种 BNF 语法验证时间自动机网络,利用 BNF 语法对时间自动机验证可采用如下形式的描述: $\text{Prop} ::= E < > p \mid A[] p \mid E[] p \mid A < > p \mid p \rightarrow q$ 。其中 $E < > p$ 代表若 p 在 1 个状态转移序列中的某个状态下为真,则 $E < > p$ 为真; $A[] p < = > \text{not } E < > \text{not } p$, 代表所有状态转换序列中,每一个状态均满足给定性质 p ; $E[] p$ 代表若存在某个状态转移序列, p 在这个序列中的所有状态下都为真,则 $E[] p$ 为真; $A < > p < = > \text{not } E[] \text{not } p$, 代表每个状态转换序列中,至少有一个状态满足性质 p ; $p \rightarrow q$ 代表若 p 为真则 q 也为真。

2.2 感执层建模

智能温室监控物联网系统的感执层组件包括感知设备与执行设备。一般的温室系统中感知设备主要负责环境信息的采集,执行设备仅执行系统指令。

2.2.1 感知设备建模

环境信息采集的传感器系统运行时,相隔一定时间(采样周期)采集环境信息。如果在规定时间内未采集到相关信息,该传感器设备处于异常状态。本文建模使用的传感器模型仅有采集信息的功能,传感器是否存在故障由物联网服务控制模块集中判断,故传感器时间自动机模型定义为 $\text{Sensor_TA} = \langle \{ \text{Idle}, \text{Work}, \text{Error} \}, \{ \text{Idle} \}, \{ \text{Val_Sensor} \}, \{ y \}, \text{SSTAI}, \text{SSTAE} \rangle$, 其中传感器有 3 个工作状态, Idle、Work、Error 分别代表待机、工作及出错状态,初始化为 Idle 状态; y 为传感器系统时钟。SSTAI、SSTAE 为传感器时间自动机节点时钟约束关系与状态转换关系,具体描述如图 2 所示。

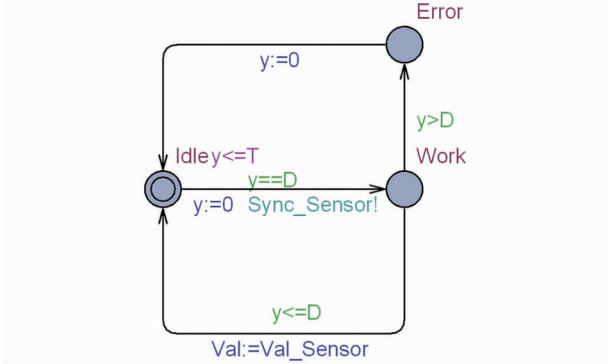


图 2 传感器时间自动机

Fig. 2 Sensor timed automata

图 2 中 T 为数据采集周期;D 为工作状态中正确采集数据的最大时间限制,超出 D 认为传感器采集数据出错;根据具体传感器不同,Error 状态的处理可以由人工处理也可以自动处理,此处不做特别说明。转换系统中 Sync_Sensor! 表示传感器进入工作状态时向系统发出同步信息,用来与其他设备进行同步,在实际系统中可能有数据采集同步信号,也可能应用统一时钟进行定时,在这种情况下,并没有任何信号发出,仅利用公共的时间作为开始收集数据的同步信号,在此,利用 chan 变量代表这一过程。当传感器正确采集信息后,将信息送入变量 Val 中,可以被其他设备使用。

2.2.2 执行设备建模

智能温室执行设备系统运行时一般处于待机状态,等待接收中央控制系统的信息,如开启与停止指令,执行设备的时间自动机模型 Device_TA 如图 3 所示。

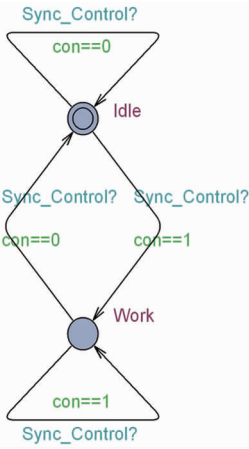


图 3 执行设备自动机模型

Fig.3 Perform device automata model

图 3 中并没有列出设备出错信息处理方法,因为不同的设备处置方式各不相同,有的设备有可能是人工操作的设备,故在此执行设备模型仅执行控制指令,因此仅列出最普通的设备运行状态,故定义

$$Device_TA = \langle \{ Idle, Work \}, \{ Idle \}, \{ con \}, \emptyset, DTAI, DTAE \rangle$$

其状态转换关系如图 3 所示。在温室中,如照明、通风等设备,仅需要一个开关信号即可工作,温室中大部分环境调节设备均与此工作过程相似,建模中采用这 2 个工作状态作为建模的模型,复杂设备需要单独建模。一般设备平常工作在待机状态,本模型中以 Idle 为初始状态。作为被动工作的环境控制设备,没有时间信息的影响,仅根据控制信号工作,并没有时间约束,即 X 为 $\emptyset$ 。设备仅受控制信号作用,可以利用 Sync_Control 变量作为控制,con 变量作为系统唯一输入信号,用此标识控制信号同步到来时的控制信息。

2.3 网络层建模

温室监控物联网系统中网络层有代表性的设备是物联网网关设备,其他硬件设备及网络通信方式均为普通互联网设备,在本文中其他设备及协议的建模,如在网络层的互联网协议,作透明处理。在此仅对物联网网关设备进行建模。

物联网网关设备作为感知层与应用层的桥梁,是物联网架构的必要通信设备,物联网网关在连接感知层时采用近距离通信的方式,收集传感器信息并转发至互联网和现场控制系统中,同时又可以传递控制指令到执行设备,具体运行模式有 2 个方面,一个是数据传输功能,另一个是控制指令发送功能。传感器采集到环境信息后,发送数据至物联网网关,物联网网关收到端口数据,然后对数据进行处理,处理完数据后,将数据分别转发给现场控制系统与互联网,完成一次数据传输的功能。同样,当现场控制设备向执行设备发送执行控制指令时,物联网网关在收到控制信息后对其进行处理,然后由相应的端口发送至执行设备,完成一次控制工作。

物联网网关时间自动机模型为

$$Net_TA = \langle \{ Idle, Up, Down, overtime \}, \{ Idle \}, \{ t \}, \{ y \}, NTAI, NTAE \rangle$$

其中物联网网关有 4 个状态,Up、Down、Idle、overtime 分别为数据信息上传状态、控制指令下载状态、待机及超时状态。t 为系统超时限制,系统的状态转换如图 4 所示。

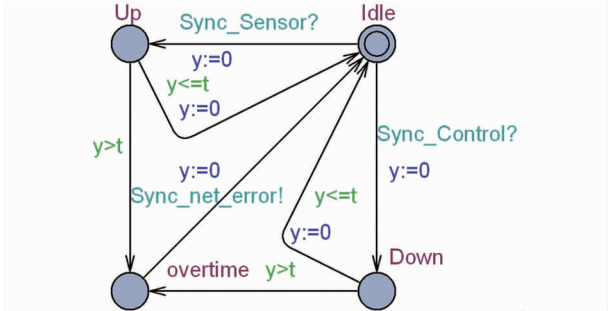


图 4 物联网网关时间自动机

Fig.4 IOT gateway timed automata

图 4 中当数据传输超时,时间自动机向外发出网络错误同步信号,系统接收到数据传输与指令控制同步信号后分别将数据信息与控制指令向对应的网络中发送。在智能温室环境监控物联网系统中网关作为数据传输装置,本身并不对数据进行控制存储等操作,数据仅从网关通过,对网关的输入控制仅有传输时间限制,就是在规定时间内是否能成功收发数据,输入符号集为 {t}。仅有一个时钟控制,即 X 为 {y}。一旦系统发送超时,将产生数据超时信号 Sync_net_error,通过同步信号发送至整个系

统。对于这个超时错误的处理在此模型中仅将时间重置,具体实施中可能采用更换设备、网关系统自动重置等操作。

2.4 应用层建模

智能温室环境监控物联网系统的应用层包括现场控制系统模块与云端物联网服务两部分。

2.4.1 现场控制系统模块

现场控制系统模块负责对实时采集的信息进行及时的控制处理。现场控制系统模块包括以下几个状态:系统启动后处于待机状态;在环境信息采样周期内,监听并处理系统收到的环境信息;如系统采样周期内没有收到环境信息,则系统进行系统错误处理,错误可能来自于传感器故障、物联网网络中数据包丢失等;当正常获取环境信息后,依据设定好的控制程序进行系统控制。因此,现场控制系统模块时间自动机定义为

Control_TA = $\langle \{Idle, Start, Judge_Sensor_abnormal, Judge_Sensor_normal, Device_Control, Control_Error, Sensor_Error\}, \{Idle\}, \{Val_Sensor\}, \{y\}, CTAI, CTAE \rangle$

其中状态有待机 Idle,开始处理数据 Start,判断传感器是否在正常区间 Judge_Sensor_abnormal, Judge_Sensor_normal,设备控制 Device_Control,控制信号发送出错 Control_Error 及传感器未响应出错 Sensor_Error。

在现场控制系统模块的建模过程中,严格地说温室系统是一个混杂系统,因为环境变量的变化是一个连续的变量,并且不一定是随时间有规律的变化,按时间自动机的定义来说不应该建立时间自动机模型,但是具体的系统设计过程中,这个问题一般采用一个简单的判断逻辑就可以将变化量变成开关变量,只要限定控制信号变化范围即可。故此处仍可以用时间自动机对其进行描述,由于 UPPAAL 建模工具可以对变量进行判断,在此不再做模型上的特别说明,如果按时间自动机的定义,应该先将环境变量做一步处理,如在图 5 中定义的 $Val \geq lower_bound \&\& Val \leq upper_bound$ 和 $Val < lower_bound \parallel Val > upper_bound$,可以先将其转换成开关变量,即 $(Val \geq lower_bound \&\& Val \leq upper_bound) \rightarrow off$ 和 $(Val < lower_bound \parallel Val > upper_bound) \rightarrow on$ 。其他自动机参数及转换过程如图 5 所示。

图 5 中,当传感器未及时采样时,系统会依据系统时钟 x 是否超出采样周期 t 来判断传感器是否工作异常;当控制信号发送过程中,如果超过系统规定的处理时间,认为控制指令未发送成功。出错处理可能采用人工方式也可能采用自动恢复等方式或仅显示警报信息,根据具体系统不同可能有多种方式,

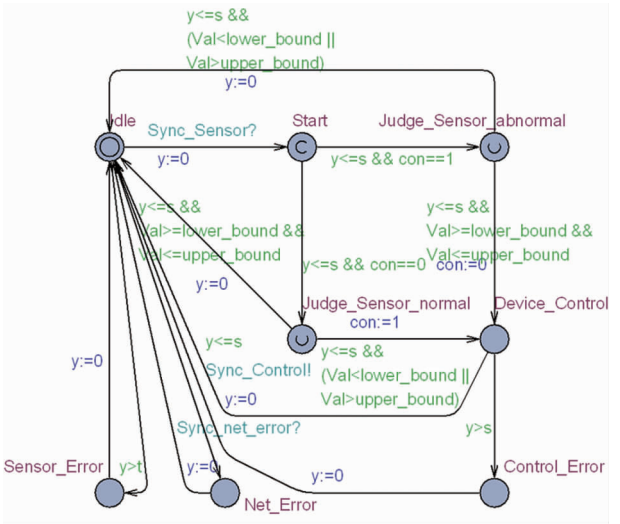


图 5 温室现场控制模块时间自动机
Fig. 5 Greenhouse site control module timed automata

在此不作详细分解。另外本文中将网关错误在现场控制中予以处理,网关错误信号发出并被现场控制系统获得,其处理由具体现场场景决定,在此现场控制系统中仅在处理结束后将系统时钟重置,代表系统转为正常工作状态。

2.4.2 云端物联网服务建模

智能温室测控物联网系统云端服务包括基本的数据处理与分析以及物联网信息数据可视化等具体的服务,本模型仅对常用的服务进行建模以表述建模方法,具体应用情况可以增删相关的服务。服务端时间自动机定义为

Service_TA = $\langle \{Start, IOT_Service, analyze, store, overtime, IOT_Service_Err, analyze_Err, store_overtime, store_Err\}, \{Start\}, \{Val_Sensor\}, \{y\}, SVTAI, SVTAE \rangle$

其中仅以物联网服务、数据存储、数据分析几个典型云端处理过程进行建模,模型中处理周期为 s ,数据采样周期为 t ,一般情况下 s 应该小于 t 。其他转换关系如图 6 所示。

图 6 中处理过程产生出错状态时,将出错处理直接指向超时处理状态,示例中将数据存储单独设定出现存储错误,为其他有类似错误处理的操作起示范作用,在错误处理后采用将时钟重置的策略,代表处理结束。

2.5 智能温室系统时间自动机网络

通过对物联网各个层次的时间自动机模型分析、建模,智能温室监控物联网时间自动机定义为 $TA = Sensor_TA \parallel Device_TA \parallel Net_TA \parallel Control_TA \parallel Service_TA$ 。

3 建模实例验证

以温室温度信息采集控制子系统为例,将第 2

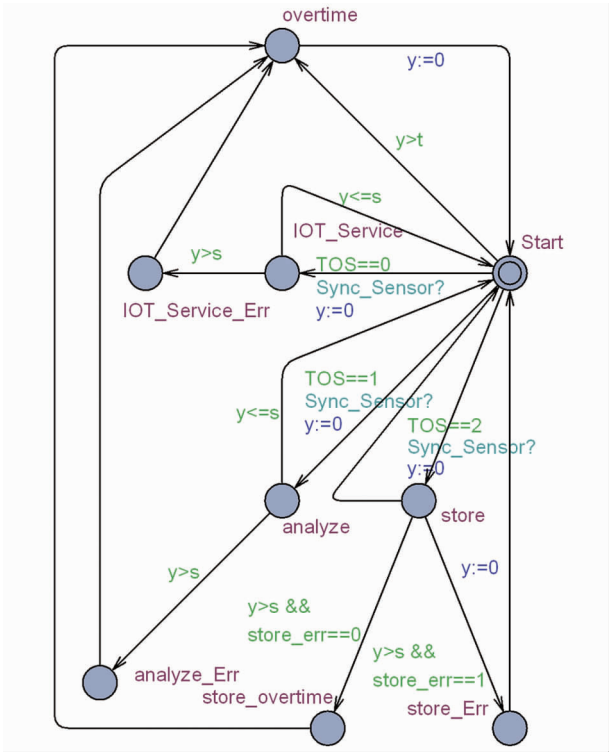


图 6 智能温室系统服务端时间自动机

Fig.6 Server timed automata of intelligent greenhouse system

节的时间自动机模型实例化,并利用 UPPAAL 工具对模型进行验证。

3.1 建模实例

温室中温度是一个最重要的、同时也是最常用的环境指标,任何作物生长均与温度有关,以温度为研究对象,其他温室指标可以用类似方法进行验证。

3.1.1 感执层建模实例化

(1)温度传感器负责采集温室温度信息,以草莓生长期为例,温室要求保持 20 ~ 30℃,一个采样周期为 10 min,在模型中为计数方便,设置为 100 个时间单位,出错时间限制为 1 min,设置为 10 个时间单位,因此有

$$\text{Sensor} = \langle \{ \text{Idle}, \text{Work}, \text{Error} \}, \{ \text{Idle} \}, \{ \text{Val_Sensor}, \text{send} \}, \{ y \}, \text{SSTAI}, \text{SSTAE} \rangle$$

其中 Val_Sensor 取值范围为 20 ~ 30,图 2 中的 T 为 100,D 为 10。

(2)执行设备是温度调节设备,如加温装置、通风装置,因此,在本实例中无特别要求,建模实例与图 3 中无差别,直接应用 Device = $\langle \{ \text{Idle}, \text{Work} \}, \{ \text{Idle} \}, \{ \text{con} \}, \emptyset, \text{DTAI}, \text{DTAE} \rangle$ 进行模型验证。

3.1.2 网络层建模实例化

网络层对物联网网关进行建模,物联网网关设备超时限制为 5 个时间单位,因此

$$\text{Net_TA} = \langle \{ \text{Idle}, \text{Up}, \text{Down}, \text{overtime} \}, \{ \text{Idle} \}, \{ t \}, \{ y \}, \text{NTAI}, \text{NTAE} \rangle$$

中的其他变量无变化,置 t 为 5。

3.1.3 应用层建模实例化

(1)现场控制模块时间自动机 Control_TA = $\langle \{ \text{Idle}, \text{Start}, \text{Judge_Sensor_abnormal}, \text{Judge_Sensor_normal}, \text{Device_Control}, \text{Control_Error}, \text{Sensor_Error} \}, \{ \text{Idle} \}, \{ \text{Val_Sensor} \}, \{ y \}, \text{CTAI}, \text{CTAE} \rangle$ 。对其实例化,将图 5 中的变量赋值,信号处理时间 s 为 10 个时间单位,采样时间与传感器采样时间保持一致,置 t 为 100。

(2)物联网服务主要对数据进行加工分析及存储等操作,对数据无特殊要求,故

$$\text{Service_TA} = \langle \{ \text{Start}, \text{IOT_Service}, \text{analyze}, \text{store}, \text{overtime}, \text{IOT_Service_Err}, \text{analyze_Err}, \text{store_overtime}, \text{store_Err} \}, \{ \text{Start} \}, \{ \text{Val_Sensor} \}, \{ y \}, \text{SVTAI}, \text{SVTAE} \rangle$$

其中状态转换关系如图 6 所示,其中参数 t 为 100,各种服务处理时间限制相同,服务处理时间 s 为 10。

3.2 模型验证分析

对智能温室环境监控系统进行系统逻辑正确性验证与系统执行时序验证。

3.2.1 系统逻辑正确性验证

主要包括系统死锁验证和温室环境监控物联网系统各层次运行正确性验证,验证结果如表 1 所示。

表 1 系统逻辑正确性验证		
Tab.1 Verification of system logical correctness		
验证项目说明	BNF 表达式	验证结果
系统不入死锁	A[] not deadlock	满足该性质
传感器工作情况正常	E < > Sensor. Idle or Sensor. Work or Sensor. Error	满足该性质
设备工作正常	E < > Device. Idle or Device. Work	满足该性质
网关工作正常	E < > Net. Idle or Net. Up or Net. Down or Net. overtime	满足该性质
现场控制系统正常	E < > Control. Start or Control. Device_Control or Control. Judge_Sensor_abnormal or Control. Judge_Sensor_normal or Control. Sensor_Error or Control. Net_Error	满足该性质
物联网服务工作正常	E < > Service. Start or Service. IOT_Service or Service. IOT_Service_Err or Service. analyze or Service. analyze_Err or Service. store or Service. store_overtime or Service. store_Err or Service. overtime	满足该性质

经过 UPPAAL 验证模块证明,表 1 中物联网各个部分均能正常执行。

3.2.2 系统执行时序验证分析

对于系统执行时序,选择有代表性的执行过程进行验证分析,主要验证项目如表 2 所示。

表 2 系统执行时序验证

Tab. 2 Verification of system execution timing

验证项目说明	BNF 表达式	验证结果
传感器采样: 传感器有数		
据采样在大于 10 个周期	$A [\] \text{ Sensor. Error}$	满足该性质
未发送, 系统进入 Error 状态	$\text{imply Sensor. } y > 10$	
物联网网关: 网关在小于 5 个周期内完成数据传输, 系统不进入出错状态	$A [\] \text{ Net. overtime}$ $\text{imply Net. } y > 5$	满足该性质
现场控制模块: 温度信息在正常范围内环境调控设备工作在相应状态	$A [\] \text{ Control. con} = 0$ $\text{imply Control. Val}$ $> = 20 \text{ and Control. Val} < = 30$	
物联网服务: 小于 10 个周期内发布物联网数据信息的情况下系统不进入超时状态	$A [\] \text{ Service. overtime}$ $\text{imply Service. } y > 10$	满足该性质

经过 UPPAAL 验证器验证, 表 2 中列举的各项系统指标均可以被验证。表中现场控制模块验证中有 $\text{Control. Val} \geq 20$ and $\text{Control. Val} \leq 30$, 在时间自动机中应该最终表示为开关变量 off, 因为 UPPAAL 可以对这个范围进行操作, 故将此范围直接作为参数, 理论说明见 2.4.1 节。

4 结论

(1) 通过对温室监控物联网系统的分析, 根据

温室监控系统的实际应用情况, 将物联网技术与具体应用相结合, 对经典的物联网层次模型进行扩展, 把感知层与执行设备共同划分在一个实际系统中, 形成感知层。

(2) 一直以来在设计过程中对温室环境监控系统实时性要求较低。但是, 随着物联网技术的应用, 系统的实时性需求也逐渐增加, 但是传统的设计方法中对此需求讨论相对较少。本文引入时间自动机理论对温室系统进行建模, 充分考虑到物联网技术与温室系统实践相结合的应用场景。

(3) 在温室内, 由于植株的生长等特性导致物联网通信时信号传输不确定, 相对环境较稳定的其他生产环境来说, 智能温室监控物联网对稳定性要求更高。本文利用时间自动机这种实时系统分析工具, 对智能温室监控物联网系统进行建模和验证, 在系统设计之时对系统进行准确的模型分析, 避免系统设计错误, 保证系统设计的正确性, 在系统投入运行中规避设计风险, 提升系统的稳定性与可靠性。

(4) 利用基于时间自动机理论的建模及验证工具 UPPAAL, 对系统已经建立的形式化模型进行了系统逻辑正确性验证与系统执行时序验证, 为实际应用中智能温室系统建模设计提供了一种可行的实践方法。

参 考 文 献

1 李萍萍, 王纪章. 温室环境信息智能化管理研究进展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 236 – 243.
LI Pingping, WANG Jizhang. Research progress of intelligent management for greenhouse environment information [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 236 – 243. (in Chinese)

2 李瑾, 郭美荣, 高亮亮. 农业物联网技术应用及创新发展策略[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 2): 200 – 209.
LI Jin, GUO Meirong, GAO Liangliang. Application and innovation strategy of agricultural internet of things[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 2): 200 – 209. (in Chinese)

3 何勇, 聂鹏程, 刘飞. 农业物联网与传感仪器研究进展[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 216 – 226.
HE Yong, NIE Pengcheng, LIU Fei. Advancement and trend of internet of things in agriculture and sensing instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 216 – 226. (in Chinese)

4 陈威, 郭书普. 中国农业信息化技术发展现状及存在的问题[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 196 – 205.
CHEN Wei, GUO Shupu. Current situation and existing problems of agricultural informatization in China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22): 196 – 205. (in Chinese)

5 李想, 王建仑, 高红菊. 面向农田物联网复杂事件处理的时空事件模型[J]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 153 – 161.
LI Xiang, WANG Jianlun, GAO Hongju. Time and space event model for complex event processing in internet of things in farmland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 153 – 161. (in Chinese)

6 苑进, 胡敏, WANG Kesheng, 等. 基于高斯过程建模的物联网数据不确定性度量与预测[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 265 – 272.
YUAN Jin, HU Min, WANG Kesheng, et al. Uncertainty measurement and prediction of IOT data based on gaussian process modeling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 265 – 272. (in Chinese)

7 LIU Y, ZHOU G. Key technologies and applications of internet of things[C] // 2012 Fifth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), IEEE, 2012: 197 – 200.

8 VICAIRE P A, XIE Z, HOQUE E, et al. Physicalnet: a generic framework for managing and programming across pervasive computing networks[C] // Real-time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS), 2010 16th IEEE, 2010:

269 – 278.

- 9 毛燕琴,沈苏彬. 物联网信息模型与能力分析[J]. 软件学报,2014,25(8):1685 – 1695.
MAO Yanqin, SHEN Subin. Information model and capability analysis of the internet of things[J]. Journal of Software, 2014, 25(8):1685 – 1695. (in Chinese)
- 10 VALIDO-CABRERA E. Software reliability methods[R]. Madrid:Technical University of Madrid, 2006.
- 11 ALUR R. Timed automata[M] // Computer Aided Verification, Lecture Notes in Computer Science 1633, Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- 12 李力行,金芝,李戈. 基于时间自动机的物联网服务建模和验证[J]. 计算机学报,2011,34(8):1365 – 1377.
LI Lixing, JIN Zhi, LI Ge. Modeling and verifying services of internet of things based on timed automata[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(8): 1365 – 1377. (in Chinese)
- 13 曹源,唐涛,徐田华,等. 形式化方法在列车运行控制系统中的应用[J]. 交通运输工程学报,2010,10(1):112 – 126.
CAO Yuan, TANG Tao, XU Tianhua, et al. Application of formal methods in train control system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(1): 112 – 126. (in Chinese)
- 14 吕继东,唐涛,燕飞,等. 基于 UPPAAL 的城市轨道交通 CBTC 区域控制子系统建模与验证[J]. 铁道学报, 2009, 31(3): 59 – 64.
LV Jidong, TANG Tao, YAN Fei, et al. UPPAAL-based simulation and verification of CBTC zone control subsystem in rail transportation[J]. Journal of the China Railway Society, 2009,31(3): 59 – 64. (in Chinese)
- 15 吕继东,唐涛. 高速铁路列控系统运营场景实时性的建模与验证[J]. 铁道学报,2011,33(6):54 – 61.
LV Jidong, TANG Tao. Modeling and verification of time constraints of operation scenarios of high-speed train control system [J]. Journal of the China Railway Society, 2011,33(6):54 – 61. (in Chinese)
- 16 BEHRMANN G, DAVID A, LARSEN K G, et al. UPPAAL 4.0[C] // Third International Conference on Quantitative Evaluation of Systems, QEST 2006, 2006: 125 – 126.
- 17 谢开斌,陈海明,崔莉. 物联网软件体系结构中的感知模型的求精[J]. 软件学报,2014,25(8):1659 – 1670.
XIE Kaibin, CHEN Haiming, CUI Li. Refinement of sense-execute model in a software architecture of internet of things[J]. Journal of Software, 2014,25(8):1659 – 1670. (in Chinese)
- 18 LARSEN K G, PETTERSSON P, YI W. UPPAAL in a nutshell[J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 1997, 1(1): 134 – 152.