

丁承君, 刘 强, 田军强, 等. 信息物理系统事件驱动下的农业气象监测系统[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(4): 825-834.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2018.04.016

信息物理系统事件驱动下的农业气象监测系统

丁承君¹, 刘 强^{1,2}, 田军强¹, 朱雪宏^{1,2}

(1. 河北工业大学机械学院, 天津 300130; 2. 泰华宏业(天津)机器人技术研究院有限责任公司, 天津 300130)

摘要: 针对传统农业气象观测和当前传感器技术存在的不足, 设计了一套基于信息物理系统(Cyber-physical system, CPS)的气象远程监测系统。针对信息物理系统时空特性, 基于节点事件驱动方法, 建立了3层信息物理系统模型, 并给出了时空事件建模方法。该系统由边缘设备负责感知, 云平台负责计算, 通过事件-行为模式保证时空同步性, 实现了气象信息采集、传输和处理的高度集成, 同时在网络边缘处应用卷积神经网络实现设备电量识别以自适应采集频率。通过在河北工业大学测试点开展的采集试验和系统模型试运行结果表明, 系统表现出较好的实时性、稳定性和时空同步性, 农业气象信息的采集、传输、处理和远程监控等各项功能均可满足各级用户需求。

关键词: 信息物理系统; 农业气象; 事件驱动; 边缘设备; MQTT 协议; 卷积神经网络

中图分类号: S165+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)04-0825-10

Agro-meteorological monitoring system based on event-driven modeling of cyber-physical system

DING Cheng-jun¹, LIU Qiang^{1,2}, TIAN Jun-qiang¹, ZHU Xue-hong^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Taihua Hongye (Tianjin) Robot Technology Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300130, China)

Abstract: In view of the shortcomings of traditional agricultural meteorological observation and current sensor technology, a set of meteorological remote monitoring system based on cyber-physical system(CPS) was designed. In view of the temporal and spatial characteristics of CPS, a three layer CPS model was established based on the node event-driven method and spatiotemporal event modeling method was put out. In this system, edge device was responsible for perception and cloud platform was responsible for the calculation. The system ensured concurrency in time and space by event-behavior model and completed the integration of acquisition, transmission and processing of meteorological information. Moreover, at the edge of the network, convolutional neural network was used to identify the system power and adaptively change the sampling frequency to minimize energy consumption of the system. The experiment and system model test run results at the test site of

Hebei university of technology showed that the system had good real-time, stability and spatiotemporal synchronization. Besides, the functions of acquisition, transmission, processing and remote monitoring of agricultural meteorology can meet the needs of users at all levels.

Key words: cyber-physical system; agricultural meteorology; event-driven; edge device; MQTT protocol; convolutional neural network

收稿日期: 2017-10-25

基金项目: 天津市科技支撑计划项目(15ZXHLGX00210); 天津市产学研合作项目(14ZCZDSF00025); 天津市“863”成果转化项目(14RCHZGX00862)

作者简介: 丁承君(1973-), 男, 河北馆陶人, 博士, 教授, 研究方向为嵌入式控制和物联网技术。(E-mail) dej@hebut.edu.cn

通讯作者: 刘 强, (Tel) 15620693227; (E-mail) lqhebut@foxmail.com

中国是一个农业大国,而每年因气象因素带来的农业损失高达数百亿元^[1],气象观测预测系统在农业防灾减灾、农事生产活动中发挥重要作用。农业气象观测大致可以分为传统农业气象观测和基于传感器技术的农业气象自动观测两种方法^[2],而从整体上看,中国农业气象观测仍以人工观测为主^[3],总体技术落后,主要表现在:①观测站点密度低;②观测项目种类少;③观测频率低;④观测误差较大。

目前国内外在智能监控系统相关方面的研究主要分为以下几种类型:1)基于单片机的控制系统^[4]:它使用传感器实现气象参数的采集,并将信号送入单片机简单处理后通过执行器改变物理环境。这类控制系统受到单片机的运算能力限制,无法给出最优化的控制策略。2)基于虚拟仪器的监控系统^[5-6]:它通过下位机进行感知,并将感知数据全部发送至上位机,由上位机的专家系统决策后给出控制指令至下位机。3)基于物联网架构的气象监测系统^[7-9]。该类系统通过感知、传输、计算融合物理世界和信息世界,并给出控制策略。上述 3 类控制系统基本实现了气象环境的监测与控制,但由于系统未考虑感知信息和控制信息的时空属性,使得控制较为滞后,精度较低,能耗较高。

信息物理系统(Cyber-physical system, CPS)是通过计算、通信以及控制技术将信息世界与物理世界融为一体的新一代智能系统^[10]。相比于物联网系统, CPS 系统更注重物理进程和信息进程在时空状态上的同步性,这种特性要求 CPS 独特的建模方法能够应用于离散、非线性物理系统。

在 CPS 相关的模型研究方面,文献[11]在 CPS 建模中提出事件-行为的 CPS 时空驱动方法;文献[12]在该基础上提出一种基于格的 CPS 事件模型,对 CPS 事件定义结构统一化,并利用格理论给出了事件生成机制;文献[13]在面向对象 PETRI 网的基础上提出了传感器、执行器、控制器模型,缩小了系统状态空间,但没有从本质上解决时间带来的影响;文献[14]、[15]从状态机模型角度阐述了 CPS 建模、应用的基本步骤,并对模型进行了验证分析。文献[16]在分析 CPS 建模方法时,提出了具有层级、时间并行特征,且可应用于模块化构造的混合系统模型。

综上所述,已有的研究工作主要对 CPS 中的事件模型和时空特性进行了考虑,初步实现 CPS 系统模型的构建。但涉及到具体异构系统构建上,尤其是复杂性节点、异步数据交换、模块化设计上仍需进一步综合考虑并加以完善。

本研究在前人研究的基础上,提出一种基于事件驱动的 CPS 时空建模方法,拟构建面向中小型气象站的 CPS 系统。

1 时空事件建模

本研究从农业实际应用的角度对已有的事件模型进行综合和改进,将农业气象信息感知到智能处理的过程描述为节点上的时间、事件与行为的形式化语言。本研究中提出的一种基于节点的 CPS 三层结构的 CPS 模型:物理层、传输层、信息层。1)物理层:物理层中的边缘设备被分为挂载若干传感器的采集单元和具有边缘计算能力的嵌入式计算单元。2)传输层:采集传输节点负责对不同采集单元上传的事件进行融合,控制传输节点负责接收来自其父节点的事件,分析并转化为控制事件,分配至相关的执行器。3)信息层:信息层在集中式大数据平台上建立云计算节点,负责接收来自传输节点的事件并调用相应计算模型后转换为信息下达。

如图 1,要实现系统物理进程和数字进程的同步,必须使系统具有感知和反馈的能力,即系统利用传感器获取环境信息,并上传至计算机,计算机对数据形成决策信息并反馈至系统,系统再次感知,从而形成一个闭环进程,而闭环节点之间的状态空间转变需要一个离散模型来定义,这里我们定义了各层各节点事件模型,在 CPS 节点上,我们并不需要了解 CPS 系统面临的环境如何复杂,我们只需关注父节点和子节点状态空间的跳转问题,在这一点上,解决了传统状态机建模工作中的状态跳转的复杂逻辑问题。通过对节点事件和转换函数定义,形成由节点事件驱动的 CPS 模型。

1.1 CPS 时空事件建模

1.1.1 物理层 传感器是农业气象信息采集的关键设备,其按照一定的周期进行数据感知,定义传感器事件如下:

$$\varepsilon_{\text{senor}} = SR(\text{Style}_{\text{sr}})(AU_{\text{id}}, SR_{\text{id}})(\text{Tim}_{\text{sr}}, \text{Loc}_{\text{sr}}, \text{Var}_{\text{sr}}) \quad (1)$$

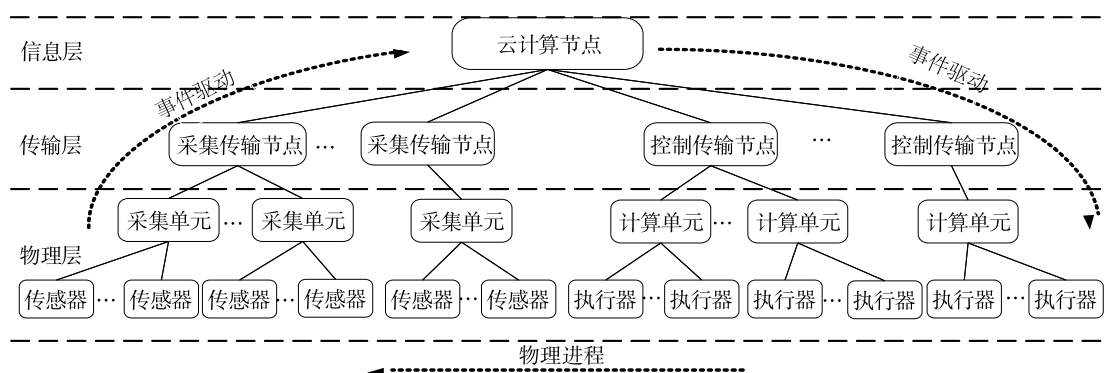


图1 CPS系统架构

Fig.1 CPS system architecture

式中 SR :事件类型; $Style_{sr}$:传感器类型; AU_{id} :父节点传感单元 id; SR_{id} :传感器 id; Tim_{sr} :事件发生的时间; Loc_{sr} :事件发生的地点; Var_{sr} :事件属性集。

采集单元是负责多个传感器的信息汇总和协议转换单元,采集单元时间定义如下:

$$\varepsilon_{au} = AU(Style_{au})(DTU_{id}, AU_{id})(Tim_{au}, Loc_{au}, Var_{au}) \quad (2)$$

式中 DTU_{id} :父节点采集传输节点 id; AU_{id} :采集单元 id。

执行器是农业气象中用于改善物理环境的装置,也是气象信息采集的目的,定义执行器事件:

$$\varepsilon_{ar} = AR(Style_{ar})(CTU_{id}, AR_{id})(Tim_{ar}^s, Loc_{ar}^s) // (Tim_{ar}^e, Loc_{ar}^e, Var_{ar}^e)(\rho_{ar}) \quad (3)$$

式中 AR :事件类型; $Style_{ar}$:执行器类型; CTU_{id} :父节点计算单元 id; AR_{id} :执行器 id; Tim_{ar}^s :事件期望发生时间; Loc_{ar}^s :事件期望发生地点; Tim_{ar}^e :事件实际发生时间; Loc_{ar}^e :事件实际发生地点; Var_{ar}^e :事件属性集; ρ_{ar} :执行器可信度。

计算单元是嵌入式边缘设备中用于负责接收传输节点信息并生成控制指令的处理单元,定义事件如下:

$$\varepsilon_{cu} = CU(Style_{cu})(CTU_{id}, CU_{id})(Tim_{cu}, Loc_{cu}, Var_{cu})(\rho_{cu}) \quad (4)$$

式中 CTU_{id} :父节点控制传输节点 id; CU_{id} :计算单元 id; ρ_{cu} :计算可信度。

1.1.2 传输层 传输层是连接物理层和信息层的枢纽,而实现物理层至信息层的数据上达以及信息层到物理层的决策下达需要解决的是网络传输中的穿透问题。这里我们根据异步数据交换协议按主题将传输节点一分为二:采集传输节点和控制传输节

点,解决了一对多和多对一的数据传输问题。采集传输节点事件 ε_{dtu} 和控制传输节点事件 ε_{ctu} 定义如下:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{dtu} &= DTU(Style_{dtu})(DTU_{id})(Tim_{dtu}, Loc_{dtu}, Var_{dtu}) \\ \varepsilon_{ctu} &= CTU(Style_{ctu})(CTU_{id})(Tim_{ctu}, Loc_{ctu}, Var_{ctu}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 DTU 、 CTU :事件类型; $Style_{dtu}$ 、 $Style_{ctu}$:采集、控制传输节点类型; DTU_{id} 、 CTU_{id} :采集、控制传输节点 id; Tim_{dtu} 、 Tim_{ctu} :事件发生的时间; Loc_{dtu} 、 Loc_{ctu} :事件发生的地点; Var_{dtu} 、 Var_{ctu} :事件属性集。

1.1.3 信息层 云计算节点一般部署在云端服务器上,主要负责对各个传输节点上传的传输事件进行汇聚,并调用相应模型形成一个全局的决策事件,定义如下:

$$\varepsilon_{cyb} = CYB(Style_{cyb})(CN_{id})(Tim_{cn}, Loc_{cn}, Var_{cn}) \quad (6)$$

式中: CYB :决策事件; CN_{id} :云计算节点 id; Var_{cn} :多维属性集($\delta_{du_1}, \delta_{du_2}, \dots, \delta_{du_i}$), δ_{du_i} :需要改变的第 i 维属性值

1.2 事件驱动及转换函数

CPS 状态空间被各级事件分为多个状态空间,我们不需要考虑各状态之间的离散问题,我们更关注从一个状态到另一个状态之间的事件驱动模型问题,这里定义事件驱动如下:

$$Drive_{things} = (\zeta_t, In_t, Out_t, f_t, s_t) \quad (7)$$

式中 ζ :属性状态空间,子节点 Var 并集; In :输入(子节点事件); Out :输出(父节点事件); f :转换函数; s :初始状态,默认取值(0, 0, \dots , 0); t :驱动时间阈值。

这里 t 的设置是为了避免因传感器故障,协议转换超时,网络拥堵带来的事件在状态时空上存在的滞后性,每当新事件输入时,驱动器都会判断事件时间是否超出该值,假如超出该值时,则认为这是一个滞后时间并抛弃该事件,若在驱动时间阈值内,则认为该事件有效并转交转换函数处理。

其中转换函数定义:

$$f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n) = \text{Event}(ID) [\tau(\text{Tim}_1, \text{Tim}_2, \dots, \text{Tim}_n), \varphi(\text{Loc}_1, \text{Loc}_2, \dots, \text{Loc}_n), v(\text{Var}_1, \text{Var}_2, \dots, \text{Var}_n)] \quad (8)$$

式中 $\text{Event}(ID)$: 各级事件以及对应的 id; $\tau(\text{Tim}_1, \text{Tim}_2, \dots, \text{Tim}_n)$: 时间操作函数; $\varphi(\text{Loc}_1,$

$\text{Loc}_2, \dots, \text{Loc}_n)$: 空间操作函数; $v(\text{Var}_1, \text{Var}_2, \dots, \text{Var}_n)$: 属性操作函数。

2 系统实现及关键技术

本研究系统硬件组成如图 2 所示,主要包括供电设备、边缘设备和气象数据采集前端等。边缘设备是定义在信息物理系统网络边缘处的网关设备,在感知数据的同时能够利用嵌入式计算单元在网络边缘处执行一定的复杂计算。考虑到气象监测系统的地域特性,系统选用太阳能供电,但现有太阳能供电系统不稳定,针对此,系统设计了设备电量识别前端以最优系统能耗。

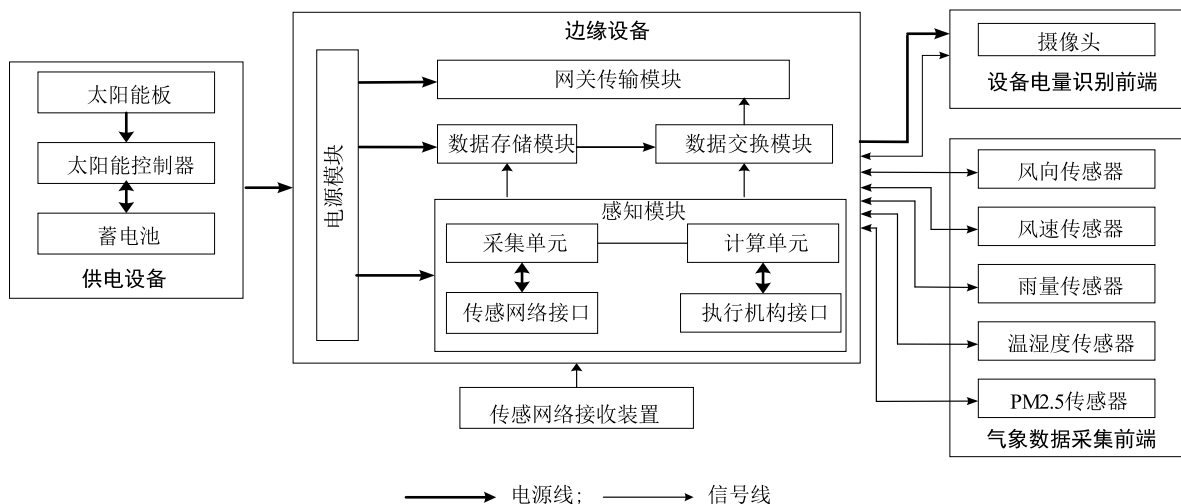


图 2 系统结构

Fig.2 System structure

2.1 气象数据的实时采集与处理

2.1.1 气象数据实时采集 气象数据采集前端主要是依靠各种类型传感器实现农业气象各参数的感知,本研究中依据成熟型原则、通用性原则对传感器选型和组网,即优先使用较为成熟的技术,不同型号的传感器具有可替代性,方便系统的推广和维护,各传感器型号如表 1 所示。

现有的传感器多样性和现场布线的复杂性决定了 CPS 系统物理层中传感网的重要性,无线传感网即利用短距离无线通讯技术连接多个传感器,实现多个传感器的融合。综合考虑,我们选用通信距离较长,功耗较低的 Zigbee 短距离传输技术组建气象传感网络,以网关 Zigbee 模块为核心,采用星型连接方式连接各气象传感器,实现数据的短距离无线传输。

表 1 传感器型号

Table 1 Sensor type

指标	型号
温湿度	DH T22
风向	HS-FX04
风速	HS-FS04
雨量	TYL-R410
可入肺颗粒物 PM2.5	HSTL-BYX

网关模块是整个系统的协议转换和传输中枢模块,网关核心控制板采用 M287,采用嵌入式 linux 操作系统,网关采用三进程并发执行,网关通电后,建立 Zigbee 传感网络并启用监听,接收来自气象采集前端的数据包,进行分析、解压、融合数据后通过消

息发布模式发送至云服务器,并将数据包通过 Zigbee 网同步至气象采集前端,使其与网关时间同步后进入休眠模式,降低功耗;网关通过龙尚 U8300GPRS 模块进行网络连接,并与云服务器建立 MQTT 连接,通过消息订阅模式接收来自云服务器的决策命令;网关同时通过摄像头模块进行太阳能

控制器的指示灯图像采集并进行图像处理,降低系统功耗。网关工作流程图如图 3 所示,实现采集前端-Internet 的协议转换和决策同步,满足网关设计的多模态性和自适应性。

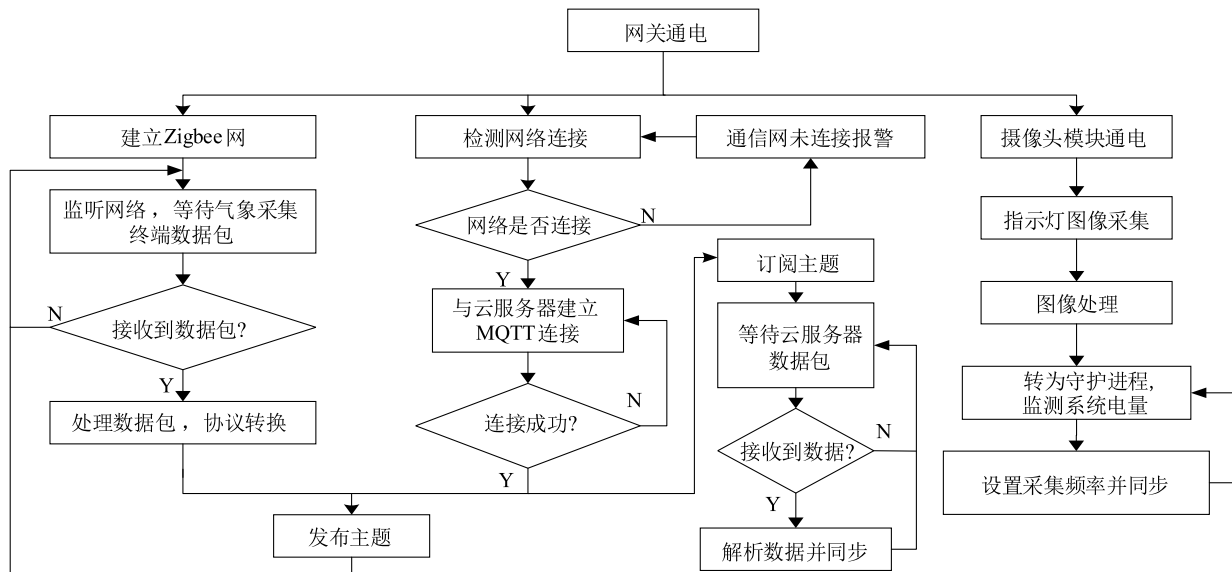


图3 边缘设备流程图

Fig.3 The flow chart of edge equipment

2.1.1.2 气象数据平滑处理 气象数据的采集精度和正确性是气象观测和调控的前提条件,而我们在实际工程中发现,数据采集精度往往会受到传感器工作状态、采集电路性能等其他因素的影响,同采样周期内的数据往往出现较大波动点,我们在网络边缘和云平台应用了数据平滑滤波来减少非环境因素带来的数据毛刺。

为减少云平台数据负担,降低网络传输量,我们在边缘设备上数据进行预清洗,主要做两方面的工作:1.缺失数据处理,假设 r_{it} 为缺失数据,则令 it 时刻的数据等于前一采样时刻的数据。2.异常数据处理,当相邻 2 个时刻的采样值大于某定值时,则认为数据异常,令 $r_{it} = r_{t(i-1)}$ 。

在网络边缘处的数据预清洗在一定程度上剔除了气象时间序列中的较大离异值,规避了由传感器故障、协议转换丢包带来的数据缺失或者异常影响平滑效果。

在此基础上,考虑到气象时间序列一般多为低频信号,为了滤除高频干扰信号,设计一阶低通滤波器如下:

$$f(z) = \frac{T_s}{f_c(1-z^{-1}) + T_s} = \frac{1-\alpha}{1-\alpha z^{-1}} \quad (8)$$

$$\text{其中 } \alpha = \frac{1}{1+f_c T_s} \quad (9)$$

选择滤波器当前时刻和前一时刻的权重系数,利用气象测试点环境因子的幅频特性曲线,进一步求得信号截止频率 f_c ;存档周期 T_s 为 60 s,则

$$f_c = 4.2 \text{ mHz} \quad (10)$$

$$\alpha \approx \frac{1}{1+f_c T_s} = 0.7987 \quad (11)$$

在一个存档周期内对所有采样数据预清洗后取平均值,利用一阶滤波器对其进行平滑滤波。图 4 是 2017 年 9 月 12 日 7:00-11:00 测试站点温湿度数据平滑节点,可以发现,该方法一定程度上规避了较大误差,实现了数据平滑。

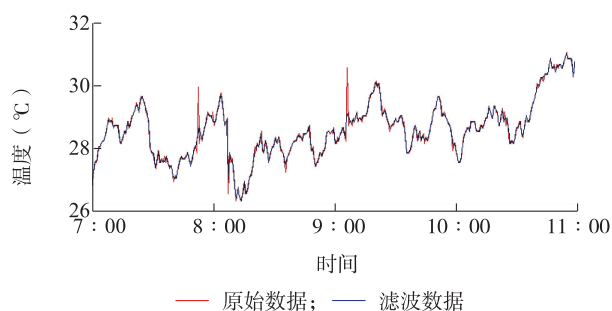


图 4 数据平滑结果

Fig.4 Smooth result of data

2.2 基于 MQTT 的异步数据交换

气象监测系统一般应用于通讯受限的室外环境, CPS 边缘设备一般多为资源有限的嵌入式设备, 且应用层用户端需要实时显示当前基站气象信息和设备状态信息, 且涉及到大量的历史数据查询、报表分析、参数设置、设备控制等操作。这就要求系统具有一定的异步数据交换能力并保证实时性。

在数据交换格式上, 本系统采用 JSON 格式进行气象数据的封包和解包, 相比于 XML 格式, JSON 文件格式简单, 传输带宽小, 客户端 JavaScript 可

以通过相关函数直接解析, 对于数据传输当量较小的 CPS 系统, JSON 格式实际应用更为出色。

在网络传输协议上, 现有的 CPS 系统网络层协议会产生相当大的信息数据量, 网络开销大, 且对室外环境下的网络带宽有一定要求。本研究采用的 MQTT 协议是 IBM 公司在 1999 年公布的轻量级即时通信协议, 是连接网络层的关键成分^[17]。它是基于 C/S 模式的消息传输协议, 几乎能应用于大部分环境包括一些受限的通讯环境, 多在一些嵌入式设备中, 占用内存小, 对带宽也无特殊要求。该协议通过订阅发布主题模式实现消息的传输, 能够实现单设备到服务器的一对一传输和服务器到多设备的一对多传输, 有效实现了设备间的信息分级管理。同时该协议提供了 3 种服务质量等级的信息发布模式, 能够满足用户对信息不同安全等级要求的数据发送和应答机制。

图 5 是该系统的数据交换时序图, 利用 JSON 格式将气象数据进行封包, 同时网关与 MQTT 服务器建立连接并发布相关主题, 用户端则通过订阅相关主题接收数据并解包存入数据库, 实现实时数据更新。

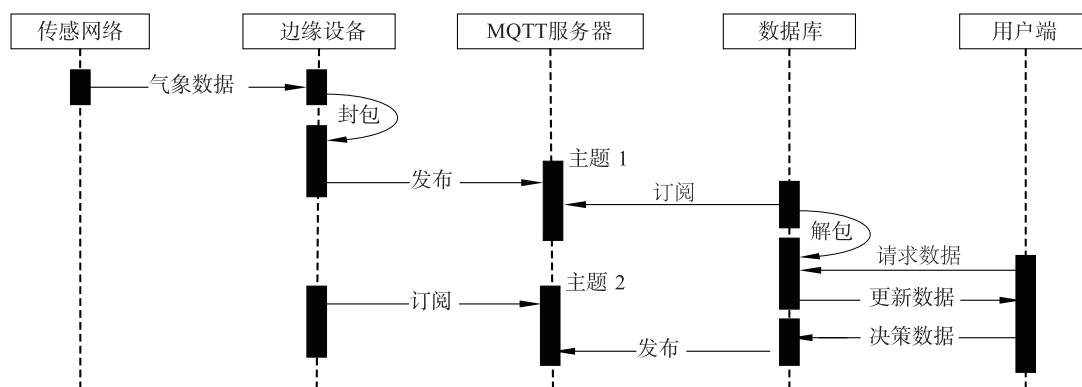


图 5 异步数据交换时序图

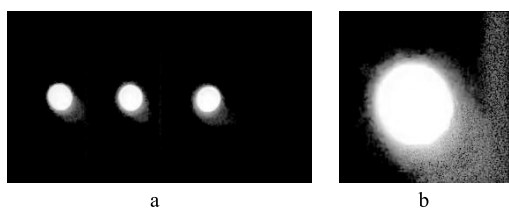
Fig.5 Asynchronous data exchange timing diagram

2.3 基于卷积神经网络的设备电量识别

小型农业气象站的功耗问题是工程应用中的关键性问题。设备功耗主要包括传感器功耗和边缘设备功耗, 而这两者与采样频率和网络传输频率紧密相关。针对此, 本研究设计了一套基于卷积神经网络 (Convolutional neural network, CNN) 的电量识别功能 (简称 Pow-Fre), 即在用户无采样周期特殊需求时, 系统通过摄像头模块对电量指示灯图像取样处理后判别系统剩余电量, 并依据电量自适应调节

采样周期功能以最小化设备功耗。

太阳能控制器共 4 个绿色指示灯, 亮灯数目与系统剩余电量成正比, 如系统电量为 75%~100%, 3 个电量指示灯会被点亮, 如图 6a (灰度图) 所示。图 6b 是人工选定的一个指示灯区域的灰度图像, 可以看到, 虽然控制箱内指示灯受外界光源干扰较少, 但指示灯图片仍受到其他设备灯光和外部较杂光线的干扰, 存在一些噪点, 很难找到一个合适的检测算子来判别电量指示灯亮灭。



a:多指示灯;b:单指示灯。

图6 指示灯灰度图

Fig.6 The gray scale of indicator

根据以上分析和指示灯图像特点,本研究选用卷积神经网络对系统进行电量识别。卷积神经网络是继反向传播神经网络后提出的多层感知器^[18-19],相比于BP神经网络,其通过感受野和权重共享减少了学习参数,使得它更受益于海量参数的图像处理。

网络结构与参数如图7a所示。主要包括2个卷积层(Convolution layer)、2个池化层(Pooling layer)、4个激活层(Activation layer)、3个降采样层(Dropout layer)以及1个扁平化全连接层(Flatten)和1个全连接分类器层(Classifier)。

假设 H_i 是卷积层, H_i 的产生过程可以描述为:

$$H_i = f(H_{i-1} \otimes W_i + b_i) \quad (12)$$

其中: W_i 表示第 i 层卷积核的权重矩阵;运算符号 \otimes 代表卷积核与第 $i-1$ 层图像或者特征进行卷积操作,卷积的输出与第 i 层的偏移向量 b_i 相加,最终通过非线性激活函数 $f(x)$ 得到第 i 层的特征 H_i 。卷积层之后是下采样层,依据一定的池化规则对特征图进行采样。下采样层的功能主要有两点:1)降低特征图维度,一定程度上避免过拟合;2)提高平移/伸缩不变性。假设 H_i 是下采样层:

$$H_i = \text{subsampling}(H_{i-1}) \quad (13)$$

经过多层卷积和池化后的特征图由全连接层对特征进行提取和分类。

第一层卷积我们选用32个 5×5 的卷积核,在这一层我们倾向于选择较大的卷积核,以充分提取全局特征^[20-21]。第一层卷积后是 2×2 maxpool池化层,对特征进行压缩,防止过拟合;第二层我们将卷积核尺寸减少至 3×3 ,以充分保留图像局部特征,卷积核数量为64,卷积后接1个 2×2 池化层。之后,我们通过1个扁平化层将特征融合至单通道图像,Classifier是全连接层,也是该结构的分类层,它对图像特征进行分类,即实现图像-电量的对应关系,并

采用交叉熵评估损失。

Dropout参数取0.25,即在训练时将25%神经元以一定概率丢弃,从而防止过拟合。激活层函数为Relu和Softmax,初始学习率为0.01,学习衰减率为 $1e-6$,动量参数为0.85。我们共收集了2134个指示灯图像样本,对图像预处理后以32张图为1个训练批次(batch),利用随机梯度法对模型进行训练,每一个batch进行依次权重更新,共进行了30轮(epoch)训练。

按照交叉验证的思想,将2132个图像样本按照8:2分为训练集1700个和测试集432个,在Linux下搭建谷歌开源的深度学习框架Tensorflow^[22],对1700个训练集进行训练,在测试集上对训练结果进行验证,结果如图7b所示。损失函数在30 epoch后收敛并最终降至0.0212,识别准确率稳定在97.45%,由此可见,该模型能够应用于系统指示灯识别。

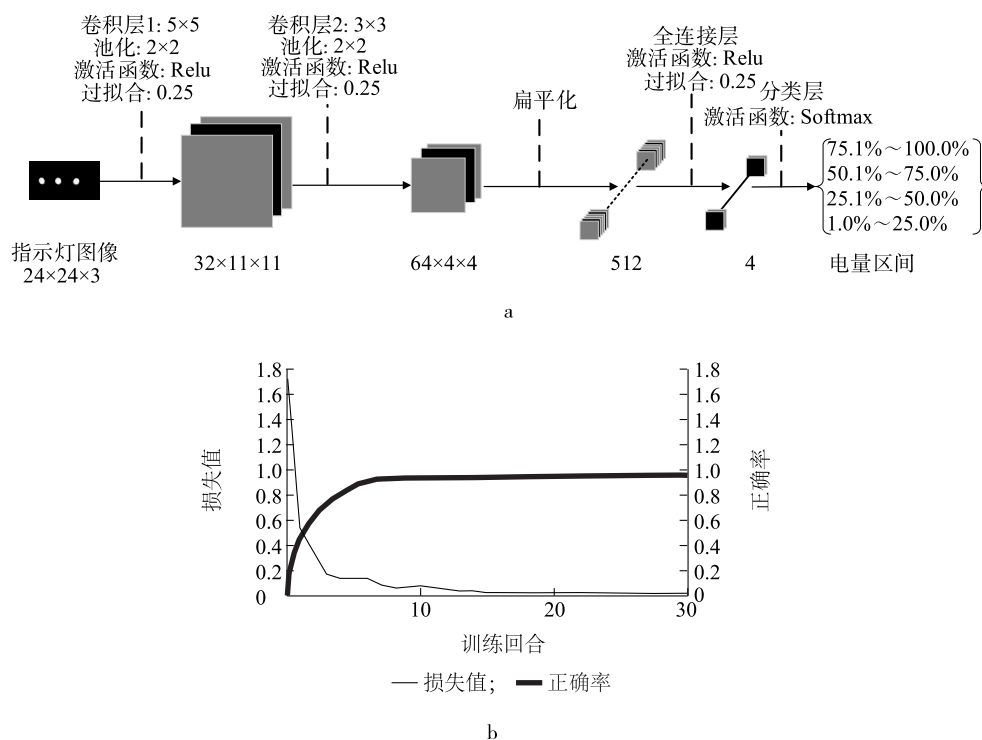
为了减少系统能耗,训练这一阶段我们并不是在嵌入式设备上完成的,而是在本地服务器上训练后得到CNN权重模型,通过在边缘设备的计算单元下的嵌入式Linux中搭建Tensorflow框架,并调用服务器的CNN模型,每次识别时,控制箱内的摄像头只需一次采样,并调用模型即可得到电量情况,进一步节省了能耗。

3 系统性能测试

本研究系统于2017年6月23日在河北工业大学试验点搭建成功并试运行。试运行结果表明,系统能够实现气象数据的实时采集和传输,并通过控制箱内的微型摄像头感知系统电量并根据电量自适应调节采集频率。本研究将分别针对系统实时性、稳定性、能耗情况进行测试,同时还将不考虑时空属性的传统物联网监控方法同本研究提出的方法进行对比试验。

3.1 延时测试

系统在进行异步数据交换时均存在一定的延时,主要表现在2个方面:(1)传感网络间的数据传输延时;(2)传输层传输节点网络传输延时。前者与传感设备、传感网节点模块性能有关,不在本研究的讨论范围内。本测试主要针对第二种延迟测试,即测试本研究所提出的轻量级MQTT协议在受限网络环境下的传输延时。



a: 网络结构; b: 训练结果。

图 7 CNN 结构及训练结果

Fig.7 Convolutional neural network (CNN) structure and training results

在不同的采样周期下,由边缘设备发送一组测试气象数据包,并进行 100 次重复试验取平均延时。考虑到边缘设备和服务器时间同步问题,本试验中以边缘设备时间为基准,边缘设备在发布数据包的同时,自身订阅该数据包主题,同时数据包发布时自带时间戳,即可测试数据包由发布至订阅的一个循环内网络传输延时,该值的一半即为传输层网络延迟。如图 8 所示,当采样周期过小时,系统资源受限,一定程度上限制了 MQTT 传输性能。该系统最大延时 60 ms,最小延时 24 ms,平均延时 33.67 ms,延时标准差 13.18 ms,系统基本无延时,具有较高的实时性。

3.2 丢包测试

信息物理系统丢包现象主要表现在 3 个方面:(1)传感网络间的节点传输数据丢失;(2)采集单元与传感网络交互中数据丢失;(3)物理层与传输层间数据传输的丢包现象。一般来说,前 2 种情况的丢包现象可以通过统计数据包中的序列号字段来判断丢包现象并启用数据重发。本测试主要针对第三种传输层网络传输时的丢包现象。

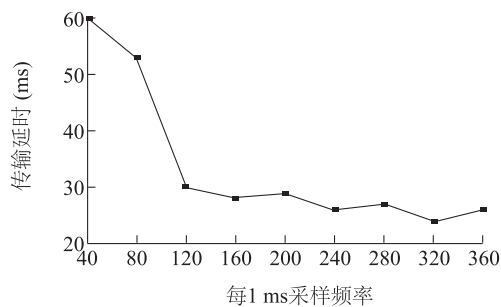


图 8 延迟测试结果

Fig.8 Results of delay test

边缘设备进行 500 次数据发布并统计丢包现象。如图 9 所示,当采集频率在 1 ms 以内时,丢包现象严重,丢包率在 5.5% 左右;当采集频率为 1~80 ms,丢包率呈现递减趋势;当采集频率在 70 ms 以上时,丢包率在 0.1% 以下,系统表现出较好的稳定性,满足 CCSA 标准,采样周期符合实际应用。

3.3 能耗分析

考虑到系统多应用于能耗受限的农业环境,本研究在应用太阳能供电的基础上,开发了 Pow-Fre 功能,以减少高频率采样带来的过高能耗。但 Pow-

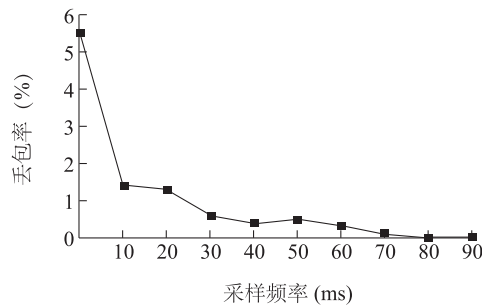


图9 丢包测试结果

Fig.9 Results of packet loss test

Fre 技术在一定程度上同时增加了系统能耗,针对此,本研究设计了能耗试验并对比分析 Pow-Fre 功能带来的能耗收益。

在停用太阳能板供电的基础上,设定初始采样周期 30 s,初始蓄电池满容量 10 Ah,在电池电量逐级下降至 75%、50%、25%时,采样频率减半。我们分别测试了有无 Pow-Fre 时的系统能耗情况,测试结果如图 10 所示。

测试结果表明,对于无 Pow-Fre 功能的系统,电量在第 4 d 耗尽。而加入了 Pow-Fre 后,虽然在高电量时, Pow-Fre 功能带来了一定的无用功电量损耗,但可以明显看出低电量时, Pow-Fre 功能带来的能耗收益远大于其自身能耗,系统运行时间延长 80%左右。

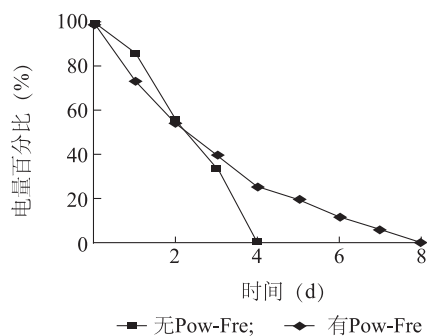


图10 能耗对比结果

Fig.10 Results of energy consumption comparison

3.4 时空同步性能

考虑到室外测试点执行器对环境作用不大,本试验选取 10 m²的室内环境,在室内部署了 1 组采集单元节点和 2 组计算单元节点。每组采集单元节点下部署了 5 种气象传感器,分别为温湿度传感器、雨量传感器、PM2.5 传感器、风向传感器、风速传感器,每组计算单元节点下有 2 个执行器,分别为加湿器和加热器。云服务器部署一个云计算节点负责全局

决策。试验对温度、湿度 2 个参数进行调控,分别设定阈值 25 ℃,30%,当外界环境参数低于阈值的时候,需要打开相应的执行器。

本测试中事件属性集中参数低于阈值取 1,否则取 0;执行器属性集 *Varar* 中 1 表示开启执行器,0 表示关闭执行器,执行器可信度 100%;节点事件阈值为 1 min,状态机转换函数中时间、空间、属性操作函数依次为取均值、取交集、取并集操作。我们测试了 2017 年 6 月 18 日 6:00–22:00 系统监控情况,共产生了 1 211 个控制事件,同时,我们还将不考虑时空属性的物联网系统同本系统在时空同步上的表现进行对比分析。

我们统计了 CPS 系统和物联网系统中的错误控制事件,错误控制事件又分别消极操作和激进操作。消极操作表示需要操作执行器的时候执行器无响应;激进操作表示不需要操作执行器的时候执行器过响应,测试结果如表 2 所示。

表 2 可以看出,由于物联网系统忽略了物理进程的时空属性,物联网系统收到的超时信息会导致执行器的误操作,而信息物理系统通过事件驱动的闭环回路保证了物理进程和信息进程的精准同步和并发性。

表2 时空同步性能对比

Table 2 Performance comparison of spatiotemporal synchronization

系统	控制错误率 (%)	消极操作率 (%)	激进操作率 (%)	响应时间 (ms)
信息物理系统	8.7	5.9	2.8	34
物联网系统	18.3	11.2	7.1	87

4 系统展示

图 11 是我们在河北工业大学湖边的测试点部署的中小型农业气象站,用于测试系统的稳定性、实时性和节能性。遗憾的是,在该测试点,执行器对环境的改变微乎其微,我们只是预留了执行器接口,但并未部署相应执行器。我们进一步在 10 m²室内部署了该系统和相应执行器来模拟温室大棚环境下系统在感知和控制上的时空同步性能。图 12 是中小型农业气象站应用层 APP 界面,通过 APP 能够帮助农业气象从业人员实时了解到农田、温室等处的气象信息,同时也能够通过 APP 远程操控以规避不必要的农业损失。



图 11 测试点系统部署

Fig.11 System deployment in test point



气象站实时数据
 风向: Westnorth
 风速: 3.3 m/s
 雨量: 0 mm/min
 气温: 28.0 °C
 湿度: 26.0% RH
 PM2.5: 1.9 µg/m³

图 12 农业气象站 APP

Fig.12 APP for agro-meteorological station

5 讨论

本研究提出了一种基于事件驱动的 CPS 建模方法,并应用于农业气象监测系统。该系统解决了传统物联网系统在复杂性节点、采集精度、异步数据交换等方面的一些关键性问题,在分析系统能耗的基础上提出了基于卷积神经网络的 Pow-Fre 技术。试验结果表明,系统具有较好的实时性、稳定性、时空同步性和节能性,在农业气象监测方面具有较强的推广价值。遗憾的是,该系统在测试阶段虽然预留了执行器接口,但受到条件限制,系统并没有结合具体的农业环境(农田小气候、温室大棚等)进一步优化控制策略,下一步我们的研究工作将聚焦于这一方面。

参考文献:

- [1] 王春乙,张继权,霍治国,等. 农业气象灾害风险评估研究进展与展望[J]. 气象学报, 2015, 73(1):1-19.
- [2] 武永峰,宫志宏,刘布春,等. 基于远程监控的农业气象自动采集系统设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10):174-179.
- [3] 曹宏鑫,葛道阔,曹 静,等. “互联网+”现代农业的理论分析与发展思路探讨[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(2):314-321.
- [4] 纪建伟,赵海龙,李征明,等. 基于 STM32 的温室 CO₂ 浓度自动
- 调控系统设计[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(5):860-864.
- [5] 韩怀阳,王俊飞. 虚拟仪器技术的农田气象信息远程监测系统开发探析[J]. 气象研究与应用, 2015, 36(2):78-81,84.
- [6] HARTUNG C, HAN R, SEIELSTAD C, et al. FireWxNet: a multi-tiered portable wireless system for monitoring weather conditions in wildland fire environments[C]. New York:ACM, 2006:28-41.
- [7] 郭志伟,张云伟,李 霜,等. 基于 GSM 的农田气象信息远程监控系统设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3):161-166.
- [8] 廖建尚. 基于物联网的温室大棚环境监控系统设计方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11):233-243.
- [9] 叶宏宝,徐志福,石晓燕,等. 设施农业环境智能监控管理平台设计与实现[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(2):467-472.
- [10] 周兴社,杨亚磊,杨 刚. 信息-物理融合系统动态行为模型构建方法[J]. 计算机学报, 2014, 37(6):1411-1423.
- [11] LIU Z, LIU J, HE J, et al. Spatio-temporal UML Statechart for Cyber-physical Systems[C]. Piscataway:IEEE, 2012: 137-146.
- [12] TAN Y, VURAN M C, GODDARD S, et al. A concept lattice-based event model for cyber-physical systems[C]. New York : ACM, 2010: 50-60.
- [13] MA Z FU X, YU Z. Object-oriented Petri nets based formal modeling for high-confidence cyberphysical systems[C]. Shanghai :Networking and Mobile Computing, 2012:1-4.
- [14] 王浩云,刘佼佼,侯思宇,等. 信息物理系统(Cyber-physical system)时空建模方法及在温室控制中的应用[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15):183-190.
- [15] 王 云,刘 东,陆一鸣. 电网信息物理系统的混合系统建模方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6):1464-1470.
- [16] PATRICIA D, EDWARD A L. Alberto sangiovanni vincentelli. Modeling cyber-physical systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100:13-28 .
- [17] KIM S M, CHOI H S, RHEE W S. Iot home gateway for auto-configuration and management of MQTT devices [C]. Piscataway: IEEE, 2015: 12-17.
- [18] LE CUN Y, BOSER B, DENKER J S, et al. Backpropagation applied to hand-written zip code recognition [J]. Neural Computation, 1989, 1(4): 541-551.
- [19] ABDEL-HAMID O, MOHAMMED A, JIANG H, et al. Convolutional neural networks for speech recognition [J]. IEEE/ACM Transactions on Audio Speech & Language Processing, 2014, 22(10):1533-1545.
- [20] 常 亮,邓小明,周明全,等. 图像理解中的卷积神经网络[J]. 自动化学报, 2016, 42(9):1300-1312 .
- [21] ZEILER M D, FERGUS R. Visualizing and understanding convolutional networks [C]. Berlin: Springer, 2014:818-833 .
- [22] SILVERD, HUANGA, MADDISON C J, et al. Mastering the game of go with deep neural networks and tree search[J]. Nature, 2016, 529(7587): 484-489.

(责任编辑:陈海霞)