

基于物联网的温室智能监控系统设计*

秦琳琳 陆林箭 石春 吴刚 王云龙

(中国科学技术大学自动化系, 合肥 230026)

摘要: 根据现代温室监控与管理需求,基于物联网技术框架,设计并实现了一种基于物联网的温室智能监控系统。系统由现场监控子系统、远程监控子系统和数据库3部分组成。采用基于分布式CAN总线的硬件系统实现环境数据的实时采集与设备控制,将分布图法应用于采集系统离异数据的在线检测。为了提高远程监控子系统的响应速度与交互性,采用了基于异步JavaScript和XML技术(Ajax)的Web数据交互方式。结合温室环境调控的特点,将基于混杂自动机模型的温室温度系统智能控制算法应用于实际系统,实现了温室环境的自动调控。为保证设备控制的安全性,采用轮询法实现了现场监控子系统和远程监控子系统中设备状态的同步,并将基于Zernike矩的图像识别技术应用于双向型设备的状态检测,实现设备的自动校准。试验表明系统数据传输稳定,环境调控可靠,满足现代温室智能监控的需求。

关键词: 温室 物联网 智能监控 混杂自动机 Zernike矩

中图分类号: S126; S625.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0261-07

Implementation of IOT-based Greenhouse Intelligent Monitoring System

Qin Linlin Lu Linjian Shi Chun Wu Gang Wang Yunlong

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: According to the monitoring and management needs of the modern greenhouse, a modern greenhouse intelligent monitoring system was designed based on the internet of things. The system was consisted of local monitoring subsystem, remote monitoring subsystem and database. The local monitoring subsystem was developed under the construction of Client/Server, but the remote monitoring subsystem with the construction of Browser/Server, and the database is the bridge between them. The hardware system based on distributed CAN bus was applied to realize the real-time greenhouse environment data acquisition and equipment control. Also, the error data of the data acquisition system was on-line checked by distributing diagram. In order to improve the response and interactivity of the remote monitoring subsystem, the Ajax-based Web data interactive way was applied. Combing the devices' features, the temperature system intelligent control based on hybrid automata was applied to realize the automatic control of the greenhouse environment. The image recognition technology based on Zernike moments was applied to realize the automatic calibration. The infrared network camera was used to acquire the real-time images of the ventilation, and Zernike moments were utilized to extract the image features, identifying the current state of ventilation by comparing with the pre-set states of the system. Then the runtime could be calculated from the current state to full closed state of the ventilation. The tests showed that the system could provide stable data transmission and reliable control, satisfying the intelligent monitoring of the modern greenhouse.

Key words: Greenhouse Internet of things Intelligent monitoring Hybrid automata Zernike moments

引言

近年来我国设施园艺快速发展,截至2012年,栽培面积已达到了362万 hm^2 ,占世界的89.3%;其中代表设施园艺现代化水平的玻璃温室面积接近9000 hm^2 ,占世界玻璃温室面积的22.5%^[1]。温室环境监控系统是提高温室作物产量、减少劳动力成本的关键技术,代表了温室生产的核心竞争力。随着传感器技术、计算机控制、网络通信以及物联网等技术的快速发展,融合了上述高新技术的智能监控系统逐渐被应用到温室监控领域^[2-3]。但是,上述系统主要侧重于单栋温室环境信息的获取和对设备的简单控制,其智能化程度不高、通用性不强,且难以扩展应用于大型连栋温室群的环境调控。而国内温室建设恰恰是以多栋温室构成的温室群为主,在这种新形势下,要求当前温室智能监控系统在软硬件的设计上,要基于统一的农业物联网技术框架,在保证设备控制安全性的前提下,将环境智能调控算法应用到温室实际生产管理中,构建出扩展性高、通用性强的温室环境智能监控系统。

物联网(Internet of things, IOT)是传感器、互联网和信息处理技术高度融合的新一代信息技术,在设施农业中有广泛应用,近年来主要在现代温室环境监测与调控、产品溯源和病虫害诊断等方面取得重要进展^[4-6]。而以物联网技术框架为基础的现代温室智能监控系统,注重全面感知、稳定传输和智能应用3个方向,且系统易于扩展,应用性强,是现代温室智能监控系统的主要发展方向^[7-8]。

本文在前期研究成果^[9-10]的基础上,设计并实现一种基于物联网的温室智能监控系统。该系统不仅能够实现温室环境参数的自动采集、实时显示、可视化的数据查询与分析,尤其能够监视现场设备的工作状态、实现智能控制,并结合温室设备的工作特点,将基于混杂自动机模型的温室温度系统智能调控算法应用到环境调控中,实现温室设备的智能控制。将基于Zernike矩的图像识别技术应用于设备状态的检测,实现设备的自动校准,充分利用Ajax技术,实现环境数据与设备状态的实时更新与同步。

1 系统总体框架

现代温室智能监控系统主要由现场监控子系统、远程监控子系统和数据库3部分构成,如图1所示。各子系统设计中相对独立,依赖聚合性较低,具有良好的可扩展性、可操作性和应用性。

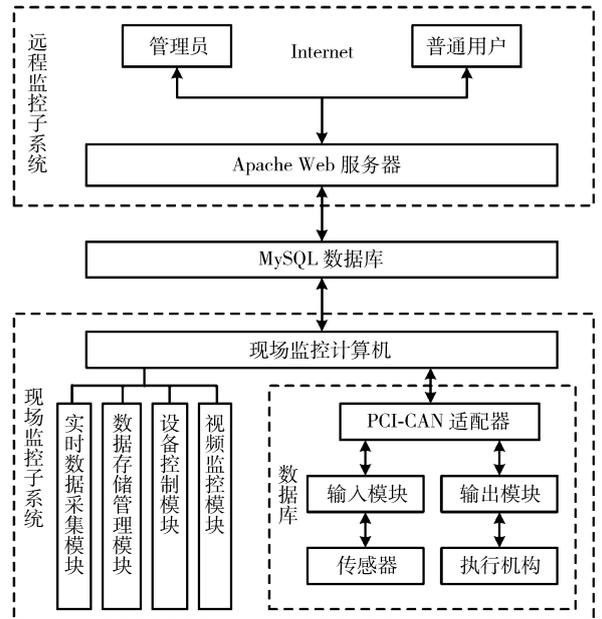


图1 系统总体框图

Fig.1 Structure diagram of system

1.1 现场监控子系统

现场监控子系统为C/S架构,现场监控计算机上运行的监控软件通过CANOpen协议和基于分布式CAN总线的温室数据采集与控制系统通信,实现对温室主要环境因子的采集和设备的控制。输入模块接收传感器采集的温室小气候环境因子(空气温度、湿度、太阳辐射等)和室外气象信息(空气温度、湿度、风速、风向、光照强度等),将它们发送到CAN总线上,现场监控计算机通过CAN通信卡接收这些数据并实时显示,同时存储到数据库中。输出模块通过CAN总线接收来自现场监控软件的控制信号,控制继电器的动作,继电器的相应动作控制着温室环境调控设备(风机、天窗、湿帘、遮阳网等)的启停。

现场监控子系统还具备数据查询与导出、视频监控、报警提示、设备状态的自动校准、监听控制指令以及远程监控子系统同步温室设备状态的功能。

1.2 远程监控子系统

远程监控子系统为B/S架构,由数据获取层、逻辑应用层和表现交互层构成,实现温室信息的获取、控制命令的下达,并提供快捷友好的用户交互逻辑,具有用户注册管理、实时环境信息预览、历史数据查询与导出、设备远程控制、视频监控等功能,使身处异地的科研和管理人员可以方便地获取温室环境信息,提供监控手段,增强其能动性与干预能力。

1.3 数据库

数据库介于远程监控子系统和现场监控子系统之间,是它们通信的桥梁。现场监控子系统将处理

过的实时环境数据、设备状态信息以及设备控制日志等存储到数据库中,供用户进行历史查询与分析。远程监控子系统一方面将数据库中存储的信息展示给远程用户,另一方面将远程用户的控制命令写入数据库的控制决策表,现场监控子系统实时轮询控制决策表,实现对温室设备的控制。

2 系统实现及关键技术

2.1 温室环境数据实时采集与处理

温室环境数据的实时采集与处理是现场监控子系统的主要功能。温室环境数据的采集精度及正确性对温室环境建模与调控具有重要影响。由于数据采集会受到传感器精度、测量电路性能等其他因素的影响,所以对数据要进行平滑处理。首先采用分布图^[11]法剔除数据序列中的离异值,以避免由传感器故障、网络传输等因素产生的异常数据影响平滑效果。由于温室环境因子多为低频信号,为滤除高频干扰信号,设计一阶型滤波器,即

$$f(z) = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}} \quad (1)$$

$$\alpha = \exp\left(-\frac{T_s}{T_f}\right) \approx \frac{T_f}{T_f + T_s} \quad (2)$$

选择滤波器所需的系数向量 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} 。输入室内外环境因子的幅频特性曲线,可以获得信号的截止频率 $f_c = 7.5 \text{ mHz}$, $T_f = \frac{1}{f_c} = \frac{1}{7.5 \text{ mHz}} = 133.33 \text{ s}$, 采样周期 $T_s = 30 \text{ s}$, 因此, $\alpha \approx \frac{T_f}{T_f + T_s} = \frac{133.33}{133.33 + 30} = 0.8163$ 。

数据采集系统的采样周期为 1 s , 为了保持较高的信噪比, 设定数据存档周期为 30 s 。对这 30 个样本点采用分布图法检测疏误差, 将剔除离异值后的 30 个样本点的算数平均值作为当前时刻的采样数据, 并应用一阶低通滤波实现数据平滑。图 2 是 2014 年 4 月 2 日 9:00—21:00 温室内湿度数据处理结果, 由图可见该方法能够有效剔除疏误差, 实现数据平滑。

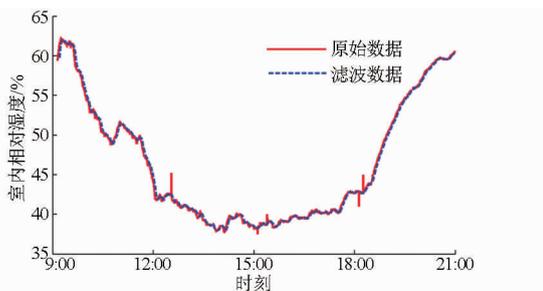


图2 数据处理结果

Fig. 2 Results of data processing

2.2 基于 Ajax 技术的异步数据交换

远程监控子系统中需要实时显示当前温室环境数据和设备状态信息, 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, 本文采用基于 Ajax 技术的异步数据交互方式构建远程监控子系统能够为用户提供流畅的数据交互体验, 且能够降低服务器负担, 提高网络传输效率^[12]。

如图 3 所示, 远程客户端浏览器中 JavaScript 定时调用 SetInterval 函数, 不断触发 Ajax 引擎, 向 Web 服务器发出数据更新请求, 服务器查询数据库中的最新的环境数据并以 JSON 格式回传给前台页面, 从而实现温室环境数据的实时更新。

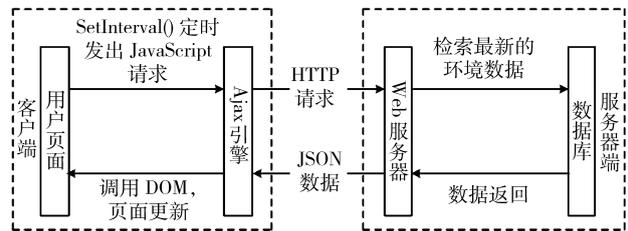


图3 系统 Ajax 请求过程

Fig. 3 Request process of Ajax

2.3 设备控制

2.3.1 设备状态的实时同步

现场监控子系统和远程监控子系统都能实现对温室环境调控设备的控制, 因此当某一子系统改变了设备的状态时, 需要及时通知对方, 保证两个子系统中设备状态信息的实时同步, 才能确保控制指令的正确性与安全性。

实现两个子系统中设备状态同步的方法主要有两种: 一种是服务器推 (Server push) 技术, 即当现场监控子系统改变了设备状态时, 服务器主动向 Web 远程客户端发送信息; 另一种是 Web 客户端不断向服务器发起请求, 查询是否有设备状态改变, 即轮询法。基于 Flash 的 XMLsocket 接口设计的服务器推框架需要浏览器安装有 Adobe Flash 播放器。这一方面需要用户同意安装, 引起不便; 另一方面, 有些客户端设备不支持 Flash 播放器。考虑到实际使用情况下温室远程监控子系统不会有大量并发用户, 因此本系统采用轮询来实现设备状态的实时同步。

数据库中记录有当前各个执行设备的工作状态, 并设有相应的标志位。当现场监控子系统改变了设备状态时, 会将相应的信息写入数据库, 并标志位置位。远程客户端以 1 s 的频率不断向服务器发起请求, 查询是否有设备状态改变。从而实现两个子系统中设备状态的实时同步, 确保控制指令的正确性与安全性。

2.3.2 控制逻辑

系统中设备的控制模式分为手动控制和自动控制,可以在两种控制模式中自由切换。手动控制既可在现场监控子系统中,也可以在 Web 远程客户端上实现,而智能控制算法只在现场监控子系统中运行。手动控制过程如图 4 所示,控制指令可能来自远程客户端也有可能在现场实施。当实施远程控制时,系统将远程控制指令写入数据库,现场监控软件读取到远程端的控制指令,调用相应的控制子函数对设备实施控制,并将更新后的设备状态写入数据库,远程客户端读取到回传的设备状态,更新页面,从而完成对设备的控制。当实施现场控制时,控制指令直接下达给现场监控软件,调用相应的控制子函数实现对设备的控制,设备状态改变后同样回传给远程客户端。



图 4 手动控制流程

Fig. 4 Manual control process

2.3.3 试验温室温度系统智能控制

温室小气候环境具有大时滞、强耦合、非线性的特点,其建模与控制方法由最初的基于能量和物质平衡的机理建模法^[13]到线性、非线性模型的系统辨识法^[14-16]再到现代智能控制方法^[17-19]。目前,国内现代温室的控制设备主要采用开关控制,控制变量是离散的,而扰动输入变量是连续的,温室环境系统是一个典型的混杂动态系统。混杂自动机模型^[20]是描述混杂动态系统的有效工具之一,本文借助混杂自动机建模与控制的相关理论,设计了温室温度系统智能控制方法。混杂自动机的一个离散状态也称为一种模式,每一种模式对应一个子系统,在该子系统下,调控设备按照算法要求,被控制在确定的工作状态。表 1 为温度系统的混杂自动机模型模式分配,通过天窗、风机、湿帘和遮阳网的开关组合来调节室内温度。

依据表 1,建立温度系统混杂自动机状态转移图,如图 5 所示。

图 5 中, x 和 t_{out} 分别表示温室内、外温度, T_u 、 T_l

和 T_b 分别是温度系统模式切换的上、下限设定值和温室内温度期望设定值, ΔT 是切换阈值。设定值根据季节、气候条件、一天中不同时间段以及作物品种、生长阶段等情况,由作物栽培专家给出设定值曲线。 $\dot{x} = f_n(x, u)$ 用来描述每一种模式下的连续动态子系统,可采用自回归滑动平均模型来描述温室温度系统混杂自动机模型的连续动态特性^[15]。

表 1 温度系统混杂自动机模型模式分配

Tab.1 Hybrid automata modes of temperature system

模式	含义	调控设备状态
Q_0	保护模式	风机关、湿帘关、天窗关、遮阳网不展开
Q_1	保温模式	风机关、湿帘关、天窗关、遮阳网展开 40%
Q_2	自然通风	风机关、湿帘关、天窗开、遮阳网展开 70%
Q_3	强制通风	风机开、湿帘关、天窗开、遮阳网展开 100%
Q_4	风机-湿帘	风机开、湿帘开、天窗关、遮阳网展开 100%

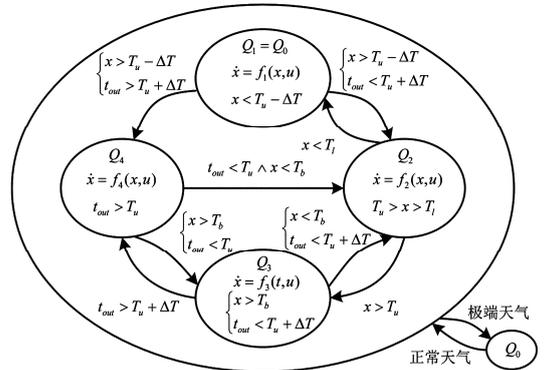


图 5 温度系统混杂自动机转移图

Fig. 5 Transition graph of greenhouse temperature hybrid automata

假设在正常天气条件下,系统初始化进入 Q_1 模式,此时根据切换律比较室内、外温度与设定值之间的关系来判断下一时刻切换到哪种模式下工作,即 (Q_1, Q_2) 、 (Q_1, Q_3) 或 (Q_1, Q_4) 。当遇到恶劣天气(大风、大雨等),无论模型处于哪一种模式下,均切换至保护模式 Q_0 ,待天气恢复正常后,重新进入正常模式。

温度系统切换上、下限分别设定 $T_u = 28^\circ\text{C}$ 、 $T_l = 24^\circ\text{C}$,切换阈值 $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ 。2014 年 4 月 1 日全天温室内温度智能控制效果如图 6 所示。图中状态 0、1、2、3、4 分别代表混杂自动机的运行模式 Q_0 、 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 。上午随着温度的升高,在 9:18 系统进入自然通风模式 Q_2 ,打开天窗降温,遮阳网展开到 70%;正午温度进一步升高,系统于 13:05 进入强制通风模式 Q_3 ,打开风机加强降温效果,同时遮阳网展开到 100%;达到降温效果后,在 14:08 再次转入自然通风模式 Q_2 ;傍晚随着温度的降低,17:50 系统进入保温模式 Q_1 ,同时遮阳网收回至 40%,由于温室中没有加温设备,夜间只能运行在保温模式。

图 6 试验结果表明,控制系统能够根据当前环境信息在不同的控制模式间自动切换,从而使温度保持在设定值范围之内。

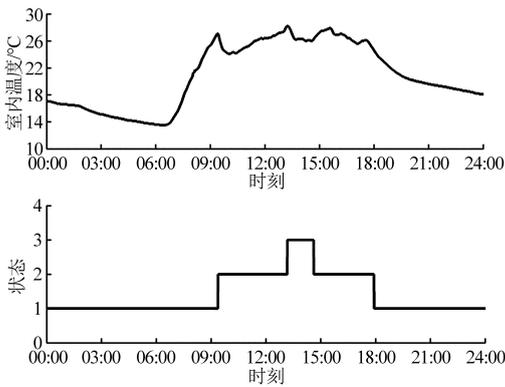


图 6 温度智能控制效果

Fig. 6 Results of temperature system intelligent control

2.4 基于图像识别技术的设备状态识别与校准

温室中的双向型设备无位置反馈装置,其运行以时间为基准,使用过程中外界因素(如用户手动操作)可能会导致设备的实际位置与控制系统识别记忆的位置有所偏差,设备自动校准的作用就是保证两者的一致性。

2.4.1 Zernike 特征矩

1980 年,Teague 在 Zernike 正交多项式^[21]的基础上首次给出了二维函数 $f(x, y)$ 重复率为 m 的 n 阶 Zernike 矩定义

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) V^*(x, y) dx dy \quad (3)$$

极坐标下 Zernike 矩的定义为

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 R_{nm}(\rho) e^{im\theta} f(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \quad (4)$$

其中 $V^*(x, y) = R_{nm}(\rho) e^{im\theta}$

式中 $V^*(x, y)$ ——Zernike 正交多项式

ρ ——原点到点 (x, y) 的矢量长度

θ ——轴 x 与 ρ 矢量在逆时针方向的夹角

$R_{nm}(\rho)$ ——点 (x, y) 的径向多项式

对于实二维图像,其 Zernike 矩 Z_{nm} 为复数,提取其实部和虚部分别记作 C_{nm} 和 S_{nm} ,并考虑到实际问题中处理的图像通常为数字图像,因此需要将原来的实部和虚部离散化,又因为 Zernike 多项式在单位圆内是正交的,需将所考虑的图像转化为单位圆内的极坐标形式,可以得到^[22]

$$C_{nm} = \frac{2n+2}{N^2} \sum_{r=1}^{N/2} R_{nm}(2r/N) \sum_{\sigma=1}^{8\eta} \cos \frac{\pi m \sigma}{4\eta} f(\eta, \sigma) \quad (5)$$

$$S_{nm} = \frac{2n+2}{N^2} \sum_{r=1}^{N/2} R_{nm}(2\eta/N) \sum_{\sigma=1}^{8\eta} \sin \frac{\pi m \sigma}{4\eta} f(\eta, \sigma) \quad (6)$$

对 C_{nm} 和 S_{nm} 求模可以得到 $|Z_{nm}|$, $|Z_{nm}|$ 可作为被识别图像的特征依据。

2.4.2 Zernike 矩在设备自动校准中的应用

系统中采用海康威视 DS-2CD3212D-15 型网络红外摄像机获取天窗实时图像,利用 Zernike 矩提取图像特征,通过与系统中预置的特征状态的 Zernike 矩的对比,识别出当前天窗状态信息,计算出从当前状态到完全关闭天窗需要的运行时间。

完整的设备校准周期为:校准指令、获取图像、图像规格化、图像灰度化、滤波去噪、提取 Zernike 矩、与预置状态对比、确定运行时间、关闭天窗。图 7 给出了天窗开度分别为 0%、50% 和 100% 时的实时图像,表 2 给出了系统中天窗预置状态下的 Zernike 矩特征。

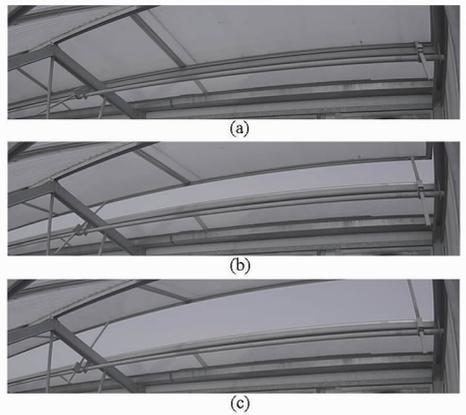


图 7 天窗状态实时图像

Fig. 7 Real-time image of ventilation

(a) 天窗开度 0% (b) 天窗开度 50% (c) 天窗开度 100%

表 2 天窗预置状态下 Zernike 矩特征

Tab. 2 Zernike moments of pre-set states of ventilation

天窗开度/%	Zernike 矩特征
0	11 096 000
25	11 060 000
50	11 051 000
75	11 043 000
100	11 118 000

天窗从完全开启到完全关闭的全程运行时间为 30 s,图像特征提取中存在一定误差,误差运行时间为 2~3 s,但由于天窗上装有限位开关,2~3 s 的运行误差对天窗运行的安全性不会造成影响,该算法可以满足实际应用的需求。

3 系统部署与运行

本系统在中国科学技术大学自动化系一座小型试验温室中部署并调试成功。温室位于中国科学技术大学自动化系楼顶。温室沿南北方向仅一跨,跨度 8.2 m,东西长 12.2 m,檐高 4.9 m,顶高 6.2 m。

温室内部设有基于物联网的智能监控系统,监测的环境因子包括温室小气候环境因子和室外气象信息。温室环境调控设备:2个风机、内遮阳网、天窗和湿帘等。

图8a是现场监控子系统操作界面,包括当前设备的运行状态、环境信息、操作记录等内容。通过菜单栏可以实现系统参数设置、历史数据查询等功能。图8b是远程监控子系统的Web客户端界面,分为实时数据、历史数据、控制执行和视频监控4个标签页。目前显示的实时数据页面,上半部分以数据的形式显示当前温室环境信息,下半部分以实时曲线

的方式直观显示一段时间中环境参数的变化趋势,并可以在温度曲线、湿度曲线和太阳辐射强度3个Tab页中切换,环境信息通过Ajax动态更新。

系统在实际运行过程中,各项功能都得到了有效测试,且运行稳定,使温室科研和管理人员能够方便获取温室信息,提供了灵活有效的监控手段。

4 结论

(1) 本文结合现代温室的管理需求,基于物联网技术框架,设计并实现了现代温室智能监控系统。系统由现场监控子系统、远程监控子系统和数据库3部分组成,设计中各部分相对独立,具有较高的可扩展性、可维护性和应用性。

(2) 温室远程监控子系统在实现实时环境数据显示、历史数据查询以及设备控制等功能时,采用传统的Web数据交互技术会导致全局刷新,影响用户体验。Ajax技术通过异步数据交互方式,实现了页面的局部更新,且用户无需等待服务器的响应。

(3) 根据温室的实际管理经验与需求,设计了完备的控制逻辑,控制模式可以在手动控制和自动控制间自由切换。借助混杂自动机建模与控制的相关理论,研究了基于混杂自动机模型的温室温度系统智能调控方法,并在实际系统中得到了验证。

(4) 采用Zernike矩来识别天窗开度,实现双向型设备的自动校准,以解决缺少位置传感器导致双向型设备难以获取其精确状态的问题。



图8 系统操作界面

Fig. 8 Interface of system

(a) 现场监控子系统 (b) 远程监控子系统

参 考 文 献

- 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)
- 孙忠富,曹洪太,李洪亮,等. 基于GPRS和WEB的温室环境信息采集系统的实现[J]. 农业工程学报,2006,22(6):131-134.
Sun Zhongfu, Cao Hongtai, Li Hongliang, et al. GPRS and WEB based data acquisition system for greenhouse environment[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(6):131-134. (in Chinese)
- 梁居宝,杜克明,孙忠富. 基于3G和VPN的温室远程监控系统的设计与实现[J]. 中国农学通报,2011,27(29):139-144.
Liang Jubao, Du Keming, Sun Zhongfu. Design and application of greenhouse remote automatic tele-monitoring system based on 3G and VPN[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(29): 139-144. (in Chinese)
- 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)
- 颜波,石平. 基于物联网的水产养殖智能化监控系统[J]. 农业机械学报,2014,45(1):259-265.
Yan Bo, Shi Ping. Intelligent monitoring system for aquaculture based on internet of things[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 259-265. (in Chinese)
- 朱会霞,王福林,索瑞霞. 物联网在中国现代农业中的应用[J]. 中国农学通报,2011,27(2):310-314.
Zhu Huixia, Wang Fulin, Suo Ruixia. The application of the internet of things in China modern agriculture[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(2): 310-314. (in Chinese)
- 夏于,孙忠富,杜克明,等. 基于物联网的小麦苗情诊断管理系统设计与实现[J]. 农业工程学报,2013,29(5):117-124.
Xia Yu, Sun Zhongfu, Du Keming, et al. Design and realization of IOT-based diagnosis and management system for wheat production[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5):117-124. (in Chinese)

- 8 Gubbi J, Buyya R, Marusic S, et al. Internet of things (IOT): a vision, architectural elements, and future directions[J]. *Future Generation Computer System*, 2013, 29(7): 1645 - 1660.
- 9 蒋勇翔, 秦琳琳, 石春, 等. 基于 CAN 总线的现代温室测控系统的设计及实现[C]//第三十一届中国控制会议论文集, 2012: 5679 - 5683.
Jiang Yongxiang, Qin Linlin, Shi Chun, et al. Design and implementation of the measurement and control system based on CAN bus in modern greenhouse[C]//Proceedings of the 31st Chinese Control Conference, 2012: 5679 - 5683. (in Chinese)
- 10 陆林箭, 秦琳琳, 石春. 基于 Web 的现代温室远程监控系统的设计与实现[C]//第三十二届中国控制会议论文集, 2013: 6660 - 6663.
Lu Linjian, Qin Linlin, Shi Chun, et al. Design and implementation of modern greenhouse remote monitoring system based on Web[C]//Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, 2013: 6660 - 6663. (in Chinese)
- 11 夏卓君. 分布图法在疏失误差处理中的应用[J]. *实用测试技术*, 2002, 28(2): 33 - 34.
- 12 孟庆瑞, 田兆锋, 阎楚良. Ajax 技术在农业装备信息网中的应用[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(12): 132 - 135.
Meng Qingrui, Tian Zhaofeng, Yan Chuliang. Application of Ajax in the agriculture mechanization information network[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(12): 132 - 135. (in Chinese)
- 13 Hasni A, Taibi R, Draoui B, et al. Optimization of greenhouse climate model parameters using particle swarm optimization and genetic algorithms[J]. *Energy Procedia*, 2011, 6: 371 - 380.
- 14 李晋, 秦琳琳, 吴刚, 等. 基于加权最小二乘支持向量机的温室小气候建模与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(16): 4232 - 4236.
Li Jin, Qin Linlin, Wu Gang, et al. Modeling and simulation of greenhouse microclimate system based on weighted least squares support vector machines[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(16): 4232 - 4236. (in Chinese)
- 15 李晋, 秦琳琳, 岳大志, 等. 试验温室温度系统建模与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(7): 1869 - 1875.
Li Jin, Qin Linlin, Yue Dazhi, et al. Experiment greenhouse temperature system modeling and simulation[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(7): 1869 - 1875. (in Chinese)
- 16 秦琳琳, 石春, 吴刚, 等. 基于混杂系统的温室天窗温度系统建模[J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(4): 833 - 836.
Qin Linlin, Shi Chun, Wu Gang, et al. Modeling of ventilation window air temperature system in greenhouse based on hybrid system[J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(4): 833 - 836. (in Chinese)
- 17 Qin Linlin, Shi Chun, Ling Qing, et al. Predictive control of greenhouse temperature based on mixed logical dynamical systems [J]. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 2010, 16(6): 1207 - 1214.
- 18 Fatnassi H, Boulard T, Bourirden L. Development, validation and use of a dynamic model for simulate the climate conditions in a large scale greenhouse equipped with insect-proof nets[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 98: 54 - 61.
- 19 Gruber J K, Guzman J L, Rodriguez F, et al. Nonlinear MPC based on a volterra series model for greenhouse temperature control using natural ventilation[J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(4): 354 - 366.
- 20 Lygeros J, Johansson K H, Simic S N, et al. Dynamical properties of hybrid automata[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(1): 2 - 17.
- 21 Teague M R. Image analysis via the general theory of moments[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1980, 70(8): 920 - 930.
- 22 田秋红, 刘成霞, 杜晓. 基于 Zernike 矩和 BP 网络的道路交通标志识别方法研究[J]. *浙江理工大学学报*, 2012, 29(2): 235 - 239.
Tian QiuHong, Liu Chengxia, Du Xiao. Research on method of traffic signs recognition based on Hu invariant moments and Zernike invariant moments[J]. *Journal of Zhejiang Sci-tech University*, 2012, 29(2): 235 - 239. (in Chinese)