

何灿隆, 沈明霞, 刘龙申, 等. 基于 NB-IoT 的温室温度智能调控系统设计与实现[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(2): 117-124.

基于 NB-IoT 的温室温度智能调控系统设计与实现

何灿隆, 沈明霞, 刘龙申, OKINDA Cedric, 杨 稷, 施 宏
(南京农业大学 工学院/江苏省智能化农业装备重点实验室, 江苏 南京 210031)

摘要:【目的】以 NB-IoT 低速率窄带宽物联网技术为核心, 研制一套以 5G 低功耗海量连接场景前期技术为基础的智能温室环境自动调控系统。【方法】应用 MSP430F149 超低功耗芯片采集环境信息, 依托 NB-IoT 蜂窝物联网平台, 云端智能调控系统, 结合多传感器融合与模糊 PID-分级控制技术, 根据用户需求调节温室环境。【结果】该系统在温室大棚内实地应用的结果表明: 温室环境信息采集相对误差不超 1%, 平均控制精度在 3.57%(±1.0 ℃), 无传输距离限制, 实现作物生长温度的自动调节。【结论】该系统稳定可靠, 为作物的生长提供良好环境, 对作物的研究提供有力的技术支撑。

关键词: NB-IoT; 5G; 多传感器融合; 模糊 PID; 温室; 温度
中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-411X(2018)02-0117-08

Design and realization of a greenhouse temperature intelligent control system based on NB-IoT

HE Canlong, SHEN Mingxia, LIU Longshen, OKINDA Cedric, YANG Ji, SHI Hong
(College of Engineering, Nanjing Agricultural University/Laboratory of Modern Facility Agriculture Technology and Equipment Engineering of Jiangsu Province, Nanjing 210031, China)

Abstract: 【Objective】 To develop an automated greenhouse environmental monitoring and control system based on an NB-IoT low-rate narrow bandwidth networking and 5G low-power massive connection technology. 【Method】 Ultra-low power chip MSP430F149 was applied to collect environmental information. Using the NB-IoT's cellular networking platform and the cloud intelligent control system and combining multi-sensor fusion with fuzzy PID-grading control technology, greenhouse environment was controlled according to user needs. 【Result】 Using the automated system in greenhouse, the relative error of greenhouse environmental information collection was below 1%, the average control accuracy was 3.57% (±1.0 ℃), the transmission distance was not limited and the automatic regulation of crop growth temperature was realized. 【Conclusion】 The system is stable and reliable, and provides a favorable environment for plant growth as well as a strong technical support for crop research.

Key words: NB-IoT; 5G; multi-sensor fusion; fuzzy PID; greenhouse; temperature

目前农业物联网技术通常采用 ZigBee、Bluetooth、SimpliciTi 及有线等方式, 但这些技术均面临通信距离短、功耗大和因通信协议而导致的终端数量饱和问题。基于蜂窝网络的 NB-IoT 窄带宽物联网技术, 在同样带宽频段下, 增益超过 20 dB, 覆盖面积可扩大 100 倍, 形成深覆盖, 海量连接的 M2M 体系, 有长达 10 年的待机时间和良好的功耗控制及数据连接能力, 正逐渐成为我国物联网发展

技术的主流^[1-3],通过 NB-IoT 与传感器的连接,将低成本、低功耗的移动终端分布于田野、山林、水下,为农业智能化物联网技术提供良好的保障^[4]。

本研究设计了一套基于 NB-IoT 窄带物联网技术的温室温度智能调控系统,应用 MSP430F149 芯片与传感器技术,采集温室环境信息,通过 NB-IoT 技术直接实现无网关化,结合用户需求以及作物生长所需环境,采用 Grubbs-均值滤波和模糊 PID-分级控制方法对温室温度进行智能调控,为作物生长提供良好环境。

1 系统总体架构

依据 NB-IoT 平台部署模式,基于 NB-IoT 的温

室温度智能调控系统主要由 NB-IoT 采集终端、NB-IoT 控制终端和云端智能调控系统构成(图 1)。其中 NB-IoT 采集终端主要由超低功耗 MSP430F149 芯片、BC-95 模组以及低功耗环境信息采集传感器构成;采集终端所获得的环境数据通过 L2TP 隧道技术构建与公共互联网完全隔离的虚拟专用网络,直接传输到 NB-IoT 基站,通过 VPDN 业务直接与云服务器进行数据交互,利用云端智能调控系统对温室系统的控制终端进行远程闭环控制;NB-IoT 控制终端主要由三菱 FX2N 系列可编程逻辑控制器、BC-95 模组以及 MSP430F149 芯片组成。云端智能调控系统主要负责环境数据的处理、存储、管理、分析、决策以及远程自动控制。

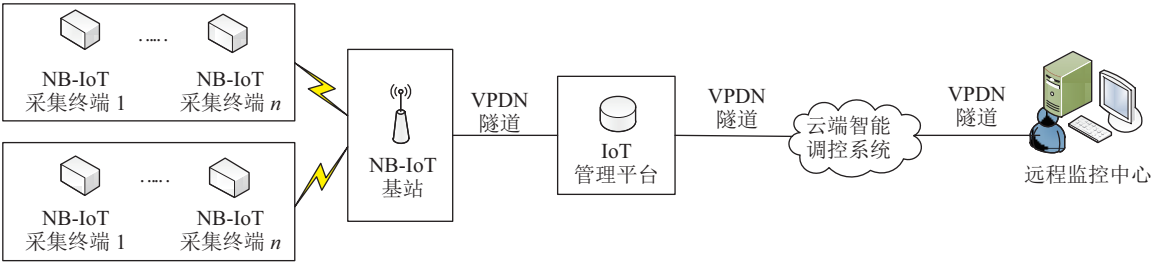


图 1 基于 NB-IoT 的温室环境智能调控系统示意图

Fig. 1 The diagram of greenhouse environment intelligent control system based on NB-IoT

2 系统硬件设计

2.1 NB-IoT 采集终端硬件设计

采集终端的硬件设计主要分为 2 个部分:NB-IoT 主控板和通信模块的电路设计。主控板负责温室环境信息的采集,通信模块负责与 NB-IoT 基站的数据交互。

2.1.1 NB-IoT 主控板的电路设计 温室所处环境较特殊,高温以及潮湿都会对硬件电路造成信号干扰,为此 NB-IoT 主控板的电源芯片采用 AMS1117,其工作属于完全的负反馈方式,在电源抑制上比开关电源性能更强,尤其在小信号处理电路上能取得不错的的效果,具有快速瞬态响应和良好的噪声抑制能力,且片内集成过热保护和过流保护模块,保证芯片和系统的可靠运行^[5-7];使用 SHT10、BH1750 和 MH-Z14 分别获取温室环境内的温湿度、光照强度以及二氧化碳浓度^[8-9]。主控板的电路设计框图如图 2 所示。

2.1.2 通信模块的电路设计 通信模块电路原理图如图 3 所示,通信模块采用 NB-IoT 系列中的 BC95 作为射频模组,与专用 NB-IoT 物联网卡进行数据交互,最后经由 800 MHz 射频天线将环境数据直接发送到 NB-IoT 基站。为确保有更好的电源供电性

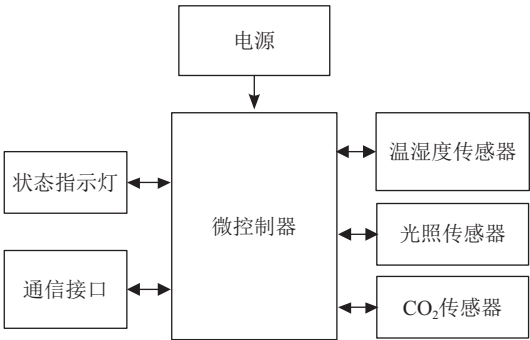


图 2 主控板设计框图

Fig. 2 Design framework of the main control board

能,在靠近 BC95 的电源输入端并联有 1 个低 ESR 的 100 μ F 钽电容,以及 0.1 μ F、100 pF、22 pF 的滤波电容;在射频天线的电路设计中,对于 PCB 走线使用专业阻抗模拟计算工具对射频信号线进行 50 Ω 的阻抗控制,并且预留有 π 型匹配电路,能够更加方便地调节射频性能,确保了射频信号良好以及可靠。

2.1.3 NB-IoT 采集终端的工作流程 采集终端在完成设备初始化后,MSP430F149 芯片进入 LPM3 模式等待定时器唤醒,同时 BC95 模块在等待一段时间后分别进入 IDLE 和 PSM 模式,当定时时间到达后,MSP430F149 芯片退出低功耗,采集温室环境信息发送给通信模块,再次进入 LPM3 模式,通信模块接

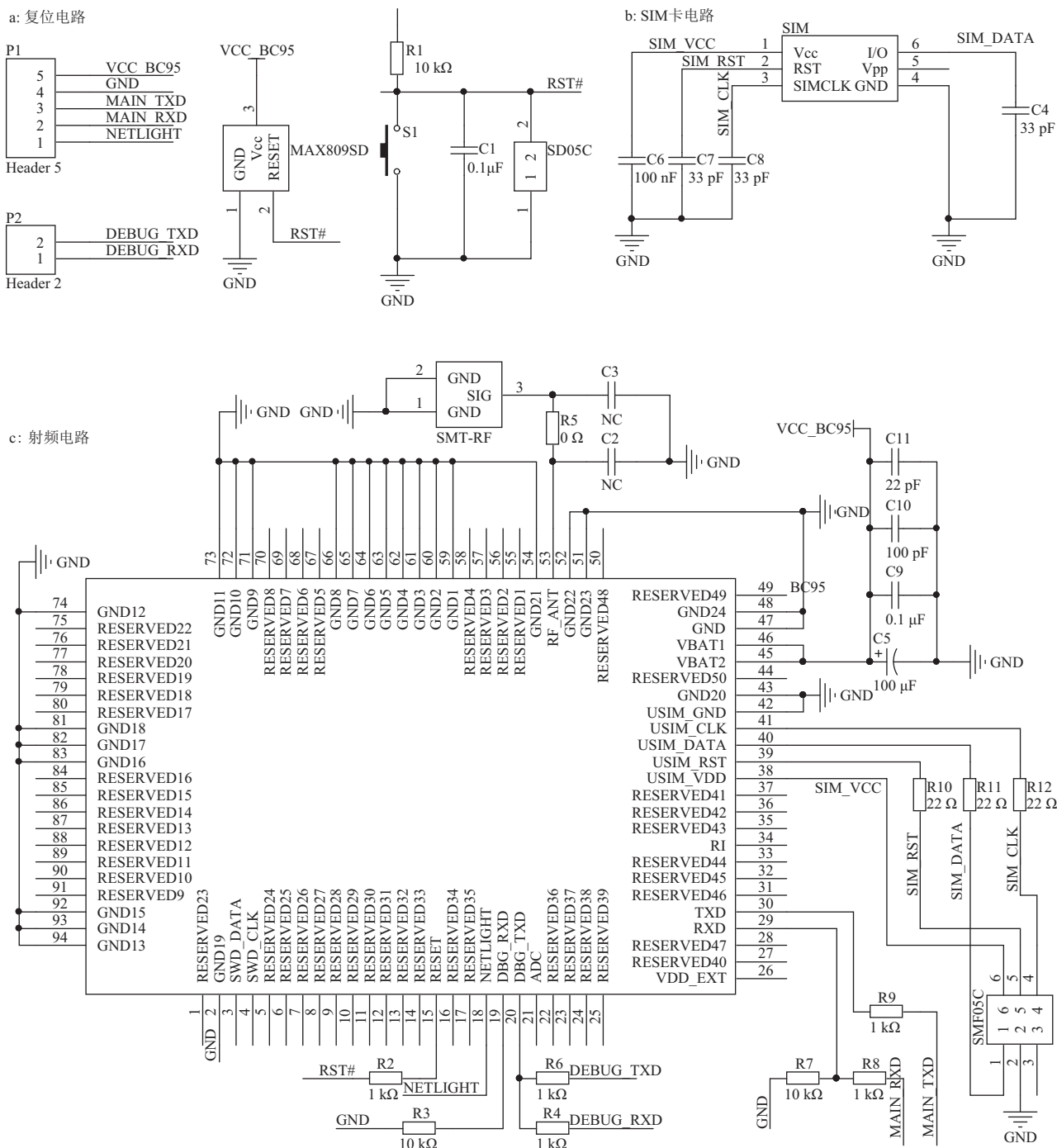


图 3 通信模块原理图

Fig. 3 Elementary diagram of communication module

收到数据后退出 PSM 模式, 通过 AT 命令集将数据发送给 NB-IoT 基站。具体工作流程图如图 4 所示。

2.2 NB-IoT 控制终端硬件设计

2.2.1 NB-IoT 控制终端硬件设计 在现有成熟稳定的智能温室布局中,大部分采用“有线网络+PLC 控制柜”对温室系统进行环境调控,保证温室控制机构的响应速度和稳定性,但其操作复杂,成本较高,需要网线或光纤、电缆线、交换机和串口服务器,且响应速度受系统网络影响,为此我们设计

了一种“NB+窄带物联网+PLC 控制柜”的控制终端,实现低成本、快速响应、无线化的控制终端,使得控制终端的成本降低了 75%,平均响应时间基本与 TCP/IP 方式持平。使用多通道 MAX232 作为 RS-232 标准串口设计的单电源电平转换模块,在低功耗关断模式下可将功耗降至 $5\text{ }\mu\text{W}$ 以内,并且该芯片电路设计简单且转换高效,通过串口通信与 FX2N 系列可编程逻辑控制器协同控制温室行程机构,实现温室环境的调节^[10-11]。TTL 信号转 232 信号电路如图 5 所示。

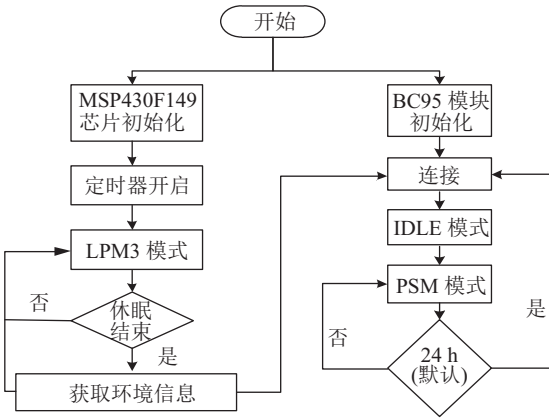


图 4 采集终端工作流程图

Fig. 4 Collect terminal flow chart

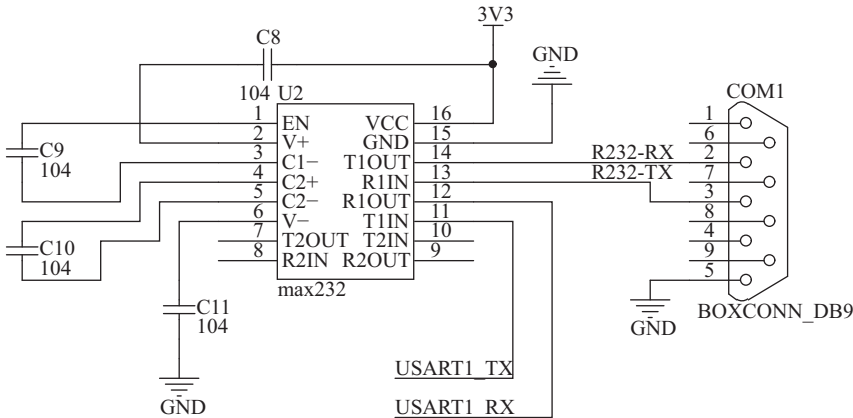


图 5 TTL 信号转 232 信号电路

Fig. 5 The circuit for transforming TTL signal to 232 signal

2.2.2 NB-IoT 控制终端的工作流程 为满足控制机构的高效性和稳定性,控制终端需要周期访问云端智能调控系统,在行程命令处于执行结束或未更新状态下,进入低功耗状态,减少能耗。其工作流程如图 6 所示。

3 数据处理

3.1 传感器异常数据的来源

采集终端在温室内的不同位置,采集的数据存在差异;单一采集终端并不能保证数据的准确性;单一的数据来源并不具有代表性;数据传输过程中的异常丢包导致异常数据。为此,采用数据帧完整性校验以及多传感器融合算法,提高温室数据的准确度。

3.2 数据帧校验

为去除异常丢包导致的异常数据,我们采用自定义数据帧校验方式,如表 1 所示, A~N 的数据格式是 16 进制,在传输协议中,将数据位的最后 1 位 (N) 定义为校验位,通过数据帧前 13 位之和与 0XFF 进行与运算,并将运算后的值与校验位 N 比较是否相等,从而判断数据帧的准确性,若为异常数据,则直接剔除。

3.3 多传感器融合算法

3.3.1 Grubbs 准则 为处理因传感器或设备异常而产生的异常数据,我们采用 Grubbs 准则,对同类型多传感器异常数据进行剔除,保证数据的准确性^[12-13]。

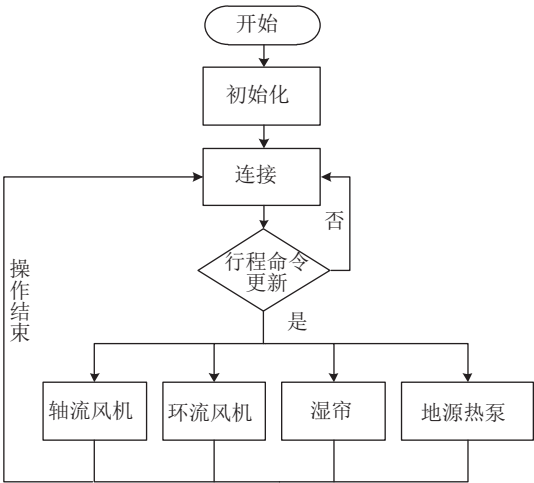


图 6 控制终端工作流程图

Fig. 6 Workflow chart of control terminal

表 1 数据帧传输格式

Tab. 1 Transmission format of data frame

基地 编号	温室 编号	终端 类型	终端 编号	数据 长度	温度 高位	温度 低位	湿度 高位	湿度 低位	光强 高位	光强 低位	CO ₂ 高位	CO ₂ 低位	校验 位
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N

假设传感器测得的温度数据序列为 $[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$, 并假设此序列已按数值从小到大排序, 即 $\theta_1 \leq \theta_2 \leq \dots \leq \theta_n$, σ' 为 θ 的标准差, 则

$$\bar{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i, \tag{1}$$

$$\sigma' = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2}, \tag{2}$$

根据顺序统计原理找出格罗贝斯统计量 (g_i) 的确切分布:

$$g_i = \frac{\theta_i - \bar{\theta}}{\sigma'}, \tag{3}$$

给定显著水平 α 后 (一般取 $\alpha=0.05$ 或 0.01), 用查表法找出格罗贝斯统计量的临界值 $g_0(n, \alpha)$ 。 $P[g_i \geq g_0(n, \alpha)] = \alpha$ 即为小概率事件, 在 $\theta_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 服从正态分布时不应出现。若满足 $g_i \geq g_0(n, \alpha)$, 则认为统计量 g_i 的分布存在显著差异, 对应的 θ_i 含有疏失误差, 即 θ_i 为可疑温度值, 应当剔除; 若 $g_i < g_0(n, \alpha)$, 则认为对应的 θ_i 没有疏失误差值, 保留 θ_i 。最终得到处理过后的温度数据序列 $[\theta_1', \theta_2', \dots, \theta_m'] (m \leq n)$ 。

3.3.2 均值滤波 对温度数据序列 $[\theta_1', \theta_2', \dots, \theta_m']$ 进行均值滤波, 得到融合值 (Data):

$$\text{Data} = (\sum_{i=1}^m \theta_i') / m. \tag{4}$$

采集终端在温室的安装位置如图 7 所示。

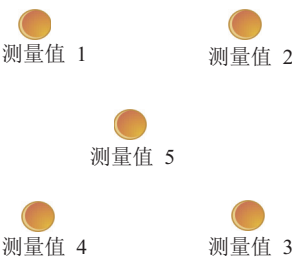


图 7 采集终端位置

Fig. 7 Location of collected terminal

4 机构控制

在现阶段的温室智能控制中, 大多采用常规的 PID 控制, 这种方法控制简单, 便于实现, 然而温室 <http://xuebao.scau.edu.cn>

是一个非线性、时变、时延大、多变量耦合的复杂对象, 采用固定参数的常规 PID 控制这样的对象, 参数整定较为困难, 且参数不能随系统的变化而变化, 很难实现最佳控制^[14], 并且在现有温室框架中, 主流控制设备为风机、湿帘、环流风机、补光灯等, 几乎没有控制对象可以接收模拟量的输出控制。为此, 本研究结合模糊响应与分级控制, 以达到控制温室环境的目的。

4.1 模糊 PID 控制器

模糊 PID 在常规的 PID 控制中采用模糊推理思想, 根据设定温度值 $\theta_{in}(t)$ 与测量值 $\theta(t)$ 之间的偏差 E 和偏差变化率 E_c 的不同, 基于前一次的比例、积分和微分参数 (K_p' , K_i' 和 K_d'), 对比例、积分和微分参数 (K_p , K_i 和 K_d) 进行在线自整定, 结合专家控制经验建立 ΔK_p , ΔK_i 和 ΔK_d 与 E 和 E_c 间的自整定函数关系, 使得系统在不同情况下对 K_p , K_i 和 K_d 不断地修改和调整, 改善了被控系统的动态和稳态性能、提高其抗干扰能力^[15-16], PID 控制器的输出如式 5 所示, 模糊 PID 控制结构框图如图 8 所示。

$$\begin{cases} K_p = K_p' + \Delta K_p \\ K_i = K_i' + \Delta K_i \\ K_d = K_d' + \Delta K_d \end{cases}. \tag{5}$$

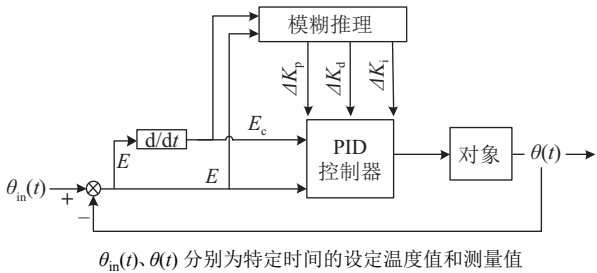


图 8 模糊 PID 控制结构框图

Fig. 8 Stuctural diagram of the fuzzy PID control block

4.2 模糊化设计

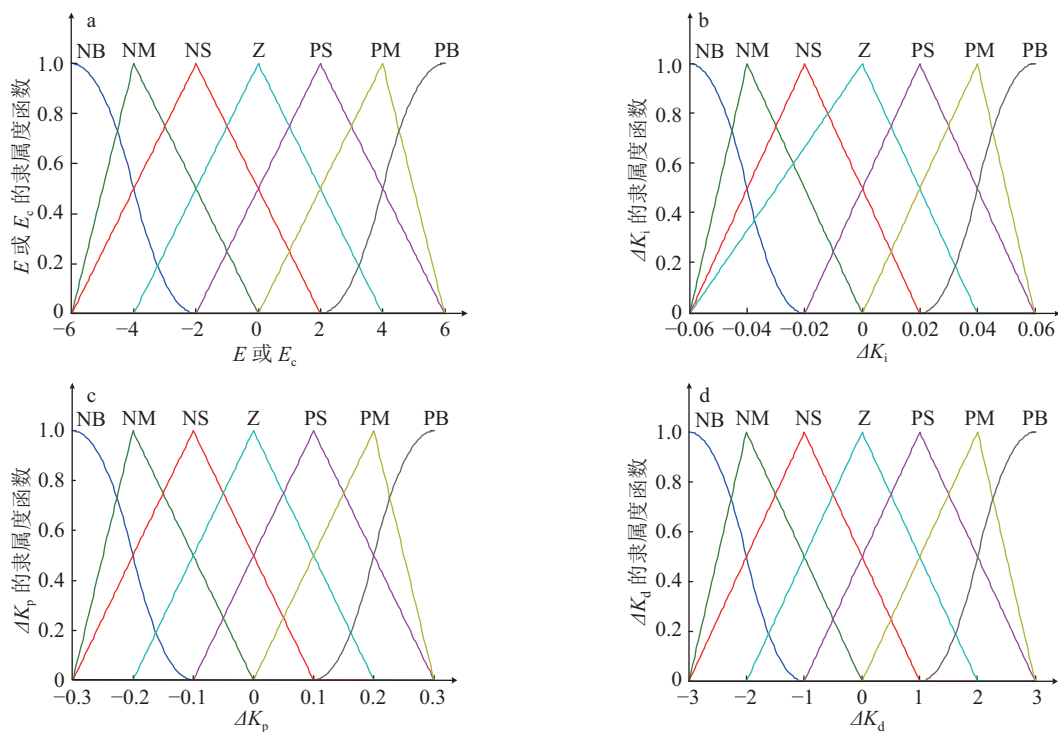
模糊推理输入和输出的都是精确量, 而本身是模糊量, 这就需要在算法实现过程中实现精确量的模糊化、模糊决策和解模糊化。模糊设计主要包含 2 个方面: 一个是模糊量的个数, 另一个是模糊量隶属函数的设计。

本系统选用 E 和 E_c 作为模糊控制器的输入, ΔK_p , ΔK_i 和 ΔK_d 作为模糊控制器的输出变量, 根据

工程经验将 E 、 E_c 、 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的模糊子集都定义为[NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、Z(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)], 其中 E 和 E_c 的论域设定为 $[-6, 6]$, ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 分别为 $[-0.3, 0.3]$ 、 $[-0.06, 0.06]$ 、 $[-3, 3]$, 系统参数的隶属度函数设定如图 9 所示。

总结工程设计人员的技术知识和实际操作经

验以及 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 参数间的相互作用及影响, 据此建立 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 模糊控制规则表, 以 ΔK_p 为例, 如表 2 所示, 本系统采用平均最大隶属度法进行解模糊, 在系统运行过程中控制系统通过对模糊逻辑结果的分析、查表、计算等, 完成 PID 参数的自动校正, 并进行分级运算控制, 工作流程如图 10 所示。



NB、NM、NS、Z、PS、PM 和 PB 分别表示程度为负大、负中、负小、零、正小、正中和正大

图 9 E 或 E_c 、 ΔK_i 、 ΔK_p 以及 ΔK_d 的隶属度函数

Fig. 9 Membership functions of E or E_c , ΔK_i , ΔK_p and ΔK_d

表 2 ΔK_p 的模糊控制规则¹⁾

Tab. 2 Fuzzy control rules for ΔK_p

E_c	E						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NM	PB	PB	PM	PM	PS	Z	NS
NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NS
Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	NS	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	Z	NM	NM	NM	NB	NB

1) NB、NM、NS、Z、PS、PM 和 PB 分别表示程度为负大、负中、负小、零、正小、正中和正大

4.3 模糊仿真

温室模糊控制系统是个多输入多输出系统, 输入变量有当前温度偏差以及温度偏差变化率, 输出为 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d , 根据余欢乐等^[17]建立的温室

温度控制模型, 近似将其看成具有扰动参与的一阶惯性时滞环节, 在 matlab 中搭建模糊 PID 控制系统和常规的 PID 控制系统, 根据图 11 仿真曲线对比

<http://xuebao.scau.edu.cn>

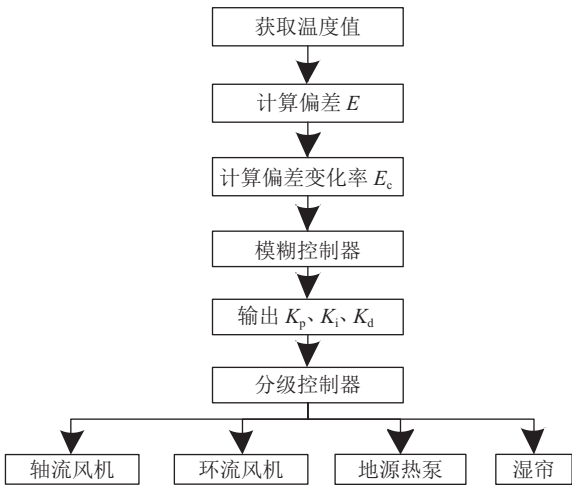


图 10 PID 参数自校正流程

Fig. 10 Procedure of self-correction of PID parameters

和分析两者的性能差异。模糊 PID 比普通 PID 的超调量减少了 74.6%、上升时间增加了 53.4%、达到峰值时间增加了 31.3%, 模糊 PID 具有超调量小, 鲁棒性高的优势。

4.4 控制采集软件设计

以安全、稳定的面向对象语言 C#作为软件系统设计基础, 通过 UDP 通信协议以及多线程操作机制设计出一套集终端数据存储、曲线展示、报表分析、规则控制、参数设置为一体的云端智能调控系统。软件界面如图 12 所示。

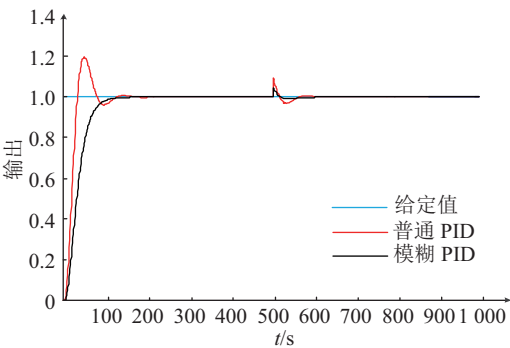


图 11 模糊 PID 与传统 PID
Fig. 11 Fuzzy PID and traditional PID

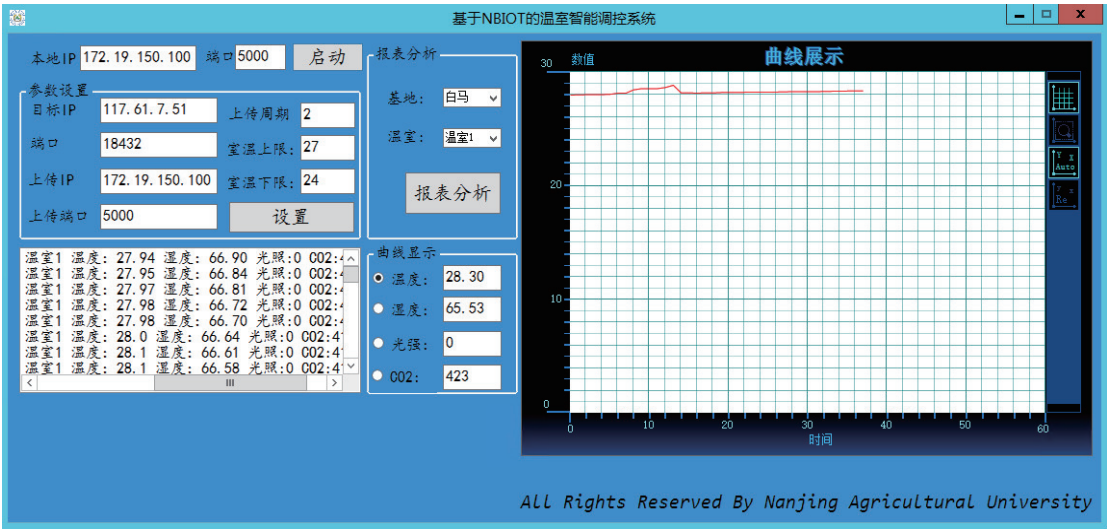


图 12 控制采集软件界面
Fig. 12 Interface of the control and collection software

用户设定采集终端上传环境信息的周期和室温上下限, 通过 Grubbs-均值滤波以及模糊 PID-分级控制算法智能调节温室内环境, 并通过数据曲线以及报表分析判断系统调节性能, 利用历史数据对作物生长环境进行相关科学性研究。

5 系统测试

5.1 多传感器融合滤波算法的实现

通过 Grubbs-均值滤波算法对同温室温度数据进行融合处理, 得到表 3 所示的结果。分别以组 1 以及组 4 进行数据解析。

表 3 多点温度测量值和融合值

Tab. 3 Multipoint temperature measurements and fusion values									℃
指标	组1	组2	组3	组4	组5	组6	组7	组8	
测量值 ^[1]	34.40	33.70	33.20	31.10	33.50	32.70	36.31	30.22	
测量值 ^[2]	34.40	33.20	33.20	31.10	33.60	32.70	36.33	30.22	
测量值 ^[3]	34.60	33.90	33.20	33.40	33.50	32.70	36.35	30.20	
测量值 ^[4]	34.40	33.80	33.20	31.10	33.50	32.60	36.34	30.20	
测量值 ^[5]	34.50	33.80	33.10	31.10	33.60	32.70	36.33	30.22	
融合值	33.46	33.80	33.20	31.10	33.54	32.70	36.33	30.21	
JR912数显温度计读数	33.30	33.50	33.10	31.40	33.40	32.40	36.50	30.40	
相对误差/%	-0.47	0.90	0.30	-0.64	0.95	0.93	0.45	0.62	

组 1: $T_i=34.46$, $V_i=[-0.06, -0.06, 0.14, -0.06, 0.04]$, $\sigma_1=0.089\ 44$, $g_0\times\sigma_1=0.149\ 36$;

组 4: $T_i=31.56$, $V_i=[-0.46, -0.46, 1.84, -0.46, -0.46]$, $\sigma_1=1.028\ 59$, $g_0\times\sigma_1=1.717\ 74$,

式中, T_i 为算术平均值, V_i 为剩余误差, $0<i\leq6$, σ_1 为近似误差, 通过查表得 $g_0(5, 0.05)=1.67$ 。

组 1 中没有可疑值需要剔除, 组 4 中 33.40 为可疑值, 需要剔除, 将剔除后的数据进行均值计算求得组 1 和组 4 中的融合值分别为 33.46 和 31.10, 融合值与 JR912 测得的温度数值相对差为 0~1.03%, 符合农业大棚的温度精度要求。

5.2 模糊 PID-分级控制效果的实现

设置室温 28℃, 温室温度控制效果如图 13 所示, 系统到达稳定状态耗时 12.96 min, 温度为 26~30℃, 最大相对误差不超 7.14%, 平均相对误差为 3.57%(±1.0℃)。

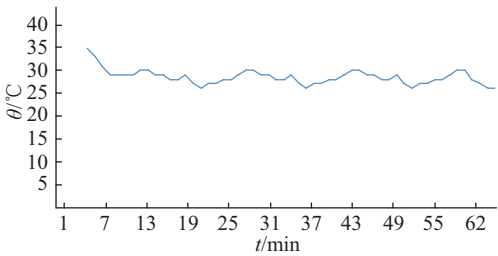


图 13 设置室温为 28℃ 的温室温度变化

Fig. 13 Greenhouse temperature change under set temperature of 28℃

6 结论

传统的环境监测系统都需要用网关汇聚采集终端的数据, 并通过网络等有线方式控制温室执行机构, 且采用移植和抗干扰性较差的传统 PID 来调节温室环境。

本研究主要以 NB-IoT 技术在农业温室领域的应用研究以及温度方面的调节测试为主, 设计了一套以 NB-IoT 窄带物联网技术为基础的智能控制系统, 集多传感器融合滤波、模糊 PID-分级控制、报表分析为一体的云端智能监控平台。试验结果表明, 该系统将采集温度数值的相对误差缩小为 1.1%, 温度控制平均相对误差缩小为±1℃, 符合温室环境采集控制的要求, 可为温室智能控制提供良好的技术支撑。

参考文献:

[1] 黄文超. NB-IoT 低速率窄带物联网通信技术现状及发展趋势[J]. 电子测试, 2017(6): 29.

[2] WANG Y P E, LIN X, ADHIKARY A, et al. A primer on 3GPP narrowband internet of things[J]. IEEE Commun Mag, 2017, 55(3): 117-123.

[3] ADHIKARY A, LIN X, WANG Y P E. Performance evaluation of NB-IoT coverage[C]// IEEE. 2017 IEEE 86th vehicular technology conference. Toronto: IEEE, 2017: 1-5.

[4] 曲井致. NB-IoT 低速率窄带物联网通信技术现状及发展趋势[J]. 科技创新与应用, 2016(31): 115.

[5] 李春玉. 密闭环境空气质量监测系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.

[6] 张宏, 沈明霞, 陆明洲, 等. 穿戴式猪用心电监测系统的设计[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(5): 872-879.

[7] 郑晓庆, 杨日杰, 杨立永, 等. 多路输出 DC-DC 电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(9): 31-33.

[8] HE J, XU L, WANG P, et al. A high precise E-nose for daily indoor air quality monitoring in living environment[J]. Integration, 2016, 58: 286-294.

[9] DENG H B, ZHANG L. Design on ZigBee wireless sensor network node[J]. Key Eng Mater, 2011, 474/475/476: 283-286.

[10] 熊本海, 蒋林树, 杨亮, 等. 奶牛饲喂自动机电控制系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 157-163.

[11] SU B, MA X. Water level sensor based on a new design structure for irrigation water measurement[J]. Ifac Proceedings Volumes, 2010, 43(26): 39-44.

[12] 刘叶玲, 朱艳伟. 加权数据融合算法及其应用举例[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(2): 253-255.

[13] 袁明月, 鸿雁, 杨志, 等. 基于 Grubbs 准则的小波阈值改进研究[J]. 人民长江, 2014(14): 69-71.

[14] 涂川川, 朱凤武, 李铁. BP 神经网络 PID 控制器在温室温度控制中的研究[J]. 中国农机化学报, 2012(2): 151-154.

[15] 韦庆志. 基于 ARM 的模糊 PID 温度控制系统的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.

[16] KUMAR A, KUMAR V. A novel interval type-2 fractional order fuzzy PID controller: Design, performance evaluation, and its optimal time domain tuning[J]. Isa T, 2017, 68: 251-275.

[17] 余欢乐, 方永锋. 基于模糊自整定 PID 的温室温度控制系统设计及仿真[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(12): 383-386.

【责任编辑 庄 延】