

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.041

设施花卉环境参数低功耗传输及模糊控制研究*

徐焕良 张灏 沈毅 任守纲

(南京农业大学信息科学与技术学院, 南京 210095)

摘要: 为了降低现有设施环境监测系统中传感节点的能耗,延长无线传感网络的生存周期,提出了节点动态组包主动传输和多种环境变量加权控制传输2种低功耗机制,减少了大量重复冗余数据的传输,并实现了基于 Zigbee 的设施花卉环境监测及其低功耗传输系统。提出设施花卉环境下的多变量模糊控制方法,解决了环境变量之间耦合问题,促使温室快速达到花卉适宜环境并保持平衡,实现了对设施花卉环境的综合控制。节点以 CC2430 芯片为核心,并根据影响花卉生长的环境参数,同时装载 SHT10 型温湿度、BH1750FVI 型光照以及 COZIR - ambient 型二氧化碳传感器,因此节点可同时采集传输多种环境参数,降低了硬件成本。在南京农业大学园艺试验基地进行组网测试,结果表明,系统比传统周期传输节点(周期 1 min)减少能耗 85.97%,测量精度在 98.5% 以上,网络平均丢包率为 0.84%,满足了对设施花卉环境的有效监测及低功耗传输的要求。

关键词: 设施花卉 无线传感网络 低功耗 Zigbee 模糊控制

中图分类号: TP274+.5; S629 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0236-06

Low Power Transmission and Fuzzy Control of Environment Parameters for Facilities Flower

Xu Huanliang Zhang Hao Shen Yi Ren Shougang

(College of Information Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Two low power consumption mechanism, named active transmission of node dynamical package and weighted control transmission of environmental variables, were proposed. A large number of duplicate and redundant data in transmission was reduced. The facilities flower environmental monitoring and its low-power transmission system based on Zigbee was achieved. The multivariable fuzzy control method in facilities flower environment was proposed, which solved the coupling problem in environmental variables and helped greenhouse to reach the comfortable environment of flowers rapidly and keep balance. CC2430 chip was used as the core of the node. SHT10 temperature and humidity sensor, BH1750FVI light sensor, and COZIR carbon dioxide sensor were also used in accordance with the environmental parameters which would affect the growth of flowers, so the nodes could collect and transmit a variety of environmental parameters at the same time, which reduced the cost of hardware. Networking test was carried out in Nanjing Agricultural University. Test results showed that the proposed system reduced energy consumption by 85.97% compared with traditional cycle node (cycle was 1 min), and measurement accuracy was more than 98.5%. The average loss rate of network packet was 0.84%.

Key words: Facilities flower Wireless sensor networks Low power consumption Zigbee Fuzzy control

收稿日期: 2012-09-09 修回日期: 2013-01-07

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAK21B05)、国家农业科技成果转化资金资助项目(2011GB2C100001)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(Y0201100080)、江苏省科技支撑计划资助项目(BE2011398、BE2011339)和南京农业大学青年科技创新基金资助项目(KJ2010022)

作者简介: 徐焕良, 教授, 博士, 主要从事物联网关键技术研究, E-mail: huanliangxu@njau.edu.cn

通讯作者: 任守纲, 副教授, 博士, 主要从事物联网技术及应用研究, E-mail: rensng@njau.edu.cn

引言

设施花卉^[1]生产以其高品质、高产量、稳定生产的优点在当前花卉栽培中的地位愈发重要。全国设施花卉栽培面积占花卉总栽培面积的比例越来越高。这表明花卉生产已从自然生长的状态进入由人工操控的智能化时代。通过监测环境因子(包括温度、光照、水分等)为花卉设施栽培提供花卉生长的适宜条件,从而实现更大的经济及社会效益。

无线传感器网络^[2](Wireless sensor network, WSN)是由部署在监测区域内大量微型传感器节点,通过无线通信方式形成的一个多跳自组织网络系统。传感器节点具有数据采集处理、无线通信和自动组网的能力,协作完成大型或复杂的监测任务。

目前,将无线传感技术应用到设施环境的实例有很多,但这些设施环境监测系统未着重考虑无线传感器节点的低功耗设计。传感节点由电池供电,电量有限,电池电量耗尽节点将失效,所以降低节点能耗,实现系统低功耗传输,延长网络生存周期成为研究热点。传统无线传感网络的低功耗设计大多采用路由算法优化或节点负载均衡^[3-5]。

本文在路由算法优化的基础上增加面向农业领域的低功耗设计,提出传感节点动态组包主动传输和多种环境变量加权控制传输2种机制,减少大量冗余重复数据的传输,有效降低节点能耗。

1 硬件设计

根据设施花卉生长参数要求,选取温湿度、光照和二氧化碳浓度3种传感器,并且考虑传感器功耗、测量精度、测量范围、成本等因素。选取瑞士盛世瑞恩公司的SHT10型数字温湿度传感器,日本ROHM公司的BH1750FVI型光照传感器,以及英国GSS公司的COZIR-ambient型二氧化碳浓度传感器。

系统硬件中的CC2430^[6]是集高性能2.4 GHz DSSS(直接序列扩频)射频核8051核以及128K闪存为一体的芯片。温湿度、光照、二氧化碳浓度3个传感器都可连接到CC2430芯片上,使传感器节点具有采集多种环境变量的功能,可以同时采样多种传感数据并发送。这样在一个区域内只需一个传感器节点,就可以满足需求,有效降低了硬件成本。硬件设计还留有可扩展接口,方便增加所需的其他传感器。在外围电路上增加USB接口用于调试节点,状态指示LEDs用于显示节点所处的各种状态,增益天线用于增强信号,增加通信距离。电源模块采用3V锂电池供电,可充电,方便实用。硬件结构如图1所示。

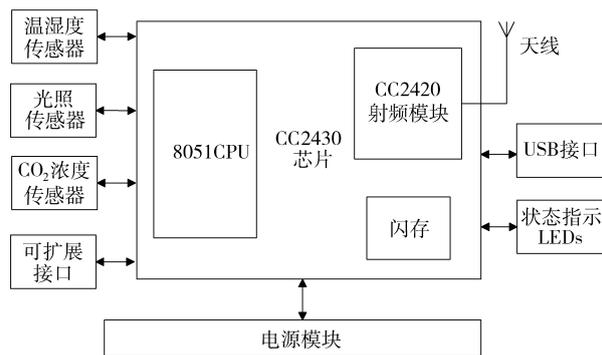


图1 传感器节点结构

Fig. 1 Structure of sensor node

2 自适应低功耗采集与传输软件设计

终端节点采用电池供电,节点随电量耗尽而失效,从而影响整个网络的完整性及生存时间。因此,节点的低功耗设计尤为重要,低功耗路由^[7]已得到了广泛的研究,本系统在设计低功耗路由的前提下,面向设施花卉生长控制提出了采集发送环节的进一步低功耗软件设计。

在实际应用中,节点的数据传输应用考虑2种情况:一是所有采集环境变量中的一个或多个对设施花卉产生巨大的影响,因此只需将这些环境变量进行组包传输;二是虽然采集的各个环境变量对设施花卉影响不大,但是综合考虑可能产生较大的影响,因此需要将所有的变量进行组包传输。显然,当这2种情况都发生时,应选择后者保证变量传输的完整性。

2.1 基于动态组包主动传输的软件设计

本系统的传感节点集成了温湿度、光照、二氧化碳浓度3种传感器,节点同时采集温度、湿度、光照、二氧化碳浓度4种传感数据。因环境参数变化缓慢,传感器测量值波动平缓,而传感节点的无线发送耗能较大,如采用周期发送机制,会产生大量重复数据,大大浪费节点能量,故设计了一种自适应传输的机制来节约节点能耗。假设当前已测得某环境变量 i ($i=1,2,\dots,n$)值为 $D_i(t+1)$,上一次所测该环境变量值为 $D_i(t)$,测量周期为 T , ε_i 为预设阈值,当 $|D_i(t+1) - D_i(t)| > \varepsilon_i$ 时,即测得某种环境变量的变化超过预设阈值 ε_i 时,将测得该环境变量值 $D_i(t+1)$ 加入发送帧载荷中。通过遍历 n 个传感器,可将满足条件的环境变量测量值动态组合加入帧载荷,遍历结束后节点传输数据帧。数据帧格式如图2所示。

假如所有环境变量测量值未满足条件,没有数据加入发送帧载荷,节点不触发射频模块,不发送数据。即根据环境变化以紧凑的方式自适应发送变化

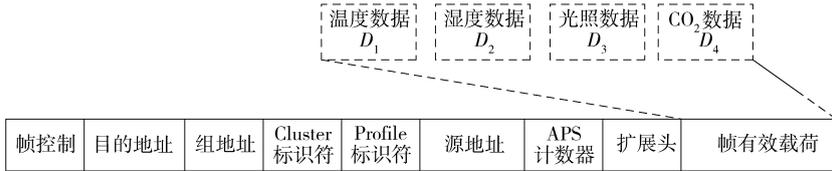


图2 数据帧格式图

Fig. 2 Format of data frame

量较大的值。其中, ε_i 值和采样间隔 T 可根据具体花卉的生长特性进行设置。

2.2 基于环境变量的加权控制传输设计

假设某环境变量 i ($i=1, 2, \dots, n$) 的变化值为 $\Delta_i = |D_i(t+1) - D_i(t)|$ 。由于不同环境变量对设施花卉受的影响不同, 因此变量对设施花卉的影响具有一定的权重, 设环境变量 i 的权值为 ω_i , 那么

n 个环境变量的总变化为 $\sum_{i=1}^n \omega_i \Delta_i = \omega_1 \Delta_1 + \omega_2 \Delta_2 + \dots + \omega_n \Delta_n$, 设 Δ_i 为预设总变化值, 如果 $\sum_{i=1}^n \omega_i \Delta_i > \Delta_i$, 则节点发送所有环境变量测量值。因为环境变量的组合作用也会对设施花卉产生影响, ω_i 和 Δ_i 可根据具体花卉品种进行设置。

软件流程步骤为:

(1) 协调器负责建立网络, 各节点完成初始化配置。

(2) 终端节点采集跟踪温度、湿度、光照和二氧化碳浓度 4 种环境变量。

(3) 判断环境变量加权变化值是否大于预设的总变化值 Δ_i , 如果是, 传输所有环境变量测量值; 如果不是, 执行步骤(4)。

(4) 判断环境变量 i 变化是否超过预设阈值 ε_i , 如果是, 将测量值 $D_i(t+1)$ 加入发送帧载荷。如果不是, 判断是否遍历所有传感器, 如果是, 执行步骤(2); 如果不是, 执行步骤(4)。

(5) 判断是否遍历所有传感器, 如果是, 传输动态组合的数据帧, 然后执行步骤(2); 如果不是, 执行步骤(4)。

3 低功耗传输方法试验结果与分析

选择南京农业大学园艺试验基地的温室进行组网试验。温室内栽培了大量蝴蝶兰, 蝴蝶兰生长适宜的温度为 $18 \sim 28^\circ\text{C}$, 湿度为 $60\% \sim 80\%$, 光照强度为 $3\,000 \sim 6\,000 \text{ lx}$, 二氧化碳浓度为 $1\,000 \text{ mg/kg}$ 以上^[8-10]。温室是长 135 m 、宽 80 m 的 3 个 $80 \text{ m} \times 45 \text{ m}$ 相连的温室, 在温室内布置 11 个节点, 其中 8 个传感器节点、2 个路由节点和 1 个协调器节点, 使用 2 节 AA 电池供电, 节点距地高度 1.5 m , 节点

的部署位置和节点间的距离如图 3 所示。系统按以下方式部署: 将温度、湿度、光照、二氧化碳 4 种标准测量仪布置在温室中, 通过有线(串口)方式连接到上位机。将低功耗传输节点部署在温室中。在低功耗传输节点旁边再布置一套周期传输节点(周期为 1 min), 周期传输节点在硬件上与低功耗传输节点相同, 但软件上采用一般的周期传输机制。

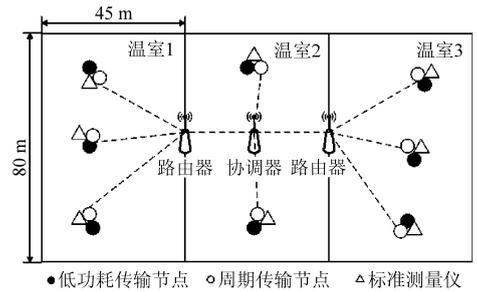


图3 试验部署

Fig. 3 Deployment of experiment

试验分别就节点能耗、节点测量精度和网络稳定性进行了测试。如图 4~6 所示。

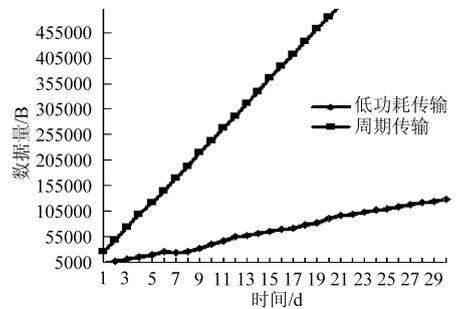


图4 发送数据帧长度对比

Fig. 4 Comparison of length of sending data frame

由于无线传感节点的射频发送能耗远远大于节点运行能耗, 所以节点能耗与其发送的数据量呈正比, 数据量也就是所有发送数据帧相加的总长度。试验数据计算得出, 低功耗传输节点比周期传输节点(周期 1 min) 减少了 85.97% 的能耗。本文低功耗传输方法节能效果明显, 适用于长时间监测。

由于周期传输节点与低功耗传输节点在硬件上相同, 只是软件上的工作机制不同, 所以两者的测量值相同, 误差率一致。周期传输的结果与标准测量仪结果并不完全吻合, 存在一定的误差, 以图 5 所示

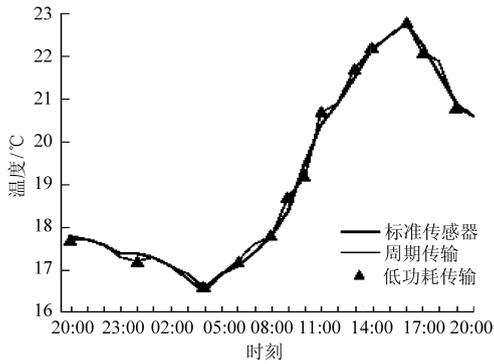


图 5 温度测量

Fig. 5 Temperature test

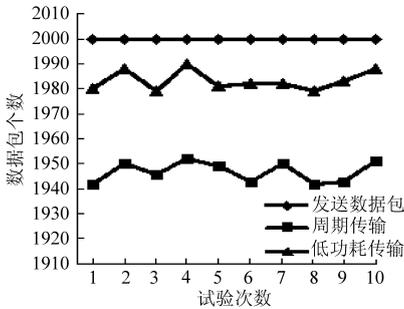


图 6 网络稳定性测试

Fig. 6 Network stability

温度测量为例,计算得出系统测量精度在 98.5% 以上。结果表明系统感知精度较高,能够满足设施花卉环境监测的精度要求。

网络稳定性测试,计算得出低功耗传输的网络平均丢包率为 0.84%,与周期传输丢包率 2.7% 相比,有更高的传输成功率,更高的稳定性。多个节点周期发送,会导致信号碰撞。而低功耗传输,大大减少了不必要数据的发送,碰撞概率降低,丢包率降低,网络稳定性增加。

4 多环境变量模糊控制及解耦方法

温室环境是一个多变量、非线性、时滞、耦合系统,这使得控制系统设计十分困难。如果对象存在耦合,就会降低控制系统的调节品质。温室中有多个环境参数(温度、湿度、光照度等),分别由各自的闭环系统控制,常常相互影响而得不到很好的结果,如光照度增加,室温相应升高,室温升高又造成温室相对湿度降低等,所以,采用多变量综合控制法,通过模糊控制,将受控参数之间的相互影响拟合到最佳状态^[11-16]。

4.1 多变量模糊控制器结构

系统分为两个部分,第一部分是 3 个独立模糊控制单元:温度模糊控制器、湿度模糊控制器和光照模糊控制器。如图 7 所示,温度模糊控制器的输入 e_1 为温度偏差, e_2 为温度变化率。湿度模糊控制器

的输入 e_1 为湿度偏差, e_2 为湿度变化率。光照模糊控制器的输入 e_1 为光照偏差, e_2 为光照变化率。第二部分是 2 个模糊解耦单元:光照-温度模糊控制器和温度-湿度模糊控制器。光照-温度模糊控制器的输入 e_1 为光照偏差, e_2 为温度偏差。温度-湿度模糊控制器的输入 e_1 为温度偏差, e_2 为湿度偏差。

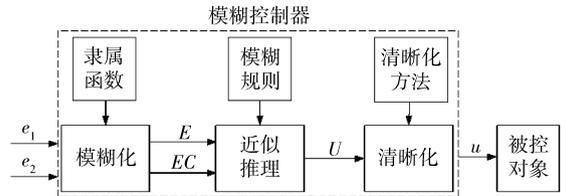


图 7 多变量模糊控制原理图

Fig. 7 Principle of multivariable fuzzy control

如图 8 所示,2 个部分同时运行,都是通过模糊规则触发系统进行环境调控,并且模糊解耦单元的处理优先级要高于独立的模糊控制单元。模糊解耦单元通过模糊规则解耦,帮助温室快速达到花卉适宜环境并保持平衡。本文将模糊控制系统分为 2 大部分,5 小部分,有效简化了模糊控制器的复杂程度,大大减少了模糊规则条数,加快了系统对模糊规则的搜索速度。

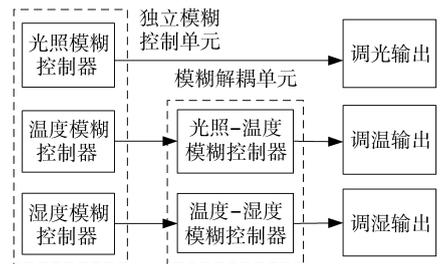


图 8 模糊控制系统结构

Fig. 8 Structure of fuzzy control system

4.2 输入输出变量模糊化

4.2.1 输入变量的论域、语言变量和隶属度

温度偏差记为 B_T ,湿度偏差记为 B_H ,光照度偏差记为 B_L ,分别为温度、相对湿度、光照度的实测值与设定值之差。温度偏差 B_T 变化范围为 $[-4, 4]$,模糊论域取为 $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$,量化因子为 $k_1 = 1$ 。温度变化率 ΔT 变化范围为 $[-0.6, 0.6]$,模糊论域取为 $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$,量化因子为 $k_2 = 20/3$ 。湿度偏差 B_H 变化范围为 $[-0.2, 0.2]$,模糊论域取为 $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$,量化因子为 $k_1 = 20$ 。湿度变化率 ΔH 变化范围为 $[-0.08, 0.08]$,模糊论域取为 $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$,量化因子为 $k_2 = 50$ 。光照偏差 B_L 变化范围为 $[-4000, 4000]$,模糊论域取为 $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$,量化因子为 $k_1 = 0.001$ 。光照变化率 ΔL 变化范围为

$[-1200, 1200]$, 模糊论域取为 $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$, 量化因子为 $k_2 = 300$ 。

温度、湿度和光照偏差及其变化率的语言变量选择为 $\{\text{负大, 负小, 零, 正小, 正大}\}$, 隶属度曲线如图 9 所示。

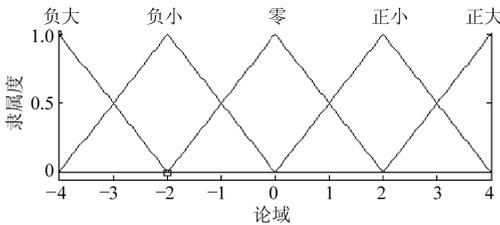


图 9 输入变量隶属度函数曲线

Fig. 9 Curves of membership function of input variable

4.2.2 输出变量的论域、语言变量和隶属度

调温输出, 降低温度使用湿帘, 升高温度使用热水循环方式, 湿帘语言变量分为 2 级: $\{\text{全功率降温, 半功率降温}\}$, 热水循环语言变量分为 2 级: $\{\text{全功率升温, 半功率升温}\}$ 。

调湿输出, 降低湿度使用风机, 增加湿度使用雾化方式, 风机语言变量分为 2 级: $\{\text{全功率降湿, 半功率降湿}\}$, 雾化语言变量分为 2 级: $\{\text{全功率加湿, 半功率加湿}\}$ 。

调光输出, 减小光照强度使用遮阳网, 增加光照强度使用补光灯, 遮阳网语言变量分为 2 级: $\{\text{全闭, 半闭}\}$, 补光灯语言变量分为 2 级: $\{\text{全功率补光, 半功率补光}\}$, 模糊论域取为 $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$, 隶属度函数如图 10 所示。

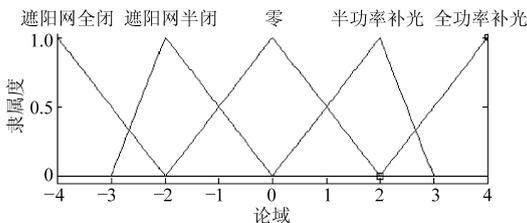


图 10 调光输出变量隶属度函数曲线

Fig. 10 Curves of membership function of output variables

4.3 模糊控制规则及决策

独立模糊控制单元以偏差和变化率作为输入量, 根据人为经验建立规则, 系统不仅能对环境变量的大小作出反映, 而且能对其变化快慢作出控制动作。模糊解耦单元考虑到其他环境变量的影响, 在规则内进行修正补偿, 帮助温室快速达到适宜环境并保持平衡。

每个独立模糊控制单元的模糊规则有 13 条, 以光照模糊控制器为例:

(1) If(光照偏差 is 负大) and (光照变化率 is 负大) then (输出 is 全功率补光)

(2) If(光照偏差 is 负大) and (光照变化率 is

负小) then (输出 is 全功率补光)

(3) If(光照偏差 is 负大) and (光照变化率 is 零) then (输出 is 全功率补光)

(4) If(光照偏差 is 负小) and (光照变化率 is 负大) then (输出 is 全功率补光)

(5) If(光照偏差 is 负小) and (光照变化率 is 负小) then (输出 is 半功率补光)

(6) If(光照偏差 is 负小) and (光照变化率 is 零) then (输出 is 半功率补光)

(7) If(光照偏差 is 零) and (光照变化率 is 零) then (输出 is 零)

(8) If(光照偏差 is 正大) and (光照变化率 is 正大) then (输出 is 遮阳网全闭)

(9) If(光照偏差 is 正大) and (光照变化率 is 正小) then (输出 is 遮阳网全闭)

(10) If(光照偏差 is 正大) and (光照变化率 is 零) then (输出 is 遮阳网全闭)

(11) If(光照偏差 is 正小) and (光照变化率 is 正大) then (输出 is 遮阳网全闭)

(12) If(光照偏差 is 正小) and (光照变化率 is 正小) then (输出 is 遮阳网半闭)

(13) If(光照偏差 is 正小) and (光照变化率 is 零) then (输出 is 遮阳网半闭)

规则(4)、(5), 当光照偏差为负小, 光照变化率为负小, 输出为半功率补光。当光照偏差为负小, 但是光照变化率为负大时, 考虑到光照强度在快速减小, 系统输出为全功率补光。系统在环境变量变化率反映到偏差前, 对温室进行预先调控, 帮助温室快速达到适宜条件。

每个模糊解耦单元的模糊规则有 8 条, 以光照-温度模糊控制器为例:

(1) If(光照偏差 is 负大) and (温度偏差 is 零) then (调温输出 is 半功率降温)

(2) If(光照偏差 is 负大) and (温度偏差 is 正小) then (调温输出 is 全功率降温)

(3) If(光照偏差 is 负大) and (温度偏差 is 负小) then (调温输出 is 零)

(4) If(光照偏差 is 负小) and (温度偏差 is 零) then (调温输出 is 半功率降温)

(5) If(光照偏差 is 正小) and (温度偏差 is 零) then (调温输出 is 半功率升温)

(6) If(光照偏差 is 正大) and (温度偏差 is 负小) then (调温输出 is 全功率升温)

(7) If(光照偏差 is 正大) and (温度偏差 is 零) then (调温输出 is 半功率升温)

(8) If(光照偏差 is 正大) and (温度偏差 is 正

小) then (调温输出 is 零)

规则(1),温度偏差为零,此时温度为设定的适宜温度,不需进行调控。但此时光照偏差为负大,会触发系统进行全功率补光,考虑到光照因素对温度的影响,对温度进行预先调控,调温输出为半功率降温。

系统2部分的模糊规则都要对会发生的情况进行定义,所以两者的模糊规则会有重叠部分,但在执行的时候模糊解耦单元的处理优先级要高于独立的模糊控制单元。根据模糊关系式 $R = E \times EC \times U$ 计算出每种输入状态下的控制输出 u ,最后用最大隶属度法进行模糊决策,使模糊量转换为精确量。

5 结论

(1)如果某种环境变量的变化超过预设阈值时,则把该环境变量测量值加入发送帧载荷中。遍历所有传感器,环境变量测量值被动态地加入帧载

荷后传输,实现动态组包主动传输的机制。

(2)如果带有权值的环境变量总变化大于预设总变化值,节点将发送所有环境变量测量值,实现了环境变量加权控制传输。

(3)通过动态组包主动传输和环境变量加权控制传输2种低功耗机制,减少了大量重复冗余数据的传输,有效降低能耗。试验结果表明,系统比传统周期传输节点(周期1min)减少能耗85.97%,测量精度在98.5%以上,网络平均丢包率为0.84%,具有较高的测量准确度,网络稳定性强,节点低功耗效果明显,能够满足对设施花卉环境的有效监测及低功耗传输的要求。

(4)提出设施花卉环境下的多变量模糊控制方法,解决了环境变量之间耦合问题,帮助温室快速达到花卉适宜环境并保持平衡,实现了对设施花卉环境的综合控制。

参 考 文 献

- 1 吴晓蕾,赵慧琴,张媛. 环境控制对设施花卉花期调控影响的研究[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版,2007,28(3):302~305.
Wu Xiaolei, Zhao Huiqin, Zhang Yuan. Research in the effect of controlled environment on flowering time regulator of protected cultivation of flowers[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2007, 28(3): 302~305. (in Chinese)
- 2 吕立新,汪伟,卜天然. 基于无线传感器网络的精准农业环境监测系统设计[J]. 计算机系统应用,2009,18(8):5~9.
- 3 王丽娟,刘玉珍. 无线传感网络节点低功耗算法改进[J]. 微计算机信息,2010,26(7-1):111~112,51.
Wang Lijuan, Liu Yuzhen. Improvement of node's low-power consumption algorithm of WSN[J]. Microcomputer Information, 2010, 26(7-1): 111~112,51. (in Chinese)
- 4 张忠厚,赵龙. 无线传感网络节能跨层调度算法[J]. 计算机系统应用,2012,21(8):48~51.
Zhang Zhonghou, Zhao Long. Energy-efficient cross-layer scheduling algorithm based on WSN [J]. Computer Systems & Applications, 2012, 21(8):48~51. (in Chinese)
- 5 田勇,唐祯安. 能量高效的无线传感器网络稳定分簇路由协议[J]. 大连理工大学学报,2012,52(5):755~760.
Tian Yong, Tang Zhen'an. Energy-efficient steady clustering routing protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2012, 52(5):755~760. (in Chinese)
- 6 李树江,段岳非. 基于CC2430的温室大棚环境信息采集系统设计[J]. 微型机与应用,2012,31(19):31~34.
Li Shujiang, Duan Yuefei. Design of greenhouse environment information collecting system based on CC2430[J]. Microcomputer & Its Applications, 2012, 31(19):31~34. (in Chinese)
- 7 梁焕焕. 面向实时监测的无线传感器网络低功耗路由算法研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.
Liang Huanhuan. Study on low power routing algorithm for real-time monitoring of wireless sensor network [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- 8 张黎,穆晓萍. 蝴蝶兰温室栽培技术[J]. 北方园艺,2004(1):37~38.
- 9 妙晓莉,曹轩峰. 蝴蝶兰温室生产的环境控制技术[J]. 现代园艺,2009(1):48.
- 10 李华云,庄军平,黄胜琴,等. 高浓度CO₂对蝴蝶兰CO₂吸收速率和生长的影响[J]. 园艺学报,2007,34(3):705~710.
Li Huayun, Zhuang Junping, Huang Shengqin, et al. Effects of elevated CO₂ concentration on growth and carbon fixation of phalaenopsis 'sogo benz sogo' [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2007,34(3):705~710. (in Chinese)
- 11 兰富军. 基于模糊控制与神经网络的智能温室温度控制研究[J]. 安徽农业科学,2012,40(7):4437~4438,4441.
- 12 冯帆,邱立春,刘维佳. 模糊控制在温室温湿度控制系统中的应用[J]. 农机化研究,2009,31(6):148~150.
Feng Fan, Qiu Lichun, Liu Weijia. Application of fuzzy control in greenhouse temperature and humidity control system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009,31(6):148~150. (in Chinese)
- 13 葛建坤,罗金耀,李小平,等. 基于ANFIS的温室气温模糊控制仿真[J]. 农业工程学报,2010,26(8):216~221.
Ge Jiankun, Luo Jinyao, Li Xiaoping, et al. Simulation of fuzzy control for greenhouse temperature based on ANFIS [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(8):216~221. (in Chinese)

参 考 文 献

- 1 Huang W, Lin J, Kong Z, et al. Stream-of-variation (SOVA) modeling II: a generic 3D variation model for rigid body assembly in multi station assembly processes [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(4): 832 ~ 842.
- 2 Xie Kang, Wells Lee, Camelio Jaime A, et al. Variation propagation analysis on compliant assemblies considering contact interaction [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(1): 934 ~ 942.
- 3 Liu Mingzhou, Zhao Zhibiao, Ge Maogen, et al. Research of correlation-model between qualities attributes and quality control points in assembly process of the complex product based on network flow [J]. Advanced Materials Research, 2012, 403 ~ 408; 3 015 ~ 3 021.
- 4 茅健, 郑华文, 曹衍龙, 等. 基于粒子群算法的圆柱度误差评定方法[J]. 农业机械学报, 2007, 38(2): 146 ~ 149.
Mao Jian, Zheng Huawen, Cao Yanlong, et al. Method for cylindricity errors evaluation using particle swarm optimization algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(2): 146 ~ 149. (in Chinese)
- 5 张建军, 张利, 穆海芳, 等. 基于改进粒子群优化 BP 网络的发动机故障诊断方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 198 ~ 203.
Zhang Jianjun, Zhang Li, Mu Haifang, et al. Improved BP-neural net work of the particle swarm optimization in the research on engine fault diagnosis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 198 ~ 203. (in Chinese)
- 6 Margarita Reyes-Sierra, Coello Coello Carlos A. Multi-objective particle swarm optimizers a survey of the state-of-the-art [J]. International Journal of Computational Intelligence Research, 2006, 2(3): 287 ~ 308.
- 7 刘朝, 祁荣宾, 钱锋. 融合交叉变异和混沌的新型混合粒子群算法[J]. 化工学报, 2010, 61(11): 2 861 ~ 2 867.
Liu Zhao, Qi Rongbin, Qian Feng. A novel hybrid particle swarm optimization algorithm merging crossover mutation and chaos [J]. CIESC Journal, 2010, 61(11): 2 861 ~ 2 867. (in Chinese)
- 8 Chen G M, Huang X B, Jia J Y, et al. Natural exponential inertia weight strategy in particle swarm optimization [C] // Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, 2006: 3 672 ~ 3 675.
- 9 陶新民, 刘福荣, 刘玉, 等. 定向多尺度变异克隆选择优化算法[J]. 控制与决策, 2011, 26(2): 175 ~ 181.
Tao Xinmin, Liu Furong, Liu Yu, et al. Clone selection optimization algorithm with directional multi-scale mutation [J]. Control and Decision, 2011, 26(2): 175 ~ 181. (in Chinese)
- 10 Tripathi P K, Bandyopadhyay S, Pal S K. Multi-objective particle swarm optimization with time variant inertia and acceleration coefficients [J]. International Sciences, 2007, 177(22): 5 033 ~ 5 049.
- 11 Pulido G T, Coello C A C. Using clustering technique to improve the performance of a multi-objective particle swarm optimizer [J]. Lecture Notes on Computer Science, 2004, 3102: 225 ~ 237.
- 12 Lechuga M S, Rowe J. Particle swarm optimization and fitness sharing to solve multi-objective optimization problems [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation. Edinburgh: IEEE Press, 2005: 1 204 ~ 1 211.
- 13 施展, 陈庆伟, 基于 QPSO 和拥挤距离排序的多目标量子粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2011, 26(4): 540 ~ 547.
Shi Zhan, Chen Qingwei. Multi-objective quantum-behaved particle swarm optimization algorithm based on QPSO and crowding distance sorting [J]. Control and Decision, 2011, 26(4): 540 ~ 547. (in Chinese)
- 14 Mostaghim S, Teich J. Strategies for finding good local guides in multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) [C] // IEEE 2003 Swarm Intelligence Symposium, 2003: 26 ~ 33.
- 15 林巨广, 邢刚, 陈欣. 汽车驱动桥主动锥齿轮总成垫片测量模型分析[J]. 合肥工业大学学报, 2005, 28(7): 778 ~ 780.
Lin Juguang, Xing Gang, Chen Xin. Analysis of the measuring model of assembly gaskets of the initiative taper gear axis of the automobile's driving axle [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2005, 28(7): 778 ~ 780. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 241 页)

- 14 余泳昌, 胡建东, 毛鹏军. 现代化温室环境参数的模糊控制[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 72 ~ 75.  
Yu Yongchang, Hu Jiandong, Mao Pengjun. Fuzzy control for environment parameters in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(2): 72 ~ 75. (in Chinese)
- 15 宫赤坤, 陈翠英, 毛罕平. 温室环境多变量模糊控制及其仿真[J]. 农业机械学报, 2000, 31(6): 52 ~ 54.  
Gong Chikun, Chen Cuiying, Mao Hanping. Multivariable fuzzy control and simulation of a greenhouse environment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(6): 52 ~ 54. (in Chinese)
- 16 钟应善, 杨家强, 邓劲莲. 温室温度和湿度的多变量模糊控制技术[J]. 农业机械学报, 2001, 32(3): 75 ~ 78.  
Zhong Yingshan, Yang Jiaqiang, Deng Jinlian. Multivariable fuzzy control of temperature and humidity in a greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(3): 75 ~ 78. (in Chinese)