

单慧勇,林宇浩,于 稼,等. 温室二氧化碳气肥环境调控系统设计[J]. 江苏农业科学,2019,47(4):204-208.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.04.048

# 温室二氧化碳气肥环境调控系统设计

单慧勇,林宇浩,于 稼,杨廷荣,赵 辉,卫 勇

(天津农学院工程技术学院,天津 300384)

**摘要:**为改善棚室蔬菜生产中二氧化碳匮乏问题,设计温室二氧化碳气肥环境调控系统。设计气肥发生器,利用碳酸氢铵加热产生二氧化碳的原理,制备二氧化碳气肥;采用负压反应腔和二级过滤净化系统提高系统的安全性;采用可编程逻辑控制器(programmable logic controller,简称 PLC)作为主控制器,实现气肥发生器工作循环的自动控制;PLC 通过无线数传电台与传感器采集装置通信,在 PLC 中集成模糊控制算法,实现温室内二氧化碳的智能调控;采用监视与控制通用系统(monitor and control generated system,简称 MCGS)触摸屏作为人机交互装置,MCGS 触摸屏通过 RS232 总线与 PLC 通信交换数据,实现系统状态与测试数据的实时显示、存储及历史信息统计。结果表明,系统运行稳定可靠,操作界面简洁方便,更好地实现了对温室二氧化碳气肥环境的实时监控。

**关键词:**二氧化碳;气肥环境调控系统;温室;PLC;气肥发生器

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)04-0204-05

温室大棚种植由于处于密闭环境和种植密度等原因,极易产生二氧化碳(CO<sub>2</sub>)不足的问题,作为植物光合作用的重要原料,二氧化碳匮乏将直接影响作物光合作用,降低对太阳光的利用率,影响作物长势与抗病害能力,因此温室大棚生产中施用二氧化碳气体肥料已成为一项重要的增产措施。现有的二氧化碳气体肥料的制备有高压钢瓶、酸盐反应、燃烧型、微生物发酵法等多种方法<sup>[1-3]</sup>,但均由于多种原因未在生产中得到广泛应用。特别是传统酸盐反应型,虽有价格便宜的优点,但控制困难,难以精确调控,针对此种情况,笔者设计了电加热型气肥发生器<sup>[4]</sup>,采用碳酸氢铵作为反应原料,价格便宜,使用方便。同时系统采用可编程逻辑控制器(programmable logic controller,简称 PLC)作为主控制器,运用组态技术、无线通信技术等实现产气输气的自动化,完成对温室大棚生产过程中二氧化碳气肥的补充,并且可进行远程监控,提高瓜果蔬菜的质量和产量,实现温室的智能化生产,减轻工人的作业强度,也对实现我国温室内设备的规模化和科学化管理有一定的促进作用。

## 1 系统总体方案

设计温室二氧化碳气肥调控系统的原理是利用加热碳酸氢铵制取二氧化碳,以 PLC 为主控制器,结合温湿度、二氧化碳等多种多路环境传感器实时采集环境数据,采用无线传输方式,通过 RS485 总线将数据传给 PLC,由触摸屏将数据实时显示出来,并绘出历史曲线等。同时 PLC 根据作物生产要求,利用模糊控制算法对温室环境系统进行智能调控。

收稿日期:2018-06-23

基金项目:天津农学院研究生培养质量提升项目(编号:2017YAL003);天津市农业科技成果转化与推广项目(编号:201703080);天津市科技计划(编号:17ZXYENC00080)。

作者简介:单慧勇(1977—),男,山西临汾人,硕士,副教授,主要从事农业自动化技术研究。E-mail: tjshyyr@sina.com。

温室二氧化碳气肥环境调控系统总体结构如图 1 所示,分为上位机与下位机 2 个部分,下位机为 PLC 控制器,主要完成对二氧化碳反应器、过滤装置、环境采集装置以及输气装置的控制;采用集可视、操作于一体的触摸屏作为 PLC 的人机接口和上位机,与 PLC 进行通信,实时地显示采集数据、储存及进行历史信息统计,并对系统工作参数如注水时间、排水时间、延时输气时间、延时排水时间、反应时间进行设置,通过下位机 PLC 编写对各个子系统工作状态进行调控的程序,实现对系统整体的智能调控,最终实现温室中气肥发生器的正常运行和室内二氧化碳的补偿和平衡。

系统总体过程如下:上电后,系统自动通过各种传感器检测温室内的温度、湿度、光照度、二氧化碳浓度等环境参数,在启动气肥环境调控系统后,PLC 控制器依据内置的模糊决策算法动态判定当前温室内适宜的二氧化碳浓度水平,控制二氧化碳发生器和气泵的工作状态,进行温室中二氧化碳气肥环境的自动智能控制。通过人机接口,可以实现相应的参数设定和信息查看,如作物类型设定、控制模式设定、历史数据信息查看、传感器参数设定等各种操作。

## 2 系统硬件设计与选型

### 2.1 PLC 选型

分析系统中所需 PLC 的 I/O 点数为 5 路输入量、7 路输出量。考虑系统 I/O 点数、经济性、存储器容量等方面的指标,选择国产信捷 PLC,型号为 XC2-16R-E,工作电压为 DC 24 V,具有 8 路输入、8 路输出,输出为继电器输出,2 路通信接口,分别为 RS232、RS485。

### 2.2 现场触摸屏选型

选择具有可视化和按键功能且性能稳定的监视与控制通用系统(monitor and control generated system,简称 MCGS)触摸屏作为显示设备,型号为 TPC1062K。该触摸屏是一款以低功耗中央处理器(central processing unit,简称 CPU)为核心(主频 600 MHz)的高性能嵌入式一体化触摸屏,预装了 MCGS

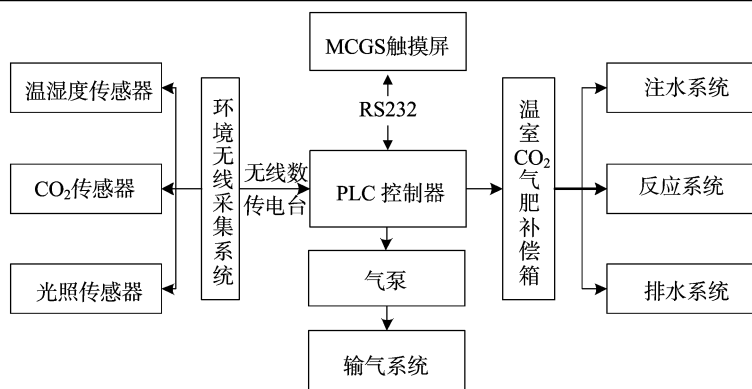


图1 温室二氧化碳气肥环境调控系统总体结构示意图

嵌入式组态软件,具备强大的图像显示和数据处理功能。

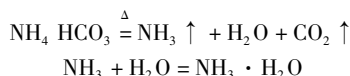
### 2.3 传感器的选型

**2.3.1 温湿度光照传感器** 考虑实用性和价格等因素,选用精讯科技 JXBS-3001 高灵敏度壁挂式光照温湿度三合一传感器,采用直流供电 9~24 V DC,光照度量程为 0~65 535 lx,精度为 ±7%;温度测量范围为 -20~60 ℃,精度为 ±0.5 ℃;湿度测量范围为 0~80% RH(相对湿度),精度为 ±3% RH;输出信号通过 RS485 输出(采用标准 Modbus 协议)。

**2.3.2 温湿度二氧化碳传感器** 采用 JXBS-3001-二氧化碳-RS 高灵敏度壁挂式二氧化碳传感器,此传感器为三合一的传感器,具有监测温度、湿度、二氧化碳浓度的功能,信号稳定、精度高。二氧化碳测量范围为 0~5 000 μmol/mol,精度为 ±(50 μmol/mol+3% 读数,25 ℃);温度测量范围为 -25~85 ℃,精度为 ±0.5 ℃;湿度测量范围为 0~100% RH,精度为 ±3% RH;输出信号通过 RS485 输出(采用标准 Modbus 协议)。

### 2.4 二氧化碳气肥发生器的设计

**2.4.1 产气原理** 考虑系统使用的安全性和可靠性,采用加热碳酸氢铵的方法制取二氧化碳。将碳酸氢铵在反应装置中进行加热,使其分解并释放出氨气和二氧化碳,经水过滤后氨气溶于水形成氮肥,二氧化碳释放到温室大棚中作为气肥使用,其基本反应关系如下:



**2.4.2 气肥发生器的结构** 传统电加热型气肥发生器的反应器处于正压状态时,会造成密封困难,容易发生氨气的泄漏;同时采用单级清水吸收过滤氨气,在反应一段时间后,由于吸收器内的水温升高,导致氨气的吸收效果变差。

针对该种情况,笔者对传统电加热气肥发生器进行改进设计,其结构示意图如图 2 所示<sup>[4]</sup>。改进后的气肥发生器核心结构组件包括电加热反应器、二级过滤器、负压与气动排水系统以及 PLC 控制系统(图中未画出)。电加热反应器中的碳酸氢铵加热分解后产生二氧化碳和氨气的混合气体,经二级过滤器净化吸收氨气后,由气泵抽出并输出纯净的二氧化碳气体。装置整体处于密封状态,适当选择气泵的参数,气泵的抽吸使得反应器、过滤器均处于负压状态,大大地提高了反应器的密封效果,避免了反应气体的泄漏。在反应器电加热部分设置温控传感器监测反应器状态,当传感器温度直线上升并超过设定阈值时,即可判断反应器中原料消耗完毕。配合

外部自动换水与气肥环境调控系统,可以实现系统的全自动工作。考虑设备使用环境,设备主体采用不锈钢材料,加工完成的气肥发生器系统如图 3 所示。

反应器工作过程如下:注水状态时,控制器控制进水阀 S1 打开,B2 气泵打开,出水阀 S2 关闭,BQ1 排水平衡气阀、BQ2 反应排气阀关闭,BQ 抽气阀开启,反应器内空气经 BQ 抽气阀被气泵抽出,使反应器内气压低于大气压值,水通过注水口进入过滤器,依次注入二级过滤器和一级过滤器,二级过滤器液位由溢流管控制,在一级过滤器中设置液位开关控制注水量;反应时,BQ2 反应排气阀和 B2 气泵打开,BQ 抽气阀、BQ1 排水平衡气阀关闭,反应器中产生的气体通过管道流入过滤器中,先经过下层的一级过滤、上层的二级过滤除其中的氨气,CO<sub>2</sub> 经 BQ2 反应排气阀和 B2 气泵输入温室中,实测在设计条件下,反应终了时出口氨气浓度仍在 1 μmol/mol 以下,大大提高了氨气的净化效果;系统在反应结束后,BQ1 排水平衡阀开启,出水阀 S2 开启,BQ 抽气阀关闭,一级过滤器中的水先排出,形成负压,二级过滤器与大气联通,在虹吸作用下,二级过滤器中的水经排水管注入一级过滤器,由出水阀 S2 排出。

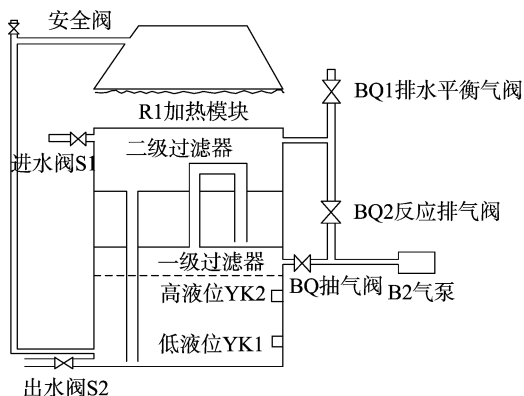


图2 气肥发生器结构示意图

## 3 系统软件设计

软件设计包括上位机触摸屏的组态设计和下位机 PLC 的程序设计。

### 3.1 PLC 主程序设计

PLC 主程序流程如图 4 所示。PLC 上电,系统初始化后可进行系统设置,选择是否设置新的参数,以及工作方式的设



图3 二氧化碳气肥发生器系统

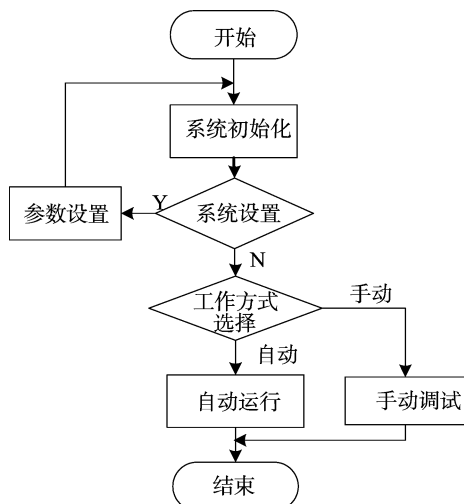


图4 PLC 主程序流程示意

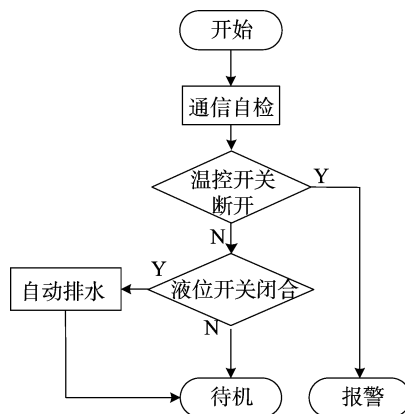


图5 系统初始化流程示意

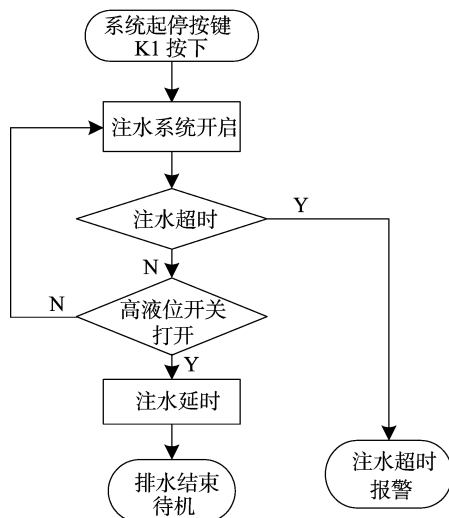


图6 注水流程示意

置等。工作方式分为手动、自动模式,手动模式中人直接控制系统的各部分运行,单独执行相关的设备;自动模式中系统根据传感器采集的参数与系统的设定值进行对比,自动调节温室中的环境,当自动、手动模式遇到设备故障时,系统停止运行并报警。

为方便控制,系统设计了2个控制按键,分别为系统起停按键 K1 和反应器起停按键 K2。上电,系统初始化完成,进入待机状态,人工添加原料后,按下系统起停按键 K1,系统进入注水状态。注水结束后,再次进入待机状态。闭合反应器起停按键 K2,进入反应状态。手动模式下此时将直接反应供气,自动模式下,由内置控制程序控制反应器是否工作。

### 3.2 系统子程序设计

**3.2.1 系统上电初始化** 系统初始化流程如图5所示,系统上电后,初始化,进行系统自检,包括外部数据采集系统、反应器温控开关系统(图中未示出)、液位开关(高液位 YK2 和低液位 YK1)、反应器控制按键的状态等。若温控开关断开,则控制蜂鸣报警器 F1(图中未示出)蜂鸣报警,此时系统起停按键 K1、反应器起停按键 K2 不起作用,待温控开关复位后,报警停止,进入上电待机状态。为提高系统安全性,系统设计为上电自检通过后,若高液位 YK2、低液位 YK1 中有1个闭合,启动排水程序。

**3.2.2 过滤器注水** 图6为系统注水流程。注水状态时,控制器控制进水阀门 S1 打开,出水阀 S2 关闭,BQ 抽气阀开启,BQ1 排水平衡气阀、BQ2 反应排气阀关闭,B2 气泵工作,过滤

器处于负压状态,清水在过滤器负压与外部水压共同作用下注入到过滤器中,随着过滤器中液位的上升,液位开关低液位 YK1 和高液位 YK2 先后打开,在高液位 YK2 打开后,过滤器中的液位达到设计液位,控制器控制进水阀 S1 关闭,注水过程结束。如果在注水期间出现液位报警或者温度报警情况,系统立即停止注水,进入报警状态。在注水时考虑液位开关的浮动干扰,设置注水去抖动延时时间  $T_0$ ,以保证灌水能够达到预定液位。

**3.2.3 反应输气状态** 采用电加热分解碳酸氢铵的方式制取二氧化碳。当反应开始时,控制器控制进水阀 S1 关闭,出水阀 S2 关闭,电加热系统开始工作,反应器中原料受热分解产生二氧化碳与氨气的混合气体,BQ2 反应排气阀开启,BQ1 排水平衡气阀、BQ 抽气阀关闭,反应器中产生的混合气体经管道输送到过滤器中过滤后,得到纯净的二氧化碳气体,经 BQ2 反应排气阀进入 B2 气泵加压后,通过排气口和相应管路输送到温室当中;在反应输气中出现液位报警情况时,系统立即停止反应,进入报警状态。图7所示为反应输气流程示意。电加热反应器内的原料反应完成后,在电加热系统的作用下,电加热反应器内温度急剧升高,控制器通过反应器温控开关系统检测电加热反应器内的温度,当电加热反应器内的温度急剧升高到预定值时,判断为原料反应完成,电加热系

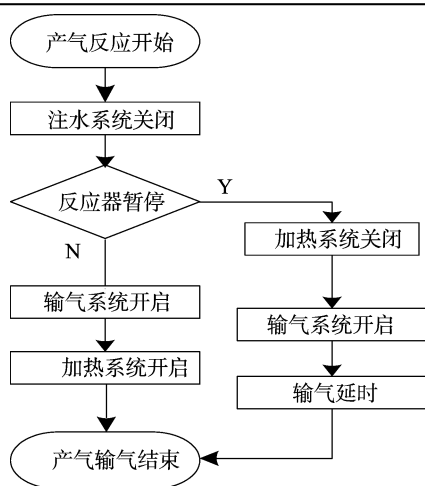


图7 反应输气流程示意

统、B2 气泵和 BQ2 反应排气阀均关闭。系统自动进入排水流程,排水完成后,缺料指示灯亮起。

**3.2.4 暂停反应延时输气状态** 反应过程中,反应器起停按键控制反应器暂停或 PLC 自动控制反应器暂停时,由于余热的影响,仍加热剩余的碳酸氢铵,此时通过设置暂停反应输气,延时状态继续输气,保证系统正常工作。主控制器 PLC 控制电加热系统停止工作,电加热反应器内的原料在余热作用下分解产生二氧化碳、氨气和水的混合气体,电加热反应器内产生的混合气体仍经管道输送到过滤器内,使水对混合气体中的氨气进行吸收,再经 BQ2 反应排气阀进入排气气泵 B2 加压后,通过管道输送到温室中。同样,由于排气气泵的抽气作用,电加热反应器与水净化器均处于负压状态,避免了内部气体的泄漏。

**3.2.5 排水状态** 系统反应结束后,电加热系统停止工作,进入自动排水状态,关闭进水阀 S1,开启出水阀 S2,BQ 抽气阀、BQ2 反应排气阀关闭,BQ1 排水平衡气阀开启,外部空气经 BQ1 进入二级过滤器,一级过滤器的水在重力作用下由出水阀 S2 排出,形成负压状态,二级过滤器中的水在虹吸作用下排入一级过滤器,液位开关高液位 YK2、低液位 YK1 先后复位,在液位开关 YK1 复位后排水结束,排水过程完成。由于液位开关的浮动,在排水结束时须设置排水去抖动时间  $T_2$ ,保证过滤器中的水可以排净。若在系统设置的最大排水时间内未完成排水,则进入排水超时报警。排水状态流程如图 8 所示。

系统设置也可通过触摸屏停止反应,强制排水。

**3.2.6 报警状态** 系统报警逻辑由 2 个部分组成,一部分为温控报警,一部分为水位报警。温控报警由温度传感器触发,当设备缺料或者无料干烧时温度会急剧升高,触发温度传感器对应程序的常闭开关闭合,系统停止加热进行缺料报警,同时进行延时输气,触摸屏上面显示缺料报警。水位报警则是通过上液位和下液位传感器实现的,若下液位没有触发上液位就已经触发,说明在 2 个传感器中存在硬件故障,须要及时检查液位传感器。在系统反应过程中设置的参数如果不合理也会报警。注水时间和排水时间设置过短,机器没有注满水或者没有能够排除所有的水,系统报警,触摸屏上显示注水超时或者排水超时。

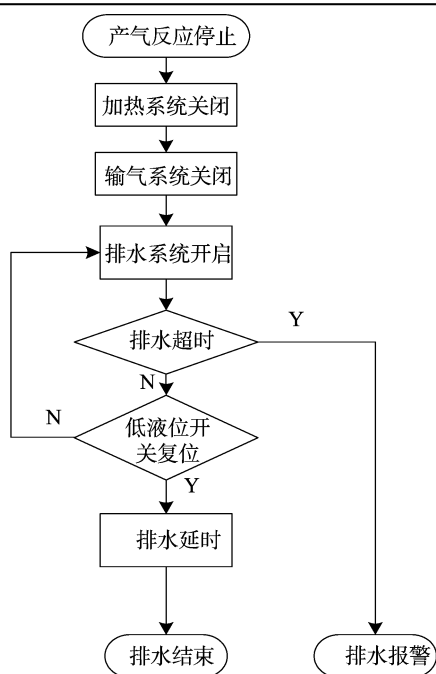


图8 排水状态流程示意

### 3.3 上位机触摸屏的组态设计

触摸屏作为 PLC 的上位机,可以中断 PLC 的进程,更改 PLC 的工作状态,设置各种初始参数。系统进入待机状态时可以通过触摸屏更改注水时间、排水时间、加热时间等参数。系统的功能框图如图 9 所示。

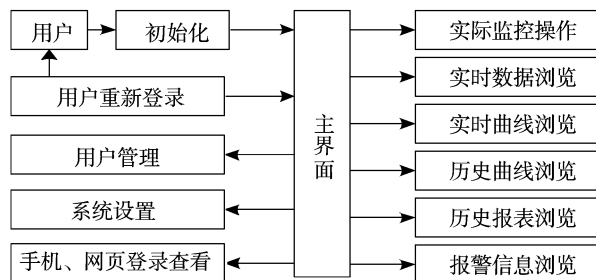


图9 触摸屏系统功能框图

在组态软件开发环境中根据系统结构要求建立相应的监控窗口,进行画面编辑、关联变量、动画连接、建立脚本等操作。设计系统环境参数设定界面如图 10 所示。

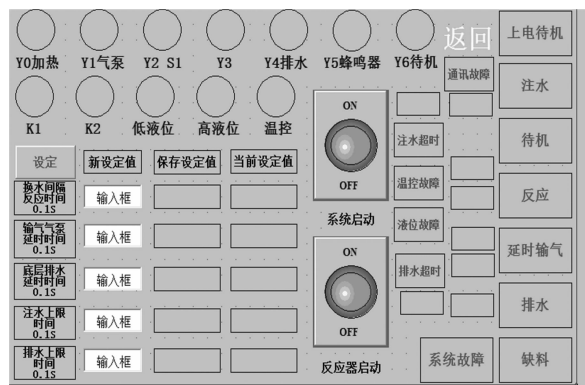
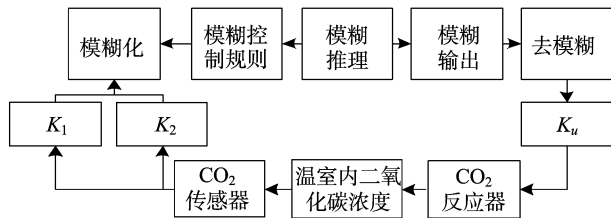


图10 系统环境参数设定界面

## 4 系统控制算法设计

温室系统是一个非线性、时变、大滞后的复杂系统<sup>[5-6]</sup>,若采用传统控制方法或现代控制理论很难实现对系统的精准控制,模糊控制<sup>[7]</sup>不须要建立被控对象,而是根据实际的输入输出,把专家的知识 and 现场操作工人的操作经验总结成一系列的控制规则,利用模糊逻辑推理和软件程序对系统进行实时、准确控制,而且模糊控制具有强鲁棒性和高稳定性。

模糊决策控制系统的核心是模糊控制器,而模糊控制器由模糊化控制、模糊决策模块和清晰化模块3个部分组成(图11)。结合温室内二氧化碳浓度的变化规律,应用模糊控制理论,建立多输入单输出的温室二氧化碳施肥模糊决策系统,在气肥调控的过程中,实时监测环境参数,实现气肥环境的动态决策调控<sup>[8]</sup>,详细算法将另文撰述。



图中  $K_1$ 、 $K_2$  分别为二氧化碳浓度偏差、偏差的变化率由物理论域向模糊论域转换的量子因子;  $K_u$  为由模糊论域向物理论域转换的比例因子

图11 模糊控制器的结构示意图

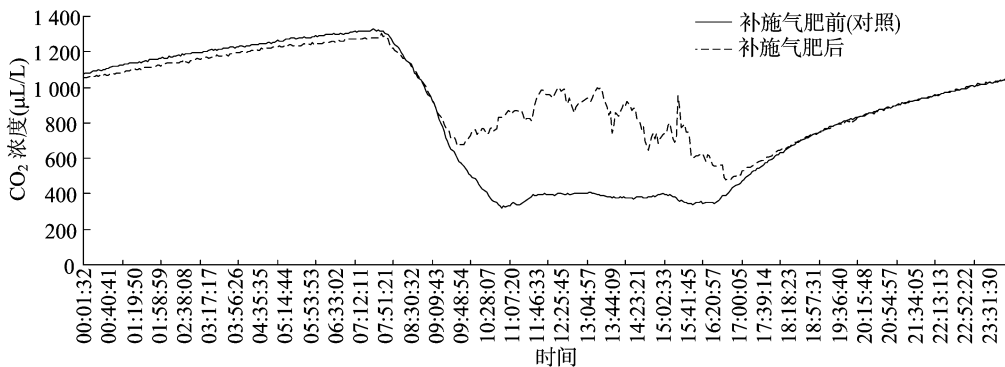


图12 温室内二氧化碳浓度变化趋势

采用特殊结构设计,利用气泵抽气和输送,使得反应器内维持负压状态,克服了反应器密封的难题,并能实现气体的带压输送,输送距离远、效率高,而且减少了气体泄漏的可能性,同时进一步提高了设备使用的安全性。

过滤器设计采用二级净化技术,反应产生的气体先后流经二级过滤器,大大提高了反应副产品氨气的吸收效果,过滤器出口处氨气浓度实测在  $1 \mu\text{mol/mol}$  以下。

系统以 PLC 作为主控制器,通过无线网络监测温室内环境参数,模糊决策算法确定适宜气肥浓度调控目标,最终实现包括反应器状态、加热功率、输气、延时、注水、排水等多个状态的切换控制以及状态实时监测报警,自动化程度高,便于与其他系统集成。

## 参考文献:

[1] 杜金伟,姜伟,付崇毅,等. 设施条件下二氧化碳气体施肥器的

## 5 系统测试

图12为日光温室番茄施用  $\text{CO}_2$  前、后棚室内的  $\text{CO}_2$  浓度变化趋势,其中靠下的曲线为未增施  $\text{CO}_2$  棚室内的  $\text{CO}_2$  变化趋势。施用  $\text{CO}_2$  前,在 08:00 之后随着太阳光照的逐渐加强,对照温室的  $\text{CO}_2$  浓度呈迅速下降趋势,但是下降的速度稍慢一些,11:00 左右通风后棚室二氧化碳的浓度水平在  $300 \mu\text{L/L}$  左右,此后即使采用通风措施也不能提高棚室内的二氧化碳浓度,该浓度水平一直维持到 16:30 之后才开始上升,说明此时仅靠通风所补充的  $\text{CO}_2$  已不能满足作物光合作用的需要,亟需其他方式补充  $\text{CO}_2$ 。采用气肥补施系统后,在棚室内  $\text{CO}_2$  浓度下降到接近大气浓度时系统即开始工作,同时随着光照度的增加,可控制棚室内  $\text{CO}_2$  浓度水平相应提高,且维持在  $600 \mu\text{L/L}$  以上,在 16:00 左右之后呈下降趋势,至 17:30 左右与未增施前基本持平。

## 6 小结

以农业生产中易获得的碳酸氢铵为反应原料,不使用硫酸和碳酸氢铵反应,应用电加热的方式获取二氧化碳,提高了设备使用的安全性和设备的推广适用性。

设备主体采用不锈钢材料加工,并设计气压自动换水系统,既提高了设备的自动化程度,又避免了系统薄弱器件与腐蚀性液体的直接接触,延长了设备的使用寿命。

应用[J]. 北方农业学报,2016,44(4):125-127.

[2] 高瑞龙. 设施蔬菜生产中的二氧化碳施肥器设计[D]. 西安:西安工业大学,2016.

[3] 张淑娟,王双喜,刘淑珍. 自压平衡式  $\text{CO}_2$  发生器的设计与应用[J]. 农业机械学报,2003,34(1):148-150.

[4] 单慧勇,李合伟,赵辉,等. 用于电加热分解碳酸氢铵制取二氧化碳的自动控制系统:CN105948828A[P]. 2016-09-21.

[5] 毕玉革,麻硕士. 我国现代温室环境控制硬件系统的应用现状及发展[J]. 农机化研究,2009,31(3):226-229.

[6] 蔡春丽. 智能温室环境控制系统研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版),2007,21(10):105-107.

[7] 徐美娇. 基于模糊控制算法的北方日光温室冬季环境控制系统的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.

[8] 罗家兵,张恒. 农业温室二氧化碳模糊控制系统算法[J]. 广东农业科学,2009(5):221-224.