

沼气干发酵反应器增温装置控制理论研究

郑勇^{1,2}, 焦静¹, 王金丽¹, 张劲¹, 黄正明¹, 曹建华²

(1. 中国热带农业科学院农业机械研究所, 广东湛江 524091; 2. 中国热带农业科学院橡胶研究所, 海南儋州 571737)

摘要: 目前,我国沼气工程发展已初具规模,但系统对人工的依赖性较大,机械化、信息化、智能化水平较低,系统故障诊断滞后,现场操作有一定的危险性。目前,多参数监测、多种传感器融合、多种控制方式并存、增温保温技术的研发与应用已成为今后农村沼气工程发展的趋势。基于上述突出问题,尝试采用农业物联网、PLC、云触摸屏、APP等现代农业信息技术,利用空气能和太阳能清洁能源,提出了一种多功能互补型沼气干发酵反应器增温装置物联网控制系统解决方案。

关键词: 沼气; 增温装置; 控制理论; 物联网

中图分类号: S216.4

文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2018)04-0247-05

DOI:10.13427/j.cnki.njy.2018.04.047

0 引言

我国沼气事业发展主要包括3个阶段—发展初期、技术发展期和发展成熟期。在发展初期,国家领导人毛泽东同志提出沼气的应用优势,20世纪70年代中期,国家开始对发展沼气事业大力扶持^[1],但沼气池的运行存在持续性差、维护技术落后等问题,在一定程度上打击了积极性。在技术发展期,开始总结沼气建设存在的问题和技术需求,加大力度提高沼气生产的技术创新和可行性改进,凸显了沼气使用的优越性^[2]。在发展成熟期,沼气事业的发展成为我国一项重大发展工程,得到了国家的大力扶持。“十二五”期间,在农村沼气建设方面,我国国家投资142亿,2015年投资20亿。在我国沼气事业发展过程中,政府积极引导和资金扶持,沼气工程标准体系得到日益完善^[3-4],沼气利用效益得到增强,沼气工程建设管理得到优化,节约了资源,减少了废弃物排放。但我国沼气技术与欧洲发达国家相比还比较落后,基础配套设施还不完善,缺乏技术人员,沼气工程系统智能化、信息化水平低,且我国发展沼气的驱动力是为了保护环境、建设美好家园,而欧洲沼气事业已经是商业化发展模式。

在沼气工程系统中,厌氧发酵温度过低是制约沼

气工程发展的一个关键因素,研究廉价实用的沼气工程增温装置显得非常重要。研究表明,温度在35℃条件下发酵产生的沼气量是温度在15℃条件下发酵的12倍^[5]。如何帮助沼气工程系统增温保温,是学者们关注的问题。学者们立足廉价、实用和清洁的能源角度,研究了将系统管道埋入地下进行保温,以及使用化学药剂聚苯乙烯和聚氨酯等材料强化保温等方式,采用减少系统水的含量的方式降低系统运行过程中的能耗^[6-7],使用太阳能集热器、沼气发电机组余热、生物质热水锅炉、空气能热泵或沼气燃烧等单种方式和复合方式进行增温^[8-11],从增温的经济效益和能源的利用率方面考评,结果都不理想。其中,太阳能易受到天气的影响,稳定性较差^[12-14];沼气发电余热能够通过专门装置实现热能的回收利用,加热最快^[15-17];空气能热泵是利用空气中的能量来进行热能的产生,以消耗最少的能源产生恒温、大水量、高水压的一种热水器。目前,分别经过大功率燃气、大功率电热水器、太阳能热水器、空气能热泵4代的发展,运用热泵工作原理制热后将热量输送给保温水箱,空气热泵制热不需要阳光,能够连续产生热量,且寿命长,不生产有毒有害气体。

空气能热泵是一项开发和应用潜力比较强大的技术。西北农林科技大学的苑建伟、黑龙江省农业机械工程科学研究院的魏兆凯等人重点研究了太阳能对沼气系统的增温技术^[18-19],沈阳农业大学工程学院的寇巍等人研究了太阳能与发电余热的复合模式对沼气系统的增温系统的理论设计^[20],西北农林科技大学农业部沼气西北分中心的邱凌等人研究了太阳能双效增温方式的平衡算法,分析了增温对沼气系

收稿日期: 2017-01-18

基金项目: 广东省公益研究与能力建设专项(2015A020209009);海南省自然科学基金项目(20155213)

作者简介: 郑勇(1984-),男,湖南永州人,助理研究员,硕士,(E-mail)zhengyong07@163.com。

通讯作者: 焦静(1983-),女,陕西蒲城人,副研究员,硕士,(E-mail)eddweiss@163.com。

统内各部分产生的热利用效率^[21]。新型复合型增温方式成为系统增温方面研究的热点和趋势。

目前,可搅拌式小型沼气干发酵装置,主要有两种形式,即“外转式—转筒仓式干发酵装置”与“内转式—螺带式搅拌干发酵装置”^[22]。通过对两种方式进行对比发现:转筒仓式干发酵装置的关键部位是发酵罐体旋转,优于螺带式搅拌干发酵装置。其优点包括:物料搅拌更均匀且物料无分层与死角地带,物料间热传递比较通畅且可实现连续进进出料。鉴于以上优势,转筒仓式干发酵装置具有较好的应用推广价值。本文针对建立的沼气中试示范基地的转筒仓式干发酵装置中的增保温装置,根据沼气干发酵工艺对温度的需求,研究了该干发酵反应器增温装置的物联网控制原理。

1 研究理论与方法

1.1 沼气干发酵工艺流程理论概述

相对常规的沼气发酵工艺,沼气干发酵工艺进料干物质浓度较高,约20%~40%。常用农作物秸秆、

生活废弃垃圾和畜禽粪便等作为发酵原料,这些原料均是固体有机废弃物,含水率低,经厌氧发酵作用后将产生沼气,沼气干发酵又称固体厌氧发酵^[23]。沼气干发酵的生物学过程大同小异,关键体现在干发酵反应器装置上,装置的不同将带来沼气生产工艺上的差异。

与常用的沼气发酵技术相比,沼气干发酵技术具有明显的优势:①因干物质浓度含量高而没有流动态的沼液,不会产生二次污染;②进行厌氧发酵时可有效保持和提升温度,能耗较低;③沼渣含水率低,易于与秸秆和畜禽粪便等固体物进行调合,可以制作成有机肥,综合经济效益高。但也存在一些问题,如发酵物料搅拌困难、接种物与新料混合不均匀及与最佳微生物生长环境相矛盾等问题。

本研究依托的沼气中试基地位于广东省湛江市,地处亚热带地区,常年气温较高,日照时间长。本研究因地制宜,根据转筒仓式干发酵装置的特点和系统需求,采用连续式中温一级消化沼气发酵工艺,具体工艺流程如图1所示。

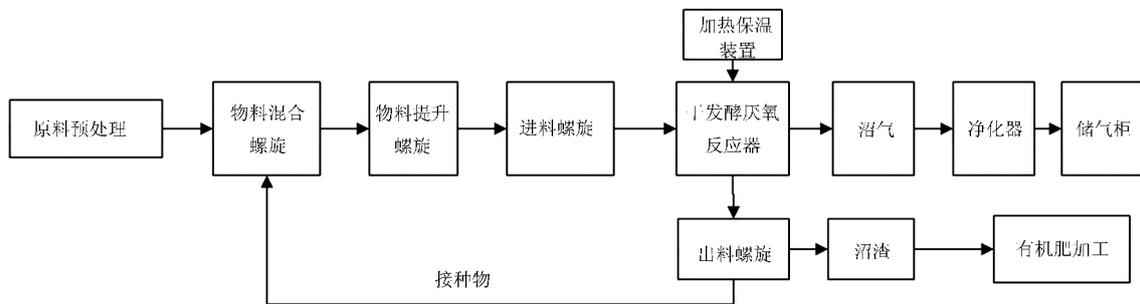


图1 沼气干发酵设备流程图

Fig.1 The technical process drawing of biogas dry fermentation

1.2 沼气干发酵装置和工作过程理论概述

转筒仓式干发酵装置主要部分由转筒仓式反应器、螺旋混料机、螺旋提升机、螺旋进料机、螺旋出料机及出料带式输送机组成,如图2所示。

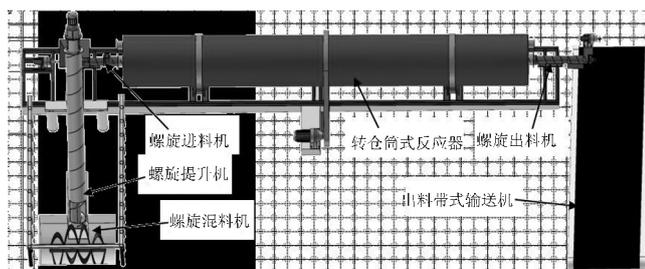


图2 装置主体结构示意图

Fig.2 The structure schematic of the device main structure

该干发酵装置的核心部分由转筒仓式反应器、螺旋进料机和螺旋出料机3部分组成。其中,转筒仓式反应器是微生物厌氧发酵原料的主体场所,螺旋进料

机负责把新鲜物料连续地送入反应器中,螺旋出料机则负责把发酵后的沼渣连续地输送出去;同时,螺旋进、出料机承担着密封进、出料口的任务,对转筒仓式反应器创造良好厌氧空间具有重要作用。

根据选定的干发酵工艺,本干发酵装置的主要工作过程包括:秸秆等原料经过预处理后添加接种物(回料)一起送入螺旋混料机中;搅拌均匀后,经螺旋提升机转送至螺旋进料机,在进料螺旋的推动下,进入转筒仓式反应器中进行厌氧消化;同时,启动转筒仓式反应器转动,新进物料与原来反应器内的物料将搅拌混合并分布均匀;发酵后的沼渣经螺旋出料机送出,落入出料带式输送机的传送带上,再落入转运小车中,以备后续工序使用。

本装置最大的优点是混料、提升、进料、转筒旋转搅拌混合及出料等各工序工作可以同时持续联动运

行,沼气发酵启动后,厌氧发酵环境将保持在一个较优的状态,系统产气平顺,甲烷浓度高,突破了批量式干发酵系统工作时,系统每次都要经历因启动、高峰、衰减而带来的产气量与甲烷浓度不稳的问题。

2 理论研究过程

2.1 反应器增温装置控制需求分析

影响沼气发酵的因素很多,但目前有关沼气发酵的相关研究结果表明:温度是沼气发酵过程中的一个关键影响因素,温度能调控发酵菌群的活性,强化产气效果。如果不采取相应的措施维持温度的稳定性,发酵料液温度将易受外界气温、地温的直接影响,温度波动较大,降影响微生物生长,且沼气产量与甲烷浓度将不稳定。

经过前期发酵温度对沼气干发酵影响的反复试验,充分证实了温度对沼气发酵的重要影响。因此,根据本研究确定的示范基地沼气发酵工艺,需要确保发酵温度保持在中温区 30~38℃。发酵温度对增温装置的控制要求包括:

1) 实时性与准确性。因进出料与发酵都是连续进行的,所以要求整个发酵过程中温度都要保持在中温区,所设计的增温控制系统应能够快速响应温度的变化,实时做出调整,并能够准确地将温度控制在中温区内。

2) 温度数据自动记录。因温度波动对沼气发酵菌群的影响很大,要求反应器内发酵温度在整个发酵过程中能够自动记录,并能形成实时图表进行输出。

在满足以上发酵工艺的控制要求前提下,根据反应器增温装置的结构特点和节能增效需要,其自身具有两种工作方式:①在有充足强度的太阳辐射时,不启动空气能热泵,单独由太阳能集热联箱负责为干发酵反应器增保温;②当连续遭遇阴雨天、白天太阳能辐射强度不够或夜间条件下,太阳能集热联箱不能满足干发酵反应器增保温时,空气能热泵启动工作进行增保温。结合该两种工作方式,控制系统工作还应满足以下条件:

1) 空气能增温模块在水循环系统首次启动时,应首先启动空气能热泵以快速加热主、副水箱,水温达到 55℃时停止加热;在之后系统的运行过程中,根据太阳能集热联箱能否满足增保温的需要,控制启动和停止。

2) 启动反应器增温模块通过 PLC 的 PID 功能控制加温过程,持续加温到反应器内温度达到 38℃,系统进入热平衡状态。

3) 当热量平衡后,保温过程主要由太阳能集热联箱采集的热量进行维持。

4) 使用主保温水箱中的热水,当主保温水箱中的热水温度低于 45℃时,启动空气能热泵加热副水箱,水温达到 55℃时停止空气能热泵,打开主、副保温水箱间的电磁阀与热水泵,进行主副保温水箱热水交换。

5) 远程自动控制与故障自诊断。由于沼气发酵增温装置涉及的元件多,空间跨度大,且很多元件都包裹在保温层内,人工控制与检查费时、费力,要求能具有现场与智能终端远程控制结合及故障自动诊断功能。

2.2 物联网控制技术的增温装置设计

“太阳能-空气能热泵”多能互补型增温装置,主要通过由紫金真空太阳能管组成的太阳能集热联箱采集热量,通过空气压缩机热交换产生热量,把采集或产生的热量储在水箱中进行换热或存储,从而提高循环水的温度;循环热水再通过转筒仓式反应器外壁上的螺旋铝盘管,以辐射方式与发酵原料间接进行热交换,以充分利用太阳能、空气低温热能,使沼气干发酵系统温度保持在中温发酵范围内,保持沼气系统运行费用在尽可能低的水平。增温装置原理示意图如图 3 所示。

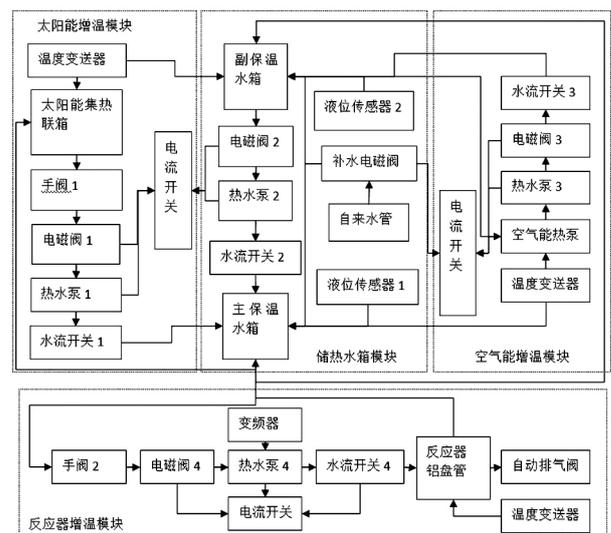


图 3 增温装置原理示意图

Fig. 3 The working principle diagram of warming facility

通过对转筒仓式沼气干发酵反应器增温装置的控制需求及工作原理分析发现:增温装置物联网控制系统的执行元件主要为各环节的热水泵、电磁阀及空气能热泵和变频器,检测元件主要有电流开关、水流开关等开关量传感器,以及液位变送器、温度变送器等模拟量传感器。这些元件所形成的系统需要控制

的点数较少,需要采集与处理的数据量不大,结合沼气发酵过程控制的特点,本研究拟采用西门子 S7-200 系列小型 PLC 可编程控制器作为控制系统的下位机,云触摸屏为上位机的系统架构。

在系统的设计中,下位机与上位机的通信,采用性能可靠的传统 RS485 通讯方式,因沼气基地建已具有有线与无线电信网络,故上位机与智能终端设备之间将利用示范基地现有的网络基础设施,采用因特网 P2P 云通讯方式,易于满足现场信号自动采集与处理及远程云控制与分析的功能需求,实现增温装置控制系统的物联网化。控制系统总体方案如图 4 所示。

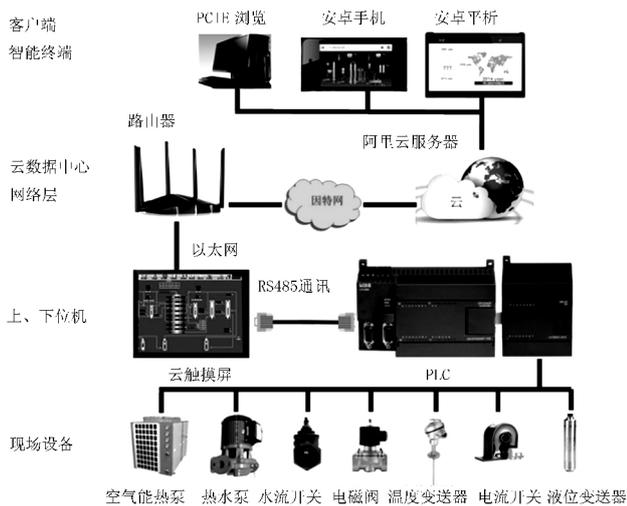


图 4 物联网控制系统总体设计

Fig. 4 The control system scheme bases IOT

3 研究结果

本文重点阐述了多能互补型沼气干发酵反应器增温装置的结构特点与工作原理,结合沼气干发酵工艺特点,分析了其在满足沼气干发酵工艺前提下的工况条件对控制系统的需求,确定了沼气干发酵反应器增温装置物联网控制系统的总体方案。本文选用由太阳能增温模块、空气能增温模块、反应器增温模块及储热水箱等四大模块组成的多能互补型水循环增温装置,采用中温转筒仓式干发酵方式和因特网 P2P 云通讯方式,完成了系统的方案总体设计,为多功能互补性沼气干发酵反应器增温装置开发应用提供思路和方法。

4 结论

发展农村沼气工程,可以提高农业废弃物的有效利用,对美丽乡村建设具有深远意义。随着信息技术的发展,越来越多的现代控制技术逐渐成熟,且系统控制模式也趋向于复杂化、多元化和智能化,多参数

监测、多种传感器融合、多种控制方式并存,以及增温保温技术的研发与应用已成为今后农村沼气工程发展的趋势。目前,在该方面的研究仍处于理论探索阶段,实践和推广意义不大。

本研究以提高沼气的产气率,提高系统运行的经济性、安全性和可靠性,实现系统的智能、远程、可视化精准控制为最终目标,充分体现环保和节能的趋势,设计理念符合我国沼气工程技术未来发展趋势。

参考文献:

- [1] 王飞,蔡亚庆,仇焕广. 中国沼气发展的现状、驱动及制约因素分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 184-189.
- [2] 李秀金,周斌,袁海荣,等. 中国沼气产业面临的挑战和发展趋势[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 352-355.
- [3] 郑鹏,高菲. 政府主导型农村沼气建设项目的后续服务问题研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(8): 3704-3705.
- [4] 程彤,李佩璇,晏强,等. 农村沼气发展现状分析及对策建议——以绵阳市为例[J]. 中国证券期货, 2013(3): 232-233.
- [5] 单军勇,刘效洲. 太阳能采暖的可行性分析[J]. 工业锅炉, 2003(6): 41-43.
- [6] 闫茂鲁,徐延熙,宋学文,等. HMC 沼气发酵装置在循环农业园区中的应用[J]. 农业工程, 2011(2): 39-41, 45.
- [7] 罗光辉,盛力伟,丁建华,等. 大中型沼气工程保温增温方法研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(9): 227-231.
- [8] 蒲小东,邓良伟,尹勇,等. 大中型沼气工程不同加热方式的经济效益分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 281-284.
- [9] 徐振军. 复合发电系统的沼气热泵供能特性研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 144-147.
- [10] 石惠娴,王韬,朱洪光,等. 地源热泵式沼气池加温系统[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 268-273.
- [11] 韩捷,向欣,李想. 干法发酵沼气工程无热源中温运行及效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 215-219.
- [12] Alvarez René, Lidén Gunnar. The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(15): 7278-7284.
- [13] 刘建禹,樊美婷,刘科. 高寒地区沼气发酵料液加热增温装置传热特性[J]. 农业工程学报, 2011(2): 298-301.
- [14] 王丽丽,杨印生,王忠江. 北方大型沼气工程加热保温系统优化[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011(4): 1183-1188.
- [15] Lubken M, Wicherna M, Schlattmann M, et al. Modeling the energy balance of an anaerobic digester fed with cattle manure and renewable energy crops [J]. Water Research, 2007, 41(48): 4085-4096.
- [16] Börjesson P, Ål, Mattiasson Bo. Biogas as a resource - efficient vehicle fuel [J]. Trends in Biotechnology, 2008, 26

- (1):7-13.
- [17] Niclas Krakat, Westphal A, Schmidt S, et al. Governs methanogen population dynamics biomass: thermophilic temperature anaerobic digestion of renewable [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76 (6): 1842 - 1850.
- [18] 苑建伟. 农村生态校园沼气系统太阳能增温技术研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学 2007.
- [19] 魏兆凯, 刘凯, 王晓洲. 沼气池太阳能增温技术研究 [J]. 农机化研究 2009, 31 (5):212-216.
- [20] 寇巍, 郑磊, 曲静霞, 等. 太阳能与发电余热复合沼气增温系统设计 [J]. 农业工程学报 2013 (24):211-217.
- [21] 邱凌, 王兰英, 苑建伟. 太阳能双效增温沼气系统热平衡计算及分析研究 [C]//2008 中国农村生物质能源国际研讨会暨东盟与中日韩生物质能源论坛论文集. 北京: 中华人民共和国农业部、亚洲开发银行 2008:5.
- [22] 陈岩. 超声波预处理与搅拌强度对秸秆发酵产沼气的影 响 [D]. 沈阳:沈阳航空航天大学 2013.
- [23] 宋籽霖. 不同温度下总固体浓度对厌氧发酵产气特性的影响 [D]. 杨凌:西北农林科技大学 2010.

The Theory Research on the Control System of Biogas Dry Fermentation Bioreactor with Warming Facility

Zheng Yong^{1,2}, Jiao Jing¹, Wang Jinli¹, Zhang Jin¹, Huang Zhengming¹, Cao Jianhua²

(1. Agro-machinery Research Institute of Chinese Academic of Tropical Agricultural Science, Zhanjiang 524091, China; 2. Institute of Rubber, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Danzhou 571737, China)

Abstract: At present, although there is suitable scale in our country in the methane project, the system is proved to be bad real-time capability, low information sharing, labor intensive personnel and low use of agricultural waste. The system fault diagnosis is depended on worker's experience, so the efficiency is low, the reliability is bad and the safety is no insurance. The development and application of technologies of multi-parameter monitoring and diagnosis, multi-sensor fusion, various control strategy and temperature control has become the development trend of developing biogas project in China rural. Based on the problems in the process of methane project in China, and with technologies of Internet of things (IOT), logic controller (PLC), touch panel, cloud technology and APP, the key technology is researched and resolving scheme is put forward in the paper.

Key words: biogas; warming facilities; control theory; internet of things