

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.039

# 基于 PLC 的养殖场氨气生物氧化装置设计与试验

郭建斌<sup>1</sup> 牛红林<sup>2</sup> 韩玉花<sup>3</sup> 董仁杰<sup>1</sup> 刘贤喜<sup>2</sup> 庞昌乐<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018;

3. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

**摘要:** 随着畜禽养殖业生产规模化、集约化不断提高, 养殖场氨气排放控制日益受到关注。养殖场氨气不经处理直接排放到大气中, 一方面与  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  结合生成大气二次颗粒物, 降低大气能见度。另一方面铵的沉降还可造成土壤酸化及水体富营养化等环境问题。针对上述问题, 根据生物法原理, 设计了基于 PLC 控制的养殖场氨气生物氧化装置, 实现了 pH 值控制、风机的启停控制、生物反应器中各环境参数的实时测量、环境参数曲线的实时显示和监测数据的自动存储等功能。设计后在北京某猪场进行了中试装置的示范搭建, 运行结果表明: 该装置对氨气去除率达到 90%, 具有运行稳定可靠、运行成本低等特点。

**关键词:** 养殖场; 氨气; 生物氧化装置; 可编程逻辑控制器

中图分类号: X701.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)03-0310-07

## Design and Experiment of Farm Ammonia Bio-oxidation Device Based on PLC

GUO Jianbin<sup>1</sup> NIU Honglin<sup>2</sup> HAN Yuhua<sup>3</sup> DONG Renjie<sup>1</sup> LIU Xianxi<sup>2</sup> PANG Changle<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

3. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

**Abstract:** With the increasing scale and intensive production of the livestock and poultry breeding industry, more and more attention has been paid to ammonia emission reduction from the animal farm. Ammonia discharged directly into the atmosphere would combine with  $\text{SO}_2$  or  $\text{NO}_x$  to form secondary particles which can reduce atmospheric visibility. Moreover, the  $\text{NH}_3$  emission is related to the risk of environmental problems such as soil acidification and water eutrophication. Ammonia is the stench gas emission in farms as one of the major pollutants in farms. Emission control of farm ammonia is an important part of air pollution control. There is a big gap in the research and application of environmental protection unit and automatic control system between our country and abroad. Biomass removal technology has attracted more and more attention due to its advantages of high efficiency, no secondary pollution, good safety, simple equipment construction, easy operation and maintenance, and low cost. A pilot ammonia bio-oxidation device based on the biological principle and PLC control was set up in a pig farm in Beijing. It realized the automatic storage and adjustment of pH value, the ventilation control, the real-time measurement and curve display of environment parameters in the bioreactor. After the system in pig farm was running stable, long-term test and continuous test were adopted to detect the treatment effect of ammonia oxidation device. After two-month operation, the ammonia removal efficiency could reach up to 90%. The device has the advantages of stable and reliable operation, together with low operation cost.

**Key words:** farm; ammonia gas; bio-oxidation device; PLC

### 引言

氨气是养殖场排放的恶臭气体中主要的污染物

之一<sup>[1-4]</sup>, 相关资料文献表明: 动物排放出的氨气约占全球氨气总排放量的 50%<sup>[5]</sup>, 在我国, 2013 年度氨排放总量为 988 万 t, 其中畜牧业所排放的氨气约

收稿日期: 2016-12-08 修回日期: 2016-12-28

基金项目: 北京市科技计划项目(D151100005115004)

作者简介: 郭建斌(1982—), 男, 副教授, 主要从事废弃物处理与生物质利用研究, E-mail: jianbinguo@cau.edu.cn

通信作者: 庞昌乐(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事生物质转化和农业工程装备研究, E-mail: pangcl@cau.edu.cn

占氨排放总量的54%。氨气能够与大气中的二氧化硫、氮氧化物的氧化产物发生反应,生成硝酸铵、硫酸铵等大气二次颗粒物,其对我国大气PM 2.5的贡献率在7.6%~37.7%<sup>[6]</sup>。因而,养殖场氨气的排放控制是大气污染防治的重要环节之一。

规模化养殖场氨排放防治技术主要包括“上游”防治技术、“中游”防治技术和“下游”防治技术<sup>[7]</sup>。“上游”防治技术主要是通过日粮配比调控、添加饲料改良剂来实现。“中游”防治技术主要是使用物理、化学、生物除臭剂或者合理配置畜禽舍,严格控制畜禽舍的温湿度、通风量<sup>[8]</sup>。用于规模化养殖场氨排放控制的“下游”防治技术主要包括吸收、吸附、催化、冷凝和生物处理技术及相关配套设备等。相对于物理化学方法,氨气的生物法去除技术由于具有处理效率高、无二次污染、安全性好、设备简单工程造价低、易于操作、管理维护以及运行费用低廉等优点受到越来越多的关注<sup>[9-13]</sup>。

目前,生物法处理污染气体的方法主要分为生物过滤法、生物滴滤池法和生物洗涤法<sup>[14-16]</sup>。生物法降解污染物气体的过程可总结为以下3个阶段:气体的溶解过程、气体的迁移过程、气体的代谢过程。生物法治理污染气体的装置已在发达国家得到成功应用,与之配套的自动控制系统在国外也比较成熟<sup>[17]</sup>,已实现了整个装置工艺流程的自动监测和控制。国内在环保单元设备和自动控制系统的研究和应用方面与国外还存在较大差距<sup>[18-19]</sup>。

本文基于生物洗涤塔技术和PLC控制技术设计一种自动监测与控制的氨气生物氧化装置,当猪舍产生的臭气通过生物填料时,被附着在生物填料上的微生物吸收、降解而实现氨气的氧化去除。

## 1 系统组成与工作原理

该养殖场氨气生物氧化装置主要由3个功能单元组成,包括养殖场臭气收集单元、生物氧化反应器单元、监测控制单元,如图1所示。当养殖场中的恶臭气体通过生物反应器中附有生物膜的填料层时,恶臭气体中的氨气首先溶解于循环水中,然后被附着在填料表面的微生物吸附获取、降解,从而达到去除养殖场氨气的目的,净化后的气体经过出气口排出。

养殖场臭气收集单元包括风机、气体分布器、压力传感器。舍中气体通过风机抽取经管道进入到生物反应器中,气体分布器使气体平均分布。通过压力传感器监测进气口的压力变化。

生物氧化反应器单元包括生物氧化反应器、填料、循环水泵、压力传感器、温湿度传感器。养殖场

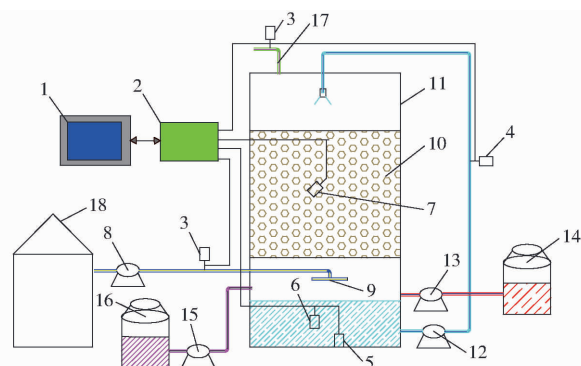


图1 养殖场氨气生物氧化装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of farm ammonia biological oxidation device

1. 触摸屏 2. PLC与模拟扩展模块 3. 压力传感器 4. 液体电磁流量计
5. 液位传感器 6. pH值传感器 7. 温湿度传感器
8. 风机 9. 气体分布器 10. 填料 11. 生物氧化反应器 12. 循环水泵
13. 加碱泵 14. 碱液 15. 加水泵 16. 水箱 17. 出气口
18. 畜禽舍

臭气通过管道、气体分布器后进入生物氧化反应器中,臭气中的氨气溶入循环水中,其反应方程式为: $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$ 。氨根( $\text{NH}_4^+$ )被附着在填料上的微生物利用,发生硝化反应,转化为亚硝酸盐氮( $\text{NO}_2^-$ )和硝酸盐氮( $\text{NO}_3^-$ ),从而达到去除氨气的目的。出气管上装有压力传感器监测出口压力,并判断填料是否堵塞;在填料层装有温湿度传感器用来监测微生物所处环境的温湿度;循环水箱中装有液位传感器、pH值传感器监测循环水的液位和pH值。

监测控制单元包括PLC、触摸屏、模拟量模块、风机、加碱泵。PLC通过模拟量模块对多个传感器电信号进行采集;产生的电信号通过A/D转换电路转换成数字信号,然后根据传感器特性对数据进行传感器系数换算。然后根据各个传感器子程序(传感器系数换算成相应的温湿度、压力、液位、pH值、循环水流量)转换的数值通过显示电路显示在触摸屏上,并且对数据进行存储,同时调用pH值、液位比较函数,并通过控制酸碱计量泵来调节控制循环水pH值与液位,同时根据压力变化控制风机的启、停。

## 2 系统硬件设计

### 2.1 生物氧化装置整体设计

生物氧化反应器是由钢板组成的箱体,箱体内外钢板都进行防腐处理,出气口安装旋流板防止循环水流失。生物氧化装置通过通风管道与猪舍侧向风机相连,废气经通风管道从生物氧化装置侧下方进入(图2),净化后的气体从上方出气口排出。通



图 2 生物氧化装置现场图

Fig. 2 Biological oxidation device

1. 生物反应器 2. 管道 3. 猪舍

风管采用耐腐蚀的硬质塑料搭建。

养殖场氨气生物氧化装置填料为聚氨酯 (Polyurethane) 填料, 简称 PU 填料。聚氨酯填料由于在成型过程中内部形成了很多微孔, 使其不仅具有多孔结构, 而且开孔率高, 透气性好, 抗压强度高并具有弹性, 从而为微生物提供了非常良好、相对安定的生存环境, 有利于微生物的附着、繁殖。具体设计参数如表 1 所示。

表 1 养殖场氨气生物氧化装置设计参数

Tab. 1 Design parameters of farm ammonia biological oxidation device

参数	数值
装置外部尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	6×3×3
填料规格(长×宽×高)/(m×m×m)	2×1×0.4
填料高度/m	0.8
填料表面积/m <sup>2</sup>	18
填料比表面积/(m <sup>2</sup> ·m <sup>-3</sup> )	3 000
堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	23
空床停留时间/s	2.88
循环水流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	17.5
日处理臭气量/m <sup>3</sup>	240 000

## 2.2 控制系统的组成及控制方式

根据控制系统现场需求, 装置自动控制系统分为 2 层结构: 现场层, 由系统的各种主要测量仪表设备和被控设备组成; 本地控制层, 由基于 PLC 的控制系统组成。装置自动监控系统结构示意图如图 3 所示。

控制系统现场层的主要控制仪表有: 填料层的温湿度、进出口压差检测和控制设备; 循环水箱水位、pH 值检测和控制设备; 循环水流量与风量检测。所有测量仪表都可直接变送至本地控制屏, 循环水流量可现场表头读取也可变送至本地控制屏读取。加水泵、加碱泵、风机、备用泵等控制设备由本地控制系统控制, 所有被控设备都可选择手动控制或自动控制。

本地控制系统主要由 PLC 主机、模拟量扩展模块、工业触摸显示器等组成。由于整个系统控制规

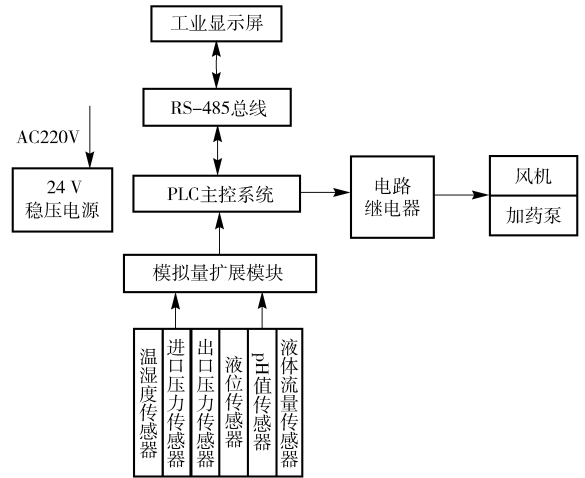


图 3 装置自动监控系统结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of automatic monitoring and control system

模较小, 选择台达公司 DVP32ES2 系列 PLC 作为本地控制的 CPU, 扩展添加 2 块四输入模拟量模块, 工业触摸显示器采用 10 寸台达 DOP-B10S411 型触摸屏。由于 PLC 主机不能识别各监测模拟量信号, 所以系统中的模拟量信号必须由模拟量输入模块处理后输入到 PLC 主机。主机与触摸屏之间采用 RS-485 连接, 触摸屏为用户提供了一个用于现场层监测控制的人机交互界面, 现场层所包含的设备运行状态以及传感器读数都可以在触摸屏上实时显示, 并显示实时数据曲线。同时, 工作人员也可以通过触摸屏设置设备运行参数以及设备的运行状态。

## 2.3 系统电源及驱动设备

配电系统电路如图 4、5 所示。配电系统电路主要分为 2 部分: 强电部分和弱电部分。强电部分包含空气开关 (QF1 ~ QFn)、交流接触器 (KM1 ~ KMn)、热继电器 (FR1 ~ FRn)、加药泵、循环水泵、风机等。

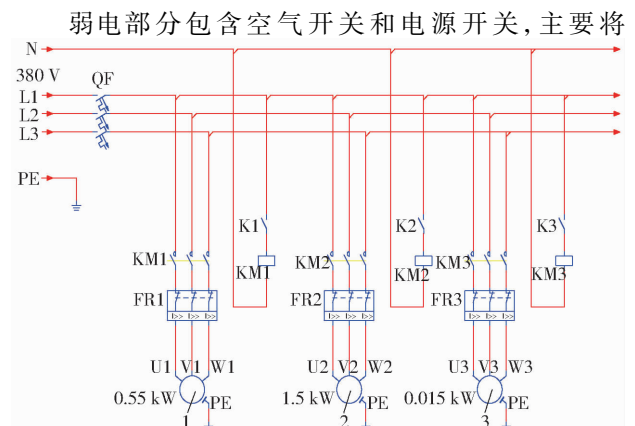


图 4 配电系统强电部分电路图

Fig. 4 Circuit diagram of high voltage power distribution system

1. 风机 2. 循环泵 3. 加药泵

220 V 强电转为 24 V 弱电,为 PLC、触摸屏和各类传感器供电。PLC 与触摸屏之间通过 RS-485 连接,PLC 通过控制继电器的开、关控制风机、循环水泵、加药泵的启、停。

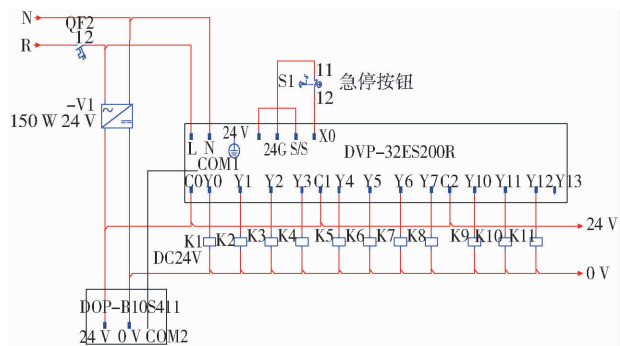


图 5 配电系统弱电部分电路图

Fig. 5 Circuit diagram of low-voltage distribution system

## 2.4 控制系统的硬件配置

生物氧化装置自动监测控制系统包括 PLC、传感器以及相应的扩展模块和人机界面等。根据生物氧化装置控制系统的要求以及今后产品的升级改造,选择台达公司生产的 DVP32ES2 系列 PLC 作为主控器件;选择与之配套的 DVP04AD-E2 模拟量输入模块,为数据采集提供四通道模拟量输入;选择台达 DOP-B10S411 触摸屏作为人机交互界面;采用温湿度传感器、液位传感器、pH 值传感器、压力传感器。传感器输出电信号(4~20 mA 或 0~5 V)。

(1) 主控器件:台达公司生产的 DVP32ES2 系列 PLC 提供 32 点数输入/输出(16 点数字量输入、16 点数字量输出),满足整个系统对 I/O 口的需求。整合的通讯功能,内建 1 组 RS-232,2 组 RS-485 通讯端口,支持 MODBUS 主/从站模式,为以后产品升级奠定基础。本 PLC 具有工作稳定、使用寿命长等特点。

(2) 模拟量扩展模块:台达公司生产的 DVP04AD-E2 模拟量输入模块可接受 4 点模拟信号(电压或电流)输入,将之转换成 14 位的数字信号。通过 DVP-PLC 程序指令 FROM/TO 读写模块的内容,模块内具有 49 个 CR(control register)寄存器,寄存器为 16 位寄存器。DVP04AD-E2 模拟量输入模块其他参数为:拟输入范围为  $\pm 10$  V、 $\pm 20$  mA;数字转换范围为电压输入  $\pm 8\ 000$ 、电流输入  $\pm 4\ 000$ ;在  $0 \sim 25^\circ\text{C}$  范围内满量程时总体精度为  $\pm 0.5\%$ ,在  $0 \sim 55^\circ\text{C}$  范围内满量程时为  $\pm 1\%$ ;响应时间为 3 ms 与通道数乘积。

(3) 信号检测:测温湿度元件选用 HYWSD 型温湿度传感器,输出信号为 4~20 mA 标准信号,精度为:温度  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ,相对湿度  $\pm 3\%$ 。压力选用

HY133 型压力传感器,输出信号为 4~20 mA 标准信号,量程为 0~100 kPa。液位选用 UTP 型投入式液位传感器,输出信号为 4~20 mA 标准信号,量程为 0~100 cm。循环水流量采用 LGD-10/S/M 型电磁流量计,输出信号为 4~20 mA 标准信号或控制电平可选择,也可在表头上直接读取流量。

## 3 系统软件设计

系统软件设计包括 2 部分:PLC 触摸屏监控程序设计和 PLC 控制程序设计。PLC 触摸屏监控程序设计采用 DOPsoft 软件进行模块化设计,触摸屏是系统的人机交互界面,具有输入输出功能。PLC 控制程序设计是系统功能的实施流程,采用 WPLSoft 软件编写,采用梯形图语言编写。

### 3.1 建立监控界面

监控主界面如图 6 所示,包括设备运行情况动态图、执行状态和监测数据实时显示,具有翻页功能,通过触摸屏下方按钮可选择进入查看监控数据曲线、查看设备信息、设备操作、修改时间参数、修改其他参数的页面。

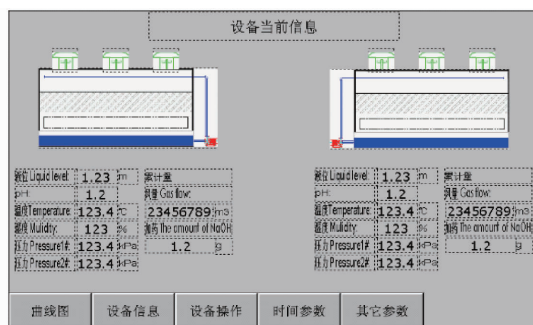


图 6 监控主界面图

Fig. 6 Main monitoring interface

### 3.2 PLC 控制程序设计

PLC 控制程序设计是系统功能的实施流程,采用 WPLSoft 软件、梯形图语言编写。同时也结合模块化设计思想设计各功能模块,主要包括程序初始化、数据采集、输出控制、数据管理等功能,如图 7 所示。

### 3.3 数据处理模块

由于各类传感器输出的信号为模拟信号(电信号:4~20 mA 或 0~5 V),选用的 PLC 不能识别模拟量信号,所以采用模拟量扩展模块。各类传感器输出的电信号首先输入模拟量扩展模块,由模拟量扩展模块将电信号转换成 14 位数字信号,再输入到 PLC 中。在采集相应的物理量之前,先要在屏幕上设置采集时间,存放于相应的寄存器中,由延时函数完成。传感器输出的信号经模拟量扩展模块 A/D 转换后进入数据缓冲区,通过 FROM 扩充模块 CR 数据读出函数成批读取缓冲区数据,然后在 PLC 内

部利用数据处理和浮点运算指令将其转换为对应的物理量。数据处理程序梯形图与指令图如图 8 所示。

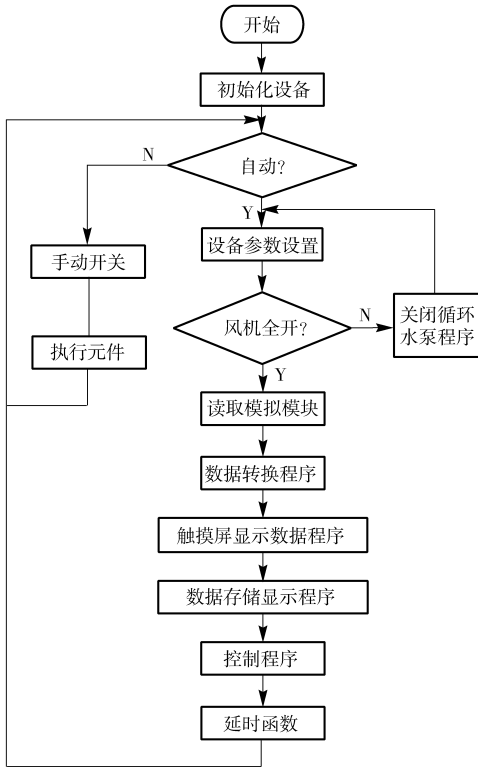


图 7 PLC 控制程序设计流程图

Fig. 7 Flow chart of PLC control program design

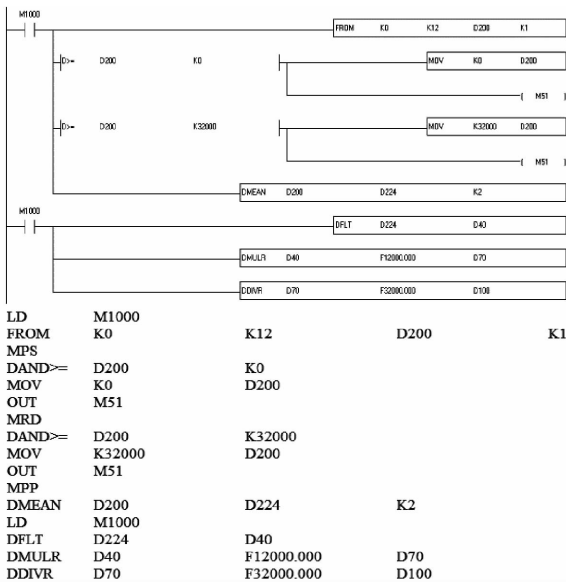


图 8 数据处理程序梯形图与指令图

Fig. 8 Ladder diagram and instructions of data processing program

数据处理程序包括数据的前期处理和数据显示、储存,数据显示包括测量结果显示和运行状态显示。测量结果借助 DOPsoft 上的数值显示模块和一般曲线图模块以数字和曲线的形式显示在触摸屏上。PLC 通过标记继电器来表示控制部件的启、停,触摸屏图标与继电器存在一一对应关系,通过访问

继电器来控制图标。

### 3.4 输出控制模块

输出控制包括风机的启、停控制和加碱液控制。通过数据处理模块采集反应器中的压力变化,控制 3 台风机的启、停,优先启动 2 号风机,随机启动 2 号和 3 号风机。通过 RAND 随机数值指令产生随机数来判断启动 1 号和 3 号风机。PLC 通过标记继电器 (M25 ~ M30) 控制触摸屏上的图标转动、停止。风机控制程序梯形图与指令图如图 9 所示。

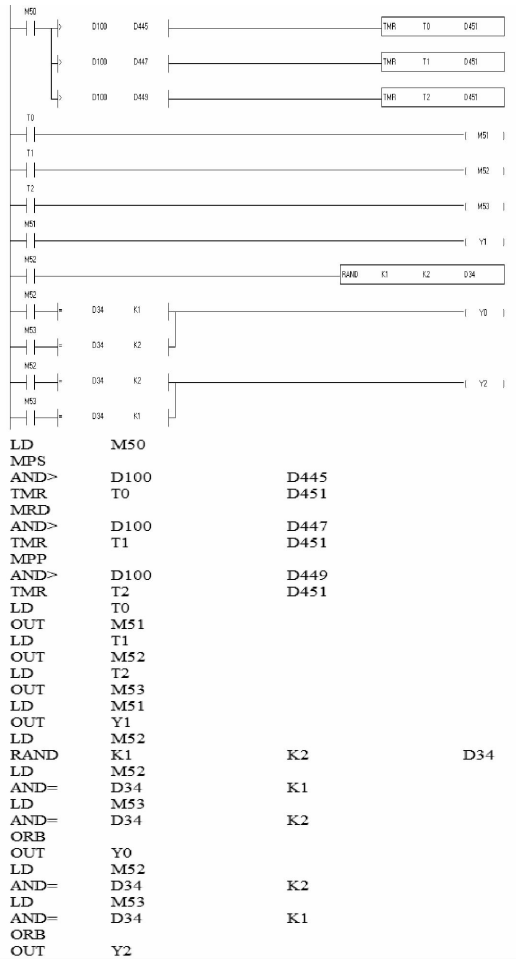


图 9 风机控制程序梯形图与指令图

Fig. 9 Ladder diagram and instructions of fan control program

由 pH 值传感器检测循环水中 pH 值的变化,当循环水中 pH 值小于设定值时,加碱泵开启。由于反应器底面积大、循环水量大,pH 值传感器过少,不能准确控制 pH 值。所以采用定时定量添加碱液,分多次添加碱液,同时显示添加量和添加时间。添加碱液控制梯形图和指令图如图 10 所示。

### 4 运行结果与分析

完成装置的硬件设计和软件设计后,在北京市昌平区某猪场进行了中试装置示范搭建。并于 2016 年 7 月 1 日开始进行生物氧化装置的安装调

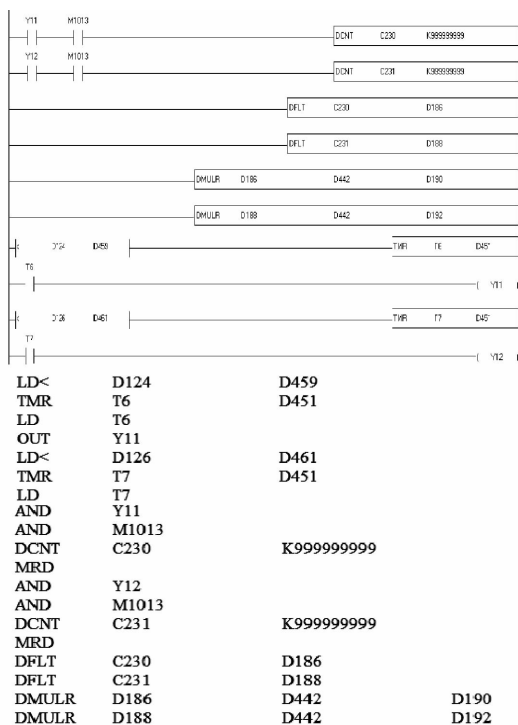


图 10 pH 值控制程序梯形图和指令图

Fig. 10 Ladder diagram and instructions of pH control program

试。系统运行稳定后采用长期测试、连续测试 2 种方法来检测猪场氨气氧化装置的处理效果。氨氮采用水杨酸-次氯酸盐光度法;亚硝酸盐氮采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法;硝酸盐氮采用 AutoAnalyzer3 型连续流动分析仪;短期测试氨气浓度采用 Thermo Fisher 17i 型分析仪;长期测试氨气浓度采用 GT903 型泵吸式氨气检测仪。

(1) 长期测试(10 月 2 日—11 月 3 日,共 33 d)

长期测试共进行 33 d,每 3 d 检测一次猪场氨气氧化装置进、出口氨气体积分数(图 11),循环水中的氨氮、亚硝酸盐氮以及 pH 值(图 12)。由图 11、12 可以看出猪场氧化装置的起始氨氮质量浓度为 42.8 mg/L,亚硝酸盐氮质量浓度为 103.23 mg/L,硝酸盐氮质量浓度为 72.3 mg/L,氨气去除率先维持在 60% 左右,是由于刚挂膜结束,微生物的含量不高,但之后去除率开始提高,能达到 90% 以上。这与图 12 所示的循环水中 pH 值变化相对应,后期 pH 值下降较快,说明氨氮开始转换为硝氮(图 12),从硝氮质量浓度变化曲线可以看出硝氮、硝酸盐氮呈现上升趋势,循环水呈现酸性。经过 33 d 实验结束时,氨氮质量浓度为 123.12 mg/L,亚硝酸盐氮质量浓度为 255.64 mg/L,硝酸盐氮质量浓度达到 284.3 mg/L。由此可以得出填料微生物挂膜成功,氨氮的硝化反应逐渐强化。pH 值调节设置为当 pH 值低于 6 时加碱泵开启。由于反应器底面积大、循环水量大,pH 值传感器过少,还不能准确控制 pH 值。

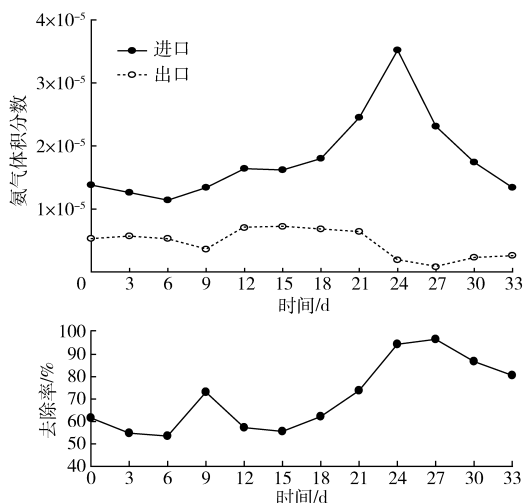


图 11 长期测试进出口氨气体积分数及去除率变化曲线

Fig. 11 Import and export of ammonia concentration and removal efficiency change in the long-term test

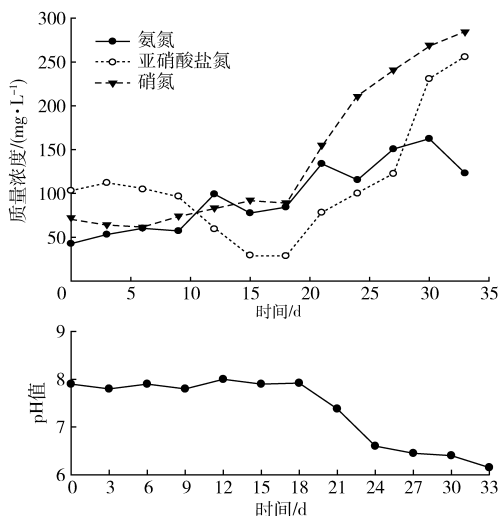


图 12 长期测试氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、pH 值变化曲线

Fig. 12 Changes of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen and pH value in the long-term test

(2) 连续测试(10 月 26 日 00:00—10 月 29 日 00:00,共 72 h,18:00—次日 06:00 猪舍风机停)

为了考察昼夜差别,进行氨气去除效果的连续测试。每隔 3 h 取样一次,测试猪场氨气氧化装置进、出口氨气体积分数(图 13)。由图 13 可以看出,猪舍内氨气体积分数在  $1.0 \times 10^{-5} \sim 3.0 \times 10^{-5}$  昼夜波动。虽然猪舍内昼夜氨气体积分数具有差异(夜间高于白天),但是整体去除率均能达到 90% 以上。虽然整体处理效果略低于其他文献的实验处理效果(表 2),但是由于本研究处理气量大、空床停留时间短,对于工程示范已经达到很好的处理效果。

5 结论

(1) 适宜的环境对微生物的生长和繁殖起着重

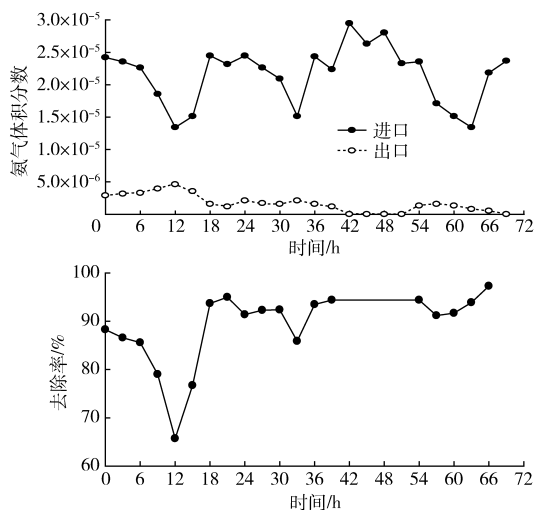


图13 连续测试进出口体积分数及去除率变化曲线

Fig. 13 Import and export of ammonia concentration and removal efficiency change in the short-term test

表2 生物氧化装置处理效果对比

Tab. 2 Treatment effect comparison of biological oxidation device

气源类型	停留时间/s	去除率/%	规模	数据来源
瓶装液体高纯氨	45	95.0	小试	文献[4]
硫化氨和氨气混合气	30	97.5	小试	文献[20]
猪舍臭气	2.88	90.0	中试	

要作用,系统实现了生物氧化反应器温度、湿度、pH值、压力的采集与处理,通过RS-485总线的方式将触摸屏控制与PLC现场数据采集相结合,对现场数据的实时采集,并完成数据的分析与保存。实现生物氧化反应器现场环境的实时监测与控制,为微生物的生长和繁殖提供保障。

(2)实施监测实验期间,猪舍内氨气体积分数在 $1.0 \times 10^{-5} \sim 3.0 \times 10^{-5}$ 昼夜波动,生物氧化装置的氨气去除率可达到90%。

#### 参 考 文 献

- ROLAND W Melse. Biotrickling filter for the treatment of exhaust air from a pig rearing building: ammonia removal performance and its fluctuations[J]. Biosystems Engineering, 2012, 113(3): 242-252.
- LILONG Chai, ROLAND Kröbel. A regional mass balance model based on total ammoniacal nitrogen for estimating ammonia emissions from beef cattle in Alberta Canada [J]. Atmospheric Environment, 2014, 92: 292-302.
- XU Jiele, TATJANA Vujic. Nitrification of anaerobic digester effluent for nitrogen management at swine farms [J]. Chemosphere, 2014, 117: 708-714.
- 冯柯. 生物法降解养殖场臭气中的氨气[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- FENG Ke. Biological removal of ammonia odor derived from the livestock using a biofilter [D]. Taiyuan: Taiyuan of University Technology, 2012. (in Chinese)
- 朱丽媛, 卢庆萍, 张宏福, 等. 猪舍中氨气的产生、危害和减排措施[J]. 动物营养学报, 2015, 27(8): 2328-2334.
- ZHU Liyuan, LU Qingping, ZHANG Hongfu, et al. Ammonia production, hazards and mitigation measures in a pig house [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2015, 27(8): 2328-2334. (in Chinese)
- 彭应登, 杨明珍, 申立贤. 北京氨源排放及其对二次粒子生成的影响[J]. 环境科学, 2000, 21(6): 101-103.
- PENG Yingdeng, YANG Mingzhen, SHEN Lixian. Ammonia emission and its effects on the formation of secondary particles in Beijing [J]. Environmental Science, 2000, 21(6): 101-103. (in Chinese)
- 刘建伟, 栾昕荣. 规模化养殖场氨排放控制技术进展[J]. 中国畜牧杂志, 2016, 52(10): 49-55.
- LIU Jianwei, LUAN Xinrong. Advances of ammonia emissions control technology in large-scale farms [J]. Eco-Farming, 2016, 52(10): 49-55. (in Chinese)
- ANDERSON N, STRADER R, DAVIDSON C. Airborne reduced nitrogen: ammonia emissions from agriculture and others sources [J]. Environment International, 2003, 29(2-3): 277-286.
- 闫志英, 许力山, 李志东, 等. 畜禽粪便恶臭控制研究及应用进展[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(2): 322-327.
- YAN Zhiying, XU Lishan, LI Zhidong, et al. Progress in research and application of controlling odor from livestock manure [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2014, 20(2): 322-327. (in Chinese)
- 徐亚同, 史家梁, 张明. 污染控制微生物工程[M]. 北京: 北京工业出版社, 2001.
- VICENTE F S, JORDI M S, JOSEP-MANUEL P, et al. Effects of nitrogen source and empty bed residence time on the removal of styrene gaseous emissions by biotrickling filtration [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2011, 34(7): 859-867.
- 余光辉, 徐晓军, 何晶晶. 复合生物滤池处理H<sub>2</sub>S和NH<sub>3</sub>的挂膜研究和工艺[J]. 环境工程学报, 2007, 1(1): 30-33.
- YU Guanghui, XU Xiaojun, HE Jingjing. Study on packing biofilm and process conditions of hydrogen sulfide and ammonia removal by composite biofilter [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007, 1(1): 30-33. (in Chinese)
- 王小军, 徐校良. 生物法净化工业废气的研究进展[J]. 化工进展, 2014, 33(1): 213-218.
- WANG Xiaojun, XU Xiaoliang. Research progress of biological methods for treating and purifying industrial waste gas [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(1): 213-218. (in Chinese)
- QUINA M J, BORDADO J C, QUINTA-FERREIRA R M. Treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration: an overview [J]. Waste Management, 2008, 28(11): 2097-2121.
- DESHUSSES M A. Biological waste air treatment in biofilters [J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997, 8(3): 335-339.
- KAZUHIRE S, SATOSI O, TAKASHI O, et al. Characteristics of hydrogen sulfide removal in a carrier packed biological deodorization system [J]. Biochemical Engineering Journal, 2000, 5(3): 209-217.
- LESON Gero, WINER A M. Biofiltration: an innovative air pollution control technology for VOC emissions [J]. Journal of the Air and Waste Mana Association, 1991, 41(8): 1045-1053.
- 朱凌云, 吕杰, 陈昭. 废气生物处理装置的远程监控系统[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(11): 2558-2583.
- ZHU Lingyun, LV Jie, CHEN Zhao. Monitoring and control system for biological treatment facility of waste gas [J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(11): 2558-2583. (in Chinese)
- LIU Fang, CLAUDIA Fiencke, GUO Jianbin, et al. Performance evaluation and optimization of field-scale bioscrubbers for intensive pig house exhaust air treatment in northern Germany [J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 694-701.
- 高改凤. 生物滴滤塔降解养殖场臭气中的氨气和硫化氢[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- GAO Gaifeng. Biological removal of NH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>S derived from the livestock using a biofilter [D]. Taiyuan: Taiyuan of University Technology, 2013. (in Chinese)