

肖乾坤,刘泽蒙,曹 逊,等. 基于 Arduino 的发酵尾气检测系统设计[J]. 江苏农业科学,2016,44(3):452-454.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.03.126

# 基于 Arduino 的发酵尾气检测系统设计

肖乾坤,刘泽蒙,曹 逊,张 瑞,李 晖,陈可泉

(南京工业大学,江苏南京 211816)

**摘要:**通过对微生物发酵过程尾气的在线监测与分析,可以得到重要微生物的代谢参数。为了获取这些参数,准确掌握和控制发酵过程、直观地了解细胞代谢情况,设计了 1 个基于 Arduino 的生物发酵尾气数据采集系统。该系统以 Arduino 开发平台为基础,选用高精度、低功耗光学传感器对尾气中氧气、二氧化碳的含量进行精确测量,采用射频收发器件 nRF24L01 为数据的无线传输模块,实现了数据采集与在线显示,适合应用于发酵现场;同时,将系统制成样机进行试验,对采集系统的准确性、稳定性进行分析验证。结果表明,该系统在尾气检测中具有良好的准确性,在应用试验中数据传输稳定、可靠;该系统具有方便易用、可移植性强、节能环保等特点,可在生产上推广应用。

**关键词:**微生物发酵;发酵尾气;在线监测;呼吸商;Arduino

**中图分类号:** TP274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)03-0452-03

Arduino 是一系列基于 Atmel 公司 AVR 单片机的人机交互产品的总称,因其使用简单、成本低、尺寸小等优点而被用于许多控制系统中,开发者可在任何时间对 Arduino 进行编程操作,这使得其运用变得更为灵活<sup>[1]</sup>。Arduino 具有简单易用、高度模块化的特点,被称为“电子积木”<sup>[2]</sup>。Arduino 拥有 1 个专属的基于 Eclipse 的软件集成开发环境(integrated development environment, IDE),程序开发者可通过该 IDE 编写适合自己所需功能的 Arduino 程序。由于 Arduino 的语言是 1 种类似 C++、JAVA 的编程语言,且 Arduino 将复杂的、带有特定功能的 C 程序封装成库函数,在 Arduino 的编程过程中,程序开发者只需要考虑设计程序的逻辑结构,而不必了解底层库函数的具体设计内容,这显著降低了程序编写的复杂程度<sup>[3]</sup>。在 Arduino IDE 中,只需要使用 1 根 USB 数据线,就可以很方便地将编写好的程序下载(烧写)至 Arduino 开发板中;如果编写的程序有问题,编译将不会通过,IDE 会提示程序某个地方有错误,开发者可根据提示进行程序的修改。

生物发酵是极其复杂的生化反应过程,同时也是生物工程领域一项最基础的工程。发酵尾气中的氧气、二氧化碳作为重要的发酵工艺参数越来越受到发酵工业的重视,通过对发酵尾气中氧气、二氧化碳含量的在线检测分析,可以获得发酵过程中的微生物生理代谢参数,如二氧化碳释放速率(carbon-dioxide evolution rate, CER)、摄氧率(oxygen uptake rate, OUR)、呼吸商(respiratory quotient, RQ)等<sup>[4]</sup>。这些参数能够反映微生物发酵过程的代谢状况,含有优化发酵控制、指导生产、预测发酵趋势和辅助建模的重要信息<sup>[5]</sup>。

Arduino 在国内的应用已经受到越来越多的重视,但是在

生物发酵方面的应用几乎未见报道。本研究以生物发酵过程尾气测量为例,展现开源硬件平台在生物发酵中的应用前景。

## 1 系统工作原理与设计

### 1.1 系统总体结构

本系统采用开源硬件 Arduino MEGA2560 作为主控制板、Arduino UNO 作为从控板;氧气传感器选用 LuminOx 荧光氧光学传感器,二氧化碳传感器选用 COZIR widerange 非色散红外二氧化碳传感器,稳压模块为笔者所在实验室自制;气体浓度数据通过 nRF24L01 进行无线收发,实时传输给计算机,从而实现对整个发酵过程的在线监测(图 1)。

### 1.2 硬件组成及设计原理

**1.2.1 Arduino 控制板** Arduino 系列采用 Atmel 公司的 AVR 微处理器的开源软硬件开发平台,Arduino Mega2560<sup>[6]</sup> 具有 54 路数字输入/输出(其中 16 路可作为 PWM 输出),16 路模拟输入,4 路 UART 接口,1 个 2 kb 存储空间 of the EEPROM,同时还有外接设备端口:USB 口、SPI 端口和 ICSP header。

系统采用了 C/C++ 语言进行底层硬件驱动的编写,它将 AVR 单片机相关的寄存器参数设置打包成函数库,在其自带的 Arduino IDE 中采用类 C++ 语言调用函数库即可实现单片机系统的全部功能。

**1.2.2 O<sub>2</sub> 传感器与 CO<sub>2</sub> 传感器** 氧气的测量采用 LuminOx 荧光氧光学传感器<sup>[7]</sup>,该传感器具有功耗低、寿命长、精度高等优点。LuminOx 传感器可同时测量氧分压、温度、大气压力、氧气浓度,同时还带有氧压和温度补偿,使其可以精确工作于宽环境范围而无需额外的补偿系统,无需额外的信号调节电路即可与微控制器连接。二氧化碳的测量采用 COZIR 传感器系列的 Wide Range,该传感器功耗低、寿命长、性能优异,能较好用于便携仪器和暖通空调等领域<sup>[8]</sup>。

**1.2.3 无线通信模块** 无线通讯模块由 nRF24L01<sup>[9]</sup> 芯片及射频收发外围电路构成(含天线)。nRF24L01 工作于 2.4 ~ 2.5 GHz ISM 频段,融合了增强型 ShockBurst 技术,无线数据传输抗干扰能力强。增加天线后,传输距离可提高到 1 km。

收稿日期:2015-01-19

基金项目:国家“863”计划(编号:2014AA021703,2015AA021005)。

作者简介:肖乾坤(1988—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,主要从事发酵参数在线监测与应用研究。E-mail:1018642221@qq.com。

通信作者:陈可泉,博士,副教授,主要从事生物过程工程与系统工程领域的研究工作。E-mail:kqchen@njtech.edu.cn。

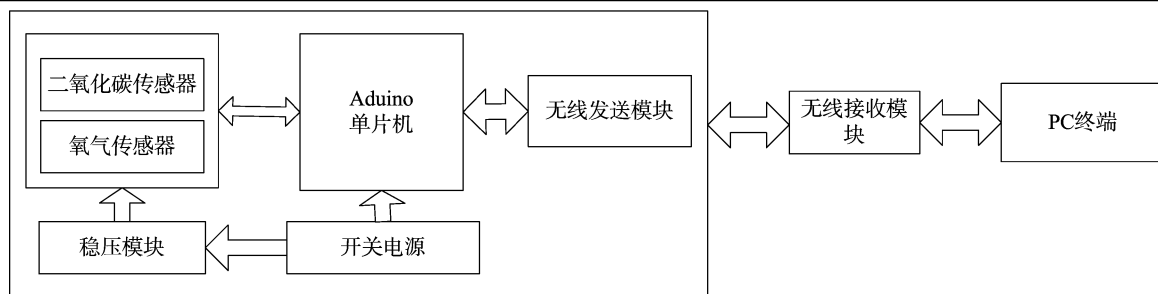


图1 系统原理框架

其通信频道和输出功率可通过软件进行初始化,即可进行 1 点对多点的无线传输;同时,nRF24L01 功耗低,具有多种低功率工作模式。nRF24L01 模块采用 SPI 通信协议,可以方便地与 Arduino 系统进行通信。如有需要,可以扩展为多点无线传输数据。Arduino 系统对 nRF24L01 初始化后,氧气、二氧化碳传感器数据经 Arduino 控制板处理后,上传入 nRF24L01 模块。当系统处于发送状态时,接收端的 nRF24L01 模块自动接收数据,同时上传至上位机。

### 1.3 系统程序设计

系统程序设计主要包括主程序、外部中断子程序和校正子程序等,软件流程如图 2 所示。

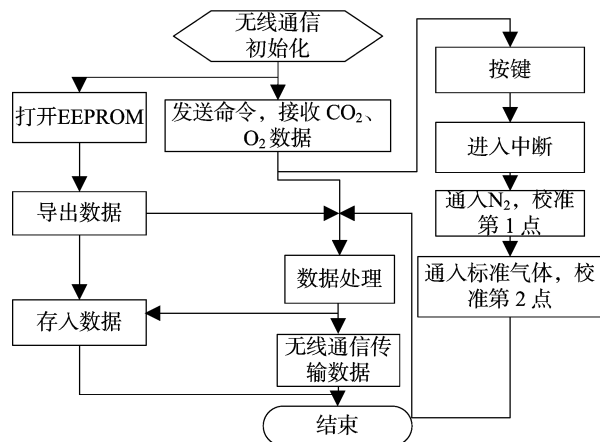


图2 尾气数据采集系统软件流程

下位机的气体数据采集、处理、发送以及传感器校正程序由 Arduino 编程软件完成。首先,Arduino 系统复位后,程序对各功能模块进行初始化,主要是氧气传感器、二氧化碳传感器、nRF24L01 模块和 EEPROM 模块。系统将传感器采集到的数据代入 EEPROM 中的标准曲线计算出气体浓度,所得结果代入式(1)中进行呼吸商的计算,同时通过无线传输到 PC 终端,呼吸商(RQ)<sup>[10]</sup>的计算公式如下:

$$RQ = \frac{CO_{2,out}}{20.9 - O_{2,out}} \quad (1)$$

式中: $CO_{2,out}$ 为发酵罐尾气排出口  $CO_2$  浓度,%; $O_{2,out}$ 为发酵罐尾气排出口  $O_2$  浓度,%。进气口空气中的  $CO_2$  含量忽略不计。

当按下按键进入校准程序时,系统将把 EEPROM 中的参数刷新,存入校准之后的标准曲线,校准程序完成后,自动跳出,进入正常采集程序。整个数据采集程序通过 Arduino 集成开发环境完成调试和下载,以下给出程序的部分代码:

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Mirf.spi = &MirfHardwareSpi;
  Mirf.init();
  Mirf.setTADDR((byte *)"serv1");
  Mirf.payload = sizeof(int);
  Mirf.config();
}

void loop()
{
  Serial2.begin(9600);
  Serial2.print("M 1\r\n");
  Serial2.print("A\r\n");
  while(Serial2.available())
  {
    bufferA[indA] = Serial2.read();
    char b = toascii(bufferA[indA]);
    valO2 += b;
    indA++;
  }
  if(bufferA[1] == 'sp')
  {
    Serial2.end();
    O2 = (valO2.substring(2,6) + valO2.charAt(7)).toInt() * 0.1;
  }
}
```

上位机数据采集软件采用 PLX-DAQ 软件<sup>[11]</sup>,该软件采用 ActiveX 技术,基于 VBA 语言的 Excel 调用 PC 系统资源,实现数据的实时显示及存储(图 3)。

## 2 结果与分析

本系统设计的目的是连续监测生物发酵尾气中氧气、二氧化碳的浓度,通过公式计算得出发酵过程的呼吸代谢参数 RQ,并将参数实时显示在计算机上。为验证本系统数据测量的准确性及稳定性,现选用 electrolab 公司生产的 Fermac368 尾气分析仪<sup>[12]</sup>与本系统进行比较试验,得出对比结果。

为了检验本系统实际测量的准确度,开机校准系统,用本系统及 Fermac368 尾气分析仪对 3 组标准混合气体进行测量,结果见表 1。

将本系统应用于连续发酵过程的尾气测量中,实时监测生物发酵过程中的尾气数据。在谷胱甘肽发酵过程尾气的监

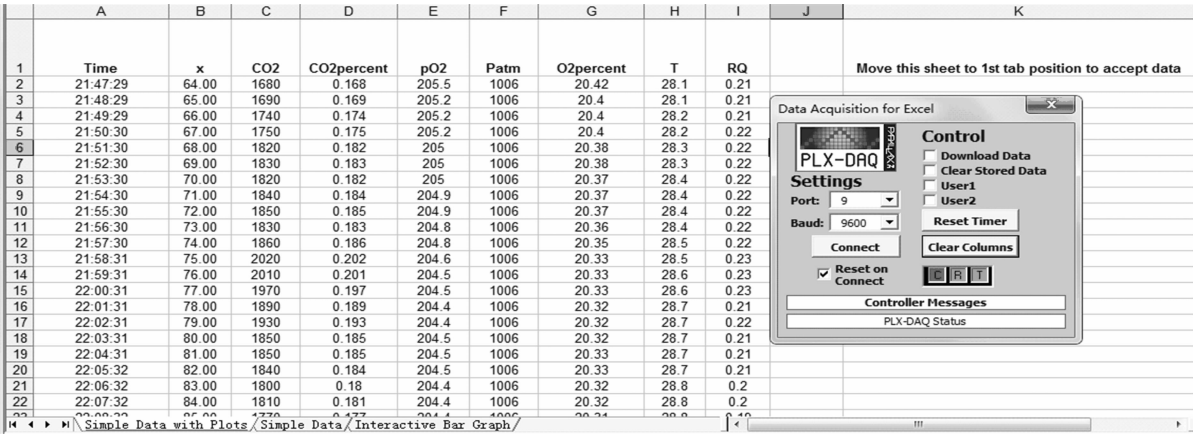


图3 系统软件数据采集界面

表 1 氧气对照测量结果

仪器	参数	标准浓度 (%)	测量平均值 (%)	平均偏差	相对标准偏差 (%)
自制尾气检测系统	氧气(Ⅰ)	5.06	5.040	0.082	2.30
	氧气(Ⅱ)	12.56	12.600	0.044	0.51
	氧气(Ⅲ)	20.15	20.160	0.051	0.36
	二氧化碳(Ⅰ)	1.00	0.982	0.007	1.10
	二氧化碳(Ⅱ)	2.50	2.503	0.021	1.00
	二氧化碳(Ⅲ)	4.02	3.946	0.030	0.91
Fermac368 尾气分析仪	氧气(Ⅰ)	5.06	5.010	0.039	1.32
	氧气(Ⅱ)	12.56	12.550	0.083	0.83
	氧气(Ⅲ)	20.15	20.110	0.133	0.70
	二氧化碳(Ⅰ)	1.00	0.960	0.016	1.97
	二氧化碳(Ⅱ)	2.50	2.480	0.023	1.18
	二氧化碳(Ⅲ)	4.02	4.050	0.037	1.20

测中,采用酿酒酵母进行分批发酵(30 h),5 L 发酵罐装液体体积 2 L,整个发酵过程尾气含量用数据采集系统采集,结果见图 4。由表 1、图 4 可见,本系统具有良好的准确度和稳定性,能实时监测尾气含量,适合用于发酵监控领域。

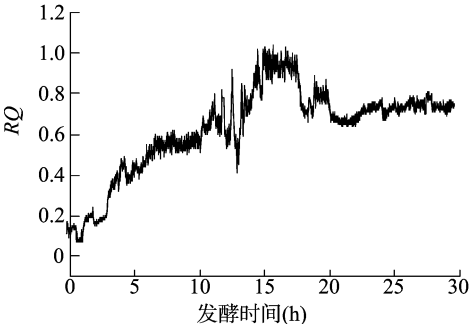


图4 酵母发酵 RQ 对时间的变化曲线

3 结论

本研究设计的基于 Arduino 低成本发酵尾气的检测系统实现了校正、无线传输、在线显示、实时监控等功能。本系统以 Arduino 开源硬件平台为基础,选用高精度、低功耗、长寿命光学气体传感器,增强型 nRF24L01 模块负责数据无线传

输,避免了发酵现场布线的麻烦,通过试验验证达到了预期的目的。本设计的鲜明特点是选用了灵活性高的开源硬件平台 Arduino 和实现了数据的无线传输;完成了系统硬件的结构设计和数据采集程序的编写,保证了系统的数据采集准确可靠,系统长时间运行稳定,能完成对整个发酵过程的在线检测和分析,为进一步实施发酵过程的在线控制提供了条件。

本系统可以进行额外的扩展进而拓展系统的适用范围,如通过改变传感器使系统具备检测其他种类气体的功能,使用 WiFi 扩展版实现数据的互联网推送。

参考文献:

[1] Arduino Manual. Arduino microcontroller arduinowebsite [EB/OL]. [2014-12-12]. www.arduino. cc.  
[2] 杨继志,郭 敬. Arduino 的互动产品平台创新设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2012(4):39-41.  
[3] 纪欣然. 基于 Arduino 开发环境的智能寻光小车设计[J]. 现代电子技术,2012(15):161-163.  
[4] 刘仲汇,史建国,朱思荣,等. 尾气在线检测分析在发酵中的应用[J]. 发酵科技通讯,2012(4):32-35.  
[5] 姜长洪,钟权龙,侯 莉,等. 溶解氧和尾气 CO<sub>2</sub> 在发酵控制中的作用[J]. 沈阳化工学院学报,2000,14(1):41-44.  
[6] Mega2560. Compare board specs. arduinowebsite [EB/OL]. [2014-12-12]. http://arduino. cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560.  
[7] 杨建华,侯 宏,王 磊. 光学氧传感器氧敏感膜的光降解[J]. 传感器与微系统,2001(12):5-7.  
[8] 陈 放,吴丽萍. 二氧化碳传感器节点的设计[J]. 杭州电子科技大学学报,2011,31(2):50-53.  
[9] 王 玲,王中训,王 恒. 基于 MSP430 单片机的多路无线温度检测系统[J]. 现代电子技术,2011,34(1):125-127.  
[10] Gea T, Barrena R, Artola A, et al. Monitoring the biological activity of the composting process: oxygen uptake rate (OUR), respirometric index (RI), and respiratory quotient (RQ) [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2004, 88(4):520-527.  
[11] 韦青燕,徐爱民. 基于 Labview 和 myDAQ 的自动控制原理实验软件平台开发[J]. 实验室研究与探索,2014(11):132-135.  
[12] 董克武,黎 路. 尾气分析在发酵食品行业中的应用[J]. 食品与机械,2015(1):235-237.