

食品二氧化碳在线质量控制系统设计

韩 军

(上海竞蓝科学仪器有限公司, 上海 201803)

摘要: 食品二氧化碳是碳酸类饮料重要的食品添加剂; 在产品的生产过程中, 质量受各种因素影响; 如何在生产过程中高效控制产品质量是企业质量和效益平衡的重要因素; 针对这种情况, 设计了实时在线质量控制系统的硬件和软件方案; 用阀切换气体来源, 气体进入预处理后, 再进入在线分析仪器中; 分析后的数据由下位机采集, 通过上位机软件分析处理并发送给集散控制系统, 对设定值和反馈值比较, 计算并调节参数, 指挥和控制系统, 调度生产运行; 经过实验运行, 结果表明, 该系统在质量设定阈值内用PID控制, 超过阈值用Fuzzy-PID复合控制; 工艺参数调节稳定可靠; 当质量超出设定的报警参数后, 系统能及时切换输出流路, 防止不合格产品流入食品储罐, 保证了产品的食品级质量, 与此同时切换生产线, 并启动再生进程; 利用此系统可实现食品级二氧化碳生产的在线质量控制及质量溯源追踪。

关键词: 食品二氧化碳; 质量控制系统; 在线检测; 上位机; 下位机; 数据库

Design of Online Quality Control System for Food Carbon Dioxide

HAN Jun

(Shanghai Jancrane Scientific Instrument Co., Ltd., Shanghai 201803, China)

Abstract: Food carbon dioxide is an important food additive for carbonated beverages. In the production process of products, the quality is affected by various factors. How to efficiently control the product quality in the production process is an important factor in the balance of quality and benefit for enterprise. In view of this situation, the hardware and software scheme of real-time online quality control system is designed. The gas source is switched with a valve, and the gas enters the online analysis instrument after the pre-treatment. The analyzed data is collected by the lower computer, which is analyzed and processed by the upper computer software and sent to the distributed control system. Compared the set value with the feedback value, the parameters are calculated and adjusted to command and control system to the production and operation of schedules. After the experimental operation, the results show that the system is controlled by PID within the quality setting threshold and Fuzzy-PID compound control over the threshold. The adjustment of process parameters is stable and reliable. When the quality exceeds the set alarm parameters, the system can switch the output flow path in time to prevent unqualified products from flowing into the food storage tank, which ensures the food quality of the product. At the same time, the system can switch the production line and start the regeneration process. Using this system, the online quality control and quality traceability of food grade carbon dioxide production can be realized.

Keywords: food carbon dioxide; quality control system; online detection; upper computer; lower computer; database

0 引言

二氧化碳在碳酸类饮料中有增加口感、解渴、促进消化和解除疲劳的功效^[1-2], 深受广大客户的喜爱, 但近年来, 食品安全事件仍在继续影响着世界各国^[3], 食品质量安全问题已经越来越受人们重视。二氧化碳作为碳酸类饮料中的重要食用添加剂, 如何从生产源头上防止食品质量安全事故的发生, 已成为质量控制的重要部分。

我国二氧化碳企业生产中气体来源主要有: 酒精发酵、碳酸盐煅烧、合成氨、乙烯催化氧化及煤气化等, 二氧化碳要达到食品级, 需提纯、净化、干燥、冷却、加压等工序^[4], 生产指标有着严格的工艺控制, 其工艺难点为脱硫^[5]、脱炔^[6]等。如何正确合理控制工艺关键点, 是企业质量控制的关键因素。

传统的控制方法是采用人工采样, 应用化学分析法、气相色谱法等实验室进行分析, 分析费时费力, 响应速度慢, 效率低, 然后根据分析数据指导生产, 调节工艺参数, 难以实时反映工况信息, 难以实时产生操作方案, 不能实时控制产品的质量^[7]。

出于安全和环保的要求, 在生产过程中分析信息的延迟或疏忽都会造成工业上经济的巨大损失。为保证最终获得合格产品, 工业生产对质量控制的要求逐渐提高, 必须对其生产过程进行监控和测试^[8]。

为了达到在生产过程中控制产品质量的目的, 设计了食品二氧化碳在线质量控制系统 (food carbon dioxide online quality control system, FCQC), FCQC以在线分析仪器为前端, 采用在线分析模式。在线分析^[9]是用采样支管将被测气体从管道中引出, 并进行调压等预处理后, 连续

收稿日期: 2022-04-07; 修回日期: 2022-05-07。

作者简介: 韩 军(1975-), 男, 上海人, 大学本科, 工程师, 主要从事仪器仪表及自动化生产方向的研究。

引用格式: 韩 军. 食品二氧化碳在线质量控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(11): 116-126, 152.

送入分析仪器的气体室中^[10], 分析仪器通过各自的检测系统完成气体的某个质量指标检测, 多台分析仪器同时检测, 从而检测出产品的各个指标, 实时分析产品中的各项指标浓度等参数的情况。FCQC 以下位机、上位机为核心控制部件, 并和 DCS 交互, 实时调度控制生产, 做到即保证了产品的质量, 又尽最大限度地降低生产成本。

本文贡献: (1) 设计了一种保证食品级二氧化碳质量生产的自动控制系统, 以信号为主要线索阐述了控制系统的各个模块, 设计具有自主性。(2) 本系统实现在生产过程中控制产品的质量, 作用具有明显性。(3) 本系统操作便捷, 不但在食品二氧化碳生产中使用, 还可以用到其它产品中, 系统具有可推广性。

1 食品二氧化碳产品介绍

1.1 食品二氧化碳质量指标

根据国家标准 GB1886.228—2016 食品级二氧化碳质量指标应符合表 1 的规定^[4]。

表 1 食用二氧化碳质量指标^[4]

项目	二氧化碳指标			
	气态	液态	固态	
二氧化碳含量(ψ/%)	≥	99.99	99.9	—
水分(μL/L)	≤	20	20	—
氧(μL/L)	≤	30	30	—
二氧化硫(μL/L)	≤	1	1	1
总硫 ^① (μL/L)	≤	0.1	0.1	0.1
总挥发烃 ^② (μL/L)	≤	50 ^③	50 ^③	50 ^③
苯(μL/L)	≤	0.02	0.02	0.02
乙醛(μL/L)	≤	0.2	0.2	0.2
二氧化氮(μL/L)	≤	2.5	2.5	2.5

注:①除 SO₂ 外,以 S 计;②以 CH₄ 计;③其中非甲烷烃≤20。

1.2 食品二氧化碳生产工艺

食品级二氧化碳的生产是一个由原料气提纯而来的过程, 以下是山东鲁化集团公司研究院工艺流程:

CO₂ 原料气→分离器 I→压缩机→预脱硫槽→有机硫水解槽→精脱硫槽→吸水槽→分离器 II→液化器→液体 CO₂→(储槽或充钢瓶、槽车)^[11]。

南京炼油厂有限责任公司的食品级二氧化碳工艺系统为:压缩系统→脱硫系统→吸附精制系统→冷凝提纯系统→产品储罐系统→(槽车灌装系统、气瓶充装系统)^[5]。

闫小茹(2008)工艺为:原料气压缩→冷却→干燥脱水→吸附脱微量饱和水→吸附脱除乙烯→氨冷凝液化二氧化碳→精馏分离(脱低沸点组分)→纯度≥99.99%的高纯度食品级液态二氧化碳^[12]。

各工艺路线^[13]虽有所不同,但去除微量杂质关键的步骤都是脱硫和吸附环节。

2 控制方案设计

2.1 控制算法

生产过程中根据二氧化碳生产工艺控制要求, 按照国家标准指标选择总硫、总烃、总苯、水分、氧含量等关键

指标进行分析控制。每个项目分析项目的浓度含量值都受温度、压力、流量等控制参数影响, 符合式 (1) 关系:

$$\begin{bmatrix} S(t) \\ H(t) \\ B(t) \\ O(t) \\ M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 S_2 \cdots S_m \\ H_1 H_2 \cdots H_m \\ B_1 B_2 \cdots B_m \\ O_1 O_2 \cdots O_m \\ M_1 M_2 \cdots M_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1(t) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & g_m(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_1(t) \\ \vdots \\ u_1(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, S_i, H_i, B_i, O_i, M_i 表示产品中总硫、总烃、总苯、氧、水分浓度值; g_i(t) 脱硫、吸附等去除杂质工艺的动态特性; u_i(t) 脱硫、吸附等工艺的控制参数。

从式 (1) 表明该过程是多变量耦合的。通过脱硫、吸附等工艺环节, 加上分析的延迟, 使 g_i(t) 中含有较大的滞后。

纯滞后的一阶函数可用式 (2) 表示:

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s} \quad (2)$$

式中, K 为控制系统的静态增益; T 为被控对象的时间常数; $\frac{K}{T_s + 1}$ 为被控对象不含纯滞后部分的传递函数, e^{-τs} 为被控对象中纯滞后部分的传递函数, τ 为纯滞后时间, 其中增益 K 由式 (3) 计算:

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta u_0} \quad (3)$$

y(0) 为随时间变化对应的浓度值, Δu₀ 输出变化量。

以下以二氧化碳质量指标中: 总硫浓度 ↔ 水洗流量为例, 分析参数计算和调整方法。

将输出转换成无量纲形式:

$$y^*(t) = \frac{y(t)}{y(\infty)} \quad (4)$$

由 (2) (3) (4) 得:

$$T y^*(t - \tau) + y^*(t - \tau) = 1 \quad (5)$$

其阶跃响应为:

$$y^*(t) = \begin{cases} 0 & t < \tau \\ 1 - e^{-(t-\tau)/T} & t \geq \tau \end{cases} \quad (6)$$

采用两点法^[14]选取 2 个时间点 t₁, t₂ 并且 t₂ > t₁ ≥ τ, 取 y*(t₁) = 0.39y(∞) 和 y*(t₂) = 0.63y(∞) 可计算参数 T, τ:

$$\begin{cases} \tau = 2t_1 - t_2 \\ T = 2(t_2 - t_1) \end{cases} \quad (7)$$

代入实验数据求得传递函数式 (2) 为:

$$G(s) = \frac{0.005}{35s + 1} e^{-80s} \quad (8)$$

采用分段控制思想^[15]当杂质浓度较小时采用 PID 控制, 消除静差, 提高控制精度^[16], 在 Matlab 软件的 Simulink 模块中搭建 PID 调节系统其结构如图 1 (a), PID 控制参数可由 Simulink 自整定获得初值, 再由实验法和扩充响应曲线法得到具体数值, 仿真结果如图 1 (c)。

当杂质浓度较大时, 使用模糊控制 (Fuzzy-PID 复合控制), 以加快响应速度, 结构如图 1 (b)。Fuzzy-PID 模块系统输入为采集值与设定的总硫含量偏差 e 及偏差变化率 ec,

输出为 PID 控制器的 3 个参数 K_p 、 K_i 及 K_d 。变量表达式为：

$$e(k) = H_d(k) - H(k) \quad (9)$$

$$ec(k) = e(k) - e(k-1) \quad (10)$$

$$u(k) = fuzzy(e(k), ec(k)) \quad (11)$$

式中, $H_d(k)$ 在第 k 个采样时刻浓度设定数值; $H(k)$ 采集的浓度值; $ec(k)$ 在第 k 个采样时刻偏差变化量; $e(k)$ 设定的浓度偏差; $fuzzy(\dots)$ 输入与输出之间的模糊控制函数^[16], 将模糊控制函数变量值分为 7 档, 依次为 {负大 (NB), 负中 (NM), 负小 (NS), 零 (ZO), 正小 (PS), 正中 (PM), 正大 (PB)}, 用来制定控制 PID 输出参数 K_p, K_i, K_d 的模糊规则, 如表 2 所示。

表 2 $K_p/K_i/K_d-e/ec$ 模糊控制规则

$K_p/K_i/K_d$	偏差变化率 ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PM	PB	PB	PB	PB	PB	PM
	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
	PS	PM	PB	PB	PB	PM	PS
NM	PS	PM	PM	PM	PM	PM	PS
	NS	NS	ZO	ZO	ZO	NS	NS
	PM	PM	PB	PB	PB	PM	PM
NS	PM	PB	PB	PB	PB	PB	PM
	NM	NB	NB	NB	NB	NB	NM
	ZO	PS	PS	PS	PS	PS	ZO
ZO	PM	PB	PB	ZO	PB	PB	PM
	ZO	PS	PM	PB	PM	PS	ZO
	ZO	ZO	PS	ZO	PS	ZO	ZO
PS	PS	PM	PM	PM	PM	PM	PS
	NM	NB	NB	NB	NB	NB	NM
	ZO	PS	PS	PS	PS	PS	ZO
PM	PM	PB	PB	PB	PM	PB	PM
	NS	NS	ZO	ZO	ZO	NS	NS
	PM	PM	PB	PB	PB	PM	PM
PB	PM	PB	PB	PB	PM	PB	PM
	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
	PS	PM	PB	PB	PB	PM	PS

采用三角型及高斯型函数反映 Fuzzy-PID 控制系统的隶属度关系如图 1 (e)。用偏差 e 、偏差变化率 ec 控制规则对 K_p 模糊推理子集 (K_i, K_d 同 K_p)，如图 1 (f)。在 Simulink 中采用面积中心计算方法, 将模糊集合转化为清晰的控制数值 K_p, K_i, K_d , 仿真结果如图 1 (d)。

系统通过试验确定转折阈值, 当采集值小于阈值时采用 PID 控制, 超过阈值后采用 fuzzy-PID 控制。根据采集浓度值 (总硫浓度含量) 减去设定值, 计算误差及误差变化率, 在输出查询表中

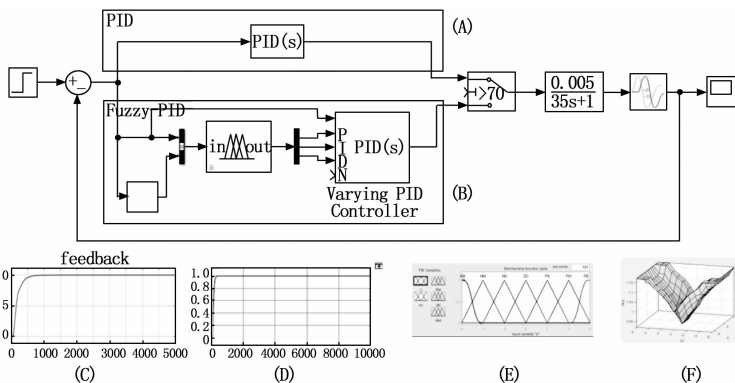


图 1 食品二氧化碳系统控制结构图

查找出相应的输出控制参数 K_p, K_i, K_d 值^[17], 用以下伪代码计算实际工艺控制量 (水洗流量):

- 1) 初始化;
- 2) 当前误差值 = 设定值 - 采集值;
- 3) 当前误差变化率 = 当前误差值 / 时间差;
- 4) $(K_p, K_i, K_d) =$ 查表 (当前误差值, 当前误差变化率);
- 5) 积分值 + = 当前误差值;
- 6) 控制变量输出值 = $K_p * \text{当前误差值} + K_i * \text{积分值} + K_d * (\text{当前误差} - \text{上次误差值})$;
- 7) 上次误差值 = 当前误差值;

二氧化碳总烃、总苯、水分等质量指标和工艺控制参数之间的控制算法同上。

2.2 控制方案

根据以上分析, 设计食品二氧化碳质量控制系统方案如图 2 所示。

食品二氧化碳在线质量控制系统由采样预处理模块、在线分析、下位机、上位机、阀切换执行机构及集散控制系统 (distributed control system, DCS) 构成。

生产中如果各项指标均在食品级 (或内控指标) 合格范围以内, 工艺采用 PID 控制, 产品流路流入食品级储罐, 如图 2 选择 C 支路, 成为合格的产品。随着正在运行的脱硫吸附装置时间的延长, 产品质量指标会出

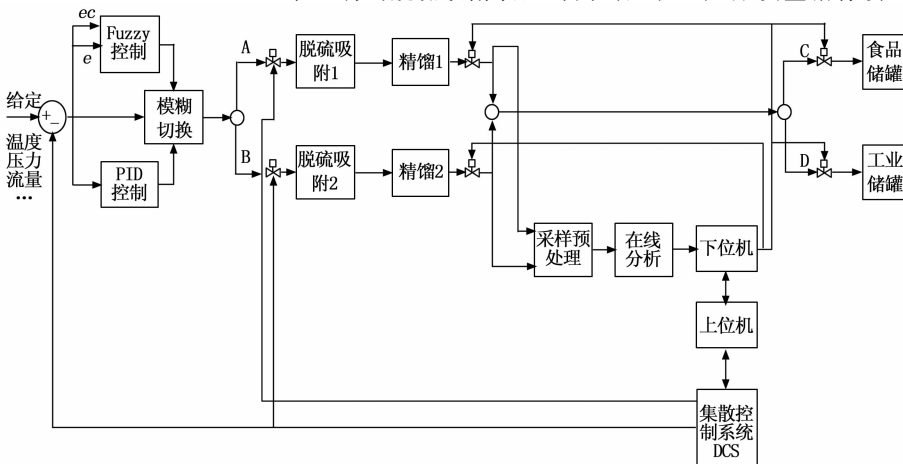


图 2 食品二氧化碳在线质量系统控制系统结构图

现降低,当超出预警线时,软件提示操作人员需要注意和处理,上位机把参数传给 DCS,根据 Fuzzy-PID 复合控制调整工艺参数;如分析指标超出报警警戒线后,则需要切换到工业级,需要把产品收集流路自动切换到工业级储罐,如图 2 切换到 D 点,同时控制系统把指标报告给管控生产线的 DCS 系统,要求把当前的脱硫吸附生产线切入再生状态,把再生好的脱硫吸附生产线投入到当前生产中运行,如图 2 切换 AB 点。

2.3 取样预处理系统

取样系统根据生产状态选择当前生产线的二氧化碳为气体来源,经过气化盘管或气化加热器进行气化,然后根据每个分析仪器的要求进样减压过滤等处理,样品预处理流程如图 3。

图 3 中实现了 2 路生产线的选择取样,每条生产线可进行在线自动切换或选择手动切换,自动取样有管路指示,当电磁阀打开时阀体指示为开状态否则指示为关闭。图 3 实现了 6 路分析仪器预处理,每条支路可独立调压等控制。气化方式为盘管加温控单元,当气化后达到设定温度后恒温。每路气体进入分析仪器之前都要经过在线颗粒物过滤器过滤,防止颗粒物进入分析仪器中造成数据的干扰和对仪器的损坏。为了定期对数据进行比对和校验,需要设置排空接口和手动取样点。

2.4 在线分析系统

由各种分析检测仪器或仪表组成,常规分析仪集成配置如表 3 所示。

其输入气体经过气体预处理模块按照仪器的要求调节压力、流量,然后进入各种分析仪器,仪器分析完数据后,以 4~20 mA 模拟信号或特定的信号进入信号处理模块。

表 3 在线分析仪器配置表

序号	项目	仪器品牌	型号	检测范围
1	总硫 Total sulfur	GREENCRANE	TQACO2 TS	0.1~1 000 ppb
2	总氮 Total nitrogen	GREENCRANE	TQACO2 TN	0.1~1 000 ppb
3	总烃 Total hydrocarbons	GREENCRANE	TQACO2 TH	0.1~1 000 ppm
4	苯 Aromatic hydrocarbons	GREENCRANE	TQACO2 TB	0~100 ppb
5	乙醛 Acetaldehyde	Antek	R1130	0.1~1 000 ppm
6	氧气 Oxygen	Southland Sensing	OMD-525	0.5~1 000 ppm
7	水分 Moisture	GREENCRANE	TQACO2 TM	0.1~1 000 ppm

2.5 控制系统

2.5.1 下位机系统

下位机系统由:信号处理模块、AD 转换模块、微控制器(MCU)、输出信号隔离模块、执行机构组成,该单元设计原理如图 4。

下位机负责分析仪器输出信号的采集转换并报告给上位机;下位机还执行上位机发来的各种指令,隔离并驱动各种执行机构动作。

2.5.2 上位机系统

上位机系统是由工业控制计算机组成,安装有控制软件、数据库系统。输入信号为下位机发送的各路采集的 AD 数值,根据软件校正模块计算分析指标的浓度含量,存储在数据库中,根据设定参数指挥控制下位机驱动电磁阀、指示灯等各种执行机构控制产品质量。上位机还负责二氧化碳质量数据的分析、存储、报表以及和 DCS 系统交互等功能。

2.5.3 分析仪器信号调理系统

食品二氧化碳在线质量控制系统中集成了各种分析仪器仪表,每种分析仪器仪表的输出信号各不相同,有的是电压信号,有的是电流信号。为了便于信号的传输与处理,需把所有的分析仪器输出的信号经过隔离调理成统一的电压信号进行采集。为了提高仪器仪表信号的抗干扰性,一般以电流输出类型为多。电流信号经过电阻转化为电压信号,其中含有大量噪声,需要经过滤波转化为平滑数据。巴特沃斯滤波器(butterworth filter, BTWF)的特点是通频带内的频率响应曲线最大限度平坦,没有起伏,而在阻频带则逐渐下降为零^[18-19]。BTWF 振幅和频率的关系可用公式(12)表示^[20]:

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}} \quad (12)$$

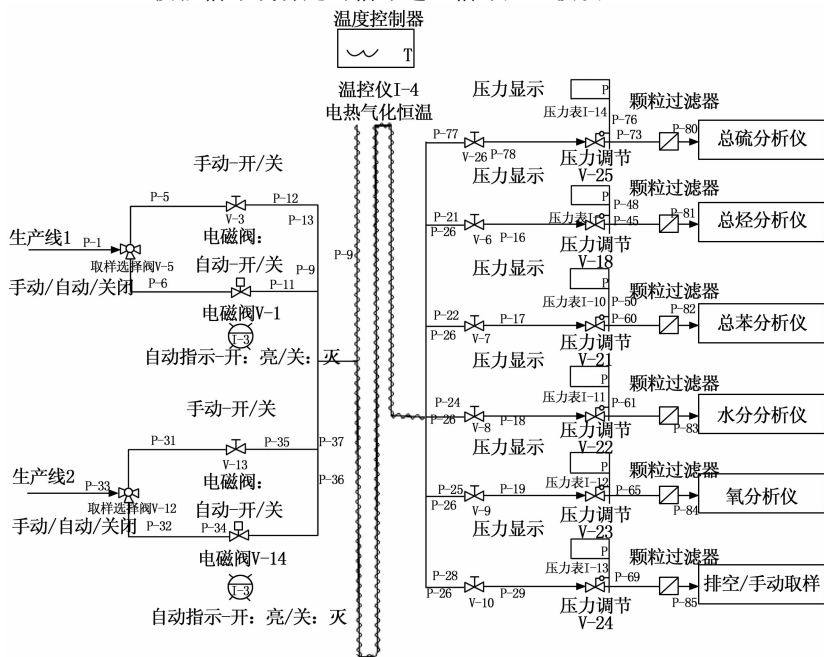


图 3 食品二氧化碳在线质量控制取样系统

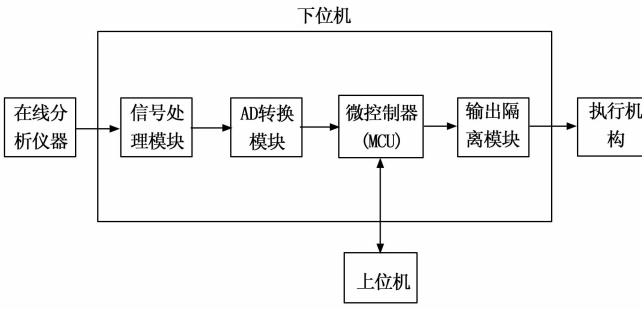


图 4 下位机系统

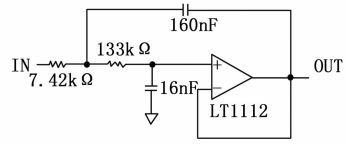
振幅的平方和频率的关系如式 (13):

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}} \quad (13)$$

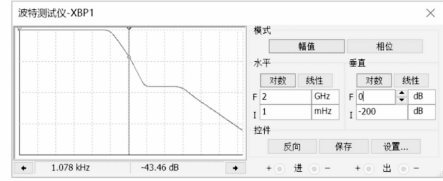
其中: n = 滤波器阶数; ω_c = 截止频率 (振幅下降到 -3 分贝时的频率); ω_p = 通频带边缘频率。

设计时设定阶数 $n=2$, 截止频率 ω_c 为 100 Hz, 阻带 -40 dB 1.05 kHz, 选取低噪声放大器 LT1112, 设计电路原理图如图 5 (a), 采用 Multisim 软件仿真^[21], 幅频特性 (波特图) 如图 5 (b):

仿真结果 $\omega_c = 107.706$ Hz 时信号衰减为 -3.714 dB; 在频率 1.078 kHz 时信号衰减为 -43.46 dB, 消除高频干扰信号效果较好, 符合设计要求。



(a)



(b)

图 5 BTWF 电路原理图及仿真信号

2.5.4 AD 数据采集模块

输入的电流信号经调理模块转化成电压信号接入 AD 电压采集模块转化为数字信号输出, AD 采集考虑因素主要有采集频率、转换精度等指标。美国德州仪器公司的 ADS1256 是一款适用于工厂自动化和过程控制且具有 PGA 的 24 位、30 kSPS、8 通道 $\Delta-\Sigma$ ADC^[22], 图 6 电路设计能满足 8 路信号同时采集的需要。

ADS1256 采集电路设计时采用 REF5025 产生的 2.5 V 电压作为电压基准, 测量 ± 5 V 范围的电压。在 PCB 布线时注意数字地和模拟地的隔离, 采集精度可达 μ V。如果

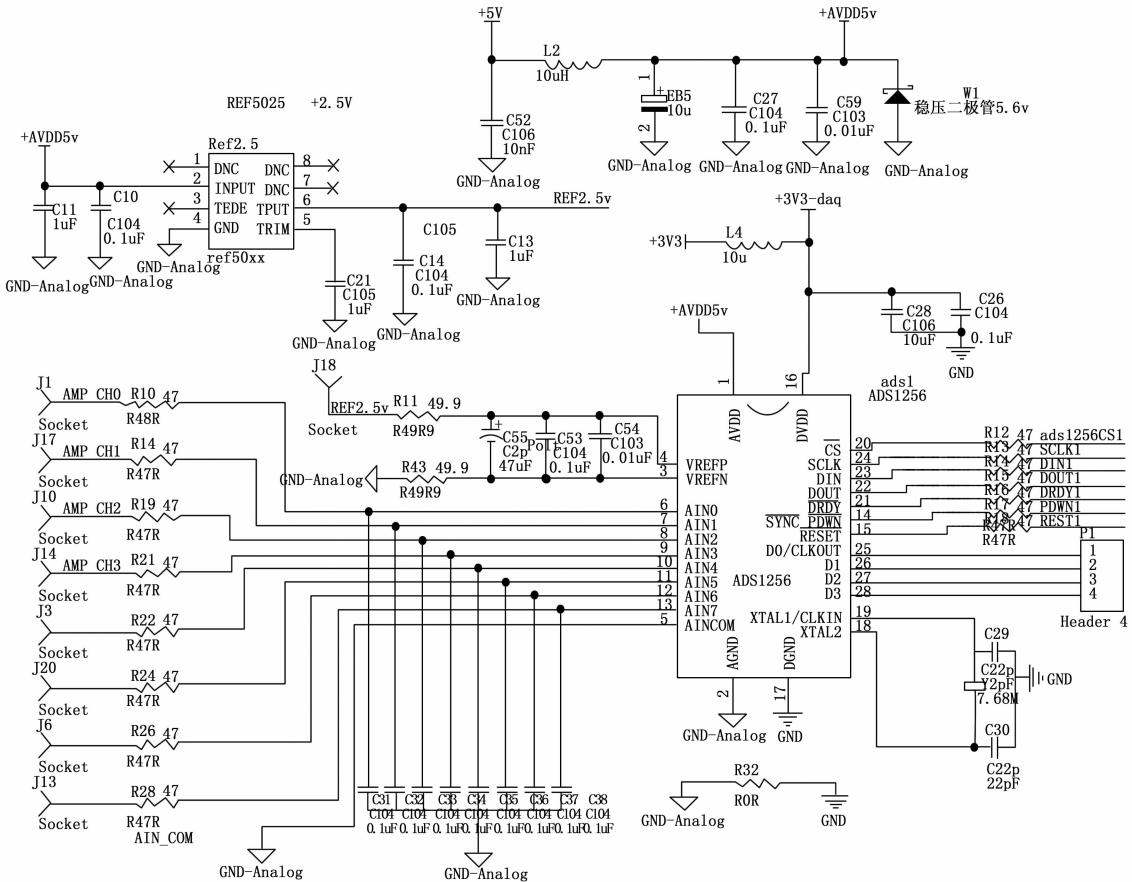


图 6 AD 采集模块

表 4 食用二氧化碳质量指标

首字节	第二字节	字节数	命令字节	第一通道数据				第二通道数据				n 通道	校验
				字节 1	字节 2	字节 3	字节 4	字节 1	字节 2	字节 3	字节 4		
5A	A5	XX	80	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	...	XX

采集通道超过 8 路时，可并联多块 ADS1256 模块进入系统。

2.5.5 微控制器

STM32F429IIT6 是意法半导体公司 32 位微控制器 (MCU)，基于 ARM®Cortex®-M 处理器，主频 180 MHz，支持包括高性能，实时功能，数字信号处理，低功耗、低电压操作，接口丰富，I/O 脚多达 140 脚^[23]，能满足控制需要。MCU 采用 SPI 总线和 ADS1256 通信。

SPI (serial peripheral interface) 是由 Motorola 公司设计的一种同步串行技术接口，是高速、同步、全双工的通信总线^[24]。SPI 总线可以通过片选引脚并行连接多块器件。连接线路如图 7 所示。

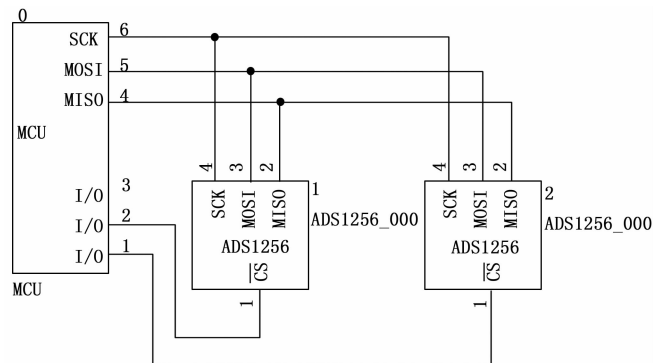


图 7 SPI 总线

MCU 通过 SPI 总线和 ADS1256 通信采集数据，MCU 控制程序是在 MDK 开发环境中用 C 语言开发。MCU 数据采集初始化为：开启管脚端口时钟，定义管脚工作模式，设定 SPI 工作模式，MCU 向 ADS1256 寄存器写入配置参数，再设定 ADS1256 的补偿、增益，启动 ADS1256 自我校准，然后启动转换同步，设定转换速度，切换转换通道，开始读数据，由于 ADS1256 转换来的数据位 uint32_t 型数据，需要根据 ADS1256 V_{ref} 脚输入的参考电压转换为 double 型电压值，然后进行移动平均计算并保存数据。ADS1256 有 8 个通道，每通道采集一次为一个采集周期，一个周期后判断，如果还需继续采集就循环执行。

MCU 采集到的数值以串口 RS485 发送给上位机。下位机接收数据是在 MCU 中设立中断优先级，利用串口中断接收和解析，控制执行机构，控制工艺生产。

2.5.6 数据转换

AD 采集的各通道模拟数据为单精度浮点型数据 (float)，利用 C 语言联合体结构转化为 4 个字节 char 型数据发送。

```
union MyUnion
{
```

```
char buf [4];
float fnumber;
} TsDataCh [n];
```

数据采用表 4 通信协议格式，以 RS485 端口发送至工控机。

其中表 4 传输命令字节例为 0X80，为模拟数据输出。设计时定义命令字节的数值如表 5 所示。

表 5 命令字节定义

模拟量输出	数字量输出	模拟量输入	数字量输入
0X80	0X81	0X82	0X83

上位机收到数据后，再按照表 4 的格式还原为 float 数据存储和分析。

下位机解析上位机发来表 4 结构的数据，控制各驱动端口动作。

数据解析逻辑如流程图 8 所示。

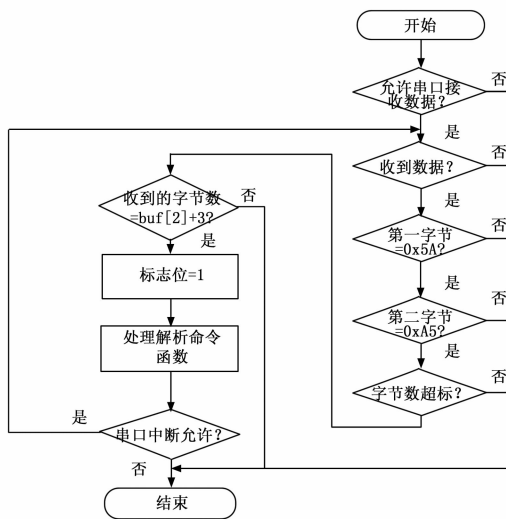


图 8 串口数据解析

在串口中断函数里，先判断接收标志位是否为允许状态，如果系统在忙的状态下，表示时不允许串口接收数据。当允许接收数据并接收到数据后，首先判断第一字节是否等于 0x5A，然后再判断收到的第二字节数据是否为 0xA5，如果都满足就继续接收数据，并不断判断字节数是否超标及字节数是否等于第三字节 (buf [2]) 数值加 3，如果等于就把标志位至 1，允许处理接收到的数据。在处理函数里，根据表 3 的格式和表 4 的命令解析和处理数据。

2.5.7 IO 输出及驱动放大系统

下位机收到上位机发来的命令，解析为相应的通道开和关，为了避免执行机构对控制系统的干扰，需要把信号

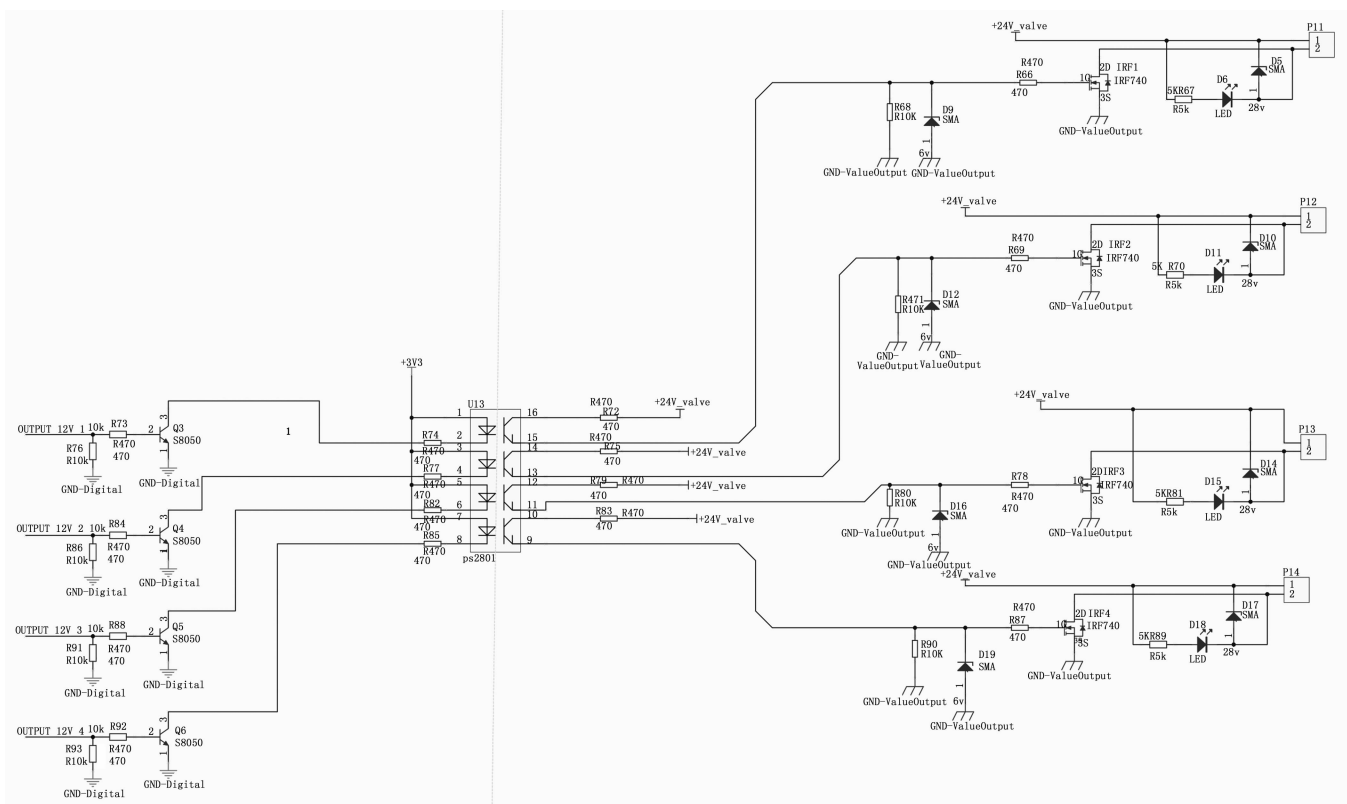


图 9 隔离放大驱动模块

隔离开来。低速开关信号用光耦 PS2801—4 隔离，高速信号用 A2630 隔离，通过 IRF740 驱动 12 V 或 24 V 电磁阀控制执行机构动作。如图 9 所示。

IRF740 是 N 沟道第三代 Power MOSFETs 管，耐压 400 V，漏极电流 10A^[25]，满足大部分常规开关电器电流电压需求。

2.6 执行机构

执行机构为气动或电动阀等，可以切换各种管路流向，报警器为指示灯或蜂鸣器指示工艺执行状态，统一受控制系统调度和运行。

2.7 分析小屋

由于各种分析仪安装需要安装在工业现场中，需要不同程度的工作环境和保护措施，以确保分析仪器的正常使用并有利于维护。食品二氧化碳在线质量控制系统集成安装在 19 英寸机柜内，整个机柜安装在分析小屋内，分析小屋设计需要满足 GB/T25844—2010 工业用现场分析小屋成套系统^[26]要求，设计如图 10 所示。

分析小屋集在线分析仪器、样品预处理系统及控制系统于一体，并配备分析仪表所需载气、标准气、仪表空气等基本设施。如图左侧放置钢瓶，设置冷暖空调，调节室内温度，安装排风风机，安装可燃气体和有毒气体报警装置，并连锁声光报警排风设施。如分析小屋设在防爆区域，则要安装正压防爆设施，满足在线分析仪表及质量控制系统运行所要求的环境条件。分析小屋的设计为在线分析仪

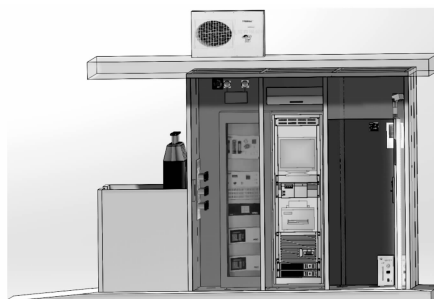


图 10 食品二氧化碳在线质量控制系分析小屋

器的现场安装、投运及维护提供了极大的方便。

3 上位机软件设计

3.1 上位机软件结构设计

上位机软件采用 Visual basic.NET 加 SQL server 开发环境，软件结构如图 11 所示。

系统需要完成的功能有：在线采集模块、查询模块、校正模块、密码及权限管理模块、质量报警预警参数模块、时间事件模块等，运行主界面如图 12 所示。

由于模块窗体较多，为了避免多个窗体的分散，采用多文档窗体界面（MDI）让所有的子窗口统一于一个父窗口之内。使用 MDI 有一个公共的主菜单，执行公共的程序或调用各个子窗口，每个子窗口具有自己独特的功能，但子窗口不能重复出现。实现代码为：

```
Public Function IsMdiChi (ByVal chiformname As String)
```

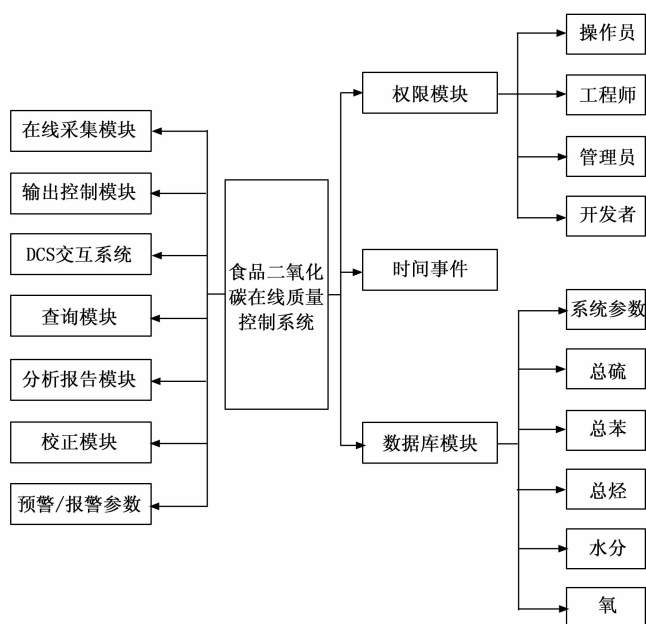


图 11 软件结构



图 12 运行主界面

```

As Boolean
    Dim chiform As Form
    For Each chiform In Me.MdiChildren
        If chiform.Name = chiformname.Trim Then
            If chiform.Visible Then
                chiform.Activate()
            Else
                chiform.Show()
            End If
            Return True
        End If
    Next
    Return False
End Function
    
```

首先遍历每个子窗口，检查点击的子窗口是否为可见，如果已经可见了就退出，否则就显示当前子窗口。

3.2 数据通信

下位机通过 RS485 串行接口和上位机通讯，串口类 SerialPort 接收数据。Microsoft.Net 2.0 版本以后提供了 Sys-

tem.IO.Ports.SerialPort 类，用户可以方便地完成串口数据的收发，首先设定串口的参数如波特率、数据位等，然后设定委托函数类型，串口类需运行在独立线程内，主线程要访问串口类的数据就要用到委托机制，其次建立独立线程为串口数据接收、处理和存储数据，最后在主线程里定时显示相关数据。

3.3 数据库系统

3.3.1 数据结构

所有的数据保存在数据库系统中。软件中的数据以表的形式存储于数据库中。分别为系统参数表，总硫数据采集表、总硫校正表、时间事件表、总烃数据采集表、总烃校正表、苯色谱参数表、苯色谱数据等。

每个采集通道的数据采用如表 6 结构存储。

表 6 单通道数据结构表

序号	字段名	数据类型	数据实例	数据说明
1	Ditem	[nchar]	TS	总硫
2	Ddatetime	[datetime]	11:41.9	采集时间
3	Dconcentration	[float]	2.158	2.158ppb
4	Dvoltage	[float]	1.352579	1.352579V
5	Pline	[smallint]	2	第 2 生产线

3.3.2 数据库操作

以 ADO.NET 连接数据库，分别设计了 DBConnection、DBCommand、DBDataTable、DBDataReader 和 DBDataRelation 几个类，进行连接数据库、执行增、删、改、查等操作。以下是 DBCommand 类代码：

```

Public Class DBCommand Inherits DBConnection
    构造函数
    Public Sub New(ByVal str As String)
        ConnStr = str连接信息字符串
    End Sub

    Public Function Insert(ByVal strSQL As String) As Integer
        Open() 连接数据库
        创建 SqlCommand 实例
        Dim cmd As SqlCommand = New SqlCommand(strSQL, conn)

        Dim count As Integer = 0
        count = cmd.ExecuteNonQuery() 执行 SQL 命令
        Close() 关闭数据库
        Return count 'count 表示受影响的行数,初始化为 0
    End Function

    用字符串 strSQL 操作数据库返回影响行数
    Public Function (strSQL As String) As Integer
        Open() 打开数据库
        创建 SqlCommand 实例
        Dim cmd As SqlCommand = New SqlCommand(strSQL, conn)

        Dim count As Integer = 0
        count = cmd.ExecuteNonQuery() 执行 SQL 命令
        Close() 关闭数据库
    End Function
    
```



```

Return count
End Function
...
End Class

```

3.3.3 数据表体积控制

由于在线生产系统是 365 天 24 小时不间断运行。生产期间会产生大量的数据，为了控制数据库的大小，不至于数据库体积过于庞大而影响运行效率，设定每一路数据每年建一个数据表。设计插入数据表名后加当年的年份，用以下字符串语句组成：

```

"insert into TS " + Now. Year. ToString + " (Ddatetime,
Dconcentration, Dvoltage, Pline) values (" + Now. ToString +
"." + Now. Millisecond. ToString + "," + d_Dconcentration +
"," + d_Dvoltage + "," + d_Pline + ")" + " ; "

```

3.4 密码及权限管理模块

RBAC (Role-Based Access Control)^[27] 是业界接受度较高的权限模型，基本的概念是将“角色”赋予各个用户，用户通过分配角色才能获得相应的权限，每个用户可以分配多个角色，每个角色可以分配多个权限，从而实现了权限的灵活配置^[28]。最基本的 RBAC 模型就是由“用户”、“角色”及“权限”组成，他们之间的关系可以是一对多关系，也可以是多对多关系。

RBAC 一般采用“通用角色”加“实例角色”的模式，可以把通用角色作为基类，实例角色可继承通用角色，从而拥有了通用角色的权限。

在本系统中定义角色和为其权限分配为：

- 1) SuperAdmin, 软件开发者，具有系统一切的权限；
- 2) Admin, 用户管理员，具有当前控制系统所有的权限，可进行数据库维护，时间事件管理，添加成员等；
- 3) Engineer, 工程师，不具备删除权限，可以修改、添加成员，分析处理数据，打印报告，可以校正分析仪器仪表；
- 4) Operator, 操作员，只可操作、查看系统。

采用“资源点”加“通用角色”加“资源 ID”来定义和实例化角色。

3.5 系统参数模块

设置每路分析项目采集数据频率，浓度预警、报警数值。采样频率根据每种分析数据的要求设定，总硫项目一般设定 1~60 s 采集一个点，水分项目设定 1~120 s 采集一个点，总苯项目设定 0.5~200 s 采集一个点，界面如图 13 所示。



图 13 系统参数界面

系统参数设定后，软件根据设定的频率改变各自定时器 Timer 的采样间隔。

3.6 时间事件模块

软件的运行日志，记录了软件的登录、运行、参数设定等，事件及每次预警报警的时间及各种相应动作如取样阀的切换，执行机构的转换分流等。软件运行时，当事件发生后存储于数据库的“时间事件表中”。

3.7 校正模块

校准是日常对仪器性能进行的检查，以保证仪器示值的准确性。是传递量值或量值溯源的方式。软件设有采集校正数据和设置校正方法模块，管理在线质量控制系统中在线分析仪器的检定与校准。界面如图 14 (a)，按照产品质量要求，工程师每月用标准气体对在线分析仪器进行校正比对，如图 14 (b) 是对总硫仪器的校正操作：



图 14 校正采集界面

点击“校正阀切换”通入零点气，则零点二氧化碳气气体流入总硫仪器中，数值稳定后点击“归零”，输入标准气体浓度，点击“标气阀切换”，标准烷基硫气体流入仪器中，等待数值稳定后点击“标气设定”，标准气体浓度写入系统，其中标气可以进行多点设定。此校正过程可自动进行，点击“自动校正”按钮，则校正系统按照设定的程序，执行上述操作过程。

检测项目的浓度和采集电压符合 (14) 单值连续函数关系^[29]。

$$V = f(C) \tag{14}$$

其中：V 代表采集电压值，C 为检测项目浓度。

采用分段线性化方式，先采集标准气体各点“浓度”~“电压”数据，按照浓度关系将每个浓度点校正成线性关系，如式 (15)：

$$C = a \cdot V + b \tag{15}$$

计算系数 a 和 b 是按照最小二乘法的原理，用以下的伪代码计算：

- 1) 计算浓度均值 $\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$;
- 2) 计算电压均值 $\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i$;
- 3) 计算浓度电压乘积 $\bar{C} \cdot \bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \cdot V_i$;
- 4) 计算电压均方 $\bar{V}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^2$;

5) 解方程:

$$\begin{cases} a + b \cdot \bar{V} = \bar{C} \\ a \cdot \bar{V} + b \cdot \bar{V}^2 = \bar{C} \cdot \bar{V} \end{cases}$$

6) 按照公式 $b = \frac{\bar{C} \cdot \bar{V} - \bar{C}}{(\bar{C} - b \cdot \bar{V}) \cdot (\bar{V} - 1)}$, 代入 (1) ~

(4) 计算的数值, 可计算得系数 b 值;

7) 按照公式 $a = \bar{C} - b \cdot \bar{V}$, 代入上述步骤 (1) (2)

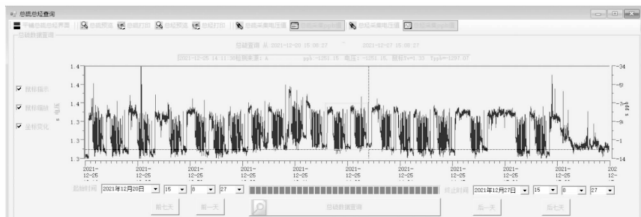
(6) 数值可计算得系数 a 值。

8) 保存系数 a 、 b 数值, 存入校正关系数据库。

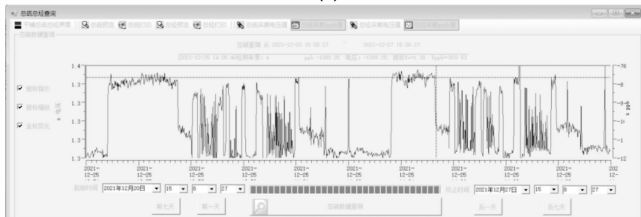
在数据采集时, 根据公式 (5), 利用校正系数 a 、 b 计算浓度数值。

3.8 曲线缩放

当我们查询历史曲线时, 选择查询的时间段较长时会出现显示界面数据过于密集现象, 曲线相互叠加, 造成看不清某一时刻具体数值和趋势^[30]。如图 18 所示, 此时如果想查看其中某一区域曲线详细的细节, 可以用软件“鼠标缩放”功能, 先在程序中勾选左侧“鼠标缩放”按钮, 用鼠标左键在图形区域里按下并拖动选择放大的区域, 此时有绿色方框随鼠标移动如图 15 (a); 到达想要的区域后, 释放鼠标左键, 被鼠标选择的区域就被放大了, 如图 15 (b)。



(a)



(b)

图 15 查询鼠标缩放界面

此框选放大步骤, 可重复进行多次, 如果想恢复原始图像, 点击取消勾选的“鼠标放大”按钮即可恢复。

采用双缓存技术绘制曲线, 首先判断是否允许启动鼠标缩放功能, 再判断是否鼠标左键按下, 如果按下, 则记录此时鼠标位置作为绘制框线的起点坐标, 鼠标移动时, 在鼠标移动函数里, 根据当前鼠标坐标位置, 重新绘制矩形, 鼠标释放时, 在鼠标释放函数里执行绘图函数, 函数里先根据矩形框大小及位置坐标计算 x 轴、 y 轴坐标分度值、比例系数等参数, 然后计算绘图数据数组, 在内存中绘制曲线中的各个点, 最后把内存中的图像整体显示出来。

4 实验结果与分析

4.1 控制系统运行实验

食品二氧化碳质量控制系统运行时, 在上位机软件中

设定各控制参数, 使用单位根据各自的内控标准设定, 如图 16 中总硫设定预警值 70 ppb, 报警值为 90 ppb, 总烃预警值为 8 ppm, 报警值为 50 ppm, 报警数值可直接在文本框内输入也用滚动条拉动设定。

点击各个项目模块的“开始”按钮, 开始实时采集分析仪器输出的数据, 在线采集模块运行界面如图 16 所示。

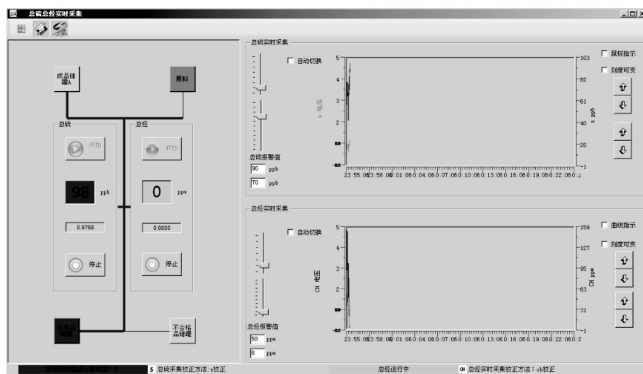


图 16 在线采集模块运行界面

控制系统软件实时采集数据, 并把控制信息传给 DCS, DCS 根据设定值和反馈值进行比较计算, 然后调节生产工艺参数, 调度和控制生产。

4.2 查询、报告及产品质量溯源

在软件查询模块中可以根据时间, 查询每种分析实验数据, 可用鼠标移动指示每个点的分析数值, 可以用“鼠标缩放”功能来放大选中曲线部分, 让查询数据更加精细。查询界面如图 17 所示。

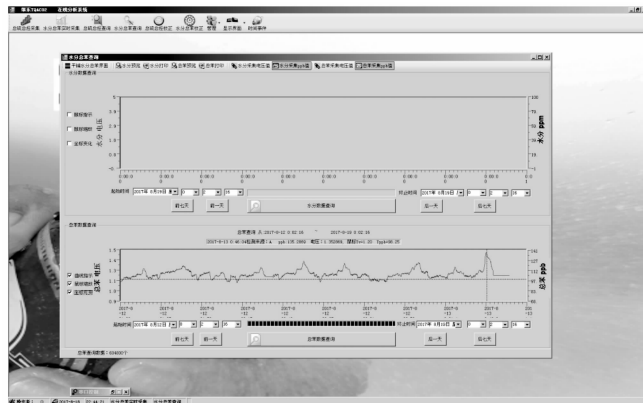


图 17 查询界面

查询的图谱可以生成“分析报告”作为质量溯源的报告, 用于分析和指示产品的质量。

4.3 数据分析报告

作为质量控制和管理, 需要生成必要的书面报告。软件可以生成按照控制管理所需要的数据分析报告, 如图 18 所示。

产品质量控制和溯源是下游用户, 如可口可乐、百事可乐等工厂质量审核^[31-32]不可缺少的一部分。在审核时, 二氧化碳质量工程师将根据数据分析报告结合控制响应事件给他们介绍生产处理情况, 并汇报产品质量状况。

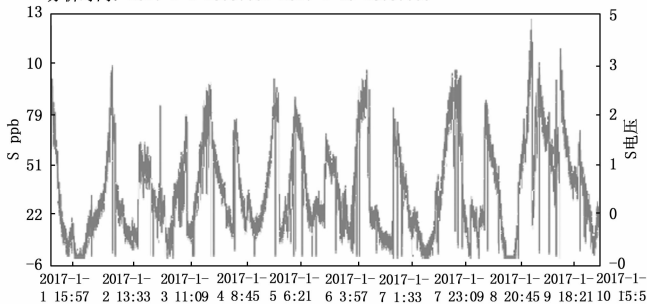
表 7 运行数据表

序号	总硫(ppb)	总烃(PPM)	总苯(ppb)	水分(PPM)	工艺控制方式	预警指示	报警指示	食品级阀 C	工业级阀 D
1	2	1.2	0	5	PID	OFF	OFF	ON	OFF
2	8	1.3	0	5	PID	OFF	OFF	ON	OFF
3	45	2.1	0	6	PID	OFF	OFF	ON	OFF
4	62	2.5	1	8	PID	OFF	OFF	ON	OFF
5	70	2.8	1	10	Fuzzy	ON	OFF	ON	OFF
6	75	5.2	2	12	Fuzzy	ON	OFF	ON	OFF
7	90	7.1	2	15	A->B	ON	ON	OFF	ON



总硫分析报告

分析时间: 2017-1-1 15:57:01~2017-1-10 15:57:00



总硫含量最大值: 134.8ppb
 总硫含量最小值: -4.85ppb
 平均值: 46.76373
 采集数: 622225

报告者: _____
 报告日期: 2017-8-21 15:57:46

图 18 分析报告

4.4 实验运行数据分析

表 7 是某一运行时段实验运行数据。

在正常运行情况下, 如表 7 序号 1~4, 工艺控制采用 PID 方式, 预警和报警指示灯关闭, 食品级流路控制阀 C 状态为 ON, 产品为食品级质量, 流入食品级储罐; 当达到表 7 序号 5, 总硫 70 ppb、总烃 2.8 ppm、苯 1 ppb 和水 10 ppm, 其中总硫采集的数据达到(或超过)设定的“预警值”系统控制预警指示灯点亮, 工艺控制方式采用 Fuzzy 方式, 此时产品质量还在食品级指标之内, 产品还是流入食品级储罐; 当到达表 7 序号 7, 总硫 90 ppb、总烃 7.1 ppm、苯 2 ppb 和水 15 ppm, 其中总硫采集数值超过报警设定值, 数值到达 90 ppb, 到达和超过“报警数值”界限, 此时报警灯闪亮, 同时驱动执行机构切换产品输出流向, 产品质量超出食品级指标, 控制食品级管路流向的阀 C 关闭, 同时工业级产品流向的阀 D 打开, 产品流入工业级储罐, 同时 DCS 启动切换工艺流程, 关闭 A 生产线, 打开 B 生产线, 让不合格的 A 生产线进入再生处理进程, 再生好的 B 生产线投入生产运行; 当采集的数值回归正常时, 系统又进入表 7 序号 1 状态。

测试结果表明 FCQC 能严格控制产品质量, 杜绝了不

合格的产品流入食品级储罐, 工艺控制参数响应及时, 调节合理, 能够精准实现自动化运行和控制。

5 结束语

食品二氧化碳产品是碳酸饮料食品的重要原料, 质量品质决定着食品安全的重要问题, 在线质量控制系统能在生产环节控制产品质量, 对保护食品安全起着重要的作用。本质量控制系统, 经过五年的实际运行, 表明系统安全可靠, 能有效的应用在二氧化碳的生产系统中, 安全高效地控制产品的质量, 在中国粮油食品(集团)有限公司等多家二氧化碳的生产工厂得到广泛的应用。本控制系统也可用于医用氧气、车用燃料氢气等在线质量控制系统中, 具有较强的推广性, 应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 赵敏. 我国食品添加剂二氧化碳产品的质量状况分析 [J]. 化工标准化与质量监督, 1997 (8): 21-22.
- [2] 王文丰. 催化氧化精脱硫剂在食品二氧化碳生产中的应用 [J]. 精细石油化工进展, 2016, 17 (1): 54-57.
- [3] 文明. 加强食品质量与安全控制的措施 [J]. 食品安全导刊, 2018 (24): 52.
- [4] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB1886.228—2016 食品添加剂二氧化碳 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [5] 刘健, 翟万军. 食品级二氧化碳的生产工艺 [J]. 广东化工, 2009, 36 (9): 158-159.
- [6] 李杨, 武奇鹤. 食品级二氧化碳生产工艺自控系统的设计 [J]. 电大理工, 2011 (3): 3-5.
- [7] 孙萍. 质量敏感型有毒有害气体传感器及阵列研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [8] 李清玲. 石化企业在线防爆分析小屋的安全设计与应用研究 [D]. 重庆: 重庆科技学院, 2016.
- [9] CLARKE J R P. A review of on-line analysis [J]. Analytica Chimica Acta, 1986, 190: 1-11.
- [10] 李宁. 基于可调谐激光吸收光谱技术的气体在线检测及二维分布重建研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [11] 王洪记. 液体二氧化碳生产新工艺 [J]. 化肥工业, 1999 (6): 55.
- [12] 闫小茹. 食品级二氧化碳生产工艺 [J]. 化工设计, 2008, 18 (6): 27-28, 39.
- [13] MCFARLANE I. Automatic control of food manufacturing processes [M]. Springer Science & Business Media, 1995.

(下转第 152 页)