

一种长寿命高精度氧气传感器设计及应用

王志荣¹, 邓 飞², 张远征^{2,3}

(1. 国能神东煤炭集团有限责任公司, 陕西 榆林 719300; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039; 3. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400039)

摘要:针对传统采用电化学原理的氧浓度检测传感器存在寿命短、受环境变化影响测量精度的问题,设计基于新型长寿命无铅氧浓度检测原理,研制了一种长寿命高精度矿用氧气浓度传感器。该传感器采用模块化设计架构,分布式微处理器数据采集方法,实现了多种测量数据的实时采集、补偿及数据融合解调,达到了更高的环境适应能力及氧浓度的高精度测量,传感器工作寿命较普通电化学式传感器高出 3 倍以上。

关键词:无铅氧;长寿命;精度;补偿

中图分类号:TP212

文章编号:1000-0682(2025)01-0042-06

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.01.008

Design and application of a long life and high precision oxygen sensor

WANG Zhirong¹, DENG Fei², ZHANG Yuanzheng^{2,3}

(1. Shenhua Shendong Coal Group Corporation Limited, Shaanxi Yulin 719300 China;

2. China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China;

3. State Key Laboratory of Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400039, China)

Abstract:In response to the problems of short lifespan and measurement accuracy affected by environmental changes in traditional oxygen concentration detection sensors based on electrochemical principles, a new type of long-life lead-free oxygen concentration detection principle is designed and developed, which is a long-life high-precision mining oxygen concentration sensor. The sensor adopts a modular design architecture and a distributed microprocessor data acquisition method, achieving real-time collection, compensation, and data fusion demodulation of various measurement data, achieving greater environmental adaptability and high-precision measurement of oxygen concentration. The working life of the sensor is more than three times longer than that of conventional electrochemical sensors.

Keywords:lead free oxygen; long lifespan; accuracy; compensate

0 引言

随着现代化工业的不断发展,煤矿作为能源的主要来源在全球范围内占据着重要的地位。然而,在煤矿生产过程中,由于煤矿内部存在着高浓度的有害气体,如一氧化碳、二氧化碳等,这些气体的存在不仅会对煤矿工人的生命健康造成威胁,而且还

会对煤矿的生产安全造成严重的影响。因此,煤矿安全监测系统当中的氧气传感器是至关重要的组成部分。传统的氧气传感器通常采用电化学法进行测量,其原理是通过测量氧气与电极之间的电流来确定氧气浓度。然而,由于煤矿环境的恶劣条件,传统的氧气传感器往往会因为腐蚀、氧化等原因导致寿命短、稳定性差等问题,从而影响其使用效果。因此,研究开发一种具有长寿命的氧气传感器技术对于提高煤矿安全监测系统的精度和可靠性具有重要意义^[1]。

随着技术的进步出现了新型的氧气敏感元件,该原理基于新型长寿命无铅氧浓度检测敏感元件,具有寿命长,响应时间快,工作功耗低等特点,但是

收稿日期:2024-05-20

基金项目:中国神华能源股份有限公司神东煤炭分公司科技创新项目——基于无线传输的瓦斯智能管控平台研究(E210100254)

第一作者:王志荣(1969—),男,陕西府谷人,工程师,北京科技大学毕业,矿产资源专业,从事煤矿“一通三防”管理工作。

E-mail:10022322@qq.com

在使用过程中也暴露出了一些不足,如环境变化影响氧浓度检测精度、需要足够长的热平衡时间,因此,该文基于新型长寿命无铅氧浓度检测技术,研制了一种长寿命高精度氧浓度检测传感器,将传感器的工作寿命提高了 2 倍,同时也提升了传感器的环境适应性。

1 氧浓度测量原理

无铅氧敏感元件由电极膜、催化剂、电解液组成,元件顶端与底部各预留一个贯通的毛细孔实现被测气体的吸入和泵出,并完成化学反应和浓度测量,氧浓度敏感元件示意图如图 1 所示。

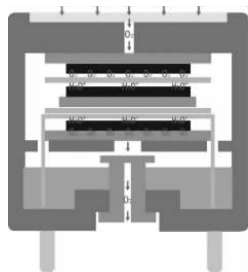
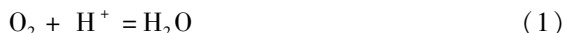


图 1 长寿命无铅氧传感器剖面图

无铅氧测量原理是环境中待测氧气气体通过微型毛细泵吸入到无铅氧敏感元件内部,氧气在工作电极上被还原,化学方程式:



然后水在对电极上被重新分解成氧气和 H^+ , 化学方程式:



最后氧气从另一边排出传感器,总的化学反应方程式:



从上面的反应机理,我们可以得出如下结论:在整个化学反应过程中, O_2 、 H^+ 、 H_2O 既不会增加,也不会减少, O_2 只是从传感器的顶部“泵”到传感器的底部,因此,氧元件在工作过程中不消耗原材料,相比普通电化学氧敏感元件的原电池工作模式,寿命提升 2 倍以上^[3]。

该原理称作氧气泵型氧气测量原理,只要是“泵”,就是需要耗电的,这个“氧气泵”所需要的电流跟 O_2 的浓度正相关,无铅氧气体敏感元件输出信号与氧浓度测量值是线性关系,关系式如下:

$$I = k \cdot \beta \quad (4)$$

式中, I 为输出电流信号; k 为氧气浓度线性常数; β 位氧气浓度。

无铅氧敏感元件在工况环境下极易受到温度、

大气压强变化的影响,导致氧浓度测量数据不准确,如图 2 所示。

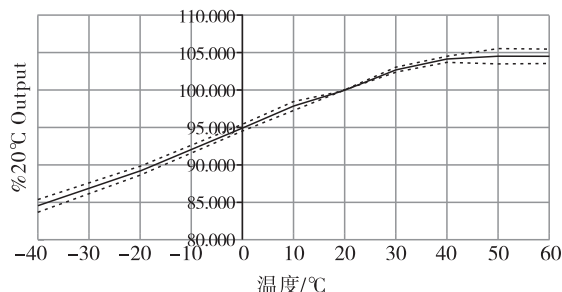


图 2(a) 温度突变影响曲线

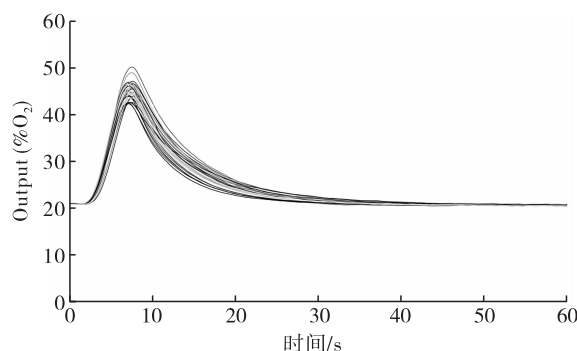


图 2(b) 压力突变影响曲线

因为无铅氧敏感元件有 -600 mV 的偏压,因此电压的平衡需要时间。当然,对用户来说,这个平衡时间越短越好。图 3 是无铅氧敏感元件断电 24 小时以上,然后上电平衡的曲线。可以得知,等待 15 分钟以上,无铅氧敏感元件就能够完全平衡了^[4]。

鉴于无铅氧敏感元件具有温度和大气压强影响特性,以及上电平衡预热时间的需求,该文将从以下几个方面进行研究。

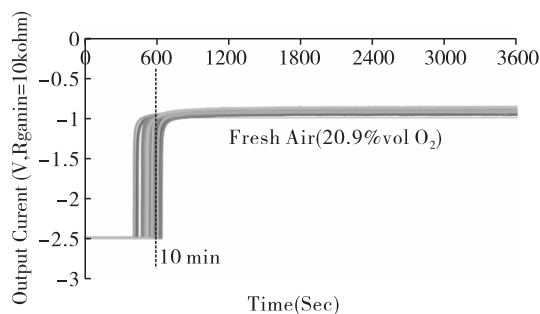


图 3 氧敏感元件上电平衡曲线

2 传感器硬件设计

2.1 总体设计

氧气传感器主要实现氧气浓度的实时在线检测,并在浓度低于报警点时发出声光报警信号,主要工作于煤矿井下采空区、工作面、避难硐室等高粉

率 24 位 ADC。HP203B 提供高精度 24 位大气压强和温度数字输出,可以根据应用需要转换速度和高度,所有内置计算采用了高速 4 MHz 的浮点运算,

计算误差小,数据补偿是内部集成,最终计算出实际的直接测量结果值,所以外部应用 MCU 通过发出信号采集命令,待完成后,再通过 I²C 接口直接读取大气压强,温度的实际测量值。HP203B 的体积也非常小巧,因此,该文将该传感器集成到无铅氧敏感元件底部,置于同一工作环境中,实时测量无铅氧敏感元件的环境温度和大气压强情况,并将数据传输给应用 MCU 实现温度、大气压强的融合解调。温度和大气压强采样电路如图 7 所示。

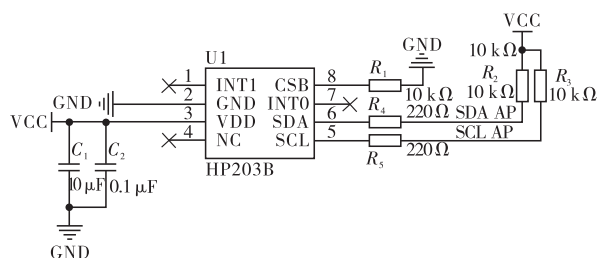


图 7 温度和大气压强采样电路

3 软件设计

3.1 主程序设计

单片机软件主要由以下几个功能模块组成:初始化子程序、氧气浓度数据采集子程序、温度数据采集子函数、大气压强数据采集子函数、温度自适应补偿子函数、大气压强自适应补偿子函数、存储子程序、显示子程序等^[9],其软件流程图如图 8 所示。

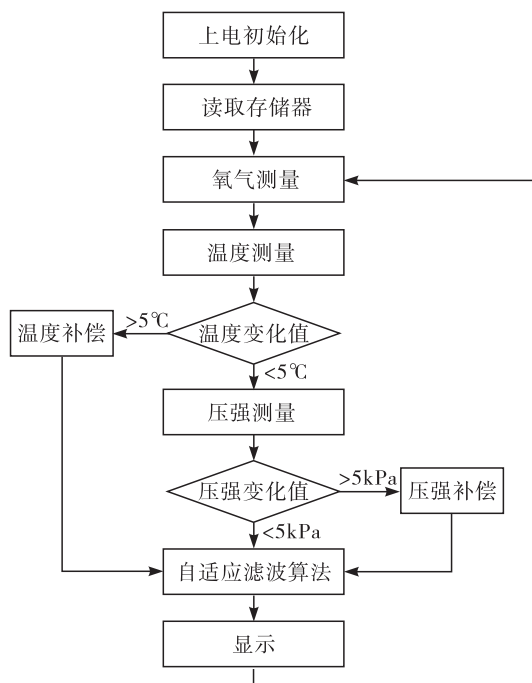


图 8 流速测量工作流程图

传感器上电后执行系统初始化子程序,包括初

始化单片机的系统参数、I/O 口状态、程序运行中所需的各种参数,待系统初始化后读取 EEPROM 存储器中的参数值;待各项参数设置好后进入氧气值采样、温度采样子函数,并根据温度变化值的大小判断是否进行温度补偿,完成温度的自适应补偿;再进入大气压强测量子函数,并根据大气压强变化值的大小判断是否进行大气压强补偿,完成大气压强的自适应补偿^[8];最后根据自适应滤波算法,输出最终的氧气浓度值,并在数码管上实时显示。

3.2 温度压力自适应补偿算法设计

环境温度、大气压强的改变对氧气传感器检测精度会产生较大影响,突破常规一维氧气浓度单一检测方法,实时获取氧气浓度、温度、大气压强多源、多维感知变量,计算出温度影响因子 δ ,大气压强变化速率因子 ν ,大气压强影响因子 θ ,其中温度影响因子 δ 通过以下方式计算:

$$\delta = t/k_1 \quad (5)$$

其中: t 为实际温度值, k_1 为常数值(一般取值 25)。

大气压强变化速率因子 ν 通过以下方式计算:

$$\nu = (p_2 - p_1)/(s_2 - s_1) \quad (6)$$

其中: p_2 为 s_2 时刻对应的大气压强值; p_1 为 s_1 时刻对应的大气压强值。

大气压强影响因子 θ 通过以下方式计算:

$$\theta = p/k_2 \quad (7)$$

其中: p 为实际大气压强值, k_2 为常数值(一般取值 98.00)。

采用三维信息实时融合预处理方法,不同大气压强变化速率因子 ν 的时候,采用不同的氧气滤波函数,计算出氧气浓度处理值 ρ_2 ,氧气浓度处理值 ρ_2 根据以下条件判断,并根据大气压强变化速率因子 ν 由下列条件项计算得出:

(1) 当 $0.95 \leq \nu \leq 1.05$ 时, $\rho_2 = \rho_1$;

(2) 当 $\nu > 1.05$ 时,设定一个时间常数 T (一般取值 30),经过 $\nu \times T$ 时间长度后,更新数据 $\rho_2 = \rho_1$;

(3) 当 $\nu < 0.95$ 时,设定一个时间常数 T (一般取值 30),经过 T/ν 时间长度后更新数据 $\rho_2 = \rho_1$;

其中: ρ_1 为氧气浓度值采样值; ρ_2 为经过大气压强趋势判断后氧气浓度值。

再次,根据不同的温度影响因子 δ 和大气压强影响因子 θ ,计算出当前环境下氧气的真实浓度值 ρ ,由下式计算:

$$\rho = \rho_2 + \rho_2 \times \delta + \rho_2 \times \theta, \quad (8)$$

其中: ρ_2 为经过大气压强趋势判断后氧气浓度值。

若函数中温度影响因子 δ 大气压强变化速率因子 ν , 气压强影响因子 θ 任一变量不等于 1, 则氧气浓度原始值 ρ_1 与真实浓度值 ρ 不相等, 表明通过多维信息实时融合预处理后, 可修正并提高氧气浓度的测量精度。温度压力自适应补偿算法流程图如图 9 所示。

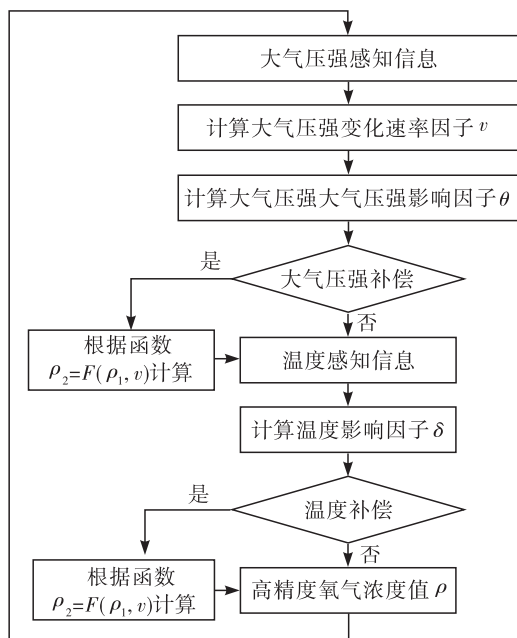


图 9 温度压力自适应补偿算法流程图

4 试验测试

该文将按照 MT447《煤矿用电化学式氧气传感器技术条件》行业标准的相关要求, 对新型长寿命氧气传感器进行 6 个月基本误差、高低温试验、大气压强试验等进行了测试验证。

4.1 6 个月基本误差试验

采用普通电化学氧元件与长寿命无铅氧元件进行为期 6 个月的基本误差试验, 第一次校准合格后不进行基本误差校准, 并且每一个月进行一次数据读取, 测定得到如下数据。

表 2 长时间运行基本误差对比试验

时间/月	普通电化学氧元件	相对误差	长寿命无铅氧元件	相对误差
0	20.9	0.0%	20.9	0.0%
1	20.7	-1.0%	20.9	0.0%
2	20.4	-2.4%	20.9	0.0%
3	20.0	-4.3%	20.8	-1.0%
4	19.6	-6.2%	20.8	-0.5%
5	19.4	-7.2%	20.9	0.0%
6	19.3	-7.7%	20.9	0.0%

4.2 温度影响误差试验

温度影响误差试验是为了验证在 $-10 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不同温度下, 氧浓度测量精度能否满足 $\pm 3\%$ FS 的要求。将传感器放置于浓度为 20% 的标准气体模拟装置中, 改变装置内的温度范围为 $-10 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 测定得到如表 3 数据。

表 3 温度补偿前后传感器的测量浓度值

温度/ $^{\circ}\text{C}$	补偿前	相对误差	补偿后	相对误差
-10	18.4	-8.0%	19.8	-1.0%
0	18.9	-5.5%	19.8	-1.0%
10	19.4	-3.0%	19.9	-0.5%
20	19.9	-0.5%	20.0	0.0%
30	20.5	2.5%	20.0	0.0%
40	21.1	5.5%	19.9	-0.5%
50	21.5	7.5%	19.9	-0.5%

4.3 大气压强影响误差试验

大气压强影响误差试验是为了验证在工作气压 $50 \sim 120\text{ kPa}$ 范围内能否满足 $\pm 3\%$ FS 的要求。将传感器放置于压力试验装置中, 改变装置内压力范围为 $50 \sim 120\text{ kPa}$, 测定得到如表 4 数据。

表 4 压强补偿前后传感器的测量浓度值

压强/ kPa	补偿前	相对误差	补偿后	相对误差
50	22.5	12.5%	20.4	2%
60	22.0	10.0%	20.3	1.5%
70	21.6	8.0%	20.2	1.0%
80	21.0	5.0%	20.1	0.5%
90	20.6	3.0%	20.0	0.0%
100	20.0	0.0%	20.0	0.0%
110	19.5	-0.5%	19.9	-0.5%
120	19.0	-5.0%	19.8	-1.0%

实验测试结果表明, 采用长寿命无铅氧元件设计的氧气传感器具有比普通电化学氧气传感器具有更长的工作寿命性能, 同时采用了温度和大气压强自适应补偿技术后, 大幅度提高了宽温度、压力范围下, 氧浓度的测量精度, 误差均小于 2.0%。可见, 新型氧气传感器拥有极佳的环境适应能力, 能满足煤矿井下环境的应用要求^[10]。

5 结论

该文针对传统采用电化学原理的氧浓度检测传感器存在寿命短、受环境变化影响测量精度的问题, 设计基于新型长寿命无铅氧浓度检测原理, 研制了一种长寿命高精度矿用氧气浓度传感器。该传感器采用模块化设计架构, 分布式微处理器数据采集方

法,实现了多种测量数据的实时采集、补偿及数据融合解调,达到了更高的环境适应能力及氧浓度的高精度测量,传感器工作寿命较普通电化学式传感器高出 2 倍以上。试验结果表明,新型氧气传感器能够实现环境温度 $-10 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和大气压强 $50 \sim 120\text{ kPa}$ 范围内的高精度测量,且测量精度优于 2.0% ,满足了煤矿井下对氧气浓度测量长寿命工作和高精度测量的需求,构建了一套完善的煤矿井下氧浓度检测技术及装备,有效地提高隐患及灾害信息的响应速度,降低现有检测技术维护难度和使用成本,对保障矿井安全生产,减少安全事故的发生具有重要作用^[11]。

参考文献:

- [1] 顾小波,唐明军,叶军明. 煤矿安全事故原因及对策[J]. 科技与企业, 2012(5):17.
- [2] 徐鹏. 矿井通风安全事故原因分析及对策研究[J]. 山东工业技术, 2018(06):55-57.
- [3] 张学典,王业生,伍雷,等. 基于非色散红外 CO_2 浓度测量的温度补偿研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(4): 412-415.
- [4] 李忠友. 氧传感器的结构原理与检测[J]. 实用汽车技术, 2008(3):31-32.
- [5] 李学胜,卢欣春,罗孝兵,等. 荧光猝灭法溶解氧传感器的研制[J]. 自动化与仪表, 2013, 28(04):17-20.
- [6] 张广军,吕俊芳. 红外气体分析中环境影响的补偿方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1996, 22(6): 655-659.
- [7] 周冬秋,肖韶荣,肖林. 基于荧光猝灭原理的光纤溶解氧传感器研制[J]. 光学与光电技术, 2013(8):64-66.
- [8] Sipocz N, Tobiesen F A, Assadi M. The use of artificial neural network models for CO_2 capture plants[J]. Applied Energy, 2011, 88(7):2368-2376.
- [9] 杨建华,侯宏. 基于荧光猝灭原理的光学氧传感器[J]. 传感器技术, 2001, 9(20):21-24.
- [10] 杨亦睿. 基于荧光猝灭原理的溶解氧浓度传感器的研究设计[D]. 青岛:青岛理工大学, 2017:45-47.
- [11] 张远征. 基于温度自适应补偿技术的氧气传感器的研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(05): 8-11.

(上接第 7 页)

随着技术的不断进步和研究的深入,相信高声压二值逻辑电路将会在未来取得更加显著的进展,并为各种应用场景提供更好的解决方案。

参考文献:

- [1] 莫硕. “强声”——武器装备新概念[J]. 兵器, 2011(1): 18-21.
- [2] 于国栋,王春阳,张月. 陆地靶场声定位系统布站图形优化方法[J]. 声学技术, 2021, 40(2):275-281.
- [3] 侯朝焕. 声信号处理新进展[J]. 物理学进展, 1996, 16(3): 578-584.
- [4] 王云刚,宋代东,李兵兵,等. 声发射法检测输气管道泄漏的研究综述[J]. 安全与环境学报, 2024(3): 1114-1127.
- [5] 郭磊,林啸宇,王勇,等. 基于深度学习的直升机旋翼声信号检测与识别一体化算法[J]. 电子科技大学学报, 2023, 52(6):925-931.
- [6] 吴海霞,李凌宇,王天,等. 基于四值逻辑的伽罗华域 $\text{AB} + \text{C}$ 电路设计[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(1): 83-88.
- [7] 束长干. 基于麦克风阵列的室内语音定位与跟踪[D]. 北京:邮北京电大学, 2012.
- [8] 李明勇,魏爱娟,兰江. 一种高 Q 值单频水声信号放大提取电路的设计[J]. 数字海洋与水下攻防, 2018, 1(2): 76-80.
- [9] 刘晓悦,王泰达. 电气化铁路谐波抑制的无源滤波器设计[J]. 机械设计与制造, 2023(6):219-223.
- [10] 陈超,李冰,司听璐. 基于迟滞比较器的双阈值稳压供电控制电路[J]. 探测与控制学报, 2015, 37(4): 30-33.
- [11] 武佳宏,王黎明,庞存锁,等. 阵列式炸点声音定位系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2023, 23(6): 88-91.
- [12] 贾志超,赵丽,何兴霖,等. 一种基于滞回比较的过温保护电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(8): 125-128.
- [13] 林骏桥,马淑欣,王旭光. 水声传感器调理电路设计[J]. 现代电子技术, 2023, 46(24):13-18.
- [14] 方佩敏. 通用贴片式器件及应用电路(四)电压变换器 ICL7660 及 ICL7662[J]. 电子世界, 2004(4): 43-44.
- [15] 任勇峰,樊瑞瑞,贾兴中. 高声压噪声传感器的校准[J]. 电子测量技术, 2020, 43(21):182-186.
- [16] 杨晓伟,闫磊,朱刚,等. 声强测量仪高声强级校准方法研究[J]. 宇航计测技术, 2012, 32(4):43-45.