

基于顺磁特性的氧气浓度检测方法

叶继伦¹, 李晨洋¹, 郑盛坤¹, 杜凤玲¹, 宋学东¹, 张旭²

1. 深圳大学医学院生物医学工程系, 广东 深圳 518060; 2. 广东省生物医学信号检测与超声成像重点实验室、深圳市生物医学工程重点实验室, 广东 深圳 518060

【摘要】旨在对国内外目前常用的3种基于顺磁特性的氧气浓度检测系统进行综合介绍,进而展示一种新的基于顺磁法的磁压敏测量装置系统。通过研究氧气具有的强顺磁特性这一特殊的物理性质在3种不同的检测系统中检测到的物理量,比如热磁对流、压力差和密度梯度等来计算混合样气中氧气的含量。接着又对应介绍了热磁对流式、磁机械式、磁压力式3种磁氧分析系统的相关内容,通过对其原理内容、内部构造、工作机理的对比与分析,让读者对这3种分析系统有更清晰的认识,对这3种检测方法理解的更透彻,以便于更好的使用这3种方法进行氧气浓度的检测。最后对本文新提出的测量装置从组成结构、工作原理、波形显示等方面进行简单论述。

【关键词】氧气;顺磁特性;磁压力式;磁机械式;热磁对流式;新型磁压敏系统

【中图分类号】R318.6

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)03-0327-06

An oxygen concentration measurement method based on paramagnetic properties

YE Jilun¹, LI Chenyang¹, ZHENG Shengkun¹, DU Fengling¹, SONG Xuedong¹, ZHANG Xu²

1. Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Shenzhen Key Lab for Biomedical Engineering, Guangdong Key Lab for Biomedical Signal Measurements and Ultrasound Imaging, Shenzhen 518060, China

Abstract: Three commonly used oxygen concentration detection systems based on paramagnetic properties at home and abroad are introduced in this paper and an innovative magnetic pressure measurement system based on paramagnetic method is further proposed. The special physical quantities of oxygen, strong paramagnetic properties, detected by three kinds of detection systems are studied. The detected measurements, such as thermal magnetic convection, pressure difference and density gradient, are used to calculate the oxygen content in mixed gas. The information about the three kinds of analyzers, namely thermomagnetic convection type, magnetic mechanical type and magnetic pressure type, are also introduced. We compare and analyze their principle, internal structures and working mechanisms to made readers understand the three kinds of analyzers more clearly and thoroughly, so that they can choose the appropriate analyzer to detect the oxygen concentration. Finally, the composition, structure, working principle and waveform display of the proposed innovative measurement device are briefly discussed.

Keywords: oxygen; paramagnetic properties; magnetic pressure type; magnetic mechanical type; thermomagnetic convection type; innovative magnetic pressure sensitive system

前言

氧气作为人体生命活动的必须物质,它的浓度检测具有十分重要的应用价值,特别是在医学仪器中的应用,如多参数监护仪、麻醉机、新生儿育婴床等都需要氧气监测功能。随着社会生产水平与科学

技术的不断发展,对氧气浓度的检测出现了多种方法。目前检测氧气浓度的方法主要有气相色谱法、奥氏分析仪法、电化学传感器法及基于顺磁特性的方法等^[1-2]。其中顺磁特性法是比较好的一种检测方法,它是基于氧气的一种特殊的物理性质即顺磁特性来作为检测原理的,且目前该方法相关技术和产品在工农业、医学仪器行业中的应用最为广泛。该方法的主要优点是能够不间断地对氧气浓度进行在线检测,而且没有耗材,经济环保,并具有应用方便和应用成本优势等特点。国外早在1940年就开始了顺磁法检测氧气浓度的研究,经过多年的探索发展,目前国外拥有自主研发顺磁氧技术的公司主要有3

【收稿日期】2017-11-03

【基金项目】广东省科技厅重大项目(2016B010108012)

【作者简介】叶继伦,博士,教授,主要研究方向:生命信息监测方法、电生理治疗方法及应用、医疗器械设计及应用,E-mail: Yejilun@126.com

【通信作者】张旭,博士,高级工程师,主要研究方向:生命信息监测与支持、无创信号检测,E-mail: xuzhang@szu.edu.cn

家:英国仕富梅集团有限公司(SERVOMEX)、美国通用(GE)公司、德国德尔格等公司。而在国内虽然多气体监测技术近几年也有了快速的发展,但是顺磁氧浓度检测技术在国内一直处于空白状态,目前国内所有的氧气检测模块均是购买国外公司的,国内没有自主研发能力,所以导致相关产品中的氧气监测模块成本高,维护艰难,同时造成老百姓看病成本提高等问题,我国急需打破这种垄断状态^[3-4]。因此,本文旨在通过介绍顺磁法的氧气监测技术,并总结基于顺磁特性的氧气浓度测量技术及实现方式,供相关研发人员应用时参考,引导开发及应用基于顺磁特性的氧气监测技术以打破顺磁氧检测技术的国外垄断局面。

1 基于顺磁特性的氧气浓度测量方法

本文首先简述了3种顺磁特性检测氧气浓度实现方法的基本原理、内部结构和计算方法,然后对这3种实现方法所完成应用系统的使用规则进行了讨论^[3,5]。

1.1 磁压差法

1.1.1 磁压差法的原理内容 磁压差法是利用气体在磁场中的压力变化量作为参考量检测氧气浓度的一种方法,图1所示为无磁场区域与有磁场区域中氧气分子的分布状况。

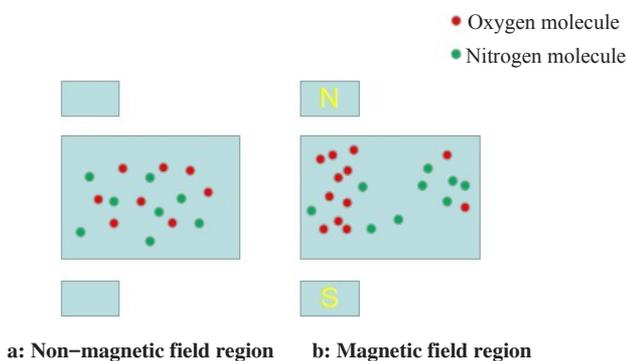


图1 无磁场与有磁场区域氧气分子分布对比

Fig.1 Comparison of oxygen molecular distribution between non-magnetic field region and magnetic field region

当样气进入磁场后,氧气分子会往磁场强度大的区域汇集,所以样气的内部压力值会发生变化,样气在磁场的不同位置会存在一定的压力差。由公式:

$$\Delta P = \frac{1}{2} U_0 H^2 (K_m - K_r) \quad (1)$$

式中, ΔP 代表样气的压差, H 代表磁场强度, U_0 代表真空磁导率, K_m 代表气体的磁化率, K_r 代表参比

气体的磁化率。可以看出,样气的压差与磁场强度的平方和样气的磁化率与参比气体的磁化率的差值成正比例关系。又由体积磁化率公式:

$$K_m = K_i C_i \quad (2)$$

式中, K_i 是样气中氧气成分的磁化率, C_i 为样气中氧气的体积分数。

联立式(1)和式(2)可得:

$$\Delta P = \frac{1}{2} U_0 H^2 (K_i C_i - K_r) \quad (3)$$

从式(3)中可以得出:混合气体中氧气的体积分数 C_i 与气体的压差 ΔP 存在线性比例关系,这一观点是磁压力式氧分析系统原理内容的核心部分^[3]。

1.1.2 磁压力式氧分析系统的工作原理 我们可以通过了解磁压力式氧分析系统的工作原理来清楚了解这种仪器的应用特性。如图2所示:参比气体从入口进入,经过左右两侧的限流装置,左右两竖直的参比气通道后进入样气室。水平通道的中间位置设有微流量传感器,由于左右两个参比气体通道是相通的,所以在开始检测时,两侧参比气体的压力是相等的, $\Delta P = 0$, 无任何信号输出。待测样气从样气室的上口进入测量腔。标注8位置是缠绕的电磁线圈,其左端与待测样气接触,当电磁线圈通电励磁时,其周围就会产生磁场,测量腔内样气中的氧气分子就会被吸引向磁场强度较大处移动,会迫使样气中的氧气分子在水平管道内从左向右运动,推动向下运动的参比气体逆时针流动。当经过微流量传感器时,有信号从电桥中输出。相反,如果电磁线圈断电去磁,右参比气通道里的气体由于没有了气阻,会顺时针流动,微流量传感器会恢复输出信号,我们反复给电磁线圈通电断电,电磁线圈反复进行励磁消磁,就可以从电桥中输出得到一组持续交流的波动信号,且波动信号的强度与样气中的氧气含量成正比。了解了该比例关系后,我们就可以通过输出的交流信号,计算出待测样气中氧气的浓度。

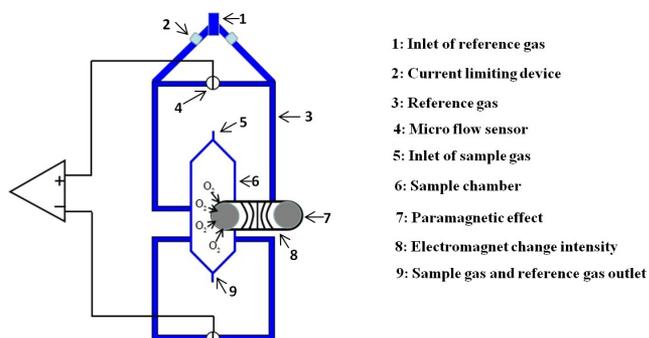


图2 磁压力式氧气分析系统

Fig.2 Magnetic pressure oxygen analyzer

1.2 磁机械法

1.2.1 磁机械法的原理内容 磁机械法与磁压差法的原理内容比较相似, 相同点是以两种含有不同氧气浓度的气体产生的压力差作为计算氧气浓度的参考量。不同点是磁机械法采用的是一种机械力学与光学结合的方法, 它由光源、反射镜、感光元件、哑铃状小球及不均匀磁场组成。气体之间的压差会迫使小球旋转, 若以张丝为参照物, 实际上是转动力矩和恢复力矩最终达到的平衡状态。经过大量实验可以得出: 在小球旋转角度较小的情况下, 即两种力矩的平衡位置偏转较小的情况下, 混合气体中的氧气浓度与小球的偏转角度成正比例关系。所以, 磁机械法的原理可以简单表述为: 通过直接实验测量小球的偏转角度, 通过比例关系, 间接计算出样气中的氧气浓度。

1.2.2 磁机械式氧分析系统的工作原理 如图3所示, 密闭的气室中, 设有磁场强度梯度相反的两对磁极块, 在两磁极块中间竖直放置一条灵敏度很高的张丝, 两个哑铃状充满氮气的小球用金属带固定于张丝上, 在小球与张丝重合处设有平面反射镜, 用来检测小球旋转角度的变化。将待测气体与参比气体通入测量气室后, 由于氧气的强顺磁特性, 当气体间挤压时, 两端的小球受力大小不相等, 就会以张丝为轴旋转。对于金属带支撑点而言, 受到的是转动力矩的作用。相反, 张丝也会产生抵抗小球旋转的复位力矩, 两个力矩最终会达到平衡状态^[6-7]。所以实验中表征样气中氧气浓度的物理量就是转动力矩与恢复力矩达到的平衡位置, 直观表现也就是小球的偏转角度。大量实验结果表明: 小球的偏转角度, 能间接反映出样气中的氧气浓度。

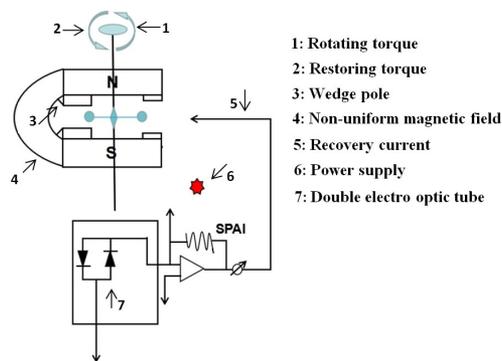


图3 磁机械式氧气分析系统

Fig.3 Magnetic mechanical oxygen analyzer

光电检测系统是将偏转角度转化为电信号输出的关键部分。调节光源的角度, 使发出的光投射到

平面反射镜上, 光到达平面反射镜后会继续反射投射到光电元件上。当样气中不含氧气时, 平面反射镜会将光均匀传递到光电元件上, 两光电元件上接收的光强相等, 因此光电组件的输出端输出为零。如果样气中含有氧气, 氧气分子会向强磁场区域汇集, 由于气体分子之间的挤压, 就会导致气体之间产生压力差, 压力差就会促使小球发生偏转。反射镜也就会随之发生偏转, 这时由反射镜反射到光学元件上的光强就不相等了, 在输出端就会有信号输出^[6]。实验结果显示: 待测样气中的氧气浓度越高, 输出端信号就会呈线性比例增大。

1.3 热磁对流法

1.3.1 热磁对流法的原理内容 氧气分子在恒定磁场中不受力, 是因为恒定磁场中磁场梯度为零^[8]。而顺磁式氧分析系统的磁场是不均匀的磁场, 因为磁极的不对称, 含有一定浓度氧气的样气在磁场中产生压力差。从微观氧气分子的角度, 相关过程表示如下:

理想气体物态方程为:

$$PV = nRT \tag{4}$$

氧气分子物质的量 n 表示为: $n = PV/RT$, 式中, R 是摩尔气体常量, T 是温度。可令一个长度微元为 dx , 设平面 A 垂直于水平轴的体积元 dv 为: $dv = A(dx)$, 由式(4)可以计算出 dv 中氧气分子的数目为:

$$n(O_2) = \left(\frac{P_{O_2}}{RT} \right) A dx \tag{5}$$

在磁场中氧气分子受到的力表示为:

$$F = KH \frac{dH}{dx} \tag{6}$$

式中, F 表示力, K 为氧气分子的磁化率, H 为磁场强度, $\frac{dH}{dx}$ 为磁场梯度, 因力 F 等于压强与面积的乘积, 压力与压差的关系可以表示为:

$$F = A[P(x + dx) - P(x)] = A \left(\frac{dP}{dx} \right) dx \tag{7}$$

结合式(5)和式(6), 计算出 n mol 氧气分子的受力为:

$$\left(\frac{P_{O_2}}{RT} \right) KH \left(\frac{dH}{dx} \right) A dx = A \left(\frac{dP}{dx} \right) dx \tag{8}$$

所以磁场中的压差可以通过积分表达式表示为:

$$\int_{P_0}^P A(dP) = \frac{KAP_{O_2}}{RT} \int_{H_0}^{H_1} H(dH) \tag{9}$$

从上述过程得出: 样气中的氧气在不均匀磁场中受到的压差与磁场强度、气室温度等均有关系。但忽略微扰因素影响后, 可以说压差的大小与样气中的氧气浓度成正比例关系。

1.3.2 热磁式氧分析系统的工作原理 如图4所示,圆型的密闭气室,气室的中间有一水平通道,通道的管壁上均匀缠有电阻丝,有两个作用:一是通电后加热样气;二是对气室内温度变化的感知反馈。电阻丝分为 r_1 、 r_2 两部分, r_1 、 r_2 与外部的定值电阻 R_1 、 R_2 连接构成测量电桥,用于检测输出信号。在水平通道的左端设有两块对称的磁极,磁场强度沿水平方向递减^[9]。待测样气从底部入口进入,沿两侧环形管道流向上端出口。当样气中不含氧气等顺磁性气体时,磁场对样气没有吸引作用,这时水平通道内没有气体通过,电阻丝 r_1 、 r_2 的热量及阻值也不会发生改

变^[10]。若样气中含有一定的氧气时,样气中的氧气流经过水平管道左端时,会被吸引进入管道且被电阻丝加热,加热后的气体与新进入的气体形成热磁对流,顺着管道流向右端后排出。当样气中的氧气被吸引进入管道后,位于左端的电阻丝 r_1 的部分热量被带走,温度下降。而流经右端 r_2 处的气体是从左端流过来的受热气体,所以 r_2 的温度没有太大变化,阻值也没有太大变化。因 r_1 处温度下降, r_2 处温度不变。 r_1 、 r_2 因温度发生了改变,阻值就会产生差异,从而电桥就会失去原有的平衡状态,输出端就会有信号输出^[11-12]。

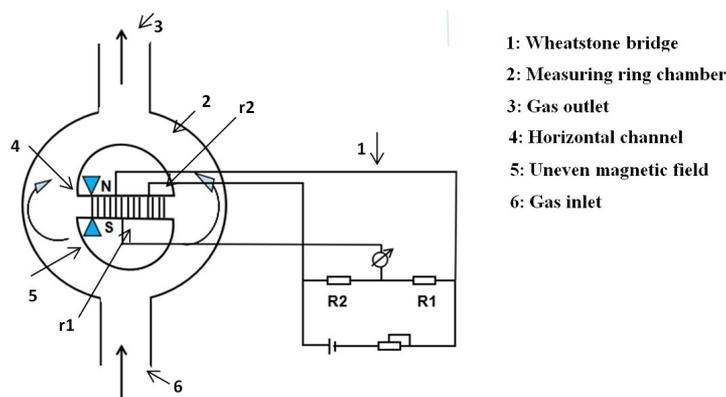


图4 热磁式氧分析系统

Fig.4 Thermomagnetic oxygen analyzer

2 3种顺磁式氧分析系统的选择及讨论

在对顺磁机械式氧分析系统试验时发现:一是系统输出信号是很微小的,只有毫伏电压级别,所以该信号还要经过反馈放大器放大后才能作为最后的信号输出;二是哑铃状小球的偏转角度越小,对最终结果造成的误差就越小,同时还能改善仪器的输出特性。可以在哑铃状小球上缠绕一周金属线圈,该线圈可以接收到反馈电流,对小球产生一个附加复位力矩,就会使小球的偏转角度大大减小,误差就会随之减少;当然在系统中固定哑铃状小球的扭矩秤制作难度极大,需要花费功夫^[13-14]。

另外,磁机械式氧分析系统与热磁式氧分析系统相比,其优点是测量过程中不会受气体导热性、密度等因素变化的影响,在氧气浓度测量范围内有线性刻度,其检测浓度范围为0~100%,测量精度高,测量误差可低至 $\pm 0.1\%$,且这种测量方法灵敏度较高,不仅可以用于常量氧的测量还经常用于微量氧的测量。但在具体采用磁机械式氧分析系统测量时也要注意一些问题,该分析系统是对氧气浓度的直接接

触测量,其他一些逆磁性气体的进入也会对测量结果造成一定干扰^[15]。因此,如果样气中存在这些干扰气体,必须提前进行清除或者对结果采取修正^[14]。待测样气的压力、系统温度的变化都会对检测结果产生一定的影响,因此在实验过程中必须稳定样气的压力且系统的温度必须稳定在规定的范围内,实验中短时间的剧烈振动及轻微的持续振动都会削弱磁场强度。因此,检测器等敏感部件都必须安装在防振装置中^[5,16]。且在设计系统内部线路时,任何电气线路不允许穿过这些敏感部分,以防电磁干扰的出现。

热磁对流式氧分析系统不仅可以在对流形式上区分为两种架构:内对流式与外对流式。产生两种测量通道:水平通道与垂直通道,且主要形成不同的测量范围,对于环形水平通道,其对气体中氧气浓度的检测范围为0~40%;而对于环形垂直通道,其检测范围较大,范围可以达到0~100%。但是在对低含量氧的样气进行测量时,垂直通道的检测灵敏度很低,甚至不能检测。所以,针对不同的氧气浓度检测时,需考虑选择不同的测量通道形式^[17-18]。

磁压力式氧分析系统则需要一路参考气体(比如:21%的空气)和一路待测气体同时进入,这时上述两路气体的输入通路对称性对于测量结果有较大的影响,且该系统的氧气浓度检测范围是0~100%。但值得注意的是:针对不同的估计测量范围,参比气体的选取是不一样的,比如:浓度范围在0~30%时参比气选择氮气;浓度范围在20%~30%时参比气体选择空气等^[5]。同时系统对在二合一的气路汇合段处的磁场也有一定的要求,在该测量系统中主要依据参考气路和待测气路在磁场区域所产生气压差与待测气体中的氧气浓度关系来进行检测,因此本测量系统具有较高的抗震动特性,但是参考气体中其他气体的顺磁特性会对该测量系统产生影响,需要采取一定的措施进行补偿和克服。

综上所述,在针对特定的氧气浓度检测应用时,要根据具体的浓度范围、具体的应用需求来选择不同的氧气实现方法所实现的分析系统^[19]。

3 新型顺磁氧监测技术及装置实现

3.1 系统组成简介

本装置系统采用了差压式氧气浓度检测方法,相比较于第1.1节中的磁压差法测量氧气浓度的装置系统,本装置在内部的复杂度以及生产工艺等方面都有很大的改进,同时在系统响应速度以及抗震动等特性方面做出了较大的改善^[20]。

系统在整体架构上是由3部分构成,分别是气路设计部分、硬件设计部分、软件设计部分(含底层驱动与信号处理过程)。其中,气路设计部分包括整个系统的气室设计及进气路和出气路的管道流向设计;硬件设计部分包括磁敏传感器及放大、数字化、单片机以及交变磁场定制及其控制等设计;软件设计部分包括磁场控制、信号采集与解调以及信号特征识别等方面。

3.2 原理方法

由居里-外斯定律的内容可以知道,具有顺磁特性物质的磁化率均与温度有关,结合第1.1节磁压差法的计算原理我们可得:

$$P - P_0 = K(P_{O_2}) \left(\frac{H_0^2}{T^2} \right) \quad (10)$$

式(10)指出,含有一定氧气成分的气体在变化的磁场中受到的压力差与磁场强度、系统温度及氧气浓度有关,且压力差的大小与氧气含量成正比例关系。根据下述的磁压敏氧气监测模型,我们可以推理得出输出信号的幅度(V)与磁场强度及温度的关系式为:

$$V = c \left[\left(\frac{P_1 + P_2}{2} - P_1 \right) - \left(\frac{P_1 + P_2}{2} - P_2 \right) \right] = c(P_2 - P_1) \quad (11)$$

式中, c 为常数, P_1 表示参比气体的氧分压, P_2 表示待测气体的氧分压^[3]。

如图5所示,在这个系统中采用差压法原理对氧气浓度进行检测计算,需用待测样气与参比气体进行对比检验。在参比气体进入气室之前先经过限流装置进行过滤,在位置5处是由图6所示电磁线圈产生的竖直方向的交变磁场。在磁场的间隙内有3段导管,但当电磁线圈通电时,由于水平方向的两路管道内气体含有的氧气含量不等,所以水平方向上的两路管道中的氧气在阶梯磁场作用下而产生压力差。这两路气体的压力差信号通过垂直管道传递到压力传感器的表面,而且与上述两路气体中氧气浓度差呈正比例关系,至此,依据参考气体的浓度值(比如大气的氧气浓度为21%)就可以检测出待测样气中氧气浓度的含量。将位置4处的混合出气口与微型抽气泵连接,它会将参考气体与待测气体的混合气体由此抽出。

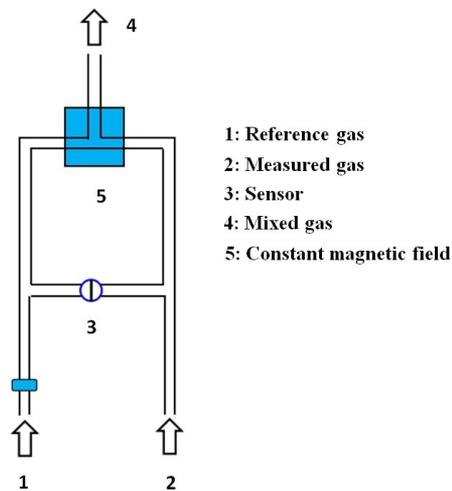


图5 基于顺磁法的磁压敏检测系统简图

Fig.5 Magnetic pressure sensitive detection system based on paramagnetic method

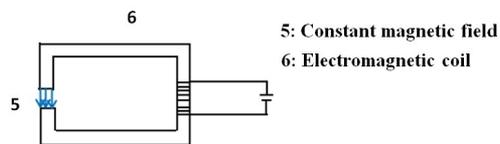


图6 变化的磁场简图

Fig.6 Diagram of a alternating electromagnetic field

3.3 本系统获得吸入呼出氧气浓度的波形显示

本装置系统结合实验室现有的比较成熟的医用二氧化碳测量技术,搭建起了顺磁氧气,远红外光谱的二氧化碳监测技术及应用研究平台,如图7所示。在上述平台上对顺磁氧监测系统进行初步的验证,其精度达到标准要求(范围:0~100%,精度:±2%),后续还在继续进行系统的改进和应用的工程化研究。



图7 氧气、二氧化碳监测平台上位机

Fig.7 Oxygen and carbon dioxide monitoring platform PC soft system

4 结束语

本文通过对热磁式、磁机械式、磁压力式3种常用的顺磁性氧分析系统的原理内容、仪器结构、工作过程、计算方法、适用原则等方面综合介绍,旨在让读者对氧气浓度检测功能的顺磁特性的不同实现方法有更清晰的认识,对利用顺磁特性去检测氧气浓度的原理与应用等有更深刻的体会,最后部分简单介绍初步提出实现的一种基于顺磁法的压敏测量装置,利用交变磁场和输入参考气体的方式,初步实现了氧气浓度的测量,进一步的应用还需要深入的系统及工程化研究^[21-22]。

随着相关新型传感器、电子技术与集成系统的快速发展,实现微型化的顺磁特性的氧气浓度检测技术及应用将会更加有利于相关工业和医学仪器的系统氧气监测性能改善和扩展,同时也将促进基于顺磁特性的氧气浓度检测技术及应用的国产化,打破国外公司对该项检测技术的垄断,使顺磁氧气浓度检测应用在国内更加普及。

【参考文献】

[1] 欧振兴. 浅谈氧气的检测方法[J]. 广东化工, 2013, 40(13): 187.
OU Z X. Discussion on the detection method of oxygen [J]. Guangdong Chemical Industry, 2013, 40(13): 187.

[2] 欧振兴. 顺磁式氧分析仪的检测原理和应用[J]. 广东化工, 2013, 40(14): 158.
OU Z X. Detection principle and applications of paramagnetic oxygen analyzer[J]. Guangdong Chemical Industry, 2013, 40(14): 158.

[3] 郑盛坤. 基于顺磁特性的氧气浓度测量系统的研制[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
ZHENG S K. Development of oxygen concentration measurement system based on paramagnetic characteristics [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017.

[4] 吴梦一, 李春瑛, 张丽娟, 等. 我国气体氧分析仪的研究现状[J]. 现代科学仪器, 2009(2): 146-151.
WU M Y, LI C Y, ZHANG L J, et al. Current development of gas oxygen analyzers in China [J]. Modern Scientific Instruments, 2009(2): 146-151.

[5] SHUK P. Process zirconia oxygen analyzer-state of art Zirkondioxid-sauerstoffsensoren-stand der technik: tm-technisches messen plattform für methoden, systeme und anwendungen der messtechnik [J]. Plattform Für Methoden Systeme Und Anwendungen Der Messtechnik, 2010, 77(1): 19-23.

[6] WILLMS J R, DOWLING A N, DONG Z M, et al. The simultaneous measurement of low rates of CO₂ and O₂ exchange in biological systems[J]. Anal Biochem, 1997, 254(2): 272-282.

[7] SYMPOSIUM A I. Proceedings of the 38th annual ISA analysis division symposium [M]. United States: Instrument Society of America, 1993.

[8] 李春瑛. 顺磁式氧分析仪计量标准不确定度的评定[J]. 低温与特气, 2006, 24(2): 39-40.
LI C Y. Uncertainty of measurement evaluation for paramagnetic oxygen analyzer[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2006, 24(2): 39-40.

[9] 翁小平. 磁力机械式氧分析仪预处理系统的改进[J]. 自动化仪表, 2006, 27(12): 46-48.
WENG X P. The improvement of pre-treatment system of magneto-dynamic oxygen analyzer [J]. Process Automation Instrumentation, 2006, 27(12): 46-48.

[10] PALOHEIMO M. Oxygen monitoring in respiratory gas [M]. Japan: Springer, 1992: 7-13.

[11] 秦媛. 磁力机械式和激光气体分析仪的应用[J]. 自动化应用, 2010(11): 69-71.
QIN Y. Application of magnetic mechanical and laser gas analyzer [J]. Automation Application, 2010(11): 69-71.

[12] DUNST K, JASINSKI G, JASINSKI P. Potentiometric oxygen sensor with solid state reference electrode [J]. Metrol Meas Syst, 2014, 21(2): 205-216.

[13] MILLIS A. Optical oxygen sensors: utilising the luminescence of platinum metals complexes [J]. Platin Met Rev, 1997, 41(3): 115-127.

[14] 张旭, 宋学东, 叶继伦, 等. 旁流呼气末二氧化碳测量在临床全身麻醉手术中有效性评估[J]. 生物医学工程与临床, 2015, 19(5): 449-454.
ZHANG X, SONG X D, YE J L, et al. Evaluation of EtCO₂ measurement validity for general anesthesia surgery [J]. BME & Clin Med, 2015, 19(5): 449-454.

[15] RAMANOORTHY R, DUTTA P K, AKBAR S A. Oxygen sensors: materials, methods, designs and applications [J]. J Mater Sci, 2003, 38(21): 4271-4282.

[16] 姚素薇, 郭萌. 氧传感器的研究与应用[J]. 传感器世界, 2004, 10(3): 12-15.
YAO S W, GUO M. The research and application of oxygen sensor [J]. Sensor World, 2004, 10(3): 12-15.

[17] 汪峻, 姚斐. 氧分析仪在微量氧分析中的应用[J]. 计测技术, 2005, 25(5): 3-6.
WANG J, YAO P. Application of oxygen analyzer in trace oxygen analysis [J]. Metrology & Measurement Technology, 2005, 25(5): 3-6.

[18] 张晓燕. 热磁式氧浓度传感器的磁流体动力学特性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
ZHANG X Y. The study of the magneto-hydrodynamic characteristics of thermal magnetic type oxygen sensor [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.

[19] VONDERSCHMIDT S, MÜLLER J. A novel micro paramagnetic oxygen sensor [C]// International Conference on MICRO Electro Mechanical Systems. IEEE, 2010: 903-906.

[20] 钱江蓉, 陈丛, 许磊, 等. 一种新型热导式氧气浓度测量方法[J]. 电子与封装, 2016, 16(3): 45-47.
QIAN J R, CHEN C, XU L, et al. A new type thermal method for oxygen concentration measurement [J]. Electronics & Packaging, 2016, 16(3): 45-47.

[21] YANG J C, SPIRIG J V, KARWEIK D, et al. Compact electrochemical bifunctional NOx/O₂ sensor with metal/metal oxide internal reference electrode for high temperature applications [J]. Sensor Actuat B-Chem, 2008, 131(2): 448-454.

[22] SPIRIG J V, RAMAMOORTHY R, AKBAR S A, et al. High temperature zirconia oxygen sensor with sealed metal/metal oxide internal reference [J]. Sensor Actuat B-Chem, 2007, 124(1): 192-201.

(编辑: 陈丽霞)