

文章编号 1004-924X(2007)05-0761-06

# 磁动式氧含量分析仪的研制

魏茂金,赖森财,黄思俞,张武威,刘德功  
(三明学院 物理与机电工程系,福建 三明 365004)

**摘要:**对磁动式测氧仪的测量池、光路和数据采集系统进行了研究。从气体磁性推导出了哑铃球在非均匀梯度磁场中受到的转动力矩公式,给出测量池系统的设计方案,采用镀银刻蚀方案实现哑铃球系统的转动阻尼,分析了非均匀梯度磁场系统的技术要求。介绍线阵 CCD 光点位置探测光路和 CCD 数据采集与处理电路系统。为满足仪器定标、温度补偿和校正的需要,设置了五个功能按键,列表说明其功能。给出了仪器的校正方案和检测数据。实验结果表明:仪器在不同的温度点测量精度均可达 0.2% 以上,仪器的温度补偿性能、精度和稳定性达到了设计要求。

**关键词:**磁动式;氧含量分析仪;线阵 CCD;校正

**中图分类号:**TM936.4;TH83 **文献标识码:**A

## A oxygen content magnetomotive analyzer

WEI Mao-jin, LAI Sen-cai, HUAN Si-yu, ZHANG Wu-wei, LIU De-gong

*(Department of Physics and Electromechanical Engineering,  
Sanming University, Sanming 365004, China)*

**Abstract:** Research is done on the measuring cell, light path and data acquisition system of a magnetomotive oxygen measuring instrument. Base on the magnetic performance of gas, the moment of rotation of a dumbbell is derived when it is in a nonuniform magnetic field. A design of the measuring cell is proposed, a rotary resistance for the dumbbell ball is implemented by a silver-coated erosion approach, and the technique requirements are analyzed for the nonuniform gradient magnetic field. The light path and the CCD data acquisition system are introduced. To meet the requirements for instrumental scaling, temperature compensation and correction, five functional keys are set up, and their function are explained by list. The correction programme of the instrument and test data is given later on. Experiments results show that the precision of the instrument is above 0.2% at different temperature, the performance of temperature compensation, the precision and stability of the instrument satisfy the design requirements.

**Key words:** magnetomotive; oxygen conten analyser; linear array CCD; correction

收稿日期:2006-08-26;修订日期:2007-04-16.

基金项目:福建省科技厅高新技术项目(No. 2005H072);福建省三明市科技项目(No. 2004-G-6)

## 1 引言

氧含量分析仪是目前工业生产自动控制中应用较多的在线分析仪表<sup>[1,2]</sup>,主要用来分析混合气体中的含氧量。如监视燃烧过程,通过分析烟道气体剩余氧含量,以控制燃料与空气的最佳比例,保证燃烧效率等。

磁动式氧含量分析仪以气体磁性为原理,属于磁力机械式、光、机、电结合的一种仪器。磁动式测量气体的含氧量与化学法相比,具有响应速度快、测量范围宽、能适时在线测量等优点。与热磁风、氧化锆等其他物理方法相比<sup>[3]</sup>,具有基本不受混合气体中非测量组份变化的影响,不受背景气体导热率、热容的干扰,反应速度快,稳定性好等优点,是一种理想的氧含量测量设备。CCD 磁动式测氧仪利用了氧气是顺磁性物质,且磁化率远大于其它气体的物理特性,以充氮铂丝哑铃球悬挂在非均匀磁场中构成测量池,作为测量气体氧气含量的传感部件,用线阵 CCD 接收信号<sup>[4]</sup>,由单片机系统处理并显示结果。本文将从气体磁性出发,分析磁动式测量气体中氧含量的基本原理,全面阐述磁动式测氧仪的测量池系统、光路系统和 CCD 数据处理系统的实现方案,分析仪器的校正要求与方法,并通过实验测试仪器的性能。

## 2 磁动式测量气体中氧含量的基本原理

氧气是顺磁性物质,它的体积磁化率在 20 °C 时为  $k = 106.2 \times 10^{-5}$ ;氮气是抗磁性物质,在 20 °C 时体积磁化率为  $k = -0.34 \times 10^{-5}$ ;各种常见气体中只有 O<sub>2</sub> 的磁化率最大,除了 NO、NO<sub>2</sub> 外,其它各种气体的体积磁化率与氧气的体积磁化率相比,其值甚小,可以忽略不计<sup>[5]</sup>。彼此不进行化学反应的混合气体的磁化率由下式求得:

$$k_{\text{混}} = \sum_{i=1}^N n_i k_i = n_{\text{O}_2} k_{\text{O}_2} + (1 - n_{\text{O}_2}) k_{\text{非O}_2}, \quad (1)$$

式中  $n_i$  为第  $i$  种气体的百分含量,  $k_i$  为第  $i$  种气体的体积磁化率,  $n_{\text{O}_2}$  为氧在混合气体的百分含量,  $k_{\text{O}_2}$  为氧气的体积磁化率,  $k_{\text{非O}_2}$  为混合气体中非氧气体的平均体积磁化率。

由于氧气的磁化率远比其他气体的高,上式中第二项值是微不足道的,可以忽略不计,因此,混合气体的体积磁化率主要由氧气的体积磁化率及其百分含量所决定,只要能测出混合气体的体积磁化率  $k_{\text{混}}$ ,就可以求出混合气体中氧气的百分含量。利用氧的顺磁性且磁化率显著高于其它气体的物理特性,可以有效地分析它在混合气体中的含量。

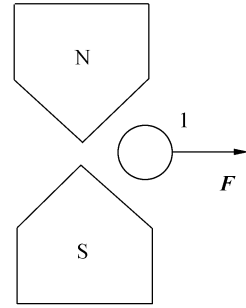


图 1 磁场中球体

Fig. 1 Sphere in magnetic field

如图 1 一小球置于不均匀磁场中,球体受到的磁场力  $F$  为

$$F = \frac{\partial W}{\partial x}$$

式中  $W$  为球体在磁场中所取得的能量。

令,磁场强度为  $H$ ,其梯度为  $\frac{\partial H}{\partial x}$ 。

若球体的磁导率为  $\mu_p$ ,球体的体积为  $V_p$ ,球体周围的磁场中充满了介质,其磁导率为  $\mu$ ,则利用  $W = \frac{1}{2} \int_0^{V_p} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dV$ <sup>[6]</sup> 可求得

$$W = \frac{1}{2} \int_0^{V_p} (\mu_p - \mu) \mathbf{H}^2 dV_p, \quad (1)$$

根据  $F = \frac{\partial W}{\partial x}$ ,可以推出球体在磁场中所受的吸引力或排斥力为

$$F_M = (k_p - k) \mu_0 \int_0^{V_p} \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} dV, \quad (2)$$

若将一对充氮气的哑铃球用铂丝悬挂在非均匀磁场中,则它所受到的力矩为

$$L_M = 2R_p (k_p - k) \mu_0 \int_0^{V_p} \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} dV, \quad (3)$$

若沿  $x$  方向的磁场强度梯度为一常数,即  $\frac{dH}{dx} = C$ ,则有

$$F_M = (k_p - k)\mu_0 CHV_P, \quad (4)$$

$$L_M = 2(k_p - k)\mu_0 CHV_P R_P. \quad (5)$$

以上各式中  $k_p$  为球体的磁化率,  $k$  为球体周围介质磁化率,  $V_P$  为球体的体积,  $R_P$  为铂丝到哑铃球中心的距离。

在哑铃球作角位移时,悬丝会产生一个复位力矩以平衡  $L_M$ ,被测气体的氧含量不同,  $L_M$ 、复位力矩和小球的平衡位置也不同,即哑铃球扭转的角度  $\varphi$  不同,这样转角  $\varphi$  也就反映了氧气含量的多少。

### 3 磁动式测氧仪系统的研制

磁动式氧分析仪主要由测量池和光信号探测处理系统组成。测量池是以氧气的顺磁性,氮气的抗磁性为原理,制成测定氧含量的传感部件;光信号探测采用线阵型 CCD。

#### 3.1 测量池系统

磁动式测氧仪中测量池系统,正是利用一对充氮哑铃球在非均匀磁场中受到转动力矩的原理,如图 2 为测量池的结构图。其中测量室盖板和支柱均应选择无磁性且热膨胀系数小的不锈钢材料。玻璃管是为了防止测量室漏气,其进出光窗口应采用光洁度良好的光学玻璃,以避免玻璃管壁厚不均匀形成光的衍射现象,使反射光斑前后沿对称。让一束光射向小镜,小镜的反射光束随哑铃球的扭转而改变方向,在固定点用线阵 CCD 探测反射光斑的位置<sup>[7]</sup>,线阵 CCD 的光点位置将随测量池内气体氧含量情况不同而改变。

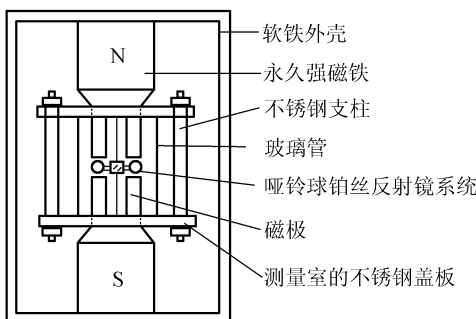


图 2 测量池结构

Fig. 2 Structure of measuring cell

为使哑铃球在尽短时间内转到正确位置,应在球体上安装阻尼线圈或镀银导电金属膜层,以

便在磁场中形成合适的转动阻尼。为了减小气流对哑铃球系统的影响,保证哑铃球系统转动稳定,并考虑到安装工艺方便,本文采用在哑铃球镀银刻蚀 3-4 圈导电薄膜环的方案<sup>[8]</sup>。经实验,此方案转动阻尼效果良好,哑铃球系统在 3~5 s 即可达到稳定。

充氮哑铃球系统必须在梯度非均匀磁场中才会受到转动力矩作用。非均匀磁场的梯度变化,可通过设计适当的磁极角度实现<sup>[9]</sup>。磁极简图如图 3 所示。其设计的基本技术要求是:

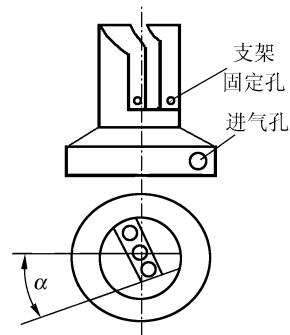


图 3 磁极

Fig. 3 Magnetic pole

(1)磁尖脊角度越小,磁场变化梯度越大,磁尖脊形状的设计应使两磁极间隙所产生的磁场在横向尽可能呈线性变化,保证哑铃球系统的旋转角度随氧气的百分含量基本呈线性关系,提高仪器数据处理精度。

(2)磁极的设计应方便安装哑铃球铂丝反射镜系统的支架,并使充氮小球靠近磁极尖脊,小球所处位置的磁场尽可能大。因此,图 3 中  $\alpha$  的值是很重要的,可根据小球的大小及间距计算。

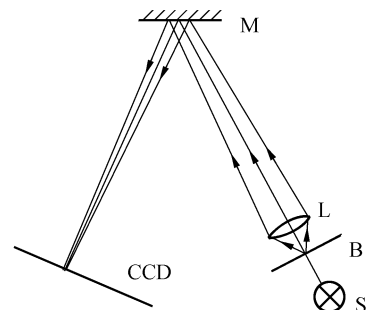


图 4 光路系统

Fig. 4 Light path system

令小球直径  $d = 3.4 \text{ mm}$ , 两小球间距  $R_p = 7.2 \text{ mm}$ , 则

$$\alpha = \frac{d/2}{R_p/2} = \frac{3.4}{7.2} = 0.472 \text{ rad} \approx 27^\circ, \text{一般可选择 } \alpha = 27 \sim 30^\circ.$$

### 3.2 光路系统

如图 4 为磁动式氧分析仪的光路系统, 其中 M 为测量池中小反射镜, 光源 S 采用高亮度发光二极管, L 为凸透镜, CCD 为线阵型(电荷耦合器件, TCD1500C), B 为狭缝。光源 S 发出的光线经透镜后聚焦于线阵 CCD 上。测量池密封室不同含氧量环境时, 充氮哑铃球、铂丝和小反射镜系统的偏转角度不同, 光源发出的光线经测量池小反射镜的反射光束随之转向, 通过探测线阵 CCD 接收到光点位置, 即可确定气体中的含氧量。

在光路系统的设计中加入狭缝 B 是为了保证投射到 CCD 上的光斑边缘整齐陡峭, 有利于提高仪器的精度。

### 3.3 CCD 数据采集电路系统

如图 5 所示为 CCD 数据采集和处理电路框

图。线阵 CCD (电荷耦合器件, TCD1500C) 装置由 EPM7064S 产生驱动信号, CCD 检测到的位置信号经运放电路放大、整形为方波信号触发 EPM7064, 它向 CPU 申请中断并送出数据。8052 接收数据, 并进行相应处理将结果由 LED 显示出来。在电路设计中, 必须考虑仪器定标和温度补偿的功能。为此, 设计了五个功能按键, 即功能设置键 (FUN), 设置存储按键 (SET), 输入数据增、减按键 (+ 和 -), 校正键。其功能说明如表 1。

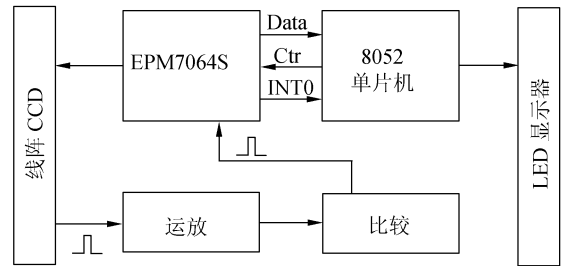


图 5 CCD 数据采集处理电路框图

Fig. 5 Electric circuit scheme of CCD data collecting and processing

表 1 功能按键说明

Tab. 1 Function keys

按键	功能说明	按键	功能说明	按键	功能说明
F-00	显示前沿像点值	F-07	显示 F-02—F-06 值, 间隔 3 s	F-10—F-17	0.0 °C
F-01	显示后沿像点值	F-08	数据表温度间隔与校零点	F-18—F-1F	7.0 °C
F-02	前沿平均值	F-09	4.8% 0030H	F-20—F-27	14.0 °C
F-03	后沿平均值	F-0A	8.8% 0058H	F-28—F-2F	21.0 °C
F-04	前后沿平均值	F-0B	13.0% 0082H	F-30—F-37	28.0 °C
F-05	温度点 $T_1$	F-0C	20.8% 00D0H	F-38—F-3F	35.0 °C
F-06	温度点 $T_2$	F-0D	46.4% 01CEH	F-40—F-47	42.0 °C
FUN	功能切换	F-0E	73.2% 02DCH		
SET	存储	F-0F	99.5% 03E3H		

## 4 仪器的校正与实验检测

### 4.1 仪器的校正方案

由于磁动式测氧仪采用了磁力机械结构, 仪器经一段时期使用, 测量池、光源、永久磁铁的磁性、电路的参数等性能均可能产生一定的变化, 因此, 对仪器的数据进行校零调整是提高仪器精度

必不可少的环节。通过对磁动式测氧仪的定期观测, 实验数据表明: 经过一段时期(如两周时间), 即使温度点相同, 各种氧含量下 CCD 像点和仪器的读数均存在一定的漂移, 读数约变化 0.2% 左右。根据各氧含量下 CCD 像点变化值基本相同的特点, 本文提出采用曲线平移方案对仪器进行分区校正处理。所谓曲线平移方案, 即对每种测量气体的 CCD 像元读数都增加或减小一个相

同的修正值,从而实现了对象元值随氧含量变化曲线的平移。所谓分区校正,即根据待测量气体的氧含量值所处区域,选择相应的校正气体。通常若待测气体含氧量为 0.0%—50.0%时,选用高纯氮作为校正气体;若待测气体含氧量为 50.0%—100.0%时,则选用高纯氧作为校正气体。

#### 4.2 实验检测

将所研制的磁动式氧含量分析仪放入恒温控制箱内,调节温控装置使测氧仪达到所需的不同温度点,先将已知含氧量的标准气体输入测氧仪,对测氧仪进行校正。其具体方法是:将已知含氧量的标准气体作为校正气体输入测氧仪,观测数据,按校正按键后,通过调节“+”或“-”按键,对测氧仪进行校正,并将校正值进行存储(按 SET 确认)。

对仪器校正后分别送入氧气含量为 0.0%, 5.0%, 10.0%, 50.0%, 99.5% 的标准气体,读取各情况仪器测量示值,测量数据对比如表 2 所示,表中温度为测氧仪内测温装置所读取的温度值。

比较表 2 各测量值与对应的标准氧含量值,得出在不同温度环境下仪器的精度均可达 0.2% 以上。

#### 参考文献:

- [1] 王仁旺. 在线氧含量分析仪选型与使用[J]. 化工自动化及仪表, 2004, 31(2): 73-75.  
WANTG R W. The choose model and use of on-line analyzer of oxygen conten[J]. *Contr. Instrum. Chem. Indus.*, 2004, 31(2): 73-75. (in Chinese)
- [2] 林日亿, 王弥康, 辛福义. 注汽锅炉烟气氧含量分析控制[J]. 节能, 2003, 10: 23-25.  
LIN R Y, WANG M, XIN F Y. Analysis and control on oxygen content in fluegas of steam injection boiler[J]. *Energy Conservation*, 2003, 10: 23-25. (in Chinese)
- [3] 刷二华. 氧含量的测量与预处理系统的应用[J]. 工业计量, 2002, 12(3): 42-44.  
JU E H. The apply of oxygen content survey and pretreatment system[J]. *Industrial Measurement*, 2002, 12(3): 42-44. (in Chinese)
- [4] 邵德奇, 王伟. 线阵 CCD 测量技术及其在马钢连轧坯测量中的应用[J]. 光学精密工程 1999, 7(1): 130-134.  
SHAO D Q, WANG W. Line array CCD measure technology and application in continuous roolled base measure of maanshan iron and steel corp[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7 (1): 130-134. (in Chinese)
- [5] Xilu222. 氧量分析仪[EB/OL]. 中国气体分离设备商务网——技术论文, 2004. 12. 4.  
Analyser of oxygen conten[EB/OL]. *www.cngspw.com/jishu/ViewContent.asp, Xilu222. China Gases Separation Specialization Website—Technological Thesis*, 2004. 12. 4
- [6] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.  
ZHAO K H, CHEN X M. *Electromagnetics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1985. (in Chinese)
- [7] 万峰, 范世福. 以 c8051F020 为核心的 CCD 驱动与采集系统设计[J]. 光学精密工程, 2005, 13(增): 179-182.  
WAN F, FAN SH F. Development of driving and sampling circuit for CCD based on c8051F020[J]. *Opt. Precision*

表 2 磁动式测氧仪测量值与标准值

Tab. 2 Measured values of magnetomotive oxygen content detector and standard values

标准氧含量(%)	5.0	10.0	20.9	50.0	95.0
测	8.3℃	5.0	10.0	20.9	49.8
量	13.5℃	5.0	10.0	20.8	49.9
值	25.8℃	5.0	10.1	20.9	50.0
(%)	30.0℃	5.1	10.0	21.0	50.1

## 5 结 论

磁动式氧含量分析仪的研制, 利用一对充氮哑铃球在非均匀梯度磁场中受到转动力矩的原理, 设计了磁动式氧含量分析仪的测量池系统; 采用镀膜刻蚀方案实现充氮哑铃球的电磁阻尼, 具有良好的效果; 用 CCD 装置测量哑铃球的微小转角, 由单片机处理数据, 电路设计的五个功能按键, 方便了仪器的定标和温度补偿; 采用曲线平移方案对仪器进行分区校正, 进一步提高了仪器的测量精度。实验结果证明: 仪器性能稳定, 具有良好的温度补偿特性和精度, 测量精度为 0.2% 以上。

*Eng.*, 2005, 13 (supp. ):179-182. (in Chinese)

- [8] 巴音贺希格,高键翔,齐向东.机械刻划长焦距凹面金属光栅的研制[J].*光学精密工程*,2006,14(3):391-395.  
BAYIN H G,GAO J X,QI X D. Manufacturing for ruling concave metal grating with a long focal length[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (3): 391-395. (in Chinese)
- [9] 杨杰伟,吴一辉,贾宏光.轴向磁化永磁微电机磁场分析及设计方法研究[J].*光学精密工程*,2006,14(1):83-88.  
YANG J W,WU Y H,JIA H G,*et al.*. Design method and magnetic field analysis of axial-magnetized permanent magnet micromotor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (1): 83-88. (in Chinese)

作者简介:魏茂金(1964—),福建人,理学士,副教授,主要从事光学与精密仪器方面的研究。E-mail: smxywmj@126.com