

光声法气体检测系统的高精度气压控制解决方案

High Precision Air Pressure Control Solution of Photoacoustic Gas Detection System

摘要：光声池内气体压力的可调节控制以及稳定性是保证光声法高精度测量的关键，但在目前的光声和光谱研究中，对气体样品池内压力控制技术的报道极为简单，甚至很多都是错误的，根本无法实现高精度调节和控制，为此本文提出了可工程化实现的解决方案。基于动态平衡法控制介绍，解决方案采用了高精度真空计、气体流量计、电动针阀和双通道真空压力控制器等，可实现气体样品池的进气流量和真空压力的自动精密控制，并适用于多种气体。

1. 问题的提出

光声法是基于光声效应的一种光谱技术，气体分子吸收特定波长的调制光辐射能量，由振动基态跃迁到激发态，然后通过快速的辐射跃迁或者无辐射跃迁过程回到基态。气体分子通过无辐射跃迁过程回到基态会产生热能，导致气体温度的变化，相应地引起气体压强的变化，从而产生声波信号，信号的强弱与入射光强和气体吸收大小成正比，检测声音信号即可间接测定气体浓度。在光声法中气体既是被检气体，又是吸收光辐射的探测器，利用同一光声池检测装置，只要改变光源的波长即可对多种气体进行检测。

随着技术的发展出现了许多新型光声光谱检测技术，但光声池始终是所有光声光谱检测仪器中的核心部件，注入光声池内的被检气体压力是影响光声法测量精度的关键因素之一，主要体现在以下两个方面：

- (1) 气体压力的稳定性对测量精度的影响[1,2]。
- (2) 不同气体和浓度的光声法测量过程中，在一个最佳气体压力下时测量精度最高[3]。

由此可见，光声池内气体压力的可调节控制以及稳定性是保证光声法高精度测量的关键，而在光声池压力控制的所有文献报道中，有些仅简单描述了压力控制基本原理，有些所描述的压力控制方法和装置根本无法实现高精度调节和控制。

如文献[3]采用石英增强光声和光热光谱技术测量痕量一氧化碳气体含量的报道中，仅介绍了光声池进样气体方式和压力控制的原理，整个装置和压力控制结构的简单描述如图1所示，图中所示的光声池压力控制尽管包括了真空泵、针阀、压力传感器和压力控制系统（PCS），但压力控制系统的布置位置并不一定正确，既没有明确具体技术细节，也没有显示出压力控制的自动化能力和控制精度能达到什么水平。同样，许多其他光声法测试技术的研究报道也多是如此简单介绍，并未看到光声池压力控制的详细文献报道。

在河北大学的发明专利CN111595786B“基于光声效应的气体检测系统及方法”中提出了一种详细的光声池内部压力控制方法[4]，其结构如图2所示。

在图2所示的光声池压力控制系统中，光声池上设有供气体进入的进气口，进气口通过导管与-30℃的冷阱预浓缩装置相连通，可以去除待测气体中水分的干扰，达到一定的浓缩效果。在光声池上还设有供气体排出的出气口、控制腔体内气压的压力监测口以及压力控制口。在进气口、出气口和压力控制口处均设有单向阀，在出气口和压力控制口处均设有真空泵。在压力监测口设有气体压力传感器，气体压力传感器连接单片机，单片机控制继电器以及一个抽气系统，当腔体内的气压未达到所设置的目标值时，压力传感器传出电信号到控制系统中的单片机来控制继电器闭合，使电机转动，抽气系统运行，保持腔内部的气压值为设定好的目标值，当腔内的气压达到设定目标值时该抽气系统不工作。

由此可见，尽管专利[4]中采用了单片机进行压力的自动控制，但所描述的抽气系统控制是一种最简单的开关式控制方式，这种控制方式在控制精度的稳定性很差，往往会使光声池内的实际压力在设定值上下出现较大波动现象。

另外，这种开关模式在控制过程中存在很大的滞后性，当传感器测量到压力值大于或小于设定值时才发出关闭或启动抽气电机信号，这势必带来控制延迟。而且对于小容积内的气压控制，目前已很少采用调节真空泵转速或开关式真空泵技术，这是因为会很容易影响真空泵寿命。

为了彻底解决光声光谱和光热光谱技术中气体样品池的压力精密控制问题，基于真空压力控制的动态平衡法，即通过自动调节气体样品池的进气和排气流量，使它们能快速达到动态平衡状态，本文将提出以下详细且可工程化实现的解决方案。

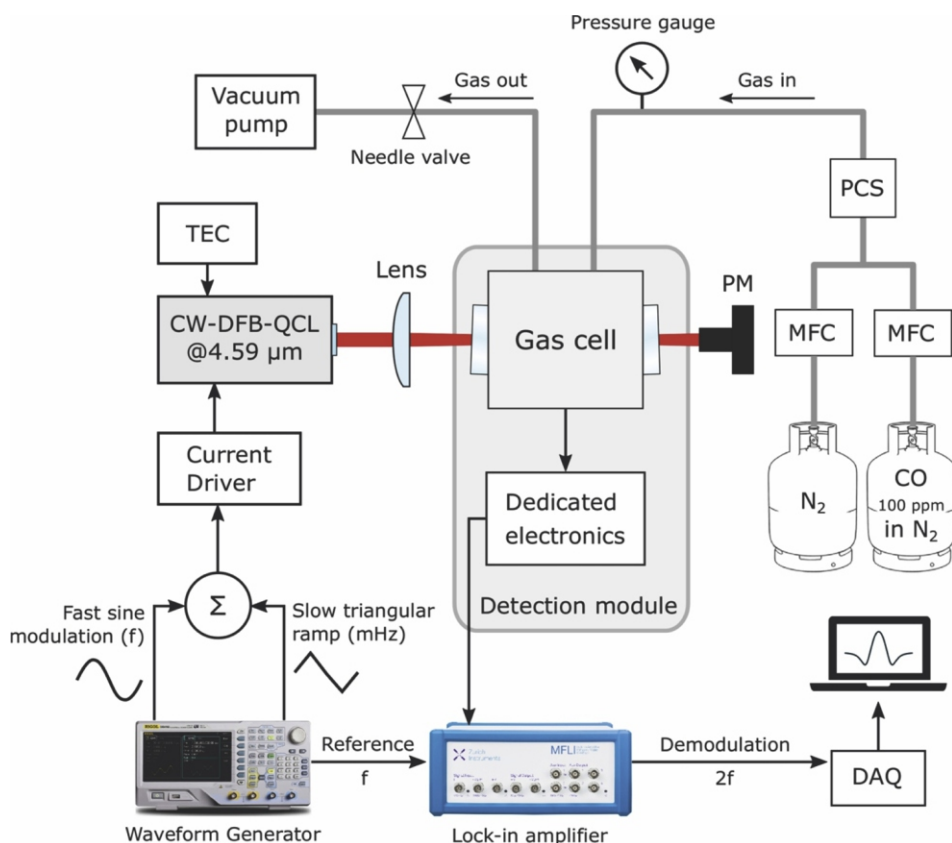


图1 文献[3]光声和光热谱检测系统结构示意图

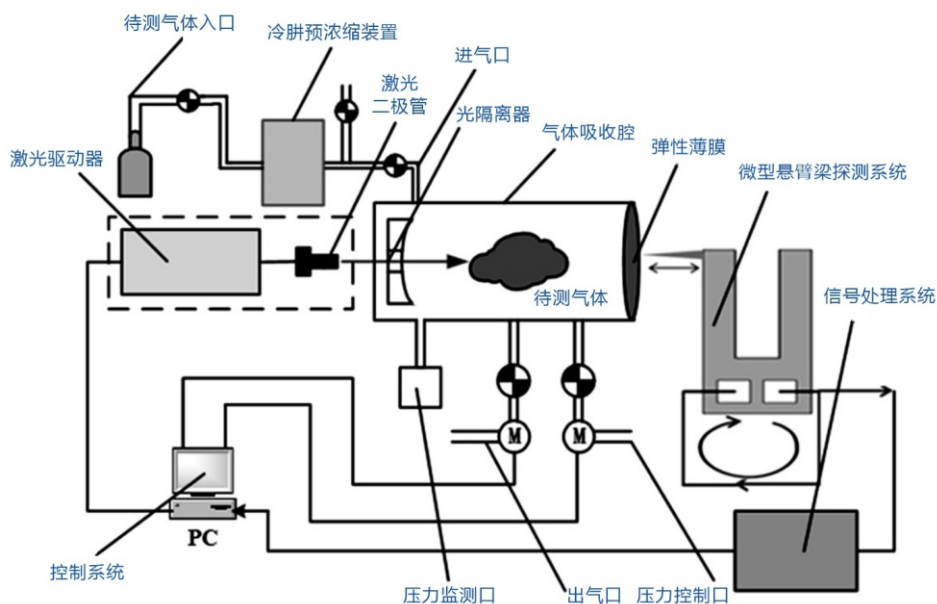


图2 专利[4]基于光声效应检测系统的结构示意图

2. 解决方案

从研究文献所报道的光声光热法气体池内压力控制中，可以得出以下几项技术指标要求：

(1) 气体池有一进气口和排气后，其中排气口连接真空泵，真空泵提供负压使样品气体通过进气口流入样品池，样品池的这种结构和气体取样方式则说明样品池内的压力一般应该是一个大气压上下的微负压或微正压，即样品池内的气体压力在500~1000Torr的绝对压力范围内，且要小于进气口压力。

(2) 在文献[3]中报道了对最佳压力的测试研究，得到的最佳压力为600Torr。由此可见，针对不同气体的光声和光热法测试中，需要根据不同气体样品池的结构和具体被测气体寻找到最佳压力值，由此可保证最佳的测试精度。

(3) 在文献[2,3]中，涉及到了多种气体混合和进气流量的控制，由此可说明在某些光声和光热法测试中需要具备对进气流量的调节，这也就是说，对于气体样品池而言，既要能调节进气流量，还要能调节气体压力且稳定控制。

针对光声光谱和光热光谱技术中气体样品池的压力精密控制问题，特别是实现上述技术指标和功能，本解决方案所设计的气体样品池压力和进气流量控制系统结构如图3所示。

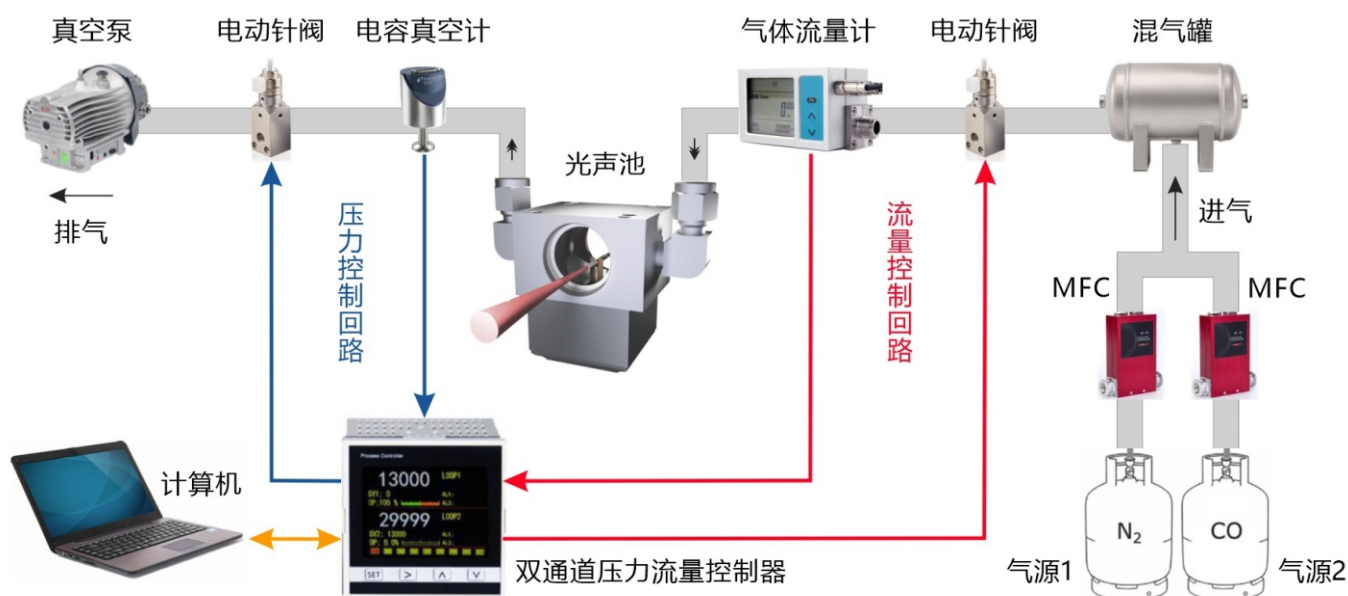


图3 光声池气体压力和进气流量控制系统结构示意图

如图3所示，整个控制系统主要包含以下几方面的内容：

(1) 压力控制模式：由于光声池内的压力需要在500~1000Torr的绝对压力范围进行调节和控制，因此解决方案中采用了动态平衡法中的下游控制模式，即恒定进气流量，通过调节排气流量的大小以达到不同的动态平衡，由此来实现不同气体压力的精密控制。进气形式如图3所示可以是单独一种气体，也可以是多种气体混合，各种气体可以通过气体质量流量控制器（MFC）进行流量的精密控制，各路气体进入一个混气罐进行混合后，再注入光声池内。气体的注入则通过排气端真空泵所提供的负压与进气端正压所形成的压力差来实现。

(2) 压力控制回路：如图3中的蓝色箭头线所示，压力控制回路由1000Torr量程的电容真空计、NCNV-20型电动针阀和VPC2021-2型压力流量控制器组成，其中真空计检测光声池的真空压力并传输给控制器，控制器将传感器数据与压力设定值比较并经过PID计算，输出控制信号给排气电动针阀，实现压力自动恒定控制。

(3) 流量控制回路：如图3中的红色箭头线所示，流量控制回路由气体流量计、NCNV-120电动针阀和VPC2021-2型压力流量控制器组成，其中控制器通过手动控制方式直接输出控制信号来调节进气电动针阀的开度，使得流量计达到希望值，由此可始终恒定进气流量保持不变。

由此可见，通过图3所示的解决方案控制系统可实现光声池压力和进气流量的独立调节和控制，这种实现的关键部件是电控针阀和双通道压力流量控制器，电控针阀可以快速精密的调节进气和排气流量，而双通道压力流量控制器可直接连接真空计和流量计，实现高精度的真空压力和流量的测量，控制精度能小于读数的 $\pm 1\%$ ，同时还能进行自动PID控制和手动恒定输出控制。

3. 总结

综上所述，本解决方案对现有文献所报道的光声池压力控制方法进行了细化，比较而言，本文所提出的解决方案具有以下优势和特点：

(1) 本解决方案更具有实用性，并经过了试验考核，按照解决方案可很快的搭建起光声池压力控制系统。

(2) 本解决方案具有很强的适用性和可拓展性，如通过改变其中的相关部件参数指标就可适用于不同范围的真空压力，可满足光声法和光热法中对样品池气体压力的各种控制要求。

(3) 本解决方案可以通过高压气源的改变来实现不同样品气体的测量，也可进行多种气体混合后的测试，具有很大的灵活性。

(4) 解决方案中的真空压力控制自带计算机软件，可直接通过计算机的软件界面操作进行整个控制系统的调试和运行，且控制过程中的各种过程参数变化曲线自动存储，这样就无需再进行任何的控制软件编写即可很快搭建起控制系统，极大方便了光谱设备的搭建和测试研究。

4. 参考文献

[1] 陈伟根,刘冰洁,胡金星,等.微弱气体光声光谱监测光声信号影响因素分析[J].重庆大学学报:自然科学版, 2011(2):7-13.

[2] 张佳薇,谈志强,李明宝,等.气体流量对石英增强型光声光谱检测精度的影响[J].科学技术与工程, 2022(003):022.

[3] Pinto D , Moser H , Waclawek J P ,et al.Parts-per-billion detection of carbon monoxide: A comparison between quartz-enhanced photoacoustic and photothermal spectroscopy[J].Photoacoustics, 2021, 22:100244.DOI:10.1016/j.pacs.2021.100244.

[4] 娄存广,刘秀玲,王鑫,等.基于光声效应的气体检测系统及方法: CN202010511763.8[P]. CN111595786B[2023-11-10].