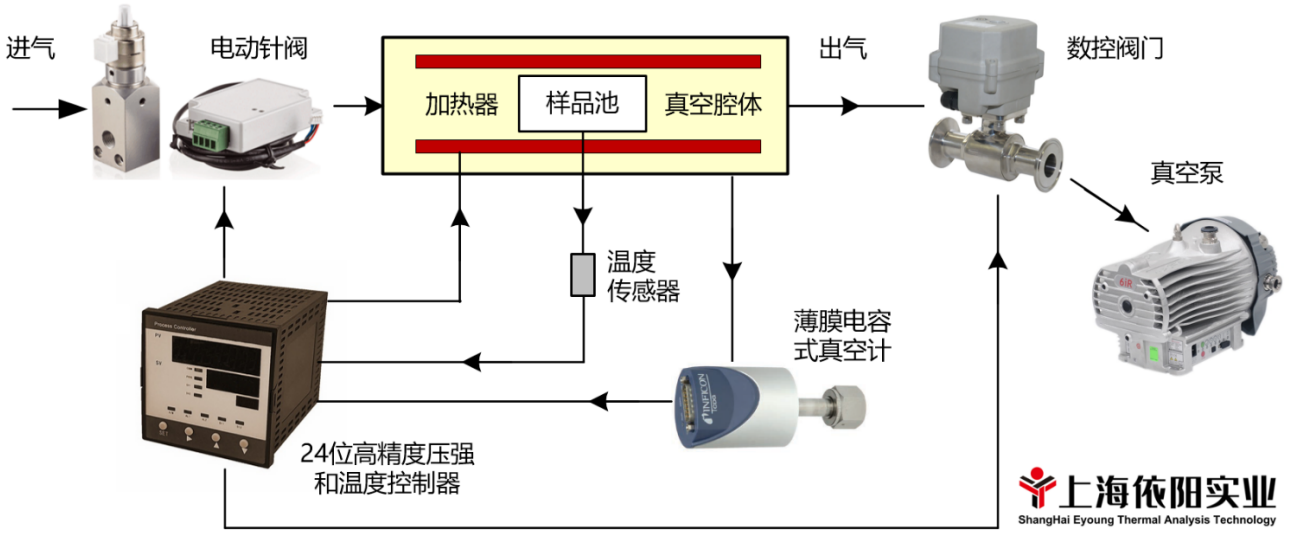
真空压力控制：
Application Note 07

上海依阳实业
ShangHai Eyoung Thermal Analysis Technology

光谱仪测量中真空压力和温度测控的整体方案

The Overall Scheme of Vacuum Pressure and Temperature Measurement and Control in Spectrometer Measurement



上海依阳实业有限公司

www.eyoungindustry.com

摘要：光谱测量和光谱仪是检测监测中的重要技术手段，为了得到满意的测量精度，光谱仪要求配套高精度的压强和温度传感器、执行机构和 PID 控制器，并需具有适用范围广、精度高、易集成和成本低的特点。本文将针对光谱仪压强和温度控制的特点，结合上海依阳公司的创新性产品，给出高精度和高性价比的光谱测量和光谱仪温压测控方案。

1. 问题的提出

光谱测量作为定性、定量的科学分析方法，以其测量精度高、响应速度快的优势成为各种检测监测研究中的重要技术手段，但在实际应用中样品气体的压强和温度变化会对测量结果产生严重的影响，以下是光谱测量中的温压控制方面国内外所做的一些研究工作以及所表现出来的影响特征：

（1）压强控制范围

不同的光谱测量和光谱仪对压强控制范围有着各自不同的要求，如使用气体吸收池的红外光谱仪，吸收峰的强度可以通过调整试样气体的压强（或压力）来达到，一般压强范围为 0.5~60kPa。在采用可调谐二极管激光吸收光谱（TDLAS）技术测量大气中二氧化碳浓度时，就需要 6~101kPa 范围内的稳定压强。在 X 射线光谱分析仪检测器内压强的精确控制中，要使得工作气体的密度稳定来保证检测器的测量精度，一般压强控制在一个大气压附近或者更高，而激光诱导击穿光谱仪的工作压强最大可达 275kPa。由此可见，光谱仪内工作气体的压强控制范围比较宽泛，一般在 0.1~300kPa 范围内，这基本覆盖了从真空负压到 3 倍大气压的 4 个数量级的压强范围。

（2）压强控制精度

在光谱测试中，观察到的谱线强度与真实气体浓度之间的关系取决于气体样品的压强，所以压强控制精度直接决定了光谱测量精度。如美国 Picarro 公司的光谱分析仪中的压强控制精度±0.0005 大气压（波动率±0.05%@1 大气压）。文献[1]报道了设定压强为 6.67kPa 时对吸收池进行控制，经过连续四小时控制，压强波动为±3.2Pa，波动率为±0.047%。文献[2]报道了样品池内气体压强同样被控制在 6.67kPa 时压强长期波动幅度为 7Pa，波动率为±0.047%。文献[3]报道了激光红外多通池压强控制系统的稳定性测量，目标压强设定为 60Torr，在 150~200s 时间内最大波动为±0.04Torr，波动率为±0.067%。文献[4]专门报道了光谱测量仪器的高精度温压控制系统的设计研究，目标压强值为 18.665kPa，42 小时的

恒压控制，最大偏差为 5.33Pa，波动率为±0.014%。文献[5]介绍了 X 射线光谱仪中探测器的恒压控制结果，在工作气体恒压在 940hPa 过程中，波动小于±2hPa，波动率为±2%。文献[6]介绍了 X 射线光电光谱仪在 0.05~30mbar 压强范围内的恒压控制技术，在设定值为 0.1mbar 时，恒定精度可达±0.001mbar，波动率为±1%。

（3）温度控制精度

在光谱测试中，谱线强度与真实气体浓度之间的关系还取决于气体样品的温度稳定性，而且温度的稳定性同时也会影响压强的稳定性。文献[2]报道了样品池内气体温度控制在室温（24℃）时，温度短期波动为±0.01℃，长期温漂为±0.025℃，波动率为±0.1%。文献[4]报道的光谱测量仪器的高精度温度控制系统中，温度控制在 45℃，42 小时内的温度波动为±0.0015℃，波动率小于±0.004%。

综上所述，由于样品气体的压强和温度变化是影响测量结果的主要因素，所以在光谱测量以及各种光谱仪中，对样品气体的压强和温度调节及控制有以下几方面的要求：

（1）压强控制范围非常宽泛（0.1~300kPa），但相应的测量和控制精度则要求很高，这就对压强测量传感器、控制阀、真空泵和相应的控制器提出了很高的要求，并且这闭环控制系统中的四个组件必须相互匹配，否则很难得到满意的结果。

（2）同样，在温度的高精度控制过程中，也应选择合适的温度传感器、加热装置、电源和控制器，并在温度闭环控制系统中四者也必须相互匹配。

（3）在压强和温度这两个闭环控制系统中，都会用到高精度控制器，为了降低实验成本和光谱仪造价，希望能用一个具有 2 路同时 PID 自动控制功能的高精度控制器。

（4）针对不同的光谱测量和光谱仪，其测试结构并不相同，这就要求温压控制系统中的各个部件具有独立性，由此有利于测试装置和光谱仪结构和合理布局和集成。

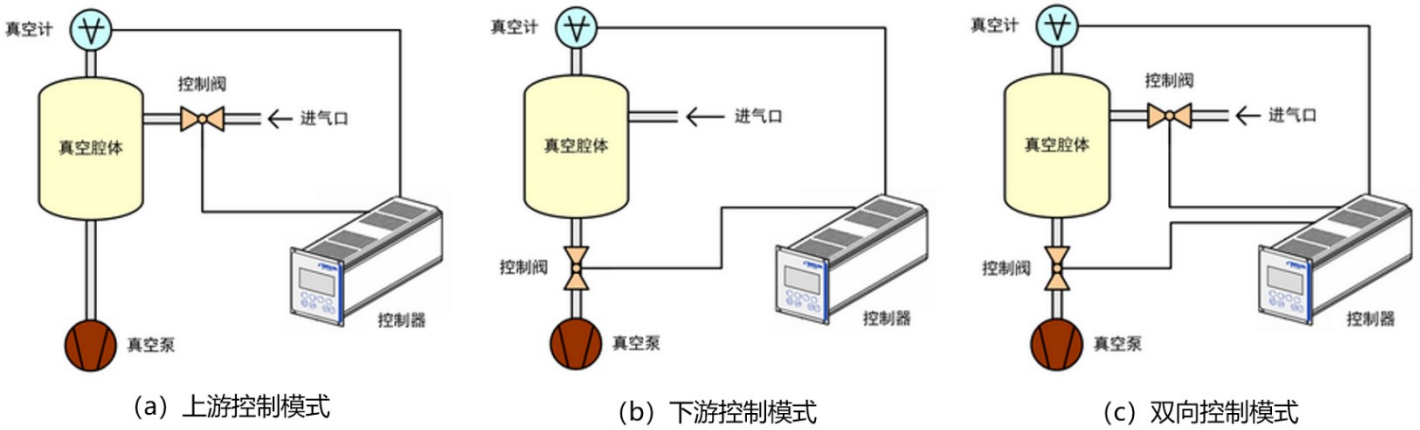
总之，为了得到光谱测量的满意精度，要求配套高精度的压强和温度传感器、执行机构和 PID 控制器，并具有适用范围广、精度高、易集成和成本低的特点。本文将针对这些特点，结合上海依阳公司的创新性产品，给出高精度和高性价比的光谱测量和光谱仪温压测控方案。

2. 光谱仪压强和温度一体化测控方案

2.1. 控制模式设计

（1）压强控制模式

针对光谱仪上述的压强测控范围（0.1~300kPa），最佳方案是针对具体使用的压强范围选择相应的测控模式，如图 2-1 所示，针对低压范围建议采用上游控制模式，针对高压范围建议采用下游测控模式，也可以采用上下游同时控制的双向控制模式。



（a）上游控制模式　　（b）下游控制模式　　（c）双向控制模式

图 2-1 压强控制的三种模式

针对低压采用上游控制模式，可以重复发挥真空泵的抽速，使得真空腔体内的压强可以快速准确的实现恒定控制。针对高压（如 1 个大气压左右）采用下游控制模式，可以有效控制真空泵的抽速，使得真空腔体内的压强可以快速准确的实现恒定控制，同时还避免了进气口处的样品气体和其他工作气体的流量太大。

如果对进气流量和腔体压强有严格规定并都需要准确控制，则需要采用双向控制模式，双向控制模式可以在某一恒定压强下控制不同的进气流量，但双向控制模式需要控制器具有双向控制功能，这对控制器提出了更高的能力要求。以上三种控制模式的特点更详细介绍，请参考文献[7]。

（2）温度控制模式

同样，温度测控模式也要根据不同的温度范围和控温精度要求进行选择，如在室温附近且控温精度较高的情况下，则需要具有加热和制冷功能的双向控制模式，只有这种模式才能保证足够高的控温精度。如果在高温范围内，也建议采用双向控制方式，即以加热为

主同时辅助一定的冷却补偿，以提高控温精度和快速的温度稳定。

2.2. 传感器的选配

传感器的精度是保证压强和温度测控准确的关键，因此传感器的选择尤为重要。

对于上述范围的压强控制，强烈建议采用目前精度最高的薄膜电容真空计[8]，这种真空计的测量精度可以达到其读数的 0.2%，全量程内具有很好的线性度，非常便于连接控制器进行线性控制，并具有很高的分辨率和很小的温漂。在实际选型中，需要根据不同的压强范围选择合适量程的真空计，如对于上述 0.1~300kPa 的压强范围，可以选择 2Torr 和 1000Torr 两种规格的真空计，由此对相应压强量程实现准确的覆盖。

对于温度控制而言，当温度不高的范围内，强烈建议测量精度最高的热敏电阻温度传感器，较高温度时也建议采用高温型的热敏电阻或铂电阻温度传感器。如果加热温度超过了热敏电阻和铂电阻传感器的使用范围，则建议采用热电偶型温度传感器。这些温度传感器在使用前都需要进行计量校准。

2.3. 执行机构的选配

压强控制执行机构是决定能否实现高稳定性恒定控制的关键。如图 2-2 所示，强烈建议采用线性度和磁滞小的步进电机驱动的电动针阀，不建议采用磁滞和控制误差都较大的比例电磁阀。电动针阀可以布置在进气口和出气口处，也可以根据上游或下游控制模式的选择布置一个电动针阀。如果光谱仪的真空腔体庞大，电动针阀就需要更换为口径和流速更大的电控阀门，以便更快的实现压强恒定控制。详细指标可参见文献[8,9]。

图 2-2 小流量电动针阀和大流量电动阀门

温度控制的执行机构建议采用具有帕尔贴效应的半导体热电片，这种热电片具有加热制冷双向工作模式，配合高精度的热敏电阻和控制器可以实现超高精度的温度控制，非常适合光谱仪小工作腔室的控温。

如果光谱仪工作腔室较大且温度在 300℃一下，建议采用具有加热制冷功能的外排式循环浴进行加热，这种循环浴同样具有加热制冷功能，可达到较高的控温精度。

如果光谱仪工作在更高温度，则建议采用电阻丝或光加热方式，同时配备一定的通风冷却装置以提高加热的热响应速度，从而保证温控的稳定性和速度。

2.4. 控制器的选配

控制器是实现高精度和高稳定性压强和温度测控的最终保障。在压强控制设计中，控制器需要根据所选真空计和执行机构进行选配，选配的详细介绍可参见文献[10]。根据文献的计算可得认为，如果要保证压强测控的精度，必须采用至少 16 位以上的 A/D 模数采集器。同样，温度测控的精度保证也是由模数采集器的位数决定。因此，对于光谱仪中压强和温度的控制，建议采用了目前上海依阳实业有限公司开发的精度和性价比最高，并结合了 PID 参数控制功能的 24 位 A/D 采集的控制器，详细内容可参见文献[11]。

按照上述的选型，最终压强和温度的测控方案如图 2-3 所示。

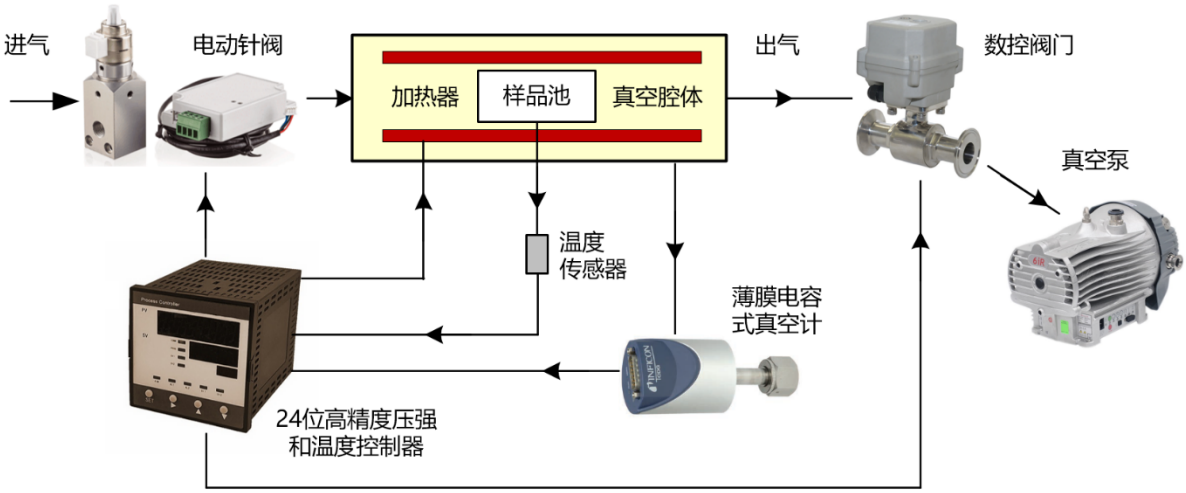


图 2-3 光谱仪压强和温度测控方案示意图

特别需要指出的是，上述的压强和温度控制，基本都采用了双向控制模式，而我们所开发的这款高精度控制器恰恰具有这个功能。另外，在光谱仪实际应用中，压强和温度需要同时进行控制，可以采用两台控制器分别进行控制，但相应的光谱仪整体体积增大、操

作变得繁复并增加成本。而目前所建议使用的高精度控制器则是一台双通道的 PID 控制器，两个通道可以独立同时进行不同 PID 参数的控制和 PID 参数自整定，并且每个通道都具有双向控制功能，这有效简化了控制器并降低了仪器尺寸和成本。

3. 总结

综上所述，通过对光谱测量和光谱仪的压强和温度测控要求的分析，确定了详细的温压测控技术方案，并详细介绍了方案确定的依据以及相应所选部件的技术参数指标。

整个技术方案完全能满足光谱测量和光谱仪对压强和温度测控的要求，并具有测控精度高、功能强大、适用范围广、易集成和成本低的特点。除了薄膜电容真空计为进口产品之外（也可选国产真空计），方案中的所有选择部件和仪表都为国产制造。

4. 参考文献

（1）牛明生，王贵师．基于可调谐二极管激光技术利用小波去噪在 2.008μm 波段对 $\delta^{13}CO2$ 的研究[J]．物理学报, 2017(02):136-144.

(2) 孙明国，马宏亮，刘强,等．参数主动控制的痕量气体实时在线测量系统[J]．光学学报, 2018, v.38；No.434(05):344-350.

(3) 许绘香，孔国利．采用 Ziegler-Nichols-PID 算法的激光红外多通池压强控制系统研制[J]．红外与激光工程, 2020(9).

(4) 周心禹，董洋，王坤阳,等．用于光谱测量仪器的高精度温压控制系统设计[J]．量子电子学报, 2020, v.37;No.194(03):14-20.

（5）Elvira V H， Roteta M , A Fernández-Sotillo, et al. Design and optimization of a proportional counter for the absolute determination of low-energy x-ray emission rates[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(10):103304.

（6）Kerherve G， Regoutz A， D Bentley, et al. Laboratory-based high pressure X-ray photoelectron spectroscopy: A novel and flexible reaction cell approach[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(3):033102.

（7）上海依阳实业有限公司，“真空度（气压）控制：上游模式和下游模式的特点以及新技术 “，知乎：https://zhuanlan.zhihu.com/p/341861844.

（8）上海依阳实业有限公司，“真空压力控制装置：电动针阀（电控针型阀）”：http://www.eyoungindustry.com/2021/621/29.html.

（9）上海依阳实业有限公司，“微波等离子体化学气相沉积（MPCVD）系统中真空压力控制装置的国产化替代”，知乎：https://zhuanlan.zhihu.com/p/377943078.

（10）上海依阳实业有限公司，“彻底讲清如何在真空系统中实现压力和真空度的准确测量和控制”，知乎：https://zhuanlan.zhihu.com/p/343942420.

（11）上海依阳实业有限公司，“高精度可编程真空压力控制器（压强控制器和温度控制器）”：http://www.eyoungindustry.com/2021/618/28.html.