

采用泊肃叶压力衰减法代替塞规 进行高精度孔径测量的解决方案

The Solution of Using Poiseuille Pressure Decay Method to Replace Plug Gauge for High Precision Aperture Measurement

摘要：针对现有压力衰减法孔径测量中存在的基本概念不清和实施方式不明确等问题，本文详细介绍了压力衰减法的孔径测量基本原理，并重点介绍压差法测量中的高精度压力控制方法，为各种微小孔径和等效孔径的准确测量提供切实可行的解决方案。

1. 问题的提出

在工业生产和实验室研究中存在着大量管件内部孔径的测量需求，而且还要求具有较高的测量精度，常见的需要精密测量的几类孔径有：

- (1) 毛细管内径。
- (2) 鲁尔接头或其他连接器母接头孔径。
- (3) 各种喷灯气孔孔径。
- (4) 栓环缝通道等效孔径。
- (5) 药用玻璃瓶或药品包装系统漏孔孔径。

通道孔径主要分为直接测量方法和间接测量方法。直接测量主要是通过精密的尺规等工具进行测量，如游标卡尺、圆锥尺、针规和塞规等，但直接测量方法并不适应于细长管和针栓环缝通道等的孔径或等效通径的测量。

间接测量法主要有光学法和流体标定法。光学法一般是利用像素为基本单位对各种形状的孔进行测量，适用于元件表面孔和裂纹的测量。但对于细长或者弯曲多变的孔径，光学法不适用。流体标定方法是一种基于压力衰减法的有效等效通径标定方法，流体介质多以气体和液体为主，通过流量计和压力传感器分别测量流体流量和压力差。但在目前的压力衰减法中普遍存在以下几方面的问题：

(1) 在低于和高于一个标准大气压的负压和正压条件下，都可以采用压力衰减法进行孔径测量，但绝大多数文献和专利报道对此并没有明确的规定，正负压测试条件的使用显着非常随意和混乱。

(2) 压力衰减法的核心是在被测孔径管道的两侧形成恒定压力差，并同时测量由此压差引起的流量变化，其中的恒定压力控制是建立试验条件和影响测量精度的最重要因素。对于精确的压力控制在各种文献和专利报道中很少看到，大多报道只是给出一个不完整的压力衰减法测试框图，对精确的压力控制以生成高精度的恒定压差还未见报道。

针对上述现有压力衰减法孔径测量中存在的问题，本文将详细介绍压力衰减法孔径测量的基本原理，重点介绍压差法测量中的高精度压力控制方法，为种微小孔径和等效孔径的准确测量提供切实可行的解决方案。

2. 压力衰减法基本原理——泊肃叶定律

在恒定压差条件下，在粗细均匀的水平刚性圆管中作层流流动的黏性流体，其体积流量满足如图1所示的泊肃叶 (Poiseuille) 公式。

从泊肃叶公式中可以看出，体积流量与管孔半径的四次方成正比，孔径微小的变化都会对流量产生明显的影响。这就是压力衰减法孔径测量的依据，孔径的微小改变都会引起流量的显著变化，因此压力衰减法在孔径测量中具有很高的灵敏度，但前提是一要准确控制管道两端的压力，二是要准确测量体积流量。

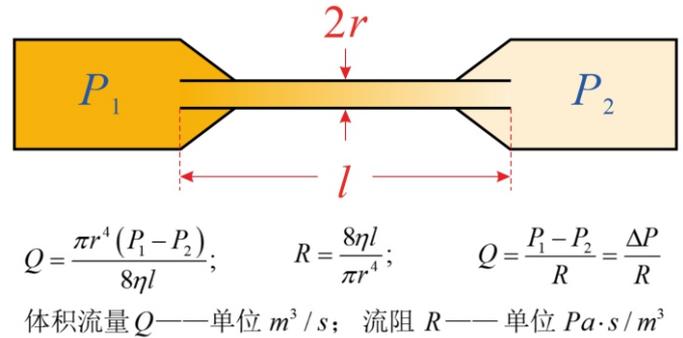


图1 流体介质的泊肃叶定律

3. 孔径测量解决方案

依据泊肃叶定律，孔径测量的关键是实现准确的压力控制和流量测量。为此，本文针对高精度孔径测量提出的解决方案如图2所示。

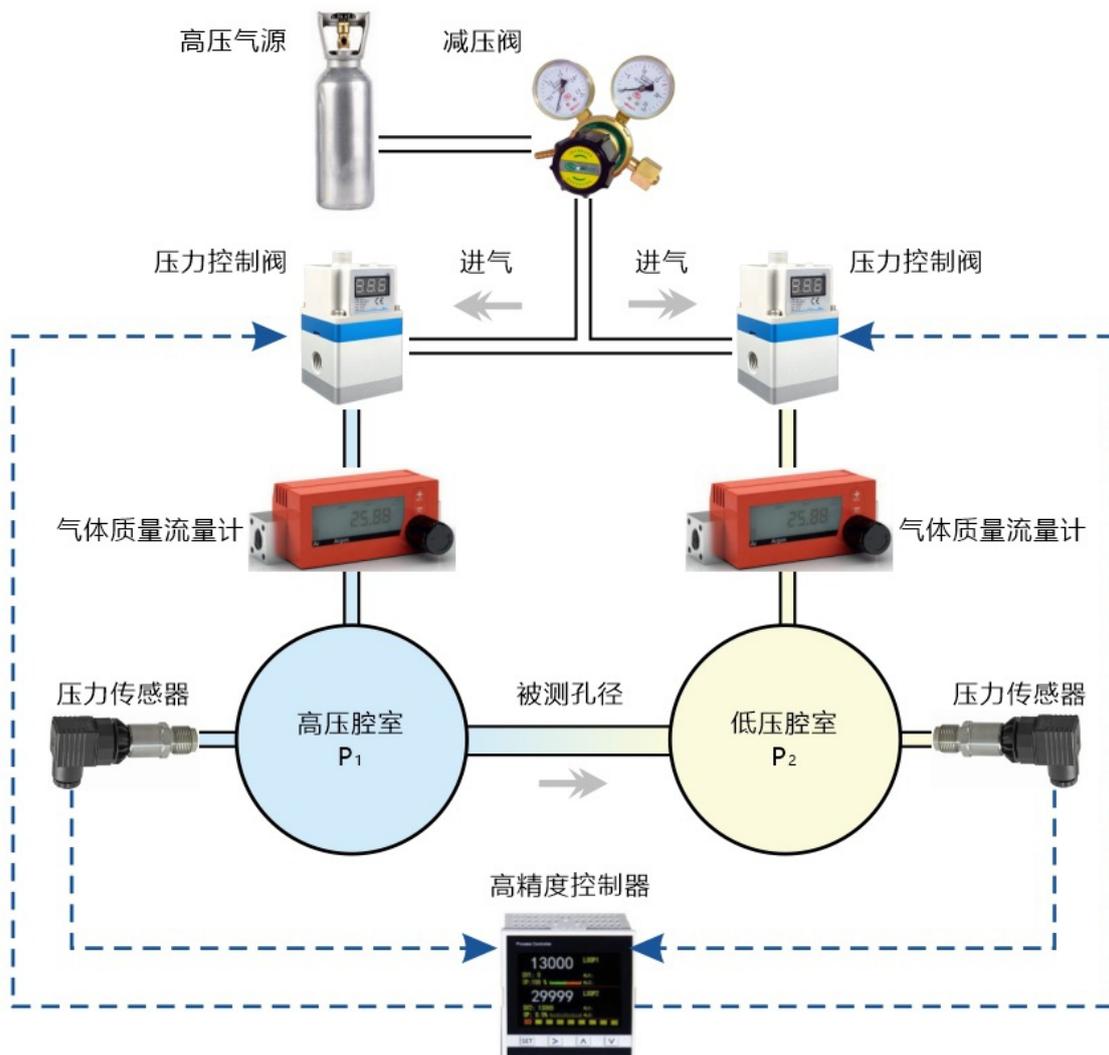


图2 压力衰减法孔径测量装置结构示意图

如图2所示，被测孔径管件安装在两个压力腔室之间，整个装置的目的是精确控制这两个腔室的压力以形成稳定的压力差，在压力差稳定的装置下测量流进和留出两个腔室的气体流量，从而可计算得到被测孔径大小。

此孔径测量装置涉及以下几方面的主要内容：

(1) 此孔径测量装置采用了正压压力控制方案，这主要是因为正压控制同样可以达到很高的精度，而且，相对于负压真空环境下的测量和控制造价较低。正压控制过程中，采用纯净的高压气瓶和减压阀提供稳定的高压气源，高压气源同时供给两个压力控制阀以实现不同的正压压力控制。

(2) 由于要测量进出两个腔室的气体流量，需要在两个腔室的进气口和出气口处分别安装气体质量流量计进行流量测量，因此压力控制阀无法直接对两个腔室的压力直接控制。为此，解决方案采用了串级控制方式，即在两个腔室上分别增加压力传感器，通过双通道PID压力控制器采集压力传感器信号，并两个通道分别设定不同的压力值，由此来驱动压力控制阀进行双回路的压力控制，由此实现两个腔室内的压力准确稳定在设定值上。

(3) 压力控制阀是一个自带PID控制板和压力传感器的闭环压力控制装置，通过接收双通道PID压力控制器的控制信号，可以使压力控制阀出口处的压力准确恒定。压力控制阀自带泄压放气孔，由此两个压力控制阀组成的压差控制回路可使气体单向流过被测孔径管件。

(4) 此解决方案中的孔径测量装置是一个对称装置，这种对称结构设计的目的是可以对被测孔径管件进行双向测试，这也是一种提高孔径测量精度的途径之一。

(5) 压力控制器采用的是双通道高精度PID控制器，AD精度为24位，DA精度为16位，两个通道独立运行，可满足各种孔径精度测量中的压力控制需要。

(6) 整个孔径测量装置的测量精度，除了受压力控制器精度影响之外，还会受到压力控制阀、压力传感器和气体质量流量计精度的影响，因此要针对不同的孔径测量精度要求选择合适精度的部件。

(7) 由于此孔径测量装置是直接控制两个腔室的压力，所以在室温下运行时腔室温度的波动对压力变化没有影响，腔室压力控制会自动会消除掉温度影响而保持腔室气压恒定。

(8) 为了实现数据的自动采集和计算孔径测量结果，双通道压力控制器和两个气体质量流量计需要与计算机通讯连接（图2中并未绘出）。由此，通过计算机可设定控制压力，采集压力和流量变化曲线以监控压力和流量是否稳定，当达到稳态状态后可通过压力和流量采集数据并依据泊肃叶公式计算得到孔径测量值。

4. 总结

综上所述，本文所提出的基于压力衰减法的孔径测量解决方案，具有很高的测量精度和广泛的适用性，整个测量过程自动运行，关键是可以满足多种形式的微小孔径测量，在替代传统塞规的前提下，是一种高精度的无损测量解决方案。特别是采用气体作为流体介质，非常适合微小尺寸（如毛细管等）和漏孔的等效口径测量。