

用于微流控芯片的多通道正负压力控制器解决方案

Multi-Channel Positive and Negative Pressure Controller Solutions for Microfluidic Chips

摘要：在微流控芯片进样、化学反应进样和长时间药物注射领域，都需要能提供正负气压可精密控制的压力控制器。本文特别针对微流控芯片进样对多通道压力控制器的技术要求，提出了相应的解决方案，并详细介绍了方案中多通道气路结构、控制方法、气体流量调节阀、压力传感器和PID控制器等内容和技术指标。通过此解决方案，完全能够满足各种微流体控制对多通道压力控制器的要求。

一、背景介绍

在微流控芯片进样、化学反应进样和长时间药物注射领域，都需要能提供正负气压可精密控制的多通道压力控制器，并且通过气体压力来控制流体的流量或流速。图1所示为这种压力控制器在微流控芯片进样中的典型应用。

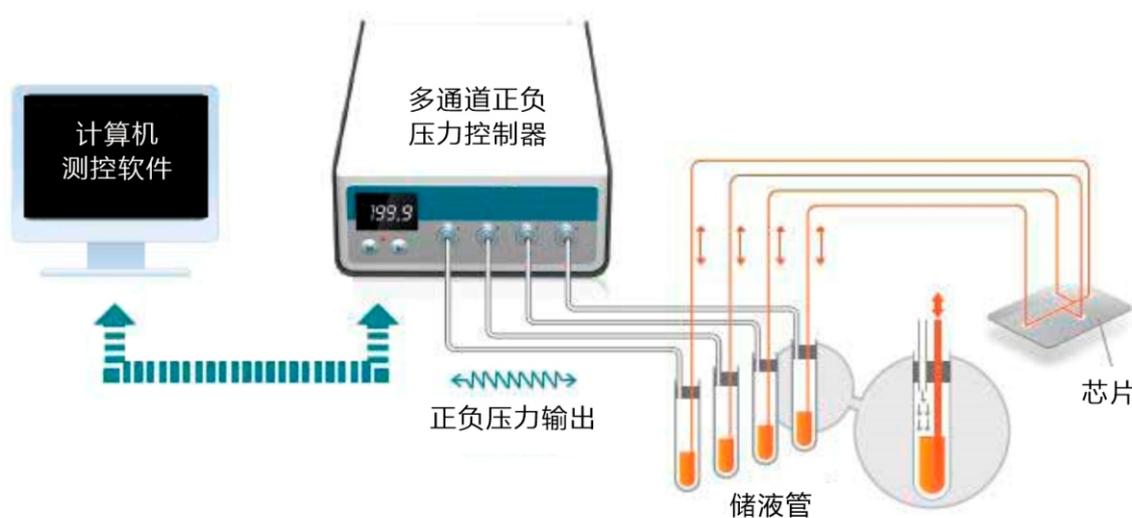


图1 多通道压力控制器在微流控芯片进样中的典型应用

在微流控芯片进样中，要求压力控制器需具备以下几方面的功能：

- (1) 多通道，每个通道可独立控制和操作。
- (2) 每个通道都可按照编程设定输出相应的正负压力。
- (3) 正负压力控制范围：绝对压力1Pa~0.5MPa（表压-101kPa~0.6MPa）。
- (4) 压力控制精度：0.1%~1%。

针对上述微流控芯片进样对压力控制器要求，本文提出了相应的解决方案，并详细介绍了方案中多通道气路结构、控制方法、气体流量调节阀、压力传感器和PID控制器等内容和技术指标。通过此解决方案，完全能够满足各种微流体控制对多通道压力控制器的要求。

二、解决方案

本文所提出的解决方案是实现在1Pa~0.7MPa绝对压力范围内的精密控制，控制精度极限可达到0.1%。即提供一个可控气压源解决方案，采用双向控制模式的动态平衡法，结合高精度步进电机和微小流量电动针阀、高精度压力传感器和多通道PID控制器，气压源可进行高精度的各种真空压力的可编程输出，同时也可用于控制不同的流体流量。

本文所涉及的解决方案，主要针对用于微流控芯片进样用多通道正负压力控制器，这主要是因为微流控芯片所用压力基本在一个标准大气压附近变化，相应的多通道压力控制器相对比较简单。而对于更低压力，如气压小于1kPa绝对压力的多通道控制，要实现精密控制则整个压力控制器将十分复杂。微流控芯片进样用多通道压力控制器工作原理如图2所示。

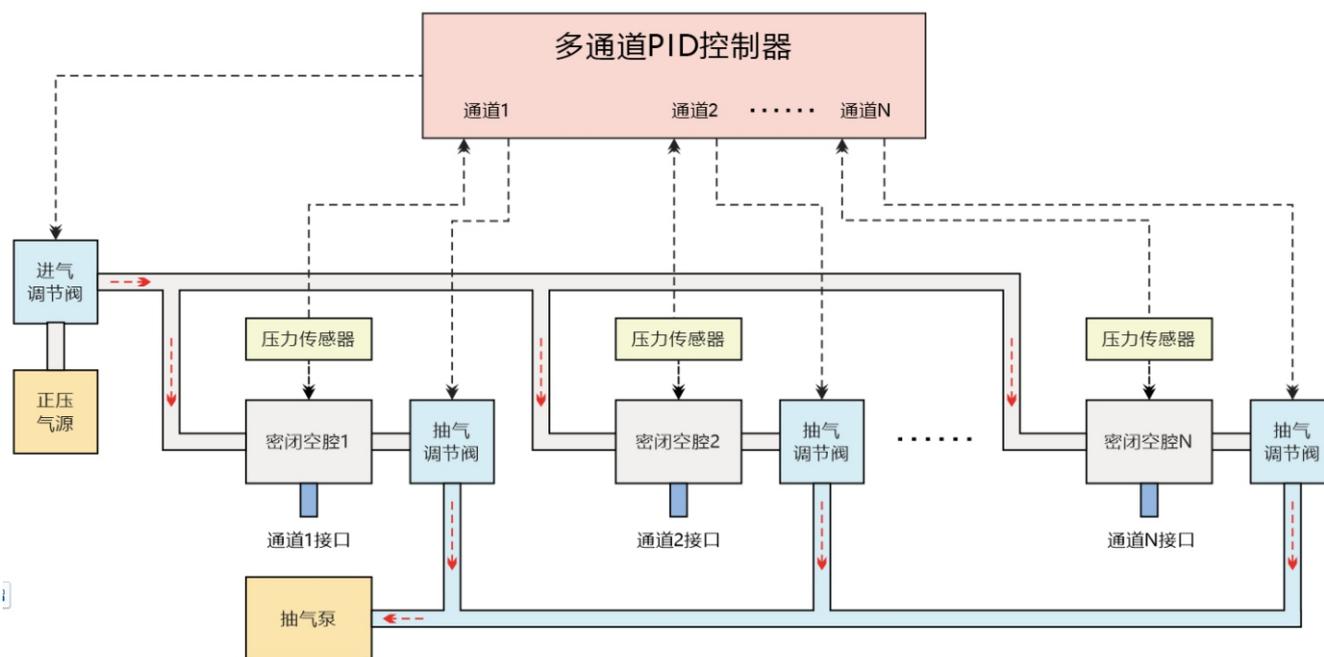


图2 微流控芯片进样用多通道压力控制器工作原理图

微流控芯片进样用多通道压力控制器的工作原理为：

(1) 多通道压力控制包括多个控制通道，每个控制通道包括正压气源、进气调节阀、出气调节阀、抽气泵和PID控制器单元。其中的正压气源和抽气泵提供足够的负压和正压能力，并且可以多通道公用。同样，多通道压力控制器也公用一个进气调节阀。需要注意的是，由于微流控进样所需的负压气压值较大并接近一个标准大气压，对于微流控芯片进样的压力控制，只需固定进气调节阀的开度，近靠调节出气阀开度极可实现正负压的精密控制，因此可以公用一个进气调节阀。如果要进行较低负压气压值（较高真空度）的精密控制，配置恰恰相反，每一通道配置的进气阀进行调节，但可以公用一个抽气阀。

(2) 精密压力控制原理基于密闭空腔进气和出气的动态平衡法。多通道压力控制器的每一个通道都是典型闭环控制回路，其中PID控制器的每一通道采集相应通道的真空压力传感器信号并与此通道的设定值进行比较，然后调节相应通道的进气和抽气调节阀开度，最终使此通道传感器测量值与设定值相等而实现该通道真空压力的准确控制。

(3) 为了覆盖负压到正压的所要求的真空压力范围，需要配置一个测试量程覆盖要求范围内的高精度绝对压力传感器，如果一个压力传感器无法覆盖全量程，则需要增加压力传感器数量来分段覆盖。采用绝对压力传感器的优势是不受各地大气气压变化的影响，无需采取气压修正，更能保证测试的准确性和重复性。

(4) 绝对压力传感器对应所覆盖的真空压力范围输出数值从小到大变化的直流模拟信号(如0~10VDC)。此模拟信号输入给PID控制器,由PID控制器调节进气阀和排气阀的开度而实现压力精确控制。

(5) 当控制是从负压到正压进行变化时,一开始的进气调节阀开度(进气流量)要远小于抽气调节阀开度(抽气流量),通过自动调节进出气流量达到不同的平衡状态来实现不同的负压控制,最终进气调节阀开度逐渐要远大于抽气调节阀开度,由此实现负压到正压范围内一系列设定点或斜线的连续精密控制。对于从正压到负压的变化控制,上述过程正好相反。

三、方案具体内容

解决方案中所涉及的正负压力控制器的具体结构如图3所示,主要包括正压气源、电动针阀、密闭空腔、压力传感器、高精度PID控制器和抽气泵。

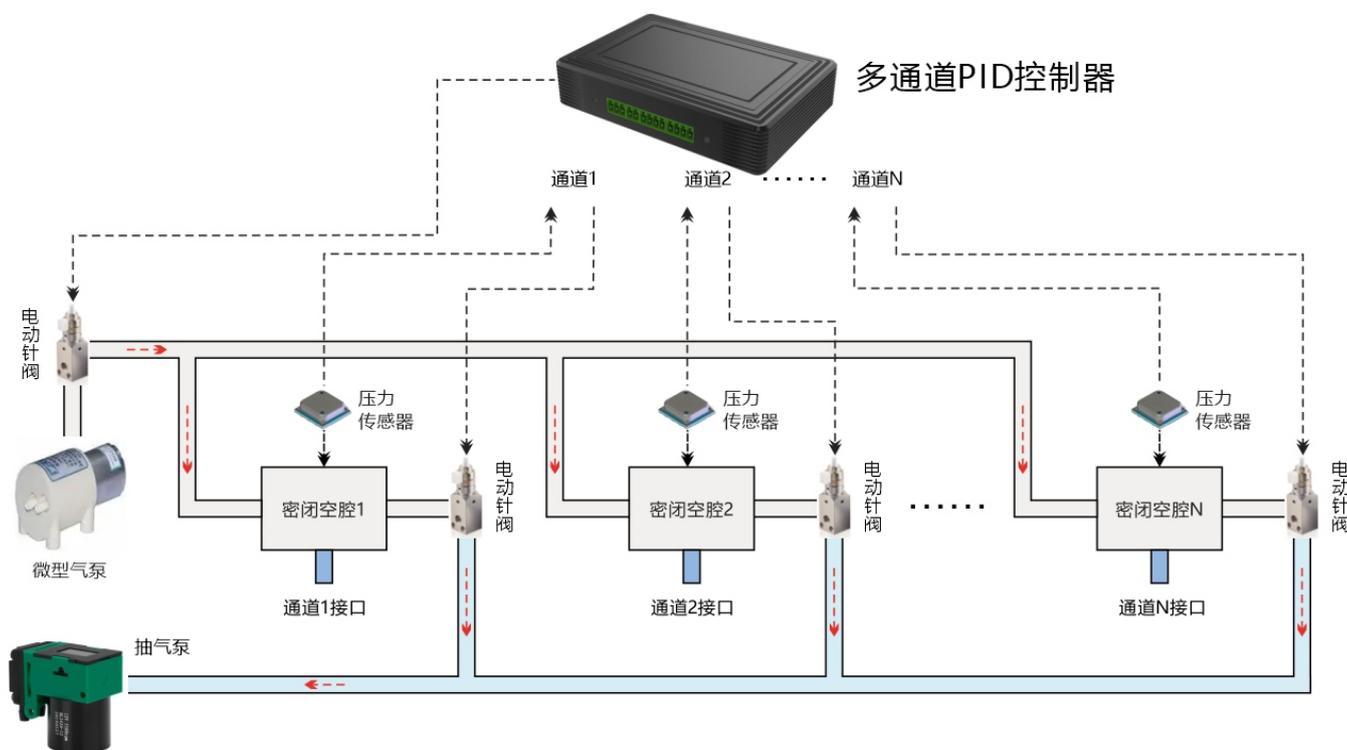


图3 微流控芯片进样用多通道正负压力控制器结构示意图

在图3所示的正负压力控制器中,每个通道都对应一密闭空腔,每个密闭空腔上的外接接口作为此通道的压力输出口。密闭空腔左右安装两个NCNV系列的步进电机驱动的微型电动针阀,电动针阀本身就是正负压两用调节阀,其绝对真空压力范围为0.0001mbar~7bar,最大流量为40mL/min,步进电机单步长为12.7微米,完全能满足小空腔的正负压精密控制。由此,压力控制器中的每个通道可实现正负压任意设定点的精确控制,也可以从正压到负压的压力线性变化控制,也可以从负压到正压的压力线性变化控制。

微流控芯片进样过程中一般要求微小正负压控制,要求是在标准大气压附近的真空压力精确控制,如控制精度为 $\pm 0.5\%$ 甚至更小,一般都需要采用调节抽气阀的双向动态模式,即通过控制器使得进气口处电动针阀的开度基本不变,同时根据PID算法来调节排气口处的电动针阀开度。由于进气阀的开度基本处于固定状态,使得微流控芯片进样所用的多通道压力控制器可以公用一个调节进气流量的电动针阀。另外,所有通道都需要具备抽气功能,抽速也是一固定值,因此多通道压力控制器也可以公用一个抽气泵。

在微流控芯片进样过程中压力控制，除了上述恒定进气流量调节抽气流量的控制方法之外，决定压力控制精度的因素还有压力传感器、PID控制器和电动针阀的精度。本方案中的PID控制器采用的是24位AD和16位的DA，电动针阀则是高精度步进电机，因此本解决方案的测试精度主要取决于压力传感器精度，一般至少要选择0.1%精度的压力传感器。

在微流控芯片进样过程中，往往会要求密闭容器在正负压范围内进行多次往复变化和按照设定曲线进行控制，因此本方案采用了可存储多个编辑程序的PID控制器，每个设定程度是一条多个折线段构成的曲线，由此可实现正负压往复变化的自动程序控制。

在本文所述的解决方案中，为实现正负压的精密控制，如图3所示，针对负压的形成配置了抽气泵。抽气泵相当于一个负压源，但采用真空发生器同样可以达到负压源的效果，负压源采用真空发生器的优点是整个系统只需配备一个正压气源，减少了整个系统的造价、体积和重量，真空发生器连接正压气源即可达到相同的抽气效果。

四、总结

本文所述解决方案，完全可以实现微流控芯片进样系统中压力的任意设定点和连续程序形式的精密控制，并且可以达到很高的控制精度和速度，全程自动化。

本方案除了自动精密控制之外，另外一个特点是系统简单，正负压控制范围也可以比较宽泛，整个系统小巧和集成化，便于形成小型化的检测仪器。

本文解决方案的技术成熟度很高，方案中所涉及的电动针阀和PID控制器，都是目前特有的标准产品，其他的压力传感器、抽气泵、真空发生器和正压气源等也是目前市场上常见的标准产品。