

离体肺通气装置中真空和压力控制的解决方案

Solution of Vacuum and Pressure Control In Ex Vivo Lung Ventilation Device

摘要：模拟肺呼吸过程的离体肺通气控制新方法——真空压力（正负压）法，目前还停留在理论层面的文献报道，还未见到这种方法的仪器化内容和细节。本文基于这种新方法提出了仪器化实现的具体解决方案，解决方案的核心内容是采用了正负压调节器和具有远程设定点功能的高精度PID控制器，由此可实现离体肺内部正压的恒定控制以及离体肺外部负压的周期性波动控制。此解决方案具有很强的灵活性、适用性和拓展性，可进行真空压力宽工作范围内的任意定点和多种波形的设置和控制，便于通气过程中各种实验参数的探索和优化。

1. 离体肺正负压通气方法及需解决的问题

肺移植是有效的治疗方法之一，供体肺在进行移植手术之前可能需要进行离体灌注和通气以恢复或保持其功能，或评估或评价它们的用于移植的质量或适宜性。对于供体肺的离体通气，常见的传统的机械通气技术是利用正压施加到气管支气管树上，由此在气管支气管树和肺泡之间形成压差，从而使得气流在压差驱动下进入肺泡。

有些文献报道了采用负压进行离体通气的方法，即在离体肺周围形成低于大气压的真空负压，使离体肺自然充满一个大气压左右的通气气体，通过真空负压的变化来形成肺呼吸。也有文献报道了采用正压和负压（真空和压力）相结合的不同通气方法，如图1所示，即通过内部正压和外部负压之间的变化来引起肺呼吸。这种正负压通气方法的最大优点是通过调节离体肺气道内的正压能有效的防止肺泡萎陷。

目前文献所报道的离体肺真空压力通气过程是：离体肺放置在密闭腔室内，将通气气体加载到肺的气道上并使腔室（肺周围）形成真空。在调节通气压力以维持肺气管处于恒定不变正压的同时，离体肺周围的真空度在一个较低水平和一个较高水平之间进行周期性变化以引起肺呼吸。然而，这种离体肺正负压通气方法并未详细报道具体实施细节，而且在实施过程中还需解决以下几方面的问题：

- (1) 如何实现正压和负压的独立控制，特别是如何在仪器化方面得到实现。
- (2) 在临床应用之前要进行实验室阶段的通过过程和参数探索，要求正负压力可调节。

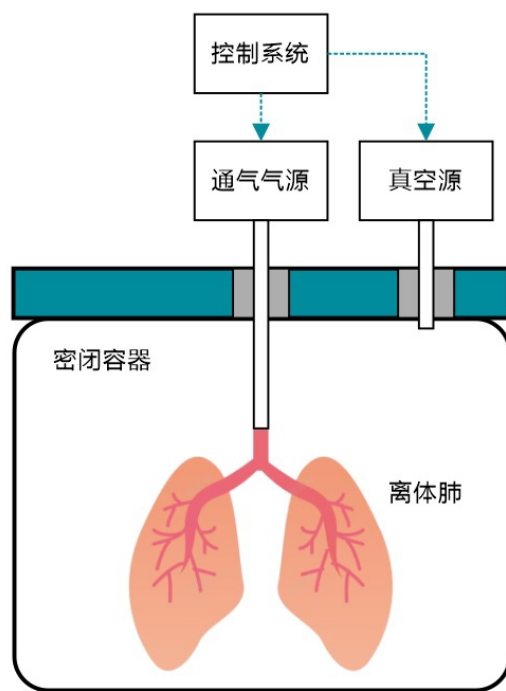


图1 离体肺真空压力通气方法示意图

(3) 负压过程要求实现周期性波动且可控， 需要实现负压波形周期和幅值的设定和控制。为了解决上述离体肺通气方法中的正负压控制问题， 本文提出如下解决方案。

2. 解决方案

正负压离体肺通气控制系统结构如图2所示， 通气控制的具体步骤如下：

(1) 首先对放置在密闭腔室内的离体肺加载正压气体， 在离体肺气管内形成正压。正压压力大小可通过手动调节旋钮或真空压力控制器按键进行实时设置， 也可通过上位机软件进行设置， 真空压力控制器驱动正压调节器将来自高压气源的气体压力恒定控制在设定值上。

(2) 开启真空泵进行抽真空， 为离体肺所处的密闭腔室提供真空源。通过周期信号发生器的按键或软件设置负压波动周期和幅值大小， 真空压力控制器驱动负压调节器按照所设置的周期和幅值大小对密闭腔室内的真空度进行控制， 并形成准确的周期性负压变化波。

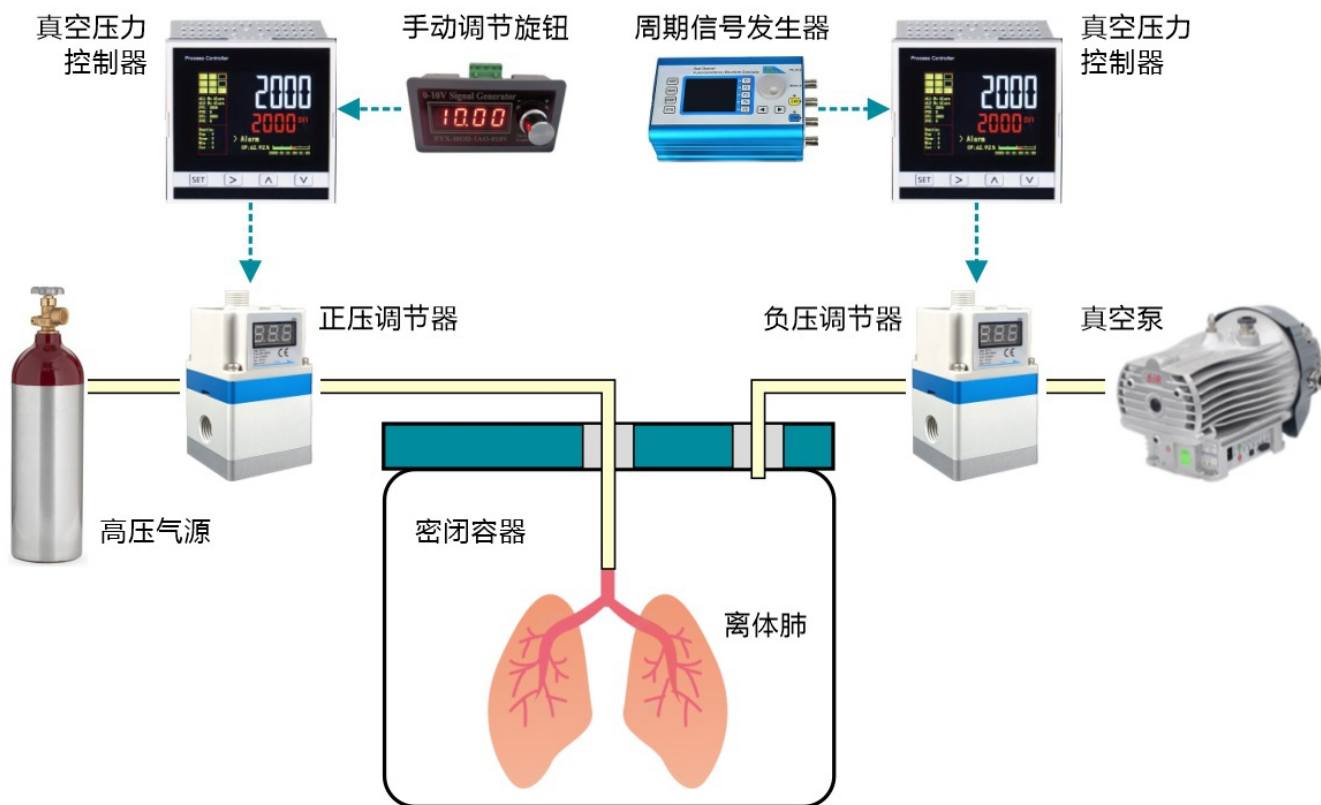


图2 用于离体肺通气的真空压力控制装置结构示意图

在此解决方案中采用了两个关键部件， 它们的主要特点如下：

(1) 正负压力调节器：正负压力调节器是一种集成了真空压力传感器、高速电磁阀和PID控制器的气体气压控制器件，可在表压-80kPa至1000kPa范围内实现真空压力准确控制。真空压力控制设定值可通过外部电压信号进行设定，可在几十毫秒的时间内将真空压力快速控制达到设定值并恒定不变。正负压力调节器的这种工作范围和高速响应速度，非常适合离体肺通气过程中的真空压力控制，特别是能满足周期性负压变化对控制精度和速度的要求。

(2) 真空压力控制器：真空压力控制器是一种多功能高精度的PID调节器。高精度特性是通过24位AD、16位DA、双精度浮点运算和0.01%最小输出百分比的软硬件指标来实现，多功能特性是在普通PID调节器基本功能的基础上还具有远程设定点、串级控制和比值控制等其他高级功能，远程设定点功能特别适用于各种周期性波形控制和设定值的手动调节。另外，此真空压力控制器具有标准MODBUS通讯协议的RS485接口和随机软件，通过上位计算机和运行软件可以直接操控和运行控制器，非常便于快速搭建离体肺正负压通气装置而无需编写软件程序。

需要说明的是，本解决方案仅介绍了如何工程实现正负压自动精密控制的关键细节，其他离体肺通气过程中的一些常规性相关细节并未提及，如流量测量和过滤等内容，但在实际过程中要加上这些内容。

另外，此解决方案也可以根据实验室具体试验过程的需要进行以下两方面的拓展：

(1) 在靠近离体肺气管的一端增加独立的压力传感器。此传感器可与正压调节器和真空压力控制器构成闭环控制回路，这样可以更准确的监测和控制离体肺的内部压力，避免使用正压调节器内部压力传感器的精度不够以及因气管较长所引起的压力不准确问题。

(2) 在密闭容器的顶盖上增加独立的真空度传感器。同样，此真空度传感器与负压调节器和真空压力控制器构成闭环控制回路，这样可以更准确的监测和控制离体肺外部的负压变化，避免使用负压调节器内部负压传感器的精度不够以及因真空管路较长所引起的真空度不准问题。

3. 总结

通过上述解决方案，可通过离体肺正负压通气过程的自动控制来模拟肺的呼吸过程，解决方案具有如下特点：

(1) 实现了准确和高速的正负压全自动控制，可有效防止肺泡萎陷现象的出现。

(2) 正压工作范围和设定值可手动或程序调节并实现自动控制，具有很强的灵活性和适用性，适合研究过程中的各种实验参数探索。

(3) 同样，负压工作范围和变化波形可手动或程序设置并实现自动控制，并具有很强的灵活性和适用性，便于研究过程中的各种实验参数探索。

(4) 此解决方案具有一定的拓展性，如可拓展应用到离体肺的灌注过程控制。