

# 体外循环过程中静脉和动脉侧血流量 高精度自动控制解决方案

## Solution of High-Precision Automatic Control of Venous and Arterial Blood Flow During Cardiopulmonary Bypass

摘要：在目前的体外循环手术过程中，需要灌注师快速而精确地操作使得血液流速调节到期望的目标值。基于国外文献报道的血流量自动控制方法和装置，本文提出了技术改进且国产化解决方案。通过本解决方案中增加的国产系列电控夹管阀、电控针阀和具有远程设定值功能的超高精度PID控制器，可以使得体外循环过程中的静脉和动脉血流量控制真正实现高精度的自动化控制，在满足临床应用和研究需求的同时，可降低灌注师的操作难度和医疗事故。

### 1. 问题的提出

体外循环（CPB）设备在心脏手术期间临时替代心肺功能，以维持体循环。心脏体外循环手术时，需要将手术病人静脉血从体内引出，通过体外循环机氧合后回输至体内动脉管道、静脉回流管、左心房引流管、心内吸引管、普通吸引管等管道，并维持血流量、静脉储库水平、氧气浓度、氧气血流量和血液温度，其中对血液流速的控制要求非常高，稍有错误就会导致循环障碍和大量空气栓塞，从而导致严重的医疗事故。

在CPB具体操作过程中，需要灌注师快速而精确地操作三个装置（静脉侧阻隔器、动脉侧阻隔器和离心泵）来将血液流速调节到期望的目标值，不正确的操作会导致气栓并改变静脉储血水平而导致意外的血压波动，从而将患者置于危险之中。因此，需要开发一种有助于自动调节血液流速的装置以提高自动化控制水平和降低灌注师工作强度，为此文献[1]提出了一种体外循环过程中动脉侧血流量的自动控制方法和控制装置，其结构如图1所示。

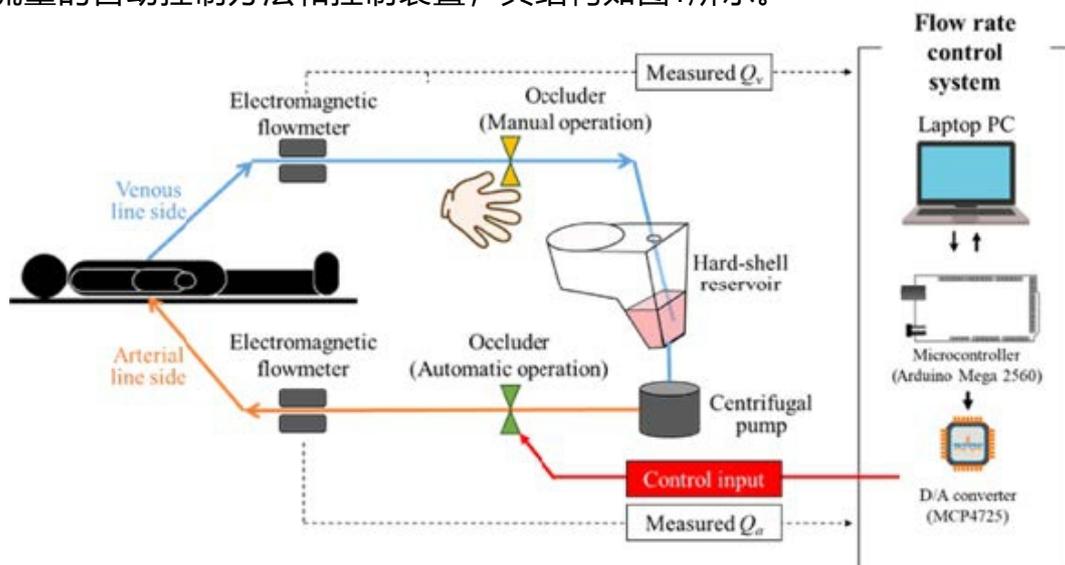


图1 体外循环血流量自动控制装置结构示意图

尽管文献[1]提出了一种体外循环过程中动脉侧血流量的自动控制方法和相应装置，但距离真正的临床应用还有一定差距，这些差距主要体现在以下几个方面：

(1) 尽管文献[1]给出了静脉侧和动脉侧血流量调节用的手动和自动阻隔器的具体型号，但我们并未在阻隔器厂家官网上查到相应型号阻隔器的具体产品和相应技术参数。因此，为了真正实现临床应用还需进一步明确阻隔器产品，甚至是国产化替代。

(2) 动脉侧血流量自动控制的目的是要自动调节动脉侧血流量的变化始终要与静脉侧血流量的变化保持快速同步和相同，但文献[1]给出的控制模型和控制策略过于复杂，较难真正的工程化实现。

针对文献[1]技术方案存在的上述缺陷，本文提出了可真正实现临床应用的解决方案，能很好的解决上述问题，并可完全采用国产化相关产品予以实现。

## 2. 解决方案

基于文献[1]所述的动脉侧血流量自动控制技术方案，我们进行了改进，并进一步明确和细化了相关所用部件，改进后的自动控制装置结构如图2所示。

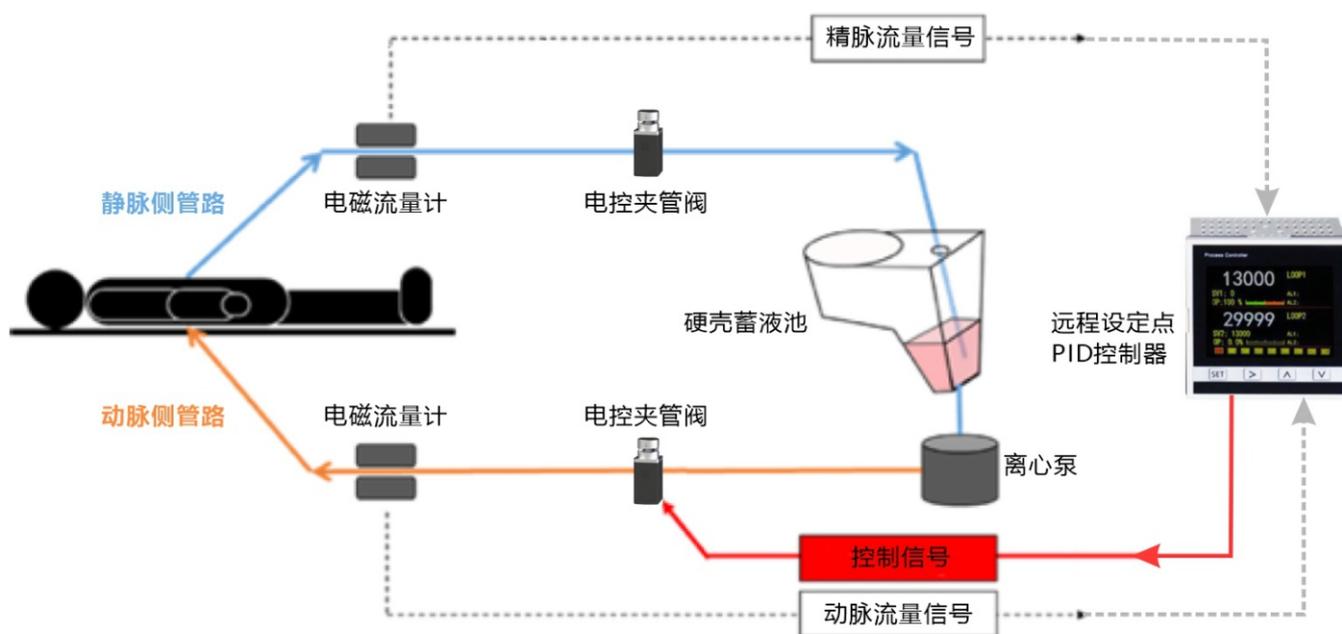


图2 改进后的体外循环血流量自动控制结构示意图

解决方案的改进内容之一是采用国产的电控夹管阀来代替文献[1]中所用的阻隔器，这种电控夹管阀可以通过0~10V的直流电压信号来改变加持力以调节管路导通口径的大小，从而实现对管路中的流体流量进行调节。由此可见，这种电控夹管阀可以很方便的被用来进行静脉侧和动脉侧血流量的手动或自动调节。

尽管电控夹管阀和自动阻隔器可以用来对体外循环系统中的血流量进行调节，但存在的问题是会带来的非线性，这种非线性会对自动控制精度带来严重影响，这也是文献[1]控制模型非常复杂的主要原因。文献[2]对这种非线性进行了研究和描述，发现操作值与开度之间呈指数关系。

为了解决管夹形式所带来的非线性问题，解决方案提出的改进内容之二是采用NCNV系列的电控针阀。NCNV系列电控针阀具有非常高的线性度，且具有快速的响应速度以及不同的孔径尺寸，常用于气体和液体介质的真空、压力和流量的精密调节。尽管采用电控针阀可以很好的解决夹管阀非线性所带来的控制精度问题，但电控针阀存在的重要问题是针阀需要接触所调节的流体介质，不能像夹管阀那样与流体介质不发生接触。

为真正使动脉侧血流量能快速与静脉侧血流量保持同步和相同，本解决方案提出的重大改进是采用具有远程设定点功能的VPC2021系列高精度PID控制器，控制器的具体特性和功能如下：

(1) 具有两个输入信号接收通道，其中主输入通道接收动脉侧流量计信号，并由主控输出通道输出控制信号对动脉侧电控夹管阀/针阀进行调节；而辅助输入通道接收静脉侧流量计信号，此接收到的静脉侧流量信号则作为动脉侧流量控制的设定值。通过这种辅助输入通道的这种远程设定值功能，可使得动脉侧的流量控制始终以静脉侧的流量为跟踪控制目标。

(2) 控制器具有超高的测量精度和控制精度，其中24位AD、16位DA和0.01%最小输出百分比，并采用了无超调的PID控制模式，这非常适用于体外循环装置中的高精度血液流量控制。

(3) 控制器具有RS485通讯接口，并执行标准的MODBUS协议。控制器自带测控软件，在计算机上运行软件可实现控制器参数设置、驱动运行、过程参数的采集、曲线显示和存储，无需再进行程序编写就可组成软硬件控制系统用于临床应用和研究。

### 3. 总结

通过本解决方案中增加的国产系列电控夹管阀、电控针阀和具有远程设定值功能超高精度PID控制器，可以使得体外循环过程中的静脉和动脉血流量控制真正实现高精度的自动化控制，在满足临床应用和研究需求的同时，降低医疗事故和灌注师的操作难度。

### 4. 参考文献

[1] Takahashi H, Kinoshita T, Soh Z, et al. Automatic control of blood flow rate on the arterial-line side during cardiopulmonary bypass[C]//2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC) . IEEE, 2021: 5011-5014.

[2] Takahashi H, Soh Z, Tsuji T. Steady-state model of pressure-flow characteristics modulated by occluders in cardiopulmonary bypass systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 220962-220972.