

基于 LabVIEW 的体外循环用离心式血泵机械参数测试系统研究

胡兆燕^{1,2,3}, 张涛¹, 陈正龙³, 侯晓蓓³, 魏天娇¹

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 医疗器械与食品学院, 上海 200093;
3. 上海医疗器械高等专科学校 医疗器械工程系, 上海 200093)

摘要: 在离心血泵的研制过程中, 流量与灌注压作为血泵的两个重要性能指标, 是关键性的检测参数; 而扭矩是离心血泵驱动能力的重要体现, 因此, 对扭矩的测试也至关重要; 针对离心血泵流量 8 L/min, 灌注压 50 kPa 的设计要求, 设计了基于虚拟仪器技术的离心式血泵压力、流量和扭矩的测试系统, 为实现离心式血泵的测试、分析和优化提供重要的试验方法; 结果表明: 该测试系统能够满足对离心血泵流量、压力和扭矩等机械参数进行测试的要求。

关键词: 血泵; 机械参数; 测试 LabVIEW

Research on Testing System for Mechanical Parameters of Centrifugal Blood Pump for Extracorporeal Circulation Based on LabVIEW

Hu Zhaoyan^{1,2,3}, Zhang Tao¹, Chen Zhenglong³, Hou Xiaobei³, Wei Tianjiao¹

(1. College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
3. Department of Medical Device Engineering, Shanghai Medical Instrumentation College, Shanghai 200093, China)

Abstract: In the research and manufacturing process of the centrifugal blood pump, the flow and pressure as the two important performance indicators, are the key testing parameters; and the torque is capable of driving for the centrifugal blood pump, therefore, the torque testing is also crucial. This paper designs a testing system for the flow, pressure and torque of the centrifugal blood pump based on virtual instrument technology, and provides a important test method for blood pump's testing and analysis. The result shows that: the test system can satisfy the testing requirements for measurement parameters.

Key words: blood pump; mechanical parameters; testing; LabVIEW

0 引言

体外循环是把人体内静脉血液引流出人体外至人工心肺机内, 进行氧合和排出二氧化碳, 然后再由血泵输回人体内, 以维持周身血液循环的过程。如图 1 所示, 虚线部分为人体自然循环, 实线部分为体外循环。血泵是体外循环装置中关键的组成部件, 并且在心脏直视手术、心脏手术的术后恢复、心脏移植的等待期以及心力衰竭患者后期等都需要使用机械辅助循环, 其主要作用是代替心室的搏出功能和术中失血的回收或用于心脏停搏液的灌注等。

目前, 体外循环中使用较多的血泵类型有滚柱式和离心式。与滚柱泵相比, 离心血泵具有对血液破坏小, 压力缓冲大, 安全性高, 体积小, 便于移动等优点, 同时基于磁力驱动方式的无叶片离心泵, 无过载现象, 压力、流量稳定, 在结构上用流体静密封传动代替动密封传动, 有效减少了漏血的发生, 由此可延长体外循环的辅助时间, 扩大临床的应用范围^[1]。

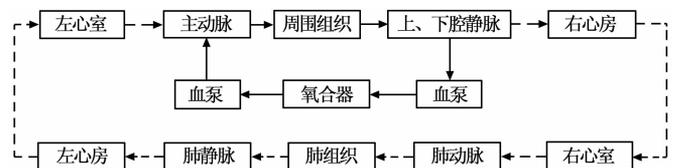


图 1 体外循环原理

国际上血泵已经发展到第三代, 其驱动方式采用磁悬浮和/或液悬浮技术。由于悬浮轴承取代了机械轴承而使第三代血泵的血栓发生率降低, 溶血减少, 机械磨损消失, 能效比增高。目前第三代血泵产品主要集中在经济、科技发达的西方国家及日本等, 目前约有 20 余种, 其中大多数仍处于研发阶段, 仅有少部分产品已通过动物及临床试验, 开始小范围的临床应用。

伴随着体外循环技术的发展, 离心式血泵的临床需求量也将越来越大, 因而离心泵的研制也越发显得关键。血泵的流体机械参数包括血流量和灌注压, 血流量是血泵的辅助效果指标, 也是血泵控制的重要依据; 而压力则是反映血泵和人体血液循环系统之间相互作用的重要指标, 只有当血泵输出端压力高于动脉压力, 才能实现血泵的功能辅助, 同时出口压力又不能一直较大。因此, 不管是在血泵的研制阶段还是在临床应用过程中, 对血泵输出液的流体机械参数的检测或监测都至重

收稿日期: 2014-01-26; 修回日期: 2014-02-28。

基金项目: 上海市教委科研创新项目(12YZ196); 上海市教委晨光计划资助项目(11CGB07)。

作者简介: 胡兆燕(1962-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事医疗器械方向的研究。

要。扭矩作为离心式血泵的驱动能力的重要参数，影响着血泵的输出能力，因此，对离心血泵的扭矩参数的测试也显得不可或缺。

针对课题组研发的体外循环用离心式血泵，为了提高离心血泵的开发效率，课题组因此开发了基于 LabVIEW 的离心式血泵的机械参数的测试系统，本测试系统，既可以作为体外循环系统的模拟试验装置，又可以用于评价离心血泵流体力学参数的设计性能，还可以作为血泵验收和是否可以临床试验的依据。根据临床应用要求，本课题中，体外循环用离心式血泵流体机械参数的技术指标为：

- 流量：0~8 000 ml/min；
- 灌注压：0~380 mmHg，即约 50 kPa。

1 流体参数测试

1.1 测试平台介绍

血泵检测可以根据研究和开发阶段的不同，分为体外模拟装置测量、动物实验以及临床应用等阶段^[2]。在心脏辅助和替代装置的研发阶段，可利用心血管体外模拟循环系统，实测血泵状态参数。这对加快血泵的研究与开发，减小心脏辅助和替代装置的动物实验成本和时间，有重要的帮助作用。在国外，血泵体外试验台的研究热点主要是建立能模拟受体生理特征的循环试验台，这种试验台的主要特征是能够模拟血泵在人体内运行的环境，通过模拟试验来测试血泵的流体力学性能^[3]。

为了加快开发进度和降低试验成本，课题组采用体外模拟循环系统对离心血泵的流体机械参数进行测试。体外循环用离心式血泵的流体机械参数检测系统原理如图 2 所示，电机通过磁力耦合驱动器带动离心血泵运行，循环回路采用通用的 3/8 英寸软管进行连接。试验中，由于仅检测血泵的流体机械参数，同时为了达到降低成本的目的，选用自来水来替代血液完全能够达到模拟体外循环的效果。压力传感器 1 和压力传感器 2 分别用于获取离心血泵的出口和入口端压力信号；流量传感器用于获取离心泵的输出流量信号；储液盒用于存储液体，工作时储液盒中的液面高度控制在设定值，使输入离心泵的液体压力为体外循环的静脉压力值；节流阀用来调节血泵出口端的压力负载；传感器的信号用采集卡进行采集，并在工控机中进行显示。

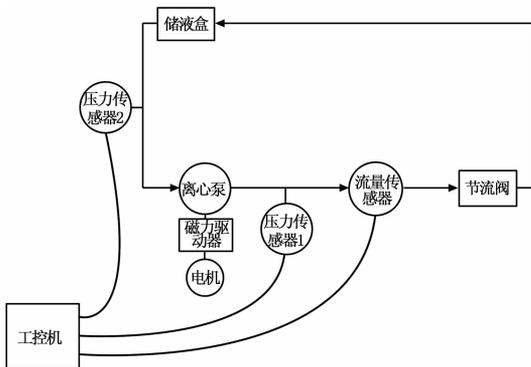


图 2 流体参数测试原理

试验时，具体操作是：电机通过磁力驱动器驱动血泵运转，使得液体在用软管模拟的循环回路中流动；调整储液盒中的液体高度使得离心泵的输入端的压力值等于静脉压力；通过调节节流阀与液柱高度来改变离心泵的出口端压力，使其满足

体外循环临床应用中的灌注压要求；通过改变驱动电机的转速，来改变血泵的输出流量。通过这一系列的操作来观察离心泵的流体机械参数是否满足其临床应用的要求。

1.2 测试系统的硬件设计

检测系统的硬件部分主要包括计算机、传感器、信号转换器、计算机外设等，主要完成数据采集和通讯的任务^[4]。其过程是通过压力、流量等传感器完成现场物理量的数据采集，经过信号调理后送入数据采集卡，再与计算机进行通讯，从而完成检测系统中各个数据信息的实时传输。

在体外循环用离心式血泵的流体机械参数的检测系统中，需要采集离心血泵的出、入口压力和输出流量等信号参数，系统的模拟量输入要求是 -10~10 V 的电压信号，而流量与压力传感器的输出信号为 4~20 mA 的电流，因此需要进行电流电压信号的变换。

如图 3 所示，系统测得的压力和流量等流体机械参数，通过相应的传感器转变为电信号，再通过信号调理系统对采集到的电信号进行处理，使之成为满足数据采集卡要求的物理量。计算机通过数据采集卡获得相应的测量数据，在软件的运行下完成各个物理量的数据采集、分析处理，并进行显示和处理^[5]。

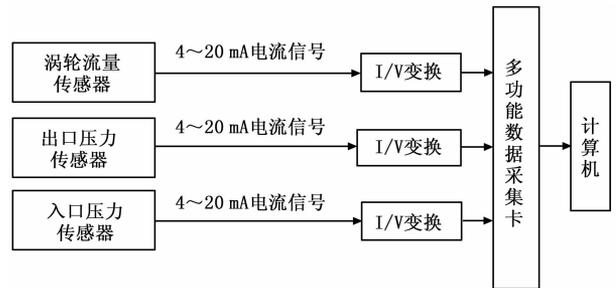


图 3 系统硬件结构框图

本检测系统主要包括 3 个部分：涡轮流量计、压力表，数据采集卡和工控机采集程序。涡轮流量计和压力表中的传感器将流量、压力转换为电信号，电信号被数据采集卡采集，经过采集卡中的信号调理电路处理后，上传到工控机，利用编写的采集程序就能实时显示数据和波形。在该检测系统中，流量计采用涡轮流量计，型号为 LWGY-6，压力表采用浮球式压力表，型号为 CEMPX503；数据采集卡采用美国 NI 公司生产的基于 PCI 总线的多功能数据采集卡，型号为 PCI-6221（37 针）；数据采集程序采用 NI 公司出版的 LabVIEW 进行编程。

1.2.1 传感器与信号调理电路

传感器和信号调理电路都集中在涡轮流量计和压力表内，涡轮流量计和压力表输出与流量、压力相对应的脉冲信号为 4~20 mA 的直流信号，都采用 24 V 的直流电源进行供电。由于 NI 公司 PCI-6221（37 针）的数据采集卡的模拟输入信号为电压，因此需要对传感器输出的电流信号进行 I/V 变换，在此选择选择型号为 DM-11-16D 信号隔离器，其输入为 4~20 mA 的电流，输出为 0~10 V 的电压信号。

1.2.2 数据采集卡

数据采集卡完成对涡轮流量计和压力表输出的电信号进行采集，将其转换为数字信号供计算机读取。PCI-6221（37 针）多功能数据采集卡是一种基于 PCI 总线的数据采集卡，可直接插入计算机内的一个 PCI 插槽中，从而构成实验室、产品

质量检测中心等领域的数据采集、工业生产过程监控系统。PCI-6221 (37 针) 多功能数据采集卡具有 16 位分辨率, 采样频率为 250 kS/s, 16 路模拟输入, 2 路模拟输出, 10 路数字 IO, 输入模拟信号的范围为 ±10 V 的电压。

1.2.3 计算机

在计算机上采用 LabVIEW 进行数据采集程序的编程, 实现的主要功能是完成离心血泵的输出流量和出、入口压力大小的实时显示, 并具有存储数据、实时图形的输出等功能。

1.3 测试系统的软件设计

美国国家仪器公司的创新软件产品 LabVIEW, 由于其开发效率高、程序修改维护简便、产品具有丰富的功能和很好的集成性, 已成为最流行的虚拟仪器开发环境。作为一种图形化的编程语言和开发工具, 功能强大灵活, 并具有扩展函数库的通用编程语言, 有丰富的函数、数值分析、信号处理和设备驱动等功能, 尤其适用于各种测试测量系统的组建和控制仪器的控制^[6]。

1.3.1 系统软件功能

根据功能需求, 将整个系统分为数据采集和数据处理等部分。其中, 数据采集部分主要是针对实验条件、传感器、采集参数进行设置和实时显示, 并将采集数据进行保存; 数据处理主要是对保存的数据文件进行后期处理等。

检测系统采用开环控制的实验方法, 手动调节离心泵的驱动电机来改变血泵的转速, 从而达到改变血泵输出流量的目的。检测时, 调节储液盒的液面高度使其压力等于静脉压力值; 调节液流阀使得血泵的输出压力满足灌注压的临床应用要求; 改变血泵的转速来调节流量的大小看其是否满足流量的临床应用要求。

1.3.2 系统参数数据采集与处理

主要完成参数设定和数据采集与处理两大功能。进行体外循环用离心血泵的流体机械参数如输出流量和出入口压力的控制和测量等, 其程序如图 4 所示。

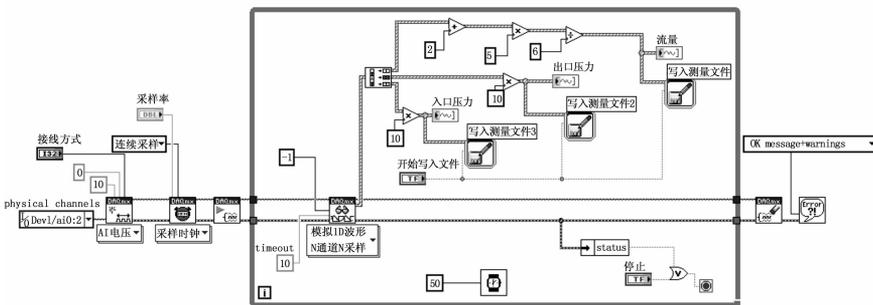


图 4 测试程序

1.3.3 测试结果

如图 5 所示, 为离心式血泵试验中出口压力测试结果显示。

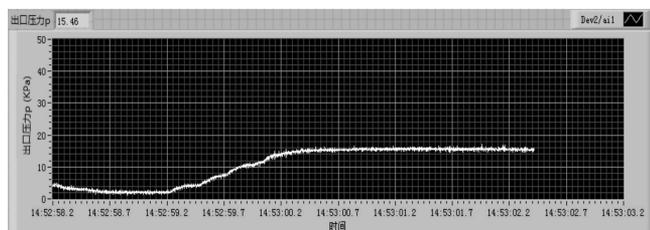


图 5 出口压力测试结果

2 扭矩测试

血泵是体外循环装置中的重要部件。目前, 国内临床使用的血泵仍以滚柱泵为主, 但由于自身结构存在的缺陷而将会逐渐被离心泵所代替。无叶片磁力驱动离心血泵, 具有对血液破坏小, 压力缓冲大, 安全性高, 驱动时无过载现象, 压力、流量稳定等优点, 更主要的是在结构上采用静密封传动, 有效减少了漏血现象的发生, 是临床治疗技术发展的重要趋势。离心式血泵是通过高速旋转使血液流体获得动能和压力的, 对于磁力驱动的离心式血泵, 其扭矩的大小关系到血泵的驱动能力, 从而影响到血泵的输出, 即灌注压与血流量。因此, 在离心式血泵的研制过程中, 需要对离心血泵所产生的扭矩进行检测。

2.1 测试原理

离心血泵通过磁力耦合来实现静密封传动, 从而有效地减少了血泵使用过程中血液的泄漏现象的发生。扭矩作为离心血泵设计制造的重要传动参数, 在设计过程中, 对其进行检测很有必要性。因此, 课题组设计了如图 6 所示的实验系统, 用于对离心血泵的扭矩进行测试。

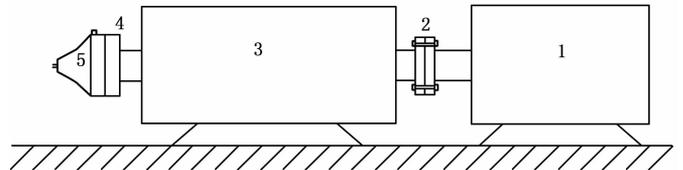


图 6 扭矩测试台

图 6 中, 1 为动力设备 (驱动电机), 2 为刚性联轴器, 3 为扭矩传感器, 4 为血泵磁力驱动器, 5 离心式血泵。

试验时, 血泵 5 连接循环液体, 驱动电机 1 通过刚性联轴器 2 带动扭矩传感器 3 转动, 扭矩传感器 3 的另一端安装有离心式血泵的磁力驱动器 4, 磁力驱动器 4 上安装固定血泵。在电机的带动下驱动血泵运转, 从而扭矩传感器输出扭矩信号, 通过调节离心泵的负载来测试其驱动扭矩。传感器输出的信号, 用采集卡进行采集后在计算机上进行实时的显示和处理。

2.2 测试传感器

传感器扭矩数值的测量采用应变电测原理, 当应变轴受扭力影响产生微小变形后, 粘贴在应变轴上的应变计阻值发生相应变化, 将具有相同应变特性的应变计组成测量电桥, 应变电阻的变化即可转变为电压信号的变化进行测量。

在有效量程范围内, 传感器的转矩输出频率与对应转矩数值基本上成线性关系, 因此, 在具体应用中, 扭矩按下列公式进行计算:

$$M = N \frac{f - f_0}{f_p - f_0}$$

式中, N 为扭矩满量程, f₀ 为转矩零点输出频率值, f_p 为满量程输出频率值, f 为实测转矩输出频率值。

2.3 硬件、软件设计

离心泵的扭矩测试系统也采用 NI 公司型号为 PCI-6221

(下转第 1344 页)

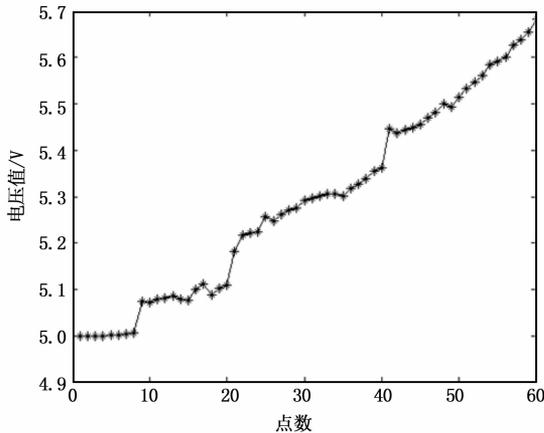


图 2 某电源组合电压采集数据

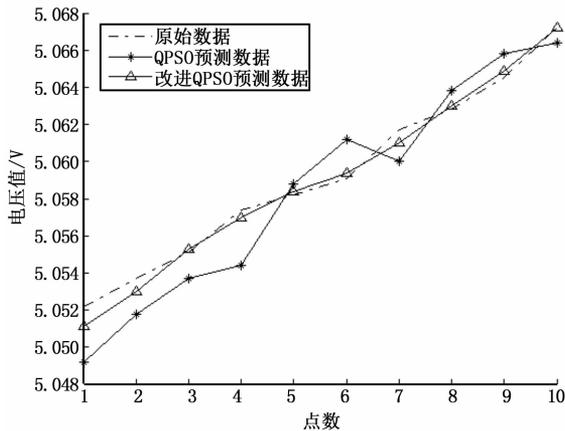


图 3 不同算法优化 SVR 的预测结果比较

从表 1 和图 3 可以看出，采用改进 QPSO 优化 SVR 的故障

预测方法在预测精度上明显优于 QPSO 算法，预测误差更小。

4 结论

本文将 QPSO 算法和 SVR 结合起来，并对 QPSO 算法中的收缩扩张系数进行了改进，建立了基于改进 QPSO 优化 SVR 的故障预测模型。以某电源组合的输出电压信号为研究对象进行了仿真分析，通过比较预测值与实际值的误差判断预测精度，仿真结果表明，该方法相较于传统 QPSO 算法预测精度更高，达到了预期目的。

参考文献:

[1] Antoni J, Danieret J. Effective vibration analysis of ic engines using cyclostationarity—part I: a methodology or condition monitoring [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 257 (5): 815-837.

[2] 郭阳明, 蔡小斌, 张宝珍, 等. 故障预测与健康状态管理技术综述 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (9): 1213-1218.

[3] Vapnik V. The Nature of Statistical Learning Theory [M]. New York: Springer-Verlag, 1999.

[4] Chapelle Olivier, Vapnik Vladimir, Bousquet Oliver, et al. Choosing Multiple Parameters for Support Vector Machines [J]. Machine Learning, 2002, (46): 131-159.

[5] Sun J, Xu W B. A Global Search Strategy of Quantum-behaved Particle Swarm Optimizations [A]. IEEE 2004 Conference on Cybernetics and Intelligent System [C], Singapore: 111-116.

[6] 何学文. 基于支持向量机的故障智能诊断理论与方法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2004.

[7] 叶苗, 王勇. 基于支持向量回归学习机的网络流量预测 [J]. 桂林工学院学报, 2007, 27 (2): 282-284.

[8] 胡丹. 小波支持向量回归模型及其应用研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2006.

[9] 李万领, 孟晨, 等. 基于改进灰色模型的故障预测研究 [J]. 中国测试, 2012, 38 (2): 26-28.

(上接第 1335 页)

(37 针) 的多功能采集卡，由于该类型采集卡只能输入电压信号，而扭矩传感器输出的是 10~15 kHz 的频率信号，因此，也会进行相应信号类型的转换。该测试系统的采集程序同样采用 LabVIEW 软件进行编程，由于程序与流体参数测试系统相类似，此处不再赘述。

3 结论与讨论

国产的离心式血泵尚无成功的临床应用，课题组以体外循环用无叶片离心式血泵为研究对象，设计了一套完整的对体外循环用离心式血泵流量、压力和扭矩进行测试的测试平台。

本测试系统实现了血泵流量、压力和扭矩信号的准确采集和动态特性的测试，并为血泵其它相关性能参数如效率、N-P-F (转速-压力-流量) 曲线的测试提供了重要的手段。血泵的功率和效率由测得的数据计算得到，从考核血泵设计优劣的角度来说，关心的是血泵的有效功率和泵效率，相关计算公式为

$$P_i = M\omega$$

$$P_o = p q$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\%$$

式中， P_i 为离心泵的输入功率， M 为扭矩， ω 为转速； P_o 为离心泵的有效输出功率， p 为输出压力， q 为输出流量； η 为离心泵的效率。

通过试验计算的方法分析得出的数据，以此对设计制造的离心泵的重要性能参数进行评价，并通过对测试参数进行分析计算来对离心泵的结构进行进一步的优化。

参考文献:

[1] 路力军, 胡兆燕, 陈正龙, 等. 体外循环用血泵的研究进展 [J]. 北京生物医学工程, 2012, 31 (4): 433-439.

[2] 杨明. 人工心脏血泵检测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23 (10): 1-7.

[3] 柳光茂, 周建业, 胡盛寿, 等. 左心辅助泵体外测试的研究 [J]. 中国生物医学工程学报, 2010, 29 (1): 106-110.

[4] 马小翠, 彭朝琴, 刘秋生, 等. 基于 LabVIEW 的电液伺服阀测试系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (6): 1476-1479.

[5] 王玲玲, 张辉. 基于 LabVIEW 的计算机辅助水泵测控实验系统 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28 (4): 230-232.

[6] 陈数学, 刘莹. LabVIEW 宝典 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.