

一种轴流血泵的磁液双悬浮支承系统

冯龙飞,云忠,徐军瑞,蔡超
中南大学机电工程学院,湖南 长沙 410083

【摘要】目的:为解决第三代血泵中磁力和液力悬浮系统体积偏大、发热多、水力性能差、血损严重等问题,提出一种磁液双悬浮支承系统。**方法:**磁液双悬浮支承系统轴向靠磁力、径向靠径向液力共同实现转子的稳定悬浮;分别利用ANSYS电磁模块和楔形动压承载原理对轴向磁力、径向液力进行分析,利用Fluent对磁液双悬浮轴流血泵的水力性能进行仿真分析。**结果:**对悬浮系统轴向、径向承载力的分析以及悬浮实验结果表明该系统可以实现稳定的悬浮;Fluent仿真及水力实验表明当血泵转子转速为9 500 r/min以上时,能满足人体需要。**结论:**磁液双悬浮支承系统具有较好的悬浮性、水力性能,可作为第三代血泵进一步改进的选择方向。

【关键词】血泵;磁液双悬浮;轴流;仿真;轴向磁力;径向液力

【中图分类号】R318.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)08-0939-06

Magnetic-hydraulic suspension supporting system for axial blood pump

FENG Longfei, YUN Zhong, XU Junrui, CAI Chao
School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: Objective To propose a magnetic-hydraulic suspension supporting system for solving the problems of magnetic and hydraulic suspension system of the third generation blood pump, such as large volume, high fever, poor hydraulic performance and serious blood damage. **Methods** The magnetic-hydraulic suspension supporting system relied on magnetic force in the axial direction and passive hydraulic force in the radial direction to realize the stable suspension of the impeller. The axial magnetic force was analyzed by ANSYS electromagnetic module and the radial hydraulic force was analyzed by wedge dynamic pressure bearing principle. The hydraulic performance of magnetic-hydraulic suspension axial blood pump was simulated by Fluent. **Results** The analysis of the axial and radial bearing capacity of the suspension system and the results of suspension experiments proved that the suspension system could achieve a stable suspension. Fluent simulation and hydraulic experiments showed that when the rotor speed of the blood pump was above 9 500 r/min, the blood pump met the needs of the human body. **Conclusion** The magnetic-hydraulic suspension supporting system had good suspension and hydraulic performances, which can provide a possibility for the further improvement of the third generation blood pump.

Keywords: blood pump; magnetic-hydraulic suspension; axial flow; simulation; axial magnetic force; radial hydraulic force

前言

第一代人工心脏泵是根据仿生原理研制的搏动式泵^[1],后来人工心脏泵由搏动式发展到叶轮式的第二代心脏泵,解决了体积、效率、流量-压力、可植入性等问题^[2]。然而机械轴承的摩擦发热造成血细胞损

伤成了制约人工心脏泵进一步发展的重要因素^[3]。近年来,将转子悬浮脱离轴承从而减少系统发热的第三代泵成为血泵的发展方向。悬浮方式主要有磁力悬浮和液力悬浮,磁力悬浮心脏泵至少需要在一个方向上实现主动控制,这会增加血泵的结构体积和能量消耗;对于液力悬浮,国内浙江大学的范灏^[4]、韩青^[5]进行了较多研究,在水力性能方面还存在一些问题。

本文在前人研究的基础上^[6-8],设计一种磁液双悬浮支承系统的心脏泵,利用在高速旋转条件下血泵叶轮顶端与泵壳内壁之间的动压间隙中形成的液力,实现血泵叶轮在径向上的无接触式的悬浮;通过两组分别安装在血泵两端的永磁轴向轴承,实现血

【收稿日期】2018-03-21

【基金项目】国家自然科学基金(31670999,51475477);浙江省重中之重学科开放基金(GK170201201003/002)

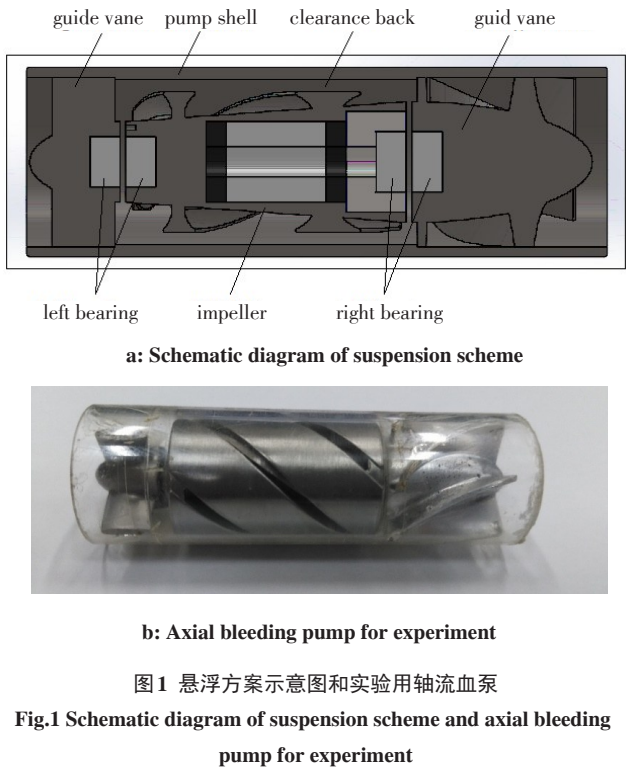
【作者简介】冯龙飞,硕士研究生,研究方向:微生物机械系统设计与仿真,E-mail: flfzy2012@163.com

【通信作者】云忠,教授,博士生导师,研究方向:微生物机械系统设计与仿真、机电一体化装置设计,E-mail: yunzhong@126.com

泵叶轮在轴向上的悬浮支承^[9]。两种悬浮支承都具有自我调节的功能,且具备较高的支撑强度,极大简化了血泵的结构,满足水力性能的同时,功耗少,减小了系统发热。

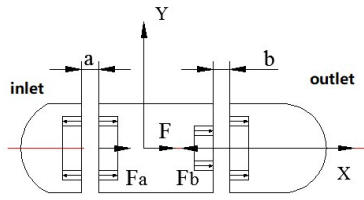
1 磁液双悬浮支承系统的设计

文中采取的磁液双悬浮方案,其设计及实物如图1所示。



1.1 轴向磁力悬浮

在血泵左右两端分别安装一对充磁斥力型轴向轴承和轴向充磁轴承(轴承组在间隙小时为斥力,间隙大时为吸力)。永磁轴承的安装示意图如图2所示,安装轴承的具体参数如表1所示。其中, a 是左轴承两对永磁块之间的间隙, b 为右轴承两个永磁块之间的间隙, F_a 是左轴承安装在血泵叶轮上永磁块受到的磁力, F_b 是右轴承安装在血泵叶轮上的永磁块受到的磁力。根据已有研究^[6]设计安装有陶瓷轴承的血泵叶轮与前后导叶间隙为: $a+b=12\text{ mm}$ 。



1.2 径向液力悬浮

由于轴流血泵属于有进出口的流通结构,血泵的内部不存在很高的压力,血液的密度也是基本保持不变的,所以可将轴流血泵内部流动的血液视为不可压缩流体,在对血泵的流体力学性能进行分析的时候,使用基于粘性不可压缩流体的相关理论来展开研究^[10-12],通过动压为轴流血泵旋转叶轮提供径向理论支撑。设计的楔形间隙结构成螺旋形分布

表1 轴向轴承系统
Tab.1 Axial bearing system (mm)

Design scheme	Left bearing		Right bearing		Remarks
	Left magnet	Right magnet	Left magnet	Right magnet	
Internal diameter (r)	1.5	1.5	1.0	3.0	Bearing material: Nd-Fe-B
Outside diameter (R)	3.0	3.0	3.0	4.5	
Axial length (L)	2.5	2.5	3.0	3.0	
Radial thickness (H)	1.5	1.5	2.0	1.5	

于转子轮毂上,根据传统的轴流血泵的结构拟选取4个螺旋叶片。由于设定叶片数为4片,总是成对分布,且每片叶片螺旋圈数为半圈,可以看成是在同一圆柱面上的锥体楔形间隙,首先确定叶片的基本长度,再确定其合理的间隙,考虑到叶片的对称分布,设定 x 轴与转轴重合,按右手定则确定 x 轴的正向,由雷诺方程可得其液力计算公式为:

$$F_y = 2\alpha \int \frac{6\mu S v (k-1)(1-l)l}{h_z^2 (k+1)[k+(1-k)l]} \cos\left(\phi + \frac{s}{r}\right) ds dz \quad (1)$$

$$F_z = 2\alpha \int \frac{6\mu S v (k-1)(1-l)l}{h_z^2 (k+1)[k+(1-k)l]} \sin\left(\phi + \frac{s}{r}\right) ds dz \quad (2)$$

其中, h 为间隙高度, μ 为血液动力粘度, v 为动壁处的速度, $k = \frac{c+\delta-e\cos\phi}{c-e\cos(\phi+\theta_0)}$, $l = \frac{s}{S_i}$, $\phi = \frac{\pi z}{0.027}$, c 为

同心间隙, e 为径向位移, δ 为楔形间隙出入口差, α 为承载能力系数, 此处取 0.4。综合考虑血泵的尺寸和流量要求选择同心间隙 c 为 0.20 mm, 径向位移 e 取值 0.15 mm, δ 取值 0.11 mm, 速度 $v = 8.37$ m/s, 血液的动力学粘度为 0.0035 Pa·s, 对 S 进行不同取值, 利用 MATLAB 软件进行解析数值计算得到初始的结构参数值^[13-16]。利用三维软件 SolidWorks 绘图得到初步设计结构如图 3 所示。

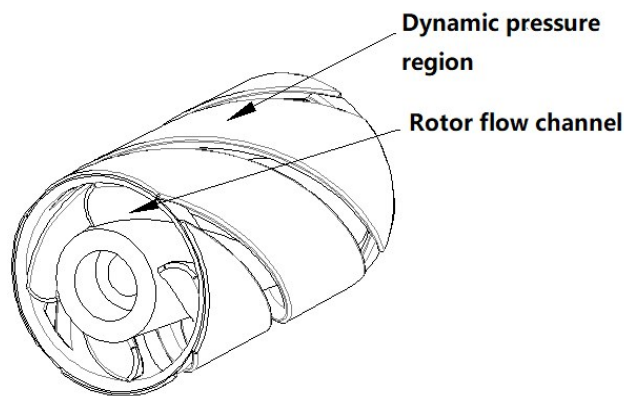


图3 叶轮示意图

Fig.3 Impeller schematic diagram

2 力学仿真计算

2.1 轴向力学特性分析

利用 ANSYS 电磁分析模块, 对永磁环进行三维静态磁场分析, 采用标量位方法, 用 solid98 三维实体单元求解。求解步骤为: 首先建立物理环境; 其次建立模型, 给模型区域赋属性并划分网格; 然后加边界条件和载荷; 再用 RSP、DSP 或 GSP 方法求解^[17]; 最后观察结果。通过 ANSYS 仿真, 得到的永磁轴向轴承的轴向力与轴向位置的关系如图 4 所示, x 坐标为转子与前导轮的间隙 σ_1 (σ_2 为转子与后导轮的间隙), 3 条曲线分别代表轴向合力、前导轮处轴承轴向力、后导轮处轴承轴向力。

从图 4 可以看出, 随着前导轮与转子间隙的增加, 轴向合力逐渐减小到零后又增加, 轴向合力为零的点为 $B(\sigma_1, \sigma_2) = (1.0, 0.2)$, 后导轮处的新型轴向永磁轴承的轴承力学特性表现为先吸力后斥力, 分界点约为 $A(\sigma_1, \sigma_2) = (0.6, 0.6)$, 前导轮处的永磁轴向轴承随着间隙的增加, 轴向斥力逐渐减小。当血泵在正常工作时, 从图中可以推测出血泵转子的轴向平衡位置在 $(\sigma_1, \sigma_2) = (0.6, 0.6)$ 附近。转子自重 1.30 N,

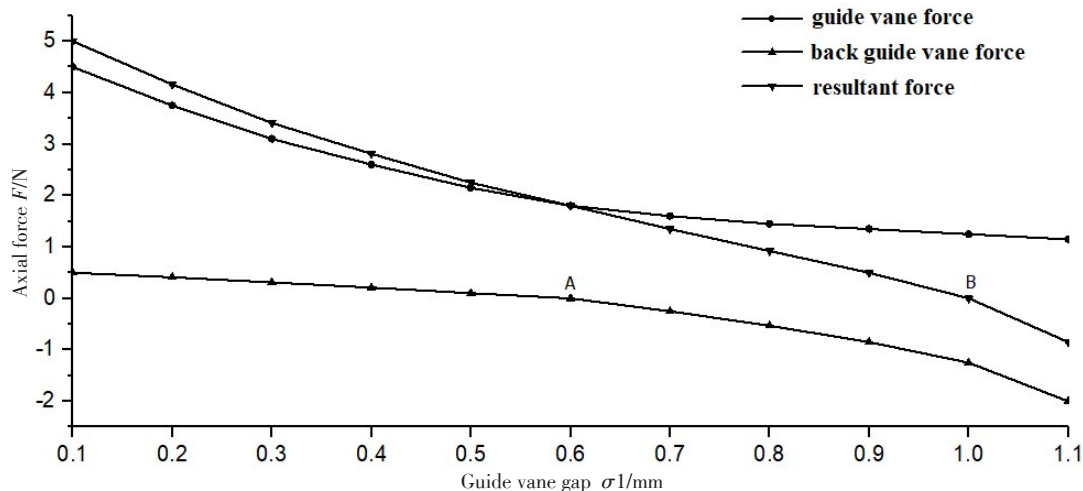


图4 轴向承载力图

Fig.4 Axial bearing capacity

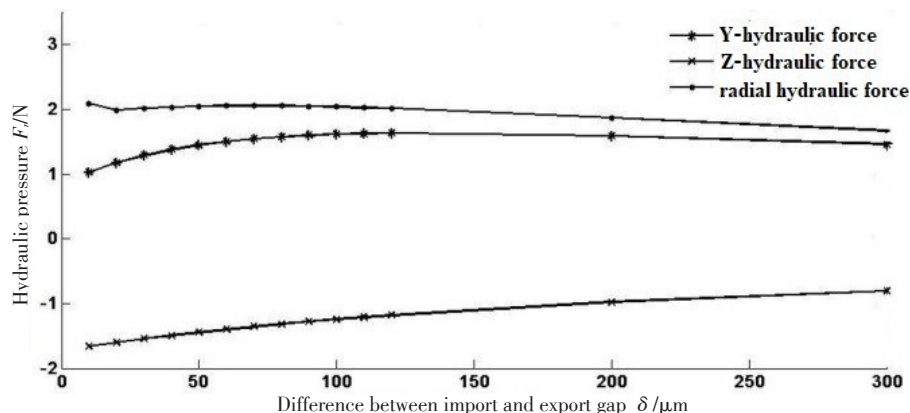
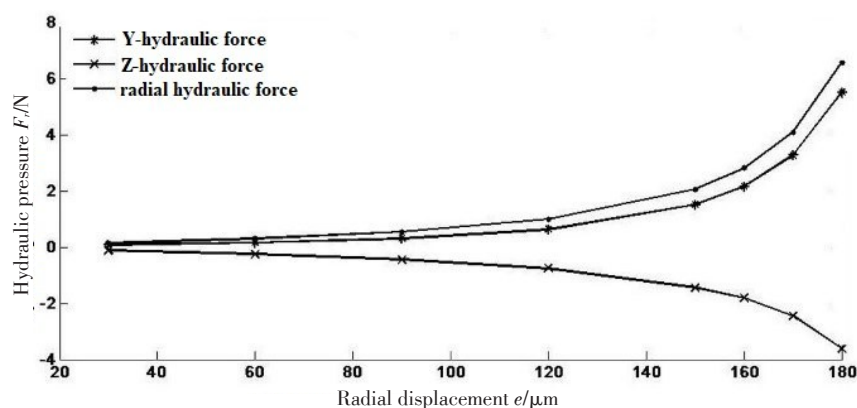
在标准工况下(进出口压差 100 mm·Hg)受到反向轴向力 2.67 N。通过仿真计算分析, 磁轴承在轴向上最大承载力约为 5 N, 可以满足承载要求; 当两端间隙均为 0.6 mm 时, 转子处于轴向平衡位置。

2.2 径向力学特性

本文对弧长 $S = 10$ mm, 从进出口的间隙差 δ 和转子径向位移 e 对径向力 F_r 的影响进行仿真计算, 当 $S = 10$ mm、 $e = 0.15$ mm 时, 血泵转子径向承载力 F_r 与

进出口间隙差 δ 的关系如图 5 所示; 当弧长 $S = 10$ mm、进出口间隙差 $\delta = 0$ 时, 血泵转子径向承载力 F_r 与径向位移 e 的关系如图 6 所示。

从图 5 可以看出 δ 对径向液压合力影响较小, 随着 δ 的增加, 径向合力变化缓慢; 从图 6 可以看出当径向位移较小时, 3 种径向力较小, 随着径向位移的增加, 3 种径向力的变化幅度变大, 在径向位移为 0.16 mm 时, 径向液压合力达到 2.8 N, 满足血泵支撑设计要求。

图5 进出口间隙差 δ 与径向液力 F_r 的关系Fig.5 Relationship between the difference between import and export gap δ and radial hydraulic force F_r 图6 径向位移 e 与径向液力 F_r 的关系Fig.6 Relationship between radial displacement e and radial hydraulic force F_r

3 动力学仿真分析

网格类型选为非结构体网格,可以将血液简化为单相流进行仿真分析,血液粘度为 $0.0036 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,密度为 1059 kg/m^3 。采用FLUENT提供标准 $\kappa\sim\epsilon$ 模型,进口边界条件设置为速度入口,出口边界条件设

置为outflow^[18-20],将入口流量分别设置为2、4、6、8、10 L/min,转子转速分别设置为6 000、7 000、8 000、9 000、10 000、11 000、12 000 r/min。根据FLUENT仿真数据得出血泵进出口压力差值 P 与进口流量 Q 和转子转速之间的关系,如图7所示。

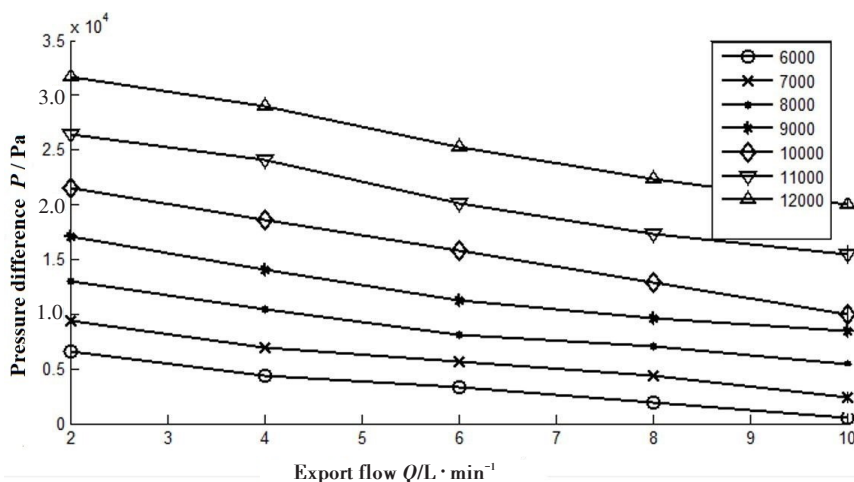


图7 不同转速的血泵流量与进出口压差的关系

Fig.7 Relationship between the pumping flow at different speeds and the pressure difference of import and export

正常成年人的心脏血流量为5~7 L/min, 血压一般为80~120 mm·Hg。从图7中可以看出, 当血泵转子转速为9 500 r/min、流量为6 L/min时, 进出口压力差在13.7 kPa(103 mm·Hg)左右, 能基本满足人体需要。

4 实验结果

4.1 悬浮实验

利用电回路来测试血泵在运行过程中是否处于完全悬浮状态。测试原理如图8和图9所示, 测量时先将轴流泵浸没在盛有25号变压器油中(该变压器油的粘度与血液相似, 且绝缘性能好), 泵的进出口之间没有导管连接, 流体在储液池内循环。将电流探针装在旋转叶轮轴线中心, 从前导轮的中心孔伸出, 与前端的金属触板组成电刷式触点, 通过触点与电源一极连接, 另一极通过导线与血泵外壳连接, 并在电路中串联一电流表。当叶轮处于未悬浮或不稳定悬浮状态时, 叶轮转子与外壳之间形成闭合回路, 电路中有电流通过; 当叶轮处于完全悬浮状态时, 叶轮转子与外壳之间回路断开, 电路中没有电流通过。改变叶轮转速, 通过观察电流表是否有电流通过, 来判断转子是否完全悬浮。

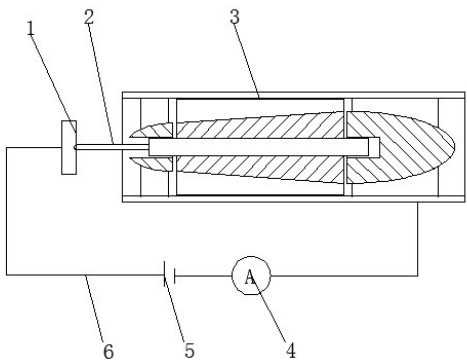


图8 磁液悬浮轴流泵悬浮探测示意图
Fig.8 Schematic diagram for suspension detection of a magnetic-hydraulic suspension axial flow pump

1: Metal plate; 2: Current probe; 3: Axial-flow pump; 4: Ammeter;
5: Power; 6: Connection wire



图9 悬浮实验线路连接图
Fig.9 Connection diagram of suspension test

当转子处于静止或低速状态时, 电流表数值不为零, 表明叶轮转子处于非悬浮状态; 随着转速的增加, 会发现电流表数值处于波动状态, 表明电路中的电流是间断性, 叶轮转子处于非稳定悬浮状态; 当转速达到5 500 r/min后, 电流表数值为零, 表明叶轮转子处于完全稳定悬浮状态。

4.2 水力实验

在水力实验台, 使用甘油和去离子水的混合溶血模拟血液流体, 溶液密度 $\rho=1\,059\text{ kg/m}^3$, 粘度 $\mu=0.003\,6\text{ kg/m}\cdot\text{s}$, 实验转速设置为6 000 r/min, 出口流量分别设置为5、4、3 L/min, 实验测试结果如表2所示。

表2 实验与仿真出口压力对比
Tab.2 Comparison of export pressure between experiment and simulation

Item	Export flow/L·min ⁻¹		
	3	4	5
Simulation pressure/Pa	5 006	4 402	3 894
Experimental pressure/Pa	4 810	4 220	3 670
Error rate/%	4.0	4.1	5.8

从表中可以看出, 实验压力值与仿真压力值之间存在一定的误差, 且误差率较小, 说明仿真值具有较高的可信度。

5 结 论

(1)根据磁效应及液力动压效应设计的轴流血泵悬浮系统在轴向磁力与径向液力的共同作用下, 可以实现稳定的悬浮; 通过对悬浮转子系统进行仿真分析、实验, 可知在转速达到5 500 r/min时, 转子达到完全悬浮并可承受一定的负载; (2)通过仿真与压力实验分析可知在转速一定的情况下, 血泵进出口压差与流量成反比; 血泵的标准工况为: 转速为9 500 r/min、流量为6 L/min、进出口压差约为13.7 kPa, 满足人体生理要求; (3)磁液双悬浮轴流血泵的悬浮系统控制得到了简化, 系统热源减少, 降低了温升对血细胞造成的损伤。

【参考文献】

[1] SLAUGHTER M S, TSUI S S, EL-BANAYOSY A, et al. Results of a multicenter clinical trial with the thoratec implantable ventricular assist device[J]. Thorac Cardiovasc Surg, 2007, 133(3): 1573-1580.
[2] GOLDING L R, JACOBS G, MURAKAMI T, et al. Chronic nonpulsatile blood flow in an alive, awake animal 34-day survival[J]. Trans Am Soc Artif Intern Organs, 1980, 26(1): 251-255.
[3] 黄铭文, 胡业发, 吴华春. Pivot 支承的轴流式血泵特性仿真与实验

- [J]. 机械设计与研究, 2017, 33(5): 55-59.
- HUANG M W, HU Y F, WU H C. Simulation and experiment of the axial-flow blood pump buttressed by pivot[J]. Machine Design and Research, 2017, 33(5): 55-59.
- [4] 范灏. 具有周向分布楔形间隙结构的液力悬浮血泵设计与研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- FAN H. Design and research of hydrodynamic suspending blood pump based on wedge-like gap structure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [5] 韩青. 人工心脏液力悬浮支撑结构设计及其血液相容性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- HAN Q. Research on structure design and hemocompatibility of hydrodynamic bearing in artificial heart[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [6] 云忠, 龚中良, 谭建平, 等. 旋转叶轮血泵的发展与展望[J]. 生物医学工程杂志, 2005, 22(1): 151-154.
- YUN Z, GONG Z L, TAN J P, et al. Development and expectation of rotary impeller blood pump[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2005, 22(1): 151-154.
- [7] 张岩, 孙寒松, 胡盛寿. 左心室辅助血泵及其临床应用研究进展[J]. 中国胸心血管外科临床杂志, 2017, 24(2): 152-155.
- ZHANG Y, SUN H S, HU S S. Research progress and clinical application of ventricular assist blood pump[J]. Chinese Journal of Clinical Thoracic and Cardiovascular Surgery, 2017, 24(2): 152-155.
- [8] TASKIN M E, FRASER K H, ZHANG T, et al. Computational characterization of flow and hemolytic performance of the UltraMag blood pump for circulatory support[J]. Artif Organs, 2010, 34(12): 1099-1113.
- [9] 张钢, 孟庆涛, 钟永彦, 等. 五自由度全永磁轴承系统的稳定悬浮特性分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(5): 56-63.
- ZHANG G, MENG Q T, ZHONG Y Y, et al. Stable levitation performance analysis of five degrees of freedom all permanent magnetic bearing system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(5): 56-63.
- [10] 吴华春, 龚高, 王子彦, 等. 轴流式磁悬浮血泵流场数值模拟及溶血预测[J]. 中国机械工程, 2013, 24(3): 399-403.
- WU H C, GONG G, WANG Z Y, et al. Flow field numerical simulation and hemolytic prediction for axial flow maglev blood pump [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2013, 24(3): 399-403.
- [11] 云忠, 谭建平, 龚中良. 轴流血泵叶轮结构CFD仿真优化研究[J]. 机械设计, 2006, 23(10): 6-9.
- YUN Z, TAN J P, GONG Z L. Research of CFD simulative optimization on impeller structure of axial blood pump[J]. Journal of Machine Design, 2006, 23(10): 6-9.
- [12] 谢雄, 谭建平, 刘云龙. 轴流式血泵流体特性CFD研究[J]. 工程设计学报, 2014, 21(2): 154-160.
- XIE X, TAN J P, LIU Y L. Research on fluid properties of the axial flow blood pump based on CFD[J]. Journal of Engineering Design, 2014, 21(2): 154-160.
- [13] 李国荣, 朱晓东, 田步升, 等. 全悬浮微型心尖轴流泵左心辅助装置[J]. 医疗卫生装备, 2013, 34(10): 21-24.
- LI G R, ZHU X D, TIAN B S, et al. Development of miniature apex-axial pump with hydrodynamic-magnetically levitated impeller for heart assistance[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2013, 34(10): 21-24.
- [14] 钱坤喜, 曾培, 茹伟民, 等. 永磁体磁悬浮叶轮血泵的研制和实验研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(5): 86-88.
- QIAN K X, ZENG P, RU W M, et al. Prototype design and experimental study of a permanent maglev impeller blood pump [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(5): 86-88.
- [15] MCGEE E, CHORPENNINGB K, BROWN M C, et al. *In vivo* evaluation of the heartware MVAD pump[J]. J Heart Lung Transpl, 2014, 33(4): 366-371.
- [16] 高殿荣, 殷桂梁, 吴长奇, 等. 体外驱动全磁悬浮锥形螺旋叶片血泵原理及关键技术研究[J]. 数字制造科学, 2011, 9(2): 1-53.
- GAO D R, YIN G L, WU C Q, et al. Research on the principle and key technique of TMSCSI-BP-DOD[J]. Digital Manufacture Science, 2011, 9(2): 1-53.
- [17] 李景天, 宋一德, 郑勤红, 等. 用等效磁荷法计算永磁体磁场[J]. 云南师范大学学报, 1999, 19(2): 33-36.
- LI J T, SONG Y D, ZHENG Q H, et al. Calculation of magnetic field of permanent magnet by equivalent magnetic charge method [J]. Journal of Yunnan Normal University, 1999, 19(2): 33-36.
- [18] WU Y, ZHU L, LUO Y. Design and hemocompatibility analysis of a double-suction injection suspension blood pump using computational fluid dynamics methods[J]. Artif Organs, 2017, 41(1): 1-9.
- [19] 高殿荣, 王广义. 锥形螺旋轴流血泵流场三维数值模拟与分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 47-50.
- GAO D R, WANG G Y. Three dimensional numerical simulation and analysis of the flow field of a conical spiral shaft blood pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 47-50.
- [20] 胡其会, 张鸣远, 李景银, 等. 轴流式血泵水动力特性和生物相容性的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(8): 118-122.
- HU Q H, ZHANG M Y, LI J Y, et al. Numerical simulation for hydrodynamics and biocompatibility in an axial blood pump [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(8): 118-122.

(编辑: 陈丽霞)