

文章编号: 1004-7220(2024)03-0552-07

离心式血泵优化设计研究进展

张珂嘉¹, 吴鹏²

(1. 苏州大学 机电工程学院, 人工器官研究所, 江苏 苏州 215131;
2. 东南大学 机械工程学院, 江苏省微纳生物医疗器械设计与制造重点实验室, 南京 211189)

摘要: 人工心脏(血泵)应兼具优良的水力学性能和血液相容性, 血泵性能的提升依赖于良好的优化设计方法。本文对近年离心式血泵优化设计相关的工作进行总结, 首先回顾数值模拟方法的进展, 高保真度的流场数值模拟是进行血泵优化设计的先决条件; 接着主要从叶轮、蜗壳、间隙等方面概括优化设计的参数敏感性研究; 总结优化设计常用的几种方法, 包括参数敏感性研究、正交优化、机器学习/遗传算法、拓扑优化; 最后提出血泵优化设计的展望及存在的挑战。研究结果可为未来的血泵优化设计工作提供有益的借鉴和参考。

关键词: 血泵; 叶轮; 蜗壳; 优化设计; 数值模拟

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.03.026

Research Progress on Design and Optimization of Centrifugal Blood Pumps

ZHANG Kejia¹, WU Peng²

(1. Artificial Organ Technology Laboratory, School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215131, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Key Laboratory for Design and Manufacture of Micro-Nano Biomedical Instruments, School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Artificial hearts (blood pumps) exhibit excellent hydraulic performance and compatibility with blood. Improvement in blood pump performance depends on the design and optimization method. This review summarizes relevant work on designing and optimizing centrifugal blood pumps. First, the progress of numerical simulation methods is reviewed. High-fidelity flow field numerical simulations are prerequisites for design and optimization. The parameter sensitivity studies are summarized mainly from the aspects of the impeller, volute, and clearances. Several commonly used design and optimization methods have been summarized, including parameter sensitivity research, orthogonal optimization, machine learning/genetic algorithms, and topology optimization. Finally, the prospects and challenges for designing and optimizing blood pumps are discussed. This review provides valuable references and guidance for the future design and optimization of blood pumps.

Key words: blood pump; impeller; volute; design and optimization; numerical simulation

人工心脏的出现是人类治疗终末期心衰历史上的一次重大突破。人工心脏(血泵)经过几十年

的发展,已由最初的搏动式血泵逐步发展为当前的第3代血泵,实现了产品植入胸腔以及大规模临床

收稿日期: 2023-12-19; 修回日期: 2024-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(12072216), 国家自然科学基金中德合作与交流项目(M-0231)

通信作者: 吴鹏, 教授, E-mail: 101013707@seu.edu.cn

应用的革命性进步^[1]。然而,血泵内因转子运动引起的过高的非生理性应力会导致血液损伤,带来的并发症已成为血泵临床应用的最大桎梏。

传统血泵采用机械轴承,由血液润滑,轴承的摩擦以及周围流动死区会造成额外的血液损伤^[2]。第3代血泵采用非接触式轴承,其中磁悬浮血泵依赖磁场力实现转子悬浮,实现了悬浮力和流体运动解耦,避免了机械轴承摩擦发热、功耗等问题,国内外均已获得大规模临床应用^[3]。主流磁悬浮血泵通常采用较大的二次流道间隙以获得良好的血液冲刷性能,降低流道内应力,避免血流瘀滞(见图1)^[4]。然而,过大的间隙使得血泵内湍流强度更高。Wu等^[5]研究表明,湍流是血液损伤的重要因素之一;Gross-Hardt等^[6]研究指出,非设计工况下血泵内流动更加混乱,湍流效应更明显;Sobieski等^[7]通过溶血实验发现,磁悬浮血泵 Centrimag 的溶血水平高于机械轴承血泵 Rotaflow。因此,采用磁悬浮轴承并不是减小血泵血液损伤的充要条件,良好的流体力学设计对改善血泵整体的水力学性能和血液相容性仍然十分关键。

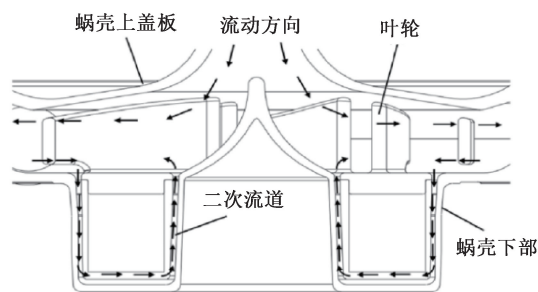


图1 磁悬浮血泵内流道示意图^[8]

Fig. 1 Schematic of the internal flow path of the magnetic levitation blood pump^[8]

血泵作为一种特殊的叶轮机械,其流道参数的设计往往遵循水力机械传统设计的经验公式。然而二次流的影响使得叶轮内的有效流量高出入口流量数倍,二次流对主流动的干扰使得叶轮内的流动更加混乱和三维。在这种情况下,使用传统经验公式确定叶轮参数的方法不再完全有效。复杂的流场结构也对使用数值模拟分析提出了较高的要求。不同于传统水力机械,血泵设计的目标函数还包括溶血、血栓形成风险等指标。国内外针对血泵优化设计的研究已见报道,取得了一些进展,但仍

面临诸多挑战。本文聚焦离心式血泵,首先回顾离心式血泵数值模拟方法的进展,接着阐述优化设计的参数敏感性研究,然后总结血泵优化设计方法的进展,最后论述血泵优化设计存在的挑战并进行展望。

1 血泵优化设计的数值模拟方法进展

在血泵优化设计过程中,计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)可以准确有效地揭示内部流场分布,是理解血泵力学特性和分析流动规律的有效工具。由于雷诺平均(Reynolds-average Navier-Stokes, RANS)方法有较低的计算成本且能满足一定的计算精度,目前仍是血泵CFD模拟采用的主要方法^[9]。Huo等^[10]研究指出,相比于RANS,大涡模拟(large eddy simulation, LES)方法能更好地预测湍流流场的复杂结构和捕获性能曲线。Torner等^[11]研究发现,LES可以提供更加丰富的瞬时流场细节。霍佳栋^[8]研究认为,RANS和LES方法对血泵优化设计趋势的指导存在区别,LES在血泵优化设计方面比RANS方法更具优势。

流场数值模拟精度一直以来都是备受关注的话题,对血泵优化设计也有着至关重要的影响。Wu等^[12]对网格失配的研究表明,全非结构网格比混合网格在动静交界面上的流动变量传输和流场数值模拟更加准确。Xiang等^[13]为血泵流场模拟进口边界条件的选择给出了实用的意见。研究并确定这些计算模拟中的不确定因素可以增加计算结果的鲁棒性,为血泵优化设计提供更加准确可靠的依据。

2 血泵优化设计的参数敏感性研究

优化问题寻优的复杂性和求解难度依赖于设计因子的数量。参数敏感性研究对所关心的单个设计参数进行分析,尽可能简化血泵优化设计变量和目标函数之间的关系,是血泵优化设计初期常用的优化方法。本文对血泵优化设计的主要参数及敏感性研究的近期进展做系统的回顾。

2.1 叶轮

叶轮(转子)是旋转机械的核心部件(见图2),叶轮设计的好坏与血泵水力学性能和血液相容性有着密不可分的影响。因此,血泵结构优化设计的大部

分工作着眼于叶轮。然而,叶轮本身包含多个设计参数,这些参数对血泵性能的影响各不相同。通常来说,血泵叶轮的关键参数包含以下几个方面。

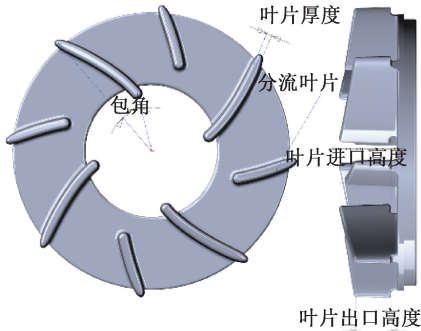


图2 叶轮设计参数

Fig. 2 Design parameters of the impeller

2.1.1 叶片数量 在叶轮设计阶段,叶片数量通常由与叶轮直径和叶片宽度相关的经验公式拟定。大多数离心式血泵的叶片数量为4~7片(不含分流叶片)。Li等^[14]研究了叶片数量与血泵性能之间的关系,发现随着叶片数量的增加,叶片对流动的约束增加,流动损失下降,压头增加。同时,叶片接触面积的增加和更少的有效流动区域导致摩擦损失增加,故溶血与叶片数呈正相关。Kannojiwa等^[15]研究也报道了类似的结论。

2.1.2 叶片包角 包角是叶片进口边与叶片出口边中间的夹角,包角越大则叶片越长。王芳群等^[16]对叶片型线的研究表明,直叶片式设计(0° 包角)会使叶道内出现分离涡和二次流,导致血泵性能下降。Ozturk等^[17]研究了不同叶片包角对血泵效率和溶血的影响。相比于直叶片设计,弯曲式叶片显著提高了流动性能与血液相容性, 120° 包角的血泵拥有最佳的性能。相对较大的包角能有效抑制湍流效应,降低流动损失。Wu等^[18]对叶片安装角研究表明,选择适当大安装角的叶片能够改善血泵溶血性能,提高血泵效率。

2.1.3 分流叶片 一些血泵采用分流叶片来更好地约束叶道内的流动。Bozzi等^[19]对比了一款离心式泵在含有分流叶片和没有分流叶片时的性能。分流叶片的存在减少了流动漩涡,使得流动更加稳定和规整,在较高转速下的改善更加明显。这与叶片数量对血泵性能的影响相似。然而没有分流叶片时的血液滞留时间更短,溶血水平也更低。这表

明对于长期使用的血泵应尽量减少叶片数量和分流叶片;而含有分流叶片的血泵则更适用于短期辅助且有更高稳定性要求时的场景。Kannojiwa等^[15]建议可以增加分流叶片,在允许的范围内适当增加剪切应力,以实现更高的压头和更均匀的流量分布。

2.1.4 叶片高度和厚度 叶片高度和厚度对血泵性能也存在较大影响。Kadir等^[20]对比了3种不同高度叶片血泵的溶血性能,结果发现,溶血最高可以相差超过1个数量级。Li等^[14]研究表明,将叶片厚度设置在1个适中的值,可以获得更高的效率和更低的溶血。这是由于过厚的叶片会导致较大的摩擦损失,而过薄的叶片由于对流动的干预不足,可能导致流动中存在较强的湍流效应。王晨等^[21]对FDA血泵的叶片进行倒角处理,结果表明,叶片顶部存在倒角时的血液损伤比没有倒角时低了1个数量级。

2.1.5 叶轮类型 Pan等^[22]对两组不同叶轮盖板面积的研究表明,增加盖板面积能够增加血泵的压头和效率,然而溶血和血栓形成的风险也在增加。Wiegmann等^[23]对比了不同叶轮类型对血泵性能的影响。结果显示,一方面,相比于半开式叶轮,尽管闭式叶轮的设计减少了高剪切应力的体积占比,然而中等应力水平的体积增加得更多,故半开式叶轮的血液相容性更佳;另一方面,虽然闭式叶轮的效率更高,然而其凝血风险也更高。

2.2 蜗壳形式

蜗壳是降低流速以将动能转化为压力能的水力部件(见图3)。良好的蜗壳设计应确保叶轮内的相对运动稳定,并尽可能减少压力损失。圆形蜗壳拆装简便且制造简单,但螺旋蜗壳中的径向力更小,血泵的效率也更高。两种设计在工程实际中均有使用。

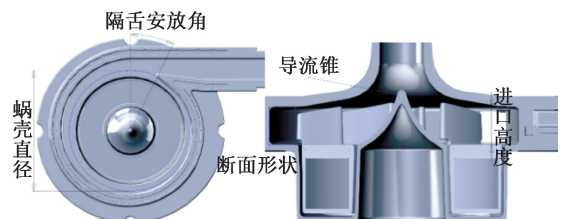


图3 蜗壳设计参数

Fig. 3 Design parameters of volute

Aka 等^[24]研究了隔舌安放角对血流动力学性能的影响。结果表明,血泵效率与隔舌安放角成反比。然而较大的角度改善了作用在叶轮上的径向力,故 20° 的舌角具有最佳的血液相容性和相对较高的效率。Li 等^[25]通过研究多种蜗壳参数对血泵性能的影响发现,隔舌安放角、蜗壳直径、进口高度、断面形状都是蜗壳设计的关键参数。Binder 等^[26]测量了蜗壳内部的流场,结果发现,蜗壳周围的流动不对称,径向力在血泵的非设计工况下更大,即蜗壳的形状会影响叶轮周围的压力分布和流动的均匀性。

部分血泵中存在导流锥,可改变进入叶轮的液体流动方向,减小叶轮所受的液体径向力。李卫东等^[27]研究了 7 种不同高度(0~6 mm)导流锥对血泵性能的影响,结果表明,具有高度为 6 mm 导流锥的血泵拥有最佳的血液相容性。

2.3 间隙尺寸

叶道内的间隙包含叶轮顶部间隙和磁悬浮转子二次流道的间隙,间隙尺寸会影响间隙内应力高低、二次流强度,对血泵的性能有较大影响,是血泵优化设计的关键因素之一(见图 4)。对于采用非接触式轴承的新一代血泵,不同间隙引起的流体力也会有很大差异,流体力会引起转子位移,并和其他力如磁场力耦合,为血泵的优化设计带来新挑战。

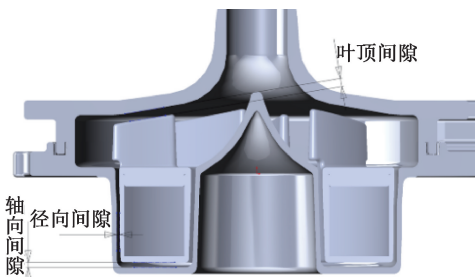


图 4 流道间隙示意图

Fig. 4 Schematic diagram of clearances in the pump

2.3.1 叶顶间隙 Wu 等^[28]研究了 3 种不同叶顶间隙(50、100 和 200 μm)泵的流动特性。不同叶顶间隙下的内流动具有不同的特征,叶顶间隙泄漏流与主流动之间存在相互干涉作用。研究发现,间隙为 100 μm 的泵具有最佳的血液相容性。Anderson 等^[29]将间隙缩小 50% 后发现,流道中的流速会降

低,泵效率也随之提高,然而导致间隙内剪切应力增加,血液相容性降低,说明血泵的叶顶间隙存在中间最优值。

2.3.2 二次流道径向间隙 Rezaenia 等^[30]对血泵间隙的研究表明,当间隙很小时,由于过高的剪切应力,溶血会上升;而当间隙过大时,由于二次流强度增加,血液在流道中的滞留时间也增加,溶血同样上升。该结果表明,二次流道径向间隙对血泵性能的影响与叶顶间隙类似,即为了兼顾水力学效率和血液相容性,间隙尺寸应设置在相对合理的范围内。Shida 等^[31]研究发现,扩大径向间隙是提高泵的血液相容性和径向稳定性的有效方法。Graefe 等^[32]对比了离心式血泵在 5 种流速和 4 种径向间隙下的流动模式。结果发现,非定常流动引起的径向速度波动可能高达时间平均值的 40%。此外,间隙对切向分量的影响是叶轮扭矩非稳态演变的关键参数。

2.3.3 二次流道轴向间隙 转子轴向位置的变化对磁悬浮血泵的性能有显著影响。Gil 等^[33]对 HVAD 的计算表明,低流量低转速下转子和蜗壳间的轴向间隙较小,溶血迅速增加,效率严重下降。Thamsen 等^[34]使用射线照相技术测量了 HVAD 的间隙,结果显示,间隙尺寸随着转速的增加而增加,在恒定转速下与流量和压头无关。较小的轴向间隙增加了血液损伤的风险。Fraser 等^[35]研究表明,将叶轮的轴向位置改变 3 mm 会导致轴向液力相差约 48%。Kosaka 等^[36]对一款闭式叶轮的离心式血泵转子所受磁力、浮力、重力、叶顶和叶底流体动压力进行受力分析,通过改变底部叶轮下盖板的面积调整轴承间隙和液体力。结果发现,轴向间隙与血液相容性存在很大关联。仅当间隙超过 60 μm 时,血泵的溶血水平才可与 BPX-80 相当。

3 优化设计方法

3.1 正交优化

在面对不止 1 个设计参数时,部分研究者选择采用正交优化方法。正交优化通过少量的分析,不仅可以比较各个因素间的主次关系,还可以了解整体的情况,得到最佳的设计组合。Huang 等^[37]对三

因素、三水平的一款离心泵进行正交优化设计,以效率和溶血为优化目标,得到了10个不同模型的CFD值,并从中选取了最优模型。霍佳栋^[8]通过5×6正交组合优化将血泵效率提升了1.8%。不过,正交优化方法仅适用于设计参数较少的情况。当参数过多时,正交阵列将会变得非常庞大,计算成本将会成倍增加。

3.2 机器学习/遗传算法

当目标函数较多且需要优化的参数较多时,参数敏感性研究和正交优化所需的计算量将十分庞大。此时,借助多目标函数的算法可以显著减少优化所需时间,在较短的时间内获得最优解。机器学习通常对较小的数据集进行训练可以得到所需结果,不过需要人工的特征提取,对操作者专业知识要求较高。国内外已有不少学者使用多目标算法,将血泵效率、扬程等作为优化的目标函数,对血泵多个设计变量进行多参数多目标的优化研究。

神经网络是一种模拟生物神经的机器学习方法,在对一定数量的样本进行训练后,它可以形成准确的预测模型。Yu等^[38]分析了一款轴流泵叶片设计参数对血泵性能的影响,该研究建立了CFD与神经网络相结合的多参数多目标性能预测模型,并与水力学实验与PIV实验的结果进行对比。Fu等^[39]通过遗传算法对一血泵进行了优化,体外溶血测试的结果显示,溶血指数仅1 mg/L,能够满足使用需要。戴伟峰^[40]利用遗传算法对目标函数进行寻优,获得了最佳的Pareto解集,优化后血泵效率提升5.63%,其研究采用的算法进程如图5所示。进化策略(evolution strategy, ES)也是一种全局优化方法,重组、变异和存活被调整以进化出更优的解决方案。Yu等^[41]结合ES和CFD对220种不同的血泵设计进行了训练。当不考虑需要优化的参数对象时,基于设计理论的CFD-O方法确实可以通过减少优化中涉及的独立变量个数来更快获得最优解。

3.3 拓扑优化

拓扑优化是根据给定的约束条件和性能指标,在给定的区域内对材料分布进行优化的数学方法,是结构优化的一种形式。通过拓扑优化可以在满足性能的前提下最大程度地减少材料用量,达到轻量化设计的效果。Aloson等^[42]研究表明,不同的拓扑

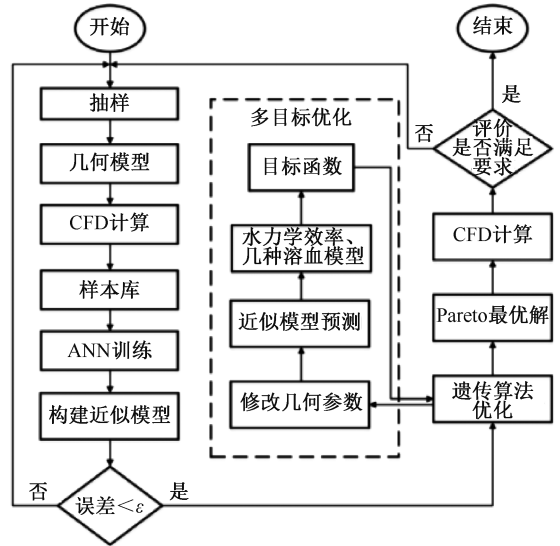


图5 遗传算法寻优的一般过程

Fig. 5 General process of the genetic algorithm

优化目标(能量耗散和溶血)会导致不同的拓扑结构。只有目标函数充分考虑到优化设计所需性能时,所得到的拓扑结构才可能是最合理的。

4 血泵优化设计的展望及挑战

不同于传统叶轮机械,血泵存在的高强度二次流和湍流使得对于设计传统水力机械的经验公式不再完全有效,高度三维和复杂的流动不仅对数值模拟方法提出了很高的要求,给血泵优化设计方法也带来了很大挑战。血泵血液相容性是血泵最重要的性能指标,除了溶血,还需考虑血小板、血管性血友病因子(von Willebrand factor, vwf)等其他血液损伤形式,其数值预测模型的可靠性仍有很大的改进空间,对优化设计也有很大影响^[43]。因此,需要继续发展适用于血泵优化设计、快速准确的流场和血液损伤数值模拟方法。此外,非接触式轴承血泵的转子在运行过程中受到流体力、磁场力等影响,是一个多物理场耦合的系统^[44],优化设计需要考虑这些因素,对系统整体进行优化。

血泵作为特种流体机械,一个显著特点是经常在动态、非设计工况下运行。受原生心脏冲击影响,血泵在临床应用中的实际流量处于脉动状态,而现有的基于CFD的优化设计大都只考虑少数的恒定工况。李寰^[45]进行了血泵在脉动条件下的CFD与体外溶血测试,结果表明,相比于恒定流工

况,处于脉动模式下的血泵流场将更加紊乱,对恒定流优化设计的结果未必同样适用于脉动工况。Gross-Hardt 等^[6]对体外血泵的研究结果表明,低流量工况($<2\text{ L/min}$)在临床应用中较为普遍,而这种工况下血泵的流场更加紊乱。因此,血泵的优化设计需考虑动态工况以及宽广范围的使用工况。

利益冲突声明:无。

作者贡献说明:张珂嘉负责文献阅读及汇总、论文主体部分撰写;吴鹏负责论文审核、写作指导及修改。

参考文献:

- [1] 许剑,王妍,周娜,等.人工辅助心脏国际发展趋势概述[J].中西医结合心血管病电子杂志,2018,6(7):16-17.
- [2] GOUBERGRITS L. Numerical modeling of blood damage: Current status, challenges and future prospects [J]. *Expert Rev Med Device*, 2006, 3(5): 527-531.
- [3] 钟敏,葛婉宁,张柳笛,等. BPX-80 离心式血泵中剪切力引发血管性血友病因子机械损伤的评价[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(4): 646-651.
- ZHONG M, GE WN, ZHANG LL, *et al.* Evaluation on mechanical damage of vWF Induced by shear stress in BPX-80 centrifugal blood pump [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(4): 646-651.
- [4] 牛迪,朱明新,冯海全,等.新一代左心室磁悬浮辅助泵血流动力学分析[J]. *医用生物力学*, 2019, 34(5): 468-472.
- NIU D, ZHU MX, FENG HQ, *et al.* Hemodynamic analysis on meglev left ventricular assist device of a new generation [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(5): 468-472.
- [5] WU P, GROSS-HARDT S, BOEHNING F, *et al.* An energy-dissipation-based power-law formulation for estimating hemolysis [J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2020, 19(2): 591-602.
- [6] GROSS-HARDT S, HESSELMANN F, ARENS J, *et al.* Low-flow assessment of current ECMO/ECCO2R rotary blood pumps and the potential effect on hemocompatibility [J]. *Crit Care*, 2019, 23(1): 348-357.
- [7] SOBIESKI MA, GIRIDHARAN GA, ISING M, *et al.* Blood trauma testing of CentriMag and RotaFlow centrifugal flow devices; A pilot study [J]. *Artif Organs*, 2012, 36(8): 677-682.
- [8] 霍佳栋. 基于大涡模拟的旋转式血泵高保真度数值模拟及优化设计研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2022.
- [9] WU P. Recent advances in the application of computational fluid dynamics in the development of rotary blood pumps [J]. *Med Nov Technol Devices*, 2022(16): 100177.
- [10] HUO JD, WU P, ZHANG L, *et al.* Large eddy simulation as a fast and accurate engineering approach for the simulation of rotary blood pumps [J]. *Int J Artif Organs*, 2021, 44(11): 887-899.
- [11] TORNER B, KONNIGK L, HALLIER S, *et al.* Large eddy simulation in a rotary blood pump: Viscous shear stress computation and comparison with unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes simulation [J]. *Int J Artif Organs*, 2018, 41(11): 752-763.
- [12] WU P, HUO JD, ZHANG ZJ, *et al.* The influence of non-conformal grid interfaces on the results of large eddy simulation of centrifugal blood pumps [J]. *Artif Organs*, 2022, 46(9): 1804-1816.
- [13] XIANG WJ, HUO JD, WU WT, *et al.* Influence of inlet boundary conditions on the prediction of flow field and hemolysis in blood pumps using large-eddy simulation[J]. *Bioengineering*, 2023, 10(2): 274.
- [14] LI Y, YU JC, WANG HY, *et al.* Investigation of the influence of blade configuration on the hemodynamic performance and blood damage of the centrifugal blood pump [J]. *Artif Organs*, 2022, 46(9): 1817-1832.
- [15] KANNOJIYA V, DAS A, DAS P. Numerical simulation of centrifugal and hemodynamically levitated LVAD for performance improvement [J]. *Artif Organs*, 2020, 44(2): 1-19.
- [16] 王芳群,李岚,王颢,等.基于粒子图像测速技术的血泵内流场研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2009, 28(4): 597-601.
- [17] OZTURK C, AKA I, LAZOGLU I. Effect of blade curvature on the hemolytic and hydraulic characteristics of a centrifugal blood pump [J]. *Int J Artif Organs*, 2018, 41(11): 730-737.
- [18] WU P, HUO JD, DAI WF, *et al.* On the optimization of a centrifugal maglev blood pump through design variations [J]. *Front Physiol*, 2021(12): 907.
- [19] BOZZI S, VESENTINI S, SANTUS M, *et al.* Fluid dynamics characterization and thrombogenicity assessment of a levitating centrifugal pump with different impeller designs [J]. *Med Eng Phys*, 2020, 83(7): 26-33.
- [20] KADIR M, AZIZ M, PADZILLAH M, *et al.* Numerical study of a left ventricular assist device (LVAD) with different blade heights and tip clearances [J]. *Int J Int Eng*, 2018, 10(4): 17-26.
- [21] 王晨,徐博翎,吴鹏.叶片倒角对 FDA 标准血泵流场和溶血预测的影响[J]. *医用生物力学*, 2019, 34(1): 58-63.
- WANG C, XU BL, WU P. Effects of rounding on prediction of flow field and hemolysis for the FDA benchmark blood pump [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(1): 58-63.

- [22] PAN G, CHANG Y, FU M. Computational fluid dynamics analysis of shroud design on hemodynamic performance and blood damage in a centrifugal blood pump [J]. *Comp Model Eng*, 2018, 116(2): 199-213.
- [23] WIEGMANN L, BOES S, DE ZÉLICOULT D, *et al*. Blood pump design variations and their influence on hydraulic performance and indicators of hemocompatibility [J]. *Ann Biomed Eng*, 2018, 46(3): 417-428.
- [24] AKA IB, OZTURK C, LAZOGLU I. Numerical investigation of volute tongue design on hemodynamic characteristics and hemolysis of the centrifugal blood pump [J]. *SN Appl Sci*, 2021, 3(1): 1-9.
- [25] LI Y, WANG HY, XI YF, *et al*. Impact of volute design features on hemodynamic performance and hemocompatibility of centrifugal blood pumps used in ECMO [J]. *Artif Organs*, 2022, 47(1): 88-104.
- [26] BINDER R, KNAPP R. Experimental determinations of the flow characteristics in the volutes of centrifugal pumps [J]. *Trans ASME*, 1936(58): 649-61.
- [27] 李卫东, 姚奇, 杜建军, 等. 基于 CFD 的液悬浮人工心脏泵叶轮入口优化分析[J]. *北京生物医学工程*, 2017, 36(1): 21-28.
- [28] WU JC, PADEN B, BOROVETZ H, *et al*. Computational fluid dynamics analysis of blade tip clearances on hemodynamic performance and blood damage in a centrifugal ventricular assist device [J]. *Artif Organs*, 2010, 34(5): 402-411.
- [29] ANDERSON J, WOOD H, ALLAIRE P, *et al*. Computational flow study of the continuous flow ventricular assist device, prototype number 3 blood pump [J]. *Artif Organs*, 2000, 24(5): 377-385.
- [30] REZAIENIA M, PAUL G, AVITAL E, *et al*. Computational parametric study of the axial and radial clearances in a centrifugal rotary blood pump [J]. *Am Soc Artif Intern Organs J*, 2018, 64(5): 643.
- [31] SHIDA S, MASUZAWA T, OSA M, *et al*. Effects of eccentric impeller position on radial passive stability in a magnetically levitated centrifugal blood pump with a double volute[J]. *Adv Biomed Eng*, 2018(7): 63-71.
- [32] GRAEFE R, HENSELER A, STEINSEIFER U. Multivariate assessment of the effect of pump design and pump gap design parameters on blood trauma [J]. *Artif Organs*, 2016, 40(6): 568-576.
- [33] GIL A, NAVARRO R, QUINTERO P, *et al*. CFD analysis of the HVAD's hemodynamic performance and blood damage with insight into gap clearance [J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2022(4): 21.
- [34] THAMSEN B, PLAMONDON M, GRANEGGER M, *et al*. Investigation of the axial gap clearance in a hydrodynamic-passive magnetically levitated rotary blood pump using X-ray radiography [J]. *Artif Organs*, 2018, 42(5): 510-515.
- [35] FRASER K, TASKIN M, ZHANG T, *et al*. The effect of impeller position on CFD calculations of blood flow in magnetically levitated centrifugal blood pumps [C]// *Proceedings of ASME Summer Bioengineering Conference*. Florida: ASME, 2010.
- [36] KOSAKA R, YASUI K, NISHIDA M, *et al*. Optimal bearing gap of a multiarc radial bearing in a hydrodynamically levitated centrifugal blood pump for the reduction of hemolysis [J]. *Artif Organs*, 2014, 38(9): 818-822.
- [37] HUANG B, GUO M, LU B, *et al*. Geometric optimization of an extracorporeal centrifugal blood pump with an unshrouded impeller concerning both hydraulic performance and shear stress [J]. *Processes*, 2021, 9(7): 1211.
- [38] YU Z, TAN J, WANG S, *et al*. Multiple parameters and target optimization of splitter blades for axial spiral blade blood pump using computational fluid mechanics, neural networks, and particle image velocimetry experiment [J]. *Sci Prog*, 2021, 104(3): 36-54.
- [39] FU M, GAO B, CHANG Y, *et al*. Application of hemodynamic optimization in the design of artificial heart [J]. *J Biomech Eng*, 2020, 37(6): 1000-1011.
- [40] 戴伟峰. 考虑湍流影响的磁悬浮离心式血泵多目标优化设计研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2021.
- [41] YU H, JANIGA G, DOMINIQUE T. Computational fluid dynamics-based design optimization method for archimedes screw blood pumps [J]. *Artif Organs*, 2015, 40(4): 341-352.
- [42] ALONSO D, SILVA E. Topology optimization for blood flow considering a hemolysis model [J]. *Struct Multidiscip O*, 2021, 63(5): 2101-2123.
- [43] WU P, BOEHNING F, GROß-HARDT S, *et al*. On the accuracy of hemolysis models in couette-type blood shearing devices [J]. *Artif Organs*, 2018, 42(10): 290-303.
- [44] WU TT, KHIR A, KUTTING M, *et al*. A review of implantable pulsatile blood pumps: Engineering perspectives [J]. *Int J Artif Organs*, 2020, 43(9): 559-569.
- [45] 李寰. 心室辅助装置溶血性能评价方法及叶轮优化设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.