

基于正交试验的离心式人工心脏泵叶片参数优化

孙丽颖¹, 穆璐璐², 肖媛², 吴小龙², 崔国民^{2*}

¹上海理工大学东方泛血管器械创新学院, 上海

²上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2025年9月27日; 录用日期: 2025年11月18日; 发布日期: 2025年11月26日

摘要

评价离心式人工心脏泵的性能主要通过水力特性和溶血特性两方面。为了在离心式人工心脏泵实验研究基础上, 探究叶片参数变化对性能的影响, 并优化离心式人工心脏泵的性能。通过正交试验设计的方法, 选取叶片转速、叶片数量、叶片出口角度和叶片厚度4个因素为变量, 以人工心脏泵扬程、效率和剪切应力三个作为离心式人工心脏泵的评价指标, 分析各因素对评价指标的影响以及影响的显著度, 同时探究出最优的叶片参数组合。研究结果表明, 相较于原始的实验数据, 更优的叶片参数组合为: 转速5000 r/min、叶轮数为4个、出口角度40°、叶片厚度0.6 mm。验证最优结构的性能: 扬程1.14 m、效率22%、剪切应力358.68 Pa。优化后的结构与原模型相比, 水力性能和溶血性能更优, 同时扬程满足人体的供血需求。

关键词

人工心脏泵, 叶片参数, 正交试验法, 水力性能, 溶血性能

Parameter Optimization of Centrifugal Artificial Heart Pump Blade Based on Orthogonal Test

Liying Sun¹, Lulu Mu², Yuan Xiao², Xiaolong Wu², Guomin Cui^{2*}

¹Oriental Pan-Vascular Devices Innovation College, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: September 27, 2025; accepted: November 18, 2025; published: November 26, 2025

*通讯作者。(崔国民, 教授, 博士研究生导师。研究方向: 换热网络, 人工心脏泵实验及模拟仿真研究。E-mail: cgm@usst.edu.cn)

文章引用: 孙丽颖, 穆璐璐, 肖媛, 吴小龙, 崔国民. 基于正交试验的离心式人工心脏泵叶片参数优化[J]. 生物医学, 2025, 15(6): 1159-1174. DOI: [10.12677/hjbm.2025.156125](https://doi.org/10.12677/hjbm.2025.156125)

Abstract

The performance of centrifugal artificial heart pumps is mainly evaluated through two aspects: hydraulic characteristics and hemolysis characteristics. In order to explore the impact of blade parameter changes on performance and optimize the performance of centrifugal artificial heart pumps based on experimental research. By using the method of orthogonal experimental design, four factors, namely blade speed, blade quantity, blade outlet angle, and blade thickness, were selected as variables. The head, efficiency, and shear stress of the centrifugal artificial heart pump were used as evaluation indicators. The influence of each factor on the evaluation indicators and their significance were analyzed, and the optimal combination of blade parameters was explored. The research results indicate that compared to the original experimental data, the optimal combination of blade parameters is: speed of 5000 r/min, 4 impellers, outlet angle of 40°, and blade thickness of 0.6 mm. Verify the performance of the optimal structure: head 1.14 m, efficiency 22%, shear stress 358.68 Pa. Compared with the original model, the optimized structure has better hydraulic and hemolytic performance, while the head meets the blood supply needs of the human body.

Keywords

Artificial Heart Pump, Blade Parameters, Orthogonal Test Method, Hydraulic Performance, Hemolytic Properties

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人口老龄化进程的加速,我国的城乡居民疾病死亡构成比中,心血管病仍位居首位[1]。每年我国有约 890 万心衰患者,其中 5%~7%已经进入终末期,这也就意味着超过 40 万患者需要接受心脏移植手术,然而,每年心脏移植只能进行 600 例左右,主要因为心脏移植供体稀缺[2] [3],目前更多的研究转向了左心室辅助装置或者人工心脏泵[4]等替代治疗方法。近年来人工心脏泵的总体发展十分迅猛,第 3 代人工心脏泵作为心脏泵领域的最新一代在包括心脏医疗服务与设备研发等领域潜力巨大[5] [6]。其中最具代表性的 HeartMateIII 产自美国的人工心脏医疗器械公司 Thoratec [7]。在国内由深圳核心医疗自主研发的 Corheart6,作为全球最小、质量最轻的全磁悬浮人工心脏于 2023 年 8 月正式发布。

本文研究主要应用计算流体力学(computational fluid dynamics) [8]技术来评价人工心脏泵性能。其中水力和溶血性能是评价人工心脏泵性能的重要指标,水力性能可以通过人工心脏泵的扬程和效率来体现,减小剪切应力能有效控制溶血和血栓的产生[9] [10]。Cibele da Silva 等[11]人对一种离心式的血泵进行实验研究其水力性能,并在动物体内进行实验研究其血液动力学特性。通过对血液压力、转速、速度、温度等研究得出离心式血泵能够在较低的转速下满足人体心脏的泵血功能。

叶轮作为人工心脏泵的重要部件,其参数变化对血泵水力和溶血性能有着直接的影响,目前许多研究针对叶轮分析和优化来展开。Silvia B.等[12]研究了个数分别为 6 片和 12 片的磁悬浮离心泵的性能,结果显示 6 片的叶片产生的切应力水平较低,能够降低血栓的产生,12 片的叶片在流速较高时性能更加稳定。胡婉倩等[13]通过改变离心式人工心脏泵的结构参数和运行参数,分析其对溶血性能的影响。对叶轮入口流量和叶轮转速进行优化设计,最终确定 7 L/min 的流量和 2300 rpm 的转速能有效降低血泵内标准

溶血值。刘泽辉等[14]研究了叶片厚度、出口角度、出口宽度以及是否设置分流4个因素对叶轮剪切应力分布和水力性能的影响,指出叶片厚度较小时会增大泵内及叶片表面的剪切应力,出口角度过大过小都会导致剪切应力增大,出口宽度与泵扬程呈正相关。

上述针对叶轮的研究中,主要分析单个因素的影响规律,对多个因素分析缺少具体的研究方法,此外,关于叶片参数对血泵水力及溶血性能的研究提及甚少。因此本文采用仿真数据与正交试验法[15][16]相结合,在考察了单一因素作用对血泵的性能影响的同时,通过正交表进行极差和方差分析,找到影响试验的最优因素和最优试验组合。

2. 实验数据及分析

针对一款离心式人工心脏泵,实物图及三维实体模型图如图1所示,搭建对应的离心式人工心脏泵实验台如图2所示,实验主要是测试离心式人工心脏泵的水力性能,以上实验台及建模图由上海市东方医院合作提供。通过实验数据与软件模拟结果的对照,验证建模及模拟仿真流程的准确性。在实验模拟的整个血液循环过程中,为保证测试结果的准确,使用40%体积比的甘油水溶液来代替血液进行试验,因为两者具有相似的密度和动力粘度[16]。

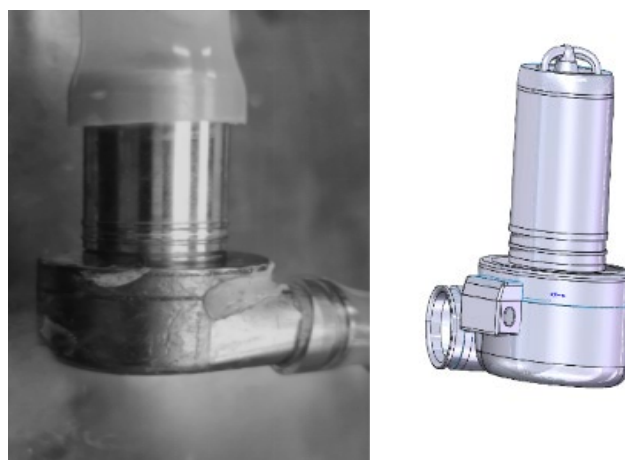


Figure 1. Physical and modeling diagram of a centrifugal artificial heart pump
图 1. 离心式人工心脏泵实物图及三维实体模型图

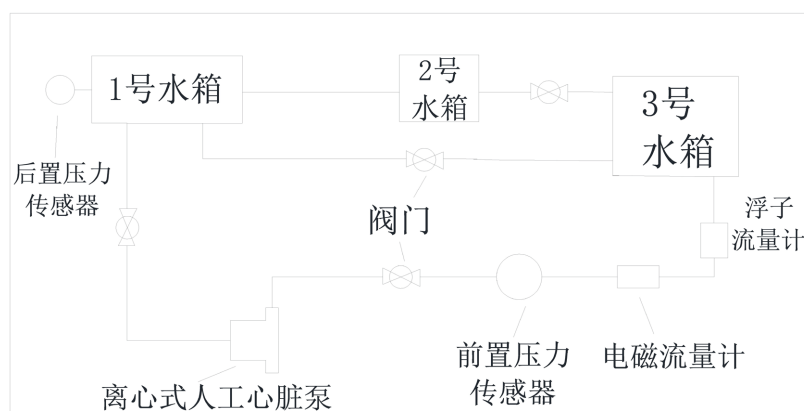


Figure 2. Experimental bench for centrifugal artificial heart pump
图 2. 离心式人工心脏泵实验台

这款离心式人工心脏泵的相关参数及实验台涉及的仪器型号如表 1、表 2 所示。

Table 1. Relevant dimensional parameters of blood pumps

表 1. 血泵的相关尺寸参数

指标名称	参数	单位
蜗壳半径	14.8	mm
蜗壳高	13	mm
转子半径	4	mm
转子高	33	mm
叶轮半径	8.75	mm
叶轮高	11	mm
叶片数	5	个
叶片厚度	0.4	mm
叶片出口角度	30	°
入口截面半径	5.5	mm
出口截面半径	5.5	mm
流速	5	L/min
转速	6.35	1000 rpm

Table 2. Instrument models of the experimental bench

表 2. 实验台仪器型号

仪器名称	仪器型号
浮子流量计	LIQUID-Sp.Gr.1.0
电磁流量计	SMR12GGX50KG/US-100
前后置压力传感器	HCP100-X-06-I-G12-B-T

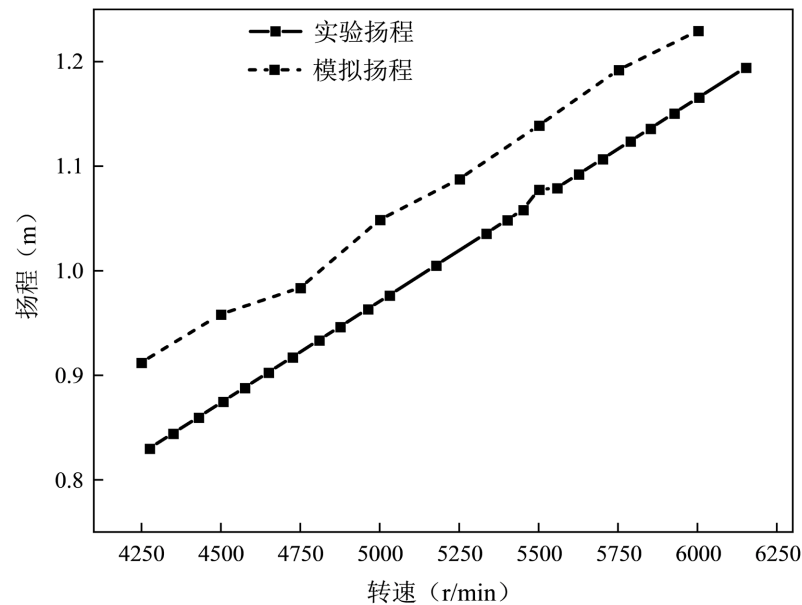


Figure 3. Artificial heart pump head change curve with speed

图 3. 人工心脏泵扬程随转速的变化曲线

为满足人体血流量 2~8 L/min 的需求,通过调节泵转速,控制浮子流量计开度,经过测试将转速调控范围控制在 4000 r/min~6000 r/min,使得泵流量满足人体需求,最终得到泵扬程随转速的变化曲线如图 3 所示。对比实验与模拟仿真的结果,扬程误差在 5%以内,证明了建模及模拟仿真流程的准确性。

3. 材料与方法

3.1. 人工心脏泵的三维建模及网格划分

以一款离心式人工心脏泵为研究对象,针对人工心脏泵的进口段、壳体、转子三部分,分别使用 UG10.0 和 Solidworks2022 完成初步建模。根据现有的人工心脏泵结构图,使用 UG 对结构进行重新绘制,如图 4(a)所示,通过 Solidworks 软件中的装配体、求差等选项对泵内流体域进行提取和切分,随后导入 ANSYS ICEM 软件中对进口段、叶轮、蜗壳三部分进行网格划分,如图 4(b)所示其中转子部分 Max element 设置为 0.3,其余结构部分 Max element 设置为 0.5,实现转子部分的网格加密,使得仿真结果更容易收敛。流域部分的网格划分如图 4(c)所示。网格数量为 1,757,228,转子区域网格质量加密为 0.3,进口段及蜗壳段正常划分网格质量为 0.7。

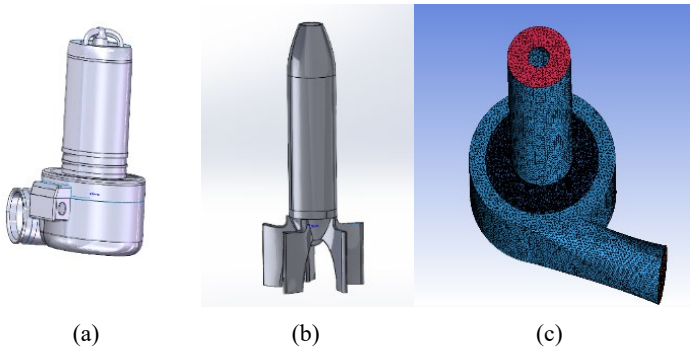


Figure 4. Artificial heart pump modeling structure diagram (a) Internal rotor modeling diagram (b) ICEM model encryption grid diagram (c)

图 4. 人工心脏泵建模结构图(a) 内部转子建模图(b) ICEM 模型加密网格图(c)

3.2. 计算域的网格无关性验证

在使用 ICEM 网格划分过程中,网格数量的多少也会对模拟结果产生一定的影响,结合文献[17][18]等网格划分后都进行了网格无关性的验证,因此针对本文研究的人工心脏泵模型,如表 3 所示,可知在网格数量超过 175 万后,数量变化引起的模拟结果的误差较小。因此在保证模拟精度的同时,尽量减少计算时间,选择 175 万网格数量的设置方法,对模型进行网格划分。

Table 3. Simulation results under different grid numbers

表 3. 不同网格数下的模拟结果

序号	网格总数	压力差/mmHg	效率/%
1	511,494	106.1961	27.4
2	828,316	106.1524	27.93
3	1,295,348	105.5527	27.36
4	1,757,228	105.0939	27.18
5	2,580,175	105.1228	27.11
6	4,268,807	105.1436	27.14

3.3. 边界条件设置

将划分好的网格导入到仿真软件 Fluent 2022R1 中进行流体动力学仿真分析, 粘性模型选择 k- ω (2 eqn)。介质属性设置为血液, 密度 $\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$, 动力粘度 $\mu = 0.0035 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。将转子的单元区域条件设置为运动参考系, 旋转速度设为 5000 r/min, 进口的表面设置为速度进口, 根据流量($Q = 5 \text{ L/min}$)和进口面积计算, 得到进口的流体速度 $v = 1.39 \text{ m/s}$; 出口的表面设置为压力出口, 叶轮的表面设置为移动壁面, 运动情况相对于相邻单元区域设置为旋转的; 在网络交界面设置将进口段、转子区域、蜗壳段三部分流域之间接触的表面设置为两组交互面, 保证血液的正常流入和流出。求解方法的设置为 SIMPLE, 空间离散选择 standard 压力求解器, 动量设置为 First Order Upwind; 残差设置为 1×10^{-5} , 以上完成设置人工心脏泵的仿真计算。

4. 讨论

4.1. 确定试验因素和评价指标

叶轮的几何参数很多, 若将所有参数都加入到试验因素中, 会使试验组数过多, 耗费时间, 因此为选取对性能影响显著, 且选取参数能基本反映人工心脏泵的整体结构, 结合参考文献[12]-[14]等研究, 选取叶轮转速, 叶片数量, 叶片出口角度和叶片厚度 4 个因素作为研究的重点。

离心式人工心脏泵的评价指标主要通过其水力和溶血性能来体现的, 水力性能体现在血泵的扬程和效率上; 剪切应力是计算溶血值的重要参数, 溶血值大小主要反映在泵体内某一位置的剪切应力最大值。因此将扬程、效率和剪切应力作为正交试验的 3 个评价指标。

为了准确探究 4 个因素对人工心脏泵的水力及溶血性能影响的显著程度, 分别在原始的离心式人工心脏泵结构参数基础上(原始泵结构参数: 转速 5000 r/min, 叶片数 5 个, 出口角度 30° , 叶片厚度 0.8 mm), 给因素选取合适的样本点, 即转速选取: 4000 r/min、4500 r/min、5000 r/min、5500 r/min、6000 r/min, 叶片数量选取: 4~8 个, 叶片出口角度选取: 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° , 叶片厚度 0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm、1.0 mm、1.2 mm。采用控制变量法进行以下分析。

4.1.1. 转速变化对人工心脏泵扬程、效率及剪切应力的影响

图 5(a)按照由左至右、由上至下的顺序, 依次展示了转速不断增加情况下, 泵体内剪切应力分布的云图。将云图的剪切应力分布设置等量的显示区间, 可以看出剪切应力较大区域主要分布在叶片外沿、根部和底部, 并且随着转速的增加, 剪切应力较大区域的范围不断扩大。从图 5(b)中的红色折线也可以得到同样的结论。这与胡婉倩[13]等研究所得的结论类似, 随着转速的增加, 血液在人工心脏泵内受到的剪切应力几乎呈现线性增加的趋势。同时从图 5(b)中可以看出, 效率随着转速的增加而减小, 当转速达到 5500 r/min 时, 效率到达最低点, 随后又随着转速的增加, 效率逐渐增大; 扬程随转速的增大而增大。在转速达到 5500 r/min 之前, 随着转速的增加, 叶轮的离心力和产生的剪切应力迅速增加, 使得轴功率的增加速率大于扬程的增长速率, 所以导致效率降低。当转速大于 5500 r/min 时, 叶轮的离心力和产生的剪切应力增长速度放缓, 使得扬程的增长速率超过了轴功率的增加速率, 所以效率开始增大。

因此, 转速对人工心脏泵的扬程、效率和剪切应力有着重要影响。在满足扬程需要同时尽可能减少剪切应力, 该人工心脏泵模型转速设置至少为 5000 r/min 才能满足需要。

4.1.2. 叶片个数对人工心脏泵扬程、效率及切应力的影响

图 6(a)为叶轮数不断增多情况下剪切应力的分布云图, 可以看出高剪切应力区域主要分布在叶片外沿、根部。从图例中高剪切应力区域可以看出, 叶轮数为 6 时产生较大的剪切应力, 数量为 7 时血泵产生剪切应力较小。由图 6(b)可以看出, 随着叶轮数的增加, 扬程逐渐增大, 这是由于叶轮数量影响了液体在实际流动过程中的滑移, 叶轮数越多, 产生的滑移就越小, 使得扬程增加; 剪切应力先增后减, 在

叶轮数为 6 时切应力取得最大值 373.98 Pa，在数量为 7 时取得最小值 354.54 Pa。

一方面，叶轮数的增加使得泵体内部整体速度的增大，内部的流场变化更加剧烈，使得剪切力增大，另一方面，随着叶轮数的增加，血液接触到每个叶片上的时间减少了，内部的流场也更加均匀，使得叶片剪切应力的减小；效率的变化总体上表现不明显，叶轮数为 6 时效率最高，为 8 个时效率较小，这是由于叶片数量的增加，对流动的挤压也相应的增大，使得泵体内流动更加均匀，也降低了叶轮的效率。

在保证扬程需要和高效率的前提下尽可能减小剪切应力，选取叶片数为 7 个的结构，能使人工心脏泵的性能最优。

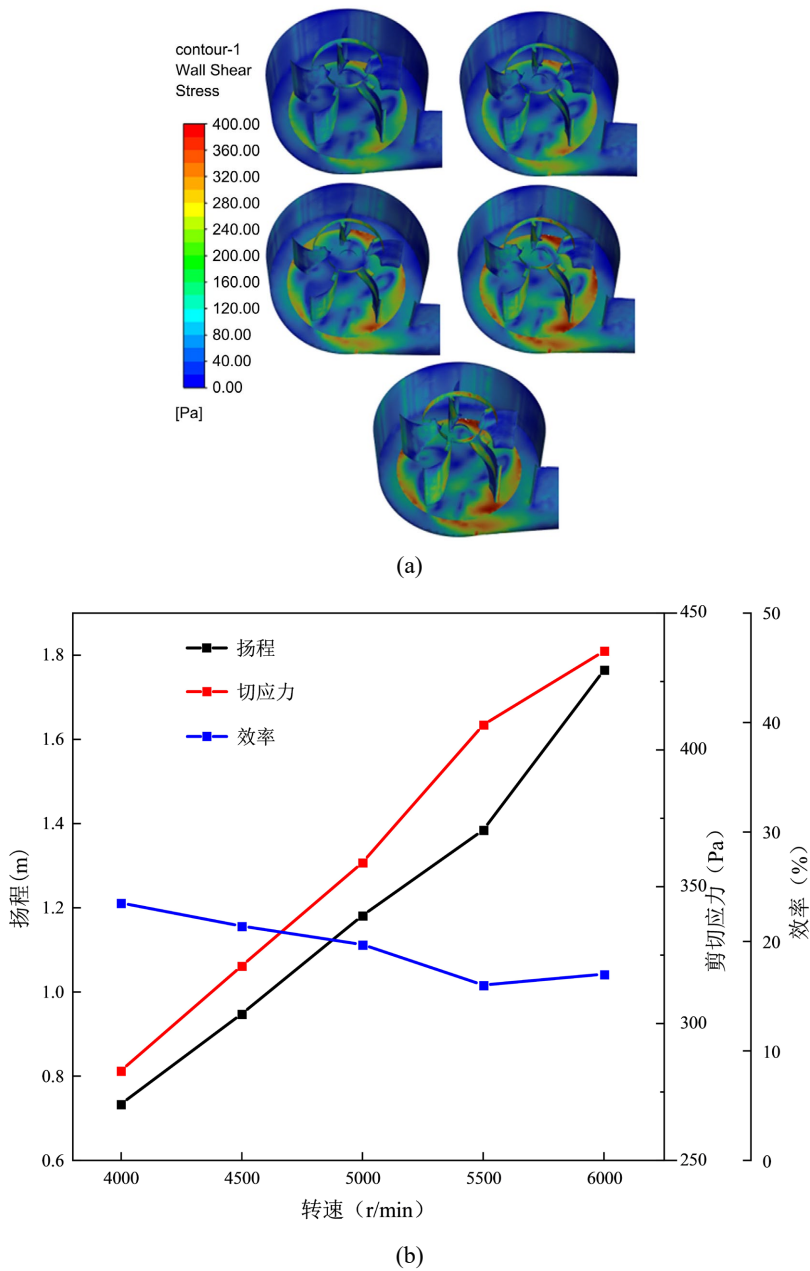


Figure 5. Distribution of shear stress in the pump at different speeds (a) Variation of pump head, shear stress and efficiency at different speeds (b)

图 5. 不同转速下泵体内剪切应力分布图(a) 不同转速情况下的人工心脏泵扬程、切应力和效率变化图(b)

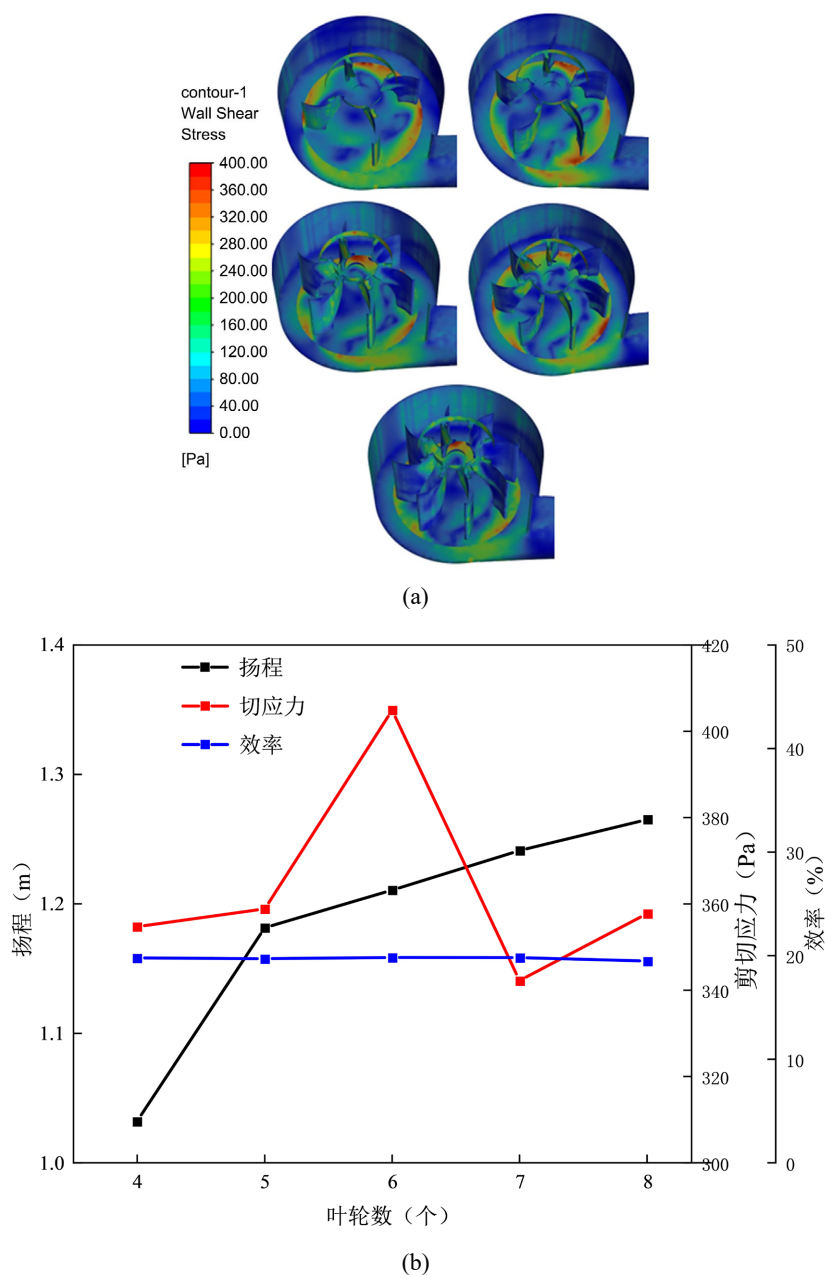


Figure 6. Distribution of shear stress in the pump with different number of impellers (a) Variation diagram of pump head, shear stress and efficiency with different number of impellers (b)

图 6. 不同叶轮个数下泵体内剪切应力分布图(a) 不同叶轮数情况下的人工心脏泵扬程、切应力和效率变化图(b)

4.1.3. 叶片厚度对人工心脏泵扬程、效率及切应力影响

图 7(a)为叶片厚度不断增加情况下剪切应力的分布云图, 高剪切应力区域主要分布在叶片尾缘和叶片根部, 并且随着厚度增加, 高剪切应力区域先增多后减少, 在 0.8 mm 厚度时高剪切应力区域所占范围最大, 随后高剪切应力区域又有所减小。这是由于较薄的叶片边缘更加尖锐, 使得在外缘处产生更大的剪切应力, 并且随着叶片的加厚, 效率和扬程也有不同程度的减小。正如图 7(b)所示, 随着叶片厚度的增加, 扬程和效率均大致呈现下降趋势。

因此不同叶片厚度情况会对人工心脏泵扬程、切应力和效率产生显著影响, 在满足扬程需求的情况

下，0.8 mm 厚度的叶片性能更优。

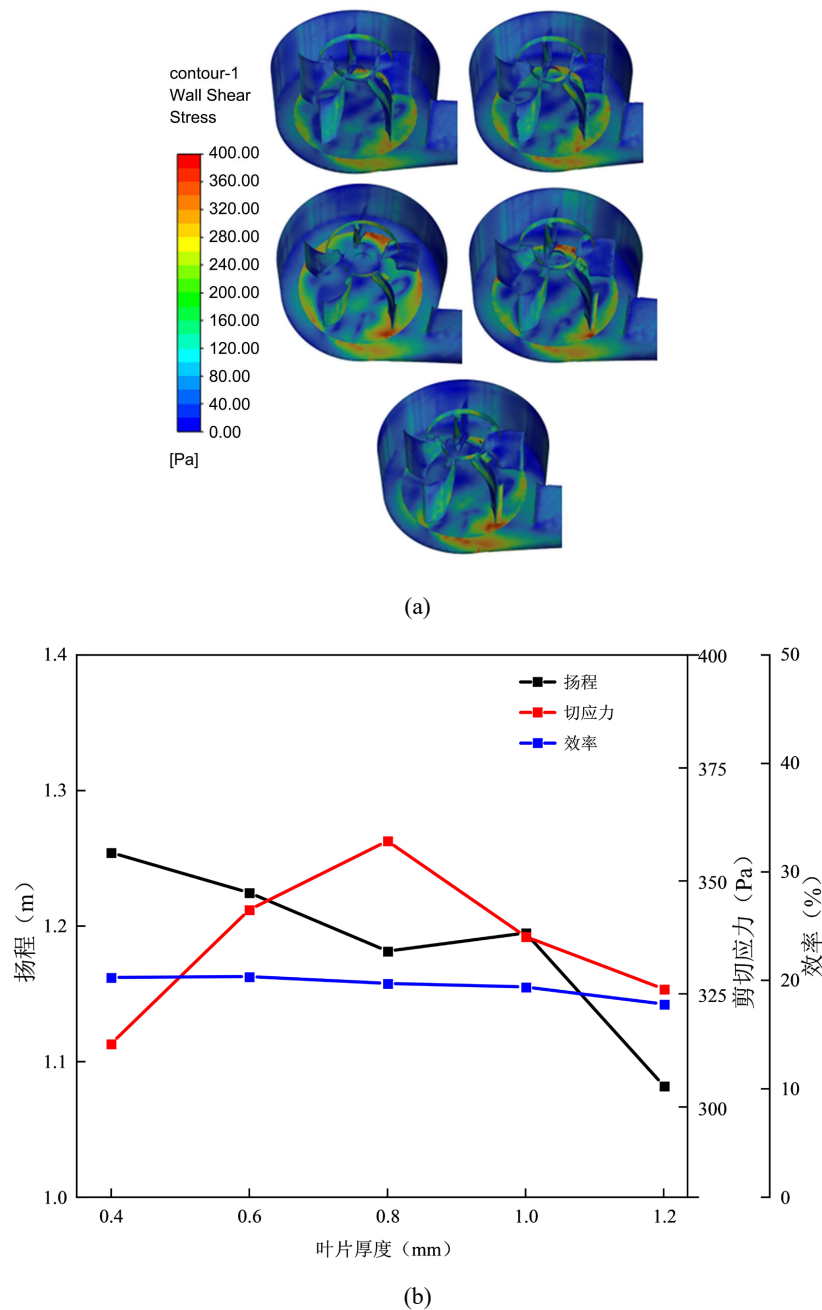


Figure 7. Shear stress distribution in the pump under different blade thicknesses (a) Variations of pump head, shear stress and efficiency under different blade thicknesses (b)

图 7. 不同叶片厚度下泵体内剪切应力分布图(a) 不同叶片厚度情况下的人工心脏泵扬程、切应力和效率变化图(b)

4.1.4. 叶片出口角度对人工心脏泵扬程、效率及切应力的影响

图 8(a)为出口角度不断增加的情况下剪切应力分布图，由于叶片的外缘流速较大，所以高剪切应力区域主要集中在叶片的外缘、根部和底侧，并且随着角度增加，高剪切应力区域先增多后减少。这是由于较大的出口角度提高叶轮出口处的绝对速度，叶轮与蜗壳的交接处的高、低速流碰撞加剧，导致流动

变的更加紊乱，从而剪切应力值增加。

由图 8(b)可知，扬程和效率均随着出口角度增加有一定程度的减小，扬程在 20°~40°有一定的回升。出口角度的增加，一方面增加了与蜗壳交界面的冲击损失，另一方面也减少了叶片与血液的摩擦损失。根据扬程的变化趋势，当出口角度在 20°~40°之间时，摩擦损失占据主要部分，因此扬程随角度的增大而增大。当出口角度大于 30°时，增大的冲击损失大于减小的摩擦损失，所以扬程和效率会随着角度的增大而减小。

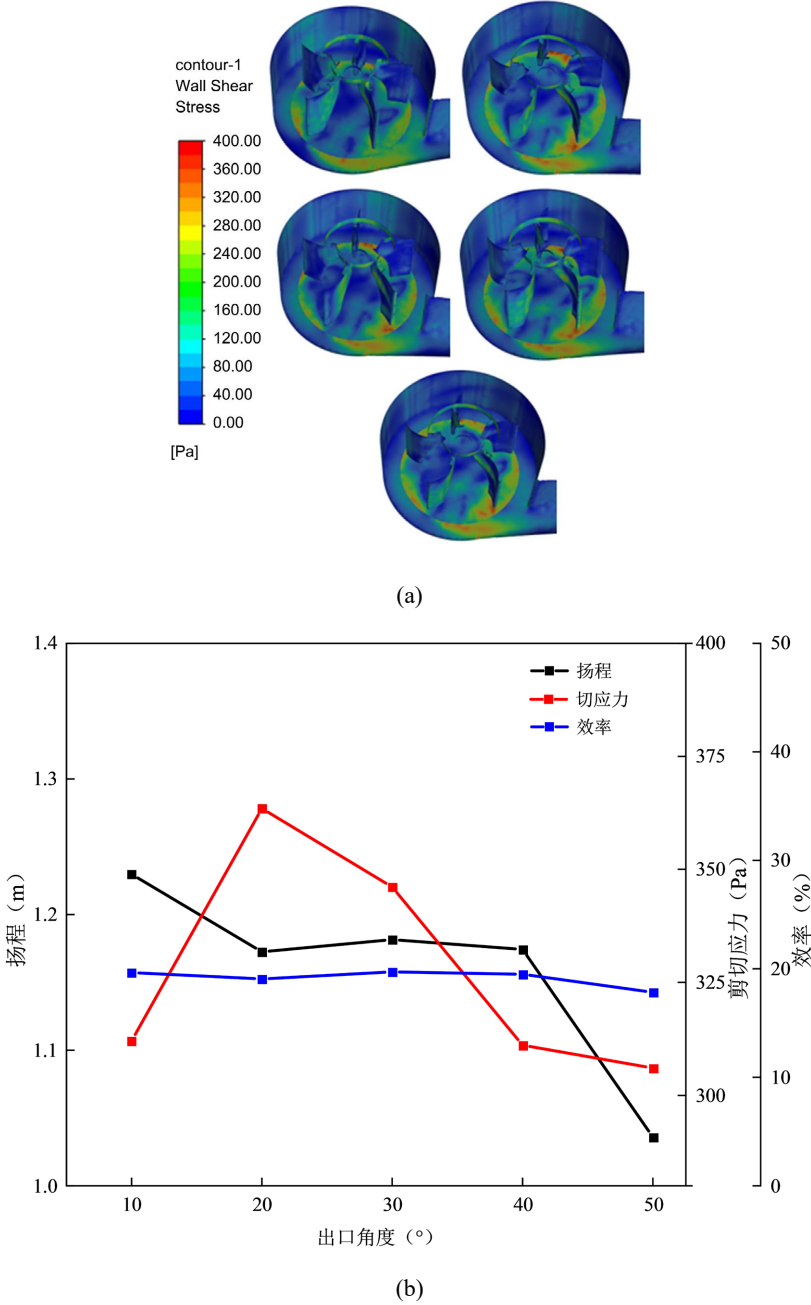


Figure 8. Shear stress distribution in the pump under different blade outlet angles (a) Changes in pump head, shear stress and efficiency under different blade outlet angles (b)

图 8. 不同叶片出口角度下泵体内剪切应力分布图(a) 不同叶片出口角度情况下的人工心脏泵扬程、切应力和效率变化图(b)

因此出口角度变化会对人工心脏泵扬程、效率及剪切应力产生显著影响，为减小剪切应力，选取出口角度 30°的叶轮结构性能最优。

以上的分析说明 4 个因素对人工心脏泵的水力及溶血性能均有不同程度的影响，为了进一步探究不同参数共同作用下离心式人工心脏泵性能的影响，进行了正交实验分析。

4.2. 正交试验表设计

正交试验通过建立合适规格的正交表，对不同因素的不同水平进行组合，从而找出各个因素对试验的影响规律和影响主次，同时找到最优的设计参数组合。根据上文的分析选取叶轮转速，叶片数量，叶片出口角度和叶片厚度 4 个因素进行正交试验设计，每个因素选取 5 个水平制定 L₂₅(5⁴)正交试验方案，分别对以上正交设计的 25 组试验方案，对叶轮结构建模，并模拟仿真，以剪切应力最值、扬程和效率作为评价指标，所得计算结果如表 4 所示。

Table 4. Orthogonal test table
表 4. 正交试验表

序号	试验因素				评价指标		
	转速 r/min	叶轮数/个	出口角度/°	厚度/mm	剪切应力/Pa	扬程/m	效率/%
1	4000	4	10	0.4	278.43	0.0057	27%
2	4000	5	30	0.6	254.04	0.0060	26%
3	4000	6	50	0.8	314.09	0.0054	23%
4	4000	7	20	1	283.94	0.0056	20%
5	4000	8	40	1.2	310.04	0.0050	18%
6	4500	4	30	0.8	331.75	0.0068	23%
7	4500	5	50	1	348.44	0.0064	20%
8	4500	6	20	1.2	334.36	0.0069	18%
9	4500	7	40	0.4	336.18	0.0076	23%
10	4500	8	10	0.6	510.02	0.0077	20%
11	5000	4	50	1.2	412.48	0.0079	20%
12	5000	5	20	0.4	329.22	0.0089	19%
13	5000	6	40	0.6	363.43	0.0089	20%
14	5000	7	10	0.8	406.27	0.0096	18%
15	5000	8	30	1	371.05	0.0090	18%
16	5500	4	20	0.6	412.53	0.0108	20%
17	5500	5	40	0.8	437.27	0.0103	18%
18	5500	6	10	1	394.11	0.0114	17%
19	5500	7	30	1.2	563.96	0.0103	14%
20	5500	8	50	0.4	518.98	0.0108	20%
21	6000	4	40	1	418.81	0.0117	17%
22	6000	5	10	1.2	529.83	0.0140	16%
23	6000	6	30	0.4	420.96	0.0135	17%
24	6000	7	50	0.6	455.98	0.0134	18%
25	6000	8	20	0.8	482.65	0.0140	16%

4.3. 模拟结果分析

根据模拟计算的结果，对评价指标的极差进行直观分析，分析不同因素对评价指标的影响程度和影响趋势，并试图找到最优的因素水平组合。

综合评价指标分析

考虑到以上不同评价指标下得到的最优叶片参数不同。为综合考量因素各个评价指标的影响，结合本文的评价标准，即选取的叶片参数需要满足：在满足扬程需求的同时，人工心脏泵的效率越高越好，剪切应力越小越好。对于像扬程这样满足范围及为最优的评价指标来说，它的指标值无法用一个分数来表示，这时候需要通过“隶属度”来表示评价指标的分数，对于扬程来说，满足范围 1.0355~1.5532 m 的隶属度为 1，范围之外隶属度为 0；对于效率来说，根据综合评分法来计算；对于剪切应力来说，由于评价标准是越小越好，所以将原始值的倒数带入综合评分法来进行计算。在权重的分配方面，结合参考文献[18]在正交设计中的权重选取办法，并结合本次研究的 3 个评价指标的重要性，将 3 个评价指标设定同等的权重，最终各自计算所得的隶属度与权重的乘积之和即为综合评分值。计算正交表中的 25 组试验，得到综合评分如表 5 所示。

Table 5. Comprehensive rating table
表 5. 综合评分表

序号	切应力隶属度	效率隶属度	扬程隶属度	综合评分
1	0.9213	1.0000	0	0.6404
2	1.0000	0.9372	0	0.6457
3	0.8062	0.7299	0	0.5121
4	0.9035	0.4624	0	0.4553
5	0.8193	0.3277	0	0.3823
6	0.7493	0.7105	0	0.4866
7	0.6954	0.4863	0	0.3939
8	0.7408	0.3295	0	0.3568
9	0.7350	0.6764	0	0.4704
10	0.1740	0.4541	1	0.5427
11	0.4888	0.4581	1	0.6490
12	0.7574	0.3985	1	0.7186
13	0.6470	0.4670	1	0.7047
14	0.5088	0.3470	1	0.6186
15	0.6225	0.3009	1	0.6411
16	0.4886	0.4803	1	0.6563
17	0.4088	0.3407	1	0.5832
18	0.5480	0.2358	1	0.5946
19	0.0000	0.0000	1	0.3333
20	0.1451	0.4559	1	0.5337
21	0.4683	0.2689	1	0.5791
22	0.1101	0.1744	0	0.0948
23	0.4614	0.1989	0	0.2201
24	0.3484	0.2959	0	0.2148
25	0.2624	0.1189	0	0.1271

从正交表中可以看出,第12组试验所得的综合评分最高,然而这组叶片参数是否为最优组合还需要对综合评分做极差分析,如表6所示。根据表中的 K_i ,即第 i 个水平数据的平均值,得到最优的叶片参数组合:转速 5000 r/min,叶轮数 4 个,出口角度 40° ,叶片厚度 0.6 mm。由于这组参数组合不存在于以上 25 组试验中,因此对该结构进行建模和模拟计算,得到该组的模拟结果:扬程 1.14 m、效率 22%、剪切应力 358.68 Pa,计算综合评分 0.7696,评分值高于正交试验的 25 组结果。同时根据表中的极差结果,得到各因素对综合评价指标的影响权重:叶片转速 > 叶片厚度 > 叶轮数 > 叶片出口角度。

Table 6. Range analysis of comprehensive scores

表 6. 综合评分的极差分析

	转速	叶轮数	出口角度	厚度
K1	0.405	0.604	0.524	0.490
K2	0.392	0.472	0.456	0.565
K3	0.760	0.471	0.446	0.454
K4	0.656	0.421	0.461	0.564
K5	0.241	0.488	0.568	0.381
极差	0.519	0.183	0.122	0.184

为了进一步定量分析各因素对综合评分的显著性影响,本研究进行了剪切应力、扬程、效率方差分析(ANOVA),如表7~9所示(F 临界值参考($\alpha = 0.05$): $F(4, 12) = 3.26$; $F(4, 12) = 5.41$ ($\alpha = 0.01$))。结果显示剪切应力转速的 F 值(26.70) > $F(4, 12, 0.01) = 5.41$,表明转速对剪切应力的影响高度显著。从均值看,转速越高,剪切应力越大。叶轮数的 F 值(4.07) > $F(4, 12, 0.05) = 3.26$,表明叶轮数对剪切应力的影响显著。出口角度和厚度的 F 值均小于临界值,表明它们对剪切应力的影响不显著。扬程转速的 F 值(206.32) 远大于 $F(4, 12, 0.01) = 5.41$,表明转速对扬程的影响高度显著。从均值看,扬程随转速增加而显著增加。出口角度的 F 值(7.12) > $F(4, 12, 0.01) = 5.41$,表明出口角度对扬程的影响也高度显著。从均值看,角度为 10° 时扬程最高。叶轮数的 F 值(5.52) > $F(4, 12, 0.05) = 3.26$,表明叶轮数对扬程的影响显著。厚度的 F 值小于临界值,影响不显著。效率转速的 F 值(10.60) > $F(4, 12, 0.01) = 5.41$,表明转速对效率的影响高度显著。但从均值看,效率随转速增加而下降。叶轮数、出口角度、厚度的 F 值均小于 $F(4, 12, 0.05) = 3.26$,表明这些因素对效率的影响均不显著。

Table 7. Variance analysis of shear stress

表 7. 剪切应力方差分析

因素	水平 1 均值	水平 2 均值	水平 3 均值	水平 4 均值	水平 5 均值
转速(Speed)	288.11	372.15	376.49	465.37	461.65
叶轮数(Impeller number)	350.80	381.76	385.39	409.27	426.79
出口角度(Outlet angle)	421.73	368.54	388.15	393.35	392.06
厚度(Thickness)	376.95	395.20	381.81	385.42	403.39

Table 8. Variance analysis of head

表 8. 扬程方差分析

因素	水平 1 均值	水平 2 均值	水平 3 均值	水平 4 均值	水平 5 均值
转速(Speed)	5.42	6.66	8.86	10.84	13.32
叶轮数(Impeller number)	8.58	9.12	9.22	9.34	9.84
出口角度(Outlet angle)	9.90	9.24	8.92	8.70	8.34
厚度(Thickness)	9.78	9.26	9.10	8.98	8.98

Table 9. Variance analysis of efficiency
表 9. 效率方差分析

因素	水平 1 均值	水平 2 均值	水平 3 均值	水平 4 均值	水平 5 均值
转速(Speed)	0.228	0.208	0.190	0.178	0.168
叶轮数(Impeller number)	0.214	0.198	0.192	0.196	0.180
出口角度(Outlet angle)	0.196	0.194	0.198	0.192	0.198
厚度(Thickness)	0.204	0.200	0.194	0.188	0.194

根据以上方差分析,可以得出以下结论:转速是最关键的因素。它对所有三个评价指标(剪切应力、扬程、效率)都有高度显著的影响。其中正面影响是提高转速能显著增加剪切应力和扬程,但提高转速会显著降低效率是其负面影响。在实际应用中,需要根据主要目标(如追求高扬程还是高效率)来权衡选择最佳转速。叶轮数同样是一个重要因素。它对剪切应力和扬程有显著影响,通常叶轮数增加,这两个指标也倾向于增加。它对效率的影响不显著。而出口角度对扬程有高度显著影响,存在一个最佳角度(从均值看,10°时扬程最高)。它对剪切应力和效率的影响不显著。厚度对所有三个指标的影响均不显著。这意味着在优化设计时,可以优先考虑其他因素,或者从成本、重量等其他角度来选择厚度。

4.4. 优化参数与文献对比分析

本研究得到的最佳叶片参数组合为:转速 5000 r/min、叶轮数 4 个、出口角度 40°、叶片厚度 0.6 mm。将这些优化结果与引言中提及的相关文献进行对比分析,以深入理解其流体动力学机制。

本研究进一步将叶轮数优化至 4 个,发现其在综合性能(包括低剪切应力、较高扬程和效率)方面表现更优。这可能是因为叶片数量在一定范围内,过少可能导致叶片间流道过宽,易形成回流和二次流,降低效率;但过多的叶片会增加叶片表面积,增加血液与叶片间的摩擦损失和剪切应力,且流道变窄也会增加局部速度梯度,不利于血液相容性。本研究中 4 片叶片可能在保证有效做功的同时,最大限度地减少了流道内的剪切和湍流强度,从而实现了更佳的血液相容性与水力性能平衡。本研究优化后的出口角度为 40°,这略高于原始模型的 30°。刘泽辉等[14]指出叶片出口角度过大或过小都会导致剪切应力增大。在 3.1.4 节的单一因素分析中,我们观察到扬程在 20°~40°之间有回升,且 30°的剪切应力性能最优。然而,在综合评估中,40°的出口角度因其对扬程和效率的积极作用,同时剪切应力仍在可接受范围内,使得综合评分最高。这可能表明在特定叶轮几何和转速下,40°的角度在叶片做功与冲击损失之间取得了更好的平衡,减少了叶片背面分离流的发生,改善了出口流场的均匀性,从而提升了泵的整体水力性能,且溶血风险增加不显著。转速(Speed)优化为 5000 r/min,与原始模型转速一致。这进一步印证了在满足人体供血需求的前提下,5000 r/min 是一个相对合适的转速。高转速虽然能提供更高的扬程,但如 3.1.1 节和胡婉倩等[13]研究所述,它会显著增加剪切应力,不利于血液相容性。5000 r/min 在此模型下既满足了生理需求,又将溶血风险控制在较低水平,是水力性能与溶血性能之间的一个良好平衡点。

5. 结论

1) 为了研究参数变化引起的血泵性能变化规律,采用正交试验法,选取叶片转速、叶片数量、叶片出口角度和叶片厚度 4 个设计因素,分析验证各因素对人工心脏泵扬程、效率及剪切应力大小的影响,同时找到影响扬程、效率及剪切应力大小的主要因素,即转速一定时,叶片出口角度对扬程的影响最大;在对效率的影响上,叶片厚度占比更大;叶轮数量对剪切应力的影响最为显著。

2) 通过对综合评价指标进行极差分析,得到的叶轮结构参数:转速 5000 r/min、叶轮数为 4、出口角

度 40°、叶片厚度 0.6 mm。研究结果表明, 最优人工心脏泵的性能: 扬程 1.14 m、效率 22%、剪切应力 358.68 Pa。优化后的结构与原模型相比, 水力和溶血性能更优。并得到各因素对综合评价指标的影响权重: 叶片转速 > 叶片厚度 > 叶轮数 > 叶片出口角度。

3) 为了研究参数变化引起的血泵性能变化规律, 并采用正交试验法, 根据极差和方差分析, 找到 4 种叶片参数对血泵性能影响的最优因素和最优组合, 为血泵叶片参数优化提供新的研究方法和思路。在未来工作中结合优化的叶片参数, 加工血泵实体结构, 通过实验数据对照仿真结果, 验证模拟的准确性。

6. 局限性与未来展望

本研究虽然通过正交试验和 CFD 模拟对离心式人工心脏泵的叶片参数进行了优化, 但也存在一定的局限性, 并为未来的研究提供了方向。

首先, 本研究的叶片参数优化是基于特定离心式血泵模型进行的, 其优化结果可能主要适用于当前研究的血泵结构。为了获得更具普适性的指导意义, 未来的研究应扩展到更广泛的叶片结构参数(如不同类型叶片、变截面叶片等), 并深入探究蜗壳等其他关键结构参数对血泵水力性能和溶血性能的影响。通过系统性的参数研究, 旨在总结出离心式血泵结构参数对整体性能影响的普遍规律。其次, 在溶血性能评估方面, 本研究主要关注剪切应力的大小, 但血细胞在高剪切应力场中的停留时间同样是诱发溶血的关键因素。单纯考虑剪切应力峰值并不能全面反映血泵的溶血风险。未来的研究应引入更完善的溶血预测模型, 如结合基于累积应力或应力-时间关系的溶血指数(Hemolysis Index)模型, 以更精确地量化和预测溶血性能。在此基础上, 可尝试建立叶片参数与溶血值之间的数学映射关系, 进而利用更先进的优化算法(如遗传算法、神经网络等)进行参数寻优, 以实现溶血性能的靶向提升, 这对于血泵的临床应用具有更高的参考价值。此外, 本研究主要依赖于计算流体力学仿真结果进行优化。尽管在初期进行了水力性能的初步测试, 但缺乏对优化后血泵实物的综合验证。下一步研究应着重于根据优化后的参数制造叶片实物, 并进行严格的体外实验验证, 包括水力性能测试、溶血性能评估以及声学性能测试。通过实验数据与仿真结果的对比分析, 不仅能够验证仿真模型的准确性, 还能确保优化设计的临床转化潜力和安全性。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(21978171, 51976126)。

参考文献

- [1] 马丽媛, 王增武, 樊静等. 《中国心血管健康与疾病报告 2022》要点解读[J]. 中国全科医学, 2023, 26(32): 3975-3994.
- [2] Rose, E.A., Gelijns, A.C., Moskowitz, A.J., Heitjan, D.F., Stevenson, L.W., Dembitsky, W., *et al.* (2001) Long-Term Use of a Left Ventricular Assist Device for End-Stage Heart Failure. *New England Journal of Medicine*, **345**, 1435-1443. <https://doi.org/10.1056/nejmoa012175>
- [3] Hershberger, R.E., Nauman, D., Walker, T.L., Dutton, D. and Burgess, D. (2003) Care Processes and Clinical Outcomes of Continuous Outpatient Support with Inotropes (COSI) in Patients with Refractory Endstage Heart Failure. *Journal of Cardiac Failure*, **9**, 180-187. <https://doi.org/10.1054/jcaf.2003.24>
- [4] 李世阳, 杨明, 蔡萍. 人工心脏的测控技术及其研究进展[J]. 北京生物医学工程, 2007(2): 216-219.
- [5] 刘鑫, 曲洪一, 王聪, 等. 第 3 代人工心脏泵研究进展及应用[J]. 中国生物医学工程学报, 2022(3): 339-350.
- [6] 张杰民. 第三代血泵的研究进展[J]. 中国胸心血管外科临床杂志, 2010(4): 321-325.
- [7] Bourque, K., Gernes, D.B., Loree, H.M., Scott Richardson, J., Poirier, V.L., Barletta, N., *et al.* (2001) Heartmate III: Pump Design for a Centrifugal LVAD with a Magnetically Levitated Rotor. *ASAIO Journal*, **47**, 401-405. <https://doi.org/10.1097/00002480-200107000-00020>

-
- [8] 陈佳, 王得水, 谷凯云, 等. 人工心脏泵辅助对左心室血流动力学影响的数值研究[J]. 北京生物医学工程, 2015, 34(4): 331-339.
- [9] 云忠, 向闯, 石芬. 血泵溶血的研究进展[J]. 生物医学工程研究, 2011(3): 194-198.
- [10] Sakota, R., Lodi, C.A., Sconziano, S.A., Beck, W. and Bosch, J.P. (2015) *In Vitro* Comparative Assessment of Mechanical Blood Damage Induced by Different Hemodialysis Treatments. *Artificial Organs*, **39**, 1015-1023. <https://doi.org/10.1111/aor.12499>
- [11] da Silva, C., da Silva, B.U., Leme, J., Uebelhart, B., Dinkhuysen, J., Biscegli, J.F., *et al.* (2013) *In Vivo* Evaluation of Centrifugal Blood Pump for Cardiopulmonary Bypass—Spiral Pump. *Artificial Organs*, **37**, 954-957. <https://doi.org/10.1111/aor.12230>
- [12] Bozzi, S., Vesentini, S., Santus, M., Ghelli, N., Fontanili, P., Corbelli, M., *et al.* (2020) Fluid Dynamics Characterization and Thrombogenicity Assessment of a Levitating Centrifugal Pump with Different Impeller Designs. *Medical Engineering & Physics*, **83**, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2020.07.008>
- [13] 胡婉倩, 李学敏, 徐林, 等. 流量与叶片出口宽度对离心人工心脏泵溶血性能的影响[J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(10): 1581-1587.
- [14] 刘泽辉, 张松, 屈一飞, 等. 基于计算流体动力学仿真的离心式人工心脏泵叶片参数优化[J]. 工具技术, 2021(10): 51-57.
- [15] 王欣宇, 翟林鹏, 汤方平, 等. 不同导叶参数对箱涵式轴流泵装置水力性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(5): 440-446.
- [16] 杨剑秋, 王延荣. 基于正交试验设计的空心叶片结构优化设计[J]. 航空动力学报, 2011, 26(2): 376-384.
- [17] 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]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2021.
- [18] 李卫东. 离心式人工心脏泵血流动力学特性分析与优化研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.