

模型血泵相似性设计及验证

张根广^{1,2}, 张鸣远¹, 杨万英¹, 朱宪然¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100, 杨凌)

摘要: 以日本磁悬浮离心式血泵为原型, 设计制作了放大2倍的模型泵, 用不同流体对泵的相似性进行实验验证发现, 模型泵和原型泵具有很好的相似性; 采用黄原胶溶液模拟血液流体比水的相似性更好, 质量分数为0.06%和0.04%的溶液比其他浓度溶液更接近血液流体. 在溶液浓度较低时, 溶液的非牛顿特性对离心泵的相似设计影响较小, 模型泵实测相似临界雷诺数和转速分别与相似设计的临界雷诺数和转速一致; 在溶液浓度较高时, 溶液的非牛顿特性对离心泵的相似设计影响较大, 模型泵实测相似临界雷诺数和转速远小于相似设计的临界雷诺数和转速.

关键词: 非牛顿流体; 黄原胶溶液; 相似设计; 离心式血泵

中图分类号: TK123 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)01-0032-04

Centrifugal Blood Pump Model Design and Verification Test

ZHANG Genguang^{1,2}, ZHANG Mingyuan¹, YANG Wanying¹, ZHU Xianran¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract: A 2 : 1 scaled-up model of the Kyoto-NTN magnetically suspended impeller centrifugal blood pump (MSCBP) selecting water and aqueous Xanthan gum solutions as working fluid was designed and tested. The results show that the present model pump performances are similar to those of the prototype, and it is better for similarity to replace blood with aqueous Xanthan gum solution than with water. It is noted that at lower concentration of solutions, the critical Reynolds number or rotary speed measured in the present pump coincides with the design value; in contrast, an obvious effect of non-Newtonian behavior on the dynamic similarity design and the measured value is extremely lower than the design value at high concentration.

Keywords: non-Newtonian fluid; aqueous Xanthan gum solution; dynamic similarity design; centrifugal blood pump

微型血液泵是一种能够部分或全部替代人体心脏泵机能的机械辅助循环装置, 在提高心衰等心血管疾病的治疗水平、降低心血管病人的死亡率、提高治愈率和改善病人的生活质量等方面起着非常重要的作用.

轴流式和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, 因此这种血泵对血液存在着潜在的损害^[1-2]. 研究发现: 溶血往往产生在高切应力作用区域和血液运动方向突然发生改变的泵壳

区; 血栓则常常在低流速区和回流停滞区形成. 因此, 为了设计一个运转性能良好, 没有溶血和血栓产生的旋转驱动式血泵, 常常需要借助原型实验、模型实验或数值模拟对血泵的流场和运行特性进行研究, 而原型实验和模型实验常常又比数值模拟更令人信服. 由于血液的快速凝固性和不透明性^[3-6]等原因, 使血液不便于人工心脏和人体主动脉搏管等大容量的流体观测实验或存储. 因此, 目前利用原型泵和模型泵进行实验的一些研究学者中除 Akamat-

su^[7]曾经采用血液流体进行过实验研究外,绝大部分学者多采用水、水和甘油混合液或空气^[8-9]等流体作为实验工质。采用这些工质进行实验研究为血泵叶轮、叶片、涡壳等部件的优化设计提供了一定帮助。但是,血液流变特性表明,血液是非牛顿流体,具有微弱的黏弹性。Akamatsu^[7]用血液和水甘油混合液实验发现,血液的水力特性曲线高于水和甘油混合液的水力特性曲线;Miklosovic^[6]用水和黄原胶溶液分别模拟原型泵,发现在满足相似条件下,黄原胶溶液的相似特性曲线低于水的相似特性曲线,最大影响可达 10% 左右,而若要使黄原胶溶液的特性曲线与水的特性曲线重合,则水和黄原胶流体在泵中的旋转速度对应的临界雷诺数比值将达到 2.5;Chua^[8]的实验结果表明,在模型泵的转速达到与原型泵工作点相似的转速时,虽然模型泵各转速的归一化特性曲线与原型泵的归一化特性曲线总的趋势一致,但彼此并不重合。

鉴于上述情况,作者根据叶片泵的相似准则,以日本的磁悬浮离心式血泵^[7]为原型,设计制作了放大 2 倍的模型泵,并采用不同流体对泵的相似性进行了实验验证。

1 实验回路及模型泵设计制作

模型泵实验回路系统(见图 1)由水箱、内径为 24 mm 的有机玻璃进水管、内径为 32 mm 的出水管、血液泵、电机、HLP-A 型分频计、直读式电磁流量计、DP1151 型差压计及调节阀等组成。差压计通过 818HG 型数据采集板与计算机连接,采样频率为 1 kHz,采样时间为 1 s。

模型泵以日本的磁悬浮离心式血泵^[7]为原型,以水和黄原胶溶液作为实验工质。模型泵相似设计基于下述 3 个相似律(雷诺数相等、归一化流量相等和归一化扬程相等)

$$\frac{N_P D_P^2}{\nu_P} = \frac{N_M D_M^2}{\nu_M}; \quad \frac{H_P}{n_P^2 D_P^2} = \frac{H_M}{n_M^2 D_M^2}$$

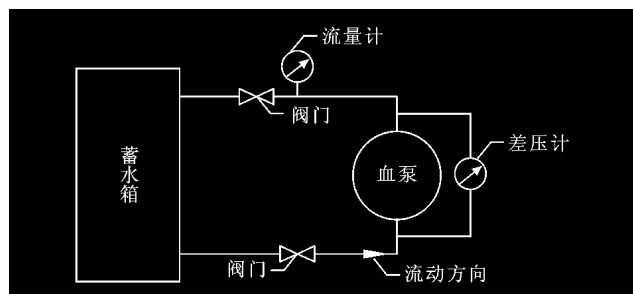
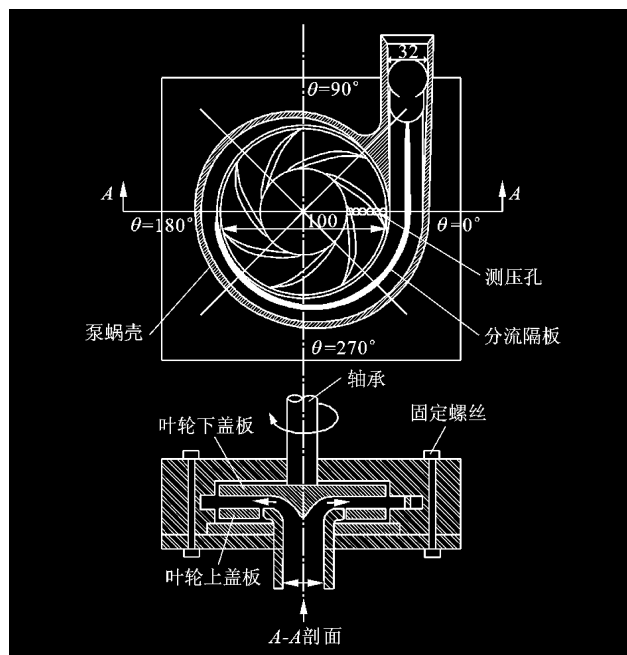


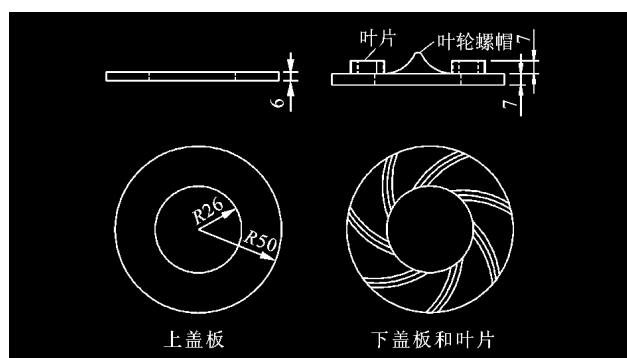
图 1 模型泵实验回路系统

$$\frac{Q_P}{n_P D_P^3} = \frac{Q_M}{n_M D_M^3}$$

根据上述相似律,将原型泵放大 2 倍。模型泵和原型泵的有关参数及尺寸见表 1 和图 2。



(a) 模型泵构造图



(b) 叶轮结构图

图 2 模型泵及叶轮构造图(单位: mm)

由表 1 可见,原型泵实验工质为血液,表观黏度为 0.003 3 Pa·s,工作点的转速、流量和扬程分别为 2 000 r/min、0.083 L/s 和 15 993.6 Pa;模型泵实验工质分别采用了水和 4 种黄原胶溶液。黄原胶溶液属于典型的非牛顿流体,具有较强的剪切稀化特性^[6-10],与血液的流变特性相似。研究表明,质量分数为 0.04% 和 0.06% 的黄原胶溶液,其流变特性与血液的流变特性匹配良好^[10]。

在液体温度恒定时,水的黏度为恒定值 0.001 Pa·s;黄原胶溶液的表观黏度虽然随着剪切速率的变化而变化,但在剪切速率 $\dot{\gamma} \geq 1\,500\text{ s}^{-1}$ 后,其表观黏度基本趋向稳定值,因此以 $\dot{\gamma} = 1\,500\text{ s}^{-1}$ 的 4 种

表1 原型泵和模型泵的有关参数

参数	原型泵		模型泵			
	血液	水	黄原胶质量分数/%			
			0.20	0.04	0.06	0.10
密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1 055	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
表观黏度 $\mu/\text{Pa} \cdot \text{s}$	0.003 3	0.001 0	0.002 0	0.003 0	0.004 1	0.005 2
扬程 H/Pa	15 993.6	367.2	1 513.0	3 393.2	6 052.2	9 966.3
转速 $N/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	2 000	152	308	461	615	789
流量 $Q/\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	0.083	0.051	0.103	0.154	0.205	0.263
叶轮直径 D/mm	50	100	100	100	100	100
雷诺数	25 253	25 253	25 253	25 253	25 253	25 253
比转数 n_s	46.2	46.2	46.2	46.2	46.2	46.2

溶液的表观黏度值 0.002 0、0.003 0、0.004 1、0.005 2 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 分别作为上述几种溶液的极限表观黏度。可以看出,质量分数为 0.06% 的溶液的表观黏度(0.003 $\text{Pa} \cdot \text{s}$)和血液的最接近。根据雷诺数相等的相似条件,当模型泵转速(以水和 4 种溶液为工质)分别达到 152、308、461、615 和 789 r/min 时,才能使模型泵和原型泵达到运行工况相似。

由图 2 可见:模型泵和原型泵的区别是,原型泵采用磁悬浮式叶轮,模型泵则采用轴承驱动式叶轮;模型泵的叶轮螺帽随着叶轮一起旋转。模型泵的蜗壳和叶轮上下盖板采用有机玻璃制作,叶片采用黄铜加工;叶轮包含 7 个叶片,螺旋角为 40° ,与文献[7]中的 A7 叶轮对应。泵的转速采用变频器控制。

为测量泵壳与叶轮缝隙间的压差分布,将蜗壳的前盖板进行了改造,使前盖板可以自由转动,并在前盖板上径向线性布设 6 个测压孔(半径 r 分别为 28、31.6、35.5、40.1、43.8、48 mm),分别和原型泵测压孔对应。测量压差时,首先将布置测压孔的径向方向对正 0° ,固定好螺栓,并启动电机使模型泵转动,当 6 个孔的压差(指该测孔与泵进口处的压差)数据采集完成后,关闭电机,再转动前盖板到一个新角度重新测量。本实验测量角度间隔为 5° 。

2 模型泵与原型泵相似性验证

2.1 归一化特性曲线验证

图 3~图 5 分别点绘了模型泵的归一化水力特性曲线随转速(雷诺数)增加逼近相似特性曲线的过程。图中归一化扬程 $\Psi = H/(\rho r^2 \omega^2)$,归一化流量 $\Phi = Q/(2\pi r^2 b \omega)$, H 为扬程(Pa), ρ 为密度(kg/m^3),

r 为叶轮外径(m), ω 为旋转角速度(rad/s), b 为叶片宽度(m)。

由图 3 可见:用水作为工质,归一化水力特性曲线逼近相似曲线的临界雷诺数为 25 253(对应转速为 152 r/min),当模型泵转速 $N > 150 \text{ r/min}$ 时,所有工况的归一化点群均落在一条相似曲线上,与原型泵特性曲线趋势一致;反之,当 $N < 150 \text{ r/min}$ 时,模型泵的归一化点群则落在相似曲线之下,实验结果与模型泵相似设计的转速和雷诺数一致。图 4、图 5 分别是质量分数为 0.04% 和 0.2% 的两种黄原胶溶液的归一化特性曲线,可以看出:对于质量分数

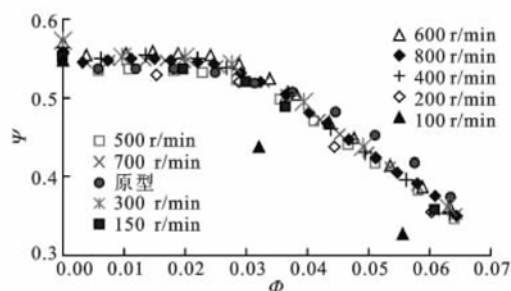
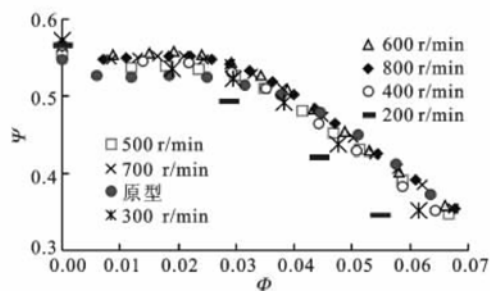


图3 原型泵和模型泵(水)运行特性曲线比较

图4 原型泵和模型泵($w=0.04\%$ 的溶液)运行特性曲线比较

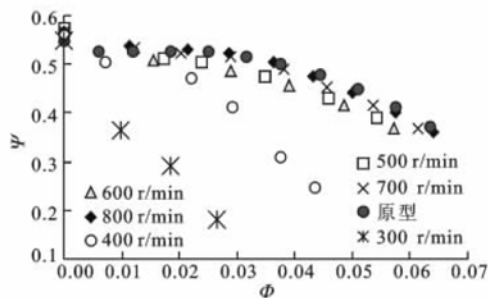


图5 原型泵和模型泵($w=0.2\%$ 的溶液)运行特性曲线比较

为 0.04% 的溶液,归一化水力特性曲线逼近相似特性曲线的临界雷诺数为 24 390(转速 300 r/min),与模型泵相似设计的临界雷诺数和转速基本一致;对于质量分数为 0.2% 的溶液,模型泵在雷诺数达到 16 026(转速 500 r/min)时,其所有工况的归一化点群均落在一条相似曲线上,远小于模型泵相似设计的临界雷诺数和转速.由此可见,非牛顿流体特性对离心泵相似性设计具有较大影响.此外,从上述 3 个图还可以看出:在 $\phi < 0.025$ 时,水和黄原胶溶液的点群略高于原型水力特性曲线;在 $\phi > 0.035$ 时,黄原胶溶液的点群已接近原型水力特性曲线,水的点群则略低.由此可见,非牛顿流体相似特性曲线与原型水力特性曲线更相似.上述情况同样也出现于质量分数为 0.06% 和 0.1% 的溶液.

通过对原型泵和模型泵在工作流量时的实测扬程值进行比较可知:质量分数为 0.06% 的溶液的实测扬程值与设计值差别最小,约为 5.9% ,而质量分数分别为 0.04% 、 0.1% 和 0.2% 的 3 种溶液,其误差分别为 9.0% 、 9.8% 和 10.5% ;水为牛顿流体,与血液特性差别最大,故其误差也最大,为 11.8% .由此可见,与血液特性越接近的流体,其扬程实测值误差越小.

2.2 模型泵工作点工况压强分布相似性验证

图6给出了第3测孔($r=35.5\text{mm}$)与进口压

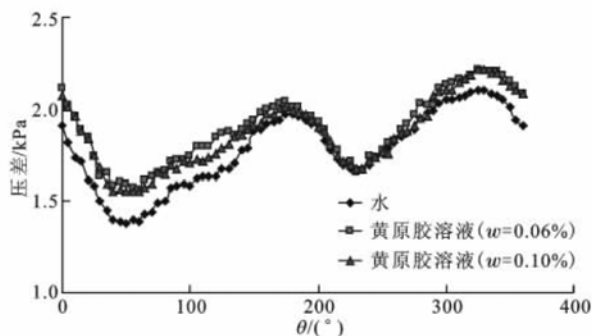


图6 第3测压孔与进口的压差分布

差的分布情况.从图中可以看出:对于水和溶液,模型泵缝隙的压差分布总趋势和原型泵及文献[8]的趋势相似;压差分布随角度 θ 变化出现 2 个峰值,第 1 个峰值出现在 $165^\circ \sim 180^\circ$,第 2 个峰值出现在 $320^\circ \sim 350^\circ$.尽管水和溶液的压差分布总趋势相似,但在量值上,溶液的压差均大于水的压差,两者最大差值可达 326 Pa,占水压差值的 36% 左右.出现此现象的主要原因是,在泵蜗壳和叶轮的缝隙之间,水和溶液的流动均处于层流区,液体的黏度对压差起主要作用.

3 结 论

本文以日本的磁悬浮离心式血泵为原型,设计制作了放大 2 倍的模型泵,用不同流体进行实验后发现,模型泵和原型泵相似性良好;用黄原胶溶液模拟血液流体比水的相似性更好,且质量分数为 0.06% 的黄原胶溶液相似程度最高;溶液浓度对离心泵相似设计的影响随着溶液浓度的增大而增大.

参考文献:

- [1] HLEMUT M R, MUSTAFA A. Blood pumps for circulatory support [J]. Perfusion, 2000, 15:295-311.
- [2] YU S C M, NG B T H, CHAN W K, et al. The flow patterns within the impeller passages of a centrifugal blood pump model [J]. Medical Engineering & Physics, 2000, 22(6):383-391.
- [3] 范家骏,赵国欣. 血液流变学基础及临床[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1995.
- [4] BROOKSHIER K A, TARBELL J M. Evaluation of a transparent blood analog fluid: aqueous Xanthan gum/glycerin [J]. Biorheology, 1993, 30(22): 107-116.
- [5] MANN D E, TARBELL J M. Flow of non-Newtonian blood analog fluids in rigid curved and straight artery models[J]. Biorheology, 1990, 27(7): 711-733.
- [6] MLIKLOSOVIC D S. An experimental evaluation of the non-Newtonian scaling effects in a rotodynamic left ventricular assist device [D]. Columbus, Ohio: The Ohio University, 1999.
- [7] AKAMATSU T, TSUKIYA T. Development of a centrifugal blood pump with magnetically suspended impeller and the related fluid mechanical problems [J]. Indian Academy of Sciences, 1998, 23(5):597-603.
- [8] CHUA L P, AKAMATSU T, CHAN W K. Preliminary measurements of an enlarged blood pump model

- [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1998, 25(8): 1055-1064.
- [9] TSUKIYA T, AKAMATSU T, OZAKI T. Fluid dynamics design of Kyoto-NTN magnetically suspended centrifugal blood pump [C/CD]// ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. Chicago, USA: ASME, 1997: FEDSM97-3425.
- [10] 张根广, 张鸣远, 朱宪然, 等. 血液及血液替代流体流变特性实验[J]. 实验流体力学, 2007, 21(2): 21-24.
- ZHANG Genguang, ZHANG Mingyuan, ZHU Xianran, et al. Experimental investigation of rheological properties of blood and Xanthan gum solutions as a blood analog fluid [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2007, 21(2): 21-24.

(编辑 荆树蓉 赵大良)