排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2013 年 12 月 Dec. 2013 | 第 31 卷 第 12 期 Vol. 31 No. 12

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.12.009

低比转数离心泵驼峰现象的 PIV 测试


马皓晨

马皓晨[1]，丁荣[2]，杨东升[3]
（1. 江苏大学机械学院，江苏 镇江 212013；2. 江苏大学流体机械工程技术研究中心，江苏 镇江 212013；3. 中国科学院上海应用物理研究所，上海 201800）

泵理论与技术

摘要：低比转数离心泵性能曲线驼峰问题严重影响泵的运行稳定性，但至今尚未得到很好的解决. 为了揭示低比转数离心泵驼峰现象的内流机理，首先根据一比转数为 73 的离心泵水力设计要求设计了 2 种水力模型，其中方案 1 有驼峰，方案 2 无驼峰，并对 2 种方案进行了能量性能试验从而验证水力设计的正确性；接着采用粒子图像测量技术对 2 个方案的内部流动进行了多工况测试与分析. 结果表明：当性能曲线出现驼峰时，叶片压力面处的低速区迅速增大，且在多个流道的叶片压力面出现了较大的旋涡，引起叶轮内流态恶化；叶轮出口与蜗壳基圆间隙之间的回流进一步增大；叶轮出口绝对速度与蜗壳基圆处流速差值也明显增加，导致了泵内冲击损失增大从而引起性能曲线的驼峰现象. 研究成果能够为控制低比转数离心泵驼峰现象提供理论参考.

关键词：低比转数离心泵；驼峰现象；PIV；内部流动；水力模型
中图分类号：S277.9；TH311　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2013)12-1056-05

马皓晨，丁荣，杨东升. 低比转数离心泵驼峰现象的 PIV 测试[J]. 排灌机械工程学报，2013，31(12)：1056-1060.

PIV test on hump phenomenon of low specific speed centrifugal pumps

Ma Haochen[1], *Ding Rong*[2], *Yang Dongsheng*[3]
(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 3. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The hump in performance curve of low specific speed centrifugal pumps affects the reliability obviously, which is still not solved today. In order to study inner flow mechanism of the hump, two hydraulic models are designed according to the same design requirements, in which scheme 1 has hump phenomenon and scheme 2 has no hump phenomenon. The performance of the two models is tested to validate the design. Then the internal flow of two model pumps are tested and analyzed by particle image velocimetry (PIV) system. The results show when performance curve appears hump, low speed area at the pressure side of the impeller blade increases rapidly, and vortex appeared at blade pressure surface of several channels. In the gap between impeller outlet and volute base circle, the flow rate of recirculation increases. The velocity difference between the impeller outlet and base circle of the volute also increases significantly, which results in increase of the hydraulic loss in the pump and causes hump phenomenon of the performance curve. The research results of the study can provide theoretical references to control the hump phenomenon of low specific speed centrifugal pumps.

Key words: low specific speed centrifugal pump; hump phenomenon; particle image velocimetry; internal flow; hydraulic model

收稿日期：2013-11-13；**网络出版时间**：2013-12-17
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1674-8530.2013.12.009.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51109095，51079062)
作者简介：马皓晨(1975—)，女，江苏海安人，讲师(mahaochen@gmail.com)，主要从事机械电子工程研究.
丁荣(1989—)，男，湖南鼎城人，硕士研究生(davidjacson@163.com)，主要从事离心泵优化设计研究.

低比转数离心泵广泛应用于航空航天、核能核电、石油化工、农业灌溉等领域[1]，但低比转数离心泵性能曲线易出现驼峰导致泵的性能不稳定，制约了其设计技术的发展. 国内外学者对减小或消除低比转数离心泵扬程曲线的驼峰现象做过较多的研究. 早在 20 世纪 80 年代，Pfleiderer[2] 就论述了叶片出口角 β_2 和叶片数 z 与扬程曲线驼峰现象的关系. 国内学者对消除驼峰现象进行了一些试验研究[3-5]，其中袁寿其[3]、牟介刚等[4] 在不同时期都对低比转数离心泵的驼峰问题做过一定的总结. 但目前关于低比转数离心泵驼峰现象内流机理的研究还比较缺乏.

PIV 技术[6-8] 可以进行全流场瞬时非接触测量[9-11]，对离心泵的内部流场测试具有很好的效果[12-13]. 鉴于此，文中对一比转数为 73 的离心泵的 2 个方案（方案 1 有驼峰，方案 2 无驼峰）进行 PIV 内流测试分析，以期揭示低比转数离心泵内流场与驼峰现象的关系.

1　试验装置

1.1　试验用泵

模型泵在 2 个方案下的性能参数和几何参数见表 1. 由表可知，2 个方案的蜗壳参数相同，叶轮参数不同. 通过对模型泵的 2 个方案进行外特性试验，得到方案 1、方案 2 的性能曲线，如图 1 所示. 由图 1a 可知，方案 1 设计流量 Q_d 的扬程为 11.46 m，效率为 58.3%，扬程曲线具有驼峰现象，在流量 15.01 m^3/h（$0.6Q_d$）时有最高扬程 13.23 m. 由图 1b 可知，方案 2 设计流量 Q_d 的扬程为 10.45 m，效率为 52.46%，扬程曲线没有驼峰现象.

表 1　模型泵的参数

Tab. 1　Parameters of model pump

方案	性能参数设计值				几何参数									
	n_s	Q_d/（$m^3 \cdot h^{-1}$）	H/m	n/（$r \cdot min^{-1}$）	z	D_2/mm	b_2/mm	β_2/（°）	β_1/（°）	$\Delta\beta_1$/（°）	ϕ/（°）	D_3/mm	b_3/mm	D_d/mm	F_t/mm^2
1	73	25	11	1 450	6	198	9	42	33.6	16	110	220	33	50	868
2	73	25	11	1 450	5	208	7	36	23.6	6	170	220	33	50	868

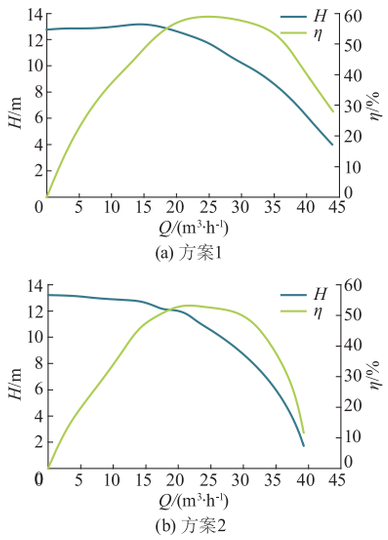


图 1　模型泵性能曲线

Fig. 1　Performance curves of model pump

试验用叶轮和蜗壳均采用有机玻璃加工，如图 2 所示. 各个表面均抛光处理，将靠近吸水室处叶轮和蜗壳的非测试面进行了涂黑处理以减少背景噪声的影响.

为了便于 PIV 拍摄，在模型泵进口设计安装了一半螺旋型吸水室. 试验中拍摄截面为模型泵的中间截面（蜗壳几何对称面）.



图 2　试验叶轮与蜗壳

Fig. 2　Experimental impeller and volute

1.2　PIV 测试系统

采用美国 TSI 公司的商用三维 PIV 系统主要包括：图像采集及分析软件平台 Insight 3G，查问区最小可达 4 × 4 个像素；YAG200 - NWL 型脉冲激光器；630059 POWERVIEW 4MP 跨帧 CCD 相机；610035 型同步器；将同步触发信号传递给同步器的同步触发控制器主机和光纤传输转换器；610015 型光臂；片光源透镜组等.

1.3　试验台

低比转数离心泵的 PIV 测试所用开式试验台结构见图 3. 其主要测试设备有：变频控制柜、三相异

步电动机、电磁流量计、压力变送器、三相脉宽调制(PWM)专用测试仪等. 通过变频控制柜对电机进行无级调速,电磁流量计测量流量,压力变送器测量扬程,三相脉宽调制(PWM)专用测试仪测量效率. 输送液体为清水.

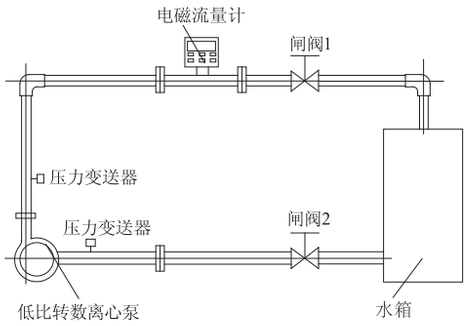


图3 试验台示意图
Fig. 3 Schematic of test rig

2 试验方案

如图1a所示,方案1性能曲线具有驼峰现象,扬程最大值在0.6Q_d处. 为了研究出现驼峰前后流场的变化情况,确定了4个拍摄工况:0.7Q_d,0.6Q_d,0.5Q_d和0.2Q_d. 对于方案2,其流量扬程曲线没有驼峰现象,为了便于对比分析,其拍摄工况同方案一.

PIV测试中使用的示踪粒子应同时具有较好的流动跟随性和成像可见性. 本试验采用粒径大小为20~60 μm的空心玻璃微珠作为PIV测试用的示踪粒子,既保证了粒子在流场中的流动跟随性,又具有足够的散射光强.

3 结果与分析

3.1 叶轮内相对速度流场

图4给出了2个方案叶轮内相对速度的分布. 可以看出,方案1叶轮内的相对速度较小,且低速区较大. 随着流量的减小,方案1叶轮流道内低速区发展较快,流态也较差,如图4a所示. 当流量由驼峰点0.6Q_d减小到0.5Q_d时,叶片压力面处的低速区增大,且在多个流道的叶片压力面出现了旋涡. 方案2在流量由0.6Q_d减小到0.5Q_d时,低速区变化很小,流态几乎没有变化,如图4b,c所示. 当流量减小到0.2Q_d时,2个方案的一些叶轮流道中都出现了较大的旋涡区,方案1叶轮流道中的旋涡区较大且流态较差,方案2叶轮流道中的旋涡区较小且流态较好,如图4d所示.

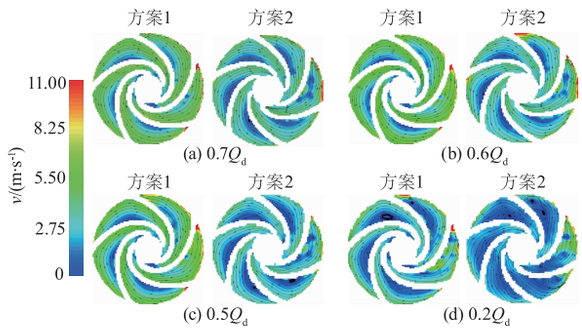


图4 叶轮内相对速度分布
Fig. 4 Relative velocity flow field in Impeller

3.2 蜗壳速度流场

图5为2个方案蜗壳内速度流场分布. 由图可见,方案2的蜗壳内流速较小,随着流量的减小,蜗壳流道中流体的流速逐渐减小,且在蜗形段的流速很大,扩散段的流速很小.

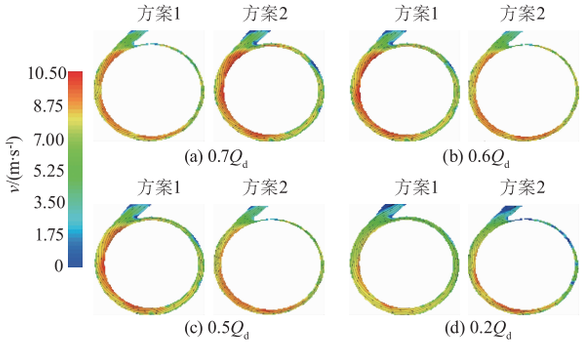


图5 蜗壳内绝对速度流场
Fig. 5 Absolute velocity flow field in volute

方案1的叶轮出口与蜗壳基圆的间隙为11 mm,方案2的叶轮出口与蜗壳基圆的间隙为6 mm. 在2个方案的各工况下,隔舌间隙中始终有回流存在,且方案1的回流流量大于方案2的. 流量减小到0.2Q_d时,在蜗壳出口出现了旋涡,堵塞了部分流道.

为了分析蜗壳进口的冲击损失,对叶轮出口和蜗壳进口的绝对速度进行了对比,其中,方案1与方案2叶轮出口处分别取在半径97,102 mm处,蜗壳进口取在半径110 mm处,如图6所示. 图中α为测试位置与隔舌的夹角,叶片正对蜗壳隔舌时α=0°. 图7给出了叶轮出口和蜗壳进口的绝对速度对比曲线,其中虚线代表叶轮出口流速,实线代表蜗壳进口流速.

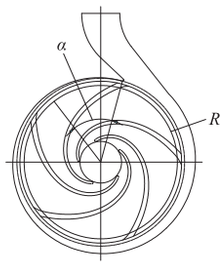


图 6　叶轮与蜗壳取样位置示意图

Fig. 6　Schematic of impeller and volute sampling location

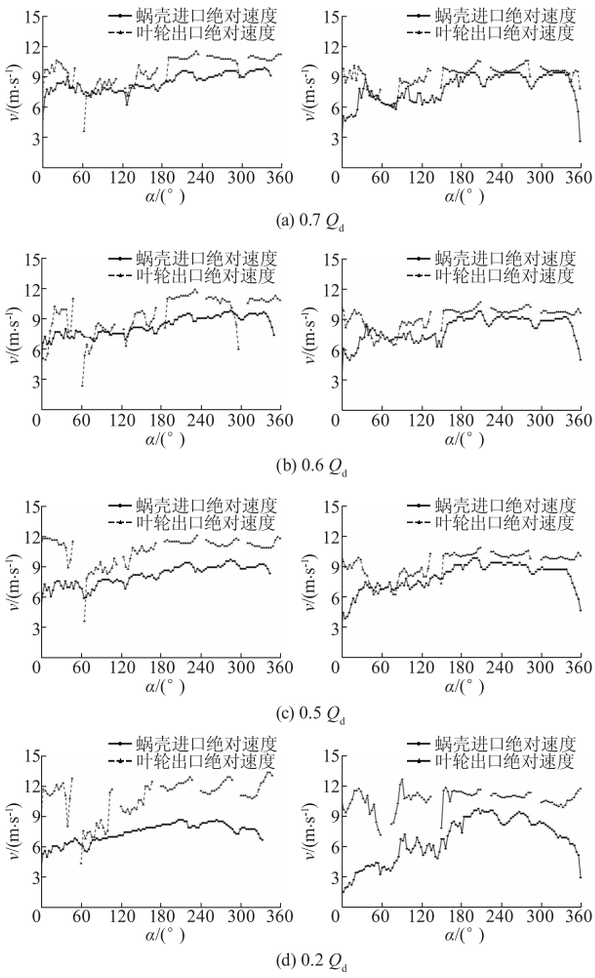


图 7　叶轮出口与蜗壳进口的绝对速度(左图为方案 1,右图为方案 2)

Fig. 7　Absolute velocity of impeller outlet and volute imports

图 7 给出了一周内叶轮出口与蜗壳进口的绝对速度. 由图 7 可知,随着流量的减小,叶轮出口流体流速与蜗壳基圆处流体的绝对速度差值越来越大,且方案 1 的差值比方案 2 的大,从而方案 1 的叶轮出口与蜗壳进口之间速度梯度较大,冲击损失较大. 当流量由驼峰点 0.6Q_d 减小到 0.5Q_d 时,方案 1 速度差值明显扩大,而此时方案 2 的两者速度之差变化不大,如图 7b,c 所示. 当流量减小到 0.2Q_d 时,2 个方案的速度差都明显增大.

结合以上的分析和扬程曲线的变化,可发现流量由 0.6Q_d 减小到 0.5Q_d 时,方案 1 的蜗壳进口冲击损失迅速增大,从而促使扬程曲线出现驼峰现象.

4　结　论

对一比转数为 73 的离心泵 2 个方案下(方案 1 有驼峰,方案 2 无驼峰)的内部流动进行了 PIV 内流测试,分析了引起性能曲线驼峰现象的内流机理,得出以下结论:

1) 性能曲线有驼峰时,叶轮内压力面相对速度低速区范围明显增大;叶轮出口与蜗壳基圆的间隙回流也明显增大.

2) 性能曲线有驼峰时,随着流量的减少,叶轮出口与蜗壳进口间有更大的速度梯度,从而引起更多的冲击损失.

参考文献(References)

[1] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2011.

[2] Pfleiderer C. 叶片泵与透平压缩机[M]. 奚启棣,译. 北京:机械工业出版社,1983.

[3] 袁寿其. 低比速离心泵理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.

[4] 牟介刚,张生昌,郑水华,等. 离心泵性能曲线产生驼峰的机理及消除措施[J]. 农业机械学报,2006,37(4):56 - 59.
Mu Jiegang, Zhang Shengchang, Zheng Shuihua, et al. Reason for centrifugal pump performance curve hump and the elimination method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(4): 56 - 59. (in Chinese)

[5] 严敬,潘光玉,阚能琪,等. 低比转速叶轮叶片数的选择准则[J]. 排灌机械,2008,26(1):18 - 20.
Yan Jing, Pan Guangyu, Kan Nengqi, et al. Criteria of blade number selection for low specific speed impeller [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008, 26(1): 18 - 20. (in Chinese)

[6] Akin O, Rockwell D. Flow structure in a radial flow pumping system using high-image-density particle image velocimetry[J]. Journal of Fluids Engineering, 1994, 116(3): 538 - 544.

[7] Pedersen N, Larsen P S, Jacobsen C B. Flow in a centrifugal pump impeller at design and off-design condi-

tions—Part I: Particle image velocimetry (PIV) and laser doppler velocimetry(LDV) measurements[J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(1): 61 – 72.

[8] Dong R, Chu S, Katz J. Effect of modification to tongue and impeller geometry on unsteady flow, pressure fluctuations, and noise in a centrifugal pump[J]. Journal of Turbomachinery, 1997, 119(3): 506 – 515.

[9] Sinha M, Pinarbashi A, Katz J. The flow structure during onset and developed states of rotating stall within a vaned diffuser of a centrifugal pump[J]. Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(3): 490 – 499.

[10] Wuibaut G, Bois G, Dupont P, et al. PIV measurements in the impeller and vaneless diffuser of a radial flow pump in design and off-design operating conditions[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 791 – 797.

[11] Krause N, Zähringer K, Pap E. Time-resolved particle imaging velocimetry for the investigation of rotating stall in a radial pump[J]. Experiments in Fluids, 2005, 39(2): 192 – 201.

[12] 张金凤,梁赟,袁建平,等. 离心泵进口回流流场及其控制方法的数值模拟[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2012, 33(4): 402 – 407.
Zhang Jinfeng, Liang Yun, Yuan Jianping, et al. Numerical simulation of recirculation control at centrifugal pump inlet[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2012, 33(4): 402 – 407. (in Chinese)

[13] 王凯,刘厚林,袁寿其,等. 零流量工况下双叶片泵内部流场三维 PIV 测量[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 61 – 65.
Wang Kai, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. 3-D PIV test of inner flow in a double – blade pump under zero flow rate condition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 61 – 65. (in Chinese)

(责任编辑 徐云峰)

(上接第 1048 页)

Wang Leqin, Zhu Zuchao, Wang Xixuan. Development on low-specific-speed high-speed centrifugal pump with two-stage complex impeller[J]. Journal of Zhejiang University: Natural Science, 1997, 31(5): 688 – 694. (in Chinese)

[4] 齐学义,倪永燕. 复合式离心泵叶轮短叶片偏置设计分析[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(4): 60 – 63.
Qi Xueyi, Ni Yongyan. Analysis of impeller design of compound centrifugal pumps with offset short blades[J]. Journal of Gansu University of Technology, 2003, 29(4): 60 – 63. (in Chinese)

[5] 袁寿其,张玉臻. 离心泵分流叶片偏置设计的试验研究[J]. 农业机械学报, 1995, 26(4): 79 – 83.
Yuan Shouqi, Zhang Yuzhen. Tests on centrifugal pump with deviated splitting vanes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1995, 26(4): 79 – 83. (in Chinese)

[6] Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry[J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(12): 1379 – 1392.

[7] Wernet Mark P. Application of DPIV to study both steady state and transient turbomachinery flows[J]. Optics & Laser Technology, 2000, 32(7): 497 – 525.

[8] 周正富,陈松山,耿卫明,等. 3 叶片离心泵内流场的 PIV 测量[J]. 扬州大学学报:自然科学版, 2006, 9(3): 72 – 75.
Zhou Zhengfu, Chen Songshan, Geng Weiming, et al. Floating field measurement with PIV in centrifugal impeller of three-blade[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2006, 9(3): 72 – 75. (in Chinese)

[9] 杨华,刘超,汤方平. 离心泵有盖板叶轮内部流场的 PIV 测量[J]. 农业机械学报, 2003, 34(2): 27 – 29.
Yang Hua, Liu Chao, Tang Fangping. PIV measurement of flow fields inside a shrouded impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(2): 27 – 29. (in Chinese)

[10] 陈松山,周正富,葛强,等. 长短叶片离心泵正交试验研究[J]. 扬州大学学报:自然科学版, 2005, 8(4): 45 – 48.
Chen Songshan, Zhou Zhengfu, Ge Qiang, et al. Orthogonal experimental study on centrifugal pump with deviated splitter vanes[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2005, 8(4): 45 – 48. (in Chinese)

(责任编辑 朱漪云)