双向潜水贯流泵装置水力模型研究*

汤方平 刘 超 谢伟东 袁家博 周济人 成 立

【摘要】 基于常规潜水轴流泵的结构组成双向贯流泵装置,双向抽水功能通过潜水泵整体掉头和采用双向叶轮这两种方式来实现。通过模型试验掌握导叶和流道结构尺寸对潜水贯流泵装置水动力性能的影响。研究表明,这两种双向贯流泵装置的性能均优于目前常用的井筒式装置,特别是双向叶轮潜水贯流泵装置具有结构简单、维护管理方便的优点,适合于低扬程双向泵站使用。

关键词: 潜水电泵 双向叶轮 模型试验 泵装置
中图分类号: TH312 文献标识码: A

Experimental Studies on Hydraulic Models for a Reversible, Tubular, and Submersible Axial-flow Pump Installation

Tang Fangping Liu Chao Yuan Jiabo Zhou Jiren Cheng Li
(*Yangzhou University*)
Xie Weidong
(*Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Conservancy*)

Abstract

Two types of reversible tubular pump installation have been developed with a submersible axial flow pump. One pumps water in opposite direction by turning the submersible pump around, and the other does it by using a reversible axial-flow impeller. Model performance can then be refined by adjusting the guiding vane and the geometry of conduit. The experiments showed that both the pump installations had better performance characteristics than that from a usual vertical submersible pump installation. The submersible pump installation with a reversible impeller especially suit for low head bidirectional pumping station on account of its simple structure and easy management.

Key words Submersible pump, Reversible impeller, Model trial, Pump installation

引言

大中型低扬程潜水泵站通常采用井筒式和坜工式两种立式安装方式,这些方式仅靠电泵自身的扩散导叶来回收水泵出口的动能,经模型试验和现场测试,泵站效率很难超越57%,与配用各种进出水流道的普通泵装置相比在效率上有较大的差距。大中型低扬程(净扬程小于3m)泵站采用立式装置使进出水结构的布置相当困难,往往难以兼顾进水流态和出口动能的回收,因此,人们自然想到采用卧式安装方式,卧式安装的潜水电泵配以进出水流道组成了典型的贯流泵装置。采用潜水电泵组成的贯流

收稿日期: 2003-07-07
* 国家自然科学基金资助项目(项目编号: 50379045)
汤方平 扬州大学水利科学与工程学院 副教授, 225009 扬州市
刘 超 扬州大学副校长 教授 博士生导师
谢伟东 江苏省水利勘测设计研究院 高级工程师, 225009 扬州市
袁家博 扬州大学水利科学与工程学院 副教授
周济人 扬州大学水利科学与工程学院 副教授
成 立 扬州大学水利科学与工程学院 讲师

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

泵装置的特点是灯泡体小, 从理论上讲有利于水流绕流。在潜水贯流泵装置设计时必须保持潜水电泵安装容易、维护管理方便等优点。本文结合淮河入海水道穿堤泵站的建设研究采用潜水电泵的双向贯流泵装置。要实现双向抽水可采用两种方式: 一种是单向潜水电泵整体掉头; 另一种是潜水电泵采用双向叶轮, 直接反转即能实现反向抽水。

1　试验台

为了准确反映设计参数变化对泵装置水动力性能的影响, 必须采用高精度的试验台和正确的测试方法。泵装置模型试验在扬州大学江苏省水利动力工程重点实验室水力机械通用试验台上进行。试验台为一立式封闭循环系统, 系统主管道直径为 500 mm, 总长度 51 m, 系统水体总容量约 60 m^3。试验台主要由汽蚀筒、压力水箱、汽水分离筒、文吐里流量计、辅助泵、调节闸阀、管路等组成。试验台效率测试的总误差为±0.57%。

试验方法按照 SL 140－97 执行。进口测压断面设置在进水箱 $A－A$ 位置, 出口测压断面设在压力水箱 $B－B$ 位置(如图 1 所示), 装置扬程 H 等于 $A－A$ 和 $B－B$ 两断面的总能头差(即相应于原型泵站的上下游水位差)。

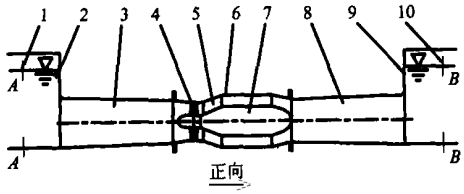

图 1　掉头方案双向贯流泵装置

Fig. 1　Geometry of the pump installation for turning around scheme

1. 测压断面 $A－A$　2. 进水箱　3. 进水流道　4. 叶轮　5. 导叶　6. 泵壳　7. 灯泡体　8. 出水流道　9. 出水箱　10. 测压断面 $B－B$

模型泵空载功率主要由轴承与轴封摩擦损失造成, 在机组不带叶片运转时测出。由于空载功率不符合水泵相似律, 模型装置难以模拟真泵装置的机械损失, 所以, 本文所指泵装置模型效率在计算时轴功率均扣除空载功率。

试验台回路系统容积较大, 试验过程中水温变化较小。试验水温以开机后一段时间的实测水温取值, 认为一次试验过程中系统水温恒定。

汽蚀试验保持流量不变, 通过系统回路内抽真空, 逐步减小有效汽蚀余量使叶轮产生汽蚀, 根据效率下降 1.0% 确定临界汽蚀余量。

2　掉头方案

在普通潜水轴流泵扩散导叶后、潜水电机外加上泵壳, 再配上进出水流道就组成了潜水贯流泵装置。由于采用单向叶轮, 需通过潜水电泵整体掉头来实现双向抽水, 因此, 模型装置尺寸主要考虑原型泵体掉头方便, 做到体积小、重量轻。装置如图 1 所示, 为实现整体掉头, 要求进出口尺寸相同, 故灯泡体后面有一明显的收缩。

用比转数 n_s= 1 000 的 ZM 4.5－Y973 模型泵叶轮[1], 叶轮直径 D = 300 mm, 轮毂比为 0.4, 叶片数为 4。模型泵高效点参数为: Q = 394 L/s, H = 4.56 m, η= 85.1%, n= 1 450 r/min。扩散导叶重新设计。3 个叶片角度的试验结果如图 2 所示。

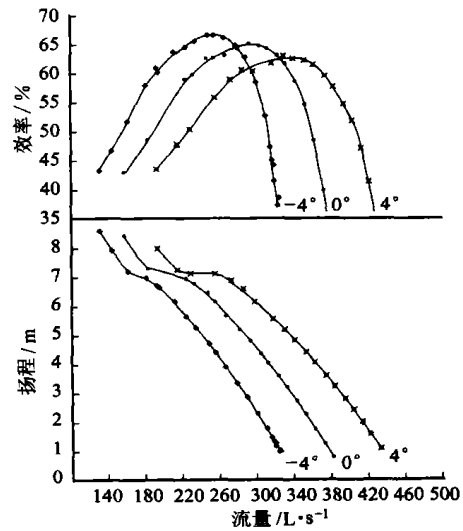

图 2　掉头方案性能曲线

Fig. 2　Performance of turning around scheme

从试验结果可以看出, 叶片角 0 时最高效率为 65.2%, 与预期的效率有较大的差距。与标准模型泵段比较, 掉头泵装置的进水条件与泵段试验时相当, 因此, 初步估计差距主要由扩散导叶和灯泡体侧收缩段引起。

为了对导叶的能量回收能力作定量分析, 设计了空导叶和有导叶两种试验方案。空导叶就是导叶体内没有导叶片, 有导叶方案采用的是导叶片扭曲较小的扩散导叶, 试验结果如图 3 所示。

从试验结果可以看出, 两副叶片扭曲不一样的扩散导叶对性能的影响很小, 扭曲较大的导叶性能略好一些, 即使这样在装置扬程大于 2.5 m 时, 扭曲大的导叶方案的性能也比空导叶的差, 说明导叶体没有起到应有的能量回收作用。装置中导叶的尺寸与标准泵段相比, 轴向尺寸短而扩散角度大, 与潜水电泵普遍采用的导叶尺寸相当。目前潜水电泵效率较低也说明了现有扩散导叶结构及其设计方法存

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在缺陷。

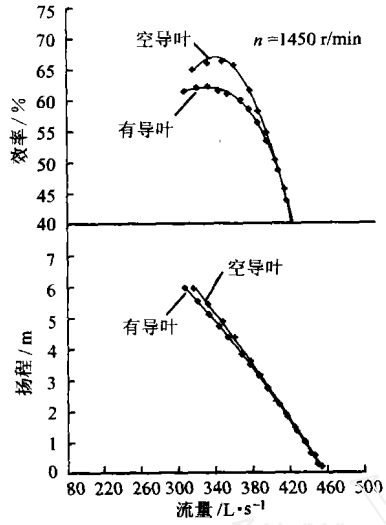

图3 导叶对装置性能的影响

Fig. 3 Effect of the diffuser on pump performance

扩散导叶出口断面到断面$B-B$之间流道损失在流量为350 L/s时约0.6 m，对净扬程只有3 m左右的装置，这一段水力损失比重过大，限制了装置效率。分析原因，一是灯泡体外部平均绕流速度过大，在Q= 350 L/s时，v= 4.1 m/s，在Q= 300 L/s，还有3.5 m/s，二是灯泡体后面的收缩段，形成射流，导致水流在后面的流道中不能充分扩散。

要提高装置效率必须取消灯泡体后的收缩，使水流充分扩散；需要增加泵壳直径来降低灯泡体绕流流速；增加导叶体轴向长度，同时减小扩散角来增强导叶的能量回收功能。这些措施与整体掉头方案要求尺寸小、重量轻以及进出口尺寸相等的要求不一致，增加了整体掉头的难度。

3 S翼型双向叶轮方案

从掉头方案分析中可以看出，直接采用当前典型潜水轴流泵结构组成的潜水贯流泵装置限制了装置性能的发挥，如改动结构尺寸，又会使掉头难度加大。采用双向叶轮则可以避免潜水电泵的整体掉头。双向叶轮采用S形翼型设计[2]，ZM S3.5双向泵模型叶轮直径D= 300 mm，轮毂比d/D= 0.466 7，叶片数z= 4，模型泵在转速n= 1 450 r/min时高效点参数为Q= 380 L/s、H= 3.8 m、η= 78%。装置尺寸进行有限的调整，改进后的贯流泵装置如图4所示。流道进出口断面积增加，水平宽度2.667D保持不变，高度由原来1.28D增加到1.667D，灯泡体直径保持0.757D不变，泵壳直径由1.333D增加到1.4D，导叶体轴向长度增加到1.0D，外表面扩散角由原来的36°降到24°，流道全长有所增加，由原来的9.2D增加到10.72D。

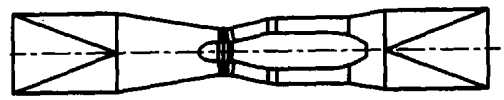

图4 改进后潜水贯流泵装置

Fig. 4 Geometry of the pump installation optimized for efficiency

为验证新装置对装置性能的改善程度，首先采用ZM 4.5单向叶轮进行无导叶方案测试，与原装置无导叶方案性能的比较见图5。

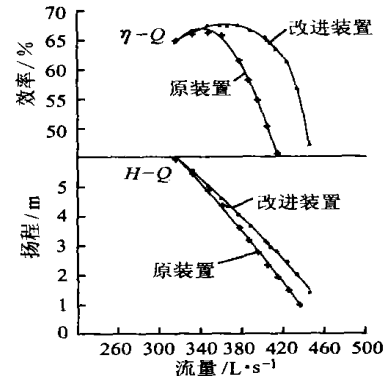

图5 新旧装置性能比较

Fig. 5 Performance comparison of two pump installations

从图中可以看出，当流量大于340 L/s后，性能有较大的改善，流量越大，改善越明显，表明装置尺寸的改进是有效的。

S翼型双向叶轮试验时，定义灯泡体在出水侧时为正向工况，针对导叶布置的不同，分为5种试验方案，见表1。在水流方向上，导叶在叶轮的后面称为后导叶，在叶轮的前面称为前导叶。

正向工况为后置灯泡体方式，正向性能以采用后扭曲导叶的方案2为最佳，采用后直导叶的方案4最差，有后导叶的方案2的最高效率比无导叶的方案1高出不到2%，主要是在导叶片设计时为兼顾到反向性能的要求，叶片拱度比单向轴流泵导叶的拱度要小得多，转轮出口的旋转动能没有充分回收。

反向工况为前置灯泡体方式，也是有后导叶的方案3性能最好。因此，后导叶对叶轮出口动能的回收作用尽管没有单向泵导叶那样明显，还是有效的。但是，弯曲的后导叶反过来就变成了弯曲的前导叶，而从方案2的反向工况和方案3的正向工况可以看出弯曲的前导叶将导致流量和效率较大的下降。从方案1和方案4的反向工况可以看出，前置的直导叶对装置性能几乎没有影响，但后直导叶会使装置性能变坏。

正反向综合性能以叶轮两侧无导叶的方案1为

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

最好, 考虑到实际工程中灯泡体和叶轮的支承, 可采用方案 3 和方案 5, 而优化的方案必须结合具体泵站的运行工况才能得到。本文结合入海水道陈涛泵站[3]选用方案 5 进行性能测试。试验结果见图 6。装置扬程 3 m, 流量 300～340 L/s 时, 正向工况装置效率 64%～65%, 必需汽蚀余量 6～7.5 m; 反向工况装置效率 61%～63%, 必需汽蚀余量 7～9 m。正向性能较好, 正向工况最高效率点扬程比反向工况高出约 0.3 m, 而最大扬程高出将近 1 m。综合性能优于掉头方案, 也优于平面 S 形流道双向轴流泵装置[4]。

表 1　S 翼型双向叶轮试验方案及试验结果

Tab 1　Experimental scheme and result of a reversible impeller with s-shaped airfoil

试验方案	导叶配置	正向工况			反向工况		
		Q/L·s^{-1}	H/m	η/%	Q/L·s^{-1}	H/m	η/%
1	叶轮两侧无导叶	306	3.802	67.4	304	3.489	63.9
2	灯泡体侧扭曲导叶	316	3.303	68.9	271	3.511	57.2
3	前侧小扭曲导叶	298	3.447	64.9	305	3.435	63.9
4	灯泡体侧直导叶	305	3.220	58.6	303	3.485	63.7
5	灯泡体侧双列短直导叶	305	3.73	65.2	299	3.684	62.4

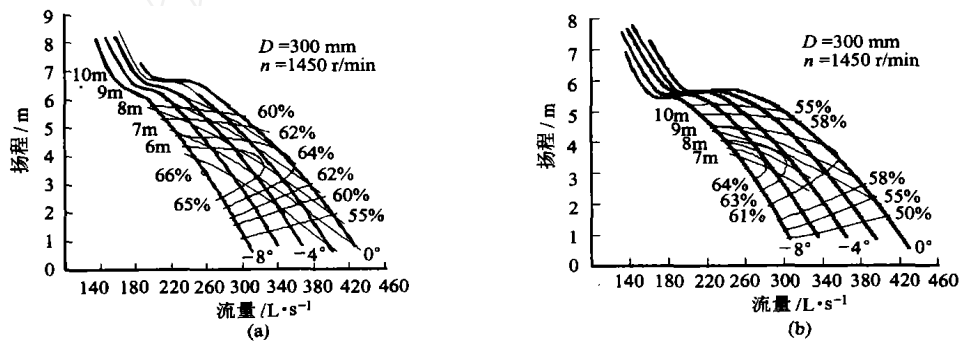

图 6　双向贯流泵模型装置通用性能曲线

Fig. 6　Performance of the pump installation

(a) 正向　(b) 反向

4　结束语

掉头方案的潜水贯流泵装置与目前常用的井筒式和坑工式立式装置相比, 装置性能有了较大地提高, 装置效率可提高 8% 以上。由于受到结构尺寸的限制, 与常规的大灯泡体或竖井式贯流泵装置相比仍存在一定的差距, 主要原因是扩散导叶的结构和设计方法不太合理以及灯泡体后的收缩引起较大的水力损失。采用商用 CFD 软件对文中贯流泵的各工况点进行了数值分析, 发现导叶片背面存在大范围脱流, 进一步证实扩散导叶是限制贯流泵装置效率提高的主要因素, 通过改进扩散导叶的设计方法, 还能进一步提高双向贯流泵装置的整体性能。采用 S 翼型双向叶轮可避免掉头, 结构尺寸可适当调整。导叶扩散角小于 24°, 流道总长度大于 10.5D 比较合理。装置双向性能以叶轮两侧无导叶时最佳, 装置扬程3 m、流量 300～340 L/s 范围内, 反向工况装置效率已超过掉头方案, 而正向装置性能更好。双向叶轮潜水贯流泵装置结构简单、安装容易、维护管理方便, 适用于低扬程双向泵站。

参 考 文 献

1　刘超, 汤方平, 袁家博 等. 高性能低扬程轴流泵水力模型开发与应用. 水泵技术, 2001(5): 3～6

2　汤方平, 刘超, 谢伟东 等. "S"翼型叶片双向轴流泵设计. 水泵技术, 2002(5): 11～13

3　江苏机电排灌工程研究所, 江苏省水利勘测设计研究院. 淮河入海水道近期工程穿堤泵站-贯流泵装置模型试验研究报告. 1999.

4　汤方平, 刘超, 王国强 等. 平面 S 形流道双向轴流泵装置水力模型研究. 农业机械学报, 2003, 34(6): 50～53

5　Lewis R I. Turbomachinery performance analysis. London: Arnold, 1996.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net