

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.04.023

低扬程泵装置流动特性及水力性能研究进展

成 立,刘 超

(扬州大学江苏省水利动力工程重点实验室,江苏 扬州 225009)

摘要 综述近年来低扬程泵装置流动特性及水力性能方面的研究进展,分别从进出水流道、叶轮和整体泵装置等方面对目前研究成果进行分析,指出为了更真实地描述泵装置流动与性能研究,应树立从装置的角度去认识泵装置及其各过流部件的内、外特性的思想。目前需要在泵装置内部三维流动测量和低扬程泵装置选型方法两方面作重点研究。

关键词 泵装置;流动特性;数值模拟;水力性能;综述

中图分类号:TV131.4 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2008)04-0085-04

Advances in research on flow characteristics and hydraulic performances of low lift head pumping station//CHENG Li, LIU Cha(*Hydrodynamic Engineering Laboratory of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China*)

Abstract : A review is made on recent research on flow characteristics and hydraulic performances of low lift head pumping station. The advances in research on flow in inlet and outlet passages, internal impeller and the whole pump set are described in detail. In order to describe the flow in pump set more accurately, the conception of integral hydraulic performances of pump set should be established to discover the internal and external character of different flowing components in hydraulic turbine. Finally, the direction for further study is pointed out, i. e. the 3-D flow field measurement and the optimal type selection for low lift head pumping station.

Key words : pumping set; flow characteristics; numerical simulation; hydraulic performance; advances

低扬程泵装置包括进水流道、叶轮、导叶和出水流道。从工程应用效果来看,不仅要求水泵处于高效率区安全可靠运行,而且要求包括水泵在内的泵装置整体性能较好。为了提高低扬程泵装置的性能,国内外学者开展了大量的研究,取得了许多可供工程应用的研究成果。

1 低扬程泵装置流动特性

1.1 进、出水流道流动

进水流道的作用是将泵站前池内的水流引入水泵叶轮室,因此进水流道内的水流运动状况直接影响水泵的进水工作条件,对水泵能否高效、可靠运行有直接的影响。出水流道的主要作用是将导叶出口的较高流速进行扩散,回收旋转动能,因此出水流道内流态和动能回收情况直接影响整个泵站效率的高低。常用的进水流道包括肘形、簸箕形、钟形、双向蜗壳等形式,出水流道则包括直管式、虹吸式、低驼峰式、蜗壳式、箱涵式等。

早期泵装置进、出水流道的设计主要依据工程

经验,采用的方法为基于一维流动理论的设计方法,即流道内各过水断面平均流速均匀变化。这种方法虽然便于工程设计中使用,但缺点是未考虑流道各断面的流速分布对装置水力性能的影响。随着紊流数值模拟技术的发展,人们认识到应采用基于流动分析基础上的三维流道水力优化方法。Li 等^[1]指出在泵装置设计工况点,水泵叶片水力设计对叶轮室进口的流场可概括为 2 个要求:流速分布均匀及水流进泵角度 $\theta = 90^\circ$,并引入进口流速均匀度和速度加权平均角度 2 个优化目标函数。该目标函数的引入为泵装置进水流道的水力优化计算提供了判别进水流场优劣的依据,已在进水流道水力设计中得到了广泛应用,效果较好。笔者在此基础上提出了改进的基于质量加权的流速均匀度优化设计函数^[2],并给出了出水流道效率和出水动能回收系数优化设计函数表达式,对进、出水流道设计具有指导意义和参考价值。

流场测试是研究进、出水流道最直接、最有效的方法。目前流场测试的手段主要有五孔探针、激光

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2007557);江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师基金(苏教[2007]2号)

作者简介:成立(1975—),男,江苏盐城人,副教授,博士,从事泵站数值模拟及实验研究。E-mail:chengli@jyzu.edu.cn

流速仪(LDV)和粒子成像速度仪(PIV)。刘超^[3]首次运用微型五孔测球和微型毕托球对大型立式轴流泵装置3种形式(肘形、钟形、双向蜗壳)进水流道内部流场进行了全面测试,获得了进水流道内较全面的流场特性。Tang等^[4]采用国际先进的2D-PIV技术获得立式轴流泵进出口及叶槽内的全流场,测试结果表明在非设计工况下泵进口外侧存在明显的回流区。图1为透明轴流泵试验装置,图2为叶轮进口处和叶槽内的流场测试结果。

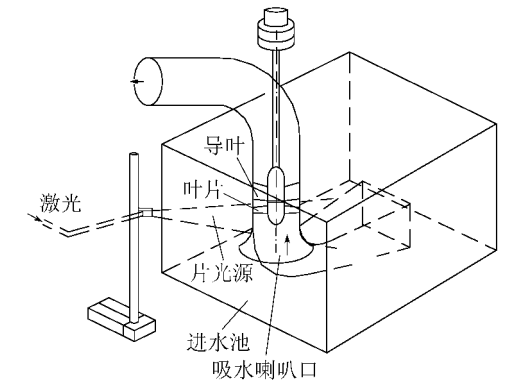


图1 透明轴流泵试验装置

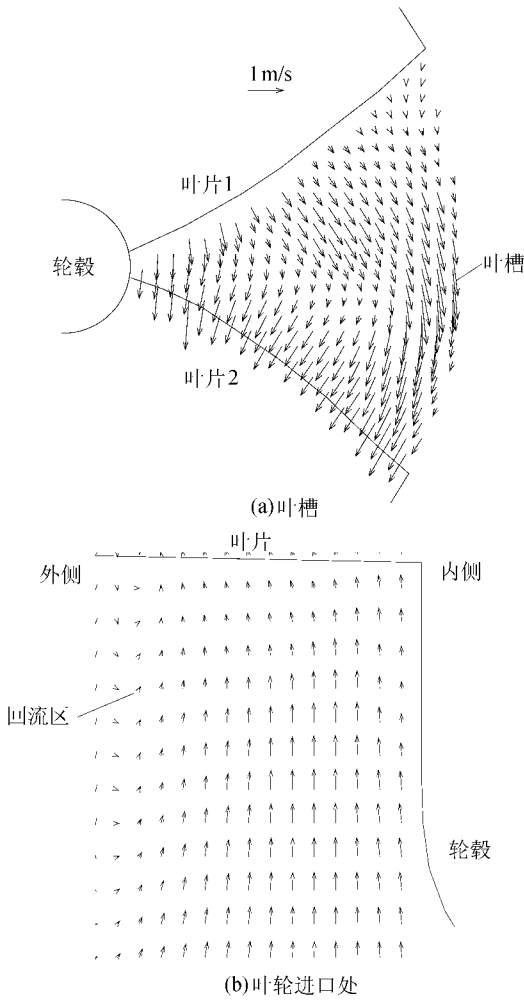


图2 流场测试结果

采用数值模拟研究进、出水流道内部流动状况已

成为趋势。阎超^[5]率先应用计算流体力学来研究泵装置进水流道,针对贯流泵装置特点将三维流道简化成二维轴对称问题求解。陈红勋等^[6]对大型泵装置进水流道内部流动进行分析后,提出了势流假定下的大型泵装置进水流道内部流动的全三维直接边界元的解析方法,并针对某30°斜轴泵装置进水流道设计方案进行了计算。Lu等^[7]开展了进水流道的三维紊流计算,对进水流道和出水流道内流态进行了分类。当前进、出水流道内部流动特性的试验和数值模拟成果较多,但由于进、出水流道作为整体泵装置的过流部件,仅仅从纯粹管道水力学的角度进行流动分析还不能真实地反映其内部的流动特性。

1.2 叶轮内部流动

泵装置的核心是水泵叶轮,水泵叶轮内部流动是复杂的三维流动,对其流动特性的研究一直是研究的难点和热点。美国TSI公司、丹麦Dantec公司相继研制出了粒子成像速度场仪(PIV),开辟了激光测量流场的新技术。Chow等^[8]应用PIV技术,以水为介质对轴流式叶轮动静叶间隙流动以及静叶叶栅内的流动进行测量,在经过两级叶栅后,仍能清晰地观察到前静叶尾涡。杨昌明^[9]运用2D-LDV对轴流泵间隙流动进行了测试,获得了间隙流动与叶轮轴向弦长的关系。测试成果对完善流动计算模型,校准计算程序起到了不可取代的作用。由于泵的体积相对较小,流动介质为水,很难用探针类有干涉的测量方法进行测量。又由于轴流泵叶轮外壳的形状是曲面,曲面对激光的非均衡折射使光点偏移,无法估计其误差,因而对轴流泵叶轮内三维流场测量仍然较为困难。

随着计算机技术和计算方法的发展,水泵叶轮内部流动计算取得了很大的进步,从二维势流、三维势流发展到准三维方法、三维无黏性欧拉法直至三维黏性法。

20世纪90年代以后,先进的CFD技术已经能分析各种叶轮内部流场。曹树良等^[10]对混流式模型叶轮内部的流动进行了紊流数值模拟。任静等^[11]数值模拟了轴流式叶轮内的三维紊流场,采用CAD-CFD系统,依据三维紊流场的预测结果优化叶轮内相关的几何参数,使叶轮内的流态接近理想流态,从而保证优化叶轮的良好性能。徐宇等^[12]基于N-S方程和两相紊流的 $k-\epsilon-A-p$ 模型,采用贴体坐标系和交错网格系统对泵-水轮机叶轮内部泵工况含沙两相紊流进行三维数值模拟,基于颗粒相速度分布用试验模型预测了磨蚀率。周凌九^[13]基于FLUENT软件,采用现实的紊流模型对混流式水轮机不同工况下的流动进行了分析,采用重整化群的紊流模型对二维水轮机动静干

涉现象进行研究。汤方平等^[14]采用简单径向平衡流动模型和二维叶栅面元法叶片造型方法设计高比转数轴流泵水力模型,并用 RNG 紊流模型对水力模型进行数值分析,数值计算结果在设计点附近精度较好,能满足工程应用的要求,但在非设计工况误差较大。上述数值模拟成果有助于人们更好地认识旋转叶轮内复杂流动。

1.3 泵装置整体流动

采用 CFD 技术与模型试验技术相结合,设计开发水力性能优良的泵装置正在成为主流。Sedlar 等^[15]应用 CFX-TASCflow 软件分析了完整轴流泵及水轮机装置内的流动,并与五孔探针测量的数据进行了比较。Muggli 等^[16]采用 CFX-TASCflow 软件对混流泵整体定常流动和非定常流动进行了计算,并较准确地预测泵的外特性。笔者^[17]在国内较早地运用 RNG 紊流模型对平面 S 形对称翼型双向泵装置(图 3)进行模拟,获得了正、反向工况下的流动状态(图 4),预测了外特性,并与模型试验结果进行了比较,研究表明在最优工况点附近预测与试验数据吻合较好,但在非最优工况总预测值与试验值误差较大。近年来,采用商业软件进行泵装置初步设计前期研究已成为一种常规的研究手段。

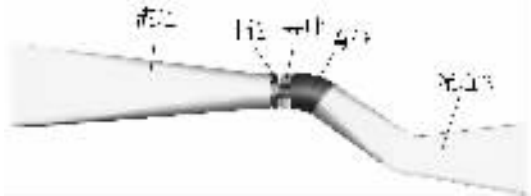


图 3 平面 S 形对称翼型双向泵装置

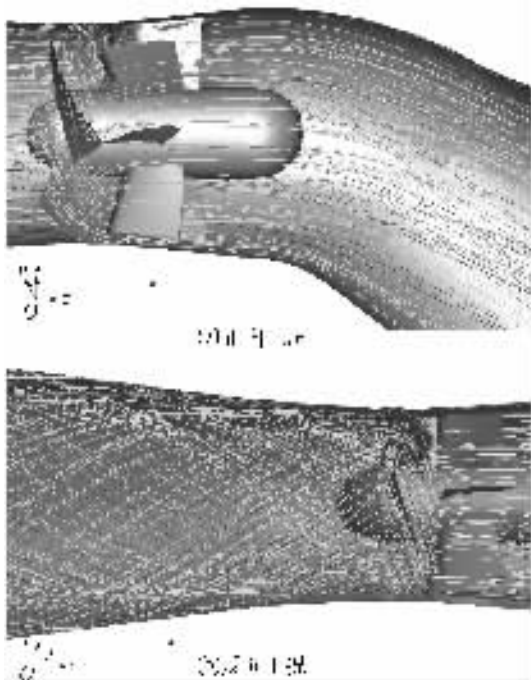


图 4 双向泵装置流动粒子迹线

2 低扬程泵装置水力性能

2.1 泵装置模型试验

模型试验是研究低扬程泵装置水力性能的重要研究手段,在高精度的试验台上,通过测试不同方案的泵站(装置)外特性如能量、空蚀、进口淹没深度等,比选进、出水流道和水泵水力模型,这是国内外最终验证水泵站(装置)优化设计成果的有效方法。张庆范等^[18]以 2 种贯流泵装置和立式轴流泵装置在同样测试条件下进行模型试验研究,论证了在 5 m 以下采用贯流泵装置的优点。刘超等^[19]通过研究双向开敞轴流泵装置,提出了独特的曲线喇叭管出水结构,在低扬程泵装置流道研究方面取得了突破。汤方平等^[20]通过一组带泵和不带泵装置的水力损失进行测试,指出了进水流道损失与流量基本成二次方关系,而出水流道则不满足这一关系,以及出水流道损失与导叶出口环量有密切关系的重要观点,并给出了泵装置条件下利用泵段性能预测泵装置扬程计算公式。

近年来,由于南水北调工程建设需要,对于同一水力模型相继进行了泵段和泵装置模型试验,如万年闸站、解台站、刘山站、台儿庄站等泵站、泵装置模型试验。关醒凡等^[21]分析模型泵段和模型泵装置试验结果,指出两者性能差别很大但也表现出一定的规律:①泵装置最高效率点的叶片角度比泵段最高效率点的叶片角度向小角度方向移动了 $2^{\circ} \sim 4^{\circ}$,泵装置最高效率比泵段最高效率约降低了 $8\% \sim 10\%$,水泵模型装置最高效率点的流量比泵段最高效率点的流量减小约 $15\% \sim 20\%$;②泵装置最高效率点的扬程和泵段最高效率点的扬程大致相等。上述规律对于指导泵站选型有重要参考价值。

2.2 泵装置性能预测

泵装置设计优化应以整体综合水力性能为目标函数,损失分析计算是性能预估的基础。水泵叶轮内的损失一般分为摩阻损失、局部损失、叶轮进口撞击损失和出口损失,以及由于叶轮间隙引起的叶端间隙损失;泵装置进、出水流道内的损失主要表现为局部损失和沿程损失。

计算水力损失的方法有一维水力损失估算法、边界层分析法和基于 N-S 方程直接解的损失计算方法。一维水力损失估算法是流动分析与经验公式相结合的计算方法,试验表明,对于设计工况附近水泵叶轮内的黏性水流流动,黏性的影响仅限于固壁边界附近很薄的区域之内。故而工程上常作简化,采用无黏性主流加黏性边界层迭代解法。边界层数学模型虽然较为完善,但由于叶片旋转、叶面扭曲和流

动分离等因素的影响,准确求解叶片三维边界层还存在着不少困难。目前通过求解雷诺平均 N-S 方程,得出其流速场和压力场,并计算流动黏性损失。将水泵装置的叶轮、导叶以及进出水流道作为一个整体来进行设计,综合考虑各部件之间的影响,通过数值试验和模型试验来检验各部件的匹配是否合理,使水泵的综合水力性能有较大的提高,这是目前泵装置性能预测的研究趋势。

3 存在问题及展望

从目前研究现状来看,泵装置流动特性及水力性能研究成果较丰富,成果直接应用于工程较为成熟。但在一些方面研究不够深入。

a. 泵装置过流单个部件研究不够系统全面,提炼的流动特性成果少。

b. 在泵站优化水力设计研究方面,注重流场细部,忽视水力性能指标,在出水流道和整体泵装置研究方面还是空白。

c. 泵装置内部全流道流动特性与水力性能之间关系的研究较少。

d. 低扬程泵装置整体流动特性研究较为薄弱,报道的流动数值模拟成果大多缺少必要的内流场试验验证。

e. 对泵装置条件下的水力性能预测研究不够深入,缺少系统的泵装置水力损失预测理论模型。

随着南水北调东线工程泵站建设和大中型泵站改造工作的开展,低扬程泵装置内部流动和水力性能越来越受到重视。笔者认为,为了更好地进行泵装置流动与性能研究,首先应树立从系统或装置的角度去认识泵装置及其各过流部件的内、外特性的思想,其次应在以下方面进行重点研究:

a. 泵装置外特性与其流动状况密切相关,外特性决定于内特性,内特性的变化将带来外特性的相应变化。因此,开展泵装置内流场测量是非常必要的,这方面的基础性研究工作亟待加强和重视。

b. 由于低扬程泵站泵段的性能与泵装置的性能存在很大差异,如用泵段性能加进、出水流道损失简单代替泵装置性能将引起泵站水力模型选型失误。因此,如何根据已有试验成果,并通过理论分析建立一套不同的泵装置选型方法,具有实际工程价值。

参考文献:

[1] LU Ling-guang , FENG Han-ming. Optimum hydraulic design for inlet passage of a large pumping station[C]//MEI Zu-yan. Proceeding of International Conference on Pumps and Systems. Beijing : China Science and Technology Press , 1992 :572-581.

[2] 成立,薛坚,刘超,等.泵站进出水流道优化设计目标函数研究[J].水泵技术,2007(3):39-42.

[3] 刘超.水泵进水流道内部流态的研究[D].南京:华东水利学院,1981.

[4] TANG Fang-ping , LIU-Chao. PIV for propeller pumps applications[C]//MEI Zu-Yan , WU Yu-lin. The Second International Symposium of Fluid Machinery and Fluid Engineering. Beijing :China Science and Technology Press , 2000 :128-134.

[5] 阎超.大型贯流站进水流道的流体动力学数值分析理论[D].武汉:武汉水利电力学院,1986.

[6] 陈红勋,张仁田.一种计算大型泵站进水流道内部流场的方流[J].排灌机械,1993,11(4):19-22.

[7] LU Ling-guang , BOOIJ R. Numerical determination of hydraulic optimized suction box of a larger pumping station [C]//IAHR. Proceeding of XVII IAHR Symposium. Beijing : International Research Center on Hydraulic Machinery ,1994 : 465-476.

[8] CHOW Y C ,UZOL O ,KATZ J et al. An investigation of axial turbomachinery flows using PIV in an optically-unobstructed facility[C]//ASME. The 9th of International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. New York :ASME,2002 :10-14.

[9] 杨昌明.轴流泵间隙流动数值模拟与试验研究[D].成都:西南交通大学,2003.

[10] 曹树良,吴玉林,杨辅政.混流式水轮机转轮内部三维紊流的数值分析[J].水力发电学报,1997,59(4):52-60.

[11] 任静,吴玉林,杨建明,等.水力机械转轮内的 CFD 分析及优化设计[J].工程热物理学报,2000,21(3):316-320.

[12] 徐宇,吴玉林,任静.泵-水轮机转轮内部泵工况含沙紊流分析及磨蚀预测[J].水泵技术,1996(6):3-6.

[13] 周凌九.水轮机转轮流场计算及性能预测[D].北京:中国农业大学,2000.

[14] 汤方平,王国强,刘超,等.高比转数轴流泵水力模型设计与紊流数值分析[J].机械工程学报,2005,41(1):119-123.

[15] SEDLAR M , VLACH M , SOUKAL J. Numerical and experimental investigation of flow in axial flow hydraulic machinery[R]. London : J Mech E ,1999.

[16] MUGGLI F A ,PETER H ,PHILIPPE D. CFD calculation of a mixed flow pump characteristic from shutoff to maximum Flow [J]. ASME J Fluids Eng,2002,124 :798-802.

[17] 成立,刘超,汤方平,等.对称翼型转轮双向泵装置紊流数值模拟与性能预测[J].农业机械学报,2004,35(5):74-77.

[18] 张庆范,吴桐林,靳子清.贯流泵装置的试验研究[J].农业机械学报,1985,16(2):38-47.

[19] 刘超,周济人,汤方平,等.低扬程双向流道泵装置研究[J].农业机械学报,2001,32(1):49-51.

[20] 汤方平,袁家博,周济人.轴流泵站进出水流道水力损失的试验研究[J].排灌机械,1995,13(3):13-14.

[21] 关醒凡,伍杰,朱泉荣.南水北调东线已招标泵站水泵模型装置试验成果及分析[J].排灌机械,2006,24(1):1-7.

(收稿日期:2007-09-18 编辑:方宇彤)