

# 低扬程泵装置的研究进展及展望

杨帆, 刘超

(扬州大学水利科学与工程学院, 江苏扬州 225009)

**摘要:** 介绍了低扬程泵装置的结构分类和特点, 分别从转轮、导叶、进出水流道及泵装置 4 个方面对目前研究取得的标志性成果、进展及理论方法进行了分析归纳, 从 4 个方面指出了低扬程泵装置中尚需深入研究的一些问题, 并探讨了研究途径和研究方向。

**关键词:** 泵装置; 叶轮; 导叶; 进出水流道

**中图分类号:** TK72

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672—1144(2012)04—0084—08

## Research Progress and Prospect of Low-lift Pump System

YANG Fan, LIU Chao

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

**Abstract:** The structure classification and characteristics of low-lift pump system are briefly introduced here. The present results, progress and methods in its research are analyzed and summarized from four aspects, such as impeller, guide vane, inlet and outlet passage and pump system, some questions of the low-lift pump system for further study are indicated, and the approach and direction for its research are also discussed.

**Keywords:** pump system; impeller; guide vane; inlet and outlet passage

泵站工程是重要的水利基础设施, 在大范围内的农田和区域抗旱、防洪排涝、城镇供水、污水排放和跨流域调水等方面起着关键作用。随着南水北调东线工程大型低扬程泵站的建设、城市防洪标准体系的提高、区域性农业灌溉排水规划实施及国家大中型泵站的更新改造, 这些因素都推动了低扬程泵装置研究工作的深入, 而从工程应用的角度出发, 泵装置需达到安全、稳定、高效地运行, 这就不仅要求泵段的水力性能好, 而且要求包括泵段在内的泵装置整体的水力性能较好。为提高低扬程泵装置的水力性能, 近几年国内外学者均开展了大量的研究工作, 低扬程泵装置的研究取得了许多供实际泵站工程设计与改造参考的成果。

三部分。低扬程泵装置按照机组结构分为立式泵装置、斜式泵装置和卧式泵装置, 三种泵装置型式中的典型装置型式如图 1 所示。

通常, 立式泵装置按进出水流道、斜式泵装置按倾斜角度、卧式泵装置按泵轴是否伸出进行分类。立式泵装置的进水流道按进水方向可分为单向进水流道和双向出水流道, 其中单向进水流道有肘形、钟形及簸箕形三种型式, 而双向进水流道有肘形对接式、钟形对接式和箱涵式三种型式; 立式泵装置出水流道按出水方向可分为单向出水流道和双向出水流道, 其中单向出水流道有虹吸式、直管式、平面对称蜗壳式和屈膝式四种类型; 而双向出水流道有三通式、肘形对接式、伞形虹吸式、矩形有压涵洞式、开敞水槽式和双向平面对称蜗壳式。目前斜式泵装置的倾斜角有 75°、45°、30°和 15°四种。卧式机组有贯流式、轴伸式、竖井式, 其中贯流式包括前置灯泡式、后置灯泡式和全贯流式; 轴伸式有前轴伸式和后轴伸

## 1 低扬程泵装置的分类和结构特点

### 1.1 低扬程泵装置的分类

低扬程泵装置包括进水流道、泵段及出水流道

收稿日期: 2012-02-21

修稿日期: 2012-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50779060); 江苏省产学研前瞻性联合研究资助项目(BY2009138); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ11-0977)

作者简介: 杨帆(1985—), 男(汉族), 江苏宿迁人, 博士研究生, 研究方向为泵及泵装置水力特性研究。

式;竖井式可分为前置竖井和后置竖井。扬州大学江苏省水利动力工程重点实验室研发了一种新型轴伸式贯流泵装置,该装置已申报了国家发明专利<sup>[1]</sup>,

该泵装置的研发对完善卧式机组的型式和推动低扬程泵装置的发展起到了推动性的作用。

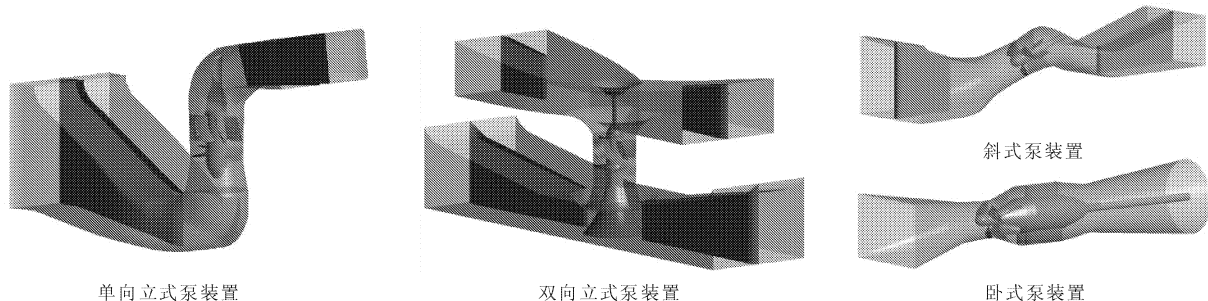


图 1 不同泵装置型式示意图

## 1.2 低扬程泵装置的特点

泵装置的型式不同决定了其具有各自的优点和缺点。立式泵装置具有电机工作环境好,水泵导轴承荷载较小,安装检修相对方便,设计和制作技术成熟等优点,但立式泵装置的泵轴线(铅直)与来水流方向(水平)互相垂直,故水流进入水泵和流出水泵时水流转角  $90^\circ$ ,水流流向的改变极易引起水流脱流,二次流、流速分布不均匀甚至产生旋涡、涡带等。文献<sup>[2]</sup>指出一般立式泵装置的高度较大,对于大泵来说,扬程低于  $3\text{ m}$  已不适合。斜式泵装置具有构造简单紧凑,开挖量较小,厂房高度低,泵房底板受力均匀等优点,斜式泵装置的泵轴倾角越大,流道弯曲得越厉害,流道弯曲厉害会导致流道内部的流态不好,但相对于立式泵装置而言,斜式泵装置的进水流道水流转向角度小于  $90^\circ$ ,阻力损失小,其出水流道转角也小于  $90^\circ$ ,水力性能相对较好。斜式泵一般采用泵壳中开的结构,安装检修比立式泵方便,而且斜式机组的电动力位置较高,具有与立式泵装置同样的通风良好的优点。卧式泵装置的进水流道平顺贯通,水流条件好,水力损失小,其形状也比立式泵装置、斜式泵装置简单,装置效率高。经过几年的努力,在单向卧式泵装置水力性能方面的研究,扬州大学取得了不少的研究成果,南水北调邳州站前置竖井贯流泵装置最高效率已达  $82.32\%$ ,此时流量为  $297.718\text{ L/s}$ ,扬程为  $3.354\text{ m}$ ,针对金湖站研发的后置灯泡贯流泵装置最高效率达  $82.02\%$ ,此时流量为  $302.863\text{ L/s}$ ,扬程为  $3.618\text{ m}$ ,单向潜水贯流泵的最高效率已达  $80.91\%$ ,此时流量为  $241.932\text{ L/s}$ ,扬程为  $1.912\text{ m}$ ,这些泵装置的水力性能已达到了国内领先的水平,这些成果对我国低扬程泵站的建设提供了很好的支撑,积极响应了国家节能减排的

号召,另外扬州大学江苏省水利动力工程重点实验室研发的新型贯流泵装置具有更好的水力性能。

双向泵装置可分为双向流道泵装置和双向转轮泵装置。双向流道泵装置通过双层流道四个闸门的启闭来调节水流的方向,达到双向抽引抽排的目的;双向转轮泵装置则通过叶轮的正反向运行来实现泵装置的抽引抽排的功能。扬州大学的刘超等人在分析水力计算基础上提出了一种新的立式轴流泵出水结构<sup>[3]</sup>,并申请了双向泵站进出水装置和开敞式水泵出水室结构两项国家实用新型专利,并在泰州高港泵站中进行了应用使得泵装置最高效率达到  $73\%$ ,相比原同类泵装置提高了  $(6\% \sim 8\%)$ ,此后 2010 年望虞河双向流道泵装置的更新改造也改用了此型式。对双向转轮泵装置的研究,扬州大学率先开展了双向对称叶轮和双向“S”型叶轮的研究,其中双向轴流泵叶片获得了国家实用新型专利的保护,并在江苏省南京秦淮新河、苏州市裴家圩、淮安里运河及泰州中干河等泵站中均得到应用。

对于双向泵装置开展相关研究工作的还有河海大学和武汉大学,河海大学的陈毓陵和傅宗甫等人针对双向流道泵装置进行模型试验,提出了双向进水流道的流态改善及消涡措施。武汉大学的朱劲木<sup>[4]</sup>等人提出了一种双向出水流道的设计方法,并通过多方案的对比试验和对流态的观察分析,验证了该方法的可行性。

## 2 低扬程泵装置的研究

### 2.1 转轮的研究

转轮是泵装置的核心部件,转轮的水力性能直接影响到泵装置的水力性能。伴随着计算机硬件的发展和 CFD 技术的成熟,CFD 技术已被学者们应用

于转轮研究的各个方面<sup>[5-16]</sup>,从最初的三维定常数值模拟到现在的三维非定常数值模拟;从单相的数值计算到固液、汽液两相的数值计算;从单纯的流场分析到水力脉动、噪声分析;从当初弱耦合的数值计算到现在强耦合的数值计算;从设计工况的数值计算研究到非设计工况的数值计算研究;从传统的流场分析诊断泵的设计缺陷到现在的涡动力学诊断理论的完善;从稳定运行工况的分析到启动过渡过程的数值计算等等,这些都反映了数值模拟计算的进步与完善。随着数值模拟计算的提高与完善,人们已将数值计算作为研究的必备工具之一,以试验研究为主,数值计算为辅主导了这个时期的研究手段。国内外近几年发表的泵方面的学术论文约 90% 的论文均与数值模拟有关,可见 CFD 技术已经在泵的研究方面得到了广泛而深入的应用。

近些年来,泵的水力模型设计方法方面开展的研究工作较少,轴流泵与混流泵的设计研究相比离心泵的水力模型仍落后,2004 年南水北调工程水力模型同台测试了 27 副优秀的水力模型,随后的国家“十一五”科技支撑计划重大项目(贯流泵装置水力性能优化理论与应用)中设计了 4 副具有超低扬程、大流量、高效率的水力模型,但贯流泵的水力模型仍较少,还未形成系列,而且设计方法基本上仍沿用传统的设计理论与方法,而目前国内轴流泵的设计者大多采用“设计 - CFD 计算 - 修改 - 模型试验”的思路,而轴流泵全三维设计的研究仍处于理论研究阶段,设计过程的控制及设计结果优劣的判断有待做进一步的研究。按照传统叶片泵水力设计理论,混流泵的比转速  $n_s$  一般不超过 500,超过时则均设计成轴流泵,随着设计方法的改进,高比转的混流泵叶轮的研究已取得了不少的成绩。华中工学院(现华中科技大学)研究的比转速为 610,型号为 MD350HD - 350 的混流泵模型,南水北调低扬程泵课题组研究的比转速为 620、型号为 NDHL12 - 350 的混流泵模型、江苏大学研究的比转速高达 800、型号为 211 - 80 的混流泵模型,扬州大学江苏省水利动力工程重点实验室研发了 HB45、HB50、HB55 及 HB60 等系列高比转混流泵,其比转速均高于 600,且 HB55 已在南水北调东线工程皂河一站的更新改造中得以应用。扬州大学已开展了轴流泵叶片及转轮整体的自动优化工作,并取得了一些成果,但仍需进一步深入的研究。因此今后的水力模型设计应注重引入三维计算流体动力学理论和技术,实现多目标自动优化,建立高效节能水泵的设计分析方法。

对泵内的三维定常与非定常计算的方法已被广大的学者所掌握,各种类型的泵均被做过三维定常与三维非定常的流场分析,这类研究已常态化。虽然 CFD 技术的应用取得了很大的进步,两方程湍流模型的数值预测在泵的最优工况与设计工况附近均可取得较高的精度,但是偏离设计工况时却难以达到工程应用的精度,今后开展非设计工况的数值计算研究显得非常必要。

空蚀的问题是大型泵站普遍存在的问题,也是当前研究的热点,今后应采用 PIV, LDV, PDPA 等现代化的测试仪器开展泵内两相流的测试,并结合数值模拟方法与理论分析,深入研究泵的空化、固液(磨蚀)的研究。对泵叶顶间隙的研究目前主要是数值计算,缺少实验验证,在今后的研究中应采取高速摄像机和 PIV 等仪器设备对其进行研究,进一步揭示叶顶间隙流动特性,分析间隙涡的发展过程,建立不同间隙对泵性能影响的数学模型。流固耦合研究涉及流体力学、固体力学、动力学及计算力学等多门学科,若需真实模拟流场与叶轮之间相互作用的内在机理及其耦合振动,仍是一个难题,目前主要的研究手段采用商用软件,如 ANSYS WORKBENCH 等,开展流固耦合的研究获得转轮叶片应力的分布对提高叶轮的设计水平是非常有意义的。对于泵内水力噪声、叶轮疲劳可靠性、泵的旋转失速机理及泵过渡过程的内流场计算及内流场的涡动力学诊断技术的应用等均处于起步阶段,今后应深入开展这些领域的相关研究。

## 2.2 导叶的研究

导叶可以分为前置导叶和后置导叶,前置导叶的设计有两个不同的目的,一个是调节工况,一个是在叶轮进口处造成所需要的  $C_{u1}$  以满足叶轮的设计要求,一般前置导叶采用机翼形或圆弧形;后置导叶的设计与前置导叶不同,后置导叶的作用是减小从叶轮出口流出液流的速度环量,将液流圆周速度的动能转化为压力能,并利用其扩散作用将部分轴面速度的动能转化为压力能<sup>[17]</sup>。后置导叶的设计可以和叶轮叶片一样,采用叶栅或孤立翼型的计算方法,也可以采用流线法,其中流线法是轴流泵后置导叶常采用的方法。

国内外对导叶的研究主要集中于导叶的几何参数和有无导叶对泵段或泵装置水力性能的研究,对导叶设计方法的研究在较长一段时间内没有进展,直到 21 世纪初,张勤昭<sup>[18]</sup>等人借鉴泵叶轮的反问题设计理论,用 Fortran 语言编程实现了高比转速数

混流泵空间导叶的水力设计。L. M. C Ferro<sup>[19]</sup>等人提出了一种贯流式涡轮机的导叶的准三维快速设计方法。南京蓝深制泵集团股份有限公司与华中科技大学共同针对潜水贯流泵研发了一种半可调的导叶,已在工程实践中获得运用<sup>[20]</sup>。

近些年来,国内学者借鉴前置导叶预旋调节技术在风机和压缩机中的应用,将前置导叶技术应用于水力模型性能的调节中。黄经国<sup>[21]</sup>(2000年)阐述了大型混流泵采用可调进口导叶调节特性的原理、技术特点和结构设计。江苏大学的孔繁余<sup>[22]</sup>等人利用有限元分析软件数值求解不同工况下混流泵的内部流场,得到了前置导叶调节工况的基本规律,以改善混流泵在非设计工况运行时的水力性能。清华大学的曹树良<sup>[23]</sup>等人提出了一种全新的适用于离心泵前置导叶预旋调节的空间导叶水力设计方法,并将该导叶应用于某离心泵,并对其在不同轴向位置和不同预旋角下进行了性能试验。武汉大学的钱忠东<sup>[24]</sup>等人提出了一种新型后置可调式导叶,可调式导叶可通过调整角度改善轴流泵导叶段的流态,减小水力损失,提高水泵扬程和效率。

### 2.3 进、出水流道的研究

进水流道的作用是为了使水流在从前池进入水泵叶轮室的过程中更好地转向和加速,以尽量满足水泵叶轮对叶轮室进口所要求的水力设计条件<sup>[25]</sup>。进水流道的水力设计将直接影响到水泵的工作状态,进水流态愈差,对水泵实际性能的影响就愈大。早期进水流道设计主要依据工程经验,采用典型的一维水力设计方法,即满足进水流道各过流断面的平均流速均匀变化。这种早期的设计方法虽然便于在工程设计中使用,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,1997年颁布的国家标准《泵站设计规范》(GB/T50265-97)就已不再将一维流动设计方法作为指导性方法列在附录中,伴随着计算流体动力学的进一步发展,以三维湍流理论为基础的进水流道优化水力设计方法已开始被大量采用,南水北调东线工程中泵站的进水流道都采用了三维优化水力设计方法,并且新颁布的《泵站设计规范》(GB50265-2010)中已明确表示重要的大型泵站的进水流道宜采用三维流动数值计算分析,并进行装置模型试验验证。

对进水流道的研究有数值模拟与模型试验两种方法,且数值模拟已经占据了进水流道分析方法的主导地位,各种形式的进水流道内流场及其关键几何参数对进水流道水力性能的影响均被进行过CFD

的计算分析和独立的透明流道模型试验(丝线观察法),尤以肘形进水流道为多。汤方平<sup>[26]</sup>等人通过泵装置整体模型试验对进水流道水力损失进行测试,获得了进水流道的水力损失与流道满足二次方关系,这是对进水流道设计、优化和改造提供最有利的理论支撑。陆林广<sup>[27]</sup>(1997年)、成立<sup>[28]</sup>(2007年)等人均提出了进水流道其他的水力性能评判标准,尤以陆林广提出的轴向速度分布均匀度与速度加权平均角被国内很多学者所采用。

偏流工况下进水流道的水力性能及其对泵装置性能的影响,实现进水流道参数化建模及水力性能自动优化方面还需进一步开展研究工作。目前,学者们独立地对进水流道进行数值计算,采用三维紊流定常数值计算方法可满足实际工程的要求,但若考虑进水流道与泵段间的耦合关系,其进行三维湍流非定常计算的意义就非常大了,可通过非定常数值计算对进水流道内部的压力脉动的分布情况进行分析,并在非定常数值计算的基础上,对进水流道内部的水力噪声进行分析,由此可见,对进水流道的研究还需进行大量的研究工作。

出水流道的作用为了使水流在从水泵导叶出口流入出水池的过程中更好地转向和扩散,在不发生脱流或旋涡的条件下最大限度的回收动能<sup>[25]</sup>。传统的出水流道设计方法是一维水力设计方法,该方法与进水流道的传统设计方法类似,适用于出水流道的初设。现在出水流道主流的设计方法是三维水力优化设计方法,即在给定控制尺寸的条件下,给定不同的出水流道边界,完成相应的流场计算,考虑不同边界条件时流道内部的三维流态,以不发生脱流和旋涡、流道水力损失尽可能小为目标,逐一优化流道的几何参数,调整流道型线。目前,对出水流道水力损失关系的研究出现了两种不同的观点,文献[26]、文献[29]通过试验得出出水流道的水力损失与流量不满足二次方关系,而文献[30]得出出水流道水力损失与流量满足二次方关系。成立<sup>[28]</sup>等人建立了出水流道水力性能优化的目标函数,即出水流道效率最高目标函数、出水流道动能回收系数最大目标函数以及出水流道水力损失最小目标函数。

目前为止,各种类型的出水流道均被国内学者做过数值计算研究工作,其中尤以虹吸式、直管式出水流道的研究工作最多,主要因这两种出水流道形式在我国的大中型泵站工程中应用广泛的原因。学者们开展的出水流道的数值计算工作,多集中于对出水流道进行独立的数值计算,虽然计算出水流道

时,很多学者在设置出水流道进口条件时设置了环量,但不同工况时导叶体剩余环量是不相同的,而且导叶体出口剩余环量随水力模型的不同而不同,因此开展出水流道的数值计算研究工作应考虑到不同工况时泵段与出水流道间的耦合关系,图 2 给出了不同工况时出水流道受导叶出口环量影响引起的内部流态的不同,表明了对出水流道水力性能的研究

需考虑导叶体的出口环量。文献[31]分析了不同工况时导叶体剩余环量对出水流道的水力性能及内部流态的影响,文献[29]采用五孔探针和丝线观察法研究了出水流道的内部流场,分析了导叶体出口环量对双孔出水流道流量分配不等的问题,并提出了相应的改善措施,针对出水流道的优化设计问题提出了当量扩散角的概念。

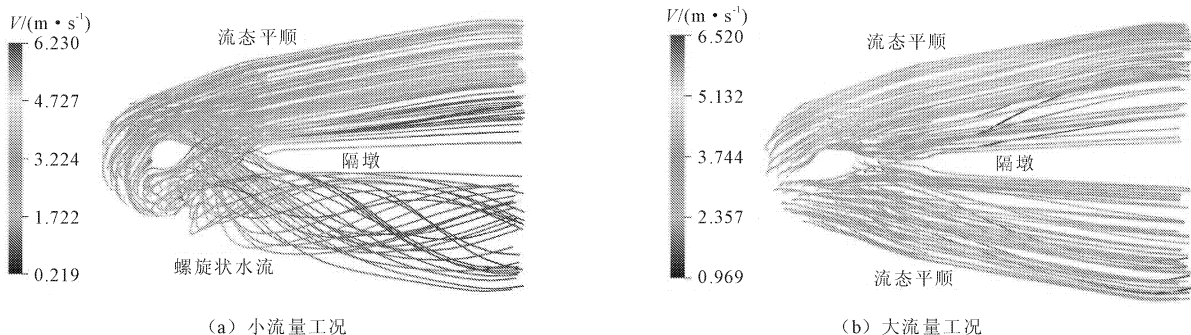


图 2 不同工况时出水流道内部的迹线图

## 2.4 泵装置整体的研究

### 2.4.1 泵装置的试验研究

对泵装置进行模型试验研究主要是为了获得其四个部件间在相互耦合作用下的整体水力性能,获取其能量性能、空化性能、脉动性能、飞逸特性及进口淹没深度对泵装置水力性能的影响等,这些试验所得外特性数据为泵装置模型整体的数值计算预测的结果提供可靠的参照数据。泵装置模型试验的进行需要高精度的水力机械试验台,目前,国内主要的水力机械试验台有 6 家,如扬州大学江苏省水利动力工程重点实验室、中水北方勘测设计研究有限责任公司、河海大学水机所、江苏大学江苏省流体测试中心、中国水利水电科学研究院及武汉大学,这些单位均进行了大量的泵装置模型试验研究,但泵装置试验研究类的论文却并不多且出现了一段研究的冷门期。

在 2002 年 12 月 28 日南水北调东线工程开工典礼在人民大会堂、江苏省和山东省施工现场同时举行。随后的数年内,泵装置的模型试验研究再次进入了大家的视眼。开展泵装置模型试验研究的主要单位有扬州大学、江苏大学、河海大学及中水北方勘测设计研究有限责任公司,这些单位均具有高精度的水力机械试验台,并且承担了大部分的大中型泵装置模型试验,泵装置模型试验研究的论文的共同点均结合某实际泵站的泵装置模型试验开展研究工作,主要因泵装置模型试验花费较高,周期较长,80% 以上的泵装置研究论文均是关于能量试验、空

化试验结果分析的,且分析的内容仅限于试验初步取得的结果。针对泵装置模型试验的典型问题,文献[32]从流体力学的一般原理出发,运行相似理论的方程分析法,系统地分析了泵装置动力特性、空蚀特性及飞逸特性的相似模拟方法。近 3 年相继增加了立式轴流泵装置、灯泡贯流泵装置的水力脉动试验的研究论文和泵装置飞逸转速试验研究的论文及泵装置压差测流的试验研究论文,这些对加深人们对泵装置模型试验的认识起到了很好的作用。

### 2.4.2 泵装置的数值计算研究

先进的 CFD 分析技术已经成为泵站水力设计、优化和分析的重要工具之一。目前很多学者都采用 CFD 技术结合泵装置模型试验研究分析泵装置内流场,并有针对性地进行优化。CFD 技术在泵装置方案初选中显得尤为重要,通过数值模拟计算初选泵装置的试验方案,不但可以缩短时间,而且节省成本,便于分析不同方案的泵装置的内特性,同时预测其外特性。泵装置作为一个整体,其各个部件间相互影响,这些需要我们将各个部件组合成一个整体进行研究。

扬州大学是国内率先开展泵装置内部流动数值模拟工作的,在泵装置的数值模拟工作方面拥有很多的经验,并且将这些技术应用于很多的国家大中型泵站的改造工程和城市防洪排涝泵站建设中。对泵装置数值计算研究的开展还不是很深入,近些年泵装置的研究类型主要集中于灯泡贯流泵装置、竖井贯流泵装置及立式轴流泵装置等,而对更多的泵

装置型式并没有开展研究工作,对其内特性的研究还不够深入,如导叶式混流泵装置、蜗壳式混流泵装置、斜轴伸泵装置等。目前,对泵装置开展的数值计算工作主要采用的是三维定常湍流数值计算技术,能基本满足工程实际应用的要求,但从泵装置的研究工作而言,不能仅限于泵装置的三维定常数值计算,应加快开展泵装置的三维非定常数值计算研究工作,目前开展泵装置非定常数值计算工作的单位有清华大学<sup>[33]</sup>、武汉大学<sup>[34]</sup>和南京水利科学研究院<sup>[35]</sup>,另外如何在非定常数值计算的基础上分析泵装置内部的压力脉动特性、水力噪声及各个部件间的相互耦合关系是值得研究的方向,这些可以为实际泵站的设计和建设提供更加有意义的参考数据。

#### 2.4.3 泵装置的内流场测试研究

泵装置内部流动是复杂的三维非定常流动,开展泵装置的内流场测试工作与泵装置模型试验、数值计算相比其意义更为重要,对泵站的进、出水道设计,转轮与导叶的设计具有重要的指导意义,尤其对现在流行的 CFD 数值计算工作提供了强有力的验证和参考作用。泵装置的内流场测试比泵装置模型试验、泵装置数值模拟开展研究工作更加困难。数值模拟需要的是 CFD 软件与计算机,目前国内的科研单位采用的 CFD 软件大多为国外的商用软件,仅有个别单位是自主研发,国外的 CFD 软件的核心求解器和计算方法仅能通过有限的说明性文字来了解,核心内容无法得知,因此计算结果的有效性需要通过大量的试验来验证,开展试验工作是非常重要的,模型试验需要的是测试系统与泵装置模型,而泵装置内流场的测试相比模型试验还需要流场的测试仪器,如五孔探针,热线热膜风速计(HWFA)、激光多普勒测速仪(LDV)、相位多普勒分析仪(PDPA)、声学多普勒水流仪(ADV)及粒子成像速度场仪(PIV)等,有的仪器设备的投资较大,限制了很多学者开展泵装置内流场的测试工作。

在 20 世纪 80 年代中期,扬州大学的刘超等人就通过五孔探针对单向和双向钟形进水道道的流速场分布进行了测试,这项测试研究对以后的学者开展 CFD 计算分析提供了强有力的验证数据,而且掀起了随后一段时期内五孔探针测泵装置内流场研究工作的小热潮。20 世纪 90 年代初,在国内扬州大学率先引进了三维粒子图像速度场仪,并开始了离心泵、轴流泵内部流场的测试工作,取得了一系列的研究成果,而国外开展泵装置内部流场的测试工作比国内较早,但近些年来,国内外对泵装置内流场的

测试研究取得的成果较少,而且不少学者取得的测试结果的参考性不强,仅就其研究的特例出发,另外国内泵装置流场测试工作的重复性较多,尤以离心泵的内流场 PIV 测试,在不同工况下的各种形式的离心泵内流场均开展过测试工作,然而离心泵内流场测试至今还是研究的热点,如基于 3DPDV 测试的低比转速长短叶片离心泵内部湍流研究在 2010 年受到了国家自然科学基金的资助。相比离心泵内流场的测试研究,对轴流泵、混流泵的内流场的测试工作开展的研究较少,主要因测试难度较大且不易取得具有参考性的研究成果,开展进水流道与泵段耦合的内流场测试工作就相对更少。

对于泵装置的内流场测试,应以典型的泵装置为研究对象,这样所取得的研究成果既有代表性又有很高的参考价值,研究不能仅限于正常工况下的转轮、进水流道内的测试,应开展非设计工况、非对称入流工况下的泵装置内部流场的测试,并根据测试结果提出一些有建设性的参考意见。

## 3 展望

低扬程泵装置的研究已取得了较丰富的成果,有些成果直接应用到了实际工程中。在《国家中长期科学和技术发展规划纲要》所确定的“水资源优化配置与综合利用”和“节能优先”主题,国家基金“十二五”发展规划里面明确指出开展非定常复杂流动机理与控制的研究,这些均为低扬程泵装置的研究指出了方向,因此今后仍然有很多方面的研究工作需要我们去完成。

(1) 对转轮的研究,需进一步完善非设计工况的数值计算方法,并且深入对空化、固液(磨蚀)、启动过渡过程、流固耦合、水力噪声、压力脉动及涡动力学诊断方法的研究,这方面的研究内容还有很多,研究的方法不能仅限于数值计算,应开展大量的试验研究工作,应以试验为主,数值计算为辅,数值计算结果的准确性必须得依靠试验给予验证。针对转轮设计方法的研究需进一步开展,特别是全三维的转轮设计方法,开展转轮的自动优化设计,力争设计出高效区宽,汽蚀性能好的水力模型,并寻找出有针对性研发转轮的方法,最终形成一套高效节能水泵设计及自动优化的软件。

(2) 对导叶的研究应着重研究前置导叶和可调和后置导叶从而提高泵装置的水力性能是非常有益的,对于后置导叶的详细几何参数对叶轮影响的研究还需深入,建议通过数值计算结合试验进行研

究分析。导叶与叶轮间的耦合关系研究还不够深入,如动静干涉的非定常流动及诱导水力脉动的研究还需进一步开展研究工作。

(3) 对进水流道的研究已经相当的全面系统,不同形式的进水流道均开展了内流场计算和模型试验研究,取得了很多有价值的资料。对进水流道与泵段耦合的研究还不够深入,尤其是进水流道出口断面受叶轮旋转影响的研究,其也为前置导叶的设计及不稳定流量工况的改善提供一定的指导意义。出水流道的研究还不够全面系统,主要因出水流道受导叶体出口环量的影响较大,无法制定一个标准对其进行判断,目前对出水流道的研究主要采取独立研究的方法,但是这样与实际情况的差别较大,应采取泵段与出水流道联立的方式开展出水流道的水力特性研究,除此之外还应开展进、出水流道的流场分析与流道参数化建模在泵装置 CAD 中的联合应用,力争实现进水流道的参数化建模及其自动优化,这样便于进水流道在实际工程中的高效、快速的应用。

(4) 对泵装置的研究需以数值模拟优化为主,最终方案需经模型试验的验证。为适应城市防洪排涝的要求,研发新型的低扬程和特低扬程的贯流泵装置形式,针对现有的贯流泵装置进行三维非定常流场计算分析,并开展泵装置内部流场的三维测量。在泵装置模型试验基础上,对泵装置的水力脉动特性、水力噪声及运行稳定性方面开展工作,加快研发泵装置整体水力性能优化的软件。

#### 参考文献:

[1] 刘超,杨帆,金燕.S型下卧式轴伸贯流泵装置:中国,201110134985.3[P].2011-05-24.

[2] 刘超.南水北调工程高比转速水泵装置的有关问题研究[J].水力发电学报,2005,24(1):88-92,101.

[3] 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.

[4] 朱劲木,何忠人,刘德祥,等.大型轴流泵站双向出水流道设计及模型试验验证[J].武汉大学学报(工学版),2005,38(4):13-16.

[5] Thai Q, Lee C J. The cavitation behavior with short length blades in centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2010,24(10):2007-2016.

[6] Wu D Z, Wang L Q, Hao Z R, et al. Experimental study on hydrodynamic performance of a cavitating centrifugal pump during transient operation[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2010,24(2):575-582.

[7] Van Esch. B.P. M, Cheng Li. Unsteady operation of a

mixed-flow pump and the influence of tip clearance[C]//Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, Hamamatsu, Shizuoka, Japan, 2011:79-87.

[8] Parrondo J, Pérez J, Barrio R, et al. A simple acoustic model to characterize the internal low frequency sound field in centrifugal pumps[J]. Applied Acoustics,2011,72(1):59-64.

[9] 杨敏,闵思明,王福军.双蜗壳泵压力脉动特性及叶轮径向力数值模拟[J].农业机械学报,2009,40(11):83-88.

[10] Cheng Li, Van Esch. B.P. M. Blade interaction forces in a mixed-flow pump with vaned diffuser[C]//Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Conference Colorado, USA,2009:165-173.

[11] Zhang D S, Shi W D, Chen B. Unsteady flow analysis and experimental investigation of axial-flow pump[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B,2010,22(1):35-43.

[12] Feng J J, Benra F K, Hans J D. Investigation of periodically Unsteady Flow in a Radial Pump by CFD Simulations and LDV Measurements[J]. Journal of Turbomachinery,2011,133(1):1004-1014.

[13] Barrio R, Parrondo J, Blanco E. Numerical analysis of the unsteady flow in the near-tongue region in a volute-type centrifugal pump for different operating points[J]. Computers & Fluids,2010,39(5):859-870.

[14] Liu D M, Liu X B. Vibration analysis of turbine based on fluid-structure coupling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2008,21(4):40-43.

[15] 李志峰,王乐勤,戴维平,等.离心泵启动过程的涡动力学诊断[J].工程热物理学报,2010,31(1):48-51.

[16] Spence R, Amaral - Teixeira J. Investigation into pressure pulsations in a centrifugal pump using numerical methods supported by industrial tests[J]. Computers & fluids,2008,37(6):690-704.

[17] 张克危.流体机械原理(上)[M].北京:机械工业出版社,2001.

[18] 张勤昭,曹树良,陆力.高比转数混流泵导叶设计计算[J].农业机械学报,2008,39(2):73-76.

[19] Ferro L M C, Gato L M C, Falcão A F O. Design and experimental validation of the inlet guide vane system of a mini hydraulic bulb-turbine [J]. Renewable Energy, 2010, 35(9):1920-1928.

[20] 黄学军,陈斌,张克危,等.可调导叶式潜水贯流泵的设计[J].水泵技术,2011,(1):25-28.

[21] 黄经国.用可调进口导叶调节特性的大型混流泵[J].流体机械,2000,28(4):37-40.

[22] 孔繁余,王文廷,黄道见,等.前置导叶调节混流泵性

- 能的数值模拟[J].农业工程学报,2010,26(10):124-128.
- [23] 曹树良,谭磊,桂绍波.离心泵前置导叶设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(增刊):1-5.
- [24] 钱忠东,王焱,郑彪,等.可调导叶式轴流泵水力特性数值模拟[J].水力发电学报,2011,30(2):123-127,137.
- [25] 刘超.水泵及水泵站[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [26] 汤方平,袁家博,周济人.轴流泵进出水流道水力损失的试验研究[J].排灌机械,1995,(3):13-14.
- [27] 陆林广,张仁田.泵站进水流道优化水力设计[M].北京:中国水利水电出版社,1997.
- [28] 成立,刘超.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.
- [29] 仇宝云.大中型水泵装置理论与关键技术[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [30] 陆林广,吴开平,冷豫,等.泵站出水流道模型水力损失的测试[J].排灌机械,2005,23(5):23-26.
- [31] 杨帆,刘超,汤方平,等.大型立式轴流泵装置流道内部流动特性分析[J].农业机械学报,2011,42(5):39-43,55.
- [32] 陈松山,葛强,周正富,等.泵装置模型试验模拟方法分析[J].水力发电学报,2006,25(5):135-140.
- [33] Wang Z W, Peng G J, Zhou L J, et al. Hydraulic performance of a large slanted axial-flow pump[J]. Engineering Computations,2010,27(2):243-256.
- [34] 冯卫民,宋立,左磊,等.轴流泵装置三维非定常湍流流场的数值模拟[J].排灌机械工程学报,2010,28(6):531-536.
- [35] 王新,李同春,赵兰浩.大型灯泡贯流泵站全流道非定常湍流数值模拟[J].水电能源科学,2010,28(4):119-121,132.