

轴流泵系统技术创新与发展分析*

刘超

(扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225127)

摘要: 论述了我国轴流泵系统水力性能研究和技术创新,探讨了轴流泵系统研究发展趋势。阐述了高比转数轴流泵水力模型和应用发展的过程;通过归纳轴流泵系统特点提出按电动机安装位置进行分类,即轴伸式轴流泵系统和贯流式轴流泵系统两类结构形式。分别阐述了不同类型轴流泵系统在泵站工程中的创新应用。从技术发展的角度研判轴流泵系统的发展趋势及应用前景。讨论了传统水泵选型方法的局限性,分析了适用轴流泵系统的水泵选型新方法的合理性。分析基于试验数据的轴流泵变角调节公式及适用性;分析了进水旋涡危害和安全策略,总结了进水池旋涡研究的成果和消防涡措施。针对该领域研究发展中的现实和潜在问题,提出进一步深化研究创新的思路。

关键词: 轴流泵 泵系统 水力模型 水泵选型

中图分类号: TV675 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0049-11

Researches and Developments of Axial-flow Pump System

Liu Chao

(School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: The low head pump system, mainly axial-flow pump system research and technological innovation in China are introduced. The research and development trend on hydraulic performance of the axial flow pump system are discussed. The applications of high speed axial-flow pump hydraulic model and development progress are presented. Through inductive characteristics of axial-flow pump system, the classification of the system is put forward according to the installation position of the motor, namely the shaft extension type axial-flow pump system and the tubular axial-flow pump system. The innovation applying of the different types of axial-flow pump systems in a quantity pumping station projects is introduced respectively. From the perspective of technological development, the development trends and application prospects of axial-flow pump system are analyzed. The limitations of the traditional pump selection method are discussed, and the applicable rationality of a new method of pump selection for the axial-flow pump system is introduced. The variable angle adjustment formula and applicability based on the test data of axial-flow pump system are introduced. The harmfulness to the pump units from the intake vortex and the safety policies are analyzed. The research results of the vortices in the pump sump and the measures of vortices prevention and elimination are described. As regarding the real and potential problems in research development on axial-flow pump system, the suggestions for further deepen researches are presented. Although the hydraulic performance of axial flow pump system research has reached a higher level, but possibility of partial breakthroughs still exists. The future research direction of pump system should be more to the structural optimization, the pump system reliability and adaptability, vibration and noise, and run quality promotion.

Key words: Axial-flow pump Pump system Hydraulic model Pump selection

收稿日期: 2015-01-18 修回日期: 2015-02-01

* 国家自然科学基金资助项目(51279173)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2015BAD20B01)和江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 刘超,教授,博士生导师,主要从事泵及泵站工程研究, E-mail: liuchao@yzu.edu.cn

引言

轴流泵是用于低扬程泵站的最主要泵型。轴流泵结构简单,安装灵活,形式多样。我国大型泵站尤其是轴流泵站的建设,最近20年来发展十分迅速。在农业排灌、跨流域调水、工业、水处理、水环境等领域有十分广泛的应用。这类泵站的特点是扬程低、流量大、信息化程度高,主要分布在长江中下游、洞庭湖区、江汉平原、珠江三角洲和大运河沿线等。根据中国通用机械工业协会泵业分会的会员企业统计的轴流泵产量^[1]。20世纪90年代以来,我国轴流泵的产量稳定增加,2006和2009年出现大幅增加,可见轴流泵的用量之大。未来,仅南水北调东线工程三期就需要近300台大型轴流泵,面广、量大的中小型泵站中轴流泵的需求量更大。

我国自1961年开始兴建江苏省江都第一抽水站,至今先后在江苏、安徽、山东、湖南、湖北、广东、江西等省区建成200多座大型轴流泵站^[2-5]。江苏省1961—1977年兴建了江都水利枢纽4座大型排灌泵站,安装33台轴流泵,抽引流量 $473\text{ m}^3/\text{s}$,总装机达4.98万kW。江都水利枢纽抽引长江水北上,向淮北区补给水源,同时减轻里下河地区内涝,彻底改变了苏北地区多灾低产面貌,成为建设高产稳产农田重要保障;淮安二站,安装了目前国内最大的轴流泵2台,水泵口径4.5 m,单机流量 $60\text{ m}^3/\text{s}$;总装机10万kW。江苏皂河泵站,安装了国内最大的立式混流泵2台,水泵口径6.0 m,单机流量 $100\text{ m}^3/\text{s}$,总装机1.4万kW。湖北江汉平原樊口泵站安装4台口径4.0 m的大型轴流泵,总流量 $214\text{ m}^3/\text{s}$ 。上海太浦河泵站是装有单泵流量为 $50\text{ m}^3/\text{s}$ 、叶轮直径4.1 m的斜式轴流泵6台,配套1600 kW电机6台,设计总流量为 $300\text{ m}^3/\text{s}$,实施从长江引水入太湖与黄浦江的调水功能,改善了上海饮水水质。东深工程1965年竣工向香港供水,工程取东江水经8个梯级轴流泵站至深圳,送往香港,每年为香港供水11亿 m^3 。引滦入津工程1983年竣工通水,沿线建造大型泵站4座,安装大型轴流泵27台,总流量 $50\text{ m}^3/\text{s}$,工程每年向天津供水10亿 m^3 。引黄(河)济青(岛)工程由山东博兴县引黄河水至青岛,沿线建造5个梯级站,安装34台大型轴流泵机组,总流量 $1595\text{ m}^3/\text{s}$,为青岛供水30万 m^3/d 。国家南水北调东线工程沿京杭大运河修建13个梯级提水工程,新建21座泵站均为大型低扬程泵站,其中19座轴流泵站,2座混流泵站,增加调水能力 $200\text{ m}^3/\text{s}$,新增装机容量20.66万kW,更新改造江都第三、四站及现有淮安、泗阳、皂河、刘山、解台泵站。

现在,我国已建有大型低扬程泵站300余座,形成了以大型低扬程泵站为骨干的防洪排涝以及跨流域调水工程体系,大幅度提高了抗御自然灾害的能力,促进了现代化建设和经济快速稳定的发展。

1 轴流泵水力模型和应用

通常泵水力模型为叶轮、叶轮室、导叶、导叶外壳和泵轴。为便于测试,导叶出口还加接 60° 弯管,国内定义前述6部件的组合体为轴流泵的泵段,即模型泵。轴流泵水力性能研究是以模型泵为研究对象的。建国以来,轴流泵及其工程应用的发展阶段可以分为仿制、研发和创新3个阶段:仿制阶段(1950—1965年),相关标志性工程为江都第一、第二抽水站64ZLB-50型泵,广东省的东深供水工程;研发阶段(1966—1983年),相关标志性工程为湖北省樊口泵站,安徽省驷马山泵站,江苏省淮安二站,江都三站、四站,皂河泵站,安徽省凤凰井双向流道泵站工程,主水泵是长江型CJ系列的轴流泵和ZL系列轴流泵;创新阶段(1983—2011年),取得了系列低扬程轴流泵及装置成果,标志性工程为江都一、二站更新改造,江苏省泰州高港双向流道泵站,广东东深工程太园泵站。此后到2013年南水北调东线工程系列低扬程泵的研究展开,并进行同台测试,标志性工程有上海太浦河泵站工程,江都三、四站更新改造,樊口泵站更新改造,南水北调东线工程13梯级中新建的21座和改造的8座泵站工程。

在国家南水北调等重大工程建设的技术需求和投入推动下,2004年9月—2005年初国家有关部门组织了轴流泵和混流泵模型的泵段性能同台测试,检测了国内高校和企业研发的20多个模型轴流泵。这也是1981年后国内又一次同台模型试验,检测结果显示取得了较大的进步。首先,模型泵已形成比较完整的系列,填补了不少空白。适用扬程范围扩大,为选择适合不同工程需要的模型,创造了有效的技术储备,基本满足国内各种低扬程泵站工程建设和改造的需要。其次,提高了泵段性能的技术指标,模型泵最高效率由84.50%提高到86.35%,各角度平均效率提高1.99%;模型泵的流量较大,约提高5%。而从日本和荷兰引进的2个模型,其同台测试的最高效率分别为84.18%和83.90%,这表明我国水泵模型的技术指标已达到国外同类水泵模型的水平。

近年来,由于农村和城市水生态治理和防洪排水工程建设的需要,引排双向提水泵站的需求不断增加,双向泵得到较大的发展,双向轴流泵水力模型研究取得重要进展。扬州大学、江苏大学研制了

双向轴流泵叶轮,并已在江苏、天津、安徽等地区较多的泵站中成功应用。其中用于大型潜水泵的叶轮直径已达到 2.2 m。而泵站运行工况的变幅扩大则推动了双向轴流泵叶轮与导叶的匹配技术研究。

轴流泵水力模型经过 30 多年的研究开发使模型泵段效率提高了 1.9 个百分点,对应 86% 的泵段效率,轴流泵的叶轮效率已经达到 93% 左右,这或是轴流式叶轮效率的上限,轴流泵模型效率的天花板效应已经显现。目前,实际泵站工程的运行工况变幅较大,传统针对单一工况设计的水泵很难适应工况变幅大的应用要求,需要采用变工况优化设计理论对水泵水力模型进一步的优化,开展变工况优化和多学科优化研究,有必要综合应用水力特性、叶片力学特性和振动特性等不同学科技术进行研究。

国际上,轴流泵的研究集中于泵叶轮内的流动、旋涡、叶片与叶轮室的间隙流动、小流量工况不稳定性及汽蚀特性,对进水池流动研究相对较多;多学科多工况的叶轮设计取得了一定进展^[6-12];在轴流泵系统整体研究方面公开发表的文献相对较少。

2 泵系统结构形式

水泵系统也称为水泵装置,包括水泵和进出水的管路系统。国内学者在 20 世纪 70 年代就认识到进出水管路对低扬程的泵系统性能影响较大,尤其是比转数较高的轴流泵和混流泵系统更加明显。从那时起就提出将水泵及进出水管路即泵系统作为整体来进行研究,并不断创新,历经 30 余年,在国际该领域已独树一帜,已成为中国对泵站工程研究的特色。经过多年的应用和发展,已经形成并逐步完善了轴流泵系统。轴流泵系统习惯上多按泵轴布置形式分为立式(轴)泵系统;卧式(轴)泵系统和斜式(轴)泵系统。实际上,按动力机布置形式可将轴流泵系统分为轴伸泵系统(电动机在泵系统流道外部)、贯流泵系统(电动机在泵系统流道内部)。后者更为清晰,没有交集,如图 1 所示,其中的 S 形轴伸泵系统、竖井式轴伸泵系统、灯泡贯流泵系统、双向流道泵系统和双向轴伸泵系统均有重要的创新。

2.1 立式轴伸泵系统

2.1.1 基本流道结构

最早的大型立式泵系统的流道结构为肘形流道进水和虹吸流道出水(图 2),如江都第一、二、三、四抽水站均为此类流道结构。肘形流道内水流顺畅无旋涡,虹吸流道断流可靠、操作简单,至今仍然是立式泵系统的一种基本流道结构形式^[13-15]。

为减少泵房底板挖深,出现了钟形和箕形进水流道;由于快速闸门断流技术的应用,直管流道出水

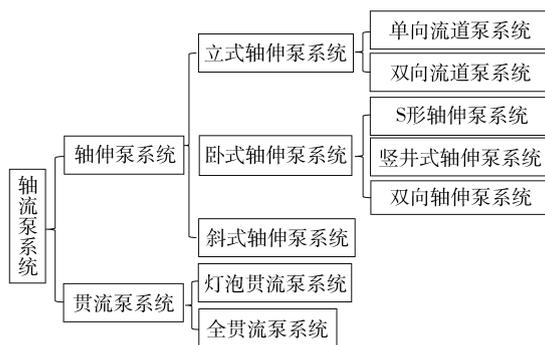


图 1 泵系统结构分类

Fig. 1 Structure classification of pump system

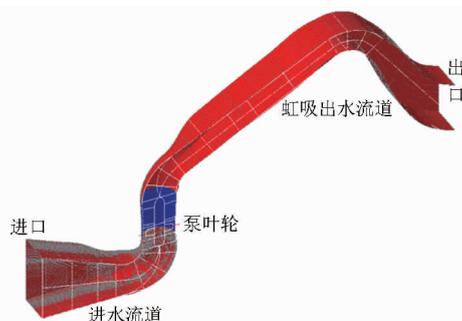


图 2 立式轴伸泵系统 3D 剖面图

Fig. 2 3D profile of vertical shaft extension pump system

也有较快发展。近 20 年来,国内学者对常规基本流道结构进行了大量的研究工作,主要集中在流道的水力设计优化方面,通过流道断面形状和型线的优化实现流道水力性能最优。优化的关键在于水流流速的渐变规律和消除脱流旋涡,增加流速分布的均匀性,减少水力损失,从而提高泵系统的整体性能。三维紊流数值模拟技术的广泛应用,推动了从流道的一维设计向三维设计的转变。不断发展完善的 CFD 计算软件为三维流动特性获取提供了重要的工具,有助于准确发现流动的不良形态并定量地把握,以及对几何参数进行调整,克服设计上的缺陷。这对于年轻的设计人员甚为有益。对于成熟有经验的设计人员则可以通过三维流动特性分析对流道进一步优化,作为前期研究的重要基础工作。通过对进水流道的几何形状优化,改善水流形态,防止脱流和旋涡,减少水力损失,再选用适合的叶轮,泵装置效率得以显著提高。大型泵系统模型最高装置效率达到 75% ~ 79%,其中进水流道优化的贡献可达到 1% ~ 3% (本文的效率均指模型效率)。同时,相应的流量也有所增加。中小型泵系统性能指标的基数较低,则有更大的提高幅度。

2.1.2 双向流道结构

双向抽水泵站当初是为实现灌溉排水结合设计的工程枢纽,由进出水渠道和水闸控制水流方向,需要占用大量的土地资源,土建投资大。双向流道泵

系统是适应城市引排水需要又能最大程度减少用地投资的泵站流道形式,用双向流道代替渠道,用闸门代替水闸,可节省70%左右的土地资源和大量土建投资,有效解决了双向抽水工程占用土地资源过多的问题,是我国泵站工程的一个创新^[16-20]。

1966年南京武定门抽水站首次采用双向流道,集抽灌、抽排、自引和自排功能于一体。1978年建成的江苏镇江谏壁双向流道抽水站安装6台叶轮直径2.8 m轴流泵,单机抽水能力 $20\text{ m}^3/\text{s}$,灌溉、排水双重功能合一。1991年建成的安徽凤颈双向流道排灌泵站安装6台叶轮直径为3.1 m的立式轴流泵,单机流量为 $40\text{ m}^3/\text{s}$,承担流域防洪、排涝、灌溉、生态补水,最高泵装置效率达到69%。1998年建成江苏常熟泵站,安装9台叶轮直径2.5 m轴流泵,单机流量 $20\text{ m}^3/\text{s}$,出水结构参照荷兰砵蜗壳泵的开敞式出水形式,引排双向运用,最高泵装置效率达到65%。1999年建成江苏泰州高港泵站(图3),安装立式开敞式轴流泵9台套,叶轮直径3.0 m,单机抽水能力 $34\text{ m}^3/\text{s}$ 。泵站采用创新的双层有压、曲线扩散出水室和防涡技术,引排双向运行,最高泵装置效率达到73%,高于同类双向流道泵系统的最高装置效率5~8个百分点,取得了突破。2010年江苏常熟泵站进行更新改造,采用该技术,最高装置效率达到71%,提高了6个百分点。目前,采用曲线扩散出水室的双层有压流道泵系统已在苏皖赣浙沿江滨湖地区得到广泛应用,运行良好。

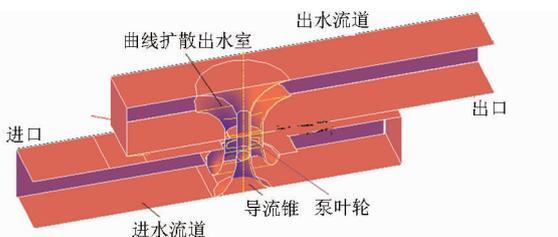


图3 双向流道泵系统3D剖面图

Fig.3 3D profile of two-way flow pump system

无论是开敞式进水池还是有压进水流道,采用喇叭管进水的立式泵系统有一个重要问题是进水流道内容易产生旋涡。国内外许多学者一直以来都在努力进行进水旋涡的研究^[21-24]。文献[22-23]针对开敞式进水池进行数值模拟并得到实验测量验证,获得了表面生成并延伸的旋涡。文献[24]应用高分辨率三维PIV激光流速场仪对轴流泵进水喇叭管及下方区域进行详细的测量,分析了进水旋涡核心区域的细部流动结构,导出了旋涡的数值形态;揭示了涡核内水流圆周速度分量的分布规律,涡核中心的流速分量接近为零,圆周速度沿半径方向迅速增大,在涡核半径3~5 mm范围内增加最快,速度

梯度最大,进水旋涡具有明显的强迫涡特征。这些成果对旋涡的研究有较大的意义。针对旋涡对机组运行的危害,导流锥、防涡消涡栅等成功地用于泵站工程,有效地消除了涡带,保证了泵机组安全运行。

2.2 卧式轴伸泵系统

2.2.1 S形轴伸泵系统

S形轴伸泵的流道形状呈S形,所以称之为S形轴伸泵。轴伸泵系统按电动机安装的位置分为前置轴伸和后置轴伸;按流道形状分为平面S形和立面S形。S形轴伸泵系统应用较早,发展较缓^[25-30]。1978年建成的广东斗门西安泵站是我国最早运用的大型轴伸泵系统,安装了2台叶轮直径3 m的卧式轴流泵,单机流量 $36.7\text{ m}^3/\text{s}$,呈立面S形,泵机组位于进水流道上方,进水条件较差,汽蚀性能不佳,2008年实施了改建;1982年建成的南京秦淮新河泵站是我国最早的平面S形轴伸泵站,采用5台单向翼型轴流泵,叶轮直径1.65 m,单机流量 $8\text{ m}^3/\text{s}$,叶片 180° 可调。将水泵叶片旋转 180° ,电动机反转即可实现反向抽水。正反向运行效率均比较低,最高为57%~60%,因为后期叶片调节困难,汽蚀严重,在1999年进行了机组改造,改为双向叶轮泵装置。1993年投产的大门渚泵站和2001年建成的广东顺德陈村联安泵站均安装5台叶轮直径1.6 m的S形轴流泵,单机设计流量 $8.5\text{ m}^3/\text{s}$,两座泵站都是排水泵站,年运行时间很短,并不注重运行效率,泵装置效率相对较低。

为了探求结构简单、损失更小的流道系统,文献[28]研发了新的高效S形轴伸泵系统。按照动压能转换损失最小的方法优化S形轴伸泵系统,高效轴伸泵系统的核心部件是S形弯管,如图4所示。经高精度模型测试验证,该轴伸泵系统的最高装置效率超过了83%,在低扬程轴伸泵系统研究中取得了较大进展。高效轴伸泵系统已获得国家发明专利,在江苏省扬州黄金坝泵站应用,采用叶轮直径1.35 m,流量 $4.5\text{ m}^3/\text{s}$ 的高效轴伸泵系统4台,扬程1.5 m时最高装置效率为78.4%。S形轴伸泵不受泵的大小制约,可以用于各种尺寸的轴流泵系统,保证高效节能,应用前景十分广阔。

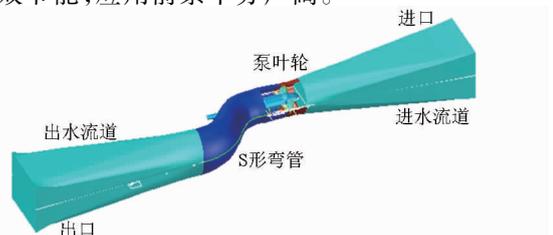


图4 S形轴伸泵系统3D剖面图

Fig.4 3D profile of S shaped shaft extension pump system

S形轴伸泵系统在我国建设较早,但是它的应用发展较为缓慢。主要原因是这种形式的泵系统性能欠佳,装置效率较低,难以满足实际工程需要。从后期应用多限于排水泵站工程可以看出对此类泵系统结构简单、维护方便的认同,而不以装置效率为重。高效S形轴伸泵系统的研发和应用突破了装置效率不高的瓶颈,实现了跨越式提高,最高装置效率从60%提高到83%,其未来应用可以期待。

2.2.2 竖井式轴伸泵系统

竖井轴伸泵系统源于竖井式水轮机组。实际上竖井泵系统的进水或出水流道分为2股流道,中央形成一个开敞竖井用于安装电动机与传动装置。也可以看成是由S形轴伸泵弯管一侧的流道分叉为2股流道,形成Y形轴伸泵系统(图5)。与轴伸泵系统一样,竖井泵系统也按竖井即电动机安装的位置分为前置和后置,工程中多选用前置竖井轴伸泵系统。就泵房立面布置而言,竖井式泵系统的水泵安装高程和底板底高程都高于立式轴伸泵系统,从而大幅降低泵站基础的开挖深度,相对抬高底板高程,对闸站结合的工程还可以减小泵站底板与节制闸底板的高差,便于闸站结合。竖井泵系统主体土建工程和机电设备的投资比立式泵系统低约30%;其水力损失较小,水力性能优良,因而在长三角和珠三角地区低扬程泵站中得到了较为广泛的应用。

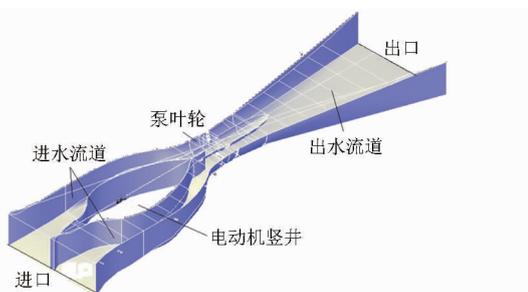


图5 竖井式轴伸泵系统3D剖面图

Fig. 5 3D profile of pit shaft extension pump system

国外的竖井泵系统在20世纪70年代就已经应用于泵站工程,日本的新川河口泵站就安装有叶轮直径4.2 m,单泵流量 $40.4 \text{ m}^3/\text{s}$,泵站扬程为2.6 m的竖井泵系统。国内采用竖井泵系统较晚,但发展较快^[31-40]。2004年建设的江苏无锡江尖泵站,安装竖井轴流泵3台套,叶轮直径2.5 m,单泵流量为 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 。2013年投入运行的江苏邳州泵站则是国内最大尺寸的竖井泵系统,安装4台轴流泵,叶轮直径3.3 m,单泵流量为 $33.4 \text{ m}^3/\text{s}$,扬程3.4 m时最高泵装置效率为82%。江苏省无锡市梅梁湖泵站安装叶轮直径2.0 m,单泵流量为 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 的竖井轴伸泵5台套,最高泵装置效率为68%。江苏南通九圩港泵站安装叶轮直径3.25 m,单泵流量为 $330 \text{ m}^3/\text{s}$

的竖井轴伸泵,扬程1.8 m时最高泵装置效率达77%。广东黄麻涌泵站采用叶轮直径1.2 m的竖井轴伸泵系统,最高泵装置效率为67%。

虽然竖井轴伸泵系统在国内应用较晚,但因大量低扬程泵站建设对多种泵站形式的需求增长较快而发展迅速,不仅是数量上的简单增加,而且在质量上也显著提升,最高泵装置效率已从70%左右提高到82%^[31-40]。

后置轴伸式泵系统的弯管对导叶出口环量的回收能力很强,尤其适用小流量工况的能量回收,适用于偏小流量工况运行;前置轴伸泵系统在大流量工况时的水力损失较小,适用于偏大流量工况运行。

2.2.3 双向轴伸泵系统

双向泵系统既不通过渠道也不通过流道而是通过改变轴流泵叶轮的旋转方向来实现双向抽水(图6)。轴流泵采用中心对称翼型,其形式也有平面S形、竖井式和贯流式泵系统^[25-29]。此类泵站扬程特别低,通常的设计扬程在1.5 m左右,对泵系统的要求较高。2000年改造完成的南京秦淮新河泵站为直径1.6 m、对称翼型的双向叶轮泵系统,正向运行效率最高为66%,反向运行效率最高为57.2%。江苏苏州裴家圩泵站选用竖井式贯流泵装置配S形叶片双向泵转轮,水泵叶轮直径1.9 mm,水泵转速155 r/min,电动机转速980 r/min,正反向最高装置效率分别为62%和58%。

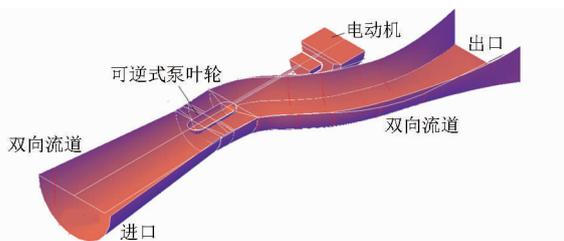


图6 双向可逆轴伸泵系统3D剖面图

Fig. 6 3D profile of reversible shaft extension pump system

双向泵系统结构简单,运行操作方便,虽然正反向性能相互制约,效率不够高,反向汽蚀性能较差,但综合特性仍然可以满足实际工程需要,为用户所接受。双向泵系统在城市引排水泵站工程的应用越来越多。

2.3 斜式轴伸泵系统

斜式泵系统界于立式和卧式系统之间。斜式轴伸泵系统具有良好的水力性能,土建投资较少,安装检修方便(图7)。这些特点在国内斜式泵机组的泵站设计、制造、使用中已有体现^[41-44]。斜式轴伸泵泵轴倾斜的安装角度通常采用 15° 、 30° 或 45° ,在满足电动机和传动布置的前提下,尽量选择较小的安装角度,以便减小弯道曲率,提高泵装置效率。1978

年建成的内蒙古河套红圪卜泵站是我国第一座采用斜式轴伸泵系统的泵站,安装10台口径1.2 m的斜式轴伸泵,单机流量 $3\text{ m}^3/\text{s}$ 。1991年建成红圪卜二站,安装6台叶轮直径2.5 m的斜式轴伸泵,单机流量 $16.6\text{ m}^3/\text{s}$ 。近年来,斜式泵系统应用也在逐渐增加,浙江省1998年建成的盐官泵站2004年验收,采用4台叶轮直径3.8 m,单机流量 $50\text{ m}^3/\text{s}$ 的斜 15° 机组,最高泵装置效率为72%。上海(江苏)太浦河泵站设计净扬程1.39 m,2003年建成验收,安装6台叶轮直径4.1 m的斜 15° 轴伸泵,是国内尺寸最大的斜式轴伸泵,单机流量 $50\text{ m}^3/\text{s}$,扬程1.6 m时最高泵装置效率71.6%。

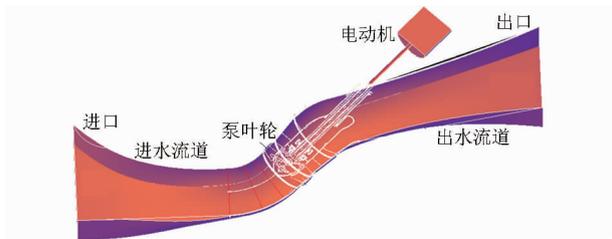


图7 斜式轴伸泵系统3D剖面图

Fig. 7 3D profile of inclined shaft extension pump system

1997年建成的顺德桂畔海泵站,站内装设叶轮直径为2.1 m的 45° 斜轴式轴伸泵4台。2009年建成的江西黄家坝泵站均采用叶轮直径1.68 m、斜 30° 泵系统,最高泵装置效率达到80%以上。2009年建成的广东惠州文头岭泵站安装6台叶轮直径为2.8 m的斜 15° 轴伸泵,单机流量 $23.2\text{ m}^3/\text{s}$,最高泵装置效率也达到80%以上,是目前装置效率最高的斜式泵系统。

斜式泵系统在我国建设较早,然而其发展是在近10多年,其性能也有了很大的提高,最高装置效率从70%提高到80%左右,应用的数量也在快速增长。

2.4 贯流泵系统

贯流泵又称管形泵,意指电动机置于管道内部的泵。这样的泵系统就是通常所称的贯流泵系统。水泵进出水水道顺直,水流沿轴向流动,进水流态均匀,符合水泵叶轮设计的基本要求,水力损失小,装置效率较高。贯流泵系统又分为灯泡式和全贯流泵系统。

2.4.1 灯泡贯流泵系统

灯泡贯流泵系统将电动机和减速箱安装在一个灯泡形的金属壳体中,电动机的主轴与转轮的轴水平联接(图8)。泵机组的轴系支撑结构、导轴承和推力轴承等均布置在灯泡体内,结构紧凑^[45-50]。但是与轴伸泵系统相比,灯泡式贯流泵的结构较复杂,密封要求高,安装维护不方便。

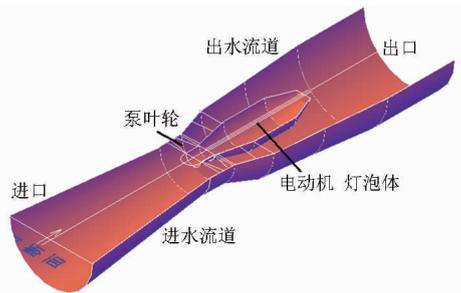


图8 灯泡贯流泵系统3D剖面图

Fig. 8 3D profile of bulb tubular pump system

1997年建成的江苏淮安三站是我国最早的灯泡贯流泵站,安装叶轮直径3.19 m、单机流量 $30\text{ m}^3/\text{s}$ 的可逆式灯泡贯流泵2台套,最高泵装置效率70%左右。淮安三站建成后,由于多方面的原因,一直存在机组启动困难、主机组超功率运行及装置效率偏低等问题,给生产运行管理造成较大影响。由于国内外灯泡贯流泵建设的实例不多,对贯流泵系统认识和研究较少,在其后多年内未再建设灯泡贯流泵站。南水北调开工建设后,计划在7座泵站选用灯泡贯流泵系统,国内开展了新一轮的灯泡贯流泵系统的研究。通过自行研制、技术引进、与国外厂商合作生产等途径来提高贯流泵系统的研究、设计、制造和安装水平。2009年建成的江苏徐州蔺家坝泵站,采用日本日立公司和无锡水泵厂合作研发的4台叶轮直径2.85 m、单泵流量 $25\text{ m}^3/\text{s}$ 全调节后置灯泡贯流泵系统,2.6 m扬程时最高泵装置效率78.1%;2011年建成的淮阴三站贯流泵机组由湘电集团长沙水泵厂与荷兰耐荷泵业公司联合制造,叶轮直径为3.14 m、单机流量为 $33.4\text{ m}^3/\text{s}$,4.28 m扬程时最高泵装置效率79.6%;2011年建成的韩庄泵站,2013年建成的山东二级坝泵站均采用灯泡贯流泵系统,由日本荏原公司和山东博山水泵有限公司合作生产制造,单机流量 $31.5\text{ m}^3/\text{s}$,扬程1.99 m时最高泵装置效率78.6%。

灯泡贯流泵是南水北调东线工程重点研究攻关的泵型,投入了相当的资金和人力。作为“十一五”国家科技支撑计划的重点内容,灯泡贯流泵位列其中。经科研人员努力,取得的成果水平显著提高,经天津同台试验确认,灯泡贯流泵最高泵装置效率达到了82%;中国水科院试验台测试了后置灯泡贯流泵系统模型^[46,48],最高装置效率超过82%、汽蚀比转数 C 大于1200,这些研究成果均与国际水平相当,在水力性能方面具备工程应用条件,但仍需要电动机、传动、密封等技术保障,这也是国内厂商近期或缺的技术。

对灯泡贯流泵系统来说,由电动机大小决定的灯泡尺寸较大,增加了水力损失,也难以用于中小型

工程。为了克服这一困难,近年来,由于密封、绝缘、冷却、监控和管道的自动耦合等技术问题得到较好的解决,用潜水电动机替代普通电动机的潜水贯流泵系统在中小型泵站中的应用逐渐增多,并有大型化的趋势,大口径潜水电泵的生产和应用迅速发展^[51-54]。直接置于水中的潜水电动机机身比普通电动机灯泡的直径小许多,既有利于散热、减小水力损失又扩大了贯流泵的应用范围。目前我国已经生产口径1.4、1.6、1.8、2.2 m的大型潜水电泵系列产品。2007年广东梅州黄塘泵站安装8台1.8 m口径的大型潜水泵,设计扬程3.6 m,设计流量 $14 \text{ m}^3/\text{s}$;2013年建成的淮安里运河楚州控制工程泵站采用叶轮直径2.1 m的潜水贯流泵系统6台,设计扬程1.3 m,单机流量 $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$,为国内最大的潜水贯流泵,经过优化最高装置效率达到81%;其中2台双向贯流式潜水泵系统,采用叶轮直径相同的双向可逆式叶轮,正反向的泵系统最高效率分别达到62%和68%左右。

2.4.2 全贯流泵系统

全贯流泵系统又称电机泵。这种泵系统将电动机和水泵叶轮合为一体,不再有传动轴,电动机的转子作为轴流泵的叶轮(图9)^[55]。与普通的轴流泵叶轮相比,叶片的外缘与电动机的转子相连,类似电动机转子的轮辐。这样的转子在运行时产生摩擦损失较大,使得电机泵的装置效率较低。国内于1978年建成的安徽齐庄泵站采用,电机泵口径0.7 m,型号为700-ZDB-155,扬程7.5 m,立式安装。因其装置效率低,其后并未得到更多的应用。尽管如此,电机泵的结构简单独特,无传动,低噪声,可靠性高,对用户仍然有较大的吸引力。根据分析,低扬程排水泵站工程中应用全贯流泵,可节约泵站工程投资30%~40%;建设周期较常规泵站减少2/3以上;泵站周边噪声比常规泵站降低20%~40%,适合城市排涝泵站工程的需要。2009年建成运行的广东清远独树电排站安装3台全贯流泵,设计扬程6.9 m,单机流量 $1.30 \text{ m}^3/\text{s}$,功率155 kW;广

州市用于改善水环境的海珠区南便涌泵站和佛山市富湾泵站等也选用了全贯流泵。

电机泵发展的关键在于提高装置效率,包括电动机的中空转子对电动机效率的影响,转子对叶轮效率的影响,轴承支撑的水力损失等均有待研究。

可以认为,全贯流泵和潜水贯流泵的快速发展和在贯流式泵系统的领域发挥越来越重要的作用。

3 轴流泵选型和系统性能换算

3.1 基于泵系统的轴流泵选型新方法

轴流泵的选型对泵站设计运行非常重要。全国泵站改造的实际调查说明,轴流泵站效率低下的一个重要原因是泵型选择不合理。传统的水泵选型方法是根据泵站扬程和流量的要求,根据设计流量,在设计扬程的基础上增加损失扬程求得设计工况点A来选择水泵。增加的损失扬程约为泵站设计扬程的15%~20%,但对于扬程较低的轴流泵系统的设计点偏差较大。已经证明,泵系统的最高效率点 E_s 在泵最高效率点 E_p 的左下方(图10)。这表明对应泵系统最高效率点的流量 Q_s 小于对应泵最高效率点的流量 Q_p ,按照传统的水泵选型方法确定的工况点不能满足设计要求。文献[56]在分析大量试验结果的基础上,提出了等扬程加大流量的轴流泵选型新方法。即根据泵系统设计扬程 H_o ,在设计流量 Q_o 的基础上增加求得设计工况点B来选择水泵。这样确定的水泵可以保证泵装置最高效率点流量和设计流量接近相等,对应的扬程也基本相同。这一方法的关键在于确定需要增加流量 ΔQ_o 的取值。需要增加的流量可以利用现有的泵和泵装置模型试验数据归纳导出。对不同结构形式的轴流泵系统,流量增加值在10%~15%。基于泵系统的轴流泵选型新方法在工程设计中已经广泛应用。这正是多年来将泵系统作为整体进行研究的一项创新成果。

3.2 轴流泵变角性能关系

轴流泵通过变角调节改变其性能,以适应不同

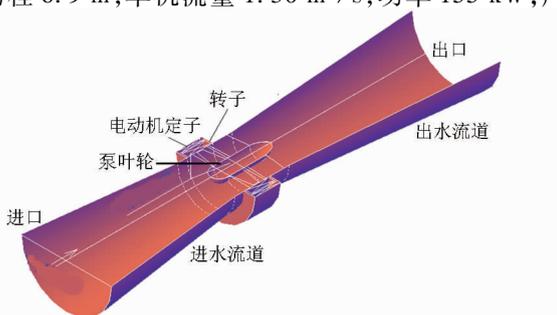


图9 全贯流泵系统(电机泵)3D剖面图

Fig. 9 3D profile of motor-pump system

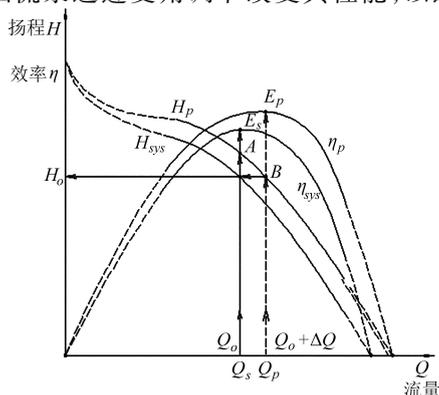


图10 轴流泵选型新方法示意图

Fig. 10 Axial-flow pump selection of new method

的泵站运行工况是大中型水泵扩大运行范围、提高运行效率最为常用和有效的方式,我国大型轴流泵站大多采用变角调节。通过变角调节能在较大的流量范围内保持水泵较高的运行效率。在泵站的优化运行中需要实时掌握变角性能,但是一直以来都缺少有效的变角性能计算方法。

文献[57]基于水泵变角调节前后水流冲角变化很小,水泵的运行效率基本不变的条件,近似地认为调节前后泵叶轮的速度三角形相似,导出了轴流泵变角性能关系式,填补了水泵变角调节性能计算的空白。变角调节公式为

$$\begin{cases} \frac{Q}{Q_a} = \left(\frac{\tan\beta}{\tan\beta_a} \right)^L \\ \frac{H}{H_a} = \left(\frac{\tan\beta}{\tan\beta_a} \right)^K \\ \frac{P}{P_a} = \left(\frac{\tan\beta}{\tan\beta_a} \right)^M \end{cases}$$

式中, Q 为流量, H 为扬程, P 为功率, β 为叶片安放角; L 、 K 和 M 分别为流量指数、扬程指数和功率指数,由试验性能数据通过数值逼近求得流量指数 L 和扬程指数 K ,功率指数 $M=L+K$ 。经计算实例验证, $Q-H$ 曲线计算结果与试验数据之间吻合很好, $Q-P$ 曲线计算结果与试验数据之间基本吻合。总体上表明水泵变角公式的计算结果可信,水泵变角关系式可应用于此类水泵不同叶片角度的性能换算,对水泵选型和泵站优化运行有较大的应用价值,使水泵选型快捷准确,泵站优化运行实际效果更好。水泵变角调节公式与变径调节的车削公式和变速调节的比例律公式完善了全部水泵变工况调节性能计算公式。需要说明的是,这里水泵变角公式适用于轴流泵系统,也可用于泵变角性能计算。车削公式和比例律公式适用于泵性能计算,也常被用于泵系统性能计算。由于泵系统内的流场包括泵叶轮内的相对流场和进出水通道内的绝对流场,无论是车削公式还是比例律公式,用于泵系统也都有一定的近似性,不过其结果在一般工程应用范围内是可接受的。

4 展望

轴流泵系统的深入研究推动了泵及泵站工程的技术进步和创新。无论是轴伸泵系统还是贯流泵系统均有跨越的发展。

随着国民经济建设及生产生活标准的不断提高,要求泵站功能多样化,在需求持续增长的推动下,宽泛工况轴流泵系统的研究渐成关注热点;立式轴伸泵系统结构简化、出流部件规范化和生产标准化尚有一定的发展空间;不同类型轴流泵系统的性能均已达到较高水平,其名义管路效率已达95%左右,再进一步提高的难度较大。因此泵系统结构可靠性和安装维护将是选择泵系统形式的重要因素。卧式轴伸泵系统和斜式轴伸泵系统正在趋向成熟,在轴流泵站工程中的应用会继续增长。高效S形轴伸泵系统应用将较快增加。与潜水贯流泵和轴伸泵系统相比,灯泡贯流泵系统不再具有效率高的优势,其应用将受到较大影响。虽然在轴流泵系统研究方面水力性能达到了较高水平,但是仍然存在着局部突破的可能。今后的泵系统研究方向应更多地转到结构优化、泵系统可靠性和适应性、振动和噪声及运行品质提升等领域。

CFD软件的飞速发展使得三维紊流数值模拟技术在泵系统研究中广泛应用,发挥了重要作用。在设计工况下泵系统的内部流动特性、外部性能预测的计算结果都能满足工程需要,但非设计工况的计算结果与实际情况尚有较大偏差,进水结构水中涡带(vortex tube)的模拟尚处于探索阶段,这都是需要不断拓展深化的研究重点。数值模拟离不开试验的验证,而目前对数值模拟计算结果的验证主要在性能预测和试验结果的比较。由于流场试验尤其是三维流场试验的研究较少,流场计算结果仅有局部和个别验证,试验研究空间较大。三维流速场的测量应以激光无干涉测量技术为主导,深度开展细部结构测量;压力场的试验研究有待现代先进研究手段应用,突破内部压力测量的难关。

参 考 文 献

- 1 景瑞,何希杰. 轴流泵及其应用概述[J]. 通用机械,2014(9):86-89.
- 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.
Liu Chao. The investigation on high specific speed pump system in eastern route of the South-to-North water diversion project of China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(1):88-92,101. (in Chinese)
- 3 汤方平,王国强,刘超,等. 高比转速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.
Tang Fangping, Wang Guoqiang, Liu Chao, et al. Design and numerical analysis on an axial-flow model pump with high specific speed[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2005,41(1):119-123. (in Chinese)
- 4 杨帆,刘超,汤方平,等. 带可调进口导叶轴流泵装置水力性能数值分析[J]. 农业机械学报,2014,45(5):51-58.
Yang Fan, Liu Chao, Tang Fangping, et al. Numerical simulation on hydraulic performance of axial-flow pumping system with adjustable inlet guide vanes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5):51-58. (in

Chinese)

- 5 张德胜,施卫东,李通通,等.轴流泵叶轮非线性环量数学模型建立与试验[J].农业机械学报,2013,44(1):58-61,66.
Zhang Desheng, Shi Weidong, Li Tongtong, et al. Establishment and experiment on nonlinear circulation mathematical model of axial flow pump impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):58-61,66. (in Chinese)
- 6 Jong-Woong Choi, Young-Do Choi, Chang-Goo Kim. Flow uniformity in a multi-intake pump sump model [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(7): 1389-1400.
- 7 Friedrich-Karl Benra, Hans Josef Dohmen. A closed loop approach to simulate the unsteady three-dimensional flow in an axial flow pump[C]//Proceedings of the ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting, 2010, 1:631-645.
- 8 Yumiko Takayama, Hiroyoshi Watanabe. Multi-objective design optimization of a mixed-flow pump[C]//Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Summer Meeting, 2009, 1:371-379.
- 9 Benra F K, Dohmen H J. Unsteady three-dimensional flow phenomena in an axial flow pump at different operating points [C]// Proceedings of the ASME 2008 Fluids Engineering Summer Meeting, 2008, 2:277-283.
- 10 Pérez Flores P, Kosyna G, Benra F K, et al. Improvement of axial flow pump part load behaviour of an experimental and numerical Study[C]//Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF09), 2009.
- 11 Laborde R, Chantrel P, Mory M. Tip clearance and tip vortex cavitation in an axial flow pump [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1997,119:680-685.
- 12 Kaya D. Experimental study on regaining the tangential velocity energy of axial flow pump [J]. Energy Conversion & Management, 2003, 44(11):1817-1829.
- 13 黎耀军,沈金峰,刘竹青,等.轴流泵轮缘间隙非定常流动的大涡模拟[J].农业机械学报,2013,44(增刊1):113-118.
Li Yaojun, Shen Jinpeng, Liu Zhuqing, et al. Large eddy simulation of unsteady flow in tip region of axial-flow pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.1):113-118. (in Chinese)
- 14 冯建刚,成斌,王晓升.基于PI定理的虹吸式出水管原型和模型虹吸形成时间的相似分析[J].清华大学学报:自然科学版,2011,51(4):503-507.
Feng Jiangan, Cheng Bin, Wang Xiaosheng. Similarity analysis of siphon formation time of siphon pipes between the prototype and model based on the π theorem [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2011,51(4):503-507. (in Chinese)
- 15 杨帆,刘超,汤方平.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.
Yang Fan, Liu Chao, Tang Fangping. Characteristics of flow in large vertical axial flow pumping system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5):39-43,55. (in Chinese)
- 16 刘超,金燕.双向流道泵装置内三维流动数值模拟[J].农业机械学报,2011,42(9):74-78.
Liu Chao, Jin Yan. Numerical simulation on three dimensional flow in two-way reversible pumping system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9):74-78. (in Chinese)
- 17 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.
Liu Chao, Zhou Jiren, Tang Fangping, et al. Study on a low-lift and two-way pumping system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(1):49-51. (in Chinese)
- 18 杨帆,刘超,汤方平,等.S形贯流泵装置多工况过流部件水力性能分析[J].农业机械学报,2014,45(5):71-77.
Yang Fan, Liu Chao, Tang Fangping, et al. Hydraulic performance analysis of flow passage components in S-shaped shaft extension tubular pumping system under multi-conditions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(5):71-77. (in Chinese)
- 19 刘超,金燕,周济人.箱型双向流道轴流泵装置内部流动的数值模拟和试验研究[J].水力发电学报,2011,30(5):192-198.
Liu Chao, Jin Yan, Zhou Jiren. Study of internal flow in cube-type bidirection passages of axial-flow pump system by numerical simulation and experiment [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011,30(5):192-198. (in Chinese)
- 20 刘超.双向钟形进水流道的试验研究[J].江苏农学院学报,1985(4):9-12.
Liu Chao. A new type suction casing for two-direction pumping installation [J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1985(4):9-12. (in Chinese)
- 21 汤方平,周济人.轴流泵进口断面流速可视化及应用[J].农业工程学报,1997,13(1):231-232.
Tang Fangping, Zhou Jiren. Axial flow pump imports section flow visualization and applications [J]. Transactions of the CSAE, 1997,13(1):231-232. (in Chinese)
- 22 刘超,杨帆,赵军.基于高速摄影技术的泵进水流道消涡实验分析[J].农业机械学报,2014,45(3):61-65.
Liu Chao, Yang Fan, Zhao Jun. Analysis of the vortex-elimination device of pump suction passage using high-speed photography [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(3):61-65. (in Chinese)
- 23 Rajendran V P, Patel V C. Measurement of vortices in model pump-intake bay by PIV [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000,126(5):322-334.
- 24 刘超,梁豪杰,金燕,等.立式轴流泵进水流场的PIV测量[J/OL].农业机械学报,2015,46(4). <http://www.cnki.net/>

- kcms/detail/11.1964.S.20141119.1729.006.html
- 25 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[J]. 农业机械学报,2003,34(6):50-53.
Tang Fangping, Liu Chao, Wang Guoqiang, et al. Study on a reversible axial-flow pump installation with S-shaped conduit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2003,34(6):50-53. (in Chinese)
- 26 李龙,王泽. 轴伸式贯流泵装置全流场三维湍流数值模拟[J]. 机械工程学报,2007,43(10):62-66.
Li Long, Wang Ze. Numerical simulation of 3D viscous flow in tubular pumping station on dual-directional operation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007,43(10):62-66. (in Chinese)
- 27 杨洪群,谢伟东,张建华. 卧(斜)式水泵水导轴承存在的问题及其选型[J]. 水利水电科技进展,2004,24(1):57-59.
Yang Hongqun, Xie Weidong, Zhang Jianhua. Lie (oblique) pump water problems of guide bearing and its type selection[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2004,24(1):57-59. (in Chinese)
- 28 刘超,杨帆,杨华,等. 新型高效S形轴伸贯流泵装置模型研究[J]. 水力发电学报,2013,32(5):251-260.
Liu Chao, Yang Fan, Yang Hua, et al. Experimental study on new high efficiency S-shaped shaft extension tubular pump system [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013,32(5):251-260. (in Chinese)
- 29 刘超,杨帆,金燕,等. 高效S形轴伸贯流泵装置内流动特性研究[J]. 水力发电学报,2014,33(5):198-203.
Liu Chao, Yang Fan, Jin Yan, et al. Numerical study on high efficiency S-shaped shaft extension tubular pump system [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,33(5):198-203. (in Chinese)
- 30 张德胜,施卫东,张华,等. 轴流泵叶轮端壁区流动特性数值模拟[J]. 农业机械学报,2012,43(3):73-77.
Zhang Desheng, Shi Weidong, Zhang Hua, et al. Numerical simulation of flow field characteristics in tip clearance region of axial-flow impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(3):73-77. (in Chinese)
- 31 关醒凡,赵艳,商明华. 邳州泵站贯流泵装置模型试验研究[J]. 水泵技术,2011(4):9-13.
- 32 刘君,郑源,周大庆,等. 前后置竖井贯流泵装置基本流态分析[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):32-38.
Liu Jun, Zheng Yuan, Zhou Daqing, et al. Analysis of basic flow pattern in shaft front-positioned and shaft rear-positioned tubular pump systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(Supp.):32-38. (in Chinese)
- 33 颜红勤. 梅梁湖泵站竖井贯流泵装置主要参数的确定[J]. 水利水电科技进展,2005,25(6):91-94.
Yan Hongqin. Determination of main parameters for shaft tubular pumping system[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2005,25(6):91-94. (in Chinese)
- 34 谢伟东,蒋小欣,刘铭峰,等. 竖井式贯流泵装置设计[J]. 排灌机械,2005,23(1):10-12.
Xie Weidong, Jiang Xiaoxin, Liu Mingfeng, et al. The design of shaft-well tubular pump unit [J]. Drainage and Irrigation Machinery,2005,23(1):10-12. (in Chinese)
- 35 郑源,张德虎,廖锐,等. 竖井贯流泵能量特性试验研究[J]. 排灌机械,2003,21(3):31-34.
Zheng Yuan, Zhang Dehu, Liao Rui, et al. Experimental study on equipment energy characteristic for shaft tubular pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2003,21(3):31-34. (in Chinese)
- 36 施法佳,陈红勋,张计光. 双向竖井贯流式水泵装置内部湍流流动分析[J]. 工程热物理学报,2006,27(4):598-600.
Shi Fajia, Chen Hongxun, Zhang Jiguang. Analysis of interior turbulent flow within bidirectional tubular pump arrangement with silo[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2006,27(4):598-600. (in Chinese)
- 37 杨华,孙丹丹,汤方平,等. 叶轮进口挡板改善轴流泵非稳定工况性能研究[J]. 农业机械学报,2012,43(11):138-141,151.
Yang Hua, Sun Dandan, Tang Fangping, et al. Research on the performance improvement of axial-flow pump under unstable condition using CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(11):138-141,151. (in Chinese)
- 38 房玉敏,宋桂玲,张清顿. 竖井贯流式机组的流道设计及选型优化探讨[J]. 大电机技术,2009(1):49-52.
Fang Yumin, Song Guiling, Zhang Qingdun. The flow passage design and type selection of pit type tubular turbine[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2009(1):49-52. (in Chinese)
- 39 陈松山,葛强,严登丰,等. 泵站竖井进水流道数值模拟与装置特性试验[J]. 农业机械学报,2006,37(10):58-61.
Chen Songshan, Ge Qiang, Yan Dengfeng, et al. Numerical simulation of turbulent flow inside inlet duct and experiment on characteristic performances in shaft tubular model pump set[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(10):58-61. (in Chinese)
- 40 王丽,邹新胜,徐磊,等. 井头泵站竖井式贯流泵装置流态及性能分析[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(4):123-127.
Wang Li, Zou Xinsheng, Xu Lei, et al. Flow pattern and performance analysis of shaft tubular pump system in Jingtou Pumping Station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2014,12(4):123-127. (in Chinese)
- 41 杨荣娣,莫为泽,张海平. 30°斜轴伸泵装置水力模型的开发及其应用研究[J]. 水泵技术,1997(2):3-7.
Yang Rongdi, Mo Weize, Zhang Haiping. Hydraulic model study and application of 30° slating axial pump set[J]. Pump Technology,1997(2):3-7. (in Chinese)
- 42 李康波,梁世皎. 新技术在文头岭泵站设计中的应用[J]. 广东水利水电,2010(1):40-42.
- 43 何钟宁,周正富,谈强,等. 15°斜轴泵装置特性试验[J]. 排灌机械,2008,26(6):36-40,54.
He Zhongning, Zhou Zhengfu, Tan Qiang, et al. Characteristic test of 15° slanting axis pump set [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008,26(6):36-40,54. (in Chinese)

- 44 冯旭松,关醒凡,井书光,等. 南水北调东线灯泡贯流泵水力模型及装置研究开发与应用[J]. 南水北调与水利科技, 2009,7(6):32-35.
Feng Xusong, Guan Xingfan, Jing Shuguang, et al. Development and application on hydraulic model and equipment of bulb tubular pumps in the eastern route of the south-to-north water transfer project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009,7(6):32-35. (in Chinese)
- 45 张仁田,邓东升,朱红耕,等. 不同型式灯泡贯流泵的技术特点[J]. 南水北调与水利科技, 2008,6(6):6-9,15.
Zhang Rentian, Deng Dongsheng, Zhu Honggeng, et al. Technical features of two bulb tubular pumps[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2008,6(6):6-9,15. (in Chinese)
- 46 汤方平,刘超,周济人,等. 低扬程贯流泵装置模型试验研究[J]. 水泵技术, 2004(4):28-31.
Tang Fangping, Liu Chao, Zhou Jiren, et al. Model test for low head shaft-well tubular pump unit[J]. Pump Technology, 2004(4):28-31. (in Chinese)
- 47 张仁田. 贯流式机组在南水北调工程中的应用研究[J]. 排灌机械, 2004,22(5):1-6.
Zhang Rentian. Study on application of tubular pumps in the project of south to north water transfer project[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2004,22(5):1-6. (in Chinese)
- 48 莫为泽,杨荣娣,张海平. 后置灯泡式贯流泵装置水力模型成果简介[J]. 水泵技术, 2005(5):13-14.
Mo Weize, Yang Rongdi, Zhang Haiping. The rear light bulb tubular pump hydraulic model results[J]. Pump Technology, 2005(5):13-14. (in Chinese)
- 49 孙洪斌,鲁靖华,郑源,等. 淮安三站大型贯流机组运行存在问题及分析[J]. 水泵技术, 2007(5):36-40.
Sun Hongbin, Lu Jinghua, Zheng Yuan, et al. Huaian No.3 pump station existence question and the analysis of large tubular unit operation[J]. Pump Technology, 2007(5):36-40. (in Chinese)
- 50 金燕,刘超,周济人. 贯流泵扩管内流场的三维 LDV 测量[J]. 农业机械学报, 2012,43(9):57-61,77.
Jin Yan, Liu Chao, Zhou Jiren. Flow field in diffuser of tubular pump measurements by 3D-LDV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(9):57-61,77. (in Chinese)
- 51 汤方平,刘超,谢伟东,等. 双向潜水贯流泵装置水力模型研究[J]. 农业机械学报, 2004,35(5):74-77.
Tang Fangping, Liu Chao, Xie Weidong, et al. Experimental studies on hydraulic models for a reversible, tubular, and submersible axial-flow pump installation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004,35(5):74-77. (in Chinese)
- 52 成立,刘超,周济人. 基于 RNG 湍流模型的双向泵站出水流道流动计算[J]. 水科学进展, 2004,15(1):109-112.
Cheng Li, Liu Chao, Zhou Jiren. Numerical simulation of flow in the outlet passages of reversible pumping station by RNG turbulent model with wall function law[J]. Advances in Water Science, 2004,15(1):109-112. (in Chinese)
- 53 杨帆,金燕,刘超,等. 双向潜水贯流泵装置性能试验与数值分析[J]. 农业工程学报, 2012,28(16):60-67.
Yang Fan, Jin Yan, Liu Chao, et al. Numerical analysis and performance test on diving tubular pumping system with symmetric aerofoil blade[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(16):60-67. (in Chinese)
- 54 金燕,刘超,汤方平等. 灯泡体支撑件对贯流泵水力性能的影响[J]. 农业机械学报, 2009,40(11):78-82.
Jin Yan, Liu Chao, Tang Fangping, et al. Influence of supporting shape on the hydraulic performance of bulb tubular pumps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(11):78-82. (in Chinese)
- 55 古智生. 全贯流潜水电泵的开发与应用[J]. 水利水电技术, 2010,41(12):54-57.
Gu Zhisheng. Development and application of a new type submersible tubular pump[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010,41(12):54-57. (in Chinese)
- 56 汤方平,刘超,成立,等. 低扬程水泵选型新方法[J]. 水利水电科技进展, 2001,21(4):41-43,70.
Tang Fangping, Liu Chao, Cheng Li, et al. A new method for low-lift water pump selection[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001,21(4):41-43,70. (in Chinese)
- 57 袁尧,刘超. 水泵变角性能的相似关系研究[J]. 水力发电学报, 2013,32(1):276-281.
Yuan Yao, Liu Chao. Study on similarity of pump blade adjusting performances[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013,32(1):276-281. (in Chinese)
- 58 岳永起,高峰,徐瑞兰. 南水北调二级坝泵站泵型研究[J]. 排灌机械, 2004,22(5):15-16,25.
Yue Yongqi, Gao Feng, Xu Ruilan. Research on the pump type of two-stage dam pump-station for south-to-north water transfer project[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2004,22(5):15-16,25. (in Chinese)
- 59 陈松山,周正富,何钟宁. 30°斜式进水流道数模分析与泵装置特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2012,31(3):204-208,216.
Chen Songshan, Zhou Zhengfu, He Zhongning. Numerical simulation of flows in 30° slanting inlet duct and model test of pump set[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012,31(3):204-208,216. (in Chinese)