

# 水泵水轮机“S”特性区的流动机理及研究进展

李琪飞 张正杰 权 辉 王仁本

(兰州理工大学 能源与动力工程学院,甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 水泵水轮机作为抽水蓄能电站中实现能量转换的核心部件,也是抽水蓄能技术国产化过程中的关键。本文介绍了水泵水轮机近几十年国内外的研究发展现状,针对水泵水轮机由于结构的特殊性在“S”特性区内低水头运行时常发生机组并网困难或者在甩负荷过程中水压异常上升的问题,通过描述“S”特性区的形成机理并从形成机理、设计方法、研究方法和流道内部不稳定流动特性等方面入手分析了现有相关研究中存在的问题,总结了“S”特性区对抽水蓄能电站的不利影响及其相对成熟的预开导叶法,并且认为今后的研究重点为优化水力设计。

**关 键 词:** 水泵水轮机; 抽水蓄能电站; 预开导叶; “S”特性区; 流动机理

中图分类号: TK730 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2017.09.001

## 引 言

随着国家经济社会的发展,电力系统规模的不断扩大,近年,电力工业以科学发展观为指导,在电力建设、结构调整、技术进步、装备能力提升、整体效率提高和节能减排等方面取得了世人瞩目的成就,步入了安全、清洁、节约发展的轨道,保障了经济社会发展和人民生活水平提高对电力增长的需求,实现历史性的跨越<sup>[1]</sup>。

目前,我国电力系统使用的发电机组容量越来越大,但由于结构上的原因,可以投入使用的巨型热力机组和核电机组不适合在变化负荷下运行,并且巨型机组还有最小出力限制,故都不适合在低负荷下运行,因此迫切需要有调节能力很强的设备<sup>[2]</sup>。抽水蓄能电站于 1882 年首先诞生在瑞士,至今已有近百年历史,以其调峰填谷的独特运行方式,发挥着调节负荷、促进电力系统节能的重要作用,承担电力

系统的尖峰负荷,并且可减少系统中强迫停运的次数和时间,从而提高电能质量,达到增加系统可靠性的目的<sup>[3]</sup>。国内近年来一直在大规模的投产使用抽水蓄能电站,2016 年为止全国抽水蓄能电站装机容量达 5 032.5 万千瓦已居世界第一位,历年全国抽水蓄能电站在建、投产和装机容量如图 1 所示。加快抽水蓄能电站的发展是优化电源结构、建设现代化电网的必然趋势。

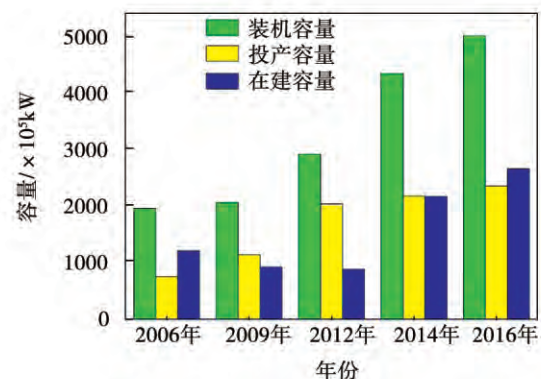


图 1 历年全国抽水蓄能电站在建、投产、装机容量

Fig. 1 Constructing, operating and installing capacities of pumped storage power station in China over the years

抽水蓄能水电站广泛采用的是可逆式水泵水轮机,可以随时将出力在 50% ~ 105% 的范围内进行调整,以适应电网需求的特点。但是,当其在水轮机工况水头范围内运行时,全特性曲线呈现出明显的“S”型弯曲,此时转轮内流动复杂多变,严重影响到了电站的安全运行。随着水轮机单机容量和尺寸的加大,人们开始重视它的运行稳定性,这使得研究水

收稿日期: 2016-11-24; 修订日期: 2017-03-01

作者简介: 李琪飞(1975-),男,甘肃靖远人,兰州理工大学副教授。

泵水轮机“S”特性的流动机理具有十分重要的意义。

### 1 “S”形特性形成机理

水泵水轮机的全特性曲线有水泵、水泵制动、水轮机、水轮机制动和反水泵 5 个工况区。对于水泵水轮机来说,必定要兼顾水泵工况和水轮机工况的性能,而水轮机最优工况区和水泵最优工况区并不重合,因此在水力设计方面的要求往往高于常规的水轮机设计。如图 2 所示,水泵水轮机的转轮,在容量和运行条件都相同的情况下,比一般水轮机转轮外径要大,前者约为后者的 1.3~1.4 倍,以适应水泵工况抽水运行的需求,导致了转轮径向流道相对较长。随着转速升高,转轮进口的冲击损失会出现显著性升高,所以飞逸转速较低,一般只为额定转速的 130%~160%。

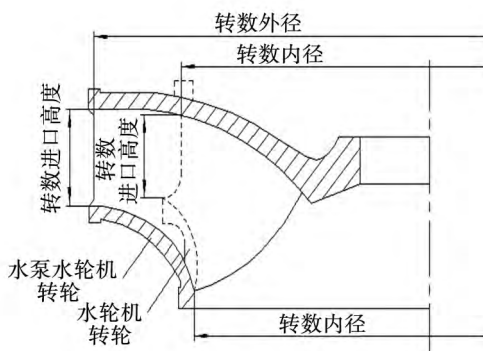


图 2 混流式水泵水轮机与普通水轮机转轮的比较

Fig. 2 Comparison of runner on Francis pump-turbine and ordinary turbine

水泵水轮机在水轮机方向的进流速度下降很快,开度线显著下降,如图 3 中实线所示。与传统的中高比转速水轮机相比(图 3(a)中虚线所示),这些线和飞逸线( $M_{11}=0$ )线的交角很小,故水泵水轮机在达到飞逸转速后更有可能进入制动区。低比转速的水泵水轮机内水流在受到自身惯性驱动而进入制动区后,由于水流对转轮会产生阻挡作用,在流量减小的同时也使转速下降,故开度线开始向单位转速值小的方向反弯。如果惯性力仍不消失,转轮离心力将水反向推出,即进入反水泵区,此后转速将逐

渐增大,使等开度线向更高单位转速方向弯曲,等开度线形成一个反“S”形,如图 3(b)所示,也就是人们常说“S”特性。在“S”区域内机组在同一单位转速下可以对应 3 个不同单位流量,而且其中 1 个是负值,流量瞬时反向对导叶受力十分不利,所以“S”特性区应尽可能避免。

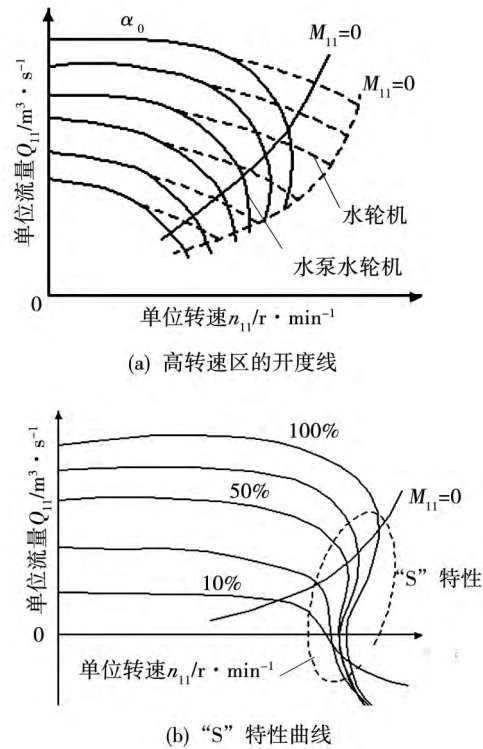


图 3 高速区的开度线特征

Fig. 3 Characteristics of the opening lines in high rotating speed region

### 2 “S”特性区对机组运行的影响

“S”特性区的存在直接影响机组在水轮机工况启动、飞逸和泵工况失电等瞬态过程的品质,机组大多数情况下不能由空载直接带负载,故此不可避免地进入了反水泵区,引起剧烈压力脉动的同时,造成了机组转速来回摆动,从而使得机组运行并网困难或甩负荷后不能达到空载稳定以至跳机。

#### 2.1 对发电机空载运行产生影响。

如图 4 所示,在高水头范围,起动开度几乎是不变的;而在低水头范围,因效率下降很多,空载开度需大幅度增加,有的约达 70% 左右。在这种状态

下,多半流量大而且不稳定,又由于空载并网时是在接近飞逸转速下运行,因此并网时只要开度稍有差异就会发生从水轮机工况进入反水泵工况的情况<sup>[4]</sup>。而反水泵工况转轮旋转方向同于水轮机工况,但向水泵方向打水。这时转轮进口产生回流,出口水流与导叶蜗壳的方向相矛盾,产生很大的撞击,使效率降低,易空蚀,噪声大,常常产生强烈的压力脉动和机械振动。

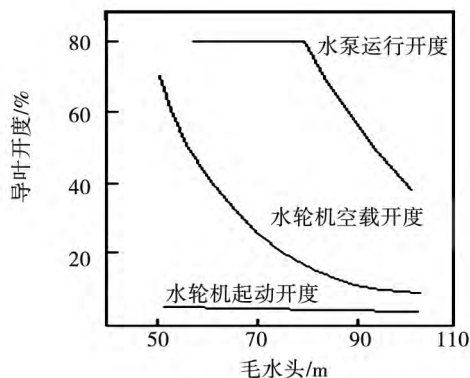


图4 毛水头与导叶开度曲线

Fig. 4 Curve of guide vane opening with respect to gross head

## 2.2 对带负荷产生影响

当机组并网后或调相转发电及发电转调相时的导叶开启或关闭过程中,如果工况点经过“S”特性区域或其附近,为了维持机组与电网同步、机组转速不变,机组将以反水泵方式从系统吸收较大的功率。如果吸收功率超过整定值,则将导致机组逆功率保护动作跳机<sup>[5]</sup>。

## 2.3 对机组甩负荷过程中的影响

水泵水轮机转轮离心力较大,转速升高时转轮截流效应明显,水轮机甩负荷即使导叶不关闭转速也会上升,由于离心力的不断增大,水流难以进入转轮,水轮机过流流量明显下降,引起压力升高,使机组振动加剧。“S”特性数据对机组甩负荷过渡过程计算极为关键。所以对水泵水轮机“S”特性区的研究具有十分重要的意义。

## 3 “S”特性机理研究现状及改善方法

### 3.1 设计理论的研究

水泵水轮机设计初期,水力设计由水轮机方向

设计、水泵方向校核,经过大量的实践证明这种方法不能达到泵工况的需求。现在的主流设计思想是按水泵工况确定转轮直径,并取水泵工况下的转轮叶片出口角 $\beta_2 = 20^\circ \sim 30^\circ$ ,叶片形状和离心泵叶片形状相似,可以在不降低水轮机效率的同时又具备良好水泵特性的效果。

国外由于起步较早,发展水平相对较高。近几年由于水力计算和设计水平的提高以及大量的模型试验研究,使水泵水轮机的模型最优效率达到了90%~92%。日本神流川电站应用的新型长短叶片型叶轮提高了水轮机的效率,降低了在部分负荷运行时压力脉动,并且出力范围振动较小<sup>[6]</sup>。在日本可变速机组和长短叶片转轮已开始广泛应用到抽蓄电站,且收效良好,就像这类成功应用的新技术还有很多,有待我们去研究借鉴。

近年来,国内对水泵水轮机优化设计方面的研究有升温的趋势,同时也取得了一些喜人的成果。梅祖彦从理论到实践较为详尽的介绍了水泵水轮机水力和结构设计的过程,分别讨论了转轮的水力和结构设计、导水机构及蜗壳、尾水管设计、吸出高度的选定以及效率换算问题<sup>[7]</sup>;吴玉林等人用准正交面法求解了混流式水泵水轮机转轮内准三元流动,证明了其可行性<sup>[8]</sup>;毛秀丽等人运用二元理论并结合螺旋势流进行了转轮叶片的水力设计,流线连续,分布均匀,流态稳定<sup>[9]</sup>;盛树仁等人对可逆式水泵水轮机转轮的水力设计做了深入研究指出转轮叶片高压侧和低压侧几何参数的计算依据,讨论了叶片安放角的计算依据和有限叶片数影响的修正,对叶片的设计有一定指导意义<sup>[10]</sup>。

随着可逆式水力机械理论和设计方法的不断完善,人们逐渐认识到提高经济效益,发展高水头,大容量的可逆机已经势在必行。因此目前设计并制造这种类型的机组已成为国外各大公司和科研机构的主要研究方向。到目前为止,日本已研制出水头高于700 m,单容量大于400 MW的转轮<sup>[11]</sup>。国内于2015年11月核准开始建设的广东阳江抽水蓄能电站,设计装机总容量为2400 MW,将安装6台400 MW的机组,最大毛水头约700 m。

### 3.2 流道内部不稳定流动特性的研究

水泵水轮机的“S”特性作为普遍存在的现象会严重影响机组的安全稳定运行。目前国内外对水泵

水轮机“S”特性的研究很多,探讨的内容形式也多样。Vlad H 通过分析小导叶开度、蜗壳、固定导叶、活动导叶和尾水管的压力脉动,得到在非设计工况下流动不稳定发生的主要地方是转轮和活动导叶之间的无叶区,并显示在水轮机工况和水泵工况之间转换的过程中会在无叶区出现回流<sup>[12]</sup>。Martin C S 以及 Petterse 等人根据水泵水轮机的内特性基础数学理论,给出了绘制全特性曲线的数学公式,并结合公式推导和理论分析描绘了“S”区特性<sup>[13-14]</sup>。

国内对于水力机械的研究,尤其是数值模拟研究起步相对较晚,由于采用模型试验的方法对机组的全特性进行测试,不仅周期长,而且成本高,因此采用数值模拟的方法预测机组的全特性逐渐受到重视,并且经过近几年的努力,已经取得了很大的进步。

张兰金等人通过数值模拟 5 种不同过渡工况下水泵水轮机的全流道流场分布,分析得出转轮与导水机构流道内涡的形成,与转轮和导叶间的强烈压力脉动是水泵水轮机“S”形特性的根本成因<sup>[15]</sup>;尹俊连采用数值计算的方法对水泵水轮机的内流机理和优化设计做了相关研究,揭示了 S 曲线导致转速失稳的内部机理,但没有进行内部流场的精细测量<sup>[16]</sup>;李彬采用数据模拟的办法来分析导叶、转轮、尾水管内的流场及外特性,并对实验数据进行验证,得出模拟计算反水泵工况的特性有利于水泵水轮机“S”特性的研究<sup>[17]</sup>;李仁年等人基于分离涡湍流模拟方法,结合数值试验、理论分析和模型试验,对“S”特性工作区的流动进行讨论,发现转轮进口的流动分离发展成为漩涡对流道造成堵塞,引起了整个流道的流动不稳定性<sup>[18]</sup>。上述这类研究均是将“S”特性区的工况点视为一系列偏工况点,在此基础上实现的常规数值模拟。然而,瞬态过程的数值模拟仍旧是当今研究的热点和难点,要接近实现真正瞬态过程的数值模拟,还需极大地努力研究。

### 3.3 “S”特性区改善和减弱方法研究

水泵水轮机的“S”特性作为一个典型的工程实际问题,人们极力在工程实践中寻找解决或改善它的方法。为了消除机组的“S”特性,国内外学者均开展了大量的研究工作,Klemm 通过试验发现采用 MGV(非同步导叶)可以改善机组的“S”特性,并将其成功的应用于比利时 COO II 抽水蓄能电站中,很

好地改善机组在空载和部分负载运行时的稳定性<sup>[19]</sup>。Billdal 等人提出利用 MGV 的方法解决同步导叶条件下不稳定问题,使机组在甩负荷后获得稳定的速度<sup>[20]</sup>。陈铁军等人通过数值模拟水泵水轮机内流场和外特性发现预开启导叶开度的增加可以削弱尾水管中的尾水涡带,但是破坏了流动均匀性,可能会导致无叶区压力脉动的提高<sup>[21]</sup>。

预开导叶方法是目前改善水泵水轮机“S”特性最有效、成熟的方法,诸多模型试验也证明该方法对改善低水头空载稳定性、解决无法并网的问题效果显著。预开导叶方法的基本思想是采用一对或多对的导叶优先开启一定的角度来增大流量,从而其它的同步导叶可以保持一个较小的角度,以此达到改善“S”特性的目的。非同步导叶的投入使得与其相应的转轮通道内的过流量明显增加,减小了进口冲角,破坏了堵塞水泵水轮机流道内部流动的漩涡结构,进入转轮域的水流可以较顺畅地平稳流出,从而也避免了机组因过流量不足而进入“S”特性区的问题。但是 MGV 的使用改变了机组内部流动均匀性,机组内部流动更加紊乱,进而导致了压力脉动的提高,影响机组运行稳定性<sup>[22]</sup>。

国内的大型抽水蓄能电站如天荒坪、宜兴、张河湾和琅琊山等,都加装有导叶不同步装置,从这些电站运行情况来看都获得了良好的效果,但是同时不同步导叶的采用也给水泵水轮机的运行特性研究带来了新的水力学问题,所以有必要分析不同步导叶对水泵水轮机内部流动和性能变化的影响,揭示其流动特点,为工程上避免 S 区运行提供一定的指导。

## 4 研究中存在的问题

### 4.1 研究方法单一

目前水泵水轮机“S”特性曲线的获得主要依赖于水泵水轮机模型实验,由于水轮机启动工况流量很小、实验工况密集,该不稳定实验并不能保证模型与真机完全相似。

### 4.2 研究中水力设计理论的创新不足

虽然目前的研究其能量指标是达到要求的,但却遗留下来严重的稳定性问题,也就是水轮机工况的“S”特性问题,“S”特性的根本原因就是水轮机工况的径向流道较长,高转速时转轮中水体受较大离

心力影响而使流量下降乃至为零,此后随着转速升高,流量方向发生改变。如何在水力设计上减弱甚至消除这种现象是研究的重点。

我国抽蓄设备国产化进程不断加速,但是长期依靠进口设备的局面并未得到有效缓解。在今后的研究中有必要对转轮设计进行系统的研究,并且揭示转轮的内部流动机理及对外特性的影响,为水力工程设计及相关的科学研究提供良好的基础。

## 5 结 论

(1) 抽水蓄能电站的相关研究及建设我国相对较晚,在规划、设计设备制造和经营等方面与世界先进水平有较大差距。因此,今后尽可能多的研究借鉴国外抽水蓄能电站及水泵水轮机的相关方面的经验,同时吸取其教训,探索长短叶片和可变速机组等新技术,研究海水和地下抽水蓄能电站建设对推进我国抽水蓄能电站的高速建设与发展有很大的帮助。

(2) 水泵水轮机水轮机启动工况下的“S”特性严重影响了水泵水轮机运行的安全性及稳定性,但是对“S”特性区的内部流动状态、湍流结构及流场诱发机理研究较少。目前仍未有完全消除水泵水轮机“S”特性的方法,成为限制水泵水轮机广泛发展的瓶颈。

(3) 预开导叶方式虽然可以成功阻止水泵水轮机进入不稳定的“S”区,但非同步导叶的投入将明显导致水泵水轮机内部流动状态紊乱加剧,增强机组的振动,所以预开导叶的方法在实际应用中仍然有待改善。在日后的研究中,应当从水力设计与模型试验研究入手,设法改变转轮与导叶内的流态,以期获得削弱甚至消除水泵水轮机“S”特性的方法,但是要反问题准确得到无“S”特性的设计方法还有很长的路要走。

## 参考文献:

[1] 张国宝. 科学发展: 电力工业赢得挑战的根本路径[J]. 求是, 2009(7): 25-27.  
ZHANG Guo-bao. Scientific development: the fundamental path to win the challenge in electric power industry [J]. Qiu Shi, 2009, (7): 25-27.

[2] 梅祖彦. 抽水蓄能发电技术[M]. 北京: 机械工业出版社

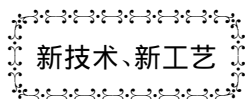
社, 2000.

MEI Zu-yan. Pumped storage power generation technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2000.

- [3] 陈宗器. 我国亟待兴建抽水蓄能电站[J]. 电器工业, 2002(5): 7-9.  
CHEN Zong-qi. Urgency to build pumped storage power station [J]. Electrical Industry, 2002(5): 7-9.
- [4] 深栖俊一. 水泵水轮机的特性[M]. 徐树斌, 译. 北京: 水利电力出版社, 1977.  
SHENQI Jun-yi. Characteristics of pump turbine [M]. XU Shu-bin, translated. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1977.
- [5] 程云山. 水泵水轮机“S”特性区危害及解决对策[J]. 水力发电, 2008, 34(6): 70-73.  
CHENG Yun-shan. The damage of S characteristic area of pump-turbine and its countermeasure [J]. Water Power, 2008, 34(6): 70-73.
- [6] 木本裕, 吕彤昇. 高速水泵水轮机转轮叶片数的优化研究[J]. 国外大电机, 2003(3): 59-63.  
MU Ben-yu, LYU Tong-yi. Optimization research of runner blades on high-speed pump-turbine [J]. Oversea Large Electric Machine, 2003(3): 59-63.
- [7] 张滇生, 陈涛, 李永兴, 等. 日本抽水蓄能电站在电网中的作用研究[J]. 电力技术, 2010, 19(1): 15-19.  
ZHANG Dian-sheng, CHEN Tao, LI Yong-xing, et al. Study on the functions of the pumped storage power stations in electric power grid in Japan [J]. Electric Power Technology, 2010, 19(1): 15-19.
- [8] 吴玉林, 林汝长. 用准正交面法计算混流式水泵水轮机转轮内准三元流动[J]. 水力发电学报, 1983(03): 123-132.  
WU Yu-lin, LIN Ru-chang. Calculating quasi-three dimensional flow in Francis-type pump-turbine runners with the quasi-orthogonal plane method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1983(03): 123-132.
- [9] 毛秀丽, 郑源, 屈波, 等. 小型混流式水泵水轮机水力设计[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 123-126.  
MAO Xiu-li, ZHENG Yuan, QU Bo, et al. Hydraulic design of small mixed-flow reversible pump turbine [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(6): 123-126.
- [10] 盛树仁, 房壮为. 可逆式水轮机转轮水力设计的探讨[J]. 大电机技术, 1983(5): 8-10.  
SHENG Shu-ren, FANG Zhuang-wei. Study on hydraulic design for reversible pump-turbine runner [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 1983(5): 8-10.
- [11] TANAKA H. Vibration behavior and dynamic stress of runner of

- very high head reversible pump turbines [J]. The International Journal of Fluid Machinery and Systems ,1990 4(2):289-306.
- [12] HASMATUCHI V ,FARHAT M ,MARUZEWSKI P ,et al. Experimental investigation of a pump-turbine at off-design operating conditions//. The 3<sup>th</sup> IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitations and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems [C]. Brno: 2009: 14-16 .
- [13] MARTIN C S. Instability of pump-turbine with S-shaped characters [C]//Proceedings of 20<sup>th</sup> IAHR Symposium ,Hydraulic Machinery and Systems ,Charlotte ,USA 2000: 10-14.
- [14] PETERSEN K ,NIELSEN T K. An explanation to the steep speed-flow characteristics of RPTs [C]//Proceedings of 22nd IAHR Symposium ,Hydraulic Machinery and Systems ,Stockholm ,Sweden 2004.
- [15] 张兰金 ,王正伟 ,常近时. 混流式水泵水轮机全特性曲线“S”形区流动特性[J]. 农业机械学报 2011 42(1):39-43.  
ZHANG Lan-jin ,WANG Zheng-wei ,CHANG Jin-shi. Flow of pump-turbine on S-shaped region of complete characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2011 42(1):39-43.
- [16] 尹俊连. 水泵水轮机“S”区内流机理及优化设计研究[D]. 杭州: 浙江大学 2012.  
YIN Jun-lian. Study on the internal flow and optimum design of pump turbine in the “S” zone [D]. Hangzhou: Zhejiang University 2012.
- [17] 李 彬. 水泵水轮机反水泵工况的特性研究[J]. 工程技术 , 2012(14):155.  
LI Bin. Study of pump-turbine's characteristic at reverse pump mode [J]. Engineering Technology 2012(14):155.
- [18] 李仁年 ,刘殿兴 ,董志强 ,等. 水泵水轮机“S”形区全流道数值模拟[J]. 排灌机械工程学报 2013 31(05):401-405.  
LI Ren-nian ,LIU Dian-xing ,DONG Zhi-qiang ,et al. Numerical simulation analysis of the whole flow passage of pump turbine in S-shaped zone [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering 2013 31(05):401-405.
- [19] KLEMM D. Stabilizing the characteristics of a pump turbine in the range between turbine part load and reverse pump operation [J]. Voith Research and Construction. 1982 28:2.
- [20] BILLDAL J T ,WEDMARK A. Recent experiences with single stage reversible pump-turbines in GE energy's hydro business [J]. Hydro 2007 2007:15-17.
- [21] 陈铁军 ,郭鹏程 ,左志钢 ,等. 非同步导叶预开启开度对水泵水轮机启动过程影响[J]. 水力发电学报 2015 34(1):203-207.  
CHEN Tie-jun ,GUO Peng-cheng ,ZUO Zhi-gang . et al. Effect of different openings of pre-opened guide vanes on start-up process of pump-turbine [J]. Journal of Hydroelectric Engineering 2015 , 34(1):203-207.
- [22] Piller M ,Nobile Eo ,Hanratty T J. DNS study of turbulence transport at low Prandtl numbers in a channel flow [J]. Journal of Fluid Mechanics. 2002 458(458):419-441.

(刘瑶 编辑)



## 第二台 MT30 船舶燃气轮机装入威尔士亲王号航空母舰

据《Warship Technology》2015 年 7~8 月刊报道,第二台 MT30 船舶燃气轮机最近装入伊丽莎白女王级威尔士亲王号航空母舰。该 65 000 t 级航母是英国海军至今建造的最大吨位军舰。

每艘航母安装有 2 台功率为 36 MW 的 MT30。每个 120 t 重的燃气轮机发电机全套设备包括 1 台连接到由 Rolls-Royce 供给的 MT30 燃气轮机的由 GE 供给的交流发电机。

该舰的第一台 MT30 是在 2015 年安装的,被装入每一艘航母并将提供航母所需 109 MW 功率的三分之二。

(吉桂明 摘译)

水泵水轮机“S”特性区的流动机理及研究进展 = **Flow Mechanism and Research Progress of Pump-turbine in the S-shaped Region** [刊, 汉] LI Qi-fei, ZHANG Zheng-jie, QUAN Hui, WANG Ren-ben ( School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, China, Post Code: 730050) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2017, 32(09). - 1~6

In the circumstance of booming electricity demand, most regions of China have the noticeable fluctuation in demand, big gap between valley and peak, and limited capacity of peak shaving. These have advanced the high-speed construction and developing of the pumped storage power station. Pump-turbine as a core component realizing energy transformation in pumped storage power station is also the key to localization process of pumped storage station technology. This paper introduces the domestic and foreign research status of pump-turbine in recent decades. Due to its structural specificity and operation for low-head in S-shaped region, it faces the difficulty in synchronizing and has the water pressure increase abnormality during the load shedding. In this paper, the deficiency and shortage in current study are analyzed by describing the flow mechanism in S-shaped region, followed by the discussion of design method, research method, and unsteady flow characteristics of flow channel. Then, the adverse effect of S-shaped region on pumped storage power station and its improving method—misaligned guide vanes are summarized. Finally this study shows that the future research is expected to focus on the optimization of hydraulic design. **Key words:** pump-turbine, pumped storage power station, misaligned guide vanes, S-shaped region, flow mechanism

LNG冷能驱动的氨水吸收式制冷系统的性能研究 = **Performance Study of Ammonia-water Absorption Refrigeration System Driven by LNG Cold Energy** [刊, 汉] LIU Yu-jia, ZHANG Guo-qiang, YANG Yong-ping ( School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2017, 32(09). - 7~13

In this paper, a new model for ammonia-water absorption refrigeration system is proposed and analyzed. Cold energy which is released from the LNG (Liquefied Natural Gas) vaporization will be used in the system as a low-temperature receiver, and a small amount of high-grade cold energy is absorbed by the system and then relatively large amount of low-grade cold energy is produced. Ammonia-water absorption refrigeration system is adopted in refrigeration cycle. Thermodynamic analysis of the system shows that when the refrigeration temperature (the distillation temperature of evaporator) is 0 °C, the distillation ratio reaches 0.185 and as the temperature of the LNG input into the system is -60 °C, the coefficient of performance of the system is 1.74. Under this condition, the system is analyzed by exergy analysis method. The result shows that the exergy loss of abstraction is the largest among several equipments, approximately 27%, and the overall exergy efficient of the system is 41%. The characteristics of the system are analyzed and it is found that when the distillation temperature of evaporator is constant, with the increase in the distilled ammonia from the top of distillation column, the operating pressure of the distillation column will di-