

# 斜轴变桨轴流泵空化特性试验

汪宝罗<sup>1</sup>, 张弋扬<sup>2</sup>, 苏胜利<sup>3</sup>, 何成连<sup>2</sup>, 潘利国<sup>1</sup>, 谢丽华<sup>1</sup>

(1. 浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310002;

2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222; 3. 嘉兴市杭嘉湖南排工程管理局, 浙江 嘉兴 314001)

**摘要:**为研究单机流量为 $50\text{ m}^3/\text{s}$ 的新型斜轴轴流泵的空化特性,基于轴流泵试验平台,针对斜轴轴流泵开展不同叶片角度条件下的能量特性及内部流动特性分析,总结了该类泵空化现象的发生规律,确定了合理的设计参数与运行参数。结果表明:叶片角度及扬程与水泵空化性能密切相关,在高扬程或超低扬程运行时,水泵空化性能较差,易产生空化;可通过变桨技术,减小水泵叶片角度,从而改善空化性能,获取更优的运行稳定性。

**关键词:**斜轴轴流泵;空化特性;叶片角度;变桨技术

**中图分类号:**TH311

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2022)04-0033-06

**Experiments on cavitation characteristics of an inclined shaft variable propeller axial flow pump//**WANG Baoluo<sup>1</sup>, ZHANG Yiyang<sup>2</sup>, SU Shengli<sup>3</sup>, HE Chenglian<sup>2</sup>, PAN Ligu<sup>1</sup>, XIE Lihua<sup>1</sup> (1. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydro-Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310002, China; 2. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 3. Jiaxing South Drainage Engineering Administration of Hangjiahu, Jiaxing 314001, China)

**Abstract:** To investigate the cavitation characteristics of a novel inclined axial flow pump with a single flow rate of  $50\text{ m}^3/\text{s}$ , based on an axial flow pump test platform, the energy characteristics and internal flow characteristics of the inclined axial flow pump under different blade angles were analyzed. The occurrence law of cavitation phenomenon for this kind of pump was summarized and reasonable design parameters and operation parameters were determined. The results show that the blade angle and head are closely related to the cavitation performance of the pump, and the cavitation performance of the pump is poor when running at high head or ultra-low head, which is easy to produce cavitation. The angle of pump blades can be reduced by variable propeller technology, so as to improve the cavitation performance and obtain better operation stability.

**Key words:** inclined axial flow pump; cavitation characteristics; blade angle; variable propeller technology

空化和空蚀现象会影响泵的水力性能,造成振动、噪声甚至是结构破坏<sup>[1]</sup>。在试验条件下监测并分析水泵的空化状态是研究空化和空蚀现象的重要手段<sup>[2]</sup>。斜轴轴流泵是我国在大流量泵站引入的一种新型泵装置<sup>[3]</sup>,已经应用于上海太浦河泵站<sup>[4]</sup>、广东文头岭泵站<sup>[5]</sup>等。由于在应用过程中该泵容易出现左右流道偏流等问题<sup>[6]</sup>,国内外专家学者主要针对进出口流道流态<sup>[7]</sup>及斜轴轴流泵能量特性<sup>[8]</sup>展开研究。徐磊等<sup>[9-10]</sup>基于计算流体力学(CFD)数值计算方法,探究了不同泵轴倾角与流道隔墩长度对进出口流道流态的影响。刘润根等<sup>[11]</sup>、谢丽华等<sup>[3]</sup>基于模型试验方法,分别探究了 $30^\circ$ 斜轴轴流泵的能量特性和 $15^\circ$ 斜轴轴流泵的空化特性、飞逸特性、压力脉动特性与偏流特性。国内围绕

斜轴轴流泵装置空化余量与桨叶角度、扬程之间的规律性研究较少,对斜轴轴流泵变桨调节原则的研究也较少。

目前,水泵空化监测与诊断的主要方法有流量-扬程法(能量法)、噪声法、振动法<sup>[12]</sup>、压力脉动法、电测法、图像法<sup>[13]</sup>。其中,基于空化余量评估泵装置空蚀性能的能量法是应用最多、最为可靠的方法。尽管已经有不少学者采用CFD数值计算方法研究斜轴轴流泵的能量特性<sup>[8]</sup>与空化特性<sup>[14]</sup>并取得了不错的效果,但是不同计算模型、求解方法与边界条件下数值计算结果的差异性致使该方法在实际工程应用中的可靠性仍显不足。对此,本文基于轴流泵试验平台开展斜轴轴流泵空化特性试验,获取不同泵轴倾角、不同叶片角度条件下的空化余量数

据,统计并总结一般性规律,以期为斜轴轴流泵变桨调节原则与泵装置选型设计提供参考。

## 1 模型泵参数与试验方法

### 1.1 斜轴轴流泵站简介

本文以浙江省长山河、盐官、八堡3座泵站的斜轴轴流泵装置模型为研究对象,这3座泵站单机流量均为 $50\text{ m}^3/\text{s}$ ,模型泵的水力模型型号均为TJ04-ZL-20,但各泵站的水泵流道型线局部有所区别。此外,3座泵站的泵轴倾角也有所不同,分别为 $20^\circ$ 、 $15^\circ$ 和 $20^\circ$ 。3座泵站的斜轴轴流泵装置具体参数见表1。

表1 斜轴轴流泵装置基本参数

泵站	泵轴倾角/ $(^\circ)$	单机流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	扬程/m			叶轮直径/mm
			设计值	最大值	最小值	
长山河	$20^\circ$	50	2.78	6.36	0.3	3550
盐官	$15^\circ$	50	2.97	6.41	0.3	3650
八堡	$20^\circ$	50	4.08	7.40	0	3600

泵站	水泵转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	流道长度/m		流道宽度/m		流道高度/m	
		进水	出水	进水	出水	进水	出水
长山河	112	23.00	25.00	9.1	9.6	6.0	4.6
盐官	101	19.74	20.51	9.0	9.5	6.0	5.0
八堡	113	18.50	22.77	9.6	9.6	5.6	5.5

以八堡泵站为例,其斜轴轴流泵装置进、出水流道单线图如图1所示,长山河、盐官泵站的斜轴轴流泵装置与八堡泵站相近。

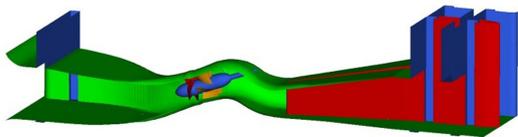
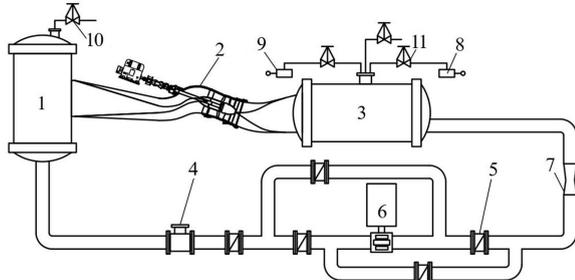


图1 八堡泵站斜轴轴流泵装置进、出水流道

### 1.2 试验台简介

为了保障对不同泵站斜轴轴流泵装置模型试验结果对比的可靠性与说服力,这3座泵站的试验均在中水北方勘测设计研究有限责任公司轴流泵试验平台上完成,该试验平台效率值测试的综合不确定度不超过 $\pm 0.3\%$ ,其试验台系统示意图如图2所示。为便于观察空蚀的发展过程,斜轴轴流泵装置模型的叶轮段流道处开设有矩形玻璃的空泡观测窗口,通过高速摄影设备获取空化发生时叶轮段的流态进行内部流动分析。

尽管在能量法中多以扬程下降3%作为空化余量的判定指标,但此时空化现象过于严重,对实际工程的指导意义有限,本文推荐采用水泵效率下降1%时的空化余量 $\text{NPSH}_c$ 作为斜轴轴流泵临界空化余量的判定标准。考虑到叶片角度对轴流泵空化性能的影响较为明显<sup>[15]</sup>,本文重点探究不同叶片角度下的模型泵空化余量 $\text{NPSH}_c$ 的变化规律,这对工程



1—出水侧压力罐;2—装置模型;3—进水侧压力罐;4—电磁流量计;5—蝶阀;6—加压器;7—文丘里流量计;8—真空泵;9—压缩机;10—出水侧排气阀;11—进水侧排气阀

图2 试验台系统示意图

实践具有一定的指导意义。同时鉴于目前尚无针对泵轴倾角对 $\text{NPSH}_c$ 影响的研究,本文拟通过试验数据分析不同泵轴倾角对 $\text{NPSH}_c$ 的影响程度。

对长山河、盐官、八堡3座泵站的斜轴轴流泵装置模型开展从零扬程至零流量的全范围装置模型试验,试验过程涵盖了工程所需要的叶片角度,对这3个装置模型的能量特性、空蚀特性进行了全面研究,获得了较为丰富的数据。表2为长山河、盐官、八堡泵站斜轴轴流泵装置模型试验过程中的扬程、流量、叶片角度的范围。

表2 斜轴轴流泵装置模型试验参数范围

泵站	扬程/m	流量/ $(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$	叶片角度/ $(^\circ)$
长山河	0~22	0~530	-8~+4
盐官	0~22.5	0~500	-8~+2
八堡	0~22	0~530	-8~+4

图3为长山河泵站的斜轴轴流泵装置模型流道和TJ04-ZL-20模型转轮及导叶。八堡泵站、盐官泵站的斜轴轴流泵装置模型与长山河泵站相近。

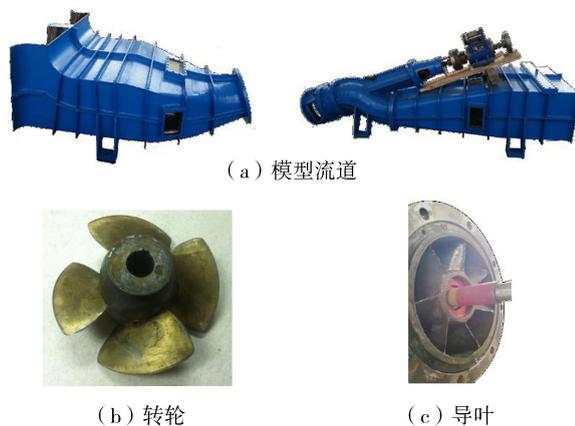


图3 长山河泵站斜轴轴流泵装置模型流道及TJ04-ZL-20模型转轮、导叶

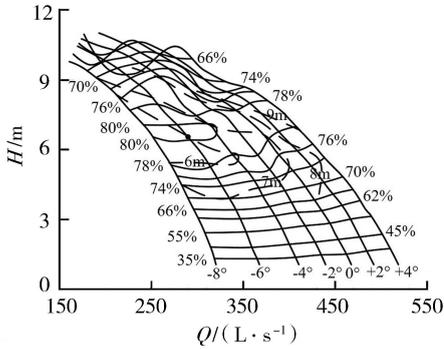
## 2 装置特性及分析

通过模型试验,得到了上述3座泵站的斜轴轴流泵装置模型综合特性曲线。以长山河泵站为例,

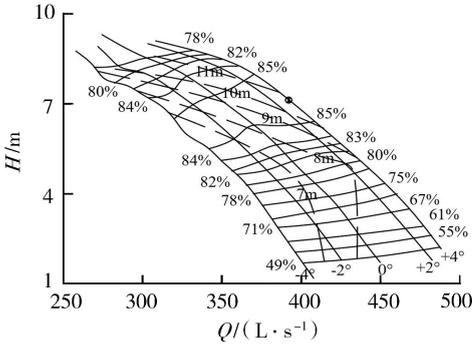
其斜轴轴流泵装置特性曲线(图4(a))与南水北调20号转轮的 TJ04-ZL-20 泵段综合特性曲线(图4(b))相比,最优工况点、等效率区、等空化余量线等关键指标均发生了一定程度的改变。经过详细数据对比,将3座泵站斜轴轴流泵装置模型与 TJ04-ZL-20 泵段的综合特性曲线在能量特性、空化余量方面的区别列于表3和表4。

表3 不同叶片角度下斜轴轴流泵装置与 TJ04-ZL-20 泵段最优工况点差异

叶片角度/(°)	装置	最优点流量/(L·s <sup>-1</sup> )	最优点扬程/m	最优点效率/%	NPSH <sub>C</sub> /m
+2	长山河	395	7.5	78.5	9.5
	盐官	365	7.5	75.5	9.0
	八堡	390	7.5	78.5	9.5
	泵段	385	7.0	85.5	10.5
0	长山河	365	7.0	78.5	7.5
	盐官	355	7.25	75.5	8.0
	八堡	350	7.0	79.0	7.2
	泵段	355	6.75	85.5	8.8
-2	长山河	340	7.0	79.5	7.2
	盐官	340	7.0	75.5	7.0
	八堡	330	7.0	80.0	6.8
	泵段	343	6.5	85.5	7.8
-4	长山河	320	6.7	80.0	6.8
	盐官	323	6.6	76.0	6.5
	八堡	315	6.5	80.0	5.5
	泵段	328	6.0	85.5	6.5



(a) 长山河泵站装置模型



(b) TJ04-ZL-20泵段模型

图4 长山河泵站斜轴轴流泵装置模型和 TJ04-ZL-20 泵段模型综合特性曲线

表3对长山河、盐官、八堡泵站的斜轴轴流泵装置最优工况点参数与 TJ04-ZL-20 泵段最优工况点参数进行了对比,可以发现,相同叶片角度下,3个斜轴轴流泵的装置最优工况点效率比泵段低5%~10%;装置最优工况点对应的扬程比泵段最优工况点对应的扬程高7%~11.6%;装置最优工况点的 NPSH<sub>C</sub> 比泵段的 NPSH<sub>C</sub> 要小,且叶片角度越大,两者之间的差异越明显,当叶片角度为-4°时,两者 NPSH<sub>C</sub> 数值基本一致。

表4 不同扬程下斜轴轴流泵装置与 TJ04-ZL-20 泵段的能量特性对比

叶片角度/(°)	装置	扬程为8m		扬程为6m		扬程为4m	
		流量/(L·s <sup>-1</sup> )	NPSH <sub>C</sub> /m	流量/(L·s <sup>-1</sup> )	NPSH <sub>C</sub> /m	流量/(L·s <sup>-1</sup> )	NPSH <sub>C</sub> /m
+2	长山河	357	9.2	408	8.0	450	8.2
	盐官	350	9.5	402	7.9	440	8.0
	八堡	342	9.0	400	7.5	440	7.7
	泵段	357	11.2	408	9.0	446	8.5
	装置与泵段的比例关系	95.8%~100%	80%~85%	98%~100%	83.3%~88.8%	98.6%~100.9%	90.6%~96.5%
0	长山河	330	8.7	384	6.9	425	7.7
	盐官	328	9.0	385	7.3	421	7.7
	八堡	310	8.0	371	6.9	408	7.2
	泵段	326	10.3	377	8.0	415	7.4
	装置与泵段的比例关系	95%~101%	77.7%~87.4%	98.4%~102%	86.3%~91.25%	98.3%~102.4%	97.3%~104%
-2	长山河	305	7.9	360	6.5	400	7.3
	盐官	307	8.1	362	6.8	398	7.5
	八堡	295	7.3	354	6.5	388	6.9
	泵段	302	10.0	353	7.2	392	6.9
	装置与泵段的比例关系	97.7%~102%	73%~81%	100%~102.5%	90.3%~94.4%	98.9%~102%	100%~108.7%
-4	长山河	282	7.5	334	6.2	372	7.2
	盐官	288	6.9	340	6.5	373	7.3
	八堡	275	6.6	329	5.8	364	6.7
	泵段	273	9.0	328	6.0	370	6.7
	装置与泵段的比例关系	100%~105%	73.3%~83.3%	100%~103.6%	96.7%~108.3%	98.4%~100.8%	100%~109%

发现:

a. 相同叶片角度下,扬程越大,装置  $NPSH_c$  与泵段  $NPSH_c$  的差异越明显;扬程越低,两者差异越小。当扬程为 8 m 时,装置与泵段的  $NPSH_c$  比值在 73% ~ 87.4% 范围内,两者存在一定偏差。但是当扬程为 4 m 时,两者的比值为 90.6% ~ 109%,说明在低扬程下,两者基本接近。

b. 无论装置还是泵段,靠近最优工况点时  $NPSH_c$  小,偏离最优工况点时  $NPSH_c$  大,且偏离得越远,  $NPSH_c$  越大。

c. 对于采用相同泵段的不同斜轴轴流泵装置,其  $NPSH_c$  特性略有区别。同叶片角度、同扬程条件下,装置  $NPSH_c$  与泵段  $NPSH_c$  的比例关系在 73% ~ 109% 的范围内。其中在高扬程段,装置  $NPSH_c$  小于泵段  $NPSH_c$  的概率大,随着扬程的降低,装置  $NPSH_c$  大于泵段  $NPSH_c$  的概率逐渐增大。

d. 通过对比发现,装置  $NPSH_c$  的决定因素是转轮水力模型,装置型线及泵轴倾角对  $NPSH_c$  的影响并没有表现出较强的关联性。

e. 相同扬程下,叶片角度对装置  $NPSH_c$  的影响显著,特别在高扬程下,改变叶片角度可以有效降低  $NPSH_c$ 。这与林鹏等<sup>[16]</sup>的研究成果吻合较好,他们的研究表明,空蚀发生与叶片轴向速度、径向速度、绝对速度的流动系数有较强的相关性,而叶片角度则是影响叶片流速分布的重要原因。因此,通过改变叶片角度,可以有效地改变空化特性,这也是指导泵变浆运行的依据之一。

### 3 空化特性与空化发展分析

#### 3.1 空化特性分析

在 6 组不同叶片角度 ( $-8^\circ$ 、 $-6^\circ$ 、 $-4^\circ$ 、 $-2^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $+2^\circ$ ) 工况下对 3 座泵站斜轴轴流泵装置模型开展空蚀试验,获取各泵站不同叶片角度下的扬程与临界空化余量曲线,见图 5。

从图 5 可以看出,随着斜轴轴流泵装置的扬程增大,  $NPSH_c$  呈现先减小后增大的趋势,其最小临界空化余量点出现的位置有所区别,数值均接近 5 m;最大临界空化余量点出现在最大扬程处。对于不同叶片角度而言,横向对比 3 个模型泵试验数据发现,最大的  $NPSH_c$  值均出现在叶片角度为  $+2^\circ$  时,最小的  $NPSH_c$  值对应的叶片角度不一。此外,不同泵站斜轴轴流泵装置模型均表现出扬程越大,不同叶片角度下对应  $NPSH_c$  的差异越大的特点。

进一步对不同叶片角度 ( $-6^\circ$ 、 $-2^\circ$ 、 $+2^\circ$ ) 条件下,不同泵站斜轴轴流泵装置流量与临界空化余量的关系如图 6 所示。从图中可以看出,对于特定叶片角度,随着流量的增大,  $NPSH_c$  呈现先减小后增大的趋势,最优空化点对应的流量大小不一。横向对比 3 个不同叶片角度的试验数据,随着叶片角度的增大,最优空化流量点向大流量方向移动,但总体上都处在 300 ~ 400 L/s 的范围内。另外,即使 3 座泵站的斜轴轴流泵装置型线、轴系倾角存在区别,但是在相同叶片角度下的  $NPSH_c$  变化趋势与最优空化点对应的流量均基本一致。根据 3 座泵站采用的泵段水力模型相同,但是流道型线及泵轴倾角不同

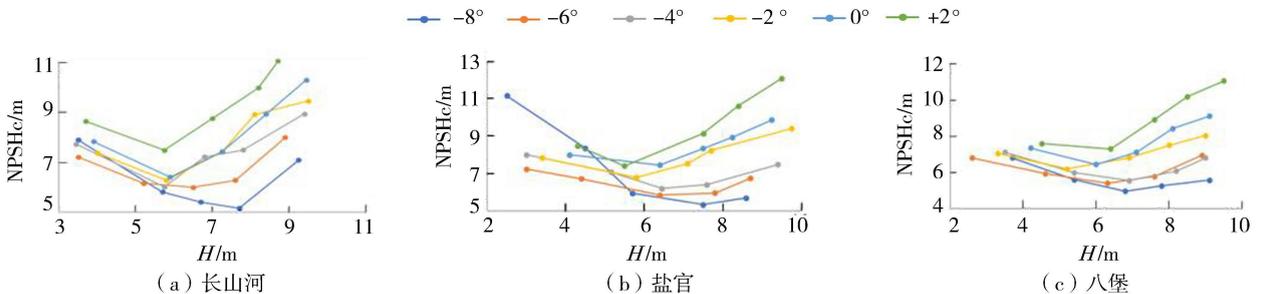


图 5 不同叶片角度下各泵站装置的扬程-临界空化余量曲线

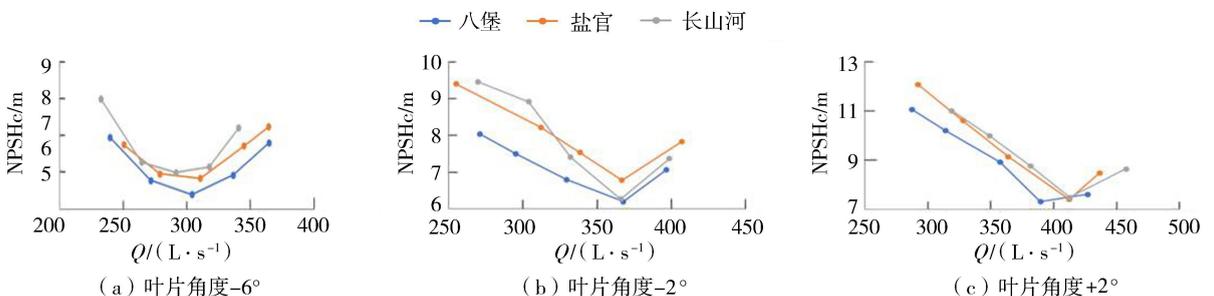
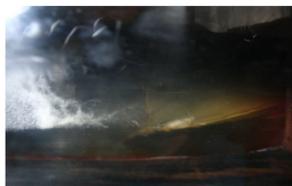


图 6 不同叶片角度下各泵站装置的流量-临界空化余量曲线

可以推断,  $NPSH_c$  主要受水泵叶轮水力模型影响, 与流道设计和轴系倾角的关系并不明显。

### 3.2 空化发展分析

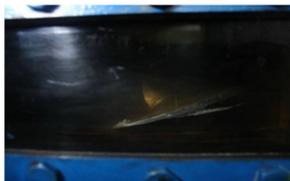
由于相同水力模型的空化性能较为一致, 本文以长山河泵站模型泵为例, 选取不同叶片角度与泵流量条件下临界空化点的叶轮段空泡观测图进行分析, 如图 7 所示。



(a) 叶片角度 $-6^\circ$ , 泵流量291.14 L/s



(b) 叶片角度 $-2^\circ$ ,  
泵流量398.72 L/s



(c) 叶片角度 $+2^\circ$ ,  
泵流量467.67 L/s

图 7 长山河泵站模型泵不同叶片角度下的叶轮段气泡

从图 7 可以看出, 叶顶间隙空化发生的初始位置位于叶顶翼型头部, 空泡团为沿叶片工作面向背面旋转的漩涡空化。随着泵进口真空度的提高, 叶顶间隙空化发生的位置、空泡团与叶顶粘连的区域均呈现由翼型头部向尾部延伸发展的趋势。这与曹卫东等<sup>[17]</sup>的空化数值模拟研究成果较吻合。在不同工况下, 间隙空化是所有空化试验过程中都存在的特点, 但是叶片表面空化却不是一定会发生的, 有些工况只有间隙空化, 而没有发生叶片空化。甚至在抽真空的过程中, 效率会有略微上升的现象发生, 这可能与间隙空化产生的汽泡堵塞了部分叶片与转轮室的间隙, 容积损失减低, 进而造成效率小幅度提升的情况有关。

## 4 结论

a. 因最高扬程工况点对应的  $NPSH_c$  较大, 且叶片角度越大,  $NPSH_c$  也越大。因此, 当水泵进入高扬程区域运行后, 应优先选择变桨技术, 将叶片角度调节至小角度 (如  $-8^\circ$ 、 $-6^\circ$ ) 运行, 从而减小  $NPSH_c$  值。

b. 因  $NPSH_c$  与扬程的关系是两头高、中间低。因此, 当水泵进入低扬程区域运行时, 也应优先选择变桨技术, 将叶片角度调节至小角度 (如  $-8^\circ$ 、 $-6^\circ$ ) 运行, 从而减小  $NPSH_c$  值。

c. 若采用半调节水泵, 则在设计选型时应尽量减小转速和叶轮直径的乘积, 或选择较小的叶片角

度作为设计角度, 从而降低真机最高扬程下的  $NPSH_c$ , 换取较小的叶轮淹没深度和土建开挖深度。

d. 当缺乏斜轴轴流泵装置特性曲线时, 在采用泵段曲线进行选型计算时, 对于泵段的  $NPSH_c$  应进行一定的处理。经过对 3 座泵站的统计, 斜轴轴流泵装置  $NPSH_c$  与泵段  $NPSH_c$  的比例关系在 73.3% ~ 109%。高扬程时, 泵段  $NPSH_c$  大于装置  $NPSH_c$ ; 中低扬程时, 两者差异较小, 甚至局部工况下, 会出现装置  $NPSH_c$  大于泵段  $NPSH_c$  的情况。因此, 在高扬程下, 使用泵段  $NPSH_c$  确定机组安装高程是安全的, 而在中低扬程下, 建议在使用泵段  $NPSH_c$  时, 再额外考虑 1.1 倍的安全余量。

## 参考文献:

- [1] 苏永生, 王永生, 段向阳. 离心泵空化试验研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 77-80. (SU Yongsheng, WANG Yongsheng, DUAN Xiangyang. Cavitation experimental research on centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 77-80. (in Chinese))
- [2] 徐朝晖, 徐东海, 吴玉林, 等. 水泵与水轮机空化状态监测与诊断的研究进展[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 139-142. (XU Zhaohui, XU Donghai, WU Yulin, et al. Monitor and diagnose of cavitation in pump and hydroturbine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(1): 139-142. (in Chinese))
- [3] 谢丽华, 王福军, 何成连, 等. 15 度斜式轴流泵装置水力特性实验研究[J]. 水利学报, 2019, 50(7): 798-805. (XIE Lihua, WANG Fujun, HE Chenglian, et al. Experimental investigation on hydrodynamic characteristics of a 15 degree slanted axial-flow pump system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(7): 798-805. (in Chinese))
- [4] 胡德义, 王为人, 李庆生, 等. 太浦河泵站斜 15° 轴泵泵水力动态力分析[J]. 水力发电学报, 2002(3): 81-87. (HU Deyi, WANG Weiren, LI Qingsheng, et al. A 15° slantways axial flow pump hydraulic force analysis in Taipuhe pump station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002(3): 81-87. (in Chinese))
- [5] 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. (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. (in Chinese))
- [6] 施卫东. 浙江盐官下河泵站轴流泵装置模型的研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 85-89. (SHI Weidong. Research on device model of axial flow pump on Yanguan Xiahe Pump Station in Zhejiang Province [J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(2): 85-89. (in Chinese))
- [ 7 ] 黄健勇, 张飞珍, 张浩, 等. 斜式轴流泵装置进水流道的正交优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(9): 741-746. (HUANG Jianyong, ZHANG Feizhen, ZHANG Hao, et al. Design optimization of inlet conduit in slanted axial-flow pump installation by orthogonal array experiment [ J ]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31 ( 9 ): 741-746. ( in Chinese ))
- [ 8 ] 刘君, 郑源, 周大庆, 等. 大型斜式轴流泵装置能量特性研究[J]. 流体机械, 2010, 38(1): 1-4. (LIU Jun, ZHENG Yuan, ZHOU Daqing, et al. Study on energy characteristics of large scale inclined axial-flow-pump arrangement[J]. Fluid Machinery, 2010, 38(1): 1-4. (in Chinese))
- [ 9 ] 徐磊, 刘荣华, 陈伟, 等. 3种泵轴倾角斜式进水流道水力性能的比较[J]. 水力发电学报, 2011, 30(2): 128-132. (XU Lei, LIU Ronghua, CHEN Wei, et al. Comparison of hydraulic performance of three slanting inlet conduits with different angles of pump shaft[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(2): 128-132. (in Chinese))
- [ 10 ] 徐磊, 夏斌, 施伟, 等. 中隔墩长度对斜式轴伸泵装置出水流道水力特性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 74-81. (XU Lei, XIA Bin, SHI Wei, et al. Influence of middle pier lengths on hydraulic characteristic of outlet conduit in pump system with slanted extension shaft [ J ]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36 ( 1 ): 74-81. ( in Chinese ))
- [ 11 ] 刘润根, 马晓忠, 詹磊. 黄家坝 30°斜式轴流泵装置模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(2): 109-111. (LIU Rungen, MA Xiaozhong, ZHAN Lei. Model test study on 30° slanting axial-flow pump set of Huangjiaba[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016 (2): 109-111. (in Chinese))
- [ 12 ] 叶阳辉, 朱相源, 孙光普, 等. 离心泵内空泡演化与其对振动的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 88-93. (YE Yanghui, ZHU Xiangyuan, SUN Guangpu, et al. Evolution of cavitation bubbles and its influence on vibration in centrifugal pump [ J ]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 88-93. ( in Chinese ))
- [ 13 ] 李忠, 杨敏官, 姬凯, 等. 轴流泵叶顶间隙空化流可视化实验研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(8): 1315-1318. (LI Zhong, YANG Minguan, JI Kai, et al. Visualization research on cavitating flow in tip clearance of axial-flow pump [ J ]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(8): 1315-1318. ( in Chinese ))
- [ 14 ] ZHANG Rui, CHEN Hongxun. Numerical analysis of cavitation within slanted axial-flow pump[J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25(5): 663-672.
- [ 15 ] 吴子娟, 侯聪, 梁武科, 等. 叶片安装角对轴流泵空化性能的影响[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2020, 35(3): 277-284. (WU Zijuan, HOU Cong, LIANG Wuke, et al. Effect of blade installation angle on cavitation performance of axial flow pump [ J ]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2020, 35(3): 277-284. ( in Chinese ))
- [ 16 ] 林鹏, 胡东, 吕云杰, 等. 含沙空化对轴流泵内流动特性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 21-26. (LIN Peng, HU Dong, LYU Yunjie, et al. Effect of cavitation on flow characteristics in axial-flow pump under sand conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 21-26. (in Chinese))
- [ 17 ] 曹卫东, 张骞, 徐玉敏. 高速潜水轴流泵大流量工况的空化特性[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 55-61. (CAO Weidong, ZHANG Qian, XU Yumin. Cavitation characteristics of high-speed submersible axial-flow pump in high flow condition [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 ( 1 ): 55-61. ( in Chinese ))

(收稿日期: 2021-07-20 编辑: 俞云利)

(上接第 14 页)

- [ 34 ] 王晓利, 侯西勇. 1982—2014 年中国沿海地区归一化植被指数 (NDVI) 变化及其对极端气候的响应[J]. 地理研究, 2019, 38(4): 807-821. (WANG Xiaoli, HOU Xiyong. Variation of normalized difference vegetation index and its response to extreme climate in coastal China during 1982-2014 [ J ]. Geographical Research, 2019, 38 ( 4 ): 807-821. ( in Chinese ))
- [ 35 ] LHOTKA O, TMKS M, KYSELY J, et al. Atmospheric circulation as a factor contributing to increasing drought severity in central Europe [ J ]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(18): 1-17.
- [ 36 ] 王璐, 黄生志, 黄强, 等. 基于综合干旱指数的黄河流域干旱多变量概率特征研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(6): 70-80. (WANG Lu, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Drought multivariable probability characteristics based on a multivariate standardized drought index in the Yellow River Basin [ J ]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(6): 70-80. ( in Chinese ))

(收稿日期: 2021-05-40 编辑: 刘晓艳)