

中低水头混流式水泵水轮机空化参数选择几点建议

陈 锐, 于纪幸, 王 鑫

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

[摘 要] 本文对我国已建成运行的有代表性的中低水头蓄能电站混流式水泵水轮机进行了统计, 从水泵工况空化性能的角度分析了模型空化试验结果, 并对中低水头蓄能电站水泵工况临界空化的限定和装置空化的选取进行了探讨。

[关键词] 中低水头; 混流式水泵水轮机; 初生空化系数; 临界空化系数; 装置空化系数

[中图分类号] TV743; TK730.1 [文献标识码] A [文章编号] 1000-3983(2015)05-0050-07

Cavitation Performance Analysis of Francis Type Reversible Pump Turbine for Low-to-Medium Head

CHEN Rui, YU Jixing, Wang Xin

(Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Statistics of the representative Francis pump-turbine at mid&low head in China were carried out in this paper, and analysis of model test results was performed about cavitation performance in pump mode, and discussions on limitation of critical cavitation coefficient and selection of plant cavitation coefficient were made as well.

Key word: mid&low head; Francis pump turbine; incipient cavitation coefficient; critical cavitation coefficient; plant cavitation coefficient

0 前言

根据工程或电网的需要, 有时会在常规水电站或调水枢纽工程中布置可逆式水泵水轮机组进行调节和蓄能。这些电站通常是中低水头段的常蓄结合电站, 具有水头变幅大的特点。由于水头绝对值小, 水头变化的相对幅度必然较大, 在偏离设计点较远的工况点上会出现效率偏低和空化现象, 严重时会出现运行不稳定情况, 这就为水泵水轮机的设计带来很多困难。特别是水泵工况高效率范围比较窄, 空化性能比水轮机工况差, 过大的水头变幅会导致泵进口空化的急速发展, 从而使机组无法正常运行。因此水泵工况的空化特性是影响转轮叶片设计和机组选型的重要因素^[1]。针对中低水头段水泵水轮机的水泵工况进行空化分析, 有助于同类机组的性能研究及选型参考, 对解决工程需要有实际的参考价值。

1 水泵工况空化的基本条件

水泵工况转轮进口为低压区, 进口绕流引起的动

压降比较大, 在叶片进口易出现压力最低点, 当该点的压力等于汽化压力时, 即产生空化^[2]。空化的基本方程式表示如下:

$$NPSH_r = NPSH_a$$

$NPSH_r$ ——泵必需的净正吸入水头;

$NPSH_a$ ——吸入管所能提供的有效的净正吸入水头;

$NPSH_r$ 与装置参数无关, 只与泵进口的运动参数 (v_0 , w_0 , w_k) 有关;

$$NPSH_r = \frac{v_0^2}{2g} + \lambda \frac{w_0^2}{2g}$$

式中: v_0 ——叶片进口水流的绝对速度, m/s;

w_0 ——叶片进口水流的相对速度, m/s;

w_k ——叶片压力最低点处的相对速度, m/s;

λ ——叶片进口绕流压降系数, $\lambda = \left(\frac{w_k}{w_0}\right)^2 - 1$ 。

在一定的转速和流量下, 运动参数由泵进口几何参数决定, 一个机型的空化特性会随叶型设计而变化。 $NPSH_r$ 与流量 Q 的关系曲线如图 1 所示。 $NPSH_r$ 越小, 表示压力降小, 要求装置必须提供的 $NPSH_a$ 小,

基金项目: 中国水利水电科学研究院科研专项 (机基本科研 1521)

因而泵工况的抗空化性能越好。 $NPSH_a$ 的大小与装置参数有关，

$$NPSH_a = \frac{p_a}{\rho g} - H_s - h_c - \frac{p_v}{\rho g}$$

式中： $\frac{p_a}{\rho g}$ ——大气压力水头，m；
 H_s ——电站吸出高度，m，蓄能电站均为负值；
 h_c ——吸入管水力损失，m；
 $\frac{p_v}{\rho g}$ ——汽化压力水头，m。

对于某个具体电站而言， $\frac{p_a}{\rho g}$ 、 $\frac{p_v}{\rho g}$ 是一定值， h_c 与流量的平方成正比， H_s 与下游尾水位有关。随着流量的增加，如果下游尾水位增加的高度大于吸入管水力损失，则 $NPSH_a$ 与流量 Q 的关系曲线是上升的(图1a)；如果下游尾水位基本不变，那么 $NPSH_a$ 与流量 Q 的关系曲线是接近水平的或略有下降的(图1b)，如常蓄结合型电站。 $NPSH_a$ 越大，表示装置所能提供的有效的净正吸入水头越大，运行越安全。提高 $NPSH_a$ 的方法有增加电站吸出高度，减小吸入损失 h_c 等。

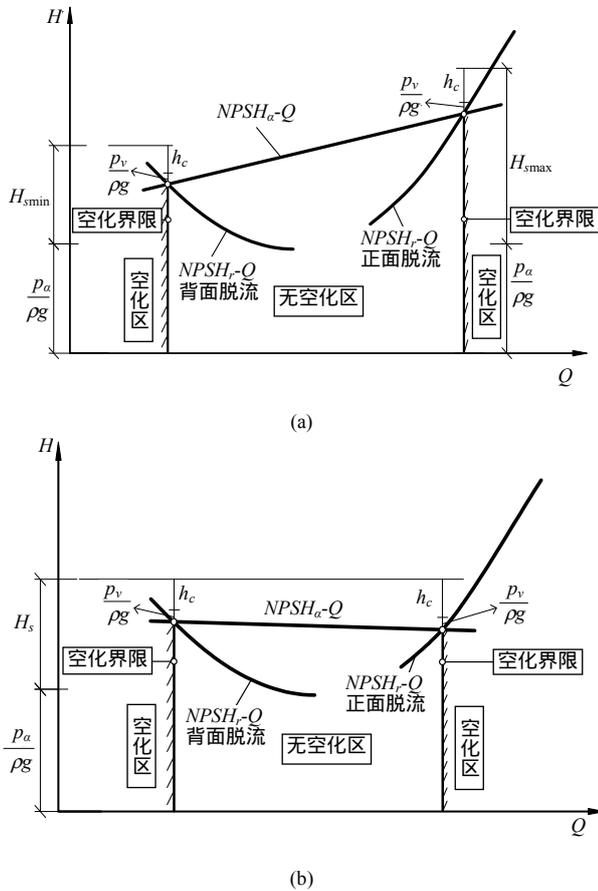


图1 流量变化时 $NPSH_a$ 和 $NPSH_r$ 的关系

图1中所示的 $NPSH_r$ 与流量 Q 的关系曲线和 $NPSH_a$ 与流量 Q 的关系曲线的交点即为泵工况发生空化的临界点。为了保证泵工况进口不发生空化，要求在泵进口处单位重量液体具有超过汽化压力水头的富余能量。即要求吸入管所能提供的有效的净正吸入水头 $NPSH_a$ 大于泵工况必需的净正吸出高度 $NPSH_r$ 。

在我国习惯用空化系数 σ 表示， $\sigma = \frac{NPSH}{H}$ 。

$NPSH_r$ 对应于初生空化系数 σ_0 。 $NPSH_a$ 对应于装置空化系数 σ_p 。

2 空化过程的观察与界定

对空化过程的观察是空化试验的重要组成部分。对于水泵工况，在最优扬程以上的小流量区运行时，空化发生在叶片进水边背面，可借助闪光测频仪通过透明的有机玻璃吸入管进行观察，初生空化系数的确定比较直接。而对于最优扬程以下的大流量区运行工况，空化发生在叶片进水边正面，不便直接观测，只能通过相临叶片背面的反光面观察或采用监测空化气泡爆破声的方法进行判断，因此初生空化系数的确定会因模型试验的条件和环境以及空泡观察者的不同产生偏差。为确保水泵工况无空化运行，在考虑到试验偏差及原、模型之间的相似偏差问题后， $NPSH_a$ 值通常保留一定的裕度。

当泵进口刚刚出现可见空泡时，水泵工况的能量特性并没有什么变化，而当空化发展到一定程度后才会受到影响。空化试验时，空化系数有任意多个，但对应水泵工况性能变化一定值的空化系数只有一个，人们通常把这个空化系数——如效率变化起始点或效率下降1.0% (或0.2%、0.5%等)时的空化系数——称为临界空化系数 σ_c ^[3]，如图2所示。

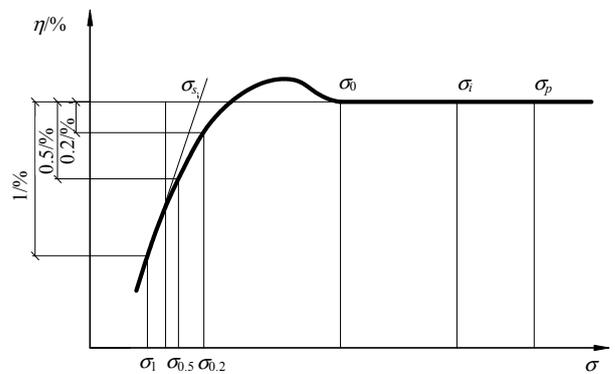


图2 空化系数的定义

初生空化和临界空化的判定方式通常在模型验收试验合同中都有明确规定，但对于不同工程的合同其规定可能不尽相同。如有些合同规定初生空化系数 σ_i 以转轮叶片表面出现第一个可见气泡时所对应的空化系数为准取值；有些规定转轮有 2 个叶片表面开始出现可见气泡时的空化系数值为初生空化系数；有些规定转轮有 2~3 个叶片进水边出现长度超过 10mm 气泡时所记录的 NPSH 值为必需的净正吸入水头。而对于临界空化的判定，有的电站以随着空化系数的降低效率下降 0.2% 为准取值，有的则以效率下降 0.5% 为准取值，还有的用 σ_s 作为临界空化系数。因在查阅的资料文献中以效率下降 0.2% 为准取值的较多，为方便比较，本文将所统计到的电站临界空化系数都统一到效率下降 0.2% 时的空化系数，记做 $\sigma_{0.2}$ 。

3 我国已建成运行的有代表性的中低水头蓄能电站水泵水轮机水泵工况参数统计

我国已建成运行的有代表性的中低水头蓄能电站有桐柏、泰安、白莲河、响水涧、琅琊山、沙河、白山、潘家口等，其中除响水涧以外的其它电站都是从国外引进的当时先进的水泵水轮机技术。这些电站的水泵工况性能参数见表 1。

从表 1 中可以看出，潘家口电站的扬程变幅最大，

最大扬程与最小扬程之比达 1.4127，其次是沙河和响水涧，达 1.2415，再次之的是琅琊山、桐柏和白山，比值均超过 1.2，分别为 1.2253、1.2139 和 1.2052，而泰安和白莲河的比值在 1.2 以内。瑞士 E.W. 公司曾建议混流式水泵水轮机最大与最小水头比值不超过 1.2 为宜，最不利的不能超过 1.4^[4]，否则在偏离最优工况较远的工作点上会出现效率偏低或运行不稳定的现象。

潘家口水泵水轮机于 1985 年由 EULZER 公司进行研发，公司先后用了两年多时间研制了三个模型转轮及在此基础上做了 19 次修型，最终将最优设计点移至较小的压力系数和较大的流量系数点，提高了水泵水轮机的效率水平和水泵工况低扬程大流量的空化性能。响水涧水泵水轮机于 2006 年由哈电机负责研发^[5]，虽然响水涧的水力性能参数与白莲河相当，有一个很好的基础转轮作为设计参照，但由于水头/扬程变幅比白莲河大很多，因此开发难度也大很多。哈电机历时两年多，先后研制了 A958、A971 和 A999 三个模型转轮，用于改善水泵水轮机能量匹配关系和提高水泵工况空化性能。由此可见，过大的水头/扬程变幅给水泵水轮机水力设计带来了不小的麻烦，需要有一定的限制范围。

表 1

| 电站名称 | 额定转速 $n/(r/min)$ | 水泵工况 | | | | | | | | | 比转速 $(m, m^3/s)$ | | | 最小吸出高度 H_s/m |
|------|------------------|-------------|--------------|--------|------------|--------------|--------|-------------|--------------|--------|------------------|--------------|---------------|----------------|
| | | H_{max}/m | $Q'/(m^3/s)$ | η | H_{op}/m | $Q'/(m^3/s)$ | η | H_{min}/m | $Q'/(m^3/s)$ | η | $n_q H_{max}$ | $n_q H_{op}$ | $n_q H_{min}$ | |
| 桐柏 | 300 | 288.3 | 90 | 93.48 | 262.1 | 105.9 | 93.95 | 237.5 | 119.5 | 93.56 | 40.68 | 47.39 | 54.21 | -58 |
| 泰安 | 300 | 259.6 | 89.2 | 93.25 | 250 | 96.2 | 93.6 | 223.6 | 112.4 | 93.6 | 43.81 | 46.80 | 55.00 | -53 |
| 白莲河 | 250 | 222.7 | 126.7 | 94.14 | 222.7 | 126.7 | 94.14 | 191 | 151.3 | 93.34 | 48.81 | 48.81 | 59.85 | -50 |
| 响水涧 | 250 | 222.1 | 104.2 | 92.67 | 207.9 | 116.4 | 93.29 | 178.9 | 137.7 | 91.77 | 44.36 | 49.26 | 59.97 | -54 |
| 沙河 | 300 | 125.02 | 42.46 | 93.25 | 125.02 | 42.46 | 93.25 | 100.7 | 53.7 | | 52.28 | 52.28 | 69.16 | -21 |
| 琅琊山 | 230.8 | 152.8 | 95.1 | 93.2 | 145 | 102.8 | 93.6 | 124.7 | 122.5 | 93 | 51.79 | 56.00 | 68.45 | -32 |
| 白山 | 200 | 130.4 | 113 | 93.6 | 126.7 | 118 | 93.95 | 108.2 | 138 | 93.05 | 55.09 | 57.53 | 70.03 | -25 |
| 潘家口* | 142.8 | 86.6 | 82.8 | 90.35 | 70.04 | 115.8 | 93.1 | 61.3 | 131.7 | 92.75 | 45.77 | 63.47 | 74.80 | -9 |

*潘家口电站采用两档转速 142.8r/min 和 125r/min，本文只涉及 142.8r/min 的情况。

4 水泵工况空化性能统计与分析探讨

4.1 水泵工况空化试验结果统计

在详细查阅了桐柏、白莲河、响水涧、沙河、琅

琊山、白山和潘家口水泵水轮机模型水泵工况空化试验结果（包括数据、曲线、描绘及照片）的基础上，对各站的装置、初生和临界空化进行了统计，结果如表 2 所示。

表 2

| 电站名称 | H/m | $Q/(m^3/s)$ | $n_q/(m, m^3/s)$ | σ_p | σ_i | $\sigma_{0.2}$ | $\sigma_p/\sigma_{0.2}$ |
|------|--------|-------------|------------------|------------|------------|----------------|-------------------------|
| 桐柏 | 288.4 | 91.8 | 41.07 | 0.235 | 0.157 | 0.106 | 2.217 |
| | 276 | 98.9 | 44.06 | 0.305 | 0.169 | 0.105 | 2.905 |
| | 263 | 106.4 | 47.38 | 0.341 | 0.179 | 0.113 | 3.018 |
| | 250 | 113.8 | 50.90 | 0.38 | 0.258 | 0.128 | 2.969 |
| | 237.6 | 120.7 | 54.46 | 0.415 | 0.395 | 0.203 | 2.044 |
| 白莲河 | 224 | 123 | 47.98 | 0.325 | 0.266 | 0.08 | 4.063 |
| | 216.5 | 129.8 | 50.57 | 0.336 | 0.208 | | |
| | 217.1 | 130.1 | 50.52 | 0.335 | | 0.105 | 3.189 |
| | 208.7 | 136.7 | 53.34 | 0.348 | | 0.087 | |
| | 207.5 | 137.4 | 53.72 | 0.350 | 0.178 | | |
| | 199.5 | 143.8 | 56.58 | 0.365 | | 0.096 | 3.782 |
| | 199.4 | 144.5 | 56.76 | 0.365 | 0.181 | | |
| | 195.0 | 148.2 | 58.45 | 0.373 | 0.279 | | |
| | 191.2 | 151.0 | 59.87 | 0.380 | 0.321 | | |
| | 190.6 | 151.4 | 60.10 | 0.382 | | 0.230 | 1.662 |
| 响水涧 | 218.7 | 105.0 | 45.04 | 0.292 | 0.283 | 0.088 | 3.318 |
| | 216.3 | 109.2 | 46.32 | 0.304 | 0.248 | 0.094 | 3.234 |
| | 209.2 | 115.8 | 48.89 | 0.324 | 0.212 | 0.117 | 2.769 |
| | 202.8 | 121.1 | 51.20 | 0.348 | 0.187 | 0.103 | 3.379 |
| | 191.0 | 129.4 | 55.36 | 0.384 | 0.240 | 0.067 | 5.731 |
| 沙河 | 180.1 | 139.6 | 60.08 | 0.423 | 0.490 | 0.105 | 4.029 |
| | 125.0 | 42.7 | 52.43 | 0.246 | 0.448 | 0.093 | 2.644 |
| | 114.8 | 47.7 | 59.08 | 0.268 | 0.300 | 0.094 | 2.856 |
| 琅琊山 | 100.7 | 54.3 | 69.54 | 0.339 | 0.299 | 0.214 | 1.586 |
| | 152.8 | 94.7 | 51.68 | 0.276 | 0.268 | 0.153 | 1.800 |
| | 150.0 | 98.3 | 53.39 | 0.280 | 0.269 | 0.153 | 1.830 |
| | 145.0 | 103.6 | 56.22 | 0.289 | 0.278 | 0.160 | 1.806 |
| | 140.0 | 108.6 | 59.10 | 0.298 | 0.290 | 0.165 | 1.806 |
| | 135.0 | 113.6 | 62.11 | 0.308 | 0.301 | 0.174 | 1.770 |
| | 130.0 | 118.6 | 65.29 | 0.338 | 0.318 | 0.190 | 1.779 |
| 白山 | 124.7 | 123.7 | 68.80 | 0.394 | 0.383 | 0.230 | 1.713 |
| | 130.39 | 114.99 | 55.58 | 0.266 | | 0.083 | 3.227 |
| | 126.71 | 118.87 | 57.74 | 0.274 | | 0.097 | 2.824 |
| | 118.37 | 128.03 | 63.06 | 0.293 | | 0.095 | 3.086 |
| | 108.18 | 138.48 | 70.16 | 0.321 | | 0.186 | 1.722 |
| 潘家口 | 86.60 | 82.80 | 45.79 | 0.219 | 0.521 | 0.180 | 1.219 |
| | 80.30 | 95.90 | 52.15 | 0.237 | 0.310 | 0.165 | 1.434 |
| | 73.30 | 109.50 | 59.67 | 0.259 | 0.262 | 0.205 | 1.264 |
| | 66.20 | 122.70 | 68.19 | 0.287 | 0.326 | 0.230 | 1.248 |
| | 61.30 | 131.70 | 74.84 | 0.386 | 0.633 | 0.340 | 1.118 |

从表 2 可以看出，扬程变幅较小的桐柏、白莲河和琅琊山在全部运行范围内的初生空化系数 σ_i 均小于装置空化系数 σ_p ，说明这些电站所提供的装置空化能满足转轮在泵工况的初生空化要求，并且还有额外的裕度，因此机组可在完全无空化条件下运行。

有些电站泵工况的初生空化有大于装置空化的现象（表中以斜体显示的数据），如响水涧的低扬程大流量工况和沙河的高扬程小流量工况。说明扬程变幅大的蓄能电站，转轮必然会运行在远离设计点的工况，这些工况的空化性能较差，需要电站提供更大的装置空化予以满足，否则就无法做到无空化运行。而扬程变幅巨大的潘家口在全部水泵工况运行范围内，其初生空化系数 σ_i 均大于装置空化系数 σ_p ，说明电站所提供的装置空化无法满足转轮在整个运行范围内的任一工况点做无空化运行。经核实试验数据，装置空化系数大于能量特性变化前的空化系数 σ_0 ，如图 3 所示。

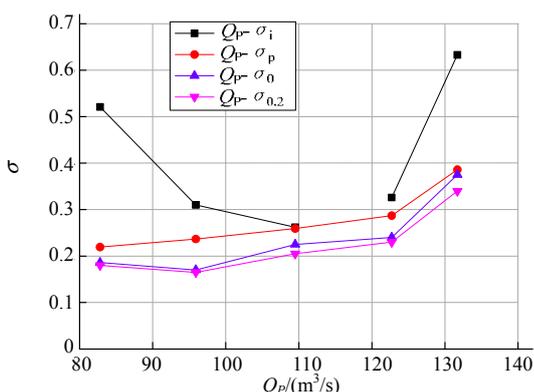


图 3 潘家口电站水泵工况 $Q_p - \sigma$ 关系

从临界空化方面来看，各站在运行范围内的装置空化系数 σ_p 均大于临界空化系数 $\sigma_{0.2}$ ，且两者之比值都在 1.1 以上。说明即使某些水头变幅大的机组，在某些工况的装置空化不能满足初生空化的要求，但是这些工况仍可运行在有空化但能量特性没有下降的情况。

4.2 空化性能分析与探讨

综合考虑扬程变幅和流量变化对空化性能的影响，在表 2 中将各站的空化系数与比转速建立起一一对应的关系，并将这一对应关系绘于图 4 中。国外对抽水蓄能电站研究起步早，有丰富的实际电站运行实例，由此统计的资料详实而准确。根据文献[1]介绍，国外有研究者根据统计对泵工况空化系数提出一个计算公式：

$$\sigma = Kn_q^{4/3} 10^{-3}$$

美国垦务局的 Stelzer 建议对于临界空化用 $K=1.17^{[6]}$ ，奥地利 Klein 建议对电站装置空化系数用 $K=1.4^{[7]}$ ， σ_p 与 σ_c 的比值约为 1.2。将该公式计算出的空化系数与比转速关系也一并绘制在图 4 中，作为对本文统计结果的参考依据。曲线 A 代表临界空化系数 $\sigma_c = 1.17n_q^{4/3} 10^{-3}$ ，曲线 B 代表装置空化系数 $\sigma_p = 1.4n_q^{4/3} 10^{-3}$ 。

从图 4 可以看出，潘家口的比速范围最大，最小比转速和最大比转速所对应的临界空化系数已十分接近曲线 A，如果比转速之差进一步加大，按曲线的发展趋势，其临界空化系数很快就会超过曲线 A，运行将是不安全的。由此可见，潘家口的比转速变化范围已经达到了极限。

图 4 中各站的 $\sigma_{0.2} = f(n_q)$ 关系曲线都位于曲线 A 的下方，说明各站的临界空化均可控制在一个合理的范围之内。由此可以认为在图 4 所示的比转速范围内，对一个新的中低水头蓄能电站进行水泵水轮机选型时，无论其比转速位于图 4 的哪段区域，由制造厂或设计单位提供的泵工况临界空化曲线应不超过曲线 A，否则需要重新选择机型或进一步改进设计。

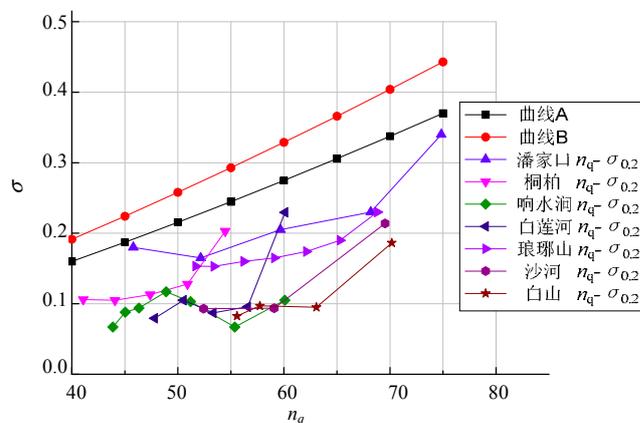


图 4 水泵工况空化系数与比转速关系统计

而装置空化统计曲线 B 则是一条参考曲线，如果可供选择的水泵水轮机泵工况空化性能一般，又要求机组在整个运行范围内完全无空化运行，就需要按最大的初生空化加额外的裕度考虑，那么电站的装置空化曲线可能高于曲线 B，如图 5 所示。如果选择的转轮泵工况空化性能好，需要电站提供的装置空化小，则电站的装置空化曲线可能低于曲线 B，如图 6 所示。由此可见，选择空化性能好的水泵水轮机能为工程带

来很好的经济效益。

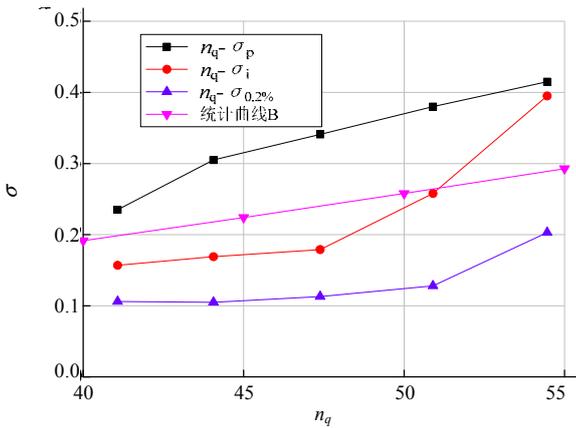


图5 桐柏电站水泵工况 $n_q - \sigma$ 关系

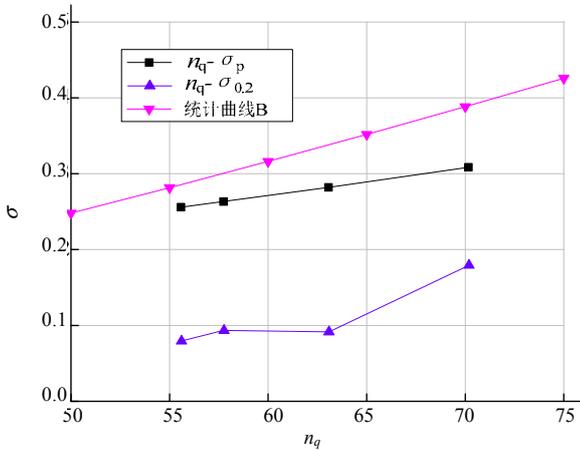


图6 白山电站水泵工况 $n_q - \sigma$ 关系

水泵水轮机的空蚀破坏程度与水头的 2.5~3 次方成比例，高水头水泵水轮机流道内相对流速较大，易发生空化，因此高水头机组为防止空蚀的发生，要求水泵水轮机无空化运行，即在选型或设计时需要在 $NPSH_r$ 的基础上考虑额外的裕度。由于高水头机组的比速变化范围小，淹没深度大，因此无空化运行的要求较容易实现。而对于中低水头机组，尤其是应用于水头变幅大的常蓄结合型电站或调水工程中用于调蓄的低水头可逆式机组，比速变化范围很宽，淹没深度小，无空化运行较难保证，而过大的挖深又是不经济的，因此应根据电站的实际运行情况，适当放宽不经常运行的工况点对空化的要求，在预估空蚀的损害较轻时，允许在有初生空化发生但能量特性没有变化或效率没有明显变化的情况下运行，这样由空化特性换算的真机吸出高度不大，可节省电站工程量及投资，达到即相对安全又比较经济的目的。

5 几点建议

5.1 临界空化系数取值

临界空化系数 σ_c 是根据模型水泵性能参数随空化系数变化的外特性确定的，合同中通常在 σ_0 、 σ_s 、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_{0.5}$ 、 σ_1 中选取一个空化系数。考虑中低水头混流式水泵水轮机的水泵工况受安装高程的限制，特别是低水头段的水泵工况可能难以满足在最小流量和最大流量运行点无空化运行的条件，临界空化系数的取值尤为重要，从对水泵性能影响较小和同时体现临界特点出发，并考虑模型试验效率测量误差的限制，建议中低水头段水泵工况的临界空化系数在 σ_s 或 $\sigma_{0.5}$ 之间选取。

5.2 初生空化系数的判定方法

初生空化的判断目前主要根据模型水泵转轮叶片进口空化流态目测或空化噪声确定，目测的方式可以判断初生空化的空泡位置及尺寸，空化噪声判别方式主要由试验人员凭感官判定或空化噪声仪器测试，但无论试验人员的感官还是目前的空化噪声仪器，其测量准确度均可能存在较大偏差，因此建议在目前阶段以目测为主，并改善叶片进口背面区域的光洁度以能够采取镜面反射方式观测大流量区域进口正面的空化流态。

5.3 空化系数计算基准高程的选择

国内目前在模型空化试验中普遍采用导叶高度中心线作为空化系数计算基准高程，与 IEC60193-1999 规定的水泵叶片进口空化基准位置高程留有一定的裕量。对于受安装高程限制的低水头段水泵水轮机，可参照 IEC60193-1999 的空化系数计算基准高程考核，在低于电网频率 50Hz 的最小流量工况和高于 50Hz 的最大流量工况可以用临界空化系数的裕量限制。

5.4 水头变幅的限制

混流式水泵水轮机水泵工况因为进口撞击和低压区都发生在叶片进口，如果水头变幅过大，偏离设计工况的来流在绕流叶片头部后产生脱流，使空化性能变差。因此需要根据工程实际情况对水头变幅有一定的限制。根据以往的经验和本统计分析结果，在中低水头段建议水泵工况满足无空化运行条件的最大与最小水头比值不宜超过 1.2，有空化发生但能量特性没有明显变化的最大与最小水头比值以不超过 1.4 为限。

6 结论

在开始进行水泵水轮机选型时，一般尚没有制造厂家提供的参数或曲线，需要依据已制成机组的统计数据以及根据这些数据归纳的曲线或公式来进行估

算。希望本文对国内中低水头高比转速抽水蓄能电站泵工况空化性能的统计分析与建议,有助于同类机组的空化性能研究及选型参考,为解决工程实际需要提供有价值的帮助。

[参考文献]

[1] 梅祖彦. 抽水蓄能发电技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[2] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.

[3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 15469.2-2007 水轮机 蓄能泵和水泵水轮机空蚀评定 第2部分: 蓄能泵和水泵水轮机的空蚀评定[S]. 2007.

[4] Muehleman E H. Arrangements of Hydraulic Machinery for Pumped Storage and Comparison of Cost, Efficiency and Starting Time[J]. Escher Wyss

News, 1972,45(1):3-12.

[5] 陈元林, 覃大清. 响水涧项目水泵水轮机水力性能研发[J]. 大电机技术, 2011(3):42-46.

[6] Stelzer R S, Walters R N. Estimating Reversible Pump Turbine Characteristics[R]. U.S. Bureau of Reclamation, 1977.

[7] Klein J. Problems of Model Testing for High Head Pump Turbines: IAHR Symposium, Vienna, 1974[C].

[收稿日期] 2014-10-24

[作者简介]



陈锐 (1963-), 1985年7月毕业于华北水利水电大学水电站动力设备专业, 现从事水力机械设计与研究工作, 高级工程师。

审稿人: 覃大清

(上接第 49 页)

脉动的传播 (0.06 倍频), 整场压力脉动传播的源头主要在于无叶区, 对于 9 倍频和 18 倍频的传播是无叶区为源头, 向上下游进行传播; 从幅度上来看, 无论是低频 (0.06 倍频) 还是 9 倍频和 18 倍频, 无叶区的压力脉动主要向下游传播, 对上游传播较弱, 下游位置转轮的吸收作用, 使其很难传播到尾水管, 所以蜗壳各主频脉动幅值都比尾水管高。同时由蜗壳压力脉动幅值看出, 18 倍频比 9 倍频传播的远。

4 结论

本文通过对活动导叶从 9mm 运动到 26mm 开度的泵工况进行瞬态数值计算, 并与导叶固定工况进行对比, 得出活动导叶运动工况的压力脉动频率成分以由导叶运动和旋涡结构等不良流动产生的低频脉动, 及转轮与双列叶栅动静干涉产生的叶片通过频率及其谐波频率传播而来的 9 倍频、18 倍频等组成; 相比于导叶固定工况, 其低频成分幅值更高, 9 倍频和 18 倍频幅值略低, 主要是活动导叶运动频率及其引起不良流动产生的低频脉动向上下游传播所致, 使低频成分明显, 并对 9 倍频等转轮叶片通过频率产生影响; 泵工况中压力脉动在无叶区幅值最高, 主要向下游蜗壳方向传播, 很难向上游传到尾水管。

[参考文献]

[1] 潘作为, 高新新, 梁双印. 基于 CFD 技术的脱

硫浆液泵节能技术研究 [J]. 节能技术, 2014,32(3):268-272.

[2] Y K Sun, Z G Zuo, S H Liu, et al. Numerical simulation of the influence of distributor pitch diameter on performance and pressure fluctuation in a pump-turbine[C]. 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. 2012.

[3] 王乐勤, 刘迎圆, 刘万江, 等. 水泵水轮机泵工况的压力脉动特性[J]. 排灌机械学报, 2013,31(1): 7-10.

[4] 张宇宁, 刘树红, 吴玉林. 混流式水轮机压力脉动精细模拟和分析[J]. 水力发电学报, 2009, 28(1): 183-186.

[5] Artemov V, Beale S B, de Vahl Davis G, et al. A tribute to DB Spalding and his contributions in science and engineering[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(17): 3884-3905.

[6] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 126-130.

[收稿日期] 2014-10-24

[作者简介]



王洪杰 (1962-), 1984 年毕业于哈尔滨工业大学, 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 教授, 现从事流体机械流动机理及控制系统方向的研究。

审稿人: 刘万江