

水轮机空化系数及其对水力性能的影响

徐洪泉, 王万鹏

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

[摘要] 水轮机空化系数对水轮机的效率、出力、空化、压力脉动、飞逸转速及轴向水推力等性能均有一定影响, 有的工况影响非常大。本文首先介绍了空化系数对能量、空化性能的影响及与其有关的两个空化系数的区别, 然后着重介绍了空化系数对压力脉动和飞逸转速的影响, 探讨了空化系数对轴向水推力的影响及正确的试验方法。

[关键词] 水轮机; 空化系数; 效率; 空化; 压力脉动; 飞逸转速; 轴向水推力

[中图分类号] TK730.7 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1000-3983 (2010) 05-0000-00

Cavitation Coefficient of Turbine and It's Effect to Hydraulic Performance

XU Hong-quan, WANG Wan-peng

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

Abstract: The cavitation coefficient can affect hydraulic performance of turbine in the fact of efficiency, output, cavitation, pressure fluctuation, runaway speed and hydraulic axial thrust, and it have badly effect in some operating points. In this paper, the effect to energy and cavitation and the difference of two cavitation coefficient are intrduced . And then stressed to introduce the effect of cavitation coefficient to pressure fluctuation and runaway speed, discussed the effect of cavitation coefficient to hydraulic axial thrust and the correct test method of hydraulic axial thrust tests.

Key words: turbine; cavitation coefficient; efficiency; cavitation; pressure fluctuation; runaway; hydraulic axial thrust

1 前言

在水轮机的模型试验和电站实际运行中, 其空化系数都扮演着重要角色, 对水轮机的水力性能有着重要的影响。受认识水平和发展阶段的限制, 对空化系数及其影响的认识也有个循序渐进的过程, 还需要进行不断地研究探索、逐步深化。

空化系数对水轮机性能的影响是多方面的, 其不仅对效率、过流能力和出力(或称功率)等能量性能有很大的影响(通过临界空化系数体现), 对水轮机转轮内的空化、空蚀有直接影响(通过初生空化系数体现), 还对压力脉动、飞逸转速和轴向水推力等特性有程度不同的影响, 需引起我们的高度重视。

2 临界空化系数和初生空化系数

关于临界空化系数, 国家标准《电工术语 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机》^[1]的定义为: “在模型空化试验中用能量法确定的临界状态的空化系数”。在模型试验时, 因选取的效率“临界状态”不同, 就有了效率下降 1% 时的 σ_1 和效率刚开始下降的 σ_0 等等。也就是

说, 临界空化系数直接反映的是水轮机的能量性能方面的变化, 和其是否已经产生空化及空化的程度等没有直接关系。尽管压力降低不仅导致水轮机效率、过流能力和出力的变化, 也使转轮进出水边、流道内空化状况产生变化, 甚至可能是空化状况的变化导致了上述能量性能的变化, 但由于确定临界空化系数的判别依据是能量性能, 而不是空化性能, 况且空化系数降低引起的并不一定是效率的单调下降, 有时还会是效率上升, 临界空化系数并不直接反映空化性能, 不能作为是否产生空化的依据。

关于初生空化系数, 文献^[1]的定义为: “模型空化试验时, 转轮叶片开始产生气泡时的空化系数”。在目前, 通用的试验方法是肉眼观测, 采用闪频仪以和转速频率相近的频率向观测部位打光, 当发现 3 个或 3 个以上叶片开始出现气泡时, 就定义当时的空化系数为初生空化系数。显然, 初生空化系数直接反映的是水轮机在低压条件下空化性能的变化, 和其是否已经造成效率和出力下降等没有直接关系。尽管压力降低不仅导致转轮内气泡产生, 也使能量性能变化, 但由

于确定初生空化系数的判别依据是气泡是否产生,而不是能量性能如何变化,初生空化系数并不直接反映能量性能,不能作为机组能否达到要求效率和出力的依据。

分清临界空化系数和初生空化系数两个不同概念的关键是区分确定这两个系数的判别依据,前者依据的是“能量”指标,后者依据的是“气泡”初生。因“能量”而定的临界空化系数用于确定在相似条件下电站能否达到预期的“能量”性能,因“气泡”初生而定的初生空化系数则用于确定在相似条件下转轮是否产生空化和空蚀。

之所以容易将两个空化系数搞混淆,一个重要原因是二者之间有割不断的联系。转轮内空化气泡的形成、发展,确实影响了效率、流量、出力等能量性能,说明初生空化系数和临界空化系数之间是有关联的。但是,我们还必须明白,二者之间的关系是间接的关系,是一种不确定的联系,因转轮、工况而异。过去曾有许多学者试图建立两者之间的联系,但最终建立的是一种不太紧密的统计关系。也就是说,二者之间无法建立一一对应的直接联系,因此也就无法通过临界空化系数确定空化是否发生及强度,同样也无法通过初生空化系数来准确确定能量性能的变化情况。

由于对两个空化系数认识的局限性,过去一直以临界空化系数来笼统地评价在空化条件下的水轮机能量和空化性能。随着初生空化系数的逐渐被了解和认知,又有人建议取消临界空化系数,建议以初生空化系数代替临界空化系数,其实是忽略了临界空化系数在反映能量性能方面不可替代的作用,从一个极端走向了另一个极端。

3 空化系数对压力脉动的影响

压力脉动是水轮机由于流道不对称、脱流、空化及涡流等因素影响而产生的压力不稳定现象,空化及空化系数对其影响很大,主要体现在三个方面。其一是对压力脉动幅值的影响,其二是对压力脉动频率的影响,其三是对压力脉动波形的影响。

3.1 空化系数对压力脉动幅值的影响

压力脉动幅值随空化系数变化的基本规律如图1所示^[2]。和小流量工况效率随空化系数变化的曲线规律相似,随着空化系数的降低,压力脉动幅值缓慢增加;当空化系数降低到一定程度时,压力脉动幅值陡增;在某空化系数下,压力脉动幅值达到最大值,可达到能量工况(或称大空化系数工况)幅值的2~3倍;当空化系数继续降低时,压力脉动幅值开始降低,

甚至可降低到能量工况幅值以下。

表面看来,空化系数很低时压力脉动幅值降低,似乎对稳定运行有利,其实不然。大量的观测资料证实,此时尾水管内已接近断流,水轮机效率很低,噪声很大,电站不可能在这种工况运行。因此,我们认为,在电站安全稳定运行范围内,空化系数的降低总体是使压力脉动幅值增加,增加电站装置空化系数在通常情况下对降低水轮机压力脉动是有利的,对稳定运行有利。

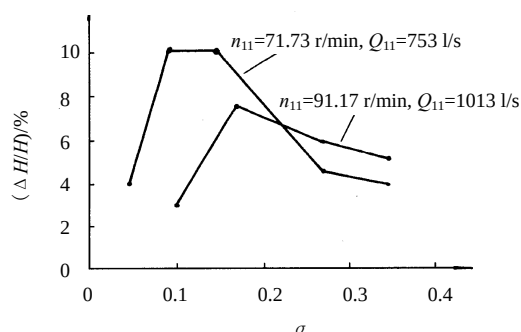


图1 压力脉动幅值随空化系数变化规律

3.2 空化系数对压力脉动频率的影响

空化系数对压力脉动频率的影响主要体现在两个方面,其一是真实地使频率产生变化,其二可能是波形的变化使分析频率产生变化。

当空化发生时,如果传感器灵敏度比较高,会比没有空化时增加一些高频成分。当空化系数降低时,特别是当尾水管涡带发生时,开始时主频率稍有降低,其后涡带频率基本保持不变。空化往深度发展时,压力脉动频率又有增加的趋势,甚至会分析出2倍或2倍以上原频率的主频。这是一种假象,并不是主频真正地增加了,而是压力脉动波形变化引起的。

3.3 空化系数对压力脉动波形的影响

空化系数对压力脉动波形的影响主要产生在低空化系数条件下,有的是因为频率的变化,有的则因为波形的不对称,由于压力降低到绝对零压力或传感器量程限制,使压力脉动波形似乎被削掉了一部分,即出现了所谓的“削波”现象(如图2所示),造成分析频率提高。

既然空化系数对压力脉动波型、频率和幅值有很大影响,在模型验收中,就不能不考虑空化系数的影响。因此,在水轮机验收试验中,都是在电站装置空化系数下测压力脉动,以保持原模型尽可能的真实相似。

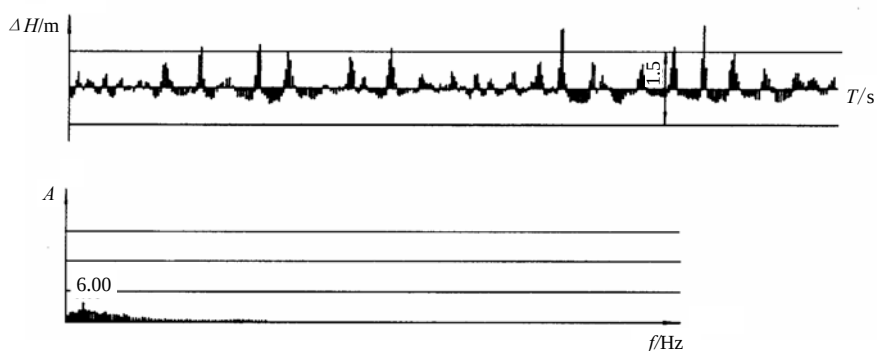


图2 压力脉动波形对频谱分析的影响

4 空化系数对飞逸特性的影响

水轮机的飞逸特性,也就是水轮机的零力矩特性,说到底应该是其能量特性的特殊外延。水轮机的内外特性是相互关联、制约和影响的,飞逸特性也不例外,其和能量、空化、流速及压力分布等内外特性等都有很大关系,对机组的压力脉动、轴向水推力等也有较大影响。

既然飞逸特性是效率特性的外延,空化系数对效率等能量特性有影响,其势必也会影响到水轮机的飞逸特性。图3和图4是某混流式水轮机在两种不同空化系数下所做飞逸试验的测试结果。和其他试验结果相似,在小导叶开度小空化系数飞逸转速高于大空化系数条件下的飞逸转速,在大导叶开度小空化系数飞逸转速低于大空化系数条件下的飞逸转速。而飞逸条件下的单位流量则略有不同,在小导叶开度空化系数影响很小,大开度条件下小空化系数的单位飞逸流量小于大空化系数的单位飞逸流量。

不仅混流式水轮机有此特性,轴流式水轮机也有同样的特性,即:在小流量空化系数小时飞逸转速较高,在大流量空化系数小时飞逸转速较低。

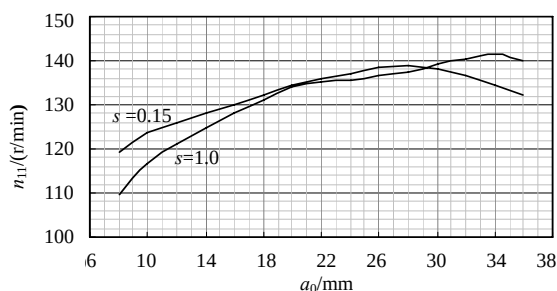


图3 空化系数对飞逸转速的影响

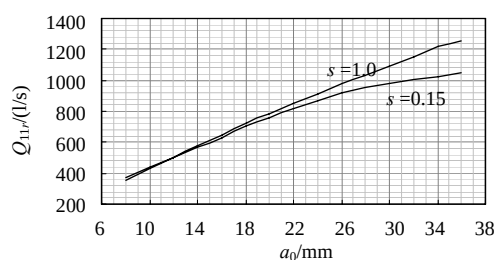


图4 空化系数对飞逸流量的影响

经过分析,造成上述现象的原因可能和空化状况下的效率性能有一定的关系。通过大量的模型试验发现,在小流量区,随着空化系数的降低,水轮机的效率通常有一上升的区域,过了该区域后会急速地下降^[3]。而在大流量区,几乎看不到这种现象,随着空化系数的下降,水轮机效率单调下降。在飞逸试验中,我们看到了类似的现象,只不过这时的因变量由效率变成了飞逸转速。

5 空化系数对轴向水推力的影响

空化系数对轴向水推力的影响主要是对单位轴向力参数及其原模型换算的影响。在过去的机械教科书及相关文献中,模型轴向水推力 P_{ZM} 采用下式换算成单位轴向力 P_{z11} :

$$P_{z11} = \frac{P_{ZM}}{H_M \cdot D_{1M}^2} \quad (1)$$

式中, H_M —模型试验水头;

D_{1M} —模型转轮公称直径。

然后,再应用下式换算到原型,计算原型轴向力

P_{ZP} :

$$P_{ZP} = P_{z11} \cdot H_P \cdot D_{1P}^2 \quad (2)$$

式中, H_P —原型水头;

D_{1P} —原型转轮公称直径。

按照常规的理解,采用式(1)计算的单位轴向水推力是相似系数,既然能用其换算原型的轴向力,其应当不受空化系数和水头等试验条件的影响。但是,当采用不同的空化系数或水头进行模型试验时,却发现单位轴向水推力是变化的,其相似性并不成立^[4],如图5和图6所示。

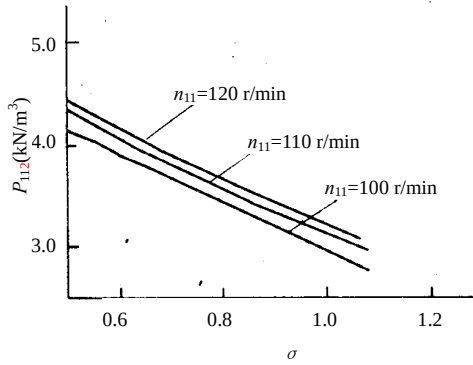


图5 空化系数对轴向力的影响

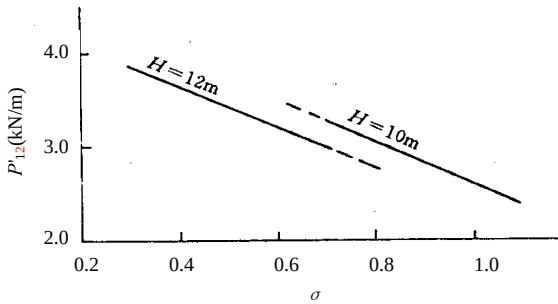


图6 试验水头 H 对轴向力的影响

之所以会出现随着空化系数的增加单位轴向力减小(包括图6所示高试验水头单位轴向水推力降低)的现象,其主要原因在于水轮机转轮之高压侧压力作用面积不同。以轴流式水轮机为例,其低压侧受力面积是以转轮外径为直径的圆面积;但在高压侧则不同,受力面积是以转轮直径 D_1 为外径、主轴密封直径 D_s 为内径的圆环面积。

当作用在转轮高低压侧的压力水头差为固定的 H 时,作用在上下两个同面积圆环上的轴向力是固定的,不随空化系数或尾水压力 H_s 而变化。但是,低压侧还多出主轴密封面积 $D_s^2 \cdot \pi / 4$,尾水压力作用在上面。当尾水压力 H_s 为正值时,作用力朝上,使轴向水推力下降(轴向力向下为正);反之,当尾水压力 H_s 为负时,轴向力增加。所以,当空化系数降低时,尾水压力降低,轴向力增加,造成前述的不相似现象。

要解决该问题,必须考虑模型和原型的主轴密封面积给高低压侧造成的受力面积不相等问题,将作用

在该面积上的尾水压力进行修正,再计算新的单位参数。当然,应用到原型时,还需要按原型的尾水压力及主轴密封面积进行修正。

能消除空化系数影响的单位轴向水推力计算方式为先计算作用在模型主轴密封面积上的不平衡力 F_D :

$$F_D = g_M \cdot \rho_M \cdot H_{sM} \cdot D_{sM}^2 \cdot \pi / 4 \quad (3)$$

如未消除不平衡力的轴向力为 F_{aM}^* ,则可相似换算的模型轴向水推力 F_{aM} 为:

$$F_{aM} = F_{aM}^* + F_D \quad (4)$$

轴向水推力系数 F_{a1} 按下式换算:

$$F_{a1} = \frac{F_{aM}}{g_M \cdot \rho_M \cdot D_M^2 \cdot H_M} \quad (5)$$

式中, D_M ——模型转轮公称直径;

ρ_M ——模型试验水密度;

H_M ——模型试验水头;

H_{sM} ——模型尾水吸出高度,和尾水压力方向一致。

原型转轮所受轴向水推力 F_{aP} 根据下式计算:

$$F_{aP} = F_{a1} \cdot \rho_P \cdot g_P \cdot D_P^2 \cdot H_P + \rho_P \cdot g_P \cdot H_{sP} \cdot D_{sP}^2 \cdot \pi / 4 - F_B$$

式中: D_P ——原型转轮公称直径;

ρ_P ——电站水密度;

H_P ——电站实际水头;

H_{sP} ——原型尾水吸出高度,尾水位在导叶中心高程以上为负值;

D_{sP} ——主轴密封处直径;

F_B ——原型转轮在水中所受浮力。

采用此种计算方法,不仅轴流式水轮机轴向水推力不受空化系数和水头影响,混流式水轮机也能保证原模型相似。在某高水头混流式水泵水轮机的模型验收中,在 71.5m 和 40m 两种不同试验水头下测试的轴向水推力系数 F_{a1} 差别只有不足 0.9%,非常接近。

扣除不平衡力影响后,轴向水推力系数不受水头和空化系数影响,进行模型轴向力试验时也就不必拘泥于保持原模型装置空化系数相似。为减少扣除不平衡力带来的麻烦,最简单有效的方法就是在模型试验时使导叶中心线处压力和大气压保持一致。

6 结论

综上所述,可得如下几条主要结论:

(1) 临界空化系数和初生空化系数是两个不同的概念,前者用于确定水轮机能量性能,后者用于确定空化性能,二者都不可或缺,也不能相互代替;

(2) 空化系数对水力机械的压力脉动影响很大, 不仅影响其幅值, 还对其波形及频率有较大影响, 在模型试验中一定要注意空化系数和电站装置空化系数的一致;

(3) 空化系数对飞逸转速的影响在满负荷工况和小负荷工况差别很大, 应区别对待, 模型验收试验应在电站装置空化系数条件下进行;

(4) 由于作用在水轮机转轮高低压侧的轴向水推力的作用面积不相等, 采用原来公式计算的单位轴向力在不同空化系数和水头下结果差别很大, 只有消除尾水压力引起的不平衡力的影响, 才能保持原模型相似, 正确地将模型试验结果换算应用到原型机。

[参 考 文 献]

- [1] GB/T 2900.45-1996, 电工术语, 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机[S].
- [2] 徐洪泉, 潘罗平, 李飞. 水轮机涡带压力脉动影响因素及模型试验方法的研究[J]. 水力发电学报, 1998, (3): P52 ~ P58.

- [3] 徐洪泉, 沈祝平. 水轮机模型空化及能量试验中若干问题的探讨[J]. 水利水电技术, 1996, (4): P29 ~ P32.

- [4] 徐洪泉, 潘罗平, 李飞. 轴流式水轮机轴向水推力测试研究[J], 水利水电技术. 1996, (12): P55 ~ P59.

[收稿日期] 2009-12-21

[作者简介]



徐洪泉 (1955-), 1982 年毕业于清华大学水利系, 从事水力机械的研究及开发工作, 教授级高级工程师。



王万鹏 (1977), 2004 年毕业于清华大学热能系, 硕士, 从事水力机械的研究及开发工作, 工程师。