

超低水头竖井贯流式水轮机模型试验

杨春霞¹, 郑源², 李玲玉², 刘梦轩²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为研究超低水头下竖井贯流式水轮机的能量特性和空化特性,对一种额定水头为 2.10 m 的超低水头竖井贯流式水轮机进行模型试验。基于河海大学水力机械多功能试验台,采用压差传感器、电磁流量计、扭矩仪等仪器对不同导叶开度、不同叶片安放角下 GD-WS-35 型水轮机的水头、流量和扭矩等参数进行测试,并绘制了水轮机模型综合特性曲线。试验结果表明:当叶片安放角为 23°,导叶开度为 65°时,在额定水头 2.10 m 条件下,模型水轮机的流量为 0.398 m³/s,效率为 83.34%,出力为 6.838 kW,对应原型水轮机的流量为 9.96 m³/s,效率为 85.14%,出力为 174.7 kW,水轮机具有良好的能量特性;当叶片安放角为 23°,导叶开度为 65°时,水轮机具有良好的空化性能。

关键词:竖井贯流式水轮机;能量特性;空化特性;模型试验

中图分类号:TV131.63 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2012)06-0087-04

Model test of tubular turbine under extremely low head//YANG Chunxia¹, ZHENG Yuan², LI Lingyu², LIU Mengxuan²(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To study the energy characteristics and cavitation characteristics of a tubular turbine with a vertical shaft, model tests for a tubular turbine under an extremely low head of 2.10 m were carried out. Based on a multi-function hydro-mechanical experimental bench in Hohai University, the water head, discharge, and torque of the GD-WS-35 tubular turbine were respectively tested with a pressure difference sensor, electromagnetic flow meter, and torque meter, under different guide vane openings and different blade setting angles. The comprehensive characteristic curves of the model tubular turbine were drawn. The energy characteristic test shows that when the blade's setting angle is 23°, the guide vane opening is 65°, and the rated water head is 2.10 m, the tubular turbine under extremely low head has good energy characteristics; the model turbine's efficiency reaches 83.34%, discharge is 0.398 m³/s, and the output power is 6.838 kW. Conversion to the antitype turbine, the efficiency is 85.14%, discharge is 9.96 m³/s, and the output power is 174.7 kW. The cavitation test shows that the turbine's cavitation performance is good when the blade setting angle is 23° and the guide vane opening is 65°.

Key words: vertical tubular turbine; energy characteristics; cavitation characteristics; model test

为减少高坝大库的淹没损失与移民搬迁费用,近年来国内外对低水头水电站的开发建设日益关注。我国低水头水力资源十分丰富,尤其是江河中下游的经济发达地区更是如此。贯流式水轮发电机组因其转轮效率高、过流量大、建设周期短、总体投资省等优点,成为开发利用低水头、大流量水力资源和潮汐能源的良好机型^[1-2]。我国近 20 多年来对贯流式水轮发电机组的开发表明,灯泡贯流式水轮机适用于水头在 5~25 m 之间的电站,对于超低水头(小头小于或等于 3 m)的电站,采用竖井贯流式水轮机代替灯泡贯流式水轮机将是未来的发展趋势^[3]。因竖井顶部是敞开的,竖井贯流式水轮发电机组的发电机、齿轮增速器等大部件可以直接从竖井坑吊进吊出,便于安装和维护^[4]。然而目前我国对竖井贯流式发电机组的流道设计、机组总体的结构形式、增速用齿轮箱及双调节结构的受油器布置等关键技术问题缺乏深入的研究,致使这种结构简单、水力性能优良、造价低廉的竖井贯流式机组未能得到推广使用^[5-6]。

本文基于河海大学水力机械多功能试验台对一种额定水头为 2.10 m 的超低水头竖井贯流式水轮机进行能量特性试验和空化特性试验,得到了不同工况下模型水轮机的流量、水头和扭矩等数据,并据此计算出水轮机的效率和出力。将试验结果与数值

模拟结果进行比较,以验证数值计算的可靠性。

1 水轮机参数及试验仪器

1.1 机组参数

原型水轮机直径为 1.75m,叶片数为 3,导叶数为 15。原型水轮机的主要工作参数为:额定水头 2.10 m,最大水头 3.30 m,最小水头 0.80 m,平均水头 2.10 m,额定流量 10 m³/s。

将原型水轮机按比例缩小至直径为 0.35 m 的 GD-WS-35 型水轮机模型,其主要工作参数为:额定水头 2.10 m,最大水头 2.80 m,最小水头 0.30 m,额定流量 0.40 m³/s,额定转速 684.7 r/min。

1.2 试验仪器

试验依托河海大学水力机械多功能试验台完成。各测量仪器选择如下:①水头选用重庆横河川仪有限公司生产的 EJA110A 压差传感器测量,精度为±0.1%。②流量选用上海光华爱尔美特仪器有限公司生产的 RFM4110-500 电磁流量计测量,精度为±0.2%。③扭矩与转速选用湖南长沙湘仪动力测试仪器有限公司生产的 JCZ-200 扭矩仪测量,精度为±0.1%。④真空度采用重庆横河川仪有限公司生产的 EJA430A 压力变送器测量,精度为±0.075%。⑤大气压采用 0.5 级空盒气压计测定。⑥水温采用水银温度计测定。

2 模型试验方法和内容

2.1 能量特性试验

水轮机能量特性模型试验内容包括:①保持 GD-WS-35 型水轮机在转速为 684.7 r/min 时,测试不同叶片安放角(φ=10°,15°,20°,23°,30°,35°)下水轮机的流量及出力变化;②在每个固定的水轮机叶片安放角下,测试不同导叶开度(α=35°,45°,55°,65°,75°,85°)时水轮机的流量及出力变化;③在保持叶片安放角和导叶开度不变的情况下,在 0.7~3.1 m 水头范围内测量水轮机的流量及出力变化;④计算每种试验工况下水轮机单位转速 n_{11} 、单位流量 Q_{11} 和效率 η;⑤绘制水轮机模型综合特性曲线。

对每个叶片安放角,采用等水头变转速的方法进行模型试验,按原、模型斯特劳哈尔值相等的原则进行试验研究。

水轮机单位转速、单位流量和效率分别为

$$n_{11} = \frac{n_p D_{1p}}{\sqrt{H_p}} = \frac{n_m D_{1m}}{\sqrt{H_m}} \quad (1)$$

$$Q_{11} = \frac{Q_p}{D_{1p}^2 \sqrt{H_p}} = \frac{Q_m}{D_{1m}^2 \sqrt{H_m}} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_m + P_0}{\rho g Q_m H_m} \times 100\% \quad (3)$$

式中: n_p, n_m 分别为原、模型水轮机的转速, r/min; D_{1p}, D_{1m} 分别为原、模型水轮机的直径, m; Q_p, Q_m 分别为原、模型水轮机的流量, m³/s; H_p, H_m 分别为原、模型水轮机的水头, m; P_m 为模型水轮机输出轴功率, W; P_0 为空载功率, W; ρ 为密度, kg/m³; g 为重力加速度, m/s²。

真机水轮机的效率根据模型试验对应的效率换算确定,采用 IEC60995 1991《考虑比尺效应的水力机械模型验收试验确定其原型性能》中规定的两步法进行效率换算。

2.2 空化特性试验

在不同的叶片安放角和不同的导叶开度下进行空化特性试验,试验保持水头稳定(水头分别为 1.0 m, 1.6 m, 2.1 m, 2.7 m),通过系统回路内抽真空的方法逐步减少有效空化余量,将效率下降 1% 的空化系数定为临界空化系数^[7]。

一般采用能量法进行模型水轮机空化特性试验,首先确定某一工况,在能量特性稳定的情况下用真空泵不断改变尾水箱的真空度,即改变水轮机的吸出高度,测出不同吸出高度时模型水轮机的能量参数,并按式(4)计算模型水轮机的临界空化系数 σ:

$$\sigma = \frac{\frac{P_a}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} - H_s}{H} \quad (4)$$

其中

$$H_s = H'_s + H'_v$$

式中: P_a 为大气压强, Pa; P_v 为试验水温下的饱和蒸汽压强, Pa; H_s 为吸出高度, m; H'_s 为几何吸出高度,为真空压力计算点至水轮机叶轮顶部的高差, m; H'_v 为真空表的真空度, m。

在实际应用中,常用式(5)计算水轮机的吸出高度:

$$H_s \leq 10.0 \text{ m} - \frac{\nabla}{900} - K_\sigma \sigma_m H \quad (5)$$

式中:∇为水轮机安装位置的海拔高度, m; K_σ 为水轮机的空化安全系数,对于转桨式水轮机,取 $K_\sigma = 1.1$; σ_m 为模型的空化系数; H 为水轮机水头, m。

3 试验结果分析

3.1 能量特性试验结果与分析

表 1 给出了叶片安放角为 23°,水轮机水头为 2.10 m 条件下,不同导叶开度时水轮机模型试验数据和对应的水轮机原型数据。由表 1 可见:叶片安放角为 23°,额定水头为 2.10 m 条件下,导叶开度为 55°时原、模型水轮机的效率最高,此时模型水轮机

表 1 $\varphi=23^\circ, H=2.10\text{ m}$ 时水轮机模型试验数据和对应的水轮机原型数据

$\alpha/(\circ)$	H/m	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$		P/kW		$Q_{11}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$n_{11}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$\eta_{\text{max}}/\%$	
		模型	原型	模型	原型			模型	原型
45	2.10	0.300	7.51	4.353	111.6	1.691	165.27	70.39	72.19
55	2.11	0.358	8.94	6.268	160.0	2.010	164.83	84.65	86.45
65	2.10	0.398	9.96	6.838	174.7	2.244	165.30	83.34	85.14
75	2.09	0.435	10.88	7.012	179.3	2.457	166.15	78.58	80.38
85	2.10	0.473	11.83	6.911	177.2	2.666	165.66	70.88	72.68

注:表中 H 值在 2.10 m 上下波动,试验时由于水压波动等因素不能将 H 值精确控制为 2.10 m 。

流量为 $0.358\text{ m}^3/\text{s}$,对应原型流量为 $8.94\text{ m}^3/\text{s}$,比额定流量 $10\text{ m}^3/\text{s}$ 小很多;而当导叶开度为 65° 时,原、模型效率虽然比导叶开度为 55° 时的效率略有下降,但其模型流量为 $0.398\text{ m}^3/\text{s}$,对应原型流量为 $9.96\text{ m}^3/\text{s}$,非常接近额定流量 $10\text{ m}^3/\text{s}$,同时出力也比导叶开度为 55° 时的出力增大,故 65° 为导叶较优开度。

图 1 为叶片安放角为 23° 时,根据物理模型试验结果绘制的水轮机模型和原型综合特性曲线。由图 1 可见,竖井贯流式水轮机的高效率区集中于导叶开度 $55^\circ \sim 65^\circ$ 的区域,可为其他竖井贯流式水轮机的开发利用提供参考。

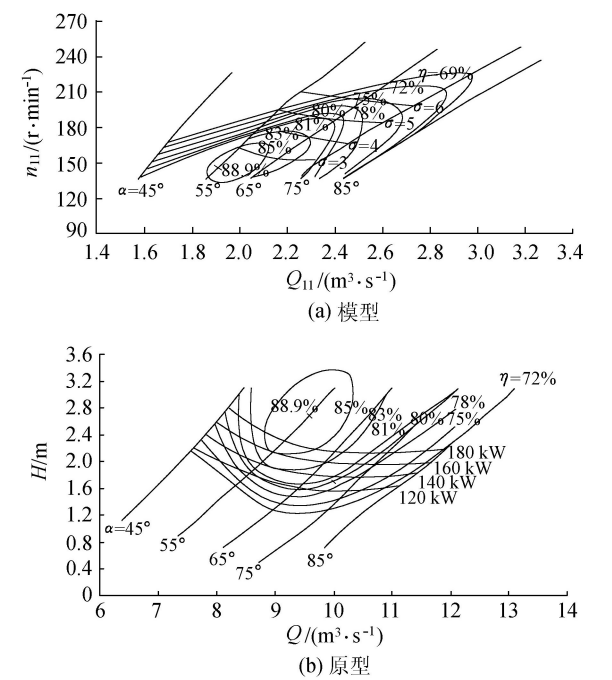


图 1 $\varphi=23^\circ$ 时水轮机模型和原型综合特性曲线

采用 CFD 技术对竖井贯流式水轮机全流道三维定常不可压湍流流场进行数值模拟。计算区域为进水流道、导叶段、转轮室和出水流道。网格采用适

应性强的四面体非结构化网格。采用压力进口和压力出口边界条件。速度项、湍动能项和湍动能黏度系数项采用二阶迎风格式进行离散。速度和压力方程用 SIMPLEC 算法耦合^[8]。在固壁区采用无滑移边界条件,在近壁区采用标准壁面函数^[9-10]。表 2 为叶片安放角为 23° ,水头为 2.10 m 时水轮机原型的数值模拟计算结果。

表 2 $\varphi=23^\circ, H=2.10\text{ m}$ 时水轮机原型数值模拟计算结果

$\alpha/(\circ)$	H/m	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	P/kW	$Q_{11}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$n_{11}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$\eta/\%$
45	2.10	7.49	108.9	1.687	165.45	70.60
55	2.10	9.04	157.9	2.036	165.45	84.83
65	2.10	9.75	176.3	2.197	165.45	87.79
75	2.10	10.56	180.5	2.380	165.45	82.96
85	2.10	11.65	181.1	2.627	165.45	75.40

将表 1 中水轮机模型试验结果转化成水轮机原型的数据,与表 2 中水轮机原型的数值模拟计算结果对比可发现,在导叶开度为 $65^\circ, 75^\circ, 85^\circ$ 时,数值模拟计算的效率和出力偏高;在导叶开度为 $45^\circ, 55^\circ$ 时,数值模拟计算的效率和出力偏低。数值模拟计算结果与物理模型试验结果基本一致,效率误差范围为 $\pm 3\%$ 。这主要是因为数值计算中,由于网格的质量、计算模型的选择和参数设置等问题,会产生一定的误差。另外,在水轮机模型制作过程中,由于导叶内缘尺寸过小不易加工,对其内缘进行了适当的加厚处理。故物理模型结果与数值模拟结果略有差异,但基本一致,保证了超低水头竖井贯流式水轮机性能预测的可靠性。

3.2 空化特性试验结果与分析

超低水头竖井贯流式水轮机在大角度和大流量区域较易产生空化空蚀,在叶片安放角为 23° ,导叶开度分别为 $55^\circ, 65^\circ, 75^\circ$ 时进行模型水轮机空化特性试验,试验结果见表 3。根据空化试验数据,可以

表 3 $\varphi=23^\circ$ 时水轮机空化特性试验结果

H/m	$Q_{11}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$			σ			H_s/m		
	$\alpha=55^\circ$	$\alpha=65^\circ$	$\alpha=75^\circ$	$\alpha=55^\circ$	$\alpha=65^\circ$	$\alpha=75^\circ$	$\alpha=55^\circ$	$\alpha=65^\circ$	$\alpha=75^\circ$
2.70	1.909	2.106	2.304	2.40	2.66	2.87	2.88	2.10	1.48
2.10	2.008	2.245	2.459	3.25	3.53	3.85	2.50	1.85	1.11
1.60	2.145	2.424	2.652	4.95	5.12	5.25	1.28	1.00	0.76
1.00	2.455	2.794	3.129	8.11	8.45	8.84	1.08	0.71	0.28

求得各种工况下的临界空化系数和吸出高度。

首先必须保证尾水管出口满足淹没深度的要求,在这一前提条件下,再用空化性能来校核竖井贯流式水轮机的安装高程。由表 3 可见,当叶片安放角为 23°,导叶开度为 65°时,在水头为 2.10 m 情况下,临界空化系数为 3.53,吸出高度为 1.85 m。根据相关资料查得该水轮机的安装高程为 3 m,最小尾水位高程为 5 m,吸出高度为-2 m,小于 1.85 m,所以水轮机空化性能良好,能够满足电站的可靠运行要求。

4 结 论

a. 当叶片安放角为 23°,导叶开度为 65°时,在额定水头 2.10 m 条件下,模型流量为 0.398 m³/s,对应原型流量为 9.96 m³/s,模型装置的效率为 83.34%,换算到原型装置的效率为 85.14%,出力为 174.7kW。可知水轮机出力、效率、流量等均达到了设计要求。

b. 当叶片安放角为 23°,导叶开度为 65°时,在额定水头 2.10 m 条件下,临界空化系数为 3.53,吸出高度为 1.85 m。可知水轮机空化性能良好,能够保证电站的可靠运行。

c. 数值模拟计算结果与物理模型试验结果基本一致,效率误差范围为±3%,从而验证了数值模拟计算的可靠性。

(上接第 63 页)

c. 聚酯板表面光滑耐磨,临界表面张力小于混凝土浆液表面张力,低胶凝含量混凝土采用钢模内衬聚酯板拆模后表面光洁平整,虽存在少许细小气泡和色差,但掺加胶凝材料质量 2% 的光亮剂后,混凝土色泽均匀、光亮致密,能形成镜面效果。该工艺施工方便,内衬聚酯板钢模多次重复使用效果好,对提高水工混凝土施工质量具有现实意义。

参考文献:

[1] 李强,李辛民,孟闻远,等.我国清水混凝土技术发展的现状、存在问题以及对策[J].建筑技术,2007,39(1):6-8.
[2] 李彦坤,陈圣君.浅谈清水混凝土的应用技术与发展[J].林业科技情报,2003,35(3):19-21.
[3] 李先波.拉西瓦水电站地下厂房清水混凝土施工技术措施[J].水力发电,2010,36(2):50-54.

参考文献:

[1] 张军智,段宏江,田树棠.超低水头水轮发电机组优化选择[J].西北水电,2006(4):77-79.
[2] 钱昌燕,孙媛媛.贯流式机组的类型及东电大型竖井贯流式机组的开发[J].东方机电,2005(1):1-12.
[3] 游赞培,杨类琪.灯泡贯流式水电站[M].北京:中国水利水电出版社,2009:2-3.
[4] 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.
[5] 曾明富,孙媛媛,程海.小龙门大型竖井贯流式水轮机结构设计[C]//第十六次中国水电设备学术讨论会议文集.哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,2007:363-369.
[6] 林其文.竖井贯流式水轮机组的设计[J].中国制造业信息化,2011,40(17):81-83.
[7] 郑源,鞠小明,程云山.水轮机[M].北京:中国水利水电出版社,2007:64-68.
[8] 冯卫民,宋立,左磊,等.轴流泵装置三维非定常湍流流场的数值模拟[J].排灌机械工程学报,2010,28(6):531-536.
[9] SAEED R A,GALYBIN A N,POPOV V. Modeling of flow induced stresses in a Francis turbine runner [J]. Advances in Engineering Software,2010,41:1245-1255.
[10] XIAO Ruofu,WANG Zhengwei,LUO Yongyao. Dynamic stresses in a Francis turbine runner based on fluid-structure interaction analysis [J]. Tsinghua Science and Technology,2008,25(2):587-592.

(收稿日期:2012-07-04 编辑:骆超)

[4] 夏仲存,刘红震,肖云伟.糯扎渡水电站地下副厂房镜面混凝土施工[J].水利水电施工,2011(5):11-12.
[5] 梅佳鸿,丛炳刚,穆红巨,等.透水模板布在青岛海湾大桥的应用[J].公路交通科技,2010,27(9):147-150.
[6] 卢建勋.透水模板布在陈家贡湾特大桥中的应用[J].西部交通科技,2011,45(4):33-37.
[7] 田正宏,郑小伟,宋健大,等.透水模板改善混凝土性能试验[J].建筑材料学报,2008,11(2):172-178.
[8] 杨魁.论清水混凝土表面气泡的特征与防治[J].四川建筑科学研究,2009,35(2):213-215.
[9] 涂成厚,林宗寿,米春艳.水泥基体中消泡剂的作用浅析[J].国外建材科技,2000,21(4):48-52.
[10] 冯枫,曾繁森,陈志泉,等.磺化三聚氰胺甲醛树脂与金属钙离子的复合物对水泥的作用[J].离子交换与吸附,2000,16(2):147-154.
[11] 吴兆强,宁平,李卫宁.磺化三聚氰胺甲醛树脂对水泥水化机理的影响[J].混凝土,2004(9):3-5.

(收稿日期:2012-02-29 编辑:熊水斌)