

混流式模型水轮机导叶水力矩试验

邵国辉^{1,2}, 赵越²

(1. 哈尔滨大电机研究所, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 水力发电设备国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 为了确定导叶在各个开度所受的水力矩从而正确选择导水机构接力器, 采用特殊的测力活动导叶轴、粘贴应变片的技术工艺、静荷载的标定方法, 针对某一混流式模型水轮机进行了同步导叶水力矩和非同步导叶水力矩的模型试验。试验结果表明, 该混流式模型水轮机导叶在同步及非同步条件下均具备自关闭的特性。试验结果已经用于真机导水机构设计, 保证了原型水轮机设计的安全性与合理性。

关键词: 混流式水轮机; 导叶水力矩; 测力活动导叶; 应变片; 测试技术; 模型试验

中图分类号: TK730.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)02-0022-04

Model tests of guide vane hydraulic torques of Francis turbine//SHAO Guohui^{1,2}, ZHAO Yue²(1. Harbin Institute of Large Electrical Machinery, Harbin 150040, China; 2. State Key Laboratory of Hydro-Power Equipment, Harbin 150040, China)

Abstract: For correct selection of the guide vane servomotor based on determining the hydraulic torque of guide vanes at different openings, synchronous and asynchronous guide vane torque model tests of a Francis turbine were performed, using a special guide vane bearing, the technology of bonded strain gauges, and the static load calibration method. Test results show that guide vanes of the Francis turbine model have a self-closing function under synchronous and asynchronous conditions. The results have already been used in the prototype design of water distributors of Francis turbines, ensuring security and rationality in prototype design.

Key words: Francis turbine; hydraulic torque of guide vane; guide vane for torque measurement; strain gauge; test technology; model test

导叶作为形成和改变水轮机进入转轮水流的环境、调节流量、改变水轮发电机组出力、正常和事故停机时封住水流从而保证水轮机具有良好水力特性和安全性的重要部件,其所受水力矩的大小直接影响到水轮机导水机构接力器容量和水轮机导水机构各传动部件结构尺寸的合理选取^[1]。由于目前无法用理论计算方法准确获得导叶所受水力矩的大小,利用与原型水轮机几何相似的模型水轮机的试验结果按照相似定律换算出原型水轮机导叶所受水力矩的方法成为确定水轮机导叶水力矩的主流方法。

因为受到安装和结构设计等方面的影响,测力活动导叶的制作工艺、加工流程繁复,水轮机模型导叶水力矩不容易进行测量^[2]。为了获得详尽准确的导叶水力矩测试资料,哈尔滨大电机研究所的测试人员经过大量细致、扎实的试验工作,成功地总结出比较完善的导叶水力矩测试方法,可以提高模型水轮机导叶水力矩测量精度^[3]。某一混流式模型

水轮机活动导叶翼型为标准对称型,根据技术合同要求,需要进行导叶水力矩试验,以便进行水轮机原型设计,本文针对该混流式模型水轮机进行了导叶水力矩试验,并对试验结果进行了分析。测试的试验结果已用于水轮机的原型设计。

1 试验原理及内容

1.1 试验原理

导叶水力矩利用在导叶轴上粘贴电阻应变片进行测量^[4]。电阻应变片是将金属丝的形变转换成电阻变化的原件。当金属丝受拉伸或压缩而变形时,其金属丝的电阻会发生相应的变化,这种变化就是金属的应变效应。电阻应变片的工作正是基于这种物理效应,当受外力拉伸时,长度增加,截面积减小,电阻值增加;当受压力缩短时,长度减小,截面积增大,电阻值减小。因此,只要能测出电阻值的变化,便可知金属丝的应变情况。电阻应变片粘贴在

作者简介:邵国辉(1980—),男,吉林白山人,工程师,硕士,主要从事水力机械设计与试验研究。E-mail: myyouth@163.com

导叶轴的表面,当导叶轴受作用力产生应变时,粘贴在其上的应变片也随之发生相同的机械变形,引起应变片电阻发生相应的变化,将电阻的变化转变为电信号的变化从而实现扭矩测量。因此只要测得粘贴电阻应变片的电阻变化就能够得出导叶轴所承受的扭矩。

1.2 试验内容

作用在导叶上的水压力和水力矩与导叶的翼型及位置有关^[5]。为了正确地选择导水机构接力器、计算导叶强度及设计导叶的传动机构必须知道导叶在各个位置(开度)的力特性^[6],导叶水力矩的试验结果可为这些工作提供依据。导叶水力矩测试通常包括所有导叶都同步条件下各个被测导叶的导叶水力矩试验、1个导叶与其他导叶不同步时各个被测导叶的导叶水力矩试验。

该混流式模型水轮机活动导叶数为24个,6个测力活动导叶为3号、9号、14号、15号、16号、22号。导叶非同步状态下,测力活动导叶为14号、15号、16号。

导叶水力矩同步试验是指测试导叶开度从小到大的各个单位转速(通常对应原型的运行水头,如最大水头、最小水头、额定水头等)时的导叶水力矩试验。

进行导叶水力矩同步试验时,混流式模型水轮机导叶水力矩试验水头定为20 m,活动导叶测试开度 A_0 为9 mm、10.5 mm、12 mm、13.5 mm、15 mm、16.5 mm、18 mm、19.5 mm。对每一个开度进行了真机最大运行水头换算对应的模型转轮单位转速的导叶水力矩试验。

导叶水力矩非同步试验是指非同步导叶处于不同的位置,其余同步导叶从小到大进行各个单位转速时的导叶水力矩试验,目的是模拟真机运行时可能出现的个别导叶被卡住的运行工况。要确定与相邻导叶不同步的导叶水力矩情况,必须对3个相邻的导叶进行测量,3个导叶中间的导叶为不同步导叶。

导叶非同步状态下,混流式模型水轮机测力活动导叶为14号、15号、16号,其中15号为非同步导叶。导叶水力矩非同步试验水头定为20 m,同步导叶开度 A_0 为9 mm、12 mm、15 mm和18 mm,非同步导叶开度 a_0 分别在每一同步导叶开度下逐次在15 mm、18 mm变换,对每一开度进行了真机最大运行水头换算对应的模型转轮单位转速的导叶水力矩测试。

2 试验方法

模型导叶水力矩采用在特殊导叶轴上按照一定

的规则粘贴应变片并构成测量桥路,通过测量导叶轴上的应变变化来计算出相应扭矩的方法进行测量^[7-9]。

2.1 导叶轴的特殊设计

测力活动导叶的轴不同于一般的活动导叶轴,为了真实准确地测量其所受导叶水力矩,要进行特殊设计^[10-12]。首先是导叶轴和轴孔之间的摩擦力矩要小,其次是粘贴传感器应变片的轴颈处尺寸要比较小,以增加测量的灵敏度。

2.2 应变片粘贴

应变片的粘贴工艺对测试结果起着决定性的作用。通常对于应变片的处理采用如下方案:用细砂纸打磨导叶轴上粘贴应变片的部位,然后用丙酮清洗该表面晾干,之后沿贴片方向打出45°交叉纹的应变片定位线,最后用应变片专用胶水将两片应变片粘贴到导叶轴的对称位置上。为保证应变片中心线与导叶轴的定位线完全重合,粘贴应变片时切记不能垂直用力。粘贴好应变片后,用万用表检查应变片在粘贴过程中是否损坏,如无损坏将应变片的引线焊接到应变片上,如图1所示。为防止应变片被水冲坏和保证其绝缘性能,需要用防水涂料将应变片和信号线全部密封好。粘贴后的应变片在室温中自然干燥15~24 h进行固化;为节省时间,也可在自然干燥数小时后用红外线灯进行烘烤,但不能一开始就烘烤,否则应变片的电阻系数将随温度的骤然变化而改变,会导致试验结果的误差增大。



图1 焊接应变片引线的测力活动导叶

2.3 测力活动导叶的标定

在进行导叶水力矩试验前,需要采用静荷载法对粘贴好应变片的测力活动导叶进行标定,即将已知的力臂和质量作用在测量导叶的开启和关闭方向上。数据采集卡采用NI的8通道应变变量采集卡NI Compact DAQ-9188,在计算机上运用LabVIEW SignalExpress软件对各个参数进行设置,然后进行标定数据的采集和处理工作,利用率定曲线可计算出导叶的水力矩。

标定时首先将测力活动导叶固定在某一位置上,在测力活动导叶的轴上加一个标定杆,当一侧加

砝码时,另一侧悬空,所加砝码从 0.25 kg 依次递增到 1.5 kg,再依次递减到零(不加砝码)为止;然后反向标定。

水力矩方向的定义:水力矩为正值时,表示导叶所受水力矩为关闭方向,反之则为开启方向。最终得出水力矩和应变的关系式为

$$T_G = mgL = k\varepsilon + b \tag{1}$$

式中: T_G 为水力矩, $N \cdot m$; m 为所加砝码的质量, kg; L 为标定杆的臂长, m; g 为重力加速度, m/s^2 ; k 为斜率, $N \cdot m$; ε 为应变; b 为截距, $N \cdot m$ 。

标定的结果为输出信号与标定水力矩之间的一条平均标定曲线。图 2 为 3 号导叶水力矩标定结果。从标定结果来看,测力活动导叶线性良好,状态稳定。

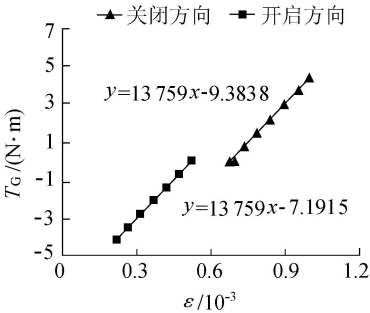


图 2 3 号测力活动导叶水力矩标定结果

2.4 测点布置

该混流式模型水轮机固定导叶数与活动导叶数相同,均为 24 个,6 个测力活动导叶分别布置在 4 个象限(其他的不是测力活动导叶),依入流的先后次序分别为:3 号、9 号、14 号、15 号、16 号、22 号。测力活动导叶为标准对称型导叶。导叶非同步状态下,测力活动导叶为 14 号、15 号、16 号,其中 15 号为非同步导叶。测力活动导叶的布置如图 3 所示。

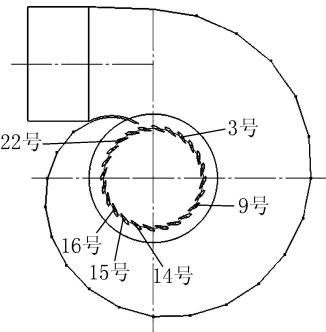


图 3 测力活动导叶布置

2.5 测力活动导叶的安装

测力活动导叶标定结束后,将这些特殊导叶替换导水机构中原来的普通导叶,最后将装配好的导水机构安装到模型机组上。

图 4 为混流式水轮机模型导叶水力矩的导水机构装配图,其中左侧 3 个相邻的导叶用于测量非同

步导叶的水力矩。

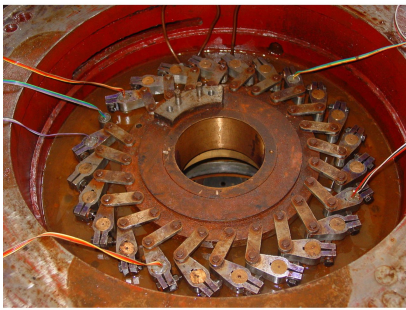


图 4 导水机构装配

3 试验结果及分析

导叶水力矩的试验结果用导叶水力矩因数来表示。根据 IEC 60193《Hydraulic turbine, storage pumps and pump-turbines-model acceptance tests》^[13] 国际规程要求,导叶水力矩 T_G 的平均值可用来计算无量纲的导叶水力矩因数 $T_{G,ED}$,计算公式为

$$T_{G,ED} = \frac{T_G}{\rho D^3 E} \tag{2}$$

式中: ρ 为水的密度, kg/m^3 ; D 为模型转轮直径, m; E 为水力比能, J/kg 。

根据式(2) 计算得到导叶水力矩试验结果。图 5 为混流式模型水轮机各导叶保持同步时的导叶水力矩试验结果,图 6 为混流式模型水轮机在非同步导叶开度 $a_0 = 15\text{ mm}$ 、 18 mm 时对应的非同步导叶水力矩试验结果。从图 5 可以看出,各个同步导叶水力矩因数的变化趋势是一致的。在导叶同步条件下,导叶水力矩因数都是正值,即趋向关闭方向。从图 6 可以看出,当 15 号导叶失控时,14 号和 16 号导叶在小开度时与 15 号导叶的水力矩因数差异较大,随着开度的增加,14 号导叶的水力矩因数逐渐增加,16 号导叶的水力矩因数逐渐减小,当 14 号、16 号导叶达到与 15 号导叶相同开度时,三者的导叶水力矩因数值非常接近,近似交汇成一点。但是三者的导叶水力矩因数也都为正值,即关闭方向。

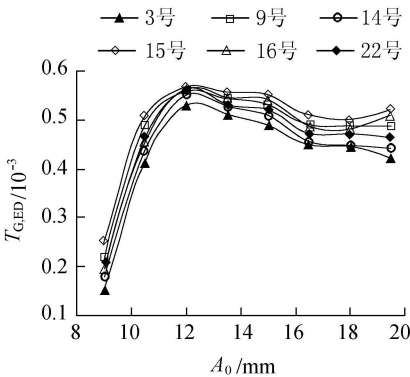


图 5 同步导叶水力矩试验结果

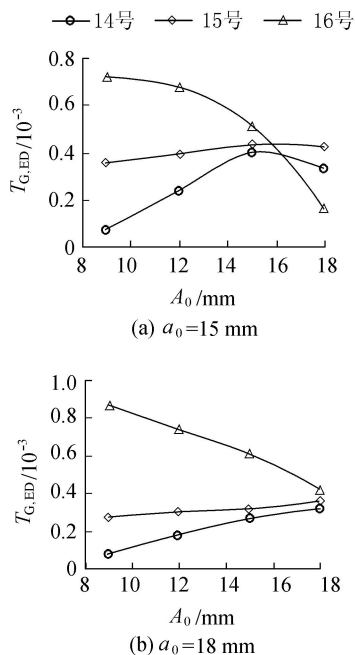


图6 非同步导叶水力矩试验结果

上述试验结果表明,该混流式模型水轮机导叶在同步及非同步条件下均具备自关闭的特性。

通常模型导叶水力矩结果的不确定度受到下列因素影响:所使用的导叶测量仪表标定曲线的滞后性;零力矩点的重复性和漂移;摩擦力的影响。若测量条件良好,则可按最大平均值的 $\pm 5\%$ 确定模型水力矩平均值的不确定度,相应的原型值为原型最大平均值的 $\pm 10\%$ ^[13]。

根据所得的模型导叶水力矩试验结果,可得出导叶水力矩因数的最大平均值。同时基于水力相似条件,通过式(3)进行原型导叶水力矩的计算。

$$T_{G,p} = T_{G,ED} D_p^3 E_p \rho_p \quad (3)$$

式中: $T_{G,p}$ 为原型导叶水力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; D_p 为原型转轮直径, m ; E_p 为原型水力比能, J/kg ; ρ_p 为电站水密度, kg/m^3 。

原型导叶水力矩换算得到的结果并不包括导叶轴承、密封和调整机构的摩擦力矩。通常来讲,由于导叶不断往复摆动,导叶轴承的摩擦力矩相当小,而连接导叶和接力器调整机构的摩擦力矩更为重要。原型摩擦力矩大小由计算或现场实测得出。

4 结 语

采用在活动导叶轴上粘贴电阻应变片的技术进行了混流式模型水轮机导叶水力矩试验,试验结果表明该混流式模型水轮机导叶在同步及非同步条件下均具备自关闭的特性。模型导叶水力矩的试验测试数据已经用于真机导水机构的设计,保证了水轮机真机设计的安全性与合理性。

参考文献:

- [1] 哈尔滨大电机研究所. 水轮机设计手册[M]. 哈尔滨: 哈尔滨大电机研究所, 1976.
- [2] 纪兴英, 刘胜柱. 混流式水轮机导叶水力矩的计算[J]. 大电机技术, 2008(3): 38-41. (JI Xingying, LIU Shengzhu. The calculation about guide vane torque of francis turbine[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2008(3): 38-41. (in Chinese))
- [3] 赵越, 童文波, 陈金霞, 等. 提高模型水轮机导叶水力矩测量精度的方法: 中国, ZI201010212819. 6[P]. 2012-05-30.
- [4] 郑源, 鞠小明, 程云山. 水轮机[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [5] 廖伟丽, 李建中. 水轮机导水机构力特性的数值实验研究[J]. 水力发电学报, 2002, 28(4): 100-107 (LIAO Weili, LI Jianzhong. Numerical modeling and flow analysis of the diversion components and entire tandem cascade of hydraulic turbine [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002, 28(4): 100-107. (in Chinese))
- [6] 纪兴英, 赖旭, 陈玲, 等. 贯流式水轮机导叶水力矩计算[J]. 水利学报, 2011, 42(7): 869-875. (JI Xingying, LAI Xu, CHEN Ling, et al. Numerical analysis of hydraulic torque of guide vanes in bubble turbines [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(7): 869-875. (in Chinese))
- [7] 李建威. 水力机械测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [8] 程良骏. 水轮机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [9] HUANG Yuanfang, LIU Guangning, FAN Shiyong. Research on prototype hydro-turbine operation [M]. Beijing: Foreign Languages Press, 2012.
- [10] 曹鹏, 姚志民. 水轮机原理及水力设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [11] 天津电气传动设计研究所. 水轮机设计与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1971.
- [12] 高建铭, 姚志民. 水轮机的水力计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1982.
- [13] IEC60193 Hydraulic turbine, storage pumps and pump-turbines-model acceptance tests[S].

(收稿日期: 2013-03-14 编辑: 熊水斌)

