

# 水轮机模型导叶水力矩测试技术研究

张海平 孟晓超 张建光 陈 莹 马兵全

(中国水利水电科学研究院, 北京, 100044, zhp1490@iwhr.com)

**摘 要:** 本文介绍了水轮机模型导叶水力矩的测试装置、测试方法、测试原理、测试内容和测试结果, 并针对水轮机模型导叶水力矩测试中的一些技术难点进行了探讨, 提出解决措施, 成功地对混流式、轴流式和灯泡贯流式水轮机模型的导叶水力矩进行了测试, 测试结果已经用于真机导水机构设计。

**关键词:** 水轮机、模型、导叶水力矩、应变片、测试技术

## 1、前言

随着现代科学技术的不断发展, 新的科研成果在水轮机导水机构中得到广泛应用, 比如每个导叶配备一套接力器装置的传动系统、滑动片式自恢复传动机构保护装置和机组启动时部分导叶先期开启的运行方式等。因此有必要对水轮机模型的导叶水力矩进行更加全面的测试, 包括正常运行工况、特殊运行工况和非正常运行工况等, 为原型水轮机的设计提供详尽的试验数据。

## 2、测试装置的研制

### 2.1 导叶轴设计

为了提高各种水轮机模型导叶水力矩测量的通用性, 我们专门设计了通用的不锈钢导叶轴, 不同机型的水轮机模型连接不同的导叶即可, 减少粘贴应变片的工作量, 提高应变片的利用率。导叶轴中间直径变小的部分用于粘贴应变片, 在轴中心留有引线孔。

由于模型机组的导叶水力矩较小, 摩擦力矩对测试结果的影响较大。因此在导叶轴与导叶连接后, 在导叶轴靠近导叶的部位和导叶下轴安装了滚珠轴承, 以减小导叶轴的摩擦力。



图 1 用于测量水轮机模型导叶水力矩的特制导叶轴

## 2.2 粘贴应变片

应变片粘贴工艺对测试结果起着决定性的作用，通过多次试验，反复比较，我们采用下述方案：先用 2000 目的细砂纸打磨导叶轴上贴应变片的部位，然后用丙酮清洗该表面并晾干，最后用应变片专用胶水将两片应变片贴到导叶轴的对称位置上，用手指压 3 分钟左右，待胶水完全干透了再松手。

粘贴好应变片后，需要用万用表检查在粘贴过程中是否对应变片造成损坏，都正常后将应变片的引线焊接到应变片上，如图 1 所示。经检查各焊接点都完好后，用防水涂料将应变片和信号线全部密封好，保证应变片不仅能够防水、防潮，还具有较快的响应速度和较小的蠕变。

## 2.3 仪器配置与接线方式

应变片我们选用 HBM 的 1-XY41-0.6/120 双栅应变片，数据采集卡采用 NI 的 8 通道应变采集卡 PXI-1520，该采集卡具有工作稳定、接线方式灵活等优点，还可以在计算机上通过软件对各个参数进行选择，以满足不同应变片的需要。为了提高导叶水力矩测量的精度，我们在连接 PXI-1520 采集卡时采用全桥的接线方式，这样既能增大输出的应变信号，提高抗干扰能力，还能抑制导叶轴上附加弯矩对测得的水力矩的影响。我们在标定时做过比较，保持输入扭矩 8Nm 不变，在导叶轴上施加 2Nm 的弯矩，结果输出信号基本没有变化。

## 2.4 整体装配

等以上准备工作都结束后，将导叶轴固定到专用的工作台上进行标定，只有线性良好和工作稳定的导叶轴才能安装到导叶上。用这些粘贴了应变片的导叶替换导水机构中原来的普通导叶，最后将整体装配好的导水机构安装到模型机组上。

图 2 为用于测量灯泡贯流式水轮机模型导叶水力矩的导水机构装配，共有 6 个导叶粘贴了应变片(在导叶轴端面有四种颜色的引线)，能够对上下左右 4 个典型位置的导叶水力矩进行测量，其中左侧 3 个相邻的导叶用于测量一个导叶与其它导叶异步条件下其正背面导叶的水力矩。

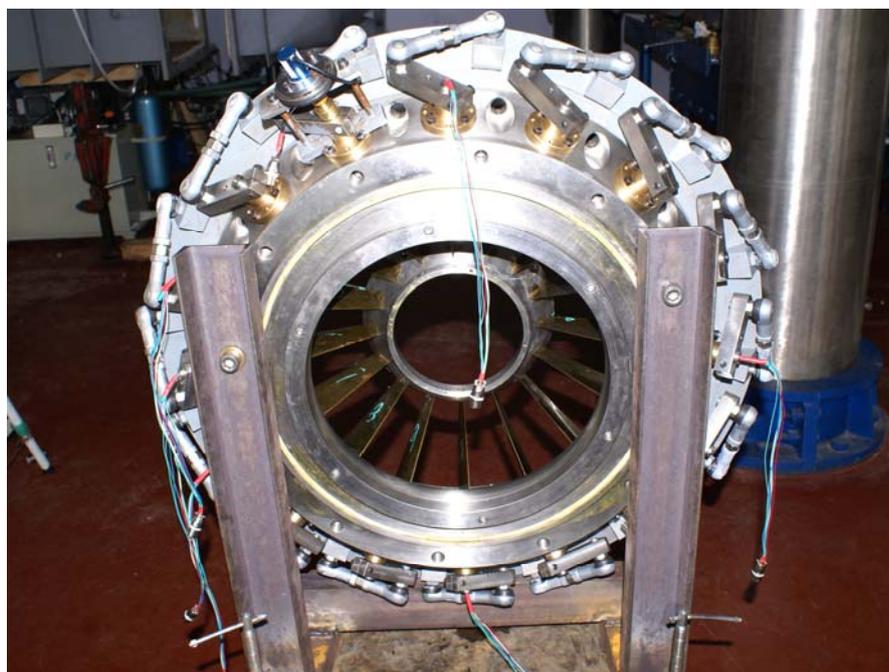


图 2 用于测量灯泡贯流式水轮机模型导叶水力矩的导水机构装配

### 3、测试原理与内容

#### 3.1 测试原理

导叶水力矩利用在导叶轴上粘贴电阻应变片进行测量。当金属丝受拉伸或压缩而变形时，该金属丝的电阻就会改变。于是，金属丝电阻的这个改变量就成了测量金属丝应变的一种尺度，而电阻应变片的变形是随着它所粘贴部件表面的应变准确的拉伸或压缩的，所以电阻应变片的电阻改变也就成为测量它所粘贴部件表面应变的尺度了。因此只要测得粘贴电阻应变片的电阻变化值就能够测出导叶轴所承受的扭矩。

#### 3.2 测试内容

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个导叶与其它导叶不同步时各个被测导叶的导叶水力矩试验。对于水轮机招标文件中有明确规定的一些特殊工况，同样需要进行试验，确保导叶水力矩试验的完整性。

同步条件下，对于不同的机型，测试内容稍有差别，轴流转桨式水轮机模型和灯泡贯流式水轮机模型还需要对各个桨叶角度(通常间隔为  $10^\circ$ )下导叶开度从小到大进行各个单位转速(或对应的原型运行水头)时的导叶水力矩试验，单位转速的选择应包括水轮机整个运行范围。

异步条件下，对异步导叶处于不同的位置，其余保持同步的导叶从小到大进行各个单位转速(或对应的原型运行水头)时的导叶水力矩试验，被测导叶中应包含异步导叶及其正背面导叶。

### 4、测试结果

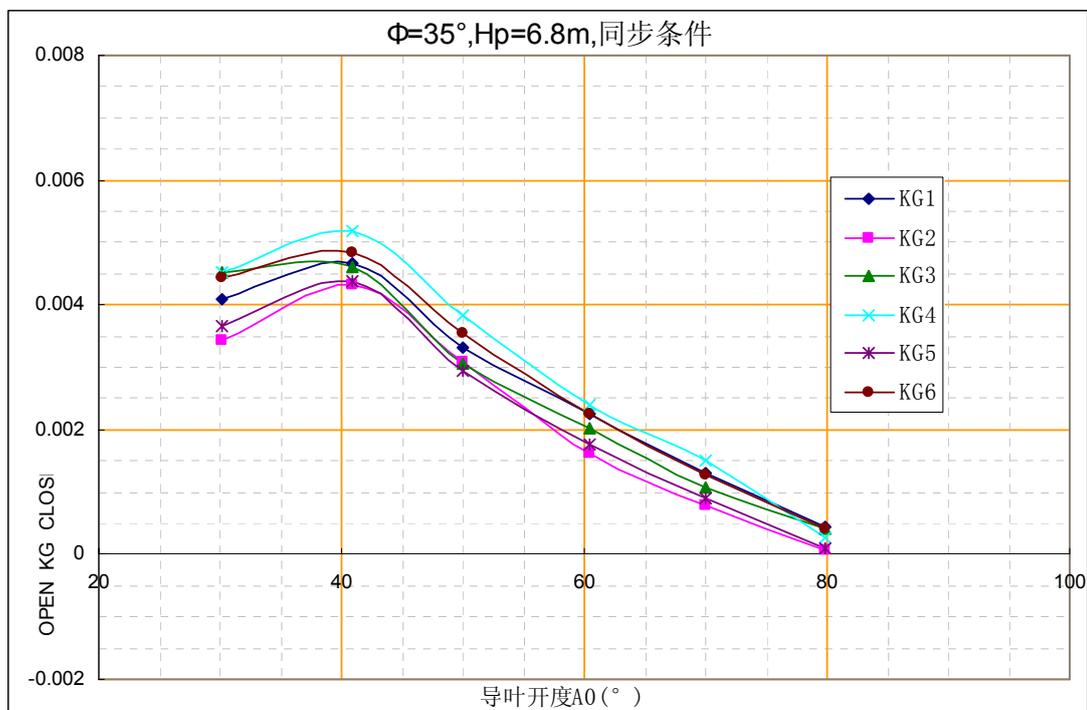


图3 灯泡贯流式水轮机模型同步条件下的导叶水力矩试验结果

导叶水力矩的试验结果用导叶水力矩系数  $KG$  表示，规定  $KG < 0$  时表示水力矩为导叶开启方向， $KG > 0$  时表示水力矩为导叶关闭方向。 $KG$  按下式计算：

$$KG = TGM / \rho_m / Q_{11}^2 / D_m^3 / H_m$$

式中： $TGM$  为测得的模型导叶水力矩， $Nm$ ；

$\rho_m$  为试验水的密度， $kg/m^3$ ；

$Q_{11}$  为单位流量， $m^3/s$ ；

$D_m$  为模型转轮直径， $m$ ；

$H_m$  为模型试验水头， $m$ 。

图 3 为灯泡贯流式水轮机桨叶角度  $\Phi=35^\circ$ ，各导叶保持同步时的导叶水力矩试验结果。图 4 为混流式水轮机模型异步条件下的导叶水力矩试验结果， $KG_4$  为异步导叶的水力矩系数， $KG_3$  为异步导叶正面侧的水力矩系数， $KG_5$  为异步导叶背面侧的水力矩系数。

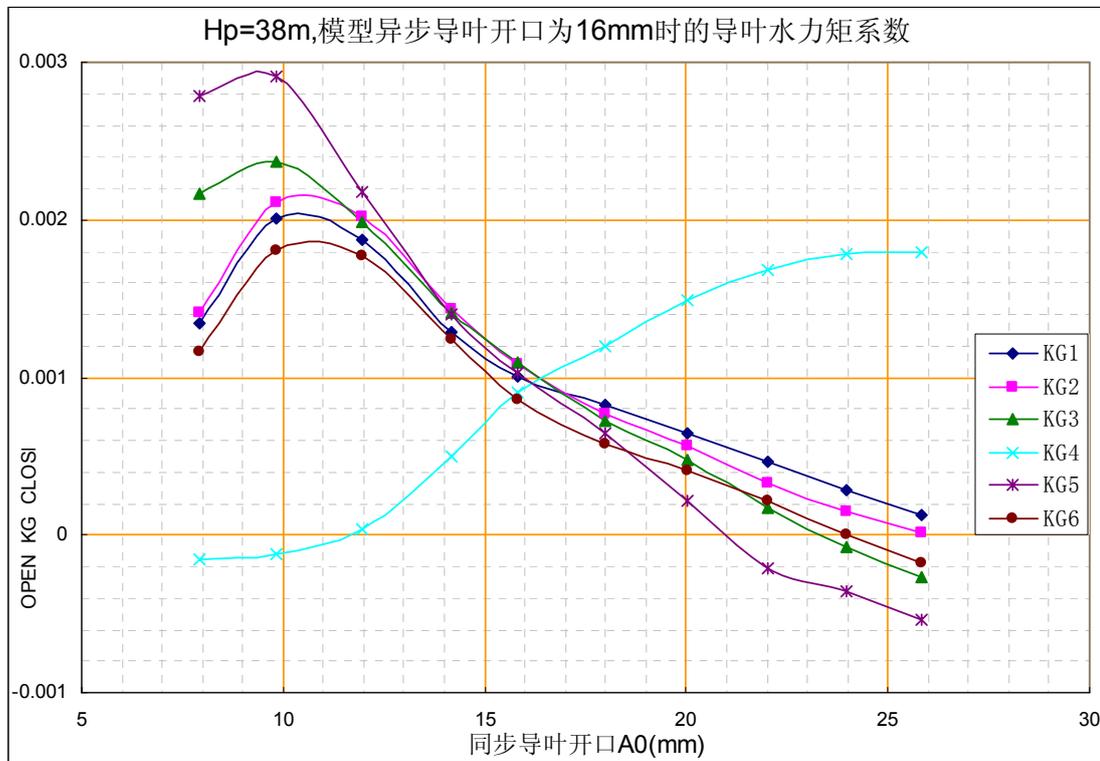


图 4 混流式水轮机模型异步条件下的导叶水力矩试验结果

## 5、结束语

由于受到安装空间和结构设计等方面的影响，水轮机模型的导叶水力矩不容易进行测量。水力机械实验室经过多年的探索和研究，最后总结出比较完善的导叶水力矩测试方法，成功地对混流式、轴流转桨式和灯泡贯流式水轮机模型的导叶水力矩进行测试，这些测试数据被制造厂家用于真机导水机构设计，保证了水轮机真机设计的安全性与合理性。