

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2018.10.009

水电站水轮机导叶漏水流量测算与应用

杨黎明, 杜雄春

(中国长江电力股份有限公司三峡水力发电厂 湖北 宜昌 443133)

摘要: 准确测算水电站各水轮机导叶在不同水头下的漏水流量是其应用的基础。结合某电站设备结构, 用通气孔法和充水管流量法测算导叶漏水流量, 并得到导叶漏水流量系数 β 。 β 为与水头等外部条件无关、直接反映导叶密封状况的系数。机组可基于 β 进行导叶漏水流量的比较, 进行电站导叶密封状态检修和节水增效。

关键词: 水电站; 水轮机; 导叶漏水流量系数; 状态检修; 节水增效

中图分类号: TV734.1 文献标志码: B 文章编号: 1671-3354(2018)10-0036-07

Measurement of the Leakage Flow through Guide Vanes in Hydro-turbine Units

YANG Liming, DU Xiongchun

(Three Gorges Hydropower Plant, China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443133, China)

Abstract: It is of great importance to accurately measure and calculate the water leakage flow through guide vanes in hydro-turbine units. Considering the actual equipment structure of a hydropower plant, the water leakage flow through the guide vanes is measured by using the venthole method and the water filling pipe flow method. It is found that the leakage flow coefficient of guide vanes can directly reflect the sealing condition of the guide vanes and is not affected by external conditions such as the water head. Based on the measurement, the sealing condition-based maintenance can be carried out for the guide vanes. Thus, the water resources can be saved and the benefit of the plant can be improved.

Key words: hydropower station; hydro-turbine; leakage flow coefficient of guide vanes; condition-based maintenance; water saving and benefit improvement

当水轮机转轮停止工作时关闭以切断进入转轮的水流是水轮机导叶的重要作用之一。理想状态下, 导叶关闭时完全切断水流。因为导叶密封制造安装缺陷、磨损、老化等问题, 导叶密封存在间隙, 导叶密封间隙总会有一定漏水流量。间隙越大, 漏水流量也越大, 严重时可能导致停机困难、蠕动、空蚀严重等。反之, 导叶漏水流量反映了导叶密封的状态, 是评定中高水头大型水轮机制造、安装和检修质量的重要指标之一^[1]。

当机组在停机状态, 导叶漏水流量不能发电, 此部分水量无法转化为电能和经济效益, 属于电站损耗。机组在运行状态时, 这部分流量就转为有效的发电流量。相比于河流径流量或机组正常发电流量, 导叶漏水流量非常小, 但是在年度时间尺度看来, 总量却不可忽略。

研究导叶漏水流量, 需要确定测量方法和比较标准。导叶漏水流量的测算和应用有两个困难。第一, 不易测量。机组运行及备用时, 水轮机过流道充满水, 无法对漏水流量进行直接测量。设备检修期间虽然流道无水, 但因为导叶密封间隙不均匀、不规则, 导致通过测量导叶密封间隙进而计算导叶漏水流量难以实现。第二, 不易比较。在不同时间, 水库上下游水位不同, 不同机组在不同时间所得的导叶漏水流量数值不可直接比较。评定导叶漏水量需进行真机试验, 由于我国标准、规程中尚无关于导叶漏水量测试及计算方法的要求, 长期以来缺乏比较通用的导叶漏水量评定方法^[2]。目前, 对水轮机导叶漏水量试验的研究主要是采用斜井法^[1]、通气孔法^[3]、节流孔板法^[4]。

某电站共有 32 台 70 万 kW 混流式水轮发电机组。电站水轮机净水头变化范围是 71 ~ 113 m, 是目

收稿日期: 2018-06-22

作者简介: 杨黎明, 男, 工程师, 从事水电站运行管理方面的工作。

前世界上运行水头变幅最大的巨型混流式水轮机之一。使用简单有效的方法分析计算电站水轮机导叶漏水流量并进行利用,是很有必要的。下面以该电站 24 号机组数据研究导叶漏水流量的计算及应用。

1 研究策略

图 1 是该水电站机组纵剖面图,水轮机流道由进

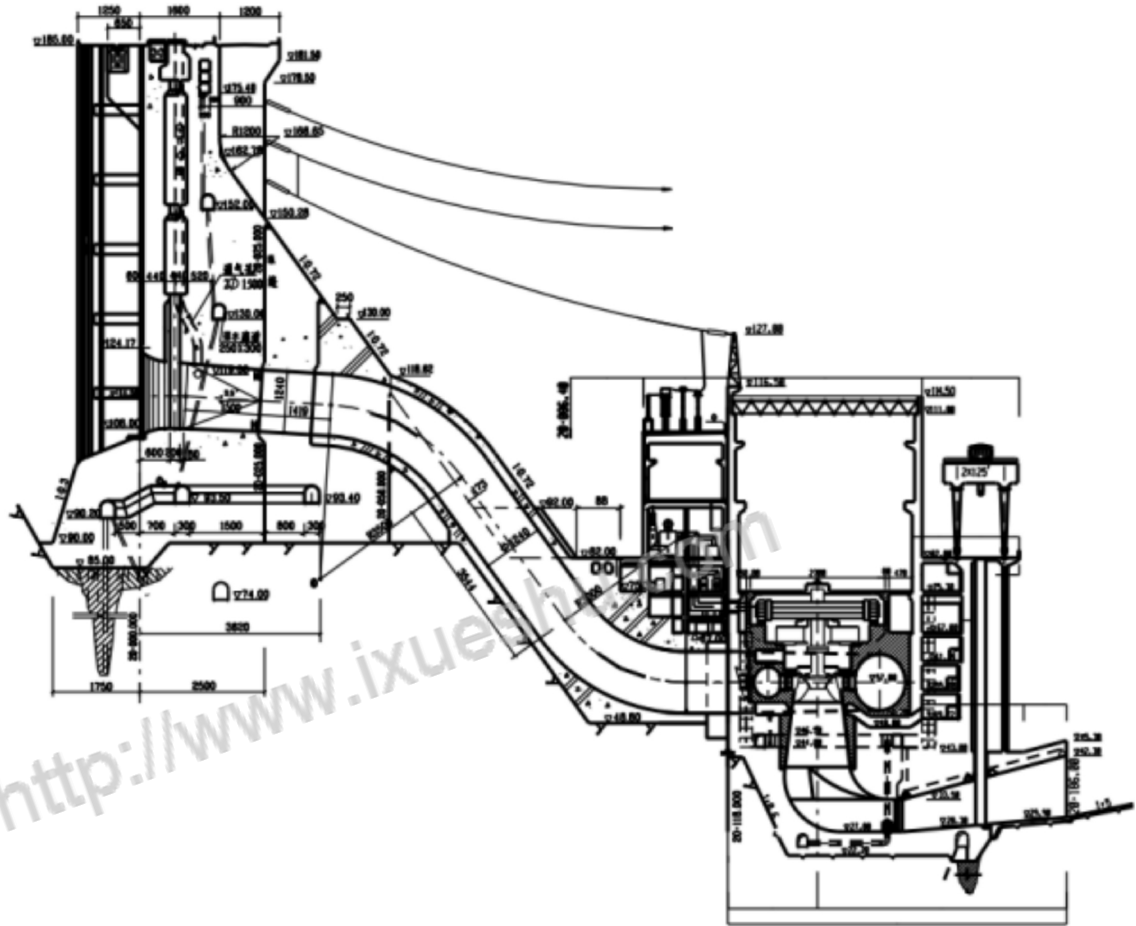


图 1 该水电站机组纵剖面图

工作闸门关闭时,上游水流被切断(工作闸门漏水流量极小,可忽略)水轮机流道包括通气孔中的水通过导叶间隙流至下游。开启工作闸门前,需先打开工作闸门上充水平压阀对蜗壳及压力钢管充水至与上游水库平压,在静水状态下开启工作闸门。下面分别对这两个过程进行分析。

2 通气孔法计算导叶漏水流量

该电站机组进水口截面见图 2。

工作闸门后是水轮机流道及通气孔。通气孔有两个,直径 $D_1 = 1.8 \text{ m}$ 进水口底坎高程 108 m、上沿高程 121.2 m,孔口尺寸 $9.2 \text{ m} \times 13.2 \text{ m}$,压力钢管直径 12.4 m。

水口快速门(简称工作闸门)、压力钢管、蜗壳、导叶、尾水管等组成。工作闸门是平板门,靠自重关闭,液压启闭机开启。通气孔是规则的圆柱形,位于工作闸门之后的流道上,与大气相连通。工作闸门上设置有充水管,用于工作闸门关闭时向压力钢管及蜗壳充水。当尾水闸门提起时,尾水与大气相通。

图 3 是工作闸门快速关闭前后过程,分析如下:
 t_0 时,工作闸门由全开位开始下落;
 t_1 时,由于工作闸门已关闭至极小开度,由工作闸门进入水轮机压力钢管的水量小于由导叶漏出的水量,水轮机流道总水量开始减少,表现为原本与上游水位相同的通气孔中的水位开始下降,蜗壳压力开始下降;
 t_2 时,工作闸门落至全关位,工作闸门完全截断上游水库进入水轮机流道(工作闸门漏水流量极小,做忽略处理)的水源。
 t_3 时,水轮机进水口上平段流道之上的通气孔中的水已漏完,由于压力钢管截面积远大于通气孔,水面下降速率变缓,蜗壳压力曲线变平缓。

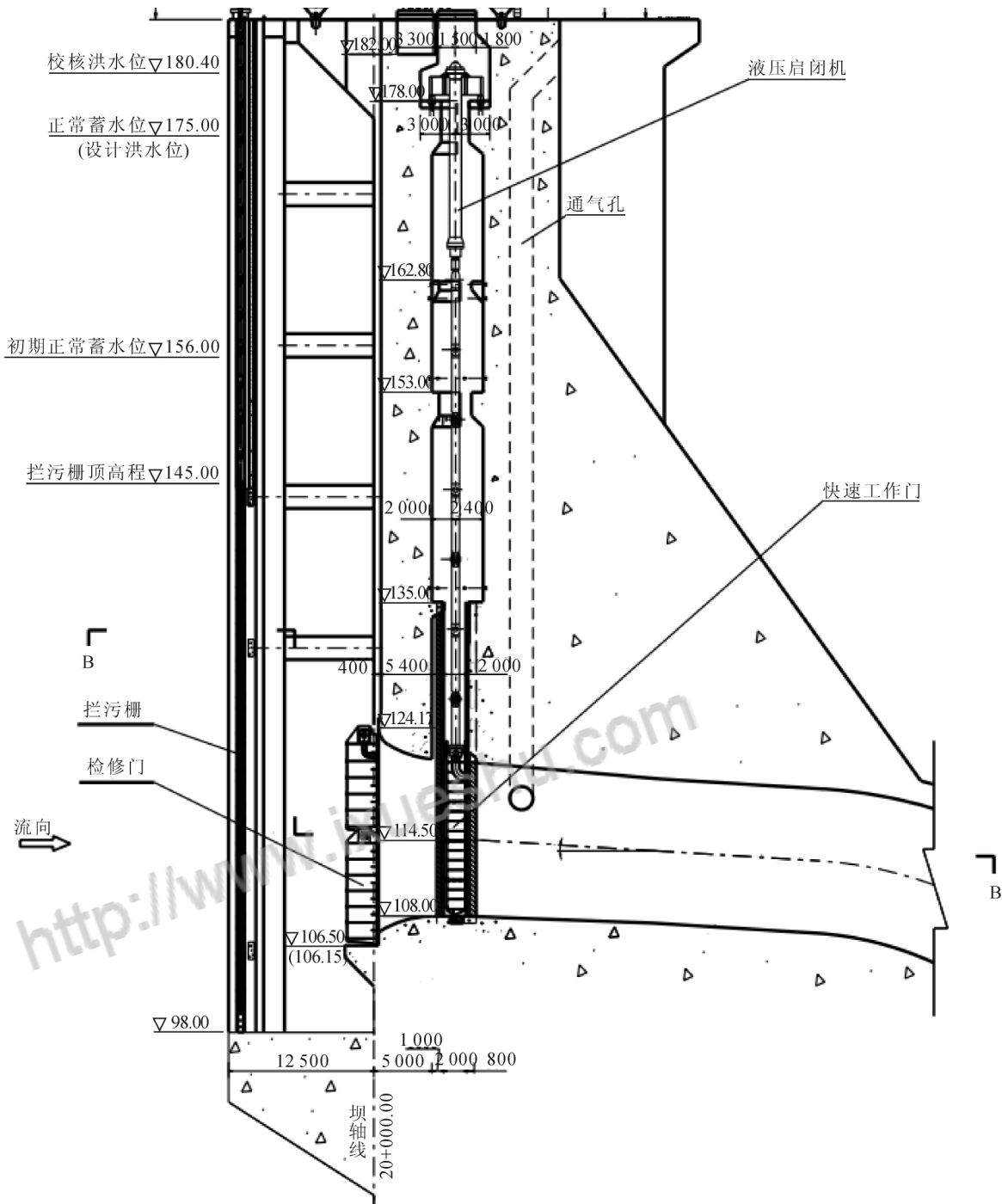


图2 该水电站机组进水口剖面图

根据水轮机安装结构,蜗壳压力表安装高程 H_y , 蜗壳压力 P 、通气孔水位 h 有以下关系:

$$h = 100(P + P') + H_y \quad (1)$$

式中: P' 是蜗壳压力表读数误差。工作闸门全开时有 $h = H_1$, H_1 是上游水库水位。根据上游水位 H_{01} 对应蜗壳压力表读数 P_0 求出:

$$P' = \frac{H_{01} - H_y}{100} - P_0 = \frac{H_{01} - H_y - 100P_0}{100} \quad (2)$$

根据 t_2 至 t_3 期间蜗壳压力变化,可计算出通气孔对压力钢管平均流量 q_1

$$q_1 = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{2 \frac{\pi D_1^2}{4} (h_2 - h_3)}{t_3 - t_2} = \frac{50 \pi D_1^2 (P_2 - P_3)}{t_3 - t_2} \quad (3)$$

式中: ΔV 为通气孔中水的体积变化量; ΔT 为考察的时间段,即 $t_3 - t_2$ s; D_1 为通气孔直径, $D_1 = 1.8$ m; P_2 为 t_2 时蜗壳压力, MPa; P_3 为 t_3 时蜗壳压力, MPa; ΔP 为 t_2 至 t_3 时间段蜗壳压力变化量; h 为通气孔中水

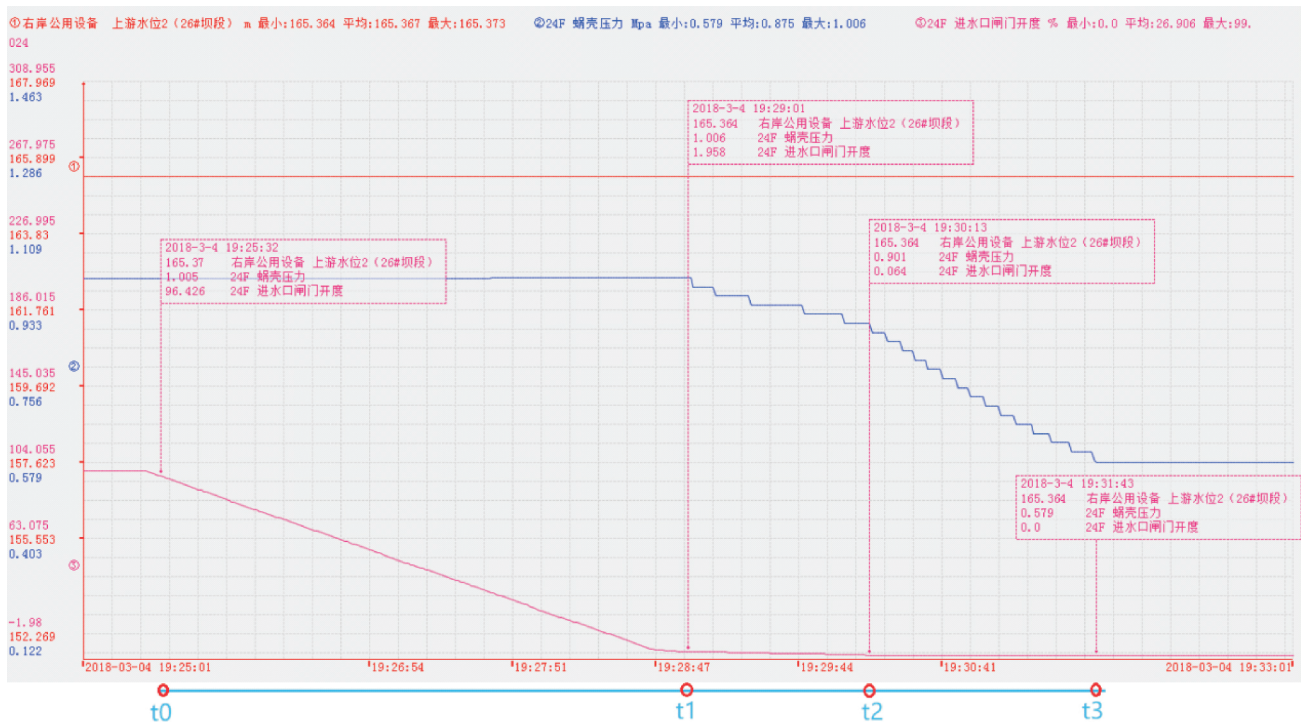


图3 24 号机组进水口工作闸门快速关闭过程

位 μm 。

导叶间隙是导致通气孔水位下降的原因 t_2 至 t_3 时间段导叶间隙漏水总量与通气孔中减少水量相同,两者变化率也相同,设平均流量为 q_1 。当 t_2 至 t_3 时间超过 60 s 时,可忽略通气孔中水流速度的影响,导叶间隙平均流量 q_1 近似等于通气孔水位 $h = \frac{1}{2}(h_2 + h_3)$ 、下游尾水位等于 H_{02} 时的瞬时漏水流量。

蜗壳压力传感器安装高程 H_y 为 62 m,导叶中心高程 57 m,下游尾水位高于导叶安装高程,导叶间隙出流为淹没出流,流量和导叶两侧水位差(即通气孔水位与下游尾水位之差)的二分之一次方成正比。所以当机组备用时,即工作闸门全开、通气孔水位等于上游水库水位时,可计算此导叶密封间隙的漏水流量 Q :

$$Q = \frac{\sqrt{H_1 - H_2}}{\sqrt{\frac{h_2 + h_3}{2} - H_{02}}} = \frac{\sqrt{H}}{\sqrt{50(P_2 + P_3) + 100P' + H_y - H_{02}}} \quad (4)$$

式中: H_1 为上游水库水位; H_2 为下游尾水水位; H 为水轮机净水头 $H = H_1 - H_2$ 。

自定义参数导叶漏水流量系数 符号为 β_1 且有

$$\beta_1 = \frac{q_1}{\sqrt{50(P_2 + P_3) + 100P' + H_y - H_{02}}} \quad (5)$$

则可得

$$Q = \beta_1 \sqrt{H} \quad (6)$$

通过式(1)、式(2)、式(3)、式(4)、式(5)、式(6)可以计算导叶漏水流量。

对该机组,由于导叶漏水流量系数 β_1 的大小只工作闸门完全关闭后通气孔中水量变化过程数据以及当时水库上下游水位有关,即只与计算时的情况有关,而与需换算时的机组净水头 H 无关,所以式(6)可方便计算任意水头下的导叶漏水流量。

需要说明的是,因为压力钢管截面是圆形,为减少误差,实际选取 t_3 时可向前一些,保持 t_2 至 t_3 时间段在 30 s 左右比较合适。如果导叶漏水流量较大,蜗壳压力下降比较快 t_1 至 t_3 时间较短,甚至工作闸门还未全关,通气孔中的水已经漏完,此种情况下该方法计算的误差可能比较大。

3 充水管流量法计算导叶漏水流量

导叶和工作闸门关闭但充水阀打开,当充水较长时间后,工作闸门充水管流量、导叶漏水流量达到平衡,通气孔水位不再上升。充水管淹没出流,属于有压管中恒定流,测量通气孔中水位后,可计算充水管流量 q_2 。

机组进水孔口面积为 121.44 m^2 (尺寸 $9.2 \text{ m} \times 13.2 \text{ m}$),工作闸门充水管截面积为 0.246 m^2 。进水

孔口面积远大于充水管截面积,可忽略闸门上游水流和闸门后压力钢管水流行进流速。上游水库水位 H_{01} 、测量通气孔中水位 h_{01} ,可求充水管流量^[5] q_2 :

$$q_2 = \mu_c A \sqrt{2g(H_{01} - h_{01})} = \mu_c A \sqrt{2gz} \quad (7)$$

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi}} \quad (8)$$

式中: μ_c 为流量系数; A 为工作闸门充水管截面积 $A = \frac{\pi d^2}{4}$ (d 为工作闸门充水管管径); g 为重力加速度,取 9.81 m/s^2 ; z 为闸门前后水位差,即上游水库水位 H_{01} 与通气孔中水位 h_{01} 之差; λ 为充水管中水流沿程阻力系数; l 为充水管长度; $\sum \xi$ 为充水管各局部水头损失系数之和。

因为水轮机流道水量平衡,所以水轮机导叶漏水流量和充水管流量 q_2 相等。

该水电站下游尾水位高于导叶安装高程,导叶密封间隙出流为淹没出流,导叶间隙漏水流量和通气孔水位与下游尾水位之差的二分之一方成正比。所以当机组正常备用时,即工作闸门全开、通气孔水位等于上游水库水位时,可计算此导叶密封条件下的导叶漏水量 Q :

$$\frac{Q}{q_2} = \frac{\sqrt{H_1 - H_2}}{\sqrt{h_{01} - H_{02}}} = \frac{\sqrt{H}}{\sqrt{h_{01} - H_{02}}} \quad (9)$$

$$Q = \frac{q_2}{\sqrt{h_{01} - H_{02}}} \sqrt{H_1 - H_2}$$

式中: H_1 为上游水库水位; H_2 为下游尾水水位; H 为水轮机净水头 $H = H_1 - H_2$ 。

自定义参数导叶漏水流量系数 符号为 β_2 且有

$$\beta_2 = \frac{q_2}{\sqrt{h_{01} - H_{02}}} \quad (10)$$

则可得

$$Q = \beta_2 \sqrt{H} \quad (11)$$

通过式(7)、式(8)、式(9)、式(10)、式(11)可以计算导叶漏水量。

对于该机组,由于 β_2 的大小只与流道平衡时测量的数据有关,而与需换算时的机组净水头 H 无关,所以式(10)可方便计算任意水头下的导叶漏水量。

该水电站机组工作闸门充水管结构如图4。充水管长度 $l = 1.87 \text{ m}$,直径 $d = 0.56 \text{ m}$ 。

查资料, 10°C 时水的运动粘滞性系数 $\nu = 1.336 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$,工作闸门充水管材质为镀防腐材料的钢

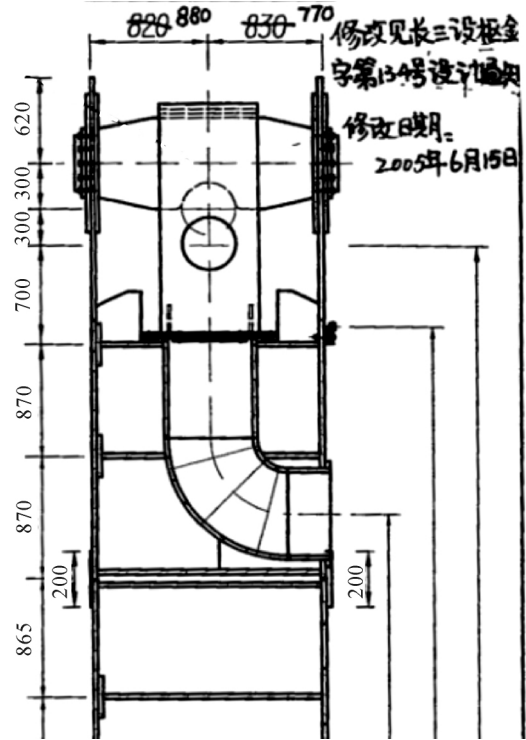


图4 24号机组进水口工作闸门充水管尺寸图

管,壁面当量粗糙度 $\Delta \approx 0.15 \text{ mm}$, $\Delta/d = 2.68 \times 10^{-4}$ 。一般情况下,平衡时工作闸门两侧水位差在 8 m 以下,按预估流速 $v \approx 12.53 \text{ m/s}$ 计算雷诺数 $Re = \frac{vd}{\nu} = 5.25$

$\times 10^6$,查莫迪图查得沿程阻力系数 λ 约为 0.0145 。

充水管入口为圆锥型入口,入口阻力系数 ξ_1 为 0.2 ;弯肘段 $d/\rho \approx 1$, $\theta = 90^\circ$,阻力系数 ξ_2 值为 0.294 ;出水为淹没出流,出口阻力系数 ξ_3 值为 1 。 $\sum \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 1.494$ 。

带入上述参数,得

$$q_2 = 0.877 \sqrt{z} \quad (12)$$

式中 z 为闸门前后水位差 $z = H_{01} - h_{01}$ 。

式(12)的引入,可以更方便计算该电站导叶漏水量。

4 导叶漏水流量的比较

根据实际测量数据,再用式(6)、式(11)可将不同时间、不同水库水位下的测量数据转换为同一水库水位下的导叶漏水量,可进行不同机组导叶漏水量在同时间、同环境下的比较。

根据前述分析,虽然导叶漏水流量系数 β_1 、 β_2 是不同方式下求得,表达式不同,但表达的意义都是漏水量和净水头之间的关系,且具有相同的量纲,单位均

为 $m^{5/2}/s$,可直接进行比较。式(6)、式(11)可以统一形式为:

$$Q = \beta \sqrt{H} \tag{13}$$

分析 β_1 、 β_2 的计算过程可以发现 ,导叶漏水流量系数一经确定 ,即与水轮机水头等外部条件无关。即导叶漏水流量系数是由导叶密封的实际状态决定 ,而

与水头等外部条件无关 ,可真实反映导叶密封的实际状态。这一重要特性 ,是其应用的基础。

5 实际计算及精确性评估

图 5、图 6 为该电站 24 号机组在不同时间工作闸门快速关闭和流道充水平压的相关数据趋势图。

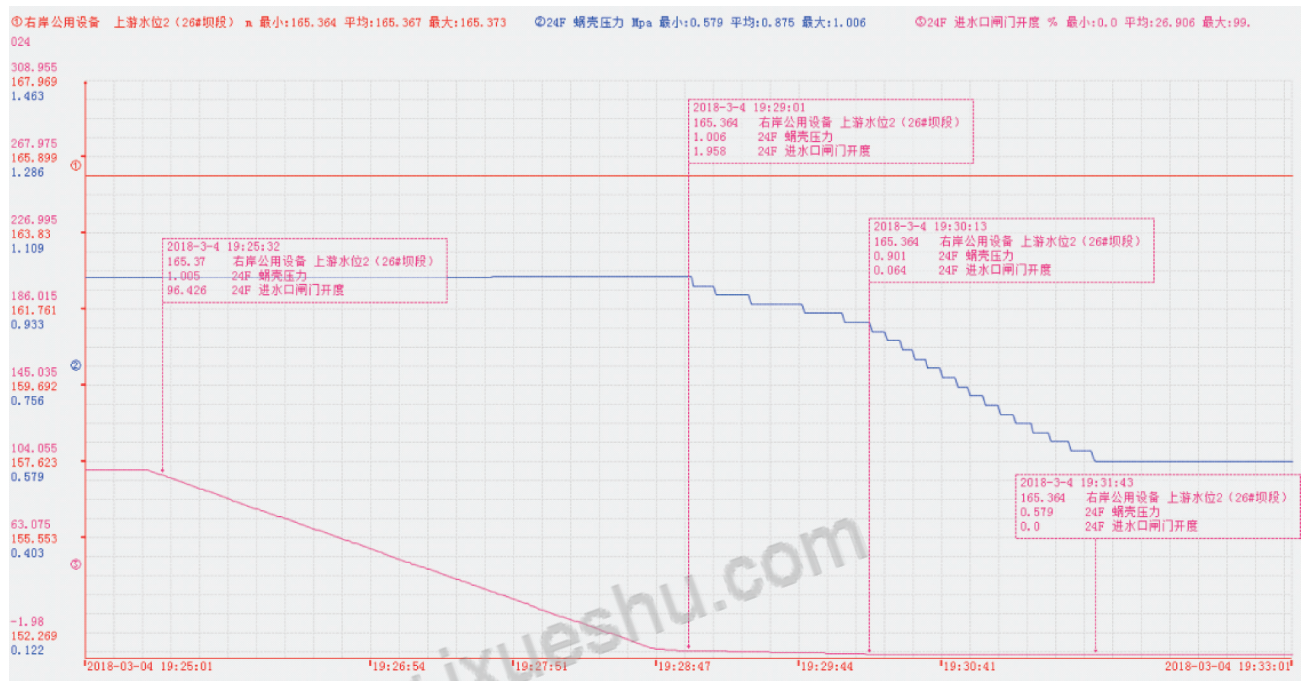


图 5 24 号机组工作闸门快速关闭趋势图

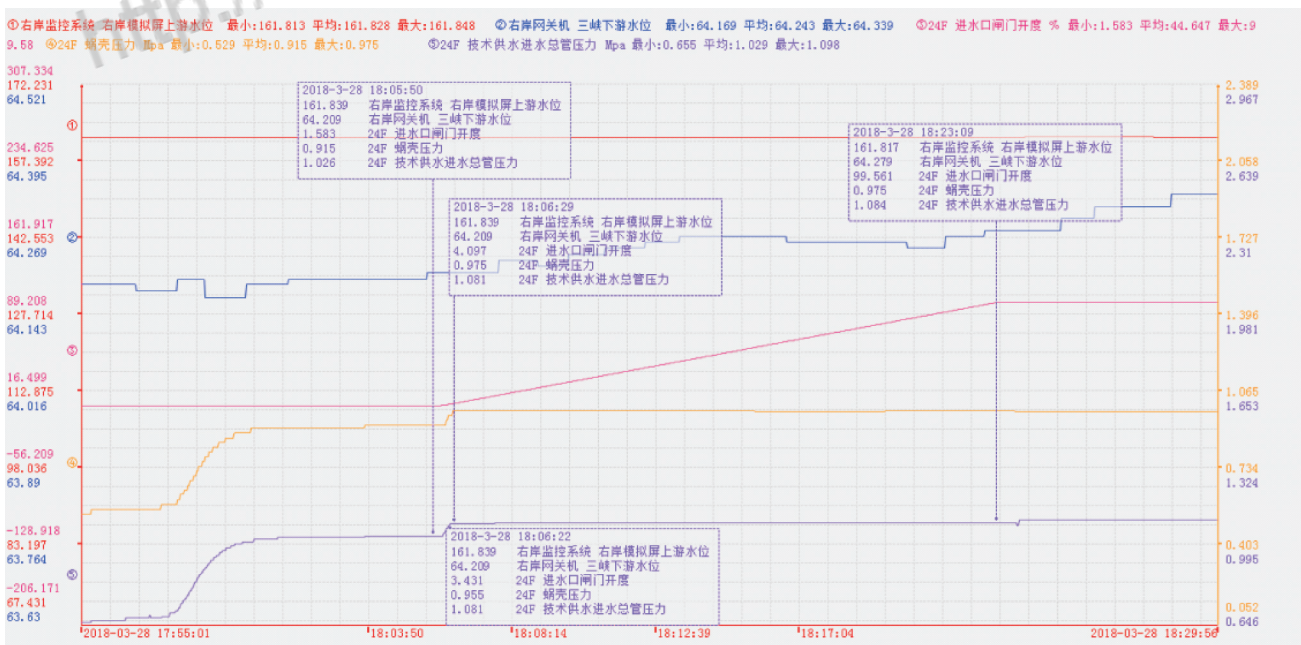


图 6 24 号机组流道充水平压过程趋势图

图5中为2018年3月4日上游水位165.3 m、下游水位65.4 m,在90 s中蜗壳压力由0.901 MPa下降到0.579 MPa,计算 $\beta_1 = 0.212 \text{ m}^{5/2}/\text{s}$ 。

图6中2018年3月28日上游水位161.84 m、下游水位62.2 m,平衡时测量工作闸门前后水位差6 m,计算 $\beta_2 = 0.222 \text{ m}^{5/2}/\text{s}$ 。

换算到相同水头下计算的导叶漏水流量相差5%,说明计算方法准确性较高,可以用来计算导叶漏水流量。

6 导叶漏水流量系统应用

6.1 导叶密封状态检修

根据水轮机额定水头、额定流量以及国家标准,可计算正常密封下的导叶漏水流量系数范围,把测量计算所得的 β 值与之比较,评估导叶密封效果。国家标准^[6]规定,在额定水头下圆柱式导叶漏水量不应大于水轮机额定流量的3‰。该水电站24号机组额定水头85 m,额定流量960 m^3/s ,额定水头下导叶漏水流量最大为2.88 m^3/s ,得到导叶漏水流量系数 β 最大值为0.312 $\text{m}^{5/2}/\text{s}$ 。24号机组 $\beta = 0.222 \text{ m}^{5/2}/\text{s}$,说明导叶密封满足国家标准要求。

导叶密封检修一般采用实地测量评估方式,周期为一年。每年把水轮机过水通道的水排空后实测间隙,该方式需要排水、开流道进人门等必要的配合工作,存在费时费力效率低的问题。应用计算所得 β 作为水轮机导叶密封效果的评估依据,可实现状态检修,达到提高工作效率、节约成本的目的。

2017年起,该电站基于各机组 β 测算值,开展导叶密封状态检修,大大减少了工作量和排水电能消耗,缩短了机组检修工期,提高了工作效率和经济效益。

6.2 优化开机方式增发电量

当电站机组不是全部运行时,因各水轮机导叶漏水流量不同,选择不同机组备用会产生不同的导叶总漏水量。假如机组 a 导叶漏水流量系数为 β_a 、漏水流量为 Q_a ,机组 b 导叶漏水流量系数为 β_b 、漏水流量为 Q_b ,且 $\beta_a > \beta_b$,则相同环境下 $Q_a \geq Q_b$ 。假设电站可供调整开机方式机组 a 运行、机组 b 备用的时间为 T ,可节约导叶漏水体积

$$V = \int (Q_a - Q_b) T \quad (14)$$

水轮发电机组发电量耗水率(每发1 kW·h电能

消耗的水体积) V_0 公式为

$$V_0 = \frac{3600}{gH\eta}$$

式中: H 为水轮机净水头(上下游水位之差); η 为水轮机发电机组效率; V_0 为耗水率 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

综上可以得出优化机组运行时间 T 节省的导叶泄漏水可增发的发电量

$$W = \int \frac{V}{V_0} = (\beta_a - \beta_b) g \eta \int H^{\frac{3}{2}} T \quad (15)$$

式中: W 单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$,时间 T 单位为 h ,取 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

根据上式及电价,可计算出该水电站机组 a 、机组 b 优化开机时间 T 所增发发电量及经济效益。

2017年该电站3号机组导叶漏水流量系数为0.3 $\text{m}^{5/2}/\text{s}$,虽然符合国家标准,但明显高于电站机组平均值0.2 $\text{m}^{5/2}/\text{s}$,因此开展了按上述方式的节水增效运行方式优化。经核算,一个检修周期内(1年)增加发电量800多万 $\text{kW} \cdot \text{h}$,创造了较大经济效益。

7 结 语

综上所述,可得出以下结论:

1)采用通气孔法和充水管流量法,可以满足该水电站计算水轮机导叶在各水头下的导叶漏水流量的要求。

2)充水管流量法简单易用,精确度较高。

3)机组导叶漏水流量系数可作为反映导叶密封实际情况的参数。

4)机组导叶漏水流量系数可应用于导叶密封状态检修和电站节水增效。

参考文献:

- [1]王海,孙建平,郑莉媛.大型水轮机导叶漏水量计算机测试[J].计量与测量技术,2001,28(1):22-23
- [2]张海库,高祥,李向东,等.官地电站水轮机导叶漏水量试验研究[J].水电能源科学,2015(1):154-156
- [3]莫剑,田海平,付亮,等.水轮机导叶漏水量的测评方法研究[J].湖南电力,2010,30(4):11-13
- [4]曹卫华,赵越,陈金霞,等.测量水轮机导叶漏水的标准节流孔板法[J].大电机技术,2008(3):34-37
- [5]吴持恭.水力学(上册)[M].4版.北京:高等教育出版社,2008
- [6]GB/T 15468-2006,水轮机基本技术条件[S]



知网查重限时 7折 最高可优惠 120元

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>
