

溪洛渡电站机组流量与效率超声波测量系统开发

陈 绪 鹏¹, 康 永 林¹, 王 青¹, 叶 青²

(1. 中国长江三峡集团公司 机电工程局, 云南 昭通 657000; 2. 上海申瑞电力科技股份有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要:水轮机组的效率是考核机组的一项重要指标,其测量方式多种多样。结合三峡水电站建设与运行经验,在溪洛渡水电站采取了超声波测流的方式,分别对东方电机、哈尔滨电机以及福伊特电机等厂家生产的设备进行了流量及机组效率的测量工作,并结合实际测量的相关误差展开了分析。分析结果表明,18 声路超声波测流系统在大型水电站水轮机组中的应用具有相当高的可靠性,同时也可作为机组的型式试验提供指导意见。对溪洛渡水电站水轮机组超声波流量和效率测量系统的设计原理、现场的实际安装工艺以及调试工作进行了相关描述。

关 键 词:超声波测量原理; 效率测量; 误差分析; 溪洛渡水电站
中图法分类号: TV734 **文献标志码:** A **DOI:**10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.11.022

1 超声波流量及效率测量的原理

溪洛渡水电站水轮机组超声波流量、效率测量设备,由上海申瑞电力提供,其中机组的超声波测流设备采用的是美国 ACCUSONIC 公司 7720 型 18 声路超声波流量计。该超声波流量计采用时差式原理,以超声波为媒介,通过测量同一声路 2 个换能器之间顺着水流方向和逆着水流方向的超声波的传播时间,来获得该声路上流体的线平均流速。对多个线平均流速进行加权积分,以获得流量。

1.1 流量测量原理

超声波流量测量装置主要采用时差法测量流速,如图 1 所示。在上下游分别布置有 2 只换能器 P1 和 P2。

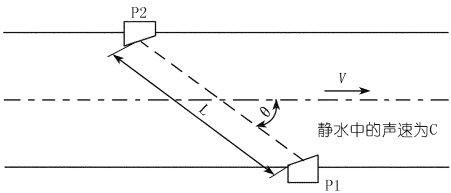


图 1 流速测量原理示意

声波的正、逆向传播时间可以表示为

$$T_{正} = \frac{L}{C + V\cos\theta}$$
 (1)

$$T_{逆} = \frac{L}{C - V\cos\theta}$$
 (2)

式中, $T_{正}$ 为超声波沿水流方向传播所经历的时间(正向传播时间); $T_{逆}$ 为逆水流向传播所经历的时间(逆向传播时间); V 代表流体速度; L 为声路长; θ 为声波路径与流向的夹角; C 为静水中的声速。由上述 2 个公式可以得到该声路上的线平均流速

$$v = \frac{L}{2\cos\theta} \left(\frac{1}{T_{正}} - \frac{1}{T_{逆}} \right)$$
 (3)

考虑到溪洛渡水电站的压力钢管直径大,流态复杂多变,为了提高测量精度,采用了 18 声路的布置方式,如图 2 所示。

将各声路上的流速对测量断面进行积分,即可得到通过测量断面的流量。流量积分公式为

$$Q = \frac{D^2}{2} \sum_{i=1}^n W_i V_i$$
 (4)

式中, D 代表管道直径; n 为测量断面上的声路数, $n = 18$; W_i 为第 i 声路的加权系数; V_i 为第 i 声路上的线平均流速。

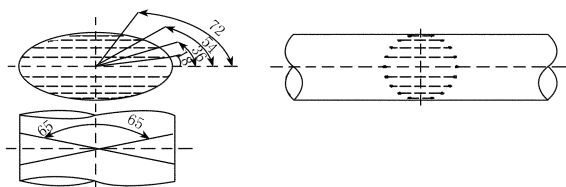


图 2 18 声路换能器布置

1.2 效率测量原理

效率测量系统首先是采集机组的流量、有功、无功、蜗壳进口压力、尾水出口压力及导叶开度等参数,来计算机组的工作水头,然后再来计算机组的效率和水轮机的效率^[1-2]。

(1) 工作水头。

$$h_{\text{工作水头}} = \frac{P_{\text{入}} - P_{\text{出}}}{\rho g} \cdot 10^6 + \frac{\left(\frac{Q}{S_{\text{入}}}\right)^2}{2g} - \frac{\left(\frac{Q}{S_{\text{出}}}\right)^2}{2g} + (Z_{\text{入}} - Z_{\text{出}}) \quad (5)$$

式中, h 代表为水轮机工作水头; $P_{\text{入}}, P_{\text{出}}$ 为水轮机蜗壳进口、出口压力; ρ 为水密度; g 为重力加速度; Q 为流量, m^3/s ; $S_{\text{入}}, S_{\text{出}}$ 为蜗壳进口、尾水出口断面面积; $Z_{\text{入}}, Z_{\text{出}}$ 为蜗壳进口、出口压力变送器的安装高程。

(2) 机组效率。

$$\eta_{\text{机组}} = \frac{N}{\rho g Q h} \quad (6)$$

(3) 水轮机效率。

$$\eta_{\text{水轮机}} = \frac{\eta_{\text{机组}}}{\eta_{\text{发电机}}} \quad (7)$$

式中, $\eta_{\text{机组}}$ 代表机组效率; $\eta_{\text{水轮机}}$ 为水轮机效率; $\eta_{\text{发电机}}$ 为发电机效率; N 为发电机有功。

2 流量与效率超声波测量设计

溪洛渡水电站水轮机组流量、效率测量系统的原理如图 3 所示。

18 声路共 36 个换能器安装于压力钢管内,换能器电缆从预埋套管引出,接到 7720C 流量测量主机和 7720B 扩展机箱,由 7720C 和 7720B 实现机组流量的测量。

效率测量系统通过 RS485 采集 7720C 和 7720B 的流量数据。此外,通过光纤通讯,从机组 LCU 采集有功、无功、导叶开度、蜗壳进口压力以及尾水出口压力等数据;同时,还通过 4~20 mA 模拟量,接收有功、无功以及静水头作为备用。

2.1 流量测量设计

超声波流量测量是采用 18 声路,测量精度要求在

恶劣条件下能优于 0.5%。

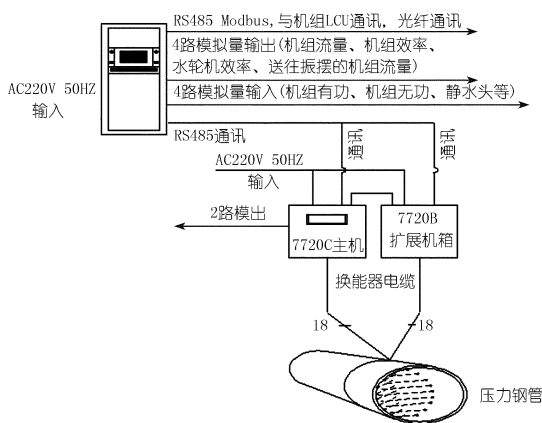


图 3 机组超声波测流和测效率原理

18 声路测流装置符合美国 ASME PTC18 - 2002 标准。由 2 个交叉 9 声路组成,分别由 7720C 9 声路和 7720B 9 声路实现流量监测;7720C 和 7720B 2 个流量的平均值,即为机组的流量。

2.2 效率测量设计

在采集到机组流量、有功、无功、蜗壳进口压力以及尾水出口压力之后,计算机组的效率就会显得非常容易。

机组有功、无功、蜗壳进口压力以及尾水出口压力数据的采集,可由以下 2 种方式实现:

- (1) 通过光纤通讯方式来采集;
- (2) 通过 4~20 mA 模拟量来采集。

2 种采集方式互为备用^[3-4]。

2.3 后台软件设计

后台软件主要用于实现机组效率计算、输入输出、历史数据存储以及人机交互。后台软件主要由以下几个部分组成。

- (1) 主界面。显示机组的流量、效率等主要数据。
- (2) 实时数据界面。显示机组的流量、效率,以及接收到的来自机组 LCU 的详细数据值。

(3) 历史数据查询界面。对测量系统的数据进行了分类,包括流量数据、PLC 数据、效率数据以及通讯状态,可分别查询和导出。

3 流量与效率超声波测量系统安装

3.1 测流系统安装

为了保证超声波测流系统的测量精度,在安装前应选择好测量系统的安装断面。通过对溪洛渡水电站现场压力钢管的实际分析,最终将安装断面中心选择在距离机组中心约 5 倍管径处。

由于溪洛渡水电站压力钢管的直径较大,为了确

保安装过程中的安全,在安装前,需要根据现场安装的实际况来搭设牢固可靠的脚手架。如图 4 所示。

3.1.1 超声波换能器定位

对于超声波测流系统来说,每一个层流速的测量均是由超声波换能器来执行的。为了最后能得到可靠的测量数据,每一个换能器的定位至关重要,必须要与 IEC41 规程一致。因此,在实际定位过程中,必须依靠精密仪器(激光经纬仪)来实施。

在安装的过程中,首先需要找到安装断面处压力钢管的管轴线,并将激光经纬仪精确地骑在管轴线上。为了找到换能器安装断面压力钢管的轴心,必须在安装断面中心的上、下游各分别选择一横截面安装一块靶板,并保证靶板的板面在钢管的中心位置,且板面和钢管的截面必须平行。

在 2 块靶板上分别贴上白纸,以靶板脚为起点,沿钢管截面圆周等分 8 点(弦长 = $0.38 \times$ 管内直径);分别以这 8 点为圆心,以小于钢管公称半径 50 mm 为半径,在靶板的白纸上画弧,得到图 5 所示图形。

弧线两两相交,构成 2 个弧线四边形,连接其中一个弧线四边形的两对角线,其交点可得一参考点 A。同样,连接另一弧线四边形的两对角线,可得另一参考点 B,连接 A、B 两点,它们的中点即是钢管的等效圆心。用记号笔明显地标识该点,上、下游靶板各得一点,两点的连线即为钢管的等效轴线。

当经纬仪精确地骑在管轴线上之后,此时可根据事先的声路布置及声路角,在压力钢管的内壁上找到 36 个(18 声路布置)换能器的安装理论点,并在钢管管壁上根据经纬仪激光所瞄准的点打上标记。由于超声波换能器及换能器座具有一定的高度,安装到管壁后,换能器的超声波发射面与钢管管壁之间有着一定的距离,因此还必须用专用模板对换能器的理论安装

位置进行修正,并画出安装换能器座的实际轮廓线,最后根据该轮廓线对换能器座实施焊接。

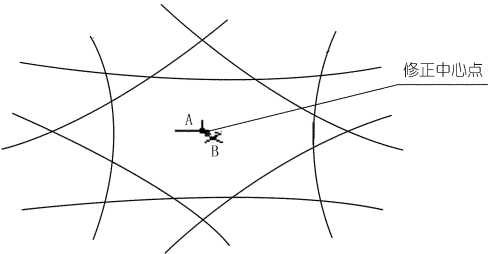


图 5 用画规(按 8 等分点)在靶板上画弧线得到的钢管等效中心

3.1.2 换能器电缆敷设

在压力钢管内安装换能器的工作结束后,需要将换能器的信号电缆从穿缆器引出钢管。由于压力钢管内的压力很高而且水的流速也较大,因此,为了保护电缆,从换能器座到穿缆器之间必须敷设不锈钢电缆护管,并保证电缆护管被牢牢地固定在压力钢管的内壁上。溪洛渡水电站在设计时就已考虑到了电缆敷设的问题,事先已设计了 2 根 $\Phi 114 \times 7$ 的预埋管,因此在压力钢管内只需要敷设换能器到预埋管之间的电缆护管。在将换能器信号电缆往电缆护管内敷设的过程中,一定要特别注意不能弄破电缆,以防防水从电缆中渗出;在密封穿缆器之前,也应逐一检查穿缆器的密封圈,以防穿缆器漏水。

3.1.3 参数复测

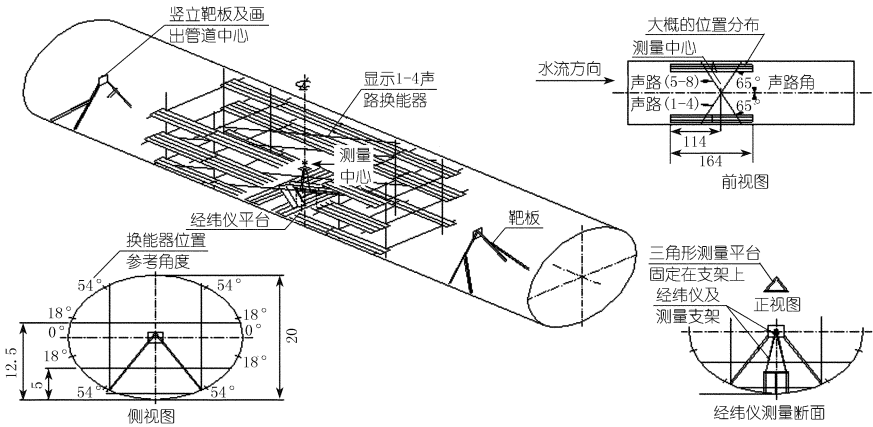
在压力钢管内完成换能器的安装及电缆敷设后,必须要对每一个换能器的安装位置进行复测,这一步非常重要。因为在安装过程中开展了大量的焊接工作,在焊接时就有可能导致换能器的位置发生一定的变化,从而导致声路角发生变化;而每一个声路(同一高程的 2 个换能器构成一个声路)的声路角(与管轴线的夹角)对流量的测量会产生一定的影响。因此,需要重新测量换能器的安装角度,并将这些复测所得到的角度换算成声路角后输入系统,以参与流量计算。

因此,需要重新测量换能器的安装角度,并将这些复测所得到的角度换算成声路角后输入系统,以参与流量计算。

3.2 效率测量系统的安装

当超声波测量系统安装完成后,将进行效率测量系统的安装。但是机组效率的计算需要采集机组流量、有功、无功、蜗壳进口压力以及尾水出口压力等相关参数。

为了保证机组效率测量系统



注:脚手架图仅供参考,额外的脚手架及附件要求结构合理

图 4 现场搭设的脚手架及经纬仪平台、靶板示意

的正常运行,在采集机组有功、无功、蜗壳进口压力以及尾水出口压力等参数时,可以通过以下 2 种方式来实现:

- (1) 通过光纤通讯从机组 LCU 进行采集;
- (2) 通过 4 ~ 20 mA 的模拟量从现地单元来采集。

流量参数也是通过 2 种方式进行采集:

- (1) 通过 MODBUS 通讯方式,从流量测量的现地单元采集;
- (2) 同样是通过 4 ~ 20 mA 的模拟量来采集。

流量、效率测量系统的接口原理如图 6 所示。

4 流量与效率超声波测量系统调试

4.1 测流系统调试

超声波测流系统安装完成后,将对该系统进行相关调试。可将其调试工作分成 2 个部分进行,即无水调试和带水调试。

4.1.1 无水调试

为了保证换能器与换能器专用电缆连接的可靠性,并检测换能器电缆在敷设过程中没有受到损伤和破坏,将进行无水调试。具体方法为:由一名工作人员在压力钢管内对每个换能器进行轻打测试,而另一名工作人员则在电缆的另一头,观察设定在交流毫伏档的电压表。电压表应指示一个有 50 mV 或更大值的振荡电压。无水调试能确保电缆标识正确,且保证电缆接头的接插可靠。

4.1.2 带水调试

当压力钢管里充满水后,首先应该在换能器电缆出口的密封处仔细观察其是否漏水,然后对每一个声路逐一调试,观察每一个声路的声速、信号增益、传播

时间以及测量波形等;所有声路在同一时间内,所测量的声速应该相近或一致。由于声路长的不同信号增益会各不相同,但应该都保持在一个正常的测量值范围内,对于每个声路调试的波形应该一致。声路调试波形如图 7 所示,声路声速、信号增益以及传播时间等参数调试如图 8 所示。

4.2 效率测量系统调试

在完成测流系统的所有调试后,最后进行效率测量系统的调试。效率测量系统主要是收集用于效率计算的所有参数,然后进行机组效率计算。该系统的调试工作主要分成两大部分:与流量计现地通讯的调试及与机组 LCU 的通讯调试。

4.2.1 与流量计现地通讯的调试

当效率测量系统和流量测量系统的 2 个现地(A、B)通讯连接成功后,系统将分别从现地 A 和 B 读取相关的参数,用于显示断面流量、机组综合流量及各个声路的状态、流速、声速、增益、增益百分比、信噪比、正向传播时间、反向传播时间以及时间差等参数。通过现场核对,效率系统中显示的流量测量的所有变量与流量测量现地显示的变量一致后,表示该部分调试完成。

双方系统启动后,由双方互设变量进行核对,接收和发送的所有变量一致后,可以确定该部分的调试正常。效率测量系统主要从机组 LCU 读取有功、无功、毛水头、导叶开度以及蜗壳压力差等变量,同时,将计算到的机组效率、水轮机效率、动水头、工作水头及采集到的机组流量、声路状态等变量传送给机组 LCU。

4.2.2 与机组 LCU 通讯的调试

当效率测量系统与机组 LCU 通讯连接成功后,在该系统界面上的通讯灯会自动点亮,表示通讯正常。

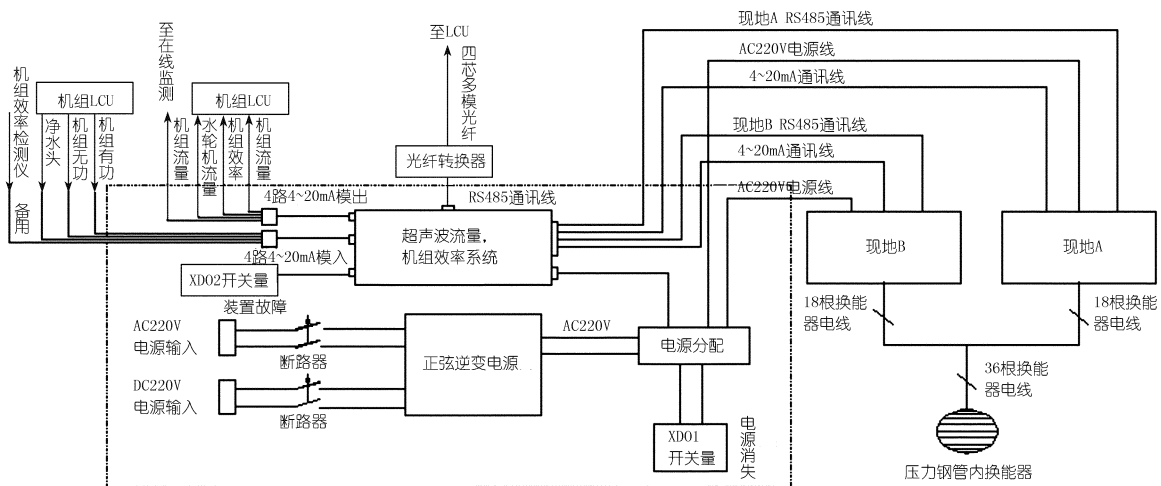


图 6 流量、效率测量系统的接口原理

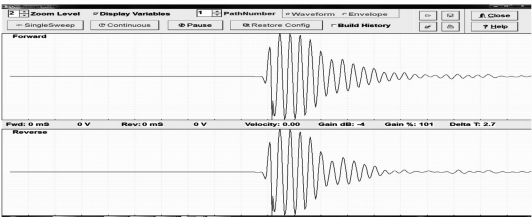


图 7 声路调试波形示意

Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6	Path 7	Path 8	Path 9	Path 10
5.656	5.87	5.561	4.503	4.507	4.725	4.205	3.207	2.144	
-4.6	-2.6	-1	12.2	6.6	5.6	5.4	0.2	-4.2	
103.2	101.6	101.6	113.3	98	106.3	101.8	113.6	106.6	
44.7	43	39.8	34.1	35	36.9	36.4	40	42.9	
2143.3	4260.4	5917	6971.2	7335.4	6975	5914	4265.7	2141.1	
Forward									
2150.2	4274.3	5925.1	6980.3	7355.3	6984.2	5928.7	4274.1	2143.7	
6892.3	14229	16704	19446	19559	15723	14114	7567	2607.5	
Reverse									
1490.6	1490.4	1490	1490.1	1490.1	1490	1490.9	1490.4	1490.4	
Envelope Time us									
Forward									
2142.9	4260.4	5916.9	6970.9	7334.9	6974.6	5913.9	4265.2	2140.7	
Reverse									
2149.8	4274.2	5925.1	6980.2	7354.6	6983.9	5928.6	4274.7	2143.4	
Path Fail									
Path Velocity Error									
Detection Method									
Level									
1st Neg Level 1	1st Neg Level 2	1st Neg Level 3	1st Neg Level 4	1st Neg Level 5	1st Neg Level 6	1st Neg Level 7	1st Neg Level 8	1st Neg Level 9	1st Neg Level 10

图 8 各声路调试状态

为了保证该系统运行的可靠性,同样需要对硬接点(4~20 mA 模拟量)实施相关的调试。

5 现场测量误差分析

效率测量系统的误差来源主要包括:机组流量测量误差、机组有功测量误差以及机组工作水头误差。

5.1 机组流量测量误差

机组流量 E_Q 的误差来源主要包括声路长误差 E_L 、声路角误差 E_A 、钢管直径误差 E_D 、积分误差 E_I 、随机误差 E_R 。

(1) 声路长误差 E_L 。应对声路长进行多次测量,这样,平均后的声路长测量误差不会超过 5 mm。对于溪洛渡水电站的声路长均在 3 m 以上,单个声路长的测量误差小于 0.17%。由此带来的流量误差小于 $0.17\% \sqrt{9} = 0.06\%$ 。

(2) 声路角误差 E_A 。溪洛渡水电站水轮机组超声波测流装置的换能器安装角度为 65° ,用激光经纬仪来控制 and 实际测量这个角度,应将角度的偏差控制在 0.1° 以内,由此带来的流量误差则会小于 0.37%。

(3) 钢管直径误差 E_D 。溪洛渡水电站的压力钢管直径为 10 m,测量多个直径,平均后的测量误差不会超过 5 mm,直径的测量误差小于 0.05%;由此带来的流量误差小于 0.1%。

(4) 积分误差 E_I 。采用 18 声路测流装置,在恶劣条件下,流量的积分误差小于 0.1%。

(5) 随机误差 E_R 。通过对多次测量值平均的方法,可以有效消除流量测量的随机误差。这样,可以将随机误差 E_R 控制在 0.2% 以内。

综合以上分析,机组流量的综合误差为

$$E_Q = \sqrt{E_L^2 + E_A^2 + E_D^2 + E_I^2 + E_R^2} = \sqrt{0.06^2 + 0.37^2 + 0.1^2 + 0.1^2 + 0.2^2} = 0.45\% \tag{8}$$

5.2 机组有功测量误差

机组有功的测量误差 E_N 在 0.5% 左右。

5.3 机组工作水头测量误差

机组工作水头的测量误差 E_h 在 0.5% 左右。

机组效率测量的综合误差

$$E_U = \sqrt{E_Q^2 + E_N^2 + E_h^2} = \sqrt{0.45^2 + 0.5^2 + 0.5^2} = 0.84\% \tag{9}$$

综上所述,机组效率测量的综合误差优于 1%。

6 结 语

溪洛渡水电站水轮机组流量、效率测量系统的成功应用,充分说明了 18 声路超声波测流系统在大型水电站应用的可靠性,是我国巨型机组上实际应用的又一范例。该技术的成功运用,为其推广,扩展运用领域提供了坚实的基础,同时,也为水电站大型水轮机组的性能评估和经济管理提供了可靠的技术支持。

参考文献:

[1] 谭文胜. 一种超声波流量测量装置[P]. 中国专利:CN201210066, 2009,(3).

[2] 杨理践,于振华,高松巍. 水下超声波测距技术的研究[J]. 电子质量,2008,(3).

[3] 杜伯,赵国建. 超声法测量水轮机效率[J]. 水电站机电技术, 1986,(2).

[4] 马跃先,原文林,吴昊. 水轮机效率曲线数字化处理的应用研究[J]. 水力发电学报,2006,(5).

(编辑:赵秋云)

(下转第 99 页)



当研究建立以市场起决定作用的水电价格机制,还原水电的商品属性,充分体现按质论价、同质同价、优质优价的原则。只有这样,才能真正体现水电的优质特性和经济价值,还原水电建设应有的盈利能力,从而培育我国水电建设业主滚动开发后续水电项目的财力,促使我国水电建设真正实现滚动开发的模式。

3 结 论

我国是世界上水能资源最丰富的国家,技术可开发水能资源总量达 5.42 亿 kW,截至 2013 年,实际已开发总量 2.8 亿 kW,已开发总量刚刚过半,后续的水电建设任务依然十分繁重。只有尽快、有效地破解水电建设管理中存在的上述疑难问题,才能从根本上改善我国水电建设环境,培育水电建设业主滚动开发后

续水电项目的财力,确保水电建设健康发展。

当前严重影响和制约我国水电建设发展的上述疑难问题实质上极其复杂,以上仅就其主要原因及破解思路进行了初步剖析和探讨,若要彻底加以解决,还需要各位同行们继续深入研究,以形成切实有效的系统解决方案,更需要国家相关部门的高度关注和相应的配套改革措施。

参考文献:

- [1] 赵鑫钰. 水利水电工程股份制移民探讨[J]. 人民长江,2008,39(2);83-85,99.
- [2] 晏志勇. 我国水电建设现状及未来[J]. 水利水电施工,2010,119(2);1-4.
- [3] 向明. 水电上网电价的问题及加快水电开发的策略[J]. 湖北水力发电,1992,11(2);7-13.

(编辑:徐诗银)

Main problems in China's hydropower construction management and countermeasures

WU Shuguo¹, XU Jinjun²

(1. Guodian Dadu River New Energy Company, Chengdu 610041, China; 2. Department of Network and Information Center, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: The main difficulties that seriously affect and restrict the hydropower development in China are summarized and analyzed, such as the hydropower construction market monopoly, endless appeal of local stakeholders, overcritical demands from relevant administrative authority, unreasonable hydropower price. In the combination of practical condition of hydropower construction in China, the causes of these problems are analyzed, and the thought and countermeasures to tackle these problems are discussed, i. e, rebuilding the fair competition platform of hydropower construction market to avoid monopoly, piloting interests – bundled resettlement compensation to prevent the endless appeal, scientifi cally establishing the decision making system of hydropower project to avoid waste, setting up the market – oriented price system to restore the profitability of hydropower construction.

Key words: hydropower price; resettlement compensation; hydropower project; project management

(上接第 92 页)

Development of ultrasonic measurement system of discharge and efficiency of generator – unit in Xiluodu Hydropower Station

CHEN Xupeng¹, KANG Yonglin¹, WANG Qing¹, YE Qing²

(1. Electrical and Mechanical Engineering Department, China Three Gorges Corporation, Zhaotong 657000, China; 2. Shanghai Sunrise Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: As one important indicator to evaluate the performance of hydropower generator – unit, the unit efficiency can be measured by a variety of methods. In combination with the construction and management experiences of Three Gorges Hydropower Station, the ultrasonic measurement method was used in Xiluodu Hydropower Station to measure the discharge and the efficiency of Dongfang turbine, Harbin turbine and Voith turbine respectively and the relative measuring error were discussed. The design principles, installation techniques on site, test and adjustment of the measurement system are described. The result shows that the 18 acoustical circuit ultrasonic measurement system is highly applicable to generator – unit of large hydropower station and capable to provide guidance to the type approval test of the generator unit.

Key words: ultrasonic measurement principle; measurement of efficiency; analysis of errors; Xiluodu Hydropower Station