

# 太平驿水轮机的抗磨措施与沉沙池标准及效益

段凌剑, 李国梁

(四川南桧河流域水电开发有限责任公司, 四川成都 610061)

**摘要:**四川太平驿电站前2台机已经连续正常和经济运行4年,发电3 0~3 28万h,达到了原定的目标。不建常规沉沙池,节省静态投资4 165万元,占电站静态总投资的4.2%。这些问题原有争议,现有结果,对其实际情况,用资料对比加以说明。

**关键词:**水轮机;抗磨损措施;不建沉沙池;效益显著

**中图分类号:**TV 734; TV 22

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2000)增-0064-03

## 1 电站概况

太平驿电站为四川岷江上游已发电的映秀湾水电站的上一级,为引水式,地下厂房装机 $4 \times 65 \text{ MW}$ ,设计年平均发电量17.2亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ,最大水头130m,额定水头108m,过机多年平均含沙量 $267 \text{ g/m}^3$ ,汛期(6~9月)平均 $515 \text{ g/m}^3$ ,粒径 $0.25 \text{ mm}$ 的含量占12%,莫氏硬度5的约占60%,已运行4年的过机泥沙接近或略小于多年平均值。

第一台机组于1994年11月并网发电,后3台机至1995年8月相继发电。到1999年元月及3月停机大修,前2台机分别正常运行4年及4年零4个月,发电3 0~3 28万h,达到了预定的目标。

## 2 沉沙池方案的变动

### 2.1 常规沉沙池的必要性与技术进步

常规沉沙池是指 $0.25 \text{ mm}$ 沙粒的沉降保证率大于80%的沉沙池。其作用是减少过机悬移质泥沙,减轻水轮机的泥沙磨损危害。由于大多数中高水头引水式电站山高坡陡,常规沉沙池的工程量大,投资昂贵,一般占电站总投资的5%~6%。随着技术的进步,可以从水轮机本体上采用较好的抗磨措施,使水轮机能正常和经济运行,达到合理的大修间隔,而不建常规沉沙池,是经济合理的。

### 2.2 常规沉沙池必要性的首次争议

我国对常规沉沙池必要性的争议,实质上是对水轮机抗磨措施及效果认识不一致。首次争议发生在映秀湾电站初设审查会。主持审查会的水电总局领导作出会议结论:修建三厢式常规沉沙池,代价过大,对必要性认识不一,不能花太多的学费去建。

### 2.3 太平驿电站沉沙池方案的变动

太平驿电站初设阶段,设计人员对设置常规沉沙池必要性的争议较大,最终在初设报告中推荐设常规沉沙池方案。

1985年的初设审查会议纪要,要求从技术经济上进一步论证设常规沉沙池的必要性。

1986年4月,映秀湾电厂根据运行总结正式答复设计院:太平驿电站可暂不修建沉沙池,预留位置。

1988年的电站优化设计报告,对沉沙池的必要性进行

了进一步的论证,认为常规沉沙池可减少过机泥沙15.9%和减轻水轮机磨损约1/4,效益是水轮机大修间隔可从3年延长到4年,但代价过高,得不偿失,是不经济合理的。优化设计报告中推荐预留沉沙池方案。

1989年,中国国际工程咨询公司对电站可行性研究进行评估。会上对常规沉沙池必要性争议很大,由于论证较充分和几位著名专家的支持,通过了暂不设常规沉沙池的预留方案。

根据评估意见,设计院在隧洞进口的直线段,设计了洞内无压沉砾池,作为防止推移质沙石进入有压隧洞的第三道防线。沉砾池直线段长140m,宽10m,水深10~16.5m,相应流速 $2.8 \sim 1.52 \text{ m/s}$ ,还能沉排粒径 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 悬移质沙80%,实际上起到低标准沉沙池的作用,造价多556万元。

预留常规沉沙池方案,需建从沉沙池出口到主引水隧洞的工程,即104m长的汛期进水支洞、进水口、安装闸门和启闭机,以便能在今后万一需要沉沙池时可在不停电状态修建。但电站建设管理局认为没有必要预留沉沙池,取消了这些工程项目,不仅节省投资511万元,还可使电站早发电3个月以上。按不要常规沉沙池方案施工,与建常规沉沙池方案相比,节省静态投资4 165万元(1993年价格),占电站静态总投资约4.2%,年费用支出少563万元。水轮机连续正常经济运行4年多的结果表明,这是正确的决策。

## 3 太平驿水轮机的抗磨措施及磨损程度预测

### 3.1 太平驿水轮机的抗磨措施

根据当时已有的研究成果,水轮机磨损的主要部位是转轮叶片出水边下部正面,转轮下环内表面下部及下止漏环进口,以及导叶内侧相邻的底环抗磨板,见图1。抗磨措施的重点是减轻这4个关键部位的磨损。主要抗磨措施是:

(1)选用水力性能好的较低比转速机型,改善流态,降低叶片正面最大相对流速。

从初设到机组采购招标,国内可供选用机型方案的主要有关数据汇总于表1。其中后两个高比转速机型方案,虽可节省机组投资13%~18%,但由于叶片出水边最大相对流速大约 $(45 \sim 50 \text{ m/s})$ 及磨损危害过大,在电站初设时被淘汰。

从表1可知:

表 1 水轮机比较方案的主要数据表(单机容量 65MW, 水轮机额定容量 66.7MW, 额定水头 108m)

方案	比转速 $n_s$	转速 $n_r$	水轮机模型数据				水轮机及额定工况点数据					4 台机组价		1991 年投标价		
			$D2/D1$	$n_{10}$	$Q_{10}$	$\eta_b$	$D_1$	$n_1$	$Q_1$	$v$	$u_2$	$\bar{u}_3$	相对值	1991 年 差价	投标价	相对值
			$/m \cdot kW$	$/r \cdot min^{-1}$	$/r \cdot min^{-1} / l \cdot s^{-1}$	$\%$	$/m$	$/r \cdot min^{-1} / l \cdot s^{-1}$	$/m \cdot s^{-1}$	$/m \cdot s^{-1}$	相对值	$/万元$	$/万元$			
1	158.9	214.3	0.956	63	690	92.1	3	61.9	727	24.5	32.3	0.68	1.12	405	4195	1.242
2	171.1	230.8	0.956	63	690	92.1	2.9	64.4	800	24	33.5	0.767	1.06	203		
3	185.4	250	0.991	68	720	92.9	2.9	69.8	773	25.4	37.6	1.084	1	0	3660	1.083
4	185.4	250	0.959	69.8	730	94	2.92	70.2	746	24.8	36.6	1	1	0	3378	1
5	202.2	272.7	0.959	69.8	730	94	2.82	73.9	817	24.2	38.6	1.173	0.95	-169	3242	0.96
6	202.2	272.7	1.034	71.7	758	92.9	2.75	72.2	853		40.6	1.365	0.94	-203	3544	1.049
7	222.5	300	1.087	71	955	91.5	2.55	73.7	1013		43.5	> 1.681 (5.21)	0.87	-439		
8	247.1	333.3	1.086	77	950	91.7	2.55	81.8	1020		48.4	> 2.31 (7.41)	0.82	-608		

注: (1) 方案 4 为选定方案; (2)  $u_2$  为转轮叶片出水边最大圆周速度,  $\bar{u}_3$  近似表示相对磨损程度, 括弧内的数字按相对流速 ( $> 45m/s$ ) 及速度指数 3.3 次方计算。

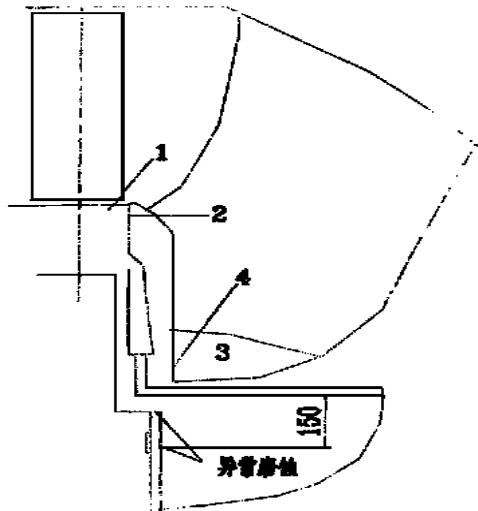


图 1 中低比速混流式水轮机磨损主要部位图

这些方案导叶开口处的平均流速  $v$  接近, 流态的差别及导叶两面水压差将是影响导叶部位磨损量的重要因素。

转轮叶片出水边下部正面最大圆周速度  $u_2$  随比速  $n_s$  的增加而增大, 相对磨损量  $\bar{u}_3$  也加大, 这是该电站机型选择的一个关键因素。

在机组评标中, 选定天津发电设备厂(方案 4 及 5)为中标单位, 理由是, 水轮机水力综合性能最好; 投标价低; 转轮叶片的最大相对流速较低; 导叶为负曲率, 部分负荷流态较好及局部最大流速较低; 主要部位磨损量小, 可达到连续正常运行 4 年才大修的基本保证; 叶片出水边厚达 17 mm, 有利于转轮叶片延长大修间隔期。

天发厂在投标书中推荐方案 5 ( $n = 272.7 r/min$ )。在合同谈判中, 业主及设计院倾向方案 4 ( $n = 250 r/min$ ), 主要理由是: 磨损关键部位(转轮叶片出水边下部)的相对流速低, 磨损量小(方案 5 大 54%), 有利于确保运行 4 年大修; 方案 5 的设计平均效率高 0.54%, 由于磨损大, 实际运行平均效率可能低; 增加机组造价 4% 是值得的。方案 4 参数匹配不够好, 高水头区效率较低见图 2。要求局部改进模型。双方同意选用方案 4。后来, 天发厂没能研究改进, 造成遗憾。

对于机型优化问题, 段凌剑曾在“四川水电中青年报告会论文集”中以“岷江太平驿水轮机优化选型”为题作了详尽的阐述, 业主明确水轮机的大修间隔从原设计的 3 年提高到

4 年。

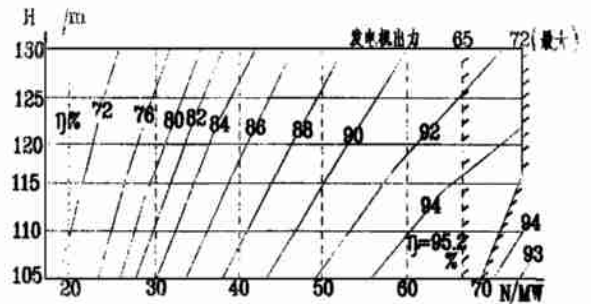


图 2 水轮机运行特性图

(2) 选用耐磨材料。

16-5 (0Cr18Ni9Ti) 不锈钢, 是 80 年代以来水轮机使用的最好材料。转轮叶片, 下环及上冠均用 16-5 铸钢; 导叶为 16-5 熔铸。16-5 不锈钢比 13-5 不锈钢的硬度高 HB50, 耐磨性能更好。

(3) 提高设计制造及安装质量。

通流部件表面粗糙度小, 增大顶盖刚度, 减小导叶上下端面间隙(2 号机安装后, 83% 的端面间隙为 0~0.16 mm, 17% 为 0.17~0.21 mm), 转轮经专门检测中心检验合格。

(4) 改善运行工况。

### 3.2 太平驿水轮机磨损程度预测

电站设计选用对比电站映秀湾、南桠河 II 级、刘家峡及龚嘴电站水轮机的实际磨损资料, 采用类比法对太平驿水轮机 3 个主要部位的磨损程度进行了预测, 预测磨损量见表 2。

表 2 太平驿水轮机磨损量预测值

主要部位	运行 3 年 20 000 h		推算运行 4 年 30 000 h	
	预测值	平均值	预测值	平均值
导叶开口区底环抗磨板平均磨损/mm	0.8~1.4	1.1	1.2~2.1	1.7
转轮下止漏最大磨损坑深/mm	1.9~4.8	3.4	2.9~7.2	5.1
转轮叶片出水边下部正面磨损/mm	2.0~4.7	3.3	3.0~7.1	5.1

### 4 水轮机的质量、运行、实际磨损及对比分析

机组设计制造质量优良, 其 4 台机组安装后, 都是一次启动成功, 正常并网发电。由于电厂精心组织生产运行及设备维护, 运行情况良好。开始运行的第一年(1995 年), 前 2

台机正常发电时间高达 8 504 h 及 8 328 h, 取得国内外少有的好成绩。

1 号、2 号机发电 3 28 及 3 0 万 h, 磨损情况相近。1999 年 1 月 8 日停机大修的 2 号机的磨损, 简介于下。

(1) 2 号机的发电时间及负荷, 见表 3。

表 3 2 号机发电时间及负荷表

年份/年	1995	1996	1997	1998	合计
发电时间/h	8 328	6 722	6 944	7 532	29 526*
发电量/亿 kW·h	4 699.8	3 233.8	3 263.9	2 488.1	13 685.6
平均负荷/MW	56.43	48.11	47.00	33.03	46.35

\* 加试运行等未计入时间, 共发电 3 万 h。

(2) 实际泥沙磨损, 除尾水锥管上段环形焊缝外, 通流部件表面都无空蚀痕迹。

导叶(24 个 16-6 熔铸)。上下端面及立面无明显坑状磨损痕迹。24 个导叶叶体下轴颈过渡处, 磨损差别很大。按图加工的磨损轻, 坑槽深 1~3 mm; 没按图加工的鼓包较大, 磨损大, 坑槽深达 8~12 mm, 造成相邻底环抗磨板处损坏坑深也大。

底环抗磨板(13-5 钢板)。自导叶轴孔中心圆至内边缘, 有浅坑波状磨痕, 边缘已磨掉 2~3 mm; 在汛期导叶运行常开位置边缘, 有深 1~2 mm 坑槽; 在导叶内侧下轴颈相邻处, 一般坑槽长 50~100 mm, 宽 20~50 mm, 深 2~8 mm, 但有 4 处损坏严重, 坑槽最深为 13, 17, 20 及 25 mm, 后者磨穿抗磨板至底环普通钢板, 见图 3。固定下止漏环进口下部磨成深 10~12 mm、高 60~100 mm 的半圆环形槽。

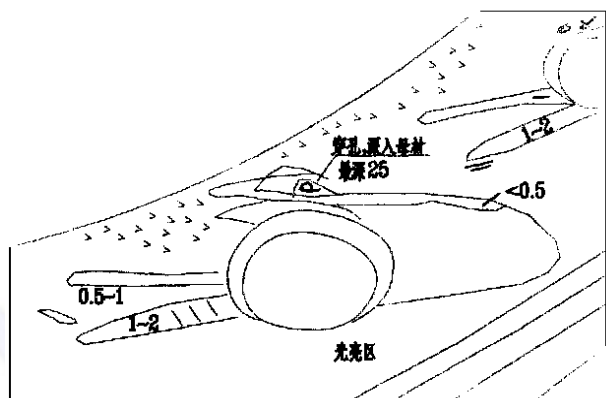


图 3 底环抗磨板磨损图

下止漏进口上段间隙, 从安装时平均 1.45 mm 扩大到 3.2 mm, 单侧平均磨损 0.88 mm。

导叶轴承及橡胶密封圈。导叶下轴承及  $\varnothing 16$  mm 橡胶密封圈均完好无损, 但厚 16 mm 的不锈钢板压盖, 个别局部磨穿。

顶盖抗磨板(13-5 钢板)。损坏比底环抗磨板轻, 上梳齿间隙从 1.25 mm 扩大到 2.2 mm。

转轮。呈磨损坑槽状损坏痕迹的部位有: 叶片进水边下根部背面, 坑深 2~5 mm; 下止漏环进水端部及下部有一个深 3~5 mm 半圆环形槽。叶片出水边正面下部及下环内表面, 呈浅波纹状, 有些米粒状小坑, 离出水边 30 mm 处的实际厚度测量及与出厂厚度比较, 见表 4。占全长约 3/4 的叶片出水边上部, 叶片厚度无变化, 即无磨损; 占全长约 1/4

的叶片出水边下部有磨损, 距下环 127 mm 处已磨损掉约 3.0 mm, 靠下环处磨损约 4 mm。从整体看, 转轮磨损较轻。

(3) 效率下降近似值。据 1999 年 1 月 20 日 4 号机运行 3 年半的仪表数据可知, 发电机 65 MW (设计效率 0.975)、净水头 123.0 m 及流量  $59.7 \text{ m}^3/\text{s}$  工况计算, 水轮机效率为 92.5%, 比设计运行特性图该工况点效率 93% 低 0.5%。

表 4 叶片出水边 30 mm 处的磨损近似值表

(13 个叶片实测平均值)

位置	1	2	3	4	5~10	备注
距下环距离/mm	127	254	381	508	635~1 270	
设计厚度/mm	16.6	15.7	15.6	15.5	15.4	出水边
实际厚度/mm	17.2	16.7	16.5	16.5	16.5	离出水边 30 mm
大修前实测/mm	14.2	14.7	16.2	16.5	16.5	离出水边 30 mm
磨损厚度/mm	3.0	2.0	0.3	0	0	

## 5 磨损特点及对比分析

### 5.1 磨损特点

它与国内大多数水轮机磨损特点比较, 既有共性, 又有明显差别。共性是: 磨损的主要部位相同, 磨损量相对大的部分一致, 局部磨损坑槽形状类似。明显差别表现在它的大部分磨损通流表面, 呈现浅波纹或均匀状磨损痕迹, 这是由于水轮机水流平顺及材料表面均一性品质较好这两个重要因素形成的。

### 5.2 实际磨损与磨损预测的对比分析

#### 5.2.1 招标时的基本要求

- (1) 从运行到第一次吊出大修的间隔时间不低于 4 年。
- (2) 大修前能用关导叶方法正常停机。
- (3) 运行 4 年局部损坏最大坑深不大于 10 mm。
- (4) 转轮叶片出水边不出现锯齿形缺口或穿孔。
- (5) 运行 4 年效率下降不大于 2%。

#### 5.2.2 对比分析

- (1) 实际磨损与预测基本吻合, 比预计略偏轻。
- (2) 底环抗磨板 4 处局部磨损坑槽深度过大, 是因导叶叶体鼓包(未按图加工), 形成局部绕流流速加大和水流紊流造成的。
- (3) 大部分磨损面呈现浅波纹状或均匀状痕迹, 是因水轮机水流平顺及材料表面均一性品质较好所致。

## 6 再认识和改进意见

对太平驿电站的水轮机抗磨措施、效果及沉沙池设置标准, 从不同认识、正常争论、决策直至顺利实现原定目标, 我们汇集了有关实际资料, 并进行了对比分析, 供同行参考。

(1) 采用的水轮机抗磨措施, 主要是选用水力综合性能好及较低比转速的机型, 选用好的耐磨耐空蚀材料制造通流部件, 提高设计制造质量, 这为水轮机长期正常、经济运行和取消常规沉沙池创造了基本条件。

(2) 在过机含沙量较大和粒径偏粗的情况下, 实现了连续、正常、经济发电 4 年 3.0~3.28 万 h 的目标, 技术上达到了较高的水平。

(3) 在当时争论很大的情况下, 设计院推荐和上级审定暂不建(预留)常规沉沙池方案, 建设单位落实了水轮机较好

(下转第 79 页)

段,最大渗流发生在13、14、15和16孔坝段,特别是14孔坝段的渗流量最大,即使在低水位时也有15 L/min,形成沿坝轴线渗漏的“漏斗”。

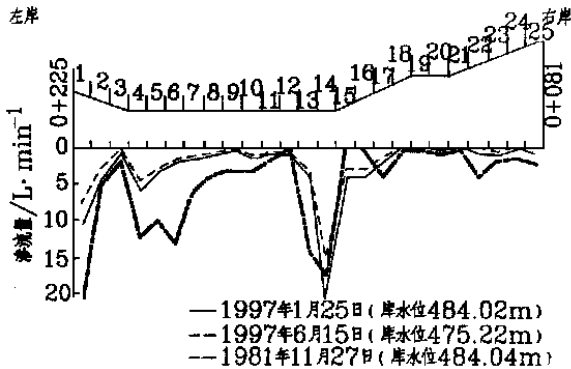


图6 沿坝轴线渗流量分布图

(2)对照大坝整治前的渗流量分布,可以看出,整治前最大渗流量发生在1号孔坝段,2~8孔坝段的渗流量都很大,整治后得到遏止。但补强的防渗帷幕对13~15孔坝段没有作用,渗流量仍很大。这几个坝段应作为监测的重点。

### 5.2 总渗流量

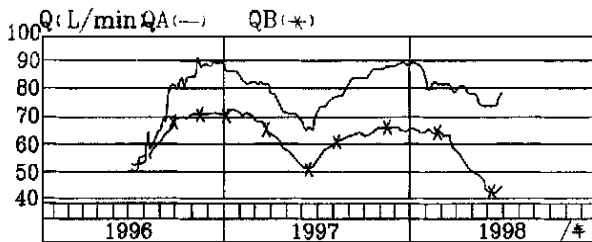


图7 实测总渗流量过程线图

总渗流量有两项:一项是坝基总渗流量(QB),另一项是总渗流量(QA),它除包括QB外,还含坝体和其他渗水。图7为这两项渗流量的实测过程线。

从图7可看到,渗流量与库水位密切相关,即高

水位时渗流量偏大,而且坝基渗流量随时间呈下降趋势。对坝基渗流量作统计计算,建立统计方程:

$$QB = - 727.27 + 1.72H + 0.2429H^2 - 0.2371H^{90} + 0.1756H^{150} - 0.2195H^{180} - 9.3036 \times 10^{-3}T$$

复相关系数  $R = 0.9956$ , 剩余标准差  $S = 0.7319$  L/min。

渗流量与库水位统计关系很好,渗流量比库水位略有滞后。时间因子的回归系数为负值,表明随时间渗水量在下降。

### 6 结语

(1)黑龙滩大坝在采取基础补强灌浆和上游坝面加防渗板等整治措施后,坝基和坝体的渗流情况大有改善,有利于坝体稳定。

(2)整治后坝基渗压荷载小于设计值。

(3)整治后坝基和坝体的总渗漏水下降,特别是1~5号孔坝段尤为明显,但第13~15号孔坝段没有明显减少,并形成了沿坝轴线坝基渗漏的“漏斗”,同时13~17号孔坝段和2、4、5号孔坝段地面仍有基础排水析出的黑色沉淀,是监测的重点部位。

(4)由于补强灌浆主要在坝基进行,所以对照整治前测值,左右岸绕坝渗流水位没有明显变化。

#### 作者简介:

李德荣(1943年-),男,四川双流人,黑龙滩水库管理站站长,高级工程师,从事水库工程管理工作;

张仕申(1953年-),男,四川仁寿人,黑龙滩水库管理站工程师,从事水库工程管理和病害整治工作;

邵乃辰(1937年-),男,浙江嘉善人,国家电力公司成都勘测设计研究院研究所高级工程师,从事大坝安全监测工作;

张晓琳(1945年-),女,四川乐山人,国家电力公司成都勘测设计研究院研究所工程师,从事大坝安全监测

(上接第66页)

的抗磨措施后,最后决策不建也不预留常规沉沙池,都是正确的决策,节省电站总投资的4%及年费用支出少563万元,效益显著,已成为引水式电站类似问题决策的良好先例。

#### (4)进一步研究改进意见:

备用转轮,不宜按原转轮图纸制造,可在国内有实力的3~4家工厂中,招标采购。

改用更好的耐磨耐腐蚀材料。转轮叶片及下环,应用16-5不锈钢钢板制造,抗磨板环及压盖亦采用16-5不锈钢板,成品表面硬度达HB320以上。

导叶及转轮等宜研究采用等离子渗氮处理(表面硬度HV900),磨损量可进一步降低,寿命成倍提高,而处理费不大,是合适的。

研制与16-5不锈钢配套的表面堆焊耐磨焊条。

在电厂考察及收集资料时,得到四川华能太平驿电厂总

工程师唐俊贤及厂长助理程洪先生的热情支持,在此笔者表示衷心感谢。

#### 参考文献:

[1] 李国梁 设置沉沙池必要性论证的关键问题[J]. 水电站设计, 1995 (4).

[2] 李国梁 太平驿水电站不设常规沉沙池的分析[J]. 水电站设计, 1995 (3).

#### 作者简介:

段凌剑(1956年-),男,陕西礼泉人,四川南桤河水电开发公司总经理,高级工程师,曾任太平驿建设管理局副局长及首任厂长,从事机电工程及电站运行工作;

李国梁(1935年-),男,湖南永州人,四川南桤河水电开发公司顾问,教授级高工,曾任水电部成都勘测设计研究院副总工程师,分管该电站机电设计监理工作