

国外长压力引水系统水电站 不设调压井的动态综述

佟文敏

(水电部成都勘测设计院)

一、前言

由于一些工业发达国家水力资源的大力开发,最有利的水电点逐渐减少。近年来大多国家又重新重视中小型水电站的发展。在这些中小型水电站开发点子中,有建设低水头、长压力引水系统水电站的趋势。

由于有些水电站受缓坡地形条件约束,在布置较长的压力引水系统时,为了使机组处于稳定工况运行,就必须布置调压井。但调压井位置又限于地形条件,往往需要延长压力钢管,从而增加了水电站的土建工程量和建设投资。

为了减少水电站的工程量和投资,故提出了在长压力引水系统水电站布置中不设调压井的设想。国外有些水电站经过多年研究实践实现了不设调压井的布置形式。其主要措施之一,是控制机组甩负荷时压力引水系统中的水压上升值,降低到允许的范围内。要想降低压力引水系统中甩负荷时的水压上升,一般采用如下几种措施:

1. 加大发电机的转动惯量(GD^2);
2. 延长水轮机导叶的关闭时间,提高甩负荷时的转速允许上升值;
3. 减缓导叶的关闭速度,使用甩负荷时允许机组处于飞逸转速下旋转;
4. 采用水斗式水轮机;
5. 采用装设调压阀的混流式水轮机。

上述第一项,只适于较短的压力引水系统。下面就上述几项措施分别予以叙述。

二、采用水斗式水轮机

水电站水头在300米左右时,大多仍采用混流式水轮机,但也有采用水斗式水轮机的。当长压力引水系统的水电站,在大多时间内处于部分负荷工况下运行时,水斗式水轮机的加权平均效率就有可能高于混流式水轮机的加权平均效率。故经过比较后,采用水斗式水轮机的,有增加趋势。

水斗式水轮机与混合式水轮机相比,水斗式水轮机的优缺点如下:

1. 即便很长的压力引水系统,也可控制缓慢关闭喷针,使引水系统中的水压上升率不大于10%,故此可省去调压井;

2. 由于可以快速关闭折流板控制甩负荷时的转速上升率,并可借助折流板以调节转速和出力,即使在长压力引水系统情况下,也可采用具有通常转动惯量的发电机;

3. 由于水斗式水轮机具有在部分负荷时的效率比混流式水轮机高的特性,在担任部分负荷运行工况时间较长的水电站(尤其引水式水电站),其年发电量可比混流式水轮机多10~20%;

4. 在多泥沙河流情况下,水轮机的维修或检修只需更换转轮、喷咀保护环和喷针头等少数部件。而且更换这些部件时又不拆卸水轮机本体和发电机,可从水轮机机坑内部进行装卸和修理,所需检修工时较混流式水轮机少得多,备品备件也较混流式水轮机少。

水斗式水轮机的缺点:

1. 水斗式水轮机的转速与混流式相比约低1/2。例如,混流式水轮机的最优单位转速约为70转/分,水斗式水轮发电机的最优单位转速约为40转/分。当水头在300米左右时,水斗式水轮发电机本体价格约比混流式水轮发电机贵30~50%;

2. 水斗式水轮机的最高效率比混流式低1~2%;

3. 以往水斗式水轮机喷针采用外接力器控制,机组分块尺寸有时稍大于混流式水轮机的分块尺寸;

4. 水斗式水轮机转轮中心安装高程要高于最高尾水位,水轮机有效水头比混流式水轮机低。

为改善上述的缺点,近十几年来采取以下办法予以补偿。

1. 改善了多喷咀水斗式水轮机的射流干扰现象,使其比速提高15~20%;

2. 采用直线式内控喷咀结构,缩小了机组分块尺寸,与外接力器相比约减少20~30%;

3. 采用反压条件运行方式(在洪水期采用压缩空气压水与回气两部分组成的反压条件),增大了水斗式水轮机的有效水头。

表1为装有水斗式水轮机不设调压井的长压力引水系统的水电站实例。其中表1的弗塞尔、巴蒂娜、苏丹水电站装有调速器,无稳定问题。其他几座水电站由于压力引水系统太长,难以进行调节运行,为节省投资省去了调速器装置。

三、采用缓慢关闭导叶的混流式水轮机

1. 藉延长混流式水轮机导叶的关闭时间(数分钟以上),也可使长压力引水系统水电站的水压上升率控制在10%以内。

混流式水轮机在甩负荷工况下约10秒钟即可达到飞逸转速。由图1可以看出,能采用这种方式的机组限于比速为200~300米·千瓦,即水头40~100米的水电站。表2为采用这种方式的实例。

2. 采用这种方式甩负荷时,在飞逸转速工况

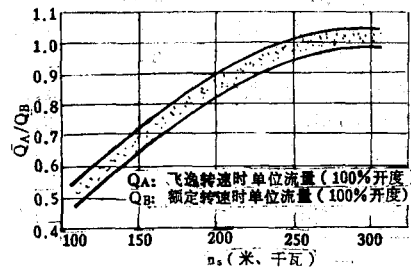


图1 混流式水轮机流量特性

表1 装有水斗式水轮机长压力引水系统不设调压井的水电站实例

电 站 名 称		弗塞尔 (Fisher)	巴蒂娜 (Poatina)	圣·地马斯 (San·Dimas)	约巴·朗达 (Yorba·Linda)	金字塔 (Pyramid)	塞波维达 峡谷 (Sepulveda·Canyon)	苏丹 (Sultan)
国 家		澳大利亚		美国	美国	美国	美国	
水 轮 机 型 式		立轴, 单转 轮, 四喷嘴	立轴, 单转 轮, 四喷嘴	立轴, 单转 轮, 四喷嘴	立轴, 单转 轮, 五喷嘴	立轴, 单转 轮, 六喷嘴	立轴, 单转 轮, 四喷嘴	立轴, 单转 轮, 六喷嘴
有效水头	米	609.6	829.1	136.2	61.4	198.1	111.56	339.85
水轮机出力	万千瓦	4.75	6.25	1.015	0.51	3.80	0.88	5.70
水轮机流量	米 ³ /秒	8.84	8.76	8.495	9.63	22.1	13.45	19.21
转速	转/分	500	600	200	120	200	120	257
压力引水系统长度	米	5116	2740	4000	28000	8840	26500	12427
压力引水系统平均 流速	米/秒	3.97		1.82	1.32	2.11	2.8	4.61 (四台运行)
引水系统 ΣVL	米 ² /秒	20308		7280	36960	18652	74200	57288
水流惯性时间常数*	秒	3.4		5.45	61.4	9.61	67.9	17.2
转动惯量	米 ² ·吨	412	520	380	550	1810	780	1423
机组惯性时间常数**	秒	5.94	8.2	4.12	4.24	5.2	3.5	4.5
水压上升率	%	10	5	2	13	16	0	25
转速上升率	%	25	17	20	20	15	20	25
喷嘴关闭时间	秒	120	300	1500	1800	200	4950	300
投入运行年份		1973	1978	1981	1982	1982	1982	1984

表2 缓慢关闭导叶的混流式水轮机

水 电 站 名 称		菲 德 尔 (Feeder)	维 尼 斯 (Venice)	柯 洛 那 (Corona)	培 雷 斯 (Perris)	洪 多 (Rio·Hondo)	克 莱 克 (Creek)
水 轮 机 型 式		立 轴	立 轴	横 轴	立 轴	横 轴	横 轴
有效水头	米	62.8	111.3	44.2	54.25	71.02	72.54
水轮机出力	千瓦	4670	10400	2950	8160	1960	3230
水轮机流量	米 ³ /秒	8.5	13.45	8.5	16.99	3.12	4.96
转 速	转/分	600	600	600	514	1200	900
压力引水系统长度	米	1310	11200	12000	4400	13680	14320
压力引水系统平均流速	米/秒	0.65 (二台运行)	2.88	1.44	2.33	1.19	1.06
压力引水系统 ΣLV	米 ² /秒	852	32275	17280	10250	16279	15179
水流惯性时间常数*	秒	1.38	29.6	39.9	19.3	23.39	21.35
尾水洞长	米	23200	3200	15200	18390	12112	2500
尾水洞平均流速	米/秒	0.56	3.07	1.44	1.93	1.19	1.08
尾水洞 ΣLV	米 ² /秒	12869	9826	21888	35439	14413	2657
尾水洞水流惯性时间	秒	20.9	9.0	50.5	66.76	20.7	3.74
转动惯量	米 ² ·吨	6.5	30	2.9	48	0.7	0.9
机组惯性时间常数**	秒	1.37	2.85	0.97	4.2	1.4	0.61
水压上升率	%	5.1		8	16		
转速上升率	%	101	122	97	143	100	106
导叶关闭时间	秒	900	900	900	1800	420	420
投入运行年份		1980	1982	1983	1983	1984	1984

* $T_w = \Sigma LV / gH$;

** $T_a = G D^2 \cdot n^2 / 365 \cdot N$

下要运行10分钟左右,故水轮发电机组的转动部件及各轴承必须满足能承受长时间在飞逸转速工况下运行的要求。

3. 因加长导叶关闭时间,不得不牺牲其调节控制特性,为此可不设调速器,只设出力调节装置。

由于加长导叶关闭时间,采用电动机操作可减小电动机容量以节省投资。

采用延长导叶关闭时间的方式可大为降低水电站投资,这是今后中小型水电站设计时值得研究的问题。

四、采用装设调压阀的混流式水轮机

1. 装设调压阀混流式水轮机的实际情况

长压力引水系统的水电站,为了降低和控制引水系统的水压上升值,很早以前就有装设调压阀的布置方式。但在设计上大多还考虑调压阀拒动工况来设计压力钢管,为此就不能降低压力钢管的投资。由于这种原因,近20年来几乎都不再考虑装设调压阀。

如果山体斜坡地形舒缓,若布置调压井往往会远离厂房,无疑增长压力钢管,也不能发挥调压井降低水压上升值和提高水轮机的调节性能。欲缩短压力钢管,又必然增大调压井的工程量和建设投资。为此,国外有些水电站为节省投资而采用装设调压阀,不设调压井的布置方式。此时压力钢管按调压阀动作水压设计。由于调压阀还有可能拒动,而使压力钢管产生破坏,所以就要设计制造动作完全可靠的调压阀及其控制装置。另外还要考虑万一调压阀拒动,可转换缓慢关闭导叶的切换装置,或在压力钢管上装设安全泄压装置。

装设调压阀通常使水轮机在限制负荷工况下运行,调压阀处于全关状态,进行所谓“节水方式运行”(Water saving operation)。另一种是借助调速器进行调节使导叶和调压阀协联,保证水轮机和调压阀合计流量恒定的所谓“同步旁通方式运行”(Synchronous By-pass operation),即耗水方式运行。当水轮机停机时调压阀可以开启保证向下游供水。

2. 装有调压阀混流式水轮机的水锤现象

设在有效水头 $H=200$ 米,导叶关闭时间 $T_s=4$ 秒、压力钢管内的平均流速 $V_m=3$ 米/秒、水流传播速度 $a=1000$ 米/秒情况下,改变压力钢管长度 L (米)、水轮机流量 Q_T (米³/秒)和调压阀最大流量 Q_R (米³/秒)之比以及调压阀的不动时间 T_d (秒),以这些参数用电子计算机进行计算,得出不同条件下甩负荷的水压上升结果示于图2、

3。

自图2看出,随压力钢管长度的增长,调压阀拒动和动作时的水压上升率差值很大。当压力钢管长度大于 $\frac{a \times T_s}{2} \approx 500T_s$ (米)时,其差值恒定。即调压阀的效果随管道长度而增大。

图3反映了调压阀的不动时间对调压阀动作时水压上升率的影响很大。欲控制降低水压上升率,就必须极力缩小调压阀的不动时间。

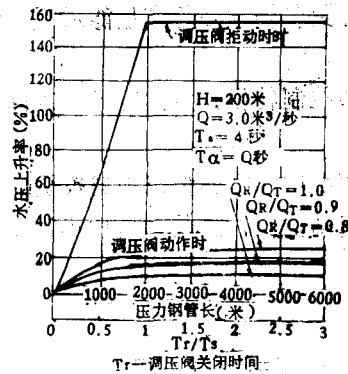


图2 装有调压阀混流式水轮机的水压上升(甩全负荷)

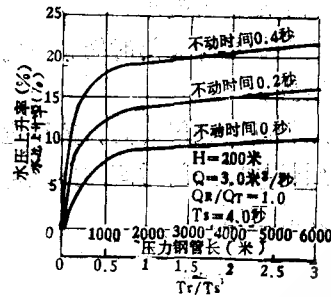


图3 调压阀不同不动时间对水压上升的影响

表3 示出装有调压阀混流式水轮机水电站的一些参数。

表3 装有调压阀的混流式水轮机

水电站名称		列曼茨姆 (Lemonty -yite.)	莫特 (Wilmot)	约旦河 (River)	维玻利二级 (Waipori II)	下沃泊尼 (Lower Borpani)	苏丹河 (Sultan River)	约尼斯支流 (Jones Fork)
水轮机型式		立轴	立轴	立轴	立轴	立轴	横轴	立轴
有效水头	米	146.3	244.8	289.6	195.5	239	205.74	175.87
水轮机出力	万千瓦	5.82	3.29	18.27	2.41	5.15	1.26	1.21
水轮机流量	米 ³ /秒	43.5	14.8	70.0	13.8	62.2	6.13	7.9
转速	转/分	300	600	257	600	500	900	600
压力引水系统长度	米	7811	4618	7440	783.72	768	12427	2965
压力引水系统平均流速	米/秒	2.24	1.69	4.9	9.994 (三台运行)	4.46 (二台运行)	4.61 (四台运行)	3.10
压力引水系统 ΣLV	米 ² /秒	17497	7804	35460	7833	3429	57288	9205
水流惯性时间常数	秒	12.2	3.26	10.8	4.1	1.46	28.4	5.34
机组转动惯量	米 ² ·吨	1125	219	7230	132.5	500	27	50
机组惯性时间常数	秒	4.76	6.57	7.16	5.42	6.65	4.76	4.06
水压上升率	%	13	12.4	9.6	15.0	12.7	25.0	30.0
转速上升率	%	42	45	50	30	30	40	50
导叶关闭时间	秒	5.0 (360)	7.0 (200)	8.5 (200)	6.0 (80)	4	5	5 (274)
调压阀运行方式		节水	节水	节水 同步旁通	节水 同步旁通	节水	节水 同步旁通	节水 同步旁通
投入运行年份		1969	1971	1971	1975	1984	1984	1984

注: () 内数值为调压阀拒动时缓缓关闭导叶的时间。

五、装设调压阀的水电站

1. 维莫特水电站(澳大利亚)

因本电站压力引水系统长4.6公里,装设了横轴调压阀。压力引水系统水流惯性时间常数(T_w)约为机组惯性时间常数(T_s)的1/2(大致满足NEMA的稳定条件)。为使水轮机满足负荷变化的调节能性和随动性,装有调速器,在通常情况进行节水方式

运行。

图4为甩负荷时的试验曲线。水压上升率为8%，调压不动时间0.29秒。

为更可靠起见，在靠近主厂房附近的压力钢管上装设了安全阀。

本电站自1971年运行以来，情况良好。

2. 列曼茨姆水电站（澳大利亚）

本电站即便布置调压井，压力钢管也很长，水轮机难以起调节作用。故不设调压井，也不装调速器，采用如图5的简易且可靠性高的控制装置（日本专利1969—19281）。

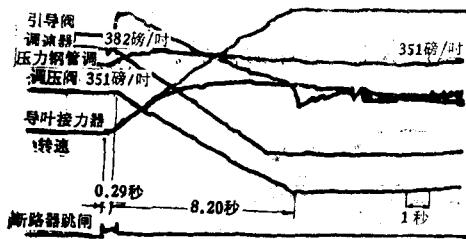


图4 维莫特水电站甩负荷试验结果

导叶接力器的容量，所以导叶既便于动作也不影响调压阀。

本方式只要液压连接管路不破坏，就能确保调压阀和导叶协联，因不动时间为零，故可控制降低水压上升率。现场甩负荷试验结果，其水压上升率为8%。另由于本方式在调压阀拒动时要关闭导叶，为安全可靠起见，在压力钢管上装设了安全阀。

本电站自1969年运行以来，情况良好。

3. 约旦河（加拿大）

本电站为混流式水轮机，机组出力18.3万千瓦，水头290米。电站引水系统是由长5750米、公称直径 $\phi 4.9$ 米的D形压力隧洞和长1400米、内径 $\phi 2.7 \sim \phi 3.2$ 米的压力钢管组成。可以在距主厂房1600米附近布置经济合理的调压井。但布置调压井后，压力钢管的水流惯性时间常数也大（ $T_w \cong 6$ 秒），难以使水轮机进行稳定调节运行。因设置调压井也不能控制水压上升率在允许范围之内，故省去调压井装设调压阀。

调压阀除主接力器外，还直连一个与导叶接力器同等容量的辅助接力器。因该辅助接力器与导叶接力器用液压管路相连，所以在甩负荷时利用配压阀 V_2 ，使调压阀首先急速开启，靠辅助配压阀的作用使导叶急速关闭。

在正常情况下，调压阀处于全关状态，导叶藉负荷限制装置控制配压阀 V_1 ，以360秒的时间进行开关。因为调压阀接力器的容量大于

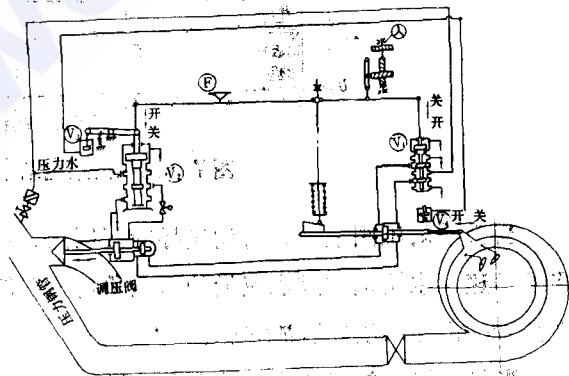


图5 列曼茨姆水电站水轮机调压阀控制系统

另一方面,本电站在通常情况下,靠负荷限制装置进行节水方式运行,但因要求机组能单独运行,故装设调速器进行必要的同步旁通方式运行。

以往由于使用缓冲装置的控制方式,不仅降低了可靠性,也难以实现同步旁通方式运行,故采用图6所示的控制方式(日本专利,1975—11527)。图中A为调速配压阀接力器的行程;B为调压阀的开度;C为负荷限制装置的整定开度;D为导叶开度。在限制负荷工况下 $C=D$,所以 $B=0$,进行节水方式运行。在调节状态下因保持 $B=C-D$,所以可进行同步旁通方式运行。正常运行时允许水压上升率为10%。

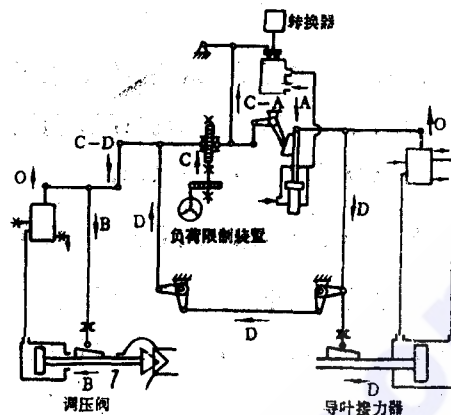


图6 约旦河水电站水轮机调压阀控制系统

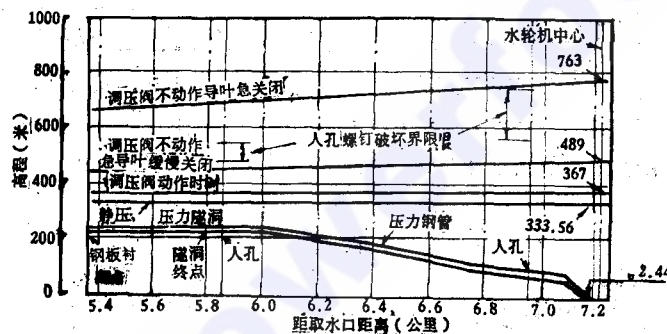


图7 约旦河水电站水锤压力分布

当万一调压阀拒动,可切换导叶配压阀,使导叶缓慢关闭。此时水轮发电机组处于飞逸转速,水轮机的过水流量约为全负荷工况的65%,为此产生约50%的水压上升,压力钢管的设计水压应增加36%。

当导叶缓慢关闭装置拒动而发生异常状态时,将产生约130%的水压上升,压力钢管的应力将为设计应力的2.1倍。为防止在此异常状态下损坏隧洞和压力钢管,在压力钢管两处设人孔,其人孔盖板起安全阀作用。图7为各种运行状态下的水锤压力分布线。

在电站试运行进行了详细的过渡过程试验和调压阀特性试验,用电子计算机分析对比了过渡过程的结果,积累了一些宝贵数据。

本电站自1971年运行以来,情况良好。

4. 维玻利二级水电站

本电站在利用原有压力引水系统基础上增装一倍容量,因此提高了引水系统的平均

流速，并用混流式替换了水斗式水轮机，降低了引水系统的允许水压上升值，故装设了调压阀。为提高调压阀的可靠性，采用了与列曼茨姆水电站相同的导叶接力器与调压阀接力器液压协联的控制方式。但因要求水轮机具有调节性能和能进行节水与同步旁通两种方式运行，故研制了图8所示的控制系统（日本专利，1978—10223；美国专利4168935）。这种系统方式兼备了动作可靠性和运行多样性，同时对选定装设调压阀地点的活动裕度大，又适于大型机组。

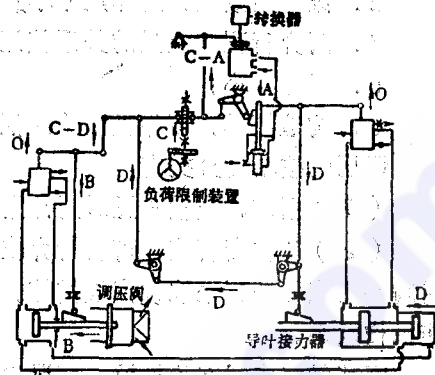


图8 维玻利二级水电站水轮机调压阀的控制系统

图9为甩负荷时的试验结果，调压阀不动时间为零，水压上升率低。

本电站自1975年运行以来，情况良好。

5. 苏丹河水电站

本电站压力引水系统长12.4公里。四台机组同接在一根压力钢管上，主厂房内安装了两套出力5.7万千瓦立轴六喷嘴的水斗式水轮发电机组和两套出力1.26万千瓦的混流式水轮发电机组。

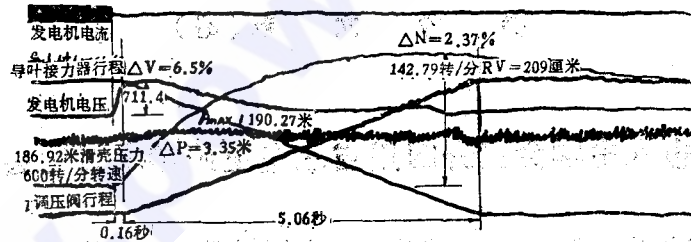


图9 维玻利二级水电站甩负荷试验结果

自混流式水轮机出来的水直接经长6.1公里尾水隧洞向比厂房还高约100米的贮水池供水。因为在停机状态下要经常保证向下游贮水池供水，因此，采用了消能性能良好的多射流孔调压阀。

调压阀控制装置用机械协联代替了上述电站的液压协联。机械协联方式操作配压阀，由于操作联杆机构而使造价增高，可靠性也较液压协联差。

六、调压阀

对调压阀有如下要求：

1. 消能效果好，即振动噪音小，要靠调压阀本体和泄水管内消能，不能因消能而另建消能的水工建筑物；
2. 发生的汽蚀轻微；

3. 流量系数大, 阀体尺寸小重量轻;
4. 阀弁行程和流量的关系接近直线;
5. 操作力小;
6. 构造简单, 可靠性高(无拒动)。

调压阀按结构分类有:

(1) 锯式, 横轴布置时阀体露出外面, 因阀体后直接拐弯, 振动噪音大。

(2) 滑动套管式, 可动滑弁位于阀体内部的结构, 操作力小, 操作结构简单, 但对阀弁出流部分要采取抗汽蚀措施。可动滑弁位于阀体外部的结构, 操作力虽小, 但操作机构复杂。

因其射流成圆锥状扩散, 藉泄水管中的水气混合而消能。

(3) 多射流孔式, 虽属滑动式的一种, 但是从很多小孔射流出水, 容易消能, 振动噪音小。其缺点是流量系数小、尺寸大、重量重、价格高。

结 语

上面介绍了国外一部分长压力引水系统水电站不设调压井和采用调压阀取消调压井的实践, 同时也介绍了简易的导叶和调压阀液压协联系统的控制方式, 供结合我国实际情况和已有的经验加以改善, 降低水电站造价、加快其建设速度的参考。

参 考 文 献(略)

省水电学会召开四川省水电电源学术讨论会

为研讨四川省水电开发程序, 加速水电建设, 省水电学会于1984年7月23日至29日在成都召开了“四川省水电电源学术讨论会”。会议由学会付理事长蔡家鲤、曹秉铨同志主持, 参加会议的有常务理事杨渭文, 付秘书长陈家远、李远惠同志, 水能规划及动能经济专委会全体委员以及从事水能规划工作的有关专家、学者共三十余人, 会议宣读了九篇学术论文, 并进行了充分讨论。

讨论会根据四川水能资源情况、重点河流规划现状、系统发展概况, 一致认为在四川系统中除拟建的瀑布沟、太平驿两水电站外, 必须首先开工建设二滩水电站。要求省领导及早作出决策, 争取早日开展二滩施工准备工作。同时还应加速进行瀑布沟的前期工作, 力争2000年前投产。此外, 充分利用省内力量搞一些中型点子, 如南桄河冷勒水电站等作为过渡。

讨论中还提出了不少集资措施的具体建议, 并一致认为要加快四川能源建设不仅是国家的事, 而必须把国家和地方的利益更加紧密地结合在一起, 充分发挥地方的积极性。与会代表还认为领导决策与筹集资金是加快水电建设的关键, 措施必须及时跟上, 否则临渴掘井, 将贻误战机, 陷于被动。

这次讨论会还本着为四川省“富民”、“升位”献计献策的精神, 提出不少改革体制的建议, 作为学会的建议书上报。

四川省水力发电工程学会水能规划及动能经济专委会

一九八四年七月二十七日