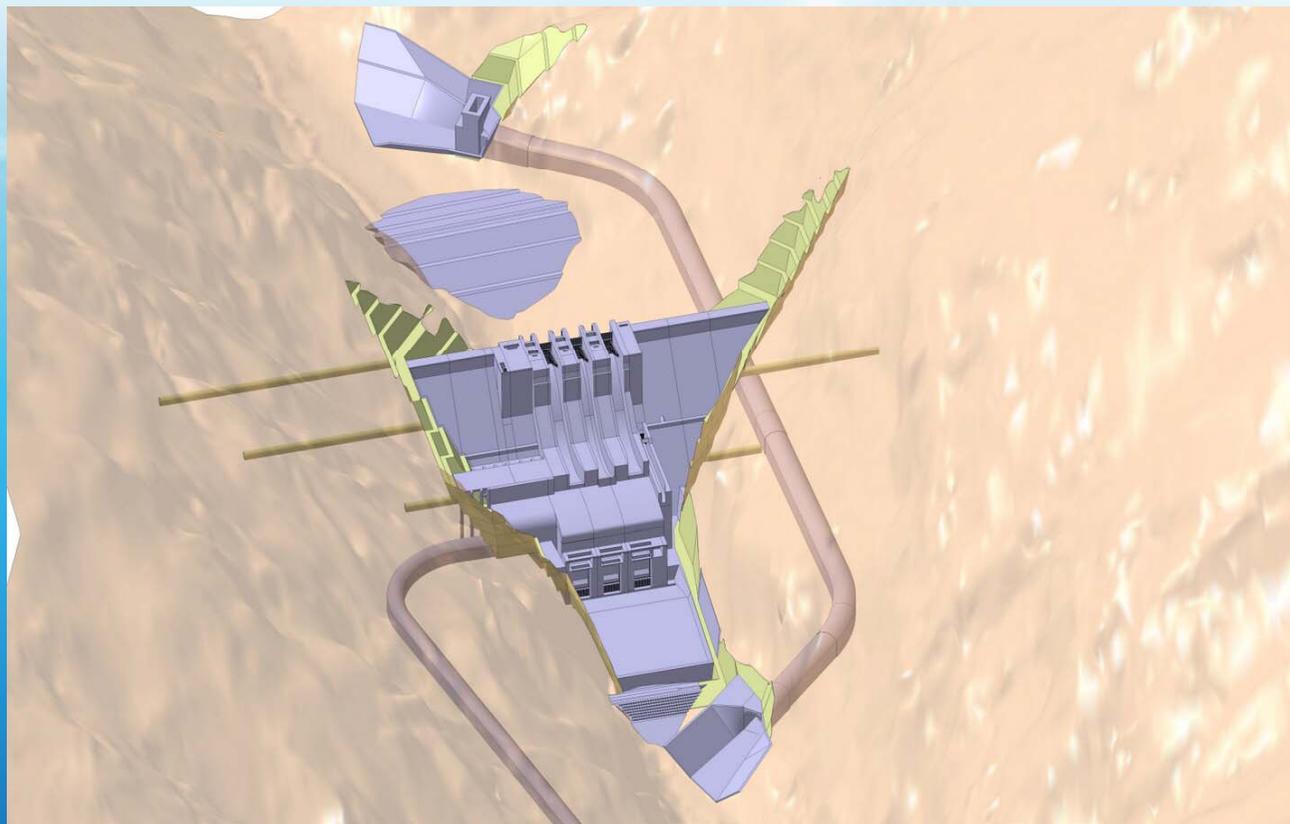




贵阳勘测设计研究院有限公司
GUIYANG ENGINEERING CORPORATION LIMITED



峡谷区高混凝土坝重叠式枢纽布置

中国电建集团贵阳院 陈海坤



汇报主要内容

- 一、引言
- 二、达维工程重叠式枢纽选择
- 三、重叠式枢纽工程调研
- 四、达维工程泄洪消能布置研究
- 五、达维工程厂坝结构设计研究
- 六、结论

一、引言

布置在高山峡谷地区的混凝土高坝枢纽，往往受地形地质条件的限制，给“厂、坝、泄”三者的合理布置带来了很多困难。当然，布置在狭窄河床上的混凝土高坝枢纽，可归结为**厂、坝集中布置**或**分散布置**这两种典型布置型式。

◆分散布置的厂房往往选择地下式，把主河床全部留给泄洪系统，总的来说，地下式厂房可使工程布置具有较大的灵活性，能因地制宜利用有利的自然条件。当然，分散布置的地下厂房枢纽也有施工系统复杂的弊端，还有厂内噪音大，照明、通风、防潮条件差的不足。

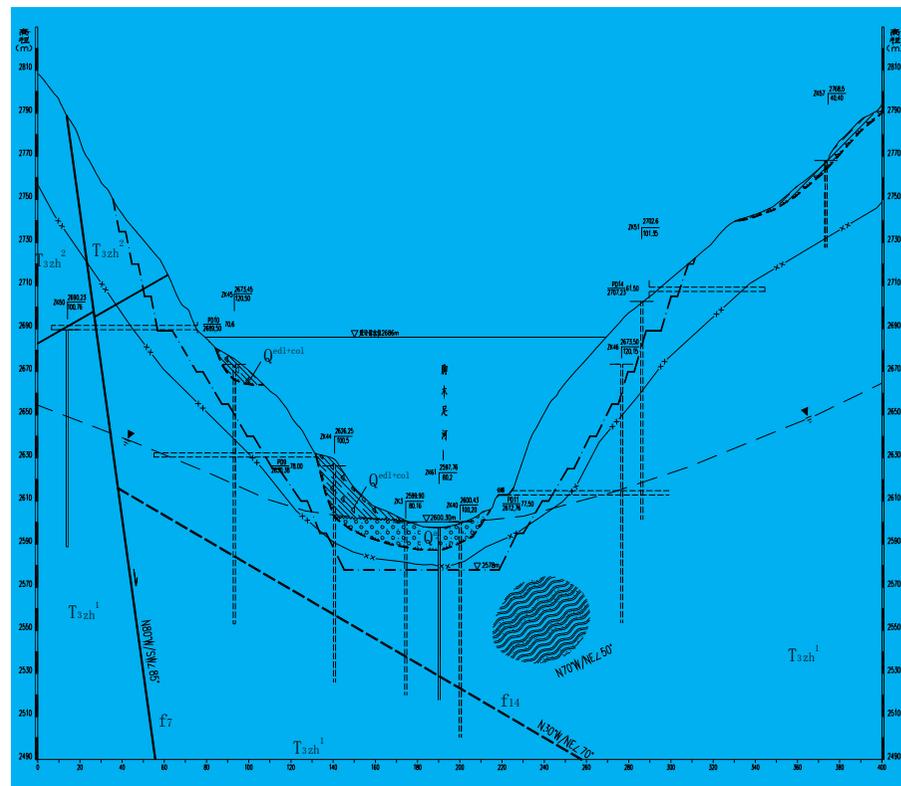
◆集中布置的高坝枢纽往往布置为坝后式厂房，尤其是坝后厂前挑流或厂顶溢流式重叠布置型式更能充分利用河床空间，合理解决厂、坝、泄布置上“争”位置的矛盾，在峡谷地区有明显优点也存有缺点，值得研究。



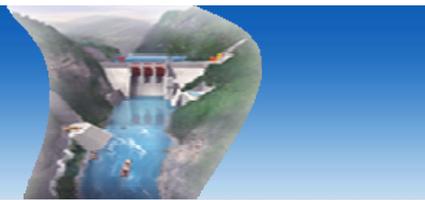
现就布置在川西高山峡谷地区的达维水电站及其重叠式枢纽布置的选择及设计体会介绍如下。

二、达维重叠式枢纽选择

达维水电站位于川西高山峡谷区，是大渡河上游干流规划中的第三个梯级电站，以发电为主，采用坝式开发。最大坝高111m，装机300MW，引用流量约424m³/s，最大洪量3550m³/s。工程具有“大坝较高、泄量较大、河谷狭窄”的特点，坝址呈对称的“V”型近横向峡谷，两岸基岩裸露，枯期水面宽约30m，正常蓄水位时谷宽约180m。坝址为中陡倾的砂板岩夹千枚岩地层。枢纽区地震设计烈度为Ⅶ度。



二、达维重叠式枢纽选择



根据上述自然条件，对坝型曾进行混凝土面板堆石坝、粘土心墙堆石坝、碾压混凝土重力坝和拱坝四种坝型全面比较，最终择优推荐碾压混凝土重力坝为选定坝型。

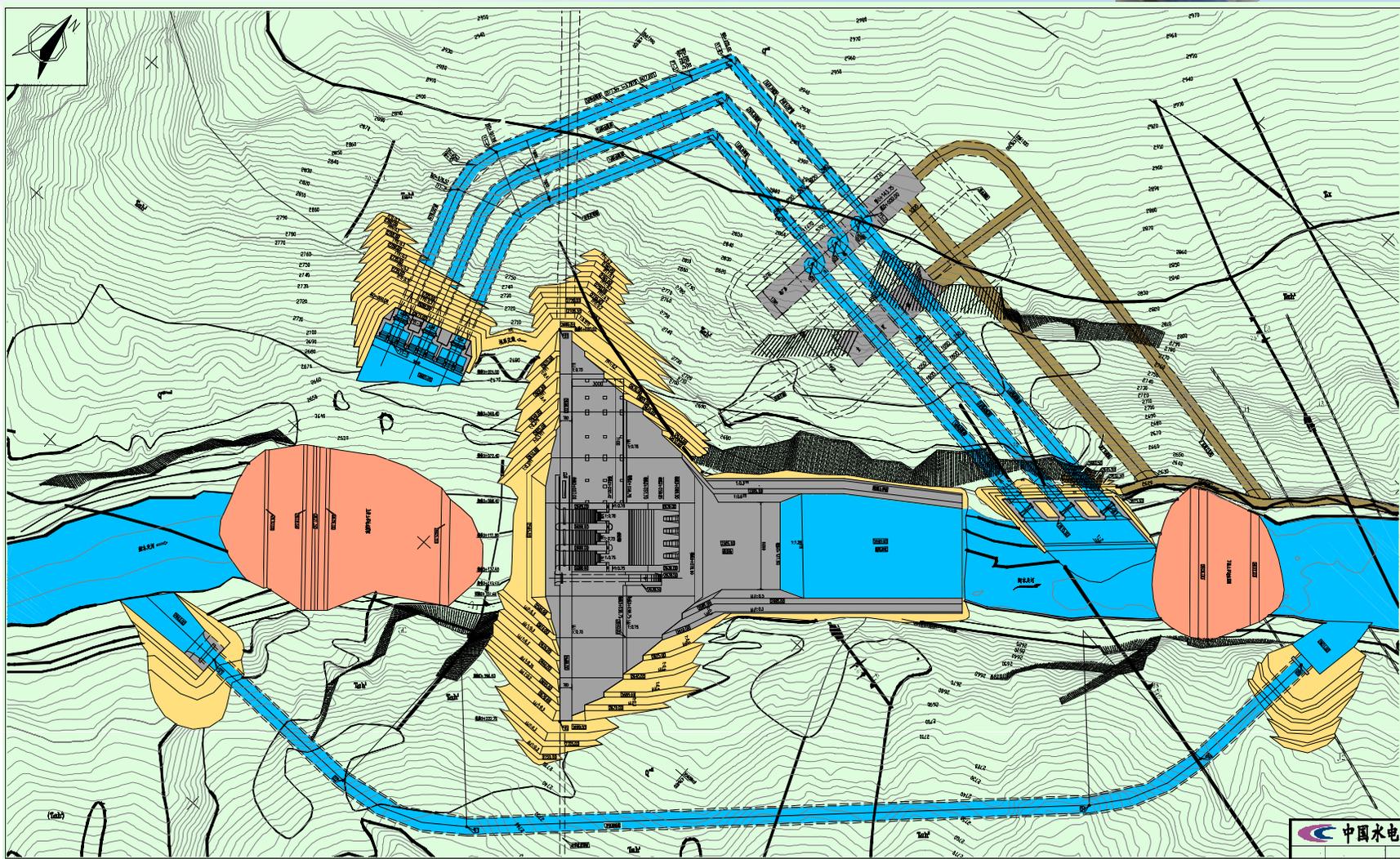
在选定RCC重力坝坝型的基础上，进行枢纽布置比选，最终归结为左岸地下厂房枢纽与重叠式河床厂房枢纽两种布置方案进行深入比选。

◆方案1：碾压砼重力坝+坝身泄洪+左岸引水系统+左岸地下厂房

◆方案2：碾压砼重力坝+坝身泄洪+坝后厂前挑流式厂房引水发电系统

二、达维重叠式枢纽选择

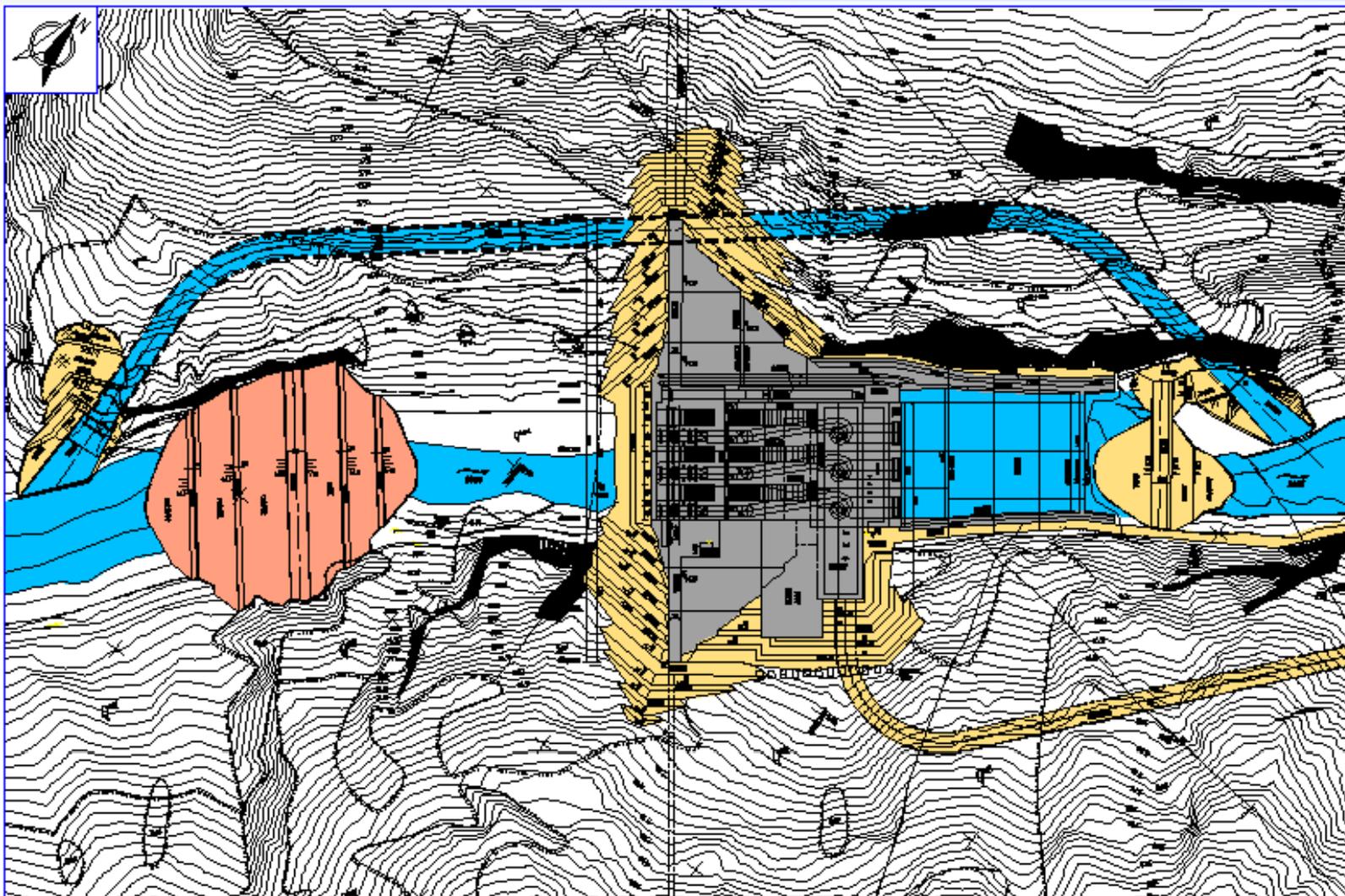
分散布置：地下厂房枢纽方案



枢纽组成：碾压砼重力坝+坝身泄洪+左岸引水系统+左岸地下厂房；
导流洞布置在右岸，为枯期导流标准。

二、达维重叠式枢纽选择

集中布置：坝后厂前挑流式厂房枢纽方案



枢纽组成：碾压砼重力坝+坝身泄洪+厂前挑流式坝后厂房；

最大坝高111m，泄洪孔口与前相同，挑流鼻坎抬高，中墩加厚以布置坝身引水系统；底孔设于左侧。导流洞布置在左岸，为全年导流标准。

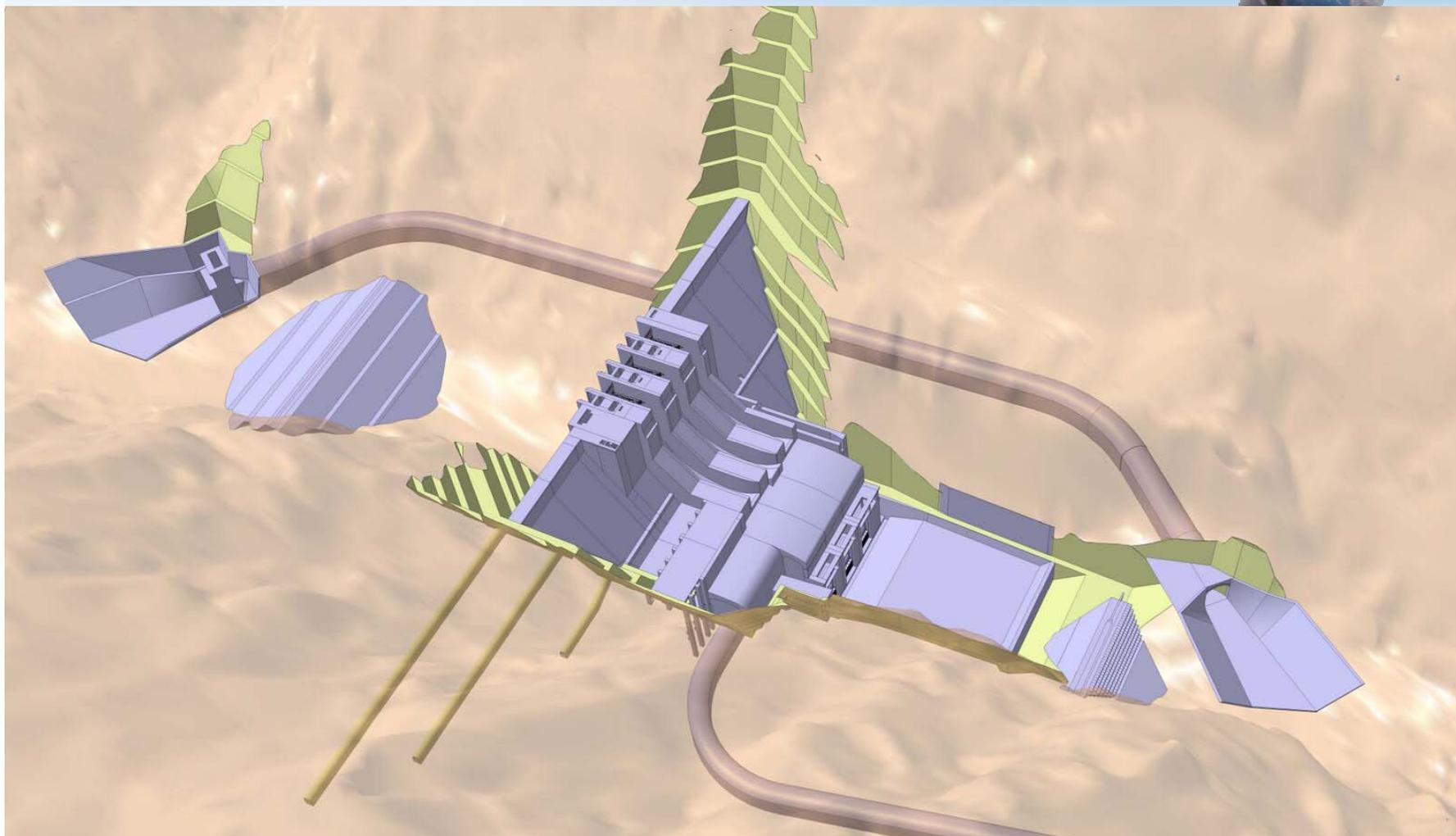
二、达维重叠式枢纽选择

枢纽布置方案综合比较表

项目	坝后厂房方案	地下厂房方案	比较结果	
地形地质利用条件	大坝及泄洪系统地质条件两方案相同，进水口等引水系统布置于坝身，厂房基础地质条件较好，能满足要求。	进水口需加强支护处理。引水隧洞总体围岩条件较好。地下厂房总体具备成洞条件，围岩局部稳定性差，需加强支护处理。	坝后厂房方案优	
枢纽布置条件	枢纽布置格局	引水发电系统由坝式进水口、坝内埋管、坝后厂房等组成。引水发电系统与大坝结合重叠布置为坝后厂顶溢流式，结构较复杂，但引水线路大为缩短，引水及厂房工程量小。	大坝及泄洪系统两方案基本相同，引水发电系统布置于左岸，为地下厂房。大坝与引水发电系统分开布置，引水发电建筑物工程量相比较大。	坝后厂房方案优
	边坡工程	坝肩边坡两方案相同，仅存在右岸安装间小范围边坡，支护处理量较小。下游消力池边坡范围略大。	枢纽方案边坡整体稳定，除坝肩边坡外，还存在进水口和尾水出口边坡，范围及支护处理量相对较大。下游消力池边坡范围略小。	坝后厂房方案优
	泄洪布置及消能条件	泄洪建筑物与坝后厂房结合重叠布置，受厂房一定限制。溢流净宽与两方案同，因闸墩长度及厚度大，使泄水及消能建筑物布置宽度增加，除挤占河床外尚需适当开挖。	河床布置3个溢流表孔，右侧布置底孔，与厂房分开布置。泄水及消能建筑物布置适应河床宽度。	地下厂房方案优
运行条件	厂、坝结合布置为坝后封闭式地面厂房，运行、维护等管理方便，但尾水受泄洪影响相比较较大，抗震方面略差。	厂、坝分开布置，相对分散，运行管理条件相比较差。地下厂房抗震方面较为有利；	各有优劣	
施工条件	全年导流规模及投资较大，坝后厂房施工干扰大，技术要求高，工期相当。	地下洞室施工难度较大，枯期导流规模及投资相对较小，工期相当。	各有优劣	
工程投资	静态投资：355962万元，比地下厂房方案少6041万元。	静态投资：362004万元，比坝后厂房方案多6041万元。	坝后厂房方案优	

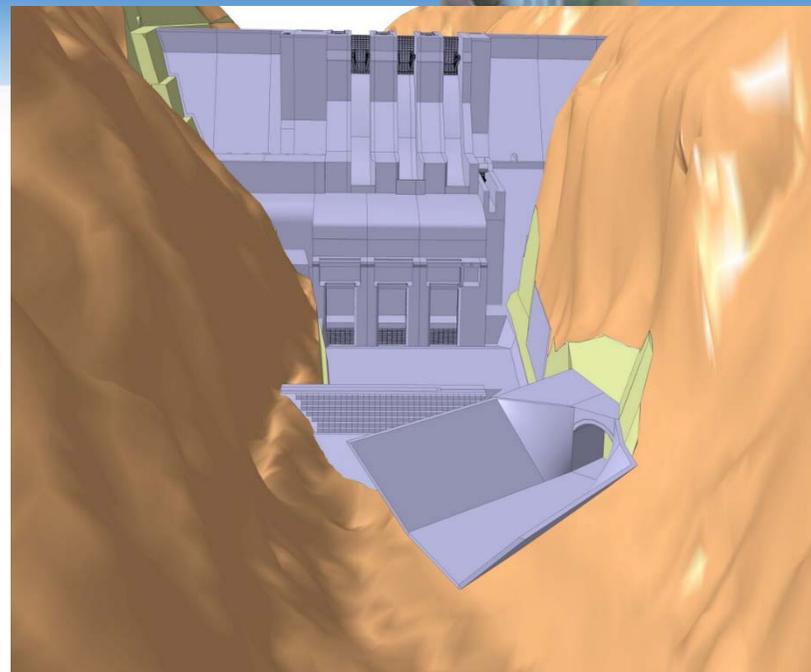
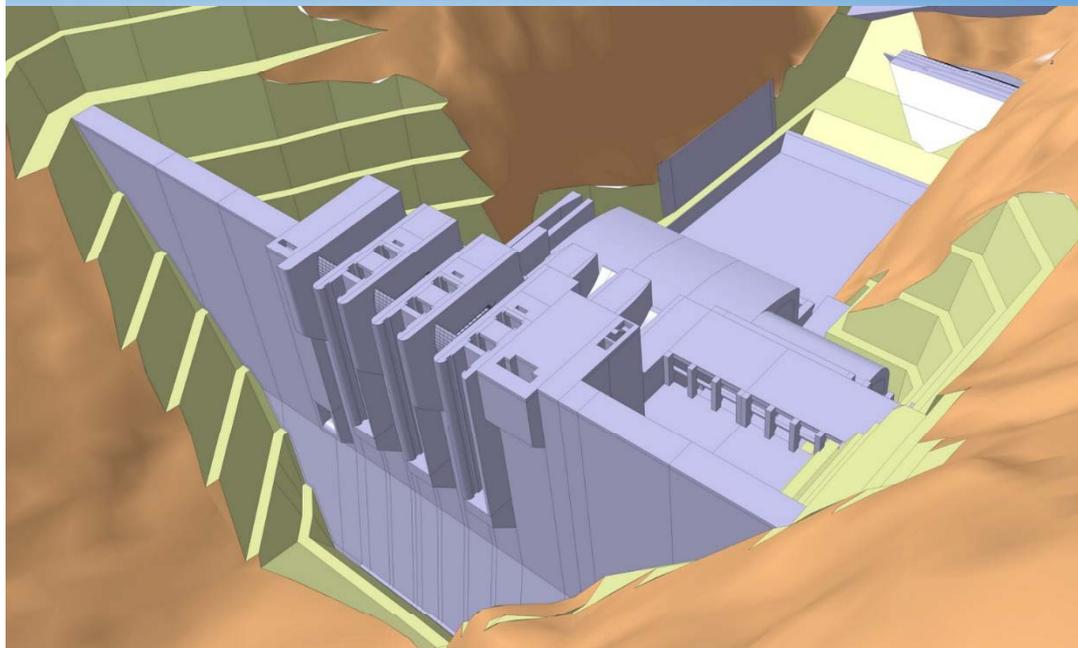
经综合比较，两种枢纽方案均是可行的，各有优缺点。坝后厂房方案具有引水道短、布置紧凑、运行管理集中的优点，对狭窄河谷的地形地质条件有较好的适应性，工程投资较省。因此，选择坝后厂前挑流式重叠布置枢纽为推荐方案。

二、达维重叠式枢纽选择

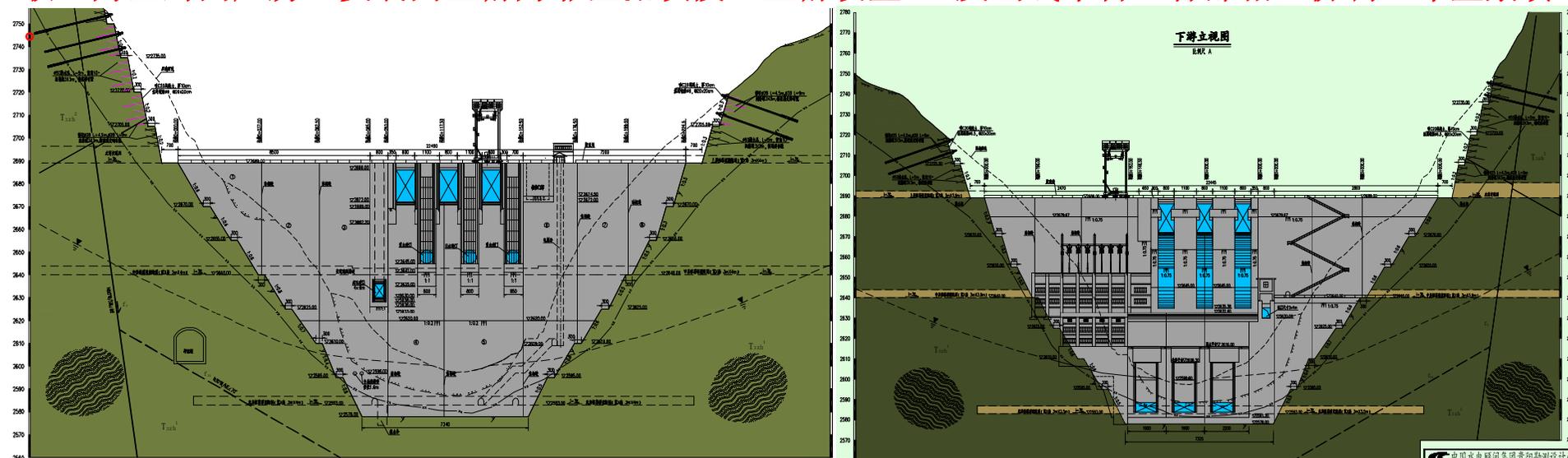


达维采用坝后厂前挑流式厂房重叠布置型式。坝身布置3个表孔和1个底孔。坝上泄洪时水流从坝后厂房上空挑过，厂房下游设置水垫塘进行消能。坝后厂房采用全封闭结构。主机间和安装间“一”字排列，主机间几乎占据了整个河床宽度。右岸布置进厂交通洞及公路。采用左岸全年隧洞导流方式。

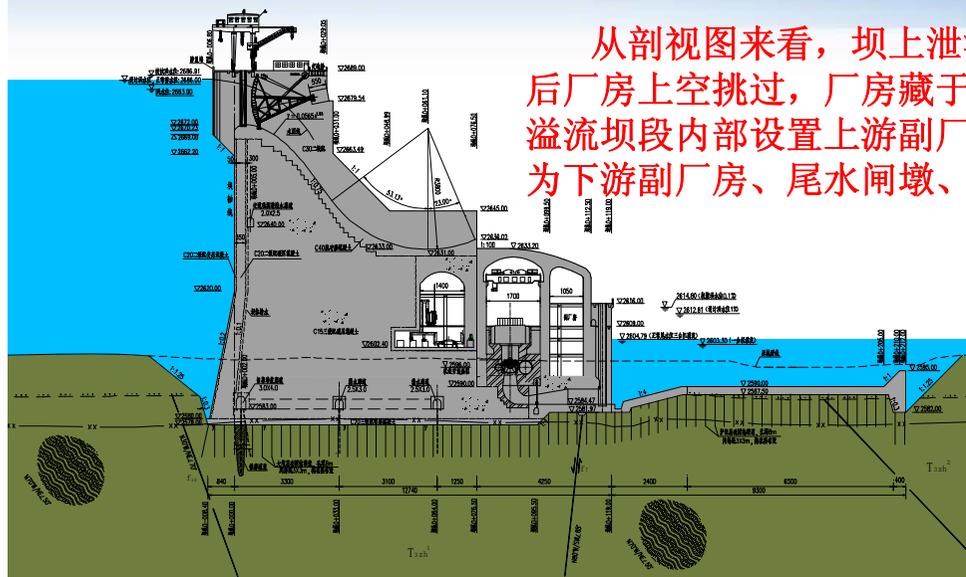
二、达维重叠式枢纽选择



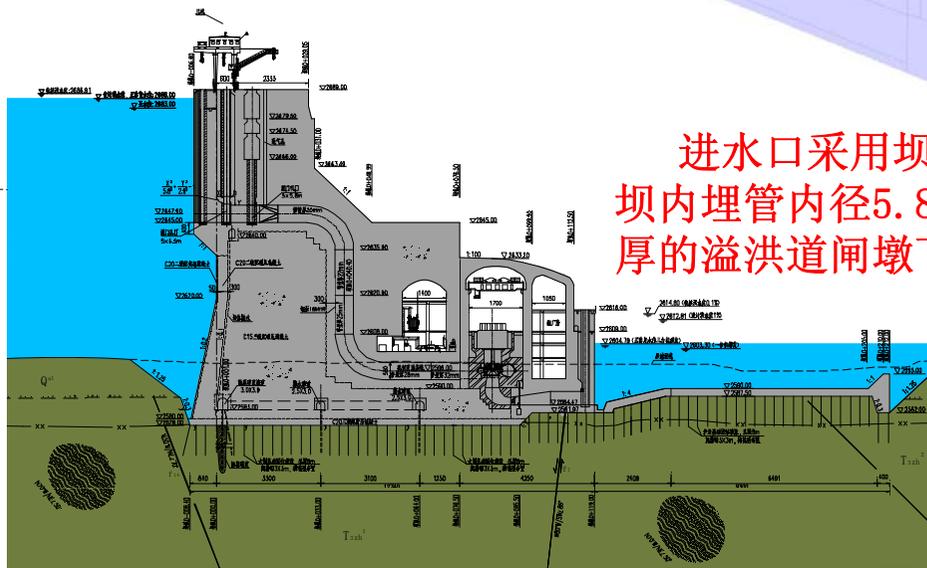
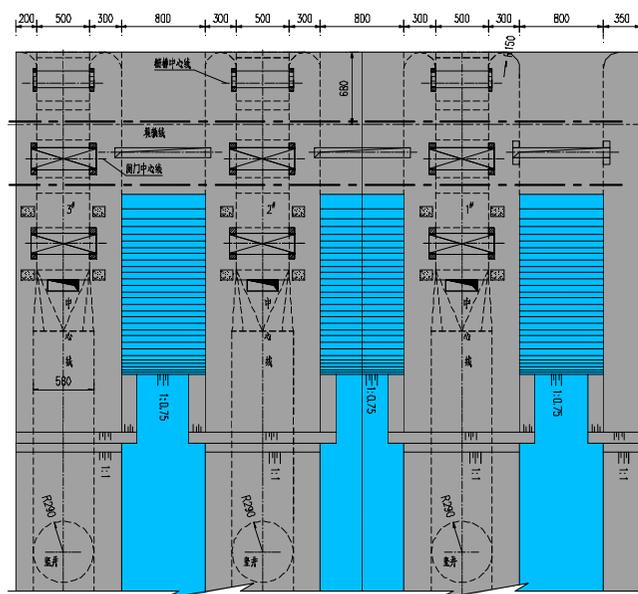
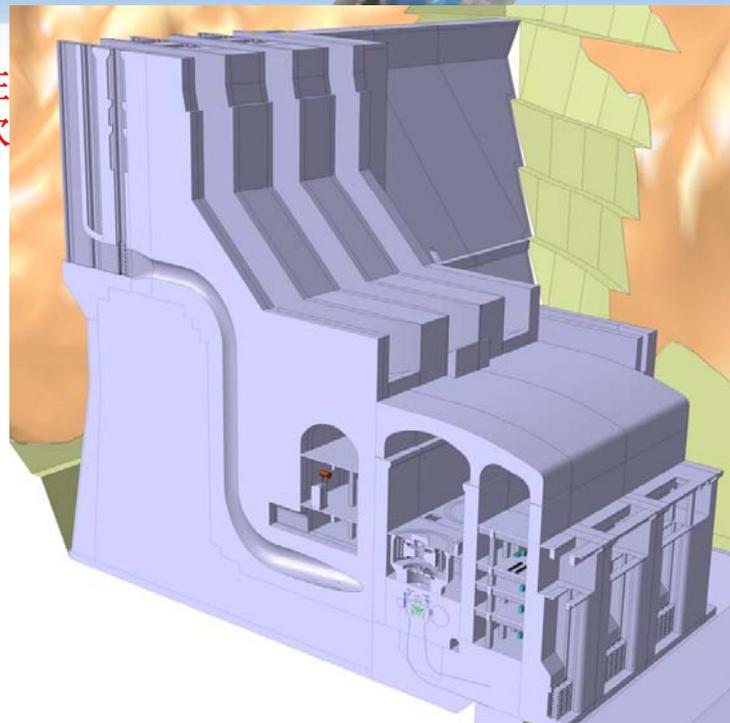
从立视图来看，主副厂房、泄水表孔、开关站多层重叠，主、副厂房在平面上前后左右紧密相联，为全封闭厂房。安装间上游为非溢流坝段，上游设置GIS及出线平台。各部相互协调，布置紧凑



二、达维重叠式枢纽选择



从剖视图来看，坝上泄洪时水流从坝后厂房上空挑过，厂房藏于水舌之下。在溢流坝段内部设置上游副厂房，下游依次为下游副厂房、尾水闸墩、尾水渠等。



进水口采用坝式进水口，三条坝内埋管内径5.8m，分别穿过加厚的溢洪道闸墩下部。

三、重叠式枢纽工程调研

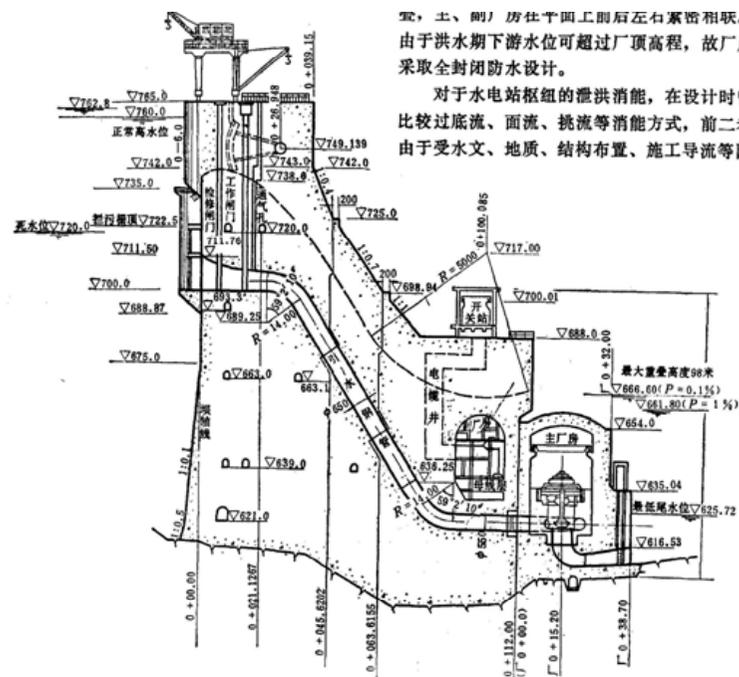
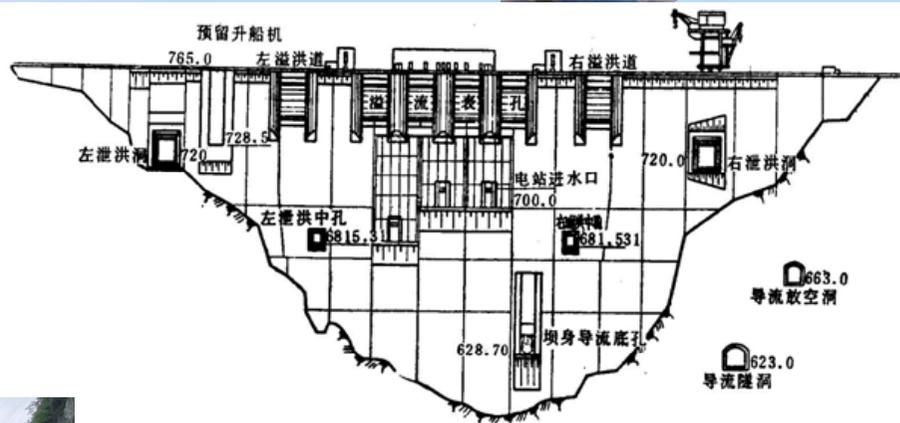


国内外已建水电站溢洪道与厂房重叠布置的枢纽

枢纽名称	坝型	坝高 (m)	装机容量 (MW)	最大泄量 (m ³ /s)	溢流堰顶至厂顶落差 (m)	厂顶单宽流量 (m ³ /s.m)	厂房型式
土耳其卡拉卡亚	重力拱坝	180	6×300	17000	113	157	厂顶溢流式
苏联托克托古尔	重力坝	215	4×300	1160	110.9	58	厂顶溢流式
中国乌江渡	拱形重力坝	165	3×210	20590	100.8	201	厂顶溢流及厂前挑流式
西班牙萨利姆	重力拱坝	131.5	4×36.8	2000	100	40	厂顶溢流式
保加利亚安东伊瓦诺维奇	重力坝	145		2060	98.5	60	厂顶溢流式
日本畑薙第一	双支墩大头坝	125	3×42.6	1700	90	40	厂顶溢流式
法国蒙台纳尔	拱坝	155	4×80	2500	85	83.4	厂顶溢流式
日本新成羽	重力拱坝	103	4×303	2400	78	40	厂顶溢流式
中国凤滩	空腹拱坝	112.5	4×100	23300	63	183.3	坝内式
法国鲍特	重力拱坝	120	2×100	1200	76	90	厂顶溢流式
法国那格鲁	重力坝	110	1×18.5	4000	60	83	厂顶溢流式
			4×23				厂顶溢流式
中国新安江	宽缝重力坝	105	9×72.5	13200	58.75	54.9	厂顶溢流式
中国漫湾	重力坝	132	6×250	22300	42.70	115.08	厂前挑流式

三、重叠式枢纽工程调研

已建的乌江渡重叠枢纽采取大流量挑流消能方式，最大单宽流量达 $240\text{m}^3/\text{s}$ ；将两侧顶层混凝土较厚的副厂房布置成溢流式、主厂房采取厂前挑流的方案。经30多年的运用实践，厂房振动微小，机组运行正常，位于溢洪道上的开关站亦未受水雾影响。



室，土、侧厂房在平面上前后左右紧密相联，由于洪水期下游水位可超过厂顶高程，故厂采取全封闭水设计。

对于水电站枢纽的泄洪消能，在设计时比较过底流、面流、挑流等消能方式，前二由于受水文、地质、结构布置、施工导流等

三、重叠式枢纽工程调研

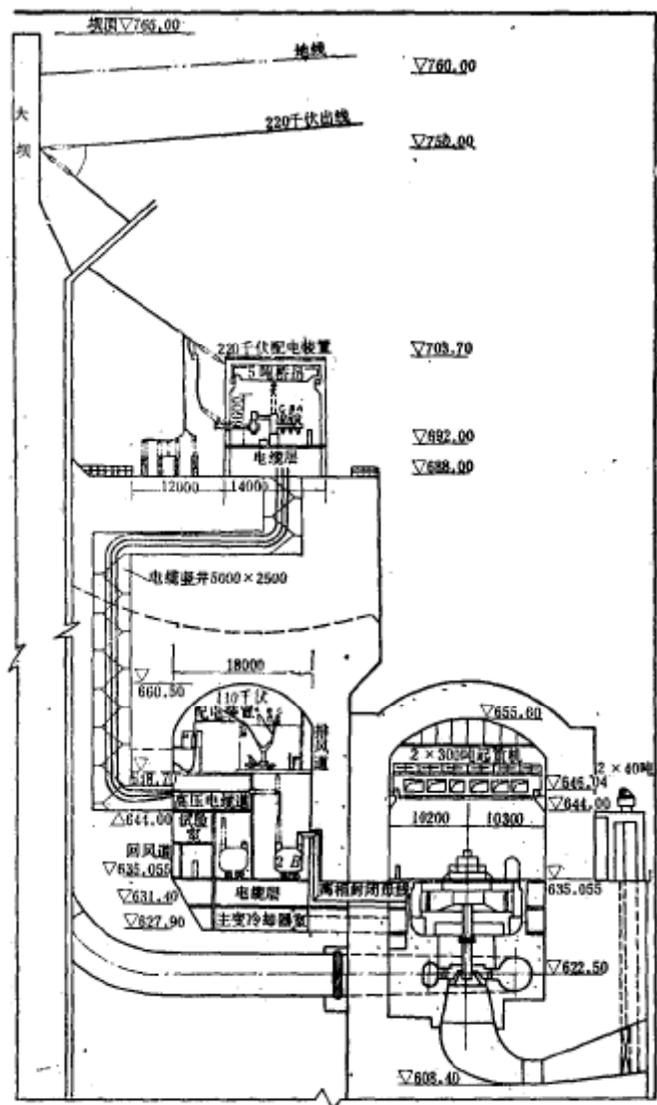
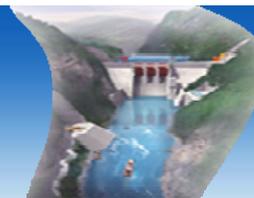
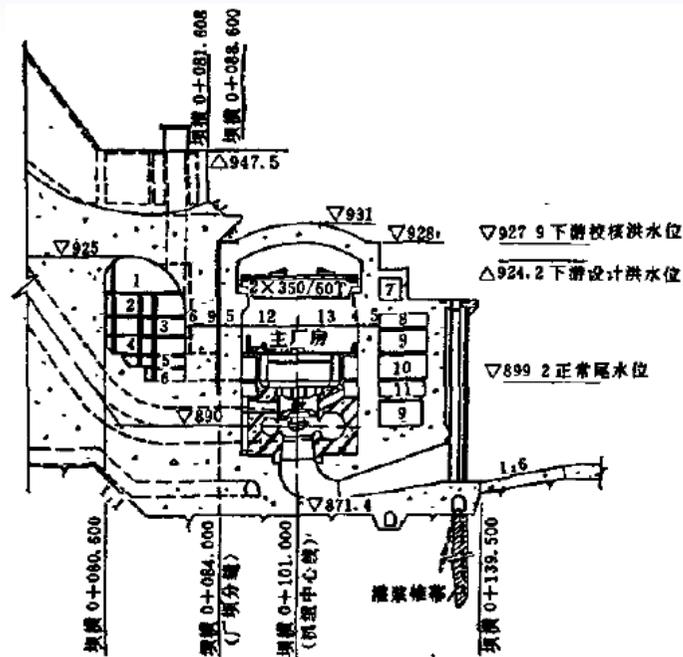


图 3 全厂横断面



主厂房为全封闭式结构。开关站设于溢洪道末段导墙上，泄洪水流穿过开关站从厂房顶挑落至下游河床。

三、重叠式枢纽工程调研



附图 5号机组坝段厂坝连接及厂房结构示意图

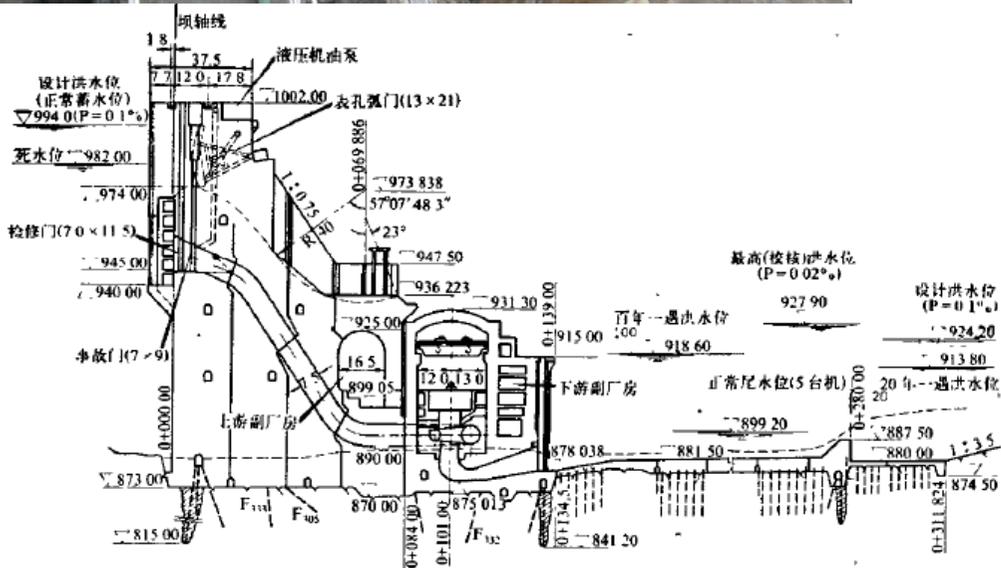
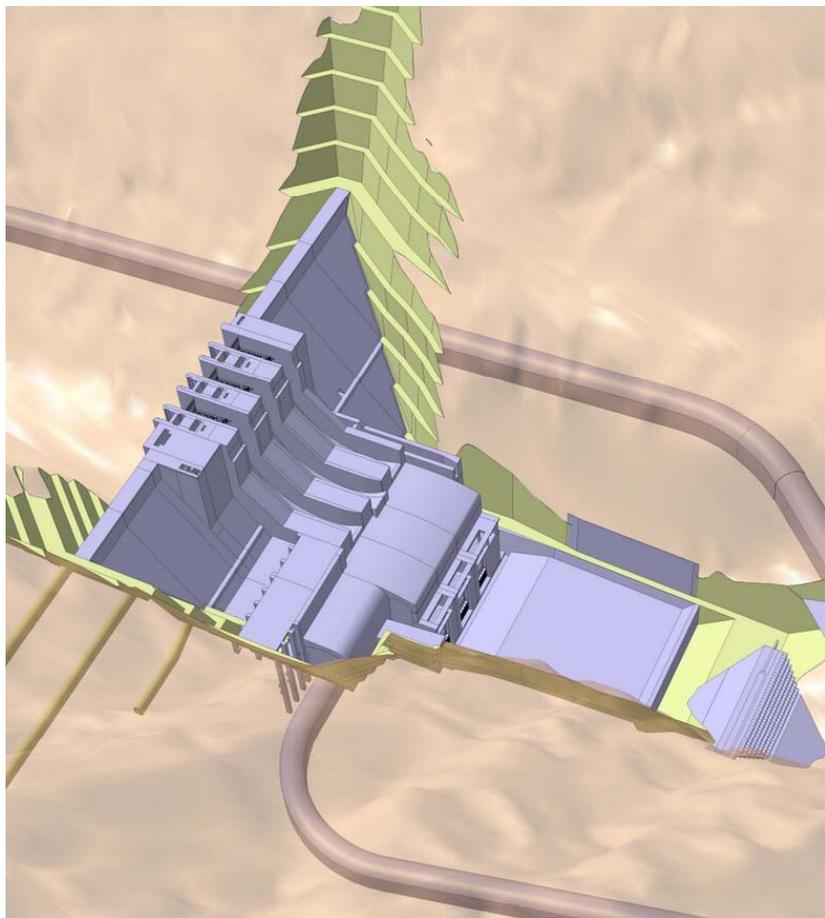


图 2 最高坝段(12号坝段)横制示意图

实践证明，我国所独创的厂坝联合泄洪挑越式厂房布置型式是成功的。

四、达维工程泄洪消能布置研究

达维大坝选择溢流表孔挑越厂顶泄洪的形式，采用 3个8m×14m表孔+1个4m×5m的底孔相结合的泄洪布置方案，最大泄量3400m³/s。其中，3个表孔最大泄量2857m³/s，最大单宽流量约119m³/s.m。为了验证并优化泄洪布置及体型设计，特别是这种坝后厂前挑流型式在泄洪闸门启闭瞬间的水力过渡过程，小流量打击厂顶的作用力大小和性质以及对厂房结构的影响等问题，在水工模型上进行了试验研究。



四、达维工程泄洪消能布置研究

试验表明，三个表孔弧形闸门的开度大于0.3~0.4m时，水流在出口处已经起挑（此时小流量薄水舌尚会局部扫击厂顶），临界闸门开度为3~4m（对应临界下泄流量300~340m³/s），水舌冲击点扫过厂顶的时间约20s~2.5min，超过上述开度或流量，水流迅速挑过厂顶，跌落于下游水垫塘内。



明显冲击

a.开度 2m



轻微冲击

b.开度 2.5m



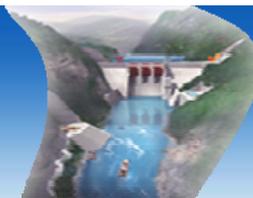
c.开度 3m



d.开度 4m



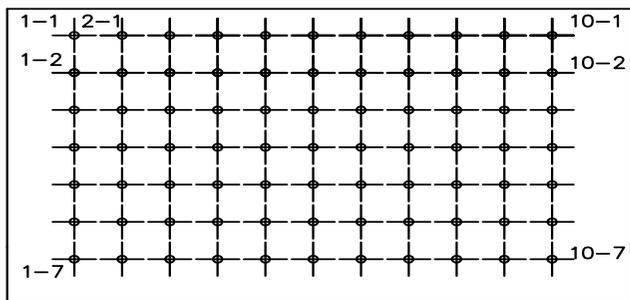
四、达维工程泄洪消能布置研究



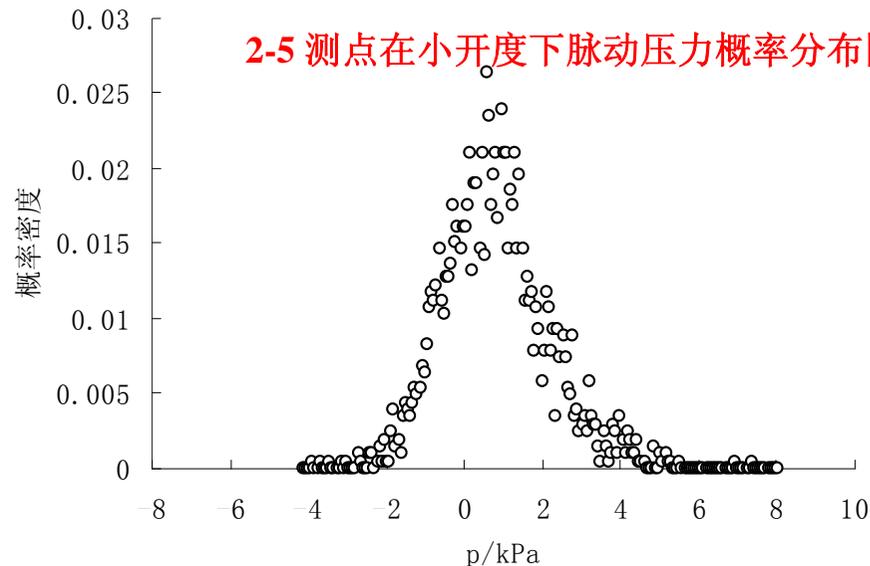
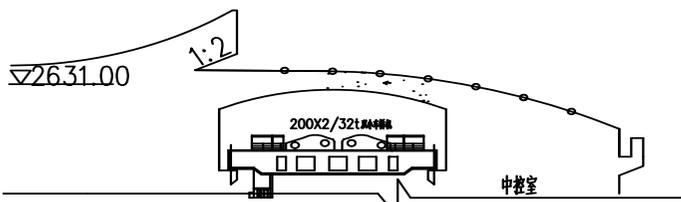
闸门从关闭开启到临界开度过程中，试验量测到的水流打击厂顶的局部压力最大值为 $6.7\sim 7.1\times 9.8\text{kPa}$ ，水流冲击的范围很小，仅占整个厂顶面积的2~3%，受水舌冲击的部位压力迅速减小，因此整个机组段上受到的总压力并不大，对厂房结构的安全不起主要作用。水流冲击厂顶的脉动荷载峰值不甚明显，小流量下优势频率为2.0次/秒，这种流态在运行中出现的时间很短。当然，小流量情况下亦可优先启用泄水底孔泄洪。



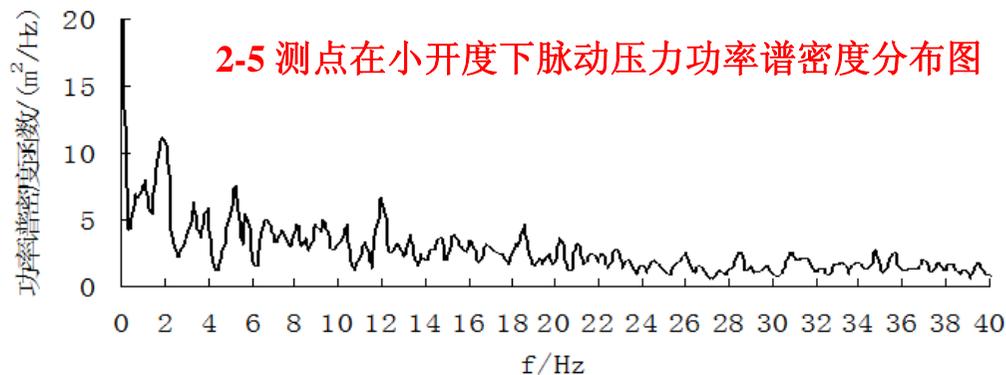
厂房顶测点布置平面图



厂房顶测点布置侧面图

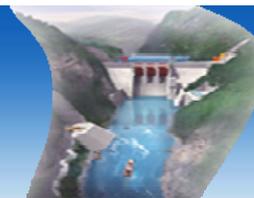


2-5 测点在小开度下脉动压力概率分布图

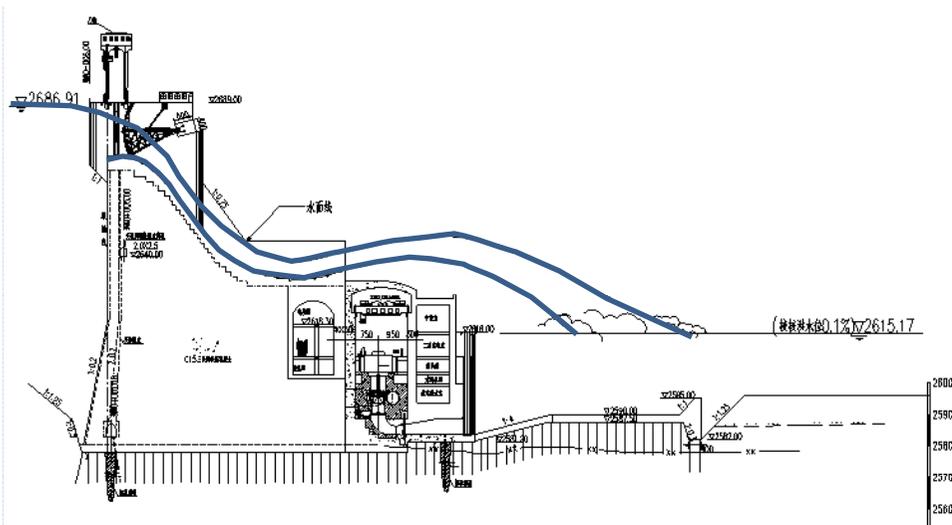


2-5 测点在小开度下脉动压力功率谱密度分布图

四、达维工程泄洪消能布置研究



左、中、右三层水舌中，表孔挑距约110m，两边孔及中间孔入水宽度分别约为28m和50m。左侧底孔出口经贴角转向后入池。厂房后设长约95m的水垫塘，宽度56m，末端设置尾坎。试验表明，这种厂前差动扩散挑流消能工配合水垫塘泄洪消能，有效利用了水上和水下两个消能空间，消力池内波动及回流不明显，对电站发电影响不大，较好地解决了狭窄河道坝后厂前挑流泄洪消能问题。



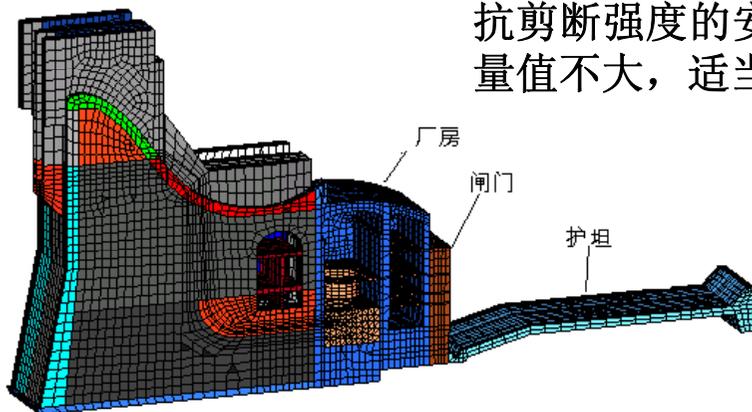
五、达维厂坝结构设计研究



(一) 河床溢流坝段结构分析

河床溢流坝段设计时，考虑表孔挑坎下部布置有14m宽的副厂房，需保证其基本三角形断面不受厂房削弱。厂房位于溢流表孔后，在闸门启闭始末均有小流量冲击厂顶，因此尽量将表孔延伸挑过厂顶，并将主副厂房布置成封闭结构，厂顶为半径60m的扁拱结构，厚度为3m。

三维有限元分析表明，除局部压应力较大外，上游坝面未出现拉应力，抗剪断强度的安全度是足够的。上游副厂房孔洞周边角点处局部应力集中，量值不大，适当加强该部位配筋后，可满足要求。



5#坝段坝体控制点顺河向/竖向位移表 (mm)

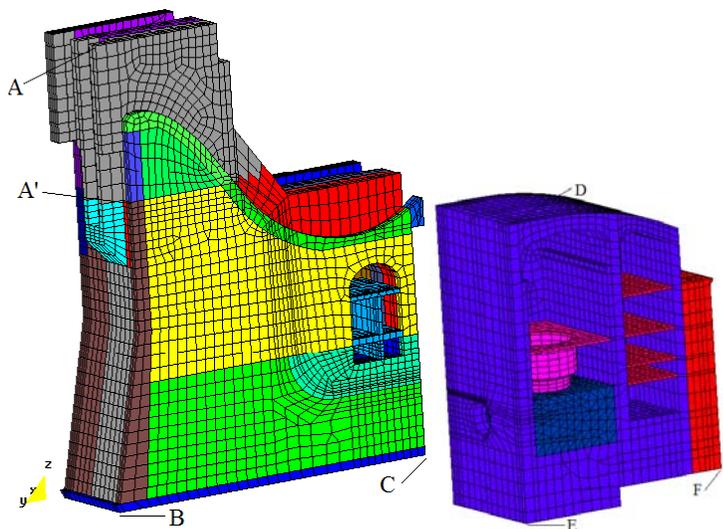
工况	A(A')	B	C	D	E	F
工况1	-5.6/-15.2	-3.7/-10.2	-3.7/-12.0	1.9/-13.8	-3.7/-12.0	-2.3/-8.5
工况2	-25.6/-11.6	-10.9/-5.0	-10.7/-9.7	-2.2/-11.8	-10.7/-9.7	-8.0/-3.9
地震工况	-51.4/-22.9	-14.4/-9.4	-14.6/-12.6	-12.8/-15.1	-14.6/-12.6	-10.7/-5.7

5#坝段底部应力表 (Mpa, 拉为正)

工况	坝踵垂直应力 (MPa)	坝趾垂直应力 (MPa)	厂房上游底部垂直应力 (MPa)	厂房下游底部垂直应力 (MPa)
工况1	-1.557	-1.417	-1.393	-1.137
工况2	-1.169	-2.143	-2.103	-1.411
地震工况	1.981	-3.986	-3.932	-2.688

上游副厂房孔洞周向拉应力 (为正) 量值表 (MPa)

工况	洞顶	洞底板	洞上游测	洞下游测
工况1	0.260	0.108	-0.011	-0.013
工况2	0.702	0.184	-0.018	-0.021



五、达维厂坝结构设计研究

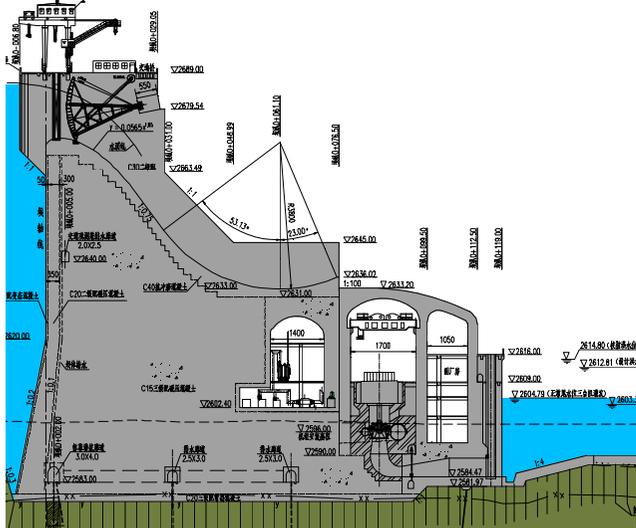
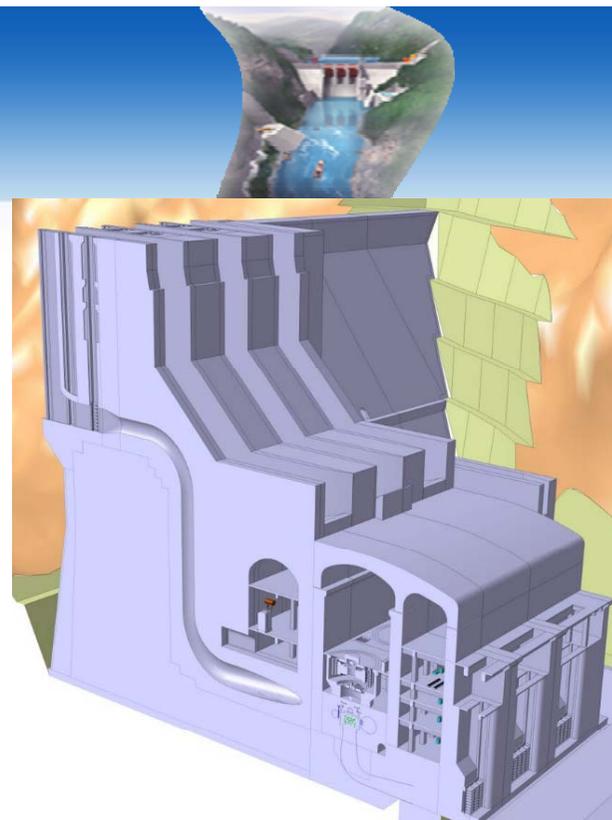
(二) 厂坝连接方式研究

高坝重叠式枢纽布置，厂坝连接方式实质上是研究厂房水下部分及溢流顶板与坝体的接合问题。设计曾研究了三种连接形式：

- ◆ 一为“上分下连”；
- ◆ 二为“上部铰接”，在厂顶设一刚性连杆；
- ◆ 三为“整体连接”。

经三维有限元分析，厂坝连接后联合受力后，大大改善了坝体和厂房及厂坝连接处底部的应力状态。最终选定“上分下连”形式，这种型式厂房应力条件好，受力明确，施工干扰相对小。

厂坝相靠接触面顶部向下游水平变位不超过4mm，接触面下部最大压应力约2.8MPa，至上部约为0.1MPa，静力工况下厂、坝之间传力约占坝前推力的35~40%。

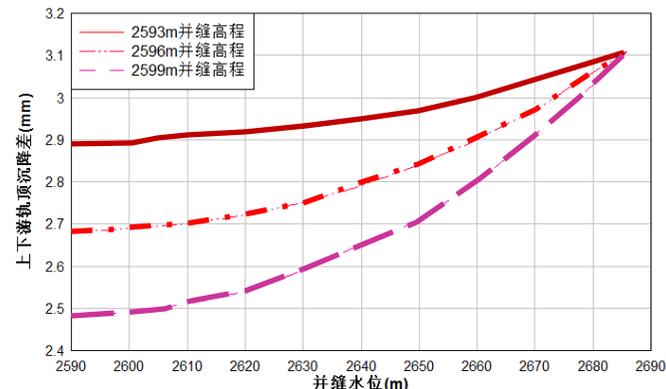
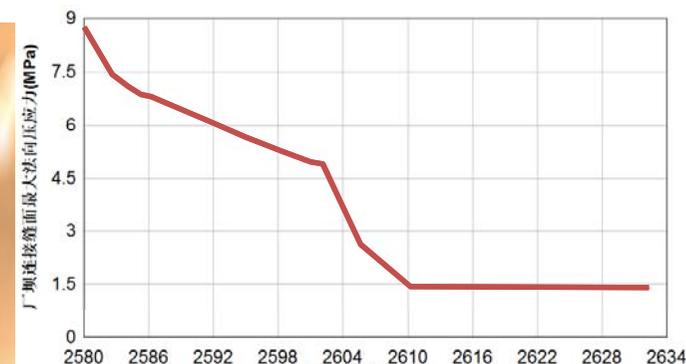
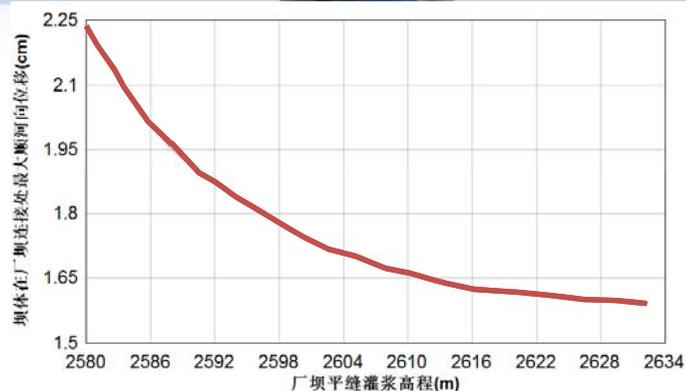
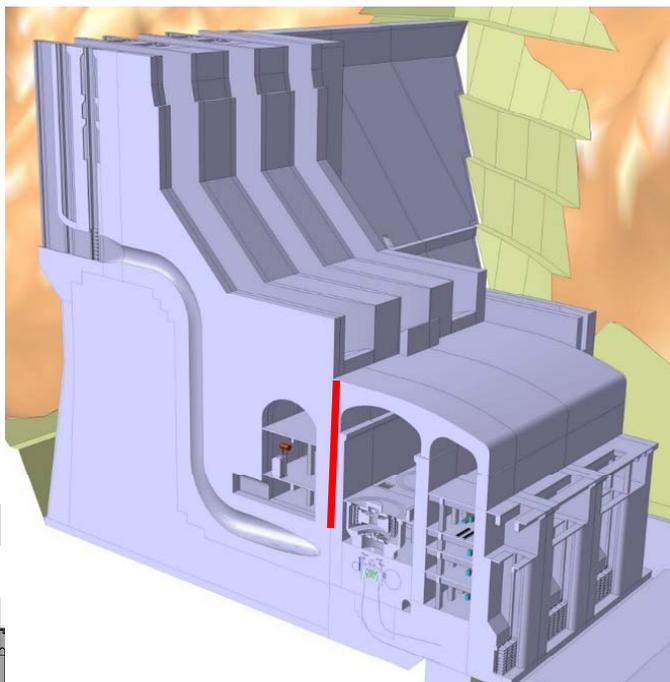
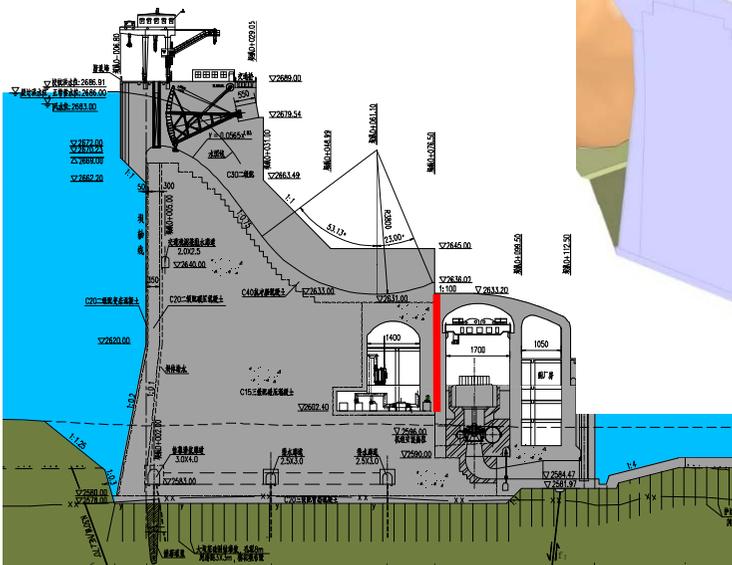


连接方案	工况	坝顶 Y向位移	坝顶 Z向位移	坝踵竖向应力	坝趾竖向应力	厂房上游顶部 Y向位移	厂房上游顶部 Z向位移	厂房下游顶部 Y向位移	厂房下游顶部 Z向位移	厂房上游底部 Z向应力	厂房下游底部 Z向应力
厂坝分离	1	-7.8	-14.7	-1.33	-3.91	4.4	-14.4	3.6	-9.7	-2.123	-0.90
	2	-32.4	-10.5	-0.89	-7.66	3.1	-12.8	2.0	-5.5	-2.541	-0.44
平缝连接	1	-5.6	-15.2	-1.56	-1.42	1.9	-13.8	1.3	-10.2	-1.393	-1.14
	2	-25.6	-11.6	-1.17	-2.14	-2.2	-11.8	-3.2	-6.1	-2.103	-1.41
整体连接	1	-4.1	-15.7	-1.72	-1.18	-4.1	-14.4	-4.98	-10.0	-1.166	-1.50
	2	-20.5	-12.9	-1.43	-1.63	-15.7	-12.3	-16.7	-6.1	-1.329	-2.08

五、达维厂坝结构设计研究

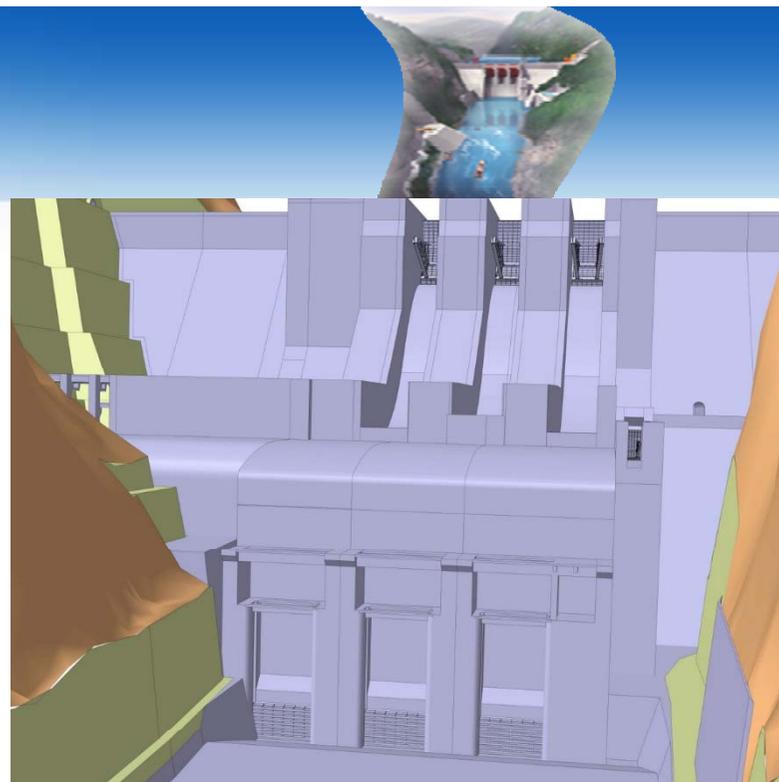
(一) 厂坝连接方式研究

根据计算分析，将连接缝顶高程选在引水钢管高程附近的2600m，厂坝连接处位移和沉降较小，缝面法向压应力和最大拉应力值也较低，深层抗滑稳定性得到提高，有利于厂房上部结构的正常运行。缝面设键槽，灌浆高度约22m，蓄水前分段并缝灌浆，以尽量减少大坝加给厂房结构的推力，改善缝面及厂房应力状态；此高程以上为5~10cm宽缝，以备主、副厂房上部框架相对自由变位，缝顶最大约2.5cm相对变位，故预留缝宽是有多余地的。

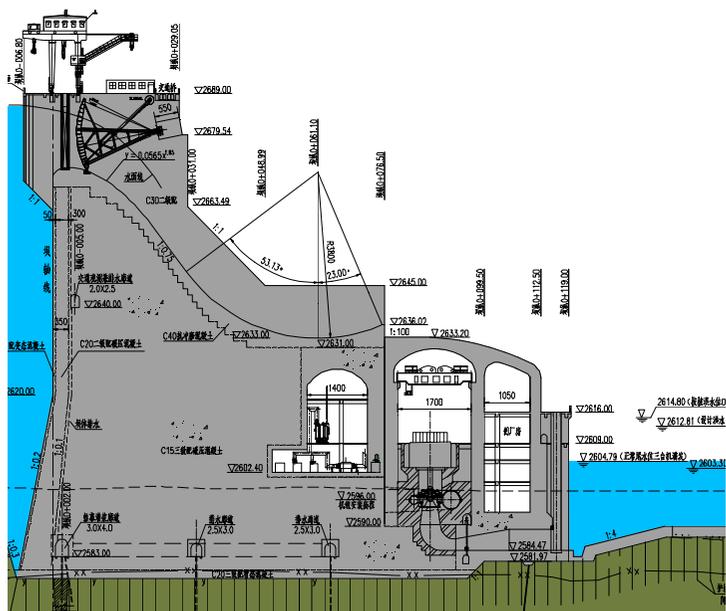


五、达维厂坝结构设计研究

在不同开度泄洪脉动压力作用于厂顶的情况下，厂房结构的振动响应均较小，顺河向最大均方根加速度为 0.38m/s^2 ，最大均方根位移为 1.1mm ，振动应力也较小（约 $0.23\sim 0.45\text{MPa}$ ），远小于混凝土的动态抗拉和抗压强度。可见，坝后厂前挑流对厂房结构影响较小，从国内建成的乌江渡、漫湾等工程实际运行情况来看，人在厂房顶拱内感觉不到水舌冲击影响以及由此产生的振动，说明振动量级很小，厂内机组运行正常，可以排除厂顶泄流结构产生有害振动的可能性。



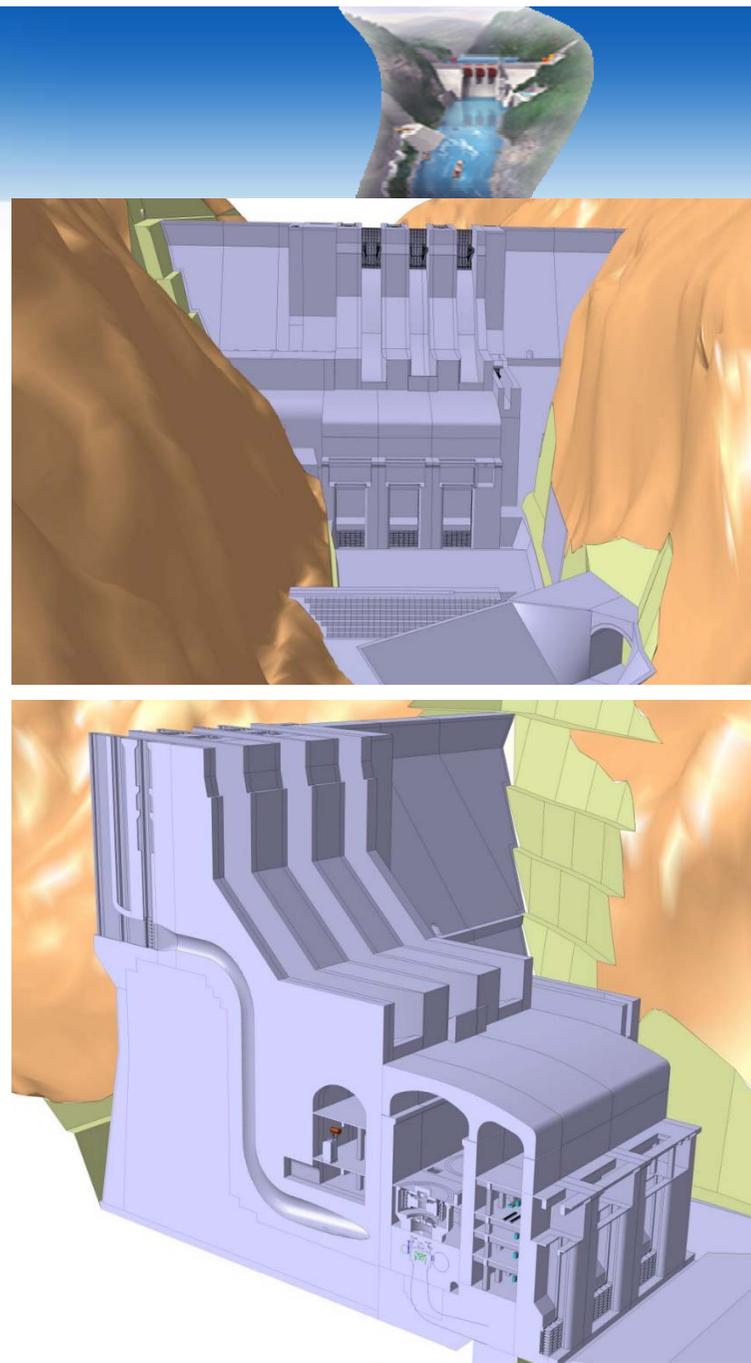
表孔不同开度水流脉动压力作用下厂房振动响应最值



闸门开度	加速度(m/s^2)			位移(mm)			主应力(MPa)	
	X向	Y向	Z向	X向	Y向	Z向	σ_3	σ_1
边孔独开闸门开度0.5m	0.16	0.32	0.51	0.11	1.05	0.28	0.21	-0.28
边孔独开闸门开度1.0m	0.13	0.29	0.43	0.08	0.93	0.27	0.19	-0.25
边孔独开闸门开度1.5m	0.17	0.19	0.29	0.11	0.57	0.18	0.11	-0.16
边孔独开闸门开度2.0m	0.16	0.17	0.23	0.09	0.53	0.16	0.10	-0.15
边孔独开闸门开度2.5m	0.09	0.09	0.12	0.07	0.59	0.10	0.07	-0.11
边孔独开闸门开度3.0m	0.08	0.07	0.12	0.04	0.21	0.08	0.05	-0.09
中孔独开闸门开度0.5m	0.24	0.39	0.63	0.47	1.10	0.58	0.23	-0.44
中孔独开闸门开度1.0m	0.18	0.30	0.42	0.34	0.89	0.44	0.19	-0.32
中孔独开闸门开度1.5m	0.12	0.18	0.24	0.18	0.54	0.24	0.12	-0.15
中孔独开闸门开度2.0m	0.03	0.04	0.07	0.03	0.11	0.04	0.03	-0.05
最值	0.24	0.39	0.63	0.47	1.10	0.58	0.23	-0.44

六、结论

布置在狭窄河床上的坝后厂前挑流重叠式枢纽，虽然带来了一些相对复杂的技术问题，厂坝施工时也有一定的干扰，并应重视施工导流及安全度汛问题。但通过优化泄洪布置体型及厂房上部结构，合理选取厂坝连接方式，通过合理的施工组织及措施，统筹兼顾，完全能解决好此类枢纽可能存在的问题。该种重叠布置型式高效紧凑结合，能充分利用河床空间，合理解决厂、坝、泄布置上“争”位置的矛盾，在峡谷地区有其显著的优点，可以说是一种较好的枢纽布置型式。





中国电建
POWERCHINA

贵阳勘测设计研究院有限公司
GUIYANG ENGINEERING CORPORATION LIMITED

谢谢各位领导、专家！

