

高拱坝枢纽及发电输水系统 优选布置探讨

丁学琦

(中国水电工程顾问集团公司,北京 100011)

关键词 枢纽布置;地下厂房;发电输水系统;高拱坝;抽水蓄能电站;优化设计

摘要 根据一些国内外工程的实践,对大流量河道上高拱坝的不同枢纽布置方式进行了分析对比,对坝区电站和抽水蓄能电站地下厂房输水系统的简化布置进行了归纳,探讨优选其布置的途径,供有关人员参考、讨论。

The discussion on optimization of layout of high arch dams and power water passages

Ding Xue-qi

(China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Beijing 100011)

Key Words: Layout of projects; underground powerhouse; power water passages; high arch dams; pumped storage power stations; optimization of design scheme

Abstracts: With reference of experiences on projects at home and abroad, the paper analyzes and compares the different project layout of high arch dams on rivers with great flows. It sums up the simplified arrangement of power tunnels and underground powerhouses at the damsite and pumped storage power stations.

中图分类号 :TV222

文献标识码 :A

当前,在水电大开发中,一批西部峡谷特高拱坝水电站及东部大型抽水蓄能水电站正在设计或兴建。根据一些国内外类似工程的实践,拟就高拱坝的不同枢纽布置,及这两类电站地下厂房输水系统优选布置,分别探讨如下。

1 大流量高拱坝枢纽布置的优选

1.1 拱坝坝身泄洪枢纽布置

工程枢纽布置围绕坝型而定。我国西南诸河洪水流量巨大,因此妥善处理泄洪消能是枢纽布置的首要任务。除少数水电站在正常蓄水位高程附近有开阔的平台或缓坡,可以布置大泄量的岸边溢洪道,并受地形地质条件的制约而修堆石坝外,多采用混凝土坝坝身泄洪。峡谷中重力坝的拱效应显著;同时为改善边坡坝块侧向稳定和坝踵拉应力,也需做成拱形轴线,因此多采用拱坝坝身泄洪枢纽布置。

自二滩水电站建成以来,双曲拱坝及其枢纽布置模式,已为多项工程所采用,其技术是先进的,运用是成功的,在当时,二滩水电站的枢纽布置也是合适的。其后经各工程的实验研究有所发展,破除了必须一定比例坝外分流的设计观念,在校

核洪水为 30 000 m³/s 左右时,采用构皮滩水电站的布置方式也是合适的。但在校核洪水高达 40 000 m³/s 左右时,采用这种模式则枢纽布置繁杂,施工干扰大,运行事故可能增多,造价较贵,因此有必要对枢纽布置进行优选。

1.2 重力拱坝坝身泄洪枢纽布置

有些工程在设计中曾对双曲拱坝和重力拱坝进行过比较。早期受必须坝外分流观念的约束(国外有卡里巴水电站孔口泄洪下游连同水垫冲深百米的情况,国内对高双曲拱坝大孔口泄大流量时河床及坝身的影响还存在疑虑),近期又受泄流前缘宽度和跌流消能的制约,比较方案除坝型外,都采用同一枢纽布置,因而否定了重力拱坝方案。为此,笔者对泄洪流量 30 000 m³/s 以上、多机组的枢纽,建议比选另一种布置方案,以与双曲拱坝坝身泄洪方案相比较。

建议方案的要点是:①采用隔河岩水电站模式上重下拱

收稿日期 2005-01-08

作者简介:丁学琦(1926—),男,山东蓬莱人,教授级高工,原水利水电规划设计总局副院长,长期从事水电设计管理、咨询工作。

剖面的重力拱坝;②坝身3层孔口泄洪、全部挑流消能、下游只做冲坑护岸工程;③地下厂房中部布置。该方案的优劣之处概述如下。

1.2.1 坝身泄洪能力增大

高拱坝坝身泄流能力取决于泄洪水舌不撞击下游岸坡,又不超出下游河床承受冲刷的能力。双曲拱坝受体型约束,表孔只能跌流消能,流道短,难以扩宽前缘,而且顾及对坝体的影响,孔口面积也不能太大。反之,上重下拱坝剖面,表孔沿坝背面设流槽挑流消能,径向效应扩宽前缘,特别当表孔集中布置在溢流段两侧时,可向两岸扩宽而增加孔数,而且孔口面积可以加大,因此其泄流能力增大。

加大坝身泄流能力尚可采用3层孔口。如以溪洛渡水电站3层孔口方案为基础,增加两侧表孔数量,并加大中孔泄量(加大闸孔面积,如用碧口水电站右岸泄洪洞 $8\text{ m}\times 10\text{ m}$ 工作门,增加孔数,如将6中孔7深孔改为7中孔6深孔等)。3层孔口同时可增加蓄洪削峰流量且运行安全。对于无防洪任务或汛限水位降低很少时,表孔可在常见洪水时启用,但汛限水位较低,远低于表孔堰顶时,表孔只能在约百年一遇上洪水时启用;遇限泄调峰启用时有的又需与中孔同时开启以碰撞消能,使用机会少且不便。根据溪洛渡水电站试验资料并据以推算,2层孔口的中孔加部分发电流量只能宣泄2年一遇洪水,遇5年一遇洪水需开启泄洪洞。3层孔口的中孔(加大泄量)加部分发电流量,可宣泄2年一遇洪水,如再加深孔,可宣泄5年一遇洪水。因此,常见洪水时,3层孔口可主要启用中孔,工作水头 60 m ,洞身钢板砌护,运行可靠。而2层孔频繁使用中孔(闸门工作水头百米)和泄洪洞(高速洞内流槽长达 $1\sim 2\text{ km}$),运行事故机遇增多。可研究降低上重下拱封拱高程,初期发电度汛时可能表孔参与(表孔堰顶降低),坝体度汛时可以研究利用表孔坝段留过水缺口,从而降低大坝发电时的挡水高程并简化后期导流。

目前,校核洪水时发电流量是否参与泄洪,各工程不同。如溪洛渡、小湾水电站采用万年一遇洪水且不考虑发电流量,三峡工程采用万年一遇洪水并考虑约70%发电流量参与泄洪,构皮滩水电站5000年一遇洪水校核,只有5台发电机组,考虑约50%的发电流量参与。300 m级高拱坝的防洪标准提高到万年一遇是可以的。由于我国大江大河上水文系列较长,而且已逐步实现梯级开发,现有工程防洪设计都不考虑上游水库的调峰作用,有的工程又加高坝高,增加了超蓄能力,在此基础上不宜再叠加安全措施。为此,建议研究校核洪水考虑50%发电流量参与泄洪(特别对多机组工程),必要时适当增加坝高,拱坝增加坝高的工程量有限,多机组发电流量则可以代替 $1\sim 2$ 条泄洪隧洞,经济上十分有利。为安全计,可以将发电流量为零时作为特殊校核条件,要求此时库水位不超过坝顶。

1.2.2 下游消能工程可以简化

双曲拱坝只能跌流消能,跌流纵向扩宽有限,能量集中,挑矩短,泄流水舌落点和雾化严重溅落区靠近坝脚,必须采用消力塘。消力塘的深度受跌流表孔单独运用控制,往往挖深过大而又需依靠与中孔水舌碰撞消能。根据溪洛渡水电站2层孔口试验,占坝身泄洪流量60%的表孔的水舌落点纵向扩宽

约 30 m ,而占泄量40%的中孔,水舌落点纵向扩宽约 80 m ,可见下游单位水体消能量差异很大。重力拱坝3层孔口表孔采用泄槽远距离挑流,水舌落点可望扩散于深孔水舌落点之后,中、深、表3层孔口水舌落点依次散布于3个冲刷区。尚可采用多种形状的挑流鼻坎,泄流水舌除纵横向扩散外,还可以竖向扩散,正如二滩水电站初设比较方案的结论意见,表孔挑流消能后,不做消力塘,只局部砌护两岸,使消能工程大为简化。

下游河床冲刷深度一般受常见洪水控制。为此,建议修建混凝土重力式下游围堰,并适当保留以做二道坝。因此,可在基坑内做好护岸工程的护脚。必要时还可以将冲坑的覆盖层挖掉,既避免滚动挟石水流对护岸混凝土的磨损,又可对冲坑河床不利地质缺陷进行简易加固,形成简化的消力塘。

1.2.3 地下厂房布置更为灵活

双曲拱坝厂坝之间需布置泄洪洞时,地下厂房移向库内,防渗工作量巨大,且由于首部开发,尾水洞很长,需设大型调压井。当布置无泄洪洞时,坝肩帷幕可斜向上游,地下厂房设在大坝帷幕与坝底部拱座推力线之间,靠近坝肩布置,如拉西瓦、构皮滩水电站。优化引水道布置(斜井和不设水平弯道等),以引水道长度不设调压井为限,使厂房位置尽量下移,可以缩短尾水洞长度,并采取措施以求尽可能不设或少设尾水调压井。

1.2.4 对工程造价、工期、大坝抗震等需全面评价

对双曲拱坝及其布置与上重下拱重力拱坝及其布置进行比较。在造价上,重力拱坝的大坝要贵,但枢纽其他建筑物可以简化,则总造价可望较省。在工期上,大坝控制工期,混凝土浇筑强度可以通过增加施工设备和措施解决,发电控制工期更重要的是大坝上升速度和封拱高程。重力拱坝可以降低封拱高程和大坝挡水高程(如1.2.1中所述),虽3层孔口数量增加对坝体上升有一定干扰,但如计及减少导流底孔,需具体研究。在坝体应力上,重力拱坝均匀性差,但都在允许范围之内,其压应力低些,可以降低混凝土等级,两种坝型坝踵都有拉应力,如有开裂,重力拱坝裕度大些。在大坝抗震性能上,都有超载能力,重力拱坝最少在上部重力剖面可以不设纵缝,在地震动力下横缝张开时影响较小。经初步分析,两者虽各有利弊,但重力拱坝利大于弊,有待具体工作后,再作全面评价。

2 发电输水系统布置的优选

2.1 坝区地下厂房输水系统

2.1.1 优选进水口布置

坝区地下厂房多为单机单管引水,当发电机组台数较多,加之导流、泄洪、排沙、放空等要求设置的隧洞,常使一岸进水口较多,且又多处于峡谷陡崖之中,出渣困难,有时还难以避免将水上开挖方变为水下开挖方,且多层进水口上下干扰,导致高边坡较长。为此,往往分别采用下列措施:

(1)集中布置。在适应枢纽总体布置和多项功能要求下,除利用地形(河湾、深沟、缓坡)和采取两岸分散布置外,对于同岸众多进水口,经调整后往往采用交叉集中布置。如小浪底水利枢纽,左岸19个进水口设10个进水塔并列在一起,前缘宽度仅 268 m 。龙滩水电站9个发电进水口与坝体结合,并与

导流洞进水口上下对应,使坝肩和导流洞可统一高边坡处理。

(2)收缩进水口前缘宽度。高水头大机组地下厂房机组间距大于引水隧洞的间距要求,有条件收缩进水口前缘宽度。宜在总体布置格局下,调整进水口和厂房的轴线与位置,使之便于收缩进水口,必要时尚可采用竖井、空间弯道等解决布置上的困难。当进水口轴线与厂房平行时,采用平面对称收缩形式布置,如小湾水电站;当两者轴线有一定交角时,采用斜进厂房放射形布置,如龙滩水电站。糯扎渡水电站进水口高边坡不严峻,在可研设计时将原进水口前缘收缩并前移后,比不收缩的原方案可节约投资8500万元。白山水电站利用初期发电水位降低,将3个进水口倒品字形布置,以收缩前缘宽度。

2.1.2 引水洞斜进厂房布置

自鲁布革水电站引进引水洞斜进厂房方案以来,该种布置形式已在引水式电站中广泛采用,在坝区地下厂房中也已为多座电站所采用,这是因为它的效果较长引水洞更为显著。其主要作用是:①缩小厂房跨度;②减小引水道长度;③简化引水道布置(不设水平弯道和空间弯道);④缩小进水口前缘宽度。

2.1.3 优选地下厂房位置

采用地下厂房中部开布置。在优化引水道布置(如采用斜井、空间弯道以减小长度)的基础上,以引水道不设调压井的允许长度为限,将厂房尽量向下游移,在地形地质条件允许的情况下,将厂房设于大坝岸边帷幕之后,尽量靠近坝肩,以简化厂房防渗工程,并为缩短尾水洞长度和不设尾水洞调压井创造条件,如向家坝水电站。

2.1.4 简化地下厂房洞室群

简化洞室群不仅有利于围岩稳定并方便施工,更可为调整厂房位置提供余地。一般多将尾水调压井与尾水闸门井合二为一,无尾水调压井时,将尾水闸门井设于主变室内,用混凝土墙隔开,如东风水电站采用这种布置,缩短了尾水道长度。水布垭水电站利用厂区高边坡处理形成的地面平台,设置地面主变与开关站,使地下厂房仅有一个洞室(尾水洞为单机单洞),便于调整上、下游输水系统的长度,达到了不设调压井的效果。

2.1.5 优选尾水洞出口位置

坝区电站下游隧洞出口也相对较多,除不少工程将部分尾水洞与导流洞结合外,宜优选尾水洞出口与泄洪冲坑的相对位置。在泄洪采用挑流消能而且机组台数不多时,将尾水出口设在挑流水舌入水之前,可缩短尾水长度,并使水面平稳且有增差效益,如东风水电站并取消了尾水调压井。尾水出口与泄洪冲坑位置主要对淤积(门前清和堆丘)和涌浪有影响。前者需要进行模型试验研究,后者有允许涌浪高度的标准问题,对此目前尚无定论,有待进一步研究。设计允许涌浪高度,小湾水电站采用大洪水时最大波高小于2.5%落差;水布垭水电站采用20年一遇洪水时1/3的大波高小于2.5%落差,并认为洪水历时短,即使有影响也危害不大。

2.1.6 不设调压井的工程实践

要取消调压井可以采取以下措施:①缩短引水、尾水道的长度;②扩大引水、尾水洞的洞径;③采用变顶高尾水洞和明流洞;④增加吸出高度;⑤采用分段关机;⑥加大机组的GD²。本文仅探讨前三点。

缩短输水道长度除前述方法外,可结合工程土石方平衡和布置的可能性,增加引水明渠和尾水明渠的长度。如向家坝水电站在坝后基岩稳定允许的情况下,加长尾水明渠,为不设尾水调压井创造条件。自彭水水电站提出变顶高尾水洞方案以来,这种型式已为多座工程所采用,其机理明确,并经过了多项工程的试验研究,但目前尚无工程运行经验,有待进一步完善。

表1列出了国内一些大容量地下厂房输水系统的数据对比。由表1可见,这些电站引水道较易满足调保要求而不需设调压井,多有余度可供调整厂房位置。要达到尾水也不设调压井,则需要采取措施。比较突出的是彭水水电站,其尾水变幅高达53m,水流惯性时间常数高达6s,输水道长度与额定水头比值达13.3%,仍然可不设尾调。

2.2 抽水蓄能电站地下厂房输水系统

2.2.1 优选地下厂房位置

表1 国内一些大容量坝区地下厂房输水系统数据对比

工程名称	坝型	装机容量/ 万kW	单机流量/ (m ³ /s)	水头/m		尾水位 变幅/m	管道长度/m			管道长度/ 额定水头/%			有(√)无(×) 调压井		厂房 位置	不设尾 水调压 井措施
				H _{max}	H _r		引水	尾水	输水	引水	尾水	输水	引水	尾水		
东风	拱坝	51	160.5	132	117		227.4	210.2	437.6	1.9	1.8	3.7	×	×	中部	吸出高度 加4.5m
二滩	拱坝	330	371	187	160	27	335	989	1323	2.1	6.2	8.3	×	√	首部	
小湾	拱坝	420	390	251	204	22	327	1052	1379	1.6	5.2	6.8	×	√	首部	
溪洛渡	拱坝	1260	424	230	180	44	416	1939	2354	2.3	10.8	13.1	×	√	首部	
向家坝 (地下)	重力坝	300	900	114	90	29	327	384	711	3.6	4.3	7.9	×	×	中部	吸出高度 加6m,变顶 高尾水洞
彭水	重力坝	175	467	80	67	53	443	481	894	6.6	6.7	13.3	×	×	中部	变顶高 尾水洞
三峡 (地下)	重力坝	420	966	113	81	21	265	436	701	3.3	5.4	8.7	×	×	中部	变顶高 尾水洞
小浪底	堆石坝	180	296	139	112	12	340	988	1328	3.0	8.8(0.7)	11.9(3.8)	×	×	中部	明尾水洞
水布垭	堆石坝	160	261	203	170	34	375	328	702	2.2	1.9	4.1	×	×	中部	加大洞径
糯扎渡	堆石坝	585	393	215	187	37	362	638	1000	1.9	3.4	5.3	×	√	中部	

注:括号内数字为仅计尾水压力段长。

表 2 国内外一些大型抽水蓄能电站输水系统数据对比

工程名称 (国别)	装机容量 /万 kW	水头/m		吸出高度 H_s/m	H_s/H_{max} /%	管道长度/m			管道长度/ 额定水头/%			有(√)无(×) 调压井		厂房位置(引 水洞条数)	不设尾 调措施
		H_{max}	H_r			引水	尾水	输水	引水	尾水	输水	引水	尾水		
腊孔山(美)	154	317	258	39.4	12.4	980	427	1 407	3.8	1.7	5.5	×	√	尾部(1)	
巴康斯蒂(美)	210	384	329	25	6.5	2 893	0	2 893	8.8	0	8.8	√	×	尾部(3)	地面厂房
格兰德迈松(法)	180	955	905	36	3.8	8 906	174	9 080	9.9	0.2	10	√	×	尾部(1)	短尾水洞
蒙特齐克(法)	90	423	417	61	14.4	706	663	1 369	1.7	1.6	3.3	×	√	中部(2)	
迪诺威克(英)	180	541	513	60	11	2 838	470	3 323	5.5	0.9	6.5	√	×	尾部(1)	短尾水洞
奇奥塔斯(意)	118.4	1 048	954	49	6.7	8 900	466	9 346	8.5	0.4	8.9	√	×	尾部(1)	短尾水洞
普列森札诺(意)	100	499		39.5	8	3 645	115	3 760	(7.4)	(0.2)	(7.6)	√	×	尾部(2)	竖井式 厂房
拉莫拉(西)	63	522	513.5	69	13.4	950	232	1 182	1.9	0.5	2.3	×	×	尾部(1)	短尾水洞
新高濑川(日)	128	242	229	33	13.6	3 016	296	3 312	13.1	1.3	14.4	√	×	尾部(2)	增加 H_s
奥美浓(日)	100	500	484	74	15	1 748	764	2 512	3.6	1.6	5.2	√	×	尾部(1)	分段关机, 增加 H_s
治源(日)	67.5	500	478	46	9.2	2 263	454	2 717	4.7	0.9	5.7	√	×	尾部(1)	短尾水洞
今市(日)	108	549	524	70	12.7	2 126	960	3 080	4.0	1.8	5.9	√	√	尾部(1)	
大河内(日)	128	407		57	14.4	727	407	1 136	(1.8)	(1.0)	(2.8)	×	×	近尾部(2)	增加 H_s
广蓄二期(中)	120	542	510	70	12.7	2 192	2 124	4 316	4.3	4.2	8.5	√	√	中部(1)	
天荒坪(中)	180	610	532	70	11.5	1 199	254	1 443	2.2	0.5	2.7	×	×	尾部(2)	短尾水洞
西龙池(中)	120	687	615	72	10	1 513	354	1 867	2.5	0.6	3.0	×	×	尾部(2)	短尾水洞
宝泉(中)	120	563	510	70	12.5	1 452	861	2 313	2.8	1.7	4.5	×	×	中部(2)	调整关机, 加大洞径
宜兴(中)	100	411	353	60	14	1 254	1 637	2 892	3.6	4.6	8.2	×	√	中部(2)	
张河湾(中)	100	344	305	44	12.7	626	184	810	2.1	0.6	2.7	×	×	尾部(2)	短尾水洞
泰安(中)	100	253	220	48	18.9	534	1 390	1 924	2.4	6.3	8.7	×	√	首部(2)	
十三陵(中)	80	440	430	56	12.7	1 260	837	2 097	2.9	1.9	4.9	√	√	中部(2)	

注:括号内数字为“管道长/最大水头”。

厂房布置在首部,除交通、施工、通风等的通道较长外,往出线困难;厂房临近上库,防渗要求高,同时只能采用竖井引水道,使管道较长,因此采用者不多。

由于抽水蓄能电站距高比小,输水系统沿线可满足覆盖厚度和地应力需要的范围比较广泛;随着近代岩土技术的发展,引水管与尾水管(包括岔管)都采用钢筋混凝土衬护,施工和造价无明显的差别,因此宜将缩短输水系统总体长度和少设或少设调压井作为厂房位置选择的重要因素。表 2 中所列工程多采用尾部布置,可只设引水调压井。厂房位置选择兼顾上下游,表列工程输水道长度与额定水头比值为 4 左右时,上下游都未设调压井。

2.2.2 比选单洞引水方案

国内已建、拟建的抽水蓄能电站,除广蓄分一、二期,每期单引水洞外,普遍采用两条引水洞,以利隧洞检修。国外有些大型抽水蓄能电站采用单洞引水(见表 2)。抽水蓄能电站发电引用流量较小,单洞引水洞径一般为 7~10 m,仍属中型断面,施工方便,随着电网的扩大、系统中蓄能和调峰电站座数的增多,宜比选单洞引水的合理性。实际上国内大中型引水式电站已有多座为单长洞引水,广蓄电站在二期建成前,一期单洞引水也长达五年半之久。抽水蓄能电站引水洞埋深较大,只要严格控制混凝土、特别是回填、固结灌浆施工质量,再经初

期运行调整后,检修机会一般不多。

2.2.3 研究竖井式进水口方案

国内抽水蓄能电站普遍采用侧式进水口,经验也比较成熟。不少工程上水库岸基岩和引水洞上平段围岩风化破碎,侧式进水口开挖面积大,与库盆防渗体的连接比较复杂;引水洞上平段有时要提高衬砌防渗能力,避免恶化岸库稳定。同时为保证洞顶最小压力要求,有的还需设陡坡或限制上平段长度,竖井式进水口可以避免上述不利条件,但国内经验尚不多,宜作研究比较。

2.2.4 简化调压井的工程实践

表 2 所列工程多为尾部开发,只设上游一个调压井。当尾水洞长度与额定水头比值在 1 左右时,可不设尾水调压井(与日本经验公式推算成果大致相当)。近年来有的工程采取工程或运行措施,开拓了长尾水洞不设调压井的经验。如日本奥美浓蓄能电站尾水洞长达 760 m 不设调压井;宝泉抽水蓄能电站最近经进一步比较论证,在不改变已定发电机组参数条件下,扩大尾水洞径,在尾水洞长达 850 m 的情况下,也取消了尾水调压井,并可节约投资约 2 000 万元。国内外一些工程采取的主要措施见表 2。

以上是笔者在回顾以往工程经验基础上提出的一点个人意见,仅供大家参考、讨论。

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告