



# 岷江犍为航电枢纽水电站厂房设计

卢丹玫，黄益洲

(中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司, 广西南宁530007)

**摘要:** 针对灯泡贯流式机组的特点, 通过采用材料力学方法、三维有限元方法分别对厂房稳定性、结构应力进行整体分析。通过合理设置厂房分缝止水位置、对厂房地基进行基础处理, 对厂房进行了合理的布置及结构设计。厂房设计取得较为满意的结果, 整体布置和结构设计合理、安全、经济。

**关键词:** 灯泡贯流式机组; 厂房布置; 厂房设计; 犍为航电枢纽

中图分类号: TV 731. 1+2; U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)12-0060-05

## Design of powerhouse for the bulb tubular turbine of Qianwei navigation-power junction project in Minjiang River

LU Dan-mei, HUANG Yi-zhou

(China Energy Engineering Group Guangxi Electric Power Design Institute Co., Ltd., Nanning 530007, China)

**Abstract:** According to the characteristics of bulb-type tubular unit, the powerhouse overall stability and structural stress have been respectively analyzed by using the material mechanics method and three-dimensional finite element method. Reasonable layout and structure design have been carried out for the powerhouse by properly setting the locations of water-stops between joints, as well as the foundation treatment. The satisfactory results are obtained for the powerhouse design, and the overall layout and structural design of powerhouse are reasonable, safe and economical.

**Keywords:** bulb tubular turbine; layout of powerhouse; powerhouse design; Qianwei navigation-power junction

岷江犍为航电枢纽工程是岷江下游河段(乐山—宜宾段)的第3个梯级, 是以航运为主, 结合发电, 兼顾供水、灌溉的水资源综合利用工程。坝址位于四川省乐山市犍为县城上游3 km处。岷江犍为航电枢纽工程水库总库容为2.27亿m<sup>3</sup>, 电站内装9台55.6 MW的灯泡贯流式机组, 总装机容量500 MW, 工程规模属大(2)型。主要建筑物等级为2级, 主要建筑物设计洪水标准采用100 a一遇设计、1 000 a一遇校核。地震基本烈度为Ⅷ度。

枢纽工程主要水工建筑物采用一字形布置, 从

左至右依次为: 左岸重力坝、鱼道、发电厂房、右储门槽坝段、泄水闸、船闸、右岸重力坝等。坝顶高程为342.00 m, 枢纽坝轴线总长1 094.55 m。

### 1 厂房布置

发电厂房为河床式厂房, 布置于左河槽, 属于挡水建筑物, 左侧接左岸接头重力坝坝段, 右侧接右储门槽坝段。发电厂房总长度为276.48 m, 其中包括主机间段190.48 m、安装间段63.0 m、装卸场段23.0 m。安装间布置在主机间左侧, 装卸场布置在安装间的左侧。厂房典型剖面布置见图1。

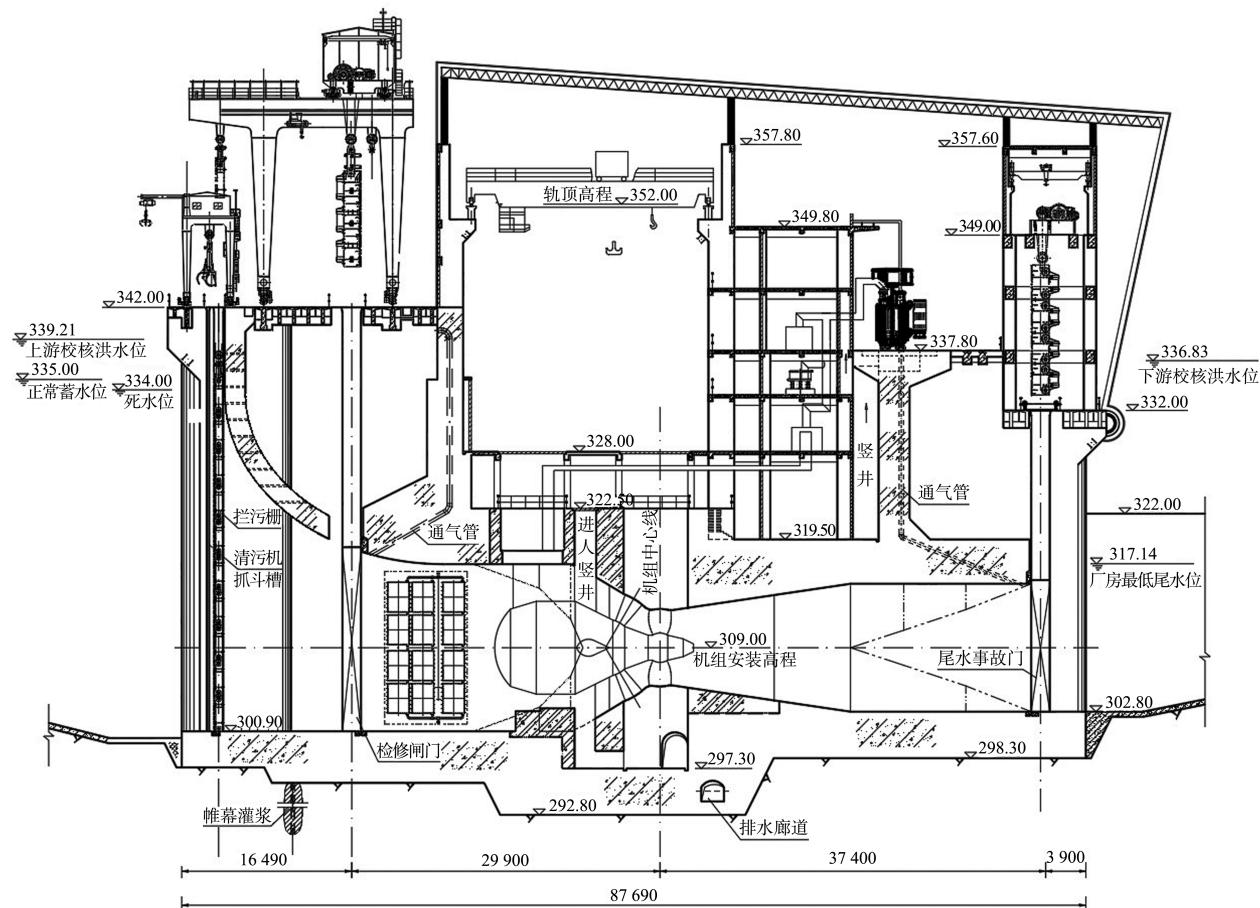


图 1 厂房横剖面 (高程: m; 尺寸: mm)

## 1.1 进水口布置

厂房进水口顺水流向依次布置 18 孔拦污栅和 9 孔检修闸门。进水口前部设一道垂直式拦污栅, 采用 2 台清污机自动清污, 并在两侧设置集污平台, 便于污物出运。进水口底槛高程为 300.90 m、顶板高程为 317.10 m、流道宽 15.20 m, 每台机组进水口前段设 1.6 m 厚的中墩, 进口段顶板采用 1/4 椭圆曲线, 椭圆曲线在顶板高程 317.10 m 与平直线平顺连接。检修闸门布置在下 0+003.340 桩号, 闸门孔口尺寸为 15.20 m×17.422 m(宽×高), 门后设通气孔。

进水口顶部高程为 342.00 m, 布置有桥面系统及启闭设备。进水口门机布置于 342.00 m 高程的坝顶上, 与泄水闸共用一台门机, 采用 2×1 600 kN 双向门式启闭机。

## 1.2 主机间段布置

厂房主机间分为 5 个坝段, 除最右侧 9 号机组为一机一段外, 其余均为两机一段缝, 主机间

总长 190.48 m、宽 87.69 m, 主体高度为 65.0 m。主机间建基面高程为 292.80 m, 机组安装高程为 309.00 m, 电缆层高程 322.50 m, 运行层高程 328.00 m, 桥机轨顶高程 352.00 m, 主厂房钢屋架底部高程 357.80 m, 厂房净跨 23.8 m。

主机间从下而上依次布置有排水廊道层、流道层、电缆层、运行层及上部结构。

厂房底部布置城门洞型的排水廊道, 廊道底部高程 294.10 m, 尺寸为 2.2 m×2.0 m(宽×高), 贯穿整个主机间, 排水廊道兼作检修通道的功能。

流道层布置有灯泡式水轮发电机组, 转轮直径 7 400 mm。灯泡体上设置有水轮机进入竖井, 竖井顶部高程 322.50 m, 可通过进入竖井对机组进行检修和维护。机组下方 297.30 m 高程层布置有转轮室和交通廊道, 转轮室主要布置接力器、轴承回油箱; 交通廊道贯穿整个主机间并与下游副厂房的楼梯相连, 形成立体交通, 可到达渗漏集水泵房和检修排水泵房。

电缆层高程为 322.50 m，主要布置电缆沟、电缆桥架。运行层高程为 328.00 m，布置有油压装置和调速器等。运行层 328.00 m 以上为厂房上部结构，上游混凝土挡水墙顶部高程 342.00 m，墙上设置混凝土吊车柱；下游混凝土挡水墙顶部高程 337.80 m，下游吊车柱采用混凝土排架形式。主机间屋顶配合枢纽整体建筑造型采用单坡面钢网架形式。

### 1.3 安装间及装卸场段布置

安装间坝段分 2 个坝段，总长 63.0 m，底宽 62.34 m，上游顶部高程 342.00 m，下游顶部高程 337.80 m，建基面高程为 308.00 m，底板高程 311.50 m，底板厚 3.5 m。安装场与主机间运行层高程均为 328.00 m。为优化工程量，高程 308.00~328.00 m 采用空腔设计，将 20 m 高的空腔设计成混凝土框格形式以增强整体刚度，空腔内回填砂卵砾石增加抗滑稳定安全性。

装卸场坝段总长 23.0 m、底宽 62.34 m，上游顶部高程 342.00 m，下游顶部高程 337.80 m，建基面高程为 308.0 m。装卸间上游侧设置 2 个闸门存放槽，尺寸为 17.6 m×3.1 m×20.6 m(长×宽×高)，装卸场高程为 337.80 m，高于校核洪水位 0.97 m。进厂道路通过回车场可以直达装卸场。

### 1.4 副厂房布置

副厂房包括主机间段下游副厂房和安装间段下游副厂房，均采用混凝土框架形式。主机间段下游副厂房布置于主厂房与下游挡水墙之间，位于尾水管上部。安装间段下游副厂房布置于安装场下游与下游挡水墙之间。副厂房主体顶部高程 349.80 m，分 5 层布置，房间进深为 7.5 m，每层上游侧设 2.5 m 宽的走道。各层主要用于机电辅助设备的布置。副厂房与主厂房下游挡水墙之间设通风竖井，以满足厂房的通风要求。

### 1.5 尾水段布置

尾水段位于主机间下游副厂房的下游侧，顺水流向宽 38.60 m，主要布置有尾水管、尾水事故检修闸门以及闸门启闭设备等。尾水段建基面高程 298.30 m、底部高程 302.80 m、底板厚 4.5 m、

顶部高程 315.20 m、顶板厚 3.8 m。尾水闸墩设事故检修闸门，每机 1 孔，每孔净宽 15.2 m、高 12.4 m。尾水事故门检修平台高程为 332.00 m，检修平台上设混凝土排架，顶部高程 349.0 m，排架顶部布置尾水启闭机房，室内安装有 9 台固卷机，用于尾水事故闸门的启闭。尾水启闭机房尺寸为 187.48 m×9.0 m×8.6 m(长×宽×高)，顶部高程 357.60 m。

## 2 厂房设计

### 2.1 厂房稳定分析

厂房稳定性采用 SL 266—2014《水电站厂房设计规范》中规定的材料力学方法进行设计<sup>[1]</sup>。分别对厂房进行抗滑稳定、抗浮稳定及基底应力分析。

厂房抗滑稳定按抗剪断强度公式计算：

$$K' = \frac{f' \sum W_1 + c'A}{\sum P} \quad (1)$$

式中： $K'$  为按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数； $f'$ 、 $c'$  为岩基上厂房基础底面与地基间的抗剪断摩擦系数及黏聚力(kPa)； $A$  为滑动面受压部分的计算截面积( $m^2$ )； $\sum W_1$  为全部荷载对滑动面的法向分值力(包括扬压力)(kN)； $\sum P$  为全部荷载对滑动面的切向分值力(包括扬压力)(kN)。

厂房抗浮稳定安全系数计算公式：

$$K_f = \sum W_2/U \quad (2)$$

式中： $K_f$  为抗浮稳定安全系数； $\sum W_2$  为机组段(或安装间段)的全部重(力)(kN)； $U$  为作用于机组段(或安装间段)的扬压力总和(kN)。

厂房基底面法向应力计算公式：

$$\sigma = \frac{\sum W_3}{A} \pm \frac{\sum M_{x'y}}{J_x} \pm \frac{\sum M_{y'x}}{J_y} \quad (3)$$

式中： $\sigma$  为厂房基底面上的法向正压力(kPa)； $\sum W_3$  为作用于机组段(或安装间段)上全部荷载(包括或不包括扬压力)在计算截面上法向分力的总和(kN)； $A$  为厂房地基计算截面受压部分的面

积( $\text{m}^2$ )； $\sum M_x$ 、 $\sum M_y$  为作用于机组段(或安装间段)上全部荷载(包括或不包括扬压力)对计算截面形心轴  $X$ 、 $Y$  的力矩总和( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )； $x$ 、 $y$  为计算截面上计算点至形心轴  $X$ 、 $Y$  的距离( $\text{m}$ )； $J_x$ 、 $J_y$  为计算截面对形心轴  $X$ 、 $Y$  的惯性矩( $\text{m}^4$ )。

电站属于河床式厂房，厂房基础坐落于弱风化粉砂岩、弱风化泥岩上，基岩的物理力学参数相对较低。厂房上游正常蓄水位 335.00 m，上游校核洪水为 339.21 m，厂房在正常运行情况下承受最大水头为 42.20 m，在校核洪水情况下承受最大水头达 46.30 m。厂房下部未设置排水系统，仅在上 0+002.40 处设一道灌浆帷幕，故扬压力不予折减。在水头较高、基岩物理力学参数较差、扬压力不予折减的情况下，边机组段及装卸场坝段的稳定应力在设计初期未能满足规范要求。通过调整止水和空腔内回填土石的位置最终达到了满意的结果，各坝段的抗滑、抗浮稳定及基底应力均满足规范要求。边机组段稳定应力计算结果见表 1。

表 1 边机组段稳定及应力

荷载组合	计算工况	$K'$	$K_f$	$\sigma_{\max}/\text{kPa}$	$\sigma_{\min}/\text{kPa}$
基本组合	正常运行工况 a1	7.91	2.31	652.80	119.62
	正常运行工况 a2	18.47	1.83	361.38	243.33
特殊组合	机组检修工况	7.56	2.19	650.46	52.63
	机组未安装工况	16.87	1.66	325.50	119.30
	非常运行工况	12.44	1.70	324.20	257.17
	地震工况	4.78	2.31	714.50	47.57

## 2.2 厂房结构分析

贯流式机组厂房上下游挡水墙与闸墩、底板共同受力，流道结构复杂，管型座及周边结构受力复杂，整体结构较为复杂<sup>[2]</sup>；安装间、装卸场均为框格三维形式，结构力学方法对边界条件进行了很多简化，计算未能考虑整体作用对结构的影响，采用三维有限元分析对厂房进行整体线弹性结构分析，机组段三维有限元模型见图 2。按照 SL 266—2014《水电站厂房设计规范》的工况规定对厂房整体建模，并对各个运行工况进行计算分析，结果表明：厂房结构合理，应力分布合理，钢筋配置均满足极限承载力和正常使用极限状态要求，

结构配筋在安全经济范围内，上下游墩墙、左右侧挡水墙、底板及下部大体积结构均合理安全，主厂房结构安全合理<sup>[3]</sup>。

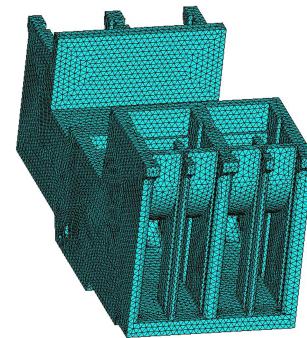


图 2 中间机组段三维有限元模型

根据三维结构计算结果，主机间段 3 个方向位移量均不大，中间机组段最大位移为 11.2 mm，边机组段最大位移为 16.5 mm，均满足规范要求。

## 2.3 厂房止水、排水设计

根据地基的特性、气候条件、温度变形、沉降等要求，厂房需要设置永久变形缝。厂房坝段共设置 7 道变形缝，缝宽均为 20 mm。主机间段除 9 号机组段为单机一缝外，其余机组段均为两机一缝。安装间分两个坝段，装卸场独立一个坝段。项目地震设计基本烈度为Ⅷ 度，按照规范规定，沉降缝设两道止水，第一道止水为“Ω”形铜片止水、第二道为橡胶止水带。厂房止水设置为 U 形，上游止水埋入基岩以阻隔上下游水流，水平止水高程设置于 318.00 m 高程，主要由厂房的稳定应力确定。交通廊道、排水廊道分缝处均设置两道止水片，形式同上下游止水。

厂房内设有一个渗漏集水井(14.3 m×9.0 m×4.8 m)和一条贯穿主机间坝段的城门洞型的检修排水廊道(2.2 m×2.0 m)，厂房内的渗漏水均通过地漏及管路排往渗漏集水井；机组检修通过排水口及管路排往检修排水廊道。

## 2.4 厂房基础处理设计

厂房建筑物基础位于弱风化基岩上，考虑到弱风化泥岩及泥质粉砂岩地基允许承载力较差，同时为了弥补开挖爆破的影响、增强基岩的整体性、提高基岩的弹性模量，在坝踵和坝趾一定范

围内进行固结灌浆，提高基岩的整体性。厂房主机间坝段固结灌浆的孔距沿轴线方向为 3 m，排距 2.5 m，沿水流方向上游侧布置 4 排，下游侧布置 4 排，灌浆深度上游入岩 8 m、下游入岩 6 m。安装间及装卸场坝段固结灌浆的孔距沿轴线方向为 3 m，排距 3.0 m，沿水流方向上游侧布置 3 排、下游侧布置 4 排，灌浆深度除上游第 1 排入岩 8 m 外，其余均入岩 6 m。

### 3 结语

1) 采用材料力学方法分析厂房的稳定应力，厂房在各个工况下的稳定应力均满足规范要求，整体布置是合理的。

2) 采用三维有限元方法对厂房整体结构进行应力分析，相较于结构力学方法获得更为合理的受力情况，从而使厂房的结构设计更合理。

(上接第 46 页)

2) 当水位变幅较大时，鱼道设计运行水位拟采用保证率和机组发电水位相结合来确定。当单台机组发电流量保证率较高时，最低运行水位可考虑调高。

3) 合理布置鱼道的进口位置和朝向，并且尽可能布设诱导鱼措施。

4) 鱼道的主体段设计在满足过鱼口流速(纵向坡比)的前提下，尽可能变化断面以模拟天然河道的特性。

5) 完善鱼道监测设施，为鱼道高效运行提供支撑。

### 参考文献：

- [1] 陆波, 喻卫奇, 陈静, 等. 浅谈水电工程鱼道运行管理[J]. 水力发电, 2020, 46(2): 85-89.
- [2] 水利部中国科学院水工程生态研究所. 岷江犍为航电工程水生态环境影响评价报告[R]. 武汉: 水利部中国科学院水工程生态研究所, 2010.
- [3] 南京水利科学研究院. 岷江犍为航电枢纽工程鱼类游

3) 根据厂房稳定及结构受力要求，合理设置止水，使厂房处于合理的平衡受力状态；根据基岩的实际情况对厂房基础进行帷幕灌浆和固结灌浆，提高了厂房基岩的整体性。

4) 厂房整体布置合理，结构形式安全，取得较为满意的设计成果，对灯泡贯流式机组厂房设计具有一定的借鉴和参考的意义。

### 参考文献：

- [1] 中水北方勘测设计研究有限公司. 水电站厂房设计规范: SL 266—2014 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
  - [2] 陶成鼎. 大源渡枢纽灯泡贯流式机组水电站厂房设计[J]. 水运工程 2000(10): 59-62.
  - [3] 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院. 水工混凝土结构设计规范: DL/T 5057—2009[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- (本文编辑 武亚庆)
- [4] 涌能力试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.
  - [5] 水利部水利水电规划设计总院. 水利水电鱼道设计导则: SL609—2013[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
  - [6] 水电水利规划设计总院. 水电工程过鱼设施设计规范: NB/T 35054—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
  - [7] 王岑, 王继保, 吴欢, 等. 不同位置和朝向的鱼道进口诱鱼效果[J]. 水产学报, 2020, 44(4): 681-689.
  - [8] 汪亚超, 陈小虎, 张婷, 等. 鱼道进口布置方案研究[J]. 水生态学杂志, 2013, 34(4): 30-34.
  - [9] 石迅雷. 不同位置与朝向的鱼道进口水流特性研究[J]. 水利科技与经济, 2020, 26(1): 17-21.
  - [10] 重庆西南水运工程科学研究所. 四川省岷江犍为航电枢纽水工模型试验研究报告[R]. 重庆: 西南水运工程科学研究所, 2012.
  - [11] 南京水利科学研究院. 岷江犍为航电枢纽鱼道工程进、出口水流条件二维数值仿真模型研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.
  - [12] 南京水利科学研究院. 岷江犍为航电枢纽鱼道工程整体物理模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.
- (本文编辑 武亚庆)