

水电站 厂房结构研究

练继建 王海军 秦亮 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

水电站 厂房结构研究

练继建 王海军 秦亮 著

江苏工业学院图书馆
藏书章



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书从水电站结构体系复杂的工作条件出发,考虑多种因素的联合作用,结合实际工程进行理论分析、数值计算和现场测试,对各类水电站结构的受力状态和静动力特征,水电站厂房结构的水力、机械、电磁等多种荷载的特征,水力—结构—机电耦联作用机理,水电站结构和机电耦联动力监测、识别和运行优化等一系列水电站结构设计运行中的重点、难点问题开展了研究,取得了具有实用价值的创新性研究成果。

本书是在总结天津大学多年研究成果的基础上撰写而成的,书中列举了大量的试验数据和实例,并在此基础上得出了一些具有实用性、创新性的理论和方法。

本书除可用作水利水电工程专业人士的参考用书外,还可作为相关专业的研究生以及教师的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水电站厂房结构研究/练继建,王海军,秦亮著. —北京:中国水利水电出版社,2007

ISBN 978-7-5084-5099-5

I. 水… II. ①练…②王…③秦… III. 水电站厂房—建筑结构—结构设计—研究 IV. TU271.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 172675 号

书 名	水电站厂房结构研究
作 者	练继建 王海军 秦亮 著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	787mm×1092mm 16 开本 19.25 印张 367 千字
版 次	2007 年 12 月第 1 版 2007 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

知悉《水电站厂房结构研究》一书即将出版，非常高兴，欣然为之作序。

21 世纪，将是水电高速发展的时期。我国水电中长期发展目标，全国常规水电装机容量到 2010 年，要达到 1.94 亿 kW；2020 年将要达到 3.28 亿 kW。在相当长的一段时间内，我国的水电开发将保持很快的发展速度，发展的重点是建设有调节能力的大型水电站、流域梯级开发的龙头水电站和抽水蓄能电站。一些大型和巨型水电站将兴建成为电网的骨干电源，并推动“西电东送”发展战略的实现。随着一批世界级的工程已经或正将拔地而起，这其中主要有：三峡、龙滩、小湾、溪洛渡、向家坝、拉西瓦、构皮滩等，我国水电的总装机容量和总发电量方面已超过美国、俄罗斯、加拿大等而成为世界水电第一大国。

水电站厂房是水利枢纽工程的一个重要组成部分，是一个由水流、机组、厂房结构等组成的复杂耦联作用体系。随着机组的单机容量和厂房结构尺寸的增大，在厂房结构设计、性态检测和机组优化运行等方面，都提出了许多新的问题。天津大学水利水电工程系多年以来，面向国家水电站建设和运行的重大需求，结合工程实际，对坝后式、河床式、地下式、溢流式（挑跃式）以及双排机厂房等不同型式厂房结构的受力状态、动力特性，水流、机械、电磁荷载特性，水力—结构—机电耦联作用规律和运行优化模式等方面开展了系统的理论分析、数值计算和现场测试研究，其成果指导了有关水电站厂房结构设计和优化运行。其中厂房抗震拟静力法计算图形等方面成果被《水电站厂房设计规范》采用。该书是作者及所在研究组多年来对水电站厂房结构研究成果的总结，在垫层蜗壳和充水

保压组合结构的受力分析，钢蜗壳外围混凝土非线性损伤模拟，厂房结构的整体静动力分析和抗震响应计算，各种振源识别和模拟，以及振动响应预测和安全监测、综合优化运行等方面进行了卓有成效的工作。以上研究成果其理论、方法具有较好的实用性和创新性。

我相信，该书的出版将有益于水电站厂房的设计和安全运行水平的提高，是一本值得向同行推荐的著作。

中国工程院院士



2007.3

前 言

我国的水能资源丰富，理论蕴藏量为 6.76 亿 kW，技术可开发容量为 4.93 亿 kW，经济可开发容量为 3.78 亿 kW。不论是水能资源蕴藏量，还是可能开发的水能资源，我国都居世界第一位。但是，与发达国家相比，我国的水力资源开发利用程度并不高。截至 2004 年 9 月，我国水电装机容量突破了 1 亿 kW 大关，但开发率仅 24% 左右，大大低于发达国家 50%~70% 的开发利用水平。因此，我国水力资源开发潜力巨大。

把水能转换成电能的工厂称为水力发电厂或水力发电站。安装水轮发电机组及其附属机电设备和辅助生产设施的建筑物称为水电站厂房。水电站结构的受力和工作条件十分复杂，除受静力荷载作用外，还要受地震、水力、机械、电磁等多种动力荷载的作用，随着我国水利水电事业的发展，单机容量由 200MW 发展到 700MW 以上，坝高达 200~300m，水电站结构的设计和安全运行面临新的挑战。随着机组的单机容量和厂房结构尺寸的不断增大，会导致厂房结构刚度相对降低、动荷载相对增大、共振的可能性加大，无论是在结构设计方面，还是在厂房结构和机组的安全稳定运行方面，都提出了许多新的课题。天津大学多年来从水电站结构体系复杂的工作条件出发，考虑多种因素的联合作用，结合实际工程进行理论分析、数值计算和现场测试，对各类水电站结构的受力状态和静动力特征，水电站厂房结构的水力、机械、电磁等多种荷载的特征，水力—结构—机电耦联作用机理，水电站结构和机电耦联动力监测、识别和运行优化等一系列水电站结构设计运行中的重点、难点问题开展研究，取得了具有实用价值的创新性研究成果，本书就是在这些研究成果的基础上撰写而成的。

全书共分16章。第1章介绍了厂房及蜗壳的各种组合结构型式；第2章介绍了垫层蜗壳组合结构的受力特性，包括垫层的材料特性、铺设范围研究等；第3章介绍了充水保压蜗壳组合结构静力分析，重点探讨了仿真计算方法和保压水头、水温等对结构的影响；第4章、第5章对钢蜗壳外围混凝土进行非线性损伤数值模拟，研究结构的损伤分布规律；第6章以实际工程为背景，深入地研究了温度对水电站厂房下部结构的影响规律；第7章对双排机厂房这种特殊的结构的布置、受力特性进行了深入的探讨；第8章介绍了河床式厂房结构模型试验研究；第9章对坝后式、地下式、河床式以及双排机厂房的动力特性和抗震响应计算进行了详细的阐述；第10章从水力、机械和电磁三个方面对引起厂房振动的振源进行了深入的讨论；第11~13章结合实际工程的现场振动测试，总结了包括坝后式、河床式和双排机厂房结构的振动规律；第14章依托厂房现场振动测试数据，采用现代识别技术对厂房结构的动力特性进行识别，并提出响应的预测方法；第15章介绍了一种根据开机过程对厂房结构振动进行预测的方法；第16章介绍水电站机组运行效率、稳定性和启停次数的综合优化方法，该方法具有较强的实用性和通用性。

本书由练继建、王海军、秦亮撰写。为本书付出辛勤劳动的还有杨敏、彭新民、李胜军、安刚、戚蓝、胡兴娥、何成连、胡志刚、张辉东、李火坤、喻刚、李松辉、张建伟、胡杰、李锦成等。我们不会忘记是在恩师王日宣教授指导下开始水电站厂房结构研究的，谨以此书献给恩师王日宣教授从教五十周年；不会忘记曹楚生院士、张勇传院士、朱尔明教授、崔广涛教授、林继镛教授、李振富教授对我们的鼓励和支持。感谢大连理工大学的马震岳教授、武汉大学的伍鹤皋教授、清华大学的马吉明教授等国内同行提供的无私帮助；感谢黄河上游水电站开发有限责任公司，中国长江三峡工程开发总公司，二滩水电开发有限责任公司，中国水电顾问集团中南勘测设计研究院、西北勘测设计研究院、昆明勘测设计研究院、成都勘测设计研究院，长江水利委员会长江勘测设计研究院等单位对我们从事科学研究的支持！

由于作者的学识和水平所限，难免存在疏漏、不妥或错误之处，
诚恳希望读者与专家指正。

作 者

2007 年 3 月于天津大学

目 录

序

前言

第 1 篇 水电站厂房结构静力分析

第 1 章 厂房及蜗壳组合结构型式	1
1.1 厂房结构型式	1
1.2 蜗壳组合结构型式	6
参考文献	8
第 2 章 垫层蜗壳组合结构静力分析	10
2.1 蜗壳垫层的材料特性	10
2.2 垫层蜗壳组合结构的有限元仿真模型	16
2.3 垫层蜗壳组合结构有限元仿真计算结果	18
2.4 垫层材料特性、厚度和铺设范围的影响分析	21
2.5 钢蜗壳滑移的影响分析	24
参考文献	25
第 3 章 充水保压蜗壳组合结构静力分析	26
3.1 充水保压钢蜗壳支撑研究	26
3.2 简化方法和仿真方法	27
3.3 工程实例	27
3.4 水温对钢蜗壳变形的影响	30
3.5 钢蜗壳残余应力分析	34
参考文献	38
第 4 章 钢蜗壳外围混凝土平面非线性分析	39
4.1 钢筋混凝土有限元	39
4.2 增量理论的混凝土弹塑性本构关系	40

4.3	混凝土开裂处理	47
4.4	蜗壳组合结构的非线性有限元分析	50
4.5	蜗壳结构配筋原理研究	55
	参考文献	56
第5章	钢蜗壳外围混凝土三维损伤分析	58
5.1	损伤演化方程	58
5.2	正交异性损伤本构模型	65
5.3	混凝土多轴应力状态下的破坏准则	67
5.4	三维损伤有限元	68
5.5	程序实现	69
5.6	应用实例	70
	参考文献	72
第6章	温度变化对厂房下部结构的影响	74
6.1	混凝土温度场以及温度应力计算基本理论	74
6.2	影响混凝土温度场的因素	77
6.3	混凝土温度应力的发展过程	79
6.4	温度变化对水电站地下厂房下部结构应力的影响	80
6.5	温度变化对水电站地下厂房下部结构配筋的影响	82
	参考文献	83
第7章	双排机厂房布置研究与结构静力分析	85
7.1	厂房布置方案的研究与比较	85
7.2	厂房下部结构静力分析和分缝研究	88
7.3	厂房上部结构静力分析	91
7.4	厂房深开挖对岸坡影响分析	92
	参考文献	96
第8章	河床式厂房结构模型试验研究	97
8.1	模拟原理	97
8.2	试验测试及分析	98
	参考文献	103

第2篇 水电站厂房结构动力分析与测试识别

第9章	水电站厂房结构的动力特性	105
9.1	水电站厂房结构自振特性分析	105

9.2	水电站厂房地震响应分析	120
9.3	水电站厂房泄洪振动	129
	参考文献	140
第 10 章	厂房和机组振动的振源分析与作用机制	141
10.1	水力荷载分析	141
10.2	机械荷载分析	149
10.3	电磁荷载分析	154
	参考文献	157
第 11 章	坝后式(引水式)厂房和机组振动测试分析	159
11.1	三峡水电站厂房结构和机组振动的测试分析	159
11.2	螺丝湾水电站厂房结构和机组振动测试分析	171
	参考文献	181
第 12 章	河床式厂房和机组振动测试分析	183
12.1	机组参数与测试方案	183
12.2	机组振动测试分析	184
12.3	厂房结构振动测试分析	191
12.4	振源分析	195
	参考文献	198
第 13 章	双排机厂房结构和机组振动测试分析	199
13.1	机组参数和测试方案	199
13.2	单机运行厂房结构和机组振动测试分析	201
13.3	双机联合运行厂房结构和机组振动测试分析	216
13.4	双排机水电站机组的运行稳定性	227
	参考文献	228
第 14 章	厂房结构动力特性识别和响应预测	229
14.1	结构动力参数时域识别方法	229
14.2	结构动力损伤诊断	246
14.3	基于小波分析的结构动力参数识别	249
14.4	基于遗传算法的结构动力参数识别	253
14.5	水轮发电机组结构垂向振动位移与压力脉动的关系	258
14.6	机组结构垂向振动与厂房结构垂向振动的关系	261
14.7	机组—结构作用机理分析	263
14.8	垂向反馈计算分析	265

参考文献	266
第 15 章 开机过程中的厂房结构振动预测方法	268
15.1 开机过程实测分析	268
15.2 开机过程中的荷载分析	271
15.3 有限元计算分析	275
15.4 减小开机过程中结构振动的措施	275
参考文献	276
第 16 章 水电站的安全经济运行综合优化研究	277
16.1 双排机运行机组效率测试	277
16.2 水电站安全经济运行综合优化	279
参考文献	296

第1章 厂房及蜗壳组合结构型式

1.1 厂房结构型式

水电站厂房是电能生产枢纽的中心，是水工建筑物、水力机械及电气设备的综合体。其功用是：通过一系列工程措施，将水流平顺地引入及引出水轮机，并为厂房内机电设备的安装、检修和运行管理提供良好的工作环境，保证能按照电力系统的需要，安全、经济、可靠地生产电能^[1]。

水电站厂房建筑物的类型较多，可按多种方式划分^[2-10]。有按机组类型划分的：如常规机组厂房、抽水蓄能机组厂房、贯流式机组厂房等。有按机组装置方式划分的：水轮发电机组主轴竖直布置的厂房称为立式机组厂房，一般大中型水电站厂房均为此类；机组主轴水平布置的厂房称为卧式机组厂房，一般装设卧式水轮机或贯流式水轮机。有按水轮发电机组的作用水头划分的：当作用水头 $H < 40\text{m}$ 时，是低水头厂房；当 $H = 40 \sim 200\text{m}$ 时，是中水头厂房；当 $H > 200\text{m}$ 时，是高水头厂房。最常用的是按照水电站厂房结构及布置特点划分：可分为地面式厂房、地下式厂房、坝内式厂房、溢流式厂房等类型。地面式厂房又分为：坝后式厂房、河床式厂房、引水式地面厂房、露天式或半露天式厂房等。另外，引水式水电站或混合式水电站，其厂房一般远离挡水建筑物，可以是地面式或地下式；抽水蓄能电站也可以是地下式或者地面式；双排机水电站厂房是一种较特殊的厂房结构型式。现将按厂房结构和布置特点划分的各类不同结构类型的厂房简述如下^[2-10]：

1.1.1 地面式厂房

1. 坝后式厂房

厂房位于坝趾下游，紧靠大坝，常采用永久竖直缝与大坝分开，厂房一般不承受上游库水压力，但有时经厂坝间接缝传力，从而帮助大坝抗滑稳定，这种情况是较少见的。坝上游面设有进水口，压力管道穿过坝体，进水口处设有拦污栅和应急事故闸门。如图 1-1 中 (a) 所示。

2. 河床式厂房

厂房位于河床，本身作为挡水建筑物的一部分，厂坝在河床上结为一体，水轮机过流量大，水头小。一般采用钢筋混凝土蜗壳，进水口在上游坝面设有拦污栅和应急事故闸门。如图 1-1 中 (b) 所示。

在多沙河流，水头低于 20m 的水电站，有时厂房兼作泄水闸闸墩，称为闸墩式厂房，如青铜峡水电站厂房。有时在厂房蜗壳与尾水管之间布置泄水道，用来泄水和排沙，称为泄水河床厂房。泄水时的射流作用，使尾水管出口断面上的压力比下游洪水位低，因而增加了水头和出力，称射流效益。葛洲坝水电站河床式厂房带有冲沙孔，主要是为了防止进水口被泥沙堵塞，微弱的射流仅起增加落差作用。

3. 引水式地面厂房

厂房位于压力输水道下游端的河岸上。也有的小型引水式水电站布设较长的明渠，明渠下游端为前池，下接压力输水道，然后布置厂房。厂房布置和结构型式基本上和坝后式厂房相同。如图 1-1 中 (c) 所示。

引水式地面厂房的压力输水道较长，需要在靠近厂房岩坡的山体顶部设调压室，以减小水击压力。为此，要注意厂房上游侧的岩坡稳定。引水式地面厂房应用较广泛，如天生桥一级水电站、官厅水电站等都是采用引水式地面厂房。

4. 露天式或半露天式厂房

如把地面厂房上部结构的墙壁和屋顶去掉，主机组用防护罩盖住，利用门式吊车安装、检修机组，辅助设备布置在水轮机层，就称为露天式厂房。每台机组要单独设防护罩，并留有吊物孔和进入孔。如图 1-1 中 (d) 所示。如把地面厂房上部结构的墙壁和屋顶去掉，厂房的主、辅设备布置在低矮的房间中，房顶开孔，孔口用活动防护罩盖住，发电机周围有较大的空间便于巡视，就称为半露天式厂房。

1.1.2 地下式厂房

厂房设在地下山岩中，既可以布置在压力输水道的首部也可布置在中部或尾部，进水口、拦污栅、应急事故闸门设在压力输水道的上游端。厂房下游有尾水隧洞，如尾水隧洞较长要设尾水调压室；同样，如厂房上游压力隧洞较长

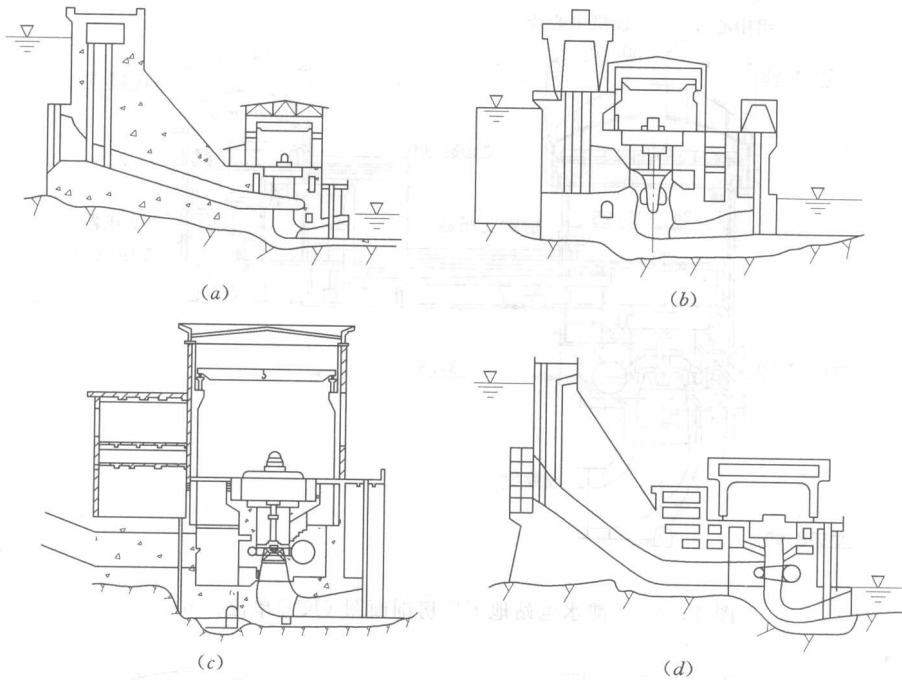


图 1-1 水电站地面式厂房类型图

(a) 坝后式; (b) 河床式; (c) 引水式; (d) 露天式

也要设调压室。地下式厂房一般适用于河流泄洪量大、坝址河床窄，或修建当地材料坝，两岸有较好地质条件的水电站枢纽。修建地下式厂房，对大坝施工干扰少，厂房施工不受气候影响，下游河道水位变化对厂房影响小，人防条件好。但开挖、支护、衬砌量大，人工照明、通风、防潮要求高。目前，由于地下开挖技术的进步和岩石力学学科快速发展，给地下式厂房的建设提供了有利条件，故近年来国内外采用地下式厂房日趋增多。图 1-2 为二滩水电站地下厂房剖面图。

1.1.3 坝内式厂房

主厂房布置在混凝土坝体内。将厂房布置在混凝土重力坝或重力拱坝空腔内，当坝址处河床狭窄且机组台数相对较多、洪水流量又较大时，采用溢流坝坝内式厂房，可解决厂房和溢流坝布置的矛盾。该类厂房的引水道和尾水道都很短，混凝土坝体内有空腔，有利于坝体混凝土的冷却和节省混凝土。其缺点是，通风、照明、防潮要求高；结构应力比较复杂；施工干扰大；下游消能和岸坡保护复杂。图 1-3 为凤滩空腹重力拱坝坝内式厂房剖面图。

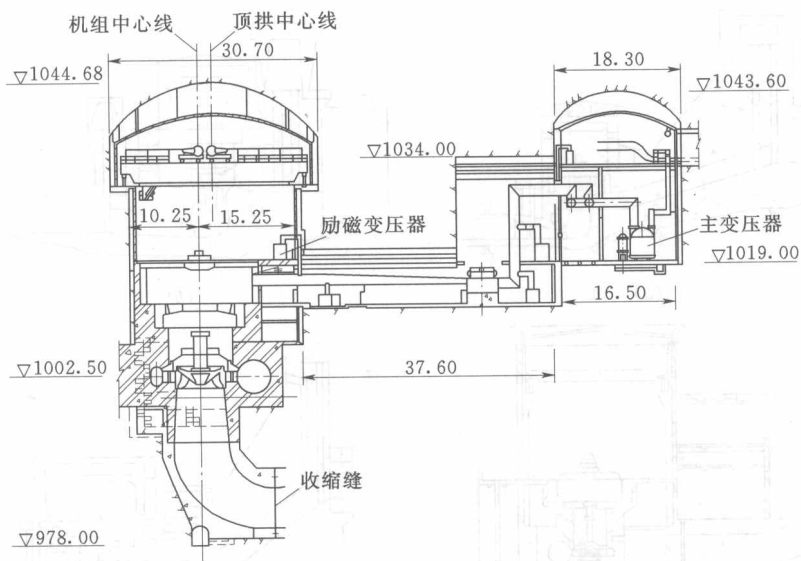


图 1-2 二滩水电站地下厂房剖面图 (尺寸单位: m)

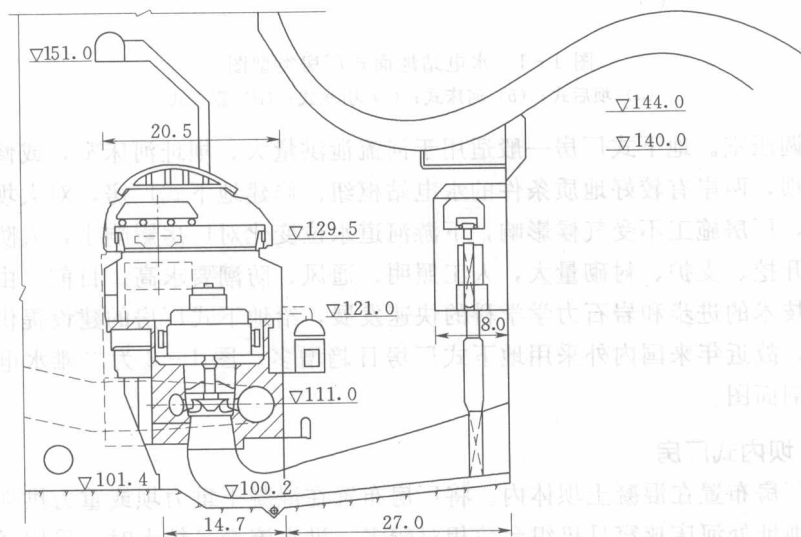


图 1-3 风滩水电站厂房剖面图 (尺寸单位: m)

1.1.4 溢流式坝后厂房

位于坝下, 经厂房顶或挑越厂房顶的水电站厂房。当坝址河床狭窄而机组台数多, 洪水流量又大时, 为解决厂房和溢流坝布置的矛盾, 常采用溢流式厂

房。溢流式坝后厂房分为溢流式和挑越式。前者厂房顶作为溢洪道的一部分,如中国新安江水电站厂房;后者厂房顶低于大坝挑流鼻坎,正常泄洪时,高速水流挑越厂房顶,水舌直接落到下游河床,如图 1-4 所示的乌江渡水电站厂房。

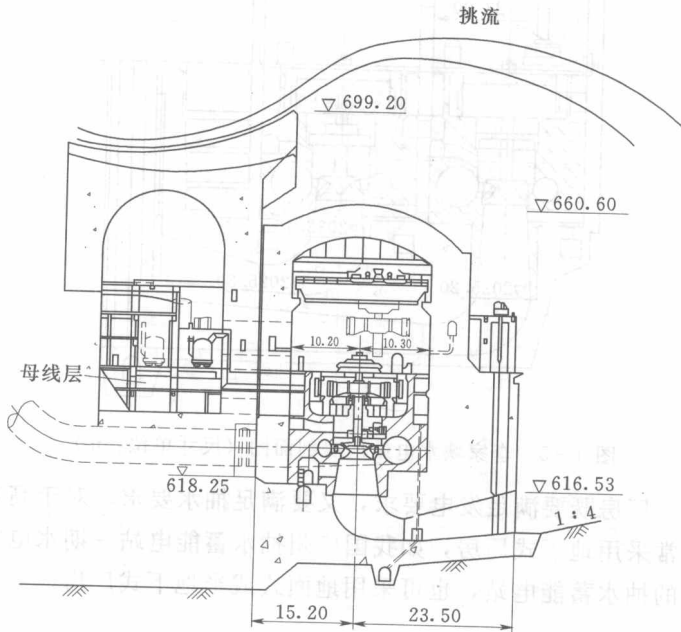


图 1-4 乌江渡水电站厂房剖面图 (尺寸单位: m)

1.1.5 双排机厂房

双排机厂房位于坝址下游,下部结构具有双层尾水管和双排进水管。在河床狭窄且水力资源丰富的坝址建筑水电站时,采用双排机布置方案,可以解决高深峡谷坝后大容量多台数机组单列式布置厂房长度不够,而需将一部分机组置于岸边山体内部的困难,有利于两岸坝肩的稳定,减少地下工程量,加快施工进度。前苏联最早采用双排机水电站厂房布置方案,即比单列式一个机组稍宽一些,布置两台机组,一台靠厂房上游侧,另一台靠厂房下游侧,如 Toktogul 水电站和 Chirkey 水电站。我国从 20 世纪 80 年代开始研究这种布置方式,并成功应用于李家峡水电站。李家峡水电站厂房剖面如图 1-5 所示。

1.1.6 抽水蓄能电站厂房

利用电网中其他电站产生的多余电能,通过抽水蓄能电站的可逆式水泵水轮机或水泵,将下水库的水抽蓄于上水库,以势能的形式蓄能,需要时再从上水库放水至下水库进行发电的电站为抽水蓄能电站。抽水蓄能电站厂房安装抽