

水电站坝内埋管设计手册及图集

水电站坝内埋管设计手册及图集编写组

水利电力出版社

60

007021 水利部信息中心



水利部信息中心	
图书编号	1000000000
分类号	17

水电站坝内埋管设计手册及图集

水电站坝内埋管设计手册及图集编写组

水利电力出版社

内 容 提 要

本书取材于国内外坝内埋藏式钢管设计的经验，并在国外压头设计计算方法上有所创新。是钢管设计的较完整的参考资料之一。
全书分为手册和图集两部分。手册部分详细介绍了坝内埋管的位置、水力计算、设计原则及受力情况、结构计算、细部结构、制造、安装等，并附有表格。图集部分介绍了国内外电站中已应用的坝内埋管，可作为设计的参考。
本书是从事水利水电设计技术人员实用的工具书，也可供科研和教学人员参考使用。

21038/19

水电站坝内埋管设计手册及图集
水利电力出版社出版、发行
(北京三里河大街8号)
水电站坝内埋管设计手册及图集编写组
各地新华书店经售
ISBN 7-120-00375-5/TV·116
水利电力出版社印刷厂印刷

1988年11月第一版
787×1092毫米 8开
1988年11月北京第一次印刷
21.5印张
印数0001—2646册
定价9.75元

前 言

随着混凝土坝筑坝技术的迅速发展，坝的埋设发电引水钢管的技术也日新月异。为适应坝内埋设钢管技术进一步发展的需要，我院在组织编写《水电站压力埋管设计规范》时，特对坝内埋管的布置、结构分析、构造等有关部分提出了规定和要求，但对其具体计算的原则、方法和图集则未能包括。为此我院组织水利电力部北京勘测设计院安康设计处编写了《水电站坝内埋管设计手册及图集》。

在编制过程中，得到了有关水利水电勘测设计、施工、运行、科研单位和大专院校的积极支持与配合，进行了调查及专题研究，在总结经验的基础上，吸取了有关单位的科研成果，并收集和整理了国内外资料。

本手册和图集共分六章及附录、图集。其中第一、二、三章由潘玉华执笔；第四章、附录由邱彬如执笔；第五、六章及第三章算例由袁培义执笔；图集由潘玉华、邱彬如绘制。

董育坚、柳长祚、林可冀、侯建功、张钟禄、张宝英等同志对本手册和图集进行了审查和定稿等工作。

本手册和图集不仅是一本从事水利水电设计技术人员实用的工具书，而且可供教学和科研人员参考使用。部分内容还可供地下埋藏式钢管及其他坝内孔道设计参考。

由于我们调查研究还不够深入，经验不足，缺点、错误之处在所难免，希望广大读者特别是从事水利水电设计工作的同志发现问题后及时告诉我们，以便再版时修订。

目 录

手册部分	
前言	
第一章 坝内埋管布置	1
第一节 布置型式和线路选择	1
第二节 压力钢管经济直径的选择	8
第二章 坝内埋管的设计原则及荷载组合	11
第一节 基本资料	11
第二节 水轮发电机组资料	11
第三节 材料	12
第四节 设计原则和荷载组合	13
第三章 水力计算	15
第一节 水力计算的内容及目的	15
第二节 水头损失计算	15
第三节 水电站引流量计算	18
第四节 调节保证计算	19
第四章 钢管道结构计算	28
第一节 承受内压的设计	28
第二节 拉外压失稳计算	40
第三节 孔口应力集中和配筋计算	56
第五章 细部结构和其他	65
第一节 伸缩节	65
第二节 进入孔	65
第三节 钢管堵头	66
第四节 灌浆孔	67
第五节 原型观测	67
第六节 钢管的防锈保护	67
第七节 运行和维修	68
第六章 钢管制造与安装要求	69
第一节 概述	69
第二节 钢管制造	69
第三节 钢管安装	71
附录 有孔圆管孔口应力集中系数表	72
图表部分	

第一章 坝内埋管布置

第一节 布置型式和线路选择

坝内压力钢管是指埋设于混凝土坝体内的水轮机引水管道。在混凝土重力坝或重力拱坝的坝后式厂房、溢流式厂房和坝内厂房，均用这种管道引水。

一、布置型式

坝内钢管的布置型式取决于坝型、厂房和进水口的布置，另外，还要考虑结构问题和施工条件。从已建成的工程实例中，可以归纳为以下几种常见的布置型式：

1. 斜针式坝内埋管

这种布置多用于混凝土重力坝坝后式厂房，当进水口高程较高时，一般都用斜管和木轮机组相连（见图1-1和1-2），这种布置型式管线较短，造价较低，管道在混凝土中埋得较深，可以考虑钢管与混凝土联合受力，另外斜管走向和坝体的一组主压应力接近平行，可以减轻孔口应力集中，少配钢筋，但这种布置将使得钢管安装和混凝土浇筑干扰较大，不利于加快大坝施工。

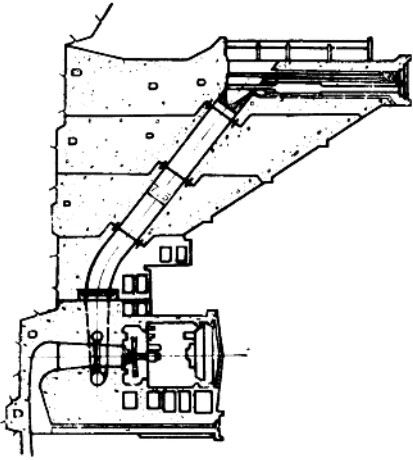


图 1-1 安澜电站

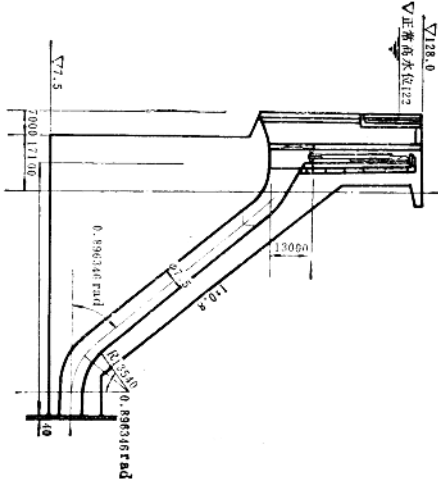


图 1-2 布拉特斯克电站

2. 斜针式的坝后背管

由于上述布置型式不利于大坝混凝土施工，国内外某些工程采用了坝后背管的布置型式，见图1-3和1-4。这种布置的特点是减少了钢管安装和坝体混凝土施工的干扰，有利于加快工程进度，但由于斜管不能考虑与混凝土的联合作用，耗费钢材较多。

3. 水平埋管

当坝不高且进口高程布置较低时，钢管可以水平或接近水平布置，穿过坝体，见图1-5。这种布置在拱坝和重力坝中均有实例。

4. 垂直埋管

这种布置多用于坝内式厂房，由于厂房距进水口比较近，只能用垂直（或接近垂直）的钢管引水（见图1-6和1-7）。我国的上犹江和枫树坝水电站均采用这种布置型式。对于一些比较薄的拱坝，如果要设埋管，也将采用垂直布置，但由于孔口对坝体有削弱作用，对拱坝而言，应力求避免采用此种布置，故拱坝中用垂直埋管的实例甚少。

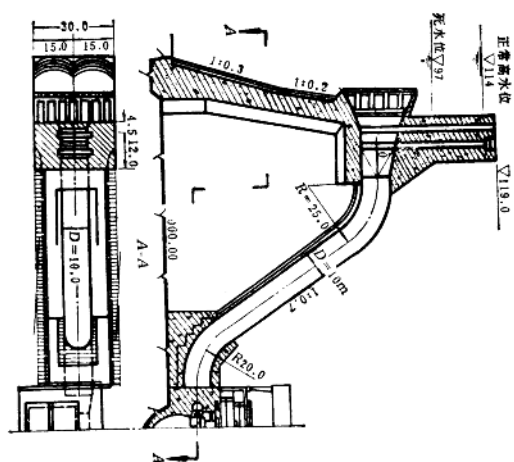


图 1-3 克拉斯诺雅尔斯克电站(比较方案)

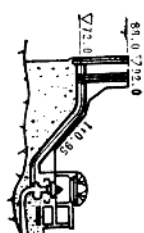


图 1-4 合面狮电站

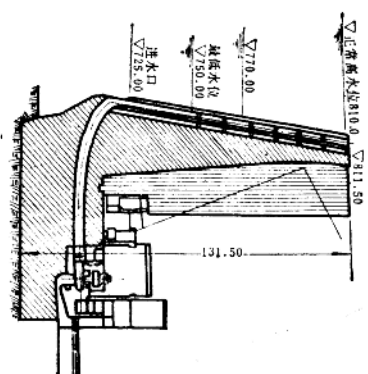


图 1-5 宾艾尔魅但斯电站

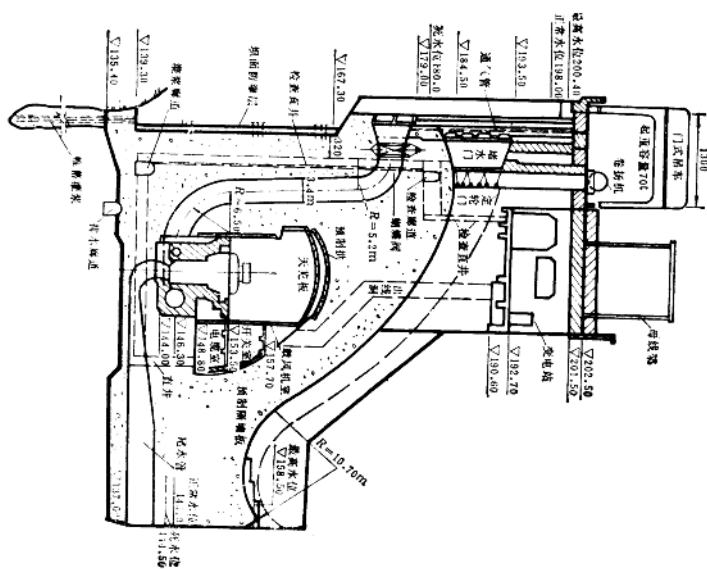


图 1-6 上犹江电站

5. 垂直入坝后背管
 这种布置型式在拱坝采用的例子很多，它将钢管布置在下游坝面上（见图1-8），这种布置不仅有利于施工，而且对坝体结构有利，但钢管受力情况比较复杂，它除了要承担内水压力外，还要考虑坝体变形的影响，钢材的用量也较多。

6. 垂直式坝面管
 这种布置的特点是将垂直管贴在坝的上游面（见图1-9），在一些拱坝中曾采用过这一布置，其目的除了以上提到的有利坝体结构和方便施工外，还可以使钢管的内外水压力平衡，减少钢材用量和配筋，当然这将给进口闸门和管道的细部结构布置带来一些困难。

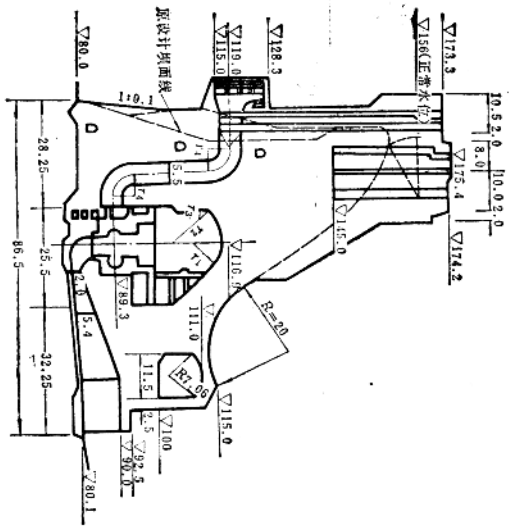


图 1-7 佩列奥电站

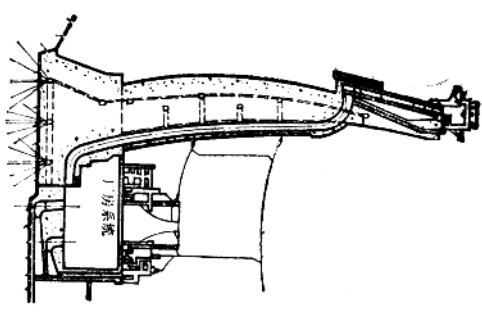


图 1-8 奇尔凯电站

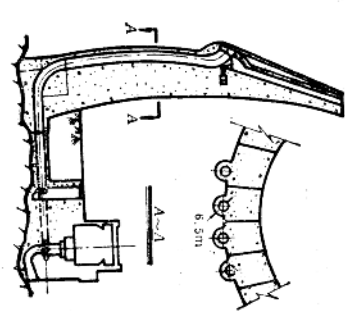


图 1-9 拉扎萨卡比尔坝

以上归纳的六种布置型式，当然不可能全部概括所有可能的钢管布置方案，但从已建成工程来看，已能概括主要的布置型式。另外坝内钢管一般均用单管单机的引水方案，由于管道较短，很少用叉管。

二、管道线路选择

坝内压力钢管的线路选择，应考虑下列原则：

(1) 应力求管道线路短而直，各条管线平行布置，一般将水从机组排列的垂直向引进厂房，这样既可减小工程量，又可减小水头和电能损失，如坝型为拱坝时，则压力钢管线路宜径向布置。

(2) 压力钢管在坝内的平面布置，通常位于坝段中央，一般坝段宽B与压力钢管直径D之比为3左右（参见表1-1），斜段顶距混凝土坝面厚度最好为一倍直径，设计计算时通常取与下游坝面内切圆作为厚壁圆筒来计算，并与试验成果对照，认为若外围混凝土最小厚度大于钢管直径，可考虑钢板、钢筋与混凝土三者联合受力；若外围混凝土最小厚度在钢管半径与直径之间，是否考虑联合作用应经论证；若外围最小厚度小于钢管半径，钢管按明管设计，即钢板单独承受内水压力。

(3) 在剖面布置上，尽量减少弯管段，以减少水头和电能损失，当钢管坡度不大时，可以不上弯管，如果平面与立面都要转折时，也可以采用空间转角，这样可以简化施工，减少水头损失。

(4) 为了大坝混凝土浇筑的方便，有时将钢管布置在下游坝面见图1-3和1-4。

足2. 线路选择要综合考虑各种因素, 经技术经济比较后决定。

三、压力钢管进口设计

1. 坝内钢管的进口布置应满足以下要求

- (1) 在规定的水位变化范围内引进水轮机所需的水量。
- (2) 进口水口的布置及其外形轮廓应能保证水流平顺地进入钢管道, 水头损失尽量减小。
- (3) 进口最好布置在泥沙淤积高程以上, 如这一要求不能满足, 则应设置冲沙设备。
- (4) 进口水口底槛高程, 应在水库水位变幅以下一定深度, 以防止钢管吸入空气。
- (5) 进口水口应设工作闸门和检修闸门, 工作闸门为快速动水关闭, 但开启时要充水降压, 因此, 应设充水设备。工作门后设通气孔并有渐变段和钢管相连。
- (6) 进口水口前应设拦污栅, 以防污物进入钢管道。

2. 进口水口高程的选择

进口水口高程应在水电站运行中可能出现的最低水位以下, 并保持一定的淹没深度, 原因如下:

- (1) 避免管道内产生负压, 在寒冷地区, 淹没深度还应增加冰盖厚度, 在验证管道内水压力时, 除考虑沿程水头损失和局部损失外, 尚应考虑突然加荷时在管道内产生的负水锤。
- (2) 避免出现串通吸气漏斗形漩涡。

3. 进口拦污栅

拦污栅一般布置在进口检修门的上游, 其功用是防止污物进入水轮机。拦污栅应有足够的有效过水面积, 一般根据电站的引用流量和允许的平均过栅流速来选定。在寒冷地区, 考虑冰凌影响, 过水面积应适当加大。另外还应考虑清污方式, 如用人工清污, 过栅流速一般为 0.7m/s 左右, 采用机械清污可提高为 $1.0\sim 1.2\text{m/s}$, 在不允许停机清污时, 应考虑设置一道备用栅。

4. 进口后渐变段

渐变段是设在闸门后由矩形渐变到圆形的连接管段, 渐变段的长度, 一般为压力钢管直径的 $1.0\sim 1.5$ 倍, 其高宽收缩角不得大于 10° , 这是为了使流速的变化均匀, 水头损失少。

5. 通气孔

通气孔位于工作闸门后面, 其作用是管道放空时补气, 和管道充水时排气, 通气孔的面积应选得合适, 否则会使管道内产生负压, 另外通气孔的面积也应和充水管相适应, 否则容易发生通气孔喷水事故。

有关坝内钢管进口水口及通气孔的设计, 这里只是简要的加以叙述, 详细内容应参见有关规范 and 文献。

四、压力钢管的弯管和锥管

1. 压力钢管的弯管布置

弯管水头损失一般较大, 往往占总水头损失中相当大的比例, 故设计时考虑水头损失要尽量小, 弯管中心线的弯曲半径, 一般不宜小于管径的 3 倍, 但有时因布置上受到限制及为了施工方便, 减少弯管的长度, 也可采用弯曲半径为 1.5 倍之管径。

2. 锥管的布置

锥管一般用于管径变化的连接段或钢管和洞室进口的连接段, 锥管的位置, 可以放在斜管段上, 也可布置在洞室进口前, 一般采用上下均匀收缩的形式, 如为了管道放空需要, 也可采用管顶收缩、管底水平的形式, 如管轴高程不变, 则需设置排水孔。

有美国内外坝内压力钢管布置, 包括进口水口、拦污栅、通气孔及渐变段的一些基本资料见表 1-1~表 1-5。

表 1-1

坝内埋管布置基本参数

工程名称	坝型	单机容量 N (MW)	最大引用 流量 Q_{max} (m^3/s)	设计 水头 H_d (m)	最大流速 V_{max} (m/s)	钢管直径 D (m)	坝段厚度 B (m)	B/D	管顶埋深 最小埋深 T _{min} (m)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	
刘家峡	重力坝	225.0	288	100	6.7	7.0	21.0	3	≈ 8
丹江口	重力坝	150.0	275	63.5	6.29	7.5	23	3.07	≈ 7
三门峡	重力坝	50.0	200	30.0	4.53	7.5	23	3.07	≈ 10
黄坛	重力坝	110.0	206	48	5.29	8.0	22	2.75	≈ 2
新丰庄	大头坝	72.5	118	73	5.56	5.2	10~12	1.82~2.3	2.6
新安庄	宽缝坝	72.5	118	73	5.56	5.2			
桓仁	大头坝	75.0	143	53.1	6.73	5.2	17.33	3.33	4
布连	大头坝	75.0	146	60		6.5			
盐锅峡	重力坝	44.0	135	39	5.42	6.63	16.5	2.63	4
双牌	大头坝	45.0	137	35	5.56	5.6	13.2	2.36	≈ 3
石泉	重力坝	45.0	139	39	5.85	5.5	16.5	3.0	≈ 4
民房	重力坝	100.0	162	73	6.58	5.6			
泾阳	重力坝	17.0	71.1	28.5	4.68	4.4	13.5	3.07	2.5
乌江渡	控制重力坝	210.0	203	120	6.18	6.5	20.0	3.08	11.75
柞水河	大头坝	7.5	37.4	18.0	3.2	3.8			2.0
安康	重力坝	200.0	304	76.2	6.88	7.5	23	3.07	≈ 10
上犹江	重力坝	15.0	38.2	48.2	4.2	3.4			
潘家口	宽缝重力坝	150.0	277	63.5	6.27	7.5	23	3.07	7.5
村	控制重力坝	50.0	113	52	5.76	5.0	13~14	2.6~2.8	≈ 11.6
板桥	控制重力坝	75.0	155	60.0	6.52	5.5	21	3.8	≈ 6
塔林峡	重力坝	112.5		137		4.57	19.8	3~4	
克拉明诺	重力坝	500.0	610	93	6.9	7.5	15.0	2	1.5
田子仓	重力坝	95.0	105			5.0	18.0	3.6	≈ 9.5
大乌	重力坝	95.0	220	50.8		7.5	22.5	3	
物华河	重力坝					5.49	15.2	2.78	
万福河	重力坝					4.27			

续表

工程名称	管顶距土最小深度				转弯半径				斜交段偏角 ($^{\circ}$)	涵管横宽 (m)
	下管段 T_1 (m)	T_1/D	T_2/D	上管段 T_2 (m)	下管段 R_1 (m)	R_1/D	R_2/D	R_2/D		
刘家峡	4.05	≈ 1.3	0.6	14.5	14.5	2.1	2.2	0.959331	10.0	
丹江口	5.25	≈ 0.9	0.7	56.25	22.5	7.5	3.0	0.693132	11.5	
三门峡	2.75			18.75	22.5	2.5	3.0	0.698132	11.5	
黄坛	4.0	0.25	0.5	12.0	16.0	1.5	20	0.925025	11.0	
新丰江	1.4	0.5		15.0	15.0	2.9	29	1.099527	6.4	
新安江				19.0	10.0	1.9	1.9	1.047198	10.0	
相仁	1.4	0.77	0.27	15.0	15.0	2.9	2.9	1.064651	不留槽	
柘溪				21.8	21.0	3.2	3.2	0.471239		
盐钢峡	3.2	0.71	0.57	20.1	16.9	3.6	3.0	0.950331	9.5	
双牌	2.4	≈ 0.54	0.43	7.0	7.0	1.2	1.2	1.134464		
石泉	2.1	≈ 0.73	0.38	8.25	11.0	1.6	2.0	1.047198	8.0	
凤滩					18.0		3.2	0.244346		
陡壁	3.4		0.77					0.314159		
乌江渡	1.81			14.0	14.0	2.2	2.2	1.029741	不留槽	
库家河	2.2			5.7	5.7	1.5	1.5	1.099527		
安康	5.5	2.3	0.5		21.0		2.8	0.936111	9.5	
上犹江				5.2	6.5			1.570796		
磨山口	2.75	1.0	0.37	22.5	22.5	3	3	0.959331	11.0	
陈村	1.4	2.32	0.28	10	10	1.92	2	0.97384		
枫树坝	1.1	很大		5.5	5.5	1	1	1.570796	竖井 $\phi 7.5$	
格乌峡						< 4	< 4			
克拉斯诺 普尔斯基		0.2			22.5		3			
田子台	1.9		0.4	25.0	15.0	5	3	0.528319		
大乌 (在坝体前部非沉泥区)				25.0	15.0	3.33	2	0.959331		
南华河	6.5									
万塔纳	6.5		0.1	15.2	15.2	2.78	2.78	0.628319		
				21.4			5	0.506145		

表 1-2

坝内钢管及拦污栅布置工程实例

工程名称	钢管直径 D (m)	拦污栅				栅		过栅流速 (m/s)
		正常蓄水位 至进口底板 处水头 H (m)	牛腿基 至进口底 板高度 L (m)	平台底与 进口底 距离 S (m)	栅高 S (m)	栅宽 B (m)	孔数 n (一个坝段)	
刘家峡	7.0	55	8	0	7.0	1.00	5-9.2 $\times$ 20	1.0 左右
丹江口	7.5	55(后期)	0	0	8.4	1.29	6-9 $\times$ 20.8	0.72
三门峡	7.5	50(一期) 60(二期)	0	0			6-3 $\times$ 27	0.52
黄坛	8.0	34(一期)	6.0	0	5.56	0.79	5-3.3 $\times$ 26	< 1.0
新丰江	5.2	40	4.45	-2.64	≈ 3.5	0.65	4-2.03 $\times$ 14	1.0
新安江	5.2	37.6	9.4	0				
相仁	5.2	23(一期) 21(二期)	5	0				(5.7)1.03 (6.7)1.38
柘溪	6.5	36.5	2	0	与校核 门槽合用	0	2-6 $\times$ 12	2-1.5
盐钢峡	5.63	19	—	0	与校核 门槽合用	0	1-8 $\times$ 11	1.6
双牌	5.60	22	—	—3	与校核 门槽合用	0	分六块1-10 $\times$ 18	
石泉	5.5	28	5	-2	4.07	0.86	4-3.2 $\times$ 15	0.85
凤滩	5.6	83.465	9.0	0	8.1	2.02	6-3 $\times$ 17	0.5-0.6
陡壁	4.4	29.1	4.5	0	4.0	1.00	3-3 $\times$ 12	
乌江渡	6.5	77.0(1*) 60.0(2*3*)	7.87	0			6-3 $\times$ 22.5	
安康	7.5	48.0	8.0	-1	7.17	0.96	6-2.9 $\times$ 20	≈ 1.0
磨山口	7.5		10.75	0	9.9	1.32	6-3 $\times$ 22.5 4-3 $\times$ 15	
田子台	5.0	66.5	6.5	-5.5	≈ 8.5		3-4.5 $\times$ 16	
大乌	7.5	21.5	11.24	-5.5	≈ 10.0			
万塔纳	4.27	79.8	6.76	-1.84	≈ 6.58	≈ 2	4-6.33 $\times$ 21.0	

表 1-3

坝内钢管进水口布置工程实例

工程名称	长度 L (进口至检修门) (m)	工作闸门 宽×高 $b_1 \times h_1$ (m ²)	进口门底高程 最低水位的水头 H_{min} (m)	$\frac{H_{min}}{H_1}$	管口						
					管口高度 $b' \times h'$ (m)	$\frac{b' \times h'}{b_1 \times h_1}$	$\frac{b'}{b_1}$	$\frac{h'}{h_1}$	顶部曲线椭圆 a 与 b 或圆 R (m)	$\frac{a}{b}$	$\frac{a}{h_1}$
丹江口	3.90	7×8	14.0	1.75	13.2×13.0	3.06	1.89	1.63	$a=18.47'$		
三门峡	4.60	6.5×10			14.8×18.2	4.17	2.29	1.82	$R=5.69$		
布渡	2.37	7×8	一期 37.0 二期 26.0	3.08							
新干江	10.27	4×6	17.0	2.84					$R=4.55$		
和仁	10.09	4×6	$(\frac{77}{3})33.0$ $(\frac{58}{3})31.0$	1.83	5.33×10.1	2.24	1.33	1.68	$\frac{a}{b}=2$ $\frac{a}{h_1}=6.6$	2.0	0.67
布渡	6.40	5.5×7	13.0	1.86	13.5×11.83 (中间有一中梁)	4.16	2.46	1.69	$\frac{a}{b}=4.83$ $R_1=6.50$		1.0
盐碱峡	3.00	6×8	13.0	1.88	8×11	1.83	1.33	1.38	$R=9.3$		
双牌	12.89	4.5×6	10.0	1.67	12×16	8.0	2.67	3.0	11.0×25 $R=2.94$		
石泉	2.45	5.5×7	13.0	1.86	9.8×10.44	2.65	1.78	1.49			
德陵	8.40	4×4.53	10.3	2.22	6×6.5	2.11	1.50	1.40	$R=3.26$		
马江渡	5.30	5.5×7.5	$(\frac{17}{3})37.1$ $(\frac{12}{3})32.0$	4.53 2.67	7×11.76	2.0	1.27	1.57	$\frac{a}{b}=6.86$ $b=2.63$	2.01	0.91
安康	4.30	7.5×9.58	$(\frac{18}{3})36.1$ (死水位时)	1.92 1.39	14.3×15.75	3.2	1.91	1.68	$\alpha=36'30''$		
德安口	4.00	7.5×9.0	14	1.56					$R=4.0$		

工程名称	$\frac{R_1}{h_1}$	底部曲线椭圆 a 与 b 或圆 R (m)	$\frac{R_2}{h_2}$	侧边曲线椭圆 a 与 b 或圆 R (m)	$\frac{a}{b}$	$\frac{a}{b_1}$	$\frac{R}{b_1}$	形状			长度 l (m)	$\frac{l}{D}$
								宽 a (m)	高 b (m)	直径 D (DCM)		
刘家峡		平 底	1	$R=2.5$	0.36	7.0	8.0	7.0	6.55	0.24	1.78	
丹江口	0.57	平 底	1	$R=4.2$	0.65	6.5	10.0	7.5	8.5	1.73		
三门峡		平 底	1	$R=1.3$	0.57							
布渡	0.57	平 底	1	$R=2.0$	0.29	7.0	8.0	8.0	6.5	0.51		
新干江		$R=10.0$		$R=1.67$	$\frac{a}{b}=4.0$	2.67	1.0					
和仁		$R=30.94$		5.16	$\frac{a}{b}=1.5$							
布渡	0.59 0.23	$R=1.0$	0.14	≈ 1.2								
盐碱峡	1.16			$R_1=9.3, R_2=18.3$ $R=8.1, R_3=2.2$	$\frac{1.165}{3.05}$ 0.37							
双牌	0.45	$R=8.0$	1.33	$R=1.8$	1.78	4.5	6.0	5.63	9.6	1.78		
石泉		(1)			0.33	5.5	7.0	5.00	3.3	0.78		
德陵	0.70	$R=1.5$	0.22	$R=2.5$	0.63	4.0	4.4	4.40	6.6	1.5		
马江渡		平 底	1	$\frac{a}{b}=2.2$ $b=2.75$	2.53	0.4						
安康		平 底	1	$R=3.4$	0.45	7.5	8.35	7.50	8.0	1.07		
德安口	0.44	平 底	1	$R=4.0$	0.53	7.5	9.0	7.50	11.0	1.47		

表 1-4

坝内埋管工作门孔尺寸和管道直径系统计算表

类别	序号	工程名称	引水管道		工作门			
			钢管直径 D (m)	钢管面积 F (m^2)	宽 $\times$ 高 $b_1 \times h_1$ (m^2)	高宽比 h_1/b_1	缩窄率 b_1/D	面积比 $b_1 h_1 / F$
甲	1	德安峡	7.0	38.5	7 $\times$ 8	1.14	1.00	1.46
	2	石炭泉	5.5	23.8	5.5 $\times$ 7	1.27	1.00	1.62
	3	安南	7.5	44.2	7.5 $\times$ 9.38	1.25	1.00	1.59
	4	丹江口	7.5	44.2	7.5 $\times$ 10	1.33	1.00	1.70
	5	雁窝口	7.5	44.2	7.5 $\times$ 9	1.2	1.00	1.57
	6	盐碱峡	5.63	24.9	6 $\times$ 8	1.33	1.07	1.93
	7	龙羊峡	7.5	44.2	7.5 $\times$ 8.5	1.13	1.00	1.44
	8	新安江	5.2	21.2	3.7 $\times$ 8.2	2.21	0.17	1.43
	9	宝善寺	6.8	36.3	6.8 $\times$ 7.6	1.12	1.00	1.42
	10	民丰	5.6	24.6	4 $\times$ 8.5	2.13	0.71	1.38
	11	三门峡	7.5	44.2	6 $\times$ 12	2.00	0.8	1.63
变化范围			5.2~7.5					1.38~1.93

乙	1	安南	8.0	50.3	7×8	1.14	0.88	1.11
	2	丹江口	5.2	21.2	4×6	1.5	0.77	1.13
	3	德安口	5.2	21.2	4×6	1.5	0.77	1.13
	4	双牌	5.6	24.6	4.5×6	1.33	0.80	1.10
	5	盐碱峡	4.4	15.2	4×4.63	1.16	0.91	1.22
	6	马江渡	6.5	33.3	5.5×7.5	1.6	0.85	1.24
	7	德安口	6.5	33.3	5.5×7.0	1.27	0.85	1.16
	8	民丰	5.5	23.8	4×6	1.50	0.73	1.01
	9	白山水	6.0	28.3	4.8×6	1.25	0.80	1.02
	10	德安口	5.4	22.9	3.8×6.2	1.63	0.70	1.03
	变化范围		4.4~8					1~1.25

注：三门峡数据为地方标准。

表 1-5

工程实际采用的通气孔面积与钢管面积之比的情况

序号	工程名称	电站形式	机			罩			罩			罩			罩		
			出力 N (MW)	发电机 (cm)	罩壳 Q ₂ (cm ²)	罩壳厚度 δ (mm)	长罩 L (cm)	钢管直径 D (mm)	罩壳面积 A (cm ²)	罩壳厚度 δ (mm)	长罩 L (cm)	罩壳直径 d ₁ (mm)	罩壳面积 A ₁ (cm ²)	罩壳厚度 δ ₁ (mm)	罩壳面积 A ₁ (cm ²)	罩壳厚度 δ ₁ (mm)	罩壳面积 A ₁ (cm ²)
1	黄 垌	坝后式	110.0	48.0	206.0	0.016	112.4	8.0	50.3	5.29	30.0	2-1×2	4.0	7.05	0.8	1.0	0.186
2	丹江口	坝后式	150.0	63.5	275.0	0.012	98.4	7.5	44.2	6.22	42.5	2φ1.1	1.9	4.30	0.65	0.751	0.175
3	潘家口	坝后式	150.0	63.5	277.0	0.012	103.5	7.5	44.2	6.27	57.4	2φ1.2	2.26	5.11			
4	安 康	坝后式	200.0	76.2	304.0	0.014	96.0	7.5	44.2	6.88	52.0	2φ1.4	3.08	6.97	0.8	1.14	0.163
5	刘家峡	坝后式	225.0	100.0	250.0	0.014	129.6	7.0	38.5	6.70	48.0	2φ1.2	2.26	6.87	0.9	1.65	0.28
6	乌江渡	坝后式	210.0	120.0	203.0	0.014	150.0	6.5	33.2	6.11	55.0	1.2×1.6	2.16	6.51			
7	新 溪	坝后式	72.5	66.0	141.0	0.012	180.0	6.5	33.2	4.34	36.2	1.6×1.6	2.20	6.90			
8	盐田岭	坝后式	44.0	39.0	142.25	0.008	55.0	5.6	24.6	5.78	14.0	0.8×1	0.8	3.21	0.6	1.14	0.353
9	双 牌	坝后式	45.0	39.0	137.0	无钢管	80.0	5.6	24.6	5.57	21.0	φ1.0	0.76	3.21			
10	石 泉	坝后式	45.0	39.0	140.0	0.012	53.1	5.5	23.8	5.88	24.0	φ1.2	1.13	4.77	2φ0.6	2.411	0.50
11	枫树坝	坝后式	75.0	60.0	155.0	0.016	49.5	5.5	23.8	6.52	53.0	φ1.6	2.01	8.46			
12	桓 仁	坝后式	72.5	53.1	143.0	0.008	103.6	5.2	21.2	6.75	27.5	2φ1.2	2.26	10.67	0.5	0.925	0.111
13	新丰江	坝后式	72.5	73.0	118.0	0.014	100.0	5.2	21.2	5.57	28.0	φ1.5	1.77	8.35	0.5	0.925	0.111
14	池 潭	坝后式	100.0	51.0	114.0	0.012	68.1	5.2	21.2	5.38	43.5	φ1.0	0.79	3.72			
15	陈 村	坝后式	50.0	52.0	113.0	0.014	74.3	5.0	19.6	5.77	30.0	φ1.2	1.13	5.74	0.4	0.592	0.111
16	霞 窝	坝后式	17.0	28.5	71.0	0.012	50.6	4.4	15.2	4.68	35.0	φ1.25	1.43	9.41	0.25	0.353	0.034
17	龙羊峡	坝后式	320.0	122.0	239.0		182.0	7.5	44.2	6.74	86.0	2φ1.2	2.26	5.11			
18	锦屏湖	引水式	20.0	53.0	48.0		121.2	3.5	9.6	4.51		φ1.0	0.79	8.23			
19	长 湖	引水式	37.5	28.0	153.0		124.0	7.0	38.5	3.97		3×1.0	3.00	7.80			
20	团 市	引水式	15.0	40.0	93.8		370.0	6.0	28.2	1.35		1×1	1.00	3.55			
21	密云白河	引水式	15.8	46.0	36.3		170.0	5.5	23.7	1.52		0.6	0.28	1.18			
22	六 甲	引水式	4.4	18.0	30.0		86.0	4.5	15.9	1.80			0.80	5.03			

第二节 压力钢管经济直径的选择

一、经济直径选择时应考虑的因素

水电站压力钢管经济直径的选定形式及因素很多，难以用一个公式概括表示。为此国内外的专家均作了很多研究分析，推导了不少公式，但这些都只考虑坝内埋管的特点，计算水头损失是以沿程损失为主，有时甚至忽略局部损失，而坝内埋管因管道短，局部损失占的比重很大，沿程损失比较小，在投资计算时，以往只考虑管道本身的造价，而进水口部分的造价不参与经济比较，而坝内埋管中进水口部分因管道直径的变化影响到进口段、闸门井、闸门的造价，在总投资中占的比重较大，应该参与经济比较。

根据坝内埋管的特点，在选择经济直径时应考虑下列条件：

- (1) 计算造价时应考虑进水口、拦污栅、闸门及启闭机、钢管周围的配筋等。
- (2) 合理地选择使用年限或偿还期。
- (3) 选定直径后应进行调节保证计算，必须符合调节保证计算中的各项规定。

二、经济直径的计算方法

经济直径计算的基本原理是使水管中水头损失所形成的年电能损失价值与水管年费用之和为最小，苏联采用“抵偿年限”的概念，从原理上讲，它们之间无很大区别，主要问题是所选用的价格和经济补偿常常是不一致，任意性比较大，有的公式只能限制在一定范围内使用。所有的计算公式中均未考虑坝内钢管的特点局部水头损失约为沿程损失的三倍左右（参见表1-6），因此我们将有关参数作了一些调整，推荐两个不很成熟的经验公式以供参考。

(1) 考虑坝内埋管的特点，局部水头损失约为沿程损失3倍的情况，可用下式求经济直径D

$$\text{总水头损失 } \Delta H = \frac{16 \Delta \Sigma}{2g L \pi^2} \times \frac{Q^5}{D^5} \left(1 + \frac{1}{3}\right) \quad (1-1)$$

$$\text{经济直径 } D = \sqrt[5]{\frac{13.06 \alpha \phi \cdot [\sigma] \Delta \Sigma (Q^5)_{\text{经济}}}{K \cdot s \cdot f \cdot L \cdot H}} \quad (1-2)$$

式中 α ——每度电价，取为0.065 (元/kWh)；

ϕ ——焊缝系数，一般取0.85；

$[\sigma]$ ——坝内压力钢管允许应力， $[\sigma] = \frac{2}{3} \sigma_s$ ；

σ_s ——钢板的屈服极限， $\sigma_s = 33000 \times 10^3$ (Pa)；

$\Delta \Sigma$ ——水管中各局部水头损失系数之和；

$(Q^5)_{\text{经济}}$ ——平均立力流量， $(Q^5)_{\text{经济}} = \alpha Q_{\text{经济}} \left(\frac{t_{\text{经济}}}{8760} \right)^{\frac{1}{5}}$ ；

$Q_{\text{经济}}$ ——钢管最大设计流量 (m^3/s)；

$t_{\text{经济}}$ ——装机电利用小时数 (h)；本手册以 $t_{\text{经济}} = 3500 \text{h}$ 计。

α ——经验系数，按电站调节性能和电站在系统中的工作情况选择。对日调节电站可用 $\alpha = 0.8 \sim 0.85$ ；对调节性能良好，装机容量较大承担尖峰负荷的电站可用 $\alpha = 0.75 \sim 0.8$ ；本手册公式取 $\alpha = 0.8$ ；

K——钢管（包括刚性环）所使用的实际重量与计算管壁厚度的重量之比值。根据已建工程的数据统计看，一般在1.2~1.3范围，当计算经济直径时以H为常数则用大值。

当计算管壁厚时以8为常数则用小值，本手册公式取K=1.3；

H——水头，考虑最大水锤压力升高值为工作水头的30%；另外考虑联合作用，计算板厚时认为70%内水压力为钢板承担； $H = 1.3 \times 0.7 H_{\text{max}}$ ；

H_{max} ——钢管最大静水头 (m)；

L——钢管全长 (m)；

f——钢管折旧、大修、维护以及考虑抵偿年限的总百分率。

年运行费用包括：

折旧、大修费占投资的百分数5~5.5%；

年运行维护费率 2~2.5%；

按抵偿年限T年所除之投资 $\frac{100}{T}\%$ 。

令 $f = \left(P + \frac{100}{T} \right) \%$ ；系数P取7%；高限取8%，低限年限按10年考虑，故取总百分率

$$f = \left(8 + \frac{100}{10} \right) \% = 18\%$$

s——每地钢管的总造价（包括材料、制作运输、安装、油漆、进口闸门启闭机、钢筋等附件部分费用）以元计。

以 $s = s_1(1+3.5) = 1960(1+3.5) = 8550 \text{元}/\text{t}$ 。

s——每地钢板的价格 (元/t)；以1900元/t计。

根据我国目前使用的建材性能及价格等代入1-2式整理简化后可得下式

$$D = \sqrt[5]{\frac{178.7 \Delta \Sigma (Q^5)_{\text{经济}}}{L H \alpha \phi}} \quad (1-3)$$

表 1-6

坝内埋管水头损失分析 (局部损失与沿程损失)

电站名称	水头损失 (m)	引用流量 (m³/s)	水头 H (m)	管长 L (m)	沿程损失 (m)	局部损失 (m)				总水头损失 (m)	局部损失 (m)
						进口	出口	弯头	三通		
投资	20	71.1	28.5	50.6	0.187	0.006	0.083	0.332	0.03	0.451	0.458
和	20	133	53.1	103.6	0.461	0.0165	0.0049	0.176	0.416	0.704	1.16
刘宋	20	398	100	131.5	0.724	0.01	0.139	0.351	0.532	1.095	1.419
35	20	23	7.2	23	0.724	0.01	0.139	0.351	0.532	1.095	1.419
三川	20	320	30	0.201	0.001	0.018	0.061	0.411	0.456	0.687	2.5
德化	20	277	62.5	109.5	0.223	0.0055	0.0088	0.234	0.012	2.167	0.678
安	20	30.1	76.2	101.0	0.385	0.02	0.18	0.213	0.202	0.512	1.654
安	20	23.3	1.25	11.4	12.2	2	31			100	3.3

(2) 若以沿程损失为主, 采用曼宁公式计算水头损失, 可用以下公式求经济直径

$$D = \sqrt[3]{\frac{40.984 Q^2}{D^{1.49} V^{1.49}}} \quad (1-4)$$

经济直径 $D = \sqrt[3]{\frac{8470.1255 \pi^2 Q^2 V^{1.49}}{K S J H}} \quad (1-5)$

式中, 陈德新 $n=0.0125$ 外, 其余符号的意义同前, 代入(1-5)式后整理化简得

$$D = \sqrt[3]{\frac{13.8 Q^2}{H_{max}}} \quad (1-6)$$

公式(1-6)可以写为

$$D = \sqrt[3]{\frac{K Q^2}{H_{max}}}$$

的形式, 式中的系数约为10~20, 凡机组运行小时数(2500≤t, <3500, K可取10~15; 3500≤t, <5000, K可取15~20, 钢材较贵, 而电价较廉时, K一般取小值, 反之取较大值, 因为要开7.33次方, 故D的变动幅度一般不超过10%。

(3) 介绍几种国内外常用的经济直径计算公式

1) 沙卡里亚经验公式

$$D_1 = 0.714 \sqrt[3]{\frac{P^{0.11}}{H_1^{0.11}}} \quad (1-7)$$

2) 彭德新经验公式

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{2.2 Q^2}{H_2}} \quad (1-8)$$

3) 李青华经验公式

$$D_3 = \sqrt[3]{\frac{12.5 Q^2}{H_3}} \quad (1-9)$$

4) 皮尔经验公式

$$D_4 = 0.20 \left(\frac{P}{H_4} \right)^{0.11} \quad (1-10)$$

$$D_5 = 1.517 \sqrt[3]{\frac{Q^2}{H_5}} \quad (1-11)$$

式中 Q_{max} ——水轮机最大引用流量 (m³/s);

H_2 ——水轮机设计水头 (m);

P ——水轮机设计容量 (kW)。

以上各式计算结果比较于表1-7和表1-8。

表 1-7 国内 28 个大型工程实际采用的直径与“经济”管径比较

序号	工程名称	水 枪 机					压 力 铜 管					公式计算的经济管径					采用直径与计算管径比较 (%)				
		H_{max} (m)	H_2 (m)	N (MW)	Q_{max} (m³/s)	v (m/s)	D (m)	D_1 (m)	D_2 (m)	D_3 (m)	D_4 (m)	D_5 (m)	D_6 (m)	$\frac{D-D_1}{D_1}$	$\frac{D-D_2}{D_2}$	$\frac{D-D_3}{D_3}$	$\frac{D-D_4}{D_4}$	$\frac{D-D_5}{D_5}$	$\frac{D-D_6}{D_6}$		
1	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
2	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
3	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
4	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
5	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
6	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
7	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
8	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
9	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
10	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
11	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
12	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
13	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
14	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
15	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
16	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
17	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
18	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
19	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
20	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
21	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
22	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
23	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
24	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
25	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
26	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
27	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		
28	龙滩	156.0	122.0	326.5	298.0	6.7/8.45	7.5/6.5	7.35	7.3	8.30	7.05	7.88	3.7	-9.6	-5.7	-0.9	-4.8	-0.9	-4.8		

注: D_1 为(1-6)式计算直径。

表 1-8

国外 38 个大型工程实际采用的直径与“经济”管径比较

序号	水 电 站	水 轮 机		压 力 水 管			公式计算的“经济”管径			采用管径与计算管径比较			序号	水 电 站	水 轮 机		压 力 水 管			公式计算的“经济”管径			采用管径与计算管径比较			
		H_p (m)	P (MW)	Q_{max} (m ³ /s)	v (m/s)	D (m)	D_1 (m)	D_2 (m)	$\frac{D-D_1}{D_1}$ (%)	$\frac{D-D_2}{D_2}$ (%)	$\frac{D-D_1}{D_1}$ (%)	$\frac{D-D_2}{D_2}$ (%)			H_p (m)	P (MW)	Q_{max} (m ³ /s)	v (m/s)	D (m)	D_1 (m)	D_2 (m)	$\frac{D-D_1}{D_1}$ (%)	$\frac{D-D_2}{D_2}$ (%)	$\frac{D-D_1}{D_1}$ (%)	$\frac{D-D_2}{D_2}$ (%)	
1	阿格弗马姆	57.0	234	464.1	7.3	9.0	10.50	9.87	11.10	-13	-8.8	-19.6	20	英 路 1	96.2	164.0	193.3	6.8	6.0	6.41	6.29	7.13	-5.8	-4.6	-15.8	
2	瓦尔姆基	58.4	207	406.9	5.1	10.0	9.80	9.24	10.47	2.0	8.2	-4.5	21	阿路特投	96.9	246.0	287.9	6.5	7.5	7.60	7.46	8.1	-0.8	0.5	-11.2	
3	土 克 里	60.0	261	493.1	5.8	10.4	10.64	10.10	11.40	-0.5	3.0	-8.8	22	布拉克克	100.0	224.0	253.7	6.6	7.0	7.15	7.03	7.97	-1.0	-0.4	-12.2	
4	艾斯纳投	60.3	169	318.2	6.0	8.2	8.80	8.33	9.44	-6.3	-1.6	-13.1	23	艾克索尔里	101.0	175.0	198.7	7.0	6.0	6.39	6.29	7.14	-5.0	-4.6	-16.0	
5	马林库多	60.3	181	339.2	6.4	8.2	9.06	8.56	9.70	-9.1	-4.2	-15.5	24	卡拉巴沙	103.5	410.0	449.2	6.1	9.7	9.07	8.94	10.13	7.2	8.5	-4.2	
6	索托阿索里所	72.0	137	246.5	5.7	7.4	7.60	7.28	8.25	-1.7	1.6	-10.3	25	索托阿索里	107.0	313.0	331.8	7.3	7.6	7.00	7.81	8.85	-3.3	-2.7	-14.1	
7	沙 西 博	73.0	272	422.6	9.6	7.5	9.54	9.15	10.37	-21.0	-18.0	-27.7	26	埃罗阿苏里	112.5	409.0	411.7	6.9	8.7	8.58	8.51	9.64	2.0	2.2	-9.8	
8	博 德 里	76.2	185	230.7	5.5	7.3	7.28	7.02	7.95	1.1	4.0	-8.2	27	伊 索 普	118.4	728.0	696.0	8.0	10.5	10.63	10.58	11.99	-0.5	-0.3	-12.4	
9	博德里 C ₂	77.3	194	277.1	6.1	7.6	7.85	7.55	8.59	-2.2	0.7	-11.5	28	博德里阿索里	128.0	364.0	322.3	8.4	7.0	7.80	7.52	8.52	-5.8	-6.3	-17.8	
10	博德里-5	79.8	285	376.0	6.6	8.5	8.80	8.59	9.74	3.8	-1.0	-12.7	29	吉 里 1	130.0	720.0	635.9	7.3	10.5	10.02	10.04	11.38	5.3	4.6	-7.7	
11	伊里伯拉	80.0	354	501.9	6.4	10.0	10.06	9.72	11.02	0	2.9	-9.3	30	伊里伯拉 C ₁	137.0	336.0	277.6	9.8	6.0	6.91	6.93	7.92	-13.0	-14.0	-24.2	
12	大古里里	86.9	623	812.3	6.9	12.2	12.16	11.80	13.19	1.4	3.4	-8.9	31	埃罗阿苏里	144.2	172.0	134.8	7.1	4.9	5.03	5.09	5.77	-2.0	-3.7	-15.1	
13	丹 伯 索	85.0	179	238.7	6.2	7.0	7.32	7.01	7.95	-2.2	-0.1	-11.0	32	索托阿索里	145.0	194.0	139.7	9.1	4.0	5.37	5.33	6.05	-12.0	-14.0	-24.0	
14	索托阿索里	88.9	155	137.8	6.0	6.5	6.59	6.43	7.28	-0.8	1.1	-10.7	33	波 尔 基 山	152.3	231.0	172.0	7.2	5.5	5.51	5.61	6.35	0.2	-2.0	-13.4	
15	兰安吉斯特拉	91.5	187.0	236.9	7.0	6.5	7.01	6.86	7.73	-6.5	-5.1	-16.1	34	里 德 比 尔	160.0	241.0	209.7	7.7	5.75	5.83	5.95	6.74	-0.7	-3.4	-14.7	
16	罗伯特莫斯	91.5	200.0	247.6	5.9	7.3	7.21	7.05	7.49	2.0	3.5	-8.6	35	索 加	168.0	444.0	293.4	6.6/6.8	7.5/6.6	6.85	7.0	7.9	10/-2.0/7.1/-5.7	-5.5	-7.3	-15.5
17	占 里 1	92.0	201.0	248.1	7.5	6.5	7.20	7.05	7.39	-9.2	-7.8	-18.6	36	德 拉 莫 立	171.0	261.0	173.0	6.5	5.8	5.39	5.53	6.26	8.2	4.9	-7.3	
18	瓦尔姆基	94.5	154.0	184.3	6.1	6.2	6.7	6.18	7.01	-1.3	0.3	-11.6	37	瓦 柯 尔	176.0	310.0	193.8	6.6	6.2	5.69	5.85	6.64	9.3	6.0	-6.6	
19	克拉斯诺达尔 斯克	95.0	511.0	609.2	7.08	7.5	10.54	10.31	11.69	-28.4	-27.3	-35.8	38	底 尔 尔 德 尔	313.0	48.4	175.0	10.5	4.0	4.75	5.09	5.77	-2.5	-0.6	-20.3	

第二章 坝内埋管的设计原则及荷载组合

第一节 基本资料

一、建筑物的设计等级

坝内钢管系埋设在混凝土坝体内的压力引水钢管，为水电站重要组成部分之一，其建筑物等级应与大坝相同。可参见《水利水电工程等级划分及设计标准（SDJ12-78）》，并可根据枢纽布置的实际情况，酌情考虑钢管的设计等级而调整。如枢纽是以防洪为主的工程，电站容量很小，则钢管道级别可以低于大坝的等级。

二、水位及流量资料

上游水库各种水位、相应下泄流量时的下游尾水位（见表2-1）、电站下游水位流量关系曲线。

表 2-1

水位及流量资料表

项 目	水 库 水 位 (m)	水库下泄流量 (m³/s)	电站尾水位 (m)	备 注
校核洪水位				泄 洪
设计洪水位				
正常高水位				发 电
死 水 位				
最低发电水位				

三、温度资料

- (1) 水温。水库建成后进入钢管道的最高水温及最低水温。
- (2) 气温。历年逐月平均气温；历年逐月最高气温；历年逐月最低气温。
- (3) 坝体内部温度。可投入温度计、气温、冷却措施、水泥用量、坝体散热条件等计算出坝体内部温度。

四、地震力

坝内埋管部分仅在计算坝体应力时组合地震情况，在计算内水压力时不考虑地震荷载。

五、外水压力

- 1. 由水库经坝体混凝土的渗透。在大坝排水孔以前考虑为全水头；在排水孔线上为 $\alpha_1 H_1$ ，其中

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \frac{C\alpha}{a \ln \frac{a}{2r}}} \tag{2-1}$$

式中 C——排水孔中心线距上游坝面距离；

a——排水孔孔距之半；

r——排水孔半径；

H_1 ——计算高程以上至正常高水位的全水头。

重力坝设计规范建议取 $\alpha_1 = 0.15 \sim 0.30$ ，以考虑部分排水可能失效。

2. 沿坝身外壁的绕渗

考虑钢管始端的高压水可从混凝土与钢管接缝处渗入。假定渗压在钢管始端为 $\alpha_1 H_1$ ， H_1 为该处静水头， α_2 为折减系数。

该处静水头， α_2 为折减系数。

假定坝身接缝处为零，中间沿管轴线呈直线变化， α_2 取值建议如下：

- (1) 钢管在最低温度时作全断面灌浆，并设有可靠阻水和排水措施的 $\alpha_2 = 0.5$ 。
- (2) 在较低温度时作接缝灌浆，在钢管进口处设有阻水环和排水措施的， $\alpha_2 = 0.7 \sim 0.8$ 。
- (3) 其他情况 $\alpha_2 = 1.0$ 。

第二节 水轮发电机组资料

一、水轮发电机组性能资料

- (1) 水轮机型号。
- (2) 单机容量N。
- (3) 机组台数及装机总容量。
- (4) 水轮机调速时间 T_s 。
- (5) 水轮机正常转速 n 和飞逸转速 n_f 。
- (6) 水轮机最大引用流量 Q_{max} 。
- (7) 水轮机特性曲线。
- (8) 水轮机安装高程。
- (9) 发电机飞轮矩 $G \cdot D^2$ 。

- (10) 发电效率 η 。
- (11) 甩全负荷时允许最大压力升高和速率上升, 加荷时允许最大压力降低。

二、钢管道基本特性

- (1) 钢管道直径 D , 长度和压力水管 $\geq 2LV$ 值。
- (2) 进口水口高程。
- (3) 电站设计水头 H_s , 最高水头 H_{max} 和最小水头 H_{min} 。

第三节 材 料

一、钢板

水电站坝内埋管, 水头高于60m以上, 一般均采用钢板衬砌, 也有由于防渗的需要虽然水头较低时仍采用钢板衬砌。

水电站压力钢管常用的钢材为3号钢(平炉镇静钢)、16Mn钢和15MnV或15MnTi钢, 现分别介绍其化学、物理力学指标如下:

1. A₃平炉镇静钢

一般水电站压力钢管最常用的钢材是普通低碳钢, 焊接性能和塑性都比较好, 抗腐蚀性较强, 其化学成分和机械性能列于表2-2和表2-3。

表 2-2 3 号 钢 化 学 成 分

元 素	C	Si	Mn	P	S
含 量 (%)	0.14~0.22	0.12~0.30	0.40~0.65	≤0.045	≤0.055

表 2-3 3 号 钢 机 械 性 能

板 厚 (mm)	屈 服 点 σ_s (10 ³ Pa)	抗 拉 强 度 σ_b (10 ³ Pa)	伸 长 率 (%)		180°弯曲试验 d = 弯心直径 a = 试验厚度
			δ_5	δ_{10}	
4~20	2100	3600~4070	27		23
20~40	2200	4100~4300	26		22
≥40~60	2200	4400~4700	25		21

2. 16Mn钢

是水电站压力钢管常用的低合金钢, 焊接性能良好, 厚板需注意正火处理, 使用温度推荐为-40~450℃, 其化学成分和机械性能列于表2-4和表2-5。

表 2-4 16Mn 钢 的 化 学 成 分

元 素	C	Si	Mn	P	S
含 量 (%)	0.12~0.2	0.2~0.6	1.2~1.5	≤0.05	≤0.05

表 2-5 16Mn 钢 的 机 械 性 能

板 厚 (mm)	屈 服 点 σ_s (10 ³ Pa)	抗 拉 强 度 σ_b (10 ³ Pa)	伸 长 率 δ_5 (%)	冲击韧性 α_k (kg·m/cm ²)		冷 弯 试 验 180°
				质 量 组	-40℃	时 间
≤16	≥3500	≥5200	21		≥3	≥3
17~25	≥3800	≥5000	19		≥3	≥3
26~36	≥3100	≥4800	19		≥3	≥3
38~50	≥2900	≥4600	19		≥3	≥3

3. 15MnV钢和15MnTi钢

这两种低合金钢材, 也为水电站压力钢管常用的普通低合金钢, 15MnV钢可不经正火处理, 在热轧状态下屈服达到15MnTi的强度, 均具有优良的抗脆裂性能, 可焊性良好, 使用温度范围-20~450℃, 化学成分与机械性能均很接近, 可以互相代用, 它们的化学成分和机械性能列于表2-6和表2-7。

表 2-6 15MnV和15MnTi钢的化学成分

含 量 (%)	C	Si	Mn	V	Ti	S	P
15MnV	0.12~0.18	0.2~0.6	1.2~1.6	0.01~0.12		≤0.05	≤0.05
15MnTi	0.12~0.18	0.2~0.6	1.2~1.5		0.12~0.20	≤0.05	≤0.05

表 2-7 15MnV和15MnTi钢的机械性能

板 厚 (mm)	屈 服 点 σ_s (10 ³ Pa)	抗 拉 强 度 σ_b (10 ³ Pa)	伸 长 率 δ_5 (%)	冲击韧性 α_k (kg·m/cm ²)		冷 弯 试 验 180°
				(正火)	(15MnV) -20℃ (15MnTi) -40℃	时 间
15MnV	≤5	≥4200	≥5600	≥19	≥6	≥3
	5~15	≥4000	≥5400	≥18	≥6	≥3
	17~25	≥3800	≥5200	≥17	≥6	≥3
	26~36	≥3600	≥5000	≥17	≥6	≥3
15MnTi	38~50	≥3400	≥5000	≥17	≥6	≥3
	≤25	≥4000	≥5400	≥19	≥7	≥3.5
(正火)	26~40	≥3800	≥5200	≥19	≥7	≥3.5