

水电站加劲压 钢管及厂坝 联结形式优化 水力联

刘宪亮 常万光 温新丽 著

水电站加劲压力钢管及 厂坝联结形式优化

刘宪亮 常万光 温新丽 著

黄河水利出版社

图书在版编目(CIP)数据

水电站加劲压力钢管及厂坝联结形式优化/刘宪亮等
著. - 郑州:黄河水利出版社,1998.11

ISBN 7-80621-250-7

I.水… II.刘… III.①水力发电站-压力钢管-结构
最优化②水电站厂房-坝-联接-最佳化 IV.TV732

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 32536 号

责任编辑:郇志峰

封面设计:朱 鹏

责任校对:赵宏伟

责任印制:常红昕

出版发行:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 12 层 邮编:450003

印 刷:黄河水利委员会印刷厂

开 本:850mm×1168mm 1/32

印 张:5.5

版 别:1998 年 11 月 第 1 版

印 数:1-1500

印 次:1998 年 11 月 郑州第 1 次印刷

字 数:136 千字

定价:18.00 元

前 言

本书是作者近年来从事压力管道研究的主要成果。内容包括:水电站加劲压力钢管结构分析方法与优化设计研究,大型坝后式水电站压力钢管取消厂坝间伸缩节的可行性研究及厂坝联结形式优选。全书共分两篇十章。

上篇为加劲压力钢管整体结构分析方法与优化设计,共分四章,内容为水电站压力管道的应用与研究,大间距加劲压力钢管整体结构分析、密间距加劲压力钢管整体结构分析及加劲压力钢管结构优化设计,首次提出了加劲环与钢管联合承载的设计新理论,建立了加劲压力钢管结构优化设计的数学模型和基本理论,提供了优化设计方法和通用计算机程序。

下篇为取消伸缩节的研究,共分六章,系统叙述了取消伸缩节的有关问题,如取消伸缩节的研究现状、结构模型和结构分析方法,以及取消伸缩节的可行性和取消伸缩节后厂坝联结形式的优选准则、局部结构优选模型、各工况下结构形式优选方法及优选方案的综合分析等,首次提出了厂坝联结形式优化的新课题,提出了厂坝联结形式优选准则和采用一段明管模拟伸缩节的技术方案,并证明了该方案的经济合理性和技术可行性。

本书由刘宪亮、常万光、温新丽合作完成。尽管作者力图精益求精,并力求理论联系实际,但由于水平有限,时间仓促,不足之处在所难免,敬请前辈和同行们批评指正。

作 者

1998年9月

目 录

上 篇 加劲压力钢管整体结构 分析方法与优化设计

第一章 水电站压力管道的应用、发展与研究	(3)
1.1 水电站压力管道的发展趋势	(3)
1.2 水电站压力管道的应用与发展	(6)
1.3 水电站压力管道的研究与进展	(10)
1.4 水电站加劲压力钢管的应用与研究	(16)
第二章 水电站加劲压力钢管整体结构分析	(32)
2.1 结构分析理论公式	(32)
2.2 边界效应分析与问题讨论	(36)
2.3 整体结构分析	(38)
2.4 主要结论	(41)
第三章 水电站密间距加劲压力钢管整体结构分析	(42)
3.1 加劲压力钢管的分类	(42)
3.2 结构分析理论公式	(42)
3.3 理论公式的分析与有限元法验证	(47)
3.4 整体结构分析	(52)
3.5 综合分析	(54)
第四章 加劲压力钢管结构优化设计	(56)
4.1 加劲压力钢管优化设计的可行性和必要性	(56)
4.2 混合离散变量优化设计方法的基本概念 和基本原理	(57)

4.3 加劲压力钢管结构优化设计数学模型	(61)
4.4 加劲压力钢管的实用优化设计研究	(67)
4.5 加劲压力钢管结构优化设计的工程应用	(82)
4.6 综合分析与结论	(88)

下 篇 大型坝后式水电站 厂坝联结形式优选

第五章 取消水电站压力钢管伸缩节的研究概况	(95)
5.1 伸缩节的发展与工程应用	(95)
5.2 伸缩节在工程应用中存在的问题	(96)
5.3 取消伸缩节的工程实践及经济技术可行性	(97)
5.4 取消伸缩节的研究现状	(100)
5.5 本篇的主要工作	(101)
第六章 三维有限元结构分析力学模型	(104)
6.1 坝体横缝缝面约束特性	(104)
6.2 整体结构模型	(106)
6.3 单元剖分	(107)
6.4 计算荷载	(109)
6.5 结果分析中几个需要说明的问题	(111)
第七章 大型水电站压力钢管取消厂坝间伸缩节可行性研究	(114)
7.1 取消伸缩节的工程经验	(114)
7.2 结构变形分析	(115)
7.3 结构应力分析	(119)
7.4 综合分析与结论	(123)
第八章 常规荷载作用下厂坝联结形式优选	(126)
8.1 结构优选基本模型	(126)

8.2 结构变形分析	(127)
8.3 厂坝相对位移及明管的平均应变分析	(131)
8.4 明管的应力分析	(133)
8.5 混凝土结构的应力分析	(137)
8.6 主要结论	(139)
第九章 温度荷载作用下厂坝联结形式优选	(141)
9.1 温度荷载的影响	(141)
9.2 考虑明管温度荷载结构分析	(141)
9.3 混凝土结构温度荷载作用下结构分析	(144)
9.4 温度荷载作用下的最优模型	(155)
第十章 组合荷载作用下厂坝联结形式优选	(157)
10.1 计算工况	(157)
10.2 各种工况对结构受力的影响	(158)
10.3 工况 1 明管位移分析	(158)
10.4 工况 1 明管应力分析	(159)
10.5 混凝土结构应力分析	(160)
10.6 厂坝联结结构形式的优选	(162)
10.7 主要工程措施	(165)

上 篇

加劲压力钢管整体结构 分析方法与优化设计

第一章 水电站压力管道的应用、发展与研究

1.1 水电站压力管道的发展趋势

能源是人类社会发展的重要物质基础,水力发电是人类获得能源动力的一个重要途径。水资源是一种再生型资源,所以水力发电具有成本低、效率高、运行灵活、不污染环境等优点^[1~3]。为了改善和调整能源结构^[4],充分利用水电的优势,世界各国水力发电事业均有迅猛发展之势。随着国内外大型常规和抽水蓄能水电站的兴建,水电站压力管道的 HD 值急剧增长,压力管道日趋向巨型($HD > 1\,200\text{m}\cdot\text{m}$)和超巨型($HD > 3\,000\text{m}\cdot\text{m}$)化发展(表 1-1)。据统计,世界上已建的巨型压力管道达 90 余座,我国约占 10 座^[5]。这标志着我国水力发电事业已向世界水平发展。应该承认,关于大中型压力管道的设计与施工等,我国已积累了丰富的成功建设经验。但也不能否认,我们在巨型压力管道建设方面还存在不足,如巨型压力管道在规模尺寸、结构新颖性、结构分析方法等诸多方面,已远远超出我国现行压力钢管设计规范^[6]的规定;国产的高强度低合金调质钢还不能完全满足巨型压力管道的需要;厚壁钢管的焊接、制造和安装等技术水平,与世界先进水平相比还有一定的差距。这就意味着有许多亟待解决的新课题^[5~7],诸如巨型压力管道的新型结构的开发与应用、设计理论和方法、施工技术与工艺、质量控制与检测及运行管理等,急需我国科技工作者和工程师们进行攻关研究和开发。

表 1-1 国内外压力钢管水平比较表

序号	参 数	中 国			国 外			
		数 值	电站名称	日 期	数 值	国 别	电站名称	日 期
1	最大管径 (m)	10.80	岩 滩	1969	10.50	巴西/乌拉圭 /美国	伊泰普/古瑞	1983
		10.50	水 口	在建	11.20	泰 国	Chiew-larn	1984
		11.2	五强溪	筹建	11.00	巴基斯坦	塔贝拉	1979
		12.40	三 峡	在建	11.40	委内瑞拉	古里二厂	1982
2	最大水头 (m)	1 074	天 湖	已建	1 750	瑞 士	山多体	已建(明槽)
		840.5	羊卓雍湖	筹建	1 675	意大利	塞·费奥拉那	已建(蓄能)
		910 ~1 100	雾灵山	蓄能待建	1 480	秘 鲁	古英戈	已建
					1 440	法 国	卡卜-德龙	已建(明槽)
3	最大 $H \times D$ (m·m)	2 552	台湾明湖	1984	5 843	英 国	底诺维克	已建
		1 824	以礼河三级	1966	5 376	日 本	Imaichi	1984
		5 810	天荒坪	蓄能初设	4 840	法 国	罗斯兰	已建

续表 1-1

序号	参 数	中 国			国 外			
		数 值	电站名称	日 期	数 值	国 别	电站名称	日 期
4	最大 $H \times D^2$ ($\text{m} \cdot \text{m}^2$)	14 802	台湾明湖	1984	55 500	英 国	底诺维克	已建
		9 090	鲁布格	1987	33 406	日 本	Imaichi	1984
					30 960	日 本	新丰根	1972
5	最大 壁厚 (mm)	46	以礼河三级	1966	75	日 本	奥清津	1976
		46	隔河岩	在建	70	美 国	胡佛/鲍尔德	已建
		42	鲁布格	1987	65	巴西/乌拉圭	伊泰普	1983
		54	三 峡	在建	64	奥地利	罗达乌	已建
6	最大长度 (m)	3 530	天生桥二级	在建	61	日 本	SHIMOGO	1982
					3 377	日 本	NAGAWATSU	1943
		$2 \times 3\,563.5$	羊卓雍湖	筹建	2 447	美 国	卡斯泰克	1971
7	最大重量 (t)	9 020	台湾明湖	1984	28 076	苏联	萨扬舒申斯克	1978
		17 000	天生桥二级	在建	23 400	苏联	克拉斯诺雅尔斯克	1973
		60 000	三 峡	在建	20 300	苏联	乌斯奇、伊里姆	已建

1.2 水电站压力管道的应用与发展

压力管道的发展,与社会生产力及科学技术的发展水平是相应的,同样经历着由小型到大型、由简单到复杂的历史过程。按布置形式、结构特征和受力特点,水电站压力管道可分为三大类:露天钢管、埋藏管和坝面管。

1.2.1 露天式压力钢管

露天钢管是最原始、最典型、最基本的水电站压力引水管道。由于明管具有维护检查方便、受力明确、结构分析成果可信、不易发生外压失稳事故、经济安全等优点,所以明管备受青睐,得到广泛应用^[8-10]。早期水电站规模较小,同时由于钢板联结工艺和方法(铆接)的局限性,明管仅用于小型的压力管道。1925年初,世界上电弧焊的发明,使钢板高质量焊接得以实现,这次钢结构的大革命,促进了高 HD 压力钢管的蓬勃发展^[11],如20世纪30年代法国的奥流水电站(水头980m,管壁厚45mm),英国的胡佛坝水电站(管径9m,管壁厚70mm)。随后建设的超巨型压力管道有意大利的赛·费奥拉那水电站($HD = 3\,266\text{m}\cdot\text{m}$),奥地利的罗达乌水电站($HD = 3\,173\text{m}\cdot\text{m}$)和法国的拉科西水电站($HD = 3\,048\text{m}\cdot\text{m}$),这些水电站压力管道均采用明压力钢管。

光面明压力钢管只是单独靠管壁承受内水压力,对超巨型压力管道毕竟显得有些“身单力薄”了。同时,管壁的无限增厚使该钢管的制造、焊接等技术问题愈来愈严重,这时法国和意大利专家发明了箍管。箍管的基本思想是让管壁与外面的高强钢箍共同承担内水压力,从而减薄了管壁的厚度。但实际上,外面的钢箍并非总能承受高压,所以法国专家们又建议了双层钢管。设计时两层管之间留有空隙,在内水压力作用下,内层钢管先进入塑性状态工作,然后两层钢管紧密贴在一起,共同承载,外层管在弹性范围内工作。因为两层钢管的缺陷不可能重合,所以双层管的

安全度极高^[8,11]。法国和意大利均有箍管和双层管的成功建设经验,如法国的罗斯兰水电站($HD = 4\,840\text{m}\cdot\text{m}$)采用箍管和双层管;蒙·塞尼水电站($HD = 3\,050\text{m}\cdot\text{m}$)、卡卜·德龙水电站($HD = 1\,440\text{m}\cdot\text{m}$)采用箍管。不论箍管还是双层钢管,均靠钢管自身承受内水压力,属露天压力钢管,可见法国和意大利专家对明管独有所衷^[11]。

1.2.2 埋藏式压力管道

尽管明管有很多优点,但并非所有情况都能采用露天压力钢管。当引水式水电站引水管道需要穿越山丘或坝后式水电站的引水管道需要穿越坝体时,此时若采用明管,只会增加引水管道的长度和工程投资,所以人们自然会想到采用埋管。不论地下埋管还是坝内埋管,周围岩体或者混凝土结构总要承担一部分内水压力,承担力的大小和管周介质的力学特性有关,它们的工作原理大同小异^[4,9]。

地下埋管钢衬的厚度与管周岩体的力学特性、地质构造密切相关^[4,9,11]。岩体是一种十分复杂的结构,岩体的弹模在同一位置不同方向是不同的,具体应如何取值,目前还没有完全统一的观点。谨慎的设计者取低的弹模,大胆的设计者取高的弹模^[12~15]。在地质条件和岩体较好的情况下,也可不设钢衬,采用钢筋混凝土衬砌,这种结构形式多用于上游引水洞,如我国的渔子溪水电站(洞径 5.0m)、莲花水电站(洞径 15.3m)。但地质条件较差、地下水位较高时,当管道放空的情况下,管道很可能被外水压力压坏或者发生外压失稳。可见地下压力管道的设计,要比明管复杂得多。

在 20 世纪 60 年代以前,混凝土坝坝后式水电站多采用坝内埋管^[4]。这种布置方式可以使引水管道缩小到最短,从而减小了水头损失,降低了水击压力,提高了发电效率,节省了工程投资。这种布置方式当管道直径和内水压力较大时,逐渐暴露出了其在

布置、设计和施工上的缺点：

(1)管道受力变形后，在管周的坝体混凝土中产生裂缝。特别是当管径较大时，在坝体内形成较大的空腔，坝体削弱较大，对坝体的应力分布和抗滑稳定非常不利。

(2)管道钢衬受周围坝体混凝土的约束作用，不能充分变形发挥材料的强度，造成浪费。

(3)管道初期充水时，由于水温较低，管周混凝土结构中的温度应力较大。

(4)坝体与管道的施工干扰较大，影响施工进度。

尽管人们希望通过在钢衬与混凝土之间加弹性垫层的方法克服上述缺点，但效果仍不尽人意，不能从根本上解决上述问题^[16,17]。

1.2.3 坝面式压力管道

怎样才能彻底克服坝内埋管的缺点呢？20世纪60年代苏联的克拉斯诺雅尔斯克水电站的成功建设，开辟了压力管道的新领域——坝面压力管道^[11]。新的布置方式必然相应着新的结构形式，钢衬钢筋混凝土压力管道从此诞生了。当压力管道布置在坝体上游面时，称为上游坝面管^[5]，如我国70年代兴建的风滩水电站；当压力管道布置在坝体下游面时，称为下游坝面管或坝后背管^[16-19]，这种布置方式比较常见，如苏联的克拉斯诺雅尔斯克、罗贡、萨扬舒申斯克等水电站，我国80年代兴建的东江、紧水滩、李家峡和正在兴建的隔河岩、三峡等水电站。

是否坝面背管必须采用钢衬混凝土压力管道呢？意大利专家马尔契格，就曾向苏联建议采用箍管或者双层管^[11]。设计钢衬钢筋混凝土压力管道的基本思想是让钢衬与外围钢筋混凝土联合受力^[16-23]，从而减薄管壁厚度。这种设计思想和管道的工作原理，与箍管或双层管没有根本性的区别，惟一的不同是用钢筋混凝土代替了高强钢箍，实际上钢筋混凝土起到了与钢箍相同的作用，

这一点在苏联进行的大比尺模型试验中得到了证实^[11]。就像钢衬钢筋混凝土管可用于引水式水电站的明管一样^[20,21]（我国依萨河水电站，管径 1.0m，水头 997m），箍管或者双层套管不失为坝面管的一种可行性方案，只不过由于各国的技术经济水平不同，他们的选择也就不同。

到目前为止，坝面管已在五个国家中的十多座水电站中应用^[18,19]，说明坝面管与坝内管相比有许多已被人们接受的优点：

(1) 管道结构与坝体结构分开，便于结构布置。

(2) 减少管道空腔对坝体的削弱，只有内压较小的一部分管道在坝体内，管道主要布置在坝体轮廓线以外，内水压力荷载基本不传递到坝体内，结构受力明确。

(3) 坝体与管道的施工互不干扰，可缩短工期。

(4) 管道可随机组安装、投产的先后顺序分期施工，减小投资积压。

(5) 便于考虑管道结构的钢衬与钢筋混凝土的联合受力，使钢材的强度得到充分发挥。

但是，坝面管势必要加长压力管道的长度，难免环境温度对管道结构受力的影响及管道结构与施工栈桥、施工机械布置的干扰^[16-21]。

钢衬钢筋混凝土压力管道，要使外围钢筋充分发挥作用，就要允许外围混凝土开裂^[16-23]。但是，外围混凝土开裂后，不仅降低了管道的刚度，而且不利于结构的耐久性及正常运行。为了防止外围混凝土的开裂，有人提出预应力钢衬钢筋混凝土压力管道^[24-27]。这种结构形式目前还正处于研究阶段，大型工程中应用较少。应该肯定，由于预应力钢衬钢筋混凝土压力管道的经济性和实用性，只要对管道整体结构进行优化设计，并解决好预应力的施加方法和施工工艺，这种结构形式将有广阔的实际应用前景。我国三峡大型水电站就开展了这方面的开发研究^[28]。

1.3 水电站压力管道的研究与进展

水电站压力管道的研究可概括为理论研究和应用研究两方面。理论研究主要包括结构分析及实验方法等；应用研究主要包括设计理论与方法、结构形式与新型材料的开发、施工工艺与技术、原型观测与运行管理等。理论研究与应用研究是相互影响、相互促进、密切联系的。理论研究是应用研究的基础，并促进着应用研究的发展。同时，理论研究应该以工程应用为依据，并且要以工程应用为目的，否则将脱离实际，研究成果将毫无价值。

1.3.1 压力管道的理论研究现状

工程力学是压力管道理论研究的基础，随着工程力学基本理论的完善和发展，压力管道的理论研究也经历着由简单到复杂，由近似到精确的发展过程。

20 世纪 50 年代前，由于大量计算工作依赖于手工进行，所以压力管道结构分析方法和理论，仅局限于线弹性范围的解析法，结构模型仍然采用简化的理想模型^[29,30]，如压力管道经济直径的计算，只是通过有限的可行性方案进行比较加以确定，或者按简化的经验公式求得^[31]。

50 年代初期电子计算机的发展与应用，使工程力学、结构优化、结构非线性分析、结构动力计算等理论取得了突破性的进展^[32]。特别是 60 年代中期有限单元法的出现^[33]，使人们可以采用数值计算方法通过计算机模拟复杂结构的受力状态^[34-38,61,62]，从此压力管道的理论研究进入了一个新的时期。世界各国在水电站压力管道结构的应力及强度分析^[39-47]、非线性有限元分析^[48-51]、优化设计^[52-59]、温度应力^[60-64]、动力计算^[65-70]、垫层材料研究^[71-73]、结构模型试验^[74-77]、断裂分析^[79]、弹塑性分析^[89-91]等方面进行了广泛深入的研究，成绩斐然。