

目 录

1 汾河流域生态修复工程 7#液压坝坝基土性质对施工影响简析.....	2
2 汾河流域生态修复核心区干流 3#液压坝工程地质分析.....	10
3 汾河流域中游核心区液压坝消能防冲计算分析.....	15
4 浅谈液压坝.....	19
5 泵闸一体化装置流激振动原型观测研究.....	22
6 桂林市漓江壅水科学试验活动坝设计简介.....	30
7 液压钢板坝实时在线监测系统探讨.....	37
8 汾河太原段综合治理工程液压坝优化方案比选.....	46
9 汾河中游核心区液压坝坝基地质问题及处理措施.....	51
10 城市景观坝设计选型及安装要点分析.....	57
11 大理市弥苴河河道景观闸门设计.....	62
12 云南省文山州德厚水库分层取水解决方案.....	70
13 底轴驱动式翻板闸门的若干关键技术问题及工程措施研究.....	72
14 汾河中下游液压升降坝优化设计研究.....	85
15 云南保山红谷田水库分层取水方案的设计.....	91
16 基于风光互补的直流驱动系统及其在智慧水利中的应用.....	96
17 基于有限元分析的液压坝结构特性研究.....	105
18 御河工程液压升降坝设计与有限元分析.....	113
19 基于 BIM 的景观河道液压坝结构优化设计研究.....	123
20 液压翻板闸门安装方案及质量控制措施.....	133
21 液压翻板闸门焊接变形的控制与矫正.....	139
22 汾河新二坝工程钢坝闸设计.....	143
23 哈尔滨市磨盘山水库取水塔进口金属结构的布置与设计.....	147
24 冷喷锌在翻板钢闸门防腐领域的应用.....	154
25 汾河中下游液压升降坝优化设计研究.....	165
26 液压坝在河道整治中的应用.....	171
27 液压升降坝工程对河道防洪的影响.....	175
28 液压升降坝在汾河干流蓄水工程中的应用.....	180
29 汾河二库泄洪排沙底孔、溢流表孔液压启闭机维修养护技术研究.....	186
30 南洋河天镇县生态修复工程设计方案简述.....	194
31 液压翻板闸门在干流蓄水工程中的应用.....	201
32 新型倒挂顶推式闸门的设计与优势介绍.....	206
33 高寒地区大型液压升降坝设计问题探讨.....	211
34 多支铰、大跨度底横轴驱动翻板闸门的设计研究.....	217

汾河流域生态修复工程 7#液压坝坝基土性质对 施工影响简析

陈伟龙

(山西省水利水电勘测设计研究院 山西太原 030024)

摘要: 7#液压坝是在汾河中游核心区干流 15 座液压坝施工过程中存在工程地质问题最多的液压坝。文中结合前期勘察资料,对 7#液压坝坝基土的工程地质条件进行了较详细的描述,并对其成因及物理力学性质进行总结,根据其工程地质性质对当前施工过程中遇到的工程地质问题进行了分析,并提出最终处理建议。

关键词: 坝基土; 承载力; 物理特性; 抗剪强度

Simple Analysis on Characteristic of No.7 Hydraulic Dam's Dam Foundation Soil in the Fen River Basin Ecology Recovery Project and Its Influence on Construction

CHEN Wei-long

Abstract: In the construction process to build 15 hydraulic dams which are located on the midstream river channel of the Fen River, the No.7 Hydraulic Dam, one of these dams, has the most engineering geology problems. By combination with early-stage exploration data, the paper details the engineering geology conditions of the No.7 Hydraulic Dam's dam foundation soil, summarizes its formation causes and physics-mechanics characteristic, and according to the engineering geology characteristic conducts analysis on these engineering geology problems encountered in present construction process, and at last presents the final treatment suggestions.

Key words: dam foundation soil; bearing capacity; physical characteristic; shearing strength

1 引言

汾河是山西省第一大河，干流全长 716km，流域面积 39471km²，流域范围涉及全省 9 市 51 县，占全省国土总面积的 25.3%。山西省汾河流域生态修复工程核心建设段范围为：汾河中下游汾河二坝至介休市义棠镇之间约 80km 的汾河干流。具体内容为新建 15 座液压坝及蓄水区、蓄水区堤防外侧湿地及相应附属建筑物，其坝址分别位于太原市的清徐县，吕梁市文水县，晋中市的祁县、平遥县和介休市境内。由于汾河河谷第四系松散堆积物岩性及物理力学性质的多样性，在液压坝施工过程中遇到了一些工程地质问题，其中 7#液压坝是存在工程地质问题最多的液压坝。现以 7#液压坝为例，通过前期勘察中对坝基土工程地质性质的研究，对后期施工中主要工程地质问题的成因及处理进行分析。

2 地质概况

2.1 地形地貌

7#液压坝坝址位于文水县刘胡兰镇贯家堡村东北约 1.5km 汾河干流上，设计液压坝坝高 2~4m，坝顶高程 751.0m，坝长约 250m，正常蓄水位为 751.0m。该处汾河流向为 S23°W，主河槽位于河床右侧，河床左侧现为漫滩及滩地，河床底宽约 250m，地形较为平缓，地面高程为 747.1~752.6m。两岸为土质防洪堤，堤顶高程 755.6~756.1m，两岸堤外地形平缓。

2.2 地层岩性

坝址区发育地层为现代人工堆积物(Q^S)和第四系全新统河流相洪冲积物(Q₄^{pal})。现自上而下分述如下：

(1) 人工堆积(Q^S)：岩性主要为低液限粉土、低液限黏土，局部夹级配不良砂，淡黄色，结构松散，稍湿，偶含块碎石，土质不均，厚 3.1~7.4 m，主要组成坝址及蓄水区左右岸防洪堤。局部为人工浆砌块石及干砌石，组成防洪堤护坡及丁坝。

(2) 全新统洪冲积(Q₄^{pal})：岩性上部为含细粒土砂及级配不良砂，淡黄色、浅灰色，粒径为粉细粒，结构松散，湿—饱和，主要矿物成分为长石、石英、云母及

少量岩屑，夹低液限黏（粉）土透镜体，两岸漫滩表层分布厚度 0~1.9m 低液限粉土，左岸堤角处较厚。该含细粒土砂层厚 6.0~13.0m。广泛分布于汾河河床及河漫滩。

中部为低液限粉土，淡黄色，结构松散，湿—饱和，可塑—软塑。本层厚度 0~6.0m，主要分布于河床及右岸漫滩下部，自河床向右岸逐渐变厚。

下部为低液限黏（粉）土，淡黄—浅灰色，稍密，土体多饱和，可塑—软塑，局部夹级配不良砂透镜体。厚度大于 5m，分布于汾河河床及河漫滩。

2.3 水文地质

地下水类型为松散岩类孔隙水。含水层主要为第四系全新统洪冲积级配不良砂、含细粒土砂。富水性主要受颗粒大小、级配和地形地貌等因素制约，一般富水性较好，具弱—中等透水性，地下水主要接受大气降水补给。低液限粉土和低液限黏土渗透性弱，可视为相对隔水层。坝址区及防洪堤两侧地下水位与河水位基本一致，地下水自汾河上游向下游径流排泄。勘察期间地下水位埋深一般在 0~1.4m。

2.4 施工中遇到主要工程地质问题

7#液压坝坝基主要存在不均匀变形沉降、渗漏、渗透变形、地震液化、坝后冲刷和基坑涌水等工程地质问题。针对坝基存在的主要工程地质问题，设计中针对性地采用水泥土地下连续墙的施工工艺，对坝基存在的不均匀变形、渗漏、渗透变形及地震液化进行处理。在地下连续墙的施工过程中，遇到钻孔缩孔、成孔后井壁局部坍塌、成桩后桩体不均匀等工程问题，对施工进度造成了一定影响。为此结合前期勘察成果，对坝基第四系土的成因及物理力学性质进行分析，进一步指导液压坝坝基处理。

3 坝基土工程地质特性

3.1 坝基土成因

该处位于太原盆地中部，汾河中游谷地，属第四系全新统洪冲积（ Q_4^{pal} ）地层，岩性主要为低液限黏土、低液限粉土、级配不良砂，在汾河中游河谷地貌广泛分布。成因主要是上游洪水的搬运作用，上游汾河干流及各支流由于暴雨或大量融雪骤然集聚，形成山洪，并挟带着大量碎屑物质自上游向下游搬运而来，洪水流出峡谷后，进

入太原盆地，由于河谷变宽，流速骤减，被搬运的粗颗粒物（如漂卵石、砾、粗砂等）首先堆积下来，随着运距的增加，细颗粒物逐渐沉积，工程区位于太原盆地中部，上游河道较为宽阔、平缓，故沉积地层多为细颗粒物。由于山洪是周期性产生的，每次搬运物质的大小不尽相同，堆积下来的物质也不一样，因此，常呈现不规则交错的层理构造，如具有夹层，尖灭或透镜体等。该处土体即呈现明显的层理发育，不同岩性土体之间多为互层、夹层或透镜体。

3.2 坝基土承载力

通过对坝基土进行钻孔标准贯入试验可知，该液压坝坝基上部级配不良砂经杆长校正后的标准贯入锤击数 $N=3.8\sim 10.8$ 击，属松散——稍密状态；中部低液限粉土经杆长校正后的标准贯入锤击数 $N=6.6\sim 9.3$ 击，属松散状态；下部低液限黏土经杆长校正后的标准贯入锤击数 $N=4.5\sim 11.1$ 击，属松散——稍密状态。根据标准贯入锤击数成果分析，建议坝基土综合承载力为 $70\sim 90$ kPa，但根据标准贯入锤击数试验结果可知，该液压坝坝基土承载力不均且差异较大，特别是局部软弱夹层承载力低，不能满足要求。

3.3 物理性质

通过对 7#液压坝坝基土取第四系全新统洪冲积（ Q_4^{pal} ）原状土样进行室内土工试验分析，由表 1 可知，其天然含水率 $19.5\%\sim 36.1\%$ ，总体来说随着深度的不断增加，含水率也不断增大，其天然含水率大多接近甚至达到饱和。由表 2 可知（取代表性钻孔 ZK7#-2、3），坝基黏性土孔隙比为 $0.670\sim 0.868$ ，根据“按孔隙比确定黏性土密实程度标准”判别，其密实程度主要为松散——稍密；液性指数为 $0.85\sim 1.29$ ，根据“黏性土状态分类”判别，坝基低液限粉（黏）土多呈流塑状态，局部地段呈软塑状态。天然压缩系数 $a_{v1-2}=0.36\sim 0.93$ MPa⁻¹，饱和压缩系数 $a_{v1-2}=0.48\sim 0.93$ MPa⁻¹，绝大多数为高压缩性，且天然压缩系数均接近或等于饱和压缩系数。特别是低液限粉土层，其物理力学指标相比下部液限黏土层略差。

表 1 7#液压坝坝基土含水率统计表

取样深度/m		2	4	6	8	10	12	14	15
ZK7#-	天然含水率 W/%	22.9	29.6	31.1	19.7	19.5	34.4	35.7	36.1
1	饱和含水率 W/%	25.8	29.6	31.5	20.1	22.8	37.0	36.5	36.6
ZK7#-	天然含水率 W/%	22.8	25.1	25.7	25.5	26.3	24.2	25.2	27.5
2	饱和含水率 W/%	25.6	26.1	26.3	25.8	26.8	24.8	26.1	27.5
ZK7#-	天然含水率 W/%	26.7	28.5	28.9	19.2	28.6	29.9	29.5	32.0
3	饱和含水率 W/%	29.7	31.2	29.1	19.5	28.9	30.3	29.5	32.1

3.4 力学性质

本次勘察对（ Q_4^{pal} ）黏性土取原状土样采用室内直剪中的快剪试验方法，分别采用天然快剪和饱和快剪加以比较，其试验成果结果见表 3。从表中可以看出该坝基黏性土的抗剪强度总体较低，而且随着深度增加，抗剪强度呈减小趋势，6 m 以上天然抗剪强度略大于饱和抗剪强度，6m 以下土层随着含水率趋于饱和，天然抗剪强度与饱和抗剪强度基本相当，其土体本身工程力学性质较差。

表2 ZK7#-2、ZK7#-3 钻孔黏性土物理性质及界限含水率统计表

钻孔编号 No.	取土深度 /m	物理性质		界限含水率				压缩系数 a_{v1-2}		土样分类 与定名
		干密度 P_d / (g/cm^3)	孔隙比 e	液限 W_L / (%)	塑限 W_P / (%)	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	天然 /MPa ⁻¹	饱和 /MPa ⁻¹	
ZK7#-2	8.0	1.43	0.688	24.4	16.4	8.0	1.14	0.86	0.89	低液限粉土
	10.0	1.37	0.760	25.4	16.7	8.7	1.10	0.74	0.75	低液限粉土
	12.0	1.45	0.670	24.8	16.6	8.2	0.93	0.49	0.50	低液限粉土
	14.0	1.41	0.710	29.4	17.7	11.7	0.85	0.77	0.77	低液限粉土
	15.0	1.41	0.747	41.5	21.0	20.5	0.32	0.36	0.48	低液限粉土
ZK7#-3	2.0	1.33	0.823	25.6	16.9	8.7	1.13	0.52	0.59	低液限粉土
	4.0	1.30	0.868	25.9	16.8	9.1	1.29	0.53	0.61	低液限粉土
	8.0	1.45	0.670	25.8	16.8	9.0	1.02	0.93	0.93	低液限粉土
	14.0	1.33	0.821	27.6	17.3	10.3	1.18	0.64	0.64	低液限粉土

表3 坝基黏性土抗剪强度指标统计表

钻孔编号 No.	取土深度 /m	天然快剪/q		饱和固结快剪/q		土样分类 与定名
		凝聚力 C/kPa	摩擦角 Φ (°)	凝聚力 C/kPa	摩擦角 Φ (°)	
ZK7#-1	4.0	27.0	26.5	24.2	25.0	低液限粉土
	6.0	23.5	24.0	22.0	24.0	低液限粉土
	12.0	18.8	25.5	18.7	25.0	低液限粉土
	14.0	16.8	19.9	16.6	20.0	低液限粉土
ZK7#-2	8.0	19.6	23.0	19.4	23.5	低液限粉土
	10.0	17.5	18.5	17.6	18.5	低液限粉土
	14.0	14.5	18.6	14.3	19.0	低液限粉土
ZK7#-3	2.0	17.2	20.8	13.2	20.5	低液限粉土
	4.0	16.9	20.5	16.5	19.5	低液限粉土
	8.0	12.6	18.0	12.7	18.5	低液限粉土
	14.0	12.5	21.0	12.1	21.0	低液限粉土

4 坝基土性质对施工的影响

7# 液压坝坝基水泥土地下连续墙具体施工过程中，遇到钻孔缩孔、成孔后井壁局部坍塌、成桩后桩体不均匀等工程问题，以下结合坝基土的工程性质对以上施工中遇到的问题进行分析。

(1) 钻孔缩孔：钻孔涉及地层中含有软弱层，在钻孔通过该层后，软弱层在土压力的作用下，向孔内挤压形成缩孔。例如 ZK7#-2、3，其中部低液限粉土层根据孔隙比判定为松散——稍密状态，且局部干密度低，相对上部级配不良砂及下部低液限黏土层为相对软弱层，且液性指数 0.93~1.29，为软塑——流塑状态，自稳能力很差；钻孔钻进过程中，该层低液限粉土在上部土体挤压及自身重力作用下，将产生蠕动变形，向孔内挤压形成缩孔。

(2) 成孔后井壁局部坍塌：井壁稳定与土体的承载力和抗剪强度密不可分。当含水率较低时，土体的承载力和抗剪强度较高，但是随着含水率的增大，其承载力和抗剪强度不断降低，当各项因素打破这一平衡时，局部自身抗剪强度较低地段率先失去自稳能力，向临空面产生明显的位移变形。7#液压坝坝基黏性土天然状态下含水率高，其承载力和抗剪强度均较低，压缩性高，满足井壁坍塌的条件，加之土体中相对软弱层及饱和砂土层的存在，更加剧了该现象的发生。

(3) 成桩后桩体不均匀：该工程问题不仅与施工工艺及方法有关，地下水渗流也会对其产生不利的影晌。7#液压坝所处汾河河谷及漫滩，地下水位埋藏浅，且由于透水层及相对隔水层的交错存在，水文条件较复杂，地下连续墙桩体基本位于地下水位以下，地下水不仅影响钻孔施工，对桩身质量也会产生不利影响。地下水在桩体未凝固前，围绕桩身或桩周形成渗流通道，不断将周边水泥砂浆冲刷，最后导致桩身周围出现水泥土离析、蜂窝状等缺陷，严重影响了桩体质量。另外，如果在水泥土灌注过程中发生井壁局部坍塌，塌落物也会导致桩体局部夹泥，影响桩体质量，严重时甚至形成断桩。

5 结论

通过对汾河流域生态修复工程 7#液压坝坝基土工程地质性质进行研究，并结合研究成果对施工过程中遇见的问题进行了分析，针对性地提出了处理建议，如：地下

连续墙钻心取样后，钻孔需及时用水泥砂浆填筑，填筑过程需分层搅拌振捣；在竖向层理发育的软弱土层或流砂层成槽，应采取慢速成槽，适当加大砂浆密度；通过施工手段，增大坝基地下水的渗流途径，减小地下水对工程的影响。通过实践证明，改进后桩体已完全符合设计要求。汾河是山西的“母亲河”，相信通过对汾河流域的生态修复，这条山西人民的“母亲河”一定会重现碧波荡漾、鱼鸟翱翔的大河风光，使山西人民重新领略汾河的风采。

汾河流域生态修复核心区干流 3#液压坝 工程地质分析

贾晓华

(山西省水利水电勘察设计研究院山西太原 030024)

摘要:近年来汾河流域生态遭到较为严重的破坏,为使汾河流域生态得到有效修复,已决定在汾河中游核心区修建 15 座液压坝及蓄水区。文中就汾河核心区干流 3#液压坝坝址的工程地质特征及主要存在的问题进行简述,并提出科学的处理措施,保证了 3#液压坝的顺利实施和日后的安全运行。

关键词:液压坝;震动液化;渗漏量

Analysis on Engineering Geological Situation of NO.3 Hydraulic Dam in Fen River ' Mainstream of the Ecological Restoration Core Area of the Fen River Basin

JIA Xiao-hua

Abstract:In recent years, the Fen River's ecosystem has been seriously damaged.In order to effectively restore the Fen River Basin's ecosystem , to build 15 hydraulic dams and water storage areas has been determined in the core area of the middle reach of the Fen River.The engineering geological characteristics and the main problems of the No.3 hydraulic dam site in the Fen River water storage core area are introduced? and the scientific treatment measures are put forward to ensure the smooth implementation and the future safe operation of this dam.

Keywords:hydraulic dam; vibration liquefaction; seepage quantity

1 引言

汾河是山西省的第一大河,黄河的第二大支流,干流全长 716km,流域面积 39471km²,流域范围涉及全省 9 市 51 县,占全省国土总面积的 25.3%。汾河流域生态修复中游核心区干流蓄水工程为汾河流域生态修复工程的重要组成部分,拟在汾河中下游汾河二坝至介休市义棠镇之间约 80km 的汾河干流上修建 15 座液压坝及蓄水区,其坝址分别位于太原市的清徐县、晋中市的祁县、平遥县和介休市境内。3#液压坝位于太原市清徐县孟封镇北程村西北约 1 km 汾河干流上,设计液压坝坝高 5.0 m,坝顶高程 759 m,坝长 252m,正常蓄水位 759 m。

2 地质概述

3#液压坝坝址处汾河流向为 S14°W，河床底宽约 236m，地形较为平缓，地面高程为 754.38~757.68m。两岸为土质防洪堤，两岸堤外地形较为平缓。坝址处主要发育地层为现代人工堆积物（Q^S）和第四系全新统河流洪冲积物（Q₄^{pal}）。人工堆积（Q^S）岩性组成为低液限粉土、低液限黏土，局部夹级配不良砂，偶含碎块石，厚度 4.5~5.7m。全新统洪冲积（Q₄^{pal}）上部岩性为级配不良砂及含细粒土砂，表层含植物根系及杂物，夹低液限粉土层透镜体，厚 12.5~17.5m；下部为低液限黏土，褐黄—褐灰色，饱和，可塑—软塑状，局部夹级配不良砂和低液限粉土透镜体，厚度大于 5.0m。

据《中国地震动峰值加速度区划图（GB18306-2001）》图 A1 及《中国地震动反应谱特征周期区划图（GB18306-2001）》图 B1，工程区地震动峰值加速度值为 0.20g，反应谱特征周期值为 0.35s，相应地震基本烈度为Ⅷ度。坝址区地下水类型为松散岩类孔隙水。含水层主要为第四系全新统洪冲积级配不良砂、含细粒土砂。地下水主要接受大气降水补给。地下水自汾河上游向下游径流排泄。地下水位埋深一般在 0~2.5m。

3 3#液压坝坝基工程地质问题

3.1 工程地质特性

该液压坝坝基地层主要为第四系全新统洪冲积（Q₄^{pal}），岩性上部为级配不良砂及含细粒土砂，淡黄—浅灰色，主要为粉细粒，稍湿—饱和，结构松散，主要矿物成分为长石、石英、云母及一些暗色矿物，局部夹低液限粉土层透镜体，厚度 12.5~17.3m。该级配不良砂含水率为 5.4%；天然密度为 1.37 g/cm³；干密度为 1.30 g/cm³；孔隙比为 1.062；饱和压缩系数（ a_{v1-2} ）0.65MPa⁻¹，具高压缩性；饱和固结快剪凝聚力为 15.5 kPa，内摩擦角为 19.0°，经杆长修正后的钻孔标贯击数为 2.7~13.9 击。下部为低液限黏土，褐黄、褐灰色，结构松散，饱和，可塑—软塑状，局部夹薄层砂层。其含水率为 24.9%~37.1%；天然密度为 1.84~1.98g/cm³；干密度为 1.34~1.56 g/cm³；孔隙比为 0.760~1.042；塑性指数 15.2~21.7；饱和压缩系数（ a_{v1-2} ）0.41~0.54MPa⁻¹，具中等压缩性；饱和固结快剪凝聚力为 14.0~17.7kPa，内摩擦角为 21.0°~22.0°；渗透系数为 2.52×10⁻⁴cm/s，具弱透水性。经杆长修正后的钻孔标贯击数为 6.8~11.8 击。

3.2 工程地质评价

3.2.1 坝基土液化问题

据《水利水电工程地质勘察规范》（GB50487-2008）附录 P 土的液化判别，液化判定可以分初判和复判两个阶段。

1) 初判

土的地震液化初判规定为：①地层年代为第四纪晚更新世 Q₃ 或以前的土，可判为不液化；②土的粒径小于 5mm 颗粒含量的质量百分率小于或等于 30%时可判为不液化；③对粒径小于 5mm 颗粒含量质量百分率大于 30%的土，其中粒径小于 0.005 mm 的颗粒

含量质量百分率相应于地震动峰值加速度为 0.20g 不小于 18%，可判为不液化；工程正常运行后，地下水位以上的非饱和土，可判为不液化。对照以上初判规定，3# 液压坝坝基岩性上部为第四系全新统洪冲积级配不良砂、低液限粉土，其地层年代为第四纪晚更新世（ Q_3 ）以前的土；其粒径小于 0.005 mm 的颗粒含量质量百分率为 3.0%~17.7%，均小于 18%；本坝基正常运行后，位于地下水位以下，为饱和土，初判其为可液化土层（详见表 1），而下部低液限黏土为不液化土层。

2) 复判

初判可能发生液化的土层，应进行复判。土的地震液化复判采用标准贯入锤击数法。有关规定为：①符合下式要求的土应判为液化土：

$$N < N_{cr}$$

式中： N ——工程运行时，标准贯入点在当时地面以下

d_s (m)深度处的标准贯入锤击数；

N_{cr} ——液化判别标准贯入锤击数临界值。

②当标准贯入试验贯入点深度和地下水位在试验地面以下的深度，不同于工程正常运用时，实测标准贯入锤击数应按下式进行校正，并应以校正后的标准贯入锤击数 N 作为复判依据。

$$N = N' \frac{d_s + 0.9d_w + 0.7}{d'_s + 0.9d'_w + 0.7}$$

式中： N' ——实测标准贯入锤击数；

d_s ——工程正常运行时，标准贯入点在当时地面以下的深度，m；

d_w ——工程正常运行时，地下水位在当当地面以下的深度，m，当地面淹没于水面以下时， d_w 取 0；

d'_s ——标准贯入试验时，标准贯入点在当时地面以下的深度，m；

d'_w ——标准贯入试验时，地下水位在当当地面以下的深度，m，当地面淹没于水面以下时， d'_w 取 0。

③液化判别标准贯入锤击数临界值应根据下式计算：

$$N_{cr} = N_o [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{3\% / \rho_c}$$

式中： N_{cr} ——液化判别标准贯入锤击数临界值；

N_o ——液化判别标准贯入锤击数基准值，8 度时取值 10；

ρ_c ——土的黏粒颗粒含量质量百分率，(%)，当 $\rho_c < 3$ ， ρ_c 取 3。

经复判，该坝基土在地震烈度为 8 度时，上部为第四系全新统洪冲积级配不良砂、低液限粉土可产生地震液化，液化土层厚度 12.5~17.3m，存在地震液化问题，结果见表 1。

表1 坝基土液化判别计算成果表

钻孔 编号	标贯深度 d_s' (d_s) /m	水位深度/m		粉土厚度 /m	黏粒含量 ρ_c / (%)	初判	标贯实测值 N' /击	校正后标贯值 N /击	标贯标准值 N_{cr} /击	复判
		d_w	d_w							
ZK3#-1	1.45	1.65	0	21.3	3.0	液化	4	2.4	24.0	液化
	3.45	1.65	0		3.0	液化	6	4.4	24.0	液化
	5.45	1.65	0		3.0	液化	3	2.4	24.0	液化
	7.45	1.65	0		42.6	不液化	7	—	—	不液化
	9.45	1.65	0		3.0	液化	9	7.9	24.0	液化
	11.45	1.65	0		3.0	液化	11	9.8	24.0	液化
	13.45	1.65	0		3.0	液化	14	12.7	24.0	液化
	15.45	1.65	0		3.0	液化	12	11.0	24.0	液化
	17.45	1.65	0		9.8	液化	11	10.2	13.3	液化
	19.45	1.65	0		32.5	不液化	10	—	—	不液化
ZK3#-2	1.45	1.75	0	17.3	3.0	液化	5	2.9	24.0	液化
	3.45	1.75	0		3.0	液化	3	2.2	24.0	液化
	5.45	1.75	0		12.6	液化	5	4.0	11.7	液化
	7.45	1.75	0		3.0	液化	7	5.9	24.0	液化
	9.45	1.75	0		21.0	不液化	8	—	—	不液化
	11.45	1.75	0		3.0	液化	11	9.7	24.0	液化
	13.45	1.75	0		45.7	不液化	13	—	—	不液化
	15.45	1.75	0		45.7	不液化	14	—	—	不液化
ZK3#-3	1.45	1.70	0	16.9	3.0	液化	4	2.3	24.0	液化
	3.45	1.70	0		17.7	液化	6	4.3	9.9	液化
	5.45	1.70	0		3.0	液化	4	3.2	24.0	液化
	7.45	1.70	0		3.0	液化	6	5.0	24.0	液化
	9.45	1.70	0		3.0	液化	11	9.5	24.0	液化
	11.45	1.70	0		3.0	液化	15	13.3	24.0	液化
	13.45	1.70	0		27.2	不液化	18	—	—	不液化
	15.45	1.70	0		27.2	不液化	14	—	—	不液化

3.2.2 坝基渗漏问题

3#液压坝坝基上部为级配不良砂及含细粒土砂，其平均渗透系数为 12.6 m/d，具中等透水性，且在坝基及上下游连续分布，构成渗漏层位；下部低液限黏土的渗透系数为 2.52×10^{-4} cm/s，具弱透水性，可视为相对隔水层。3#液压坝正常蓄水后，存在坝基渗漏问题。现采用下式对其渗漏量进行估算。经计算，在 3#液压坝蓄水后，坝基渗漏量为 $5548 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

$$Q = BkM \frac{H}{2b + M}$$

式中： Q ——坝基渗漏量， m^3/d ；

B ——计算段宽度，m，取 360 m；

k ——坝基土渗透系数，m/d，取 12.6m/d；

H ——正常蓄水位时防洪堤内外（闸坝上下游）水位差，m，取 5.3m；

M ——坝基透水层厚度，m，取 15m；

$2b$ ——平均坝基宽度，m，取 50m。

3.2.3 坝后洪水冲刷

3#液压坝坝后主要由全新统洪冲积级配不良砂及含细粒土砂组成，其结构松散，抗冲刷能力低，在洪水的冲刷和淘蚀作用下易形成冲刷坑，影响坝基土体的稳定。建议在坝后修筑海漫等抗冲刷设施，确保坝后土体稳定。

3.2.4 基坑涌水

3#液压坝坝基岩性主要为级配不良砂及含细粒土砂，其渗透系数为 1.6~3.4 m/d，属中等透水层，且基底高程位于地下水位以下，基坑开挖时存在涌水问题，应排水。

4 结论及建议

3#液压坝坝基上部为淡黄—浅灰色级配不良砂、含细粒土砂，局部夹低液限粉土透镜体，厚 12.5~17.3 m；下部为褐黄—褐灰色低液限黏土，厚度大于 5m。坝基上部级配不良砂、含细粒土砂层存在地震液化、坝基渗漏、坝后冲刷及基坑涌水等工程地质问题。建议在坝基上游侧筑防渗墙，墙底应深入坝基下部低液限黏土层 1.0~2.0m，以降低坝基渗漏量；在坝基下游侧打碎石桩，碎石桩桩端应置于坝基下部较为低液限黏土之上，以消除坝基土液化问题；同时在坝后设防冲刷设施，确保坝后土体稳定。

汾河流域中游核心区液压坝消能防冲 计算分析

崔攀

(山西省水利水电勘测设计研究院, 山西 太原 030024)

摘要: 以汾河流域生态修复中游核心区液压坝消能防冲为例, 计算并分析了不同坝高的泄流流量、消力池池深与池长、消力池底板厚度及海漫长度。结果表明: 液压坝受淹没系数的影响, 泄流流量随坝降落呈先增大后减小分布; 消力池消能率与收缩断面处的弗洛德数正相关, 呈对数分布; 钢筋混凝土材料制作的消力池底板抗冲厚度略大于抗浮厚度要求; 海漫长度随液压坝坝高的增高而增长。

关键词: 生态修复; 液压坝; 消能防冲; 汾河流域

1 引言

汾河是山西省第一大河, 黄河第二大支流, 按河流特征分为上、中、下游三段。太原兰村以上为上游地区; 兰村至洪洞石滩为中游地区, 洪洞石滩至黄河口为下游地区。其中, 中游段河道宽 150~300 m, 河长 266.9 km, 流域面积 20509km², 属平原性河流; 中游地势平坦、土质疏松, 河谷冲积层深厚, 河型蜿蜒曲折。

本次“核心区”建设位于汾河太原以下段汾河二坝——三坝之间。主要任务是通过在河道内设置蓄水闸坝, 抬高河道水位, 拦蓄洪水, 为堤外蓄水湿地提供水源, 同时河道内形成蓄水水面, 增补地下水, 改善周边环境。治理理念为恢复河道水域, 蓄滞洪水, 充分利用雨水资源, 改善生态环境; 增强地下水补给, 抬升地下水位; 增大河道水域面积, 减缓洪水流速, 提高防洪能力; 同时, 通过增大水域面积, 增强河道水质的自然修复能力, 改善水质。

此次治理段的防洪标准为 20 年一遇洪水。结合汾河中下游河道疏浚整治工程的总体布局、建设任务及堤外蓄水湿地的布置, 在核心区共布设 15 座液压坝, 每个蓄水湿地蓄水量 64 万~123 万 m³, 蓄水面积为 16.17km², 总蓄水量 1737 万 m³。根据蓄水量及规模, 确定液压坝等别为 IV 等 4 级。

2 工况计算

汾河生态修复中游核心区干流蓄水工程共有 15 座液压坝, 每座液压坝均包括主坝及左右两侧副坝。其中, 主坝位于河道主槽内, 副坝位于主坝两侧的滩地上。副坝坝高

均为 2m，主坝有 3.0m，3.5m，4.0m，4.5m，5.0m 等 5 种坝高形式。根据 1~15 号液压坝平面布置形式及运行情况，液压坝的泄流情况分两种类型：一种是主坝及两侧副坝的泄流洪水分别流入各自下游消能防冲建筑物之内，经各自海漫段后排入下游。另一种是两侧副坝下泄洪水全部汇入主坝，与主坝洪水汇合后，流入主坝消力池内，经主坝海漫段后排泄到下游。

考虑到液压坝既是挡水建筑物又是泄水建筑物，每座液压坝的主坝及副坝均应计算立坝溢流和塌坝泄流运行情况的消能、防冲。在立坝溢流情况下，堰上水头看 0.1m, 0.2m, 0.3m, 0.4m, 0.5m 五种工况；在塌坝泄流情况下，不考虑行洪对堰前水位的影响，考虑堰上水头为 0.5m，闸门每降低 0.5m 为一个工况，直至闸门塌平。

因此，在上述各运行情况下，计算并分析各液压坝主坝及副坝的泄流流量，下游水深，消力池池深与池长、消力池抗冲厚度及抗浮厚度、海漫长度，得出不同液压坝坝高消能防冲特性，为类似工程的设计提供参考依据。

3 计算结果

3.1 过流能力计算

液压坝的过流能力采用堰流公式计算：

$$Q = \sigma \epsilon m b \sqrt{2g} H_0^{3/2}$$

式中： σ ——淹没系数；

ϵ ——侧收缩系数；

m ——流量系数；

b ——闸孔净宽，m；

H_0 ——包括行近流速的堰前水头，m。

经计算可知，在立坝溢流情况下，随着堰上水头的增加，流量也逐渐增大；考虑到液压坝运行安全，堰上最大水头为 0.5 m，则在立坝溢流时，该工况所对应的流量值最大，为 75.03 m³/s。在塌坝行洪情况下，闸门初始降落时，泄流量随闸门降低而逐渐增大；当闸门快塌平时，下游水流形成淹没流，淹没系数变小，最流量影响较大，泄流量略有减小。

3.2 消力池池深及池长计算

依据《水闸设计规范》消力池计算公式，计算各工况，得出如下结果，坝高不同，消力池池深及池长差别较大：滩地坝高 2.0 m，消力池池深 0.13 m，池长 6.95 m；主槽

坝高分别为 3.0 m, 3.5 m, 4.0 m, 4.5 m, 5.0 m 五种类型, 计算所得主槽消力池池深为 0.23~0.43 m, 池长为 11.18~13.87 m。随着液压坝坝高增大, 消力池池长也在增大, 消力池长度主要由上下游水头差而决定。消力池池深最大值所对应的单宽流量比较大, 消力池池深主要由单宽流量决定。立坝溢流的消能率基本上大于塌坝行洪时的消能率见表 1; 消能率 η 与收缩断面处的弗洛德数 Fr 呈对数关系分布见图 1。

表 1 2 m 高压坝消能率计算成果

立坝溢流					塌坝行洪			
堰上水头/m					坝高/m			
0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.5	1.0	0.5	0.0
0.59	0.79	0.72	0.67	0.62	0.55	0.39	0.12	0.21

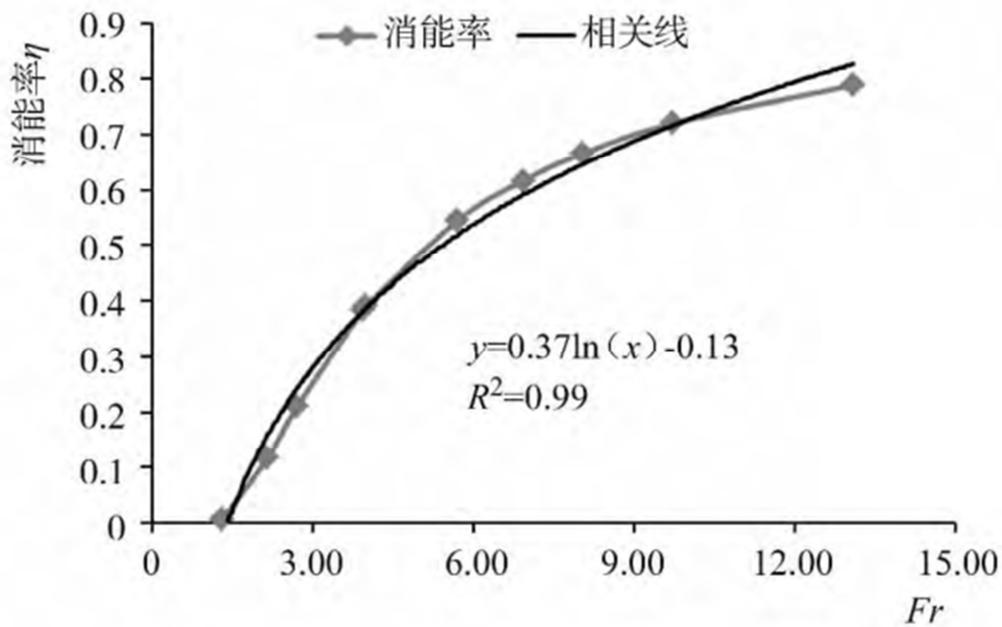


图 1 消能率 η 与弗洛德数 Fr 相关性

计算公式如下:

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1}$$

式中: η ——消力池消能率;

E_1 ——消力池收缩断面处能量, m;

E_2 ——消力池末端水流断面能量，m。

3.3 消力池底板厚度计算

消力池底板厚度应根据抗冲和抗浮要求分别计算确定，并取计算结果最大值。依据《水闸设计规范》消力池底板计算公式，计算各工况底板的抗冲与抗浮厚度，计算可知：因消力池采用钢筋混凝土材料制作而成，消力池的抗冲计算厚度略大于抗浮计算厚度要求。消力池底板计算厚度随坝高的增大而增大，滩地消力池底板厚度为 0.34 m，主槽消力池底板厚度为 0.40~0.50 m。

3.4 海漫长度计算

水流经过消力池消能后仍存有部分剩余能量，需要利用海漫消除，并且不同河床土质的抗冲能力差别较大。因此，海漫的长度由剩余能量的大小及河床的抗冲能力决定。依据《水闸设计规范》海漫计算公式，计算得到滩地液压坝的海漫长度为 9.06 m，主槽液压坝的海漫长度为 20 m 左右，计算长度随液压坝坝高增大而增大。

4 结论

第一，在立坝溢流情况下，液压坝的过流能力随堰上水头的增高而增大；塌坝泄流情况下，液压坝的过流能力受到淹没系数的影响，泄流流量随液压坝降落呈先增大后减小趋势。

第二，消力池池长主要由上下游水头差而决定，池深主要由单宽流量而决定；消力池消能率与收缩断面处的弗洛德数正相关，呈对数分布。

第三，钢筋混凝土材料制作的消力池，其底板抗冲厚度略大于抗浮厚度要求。

第四，海漫长度取决于消力池末端剩余能量大小及河床抗冲能力，并随坝高的增高而增长。

浅谈液压坝

代威

(山西省水利水电勘测设计研究院有限公司, 太原 030024)

摘要: 近年河道挡水闸门种类可谓是日新月异, 本文着重对液压坝的优缺点进行表述, 并对其部分缺点的改进做出了探讨。

关键词: 液压坝 优点 缺点 闸门

近年河道挡水闸门种类可谓是日新月异, 出现了许多诸如“钢坝”、“钢闸坝”、“气盾坝”、“液压坝”“液压翻板坝”的挡水设备。本文谨从探讨的角度, 尝试论述其中之一的“液压坝”。

一、液压坝的优点

上文中所述的新兴闸坝有一些共同的特点, 比如闸坝处于挡水工况时, 通常有 10° ~ 20° 的倾角, 有利于闸坝的在无水条件下依靠自重倒伏, 当上游径流不断补给时, 又可以有效地形成瀑布水帘。传统闸门行洪时, 大多向上提(翻)起, 当洪水位过高时, 难免产生阻洪, 而新兴闸坝大多为倒伏式闸坝, 行洪时, 闸门倒伏于闸底板上, 超高洪水来袭时, 不会像传统闸门一样门底阻水。新兴闸坝向下开启, 因此当水中有漂浮物时, 可通过适当降低闸坝的方式进行排污, 相比传统闸门可大量的节省水利资源。

而液压坝结构的特殊性, 其还有自身独特的一些优点:

(1) 液压坝结构简单, 受力合理。一扇液压坝通常具有两组支承, 当闸坝正常挡水时, 每组支承与坝体本身形成一个稳固的三角形, 其力学结构设计合理, 可较大的发挥出钢材自身的性能。

(2) 液压启闭机将液压坝推至设计工位时, 即坝面正常挡水时, 液压启闭机所受的荷载几乎是全运行阶段最小的, 也正是因此, 多级柱塞缸成为了可行的动力方式。

(3) 液压坝可布置于宽阔的河道中, 在河道中不用增设闸墩。目前已建成运行的液压坝超过 200m 跨度, 而无需设置中墩。这种设计符合“补齐工程短板”中的“恢复北方河流基本形态和行洪功能, 扩大河湖生态空间”的理念。

(4) 平原河道中, 闸前淤积一直是困扰闸门正常运行的大问题, 而新兴闸坝的坝后淤积则更会导致闸坝无法完全倒伏, 甚至无法倒伏, 以至于影响到河道的行洪安全。液压坝相对而言, 有良好的冲沙功能, 一道液压坝通常由数扇至数十扇坝面组成, 单扇坝面小开度开启(倒伏)泄水, 水流从门叶两侧泄出, 其对左右两侧液压坝下游淤积可起到冲击及扰动作用, 几扇坝面交替往复, 可最大限度提高水流冲沙效率, 有利于液压坝的完全开启(倒伏)。在坝前未达到设计水位时, 其优势更为明显: 液压坝仍仅需小开度开启, 便可实现两侧出流冲沙, 这种应用在泥沙含量较高, 而水量并不充沛的河道中更为适用。

二、液压坝的缺点及目前的应对方式

优点在很多样本手册中都可找到，但真正有意义的，需要重视的，常常被回避的却是液压坝的缺点，通过对缺点的剖析，我们可找到很多改进的地方，从而推进这种闸坝的发展。笔者也试着通过本文，对这一新兴坝型进行简单的论述，望得到广大同行的不吝指正。

(1) 液压坝作为新兴产物，目前并无相应国家或行业标准对其进行规范。以至于其运行工况到底如何确定合适，都未明确指出。《水利水电工程钢闸门设计规范》中要求工作闸门门能在动水启闭，而液压坝在河道中实际是以工作闸门的地位存在的，但每扇液压坝如果要求都可在动水中完全开启，则对现行液压坝及启闭机都提出了更高的要求。当液压坝从挡水工况逐渐开启至 40° 左右时，门上正压力由“三角形”逐渐向“梯形”转变，力对轴的力臂也逐渐增大，加之动水会产生额外的动压力，对液压坝及启闭机造成额外的冲击，因此并不应仅按照《水电站机电设计手册》中的 0.583 的系数来做设计。

当液压坝从挡水工况逐渐开启至 40° 时，笔者是取设计水位，按照门上全水柱考虑，虽然有些保守，但苦于无相应规范及实验数据，为安全起见，以往一直如此设计。但是这样必然会造成一定的浪费。实际上，如果河道宽度上百米，更推荐通过缓慢开启闸门，逐渐降低闸前水位，抬高闸后水位，从而降低对液压坝及启闭机要求。另外，每道液压坝可根据水文调节结果，设计若干扇强度大于平均值的门体及配套启闭设备，用以在动水中启闭，塌坝行洪时，首先放倒这几扇坝面，待下游水位上涨，上游水位有所下降后，再操作其余液压坝。总之，通过设计合理的运行方式可减少不必要的材料浪费。

如果有可能，盼望在未来的《水利水电工程钢闸门设计规范》等一系列闸门规范中，能引入这类闸坝，并对其作出具体要求，针对此问题给出安全系数，提出运行的标准。

(2) 传统液压坝通常配备支撑杆，尤其是当液压坝高于 3.0m 时，含支撑杆的设计更为常见。当主液压启闭机将液压坝推至设计工位后，为了将液压系统卸荷载，于是引入了额外的支撑系统，即支撑杆。支撑杆形式多样，有滑动式，有折叠式，目前又从折叠杆演变到折叠板。额外支撑系统的优点不再赘述，但是在多泥沙的河道中，这个支撑杆有时会起到不利的作用：首先，额外支承会引入锁定系统，整套解锁装置在水下甚至淤泥中，且距离操作室很远，出现问题时不宜发现；其次，当下游淤泥厚重且板结后，支撑杆时常无法解锁，导致液压坝小开度都无法实现，难以冲沙，从而使液压坝无法倒伏；第三，由于有支撑杆解锁系统的存在，不单会增加液压系统的复杂程度，支撑杆的几处轴承、限位钩的制安精度等等都会增加整套系统的复杂程度，客观上就会增加系统故障率。重要的是，支撑杆系统一旦出现问题，有可能导致液压坝受力不均产生扭曲变形、甚至无法放倒液压坝，严重阻洪发生事故。

因此，笔者更倾向于直接通过液压缸对坝面进行锁定。为安全起见，仅需要适当提高液压坝主动力系统的稳定性。之所以是“仅需”，因为如上文优点(2)所述，液压坝正常挡水时，启闭机所受荷载并不高，此时的系统压力仅为运行时最高压力的三分之一左右，所以其本身就有三倍左右的安全系数。通过优化设计，已经有设计师利用液压坝自身这个优点结合机械连杆结构，做出了低系统压力，短行程，粗液压缸，大启门力输出的液压坝设计方案，且已投入运行，目前运行基本良好。液压坝正常挡水时，低系统压力，意味着对整套液压系统要求可以不至于过于苛刻；短行程，意味着受压杆件不宜失稳；粗液压缸，意味着可以提供更大的启门力，在挡水工况时有着更多的动力储备，同时也意味着液压缸具有优良的稳定性。

(3) 有些液压坝为了降低启闭机容量，设计者会将启闭机支撑点设计的过低，甚至将液压缸部分置于预留坑中。通过一些工程实例，我们发现，当有泥沙进入预留坑中时，启闭机会因为泥沙阻力而无法灵活摆动，导致液压坝无法依靠自重闭门，于是也有工程使用开槽式布置方式，但这种布置形式更适用于下游坡度较大，利于冲沙的地区使用，而且开槽式布

置配合液压管沟的预留，会使闸底板整体性变差。相较而言，适当增加启闭机容量，增大门体刚度，减小启闭机行程的设计思路更为可靠。

(4) 液压坝通过液压缸控制启闭，通常有数十根甚至上百根不锈钢液压管，总长度动辄数千米。这些不锈钢管路拥有大量的焊接接头，这些接头大部分为现场手工焊接，过多的接头及过长的管线势必会带来更多的不确定因素。加之不够钢管难免会长期接触劣质水体，势必会对其造成电化学腐蚀，影响寿命。因此应优化管路的布置，目前已有单位在进行实验，如果可行，将大量减少不锈钢材的使用，减少防护工作量，从一定程度上提高液压系统的稳定性。

液压坝的启闭机随着其坝面的开启角度不同而摆动，为适应这种摆动，以往设置一根软管进行对接液压缸与不锈钢液压油管。即使选用高质量软管，长期暴露户外，其寿命也成了整套液压系统的短板。在北方的冬季，下游如果有一定回水，当闸门需要操作时，则冰冻更有可能对软管产生破坏。起初的很多液压坝都有这个问题，但现在我们设计了一种“液压旋转接头”，通过对液压缸进油口位置的调整，配合液压旋转接头已经基本解决了这个问题，已有旋转接头服役四年有余，目前运行良好。

(5) 液压坝肩负工作闸门的功能，那么它的检修也是个需要正视的问题。止水的更换，门体的防腐都需要工作人员进入主河道进行操作。针对此问题，目前我院也同兄弟单位进行了钢围堰的设计制作。当然我们也遇到一些难题，如围堰运输，单单从一扇坝面垂直水流方向移动 6m，放置于另一扇坝面前起初就费了一些周折；钢围堰由于淤泥过多，检修每扇闸门时，最初放不到闸底板，需要放水冲沙才行；另外闸底板未设置与之配合的钢埋件，加之其重量过低，底部止水效果欠；我们固定在闸底板的止水橡皮是通长的，后期如果更换恐只得对它进行分段处理……。检修的工作条件比较恶劣，但是我们的尝试工作也谨是为后期完善整套液压坝体系做抛砖引玉之用。

(6) 液压坝的液压缸布置在坝面下游侧，液压缸长期置于水中，如果套用启闭机设计规范，则不满足现行启闭机设计规范要求。目前也有厂家设计有新型液压坝，将液压缸隐藏于门体结构中，也有设计方案是直接密封于闸底板内。至于液压缸在水下的可靠性还需时间的考验。也希望各兄弟单位能提出宝贵的建议。

以上 6 点是目前遇到的主要问题，诚然还有一些小问题，比如液压坝由众多的单扇坝面组成，当坝体倾斜某一角度时，液压坝需要依靠角度传感器传输信号，由于累计误差的存在，水下角度传感器寿命及稳定性的影响，其无法像钢坝一样整齐划一，这也是它一个缺点。

三、结语

笔者认为，“坝”是指建筑在沟、峪、河流中拦截水流的水工建筑物；“闸门”才是装置在各种过水孔口上用以控制水流的活动设备，关闭和开启时可以调节流量和控制水位。本文中的“坝”实则具有闸门的功，为了与目前主流叫法统一，故文中亦称之为“液压坝”。希望在不久的将来，能将液压坝正式划入钢闸门的行列，到时它也将拥有自己的行业规范。尽管目前它有些地方还不够完善，但是通过无数企业及广大设计工作者的不断努力，一定能完善这种坝型。小步快跑，不断迭代是我国创新型企业的一大特色，目前各种新型闸坝不断推陈出新，正是创新型社会精神的体现。相信我们的水工钢结构能给我们的城市景观，带来更多惊喜。

作者简介：代威，男，1981 年 12 月出生，2004 年毕业于太原理工大学机械系，高级工程师。

泵闸一体化装置流激振动原型观测研究

严根华^{1,2} 朱春玥^{1,2} 孙云茜^{1,2} 侍贤瑞^{1,2} 董家^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210029.)

摘要: 本文研究泵闸一体化装置的流激振动问题。依托某城市河道水环境整治工程, 重点考查闸门全关挡水、水泵抽水排涝状态下泵闸结构的振动特性。通过泵闸结构的振动加速度、动位移、动应力及水流脉动压力等动力参数测量, 取得了结构振动的各动力参数的特征值和频谱密度, 并取得了水泵抽水运行时的噪声特性, 在此基础上对泵闸结构的振动安全性进行了评估, 提出了减振措施, 取得满意效果。

关键词: 泵闸一体化装置 流激振动 原型观测 安全性评估 减振措施

1 前言

飞力一体化泵闸装置是一种新型的泵闸组合式水工引(泄)水结构, 闸门结构的运行平稳性和动水作用下的流激振动状况需高度重视。通过现场泵闸结构的流激振动原型观测, 取得水泵抽水运行时结构的水流脉动压力荷载的谱特征和数据特征, 获得闸门结构的振动加速度、动位移及振动应力的量级和振动能量在频域的分布特征, 揭示不同水泵抽水流量条件下的闸门结构流场动力作用和振动响应特征, 以及水泵结构自身的振动特性等。通过对不同运行工况下的泵闸结构流激振动数据的分析评估, 给出泵闸结构安全运行的局部开启安全开度以及水泵抽水流量与上下游水位的安全组合区间, 提出控制闸门疲劳损伤的安全运行区域。

本文依托飞力一体化泵闸装置的某具体工程应用情况, 根据平面工作闸门的运行工况具有闸门全关、水泵抽水和水泵停运、闸门动水开启以及局部开启运行要求, 通过平面闸门及水泵一体化装置的流激振动现场观测, 论证闸门安全运行的可靠性, 完整掌握闸门动力特性及在各种运行工况时的振动响应特征。以闸门各主要部件的振动加速度、动位移以及振动应力、应变作为基本依据, 评估闸门结构振动安全性, 对存在问题, 提出闸门抗振措施, 并对闸门运行操作规程提出合理建议。

该依托工程枢纽主体结构所用的飞力一体化泵闸装置由赛莱默(中国)有限公司负责设计、制造和安装。工程布置为2孔净宽3m, 设 $B \times H = 3\text{m} \times 3.5\text{m}$ 平面钢闸门2扇, 采用螺杆启闭机启闭。每座闸门上设潜水泵1台, 共2台, 单泵参数为: $Q = 422\text{L/s}$ 、 $H = 2.3\text{m}$ 、 $N = 22\text{kW}$ 。小龙涌低潮位时开闸自流排水, 小龙涌高潮位且下大雨发生内涝时, 则关闸开泵排水。每扇闸门设自控系统一套, 根据支涌和小龙涌的水位自动控制闸门的启闭及潜水泵的启停。工程现场见照片1-1和1-2, 工程结构侧视图见图1-1。



照片 1-1 飞力一体化泵闸装置工程远景



照片 1-2 飞力一体化泵闸装置近景图

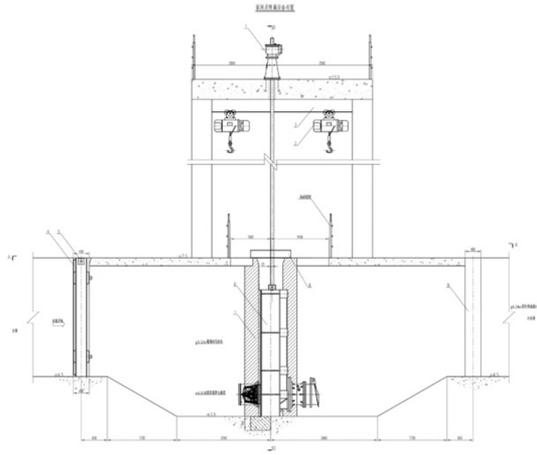


图 1-1 飞力一体化泵闸结构侧视图

本次研究采用原型观测和数值模拟相结合的方法进行。泵闸抽水过程中的闸门振动加速度、动位移及动应力参数将通过现场监测仪器进行实时测取，泵闸结构的动力特性通过三维空间有限元法进行分析研究，通过现场观测的泵闸结构动力响应参数和动特性分析数据的综合分析，对泵闸一体化装置的运行安全性进行评估。在此基础上，为该类泵闸工程的应用推广积累和提供科学依据。

2 原型观测仪器设备布置

本次原型观测在飞力一体化泵闸装置安装布置了脉动压力、振动加速度、振动位移、振动应力传感器以及振动声级计等测试仪器（典型测点传感器见照片 2.1）。通过本次原型观测，系统获得了泵闸运行过程中的动水压力统计特征，泵闸结构抽水运行工况振动响应以及振动噪声测试等重要成果，取得了第一手可靠安全性评估数据资料，为泵闸一体化装置的工程推广应用提供了重要依据。

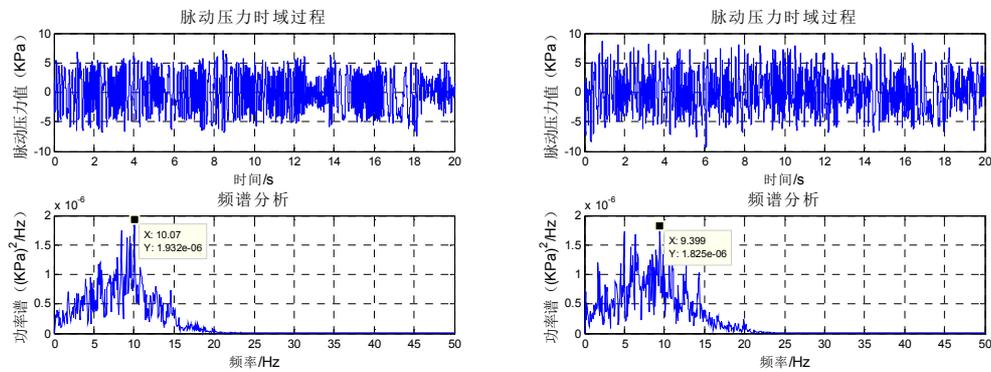


照片 2.1 泵闸一体化装置典型脉动振动应力传感器布置

3 泵闸运行的动水压力特征

在内河和外江水位差 0~1.14m 范围内变化时，水泵正常抽水过程中，内河侧水流比较平静，外江侧水流出现一定水流紊动现象；当内河侧水位低于水泵进口临界淹没水深时，水

面将出现吸气漏斗旋涡，从而增强水流的扰动和吸气啸叫声及水流脉动压力作用。图 2.1 绘出了水泵电机 50Hz 抽水脉动压力时域波形和功率谱密度曲线。结果显示，在该工况下水流脉动压力的能量分布随测点位置不同而变化，水泵进口和出口拍门部位的水流脉动能量主要分布在 15Hz 频率范围内，优势能量集中在 5~10Hz 内。从总体上，水泵抽水时的水流脉动压力属于低频大尺度旋涡运动，符合水泵抽水时的水流流动规律。



1 号门 50Hz 抽水 RB2 测点

1 号门 50Hz 抽水 RB3 测点

图 2.1 水泵电机 50Hz 抽水典型测点脉动压力

3 泵闸运行振动响应测试与分析

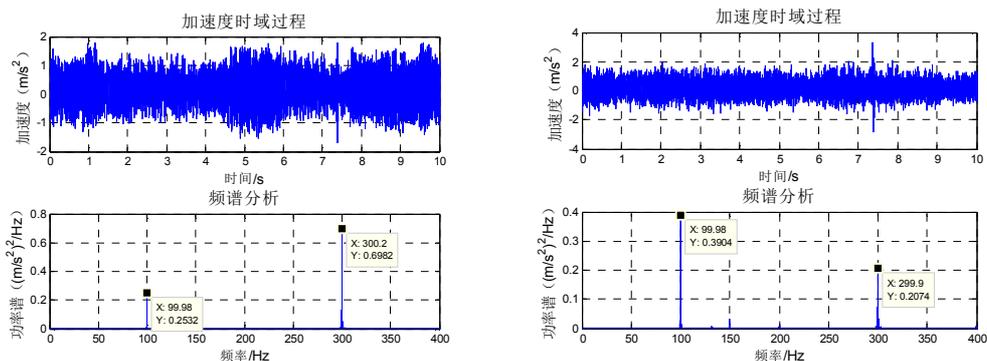
泵闸装置抽水运行的流激振动响应按照可能的运行工况，进行双泵开启、单泵抽水等进行测试分析。数据分析结果显示，小于 40Hz 低频抽水的结构振动加速度比 50Hz 正常抽水频率时的振动量要大，这是低频运动产生的动力响应比高频激励相对要大的缘故。因此，泵闸装置的振动特性分析以 50Hz 正常抽水工况为主进行。

3.1 泵闸装置的振动加速度特征

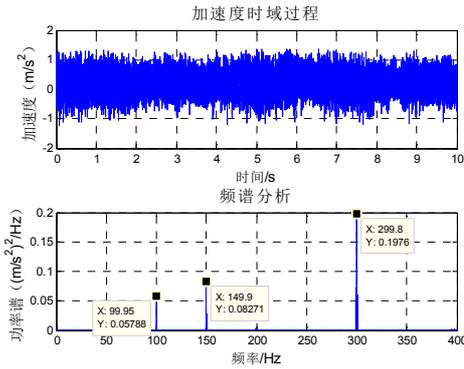
原型观测成果指出，双泵抽水时不同电机频率的闸门最大振动量基本相当，双泵抽水的振动量大于单泵抽水的振动量。

当电机抽水频率 50Hz、1#门单泵抽水时，闸门左下角部位测点最大振动加速度均方根值为 1.347 m/s²，闸门门顶三向加速度最大均方根值为 0.278m/s²，水泵上游叶轮处顶部 0.896 m/s²，水泵下游拍门处顶部 1.043 m/s²。2#门单泵抽水时闸门左下角部位测点最大振动加速度均方根值分为 1.106m/s²；门顶为 0.054m/s²；水泵上游叶轮处顶部 0.557 m/s²，水泵下游拍门处顶部 0.653m/s²。

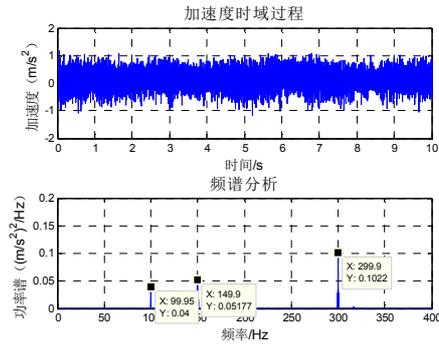
泵闸振动的频谱密度分析显示，泵闸电机 50Hz 频率下单独抽水时，各测点振动响应的能谱密度以 2、3、6 倍频程的形式（100、150 Hz 及 300Hz 等）表现出来，泵闸结构的振动以高频振动为主。典型振动加速度时域过程和功率谱密度绘于图 3.1。



1 号门单独抽水 RA2 测点 X 方向



1 号门单独抽水 RA1 测点 X 方向



2 号门单独抽水 LA2 测点 Y 方向

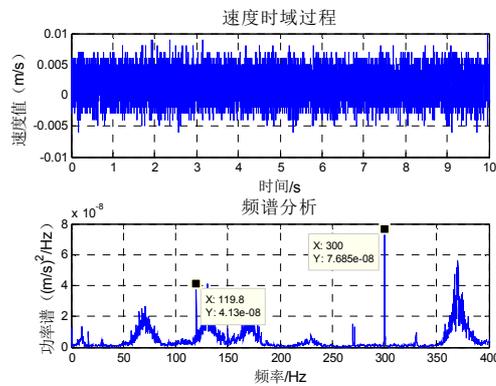
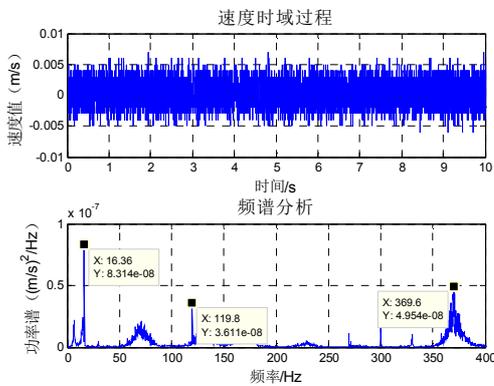
2 号门单独抽水 LA2 测点 Z 方向

图 3.1 水泵电机 50Hz 振动加速度时域过程及功率谱密度

3.2 泵闸装置的振动位移特征

泵闸抽水过程中闸门结构振动位移值很小。双泵开启状态下闸门结构门顶的最大振动位移均方根值为 $4\mu m$ ；单泵开启抽水时闸门结构的最大振动位移均方根值 $2\mu m$ ；振动速度能量基本集中在 16.3、65、120、360Hz 处（见图 3.2）。因此无论双泵开启还是单泵运行，闸门振动量均位于微幅振动范畴。

分析数据显示，双泵同时抽水的振动位移略大于单泵运行情况，振动位移以电机低频抽水工况相对略大。总体上看，泵闸结构的振动位移均位于微幅振动范畴，泵闸装置运行时是安全可靠的。



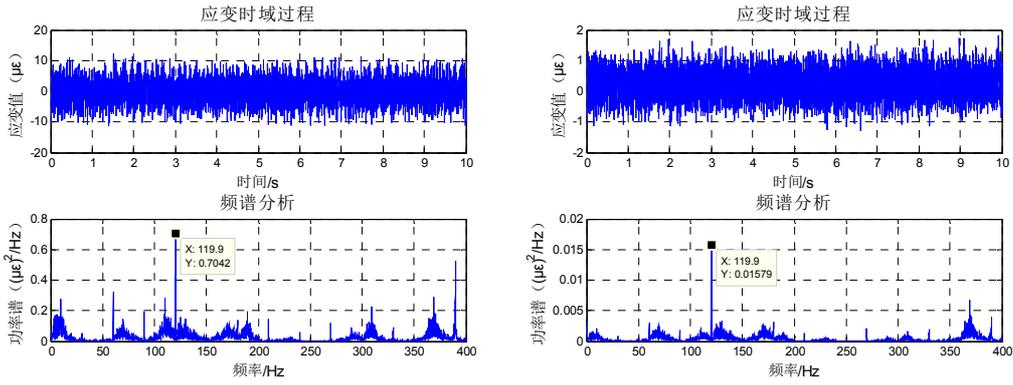
双泵同时抽水 Rx 测点 X 方向

双泵同时抽水 Rx 测点 Y 方向

图 3.2 水泵电机 50Hz 振动速度时域过程及功率谱密度

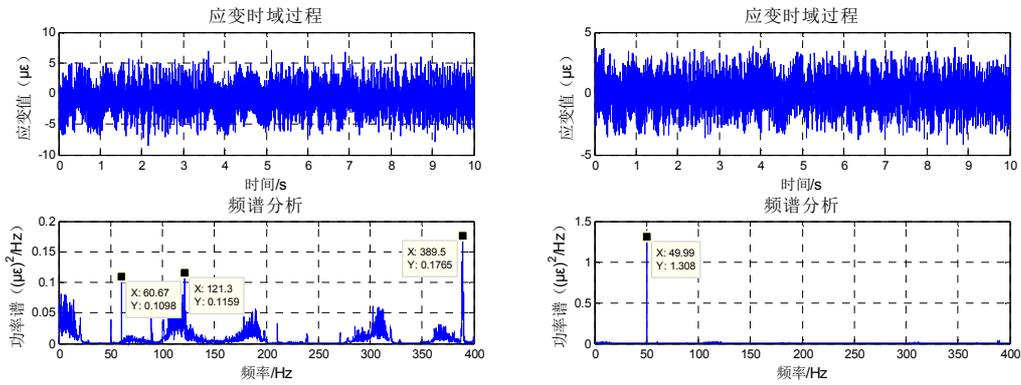
3.3 泵闸装置的振动应力特征

1#门泵闸水泵抽水运行时最大应力均方根值为 1.767MPa；2#泵闸水泵抽水运行时最大振动应力均方根值为 0.696MPa；振动应变能量集中在 120、150Hz 处，此外还存在 15Hz 以内少量的低频响应能量（见图 3.3），这可能是水泵抽水引起的水流脉动压力激发的低频振动应力的变化。从整体来说，水泵抽水时闸门结构的振动应力值较小，即泵闸结构的动强度满足安全运行要求。



a) 1号泵闸单独抽水 RC2 测点

b) 1号泵闸单独抽水 RC1 测点



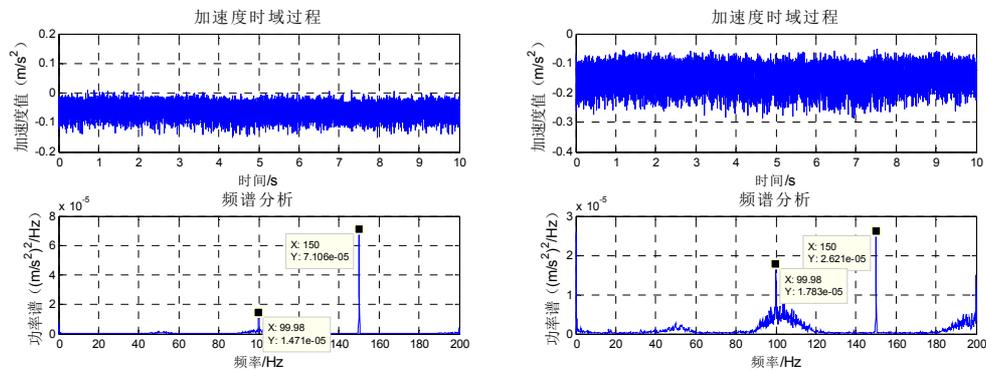
c) 2号泵闸单独抽水 LC2 测点

d) 2号泵闸单独抽水 LC4 测点

图 3.3 典型测点振动应变时域过程与功率谱密度

4 泵闸运行建筑物振动与噪声影响分析

在泵闸电机 50Hz 频率抽水工况下，进口闸墩顶部的最大振动加速度均方根值为 0.025 m/s²，闸室地面最大振动加速度均方根值为 0.167m/s²，闸后交通盖板最大振动加速度均方根值为 0.128m/s²。闸墩顶部振动位移均方根值小于 1μm。建筑物振动能量谱密度显示，主要振动能量以 1、2 倍电机抽水频率的倍频程（50、100Hz）为主（见图 4.1），振动最大值出现在闸室地面（紧靠泵闸结构）处，进口墩头顶部、闸后地面分别位于泵闸结构的前后，振动量具有明显减弱的传递性质。总体上看，泵闸装置的运行对闸墩等土建结构的影响不大。



a) #2 测点 X 方向

a) #2 测点 Y 方向

图 4.1 建筑物典型测点振动加速度时域过程及功率谱密度

此外，通过对不同水位不同电机功率下双泵同时抽水、1号泵单独抽水和2号泵单独抽水等工况进行信号采集与处理，并根据噪声数据的对比分析可以看出，电机频率越高，声压和声强值越大，但从总体上看泵闸在各工况下抽水运行所产生的噪声不大，在闸前出现吸气漏斗形成啸叫声（见图4.2）时附加声强在10dB以下；水泵正常抽水时附加声强控制在5dB以内。因此泵闸正常运行时不会对周围居民区产生噪音干扰影响。

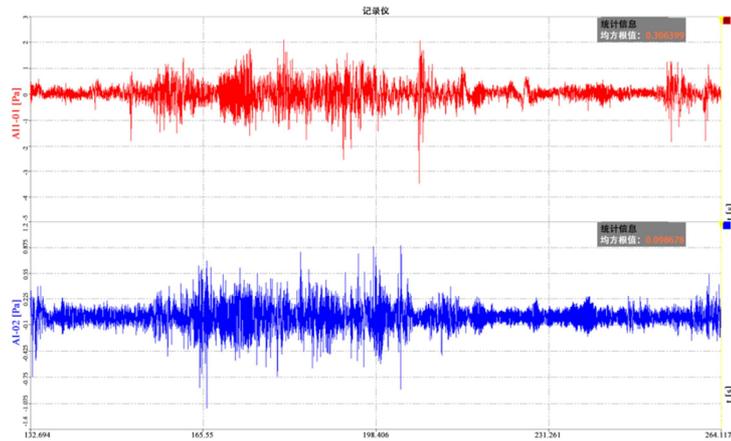


图 4.2 两孔同时 50HZ 抽水声压变化时域图

5 水泵电机频率与泵闸振动的关系分析

泵闸结构振动加速度响应的能量谱密度分析结果显示，泵闸结构的振动能量在频域的分布主要以水泵电机频率的高阶倍频程振动响应为主。

分析数据指出，电机不同频率抽水时的泵闸结构的最大振动加速度量值基本相当，但振动位移量在电机低频抽水比 50Hz 正常抽水频率时振动量要大，这是低频运动产生的动力响应比高频激励相对要大的缘故。

抽水频率 50Hz，闸门左下角部位测点 xyz 三个方向的振动加速度均方根值为 0.982、1.347 及 0.733m/s²，泵闸门顶三向加速度均方根值为 0.08~0.278m/s²；各测点振动响应的能谱密度以 2、3、6 倍频程的形式（100、150 Hz 及 300Hz 等）表现出来。单泵抽水时振动量略小。

泵闸装置在水泵抽水运行过程中的振动能量在频域的分布特征与水泵的运行特性密切相关，也与泵闸一体化装置的动力特性有关。鉴于水泵旋转机械的倍频程频率普遍较高，其振动响应一般以高频振动形式为主，因此结构运行是安全的。

6 泵闸结构的动力特性与共振问题分析

泵闸一体化装置结构动力特性分析结果指出，在有水闭门状态下闸门结构一阶变形振动形态反映泵闸结构下部横向振动变形，相应频率 48.06Hz；二阶变形振动频率为 73.22Hz，其振型为闸门上部和下部泵结构范围弯曲变形振动；三阶振型表现为闸门上部结构范围弯曲变形振动，相应频率为 109.27Hz（见图 6.1）；在有水启门状态下闸门结构一阶振动基频 35.67Hz，反映泵闸结构下部横向振动变形；二阶变形振动 48.0Hz，振型为闸门下部泵结构范围弯曲变形振动，其它频率的结构振型反映泵闸结构的高阶变形振动（见图 6.2）。

上述泵闸结构动力特性分析结果显示，闸门结构的最小振动基频为 35.67Hz，而水泵抽水过程中的脉动压力主能量基本集中在 15Hz 以内的低频区，因此从整体上说，结构固有频

率相对较高，水流脉动压力一般不会引发结构共振问题。

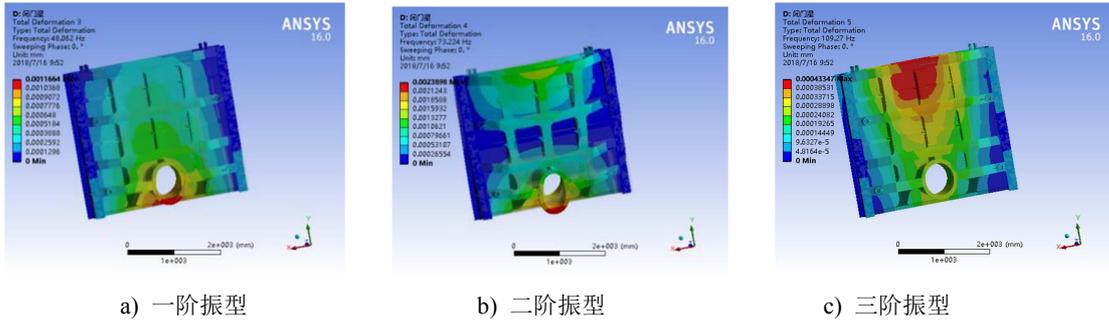


图 6.1 闭门有水状态下闸门变形振动振型

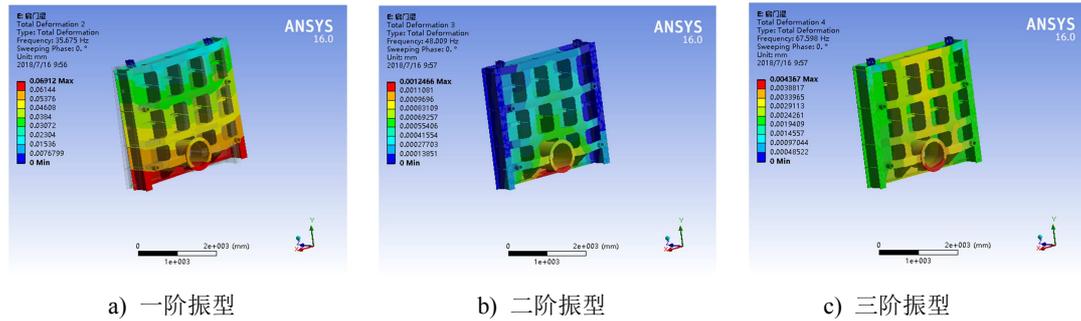


图 6.2 启门有水状态下闸门结构变形振动振型

7 结语

通过对泵闸装置抽水工况水流脉动压力、结构振动加速度、振动位移及振动应力，以及泵闸建筑物振动响应参数与闸门结构动力特性数据的综合分析，可以得到如下几点结论：

(1) 在水位差 0~1.14m 范围内，水泵抽水时的水流脉动压力能量主要分布 0~15Hz，主能量集中在 5~10Hz 范围内，属于低频大尺度旋涡运动；而泵闸结构的低阶频率在 35Hz 以上，水流脉动压力不会产生泵闸结构的共振危害。

(2) 泵闸结构的水泵抽水电机频率对闸门振动量产生影响，振动加速度最大值在不同电机频率时基本相当，但振动位移在小于 40Hz 进行低频抽水时结构振动比 50Hz 正常抽水频率时的振动量要大些，这是低频运动产生的动力响应比高频激励相对要大的缘故，因此在日常抽水运行时采用 50Hz 电机频率是最优的。

(3) 泵闸装置在水泵抽水运行过程中的振动能量在频域分布特征与水泵的运行特性密切相关，也与泵闸一体化装置的动力特性有关。鉴于水泵旋转机械的倍频程频率普遍较高，因此其振动响应一般以高频振动形式为主，对结构的振动安全危害性较小。

(4) 根据噪声数据的对比分析，电机频率越高，声压和声强值越大，但泵闸各抽水运行工况所产生的噪声总体不大，在闸前出现吸气漏斗形成啸叫声时附加声强在 10dB 以下，水泵正常抽水时附加声强控制在 5dB 以内。因此泵闸正常运行时基本不会对周围居民区产生噪音干扰影响。

(5) 泵闸装置抽水时，土建结构的振动最大值不大，处于微米级别，最大振动量出现在闸室地面（紧靠泵闸结构）处，进口墩头顶部、闸后地面的振动量明显减小。总体上看，泵闸的运行对闸墩土建结构的影响不大。

(6) 泵闸结构的最大振动应力均方根值小于 1.8MPa，因此水泵抽水时闸门结构的动强度和动刚度均能满足泵闸结构安全运行要求。

(7) 水泵抽水状态下水流流态观测显示，正常抽水时泵闸内外侧水流流态平稳；一旦内河水位低于水泵临界淹没水深时，门前会形成吸气漏斗旋涡，并诱发噪声。因此水泵运行

时需满足淹没水深要求。

(8) 在泵闸结构增设阻尼减震垫，有助于控制和减小结构振动量，具有良好效果。

(9) 通过本次飞力一体化泵闸装置实际现场运行原型观测研究证明，该泵闸装置结构运行平稳、振动量较小，处于振动可控范畴。根据该类泵闸的水力结构构造特征，比较适合于在中小河流，特别是城市水环境、水生态方面的治理应用。

参考文献

[1] 水电工程钢闸门设计规范 NB 36055-2015，中国电力出版社，2016 年

[2] 严根华, 水工弧形闸门三维水弹耦合共振频率的数值计算. 水利水运科学研究. 1993, 1

[3] 严根华, 水工泄水结构动态优化方法及其在弧形闸门中的应用, 《水利水运科学研究》1993 年第 2 期

[4] Yan Genhua, Experiments and Researches on Flow-induced Vibration of Large Radial Working Gate in Sand Sluicing Chamber, 16th Asia and Pacific Division Congress of the International Association of Hydraulic Engineering and Research/3rd IAHR International Symposium on Hydraulic Structures - Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering, October, 2008

[5] 严根华等, 水工泄水结构振动的模态分析与有限元综合法, 振动测试与诊断, 1994, 14(1): 1-7.

联系方式:

联系电话: 025-85828232 (办), 13952095958

传真: 025-85828222

电子邮箱: ghyan@nhri.cn, 1835858463@qq.com

桂林市漓江壅水科学试验活动坝设计简介

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司 左长新 蒋立新

摘要：本文简要介绍了桂林市漓江壅水活动试验坝项目的概况、活动坝（主坝）坝型选择，并详细说明了所选择的液压升降坝及其附属设备的设计情况，对设计过程中相关问题进行了探讨，为同类工程和坝型的设计提供参考。

关键词：液压升降坝 闸板 液压启闭机 锁定装置 压力继电器 时间继电器

1 工程概况

桂林市“两江四湖”环城水系漓江壅水活动试验坝项目位于广西壮族自治区桂林市漓江净瓶山大桥附近。坝址距桂林市中心 5km 左右，距下游净瓶山大桥约 500m。

该漓江壅水活动试验坝项目是桂林市“两江四湖”环城水系总体规划中三期目标漓江水位控制性项目，项目的建成可抬高桂林市枯水期漓江河段水位，增强枯水期沿江各旅游景点的观赏性，同时工程的建设可扩大市区水域面积，增强水系间连通，改善景点间旅游通航条件，并为后期丰富市区水上旅游打下良好基础。

本工程由船闸、活动坝、泄水闸等 3 部分组成。船闸布置于左岸，泄水闸布置于右岸，中间布置活动坝。

漓江壅水活动试验坝设计正常水位 145.600m。

漓江壅水活动试验坝船闸为 VI 级航道，其闸室有效尺度为：100m×8m×1.60m(长×宽×槛上水深)，上游校核洪水位 148.190m，上游最高通航水位 146.500m，上游最低通航水位 142.200m，下游最高通航水位 146.400m，下游最低通航水位 140.850m。

右岸两孔泄水闸，用于配合活动坝调节下泄流量，根据需要增减活动坝坝顶溢流水层厚度或停止坝顶溢流。泄水闸孔口宽度 12m，底槛高程 140.500m。

活动坝布置于河床中部船闸与泄水闸之间，中间不设隔墩，底板顶部（以下简称坝基）高程 141.500m，挡水面由 38 块闸板组成，单块宽度 6.025m，设计挡水位置坝顶高程 145.500m，考虑坝顶 0.10m 水层溢流，正常壅水位 145.600m，坝线长 228.95m。

根据上游来水流量变化，设计考虑活动坝分 145.600m、145.100m 及 144.600m 三级水位控制，汛期活动坝全降，恢复天然河道。后方案审查时，环保部门提出，为保护漓江水产资源，无论上游来水量多少，每年的 4 月 1 日开始

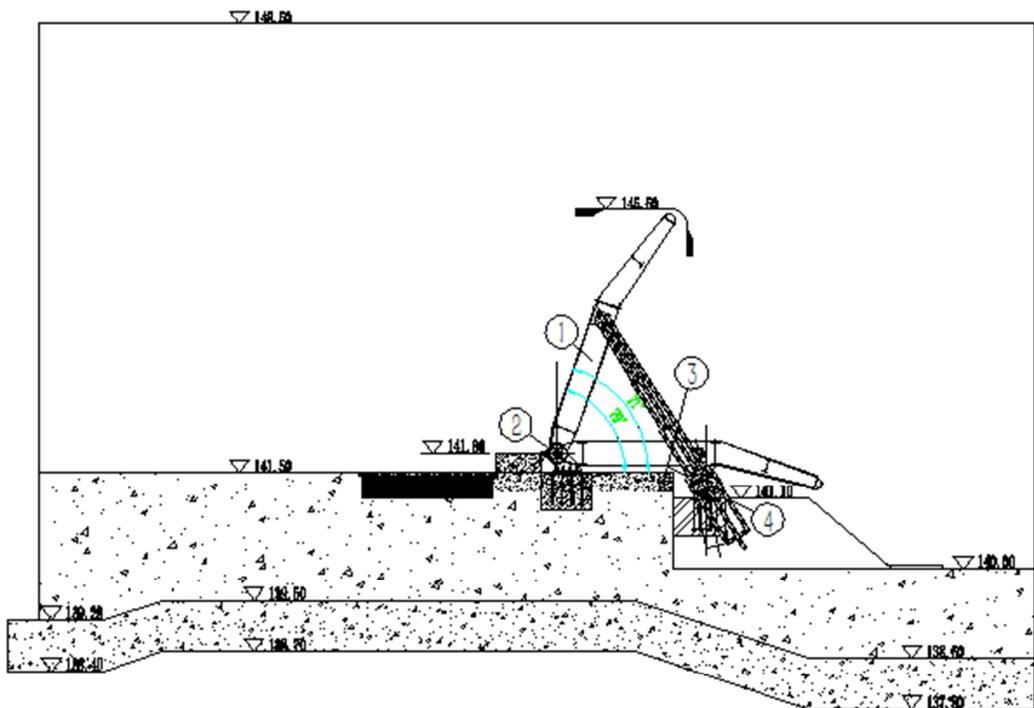
至汛期结束，必须完全降坝。

对于活动坝，早期考虑采用橡皮坝，考虑到橡胶抗老化及抗尖锐物破坏的能力有限，没有采用。后又比较了源自美国的气盾坝，即操作液压坝的油缸改为橡胶气袋，以避免液压系统泄漏破坏环境的风险。此种坝型为避免坝体振动，每块闸板有两根预设长度的拉紧带，配合气袋适当的充气气压，提高坝体抗振刚度。此种坝型多用于全升全降控制的活动坝，对于需要多级锁定的活动坝，不适用。经多方面权衡，活动坝坝型最终选用了液压升降坝。

2 液压升降坝典型剖面

如图 1，是液压升降坝的典型剖面，其中每块挡水闸板通过两个底铰与坝基相连，闸板与坝基之间及闸板之间设有水封装置，每块闸板由两只多级液压油缸操作，每块闸板设一套液压操作的锁定装置，对应三个控制水位，设三个锁定位置，故液压坝从全升到全降，有四个典型状态，即全升、一级降坝、二级降坝及全降四个状态，配合右岸泄水闸，对应控制坝前 145.600m、145.100m、144.600m 三个特征水位，全降时恢复天然河道，汛期宣泄洪水。

液压坝典型剖面



1. 闸板 2. 底铰 3. 油缸 4. 油缸支铰

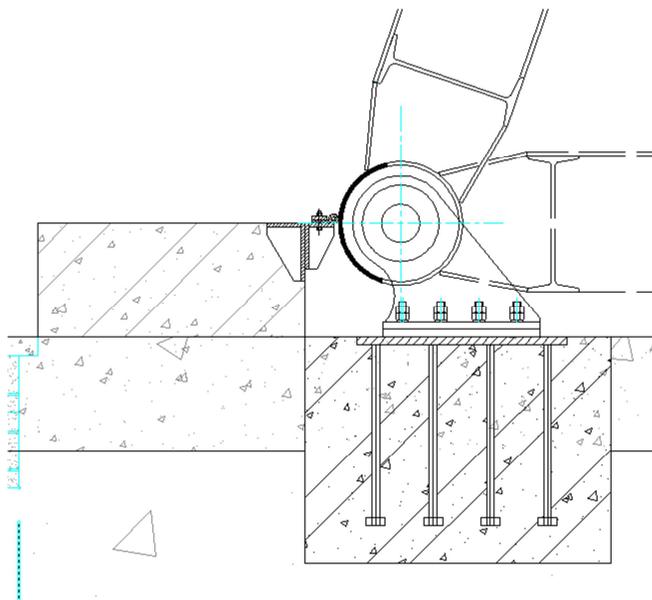
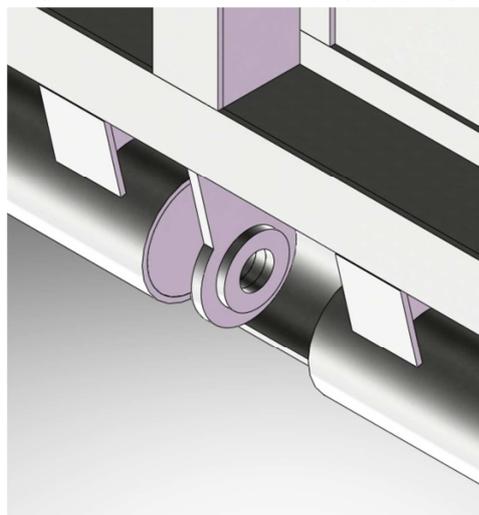
图一

3 闸板设计

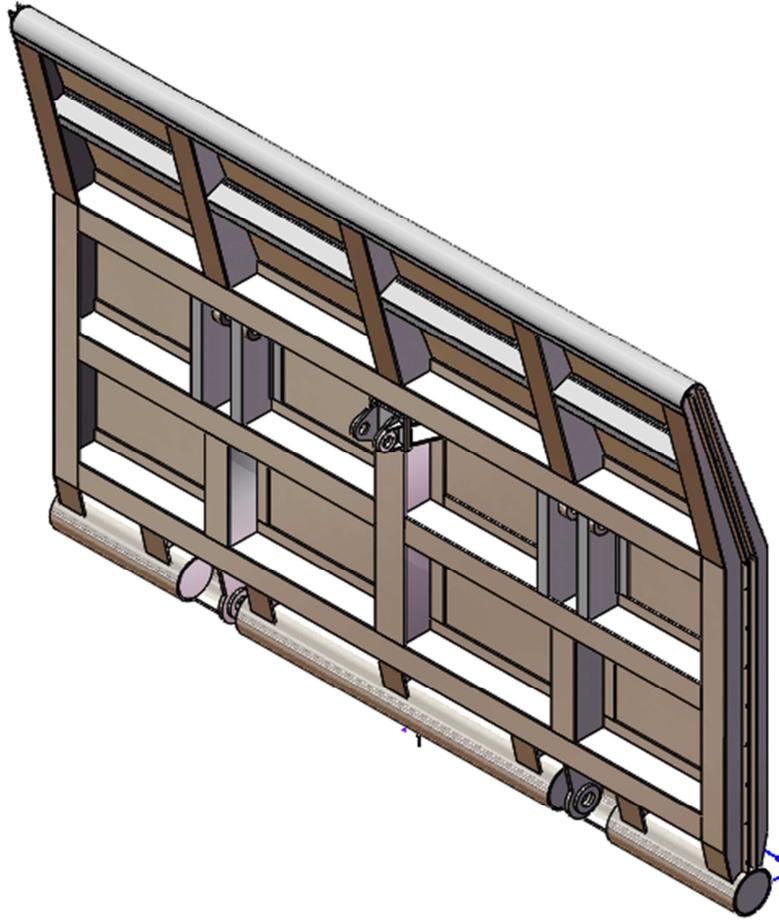
闸板可以选择钢结构或钢筋混凝土结构。钢结构闸板，有后期防腐维护要求，但相对美观；钢筋混凝土结构闸板，基本无后期防腐维护要求，通过有效措施，美观也不是大问题，但目前钢筋混凝土结构的闸板尚无相关国家标准。本工程业主最终选择了钢结构闸板。

闸板采用主横梁结构，靠近上主梁的三个纵隔板位置分别布置两个油缸吊耳和一个锁定装置吊耳，底部结构，为了便于止水装置布置，采用适当直径的钢管与闸板焊接，底铰处切去局部，避免与底铰干涉，详见图二、图三。为避免闸板起升过程中，底水封卷入撕裂，根据枯水期坝前水位高，下游水位低的特点，底水封压缩量取 $0\sim 2\text{mm}$ ，保证枯水期下游侧底槛出露时无射水即可。

图二



图三



图四

闸板结构如图四。从图一可见，如采用平面型闸板，液压坝全升时，坝顶溢流将直接砸在启闭机油缸活塞杆工作面上，对油缸安全及寿命不利，故考虑采用曲面或折线闸板，为简化制造，最终采用了折线闸板。

4 锁定装置设计

锁定配置如图五，锁定杆上部通过吊耳及铰轴与闸板相连，下部三个卡口与埋设于坝基的锁定横轴配合，中部由解锁油缸的顶升与回缩控制锁定杆进入或脱离锁定位置。

锁定过程：

a 闸板起升锁定

以闸板从下一级锁定位置调整到上一级锁定位置为例，闸板起升 1° ，使锁定杆松劲，解锁油缸顶起锁定杆至脱离锁定位置，操作闸板上升至超过上一级锁

定位置 1° 暂停，解锁油缸回缩至锁定位置，操作闸板落座锁定。解锁油缸只设全伸全缩两个控制位置，由压力继电器控制。闸板超过锁定位置 1°，由液压启闭机在调试中整定，通过时间继电器控制。

b 闸板下降锁定

闸板处于上级锁定状态。首先使闸板起升 1°，使锁定杆卡口脱离锁定座，然后解锁油缸全伸顶起锁定杆，启闭机打开回油阀，闸板在水推力及自重作用下，克服液压系统回油阻力下降，锁定杆杆身沿解锁油缸活塞杆球面柱头下滑；闸板下降至离下级锁定位置 1°，停止下行，解锁油缸全缩，操作闸板继续下降，落座锁定。

5 液压坝时间继电器整定

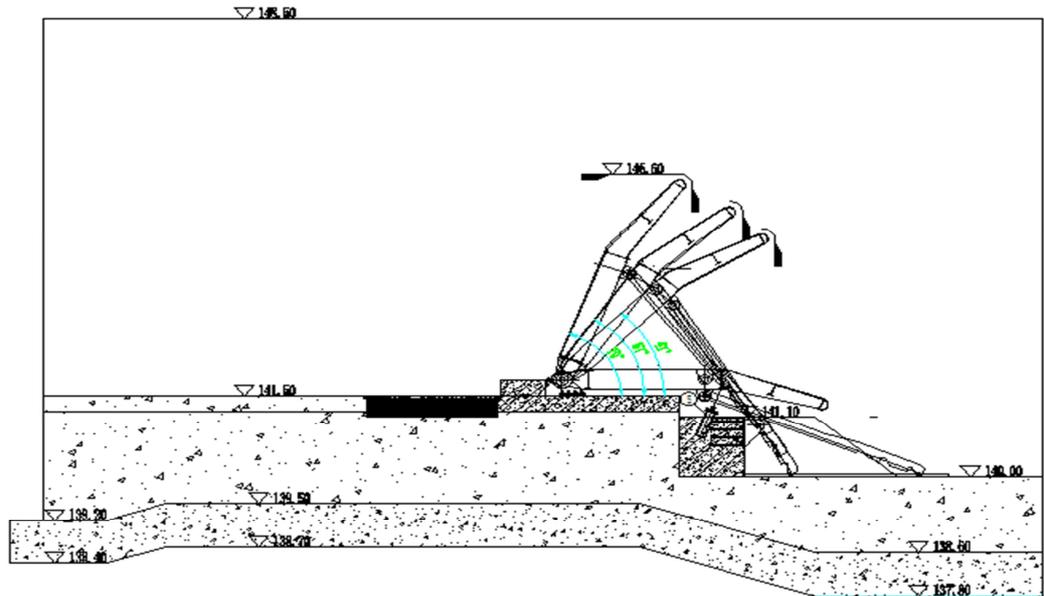
由于长时间水下工作，液压坝的液压启闭机行程控制，多不选择电控。故闸板超过锁定位置 1°，多由时间继电器控制。由于各闸板的启闭机油缸距离泵站距离不同，油阻各不相同，各闸板起升 1° 的时间长度是不同的，随季节不同的温度变化，也会导致相关时间长度变化，应在实践中及时总结经验，找出规律，使时间继电器的整定时长符合实际需要。尤其最上一级锁定，时长整定过大，将导致闸板底部止水钢管与底铰干涉过载，还应投入压力继电器进行保护性控制。

6 关于锁定杆

由于空间限制，每块闸板仅设一个锁定装置。锁定杆除考虑压杆稳定以外，还应有足够的动载刚度。闸板起升，多是分块操作，起升过程中，闸板下游侧不可避免存在横向水流。为了防止横向水流作用使锁定杆脱离正确位置，故锁定座横轴耳板应适当加高。为了提高闸板抗扭刚度，避免锁定单杆偏载弯曲，闸板锁定后，应切断启闭机油缸与油箱的油路，使启闭机两个油缸起辅助支撑作用。由于绝大多数管路浸在水下，温度升高对密闭管路油压升高的作用有限。

锁定配置情况如图五。

三级锁定状态



图五

7 液压启闭机设计

操作闸板升降的启闭机，其控制容量应考虑最后起升那块闸板的龙口效应。所谓龙口效应，是指围堰截流合拢口处，流急浪高的特殊效应，通常考虑采用容量储备系数 2。即启闭机容量取静态水荷载下所需计算容量的 2 倍。考虑到长期指定某块或某几块为最后起升的闸板，对消力池寿命不利，故通常所有闸板及其启闭机取统一规格。

对于长坝（坝轴线长度超过 50m），尤其对于桂林市漓江壅水科学试验活动坝而言，由于工程布置限制，液压坝泵站只能单侧布置于右岸，其液压管路远长于常规液压启闭机管路，而由于管路众多，管径往往由于空间限制而偏小，低温季节降坝时的油阻往往较大，可能影响闸板全降时完全落底，必要时可在泵站配置适当容量的抽油机帮助液压系统回油，使闸板顺利落底。曾经考虑过所有闸板共用一根大直径主供油管，配合液控通断阀来控制液压坝。由于众多液控通断阀置于水底，检修条件太差，没有采用。

对于双缸液压启闭机同步问题，由于闸板间侧止水对于闸板间角度偏差容忍度较高，通常多采用三通硬同步，即每块闸板的两只油缸通过三通共用一根主供油管。本工程也采用了硬同步，实践证明，使用良好。

8 关于液压坝通气抗振

桂林市漓江壅水科学试验活动坝，坝线长，加之坝顶有 0.1m 厚度水层溢流（产生人造瀑布景观），使得闸板，溢流水幕，端墙及消力池水面形成动态密闭空间，有可能导致液压坝发生共振导致事故。所以，在液压坝端墙的适当位置设置了若干通气孔，尽量避免发生共振。当然，端墙能够布置通气孔的位置有限，如果仍然存在诱发振动倾向时，备了若干梭镖形破水锥，必要时在闸板顶缘加装破水锥，人为破开水幕。

桂林市漓江壅水科学试验活动坝及泄水闸已于 2018 年春投入试运行，除局部尾工有待完善，至今整体运行良好，但个别闸板存在前述不能顺利落底现象，因对行洪影响甚微，仅在全降坝状态而又过流量偏小时，影响坝线整体美观，故尚未进行处理。

液压钢板坝实时在线监测系统探讨

刘鹏鹏¹, 王长江², 梅燕¹, 张伟平¹

(1.成都众柴科技有限公司, 四川成都 610000)

2. 中水淮河规划设计研究有限公司, 安徽合肥 230601)

[通讯作者]刘鹏鹏, wayne1087@sina.com

摘要: 为深入研究液压钢板坝受力和振动的安全性, 本文利用有限元 ANSYS Workbench 对液压钢板坝的静、动力特性进行了研究, 并分析了流固耦合作用对液压钢板坝自振频率的影响。针对仿真计算、试验分析不能完全反映液压坝实际运行状况的局限性, 提出利用实时在线监测系统对液压钢板坝进行各类工况条件下原型观测的建议, 通过对原型观测数据的综合分析, 掌握复杂工况下液压钢板坝坝体的振动、支撑杆在水流冲击下的压杆稳定数据, 为今后液压钢板坝的运行安全提供可靠的数据支持。

关键词: ANSYS Workbench; 液压钢板坝; 实时在线监测系统; 流固耦合; 自振频率

1 引言

随着国家经济的快速增长, 人文生活水平的不断提高, 人们对环境、生态越来越重视。安全, 是水利工程永恒的主体。它既是水利工程建设和管理核心价值的体现, 也是水利工程运行安全文化观的反映。近些年来刚兴起的液压钢板坝解决了传统坝型中的大多数问题, 凭借着诸多优点, 应用得越来越广泛。液压钢板坝是一种新型可调控溢流坝, 用于水利环境与市政工程。由土建基础结构、带固定枢轴的钢结构坝体、驱动装置设备等组成。这类建筑物适合于河道孔口较宽(10m~100m)而上下游水位差比较小的工况(1m~6m)。采用钢坝作为河道、湖泊、水景的蓄水、灌溉、行洪排涝的工程设计, 可以省去工程土建的闸墩, 结构简单, 节省投资, 节能环保。液压钢板坝立坝可以蓄水, 卧坝可以行洪排涝, 还可以利用坝顶过水, 形成人工瀑布的景观效果。液压钢板坝这种新型的坝体建筑物正得到广泛应用^[1]。

液压钢板坝在运行过程中, 坝前、后水位不断变化, 随着水位的变化, 坝体结构的荷载也不断变化。坝体受泄水量和风浪的影响, 坝体会产生摆动, 出现“拍打”现象;

在坝顶溢流形成景观时，水舌将坝体下游侧全部覆盖，在补气不足的工况下门体产生振动，门体结构振动的严重后果，会导致钢坝结构、坝坎结构的变形、失稳、破损直至毁坏。

本文利用 ANSYS 分析液压钢板坝静、动力特性，探讨实施实时在线监测系统的必要性，以期在实际工程中实时监测液压钢板坝的运行状态，保证水利枢纽工程的安全运行，为民生安全保驾护航。

2 液压钢板坝静动力分析

2.1 受力特性

液压钢板坝正常运行时，水压力直接作用在面板上，面板由顶梁、底梁、竖直纵梁和横梁共同支撑，数值纵梁把力传给液压杆上。当液压钢板坝正常挡水时，水压力由支撑杆承受，液压启闭机处于泄压状态。坝体及液压支撑杆均以转铰的形式与底座相连，并通过基座固定在基础上，每扇液压活动坝上有两个液压缸和两个支撑杆，每个支撑杆承受坝面 1/2 宽度的水荷载及坝体自重。液压钢板坝计算简图如下图 2.1 所示：

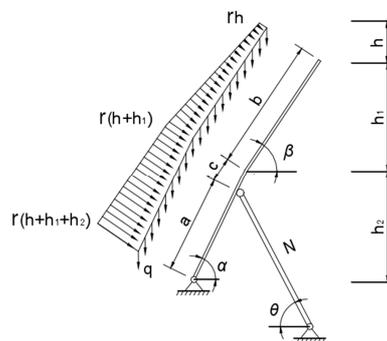


图 2.1 液压钢板坝计算简图

2.2 有限元模型建立

为研究液压钢板坝的受力和振动频率，引入水体与门叶结构耦合计算，结合某工程，利用 BIM 仿真软件 Inventor 建立模型。河道宽度 40m，由 8 扇液压钢板坝拼接而成，每扇坝中间通过水封止水，单扇坝体可单独启闭。单扇坝体宽 5m，挡水高度 3.5m，上游面板外缘半径 4m。水流溢流高度 0.5m，水体长度按 3 倍挡水高度取值，即水体沿河流方向长度为 10m，如下图所示。

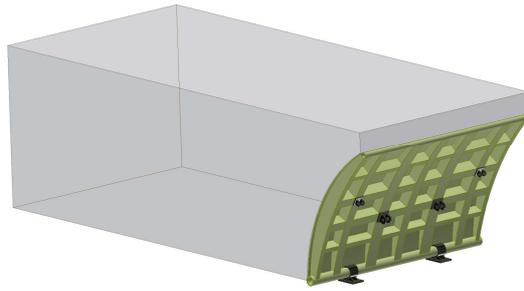


图 2.2 液压钢板坝与水体模型

建立模型时，设定坐标系定义为 X 轴正向为水流方向，Y 轴正向为液压钢板坝面板高度方向，Z 轴沿面板宽度方向，顺水流方向看由侧为正向。为了更好的展示坝体内部构件的受力，将门叶结构中的下游面板简化掉。流体上游面设置为 inlet 界面，水流流速 1m/s，溢流面设置为 outlet 界面，出口压力设置为 0MPa^[2]，与门叶结构上游面板共用节点；底部支座轴承与底轴之间采用 Frictionless 接触，底部转铰底面全约束，支撑杆上支铰轴孔施加位移约束。

2.3 有限元结果分析

2.3.1 静力学分析

由 Fluent 计算求得流动水体对门叶结构的动水压力，并将计算结果作为边界条件导入静力学计算中^[3]，得到动水溢流、静止挡水条件下液压钢板坝的应力和变形，如图 2.3~2.6 所示。

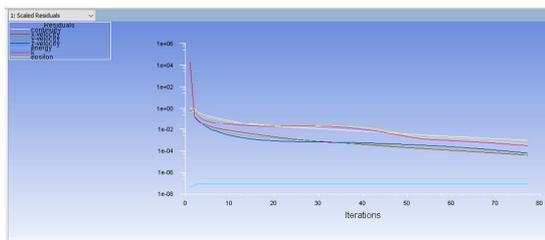


图 2.3 流体收敛曲线

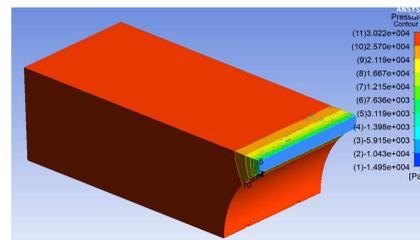


图 2.4 动水压力分布图

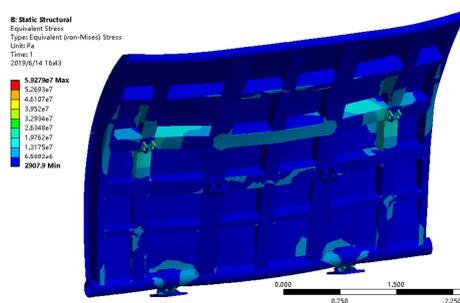


图 2.5 液压钢板坝应力云图

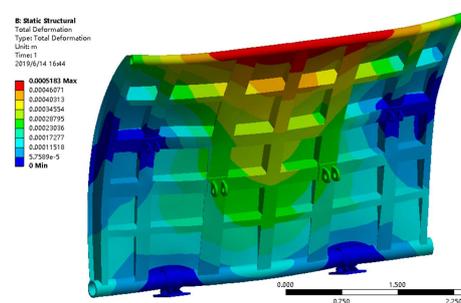


图 2.6 液压钢板坝位移云图

由上图可知，动水压力作用下，液压钢板坝的最大应力为 30.22 kPa，动水溢流和静止挡水载荷叠加后，坝体结构最大应力为 59.3MPa，最大应力点出现在支撑杆上支铰点位

置, 该点属于应力集中点; 坝体最大变形出行在坝体顶部跨中位置, 最大位移为 0.52mm。坝体整体在溢流 0.5m 工况下静力学性能满足规范允许范围。

2.3.2 振动分析

液压钢板坝溢流时的振动现象是影响坝体安全运行的重要因素。本文对坝体与水体耦合的振动频率做分析。利用静力学的模型和边界条件作为输入参数, 对其先进行自振频率分析, 得到前 6 阶的振动频率; 然后将门叶结构模型再与水体耦合后进行耦合振动分析, 如下图所示:

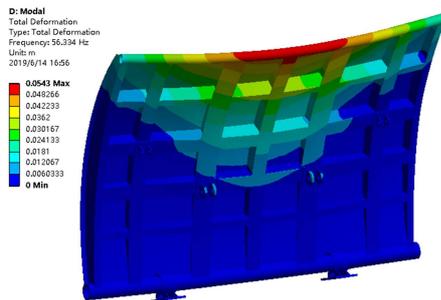


图 2.7(a) 第一阶 (自振频率)

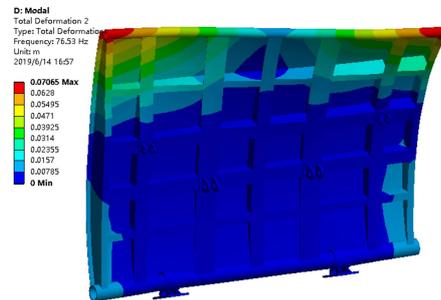


图 2.7(b) 第二阶 (自振频率)

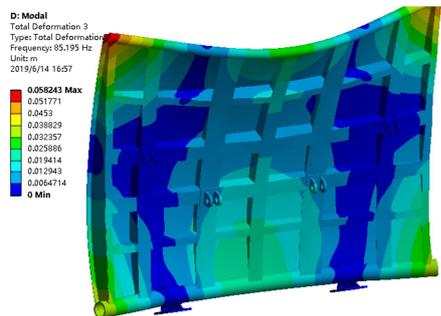


图 2.7(c) 第三阶 (自振频率)

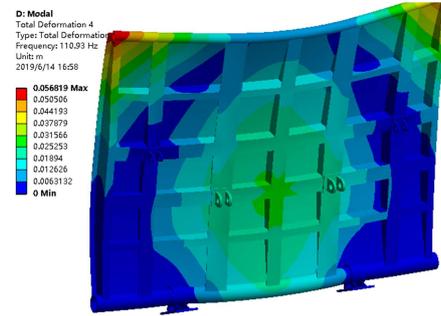


图 2.7(d) 第四阶 (自振频率)

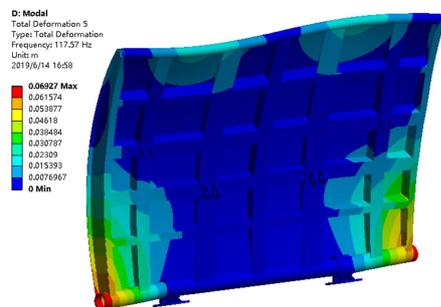


图 2.7(e) 第五阶 (自振频率)

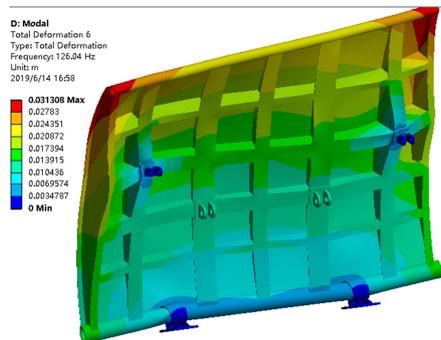


图 2.7(f) 第六阶 (自振频率)

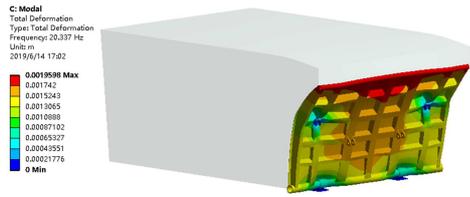


图 2.8(a) 第一阶（耦合频率）

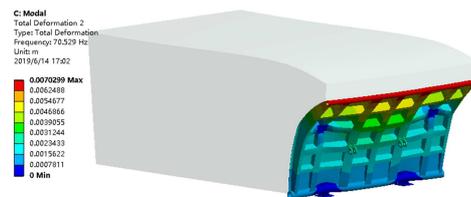


图 2.8(b) 第二阶（耦合频率）

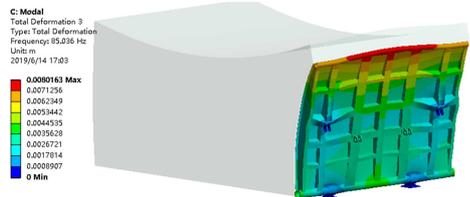


图 2.8(c) 第三阶（耦合频率）

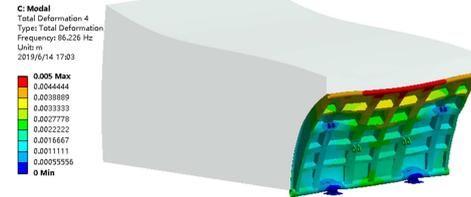


图 2.8(d) 第四阶（耦合频率）

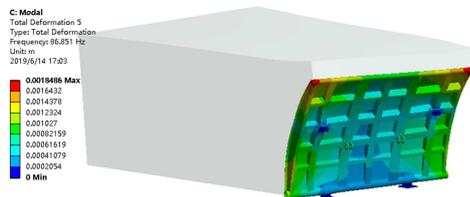


图 2.8(e) 第五阶（耦合频率）

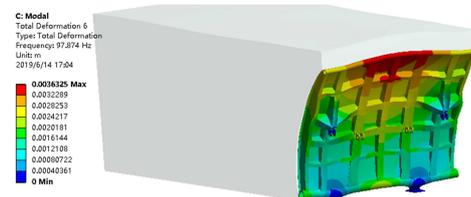


图 2.8(f) 第六阶（耦合频率）

由静力学分析可知，液压钢板坝的自振频率前 6 阶分别为 56.334Hz、76.53 Hz、85.195 Hz、110.93 Hz、117.57 Hz、126.04 Hz；与水体耦合后前 6 阶频率分别为 22.337 Hz、70.529 Hz、85.036 Hz、86.226 Hz、86.851 Hz、97.874 Hz。耦合后频率分布减小 60.35%、7.84%、0.19%、22.27%、26.13%、22.35%。根据闸门的自振特性研究可知，水流脉动频率的分布有如下特点：水流主频在 0~10Hz 的占 48%，在 10~20Hz 的占 44.5%，而水流脉动压力优势区在 4Hz 以内^[4]。由此看出，液压钢板坝的自振频率不在水流脉动压力优势区，但门叶结构与水体耦合后的第一阶振动频率为 22.337Hz，与水流脉动频率较为接近，极有可能发生共振。

有限元仿真分析无法准确的模拟复杂的水流工况，上述分析未能够对支撑杆进行压杆的稳定分析和正常挡水溢流支撑杆的振动分析，同时坝体溢流工况降坝时由于补气不足，造成门叶结构流激振动现象也无法利用 ANSYS 进行仿真计算，因此需要利用更先进、更完善的技术手段，掌握坝体在各类工况条件下结构的稳定性、安全性，尤其是液压坝溢流工况下的振动特性，分析不同过流条件、不同挡水高度工况下的流激振动，将复杂的水流特性直观化。这就是实施、利用液压坝闸门实时在线监测系统的目的。

3 实时在线监测系统

液压钢板坝实时在线监控（real-time online monitoring system—ROMS）实时自动监测、监控，实时采集液压钢板坝运行数据、通过信息传输与处理，实现对液压钢板坝构件的工作应力、动态特性和枢轴运行状态的实时在线监测，确保液压钢板坝运行安全和充分发挥水资源的合理利用。

3.1 在线监测系统组成

ROMS 由应变传感器、加速度传感器、倾角传感器和倾角开关的传感器测试单元、应变、振动、倾角等数据采集单元、中控机及计算分析软件组成的工作站构成并采用以太网与中控室实时通讯。

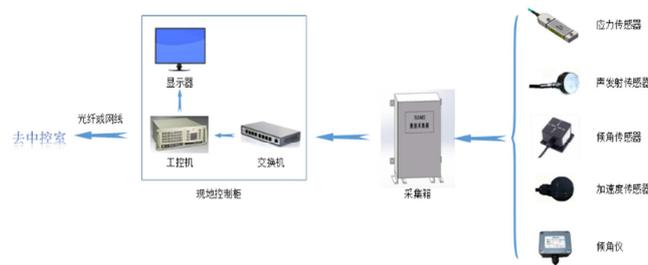


图 3.1 系统原理结构图

3.2 技术参数及性能指标

3.2.1 数据采集及数据处理技术指标

数据采集仪所有通道同步采样，仪器间无需同步，各仪器均独立工作。仪器电源为常规的 AC220V/50Hz，仪器总功率约为 100W，采用 IP65 防护等级，适应 GB T 6587-2012 III 组规定的使用环境。采集箱采用高强度结构，表面喷涂高温烘烤处理，系统工作存储温度 -20℃~60℃，适应在 40℃ 相对湿度 10%~95% 无冷凝环境，可在 1Grms/5~500Hz/ 工作状态下连续稳定工作。

3.2.2 应变监测

液压钢板坝门叶结构应变测量通道为 16~32，采用 DIF-DC、GND 输入方式，量程 $\pm 40\text{mV}$ ，（量程与 DH1205K 传感器输出一致）。示值误差不大于 0.5%F.S，零漂不大于 $2\mu\text{V}/4\text{h}$ ，10℃~90℃ 内自补偿温度，最大输出电流 20mA/通道，采样总速率为 8kHz，模数转换器 24 位 A/D 转换器。

3.2.3 振动监测

液压钢板坝门叶结构振动通道 16~32, 适用 IEPE 传感器, 加速度测量范围 $\pm 5g$, 示值误差不大于 0.5%F.S。IEPE 电源采用 4mA/24V, 频响范围 0.5Hz~2kHz(+0.5dB~-3dB), 采样速率 1kHz, 模数转换器 24 位 A/D 转换器。

3.2.4 枢轴状态监测

液压钢板坝门叶枢轴及轴座监测通道 16~32, 适用传感器 AVS 系列声振传感器, 示值误差不大于 0.5%F.S, IEPE 电源采用 4mA/24V, 频响范围 0.5Hz~2kHz, 采样速率 1kHz, 模数转换器 24 位 A/D 转换器。

3.2.5 表面应变传感器技术指标

采用 DH1205K 表面应变计, 可适用于水下工况, 传感器标距 78mm, 灵敏度为 500 $\mu\epsilon$ /mV/V, 量程 $\pm 1000\mu\epsilon$, 额定电阻 120 Ω , 非线性误差不大于 $\pm 2\%$ F.S。防护等级 IP68, 耐水压 3MPa, 使用温度-20 $^{\circ}\text{C}$ ~100 $^{\circ}\text{C}$ 。

3.2.6 振动传感器技术指标

采用 1C302A 单向加速度传感器, 属于防水型加速度传感器, 灵敏度 $\sim 175\text{mV/g}$, 最大测量加速度 5g, 频率范围 0~500Hz, 谐振频率大于 5.5kHz。防护等级 IP68, 耐水压不低于 490KPa, 使用温度-20 $^{\circ}\text{C}$ ~90 $^{\circ}\text{C}$, 安全过载不低于 1000%。

3.2.7 声振传感器

采用 AVS 系列声振传感器, 谐振频率 120kHz, 10db 带宽 20~400, 灵敏度 $>80\text{db}$, 不锈钢壳体防护等级 IP68, 耐水压不低于 490kPa, 使用温度-20 $^{\circ}\text{C}$ ~90 $^{\circ}\text{C}$ 。

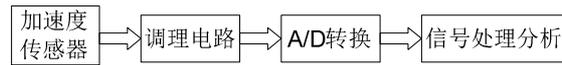
3.3 测点布置

3.3.1 应变计布置

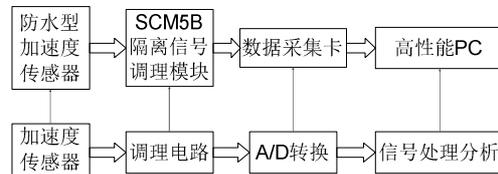
表面应变传感器数量根据钢坝的坝体节数确定, 具体测点位置: 钢板坝每扇坝体的中心线上, 靠近底部枢轴侧, 测量钢坝闸体结构的工作应力。应变传感器通过双绞屏蔽电缆与采集系统连接, 应变传感器通过螺栓连接方式与固定底座连接, 固定底座焊接在钢坝测点部位。应变传感器信号线通过钢管及金属软管全封闭安装以防沙防水。

3.3.2 加速度传感器布置

加速度传感器安装数量根据钢坝的坝体分节数确定, 具体测点布置在钢板坝每扇坝体中心线上, (1) 靠近底部枢轴侧, 测量水流方向的振动和加速度; (2) 靠近顶部, 测量溢流时门叶结构的流激振动; (3) 支撑杆底部, 测量溢流时支撑杆的振动情况。D 转换电路和信号处理分析, 流程示意图如下。



动态响应在线监测实施方案如下图所示：



3.3.3 声振传感器布置

枢轴及轴承的故障主要有磨损、疲劳、腐蚀、断裂、压痕和胶合等形式，这些故障受到外力或内力作用产生变形、裂纹扩展及产生碰磨时，不仅会机械振动的形式释放应变能，同时也会以弹性波的形式释放应变能，弹性波在弹性介质中的传播现象即为声发射现象。声振信号监测技术是一种动态无损检测方法，声信号来自缺陷本身。缺陷所处的位置和所受应力状态的不同其损伤程度也不同，声信号特征也不同。因此可以利用钢板坝枢轴的声信号对轴承的安全性及运行状态进行长期监测。由于声信号的频谱较宽，用其高频特性，可以有效抑制干扰，提高诊断的准确性。声振传感器是一种新型传感器，采用特殊技术加工而成，灵敏度大大高于传统的加速度传感器及声发射传感器，带宽大、灵敏度高是声振传感器的一大优势。利用声发射信号进行轴承的故障检测，能减少噪声和工况的干扰，特别是能够在低速重载下有效检测枢轴及轴承的故障。

通过在每节钢板坝闸叶的底枢轴座或枢轴上布置声振传感器，可及时监测到枢轴及轴座在运行过程中产生的缺陷信号，可较为准确的检测出枢轴、轴承的金属剥落、裂纹、压痕、腐蚀凹坑和胶合等缺陷，及时为钢板坝运行维护提供信息。

4 结论

本文在某工程液压钢板坝工程的基础上，利用 ANSYS Workbench 分析坝体在正常挡水溢流工况下的静力和振动分析，同时就软件无法求解的工况提出更先进、更完善的实时在线监测技术手段，旨在更加深入的研究和探讨液压钢板坝振动带来的安全问题，为今后同类型的工程提供更具专业性的分析数据。

参考文献

- [1]张磊涛.新型平面液压活动坝静动力特性研究及结构优化设计[D].西安:西安理工大学,2018
- [2]朱红钧.FLUENT 流体分析及仿真实用教程[M].北京:人民邮电出版社,2010:375-387

[3]王旭声.不同开度时弧形闸门流固耦合数值模拟[D].郑州:华北水利水电大学,2018:26-28

[4]章继光,刘恭忍.轻型弧形钢闸门事故分析研究[J].水力发电学报,1992(3):45-57

汾河太原段综合治理工程液压坝优化方案比选

梁 钧

(山西省水利水电勘测设计研究院, 山西 太原 030024)

摘 要: 在满足防洪、蓄水、游船通行、搭建两岸景观建设和 2019 年第二届全国青运会水上比赛项目等方面的前提下, 针对不同液压坝坝型的结构、运行工况、过流能力以及造价等方面进行了比选, 确定钢筋混凝土液压坝为最优方案, 并为其他同类工程提供借鉴。

关键词: 汾河治理; 蓄水; 液压坝; 方案比选

1 引言

汾河为黄河的一级支流, 是山西省境内的第一条大河, 发源于宁武县的管涔山南麓, 由北向南流经宁武县及静乐县, 于娄烦县静游镇流入汾河水库, 出汾河水库经古交峡谷和汾河二库, 由兰村出山口流经太原盆地, 至灵石县又进入灵霍山峡, 向西南流经临汾盆地, 至万荣县汇入黄河。汾河全长约 710km, 流域面积为 39471km²。流经太原市区段汾河长度约 40km。为改善城市环境, 自 1998 年以来, 太原市政府对主城区段的汾河河道分两期进行了综合治理。为妥善解决防洪、蓄水、排沙和美化的矛盾, 在保留汾河治理一、二期工程成功经验, 规避其不足的基础上, 本次工程蓄水池的总体布置仍采用了排沙槽和蓄水槽分开的双槽布置方案。同时, 为达到大水面的景观效果, 采取抬高蓄水位的工程措施, 把排沙槽与蓄水槽之间的中隔堤淹没在水下, 可形成全槽蓄水的效果。

2 工程总体布置

2.1 工程布置原则

根据相关规程、规范, 结合治理段河道特点, 工程布置遵循以下原则: 防洪安全的原则; 充分体现生态水利的原则; 亲水性的原则; 因地制宜、就地取材的原则; 充

分利用现有工程，避免投资浪费的原则；通航游览相结合的原则；满足太原市水上运动场地的原则。

2.2 工程总体布置

本工程是汾河上一期工程的延续，位于太原市南部新区的汾河主河道，全长约12km，呈南北向展布。河道横断面采用复式断面，总宽度为430~450m，由300~348m宽的蓄水池、两侧二级平台及堤防组成。结合南部新区总体布局及2019年青运会水上运动场地要求，在河槽内共设有1号和2号两座壅水闸坝，分别布置在桩号7+400和桩号11+800的主槽内，形成2座蓄水池，蓄水位分别为775.7m、772.0m，池长分别为7.4km和4.4km。两座闸坝均由两跨液压坝和一跨壅水闸组成，其中，壅水闸布置在中间已建的约100m宽主槽范围内。两跨液压坝分别布置于壅水闸东西两侧。

3 液压坝方案优化比选

3.1 液压坝坝型比选缘由

根据相关规范要求，液压缸尽量避免长期淹没在水下，如无法避免时液压缸需厂家特制。坝下游最大水深为3m，冰冻和消冰均会对液压缸产生不利影响。2019年青运会将在1号蓄水池内举行水上运动比赛，闸坝上、下游全年蓄水，对1号坝运行条件要求较高。

3.2 液压坝设计条件

本次液压坝优化方案以1号闸坝东跨液压坝为例，具体要求如下：一是原则上要求液压坝不设或者少设中墩。二是东跨液压坝总长为108m，上游设计水深为6.7m，坝顶溢流水高度为0.5m，下游水深为3m。三是冬季上、下游最大冰层厚度为0.5m，通过设置除冰设施消除冰冻和消冰对门板及液压设备的影响。四是液压设备和门体维护检修时，可结合灌溉期预先放空蓄水池或部分塌坝降低上、下游水位；检修完成后立坝拦水，通过水量置换的方式达到检修的目的，同时也可对蓄水池进行换水以改善

水质。五是液压缸事故检修时，需有临时或永久支撑设施。

3.3 液压坝比选

3.3.1 钢筋混凝土液压坝（方案一）

由钢筋混凝土坝体、液压缸及支撑杆等组成。工作原理主要是底部以铰链轴固定在坝基础上，利用坝体背后液压缸启闭机伸缩，实现升坝拦水，降坝行洪的目的。每跨液压坝均由多扇独立升降的钢筋混凝土闸门组成，各扇门体间不设闸墩，直接由闸板间的止水对接实现挡水，每扇门长 6.0m。

优势：国内钢筋混凝土液压坝应用实例较多，已运行多年，为水利部推广的新技术，且 6m 以上高坝已有实例。支撑杆可有效锁定坝体，避免液压缸因长期受力造成内泄而使闸门塌落，也利于闸门检修。本方案每扇门体均有独立的液压管路控制升降，最大程度避免泄漏故障。不设中墩，水位壅高 8cm，不影响行洪。分体式结构能够有效适应地基不均匀沉降。造价较低，门体及其埋件和控制系统等设备 2.2 万元/m²。

劣势：过水时，闸门宜振动，需设破水掺气装置。液压缸长期水下工作，需采用特制液压缸，对检修不利。

3.3.2 双向可折叠液压坝（方案二）

本方案采用整体式结构，即 108m 长设一扇闸门，不设中墩，每 5m 设一道液压启闭机。门体采用钢闸门，门高 6.7m，整个闸门由上、下游两块门板形成一个三角形结构。下游面板为液压坝可折叠升降部分，由上、下两块铁板组成，中间由绞轴相连，当液压坝面板升到要求高度时，两块铁板咬合在一起，起主要的支撑作用，油缸此时只起到辅助的支撑作用。

优势：液压启闭机封闭于两面的闸门面板和两端岸墙之间，所以油缸不容易受损伤，使用寿命长，且检修方便。由于闸门为三角形结构，在坝顶过水时，上游水流会顺下游闸门面板流下，不会在下游形成真空，也不会引起振动。不设中墩，水位壅高 8cm，不影响行洪。

劣势：闸门为一跨整体式结构，同步起落，运用不灵活，不利于冲沙。造价较高，门体及其埋件和控制系统等设备 3.2 万元/m²。

3.3.3 单向可折叠液压坝（方案三）

本方案采用分体式结构，即由多扇独立升降的门体组成，每扇门长 12m，共 9 扇，不设中墩，每扇门设两道液压启闭机。门体采用钢闸门，门高 6.7m，下游支撑杆由上下两块铁板组成，中间由绞轴相连，当液压坝面板升到要求高度时，两块铁板咬合在一起，起主要支撑作用，油缸此时只起到辅助的支撑作用。

优势：多扇闸门均可独立升降，运行调度灵活方便，便于冲沙。不设中墩，水位壅高 8cm，不影响行洪。设有支撑杆，起主要支撑作用，油缸此时只起到辅助的支撑作用。在塌坝时，液压坝面板倒下时将油缸完全覆盖在下面，对油缸起到很好的保护作用。造价较低，门体及其埋件和控制系统等设备 2.6 万元/m²。

劣势：液压缸长期水下工作，需采用特制液压缸。由于油缸常年处于运行状态，密封圈需要更换维修。且下游无法围堰，从而导致更换困难。过水时，闸门宜振动，需设破水掺气装置。

3.3.4 上翻式液压坝（方案四）

本方案采用 3 跨旋转钢闸门，液压启闭机驱动，每扇门共两套设备。闸门每跨净宽 34m，中墩两座（宽 3.2m×2m），每跨闸门后面另设两座 1m 厚的支墩，支墩间距为 11.3m。门体采用弧形钢闸门，门高 6.7m，由弧形门体、支撑结构、液压启闭机等主要部分组成，弧形门体固定在闸门两侧的支撑结构上，支撑结构与支铰相连，支铰固定在闸墩内。液压启闭机驱动支撑结构，带动弧形门体旋转，实现闸门开启和关闭。

优势：旋转闸门门体的迎水面采用弧形结构，且每扇门后设 2 座支墩，闸门形成连续梁结构，受力较好。旋转闸门可向上开启一定角度，使闸门底部淤积泥沙顺着水流从门底排向下游，进行底孔冲沙。旋转门可用自身启闭设备将闸门翻起离开水面，在水中用脚手架即可进行闸门二次防腐或更换止水橡皮等维修保养工作，十分方便。液压缸处于水面以上，运用条件好，利于检修。

劣势：每跨长 34m，闸墩较多，水位壅高 13cm，影响河道的行洪能力及景观美化。闸墩多，土建成本高。造价较高，门体及其埋件和控制系统等设备 3.0 万元/m²。

综上所述，方案一结构稳定，能有效适应地基不均匀沉降，行洪能力强，便于检修，造价较低且工程实例较多，为最优方案。

4 结论

结合工程治理方案及河道特点，通过对不同液压坝坝型方案进行综合比选，确定钢筋混凝土液压坝为最优方案。在汾河蓄水工程建成后，充分发挥其建设成本低、使用年限长、塌坝迅速，利于冲沙、过流能力强、景观效果显著等特点，旨在为今后生态水利工程建设提供借鉴依据。

汾河中游核心区液压坝坝基地质问题及处理措施

杨石眉

(山西省水利水电勘测设计研究院, 山西 太原 030024)

摘要: 汾河中游核心区干流 1~5 号液压坝坝基地层结构相似, 其中汾河流域生态修复中游核心区干流上拟建 15 座液压坝中坝地质条件最差, 存在工程地质问题最多, 地基处理最具代表性的有 5 座液压坝。对 1~5 号液压坝坝基工程地质条件进行了描述, 查明了 1~5 号液压坝坝基存在的主要工程地质问题, 最后采用网格状水泥搅拌连续防渗墙对地基进行了处理, 从而保证了 1~5 号液压坝按期开工和安全运营。

关键词: 液压坝; 地震液化; 渗漏量; 防渗墙; 水泥搅拌

1 引言

汾河发源于宁武县东寨镇管涔山脉楼子山脚下, 由水母洞、龙眼泉及象顶石河汇流成河, 流经忻州、太原、晋中、吕梁、临汾、运城市 6 个地市、34 个县(市), 在运城市万荣县庙前村附近汇入黄河, 干流全长 716km, 流域面积 39471km²。多年来, 受自然和人类活动等多种因素影响, 汾河流域生态环境受到严重破坏。2015 年, 山西省委省政府决定启动汾河流域生态修复工程, 旨在恢复汾河河道水域面积, 通过蓄滞洪水, 充分利用雨洪资源, 改善附近生态环境; 增强地下水的补给; 增强河道水质的自然净化和修复能力, 改善水质, 最终使汾河流域的生态重现碧波荡漾、鱼鸟翱翔的大河风光。

汾河流域生态修复中游核心区干流蓄水工程, 拟在汾河中下游清徐县西谷乡(汾河二坝下游约 2.8km 处)至介休市义安镇(汾河三坝下游约 27.0km 处)之间约 80km 的汾河干流上修建 15 座液压坝及蓄水区, 其坝址分别位于太原市的清徐县, 晋中市的祁县、平遥县和介休市境内。其中 1~5 号液压坝位于清徐县西谷乡东木庄村至柳杜乡东南社村沿线汾河干流上, 设计液压坝坝高 4.0~5.0 m, 坝顶高程 755.5~761.0m, 坝长 230~260m, 正常蓄水位 755.5~761.0m, 蓄水区范围全长约 12.5 km。

2 区域地质情况

工程区地处太原—晋中断陷盆地中北部。地貌单元属汾河洪冲积平原区，地形平坦，地势总体沿汾河由上游向下游微倾，地面高程 700~900m。发育地层岩性主要为新生界上第三系及第四系松散堆积物，主要分布于盆地内汾河两岸及河谷，其中河湖堆积物厚度较大。岩性主要为级配不良砂，低液限粉土及低液限黏土等。

本区新生代以来，构造运动主要表现为四周地表大面积不均匀抬升，形成了太原—晋中断陷盆地。目前地壳处于相对稳定期，区域稳定性尚好。工程区地震动峰值加速度值 0.20g，反应谱特征周期值 0.35s，相应地震基本烈度Ⅷ度。

区内地下水类型主要为松散岩类孔隙水。含水层主要为第四系沉积的粉土质砂、级配不良砂、级配不良砾、卵石混合土等粗粒土。一般富水性较好，地下水埋藏较浅。地下水主要接受大气降水补给及边山侧向补给，自汾河上游向下游径流排泄。

3 液压坝坝基工程地质

1~5 号液压坝坝基地层结构相似，所存在的工程地质问题也相近。

3.1 工程地质条件

1~5 号液压坝坝址处，河床宽 230~260m，两侧现为滩地，地形较为平缓，地面高程 750.70~760.35m。两岸为土质防洪堤，堤高 3.5~6.2m。坝基地层主要为第四系全新统洪冲积。上部岩性为级配不良砂及含细粒土砂，淡黄——浅灰色，稍湿——饱和，结构松散，局部夹低液限粉土层透镜体，厚 10.8~16.8m。其含水率 5.3%~18.5%；天然密度 1.39~1.67g/cm³；干密度 1.23~1.48g/cm³；孔隙比 0.811~1.175；饱和固结快剪凝聚力 13.9~17.4kPa，内摩擦角 16.0°~20.5°。渗透系数 1.4~3.5m/d，平均值 2.4m/d，具中等透水性。中间夹低液限粉土层，淡黄、浅灰色，湿—饱和，为可塑状，厚 1.0~7.3 m。其含水率 20.7%~35.9%；天然密度 1.77~2.06g/cm³；干密度 1.30~1.71g/cm³；孔隙比 0.576~1.104；压缩系数 0.09~0.74 MPa⁻¹，多具中等压缩性；饱和固结快剪凝聚力 10.0~23.2kPa，内摩擦角 19.0°~25.5°；渗透系数 1.85×10⁻⁴~5.90

$\times 10^{-4}$ cm/s, 具弱透水性。下部为低液限黏土, 褐黄—褐灰色, 饱和, 可塑—软塑状, 局部夹级配不良砂和低液限粉土透镜体, 该层厚度大于 3.0m。其含水率 23.9%~37.9%; 天然密度 1.83~2.03 g/cm³; 干密度 1.33~1.74 g/cm³; 孔隙比 0.576~0.912; 压缩系数 0.16~0.77 MPa⁻¹, 多具中等压缩性; 饱和固结快剪凝聚力 7.1~22.5 kPa, 内摩擦角 19.0°~25.0°; 渗透系数 $3.45 \times 10^{-6} \sim 2.52 \times 10^{-5}$ cm/s, 具微—弱透水性。

地下水类型为松散岩类孔隙水。含水层主要为第四系全新统洪冲积级配不良砂、含细粒土砂等。地下水主要接受大气降水补给。地下水自汾河上游向下游径流排泄, 地下水位埋深一般为 0~3.2m。

3.2 工程地质评价

1~5 号液压坝坝基上部级配不良砂、含细粒土砂及中间所夹低液限粉土层工程地质条件差, 主要存在地震液化、坝基渗漏及坝基土渗透变形等工程地质问题。下部低液限黏土工程地质特性较好。

3.2.1 坝基土液化问题

1~5 号液压坝坝基级配不良砂、含细粒土砂及其下的低液限粉土夹层的粒径小于 0.005mm 的颗粒含量质量百分率小于 18%, 初判其为可液化土层, 下部低液限黏土层为不液化土层。

坝基土液化复判采用标准贯入锤击数法。由于坝基地下水位埋深与工程正常运用时不同, 因此实测标准贯入锤击数 N' 需按式 (1) 进行校正, 并以校正后的标准贯入锤击数 N 作为复判依据; 液化判别标准贯入锤击数临界值 N_{cr} 采用式 (2) 进行计算。

$$N = N' \frac{d_s + 0.9d_w + 0.7}{d'_s + 0.9d'_w + 0.7} \quad (1)$$

$$N_{cr} = N_o [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{3\% / \rho_c} \quad (2)$$

式中: N' ——实测标准贯入锤击数;

d_s ——工程正常运行时, 标准贯入点在当时地面以下的深度, m, 标准贯入试验点深度与工程正常运用时相同;

d'_s ——标准贯入试验时, 标准贯入点在当时地面以下的深度, m;

d_w ——工程正常运行时，地下水位在当时地面以下的深度，m；

d'_w ——标准贯入试验时，地下水位在当时地面以下的深度，m。

N_{cr} ——液化判别标准贯入锤击数临界值；

N_0 ——液化判别标准贯入锤击数基准值，取 10；

ρ_c ——土的黏粒颗粒含量质量百分率，%，当 $\rho_c < 3\%$ ， ρ_c 取 3%。

当标准贯入锤击数 N 小于临界值 N_{cr} 时应判为液化土，经计算，1~5 号液压坝坝基级配不良砂、含细粒土砂及其下的低液限粉土夹层在地震烈度为 8° 时可产生地震液化，存在地震液化问题，各坝基可液化土层厚度见表 1。

表 1 1~5 号液压坝坝基特征统计表

液压坝	液化土层厚度/m	坝基渗漏量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}$) ⁻¹	临界水力 比降 $J_{临}$	允许水力 比降 $J_{允}$	地层岩性
1 号	16.6~16.8	1694	0.78	0.39	级配不良 砂、含细粒 土砂及低 液限粉土
2 号	14.6~15.7	1217	0.80	0.40	
3 号	12.5~17.3	1535	0.84	0.42	
4 号	12.8~14.7	757	0.92	0.46	
5 号	11.8~12.1	917	0.88	0.44	

3.2.2 坝基土渗漏问题

1~5 号液压坝坝基上级配不良砂及含细粒土砂的渗透系数为 1.4~3.5 m/d，具中等透水性，为透水层；其下低液限粉土层的渗透系数为 $(1.85 \sim 5.90) \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ，具弱透水性，为弱透水层；下部低液限黏土的渗透系数为 $3.45 \times 10^{-6} \sim 2.52 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ，具微——弱透水性，为相对隔水层。当 1~5 号液压坝正常蓄水后，坝基级配不良砂、含细粒土砂及低液限粉土层存在渗漏问题。为此，采用式 (3) 对 1~5 号液压坝坝基级配不良砂、含细粒土砂及低液限粉土层的渗漏量进行估算。

$$Q = BkM \frac{H}{2b + M} \quad (3)$$

式中： Q ——堤基渗漏量， m^3/d ；

B ——计算段宽度，m；

k ——堤基土渗透系数，m/d；

H ——正常蓄水位时防洪堤内外（闸坝上下游）水位差，m；

M ——堤基透水层厚度，m；

$2b$ ——平均堤基宽度，m。

经计算，1~5号液压坝正常蓄水后，坝基土渗漏量为757~1694m³/d。

3.2.3 坝基土渗透稳定性

1~5号液压坝坝基持力层为级配不良砂、含细粒土砂层，其结构松散，且在坝基及上下游连续分布，各液压坝正常蓄水后，在液压坝上下游水位差产生的渗压作用下，坝基持力层级配不良砂、含细粒土砂可产生渗透变形。据1~5号液压坝坝基级配不良砂、含细粒土砂的物质组成、粉黏粒含量和结构等，经判别，坝基级配不良砂、含细粒土砂的渗透变形类型为流土。流土型临界水力比降采用式(4)进行计算。

$$J_{cr} = (G_s - 1)(1 - n) \quad (4)$$

式中： J_{cr} ——土的临界水力比降；

G_s ——土粒比重；

n ——土的孔隙率（以小数计）。

考虑到各液压坝的重要性，安全系数取2，求得各坝基土的允许水力比降为0.39~0.46。

4 结论及建议

1~5号液压坝坝基地层持力层为级配不良砂及含细粒土砂，厚10.8~16.8m；中间夹低液限粉土层，厚1.0~7.3m；其下为低液限黏土，厚度大于3m。坝基级配不良砂、含细粒土砂及低液限粉土层主要存在地震液化、坝基渗漏及渗透变形等工程地质问题。由于液压坝坝型对坝基不均匀变形要求非常严格，为彻底消除坝基地震液化、坝基渗漏及渗透变形等问题，地基处理时主要考虑对地基土进行围封以消除地基土液化问题；同时在坝基筑防渗墙，减小坝基渗漏量的同时，可增大坝基地下水的渗流途径，降低坝基地下水的水力比降，从而消除坝基土渗透变形隐患。为此，施工时1~5号液压坝坝基创造性地采用网格状水泥搅拌连续防渗墙，施工工艺及要求主要参考水泥搅拌桩制作工艺。网格状水泥搅拌连续防渗墙具体要求如下：防渗墙有效墙径0.3m；防渗墙垂直河流方向共设两道，间距8~10m；防渗墙平行河流方向设40~50条，间

距 4~6 m；防渗墙墙底应伸入坝基下部低液限黏土层 0.5~1.0 m；待网格状水泥搅拌连续防渗墙验收合格后，在网格内换 0.5 m 厚碎石层；最后在网格状水泥搅拌连续防渗墙及碎石层之上回填 0.2~0.3 m 厚的沥青水泥砂浆，以确保坝基的连续性和均匀性。

城市景观坝设计选型及安装要点分析

—以镇康县景观坝为例

李斌, 陈琪, 余俊阳

(中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南, 昆明 650051)

(E-mail: 1056272914@qq.com)

摘要: 坝式闸门作为低水头挡水建筑物, 具有结构可靠、抗洪水冲击能力强、耐久性好、操作方便和人工景观效果好等特点, 在景观坝领域内具有很好的应用前景。本文结合镇康县景观坝的设计选型和安装, 对各种景观坝的特点进行了对比, 对坝式闸门的安装做了较为详细的论述, 为城市河道治理和景观提升工程的拦河建筑物结构选型及安装提供了参考。

关键词: 城市河道治理; 景观提升; 景观坝选型; 坝式闸门安装; 南伞河

0 工程概况

镇康县南伞河河道治理项目主要对南伞河城区段进行河道治理、截排污、景观提升。工程位于镇康县城驻地及周边, 城市公路可直接到达, 交通条件较好。在南伞河城市中心处布置一座40m×1.5m(宽×高)景观坝, 形成大水面, 同时打造“同心湖”景观。

1 景观坝的特点及应用现状

随着河道整治工程的全面推进, 以及人们对城市防洪、景观建设等的需求, 景观坝越来越多的应用到城市河道治理和景观提升的工程项目中。

作为城市河道治理和景观提升工程中必不可少的永久性建筑物, 景观坝布置区域河道平缓, 两岸大多为居民区或其他城市建筑物, 因此建筑物布置应紧凑, 且需满足城市防洪、供水、排沙排污、航运等基本需求; 景观坝大多位于城市中人群密集区域, 因此应具有耐久性好、操作方便、维修简单等特点, 需满足净化环境、城市景观提升、改善水生态环境等方面的需求^[1]。

基于景观坝的以上特点, 闸坝等传统坝型已经不能满足其需求, 坝式闸门、液压升降坝、橡胶坝、气动盾形坝等新型坝型由于兼顾了城市防洪和景观建设等要求, 越来越多的应用到了景观坝的选型中。

刘彦琦等^[1]在《城市河道治理中景观坝坝型的对比与优选》一文中对坝式闸门、液压升降坝、橡胶坝、气动盾形坝等新型坝型的特点做了较为详细的论述, 从泄洪能力、地基要求、施工安装、后期运行管理、投资造价、景观生态效果等多方面进行了综合分

析。该文指出，坝式闸门和液压升降坝由于坝体结构坚固可靠，抗洪水冲击能力强，特别适合雨量充沛的南方、洪水涨落快速的山区及北方泥沙含量大的河道。

2 镇康景观坝的选型

镇康景观坝跨度40m，高1.5m，设计溢流0.5m，景观坝相关水工建筑物级别为4级。景观坝在枯期立门蓄水、汛期卧门过洪。枯期当流量较小，水深不能满足景观要求时，闸门竖立蓄水，一旦水深超过门顶0.5m时，根据来流量调节闸门角度，闸门泄流以调节河道水位。

镇康景观坝的主要功能是防洪、蓄水，基本运行要求是动水启闭、灵活调度。根据项目景观坝的主要功能及运行要求，确定景观坝的选取原则为主要考虑景观效果，并适应单向挡水、启闭安全可靠、灵活方便，能在动水中启闭，并能任意控制开度，便于运行维护与检修。

根据镇康景观坝的选取原则，对比分析坝式闸门、液压升降坝、橡胶坝、气动盾形坝等新坝型的特点，考虑到坝式闸门同时具有整体景观效果最好、能任意控制开度、结构可靠性好、抗洪水冲击能力强、耐久性好、操作检修方便等特点，选取坝式闸门作为镇康景观坝的坝型。

镇康景观坝的结构主要有门叶、底轴、拐臂、铰座、防水套等组成。门叶为焊接钢结构，门叶与底轴、底轴与拐臂均为刚性连接，底轴通过两岸带轴承防水套支承，加上河间支座辅助支承固定在闸段底板上，支座结构能适应一定范围内的基础沉降。底轴端部的拐臂与液压启闭机相连，启闭机活塞杆推动拐臂使底轴旋转，从而控制门叶的开闭。拐臂上设有锁定孔，坝体挡水时，将锁定轴穿入锁定吊耳中，增加结构的可靠性。两端侧墙采用大理石贴面，底轴与底板、门叶与两端侧墙间设有止水装置，保证坝体在运行过程中不漏水。

镇康景观坝配有水景系统，由喷水系统、灯光系统和水景控制系统组成。通过音乐喷泉程序操作平台，运用计算机对控制器编程，可对更新曲目进行编排，使景观坝音乐喷泉常看常新。

对于环境温度低于0°的景观坝，尚应设有有效的防冻装置，水景系统不工作或冬季时确保水泵、喷头装置、水管等应处于无水状态。

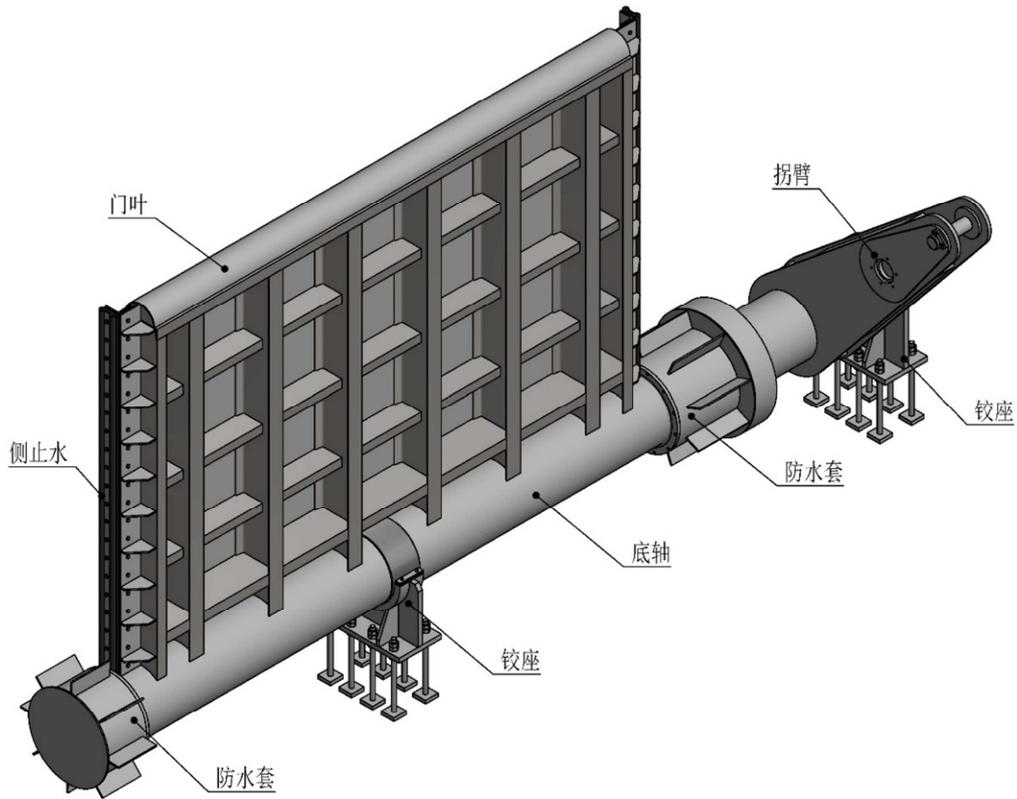


图1 坝式闸门结构组成示意图

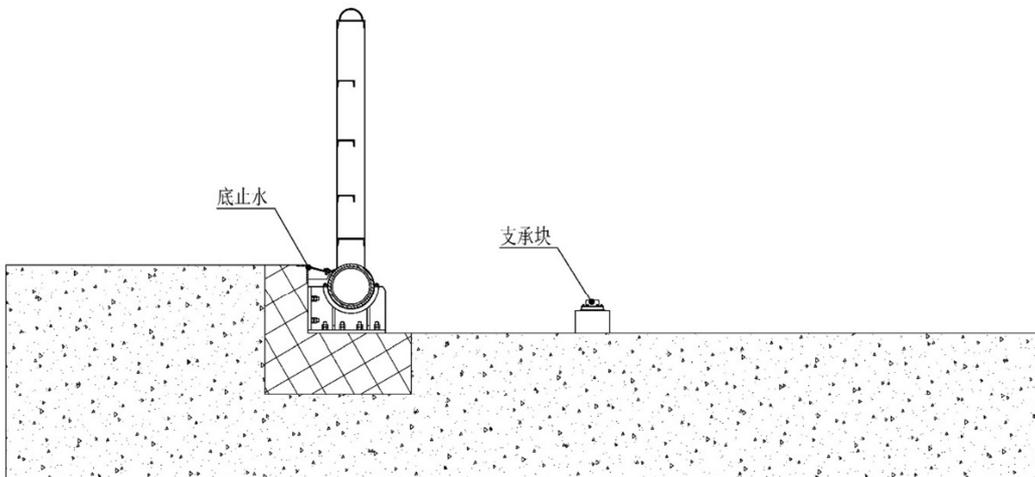


图2 闸坝横断面示意图

3 镇康景观坝的安装要点

镇康景观坝的安装主要包括以下内容：

- (1) 放线、复核尺寸；
- (2) 埋件安装、底横轴；
- (3) 拐臂、端头轴安装；

- (4) 锁定、启闭机安装;
- (5) 门叶安装;
- (6) 止水安装;
- (7) 喷泉、灯光安装及调试;
- (8) 电气安装、调试;
- (9) 系统的调试、试运行;
- (10) 系统的负载运行。

由于坝式闸门在国内尚无相关制造及安装验收规范可循,因此,在制造及安装验收过程中可参照《水利水电工程钢闸门制造、安装及验收规范》^[2]和《水闸施工规范》^[3]中相关规定执行,但需注意以下三点:

(1) 坝式闸门对底轴同轴度及地基沉降较为敏感,对基础平整度、稳定性和施工质量要求严格,允许误差小^[4]。安装过程中应保证各支铰座及防水套的基准线对齐、座(套)心在一条线上、各座底在同一水平面内,保证支铰座与防水套的整体同轴度及它们的相对间距尺寸公差。

(2) 坝式闸门的工作方式决定其为易疲劳结构,门叶结构和底轴的连接处为刚性连接,采用全熔透焊,该部位应力集中严重,且为易疲劳部位,因此应重点关注该连接焊缝的质量,且应进行必要的焊后热处理。

(3) 焊接变形的控制是坝式闸门安装的关键且矫正难度大。焊接变形量应不超过规范允许的数值,坝式闸门在现场拼接的焊缝主要有底轴管接头对接、各节门叶与底轴焊接、各节门叶之间对接,其中,以各节门叶面板对接焊对变形影响较大,易产生较大的波浪变形和较大的弯曲变形。

4 结语

(1) 坝式闸门同时具有整体景观效果最好、能任意控制开度、结构可靠性好、抗洪水冲击能力强、耐久性好、操作检修方便等特点,在景观坝领域内具有很好的应用前景。

(2) 坝式闸门对基础沉降较为敏感,对基础平整度、稳定性和施工质量要求严格,允许误差小,安装过程中应保证支铰座与防水套的整体同轴度及它们的相对间距尺寸公差。

(3) 坝式闸门为易疲劳结构,应重点关注坝式闸门门叶结构和底轴连接焊缝的质量,需对其进行必要的焊后热处理;应重点关注坝式闸门现场拼接的焊接变形量。

参考文献：

- [1] 刘彦琦, 张梁, 王瑞瑶. 城市河道治理中景观坝坝型的对比与优选 [J]. 水电站设计, 2017, 33(3):19-22.
- [2] GB/T 14173-2008 水利水电工程钢闸门制造、安装及验收规范 [S].
- [3] SL 27-2014 水闸施工规范 [S].
- [4] 李权. 挡水坝式闸门结构设计要点 [J]. 水利科技与经济, 2018(10).

第一作者简介：李斌（1990-），男，籍贯重庆，工程师，主要从事水工金属结构设计工作。

通讯地址：昆明市人民东路115号中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司。

传真：0871-63062691。手机号：18208803538。E-mail: 1056272914@qq.com。

大理市弥苴河河道景观闸门设计

陈若炜 韩云峰

(云南省水利水电勘测设计研究院 云南昆明 650021)

摘要：城市建设给河道治理的景观提出更高要求，本文因工程需要收集并比较了目前常见的景观闸门。

关键词：大理 景观闸门 液压坝

1 引言

大理洱海为云南宝贵的旅游资源，该地区的水利工程和河道治理工程均在景观方面提出更高要求，业主方不希望在该地区自然环境中出现金属结构排架的情况，经收集和方案比较我院决定采用下卧式闸门方案，下面将设计前期收集介绍和比较过程呈现给大家。

1 传统闸门介绍

近年来随着城市河道水利应用对景观提出更高要求，水利钢结构应用出现了更多样的景观闸门，慢慢摆脱了最早混凝土翻板闸门的设计方式。下图为改进过的采用液压启闭机控制的混凝土翻板闸门，该闸门延用了原自控翻板闸门的特点，既支承铰心放置在闸门 1/3 高度处，这样有助于减少启闭力。但该闸门是分段布置在河道上主要材料为混凝土结构所以在封水效果上不够理想。最重要的是不够美观，这种形式的闸门逐步被其他形式闸门取代。

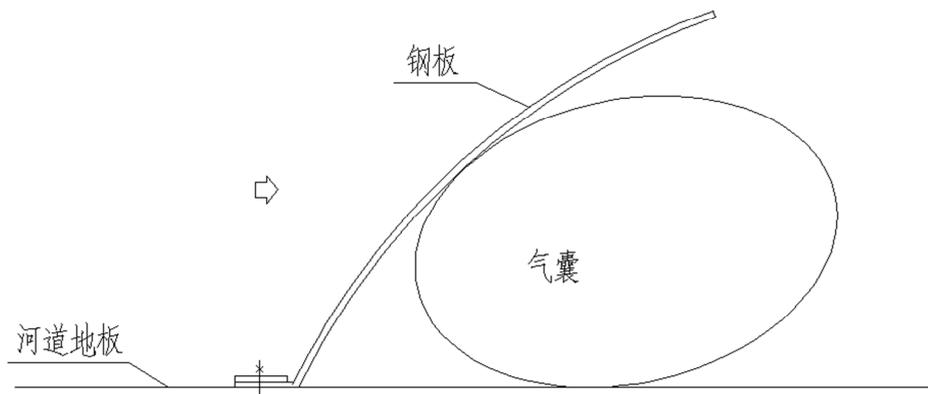


传统的拦河闸门另一种方式：充气式或充水式橡胶坝，该形式闸门优点在于价格低廉，结构简单、施工方便、施工期短。缺点在于受橡胶材料限制，该闸门不宜频繁启闭，橡胶本身耐久性不强，高原地区的紫外线以及顺水流经坝面的硬物对橡胶表面均造成不同程度的损坏，另外还容易受人为损坏。

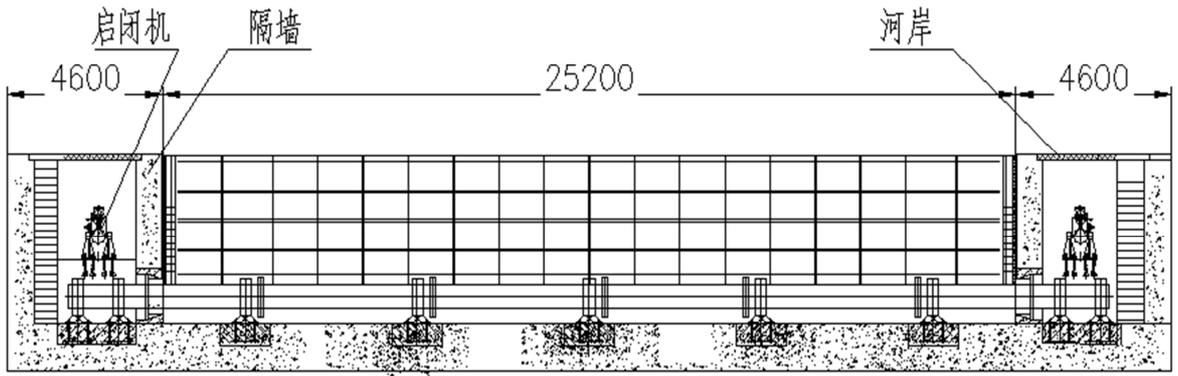


2 全跨式整体闸门介绍

为避免紫外线以及顺水流经坝面的硬物对橡胶表面均造成不同程度的损坏。出现了一种气盾闸，结构也比较简单，就是在橡胶坝前再铰接一块钢板，但均难解决气囊耐久性问题，见下图：



目前比较流行的景观闸门是底轴式下卧闸门（如下图），该闸门通过一根底轴与河道岸边隔墙外的启闭机连接，通过摇杆控制闸门启闭，该形式闸门优点在于闸门外形简洁整体性好，启闭机布置在河道外容易维护维修，结构简单。缺点在于价格较高，如果河道较宽必然导致底轴直径太大，开挖量大施工难度增加，底轴下部缝隙进泥沙后不好处理，可能导致启闭力无法控制，另底轴穿隔墙处密封圈需经受长期的考验，目前因该闸门使用期都不长，相关问题还未显现。

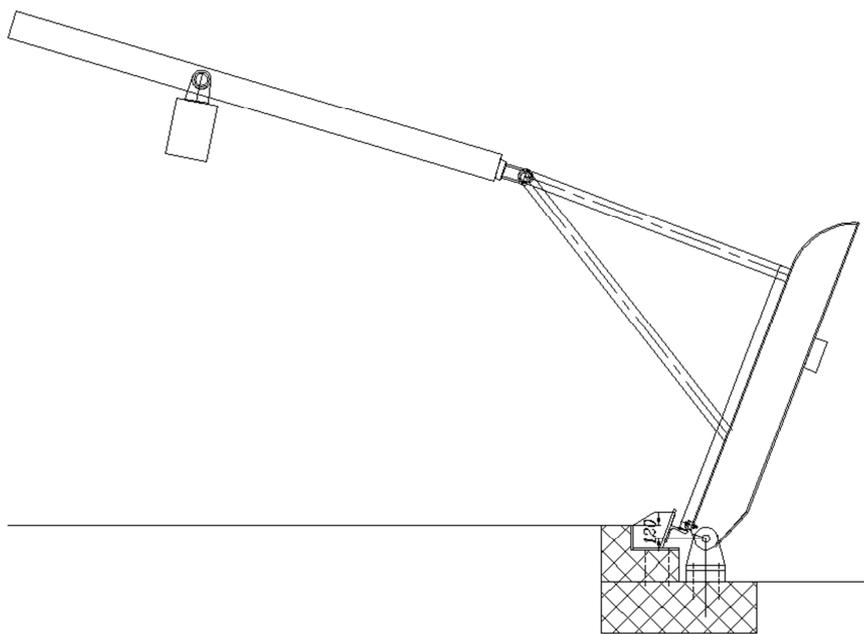


底轴式下卧闸门为减小底轴直径出现了一些分段式布置的闸门（如下图），分段式闸门不仅可以缓解因底轴直径太大而造成的造价过高，还可以采用分段式开启闸门达到冲砂的作用，另外还可弥补万一闸门出现故障，泄洪时还可分段开门的应急工况。

整体式景观闸门如下图的形式，启闭机布置在河道两侧，闸门采用弧门上翻式开启后闸门也不浸泡在水中，是水利溢洪道弧门的另一种应用拓展，这种方式对启闭机和闸门的检修十分有利。



另有整体式景观闸门如下图的形式，闸门采用平门，启闭机如上一种方式，布置在河道两侧，闸门下卧式开启后闸门整体浸泡在水中，闸门采用连杆支架连接液压启闭机控制闸门。

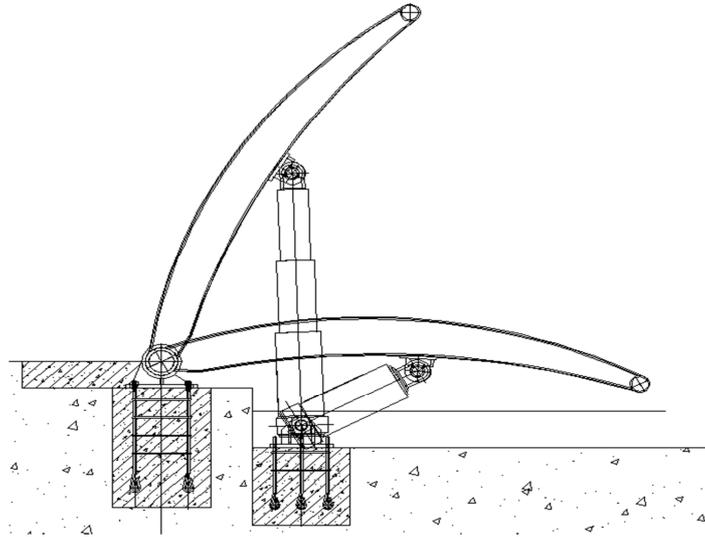


3 分段式闸门介绍

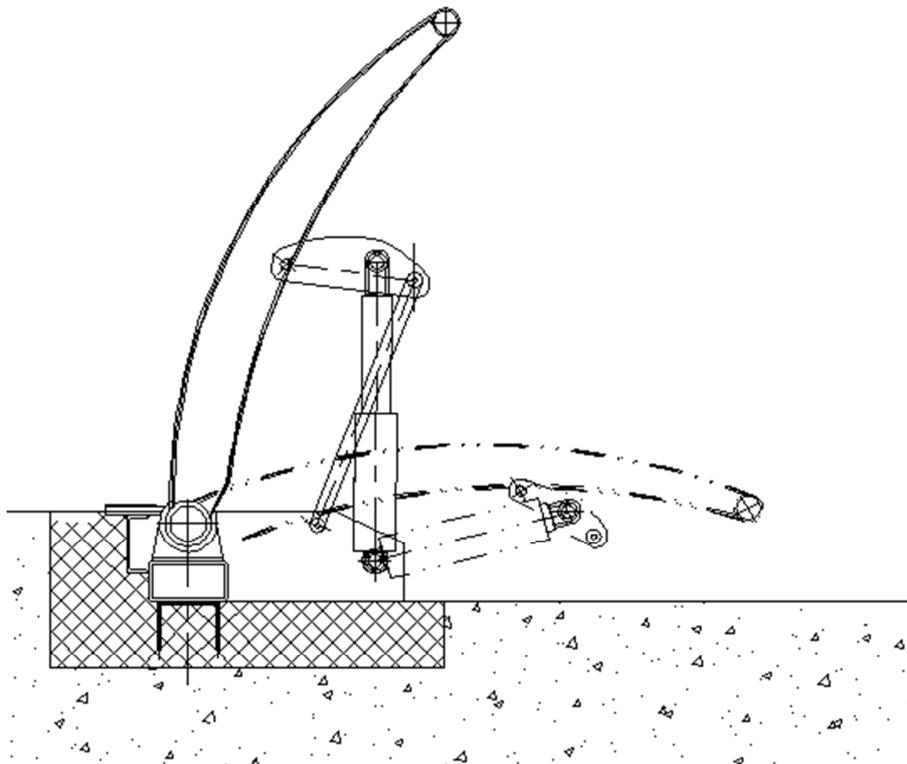
分段式下卧闸门已经是下卧式闸门的一个大类了，分段式有一个优势，就是可采用临时围堰方式进行检修。分段式下卧闸门一般结构为液压启闭机布置在闸门后面，利用液压启闭机的推力或拉力关闭闸门，目前布置形式已经非常繁多了。以下介绍几种常见形式：



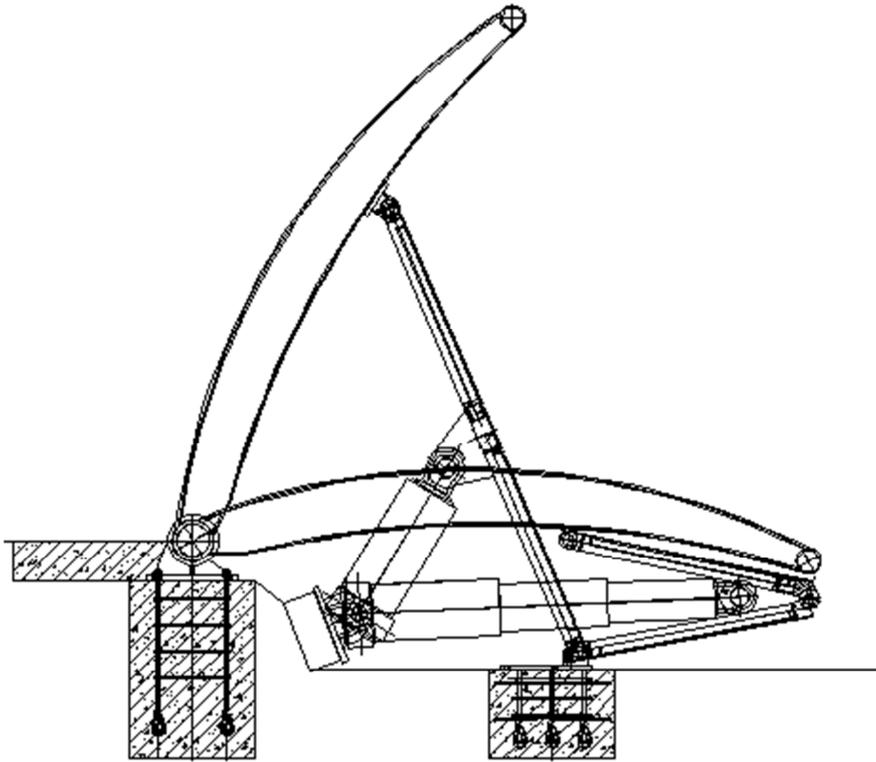
(2) 液压直撑式，受力简单结构简洁，因行程因素液压启闭机需采用多级杆。



(2) 液压带传力机构式，依靠传力机构达到减少液压机行程的目的，但需加大启闭机容量。本闸门后采用的是四连杆机构（也称为：马勒里式举升机构），该机构特点是举升平稳，可靠性高。



(3) 液压带传力机构式，下图设计液压机作用方向不同，改开门为液压推力。



4 结语

大理弥苴河项目最后决定采用分段式带传力机构的下卧闸门，分段式下卧闸门可采用局部临时围堰方式闸门和底槛进行维护维修。为提高举升稳定性，选用传力机构为四连杆机构，即：马勒里式机构举升机构，该机构特点是举升平稳，可靠性高，可显著降低液压杆行程，防止多级缸常出现的密封不严的现象，同时也有利于闸门在不同开度的锁定稳定状态。

得益于我国城市建设的不断进行，人民生活水平不断提高，人民对生活环境的要求也在迅速提高，笔者只是感动于景观闸门呈现百家争鸣的可喜状况，将所见所闻进行收集介绍，十足的班门弄斧，相信未来必然会出现一些更新更炫也更受欢迎的形式。

云南省文山州德厚水库分层取水解决方案

陈若炜 韩云峰

(云南省水利水电勘测设计研究院 云南昆明 650021)

摘要：比较了三种上层取水的形式的取水塔金属结构，并对德厚水库所采用的单面分层、四道挡水闸门共用一个门槽的矩形塔式取水口形式进行了较详细介绍。

关键词：上层取水 四门一槽 共用台车

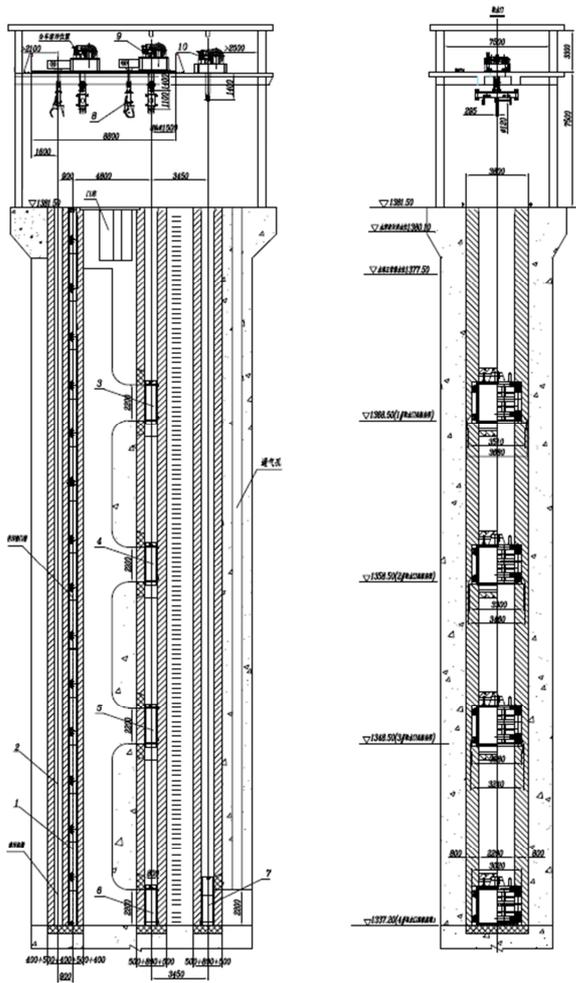
1 工程简介

德厚水库工程位于云南省文山州文山市德厚镇，是一座以城乡生活和工业供水、农业灌溉为主，兼顾一定的发电功能的大型水利枢纽。是解决盘龙河上游平远地区缺水的唯一水源工程，也是解决盘龙河中上流域资源性缺水和工程性缺水的核心水利工程，其供水对象主要为平远片区、马塘片区的生活及工农业供水。水库总库容 1.13 亿 m^3 ，兴利库容 8975 万 m^3 ，坝后电站总装机 2.2MW，抽水泵站总装机 10.22MW，农业灌溉供水 2980 万 m^3 ，城乡生活供水 2227 万 m^3 ，工业供水 4242 万 m^3 。

2 方案比较

因本工程承担农业灌溉供水任务，水库上层水的水温较高而且上层水所含微生物较多更适合农业植物生长需要，应工程要求大坝右岸引水隧洞取水塔承担取上层水的任务，可研阶段拟定了三种取水塔取水型式进行综合比较。第一种方案：采用多边形取水塔，我院在掌鸠河云龙水库曾使用过，取水效果很好，但取水塔体积较大，金属结构设备在取水塔每一边均需设置一套，金属结构维护量较大，造价较高，且如果遇到需要更多取水口时就需要增加多边形取水塔的边数，增加投资较多。第二种方案：单面叠梁式闸门分层取水方案，该方案采用单面取水塔，取水塔设一门槽，门槽内全叠梁门形式挡水，采用逐节提门取上层水，叠梁门每节 3 米，本工程取水塔高度约 42 米，需要 14 节叠梁门挡水，闸门采用移动式启闭机通过一套专用的抓梁控制闸门。该方案需要现场工作人员 24 小时不间断现场观察库水位，并随库水位经常操作闸门启闭，现场闸门控制工作将是繁琐以及难以长期实施的方案，另叠梁门间漏水也将是可能出现的麻烦以及当取水水位较低时大量的上层叠梁门堆放也是一个棘手的问题。为解决上述两个方案的一些不足，金属结构专业提出了第三

种方案（并得到实施）：单面分层、四道挡水闸门共用一个门槽的矩形塔式进水口方案，如下图所示，该方案门槽部分顺水流方向依次为 1 清污机槽、2 拦污栅槽、3 挡水门槽、4 事故门槽。取水塔拦污系统采用的是我院使用较多而且效果较好的叠梁式垂直拦污栅，拦污栅前采用一套全跨式清污机抓斗，清污机未单独设置行走机构而是集成在台车前端，减少了一套行走机构有利于缩短取水塔前后尺寸。拦污系统后设置了一个挡水门门槽，在门槽从高到低设置了 4 个取水孔口，每个孔口均设置挡水闸门，即：四门一槽结构。每个孔口下侧方均设有锁定梁式底槛，4 个闸门宽度从上到下依次变窄，最下面的闸门宽度最窄，以闸门便于穿过孔口两侧锁定梁式底槛到底对应的底槛位置，利用检修平台的空余处设置了 2 个储门库，当库水位



较低时放置上部两扇闸门用。挡水门槽后为事故门槽原设计计划共用台车启闭该闸门，但考虑到该台车承担较多不利于应对工程事故应急情况，经论证后决定事故闸门采用一门一机配置，事故闸门启闭采用一台高扬程卷扬式启闭机连接控制。

3 结语

该方案较方案 1，达到相同的功能减小了取水塔体积，减少了 3 套金属结构设备，减少了投资。较方案 2，更利于管理和操作。本工程取水塔方案取上层水并非是能称得上好的解决方案，许多同仁在遇到同样问题时都想出了一些更好的方案，但都苦于材料或安全方面的考虑难以实施，此

处只是介绍一种我们已经实施建成的方案供大家参考，也大家给予请指导。

底轴驱动式翻板闸门的若干关键技术问题及工程措施研究

严根华^{1,2} 董家^{1,2} 孙云茜^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210029.)

摘要: 本文研究总结底轴驱动式翻板闸门工程设计和制造的若干关键技术问题及工程措施研究成果。首先阐述了该型闸门的受力和变形特性, 提出了结构设计所关注的方向; 随后分别讨论了闸门结构的不均匀沉降及底轴受力变形特性、底轴沉降量对支座反力作用的影响, 指出了控制闸室底板不均匀沉降的重要性; 此外对底轴驱动式翻板闸门的振动问题进行了试验研究, 取得了泄流流态与动水压力特征、闸门结构振动加速度特征等数据资料, 并对影响闸门结构动力安全的负压空腔、通气孔设置和门顶破水器体型布置等进行了专门研究, 并提出了相关技术要求。根据底轴驱动式翻板闸门存在的消能工安全问题, 给出了闸下底板失稳试验结果, 提出了确保消力池底板稳定的设计原则; 最后讨论了该型闸门的泥沙淤积问题及其处理措施。本文成果可供类似工程水闸的设计和施工部门参考使用。

关键词: 底轴驱动式翻板闸门、不均匀沉降、底轴受力与变形、流激振动、负压空腔、通气孔布置、门顶破水器、消力池底板稳定、泥沙淤积与处理

1 前言

底轴驱动式翻板闸门是我国目前广泛使用的特殊门型, 在城市水环境和水生态整治建设中取得了很好效果。典型底轴驱动式翻板闸门实景见照片 1.1~1.2。这种门型的最大优点是全开卧倒时河道通透、便于通航, 不利之处是闸门在卧倒状态下门体容易产生淤积, 增加启闭力等问题。另外该类闸门的设计和建设还受到底轴不均匀沉降等要求的制约。鉴于该闸门属于门顶溢流, 闸下空腔的负压震荡容易诱发闸门结构的强烈振动, 因此通气孔设置和门顶破水器结构形式的选择也是涉及到闸门结构运行安全的重要内容之一。此外闸下消力池底板的稳定也是该型闸门设计和施工过程中需要关注的问题。显然, 该类门型的安全使用需要解决一些关键技术问题。



照片 1.1 典型底轴驱动式翻板闸门工程效果图



照片 1.2 关闸挡水或卧倒状态

2 闸门结构的受力和变形特性分析

某工程底轴驱动式翻板门具有双向挡水功能。闸门总跨度 102m, 系我国跨度最大的大

型挡潮结构，水闸枢纽布置见图 2.1。根据黄浦江潮位变化及内河水位调控要求，水闸需要承担最大高潮位 6.26m，内河 2.8m 水位的反向挡潮，及最低潮位（0.24m）下内河正常水位 3.5m 时正向挡水二种基本工况的操作运行，以保证苏州河正常的观光效果。

该水闸采用新型卧倒式结构，门叶与底轴刚性联接，并将底轴上的轴承座与基础固结，

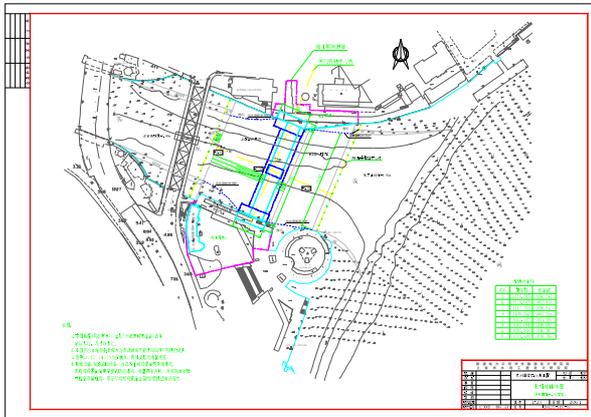


图 2.1-1 水闸枢纽布置图

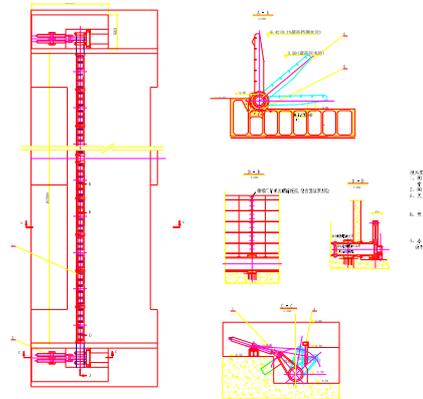


图 2.1-2 水闸结构布置图

布置在二岸侧的液压启闭机通过联轮带动底轴旋转从而实现水闸的启闭操作（见图 2.1-2）。为避免底轴基础沉降变形可能带来的不利影响，在底轴中部（河中央）采用软联接。门叶之间亦采用弱联接。鉴于水闸跨度大、运行状态复杂，因基础变位、水动力荷载作用等导致的水闸振动及运行非平稳性问题，需要进行深入研究。

当水闸门叶受到双向水压的作用时，门叶上的作用力传给底轴，而底轴作为力传递构件在应力应变方面起到控制作用。分析结果显示，闸门的最大位移量为 221.5mm，出现在河中央门叶上方部位，闸门的整体变位为扭斜面。门体的应力变化以近岸侧主纵梁根部部位为大，面板部位略小。图 2.3~2.4 绘出了闸门结构的位移和应力变化云图。门体的较大应力值在底轴支座部位出现峰值。但近岸侧的最大应力点发生部位出现在近岸侧第二个纵梁根部其应力值为 178.5MPa。底轴的最大位移出现在门体中部，而最大应力出现在近岸侧的固定端部，这种应力和变形特征符合结构受力特征。因此闸门结构的设计因分别考虑上部门叶与底轴两个主要部件的位移和应力问题。

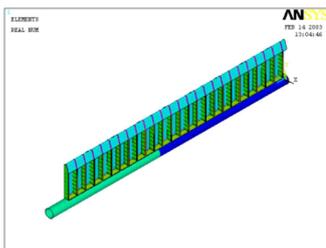


图 2.2-1 半整体水闸有限元模型

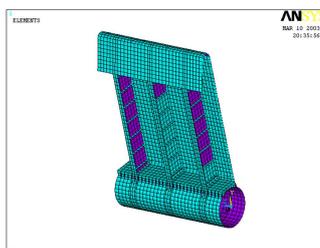


图 2.2-2 其中一节闸门有限元模型图

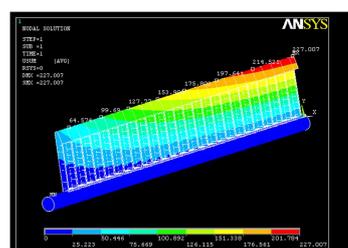


图 2.3 闸门整体变形云图



图 2.4 闸门应力分布云图（局部放大）

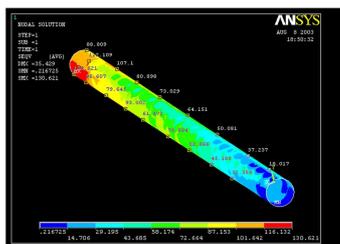


图 2.5 闸门转轴上应力分布云图

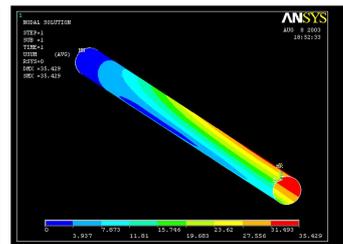


图 2.6 闸门转轴上变形云图

分析结果指出，该类门型的最大变形出现在闸门门叶跨中部位，底轴最大扭转变形同样出现在门体中部；而最大应力出现在闸门两侧的固定端，符合结构的构造和力传递原理。这为底轴驱动翻板门的结构静动力设计提供了基本依据。

3 闸门结构的不均匀沉降及底轴受力变形特性分析

3.1 基础变位对水闸受力特征的影响分析

工程上水闸底轴的沉降是不可避免的，但沉降量的控制是必要的，过大的沉降量将导致门体受力的不利影响。分析结果指出，水闸沿门宽方向的应力变化有其特有规律。某工程闸门挡水工况时，近岸侧门叶底座加劲板部位局部集中应力随沉降量的增加而加大(见图 3.1~3.2)。底轴无沉降量时应力值为152MPa，而当底轴沉降量为1.5倍设计给定值时达212.5MPa。基础沉降导致结构应力增加40%左右。

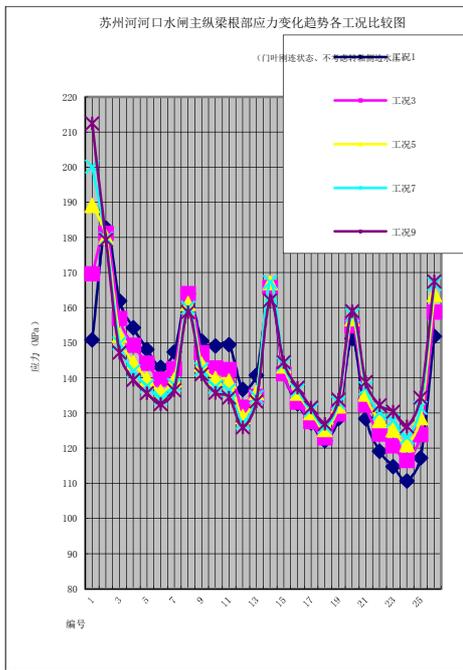


图 3.1 主纵梁根部应力变化比较图

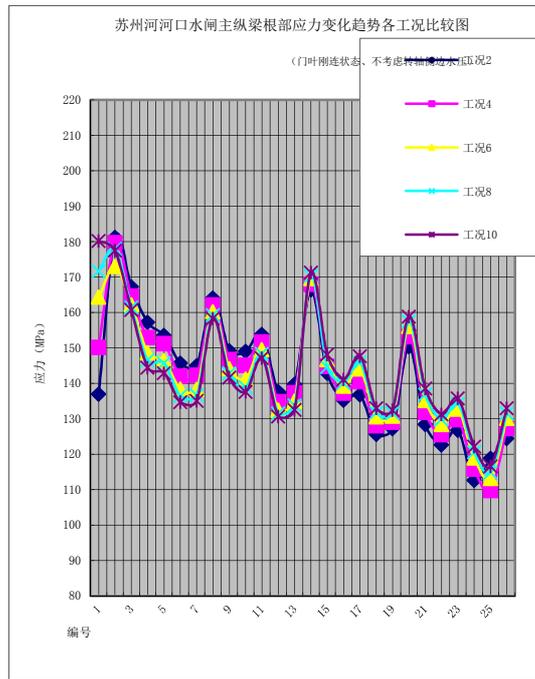


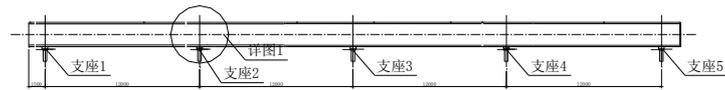
图 3.2 主纵梁根部应力变化比较图

3.2 底轴沉降量对支座反力作用的影响

水闸处于反向挡潮或正向挡水工况时，作用于门叶的水压力荷载将通过底轴传向岸侧启闭装置。底轴 5 个轴承座（半江）(图 3.3) 将承受垂直和水平二个方向的支承反力。分析时将底轴的每个支座划分为三个断面（见图 3.4），主纵梁计算断面见图 3.5。

分析计算的重点针对反向挡潮工况条件下，分别对不同的支座沉降量进行底轴支座反力分析。计算结果显示，水闸底轴沉降量的变化将导致诸支座反力的改变。相对而言，各支座水平向的反力随沉降量变化不出现本质的变化（见图 3.6），而沉降量对底轴支座的垂向反力具有明显影响，图 3.7 显示了诸支座的垂向反力变化特征。显然，随着沉降量的加大，支座的垂向反力明显加大。其中，1#和 5#支座反力方向向上，其他支座反力方向向下。1#支座最大垂向反力值为 $5.9487 \times 10^6 \text{N}$ ，出现在工况 9（相对沉降量为 1.5 倍的设计给定值）。从总体上看，支座垂向反力随底轴沉降量的加大而增加。

从基础沉降量对底轴驱动翻板门的应力和支座反力两方面考查，设计和施工部门控制闸门基础沉降量对水闸工程的安全具有重要作用和意义。



说明：图中尺寸单位以mm计。

图 3.3 整体计算简图

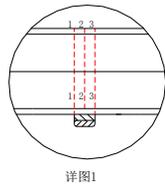


图 3.4 每个支座的三个计算断面

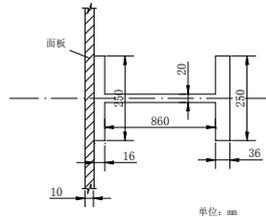


图 3.5 主纵梁计算断面尺寸

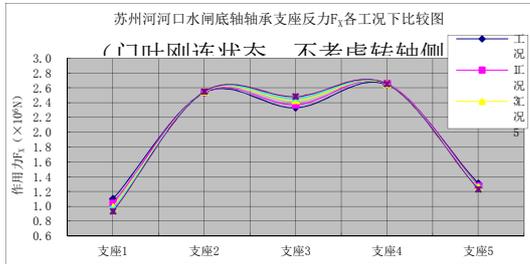


图 3.6 不同沉降量支座水平反力 F_x

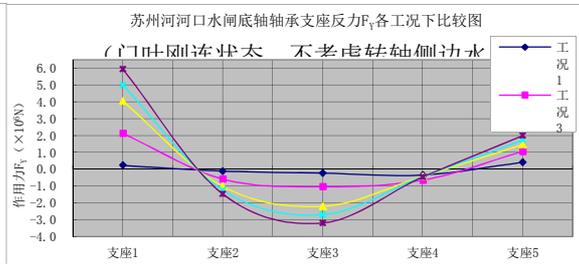


图 3.7 不同沉降量支座垂向反力 F_y

4 底轴驱动式翻板闸门的流激振动问题

4.1 工程案例概况

某工程水闸采用闸堰组合式结构布置（见图 4.1~4.2），是一座用于城市水景观建设的重要水利工程。该工程采用固定溢流堰和底轴驱动翻板闸门结构联合构成，其中两个溢流堰边孔单孔宽度 10m、主中孔宽度 24m。主中孔采用底轴驱动翻板闸门结构型式。上部布置采用具有江南文化元素的廊桥结构，实现水闸工程的功能化、景观化和生态化要求。运行时形成的瀑布亦将成为自然景观，形成一道亮丽的水景观，增加城市活力。

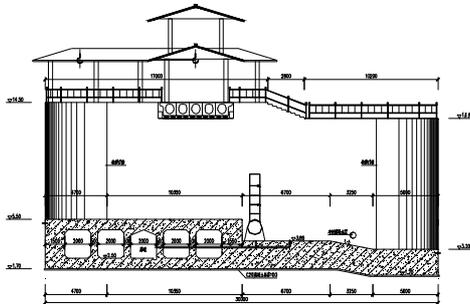


图 4.1 闸室剖面布置详图

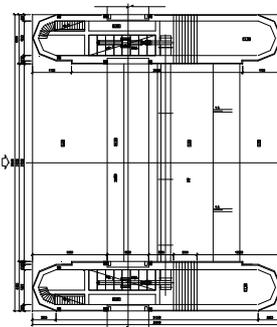


图 4.2 闸室平面布置详图

由于该闸门跨径较大，泄水建筑物组合结构形式较为新颖，泄流时的流态较为复杂，因此，有必要对该水闸开展全面的水力学和流激振动模型试验，取得系统的数据资料，有针对性地对原设计方案提出优化和改进措施，消除原设计方案中可能存在的因素，保证建

成后的水闸工程既能满足水利和景观的功能需要，日常运行维护又能够安全可靠。

4.2 研究的主要问题

通过闸门结构水弹性振动模型试验研究解决以下问题，(1) 研究在各种工况动水操作过程闸门受到的水流时均压力、脉动压力，分析荷载量级及其能谱特征，取得动荷载高能区频域能量分布状况。(2) 研究测量闸门在各种工况（结合启闭机）下运行时的动力响应，包括应力、位移、加速度，给出振动参数的数字特征及其功率谱密度，明确振动类型、性质及其量级等，分析振动危害性。(3) 研究闸前进流和闸下出流流态与水流脉动荷载之间的关系，以及下游淹没水深对闸门强烈振动区的影响。(4) 研究诱发闸门结构强烈振动的机理，包括门顶破水器形式对结构控振的影响。(5) 研究侧壁空腔通气设施布置方案，提出最佳通气孔尺寸和布置位置，确保闸门结构平稳安全运行。(6) 通过对闸门水动力荷载、结构静动力特性以及水弹性振动特性等成果的综合分析研究，提出结构抗振布置方案，确保工程长期安全运行。试验模型比尺 1:20，模型布置见图 4.3 和照片 4.1。照片 4.2 为闸门不同开启角度时闸门顶部溢流水流流态（闸上 9.5m）。

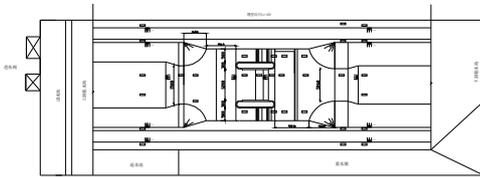
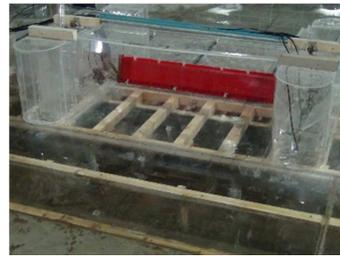


图 4.3 模型设计布置图



照片 4.1 模型水闸工作段



闸门开启 $e=20^\circ$

闸门开启 $e=30^\circ$

闸门开启 $e=30^\circ$

照片 4.2 闸门不同开启角度时闸门顶部溢流水流流态（闸上 9.5m）

4.3 泄流流态与动水压力特征

试验在上游水位 9.0m、下游水位 7.0m、闸门开度 $e=30^\circ \sim 90^\circ$ ；上游水位 9.5m、下游水位 7.5m、闸门开度 $e=10^\circ \sim 90^\circ$ 等运行工况下进行。成果表明：闸门启闭过程中作用于门体上游面的动水时均压力随闸门开度变化而呈现一定的变化规律，总的趋势是小开度时的上游面压力最大，随开度增大上游各部位动水时均压力逐步降低，在同一开度底部压力大，上部压力小。顶部受较大的流速水头影响，其时均动水压力降低较快，门后各测点也具有同样的变化规律。上游水位 9.5m 下游水位 7.5m，闸门开度在 $e=40^\circ \sim 60^\circ$ 区间，门顶圆弧上游面测点 M5 处于微小负压状态（ $-0.99 \times 9.8\text{kPa}$ ）；门顶圆弧顶部测点亦有其相同的变化趋势，闸门开度在 $e=30^\circ \sim 50^\circ$ 区间，门顶测点 M6 亦处于微小负压状态（ $-0.88 \times 9.8\text{kPa}$ ）；门后在大开度时整体处于水体之中，所以压力均为正值，但在闸门开度在 $e=10^\circ \sim 30^\circ$ 区间，过闸水流呈现射流跌流，而门后通气不畅，门顶部后部呈现负的压力腔，试验测得最大负压 $-2.86 \times 9.8\text{kPa}$ 。上游水位 9.0m 下游水位 7.0m，闸门开度在 $e=50^\circ \sim 70^\circ$ 区间，门顶圆

弧上游面测点 M5 同样处于微小负压状态 ($-1.22 \times 9.8\text{kPa}$)；门顶圆弧顶部测点 M6 亦有同样的变化规律，闸门开度在 $e=50^\circ \sim 60^\circ$ 区间，试验测得该处最大负压 $-1.272 \times 9.8\text{kPa}$ ；门后各点在大开度时整体处于水体之中，所以压力均为正值，但在闸门开度在 $e \leq 50^\circ$ 区间，亦因过闸水流呈现挑射跌流，门后通气不畅，门顶后部呈现负的压力腔，最大负压 $-2.258 \times 9.8\text{kPa}$ (M7 测点)。总体上看翻板平面闸门上下游压力变化和过闸流态基本一致，水流脱空或空腔内水柱负压提升的部位呈现负压，其它各点则呈现正压变化，其变化具有良好的规律性，门后设置通气孔补气后，空腔负压量减弱或消失，这对控制闸门振动有益。

作用于门体的脉动压力试验亦在上游水位 9.0m、下游水位 7.0m、闸门开度 $e=30^\circ \sim 90^\circ$ ；上游水位 9.5m、下游水位 7.5m、闸门开度 $e=10^\circ \sim 90^\circ$ 等运行工况下进行，各测点脉动压力均方根值随开度的变化关系绘于图 4.4。试验结果表明，诸测点脉动压力随闸门开度变化不大，最大脉动压力均方根值约为为 3.383kPa。从功率谱密度曲线可以看出：工作门门体脉动压力的主能量分布在 10Hz 范围以内，其中优势频率在 1Hz 左右，较高频率的脉动能量已迅速衰减。

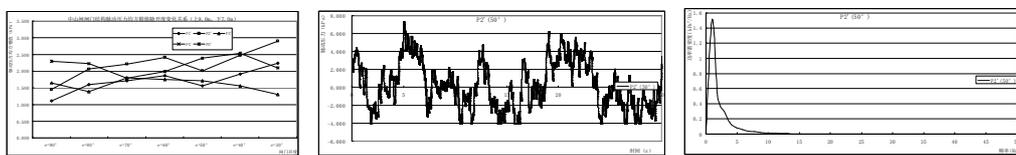


图 4.4 闸门结构各测点脉动压力均方根值随开度变化关系及典型测点时域过程与谱密度

4.4 闸门结构振动加速度特征

为了获取工作闸门运行过程中的流激振动特性，在特制的水弹性闸门模型上布置了 5 个振动测点（测点布置见图 4.5），每个测点分别测取垂直面板方向 (x 向)，垂直水流横向 (y 向) 及垂直于底轴方向 (z 向) 三个方向的振动量。采用随机振动理论及其谱分析方法进行振动数据的处理，分别获得闸门振动过程的谱特征和数字特征，以揭示闸门振动的频域能量分布及振动量级。

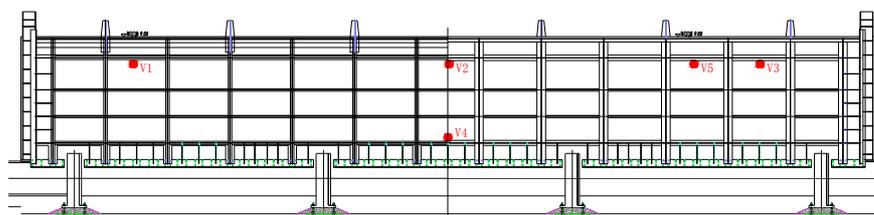


图 4.5 工作门振动测点布置图

试验结果指出，闸门面板结构振动量级总体趋势是随着闸门开度和下泄流量逐渐减小而振动响应逐渐减弱，在闸门开度 $e=10^\circ \sim 40^\circ$ 区间，由于门后空腔出现不稳定负压气囊而使振动量增加，随后迅速降低，闸门面板结构顶部振动量级较下部大，下部靠近底轴位置振动量级较小，闸门两侧振动量大，闸门中部振动量级小。试验测得闸门面板结构顶部振动加速度最大均方根值分别为，垂直面板方向 (x 向) 为 0.212 m/s^2 、垂直水流横向 (y 向) 为 0.132m/s^2 、垂直于底轴方向 (z 向) 为 0.520m/s^2 ；闸门面板结构底部振动加速度相对较小最大均方根值分别为，垂直面板方向 (x 向) 为 0.064 m/s^2 、垂直水流横向 (y 向) 为 0.132m/s^2 、垂直于底轴方向 (z 向) 为 0.048m/s^2 ；门叶两侧最大振动均方根值为 0.520 m/s^2 ，门叶中部最大振动均方根值为 0.132 m/s^2 。

在固定闸门开度运行工况 ($e=42^\circ$) 闸门面板结构振动量级总体趋势是随着上游水位的升高，下泄流量逐渐增大而振动响应逐渐增强，闸门面板结构顶部振动量级亦较下部大，门

叶两侧振动量较门叶中部大。从频谱分析可以看出闸门结构振动频率主要集中在 25Hz 以内，其中优势频率在 1Hz、10Hz 和 15Hz 左右。

水弹性振动试验结果指出，闸门结构的较大振动量与门顶射流下方的负压空腔密切相关，若要控制闸门的振动量，需要考虑破除负压空腔及输气问题。

5 负压空腔和通气孔设置

某工程底轴驱动闸翻板门运行过程中，在闸门全关至 55° 范围内门后抛射水舌下方形成一定范围的空腔，在上游低水位和闸门小开度运行时，由于门顶破水器将抛射水帘撕开，空气能从撕裂的区域向空腔内补入；但在高水位或闸门大开度，抛射水体变厚，空腔封闭程度加强，由于下泄水流不断带走空腔内部空气，空腔负压增加，腔内水体抬升，易形成不稳定负压空腔，故须在闸墩侧壁设置通气孔向空腔内补气，以保持其输气、携气动态平衡，试验在门后每侧布置两个 $\varnothing 30\text{cm}$ 通气孔，孔中心高程布置在 7.45m，门前坎后 3.18m，间隔 0.6m，通气孔布置图见图 5.1 所示。

试验结果表明，在闸门开度 $e=0.0^\circ \sim 10^\circ$ 区间，门后负压空腔可通过门顶破水器撕裂的区域自行向空腔补气而达到平衡；在闸门开度 $e=20^\circ$ 左右可通过前一道通气孔补气，单侧补气量在 $0.12 \sim 0.25\text{m}^3/\text{s}$ 左右；在闸门开度 $e=30^\circ \sim 50^\circ$ 区间，门后空腔可通过后一道通气孔补气，单侧补气量在 $0.17 \sim 0.60\text{m}^3/\text{s}$ 。若按照风速 40m/s 控制，可选用两个直径 $\varnothing 15\text{cm}$ 的通气孔即可满足要求。

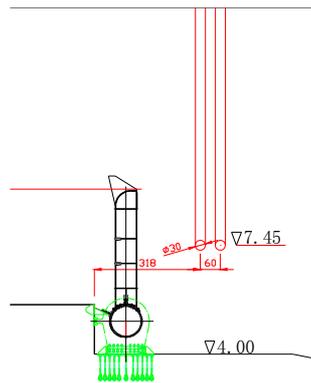


图 5.1 闸室门后通气孔布置图

6 门顶破水器设置要求

门顶破水器旨在闸门小开度及低水位运行时，自动撕裂抛射水舌，形成向门后空腔输气目的。但试验观察发现，原设计破水器（见图 6.1），仅在库水位很低时才起作用，在水位略高情况下虽破水器未被漫顶，但水流流经破水器后自动闭合，门后空腔依然是密闭空腔。在闸门开度 $e=10^\circ$ ，上游水位 9.5m 时破水器流态详见照片 6.1b。显然，原设计门顶破水器破水效果不佳，无法有效达到破除负压空腔目标。

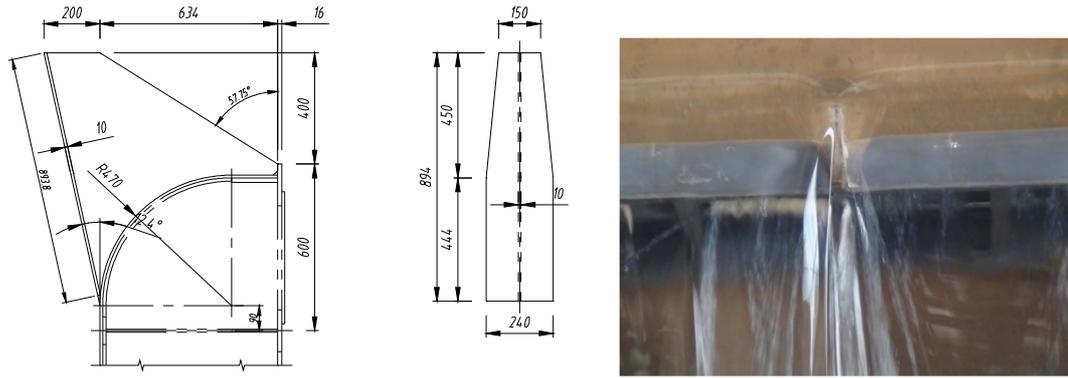


图 6.1 破水器原设计方案及破水器原设计方案分割水流效果

为改善破水器分流效果，共进行了 5 个修改方案的研究，1~3 修改方案亦仅在库水位很低时才起作用，在水位略高情况下虽破水器未被漫顶，但水流流经破水器后自动闭合，门后空腔依然是密闭空腔。

门顶破水器优化方案四采用上游面为长轴 200cm，短轴 100cm 的“半椭圆”结构，后部为两个平行翼板式结构。试验表明此方案具有较好的水流撕裂效果，在闸门开启至 42° ，上游水位 8.5m 时，及闸门处于全关位，上游水位 9.5m 时，水流流经破水器后水股撕裂形态较好，且门顶均匀布置 4 个破水器即可满足水流门后空腔输气需求。

门顶破水器优化方案五采用上游面为高 200cm，宽 200cm 的“三角型”结构，后部为两个平行翼板式结构（见图 6.2）。试验表明此方案亦具有较好的水流撕裂效果，在闸门开启至 42° ，上游水位 8.5m 时，及闸门处于全关位，上游水位 9.5m 时，水流流经破水器后水股撕裂形态较好（见照片 6.1），且门顶均匀布置 4 个破水器即可满足水流门后空腔输气需求。

因此门顶破水器优化方案四和优化方案五，在门顶溢流高度 50cm 以下时均有较好的撕裂水股向门后空腔掺气的功效，可根据实际情况选用。

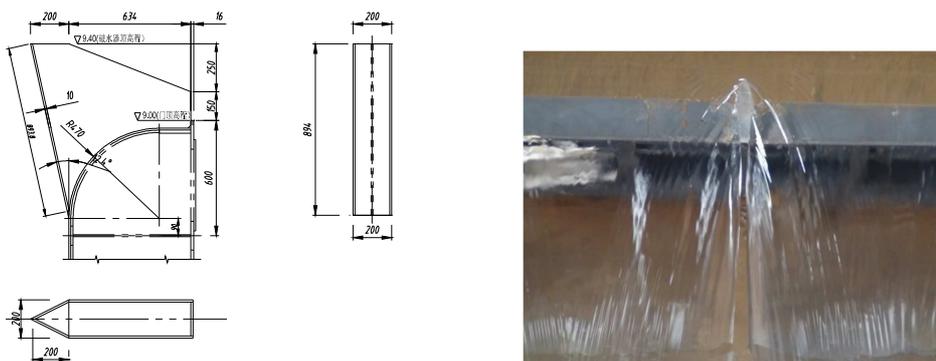


图 6.2 破水器修改方案五

照片 6.1 破水器修改方案五分割水流效果(闸门开度 42°)

7 底轴驱动式翻板闸门消能设计

某工程底轴驱动翻板门在泄流运行中出现消力池底板掀起失事事故，这也是该类门型的设计和施工过程需要高度重视的问题。该工程的闸室布置见图 7.1，闸室下游通过止水结构紧接设置消力池底板。为搞清消力池底板失事原因，开展了闸下底板失稳试验。

7.1 闸下底板失稳试验设计

该试验在 $L_r=20$ 的单孔整体模型中进行，原型钢筋砼底板厚 0.6m，宽 16.9m，长 22.0m，

为了减轻扬压力，闸室中上游端设防渗墙，底板上设排水孔，板块分缝设止水，底板下设埋石砾和夯实抛填石或砾渣。

模型底板采用无色透明有机玻璃制作，几何尺寸与原型相似，采用质量分布相似保证底板块的重力分布相似，模型中设置排水孔和分缝止水，排水孔个数和单孔面积与原型相同和相似。模型底板下部垫层采用不同粒径的石渣和砂砾充填，闸室上游并设有模拟的防渗装置，在模型中闸下斜坡段、消力池、尾坎、海漫等消能措施一一俱全，其体型尺寸均模拟相似，模型模拟图见照片 7.1。

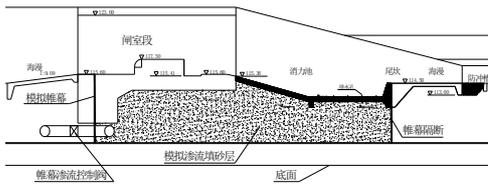


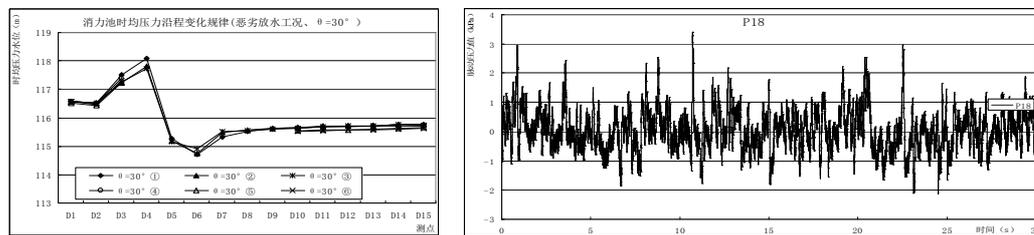
图 7.1 消力池底板失稳试验模拟示意图 照片 7.1 消力池稳定试验失稳掀起的板块位置

7.2 底板失稳动水时均压力荷载试验

该项试验在 $L_r=20$ 的单孔整体模型中进行。经验表明，底板失稳通常在斜坡顶分缝止水失效，排水孔堵塞，防渗帷幕受损等情况下发生，按以下几种条件模拟底板失稳状况：

- (1) 防渗帷幕完好，排水孔全部堵塞，止水完全失效；
- (2) 防渗帷幕及二侧止水完好，顶止水失效，排水孔全部堵塞；
- (3) 防渗帷幕及两侧止水完好，顶止水失效，排水孔部分堵塞；
- (4) 防渗帷幕损坏。

根据流态观测分析，闸门开度 $\theta=30^\circ$ 左右时门顶溢流水舌直接冲砸底板分缝止水，导致动水压力进入底板，使动水压力显著增加（见图 7.2），引发消力池失稳的运行工况，试验还着重考察了以下各组合工况的消力池时均动荷载变化规律：①排水、止水正常；②排水正常、第一道止水损坏；③排水正常、第一、两侧止水损坏；④排水失效、第一道止水损坏；⑤排水失效、第一道止水损坏、两侧止水损坏 50%；⑥排水失效、第一道止水损坏、两侧止水损坏。试验结果指出，止水破坏引起的最大扬压力发生在闸门开度区间在 $Q=30^\circ \sim 40^\circ$ ；排水孔遭受封堵失效是促使底板扬压力增大的另一个原因。



a) 底板压力沿程变化关系 b) 底板典型测点脉动压力时域过程

图 7.2 开度 $\theta=30^\circ$ 泄水、止水损坏底板压力沿程变化及典型测点脉动压力时域过程

7.3 消力池底板点面系数分析

通常以 $K = \frac{\text{直接测量的面脉动总荷载}}{\text{按试验点脉动推算的平均脉动总荷载}}$ 来定义点、面脉动荷载系数，在

获得消力池底板脉动总荷载和点脉动压力基础上,可以获得不同运行工况的系数 K ,则可进行点、面脉动荷载的换算。成果指出:

- (1) 排水孔封堵,第一道止水失效后的点面系数略有增大,即受下部扬压力脉动影响,总体底板的点、面系数有增大趋势;
- (2) 闸门开度 $\theta \leq 20^\circ$,消力池水平段底板的系数 K 比倾斜段的大;
- (3) 闸门开度 $\theta \geq 60^\circ$,斜坡段底板的系数 K 比水平段的大;
- (4) 在计算取用水流脉动荷载时,应考虑脉动荷载大和点、面系数亦大的综合情况。

点面脉动系数 K 与各点脉动波形的空间相位关系密切,在理想条件下 K 以 1 和 0 为极值。一般规律是点脉动相位变化小,同步性大,则 K 值大。反之, K 值则小。 K 值尚与试验块体面积大小有关,面积愈大,点脉动不同相位可能性加大,故 K 值趋小,随机脉动而且当面积趋于无限大时, K 趋向为 0,当测试面积趋于一个点时,点与面脉动基本接近相同, K 趋向为 1。

当闸门开度加大,水流砸向斜坡段,流态复杂,水流紊动加大,压力脉动随机性大,各点脉动波形相位差大, K 则小。第一道止水破坏,由分缝水流往下传递的动水压力受分缝制约,其扩散比较有规则,其压力波动空间相位相对比较简单,故其压力脉动虽较小,但系数 K 较大。第一道止水破坏,通过接缝上、下联通的压力脉动,其面荷载与同样块体止水完好情况下的面荷载相比,作用面积相差一倍,面积加大, K 值偏小。由此可见底板下表面压力脉动对点面系数影响是互相消长的。

消力池底板的点面荷载影响系数还与水流流态密切相关。若闸顶溢流,水舌冲击部位表现为局部冲击作用,也是受力较大的区域;其它部位则是以水跃紊动产生的动水作用。本项试验按整块底板进行面荷载试验,因此底板的点面荷载系数小于常规泄流的底流消力池点面脉动荷载系数值。荷载设计时应区别对待。

7.4 消力池底板的流激振动试验

与脉动压力特征试验类似,流激振动试验在前述规定的试验工况下进行,其中 1#、5# 闸孔开启或关闭过程中消力池底板各测点振动加速度变化特征绘于图 7.3,从振动测试资料分析可知,消力池倾斜段前端受到过闸水流跌落冲击产生较大振动量,在扬压力过大情况下,受此影响消力池底板存在失稳可能。闸门启闭过程中消力池底板振动最大量级约出现在 $\theta \approx 30^\circ \sim 50^\circ$ 区间,其中消力池斜坡段振动量级明显大于水平段,且尤以斜坡前端最大,在整个启闭过程中, V1 测点振动加速度幅值接近 3.0 m/s^2 ,均方根值亦接近 0.7 m/s^2 。说明底板在泄流动荷载作用下产生振动的动力源于水舌冲击点附近,此时若止水损坏,动水压力进入底板下部,就有可能引发底板抬升失事。

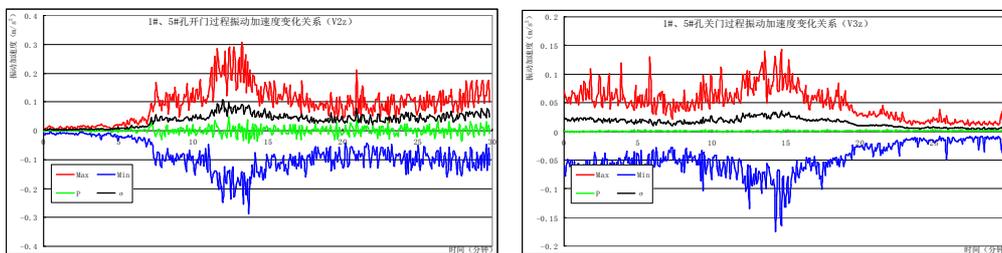


图 7.3 闸门启闭过程(1#、5#孔)消力池底板振动加速度变化特征

此外,鉴于部分工程水闸泄洪时,下游防冲槽及下游河道近底流速 $v > 1.0 \text{ m/s}$,因此也需要注意防冲槽下游水流淘刷及防冲安全。

8 关于泥沙淤积问题的处理

鉴于底轴驱动翻板式钢闸门易发生泥沙淤积，导致闸门开启困难，因此需要做好泥沙淤积防治工作，确保水闸安全运行。

8.1 冲淤装置布置及冲淤效果试验

某水闸工程河段处于感潮河段，以悬移质的运动方式随潮流进入工程河段。当闸门关闭或处于某一开度状态时，在潮流等作用下，整个闸室下游及护坦段将遭受悬移质的淤积。同时由于闸室底板高程较护坦段低，闸门下部及其周围因水深较大、流速较弱，悬移质极易在该区域淤积，当悬移质淤积至一定高度将可能阻碍闸门开启和正常运行。

闸门底部淤沙可能的危害主要从影响闸门启闭的两个方面：一是闸门在平卧过程中如果门下泥沙淤积过高，则可能导致闸门无法平卧；二是闸门在启门至全关过程中，由于泥沙淤积对于门体梁格增加了作用力，导致闸门启门困难。因此该工程设置了冲淤设备，并定时进行冲淤，确保闸门安全、灵活、简便地运行。

在工程实际应用中，冲淤系统多为利用高压喷嘴冲击门前或流道内淤沙，扰动淤沙，减少泥沙对建筑物的粘滞作用，然后利用闸门启动后形成的水流排沙，或者利用喷嘴的高压水流喷射作用在河床上，使淤积的泥沙扬动悬浮，再利用河道的天然流速将其输送到下游河道，从而达到清淤的目的。该工程应用中所采用的冲淤系统布置见图 8.1a。由于冲淤管布置位置特殊，仅对门体下方的淤沙进行扰动，力图使之悬浮，但缺少天然的水流量进行输送，因而无法达到冲淤目标。

该工程悬移质泥沙中值粒径约为 0.01mm，其淤积泥沙的干容重， $\gamma_0=686\text{kg/m}^3$ ，淤泥的重率 γ_s 按 2650kg/m^3 。冲淤试验旨在解决以下二个主要问题：（1）论证冲淤装备的动力能否满足预定的冲淤要求；（2）力求冲淤系统系统配置，包括管径大小、喷嘴大小、个数和布置的疏密度等的合理性，以达到喷嘴的出水量、能量分布均衡。试验结果显示，原设计方案采用常规冲淤管无效，无法解决闸下淤积问题（见图 8.1b、c）。50m 扬程的冲淤管在冲淤后仅将喷嘴出口处的砂冲出一个较小的凹坑或一条很浅的凹槽。



图 8.1 一般高压冲淤管冲淤前后照片图

8.2 采用悬管布置自引水方式冲淤系统的冲淤效果

鉴于埋管方案存在管道淤积的可能性，因此采用悬管自引水方式进行冲淤试验。考虑利用每月 3~4 天左右的时间、内河和外江形成 2.5m 左右的水位差（潮差）进行冲淤，并采用三排冲淤系统的布置方式进行，按照每排长度 9m，按 20cm 等间距布置 45 孔 $\Phi 60\text{mm}$ 的出水孔，布置方式见图 8.2，按 5cm 淤沙考虑，结合门顶溢流，利用潮差自引水冲淤的冲淤效果见图 8.3。试验结果证明，通过调整冲淤管道离地高度、管嘴型式、管嘴布置等就可实现水闸冲淤的效果。采用该优化冲淤方案可以取得较好结果。

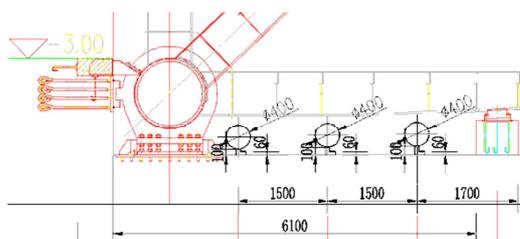


图 8.2 闸底板冲淤管布置图



图 8.3 组合冲淤效果图

9 结语

底轴驱动式翻板闸门的工程应用给我国的城市水环境水生态建设带来了技术进步和发展,但工程设计和施工中的一些关键技术问题需要认真对待和处理,尤其对于跨度大、感潮河段泥沙淤积较大区段的闸门结构特别需要加以重视和关注。通过本文研究可获得如下结论:

(1) 由受力分析得知,该门型的闸门结构的设计因分别考虑上部门叶与底轴两个主要部件的位移和应力问题。

(2) 鉴于基础沉降量对底轴驱动翻板门受力产生显著影响,因此设计和施工部门应严格控制闸门基础沉降量,防治沉降过大引起底轴支座受到挤压,导致应力集中问题的产生,损伤底轴和支座结构。

(3) 水弹性振动试验结果指出,闸门结构的较大振动量与门顶射流下方的负压空腔密切相关,若要控制闸门的振动量,需要考虑破除负压空腔及输气问题。

(4) 门后两侧边墙设置通气孔,并在门顶布置破水器可有效破除负压空腔,实现自行向负压空腔补气达到压力动态平衡的效果。

(5) 底轴驱动翻板门在泄流运行中出现消力池底板掀起失事事故,也是该类门型的设计和施工过程需要高度重视的问题。底板振动试验结果显示,在泄流动荷载作用下产生振动的动力源位于水舌冲击点附近,此时若止水损坏,动水压力进入底板下部,就有可能引发底板抬升失事。因此工程设计时需要兼顾有效避开射流水舌击落点对底板分缝的直接冲击,也要做好防渗帷幕和底板排水的设计布置,确保消力池底板的稳定。

(6) 鉴于部分工程水闸泄洪时,下游防冲槽及下游河道近底流速 $v > 1.0\text{m/s}$,因此也需要注意加强防冲槽下游水流淘刷及防冲安全。

(7) 泥沙淤积是一个感潮河段水闸面临的又一棘手问题,需要慎重对待。设计阶段首先要做好泥沙淤积资料的收集和整理,包括沙粒构成、淤沙速度及板结力参数等,在此基础上采用有效冲淤防淤措施予以解决,确保工程安全可靠地运行。

参考文献

- [1]严根华,苏州河河口水闸金属结构数学模型分析研究,水利水电科技进展,增刊,2007.4
- [2]严根华,我国大跨度闸门应用趋势与抗振对策,水利水运工程学报,2009.4 期
- [3]徐惠明、严根华、陈照,中山河翻板闸门流激振动试验及优化设计,人民黄河,2018.7
- [4]严根华,大跨度特型闸门流激振动及控振措施研究,水利与建筑工程学报,2018.10
- [5]NB 35055-2015 水电工程钢闸门设计规范,中国电力出版社,2016.3
- [6]严根华,淹没水跃作用下大宽高比闸门的流激振动试验研究,振动工程学报,振动工程专集,2005.10

作者简介:严根华,水利部 交通运输部 国家能源局南京水利科学研究院,二级教授,博士

生导师，主要从事水工水力学、水工结构流激振动及动态优化设计研究。

通讯地址：南京市广州路 223 号，邮编：210029

联系电话：13952095958，(025) 85828232

电子信箱：ghyan@nhri.cn

汾河中下游液压升降坝优化设计研究

吴建华, 张少华, 刘慧如, 焦莉雅, 孙志勇, 杜卓, 辛国伟

(太原理工大学 030024)

摘要: 为分析液压升降坝结构失稳问题, 以汾河中下游液压升降坝系统为例, 运用有限元分析法, 建立整体式液压升降坝升降模型, 对液压升降坝特定工况下结构施加荷载进行受力分析, 研究多种因素对液压升降坝结构性能的影响。通过本研究, 可以为液压升降坝特性优化提供技术支持, 研究成果可为其他液压升降坝特性优化参考。

关键词: 生态治理, 液压升降坝, 有限元分析

1 工程概况

汾河作为山西的母亲河, 流域面积为 39471km², 覆盖全省 9 市 51 县, 干流全长为 716km, 流经 6 市 27 县。为科学配置流域内各种水资源, 重建河流水系, 涵养水源, 加强污染防治, 使山水林田湖互相促进, 良性循环, 实现天然自我恢复, 把“海绵城市”扩展到“海绵流域”, 将汾河流域建成全省的生态、宜居、富民长廊, 因此实现汾河中下游流域的水系重建综合治理凸显的十分重要。主要建设内容为: 在汾河的干支流及流域内的重要位置修建一系列能够调蓄洪水的蓄水坝, 使其能够在发挥防御洪水的前提下, 对地下水进行补充。汾河流域生态修复中蓄水工程是整体生态修复项目中重要的一部分, 该工程始于汾河二坝, 终于文峪河汇入口, 全长 82.2km。蓄水工程的主要建设内容是在汾河干流修建 15 座用于蓄水行洪的液压升降坝, 本论文结合设计方案, 对汾河中下游液压升降坝的特性进行分析特探讨, 以期对液压升降坝的优化设计起到一定的指导作用。

2 液压升降坝研究现状

液压升降坝在实际应用中有诸多优点, 但由于其理念提出及实际应用时间较短, 目前对液压升降坝理论研究资料较少。杨绍金, 肖建军^[1]等为了解决橡胶坝在南方地区使用寿命短暂等问题, 提出了与液压升价坝相结合的新型坝, 同时提出一种新的运行方式。陈业银, 任华春^[2]等分析介绍了液压升降坝的坝体结构、工作原理及特有的特点, 在结合液压升降坝不同与其他坝型的结构特点及在实际工程中的运行工作特点, 采用相关有限元分析方法和软件建立了液压升降坝的三维模型, 对不同工况情况下的液压升降坝面板进行结构应力和应变分析, 并研究了其工作性态。倪洪启, 王帅军^[3]利用 BP 神经网络 PID 控制对液压控制系统进行改进, 实现对滑块位移精确的控制。王新宇^[4]介绍了液压升降坝地基处理的方式及冬季施工注意问题。液压升降坝是在改进传统活动坝型的基础上新兴的坝型, 其本身保留了其他坝型的基本优点, 有具有本身的结构特点。液压升降坝结构更加科学合理, 在受力时具备较大优点, 同时其运行灵活不易发生阻水现象且下泄洪水能力较强; 由于其升降比较方便, 使其不受河流上的漂浮物影响, 利于河道环境维护。

3 液压升降坝阀门结构有限元分析

3.1 有限元分析法

1) 结构离散化

结构离散化是将连续体划分成为可计量个单元组成的计算模型，各个计算单元间有特定的节点链接。在进行结构离散化时，要综合分析多方面的因素，再来确定计算单元的大小及个数。

2) 确定位移差值函数

确定位移差值函数在完成连续体结构离散化的基础上，寻求各因素之间关系，利用节点位移表示相应计算单元的位移及应力应变值。如图 2-1，该单元为一个三角形单元，三个节点 a, b, c 的坐标分别为 (X_a, Y_a) 、 (X_b, Y_b) 、 (X_c, Y_c) ，其对应 X, Y 坐标轴位移分别为 U_a, V_a ； U_b, V_b ； U_c, V_c 。

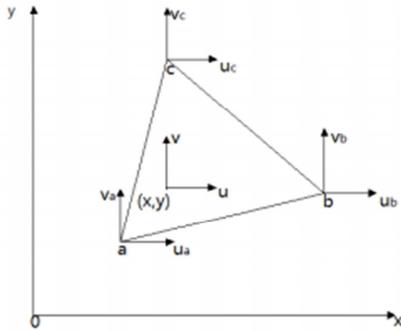


图 3.1 三角形单元

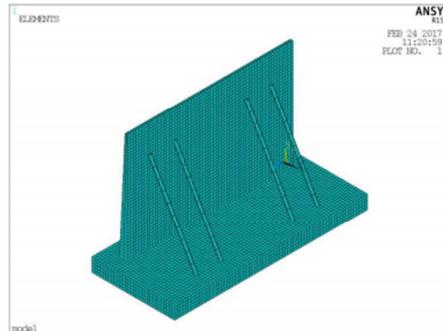


图 3.2 液压升降坝结构模型图

$$\text{位移矩公式: } \{f\} = [N]\{\delta\}^e \quad (3-1)$$

式中： $\{f\}$ —单元内任意一点位移； $[N]$ —转换矩阵； $\{\delta\}^e$ —单元节点位移。

3) 分析单元力学特性

$$\text{单元应变节点位移表达公式: } \{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}^e \quad (3-2)$$

式中： $\{\varepsilon\}$ —单元应变； $[B]$ —应变几何矩阵；

$$\text{单元应力通过等效的单元节点力代替，单元应力公式: } \{\sigma\} = [D][B]\{\delta\}^e \quad (3-3)$$

式中： $\{\sigma\}$ —应力单元； $[D]$ —与连续体结构材料有关的弹性矩阵。

$$\text{由变分原理得到的平衡方程: } [F]^e = [K]^e\{\delta\}^e \quad (3-4)$$

式中： $[F]^e$ —单元节点力； $[K]^e$ —单元矩阵； $[K]^e = \iiint [B]^T [D] [B] dx dy dz$

4) 构建整体结构平衡方程

综合分析结构的平衡条件和边界条件，在分析的基础上运用分析结果建立整体结构

$$\text{的平衡方程，总刚矩阵}[K], \quad [K] = \sum [K]^e \quad (3-5)$$

$$\text{平衡方程: } [K]\{\delta\} = [F] \quad (3-6)$$

$$\text{5) 单元应力计算: } \{\sigma\} = [S]\{\delta\} \quad (3-7)$$

式中： $[S]$ —几何矩形。

3.2 液压升降坝结构模型建立

利用 ANSYS 软件，对液压升降坝结构进行静力与动力分析^[5]。由于液压升降坝面板具有大量钢筋且钢筋分布较均匀，选择整体模型进行建模，以 4m 高的液压升降坝单个坝段作为计算分析对象，即沿坝轴线宽 6m 坝段，研究上游水位 4m，下游无水的情况；坝面主要受力为迎水面的静水压力和闸门自重；研究对象为液压升降坝坝面和与坝面铰连在一起起支撑作用的支撑杆；边界条件为：对支撑杆底部节点施加全部约束，通过对将 x 方向、Y 方向、Z 方向的节点自由度进行耦合来模拟铰连接，在坝面与基础接

触的一面上施加 X 方向、Y 方向、Z 方向的节点三向线位移约束。坝面和混凝土闸基利用 solid65 进行单元网格划分，支撑杆和液压杆利用 beam 188 单元进行单元网格划分。基于 ANSYS 有限元分析软件初步建立液压升降坝模型如图 3.2。

4 液压升降坝结构分析

4.1 坝面尺寸不同

对 4m 高液压升降坝坝面尺寸进行结构分析时，保持坝面高度，长度不变，通过改变坝面顶部厚度，查看不同尺寸下，坝面位移及受力分布变化情况。坝面底部厚度取 0.3m，坝面顶部厚度分别取 0.3m，0.2m，0.1m 三种厚度，分析三种尺寸的坝面位移及第一主应力受力分布变化情况。

坝面顶部厚度为 0.3m，0.2m，0.1m，坝面受力后最大位移分别为 1.21mm，1.49mm，2.52mm，随着坝面顶部厚度变小，坝面受力后位移呈现变大的趋势，但最大变形位置不变，且出现在坝顶中变部位。通过三幅坝面位移图可以看出，随着坝面顶部厚度变小，坝面位移大小分布趋势发生变化，相同位移带呈现“凹”。

坝面顶部厚度为 0.3m，0.2m，0.1m，坝面第一主应力最大值分别为 6.77mpa，7.76mpa，13.2mpa，第一主应力最大值皆出现在坝面和支撑杆接触处，且随坝面顶部厚度变小呈现变大趋势。第一主应力分布随着坝面顶部厚度变小而变化，应力在坝面和支撑杆接触处发生突变的范围越来越大。

通过上述分析对比可以得出坝面顶部厚度变化对坝面位移、受力大小及分布情况有较大影响，坝面受力后位移和第一主应力最大值皆随坝面顶部厚度变小而呈现变大的趋势，最大变形位置和第一主应力最大值出现位置不变，随着坝面顶部厚度变小，坝面位移大小分布趋势发生变化，相同位移带呈现“凹”，应力在坝面和支撑杆接触处发生突变的范围越来越大。

4.2 坝面安放角度不同

通过调整支撑杆位置，可使液压升降坝挡水高度在一定范围内变化，此时坝面与铅垂面呈现角度称之为安放角度，通过改变坝面不同角度，分析不同角度下坝面位移及受力变化情况，分析坝面安放角度为 0°，15°，30°时坝面位移和第一主应力受力情况。

0°，15°，30°三种安放角度坝面位移趋势没有改变，最大位移出现在坝面顶部中间位置，最大位移值依次为 2.52mm，1.84mm，1.52mm，呈现减小趋势。

0°，15°，30°三种安放角度坝面第一主应力整体趋势没有较大改变，但在支撑杆与坝面接触位置处第一主应力分布情况变化较大，最大应力值区间所分布的面积随安放角的增大而增大。最大应力值皆存在支撑杆与坝面接触位置，最大应力值依次为 13.2Map，4.35Map，3.21Map，呈现减小趋势。

通过上述分析对比可以得出随坝面安放角度变大，坝面受力后位移和第一主应力最大值呈现减小趋势，坝面第一主应力分布整体趋势没有较大改变，但在支撑杆与坝面接触位置处第一主应力最大值分布区间面积随安放角的增大而增大。坝面安放角度变化对坝面位移及受力大小及分布情况都有较大影响，在调整支撑杆位置改变液压升降坝挡水高度，需注意坝面位移及应力是否在安全范围内。

4.4 汾河中下游干流蓄水工程 4m 坝整体结构性能分析

汾河中下游生态治理工程中采用的 4m 高液压升降坝如图 4.1，图 4.2，进行液压升降坝结构性能分析。

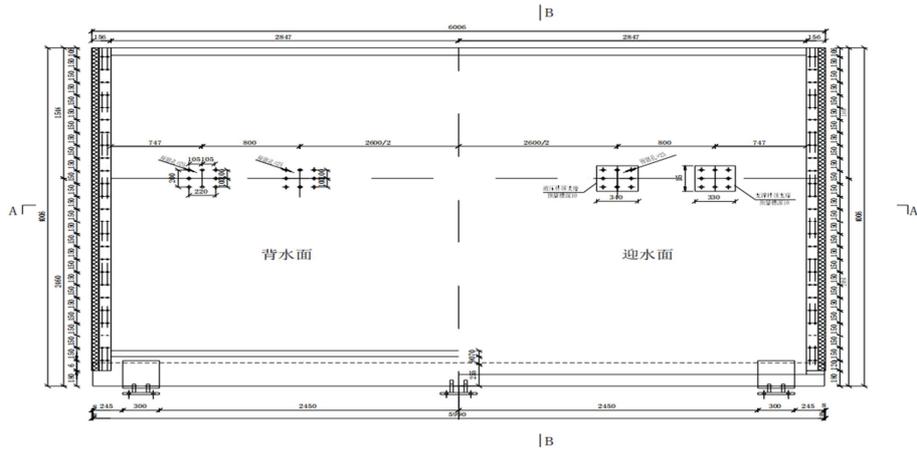


图 4.1 液压升降坝坝体平面布置图 (单位: mm)

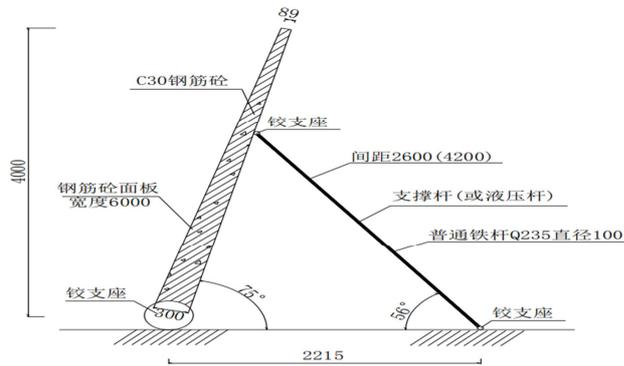


图 4.2 液压升降坝坝体坝体计算简图 (单位: mm)

1) 支撑杆稳定性判断依据

支撑杆判断依据利用材料力学计算方法得出, 具体步骤如下:

基本资料: 支撑杆长度因素 μ 取 1, 支撑杆长为 2.627m, 支撑杆横截面形心主惯性矩为 $4.9e-6m^4$, 截面面积为 $0.00785m^2$ 。

支撑杆类型判断: 支撑杆细长比由公式 4-1 得, 根据欧拉公式 Q235 支撑杆的临界细长比为 100, 判定该受压支撑杆为细长杆。

$$\lambda = \mu L \sqrt{I \setminus A} \quad (4-1)$$

式中: μ —长度因素; L —杆长, m; I —杆横截面形心主惯性, m^4 ;
 A —杆横截面面积, m^2 ;

稳定临界应力: 根据欧拉公式 4-2 计算得稳定临界应力 $\sigma_{cr} = 178.859Map$

$$\sigma_{cr} = \pi^2 E \setminus \lambda^2 \quad (4-2)$$

2) 结构有限元分析

在 2.1 介绍的建模的基础上进行坝体结构有限元分析, 坝体面板位移, 第一主应力, 第三主应力及液压杆应力分布见图 4.3-图 4.6。

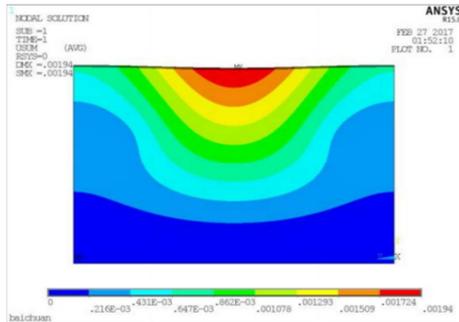


图 4.3 面板位移分布图 (单位: m)

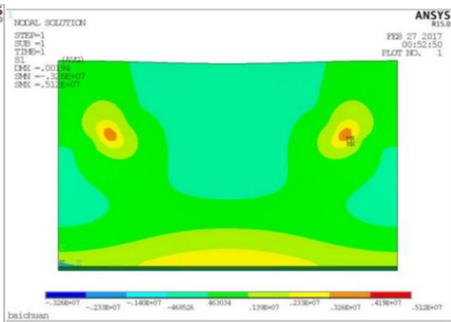


图 4.4 面板第一主应力分布图 (单位: pa)

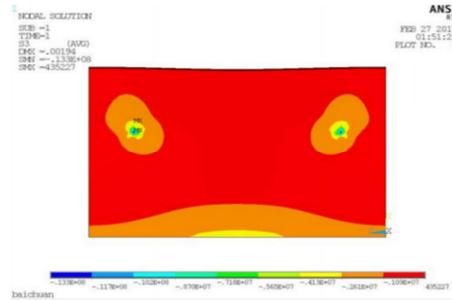


图 4.5 面板第三主应力分布图 (单位: pa)

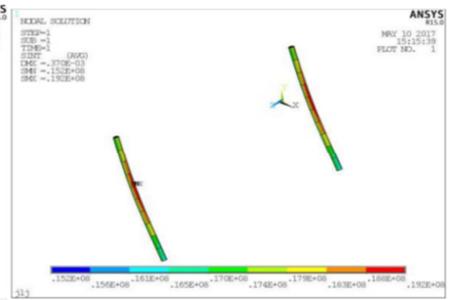


图 4.6 支撑杆应力分布图 (单位: pa)

通过上述有限元分析结果可以看出: 在上游 4m 高的水头作用下, 压应力和拉应力最大值出现范围都比较小, 且最大值都出现在坝面与支撑杆接触位置, 此位置产生应力集中问题, 拉应力最大值 5.12 Mpa 超过了混凝土 C30 的轴向抗拉标准 2.01Mpa, 可通过采用钢构件加固方案, 增大该处抗拉强度及抗压强度, 解决应力集中的问题。坝面的压应力和未出现应力集中部位的拉应力均未超过材料的抗拉、抗压强度指标, 支撑杆承受的轴向最大压应力为 19.2 Mpa 也未超过由公式 4-2 计算的稳定临界应力 178.859Map, 支撑杆结构稳定不需要进行额外加固处理。

4 结论

(1) 液压升降坝结构性能优化, 应着重考虑坝面顶部厚度以及坝面安放角度的变化, 为减小坝面和支撑杆处应力突变范围和坝面位移与应力, 在满足设计要求且保证坝面位移和受力大小安全的情况下, 可以减小坝面顶部厚度, 以节约建筑材料, 实现坝面最优。在调整支撑杆位置改变液压升降坝挡水高度时, 需注意坝面位移及应力是否在安全范围内。

(2) 在上游 4m 高的水头作用下, 压应力和拉应力最大值出现范围都比较小, 且最大值都出现在坝面与支撑杆接触位置, 此位置发生形态突变, 产生应力集中问题, 致使拉应力超标, 可通过采用钢构件加固方案, 增大该处抗拉强度及抗压强度, 解决应力集中的问题。

(3) 在以上优化研究的基础上, 总结经验, 以期为山西汾河流域、沁河、滹沱河生态修复工程提供技术支持。

参考文献

- [1] 杨绍金, 肖建军, 钱圣, 等. 一种新型复合坝在城市河道中的成功运用 [J]. 水利水电技术, 2016,47(5):29-32.
- [2] 陈业银, 任华春, 朱水生. 液压升降坝工作原理及结构性态分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 69-72.
- [3] 倪洪启, 王帅军, 王树强等. BP 神经网络 PID 控制对液压控制系统的改进[J]. 锻压技术, 2015, 40(11): 67-70.

- [4] 王新宇. 预制混凝土底板在汾河流域生态修复工程中的应用[J]. 技术与应用, 2016(9): 46-47.
- [5] 刘涛, 杨凤鹏. 《精通 ANSYS》[M].清华大学出版社,2002

云南保山红谷田水库分层取水方案的设计

马丛科，韩云峰，蔡一飞

(云南省水利水电勘测设计研究院，昆明 650051)

摘要：随着社会经济的发展，生活用水、生态流量等对水库原水的质量要求越来越高。除上游流域的环境保护、水源水库的合理选址及设计外，合适的分层取水措施也可获得更好的原水水质。本文介绍了红谷田水库的小流量分层取水设计方法，对类似的水库分层取水方案具有参考价值。

关键字：红谷田水库、小流量分层取水、长杆闸阀

1. 工程概况

红谷田水库位于云南省保山市施甸县老麦乡红谷田村附近，是一座解决周边集镇供水、农村人畜饮水及农业灌溉的综合水利枢纽工程，该工程枢纽建筑物由拦河坝、溢洪道、导流输水隧洞组成。根据规划设计成果，农村人畜饮水流量为 $0.065\text{m}^3/\text{s}$ ，生态放水流量为 $0.077\text{m}^3/\text{s}$ 。

2. 分层取水的必要性

在不需下泄灌溉流量期间，若通过导流输水隧洞闸门下泄流量较小的人畜饮水流量和生态放水流量，会导致闸门开度不易控制、闸门检修频繁等问题。因此，红谷田水库单独设置取水装置以满足人畜饮水流量和生态放水流量要求。

取水装置除了满足流量要求外，还应优先获取水库表层水。原因是红谷田水库水源主要是雨季地表径流水，水源中含有较多氧化物，一些氧化物容易累积于底层水中，并分解出铁、锰等物质，导致水质下降；其次，由于有机物质残屑下沉，底层水较表层水具有较高浓度的磷酸盐、氨、硫化氢等，水中异味较难消除，增加了下游水厂的处理难度和成本；另外，底层水容易出现低温浑浊现象，对下游生态植物造成不利影响。综上所述，红谷田水库单独设置分层取水装置来获取水库表层水，满足农村人畜饮水流量和生态放水流量要求。

3. 分层取水方案的选定

红谷田水库采用卧管取水方案：沿水库上游边坡设置取水卧管一根，卧管采用 DN325mm 无缝钢管 ($\delta=8\text{mm}$)。以 2m 高程差在卧管不同位置设置 24 级取水口，取水口尺寸为 DN300mm。当水库水位变化时，通过开启或关闭相应取水口来达到取表层水的目的，如图 3-1 所示。取水口可通过木塞、拍门、阀门等控制。

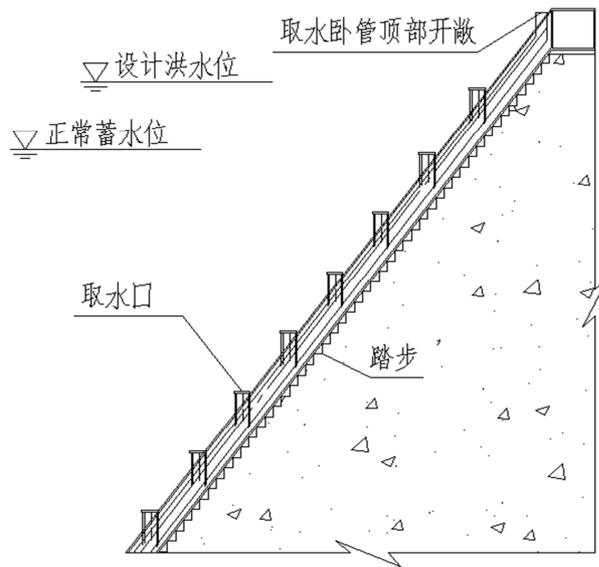


图 3-1

3.1 木塞控制

采用木塞控制取水口，优点是造价低廉。缺点是木塞常年日晒水泡，容易损坏，造成止水效果下降，无法满足工程运行要求。同时，木塞经常裸露在外，容易被盗，增加了工程运行人员的管理难度。本工程未采用此方案。

3.2 拍门控制

采用拍门控制取水口，通过连接在拍门阀板上的链条手动开启拍门，实现表层取水，如图 3-2。该方案优点是拍门不易被盗，缺点是拍门止水效果不理想，密封圈容易老化。其次，启闭拍门所需拉力较大，在启闭过程中可能存在滑落水中等危险，增加了运行管理人员的劳动强度且有一定危险性。本工程未采用此方案。

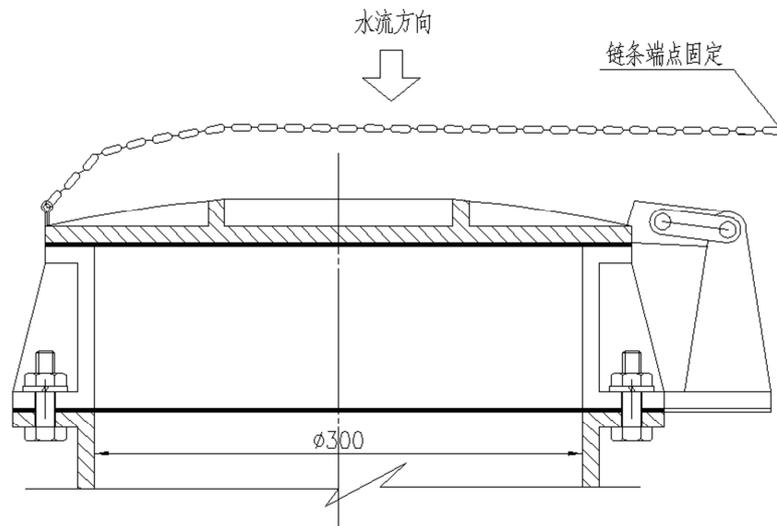


图 3-2

3.3 闸阀控制

采用闸阀控制取水口，运行管理人员在操作平台通过阀杆完成闸阀的开启或关闭，如图 1-3。采用本方案控制取水口稳定性高，止水效果好。与拍门相比，闸阀的启闭更为省力，降低了管理人员的劳动强度。同时，在阀杆操作平台边缘设有栏杆，提高了操作人员的安全性。因此，本工程采用此方案。

闸阀进水面设置拦污栅。为方便检修，拦污栅与闸阀、闸阀与管道均通过法兰连接。闸阀的阀体采用球墨铸铁，阀板以及阀杆采用不锈钢，阀杆根据工程需要采用加长型，阀杆长度为 3 米。在阀杆上设置标识，当阀杆露出水面后可明显观测到阀门状态（开启或关闭），便于运行管理。

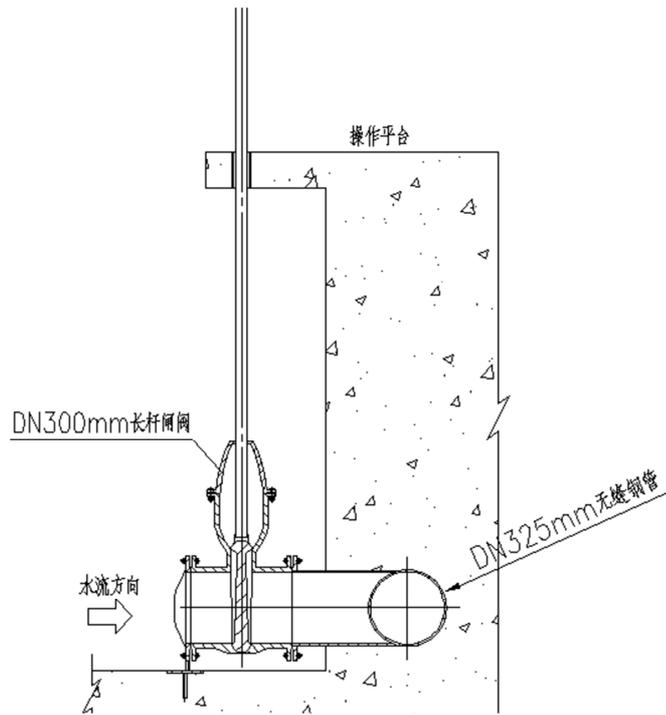


图 3-3

4. 结论

红谷田水库分层取水装置采用长杆闸阀方案，目前已安装调试完毕，阀门操作简单，进水时未出现明显震动，情况良好。

该方案在保证供水流量的前提下，减轻了运行管理人员劳动强度，提高了输水水质，降低了下游水厂原水处理成本，保护了下游生态植物，可供类似小流量分层取水设计作参考。

参考文献

- [1]黄永坚. 水库分层取水[M]. 北京：水利电力出版社，1986
- [2]杨晓红, 郑俊, 常艳春, 陈江, 吴惠英. 中型水库水温分层的影响及分层取水建议[J]. 城镇供水, 2014(5): 62-66
- [3]肖功伟, 袁新民, 黄福贵, 向红. 山江水库取水卧管改造[J]. 湖南水利水电, 2001(1): 9-10
- [4]王煜, 戴会超. 大型水库水温分层影响及防治措施[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2009(6): 11-14
- [5]朱伯芳. 库水温估算[J]. 水利学报, 1985(2): 12-21
- [6]高学平, 赵耀南, 陈弘. 水库分层取水水温模型试验的相似理论[J]. 水利学报, 2009(11):

1374-1380

基于风光互补的直流驱动系统及其在智慧水利中的应用

冯克列 李瑶 王易钱 魏建宏 邓星星 方泰军

常州兰陵自动化设备有限公司, 江苏 常州 213031

摘要: 发展智慧水利, 离不开信息的采集、传输和远程控制等技术支撑, 为了解决智慧水利项目中由于选址偏远所带来的终端系统供电问题, 提出基于风光互补的直流驱动系统解决方案。在介绍了基于风光互补的直流驱动系统总体设计的基础上, 详细描述了整个系统的主要功能模块, 通过研发基于物联网的智能管控平台, 提高整体系统监测和管理效率, 使其更加智能化、数字化、规范化。

关键词: 风光互补; 直流驱动系统; 智慧水利; 物联网; 管控平台;

0 引言

随着科学技术的发展和人类环保意识的增强, 对于清洁能源的开发和使用越来越受到重视, 其中风能、太阳能、水能、地热能和海洋能等可替代能源由于其储量巨大、清洁、使用过程中污染少等特性得到大家广泛关注^[1]。然而采用某种单一的资源供电, 会受到地理位置和时间等方面的限制, 造成电力供应不足或不平衡等问题, 如何寻求多种资源有效互补成为研究的热点。由于风能和太阳能在时间上拥有昼夜互补性和季节互补性, 同时在地域上也具有很强的天然互补性, 使得风光互补发电系统成为实现可再生能源综合优化利用的有效途径之一^{[2][3]}。

国外在风光互补发电方面研究比较早, 1981 年, 丹麦的 N. E. Busch 和 I. K. Ienbach 就提出太阳能和风能混合利用技术问题; 2006 年, 加拿大 Ssaka Tchewan 大学的 R. Karki 等人研究了独立小型风光互补发电系统的成本及可靠性问题, 给出解决方案^[4]。近年来, 国外相继开发出一些模拟风力、光伏及其互补发电系统性能的大型工具软件包, 通过模拟不同系统配置的性能和供电成本可以得出最佳的系统配置。我国风光互补发电系统还处于起步阶段, 但发展迅猛, 2000 年, 我国风光互补路灯照明系统中风机容量为 400W, 光伏容量为 120W, 到了 2010 年, 仅山东泰安通信基站供电系统中的风机容量和光伏容量就分别达到 2kW^[5]。

目前, 随着太阳能光伏电池板技术的不断提升, 风光互补系统造价大大降低, 已广泛应用于各行各业。本论文将面向水利行业, 提出基于风光互补的直流驱动系统解决方案, 设计了远距离输水智能测控系统, 开发了基于物联网的智能管控平台, 提高整体系统监测和管理

效率，使其更加智能化、数字化、规范化。

1 系统整体设计

在水利工程中，特别是远距离输水项目中，输水管道一般铺设在野外，远离电网覆盖地区，阀门启闭的动力来源若采用电网线路架设的话，则长度较长，电力线路所经之处占用的土地较多，且后期维修较为困难，如何解决电力供应问题成为项目成功实施的关键。采用风光互补发电系统，利用风能与太阳能很好的互补性，并且两个发电系统可以共同使用部分蓄能设备和控制器件，可以提高资源利用率、降低成本且运行方式灵活^[6]。可见，风光互补自供电智能测控系统可以为这些偏远地区提供低成本、高可靠性且不会破坏生态环境的清洁电力，是满足水利工程的需要、解决偏远地区供电问题的最优选择。

近几年，随着风力发电技术和太阳能光伏发电技术的日臻完善，为风光互补发电系统的发展及推广奠定了坚实的基础。通常，风光互补发电系统由风力涡轮发电机，太阳能光伏发电阵列，风光互补系统控制器，蓄电池组，逆变器，交流负载、直流负载以及其他部件组成^[7]。发电系统工作时输出直流电，直接供给直流负载使用；也可以经蓄电池存储，然后由蓄电池向用户提供稳定的电能；若用户使用的是交流电，则可通过逆变器将直流电转变为交流电供交流负载使用。然而采用逆变方式对发电设备电能的损耗很大，效率低，而且大功率逆变器成本也比较高，另外采用逆变方式且在夜晚或阴雨无光时段使用时，仅靠电池组电量进行逆变，无法连续使用，存在安全隐患。因此，本文设计一种基于风光互补直流自供电智能测控系统，其结构如图 1 所示。

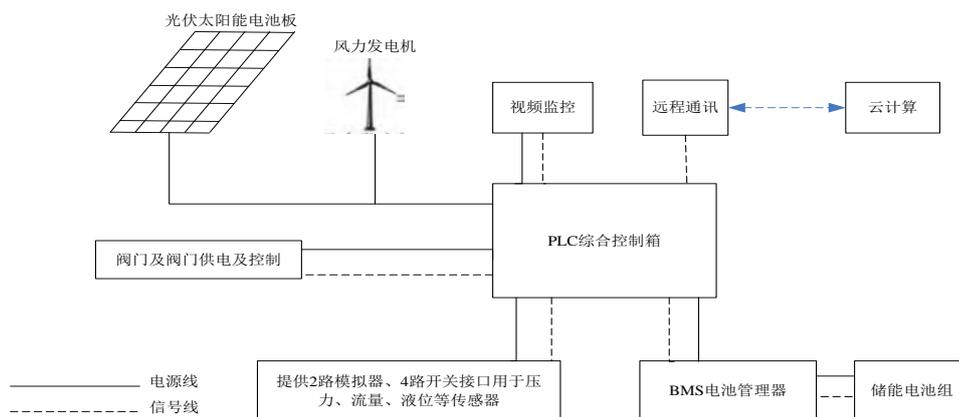


图 1 风光互补直流自供电智能测控系统

由图 1 所示，本风光互补直流自供电智能测控系统将光伏太阳能电池板和风力发电机与 PLC 控制箱相连，然后通过直流永磁无刷电机对水阀门进行控制，它主要由太阳能光伏板及

控制器、风力发电机及控制器、智能测控可编程 PLC 控制箱、储能电池组及 BMS 电池管理系统、阀门及闸门直流负载管控、视频监控、流量/压力/液位传感器信号采集、远程数据通讯等组成。系统中配置有专用防雷 SPD 浪涌保护器，所有主控设备均防电磁干扰，逐一进行严格的 EMC 电磁兼容性试验，可靠保障设备不受雷电及外界信号骚扰，稳定有效运行。

2 系统主要功能模块

2.1 太阳能发电模块

对于光能的应用是通过光伏发电技术利用转换效率较高的单晶硅太阳能电池板对光能进行采集，而且其在弱光环境下也能进行稳定的光电转换，光电转换效率为 17%左右，最高的达到 24%。在平均光照条件差、阴雨天多的地区也很适宜。

在 PLC 综控箱内设置了光伏控制器，其采用 MPPT 控制算法，使其在任何环境下均能快速追踪到光伏阵列的最大功率点，实时获取太阳能电池板的最大能量，使太阳能光伏板获取光能效率更高。

2.2 风能发电模块

风力发电技术在日益发展，通过利用风力发电机将风能转化为机械能，最终完成供电目的。在 PLC 综控箱内设置了风电控制器，其专为风力发电机控制和蓄电池组充电而设计，最大功率跟踪，智能监测并进行调节和控制风力发电量，采用 PWM 无级卸载方式控制风机发电，有效调节电流电压。还有限速保护功能，防止风力过大对风机造成损坏。

2.3 PLC 综合控制箱

PLC 综合控制箱是智能测控系统的大脑，它同时连接着光伏发电、风力发电管理模块，BMS 电池管理、直流驱动控制模块，视频监测模块、流量、液位等管理模块，数据通信管理模块等。这部分可以通过远程通讯对光伏发电、风力发电模块进行管理，实现对阀门控制部分的智能监测和控制。

2.4 BMS 电池管理及储能功能

在独立运行的风光互补发电系统中，储能装置主要是蓄电池。在风力、光照充足时，系统发电量能够满足外界负载，还会多余电能，蓄电池进行充电；在风力、光照不足时，系统无法满足外界负荷需求，蓄电池进行放电，提供给负载，提高供电品质。

一般的电池应用比如路灯照明、视频监控等，仅仅是稳压稳流使用，对电池的保护要求并不高，仅限于单纯的充放电保护。而动力设备所使用的电池需要的电压和电流都比较大，比如 2X80kN 的启闭机所用的直流电机电压 84V，启动电流可达 100A 以上，就需要 7 块 12V 的电池进行组合，电机启动瞬间要释放这么大的电流，就必须要对各个电池进行管理，BMS 电池管理控制器能够对大功率动力电池进行管理和控制。BMS 时刻监控各单块电池的使用状态及寿命，可依据负载设备需求瞬间释放大电流，同时具备充/放电保护、短路保护、电池均衡、低功耗低电流输出、还可在超越环境温度或不使用时自动进入休眠模式，保持电能的充足延长电池寿命。BMS 还设有报警功能，当电量小于设定值时，便会自动发出警示。

2.5 直流控制装置

本系统改变交流阀门电动装置的电机和电气控制方式，通过直流永磁无刷电机对阀门进行控制。直流控制装置采用全智能非侵入式结构，可通过人机交互界面现场标定行程位置、转矩大小及转速大小、输出信号等，并可开、关不同速度或设置多种速度，矢量控制、软启动更加适合对阀门及闸门起闭时的机械冲击保护。这部分具有系统自检等多重保护功能，具有超温、低温、堵转、过力矩、过流、过压、欠压保护等，可靠保障电机长期稳定运行。宽电压适应，电压波动范围高达±50%以上，矢量控制不影响扭矩输出，可小功率替代大功率使用。图 2 所示为针对水利行业专门设计的一款直流阀门电动装置，其产品型号规格及连接接口尺寸采用行业标准，防护等级 IP68，使用环境温度最高 70℃，最低零下 30℃。



图 2 直流阀门电动装置

3 基于物联网的智能管控平台

3.1 智慧水利发展需求

智慧水利旨在应用云计算、物联网、大数据、移动互联网和人工智能等新一代信息技术，实现对水利对象及活动的透彻感知、全面互联、智能应用与泛在服务，从而促进水治理体系

和能力现代化^{[8][9]}。在“智慧水利”理念的引导下，水利主管部门的管理方式也发生了变革，各种信息技术得到应用。通过采用各种传感设备在线检测水务系统的运行状态，并利用无线传输技术进行信息发送，采用可视化的方式有机整合水务管理部门各种设施和装置，形成“水务物联网”。因此，有的学者把智慧水利利用一个简单的理论公式来表达，即“智慧水利=物联网+人工智能+水利应用”^[10]。

为了满足智慧水利的发展要求，需要通过水务数字化管理平台将海量数据进行及时分析与处理，将传统自控系统中的数据通过无线网络实时传输到总部，进行集中存储和应用。进一步，还需要通过对各类关键数据的实时监视和智能分析，提供分类、分级预警，给相关部门辅助决策建议，以更加精细和动态的方式管理系统的整个流程，使之更加数字化、智能化、规范化，从而达到“智慧”的状态。

3.2 智能管控平台整体架构

根据智能水利的总体需求，研发了基于物联网的风光互补直流直供电智能测控系统智能管控平台，通过无线网络进行远程数据通讯，充分利用大数据、物联网、移动互联网和人工智能等技术，从宏观向精准定向转变，从而使管理更加动态、更加科学。系统整体架构如图3所示，该系统集数据采集、云端存储、智能分发、远程控制、权限认证和多终端可视化展示于一体。

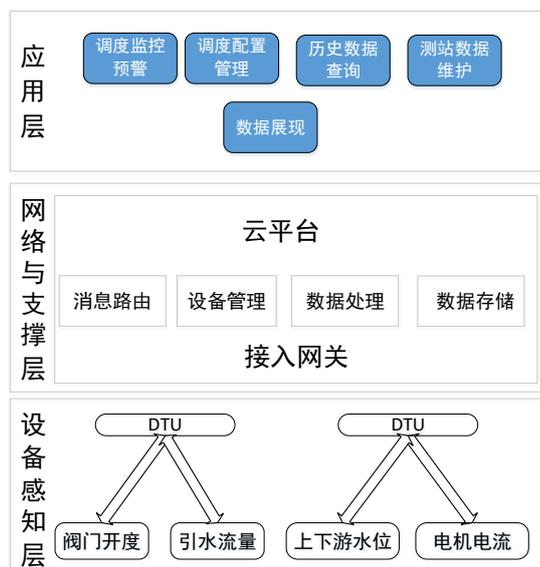


图3 基于物联网云平台的智能管控系统架构

3.3 管控平台软件开发

基于物联网的风光互补直流直供电智能测控系统远程管理界面如图 4 所示。该智能管控平台分别提供基于 WEB 和移动设备的应用客户端，用户可以通过登录应用客户端在该平台查看前端设备的实时运行工况，调阅历史运行记录和统计分析结果，亦可调用平台提供的统一的数据接口，访问和管理前端设备，为进行系统集成、二次开发和智能化管理提供数据支撑。图 5 为后台数据界面。



图 4 远程管理界面



图 5 后台数据界面

4 系统应用实践

随着水利供水工程的发展和水利自动化要求的不断提高，对远离电网覆盖地区的供水管道、渠道的运行控制及信息采集，都需要低成本、高可靠性的独立供电系统。本文设计的基于风光互补的直流驱动系统在很多已建系统改造，新建系统中得到越来越多的应用，发挥着

重要作用。下面分别针对已建系统改造和新系统，介绍本系统的应用情况。

4.1 卷扬启闭机闸门改造项目

对于大量已建水利系统，很多采用的是传统的阀门、螺杆启闭机闸门或者卷扬启闭机闸门，利用本系统对其进行改造，改造工作量小，新增成本低，很容易接入智慧水务平台，完全可以满足智慧水利的发展需求。

下面以卷扬启闭机闸门改造为例进行介绍，其中：闸门本体不用改动，单/双吊点卷扬机变速箱也不用改动，只需将交流电动机改为同功率的直流电动机，原交流控制系统全部改为直流控制系统。在闸门房屋顶上适当位置，增加风力发电机、太阳能光伏板和其安装固定的支杆，光伏板的数量依据闸门大小和启闭频次决定。系统结构示意图如图 6 所示：

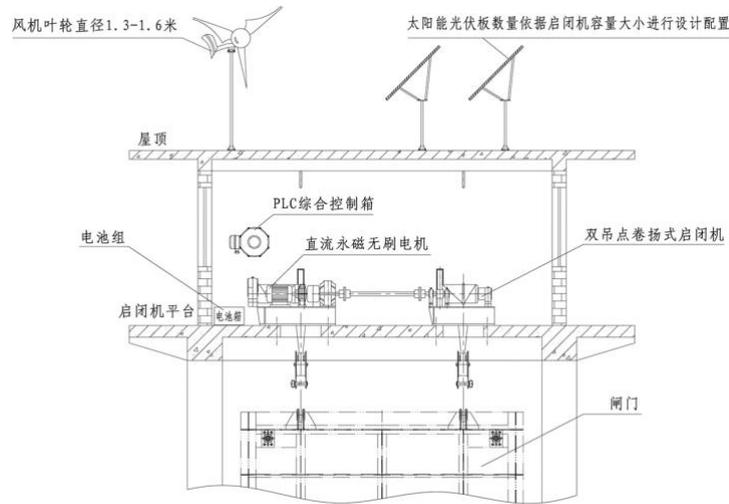


图 6 基于风光互补直流驱动系统的卷扬启闭机闸门

4.2 新建输水工程项目

下面介绍本系统在某灌区供水工程中的应用。该项目驱动装置主要参数要求如表 1 所示：

型号	螺杆规格	行程(m)	数量	计算所需转矩	驱动装置参数		
					额定转矩	额定转速	额定功率
125kN/50kN	Tr85×12	4.5	1	827N.m	900N.m	18r/min	2.5kw
80kN/30kN	Tr75×10	3.1	9	502N.m	600N.m	18r/min	1.5kw
50kN/20kN	Tr65×10	2.2~3.9	23	283N.m	300N.m	24r/min	0.75kw
30kN/10kN	Tr55×10	1.5~2.2	24	146N.m	200N.m	24r/min	0.55kw

该项目所在地的环境条件如下：海拔高程：~480.00m；多年平均气温：16.1~17.4℃；

极端最低/最高气温：-5.4/40.2℃；多年平均相对湿度：78~83%；实测最大风速：22.0m/s，风向：SSW；地震基本烈度Ⅶ度。可见采用本系统完全可以满足要求，目前项目已经顺利实施。图7为本系统在不同项目中的实物图：



图7 基于风光互补直流驱动系统实物图。

5 结束语

随着智慧水利的发展，对系统感知、传输和控制的需求越来越多。本文重点介绍了基于风光互补的自供电直流驱动系统，并将其用于智慧水利中，为偏远地区提供低成本、高可靠性且不会破坏生态环境的清洁电力，保障系统更加安全、清洁、高效的运行。并研发了基于物联网的智能管控平台，通过无线网络进行数据传输，运用物联网、云计算等技术将数据采集、云端处理、智能控制等融合在一起，按照水利数据实时汇集、共享服务、快速响应要求，逐步构建人工智能、大数据和专业模型等于一体的水联网系统，最终实现智慧水利的发展目标。

参考文献：

- [1] 李冲, 郑源, 周发州, 等. 储能技术在独立风光互补发电系统中的应用及展望[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2011,9(4):21-27.
- [2] 郭创新, 张理, 张金江, 等. 风光互补综合发电系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013(1):102-108.
- [3] 马苗苗, 邵黎阳, 潘军军, 等. 风光互补发电系统的监督预测协调控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018,49(10):244-251.

- [4] 朱芳, 王培红. 风能与太阳能光伏互补发电应用及其优化[J]. 上海电力, 2009(1):23-26.
- [5] 王侃宏, 李昔真, 杨震. 可再生新能源风光互补发电系统的研究应用[J]. 节能, 2017(2):4-8.
- [6] 樊小朝, 史瑞静, 王维庆, 等. 乌鲁木齐地区风光互补发电系统优化研究[J]. 水力发电, 2018,44(3):89-93.
- [7] 李丹, 付静, 姜广军. 风光互补发电系统及应用综述[J]. 赤峰学院学报(自然版), 2014(15):46-47.
- [8] 蔡阳. 智慧水利建设现状分析与发展思考[J]. 水利信息化, 2018,(4):1-6.
- [9] 王忠静, 王光谦, 王建华, 等. 基于水联网及智慧水利提高水资源效能[J]. 水利水电技术, 2013,44(1):1-6.
- [10] 倪建军, 汤敏, 詹万林, 等. 水联网与水利信息化理论探讨及应用实践[J]. 水利信息化, 2016(4):32-35.

Wind-solar hybrid DC power drive system and its application in smart water conservancy

, *, ***

Changzhou Lanling Automation Equipment Co., Ltd., Changzhou 213022, China

Abstract: The development of smart water conservancy is inseparable from the technical support of information collection, transmission and remote control, etc. To solve the power supply problem of terminal system caused by remote site selection in smart water conservancy projects, a solution of DC drive system based on wind-solar complementarity is proposed. On the basis of introducing the overall design of the DC drive system based on wind-solar complementary, the main functional modules of the whole system are described in detail. By developing the intelligent management and control platform based on the Internet of things, the monitoring and management efficiency of the whole system can be improved to make it more intelligent, digital and standardized.

Key words: Wind-solar complementary; DC drive system; Smart water conservancy; Internet of things; Management and control platform.

基于有限元分析的液压坝结构特性研究

吴建华, 焦莉雅, 张景望, 张少华, 孙志勇, 杜卓, 辛国伟

(太原理工大学 030024)

摘要: 本文以南洋河天镇县核心区生态修复工程所使用的一种液压坝为研究对象, ABAQUS 有限元分析模型为手段, 通过控制坝面安放角, 液压缸与坝面的接触位置, 分析液压坝面板在不同工况下的受力情况; 通过对液压缸支撑力、坝面最大应力、坝面最大位移的分析等结构特性研究, 确定液压缸与坝面的最优支撑位置, 以为液压坝的安全稳定运行以及山西南洋河生态修复工程提供技术支持。

关键词: 液压坝, 结构分析, 有限元分析

南洋河天镇县核心区生态修复工程中, 共布置有 3 座液压坝, 其中 1# 坝分为主坝和副坝各一座, 分别位于清水渠和浑水渠内, 3# 和 4# 坝均位于清水渠。本文选取其所使用的最大的坝型 (1# 副坝, 坝宽 6m, 坝高 6m, 尺寸最大, 工况及受力也最复杂) 进行结构特性分析并寻找最优支撑点。

1、液压坝材料本构模型

液压坝是采用自卸汽车力学原理, 结合支墩坝水工结构型式的一种坝型, 具备挡水和泄水双重功能。它的工作原理是门体在液压启闭机的驱动下, 以底部为轴, 带动门板作弧线运动, 实现升坝拦水, 降坝行洪的目的。液压坝是一种平面闸门, 但是它的运行轨迹是一条弧线, 与传统意义的平面闸门作直线运动有着明显的不同。液压坝的构造主要由坝面、液压缸和液压泵站组成。

液压坝在实际运行过程中, 其坝体结构性态与自动翻板门坝具有一定相似之处, 其受力示意图如图 1 所示。

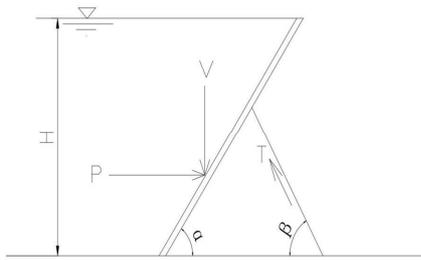


图 1 液压坝受力示意图

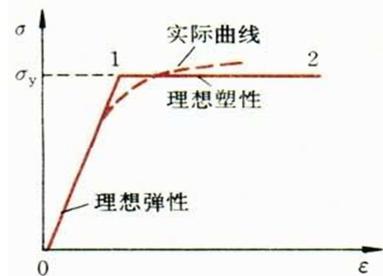


图 2 理想弹塑性体应力-应变图

本文中液压坝面板在有限元分析中设置为钢理想弹塑性模型 (如图二), 忽略材料的强化作用, 在应力达到屈服点以前完全服从胡克定律, 材料一旦屈服应力值不增加, 应变值无限增加, 材料就可以无限变形。

2、液压坝有限元模型的建立

基于上文中提出的材料本构模型, 本文利用 ABAQUS 工程模拟有限元软件建立与上文计算中尺寸一致的液压坝有限元模型。使用 Standard 分析模块对其不同加载工况进行建模及静力学分析求解。模型尺寸根据工程实际设计为 6000mm×6000mm×150mm, 网

格划分尺寸为 10mm×10mm×10mm，网格类型为实体三维 8 节点缩减积分单元（C3D8R）。
 液压坝面板模型在 ABAQUS 中的参数如表 1 所示：

表 1 液压坝面板模型参

材料	密度 (kg/m ³)	E (GPa)	ν	屈服强度 (MPa)
钢	7900	300	0.3	235

将液压坝的两个液压缸支撑杆简化为两个支撑于液压坝面板背后的圆柱体，其横截面与钢板相切，截面为直径 150mm 的圆，分别设置其横截面圆心为参考点，用 RP 表示。将两个圆柱体设置为刚体（RIGID BODY）。液压坝和圆柱体支座使用通用接触，接触类型定义为刚性接触。在载荷（Loading）模块中，将液压缸圆柱体加以完全约束，不可发生位置上的移动和转动；设置液压坝坝面仅可绕底轴转动，使其自由度为 1，只可发生相对转动。液压坝有限元模型如图 3 所示。

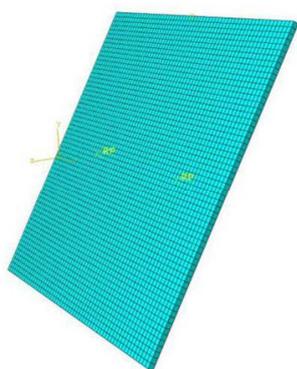


图 3 有限元模型

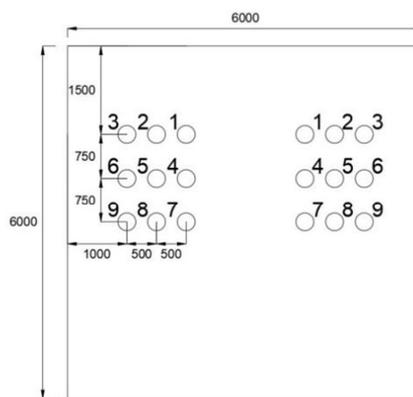


图 4 液压缸与坝面接触位置

在液压坝有限元模拟中，本文通过改变坝面安放角 α 和液压缸与坝面的接触位置，来实现对液压坝的不同工况的加载。控制角 α 设置为 15°、30°、45°、60°、75° 五种工况。两个液压缸对称分布，通过理论计算与模拟分析，如果液压缸与坝面接触位置高于坝面高度的 75%、低于坝面高度的 50%、或靠近坝面两侧或者靠近坝面中轴线时，均会造成坝面变形超过面板弹性变形极限，产生不可逆的塑性变形，造成液压坝的破坏，故选取液压缸与坝面接触位置为 1~9 号，位置分布如图 4 所示。

在 ABAQUS 中几何建模时，坝面与水平面呈直角，在坝面正中心处设置局部坐标系，本文中面板为 6000mm×6000mm×150mm，在距离坝面底部和侧边各 3000mm 处设置为坐标原点，建立局部坐标系。局部坐标系不会随面板与水平面所呈角度的改变而变化。为保证水面处压强为零，在 Loading 模块中的 Analytical Field Manager 中针对不同倾斜角度建立不同的 Expression field，具体设置水压力场如表 2 所示。

表 2 水压力场设置公式

面板角度/°	压强/MPa
15	$P=-9800 \times (Y-2796)$
30	$P=-9800 \times (Y-2196)$
45	$P=-9800 \times (Y-1243)$
60	$P=-9800 \times (Y+124)$
75	$P=-9800 \times (Y+1350)$

3.1 液压缸支撑力分析

在有限元模拟中，本文设置液压缸有三个支撑高度，分别为 4.5m（1、2、3 号支撑

位置)、3.75m (4、5、6 号支撑位置)、3m (7、8、9 号支撑位置)。由于两个液压缸对称分布,高度和中心距都相同,所以受力相同。在模型计算完成后,提取其中一个圆柱体支座的反作用力 (React Force),不同接触位置在不同角度加载下液压缸支撑力和分布如表 3 所示。

表 3 不同接触位置各角度液压缸支撑力 (单位: kN)

位置 \ 角度/°	15	30	45	60	75
1	161.36	168.28	174.75	181.43	182.85
2	161.72	168.50	185.70	181.56	188.22
3	161.39	167.82	174.29	181.18	182.51
4	373.24	389.17	455.29	415.25	406.50
5	426.92	372.51	456.97	498.74	419.12
6	381.39	386.67	456.05	472.60	512.13
7	978.72	1046.94	1075.74	1046.94	1087.28
8	1426.41	1293.65	1428.04	1797.69	1654.51
9	1676.90	1681.50	1698.04	1826.48	1800.15

从表中数据可以看出,三个支撑高度的支撑力数值上没有交叉重叠,大致呈梯度分布,支撑高度越高,液压缸的支撑力越小,支撑高度越低,液压缸的支撑力越大。4.5m、3.75m 支撑高度下的支撑力比较符合实际工程的要求,工程中选用的液压缸也可以满足此支撑高度下的支撑力;而 3m 支撑高度下的支撑力偏大,需要选用更大规格的液压缸才能满足需求,这会大大增加工程的成本,在实际工程中不尽合理。

在每一个支撑位置上,随着坝面与水平面夹角的增大,液压缸支撑力的大小也呈上升趋势。随着夹角 α 的增大,坝前水位随之提升,最大压强也相应增大,整个液压坝坝面所受的压力也增大,导致液压缸支撑力的增大。

3.2、坝面最大应力分析

液压坝设计中,为验算坝体是否符合强度要求,进而确定坝体结构设计,需要进行应力分布的计算。在有限元模拟中,不同工况下钢板上最大应力如表 4 所示,

表 4 不同工况下最大应力表 (单位: MPa)

位置 \ 角度	15°	30°	45°	60°	75°
1	26.16	28.10	29.30	30.60	30.81
2	23.38	24.43	27.29	28.13	44.91
3	23.28	23.96	25.94	27.84	28.33
4	75.59	73.78	82.36	80.44	79.73
5	82.18	70.68	81.20	89.86	80.62
6	67.01	66.78	75.38	75.57	86.00
7	176.23	186.98	197.12	194.53	203.60
8	190.10	211.00	184.90	178.00	173.70
9	191.21	187.63	198.56	206.78	213.88

由表中可以看出,三个支撑高度下坝面最大应力梯度明显,支撑位置越高,坝面最大应力越小,支撑位置越低,坝面最大应力越大。液压缸位于同一支撑高度位置时,随着液压坝坝面与水平面夹角的增大,坝面最大应力变化微弱,且最大应力基本发生在坝面与液压缸接触的位置,其周围应力随各点到支撑位置距离的变大而逐渐减弱。其原因是在液压坝受水的压强载荷作用下其背水侧没有任何约束,只在液压坝低端进行转动

约束，坝体除液压缸支持处均处于自由受力状态。另一方面，坝体采用 Q235 材料，弹性模量较大，在静水压强作用下受力依旧处于弹性阶段。随着液压缸距离坝体底部越来越远，其变形模式发生改变，坝体最大应力值也随着显著增大。

在模拟中发现，3m 支撑高度下最大应力接近液压坝制作材料的屈服强度 235MPa，坝面已经开始出现局部严重的变形，液压坝在实际工作中最大应力有可能会超过屈服强度，进入硬化阶段，所以从此支撑高度下在最大应力角度来看在工程设计中是不可取的。

3.3、坝面最大位移分析

在模拟计算结束后，观察位移云图，液压坝坝面变形过程如图 5 所示（左边为坝顶视图的位移变化过程，右边为坝面一侧视图的位移变化过程）。在结果显示的 ODB field output 中通过提取下图坝顶两侧、中点和坝面中心最大位移（具体位置如图 6）来分析不同工况下坝体的变形状态。



图 5 坝面变化过程云图

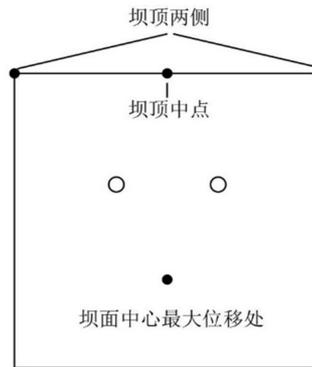
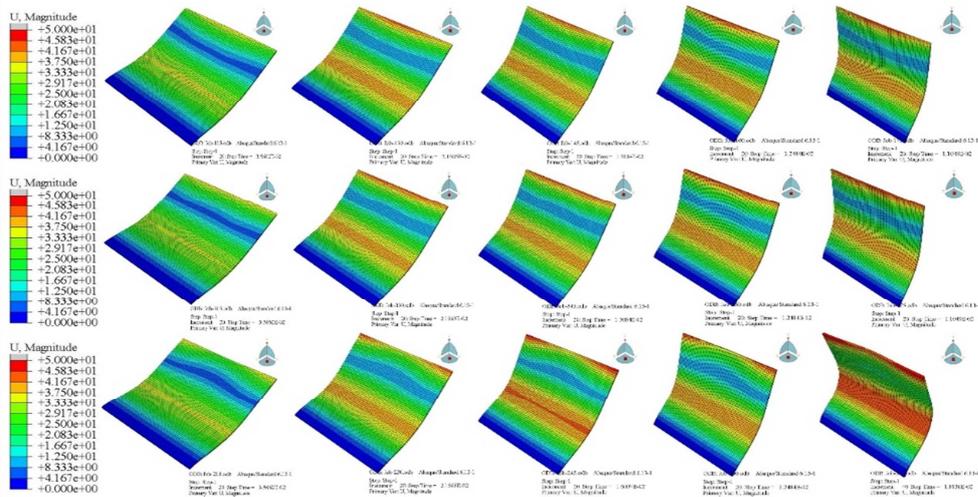
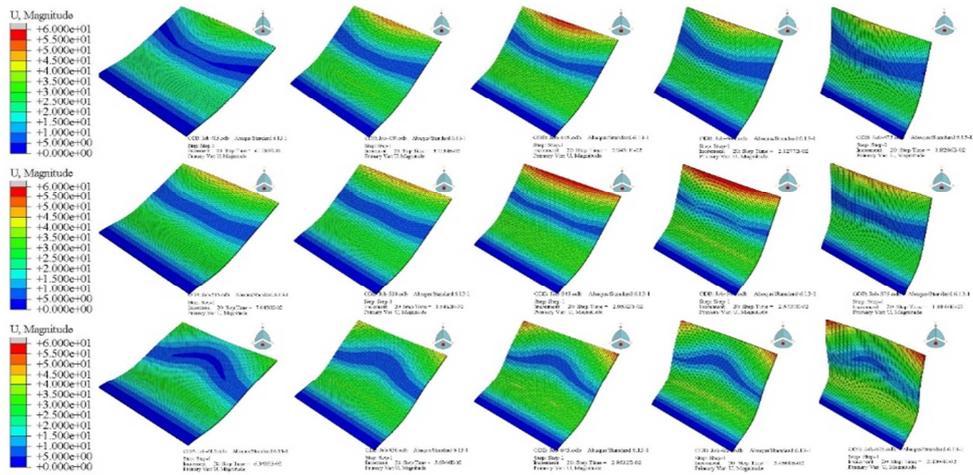


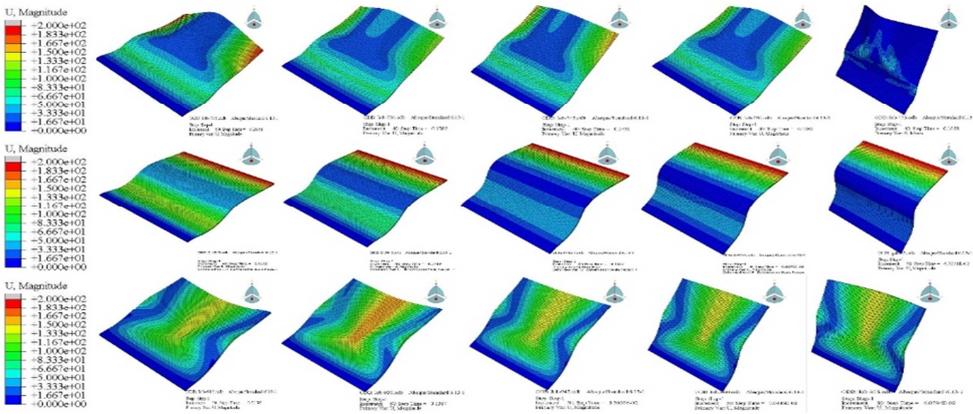
图 6 坝顶两侧、中点和坝面中心最大位移处位置



(a) 1-3 号位置



(b) 4-6 号位置



(c) 7-9 号位置

图 7 不同支撑位置在不同角度下坝面位移图:

云图中可以看出液压坝坝面在坝顶两侧、坝顶中间位置以及坝面中下部中间位置产生了较大的位移。本文针对这三个位置的位移展开研究。

(1) 坝顶两侧位移

由于在坝顶缺少约束,液压坝如同一个外伸简支梁,在坝顶两侧产生了较大的位移。由于支撑位置的不同,坝顶两侧位移方向有指向坝前(迎水侧),也有指向坝后(背水侧)方向。不同工况下坝顶两侧位移量如表 5 所示。

表 5 不同工况下坝顶两侧位移(单位: mm)

位置 \ 角度	15°	30°	45°	60°	75°
1	31.40	38.23	37.80	38.47	37.94
2	38.80	45.39	48.80	46.23	47.44
3	35.56	42.18	41.94	42.80	42.29
4	21.40	36.40	40.95	31.38	27.96
5	38.30	43.13	51.62	55.27	39.47
6	35.51	46.28	52.82	52.63	57.24
7	111.94	81.18	98.97	81.18	111.86
8	138.97	91.07	115.99	115.99	149.25
9	89.67	127.63	97.76	94.64	93.04

从表和云图中可以看出,同一支撑位置下各角度位移云图模态基本相同,说明同一

支撑位置下坝顶两侧位移趋势基本一致；随着坝面与水平面夹角的增大，坝顶两侧位移也大致呈增大趋势。

各个支撑位置中，坝顶两侧位移最小的是4号支撑位置，平均位移31.62mm；1、2、3号支撑位置高度与4、5、6号支撑位置高度下坝顶两侧平均位移相差不大，而7、8、9号支撑高度下坝顶两侧位移相对较大，平均比4号支撑位置高237%，最大比4号支撑位置高372%；8号支撑位置下坝顶两侧平均位移达到了122.25mm，液压坝变形严重，不符合实际工程的要求。

(2) 坝顶中点位移

表6 不同工况下坝顶中点位移（单位：mm）

位置 \ 角度	角度				
	15°	30°	45°	60°	75°
1	37.50	44.06	43.90	44.81	44.38
2	28.81	35.54	37.97	35.47	36.30
3	37.15	43.66	43.49	44.40	43.91
4	37.70	50.32	57.40	47.75	44.65
5	47.55	48.14	58.70	63.88	47.80
6	18.47	28.29	32.91	32.39	35.97
7	19.44	30.23	23.38	30.23	19.70
8	138.77	91.02	115.82	115.82	148.99
9	54.71	63.55	55.62	55.39	55.36

从表6和云图中可以看出，同一支撑位置下各角度位移云图模态基本相同，说明同一支撑位置下坝顶中点位移趋势基本一致；随着坝面与水平面夹角的增大，坝顶中点位移也大致呈增大趋势。

各个支撑位置中，坝顶中点位移最小的是7号支撑位置，平均位移24.6mm；1、2、3号支撑位置高度与4、5、6号支撑位置高度下坝顶中点平均位移相差不大，而7、8、9号支撑高度下坝顶中点位移相对较大；其中，8号支撑位置下坝顶中点平均位移达到了122.08mm，液压坝变形严重，不符合实际工程的要求。

3) 坝面中心最大位移

表7 不同工况下坝面中心最大位移（单位：mm）

位置 \ 角度	角度				
	15°	30°	45°	60°	75°
1	33.82	38.81	39.01	39.95	39.69
2	33.57	38.58	41.72	39.70	47.02
3	33.50	38.48	38.67	39.66	39.37
4	24.84	30.48	34.94	30.03	28.56
5	29.02	28.35	34.42	37.49	29.01
6	26.03	30.18	34.96	35.45	38.57
7	41.50	39.55	40.19	40.26	40.80
8	24.89	22.57	25.88	25.88	32.16
9	39.50	42.62	46.08	43.18	44.92

从表7中可以看出，同一支撑位置下各角度位移云图模态基本相同，说明同一支撑位置下坝面中心最大位移趋势基本一致；随着坝面与水平面夹角的增大，坝面中心最大位移也大致呈增大趋势；在同一支撑高度下，支撑位置越靠近坝面中心（1、4、7号支撑位置），坝面外翻越严重，越靠近两侧位置（3、6、9号支撑位置），坝面凹陷越严重。

各个支撑位置中，坝面中心最大位移较小的是 4 号、8 号支撑位置，平均位移为 29.77mm 和 26.28mm。

4、最优支撑位置的选择

对不同支撑位置 and 不同倾斜角度的坝体进行静水压强加载后，综合考虑液压缸支撑力、坝面最大应力、坝顶两侧位移、坝顶中点位移和坝面中心最大位移，选出液压缸与液压坝面板最佳的接触位置。

表 8 不同支撑位置下不同指标平均值

支撑位置	指标	液压缸 支撑力 (kN)	坝面最大 应力 (MPa)	坝顶两侧 位移 (mm)	坝顶中点 位移 (mm)	坝面中心 最大位移 (mm)
1		173.74	28.99	36.77	42.93	38.26
2		177.14	29.63	45.33	34.82	40.12
3		173.44	25.87	40.95	42.52	37.93
4		407.89	78.38	31.62	47.56	29.77
5		434.85	80.91	45.56	53.21	31.66
6		441.77	74.15	48.90	29.61	33.04
7		1047.12	191.69	97.30	24.60	40.46
8		1520.06	187.54	122.25	122.08	26.28
9		1736.61	199.61	100.55	56.93	43.26

通过表 8 可以看出，7、8、9 号支撑位置液压缸支撑力、坝面最大应力较大，即液压缸在接触处受力过大发生变形，对液压缸的标准提高，增加成本，所以不是最佳支撑位置；在 1、2、3 号支撑位置下虽然液压缸支撑力、坝面最大应力较小，但是由于支撑位置靠上，且液压坝坝面所受水压力随水深呈线性分布，液压坝下半部分受水压力较大，所以会在坝面下半部分产生较大的弯矩，造成坝面中心较大的变形，所以也不是最佳支撑位置；4、5、6 号支撑位置中，4 号支撑位置的液压缸支撑力小于 5 号、6 号支撑位置，且坝面整体变形小于 5 号、6 号支撑位置，所以 4 号支撑位置（高度距坝底 3750mm，为坝面高度的 62.5%；距坝面两侧距离 2000mm，均为坝宽的 33.3%）为液压缸与液压坝面板最佳的支撑位置。

5、结论

本文在研究学习了国内外河道治理和液压坝的研究现状基础上，对南洋河生态治理工程中所使用的液压坝进行理论分析，并运用有限元分析软件 ABAQUS 对其进行结构性分析。研究主要结论如下：

1) 液压缸支撑力随着支撑高度的增加而减小，低于坝高 50%高度的支撑高度在实际工程中不建议使用；支撑力随着坝面与水平面夹角的增大而增大。

2) 坝面最大应力随着液压缸支撑高度的降低，最大应力也随之增大，支撑高度低于坝高 50%时会造成坝面最大应力过大，在实际工程中不建议使用；同一支撑位置下应力云图的模态基本相同，随着角度的加大，同一支撑位置的最大应力也呈增大趋势。

3) 坝面最大位移中，坝顶两侧位移在同一支撑位置下各角度位移云图模态基本相同，说明同一支撑位置下坝顶两侧位移趋势基本一致，随着坝面与水平面夹角的增大，坝顶两侧位移也大致呈增大趋势；坝顶中点位移在同一支撑位置下，随着坝面与水平面夹角的增大，坝顶中点位移也大致呈增大趋势；支撑高度低于坝高 50%时，坝顶位移较大，坝面严重变形，在实际工程中不适用；坝面中心最大位移在同一支撑高度下，支撑

位置越靠近坝面中心，坝面会有外翻现象，越靠近两侧位置，坝面凹陷越严重。

4) 经过分析后，确定液压缸与液压坝面板最佳的接触位置为 4 号支撑位置（高度距坝底为坝面高度的 62.5%，距坝面两侧距离分别为坝宽的 33.3%）。

6、参考文献

[1]高媛. 潍坊淮河流域橡胶坝工程应用研究[D]. 西安建筑科技大学, 2010.

[2]刘慧如. 汾河中下游生态治理工程蓄水坝的优化设计研究[D]. 太原理工大学, 2017.

[3]揭炳国. 浅析橡胶坝设计过程中的几个关键问题[J]. 中国水运, 2013, 13(4): 162-163.

[4]Kahl, T., Ruell, S. Flashboard alternatives including rubber dams[C]. Proceedings of Waterpower' 89, Niagara Falls, New York, N.Y., 1989:447-456.

[5]D.A. Conrad, D.P. Muldoon. Design and application of a PC/PL Cutility Rubber Dam control system[J]. Instrument Sociter of America, 1995, 6: 351-362.

御河工程液压升降坝设计与有限元分析

陶庭鸿¹, 李振强^{2*}, 赵毅¹, 张志强¹

(1. 芜湖市银鸿液压件有限公司, 安徽芜湖 241100

2. 河海大学机电工程学院, 江苏常州 213022

通讯作者: 李振强 E-mail: zhenqiang.lee@foxmail.com)

摘要: 根据御河工程液压升降坝项目实际, 在设计方案与坝基完成的基础上, 对闸门结构进行设计, 利用 SolidWorks 软件进行三维建模, 在 ANSYS 平台上对闸门进行有限元分析校核。由于项目工程位于山西大同御河, 当地冬季气候寒冷, 所以在闸门设计时必须考虑冰冻的影响。研究结果为保证闸门的安全性提供理论依据, 并为液压升降坝的设计提供参考。

关键词: 液压升降坝; 闸门设计; 三维几何建模; 有限元分析

1. 引言

液压升降坝作为一种低水头拦河建筑物, 广泛应用于中小河流治理。采用液压系统控制原理和机械力学原理, 结合支墩坝水工结构型式的新颖活动坝, 具备挡水和泄水双重功能^[1]。

国内对液压升降坝的研究主要通过两种方法——物理模型试验法与纯数值模拟计算方法。物理模型试验法即在一定的工况下建立物理模型^[2], 通过实测得到有关数据。纯数值模拟计算方法是利用计算机软件建立三维数据模型^[3-4], 并通过相应的分析程序进行模拟分析。本文对闸门布置结构进行设计, 利用 SolidWorks 软件进行三维建模, 在 ANSYS 平台上对闸门进行有限元分析校核。

2. 闸门的设计

2.1 液压坝设计要求

液压升降坝总长 300m, 设计坝高 3.5m, 单扇门体宽度不小于 6.0m。

运行条件:

1、正常运行: 门前水深 3.5m, 门后水深 1.0m。

2、低水位运行: 闸坝在降落行洪过程中, 须满足门顶溢流水位始终高出设计坝高 0.3m 安全运行的要求。

3、冬季运行: 闸坝须满足冬季正常蓄水的要求 (蓄水位闸前 2.5m, 冰层厚度为 0.5m; 闸后 0.0m)。

2.2 闸门总体布置

1、液压升降坝横向布置

根据液压升降坝单座液压坝总长 300m, 设计坝高 3.5m, 单扇门体宽度不小于 6.0m 的设计要求, 采用单扇规格为 6m×3.5m 的 50 扇闸门。其布置示意图如图 1 所示。

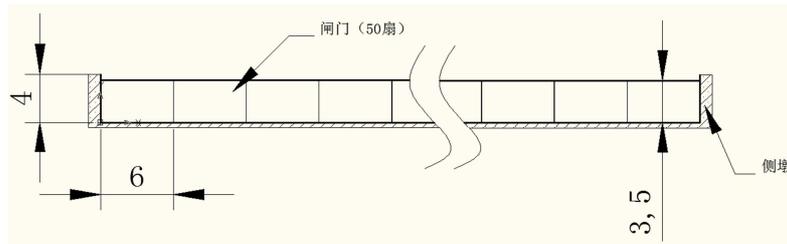


图 1 闸门布置示意图

2、闸门支撑杆支撑布置

根据弧形液压升降坝的结构特点和工作条件,分析其结构受力状态。弧形液压升降坝在工作时的最不利工况常出现在上游高水位和下游无水时的情况^[5],此时液压升降坝受力最大(见图2)。在结构分析中取单扇闸门进行受力计算。闸门宽度为B,在顶轴形心处建立坐标系 hox , 原点 o 与顶轴形心重合。迎水面板曲线: $h = h(x)$

闸门在水压力(图中分解为水平水压力 P , 竖直水压力 G), 重力 F_w , 底轴约束力 F (γ 为 F 与水平向右方向夹角), 单根支撑杆约束力 F_T 作用下平衡。

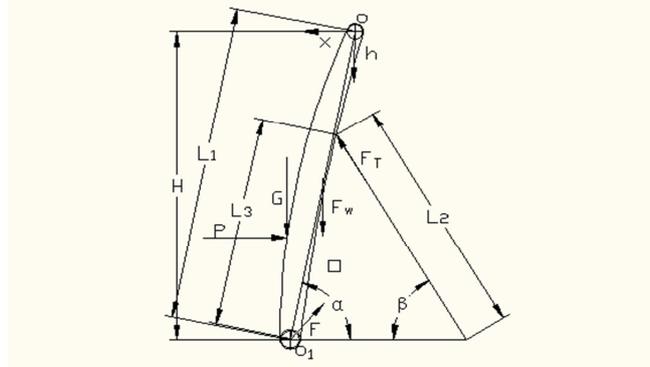


图2 液压坝受力图

$$\text{水平水压力: } P = \int_0^H P(h) B dh, \quad P(h) = \rho gh$$

$$\text{竖直水压力: } G = \int_0^X P(x) B dx, \quad P(x) = \rho gh(x)$$

为充分利用面板抗弯承载力又不致使支撑杆以上悬臂部分弯矩、挠度过大,一般取 $L_3 = \frac{2}{3}L_1$ ^[6]。且 $H = L_1 \sin \alpha$, 根据平衡方程, 得

$$F_T = \frac{\frac{1}{4}P \sin \alpha + \frac{1}{4}G \cos \alpha + \frac{3}{8}F_w \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}$$

经求导计算,

当 $\alpha + \beta = 90^\circ$ 时, 支撑杆所受闸门载荷最小, $F_T = F_{Tmin}$ 。

当 $\alpha + \beta = 140^\circ$ 时, 支撑杆所受闸门载荷 $F_T = 1.5F_{Tmin}$ 。

实际工程中, 考虑到结构的美观性及成本等因素。如当支撑点不变、 α 一定时, β 过小, 将使支撑杆过长, 从而使坝基尺寸(沿水流方向)过大。这样不仅会影响美观性, 而且使土建成本增加。 β 过大, 将使支撑杆受力过大。综合考虑。可取 $90^\circ \leq (\alpha + \beta) \leq 140^\circ$

在本工程中, 取 $\begin{cases} \alpha = 71.76^\circ \\ \beta = 60^\circ \end{cases}$

根据闸门外形尺寸、受压情况及受力点分析, 支撑杆之间的间距暂定为 4.2m, 液压缸之间的间距暂定为 2.6m。闸门的支撑杆支撑图如图 3 所示。

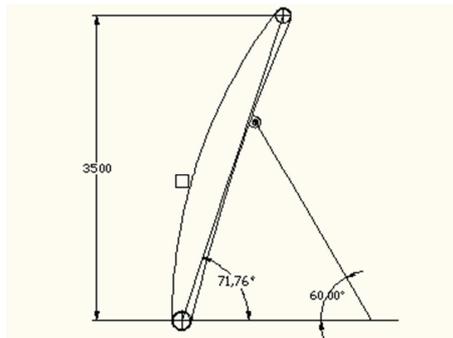


图3 支撑杆支撑图

2.3 重要参数计算

已知参数如表 1

表 1 闸门主要参数

参数	取值	参数	取值
H——闸门高度	3.5m	F_W ——闸门自重	1.153m
B——闸门宽度	6m	α ——倾斜角度	88kN (估算值)
X——闸门厚度	1.153m	β ——支撑角度	71.76°

$h(x)$ 迎水面板曲线函数, 本工程中为 $h(x) \approx -\sqrt{5.898^2 - (x + 4.635)^2} + 3.5$, $0 \leq x \leq 1.153$ 。根据前面分析, 在本工程中

$$\text{求得} \begin{cases} F_T = 143.52 \text{ kN} \\ F = 460.16 \text{ kN} \\ \gamma = 133.59^\circ \end{cases}$$

底轴直径的计算:

底轴选用材料为 20#钢的无缝钢管。

表 2 20#钢力学性能表

牌号	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	许允应力 $[\sigma]$ /MPa
20	245	410	84

低水位运行工况时的受力情况如图 4 所示。

$$F_P = \rho g B H^2 = 735 \text{ kN},$$

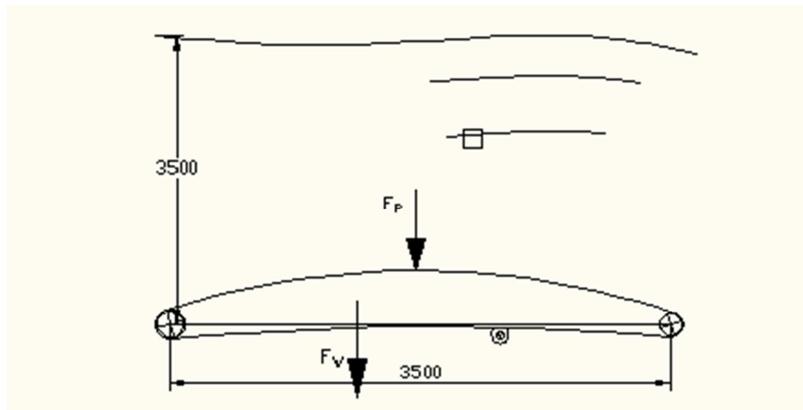


图 4 塌坝时闸门受力情况

此时钢管横截面积

$$S_1 \geq \frac{F_W + F_P}{\frac{4}{[T]}} = 2857.64 \text{ mm}^2$$

F_P ——塌坝时静水压力

F_W ——闸门自重

经查表, $\Phi 219 \times 25$ 规格的无缝钢管符合上述要求, 选做底轴。顶轴亦采用材料为 20#钢截面为 $\Phi 180 \times 10$ 的无缝钢管。

闸门内的纵梁、横梁、迎水面板与背水面板, 根据工程技术要求, 材料选用 Q345B。纵梁、横梁及迎水面板厚度 10mm, 背水面板厚度 8mm。

2.4 液压缸支撑

液压缸支撑角度, 要考虑到液压缸的行程, 塌坝时的极限位置, 设置合理的支撑台阶, 这里要结合 AutoCAD 软件不断地调整, 以达到合理的支撑。

本工程经过不断的调整, 采用 500mm 的台阶, 进行支撑, 如图 5 所示。底轴支座与液压缸支座之间的水平距离为 1058.20mm。可以得到液压缸行程为

$$L_{\max} = 2622.02 - 1179.60 = 1442.42\text{mm}。$$

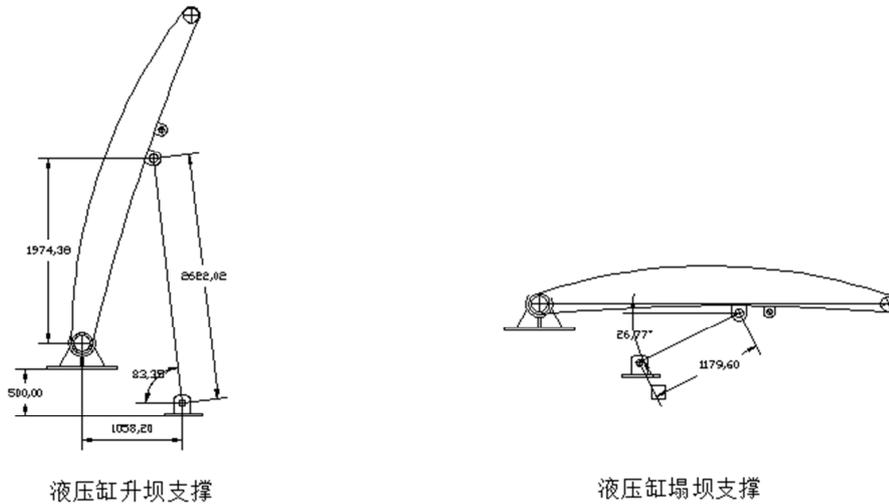


图 5 液压缸支撑图

2.5 坝基结构设计

坝基采用钢筋混凝土结构，当坝基浇筑时，需要把埋件一起浇筑在混凝土结构中，为安装闸门做准备。

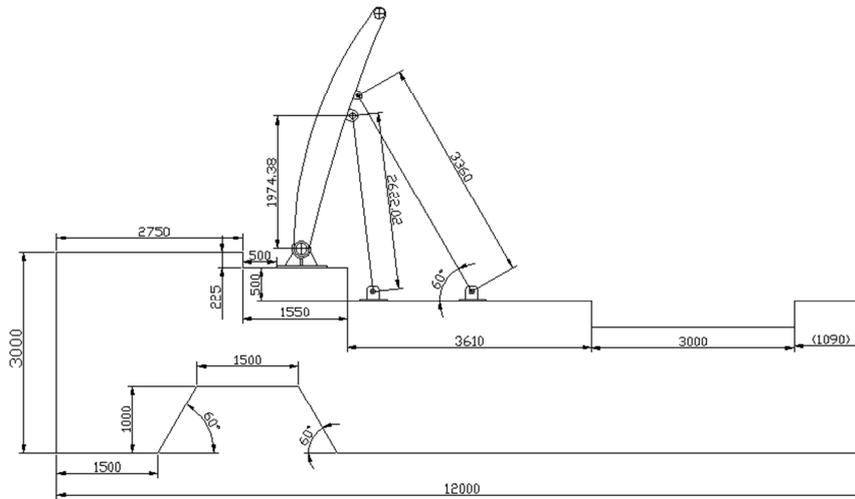


图 6 坝基截面尺寸

坝基的尺寸要配合闸门、液压缸、与支撑杆的安装，液压缸支撑杆的安装段与闸门高度相当，为 3610mm。具体形状尺寸如图 6 所示。

折叠式支撑杆中心距： $D = 3360\text{mm}$ 。

支撑杆支撑时的尺寸，根据图 6 所示。为使支撑杆不妨碍降坝，取上杆长为 $X(\text{mm})$ ，下杆长为 $3360-X(\text{mm})$ 。则杆长关系应满足：

$$\begin{cases} 2429.48 + X = 2597 + Y \\ X + Y = 3360 \end{cases}$$

则， $X=1763.76$ ， $Y=1596.24$

考虑到台阶作用，可以取上杆长 $X=1760\text{mm}$ ，下杆长可取 1600mm 。

3. 闸门三维建模与有限元分析

闸门采用 SolidWorks 软件建立三维模型，然后对模型作必要的处理，最后应用 ANSYS 有限元分析软件对闸门模型进行分析，对发现的问题提出修改意见。

3.1 闸门三维模型的建立

闸门模型按前面计算的参数进行建模(其余尺寸根据经验确定)，三维模型如图 7 所示。

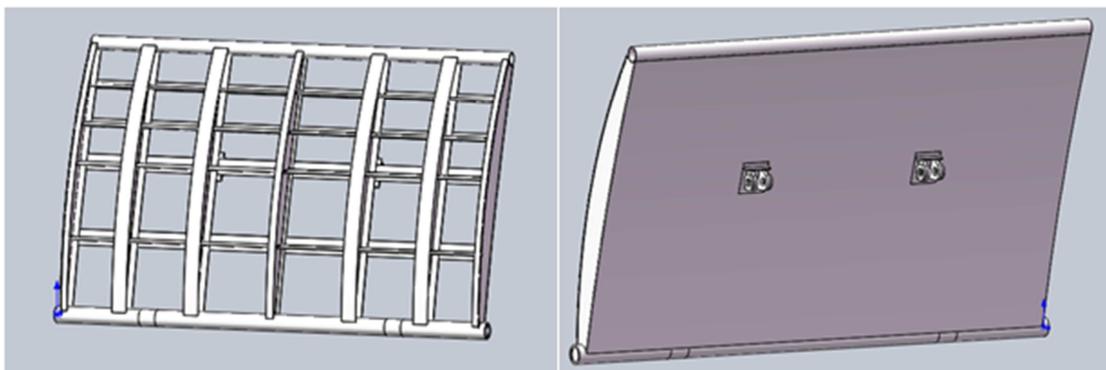


图 7 闸门三维模型

3.2 闸门的材料

本课题中闸门除底轴、顶轴采用 20#钢外，主体采用 Q345B 钢板制作，材料属性见表 3

表 3 材料力学性能表

牌号	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	密度 Kg/m^3
20#	245	410	213	0.282	7800
Q345B	345	470	206	0.280	7850

3.3 闸门的工况

本次只进行闸门在最不利的工况的强度分析，包括低水位运行与冬季运行

3.4 坐标系的建立

坐标系以底轴形心为原点，底轴轴向为 X 轴，Y 轴向上，Z 轴垂直屏幕指向外侧，如图 8 所示，后续边界条件（载荷、支撑约束）的添加均以此坐标系为准。

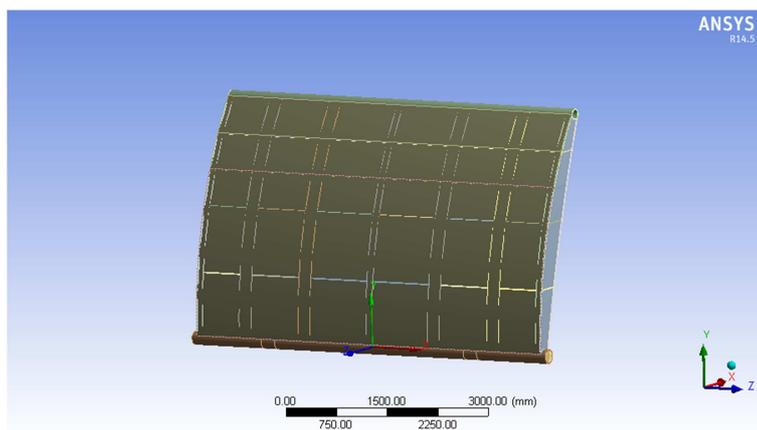


图 8 坐标系的建立

3.5 模型网格划分

本课题研究对象长 6000mm，高 3500mm；大部分材料采用 10mm 厚度钢板制造。

闸门为较规则的板壳结构，进行网格划分时，可采用自动方式进行即可。将网格大小控制在 100mm 为主情况下，局部较小结构(支座、较窄的纵梁)采用小于 30mm 左右的网格局部细化，网划分完成状态见图 9。单元数 30565，节点数 205105。

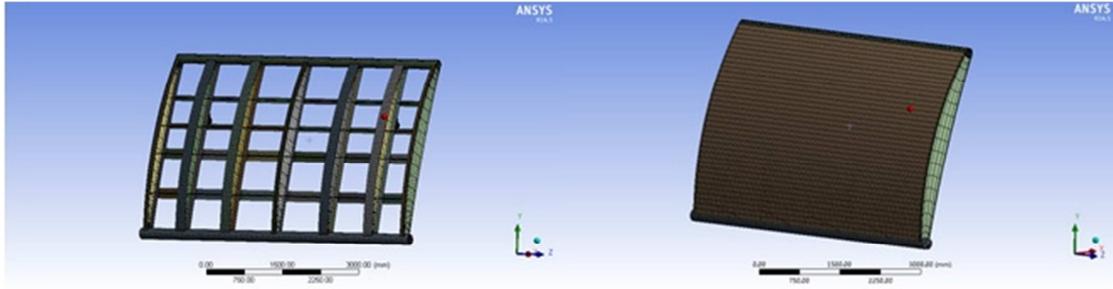


图 9 网格划分

3.6 载荷分析

低水位运行工况时，闸门的负载与约束如图 10 所示。

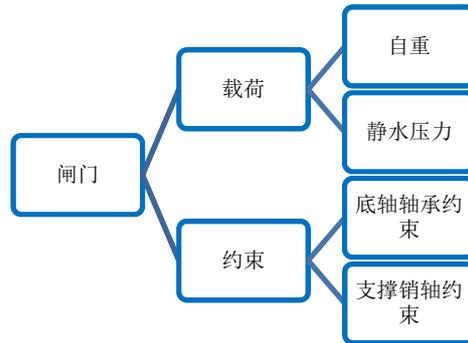


图 10 塌坝时闸门的负载与约束

3.7 分析结果

进行有限元分析计算，查看整体变形、整体应力与安全系数，如图 11、图 12、图 13 所示。

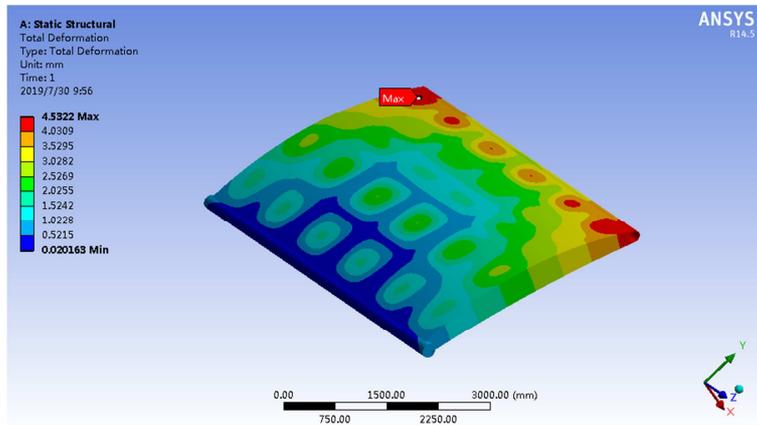


图 11 整体变形图

由图 11 可见，塌坝过流时最大变形量 4.53mm，最大变形处位于靠近顶轴的边角处。由图 12 与图 13 可见，最大应力达到 482.12MPa，位置位于支撑销轴约束处——液压缸支座处，已经超过了 Q345B 钢的屈服强度，且最小安全系数已经低于 1，低至 0.71，这将使超出 Q345B 屈服强度的部分发生塑性变形破坏，甚至断裂。

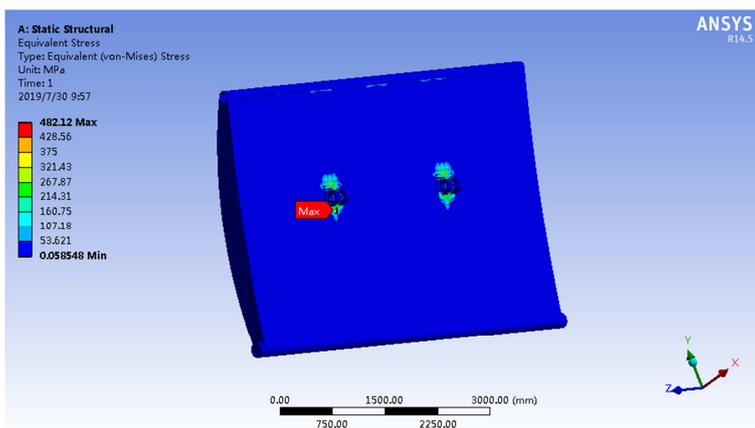


图 12 网格应力划分

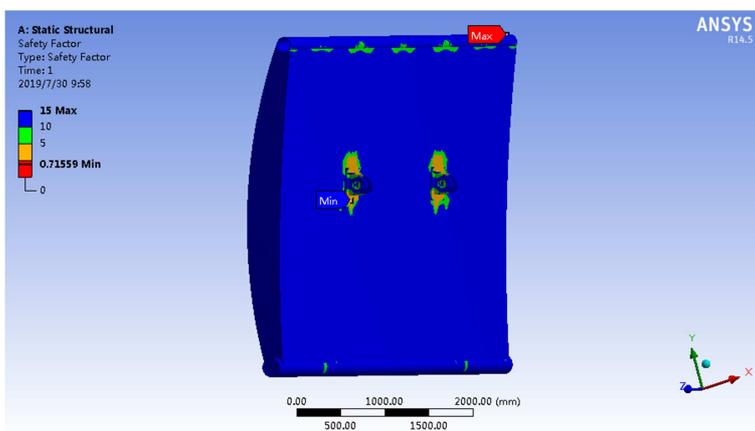


图 13 整体安全系数图

为确保安全，必须对闸门结构或尺寸进行改进，可以对连接支座的纵梁进行加宽，由 200mm 加宽到 300mm，如图 14。然后再次校核分析。

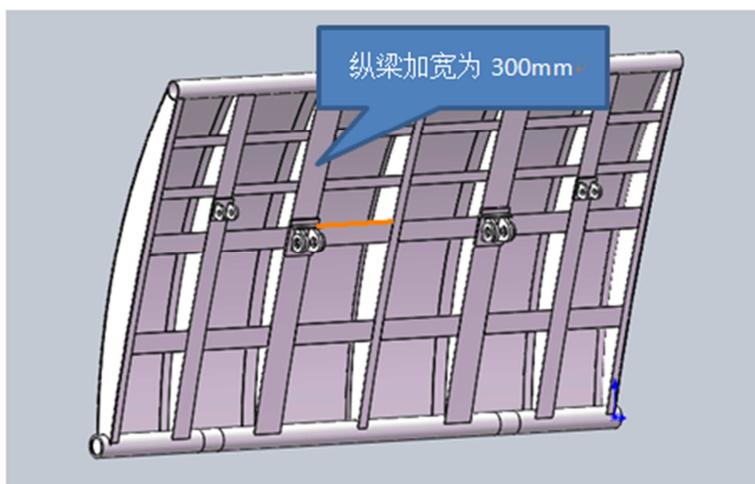


图 14 纵梁加宽

3.8 改进后分析结果及结论

对结构进行改进后，查看整体变形、整体应力与安全系数，如图 15、图 16、图 17 所示。

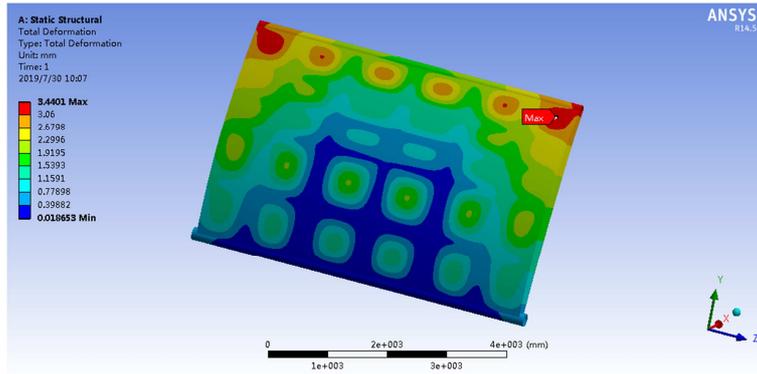


图 15 改进后整体边形图

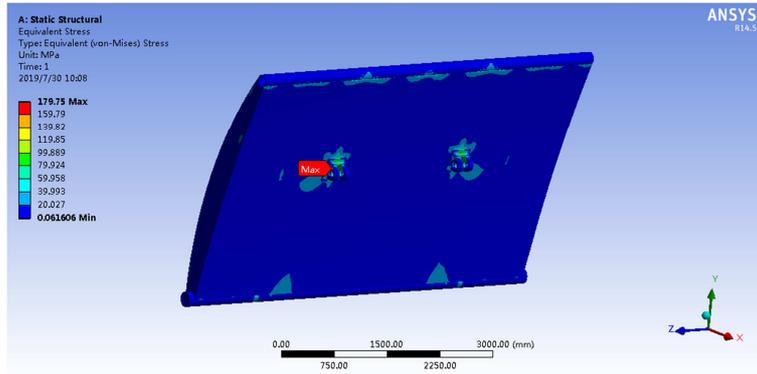


图 16 改进后整体应力图

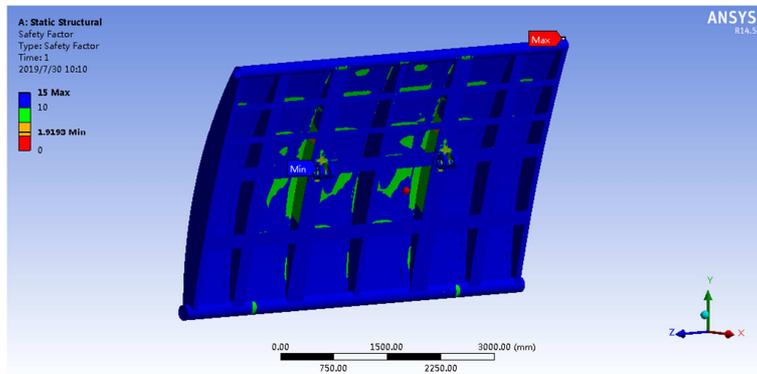


图 17 改进后安全系数

改进后，由图 15 可以看到，最大变形量由原来的 4.53mm，减少到 3.44mm。最大变形处的位置几乎不变。由图 16、图 17 可以看到最大应力仍然位于液压缸支座附近，由原来的 482.12MPa 降低到 179.75MPa，且最小安全系数提高为 1.91，根据一般经验，此时已满足对闸门安全系数 1.4 的要求。

3.9 冬季运行载荷分析

冬季运行工况，闸门的负载与约束如图 18 所示。

静冰压力位于闸门 2500mm-3000mm 迎水面板处进行添加，按照 0.2MPa 压力进行添加。

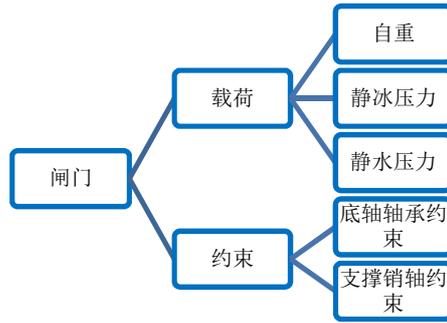


图 18 冬季闸门的负载与约束

3.10 冬季运行分析结果

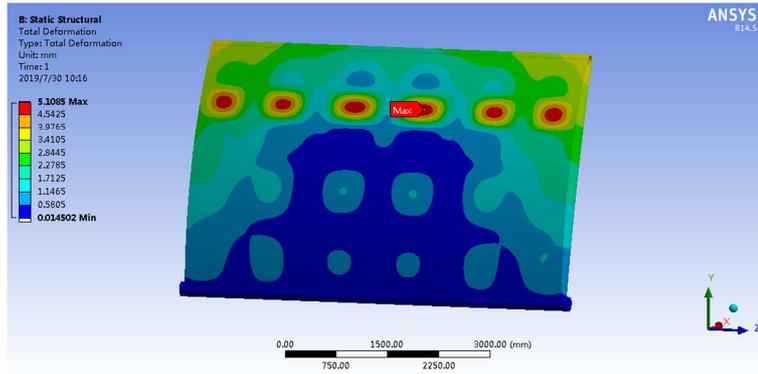


图 19 整体变形图

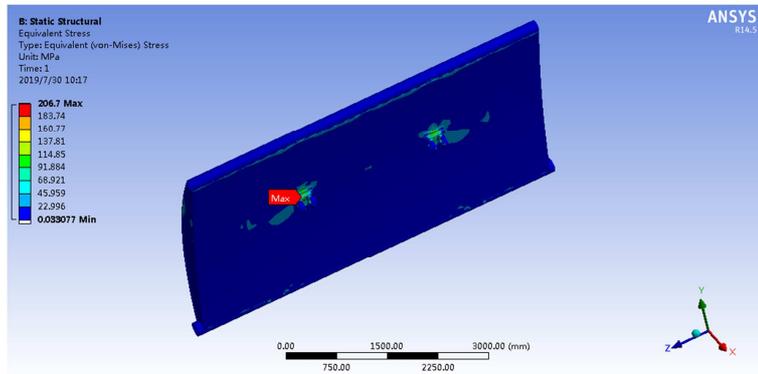


图 20 整体应力图

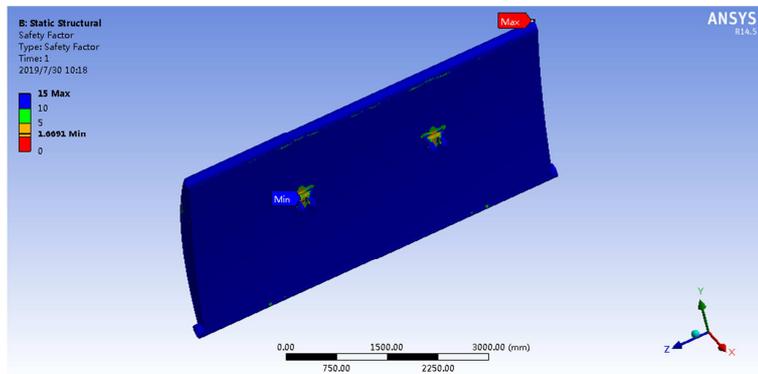


图 21 整体安全系数

由图 19 可见，塌坝过流时最大变形量 5.10mm，最大变形处位于靠近顶轴的边角处。

由图 20 与图 21 可见,最大应力达到 206.7MPa,位置仍然位于支撑销轴约束处——液压缸支座处,最小安全系数 1.6,仍然满足要求。

4. 结论

本文依托具体项目,对液压升降坝的闸门进行设计,并结合有限元分析完成对闸门的校核与改进,理论上保证闸门的安全性。

参考文献

- [1]丁峰,刘月刚,邱象玉. 液压升降坝在城市河道中的选型设计[J]. 水利规划与设计, 2013(03):59-61.
- [2]谢良平. 液压升降坝泄流特性试验研究[D]. 太原理工大学,2017.
- [3]张玉海. 液压升降坝在山区景观河道中的应用[J]. 山西建筑,2015,41(21):202-203.
- [4]张磊涛. 新型平面液压活动坝静动力特性分析及结构优化设计[D]. 西安理工大学,2018.
- [5]赵振兴,何建京. 水力学[M]. 京:清华大学出版社, 2010.
- [6]朱嫫,黄建华. 液压升降坝在景观河道中的应用[J]. 上海水务,2018,34(04):31-33+30.

基于 BIM 的景观河道液压坝 结构优化设计研究

王雪岩¹, 李国宁¹, 王文强², 梁一飞²,
薛洁², 左舒扬², 肖志远³, 刘涛³, 乔永新³

(内蒙古自治区水利水电勘测设计院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

814658354@qq.com

摘要: 对景观河道液压坝在工程应用中的一些问题进行总结, 基于 BIM 技术对其结构进行三维优化设计, 并在包头昆都仑河综合治理工程中的成功运用, 为以后同类型的工程提供可借鉴的成功经验。

关键词: 景观河道; 液压坝; BIM; 优化设计

1 引言

随着社会经济的发展和城市现代化进程的加快, 以及国家对生态环境保护的重视, 中小河流治理和城市生态水系工程发展迅速。

在城市河道整治工程和生态水系工程中, 城市河道主要设计原则是在保证城市水系防洪、供水标准原则下, 并能完美与城市河道景观相结合。即在满足河道基本水利功能的前提下, 还要尽可能以水为载体, 营造水上河边景观, 还人以生态自然的空间环境, 给人以良好的视觉享受。

2 项目概况

包头市城市水生态提升综合利用 PPP 项目, 是包头市近年来一项重大生态工程, 也是重要民生工程项目。为保障居民生产生活安全, 促进社会经济发展, 打造生态宜居城市, 推进水务发展十三五规划的实施, 建设四纵四横四湖四库三水网的河湖水系, 建设北起大青山、南抵黄河、西至昆都仑河、东达白银湖的环城水系, 实施河湖联通、水系循环、园林景观、文化旅游等重点工程。工程建成后, 将提升城市生态环境, 把包头市打造成西部缺水城市水系生态的典范, 开创工业城市转型生态宜居城市的新模式。

1) 上游铺盖

液压坝上游铺盖长 12m，采用 0.7m 厚 C25 钢筋混凝土结构，铺盖下设 0.1m 厚素混凝土垫层。铺盖沿河宽方向每 8.9m 设一道伸缩缝，缝宽 2cm，缝内填 BW 聚乙烯闭孔泡沫板，止水采用 B 型橡胶止水带。

2) 液压坝段

液压坝采用 C25 钢筋混凝土基础，基础齿墙底宽 0.5m，顶宽 1m，根据基础内液压装置埋设要求，闸前底板厚度 2.2m，闸后底板厚度 1.5m，基础以下铺设 0.1m 厚素混凝土垫层和 0.3m 厚的碎石垫层。

顺水流方向闸底板长度 8m。根据液压坝面板分幅宽度，顺坝长方向底板分缝长度 12.49m，缝间设橡胶止水带，缝内填充中密度闭孔泡沫板。

闸孔净宽 200m，液压坝由 32 扇 6.25×3.5 m（宽×高）钢结构面板组成，每扇面板后均布置液压杆两根。液压坝边墙采用 C25 钢筋混凝土挡土墙结构，与底板浇成一个整体。顶宽 1.0m，临水侧为直立面，背水侧边坡 1:0.3，边墙高 4.5m。

液压站及控制室设在壅水闸两岸大堤堤顶内侧。尺寸为（长×宽×高） $8\text{m} \times 10\text{m} \times 3.6\text{m}$ ，框架结构。

3) 消力池段

液压坝闸室后以坡度 1:4.0 与消力池相接，消力池顺水流方向总长 15m，消力池池深 0.7m。消力池底板厚 0.6m，采用 C25 钢筋混凝土结构。消力池沿河宽方向每 8.9m 设一道伸缩缝，缝宽 2cm，缝内填 BW 聚乙烯闭孔泡沫板，止水采用 B 型橡胶止水带。消力池下游与河道自然衔接。

3.2 金属结构

(1) 概况及组成部分

根据工程总体布置，液压坝由 32 扇液压活动闸门组成，桩号为 1+000，总宽 200m，单扇闸门净宽 6.25m，边墩高度 3.8m，闸前挡水高度 3.5m。

金属结构设备主要由以下三部分组成。液压坝工作闸门；液压坝启闭设备；液压坝闸前防冰冻设备。

(2) 金属结构布置方案

液压坝采用改进型液压坝方案，河道总净宽为 200m，挡水高度 3.5m，每扇闸门净宽 6.25m，共设 32 扇闸门。启闭设备采用多级柱塞式液压启闭机，设置两套液压泵站，左、右岸各一套，每套控制 16 扇闸门。由于冬季闸门挡水运行，闸前设置一套防冰冻装置。

(3) 金属结构防冰冻措施

液压坝冬季挡水运行，根据规范要求“闸门不能承受冰冻压力”，防冰冻措施采用闸门前气泡式防冰冻装置，200米河道设置2套空气泵站，每套空压机功率为55KW。

空压机→储气罐→主管路→支管路→吹气装置。

空气通过压缩机进入有压力的储气罐，经过稳压后连续稳定的输出到管路当中，经过吹气装置吹到闸门前，气泡不断上升，最后到达水面爆破，防止水面结冰。

(4) 金属结构防腐蚀措施

应对所有闸门及埋件进行全面防腐蚀处理，均采用喷锌加涂漆封闭的防腐方法。

3.3 工程存在问题及难点

我院第一次较为圆满的运用 BIM 技术完成跨度为 200m 的底轴式液压顶推式翻板钢闸门（俗称液压坝）设计工作，现在基本完成最后调试阶段。由于时间紧，任务重，我院承接项目后，第一时间对正在施工或已建成的工程进行调研，发现了设计中出现的一些问题和不足。

1. 底支铰上游侧主纵板在闸门全关时与门叶面板碰撞，需对面板、底止水进行局部切割，只能通过设置支铰止水橡皮来止水，在加工精度和安装质量的制约下，运行中此处漏水严重。

2. 侧止水压板为直板型，由于水压力较大，导致侧止水 P 头变形，脱离止水座板，出现局部漏水现象。

3. 底支铰在安装时，需预先套于闸门底部筒轴上，与门叶一体不易分离，加工、安装、运输、检修都极不方便。

4. 闸门门叶为整扇，且与两个底支铰一直相连，挡水较高时，闸门运输即超宽超限，为远距离运输带来不便。

5. 边墙液压管路外露，影响景观效果。

4 基于 BIM 技术进行结构优化设计

4.1 技术路线

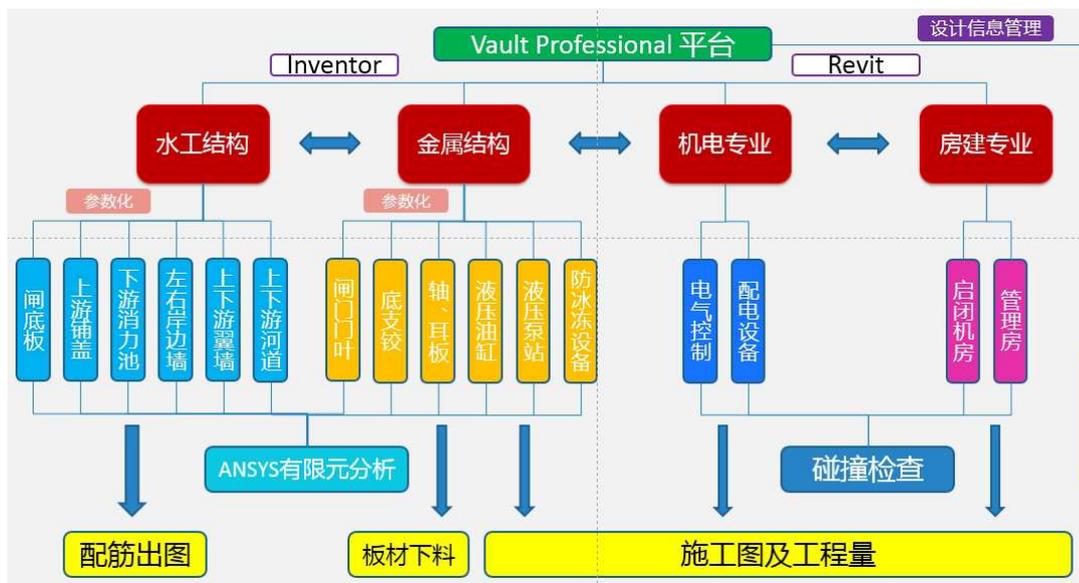


图 4-2 技术路线图

包头市昆都仑河景观河道液压坝结构优化设计采用 Inventor 软件进行水工结构和金属结构三维参数化建模，将液压坝的水工结构如闸底板、边墙、挡土墙等通过衍生特征命令进行关联设计，将金属结构总装配闸门与闸底板进行 iLogic 规则设置，实现参数化联动。采用 Revit 软件进行机电设备和附属建筑物进行三维建模。将建好的模型导入 Vault 平台，进行设计信息管理和整体装配。对装配好的液压坝进行仿真运动和效果渲染。将水工结构和金属结构模型导入 ANSYS 软件进行有限元分析，使其符合设计强度和稳定要求。最终将模型导出图纸和工程量，满足施工要求。

4.2 金属结构三维参数化设计

(1) 闸门结构设计

运用 Inventor 软件建立水工钢闸门参数化模型，将钢闸门模型门叶进行全参数化设计，如闸门宽度、挡水高度等参数与水工结构建立规则联系，形成液压坝整体参数化联动。其他零部件如底支铰、耳板等建立系列库，液压泵站、液压油缸等逐渐积累形成各级容量启闭机模型库。就液压坝闸门而言，应根据其不同零部件各自的特点，采用不同的处理方式：

1) 门叶——焊接件，尺寸关联性强，参数少，种类少；建立全参数化模型，通过参数表或规则表单控制门叶模型。

2) 标准件——螺栓、螺母、垫片、密封圈、轴用零件、角钢、槽钢、工字钢等结构型材，这些都是机械标准件，可以直接调用资源中心库，使用非常方便。

3) 系列件——吊耳、底支铰等，这些部件虽未标准化，但在金属结构设计手册等

书籍中，对其主要尺寸进行了规定，完成了“系列化”；另外，这些部件的尺寸较多，较杂，参数太多，不适于建立参数化模型。对系列件的处理方法是，建立完备的系列件库，把每个型号规格的系列件建成模型库，使用的时候，调用即可。

4) 常用件——各类水封、止水垫、止水压板等，称其为常用件。这类零件断面尺寸相对固定，只是使用长度和螺栓孔的大小、位置不同。针对这一特点，处理方法是建立半参数化模型，断面非参数化，长度和孔参数化，根据使用需求，设定不同的长度和孔数、孔距即可。

5) 启闭机库——启闭机根据工程运行条件及适用范围基本包括螺杆启闭机、卷扬式启闭机、液压启闭机，逐渐完善各种类型、容量的启闭机三维模型。

6) 孔、槽等——对于闸门上的螺栓孔、漏水孔、锁定槽、轮槽、板、加强筋等结构，进行常规的三维操作就行了，这部分结构的工作量不大，无需且难于参数化。

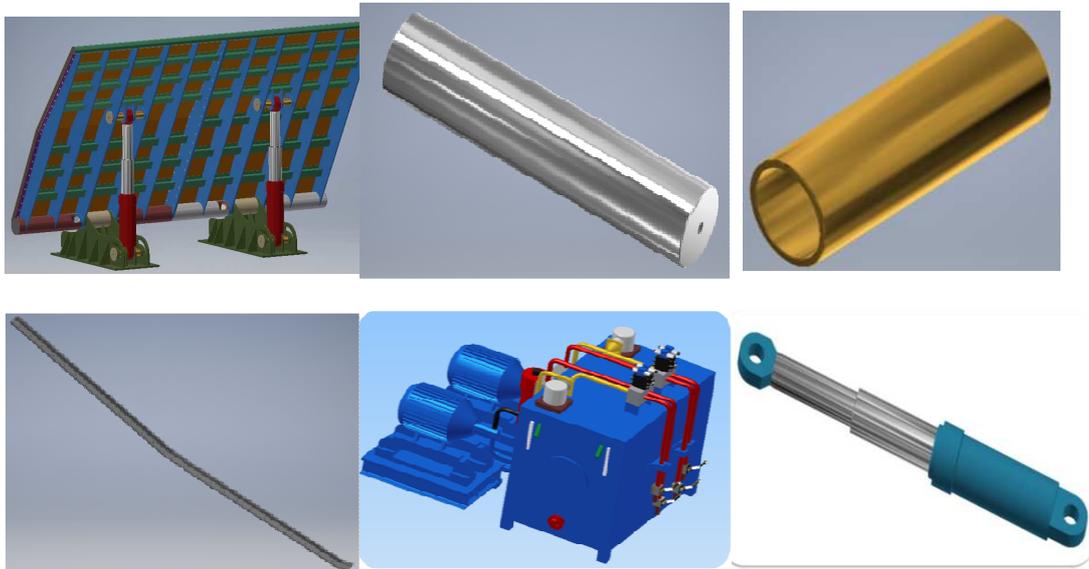


图 4-7 金属结构模型

(2) 计算分析

将装配完成的闸门模型导入有限元分析软件 ANSYS 中，划分网格，设置运行的边界条件和载荷，对闸门结构进行稳定分析、应力分析、位移分析等计算分析工作，对应力集中或者位移偏大的地方进行局部优化。

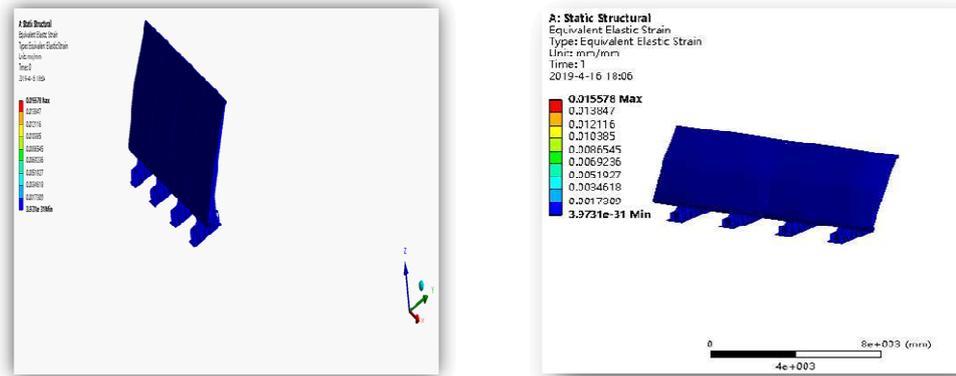


图 4-8 金属结构有限元分析

(3) 图纸输出

将三维模型与二维平面图灵活结合，绘制可以直接进行加工生产的零部件图。针对金属结构专业建立符合规范的统一制图模板，将各零部件的材料、型号、装配要求、加工精度、粗糙度以及公差配合等信息清晰明白的传达到图纸上，准确无误的传达给生产车间。生成的工程图纸与相应的零部件三维模型关联，实现设计调整修改时，工程图纸的自动更新。

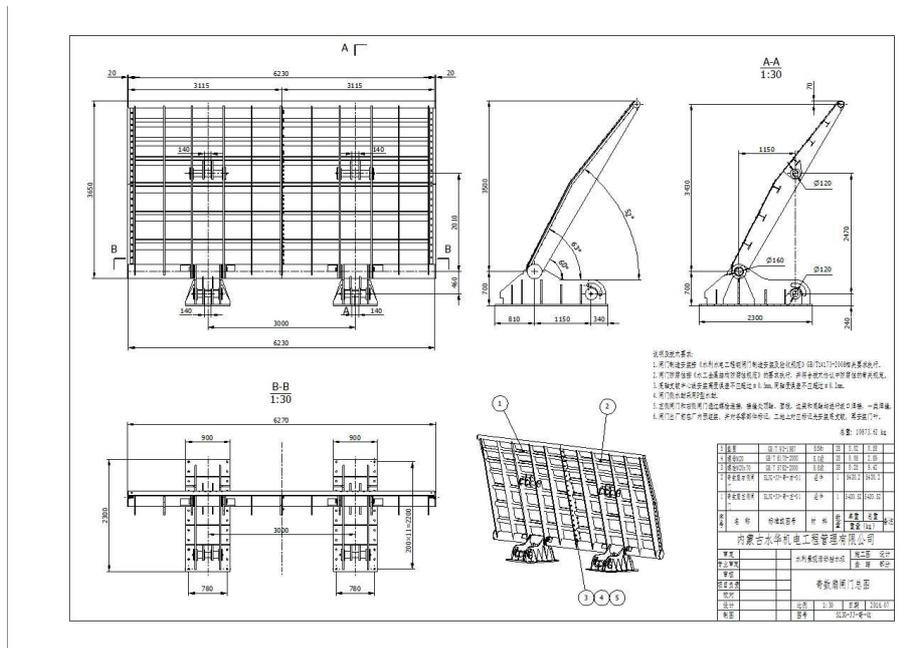


图 4-9 闸门总图

(4) 防冰冻设备的设计

由于冬季闸门挡水运行，闸前设置一套防冰冻装置，采用闸门前气泡式防冰冻装置，200米河道设置2套空气泵站，每套空压机功率为55KW。运用 Inventor 软件将防冰冻系统中的空压机、储气罐、油水分离器、吹气单元、管路及附件、气动阀组以及控制柜

等组成模块进行三维模型设计。将各模块根据两侧设备控制房的大小进行合理的布局摆放。将吹气管垂直排列布置，减少压力损失。

空气通过压缩机进入有压力的储气罐，经过稳压后连续稳定的输出到管路当中，经过吹气装置吹到闸门前，气泡不断上升，最后到达水面爆破，防止水面结冰。

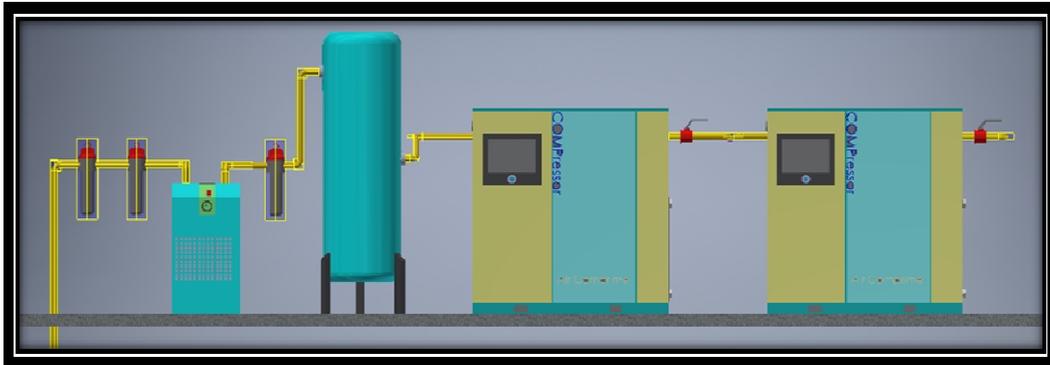


图 4-10 防冰冻设备

4.3 结构优化设计

(1) 基于 BIM 技术对液压活动坝进行结构优化设计，可以发现传统二维设计方法无法发现的问题，如碰撞、拆装、变形等，可以通过更直观的视角彻底解决工程问题，优化结构，提高设计产品质量，体现 BIM 设计的价值和魅力。

1) 底止水结构优化

面板在底支铰位置无需切割，底止水橡皮完整连贯安装，面板底缘与底筒轴外表面构成两个封水面，整扇闸门均止水严密。

2) 侧止水结构优化

对侧止水压板进行折弯，抵住 P 头，使其始终压缩在止水座板上，保证止水严密。

3) 门叶结构优化

将门叶分为左、右半扇，通过高强螺栓连接。采用实心轴将底支铰与门叶主纵梁相连，底支铰可以随时拆装，方便运输与安装，易于检修。

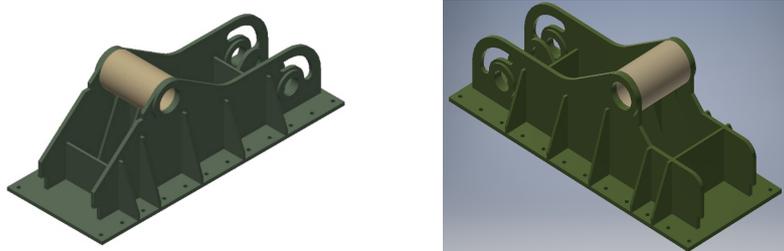


图 6-1 底支铰优化对比图

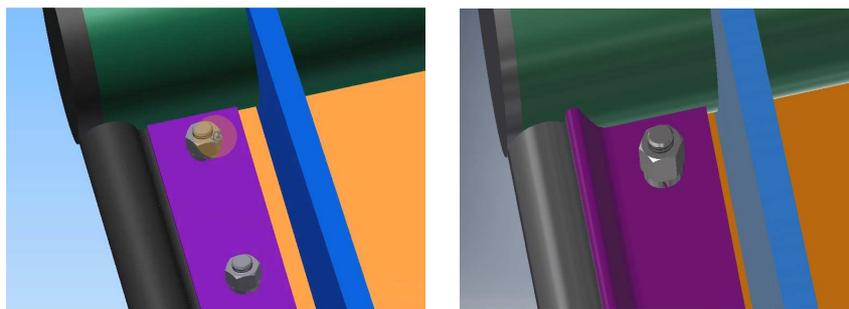


图 6-2 侧止水优化对比图

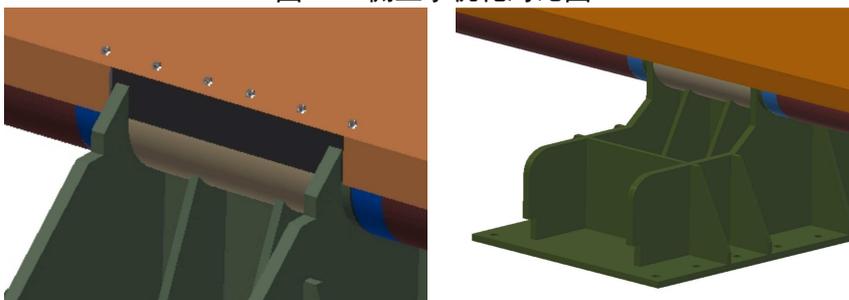


图 6-3 门叶底支铰位置优化对比图

(2) 液压管路布局优化

将边墙外露液压管路进行暗管设计，提升景观效果。

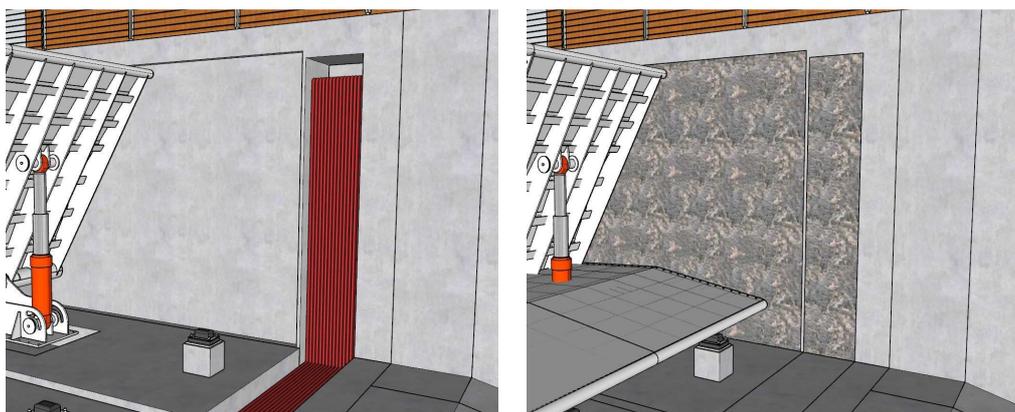


图 6-4 液压管路暗管设计

(3) 参数化联动设计

以金属结构专业为主，与水工专业及其他专业进行参数化关联。通过调整河道宽度、挡水高度等参数对液压坝进行联动设计。使闸底板预留电缆孔、边墙预留液压管路孔以及预留防冰冻管孔与房建专业配合零误差，提高施工质量及精度。

5 结语

本项目基于 BIM 技术，根据工程实例中出现的问题，进行多专业协同三维设计，有效的解决了工程中存在的难点和不足。金属结构专业闸门结构在原有的基础上有所创新，可推广使用。

液压坝与钢坝闸、气盾闸等河道景观类闸型类似，触类旁通，举一反三，可以将液压坝的 BIM 设计经验运用到其他坝型中，拓展景观河道类水闸的应用范围，为其他景观河道类闸的设计提供了宝贵的设计经验。

液压翻板闸门安装方案及质量控制措施

作者：赵一方

单位：山西省水工机械有限公司 邮政编码：030012

E-mail: 756958991@qq.com

【摘要】 液压翻板闸门是一种布置灵活、结构科学、运行方便、稳定美观的新型结构闸门，因其技术结构优势受到水工行业的广泛认可，越来越多的厂商愿意投入精力研发生产这种闸门，相关文献已经比较丰富。本文则从安装角度出发，简述一种液压翻板闸门的安装方案及质量的控制措施。

【关键词】 水工金属结构；液压翻板闸门；安装方案；质量控制

一、液压翻板闸门简介

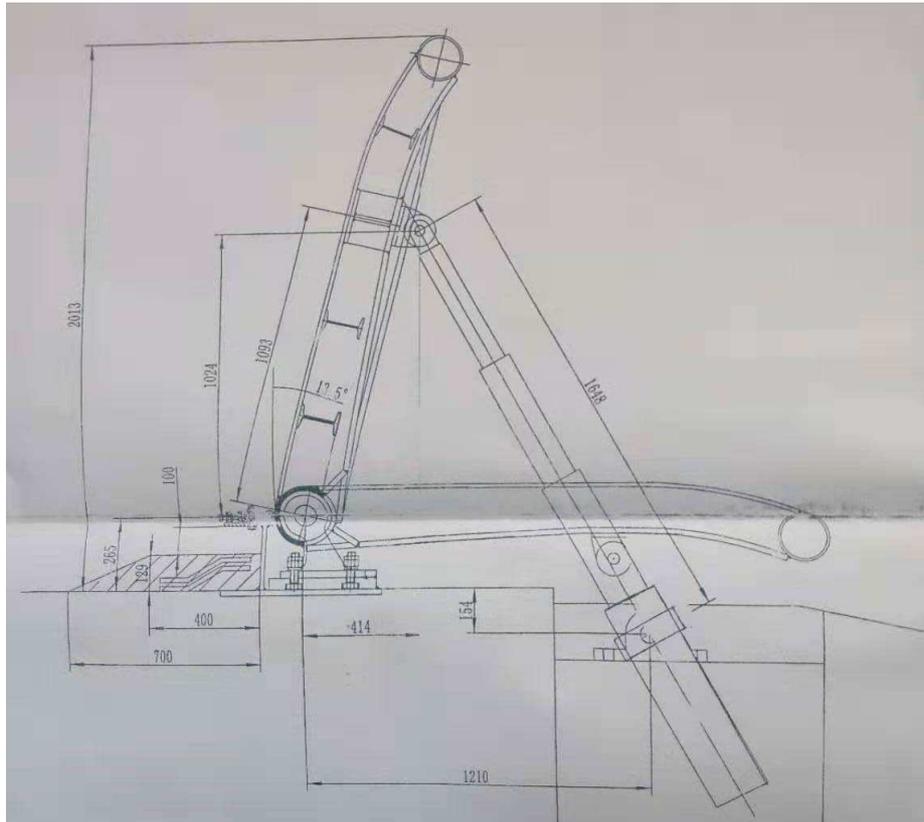
液压翻板闸门是一种采用液压系统控制和自卸汽车力学原理，结合支墩坝水工结构型式的新颖活动坝，具备挡水和泄洪双重功能。该种闸门具有以下特点：

1. 其坝体由多扇闸板串联组成，因此，液压翻板闸门理论上可以在任意宽度的河床上安装布置。
2. 液压翻板可以在 0-90 度范围内任意控制，坝面升起后，形成一个稳定的三角坝墩，抗击洪水能力极强。
3. 液压翻板闸门可根据实际需要配置电控设备，实现自动控制。闸门启闭灵活迅速，行洪过水、冲砂、排漂浮物效果非常好。
4. 液压翻板闸门顶部为弧形结构，在上游蓄水至一定高度后，会从坝顶溢流而过，形成壮观的水帘长廊。在生态景区使用液压翻板闸门有很高的景观价值。

二、安装方案

1 液压翻板闸门的基本结构

液压翻板闸门由直线门体、埋件、液压杆、支撑杆、液压缸和液压泵站组成。如下图：



液压翻板闸门结构图

2 安装准备工作

熟悉产品制作情况、现场情况及有关的技术文件说明。

- ①按施工图纸规定的内容及供货清单全面检查闸门、门槽埋件零部件的完整性和完好性。
- ②埋件埋设部位一、二期混凝土结合面是否已进行凿毛处理并冲洗干净；预留锚板的位置、数量是否符合施工图纸要求。
- ③按施工图纸及标准逐项检查各安装设备的完整和完好性。
- ④按供货清单逐项检查设备的构件、零部件是否损坏和变形。
- ⑤制作安装工装

3 正式安装

安装流程

底止水的安装→支撑准备→闸门排布对号→水封装置安装→支铰安装→闸门底横轴与支铰连接安装→闸门间隙调整→收尾工作。

● 安装底槛埋件

首先，测量基准点。清除埋件槽的污物及杂物。切除一期砼上有妨碍埋件安装的钢筋。以孔口中心线和图纸的高程及里程控制安装底槛埋件，底槛上表面的高程差控制±2mm，里程差控制±2mm，在允许的误差范围内报监理复查，验收后进行加固，复查无变形后进行二期砼的浇筑。

● 安装液压翻板闸门

根据设计图纸，以闸门孔口中心基准点为基准，复测闸门支铰中心线，底槛高程。

利用吊车把闸门卸车；把闸门各单元吊运到位，测量闸门的对角线扭曲等符合图纸及标准要求。

- 安装水封

封水装置是闸门严密止水运行可靠的关键，闸门水封装置安装允许偏差和水封橡皮的质量要求，必须符合相关标准要求。安装时，将橡皮按需要的长度黏结好，再与水封压板一起配钻螺栓孔。橡胶水封的螺栓孔，应采用专用钻头使用旋转法加工，其孔径应比螺栓直径小 1mm，当均匀拧紧螺栓后，其端部至少应低于止水橡皮自由表面 8.0mm。

- 安装支铰并与闸门底横轴连接

首先，将支铰座安装在闸门单元对应埋件位置，要求支铰中线里程、高程和对孔中心线距离的极限偏差为±1.5mm。埋件安装工作结束，并经监理人检查认可后才能允许浇筑二期混凝土。在二期混凝土的强度达到施工图纸要求，并检查各铰座中心孔同心度符合规定后，

安装好支铰后，用起吊设备把已就位好的闸门与支铰通过底横轴连接，测试闸门的转动是否灵活顺滑，确认无误后用支架将闸门固定好，将闸门与液压启闭机连接。

- 间隙调整

液压翻板闸门由多个单元闸门组成，止水间隙多，通过调整止水调节螺栓使止水橡胶压缩量控制在 2mm 左右，保证止水橡胶与止水工作面接触均匀严密，防止漏水。

- 收尾工作

闸门安装完毕后，应拆除所有安装用的临时焊件，修整好焊缝，清除门叶上的所有杂物，在各转动单位按施工图纸要求灌注润滑脂，对涂装部位有损坏的应按施工图样及有关的技术文件说明进行涂装修补。

4 闸门试验

闸门安装完毕后，应会同监理人员对闸门进行以下项目的试验和检查：
无水情况下全行程启闭试验。试验时必须对水封橡皮与水封座板的接触面采用清水冲淋润滑，以防损坏水封橡皮。检查支铰等转动部位的情况，应做到启闭过程平稳。

三、质量控制措施

要保证工程高质量、高标准地完成，就需要制定科学完善的工程质量控制措施。

1 工程项目管理

项目经理组织有关人员（技术、质量、预算、采购等人员），依据项目招投标、合同要求及技术交底情况，对该工程项目施工质量进行策划，形成项目策划书，包括：

- 项目质量目标要求：质量目标包括工程目标，可包含检验批优良率、合格率目标。
- 项目经理部组织机构，人员及岗位职能分配、图表或说明内容。
- 施工管理依据的文件清单和文本，包括国家法律、地方法规的要求。
- 劳动力配置计划、施工设备配置计划、主要材料采购计划、施工方案编制计划。

- 质量关键点及其控制措施，关键工序施工方案，特殊过程管理方案。
- 检查和验收流程（包含预检、隐检、交接检的时间、验收标准和方法）。
- 对违规事件的报告和处理流程（包括不合格品及质量事故的评审、处置和改进）。
- 施工管理应形成的记录清单、记录表式和保存要求。
- 质量管理技术措施。

2 施工过程管理

（1）施工交底

项目经理组织工程技术部，向参与施工和质量检查的人员（包括发包方的人员）进行施工技术交底，交底以书面方式进行并辅以口头说明，其目的是使施工人员和质检人员对工程特点、技术质量要求、施工方法与措施方面有全面系统了解，以便于科学的组织施工，避免质量、安全事故发生，交底内容：

- a 施工范围、工程量、工作量和施工进度要求。
- b 施工图纸的解说
- c 施工方案措施。
- d 操作工艺和保证质量安全的措施。
- e 工艺质量标准和评定方法。
- f 技术检验和检查验收要求。
- g 技术记录内容和要求。
- h 其它施工注意事项。

交底应形成记录，记录的形式按项目所在地技术资料的管理规定执行。

（2）施工过程质量控制

项目经理部对施工过程质量进行控制。包括：

- ① 正确使用施工图纸、设计文件，验收标准及适用的施工工艺标准、作业指导书。
- ② 调配符合规定的操作人员，特种作业人员应持证上岗；
- ③ 按工程项目施工质量管理规定，配备适用材料、配件和设备、检测设备；
- ④ 施工过程监控

项目经理部应按图纸规范和方案等要求组织施工，按检验试验计划及时进行检查、监测。对施工过程的检查、监测包括：对工序的内部检查、技术复核，施工过程参数的监测和必要的统计分析活动；

- ⑤ 根据现场管理有关规定对施工作业环境进行控制；
- ⑥ 根据设计要求采用新材料、新工艺、新技术、新设备。工程技术部对此进行指导，项目经理部对此进行监控；
- ⑦ 合理安排施工进度：项目经理对作业组、分供方的施工进度、工作进度进行管理控制，确保满足施工进度计划，并保证施工质量；
- ⑧ 对不稳定和能力不足的施工过程、突发事件实施监控；

(3) 施工过程的确认

主要针对隐蔽工程的事先确认，包括：

- ①对工艺标准和技术文件进行评审，并对操作人员上岗资格进行鉴定；
 - ②对施工设备进行认可；
- 定期或在人员、材料、工艺参数、设备发生变化时，重新进行确认。
- ③施工过程中应做好施工过程及进度标识，确保施工过程具有可追溯性。记录人员做好过程记录，包括施工日志、检验和试验报告等表明施工过程状态；

(4) 施工过程信息沟通

项目经理部负责做好与工程建设有关方：顾客、监理、设计、分包方等的信息沟通工作，包括

- ① 工程信息（包括与工程有关的要求）；
- ② 合同的处理，包括对其的修改；
- ③ 建设方问询的处理、建设方反馈、包括投诉。

(5) 项目经理组织建立施工过程中的质量管理记录，包括：

- ① 施工日记和专项施工记录；
- ② 交底记录；
- ③ 上岗培训记录和岗位资格证明；
- ④ 施工设备和检验、测量及试验设备的管理记录；
- ⑤ 图纸的接收和发放、设计变更的有关规定；
- ⑥ 监督检查和整改、复查记录；
- ⑦ 质量管理相关文件；

施工记录应符合记录管理制度的记录控制要求，并在工程竣工交付后由项目经理负责移交给档案室存档。

(6) 建立三检制：

该工程严格执行自检、复检、终检三级检查制度，即：班级自检、分厂质检员复检、质检科专职质检员终检。

(7) 服务

① 工程移交和移交期间的防护

工程移交和移交期间，由项目经理制订成品保护措施，确定相关责任人，通过施工作业时的相互监督、巡回检查等方法，确保工程防盗、防火、消防及各种物资、设施的维护。

② 服务管理制度的制订和实施

管理组织制订服务管理制度，由项目经理部按服务管理制度要求，做好用户服务工作，包括： a 保修； b 非保修范围内的维修； c 合同约定的其他服务。

③ 项目经理部按服务管理制度要求，及时处理各项目阶段的服务需要信息，包括：收

集信息、作出响应、有效实施服务措施、及时测量服务效果，进一步改进服务。

项目经理部根据上述 ③服务信息收集及处理情况，用于质量分析和改进。

3. 施工人员资质管理

(1) 焊工资格管理

- ① 从事焊接的焊工必须持有水利部颁发的焊工合格证书，并在有效期内。
- ② 焊工在施工中焊接的钢材种类、焊接方法、焊接位置等均与焊工本人考试合格的项目相符。

(2) 质检人员资格管理

从事焊接、防腐、无损检测的人员应经有关部门批准的，技术资格鉴定考试委员会考试合格，并持有焊接、防腐、无损检测资格证书的人员担任。无损检测评定焊缝质量应由 II 级或 II 级以上的检测人员担任。

四、引用标准

GB/T14173	水利水电工程钢闸门制造安装及验收规范
SL105	水工金属结构防腐蚀规范
SL381	水利水电工程启闭机制造安装及验收规范
DL/T 5018	水电水利工程钢闸门制造安装及验收规范

以上所列标准，在合同执行过程中应按最新有效版本执行，当有关标准相互矛盾时，应按要求高的执行。

液压翻板闸门焊接变形的控制与矫正

作者：潘慧玲

单位：山西省水工机械有限公司 邮政编码：030025

E-mail: 895703075@qq.com

[摘要] 分析了液压翻板闸门在制作安装过程中常见的焊接变形种类及原因，介绍了液压翻板闸门金属结构在制作及安装中焊接变形控制及火焰矫正的工艺。

[关键词] 液压翻板闸门；焊接变形；火焰矫正

一. 概述

本闸门用于汾河流域生态修复核心区干流蓄水工程 10#-12#坝，闸门结构特征：主框架结构为焊接结构，采用纵向主梁配合底横轴承受荷载的布置形式，每扇闸门为 1 个单独的制造运输单元，不分节。处于同一道门槽内的闸门又细分为 A、B、C、D 四种规格相互配合止水。

二. 液压翻板闸门焊接变形的控制与矫正

液压翻板闸门的主要构件：主梁、纵梁、底横轴等均属细长结构的焊接组合构件，根据结构要求和受力情况大多设计为非对称的 I 型组合槽钢钢梁，这些构件的平直度必需达到规程规范和设计要求才能满足液压翻板闸门性能和安全要求。但这些构件在制作和安装过程中都存在焊接变形问题，必须进行控制和消除。

下面介绍液压翻板闸门制作焊接变形的控制与火焰矫正的施工方法。

1. 影响焊接构件变形的主要因素及变形的种类

(1) 影响焊接构件变形的主要因素有：①焊缝在结构中的位置；②构件钢性的大小；③装配和焊接顺序；④焊接工艺的选择。

(2) 焊接变形的种类有：①纵向收缩和横向收缩。焊后纵向、横向尺寸变小；②

角变形。工作面板、后翼板，主梁前、后翼板、钢板拼接，焊后显龟背型变形；③弯曲变形。主梁的正面弯曲和旁弯；④波浪变形。工作面板、后翼板，主梁前、后翼板，焊后显波浪变形；⑤扭曲变形。焊后显麻花型变形。

2. 控制焊接变形的的方法

根据焊接变形的原因和种类，制订合理的焊接工艺，可以有效控制焊接变形量。控制焊接变形的主要方法如下：

(1) 反变形法。在焊前进行装配时，预置反方向的变形量抵消焊接变形。例如：在闸门面板、主梁腹板 V 形坡口单面对接焊时，8~12mm 厚的钢板预置量 3~4mm，基本消除了角变形。

(2) 利用装配和焊接顺序来控制变形。采用合理的装配和焊接程序来减少变形，在闸门门叶拼装时，按照主梁—次梁—顶梁—底梁—中隔板—上、下隔板—边梁的拼装顺序从构件的中部开始向两端拼焊，防止了气鼓现象，减少拼装过程中产生的内应力，减少了焊接变形。安排焊接顺序时应注意下列原则：①尽量采用对称焊接。对于具有对称焊缝的工作，最好由成对的焊工对称进行焊接。这样可以使由各焊缝所引起的变形相互抵消一部分；②对某些焊缝布置不对称的结构，应先焊焊缝少的一侧；③依据不同焊接顺序的特点，以焊接程序控制焊接变形量。常见的焊接顺序有 5 种，即：分段退焊法、分中分段退焊法、跳焊法、交替焊法、分中对称法。

3. 液压翻板闸门焊接变形的火焰矫正

焊接钢结构产生的变形超过规程规范允许变形范围，必需进行矫正。在生产过程中普遍应用的矫正方法，主要有机械矫正、火焰矫正和综合矫正。其中，火焰矫正法用的设备少，成本低，特别适于中小型项目的制作和安装施工。但火焰矫正较难操作，方法掌握、温度控制不当还会造成构件新的更大变形。因此，火焰矫正正要有丰富的实践经

验。下面谈一谈火焰矫正方法在各变形种类上的施工工艺。

3.1 液压翻板闸门结构件焊接变形的火焰矫正

闸门主梁、埋件等构件大多是钢板组合焊接而成的非对称工字钢。焊接变形经常采用以下3种火焰矫正方法：线状加热法、点状加热法和三角形加热法。下面介绍解决不同部位的施工方法。

(1) 翼缘板的角变形。主梁等焊接后前、后翼缘板角变形的矫正。在翼缘板上面对准焊缝外纵向线状加热（钢板显暗红色 600°C 左右），加热范围不超过两焊脚所控制的范围，所以不用水冷却。线状加热时要注意：①不应在同一位置反复加热；②加热过程中不要浇水。

(2) 上拱与下挠及弯曲。①矫正弯曲变形：在翼缘板上，对着纵长焊缝，由中间向两端作线状加热，即可矫正弯曲变形。为避免产生新的弯曲和扭曲变形，两条加热带要同步进行。温度控制在 600°C 左右钢板显暗红色即可；②矫正主梁、撑的弯曲变形：翼缘板上作线状加热，在腹板上作三角形加热。用这种方法矫正主梁、撑的弯曲变形，效果显著，横向线状加热宽度一般取 $20\sim 90\text{mm}$ ，板厚度小的，加热宽度要窄一些，加热过程应由宽度中间向两边扩展。线状加热最好由两人同时操作，再分别加热三角形，三角形的宽度不应超过板厚的2倍，三角形的底与对应的翼板上线状加热宽度相等。加热三角形从顶部开始，然后从中心向两侧扩展，一层层加热直到三角形的底为止。自然冷却或浇少量水。

(3) 门叶面板、梁、腹板的波浪变形。矫正波浪变形首先要找出凸起的波峰，用圆点加热法配合手锤矫正。加热圆点的直径一般为 $50\sim 90\text{mm}$ ，当钢板厚度或波浪形面积较大时直径也应放大，烤嘴从波峰起作螺旋形移动，温度在 $600^{\circ}\text{C}\sim 700^{\circ}\text{C}$ ，同时将手锤放在加热区边缘处，再用大锤击手锤，使加热区金属受挤压，冷却收缩后被拉平。矫

正时应避免产生过大的收缩应力。矫完一个圆点后再加热第二个波峰点，为加快冷却速度，可对 Q235 钢材进行加水冷却。这种矫正方法属于点状加热法，加热点的分布可呈梅花形或链式密点形。

3.2 火焰矫正施工的注意事项

火焰矫正引起的应力与焊接内应力一样都是内应力。不恰当的矫正产生的内应力与焊接内应力和负载应力迭加，从而导致承载安全系数的降低。因此在钢结构制造中一定要慎重，尽量采用合理的工艺措施以减少变形。为避免产生矫正应力迭加的不利状况，采用火焰矫正时还应注意以下几点：

(1) 火焰矫正时加热温度不宜过高，在 600° C 左右（钢板微微显暗红），过高会引起金属变脆、影响冲击韧性。在高温矫正时不可用水冷却，包括厚度或淬硬倾向较大的钢材。

(2) 烤火位置不得在主梁最大应力截面附近；不要在同一位置反复多次加热。

(3) 矫正处烤火面积在一个截面上不得过大，要多选几个截面；

(4) 宜用点状加热方式，以改善加热区的应力状态。

三. 总结

实际施工时，只要我们认真按制订的工艺流程制作，辅以严格的质量检查，并在完善的质量保证体系控制下，产品制造质量将会得到有效控制，在提高产品质量的前提下大大加快闸门的制造进度，并降低成本，从而为企业带来良好的经济效益和社会效益。

汾河新二坝工程钢坝闸设计

作者：刘晓红 张医娟

单位：山西省水工机械有限公司、山西省水利水电勘测设计研究院有限公司

邮政编码：030012

E-mail: lxh163@.com

【摘要】本文通过对新二坝工程钢坝闸的论述，分析了闸门结构设计的特点，描述了钢坝闸在新二坝工程中的应用。

【关键词】钢坝闸；穿墙机构；曲柄机构；底轴结构；侧封水；底封水。

1. 工程概况

新二坝位于太原市，为汾河流域生态修复工程，继汾河一期、二期、三期后又一段向南延建、扩建工程，建成后形成水面面积 315.8 万米²，湿地水面 163hm²，形式与汾河景观结合，具备观光旅游、游船通行、灌溉、泄洪、防洪排涝等功能。

汾河新二坝工程滩地共设置钢坝闸 4 孔，东岸 2 孔，单孔宽 20m，西岸 2 孔，单孔宽 30m，设计水头 3m，闸底高程▽764.2m，该闸门型式为自动翻板门。

钢坝闸东岸两孔闸门启闭设备采用 2×800KN 液压启闭机；西岸两孔闸门启闭设备采用 2×1000KN 液压启闭机。启闭机布置在下游侧左右两端，液压启闭装置通过曲柄装置驱动底横轴，通过底横轴和门体转动，实现控制水位，改变流量的目的。液压启闭机控制阀组设在油缸附近，液压油路从液压站引出经坝面工作桥到控制阀组与油缸连接。

随着我国城乡的变化，人们生活水平的提高、景观工程的增多，需要不同形式的闸门来满足需要，钢坝闸就是一种新型可调控溢流坝，又称底轴驱动钢闸门，适用于宽河道，低水头的拦河闸上，具有景观效果好、自动化程度高、使用寿命长等特点。立可蓄水，卧可行洪排涝，可调节开启角度控制水位，也可以利用坝顶过水，形成人工瀑布，可营造良好的生态水景观。

2. 本工程钢坝闸设计特点

明确设计要求、探讨常规闸门和改进。

3. 设计要求

- 1) 本闸门设计宗旨，结构安全可靠、封水严密、运行灵活、维修方便；
- 2) 使用功能 80° 、 60° 、 45° ；
- 3) 结合景观，结合北方河流实际情况。

4. 探讨常规闸门和改进

所有钢坝闸结构形式相同，均有门体、底轴、孔中支铰、闸室支铰、穿墙结构、闸门侧封水、闸门底封水、曲柄和锁定几部分组成，但目前钢坝闸均存在诸多问题，多年来钢坝闸设计一直处在完善和改进阶段；本设计结合众多钢坝闸的使用情况，分析每一个原因，对每一个构件进行改进。

下面重点阐述穿墙机构、曲柄机构、门轴机构，门侧底封水机构的设计过程和要点。

1) 穿墙机构

现有的穿墙止水设计大多采用 O 型圈与油浸盘根密封，这种型式存在两方面问题，一方面密封圈材料的均匀性差，因为是分多次放入，另一方面密封圈弹性无法控制，机械性能随时间变化大，这样更换时很难取出，影响了封水效果。

本项目设计中充分考虑上述两个问题，封水装置采用固定体和活动体两部分，封水采用 O 型圈与 P₁ 型橡胶两道，且固定在活动体上，拆装时整体推入或拉出活动体即可带动封水进出，这样封水起到双保险和拆卸方便作用。穿墙机构是钢坝闸重要部件，密封圈是易损件，设计必须考虑更换。并创造更换条件。

2) 曲柄机构

传统曲柄结构形式采用法兰与底轴连接或直接焊在底轴上，不便检修；锁定装置固

定在曲柄腹板上，锁定孔在墙上，油缸受力轴成悬臂式，受力条件很不好，油缸受到震动力大，软管易漏油，安装拆卸难度大。

本设计中选用曲柄通过连接管与底轴连接，底轴内设套管以增加强度与抗剪能力，紧固件采用高强特制螺栓，拆装便捷；锁定孔直接设在曲柄板上，在同一平面加工，这样保证了锁定孔位置、底轴中心、启闭机作用中心的尺寸与形位公差的整体性。

曲柄是钢坝闸关键部件，受力最大、受力最复杂，受力点最多；受闸门底轴传来的力、闸门锁定的作用力、启闭机油缸的作用力，也是作用功能最大的构件。

3) 底轴结构

钢坝闸门底横轴作为门叶纵向悬臂梁的固定端和钢坝闸门启闭驱动轴，是钢坝闸门组合体的重要构件，底轴材料采用 Q345B，底轴直径为 630mm—710mm，经强度计算，轴管壁厚度 30—35mm。底轴制作的关键点是加工精度，才能保证闸门运行灵活、穿墙结构的封水效果好。

4) 侧封水形式

本项目侧止水采用双 P 型头橡胶，在一定范围内左右可根据门槽宽度进行调节，侧封水处边梁腹板距侧埋件护面板 20mm，可有效防止杂草杂物进入门体梁格。

5) 底封水形式

常规底封水座板为单板形式，未考虑人员维修的操作方式和空间，本次设计采用了隔水板和封水板双层形式，方便了闸门底封水的安装和更换。

5. 设计关键点

- 1) 做好结构分析受力和计算，保证结构的强度和刚度；
- 2) 设计做好机构形式研究，保证运行功能和效果；
- 3) 设计必须考虑易损件的更换，创造检修条件；

4) 设计同时考虑制作工艺，保证设计与生产制作的统一；

5) 既定好安装工艺和程序，避免返工和材料浪费。

6. 结语

本项目设计在传统钢坝闸的基础上进行完善、改进和创新，使产品在结构上更加新颖、止水更加严密、运行更加可靠、维修更加方便，是一个新的提高和突破，为社会和工程建设带来更多社会效益和经济效益。