

景洪水电站水力式升船机塔楼结构性态分析

黄光明^{1,2}, 凌云³, 朱国金³

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 云南华能澜沧江水电有限公司, 云南 昆明 650214;
3. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 6500051)

摘要 针对水力式升船机的受力特点, 拟定了其设计工况和主要荷载的取值, 在此基础上采用数值计算方法对景洪水力式升船机的塔楼结构性态进行了研究. 结果表明, 该塔楼结构形式合理, 但由于结构较为单薄, 其应力状态较为复杂, 许多部位出现较大的拉压应力, 需要采取一定的工程措施来改善这些部位的应力状况.

关键词 景洪水电站; 水力式升船机; 塔楼; 结构性态

中图分类号 TV314 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2008)04-0505-06

景洪水电站位于澜沧江中游河段, 垂直升船机布置在枢纽的右岸 1 号和 2 号溢流表孔之间, 是整个枢纽的重要建筑物之一. 景洪升船机是世界上第 1 个水力式升船机, 其基本原理是将平衡重做成重量和体积合适的浮筒, 浮筒重量大于船厢总重量, 通过调节浮筒的入水深度来改变浮筒的浮力, 利用浮力变化在船厢重量与浮筒重量之间产生的差值来驱动船厢升降运行. 在发生漏水事故时水力式升船机依然保持平衡, 即使船厢内水体全部漏空, 平衡关系也不会被破坏, 这从根本上解决了船厢漏水等极端事故状态下的安全问题.

塔楼作为升船机船厢的支承、导向和限位结构, 承担船厢正常运行和事故状态时的全部动荷载和静荷载. 为了保证船厢的顺利提升, 塔楼结构有严格的变位限制, 同时塔楼结构还要有良好的抗震性能. 作为升船机的主要受力结构, 塔楼结构设计目前国内还没有指导性的规程可以依循. 虽然, 水口、岩滩等已建了类似的结构, 有一定的设计经验, 但是水力式升船机塔楼结构由于输水系统和竖井系统的布置使得塔楼结构形式较常规塔楼结构形式复杂很多, 且增加了巨大水压作用, 受力条件也更为复杂. 因此, 对水力式升船机塔楼这种特殊结构的力学性能进行研究是非常必要的.

本文根据相关规范、已有工程经验和科研成果, 研究了水力式升船机塔楼结构的设计工况和主要荷载取值, 并在此基础上采用数值计算方法研究了景洪水电站水力式升船机塔楼结构的应力和变形特点.

1 塔楼结构形式

在我国, 垂直升船机塔柱结构的形式大体有 4 种, 即全筒式、开敞筒体式、筒体-箱梁式和墙-筒式^[1]. 全筒式结构的整体稳定性最好, 传力明确, 整个结构布置规则、对称, 质量分布和刚度分布变化均匀, 对抗震十分有利, 质量中心与刚度中心基本重合, 抗震抗扭性能最好, 同时全筒式的结构刚度最大, 相对水平最小, 有利于顶部机房的运行. 因此, 景洪水力式升船机塔楼采用全筒式结构, 其主要由设有等惯性输水系统和竖井系统的船厢池底板以及左右塔柱(支承结构)等结构组成, 如图 1 所示.

塔楼高 92 m, 上下游方向长 76.6 m, 中部设置了纵向结构缝, 横河向宽为 40 m, 以升船机中心线为轴线左右对称布置了 2 个宽为 11.6 m 的塔柱, 每个塔柱内分别设置了 8 个竖井, 竖井高 72.0 m, 底高程为 542.0 m, 竖井在 594.5 m 高程以上为方形断面、以下为圆形断面, 断面尺寸分别为 7.2 m × 7.9 m, $\varnothing 6.5$ m. 为了使各竖井间水位在充泄水过程中能同步上升或下降, 在竖井底部 542.0 m 高程处设置了竖井连通廊道, 廊道断面为城门洞型, 尺寸为 2.0 m(宽) × 4.0 m(高).

左右塔柱中间空腔为船厢池, 是升船机船厢的运行空间, 宽 16.8 m, 底高程为 528.5 m, 船厢池底板厚 6.5 m, 底板中设有直径 2.5 m 的等惯性输水管道.

塔楼顶部设置了联系左右两塔柱的钢筋混凝土大梁,梁高 3.5 m,梁宽 2 m,共 11 根。

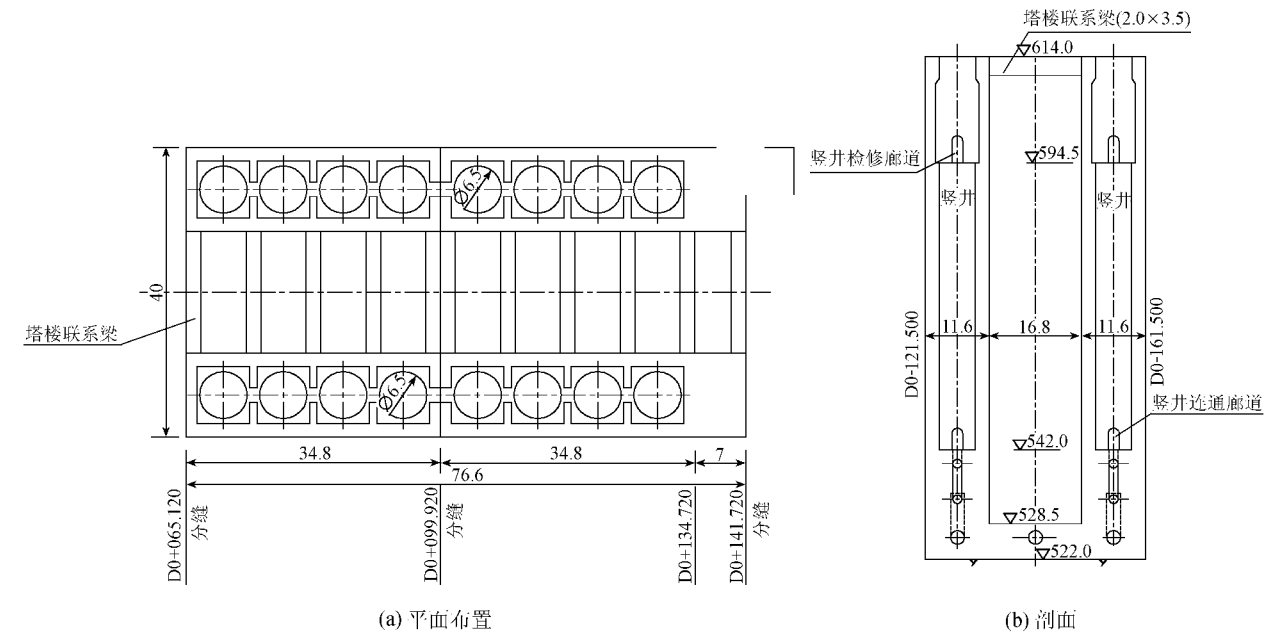


图 1 景洪水力式升船机塔楼结构(尺寸及高层单位:m)

Fig.1 Tower structure of hydraulic ship lift of Jinghong hydropower station(unit of dimension and elevation : m)

2 塔楼结构设计工况和荷载

关于垂直升船机塔楼结构设计问题,国内已进行了大量研究^[2-6].但是,水力式升船机的塔楼结构形式和受力条件较常规的升船机塔楼结构复杂许多,目前国内外尚没有专门的规程、规范作为设计依据,因此对塔楼结构设计中设计工况和主要荷载的取值问题进行研究是完全必要的.本文根据相关规范、已有工程经验和科研成果,对景洪水力式升船机塔楼结构的设计工况和主要荷载取值进行研究.

2.1 设计工况的拟定

作用于塔楼的荷载主要有(a)永久荷载,即混凝土自身重量、设备荷载、浮筒重量和船厢重量;(b)可变荷载,即水压力、风荷载、温度荷载和锁定荷载;(c)偶然荷载,即地震荷载(地震烈度为7度).

本文根据水力式升船机的运行和检修特点以及三峡等工程的经验^[1],拟定了塔楼结构的各种受力工况,如表1所示.

表 1 计算荷载及工况
Table 1 Calculation loads and design conditions

结构状态	设计工况	荷载种类								
		混凝土自身重量	设备荷载	船厢重量	浮筒重量	静水压力	动水压力	风荷载	温度荷载	锁定荷载
持久状况	正常运行工况 1	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
	正常运行工况 2	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
	正常运行工况 3	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
	正常运行工况 4	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
短暂状况	检修工况 1	✓	✓					✓	✓	✓
	检修工况 2	✓	✓					✓	✓	✓
偶然状况	地震工况	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓

注:“✓”表示某工况下考虑了该荷载的作用.

2.2 主要荷载取值

景洪水力式升船机塔楼荷载值一般可按荷载规范^[7-9]取值.本文对按照规范^[7-9]难以确定的风荷载、温度荷载及动水荷载的取值进行探讨.

2.2.1 风荷载

塔楼结构在顺河向的弯曲刚度很大,且该方向的受风面积较小,而塔楼横河向刚度较小,且受风面积较大,故计算时只需考虑横河向风荷载对结构的影响.我国所有规范对风荷载的取值均按统一方法计算,即作用在塔楼结构单位面积上的风荷载标准值按下式计算:

$$w_k = \beta_z \mu_z \mu_s w_0 \tag{1}$$

式中: w_0 ——基本风压; μ_z ——风压高度变化系数; μ_s ——风荷载体形系数; β_z ——风振系数.

式(1)中的 w_0 、 μ_z 和 β_z 均可根据规范常规取值.

塔楼结构中间有船厢池通道进风,顶部有机房覆盖,是一个对气流发生干扰的建筑物,加上上闸首的影响,有可能会产生涡流,目前还无法从理论上确定塔楼结构的体形系数 μ_s , μ_s 应通过风洞试验测定,而从三峡升船机塔楼结构的风洞试验结果发现,通过风洞试验测定 μ_s ,无论哪一个面, μ_s 均比荷载规范中的高层建筑体形系数小得多^[1].原因有2个:一是荷载规范中取值偏于安全;二是受到了风洞试验模型比尺的影响.对于水力式升船机塔楼这种新式结构,为慎重起见,应根据规范中的类似结构选取 μ_s 值.

当塔楼受到横河向风作用时,按照规范^[7-9]规定,迎风面风体形系数 $\mu_s = 0.8$,背风面 $\mu_s = -\left(0.48 + 0.03 \times \frac{H}{L}\right) = -0.52$.实际上,升船机结构中间还有船厢通道,塔楼的内立面也应有吸力存在,但荷载规范没有列出这类结构的 μ_s .套用规范^[7]中“封闭式对立两个带雨篷的双坡屋面”的规定,两内立面 μ_s 分别为 -0.4 和 0.2 .故塔楼结构总的横河向风体形系数 $\mu_s = 0.8 + 0.4 - 0.2 + 0.52 = 1.52$.

2.2.2 温度荷载

温度是影响塔楼结构应力状态的主要荷载之一,尤其是水力式升船机塔楼结构,其竖井内的水温与外部气温差值在竖井边墙和隔墙上形成的较大变温梯度,使其温度效应场变得更为复杂.计算考虑温升和温降2种情况,温升荷载为高温场与初始温度场的差值,温降荷载为初始温场与低温度场的差值.

初始温度场:气温取多年均值 22.0°C ,竖井及输水管道中水温取上游进水口 580.5 m 高程库水温的年均值 19.65°C ,船厢池中水温取多年均值 18.5°C .

高温场:气温取近30年月平均气温中的最大值,即1979年5月的 27.7°C ,同样,塔楼外边界考虑到太阳辐射的影响,其值增高 2.9°C ,为 30.6°C ,船厢池中水温取5月对应的 20.4°C .竖井及输水管道中相应地取5月对应的库水温 19.8°C .

低温场:气温取近30年月平均气温中的最小值,即1975年12月的 13.3°C ,同样,塔楼外边界考虑到太阳辐射的影响,其值增高 2.9°C ,为 16.2°C ,船厢池中水温取12月对应的 14.0°C ,竖井及输水管道中相应地取12月对应的库水温 17.9°C .

以上气温值和船厢池的水温是根据景洪地区近30年各月平均气温及水温多年月平均资料取得的,竖井与输水管道中的水温是根据库水温度计算公式^[10]计算出来的.

2.2.3 竖井中的动水压力

竖井中的水为有限域水体,在地震工况下,水体的振荡和波动将对塔楼结构产生一定的影响.这种影响与无限域水体对结构产生的影响存在较大差异.对于这种无限域水体的动水压力计算方法已有很多研究,且规范^[11]中也有引用,而有限域水体产生的动水压力与容器形状等因素关系密切,其计算十分复杂.以下对竖井中的动水压力计算方法进行研究.

根据文献[12],竖井中的水体运动可看成无旋流动,用 $\Phi(r, \theta, z, t)$ 表示水体运动的速度势,它应满足拉普拉斯方程

$$\nabla^2 \Phi = 0 \tag{2}$$

以及边界条件和初始条件

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \Big|_{\theta = \pm \frac{\pi}{2}} &= 0 & \frac{\partial \Phi}{\partial r} \Big|_{r=a} &= \dot{x}_0(t) \sin \theta & \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=-h} &= 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} + gf &= 0 & \Phi \Big|_{t=0} &= \Phi_0 & \dot{\Phi} \Big|_{t=0} &= \dot{\Phi}_0 \end{aligned}$$

式中: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$; r, θ, z ——任一点的径向坐标、环向坐标和竖向坐标; $\dot{x}_0(t)$ ——水体

自由表面的方程 $\ddot{x}_0(t)$ ——地震时竖井水平方向运动的速度; g ——重力加速度. 其中 $f(r, \theta, t), \dot{x}_0(t)$ 可根据文献 [12] 求得.

竖井侧壁上任一点的动水压力为

$$p(r, \theta, z, t) = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \tag{3}$$

由式 (2) (3) 可得

$$p(r, \theta, z, t) = \rho a \tilde{\omega}^2 e^{i\tilde{\omega}t} \sin\theta \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{h_0 \sigma_n \tanh(\sigma_n h_0) - \delta} \frac{\cosh\left(\sigma_n \frac{z+h}{a}\right)}{\cosh\left(\sigma_n \frac{h}{a}\right)} + 1 \right] \tag{4}$$

式中 $\tilde{\omega}$ ——竖井运动的频率; $\delta = \frac{a\tilde{\omega}^2}{g}$; a ——竖井半径; ρ ——水体的密度; h ——竖井高; h_0 ——高宽比, $h_0 = \frac{h}{a}$.

对式 (4) 沿 r, θ 积分, 可得竖井侧壁上动水压力在水平方向的合力为

$$S = \rho \pi a^2 h \tilde{\omega}^2 e^{i\tilde{\omega}t} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{h_0 \sigma_n - \delta \coth(\sigma_n h_0)} + 1 \right] \tag{5}$$

式 (4) (5) 中的 σ_n, d_n, c_n 的计算公式详见文献 [12].

令 $M_l = \rho \pi a^2 h$ 为水体的真实质量, $\xi = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{h_0 \sigma_n - \delta \coth(\sigma_n h_0)} + 1$, 则式 (5) 变为

$$S = M_l \xi \tilde{\omega}^2 e^{i\tilde{\omega}t} \tag{6}$$

再令 $M_{pr} = M_l \xi$ 为等效质量 (ξ 为折算系数, 它是液体的总等效质量与总质量之比), 则式 (6) 变为

$$S = M_{pr} \omega^2 e^{i\omega t} \tag{7}$$

式中 $\omega^2 e^{i\omega t}$ 为地面加速度, 则 M_{pr} 即为数值计算时的附加质量.

3 塔楼结构静动力计算分析

3.1 计算模型及参数

由于在塔楼中间部位设置了结构缝, 选取塔楼上游特征段为计算模型. 塔楼结构三维模型如图 2 所示. 模型模拟了竖井、输水系统管道、连通廊道、检修廊道、联系梁等结构. 模型绝大部分采用八节点六面体单元, 竖井钢衬采用四节点壳体单元, 如图 3 所示. 模型共划分 44 912 个单元, 共有 51 647 个节点.

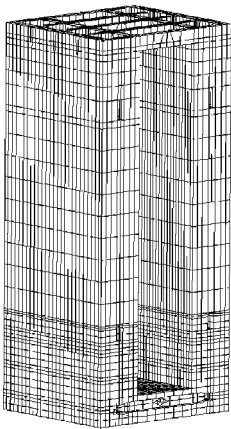


图 2 塔楼三维有限元模型



图 3 竖井系统模型

Fig.2 Three-dimensional finite element model of tower

Fig.3 Finite element model of shafts

塔楼混凝土及竖井系统钢衬的计算参数取值如表 2 所示.

3.2 计算成果

各种工况下的塔楼顶部高程 614.0 m 的位移计算值如表 3 所示,塔楼关键部位的应力计算值如表 4 所示。

表 2 计算参数取值

Table 2 Calculation parameters

部 位	弹性模量 <i>E</i> /GPa	泊松比 μ	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
高程 542.0 m 以下	25.5	0.167	24.5
高程 542.0 m 以上	28.0	0.167	25.0
塔楼联系大梁	30.0	0.167	25.0
竖井系统	206.0	0.300	78.5

表 3 塔顶位移计算值

Table 3 Calculated displacement of tower top

工 况	顺河向 位移/mm	横河向 位移/mm	竖向位 移/mm	工 况	顺河向 位移/mm	横河向 位移/mm	竖向位 移/mm
工况 1	-0.74	0.84	-7.20	工况 5	1.90	-6.20	-4.70
工况 2	-0.73	-6.00	-7.60	工况 6	1.35	-6.60	12.20
工况 3	-1.66	-7.20	-5.00	工况 7	-6.70	19.00	9.50
工况 4	-2.00	-7.70	-12.50				

注 顺河向位移以指向下游为正,横河向位移以指向右岸为正,竖向位移以向上为正。

从表 3 和表 4 可以看出：

a. 塔楼结构的顺河向位移受地震荷载影响最大,在地震工况下,塔楼顶部有最大 -6.70 mm 的顺河向位移,而在其他各工况下,塔的顺河向位移均在 2.00 mm 以下。

表 4 关键部位应力计算值

Table 4 Calculated stress of key position

工 况	顺河向正应力/MPa				横河向正应力/MPa			竖向正应力/MPa		
	竖井底部	竖井边墙外侧	竖井隔墙	竖井边墙内侧	连通廊道顶部	船厢池底板	联系大梁	竖井边墙外侧	竖井边墙内侧	基础面
工况 1	1.0	0.5		0.50	3.4	0.8	0.80			-6.6
工况 2	1.0	0.5		0.50	3.4	0.9	0.75			-7.1
工况 3	2.3	-1.7		1.80	3.0	0.8	0.80		1.2	-5.8
工况 4		1.8	0.8	-2.10	2.8	1.6	1.00	0.5		-4.5
工况 5	2.2	-2.2		2.75	0.5		0.90		1.2	-5.6
工况 6		1.5	1.4	-2.20		1.75	0.90			-4.2
工况 7	1.8	0.8		0.80	3.5	1.35	4.00			-12.0

注 应力值以拉为正、压为负。

b. 塔楼的横河向位移受地震荷载影响最大,其次是风荷载,在地震工况下,塔楼顶部有最大 -19.00 mm 的横河向位移。

c. 竖井中的水压荷载对塔楼结构的外扩作用不大,在水荷载作用下,塔楼的水平位移均在 1.00 mm 以下。

d. 塔楼结构竖向位移主要受结构自重影响,基本为下沉,在正常运行工况下,加上温降荷载的影响,结构沉降值达到最大,为 -12.50 mm,越靠近结构顶部沉降值越大。

e. 根据规范^[9,43]要求,高层结构顶部位移 u 与总高度 H 之比 $\frac{u}{H}$ 不宜大于 1/1 000。参照三峡升船机的标准^[1],升船机塔楼顶部 $\frac{u}{H}$ 限值严格控制在 1/1 500~1/2 000 之间。景洪水力式升船机塔楼高 92.0 m,则水平位移限值 u 应在 46~61 mm 之间。显然,在上面各种工况下,塔楼的水平位移远小于限值。

f. 塔楼竖井间的隔墙主要受竖井内水压影响,其横河向应力基本为拉应力,在竖井连通廊道的顶部出现了显著的拉应力集中,最大拉应力为 3.50 MPa。联系梁与塔楼间连接处的横河向应力受地震荷载影响十分显著,在地震工况下,最大拉应力达到 4.00 MPa。塔楼底板在两侧塔柱自重影响下,发生向上拱起的反弯效应,从而产生较大的横河向拉应力。在工况 6 下,塔楼底板的最大横河向拉应力为 1.75 MPa。

g. 塔楼竖井边墙顺河向应力受温度荷载影响显著。在温升情况下,边墙内侧(靠竖井一侧)为拉、外侧为压,在温降情况下,边墙外侧为拉、内侧为压。在工况 5 下,边墙的内侧最大顺河向拉应力为 2.75 MPa;在工况 4 下,边墙外侧最大拉应力为 1.80 MPa。竖井的底部在水荷载和温降荷载作用下出现了顺河向拉应力。在工况 3 下,竖井底部有 2.30 MPa 的拉应力。

h. 塔楼竖向应力主要受自重影响,基本为压应力。竖井边墙的竖向应力受温度荷载影响较大。在温升荷载影响下,边墙内侧处于竖向受拉状态,最大拉应力约为 1.20 MPa;在温降荷载影响下,边墙外侧处于受拉状

态,最大拉应力约为 0.50 MPa.塔楼与基础接触面出现了较大的压应力集中,尤其在地震荷载作用下,最大压应力达到 -12.00 MPa.

通过对计算结果的分析可知,塔楼由于其结构较为单薄,许多部位出现了较大拉压应力,如竖井隔墙、联系梁、船厢池底板部位拉应力偏大,需要采取一定的工程措施,如加强配筋或局部调整该处的截面面积,来改善这些部位的应力状况.

4 结 语

本文对景洪水电站水力式升船机塔楼的结构形式、设计工况和主要荷载取值进行了探讨,并在此基础上,采用数值计算方法对塔楼结构的力学性能进行了研究.结果表明:

a. 塔楼的结构形式合理可行,可满足水力式升船机的船厢运行及输水系统和竖井系统布置的要求.

b. 由于竖井水压力作用使得竖井连通廊道顶部出现了较大的横向拉应力,其竖井隔墙基本处于受拉状态.塔楼顶部联系大梁对提高塔楼结构整体刚度有一定贡献,但是由于联系大梁刚度较左右两塔柱刚度相差许多,故在联系梁与塔柱连接处出现了显著的拉应力集中.船厢池底板由于受到左右塔柱及内部输水系统管道的影响,也出现了较大的拉应力.应在结构应力变化明显的部位加强配筋,或局部调整该处的截面面积,以缓和应力集中现象.

参考文献:

- [1] 纽新强.三峡升船机结构关键技术问题研究[D].武汉:华中科技大学,2005.
- [2] 何衡,李同春.水口水电站升船机塔楼结构动力试验研究及数值分析[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(6):642-645.
- [3] 谢德浚,黄云生,陆辛.岩滩升船机塔柱结构设计与分析[J].红水河,1999,18(4):101-104.
- [4] 陈厚群,胡晓,王济,等.三峡升船机塔柱结构抗震试验研究[J].地震工程与工程振动,1999,19(1):47-56.
- [5] 扈晓雯.水口水电站 2×500t 级垂直升船机塔楼结构设计[J].华东水电技术,1996(4):7-10.
- [6] 张伯艳,刘云贺,刘克平,等.向家坝升船机的抗震计算[J].水利水电技术,2004(4):17-19.
- [7] GB 50009—2001,建筑结构荷载规范[S].
- [8] DL 5077—1997,水工建筑物荷载设计规范[S].
- [9] GBJ 135—90,高耸结构设计规范[S].
- [10] 朱伯芳.库水温度估算[J].水利学报,1985(2):12-21.
- [11] DL 5073—1997,水工建筑物抗震设计规范[S].
- [12] 居荣初,曾心传.弹性结构与液体的耦联振动理论[M].北京:地震出版社,1983.
- [13] JGJ 3—2002, J 186—2002,高层建筑混凝土结构技术规程[S].

Behavior analysis of tower structure of hydraulic ship lift for Jinghong Hydropower Station

HUANG Guang-ming^{1,2}, LING Yun³, ZHU Guo-jin³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineer, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yunnan Huaneng Lancang River Hydropower Co., LTD, Kunming 650214, China;

3. Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, CHECC, Kunming 650051, China)

Abstract: Based on stress characteristics of the hydraulic ship lift, design conditions and main load values of the tower were determined. Then, the numerical calculation method was used to study the behavior of the tower structure of hydraulic ship lift for Jinghong Hydropower Station. The results show that the structural style of the tower is appropriate but its stress state is complex, and there are larger tension stress and compression stress at some locations. Some engineering measures are needed to improve the stress state at these locations.

Key words: Jinghong Hydropower Station; hydraulic ship lift; tower; structure behavior