

文章编号: 1000-4750(2009)04-0221-07

地震作用下大型升船机结构的时变动力可靠度

*程载斌, 刘玉标, 梁乃刚

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘 要: 利用三维有限元方法对三峡升船机塔柱结构的动力学特性及随机地震响应进行了计算分析, 结果表明塔柱结构柔度较大, 其顶部节点随机地震位移响应为中宽带过程。在此基础上, 采用首次超越破坏机制, 以塔柱结构顶部典型位置的位移限值为可靠度界限, 对设计地震烈度下升船机塔柱结构的时变动力可靠度进行了计算分析, 得到了塔柱结构设计基准期内的时变动力可靠度, 并讨论了可靠度界限值的随机性对结构抗震时变可靠度计算结果的影响, 建议升船机结构抗震可靠度计算模型采用 Markov 过程假定。该文可为升船机结构设计及安全运行提供必要的参考。

关键词: 三峡升船机塔柱结构; 随机地震响应; 时变动力可靠度; 三维有限元; 首次超越

中图分类号: TU311.3 **文献标识码:** A

TIME DEPENDENT DYNAMIC RELIABILITY OF LARGE-SCALE SHIP-LIFTING TOWER STRUCTURE UNDER A SEISMIC LOAD

*CHENG Zai-bin, LIU Yu-biao, LIANG Nai-gang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The dynamic characteristics and the random seismic response of Three Gorges' ship-lifting tower structure were investigated by using 3-D FEM model. The dynamic characteristics results show that the tower structure has large flexibility. The random seismic response is found to be a median-wide band process. Based on the first excursion probability mechanism, the time dependent dynamic reliability of the ship-lifting tower structure under designed earthquake intensity was calculated by assuming the reliability level to be the displacement limit of the structural typical position on the top floor of the tower. The time dependent dynamic reliability of the tower structure in the design base period was obtained. The effects of the definite level and the random level on the time dependent dynamic reliability under a seismic load were also discussed. The model based on Markov hypothesis is advised for aseismic reliability analysis of ship-lifting tower structures. It could provide engineering information for the design and safe service of ship-lifting structures.

Key words: ship-lifting tower structure of Three Gorges; random seismic response; time dependent dynamic reliability; 3-D FEM; first excursion

升船机结构是水工建筑中的一种特殊结构, 其主要功能是为过往水库大坝的轮船提供快速过坝设施, 有着明显的使用价值和经济意义。升船机结构形式复杂, 一般由 2 个或 4 个钢筋混凝土筒体塔

柱支撑顶部的单层厂房构成, 柱顶除承受机房和机电设备等巨大载荷外, 还承受风与地震等动力载荷作用。因此, 升船机塔柱结构是一种承受载荷大、受力情况复杂、运行要求高的特殊高耸结构, 其在

收稿日期: 2007-12-04; 修改日期: 2008-07-11

作者简介: *程载斌(1978—), 男, 山西人, 博士生, 从事多体动力学与结构可靠性研究(E-mail: chengzaibin@126.com);

刘玉标(1961—), 男, 湖南人, 副研究员, 硕士, 从事工程力学与结构减振研究(E-mail: yubiao@imech.ac.cn);

梁乃刚(1944—), 男, 河南人, 研究员, 博士, 从事计算结构力学和材料损伤等方面的研究(E-mail: lng@lnm.ac.cn).

地震作用下的安全问题十分重要。

以往对大型水工建筑物的抗震分析大都采用振型分解反应谱法与逐步积分时程分析方法^[1-2], 采用概率方法研究水工结构随机响应的文献较少。陈清军等^[3-4]分析了升船机结构的地震响应特征, 对升船机结构抗震可靠度分析中的若干问题进行了初步的探讨。由于地震动具有明显的随机过程性, 采用概率分析方法研究地震作用的随机性将是一大趋势。因此, 大型升船机建筑结构的抗震设计也将向动力可靠度设计的方向发展, 从而使结构的抗震设计建立在更为合理的概率基础上^[4]。

本文将三峡升船机塔柱结构为背景, 采用随机过程跨阈率理论和首次超越破坏机制, 对升船机塔柱结构在地震作用下的时变动力可靠度进行计算分析。首先, 对升船机塔柱结构的动力学特性及其在随机地震动激励下的功率谱响应进行计算分析; 然后, 基于结构抗力的时变模型, 对塔柱结构的时变动力可靠度进行分析, 并讨论可靠度界限随机性对抗震可靠度计算结果的影响; 最后, 总结分析结果, 得到了一些有应用价值的结论。

1 结构随机地震响应

多自由度体系承受平稳随机地震加速度激励时的控制方程为^[5]:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

式中: m 、 c 、 k 分别为总体质量矩阵、总体阻尼矩阵和总体刚度矩阵; $-m\ddot{u}_g(t)$ 为有效地震作用力, t 为描述地震激励方向的向量, $\ddot{u}_g(t)$ 为均值为零的地面运动加速度; u 为结构的随机位移响应。

采用振型分析方法, 将 N 自由度系统的位移 u 展开为各阶模态贡献的叠加, 并利用振型的正交性可得 N 个独立的微分方程:

$$\ddot{q}_n + 2\zeta_n\omega_n\dot{q}_n + \omega_n^2q_n = -\Gamma_n\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

式中: q_n 为广义坐标; ζ_n 为振型阻尼比; ω_n 为 n 阶自振圆频率; Γ_n 为第 n 阶振型参与系数, 定义如下:

$$\Gamma_n = \frac{\phi_n^T m \mathbf{1}}{\phi_n^T m \phi_n} \quad (3)$$

式中: ϕ_n 为 n 阶振型函数; 上标“T”表示转置。

式(2)的均方解可表示为:

$$q_n(t) = -\Gamma_n \int_0^t h_n(t-\tau) \ddot{u}_g(\tau) d\tau \quad (4)$$

式中 $h_n(t-\tau)$ 为单位脉冲响应函数。

对于小阻尼体系, 广义坐标的平稳响应与地震加速度互功率谱密度之间的关系为^[6]:

$$S_{q_n q_l}(\omega) = \Gamma_n \Gamma_l H_n(\omega) H_l^*(\omega) S_{\ddot{u}_g}(\omega) \quad (5)$$

式中: $H_n(\omega)$ 为第 n 阶振型的频响函数; 上标“*”表示共轭。则质点 i 的位移响应 u_i 的自谱密度函数及方差分别为:

$$S_{u_i u_i}(\omega) = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^N \phi_{in} \phi_{il} S_{q_n q_l}(\omega) \quad (6)$$

$$\sigma_{u_i}^2 = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^N \phi_{in} \phi_{il} \int_{-\infty}^{\infty} S_{q_n q_l}(\omega) d\omega \quad (7)$$

式中 ϕ_{in} 表示第 i 单元第 n 阶振型的位移值。

质点 i 的响应速度和加速度的方差由下式计算:

$$\sigma_{\dot{u}_i}^2 = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^N \phi_{in} \phi_{il} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S_{q_n q_l}(\omega) d\omega \quad (8)$$

$$\sigma_{\ddot{u}_i}^2 = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^N \phi_{in} \phi_{il} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^4 S_{q_n q_l}(\omega) d\omega$$

2 随机地震动模型

严格来讲, 地震动应属于非平稳随机过程。但为了使问题简化和分析方便, 对于强震持时较长的地震动, 一般都采用平稳随机过程来描述。通过对地震地面运动随机过程特性的研究, 研究人员提出了多种地震动平稳随机过程模型^[7-8]。

目前, 在地震工程界广泛应用的是日本学者金井清提出的加速度平稳高斯过滤白噪声模型, 被称为金井清谱^[9]。金井清模型考虑了地表土层特性对地震动频谱特征的影响, 具有明确的物理意义, 频谱特征比较符合实际的场地地震动。但金井清谱高估了地面运动的低频能量, 比较适用于中频、高频结构的随机地震响应分析, 用于低频结构的分析时可能会得到不合理的结果。此外, 金井清模型忽视了地震源是频率相关的, 当 $\omega=0$ 时, 它的速度谱和位移谱会出现明显的奇异点, 使得地面运动位移、速度的方差无界。

水工建筑物中存在许多长周期结构, 合理地确定地震动的低频能量十分重要。为了克服金井清模型高估地震动低频能量的缺点, 胡聿贤^[10]、克拉夫 R 和彭津 J^[11]对金井清模型进行了数学上的修正, 但其地基土的卓越频率与阻尼比的物理意义并不像金井清模型那样明确, 而且参数值必须由强震记录标定, 存在一定困难。

杜修力、陈厚群^[12-13]基于地震动的物理形成机制，提出了一种平稳加速度随机过程模型。该模型反映了人们对震源机制的理解，是对金井清模型的一种物理修正，其中的参数物理意义明确，易于确定。其定义如下：

$$S_A(\omega) = \frac{1}{1+(D\omega)^2} \cdot \frac{1}{1+(\omega_0/\omega)^2} \cdot \frac{1+4\xi_g^2 \frac{\omega^2}{\omega_g^2}}{\left(1-\frac{\omega^2}{\omega_g^2}\right)^2 + 4\xi_g^2 \frac{\omega^2}{\omega_g^2}} \cdot S_0 \quad (9)$$

式中： ω_g 、 ξ_g 分别为地基土的卓越圆频率和阻尼比； ω_0 为低频拐角频率，与断层的破裂持时相关； D 为震源辐射加速度脉冲的宽度。

图 1 给出了地震烈度为 7 度时，金井清谱和杜修力-陈厚群谱的比较。

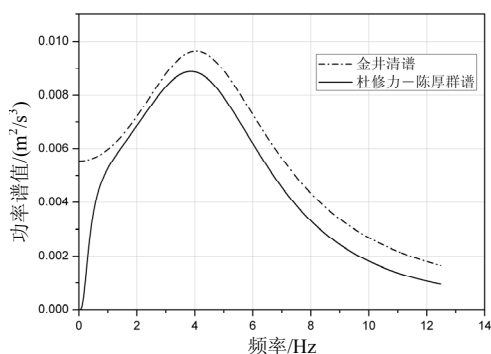


图 1 两种功率谱模型比较

Fig.1 Comparison of two power spectrum models

3 时变结构抗力的平稳化随机模型

对于结构抗力的随机性，应考虑如下几种不确定性：即结构材料性质的不确定性、构件几何尺寸的不确定性、结构计算模式的不确定性。结构抗力随时间的变化一般为一维或多维非平稳随机过程，为使结构时变可靠度分析方法应用于工程实际，可将非平稳随机过程平稳化，即将抗力 $R(t)$ 表示为：

$$R(t) = \alpha(t)R_0(t) \quad (10)$$

式中： $\alpha(t)$ 为确定性函数； $R_0(t)$ 为平稳随机过程，而 $R(t)$ 则称为平稳化随机过程。取 $R_0(t)$ 在初始时刻 ($t=0$) 的数字特征作为代表值，而将初始时刻的结构抗力记为 R_0 。

通常，对于受静力载荷作用的结构， $R(t)$ 是时间的缓变过程， $\alpha(t)$ 可视为以年为单位的衰减函数。

基于上述分析，将 $R(t)$ 写为：

$$R(n) = \alpha(n,k)R_0 \quad (11)$$

式中： $R(n)$ 为结构使用了 n 年的抗力，称为结构在第 n 年的剩余抗力； R_0 为结构的初始抗力； k 为结构抗力的衰减系数； $\alpha(n,k)$ 为结构抗力的确定性衰减函数， $\alpha(n,k)$ 与结构材料、类别、受力特点、使用条件、环境等因素有关，需要用大量的试验数据来确定。

文献[6]基于大量试验资料和对钢筋混凝土结构随机时变抗力影响因素的分析，提出了三种确定结构时变抗力的简化衰减函数模型：幂指数模型、指数型模型、多因子模型。本文计算中采用幂指数模型，其衰减函数定义为：

$$\alpha(n,k_1) = \left(1 - k_1 \frac{n}{T}\right)^r \quad (12)$$

式中： T 为结构使用年限； k_1 、 r 由试验资料或工程经验确定，例如可考虑结构使用年限内抗力衰减至初始抗力的 90%、80%、70% 甚或更低。

令 $n=T$ ，即可由下式求得 k_1 ：

$$k_1 = 1 - \alpha^{\frac{1}{r}}(T) \quad (13)$$

$r=1$ 时称为线性函数模型(LFM)， $r=2$ 时称为平方函数模型(QFM)， $r=3$ 时称为立方函数模型(CFM)。

4 基于首次超越破坏机制的时变动力可靠度

此类问题的求解基于随机过程跨阈率理论，以结构体系特定位置的动力响应首次超越安全界限值为标志，以可靠度界限来反映结构抗力在长期使用过程中的衰减，而结构抗力在一次加载过程中的衰减则在计算单位时间内的超越概率时考虑。假设结构响应 $X(t)$ 超越界限的事件服从 Poisson 分布，单侧界限时的时变动力可靠度为^[6]：

$$P_{s_1}(n) = \exp\left[-\frac{A\sigma_X T}{2\pi\sigma_X} \exp\left(-\frac{R_n^2}{2\sigma_X^2}\right)\right] \quad (14)$$

$$A = \exp\left(-\frac{\dot{R}^2}{2\sigma_X^2}\right) - \sqrt{2\pi} \frac{\dot{R}}{\sigma_X} \Phi\left(-\frac{\dot{R}}{\sigma_X}\right) \quad (15)$$

式中： σ_X 为结构响应的标准差； $\sigma_{\dot{X}}$ 为结构响应速率的标准差； T 为强震平稳持时； \dot{R} 为结构抗力在一次加载过程中的时变速率； Φ 为标准化 Gauss 分布函数。

当可靠度界限不高，结构响应为窄带过程时，Poisson 过程法不再适用，引入 Markov 过程假定，

得到如下的修正公式^[6]:

$$P_{s_1}(n) = \exp \left[- \frac{A\sigma_{\dot{X}}T}{2\pi\sigma_X} \exp \left(- \frac{R_n^2}{2\sigma_X^2} \right) \frac{1 - \exp \left(- \sqrt{\frac{\pi}{2}} q \frac{R_n}{\sigma_X} \right)}{1 - \exp \left(- \frac{R_n^2}{2\sigma_X^2} \right)} \right] \quad (16)$$

式中 q 为功率谱密度函数的形状系数, 其定义如下:

$$q = \sqrt{1 - \frac{\alpha_1^2}{\alpha_0\alpha_2}} \quad (17)$$

α_i 为结构响应 $X(t)$ 的 i 阶矩。

由于结构抗力为随机过程或随机变量, 故可靠度界限是随机的, 而且抗力又是时变的, 因此在进行结构动力可靠性分析时, 应将可靠度界限视为随机时变的。设结构的响应 $X(t)$ 为具有零均值的平稳 Gauss 过程, 抗力服从 Gauss 分布, 且 \dot{R} 为常数, 则对于 Poisson 过程假定, 单侧界限的时变动力可靠度为^[6]:

$$P_{s_1}(n) = \exp \left[- \frac{A\sigma_{\dot{X}}T}{2\pi\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_{R_n}^2}} \exp \left(- \frac{\bar{R}_n^2}{2(\sigma_X^2 + \sigma_{R_n}^2)} \right) \right] \quad (18)$$

式中, \bar{R}_n 、 σ_{R_n} 分别为结构抗力的均值和标准差。

5 数值计算

5.1 升船机结构有限元模型

三峡升船机船厢的承载主体结构由两两对称, 四组基本相同的钢筋混凝土薄壁筒体塔柱构成, 主要组成部分为底板、两侧塔柱和顶部机房、以及顶部中控室和观光平台等。

塔柱基础底板和承船厢室底板为整体式平板结构, 平面尺寸为 121.0m×58.4m, 厚 2.0m, 顶高程 50.0m, 建基面高程 48.0m。

塔柱对称布置在承船厢两侧, 主体规模长 119m, 宽 57.8m。上游端、下游端分别距上闸首、下闸首 1.0m, 从上游到下游依次布置 1m 厚墙-筒体-2m 厚墙-筒体-1m 厚墙, 对于承受强载荷的墙(例如螺母柱区域), 厚度增加到 1.85m。塔柱净高 148m, 每个塔柱筒体高 146.0m, 外形长 40.3m、宽 16.0m, 包括的总体积大约为 1162415m³, 总重量约为 400000t。

墙体与筒体塔柱的净距离为 8.6m, 墙与筒体之

间在不同高程通过布置剪切梁/剪力墙实现纵向连接, 为塔柱的开敞式区间。筒体与墙体连接的剪切梁高度为 7m, 剪切梁宽同墙等厚, 为 1m。左塔柱、右塔柱结构在高程 196.0m 通过中控室、2 个参观平台和 3 个横向剪切梁实现横向连接。梁与墙采用固接的连接方式。每个塔柱外侧均设排烟孔。

在两侧塔柱顶高程 196.0m 上, 布置两个钢索轮机房, 为钢-钢筋混凝土混合式框架结构, 包括屋顶梁和垂直立柱, 采用左、右分开, 结构对称的布置方案。立柱置于塔柱墙上。每侧机房长 119m, 宽 21.7m, 高 21m^[2]。

为了使升船机塔柱结构的力学模型尽量合理并适用于工程实际, 本文建立了塔柱结构的 3 种参数化有限元模型: 1) 基础底板、墙体及顶部连接由三维有限元块体单元 Solid 65 生成, 该单元采用整体式模型模拟钢筋混凝土材料, 将钢筋弥散于整个单元中, 视加筋混凝土为连续均匀材料; 三峡升船机塔柱结构地基为坚实基岩, 其基础为大块基础板, 参考微风化或新鲜花岗岩, 基础的弹性模量取 30000MPa; 2) 包含塔柱筒体和顶部机房的空梁、板单元组合模型, 主要分析主从结构的动力耦合效应; 3) 将顶部机房简化为点质量单元的空梁、板单元组合模型。

图 2 所示为将顶部机房简化为点质量单元的空梁单元、板单元组合模型。

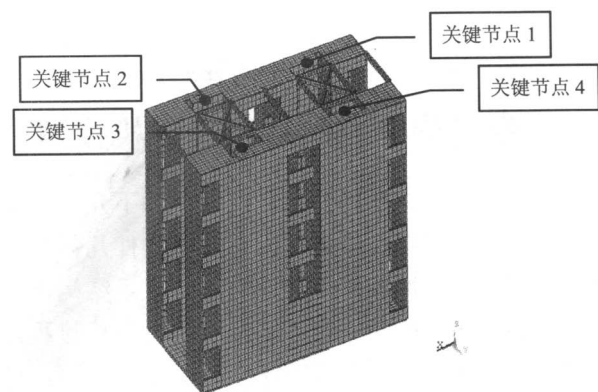


图 2 三峡升船机结构有限元模型

Fig.2 FEM mesh of the Three-Gorges ship-lifting structures

3 种模型的计算结果相互比较, 以验证模型的合理性, 确定可靠度分析的有限元模型。

5.2 升船机结构的动力学特性

采用 Block Lanczos 法对升船机结构的动力学特性进行计算, 结果如表 1 所示, 可得如下结论。

1) 整体结构的基频较低, 塔柱与机房整体计算时, 前 20 阶频率小于 2Hz, 把机房作为集中质量时,

前 20 阶频率小于 4Hz。塔柱的基本周期达 2.27s，柔度较大，属于水工建筑物中高耸的长周期结构。

2) 整体结构的振型非常丰富，包括多种机房振型以及塔柱的弯曲、扭转、错动和呼吸等振型。

3) 从振型参与系数来看，只有其主轴方向的低阶振型参与系数较大，对地震响应贡献较大，其余振型的贡献都很小。

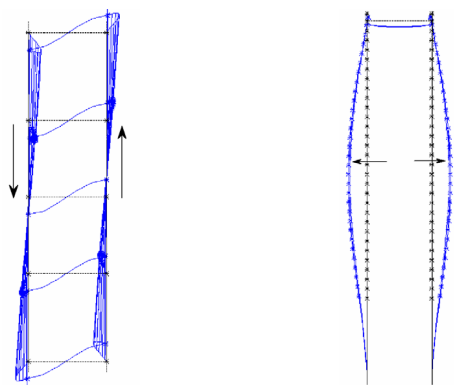
4) 塔柱与顶部机房耦合效应不明显，在计算塔柱结构的地震响应时，可将机房作为塔柱顶部的附加质量计入。

5) 模型 2 与模型 3 的计算结果相近，自然频率计算结果的最大误差为 10.14%，振型完全相同，可选用模型 2 作为抗震分析模型。

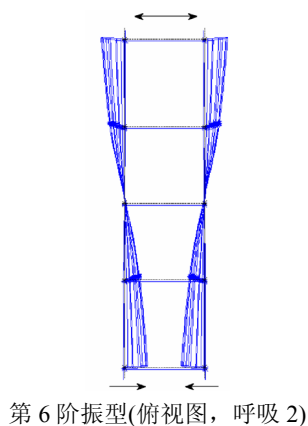
表 1 升船机结构动力学特性

Table 1 Dynamic characteristics of the Three-Gorges ship-lifting structures

序号	模型 1			模型 2			模型 3		
	频率/Hz	周期/s	振型	频率/Hz	周期/s	振型	频率/Hz	周期/s	振型
1	0.44	2.27	整体横向	0.45	2.22	横向	0.44	2.27	横向
2	0.58	1.72	机房纵向	0.88	1.14	扭转	0.89	1.12	扭转
3	0.59	1.69	机房纵向	1.38	0.72	纵向	1.24	0.81	纵向
4	0.64	1.56	机房横向	1.74	0.57	纵向错动	1.67	0.60	纵向错动
5	0.67	1.49	机房横向	1.78	0.56	呼吸 1	1.71	0.58	呼吸 1
6	0.68	1.47	机房扭转	1.95	0.51	呼吸 2	1.87	0.53	呼吸 2



第 4 阶振型(俯视图, 纵向错动) 第 5 阶振型(侧视图, 呼吸 1)



第 6 阶振型(俯视图, 呼吸 2)

图 3 塔柱结构振型示意图

Fig.3 Schematic of tower's mode

5.3 升船机结构随机地震响应分析

三峡升船机塔柱结构的基本周期大于 1s，其抗震设计烈度为 7 度，随机地震响应分析时采用式(9)表达的功率谱模型作为结构的随机地震输入，输入方向为 X 向、Y 向 1:1 输入。根据《水工建筑物抗

震设计规范(DL 5073-2000)》，计算时场地取 I 类场地(坚硬场地土，土层剪切波速 $C_s > 500\text{m/s}$)；白噪声谱强度 $S_0=55.32\text{cm}^2/\text{s}^3$ ； $\omega_g=31.42\text{Hz}$ ， $\xi_g=0.64$ ；略去不同震级影响取圆形断面半径 $r=4000\text{m}$ ，则低频拐角频率为：

$$\omega_0 = 2\pi C_s / 3r = 1.57 \text{ Hz}$$

D 取统计平均值：

$$D = 1 / (28\pi) = 0.011 \text{ s}$$

地震动平稳持时为 $\tau=12.48\text{s}$ ^[4,8,12-13]。

图 4 给出了升船机结构顶部关键节点 2 的横向(Y 向)位移响应功率密度曲线。结果表明：升船机塔柱结构顶部的随机地震位移响应功率谱密度函数在结构一阶自振频率处有一峰值。

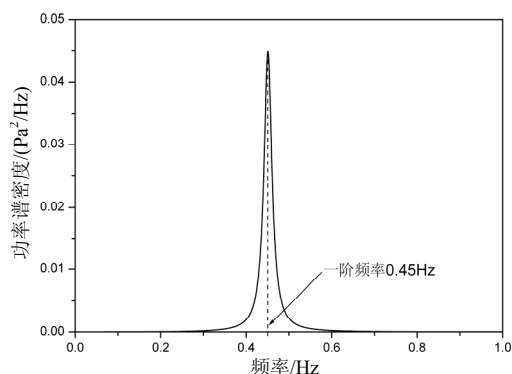


图 4 节点 2 横向位移响应功率谱密度

Fig.4 Power spectral density of transverse displacement at node 2

表 2 给出了 7 度随机地震载荷作用下塔柱结构顶部节点位移响应的标准差，并给出了位移响应谱密度函数的形状系数。按文献[6]的定义：当 $q \leq 0.1$

时, 随机过程为窄频带过程; 当 $0.1 < q < 0.35$ 时为中宽频带过程; 当 $0.35 \leq q \leq 1$ 时为宽频带过程。计算结果表明: $q > 0.1$, 升船机塔柱结构顶部关键点的随机地震位移响应为中宽频带过程。

表 2 典型节点处位移标准差

Table 2 Standard deviation of displacement

关键节点	1	2	3	4
位移标准差 σ_x/mm	39.2	39.3	39.2	39.3
响应谱密度函数	0.2912	0.2927	0.2912	0.2927
形状系数 q				

5.4 升船机结构时变动力可靠度分析

考虑到三峡工程的重要性及升船机系统的运行要求较高, 应限制塔柱结构顶部位移在较小范围内。若考虑钢筋混凝土的延性, 界限值可以取弹性极限值的 2 倍。我国《高层建筑结构规范》规定, 地震载荷作用下按照弹性方法计算的结构顶部位移 u 与总高度 H 之比的限值为: $1/900 - 1/1100$, 对于三峡升船机塔柱结构, 应控制其在更小的范围内。本文的抗震可靠度界限值取为 120mm, 约为位移响应标准差的 3 倍, 其标准差取 10mm, 位移分

布概率为正态分布, 时变抗力衰减模型采用平方函数模型, 位移衰减率按 80% 考虑。

地震作用下塔柱结构表现出良好的整体性, 其顶部关键位置的随机地震位移响应标准差及功率谱密度函数形状系数的计算结果基本相同, 故取塔柱结构顶部关键位置 2 节点的可靠度进行分析。节点 2 坐标为 $(-30.9, 21.600, 127.08)$ 。

表 3 和表 4 分别给出了基于 Poisson 过程假定和 Markov 过程假定, 在非随机和随机时变可靠度界限下的塔柱结构动力可靠度计算结果, 从中可以看出: 采用非随机时变界限计算的可靠度结果高于采用随机时变界限的可靠度结果; 基于 Poisson 过程假定的抗震时变可靠度结果小于基于 Markov 过程假定的结果。由于 Poisson 过程假定适合于结构响应为宽频带的情况, 升船机结构的抗震可靠度计算建议采用 Markov 过程假定。就可靠度的时变性而言, 计算结果表明: 随着时间的变化, 结构的可靠度都有所降低; 在升船机结构设计基准期内, 塔柱结构的抗震动力可靠度大于 0.815066。

表 3 升船机结构时变动力可靠度计算结果(基于 Poisson 假定)

Table 3 Time dependent dynamic reliability of Three-Gorges ship-lifting tower (based on Poisson hypothesis)

关键节点	R_n	时间 t/a					
		时不变	20	40	60	80	100
2	非随机时变	0.945356	0.919636	0.886288	0.844852	0.795454	0.738878
	随机时变	0.930132	0.899980	0.862000	0.816101	0.762810	0.703290

表 4 升船机结构时变动力可靠度计算结果(基于 Markov 假定)

Table 4 Time dependent dynamic reliability of Three-Gorges ship-lifting tower (based on Markov hypothesis)

关键节点	R_n	时间 t/a					
		时不变	20	40	60	80	100
2	非随机时变	0.962472	0.946365	0.925471	0.899960	0.869950	0.835867
	随机时变	0.952552	0.934143	0.910682	0.882761	0.850691	0.815066

6 结论

本文以三峡升船机塔柱结构为背景, 建立了塔柱结构的三维有限元模型, 通过求解大型特征值问题, 分析了塔柱结构的动力学特性。采用随机过程跨阈率理论和首次超越破坏机制, 对升船机塔柱结构在随机地震作用下的响应和时变动力可靠度进行了计算分析, 并讨论了可靠度界限的随机性对抗震时变可靠度计算结果的影响。通过计算分析, 可得如下结论:

(1) 三峡升船机塔柱结构柔度较大, 属于水工建筑中的长周期结构, 地震作用下其顶部典型位置

的随机位移响应为中宽频带过程。

(2) 抗震设计烈度下, 采用非随机时变界限计算的可靠度结果高于采用随机时变界限的可靠度结果; 基于 Poisson 过程假定的抗震时变可靠度结果小于基于 Markov 过程假定的结果; 建议采用基于 Markov 过程假定的可靠度计算模型。

(3) 随着时间的变化, 结构的可靠度都有所降低; 在升船机结构设计基准期内, 塔柱结构的动力可靠度大于 0.815066。

结构时变动力可靠度计算结果的准确性依赖于力学模型、随机过程假定、随机载荷模型以及可靠度界限等因素, 随机载荷的输入参数也对其有一

定的影响, 如强震持时 T 的确定。如能建立更为合理且工程上适用的力学模型, 并根据大量工程资料较为准确地标定各参数, 将大大提高时变动力可靠度计算结果的参考价值, 从而使结构的动力可靠性设计更为合理。

参考文献:

- [1] 吴杰芳, 陈敏中, 戴湘和. 三峡工程垂直升船机建筑结构整体抗震计算[J]. 长江科学院院报, 1997, 14(3): 43—46.
Wu Jiefang, Chen Minzhong, Dai Xianghe. Whole structure aseismic computation of three gorges project's ship-lift [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1997, 14(3): 43—46. (in Chinese)
- [2] 德国“Li-Kuk”设计联营体, 中国长江三峡工程开发总公司. 长江三峡工程升船机—阶段 B—设计报告[R]. 内部资料, 2004.
German Lahmeyer International (LI)—Krebs Und Kiefer (KUK) Joint Venture, China Three Gorges Project Corporation (CTGPC). Three gorges project ship lift—phase B—design Report [R]. Inside Information, 2004. (in Chinese)
- [3] 陈清军, 王汉东. 地震作用下大型升船机结构的响应特征分析[J]. 振动与冲击, 2005, 24(4): 52—55.
Chen Qingjun, Wang Handong. Analysis on the response of large-scale ship-lifting structure under aseismic loads [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(4): 52—55. (in Chinese)
- [4] 陈清军, 王汉东. 升船机结构抗震可靠度分析中若干问题的探讨[J]. 力学季刊, 2003, 24(3): 313—318.
Chen Qingjun, Wang Handong. Study of some seismic reliability analysis problems of ship-lifter tower structure [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2003, 24(3): 313—318. (in Chinese)
- [5] 肖帕(美). 结构动力学: 理论及其在工程中的应用[M]. 第2版-影印本. 北京: 清华大学出版社, 2005.
Anil K Chopra (USA). Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering [M]. Second edition-Photostat copy. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [6] 李桂青, 李秋胜. 工程结构时变可靠度理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
Li Guiqing, Li Qiusheng. Time dependent structural reliability: Theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [7] Housner G W. Characteristic of strong-motion earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA), 1947, 37(1): 19—31.
- [8] 欧进萍, 牛荻涛, 杜修力. 设计用随机地震动的模型及其参数确定[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(3): 45—54.
Ou Jinping Niu Ditao, Du Xiuli. Random earthquake ground motion model and its parameter determination used in a seismic design [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1991, 11(3): 45—54. (in Chinese)
- [9] Kanai K. An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions [J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University, 1961, 39: 85—95.
- [10] 胡聿贤, 周锡元. 弹性体系在平稳和平稳化地面运动下的反应[R]. 地震工程研究报告集(第1集). 北京: 科学出版社, 1962: 33—35.
Hu Yuxian, Zhou Xiyuan. The response of elastic system under stationary ground motion [R]. The Research Report Series on Earthquake Engineering (Volume 1). Beijing: Science Press, 1962: 33—35. (in Chinese)
- [11] 克拉夫 R, 彭津 J. 结构动力学[M]. 第2版. 王光远, 译. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Clough R, Penzien J. Dynamics of structures [M]. 2nd Ed. Translate by Wang Guangyuan. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [12] 杜修力, 陈厚群. 地震动随机模拟及其参数确定方法[J]. 地震工程和工程振动, 1994, 14(4): 1—5.
Du Xiuli, Chen Houqun. Random simulation and its parameter determination method of earthquake ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(4): 1—5. (in Chinese)
- [13] 杜修力. 水工建筑物抗震可靠度设计和分析用的随机地震输入模型[J]. 地震工程和工程振动, 1998, 18(4): 76—81.
Du Xiuli. A random seismic input model used in seismic reliability design and analysis of hydraulic buildings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(4): 76—81. (in Chinese)