

水击随机分析在压力管道结构设计中的应用

张芹芬, 索丽生

(淮海大学水利水电工程学院, 江苏南京 210098)

摘要 从水电站压力管道结构可靠度设计的需要出发, 提出应采用平稳二项随机过程或极值统计法来研究内水压力(含水击)这类可变荷载. 根据静、动两部分荷载的不同特性(年发生率、持续时间及概率分布等), 通过压力钢管设计算例, 阐明在结构分项系数设计中应将它们分别作为单独的可变荷载, 采用不同的作用分项系数和设计标准值.

关键词 水击 随机分析 压力管道 结构可靠度设计

中图分类号: TV734.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2000)02-0017-06

目前工程结构的设计方法正从传统的安全系数法向可靠度设计方法过渡,《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》^[1]中规定,水电工程结构设计采用概率极限状态设计原则,以分项系数极限状态设计为实用设计方法.

水击压力作为管道结构设计的主要荷载之一,其随机特性对结构可靠度设计有着不可忽视的影响. 但迄今为止,水击压力随机过程概率模型尚未确定,其标准值仍采用确定性方法计算,即在进行水击分析计算时,仍将水力系统的参数、边界条件、初始条件及待求的控制变量当作确定量,并选择最不利条件组合,得出最大正、负水击压力,作为结构设计的动水荷载^[2]. 因此,即使结构设计采用目前推广使用的较为精确的分项系数极限状态设计方法,因作用荷载的精度不相匹配,设计水准并没有得到实质性的提高. 文献[3,4]对由水库、管道及阀门组成的简单管水力系统,在分析影响水击的主要随机因素及其统计规律的基础上,从水击极值近似解析公式出发推导了第一相水击和极限水击的概率分布表达式,并通过数值分析得到了最大水击压力的概率分布. 本文在此基础上对压力钢管的水击荷载及结构设计方法进行探讨.

1 压力管道内水压力荷载分析

总内水压力 H 指压力管道某断面处静水压力 H_0 及水击升压 ΔH 之和,即

$$H = H_0 + \Delta H \tag{1}$$

作为时间 t 的随机过程,则有

$$H(t) = H_0(t) + \Delta H(t) \tag{2}$$

如图 1 所示.

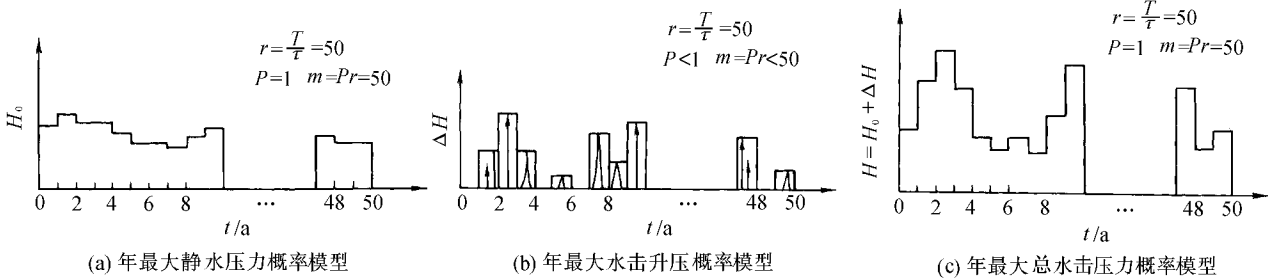


图 1 水击压力荷载随机过程示意图
Fig.1 Stochastic process of waterhammer

收稿日期: 1999-07-20

基金项目 教育部博士点基金资助项目(97029403).

作者简介 张芹芬(1965—),女,江苏武进人,副教授,博士,主要从事水电站水力学研究.

现以机组电负荷引起水击升压为例,分析静水压力 $H_0(t)$ 与水击升压 $\Delta H(t)$ 这两种随机过程的不同特性和概率分布.

1.1 静水压力 $H_0(t)$ 荷载特性与概率分析

压力管道某断面处的静水压力 H_0 ,即电负荷前管道恒定流时该断面处的内水压力为

$$H_0 = Z_R - h_{w0} \quad (3)$$

式中: h_{w0} ——自进水口至该断面处的总水头损失,因其值相对较小,此处认为 h_{w0} 为常量(确定量); Z_R ——库水位.因 Z_R 随时间变动,因此 H_0 也属随机可变荷载,并且只需统计分析 Z_R 的随机特性,即可推知 H_0 的随机统计特性.

取一年中库水位观测值的最大值为年库水位峰值,运行 N 年的电站即获得 N 个年库水位峰值样本资料,对此 N 个样本进行统计分析和假设分布检验,可得出该水库库水位峰值 Z_R 的统计特性和概率分布.根据文献[5]对我国 83 座大中型水库进行的统计分析结果,年库水位峰值 Z_R 服从正态或对数正态分布.

年最大静水压力 H_0 的随机过程如图 1(a)所示.将设计基准期 T 划分为等时段 τ ,因为水文变化周期为年,故 τ 取为 1 a.由式(3)知, H_0 的分布函数 $F_\tau(H_0)$ 与年库水位峰值 Z_R 的概率分布类型相同,其统计参数(均值 m_{H_0} 及变差系数 V_{H_0})也可近似地由 Z_R 的统计参数推知:

$$m_{H_0} = m_{Z_R} - h_{w0} \quad (4)$$

$$V_{H_0} = V_{Z_R} \quad (5)$$

压力管道设计基准期 T 一般为 50 a, $r = T/\tau = 50$,采用平稳二项随机过程理论或按极值统计法,均可得出设计基准期 T 内最大静水压力的概率分布^[6]

$$F_T(H_0) = [F_\tau(H_0)]^{50} \quad (6)$$

静水压力 H_0 是设计基准期内一定出现的持久性可变荷载,它的概率分布主要与库水位 Z_R 有关,而与电负荷事故发生与否、发生频率 P 及电负荷程度等随机因素没有直接关系.

1.2 动水压力 $\Delta H(t)$ 荷载特性与概率分析

水击升压 ΔH 一般只在电负荷时产生,根据对 8 个电站 13 个水力单元共计 188 个运行年发生的事故紧急关机统计,年均发生率不到 1 次/a^[4],而且每次发生时持续时间很短,只有几秒,如图 1(b)所示,因此水击升压属偶然性的可变荷载.虽然习惯上将它考虑为基本组合荷载之一,但它的发生频率及持续时间在结构可靠度设计时应有所反映,也即它的作用分项系数不应按通常的可变荷载取为 1.4,也不应按地震等偶然荷载取为 1.0,而应在 1.0~1.4 之间取值,因此规范^[2]规定水击压力的分项系数为 1.1 是合理的.同时还需考虑它与其它荷载的效应组合问题,取一合理的折减系数,它的荷载效应组合系数可取为 0.6^[6].

由于静水压力 H_0 (初始条件)对水击升压 ΔH 的计算及随机特性有较大影响,因此 ΔH 的划分时段 τ 仍相应地取为 1 a,并需获得各个时段 τ 上最大水击升压 ΔH 的概率分布 $F_\tau(\Delta H)$.而水击升压 ΔH 很少能直接量测得到足够容量的观测样本,因此文献[3,4]建立了年最大水击升压 ΔH 的随机分析数学模型,求得了年最大水击升压 ΔH 的概率分布 $F_\tau(\Delta H)$ 曲线,它与电负荷程度等多种随机因素有关.

下面采用平稳二项随机过程模型来分析荷载随机过程 $\Delta H(t)$, $t \in [0, T]$.设计基准期 T 划分为时段 τ (1 a),在时段 τ 内的水击事故发生概率 P 从电站统计取得^[4],设计基准期 T 内最大水击升压的概率分布为^[6]

$$F_T(\Delta H) = [F_\tau(\Delta H)]^{50P} \quad (7)$$

水击升压作用历时较短且一般小于静水压力,因此在分项系数极限状态设计表达式中,静水压力作为第一项可变荷载,其标准值须采用设计基准期 T 内最大静水压力概率分布 $F_T(H_0)$ 的 0.95 分位值.而动水压力作为第二项可变荷载,其标准值只须采用时段 τ 内概率分布 $F_\tau(\Delta H)$ 的 0.95 分位值,不必求得设计基准期 T 内最大水击升压的概率分布 $F_T(\Delta H)$.

以上分析表明,虽然 H_0 与 ΔH 两者并非在空间上、时间上完全相互独立,但两者叠加的持续时间相对很短,最大值更很少同时发生,并且它们分属于持久性和偶然性可变荷载,具有不同的随机特性和概率分布.将两者分别作为单独的可变作用来进行分项系数极限状态结构设计,物理意义更明确,更能反映各自的荷载特性.当然,两者的标准值、分项系数、组合值系数以及准永久值系数均应按照它们各自的概率分布、随机过程

特性来选取. 例如, 进行正常使用极限状态设计时, 若采用长期效应组合, 静压部分 H_0 的准永久值系数宜取较大值, 而水击升压 ΔH 宜采用较小的准永久值系数进行折减才符合实际情况.

2 压力管道强度设计原理

2.1 传统设计方法

2.1.1 荷载确定(忽略温度力、风荷载、雪荷载等影响)

- a. 钢管和管内水体自重为均布荷载 q , 则跨中断面弯矩 $M = qL^2/12$.
- b. 内水压力按传统的确定性方法计算.

2.1.2 应力计算

首先将各种荷载在管道最危险截面上某些最危险点的轴向应力、径向应力、环向应力分别计算出来, 然后按下式求出该点的计算应力:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_x)^2]} + 3(\tau_{xr}^2 + \tau_{r\theta}^2 + \tau_{\theta x}^2) \tag{8}$$

若满足 $\sigma < \varphi[\sigma]$, 则表明钢管厚度已能满足强度要求. 其中钢管焊缝系数 φ 取为 0.95, 允许应力 $[\sigma] = 0.67\sigma_s$, σ_s 为钢管屈服应力, 可按管壁厚度 δ 来取值^[7].

2.2 分项系数设计方法(静水压力、动水压力作为两项可变荷载)

荷载效应组合仅考虑钢管和水体自重 G 、静水压力 H_0 (第一项可变荷载 Q_1) 和水击升压 ΔH (第二项可变荷载 Q_2) 三项, 忽略温度力、风荷载、雪荷载等效应的影响. 分项系数极限状态表达式可写为

$$\gamma_0(\gamma_G S_{G_k} + \gamma_{Q_1} S_{Q_{1k}} + \varphi \gamma_{Q_2} S_{Q_{2k}}) \leq R_k / \gamma_R \tag{9}$$

式中 $S_{G_k}, S_{Q_{1k}}, S_{Q_{2k}}$ 分别为荷载 G, Q_1, Q_2 产生的荷载效应.

2.2.1 荷载标准值

- a. 钢管和管内水体自重 G 属确定性永久荷载, 荷载分项系数 γ_G 按规范^[1,6]取为 1.2, 荷载标准值 $G_k = q$, 跨中弯矩 $M = qL^2/12$.
- b. 静水压力 H_0 是一项主要的可变荷载, 其年最大值一般服从正态分布 $N(\mu_{H_0}, \sigma_{H_0}^2)$, 荷载标准值 Q_{1k} 应根据设计基准期 50 年内最大静水压力分布的 0.95 分位点确定. 分项系数 γ_{Q_1} 按规范^[1]取为 1.4.
- c. 水击升压 ΔH 是第二项可变荷载, 其年最大值的概率分布由水击随机分析而得, 其年最大值概率分布的 0.95 分位点值即为荷载标准值 Q_{2k} . 分项系数 γ_{Q_2} 取为 1.1, 荷载组合系数 φ_2 取为 0.6^[1].

2.2.2 荷载效应计算

分别计算由永久荷载 G_k 、第一项可变荷载 Q_{1k} 和第二项可变荷载 Q_{2k} 产生的荷载效应 $S_{G_k}, S_{Q_{1k}}$ 和 $S_{Q_{2k}}$, 结构重要性系数 γ_0 据结构安全等级定为 1.0. 以上各项均代入式(8)的左边, 即得总的荷载效应 S .

2.2.3 结构抗力标准 R_k 及分项系数 γ_R 的确定

我国钢结构统一标准中对钢管材料屈服强度进行了统计分析, 得出了各种规格国产 16Mn 和 A3 钢板强度均服从正态分布 $N(\mu_{\sigma_s}, \sigma_{\sigma_s}^2)$ 的结论, 并给出了各种规格的分布参数, 其中 $\delta \leq 16 \text{ mm}$ 的 16Mn 钢, 其屈服强度统计均值 $\mu_{\sigma_s} = 391 \text{ MPa}$, 均方差 $\sigma_{\sigma_s} = 25.3 \text{ MPa}$. 抗力标准值取对结构设计不利的 0.05 分位点值, 即

$$R_k = \mu_{\sigma_s} - 1.645\sigma_{\sigma_s} \tag{10}$$

抗力分项系数 γ_R 应根据具体结构取值, 抗力效应为 R_k / γ_R .

若总的荷载效应 S 小于抗力效应 R_k / γ_R , 则钢管厚度 δ 能满足分项系数强度设计要求.

2.3 分项系数设计方法(静水压力、动力压力合为一项可变荷载)

此时可变荷载只有一项, 分项系数设计表达式为

$$\gamma_0(\gamma_G S_{G_k} + \gamma_{Q_1} S_{Q_{1k}}) \leq R_k / \gamma_R \tag{11}$$

年最大总内水压力的概率分布由水击随机分析提供, 但其荷载标准 Q_{1k} 须根据设计基准期 50 年内的最大总内水压力概率分布的 0.95 分位点来确定. 式(11)中其它各项与式(9)相同.

3 算 例

对图 2 所示的电站,静水头 H_0 服从正态分布 $N(\mu_{H_0}, \sigma_{H_0}^2)$, $\mu_{H_0} = 100.0\text{ m}$, $\sigma_{H_0} = 10.0\text{ m}$, 设计水头 $H_d = 100.0\text{ m}$, 管长 $L = 500.0\text{ m}$, 波速 $a = 1\,000\text{ m/s}$, 阀门全开时管道流速为 $V_f = 5.0\text{ m/s}$ (即 $C_d = 0.5$), 阀门从初始开度 $\tau_0 = 1.0$ 至终了开度 $\tau_1 = 0$ 的整定关闭有效历时为 10 s , 服从线性关闭规律. 初步设计确定钢管直径 $D = 4.0\text{ m}$, 支墩间距 $L = 8.0\text{ m}$, 采用 16Mn 钢. 假设管壁厚度 $\delta = 12\text{ mm}$, 要求校核正常运行期间, 钢管跨中断面承受内水压力时钢管强度是否满足要求.

3.1 内水压力分析

由于 $\rho\tau_0 > 1$, 故发生极限水击. 若采用确定性分析方法^[4], 可知管道末端最大水击升压为 $\Delta H_m = 30.42\text{ m}$, 最大总内水压力 $H_m = H_0 + \Delta H_m = 140.42\text{ m}$. 管道末端最大水击升压为 ΔH_m 的概率密度曲线和累积分布曲线如图 3(a)(b) 所示, 均值为 28.28 m , 均方差为 2.73 m ; 也可计算 H_m 的概率密度曲线和累积分布曲线, 如图 3(c)(d) 所示, 均值为 127.26 m , 均方差为 5.50 m . 通过 χ^2 法分布假设检验, ΔH_m 和 H_m 均服从正态分布, 也接受对数正态分布假设.

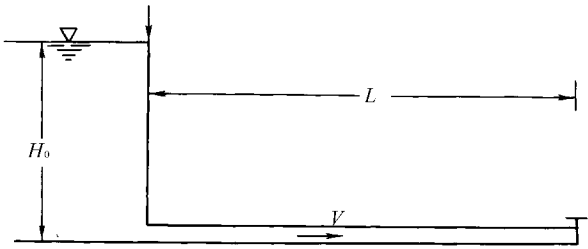


图 2 简单管示意图
Fig.2 Reservoir-pipeline-valve system

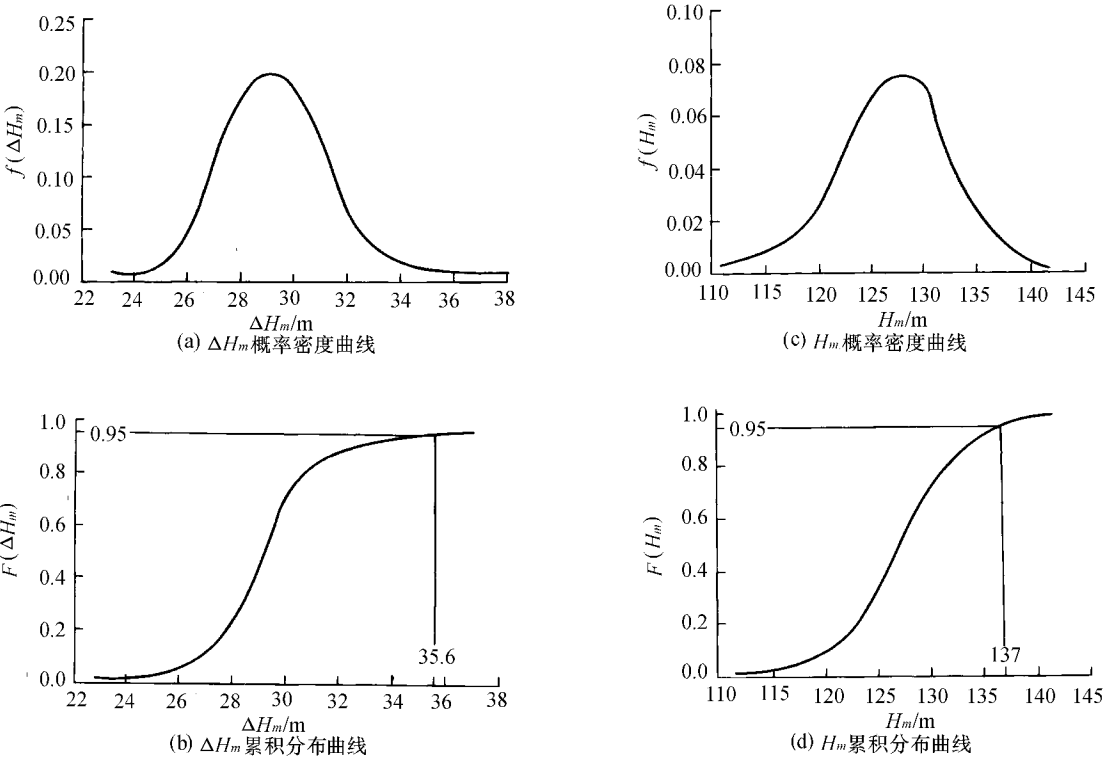


图 3 极限水击压力的概率分布

Fig.3 Probability distribution of the maximum vaule of waterhammer

3.2 传统设计方法

计算得 $q = 1.35 \times 10^5\text{ N/m}$, 跨中断面弯矩 $M = 7.20 \times 10^5\text{ N}\cdot\text{m}$, 管末最大总内水压力为 $H_m = 140.42\text{ m}$. 最大计算应力(跨中断面最低点) $\sigma = 281.22\text{ MPa}$. 钢管允许应力 $[\sigma] = 0.67\sigma_s = 256.99\text{ MPa}$, 钢管焊缝系数 φ 取为 $0.95^{[7]}$. $\sigma > \varphi[\sigma] = 244.14\text{ MPa}$, 钢管厚度 $\delta = 12\text{ mm}$ 不能满足强度要求. 假设钢管厚度 $\delta = 14\text{ mm}$, 重新计

算得 $\sigma = 234.91 \text{ MPa} < \varphi [\sigma]$, 因此钢管厚度 $\delta = 14 \text{ mm}$ 能满足强度要求.

3.3 分项系数设计方法(静、动水压力作为两项可变荷载)

先按假设的钢管厚度 $\delta = 12 \text{ mm}$ 来校核. 荷载标准值 $G_k = q = 1.35 \times 10^5 \text{ N/m}$, 跨中弯矩 $M = 7.20 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}$. $H_0 \sim N(\mu_{H_0}, \sigma_{H_0}^2)$, $\mu_{H_0} = 100.0 \text{ m}$, $\sigma_{H_0} = 10 \text{ m}$. 据式(6)可得 50 年内最大值概率分布曲线 $F_T(x)$, 如图 4 所示, 其 0.95 分位点值为 142.9 m . 但考虑到坝高限制、泄洪控制等原因, 库水位不可能超过最高洪水位 115 m , 因此取荷载标准值 $Q_{1k} = 115 \text{ m}$. ΔH 的年最大值的概率分布见图 3(a)(b), 其 0.95 分位点值即为荷载标准值 $Q_{2k} = 34.0 \text{ m}$. 经计算, 跨中断面最低点总的荷载效应 $S = 385.80 \text{ MPa}$

本算例抗力标准值为 $R_k = 342.76 \text{ MPa}$, 抗力分项系数取为 1.0, 抗力效应 $R_k/\gamma_R = 342.76 \text{ MPa}$. 因 S 大于 R_k/γ_R , 故钢管厚度 $\delta = 12 \text{ mm}$ 不能满足要求. 重新取 $\delta = 14 \text{ mm}$, 此时 S 小于 R_k/γ_R , 满足钢管强度设计要求.

3.4 分项系数设计方法(静、动水压力合为一项可变荷载)

唯一的一项可变荷载 H_m 的年最大值概率分布见图 3(c)(d). 经计算, 得设计基准期 50 年内的最大总水击压力概率分布(图 5), 荷载标准值取 0.95 分位点值, 即 $Q_{1k} = 149.8 \text{ m}$, 相应的荷载效应 $S_{Q_{1k}} = 302.49 \text{ MPa}$, 式(11)中其它各项取值与式(9)中相同. 计算得总的荷载效应 $S = 430.35 \text{ MPa} > R_k/\gamma_R$, 因此厚度 $\delta = 12 \text{ mm}$ 不能满足分项系数强度设计要求. 取 $\delta = 14 \text{ mm}$ 仍不能满足设计要求, 最后取 $\delta = 16 \text{ mm}$ 才满足设计要求.

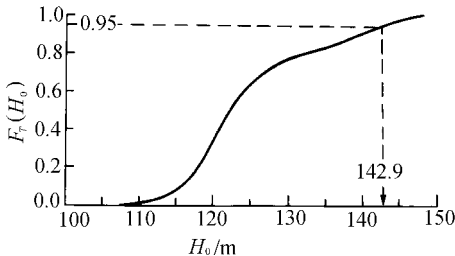


图 4 50 年内 H_0 概率分布

Fig.4 Probability distribution of H_0 during 50 years

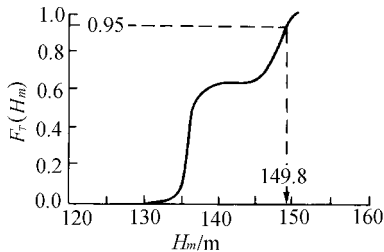


图 5 50 年内 H_m 概率分布

Fig.5 Probability distribution of H_m during 50 years

4 结 论

- a. 本文从压力管道的结构分项系数概率极限状态设计这一目标出发, 提出应采用平稳二项随机过程或极值统计法来研究水击这类可变荷载.
- b. 传统的确定性设计方法将各种荷载产生的内力效应合并在一起, 笼统地用一个安全系数(本算例中即为允许应力与屈服应力之比)表示各种不确定因素的安全裕量, 物理意义不很明确, 带有很大的主观性, 已不能满足日益精确的结构设计需要.
- c. 采用分项系数概率极限状态方法进行结构强度校核时, 将静、动两项水压力作为两项可变荷载, 所得结论与原规范确定性设计方法相一致. 说明虽然极限水击升压 ΔH_m 的确定性解是偏小的(由于不考虑 T_c 的误差分布), 但传统的确定性计算设计取值是在 ΔH_m 上叠加可能的最大静水压, 原理上并不合理, 但在数值上还是安全可用的.
- d. 在进行分项系数结构可靠度设计时, 若按传统的水击压力荷载概念将静、动两项水压力合为一项可变荷载, 不区分各部分荷载在发生几率、作用历时及概率分布等方面的不同特性, 取用同一个分项系数, 则物理意义不明确, 设计结果偏于保守, 因而是不可取的.

参考文献:

[1] GB 50199—94 水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S].
[2] DL 5077—1997 水工建筑物荷载设计规范[S].
[3] 郭文涛, 索丽生. 简单管水击随机分析[J]. 水力发电学报, 1996, (4) 72~81.
[4] 张芹芬. 水电站水击与调压室涌浪的随机分析[D]: [学位论文]. 南京 河海大学, 1998.
[5] 吴世伟, 张思俊, 余强. 坝上游水位变化规律及统计量[J]. 华东水利学院学报, 1984, 12(4) 76~74.

- [6] GBJ 68—84 建筑结构设计统一标准(试行) [S].
[7] SD 144—85 水电站压力钢管设计方法 [S].

Application of Stochastic Analysis of Waterhammer in Structural Design of Penstocks

ZHANG Qin-fen, SUO Li-sheng

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract To meet the need of the structural design of penstocks with the Load Coefficient Limiting State method, the theory of stationary binomial random process or the extreme value statistical method should be used for the analysis of such variable loads as static pressure waterhammer. The characteristics (annual occurrence sustaining period and probability distribution) of the static and dynamic hydraulic loads are studied in detail, and a practical example of structural design of a penstock is presented. It is deemed that the hydraulic pressure should be treated as two individual stochastic variable loads—the static pressure and the dynamic pressure, and different load coefficients should be adapted, respectively, to reflect their physical features. Especially, the probability distribution of the maximum value in design standard period is employed when dealing with the static hydraulic load, while that of the annual maximum value is utilized for dynamic hydraulic load.

Key words waterhammer; stochastic analysis; penstock; structural reliability analysis

《水利水电科技进展》征订启事

《水利水电科技进展》(双月刊,国内统一刊号 CN32 - 1439/TV,国际标准刊号 ISSN1006 - 7647)。主要刊登与水利、水电、水运、海洋、土木、环境等学科有关的文章,为水利水电工程建设及运行管理提供有借鉴意义的新颖实用技术和科技信息。主要栏目有科技论坛、综合述评、研究探讨、工程技术、成果推广、国外动态等,适合广大工程技术人员、科学研究人员、科技管理人员以及大专院校师生阅读。

本刊由河海大学主办,全国各地邮局均可订阅,邮发代号 28 - 244,2000 年全年订价 30.00 元,也可直接汇款至编辑部订阅(另加包装邮寄费 6.00 元)。编辑部地址:南京市西康路 1 号河海大学《水利水电科技进展》编辑部,邮政编码 210098。汇款时务请注明“订水利水电科技进展”。联系电话:(025)3713777 转 50335。