

压力钢管可靠度分析方法探讨

张雪颖, 索丽生

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:考虑荷载的随机性及管壁材料的统计特性,从概率角度出发,利用改进的一次二阶矩法,对水平放置的压力明钢管跨中截面的强度可靠度作了初步探讨.结果表明,安全系数法偏于保守,采用结构可靠度分析方法进行设计更为合理.

关键词:压力钢管;荷载;水击;可靠度

中图分类号:TV732.4+1

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2002)02-0022-03

在工程结构设计标准中采用以结构可靠度理论为基础的概率极限状态设计法,已成为当前国际工程结构领域的一个共同发展趋势.我国在水利水电工程方面也先后颁布了GB50153-92《工程结构设计统一标准》和GB50199-94《水利水电工程结构可靠度统一标准》.这些标准采用了先进的可靠度理论为基础的极限状态设计法,以结构的失效概率度量结构构件的可靠性,按分项系数设计表达式进行结构设计.近几年来对压力钢管的主要荷载的随机性及统计参数的研究较多;文献[1]通过对现有资料和数据统计分析,得到了水电站压力钢管可靠度分析基本变量的统计参数和概率分布类型;文献[2]从水击极大值的近似解析式出发,导出了由水库、管道和阀门组成的简单管水击最大升压的概率分布及统计规律;文献[3]采用广泛适用的Monte-Carlo法,计算分析了调压室最高涌浪的统计特性及概率分布;文献[4]在文献[2]的基础上考虑更多的随机影响因素,从简单管水击极值近似解析表达式出发,推导出年最大水击压力的解析概率分布.这些文献仅研究了压力钢管荷载的统计特性,而没有涉及钢管结构可靠度分析的问题.本文在此基础上对水平放置的明钢管跨中截面的强度可靠度分析方法作一探讨.

1 压力钢管的承载力极限状态方程

结构的承载能力用功能函数描述^[5]

$$Z = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (1)$$

式中 X_i 为随机变量. $Z > 0$ 时结构安全, $Z < 0$ 时结构失效, $Z = 0$ 为结构极限状态.

$$g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = 0 \quad (2)$$

为极限状态方程. $Z > 0$ 的概率是结构承载能力的可靠概率.

压力钢管在内水压力作用下的强度设计就是要使内水压力作用下的工作应力小于钢管材料的极限应力,相应的承载力极限方程^[5]为

$$Z = R - S \quad (3)$$

式中: R 为结构的抗力; S 为内水压力作用下钢管的荷载效应.

2 荷载及荷载效应的统计特性

a. 对简单管,文献[4]在假设阀门开度依线性规律从 τ_0 至全关 ($\tau_0 = 0$) 的条件下,把电站静水压力 H_0 、带负荷系数 m_0 、实际关闭历时 T_c 视为随机变量,从简单管水击极值近似表达式出发,得到极限水击压力 ΔH_m 和第一相水击压力 ΔH_1 的概率分布;并通过 χ^2 法分布假设检验,分极限水击和第一相水击两种情况,得出最大内水压力 $H_m = H_0 + \Delta H_m$ 和 $H_1 = H_0 + \Delta H_1$ 均服从正态分布,其次也接受对数正态分布假设的结论.

b. 钢管自重和水体自重只与钢管直径 D_0 和钢管壁厚 δ 有关,而 D_0 和 δ 变异相对较小,可视为确定量,所以钢管自重、水体自重可作为确定量.

下面讨论在上述荷载作用下的荷载效应.管身的应力分析一般取三个基本断面:跨中断面、支承环断面和支承环附近断面,本文只讨论跨中断面.压力钢管跨中截面应力:

a. 由内水压力及管内水重而产生的环向应力

$$\sigma_\theta = \frac{\gamma H_m D_0}{2\delta} + \frac{\gamma D_0^2}{4\delta} (1 - \cos \alpha) \quad (4)$$

b. 主要由钢管和水体自重产生的轴向应力

$$\sigma_x = \pm \frac{4M}{\pi D_0^2 \delta} \quad (5)$$

c. 主要由内水压力引起的径向应力

$$\sigma_r = -\gamma H_m \quad (6)$$

式中: γ 为水的容重; H_m 为内水压力; D_0 为钢管直径; δ 为管壁厚度; M 为钢管与水体自重产生的跨中弯矩。

径向应力与环向应力及轴向应力相比较小,可忽略不计。

由式(4)~式(6)即可推导出荷载效应的统计特性。

3 结构抗力的统计特性

我国钢结构统一标准 SD144-85《水电站压力钢管设计方法》对钢管材料屈服强度进行了统计分析,得出了各种国产 16 Mn 钢和 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

4 构件的可靠度分析

钢管处于三维应力状态,传统的强度校核方法是求出计算应力并与容许应力作比较。钢管的强度校核目前多采用第四强度理论,其强度条件为

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{x\theta}^2 + \tau_{\theta x}^2 + \tau_{\theta x}^2)] \right\}^{\frac{1}{2}} \leq \varphi[\sigma] \quad (7)$$

式中 φ 为焊缝系数,因为焊接工艺等原因 φ 应作为随机变量考虑,鉴于这方面的统计资料比较欠缺,本文暂把它作为确定量取为 0.9。由于 $\sigma_r, \tau_{x\theta}, \tau_{\theta x}$ 一般较小,且在钢管的跨中断面 $\tau_{\theta x}^2 = 0$,故相应的功能函数为

$$Z = g(\sigma_s, \sigma_\theta) = 0.9\sigma_s - \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_x\sigma_\theta} \quad (8)$$

由于 D_0 和 δ 作为确定量,所以 σ_x 为常量。

由式(4)且 H_m 服从正态分布,所以 σ_θ 也服从正态分布,其统计参数

$$\begin{cases} \mu_{\sigma_\theta} = \frac{\gamma H_m D_0}{2\delta} + \frac{\gamma D_0^2}{4\delta} (1 - \cos \alpha) \\ \sigma_{\sigma_\theta} = \frac{\gamma D_0 \sigma_{H_m}}{2\delta} \end{cases} \quad (9)$$

利用改进一次二阶矩法^[5]计算可靠指标 β ($\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z}$)。

选择失效边界上与结构最可能失效概率对应的

点,即所谓的设计验算点^[5] ($\sigma_s^*, \sigma_\theta^*$) 作为线性化点,根据式(8)可得线性化的极限状态方程

$$g(\sigma_s^*, \sigma_\theta^*) + \frac{\partial g}{\partial \sigma_s} \Big|_{(\sigma_s^*, \sigma_\theta^*)} (\sigma_s - \sigma_s^*) + \frac{\partial g}{\partial \sigma_\theta} \Big|_{(\sigma_s^*, \sigma_\theta^*)} (\sigma_\theta - \sigma_\theta^*) = 0 \quad (10)$$

由于设计验算点在失效边界上,即有:

$$g(\sigma_s^*, \sigma_\theta^*) = 0 \quad (11)$$

记 $\frac{\partial g}{\partial \sigma_s} \Big|_{(\sigma_s^*, \sigma_\theta^*)} = A, \frac{\partial g}{\partial \sigma_\theta} \Big|_{(\sigma_s^*, \sigma_\theta^*)} = B$, 由 σ_s, σ_θ 相互独立,得出 Z 的均值和方差分别为

$$\begin{cases} \mu_Z = A(\mu_{\sigma_s} - \sigma_s^*) + B(\mu_{\sigma_\theta} - \sigma_\theta^*) \\ \sigma_Z = \sqrt{(A\sigma_{\sigma_s})^2 + (B\sigma_{\sigma_\theta})^2} \end{cases} \quad (12)$$

利用 $\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}} = \sum_{i=1}^n \varphi_i x_i$ 将式(12)中 σ_Z 线性化:

$$\sigma_Z = \alpha_{\sigma_s} \sigma_{\sigma_s} A + \alpha_{\sigma_\theta} \sigma_{\sigma_\theta} B \quad (13)$$

其中

$$\alpha_{\sigma_s} = \frac{\sigma_{\sigma_s} A}{\sigma_Z}, \alpha_{\sigma_\theta} = \frac{\sigma_{\sigma_\theta} B}{\sigma_Z} \quad (14)$$

根据可靠指标的定义有:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{A(\mu_{\sigma_s} - \sigma_s^*) + B(\mu_{\sigma_\theta} - \sigma_\theta^*)}{\alpha_{\sigma_s} \sigma_{\sigma_s} A + \alpha_{\sigma_\theta} \sigma_{\sigma_\theta} B} \quad (15)$$

可整理得

$$(\mu_{\sigma_s} - \sigma_s^* - \beta \alpha_{\sigma_s} \sigma_{\sigma_s}) A + (\mu_{\sigma_\theta} - \sigma_\theta^* - \beta \alpha_{\sigma_\theta} \sigma_{\sigma_\theta}) B = 0 \quad (16)$$

即 $\sigma_s^* = \mu_{\sigma_s} - \alpha_{\sigma_s} \beta \sigma_{\sigma_s}, \sigma_\theta^* = \mu_{\sigma_\theta} - \alpha_{\sigma_\theta} \beta \sigma_{\sigma_\theta} \quad (17)$

由式(2),(14),(17)应用拉克维次^[5]提出的一种收敛速度很快的迭代法即可计算出可靠指标 β 及设计验算点。具体计算步骤见图 1。

5 算例

某一段水平放置的压力管道,其总内水压力 H_m 服从正态分布,其均值为 127.26 m,均方差为 5.50 m,按传统的确定性方法设计,内水压力取 140.42 m。初步设计确定管径 $D_0 = 4.0$ m,两支墩之间跨长 $L = 8.0$ m,采用 16 Mn 钢,管壁厚 $\delta_0 = 12$ mm,计算正常运行期间,钢管跨中断面承受内水压力时的强度可靠度。

荷载确定如下:

a. 钢管 ($\delta_0 = 12$ mm) 和管内水重: 均布荷载 $q = 1.35 \times 10^5$ N/m,跨中断面弯矩 $M = qL^2/12 = 7.29 \times 10^5$ N·m。

b. 内力计算(拉应力为+,压应力为-,切应力

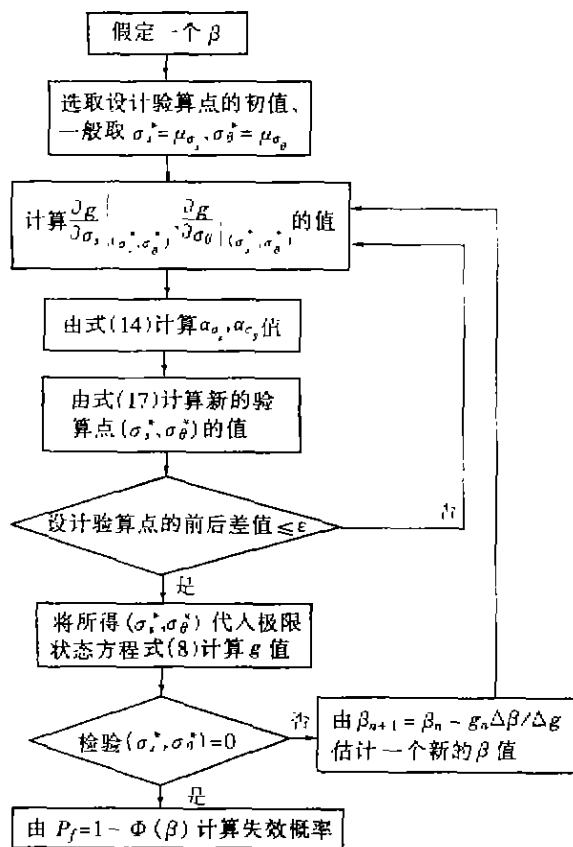


图1 可靠指标 β 计算流程

全为零), 考虑钢管锈蚀影响, 取计算厚度 $\delta = 10\text{mm}$, 跨中断面最不利点为最高点 ($\alpha = 0^\circ$ 称为 A 点) 和最低点 ($\alpha = 180^\circ$ 称为 B 点)。

由 H_m 服从参数 $\mu_{H_m} = 127.26\text{mm}$, $\sigma_{H_m} = 5.50\text{mm}$ 的正态分布及式(4)、式(5), 得到荷载效应服从正态分布, 其统计参数见表 1。

由 SD144-85《水电站压力钢管设计方法》可查得抗力满足 $(383.57, 24.79^2)$ 的正态分布, 由式(8)得: A 点对应的功能函数为

$$Z_A = g(\sigma_s, \sigma_\theta) = 0.9\sigma_s - \sqrt{\sigma_\theta^2 + 5.72\sigma_\theta + 5.72^2}$$

B 点对应的功能函数为

$$Z_B = g(\sigma_s, \sigma_\theta) = 0.9\sigma_s - \sqrt{\sigma_\theta^2 - 5.72\sigma_\theta + 5.72^2}$$

利用前述方法, 笔者编制了计算程序, 计算出可靠指标, 见表 1。

表1 计算结果

位置	轴向应力 σ_s/MPa	环向应力 $\mu_{\sigma_\theta}/\text{MPa}$ $\sigma_{\sigma_\theta}/\text{MPa}$		可靠指标 β	设计验算点
		$\mu_{\sigma_\theta}/\text{MPa}$	$\sigma_{\sigma_\theta}/\text{MPa}$		
A 点	-5.72	249.43	10.78	4.53	(254.31, 251.40)
A 点	5.72	257.27	10.78	4.42	(256.38, 259.19)

综合 A、B 两点可得跨中断面强度的失效概率为 $P_f = 1 - \Phi(\beta) = 1 - 0.999995 = 0.0005\%$ 。

从工程设计观点看, 可以认为本钢管跨中断面强度失效概率为 0.0005%, 也就是说本截面强度具有 99.9995% 的可靠度。

与确定性的安全系数法得出的 $\delta = 14\text{mm}$ 方能满足的结论有些差异, 分析有以下原因: ①安全系数法中内水压力采用的是可能的最不利值的叠加(这种情况发生的几率极小), 而抗力则为了安全大打折扣; ②可靠度分析虽然反映了荷载及抗力的不确定性, 但由于资料有限, 随机变量的选取及统计参数的获得都带有一定的局限性, 不过从本文分析可以看出可靠度方法更能反映实际情况, 而安全系数法偏于保守。

6 结 论

根据压力钢管内水压力的随机性和管壁材料强度的统计特性, 给出了钢管结构可靠度的计算方法, 并通过实例对可靠度分析与容许应力法的结果进行了比较, 说明前者更合理。这种先进方法最本质的进步是将设计中主要的不确定性因素加以量化分析, 从定值设计观念向非定值设计观念转变, 为实现优化设计, 在安全与经济之间选择最佳平衡创造了条件。因此, 在水工结构统一标准中积极稳妥地推行以先进的结构可靠度理论为基础的概率极限状态设计法, 是促进水利水电工程设计进一步科学化与合理化的有力措施。

参考文献:

- [1] 何英明, 侯建国, 张健, 等. 压力钢管可靠度分析基本变量的统计特性[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(5): 5~10.
- [2] 郭文铸, 索丽生. 简单管水击随机分析[J]. 水力发电学报, 1996(4): 72~80.
- [3] 张芹芬, 索丽生. 调压室涌浪分析的随机模型[J]. 河海大学学报, 1997, 25(5): 41~45.
- [4] 张芹芬. 简单管水击随机分析再探[J]. 水力发电学报, 2000(2): 56~63.
- [5] 吴世伟. 结构可靠度分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.

(收稿日期: 2001-06-04 编辑: 熊水斌)

