

式中 D_c 为结构破损度效应; D_c^* 为破损度模糊安全域.

由式 (6) 即可计算结构层和结构体系的模糊动力可靠性^[13,14].

3.4 抗震结构的震害预测和损失估计

文 [15] 利用地震危险性分析给出的地震烈度概率分布, 提出了抗震结构在未来使用期间的震害预测方法, 具体表达式为

$$P_f(\bar{B}_i) = \sum_I P_f(\bar{B}_i / I) \cdot P(I) \quad (7)$$

式中 I 为地震烈度, 一般取 $I = 6-10$; $P_f(\bar{B}_i)$ 为相应于发生震害等级 B_i 的失效概率.

结构的地震损失 (直接损失) 可以分为财产损失和人身伤亡损失两大类, 文 [16] 提出了初步的结构损失估计原则和相应于各震害等级的损失估计函数. 结构的损失期望可以表示为^[16]

$$E_f = \sum_{i=1}^5 P_f(\bar{B}_i) L_f(B_i) \quad (8)$$

式中 $L_f(B_i)$ 为相应于 B_i 等级震害的损失.

4 抗震结构的概率设计

以可靠性为基础的概率设计是结构设计的必然趋势, 文 [3] 在总结、完善抗震结构设计理论涉及的诸分支领域的基础上, 系统地建立起了抗震结构的概率设计理论, 提出了 3 种具体的设计方法.

4.1 期望破损度设计法

结构的期望破损度 $\langle D_c \rangle$ 从平均意义上反映了结构的破损程度, 这一设计模型为

$$\left. \begin{array}{l} \text{求: 设计向量 } \bar{x} \\ \text{使: } \langle D_c \rangle \leq D_c^* \end{array} \right\} \quad (9)$$

式中 D_c^* 为破损度的容许值.

4.2 动力可靠性设计法

完整的概率设计应是基于可靠性的结构设计, 其设计准则可以表示为

$$\left. \begin{array}{l} \text{求: 设计向量 } \bar{x} \\ \text{使: } P_s(B_i^*) \geq P_{s_i}^* \end{array} \right\} \quad (10)$$

式中 B_i^* 为结构不发生 B_i 或更高等级震害的模糊安全域; $P_{s_i}^*$ 为相应的可靠性限值.

4.3 具有可靠度约束的双目标优化设计法

基于结构的失效概率分析和地震损失分析, 考虑结构的初始投资和可能遭受的地震损失, 结构的双目标优化设计模型可以表示为^[15]

$$\left. \begin{array}{l} \text{求: 设计向量 } \bar{x} \\ \text{使: } W(\bar{x}) = \theta_I C_I(\bar{x}) + \theta_f E_f(\bar{x}) \rightarrow \min \\ \text{满足: } P_f(\bar{B}_i^*) \leq P_{f_i}^* \end{array} \right\} \quad (11)$$

式中 $W(\bar{x})$ 和 $C_I(\bar{x})$ 分别为目标函数和初始造价; \bar{B}_i^* 为结构发生 B_i 或更高等级震害的模糊失效域; θ_I 和 θ_f 分别为初始造价和损失期望的权系数, $\theta_I + \theta_f = 1$.

5 工程结构的弹塑性随机动力分析与概率设计

实现概率抗震设计的根本途径就是要把工程结构的随机动力分析与具体设计参数联系起来, 即必须建立恢复力模型参数和抗震能力 (极限变形与极限耗能) 与结构设计参数的定量关系. 这是结构随机地震反应分析研究未能应用于工程抗震设计的主要原因.

文献 [3] 以双线性模型描述钢结构的恢复力特性、以光滑型模型描述钢筋混凝土结构和砌体结构的恢复力特性, 利用结构分析和大量动力试验 (包括低周疲劳试验) 结果, 确定了恢复力模型参数 (初始刚度、屈服剪力和屈服后前刚度比) 和抗震能力与结构设计参数 (结构几何特征、材料的物理特征、截面特征等) 的定量关系, 架通了弹塑性随机动力分析与具体概率设计的桥梁, 将概率设计理论与方法初步应用到了工程结构的抗震设计中.

5.1 钢结构的概率设计

钢结构的破损度定义为

$$D_c = \left(\frac{X_m}{x_u} \right)^\beta + \left(\frac{W_p}{w_u} \right)^\beta \quad (12)$$

式中 β 为一正的常数.

钢结构的设计参数一般包括: 弹性模量、屈服强度、截面形式和惯性矩等, 一般来说, 钢材种类和截面形式常根据工程经验确定. 这样, 对于工程中常用的 H 型钢截面, 钢结构的概率设计就是在某种准则下求截面高度 h .

5.2 钢筋混凝土结构的概率设计

钢筋混凝土结构的破损度定义为

$$D_c = \frac{X_m}{x_u} + \beta_c \frac{W_p}{Q_y x_u} \quad (13)$$

式中 β_c 为耗能因子; Q_y 为屈服剪力.

钢筋混凝土结构的设计参数包括:混凝土强度等级、钢材种类、截面大小、纵筋及箍筋配置等,其中钢材种类、混凝土强度等级和箍筋等基本上依据工程设计和构造要求确定。这样,钢筋混凝土结构的概率设计,就是在某种设计准则下确定截面宽度 b (假设矩形截面的高宽比为常数)和纵筋配筋率 ρ 。

5.3 砌体结构的概率设计

砖房的破损度定义为

$$D_c = \frac{1}{14.61} \left[\left(\frac{X_m}{x_y} \right)^2 + 3.67 \left(\frac{W_p}{Q x_y} \right)^{1.12} \right]^{1/2} \quad (14)$$

式中 Q 为结构强度; $x_y = Q/K$ 为名义屈服位移, K 为初始弹性刚度。

砌体结构有无筋砖房和配筋砖房 2 类。对于无筋砖房,设计参数包括:砖和砂浆的强度等级、砖墙厚度等,而这些参数大都是根据工程经验确定。因此,无筋砖房的概率设计基本上是抗震验算;对于配筋砖房,设计参数还要加上配筋量,因此,配筋砖房的概率设计就是在某种设计准则下确定墙体配筋量 U_g 。

6 结 论

本文初步提出了概率抗震设计的理论和方法,要用于实际结构的具体设计还需做大量的工作,以下问题尚需进一步研究:

- (1) 建立更实用的随机地震动输入模型和荷载标准;
- (2) 结构地震破坏机理和模型研究;
- (3) 结构体系可靠性分析;
- (4) 各类结构的恢复力模型参数、破损度模型参数及各种允许指标的具体标定;
- (5) 实用概率设计方法研究。

概率动力设计理论是结构抗震设计的发展趋势,随着这一理论和方法的逐步完善,必将在工程结构抗震设计中发挥重大作用。

参 考 文 献

1 胡聿贤. 地震工程学. 地震出版社, 1988

2 王光远. 工程软设计理论. 科学出版社, 1992
 3 牛获涛. 基于弹塑性随机动力分析的抗震结构概率设计理论与方法. 哈尔滨建筑工程学院博士论文, 1991
 4 Kanai K. Semi Empirical Formula for the Seismic Characteristics of Ground. 东京大学地震研究所汇报, 1957, 35(2)
 5 欧进萍, 牛获涛. 地震地面运动随机过程模型的参数及其结构效应. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990, 23(2):24-34
 6 欧进萍, 牛获涛, 杜修力. 设计用随机地震动的模型及其参数确定. 地震工程与工程振动, 1991, 11(3): 45-54
 7 朱位秋. 随机振动. 科学出版社, 1992
 8 牛获涛, 欧进萍. 地基土-弹塑性结构体系的随机能量反应分析. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1989, 22(3):22-31
 9 牛获涛, 欧进萍. 非线性钢筋混凝土结构的随机破坏分析与设计. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1991, 24(3):8-17
 10 Young-Ji Park, Alfredo H-S Ang. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, April, 1985
 11 陈永祁, 龚思礼. 结构在地震动时延性和累积塑性耗能的双重破坏准则. 建筑结构学报, 1986, 7(1)
 12 江近仁, 孙景江. 砖房的地震破坏模型. 地震工程与工程振动, 1987, 7(1):20-34
 13 欧进萍, 牛获涛, 王光远. 多层非线性抗震钢结构的模糊动力可靠性分析与设计. 地震工程与工程振动, 1990, 10(4):27-37
 14 牛获涛, 欧进萍. 多层钢筋混凝土结构的概率弹塑性抗震设计. 西安冶金建筑学院学报, 1993, 25(2): 137-144
 15 欧进萍, 牛获涛, 王光远. 非线性钢筋混凝土抗震结构的损失估计与优化设计. 土木工程学报, 1993, 26(5):14-21
 16 欧进萍, 牛获涛, 王光远. 多层非线性抗震钢结构的损失估计与优化设计. 计算结构力学及其应用, 1992, 9(2):171-179

(1993 年 4 月 11 日收到第 1 稿,
1994 年 5 月 10 日收到修改稿)

“涡流排污装置”研究成功

气动中心低速所(四川安县)成功地采用机翼空气动力学原理即利用较强的前缘脱体涡、襟翼涡、立尾效应等组合成“涡流排污装置”。该装置能利用非对称的空气动力有效地使流体产生强大杂乱无章的湍流,从而达到清除港口、主航道等地的淤泥。该装置多次在低速所 0.4m × 0.4m 水洞中进行实地排污取得显著效果,当来流速度 $V \geq 0.2\text{m/s}$ 时,该装置能有效地排除在实验段中沉积的泥沙。其次可利用该装置在风洞中进行涡流与涡流相互之间干扰研究和多组合群体的排放研究。目前该项成果已获国家实用型专利。

(张维智)

大型变压器箱壁平板耐压强度计算

杨俊海

(保定变压器厂, 保定 071056)

摘要 本文根据弹性力学的基本理论, 以薄板模型为基础, 对大型变压器箱壁平板耐压试验进行了受力分析, 导出了各种条件下变形和应力计算公式, 最后对计算模型适用性进行了讨论.

关键词 变压器, 薄板, 耐压强度

1 引言

作为压力容器的变压器油箱虽已能用数值方法进行强度分析, 但工作量很大. 借助力学基本理论, 寻求便于工程计算的简便方法仍是产品设计部门所希望的.

为满足国际对变压器耐压试验要求, 其油箱壁多用加强铁分隔成矩形平板单元, 这种单元在受载时变形和应力的计算, 是产品合理设计的前提.

大型三相变压器常用的梯形八角油箱结构示于图 1, 图中 (b),(c) 分别表示垂直于 y 轴和 x 轴的由箱壁平板中面围成的截面图. 其上节油箱无腰梁而用 \square 形加强铁将箱沿及侧盖相连. 本文即对该种结构中由加强铁、箱沿及顶盖围成的平板单元进行讨论.

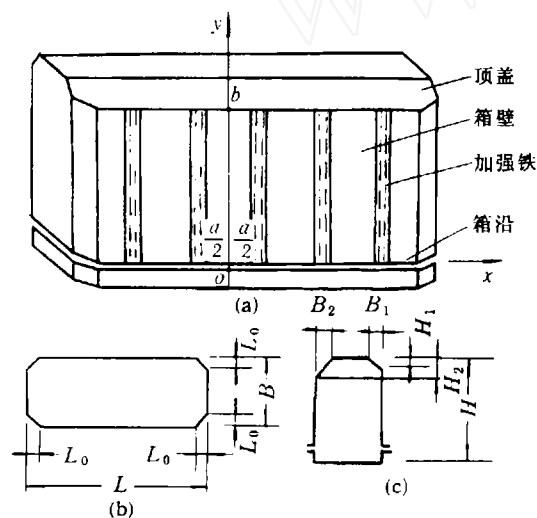


图 1

2 计算模型的建立

在箱壁上取相邻两加强铁间一块平板单元. 为

简化计算而不计加强铁变形对单元强度的影响, 并由于加强铁两边均有箱壁对称作用而略其扭转. 箱壁与顶盖连接处仅一条焊缝, 而箱壁与箱沿边处虽有箱沿加强作用, 但由于密封胶条影响, 故将箱壁与箱沿及侧盖连接处均按简支边界考虑. 这样在图 2 坐标下, 按薄板理论知, 箱壁平板在耐压试验时的变形问题即为求解定解方程式

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \\ & = \frac{1}{D} \left(q + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ & w(x, y) = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad \text{当 } x = \pm \frac{a}{2} \text{ 时} \\ & w(x, y) = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0, \quad \text{当 } y = 0 \text{ 及 } y = b \text{ 时} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $w(x, y)$ 为平板单元各点横向位移变形; q 为油箱内压或外压试验压力; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ 为箱壁平板弯曲刚度; h 为箱壁平板厚度; E, ν 为箱壁材料弹性模量和泊松比; N_x, N_y 为箱壁平板面内沿 x 和 y 方向的力. 考虑满足工程设计要求和简化计算, 此处不计加强铁及箱沿影响, 认为该力在箱壁面内均布, 从而按图 1 有

$$\left. \begin{aligned} N_x &= q \cdot \left[H \cdot B - \frac{1}{2} (H_1 B_1 + H_2 B_2) \right] \\ & \quad \left/ \left[2(H+B) - (B_1+B_2+H_1+H_2) \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \sqrt{B_1^2+H_1^2} + \sqrt{B_2^2+H_2^2} \right] \right. \\ N_y &= \frac{L \cdot B - 2L_0^2}{2(L+B) + 4(\sqrt{2}-2)L_0} \cdot q \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

油箱耐压试验时, 由图 1 用截面法不难求得在图示坐标下垂直于 x 轴和 y 轴的箱壁截面上剪力均为零, 因而式 (1) 中不存在剪力项.

3 平板横向位移变形计算

考虑上述模型边界条件特点, 用分离变量法求解方程 (1). 设

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} X_m \sin \frac{m\pi y}{b} \quad (3)$$

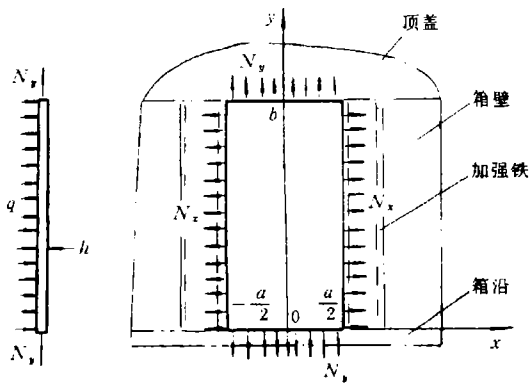


图 2

式中 X_m 仅为坐标 x 函数. 易证明式 (3) 满足式 (1) 在 $y=0$ 及 $y=b$ 处的边界条件, 且由于 $w(x,y)$ 对称于 $y = \frac{b}{2}$, 即 $w(x,y) = w(x,b-y)$, 这只有当式 (3) 中 m 为奇数时才成立, 从而有

$$w(x,y) = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} X_m \sin \frac{m\pi y}{b} \quad (4)$$

利用三角函数正交性, 将 $\frac{q}{D}$ 展成三角级数

$$\frac{q}{D} = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4q}{m\pi D} \sin \frac{m\pi y}{b} \quad (5)$$

将式 (4)、式 (5) 代入式 (1) 中偏微分方程得

$$\sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \left[X_m^{(4)} - \left(\frac{2m^2\pi^2}{b^2} + \frac{N_x}{D} \right) X_m^{(2)} + \frac{m^2\pi^2}{b^2} \left(\frac{m^2\pi^2}{b^2} + \frac{N_y}{D} \right) X_m - \frac{4q}{m\pi D} \right] \sin \frac{m\pi y}{b} = 0 \quad (6)$$

(1) 当 $U_m^2 - 4V_m > 0$ 时

(a) 若 $U_m - \sqrt{U_m^2 - 4V_m} > 0$, 则 $U_m + \sqrt{U_m^2 - 4V_m} > 0$

$$\left. \begin{aligned} X_m &= A_m \operatorname{ch}(r_{m1}x) + B_m \operatorname{ch}(r_{m2}x) + \frac{4q}{m\pi D V_m} \\ A_m &= -\frac{r_{m2} \operatorname{sh}\left(\frac{r_{m2}a}{2}\right)}{r_{m2} \operatorname{sh}\left(\frac{r_{m2}a}{2}\right) \operatorname{ch}\left(\frac{r_{m1}a}{2}\right) - r_{m1} \operatorname{sh}\left(\frac{r_{m1}a}{2}\right) \operatorname{ch}\left(\frac{r_{m2}a}{2}\right)} \times \frac{4q}{m\pi D V_m} \\ B_m &= \frac{r_{m1} \operatorname{sh}\left(\frac{r_{m1}a}{2}\right)}{r_{m2} \operatorname{sh}\left(\frac{r_{m2}a}{2}\right) \operatorname{ch}\left(\frac{r_{m1}a}{2}\right) - r_{m1} \operatorname{sh}\left(\frac{r_{m1}a}{2}\right) \operatorname{ch}\left(\frac{r_{m2}a}{2}\right)} \times \frac{4q}{m\pi D V_m} \\ r_{m1} &= \sqrt{\frac{U_m + \sqrt{U_m^2 - 4V_m}}{2}}, \quad r_{m2} = \sqrt{\frac{U_m - \sqrt{U_m^2 - 4V_m}}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

令

$$U_m = \frac{2m^2\pi^2}{b^2} + \frac{N_x}{D}, \quad V_m = \frac{m^2\pi^2}{b^2} \left(\frac{m^2\pi^2}{b^2} + \frac{N_y}{D} \right) \quad (7)$$

$m = 1, 3, \dots$

欲对所有 y 满足式 (6), 须对所有 $m = 1, 3, \dots$ 均有下列 X_m 对 x 的微分方程成立

$$X_m^{(4)} - U_m X_m^{(2)} + V_m X_m = \frac{4q}{m\pi D} \quad (8)$$

根据微分方程解的结构, 式 (8) 解由其任一特解 X_{1m} 和相应齐次方程通解 X_{2m} 组成, 即 $X_m = X_{1m} + X_{2m}$. 对任一 m , 当 $V_m \neq 0$ 时取

$$X_{1m} = \frac{4q}{m\pi D V_m} \quad (9)$$

余下的问题即是求齐次方程 (10) 的通解

$$X_{2m}^{(4)} - U_m X_{2m}^{(2)} + V_m X_{2m} = 0 \quad (10)$$

四阶方程 (10) 的特征方程和特征值分别为

$$r_m^4 - U_m r_m^2 + V_m = 0, \quad r_m^2 = \frac{U_m \pm \sqrt{U_m^2 - 4V_m}}{2} \quad (11)$$

3.1 当 $V_m = 0$ 时, 由式 (9) 知平板失稳, 即

$$V_m = 0, \quad N_y = -\frac{m^2\pi^2 D}{b^2} \quad (12)$$

为平板失稳临界条件之一.

3.2 当 $V_m \neq 0$ 时, 根据 U_m 与 V_m 关系和 X_m 关于 $x = 0$ 的对称特点, 利用数学方法, 代入式 (1) 中 $x = \pm \frac{a}{2}$ 处边界条件 ($w(x,y) = 0$ 即 $X_m = 0, \frac{\partial w}{\partial x} = 0$, 即 $\frac{dX_m}{dx} = 0$) 得式 (8) 解的不同形式如下: