

城市供水管网抗震可靠性分析与设计优化^{*}

徐 良^{1,2}, 彭勇波³, 李 杰¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海核工程研究设计院, 上海 200233; 3. 同济大学 上海防灾救灾研究所, 上海 200092)

摘 要: 考虑管线震害发生的随机性, 利用管线在地震作用下反应的二阶矩特征信息, 采用带渗漏管网抗震可靠性分析的一次二阶矩方法, 以华中地区某市主干供水管网为例, 进行了基本烈度条件下的可靠度分析, 结果表明, 在低、中烈度条件下, 供水管网中各节点均处于可靠状态; 在高烈度条件下, 节点主要处于可靠状态, 局部处于严重不可靠、甚至出现断水状态。进一步地, 基于微粒群优化算法, 以管网年费用折算值为优化目标、管网拓扑结构与管径为优化参数、管网节点可靠度为约束条件, 建立了新的供水管网抗震设计优化模型, 并将供水管网所在区域的道路信息引入管网优化设计中, 提出了管网拓扑的自动生成策略, 从而形成了城市供水管网系统智能化抗震设计方法。数值算例表明, 基于可靠度的抗震优化设计方法为风险-投资之间的合理均衡提供了理论基础, 决策者可以据此选择所期望的最佳方案。

关键词: 抗震可靠度; 一次二阶矩; 微粒群算法; 拓扑优化; 自动生成; 供水管网

中图分类号: P315.052 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2010)S0-0227-05

0 引言

城市供水管网系统作为城市生命线系统中重要的组成部分, 担负着城市工业生产、生活供水的任务, 是现代城市的动脉^[1]。地震中供水管网的破坏, 不仅直接影响生产和生活, 而且当发生火灾等次生灾害时, 还会影响到救灾的顺利进行, 造成巨大的经济损失。因此, 研究城市供水管网系统的抗震性能, 进行抗震优化设计, 提高管网系统的抗震能力, 对现代城市的发展具有重要的意义。

本文介绍了供水管网系统抗震可靠性分析方法, 并在基础上, 着手进行供水管网系统抗震可靠性优化设计。首次供水管网所在区域道路信息引入优化设计中, 提出了城市供水管网系统智能化抗震设计方法。在上述研究工作的基础上, 进行了华中地区某市主干供水管网的抗震可靠性分析和优化。结果表明: 本文提出的方法能够有效地完成大型城市供水管网的抗震优化设计工作。

1 供水管网系统抗震可靠性分析

在地震作用下, 供水管线可能发生不同程度地破坏。对于在地震中严重破坏的管段, 通常认为不能再继续承担供水功能, 必须在震后尽快关闭其两端阀门。而对于在地震中轻微破坏乃至中等破坏的管段, 则一般认为它们仍然可以承担供水的功能, 但在进行管网功能分析时, 必须考虑管段由于破坏而产生的渗漏量, 并通过引入渗漏模型^[2]来描述管段渗漏量与渗漏面积间的关系。因此, 震后供水管网的功能分析是针对带渗漏管网的分析^[3]。

供水管线的渗漏面积受到地震动幅值、场地条件、管道接口形式等多种因素影响, 其中若干因素本质上为随机变量, 因此, 管段渗漏面积本质上为随机变量, 由此, 管网中节点的供水压力亦应为随机变量。对于随机供水压力的管网的功能可靠性, 应采用概率论的方式加以分析。研究表明: 在管网抗震分析中, 考虑管线震害发生的随机性, 利用管线在地震随机作用下的反应二阶矩信息, 可以采用均值一次二阶矩方法得到管网

* 收稿日期: 2010-09-25

基金项目: 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金(50621062)资助项目

作者简介: 徐良(1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事生命线工程管网智能化抗震设计研究. E-mail: liang851224@126.com

节点水压的均值和方差，进而得到节点的抗震功能可靠性指标。

供水管网的节点极限状态方程可以写为：

$$Z_i = H_i - H_{\min i}, \tag{1}$$

式中： H_i 为节点处的水压； $H_{\min i}$ 为节点 i 要求的最低水头。

当各基本变量（各管段渗漏面积）服从正态分布时， Z_i 显然服从正态分布，在此前提下：

$$P_{si} = P(Z_i > 0) = \Phi(\beta_i) \quad (i = 1, 2, \cdots, n), \tag{2}$$

式中： $\Phi(\cdot)$ 为标准正态概率分布函数。

$$\beta_i = \frac{\mu_{Z_i}}{\sigma_{Z_i}} \quad (i = 1, 2, \cdots, n), \tag{3}$$

称 β_i 为节点可靠性指标。

以华中地区某城市供水管网为例进行抗震可靠性分析。城区分为 A、B、C、D 四个区域，A 区内现有一个设计规模为 20 万 t/d 的水厂，可满足 A 区（远期需水量 13.86 万 t/d）及 D 区（远期需水量 7.32 万 t/d）的要求；在 B 区和 C 区之间，将新建一座规模为 30 万 t/d 的规划水厂，以满足这两地区（远期需水量 29.57 万 t/d）的要求。城区主干供水管网（内口径在 300 mm 及以上的管线）共有 228 条管线，148 个需水节点及 2 个水源点，如图 1 所示。

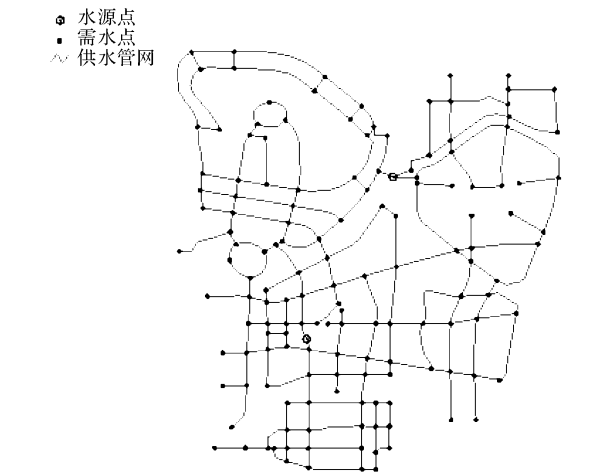


图 1 城区主干供水管网分布图

根据上述介绍的一次二阶矩方法，分别计算了地震烈度为Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ度基本烈度时供水管网的抗震功能可靠性。按不同的可靠性指标值将结果分为“可靠”，“轻微不可靠”，“中等不可靠”，“严重不可靠”和“断水”五种^[4]，计算统计结果见图 2。图 3 和图 4 分别给出了Ⅷ、Ⅸ基本烈度时管网中各节点抗震可靠度情况。计算结果表

明，在Ⅵ、Ⅶ基本烈度条件下，供水管网中各节点均处于可靠状态；在Ⅷ、Ⅸ基本烈度条件下，节点主要处于可靠状态，局部处于严重不可靠、甚至出现断水状态。根据《建筑工程抗震设防分类标准》（GB 50223 - 2008），该城区建筑工程抗震设防烈度为Ⅷ度，其主要供水管线的抗震设防类别应划为重点设防类。因此，需进行Ⅷ度烈度条件下供水管网系统的抗震可靠性优化与设计。

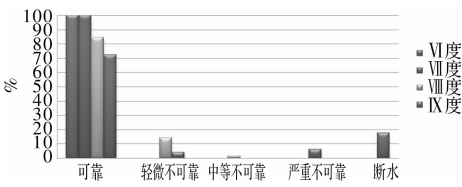


图 2 供水管网抗震可靠性分析结果统计图

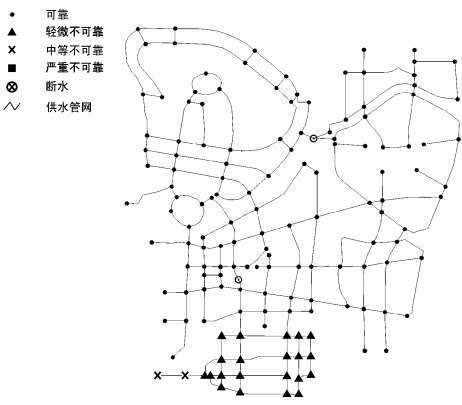


图 3 Ⅷ度地震作用下供水管网功能可靠性计算结果

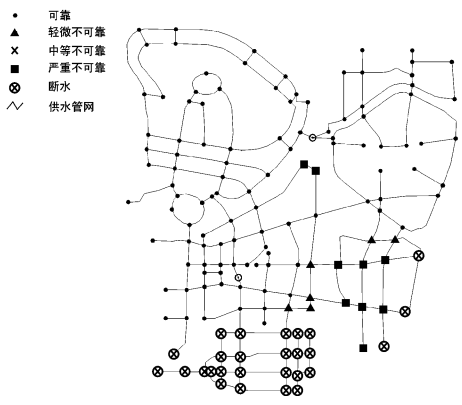


图 4 Ⅸ度地震作用下供水管网功能可靠性计算结果

3 供水管网系统抗震可靠性优化设计

3.1 供水管网优化模型的建立

供水管网是一个复杂的大系统，其基本设计参数包括管网的拓扑结构、管段的管径、管材、接头形式等。考虑到实际工程项目的可行性以及设计习惯等因素的影响，本文以管网拓扑结构和

管径为优化参数, 抗震可靠度作为约束, 管网费用最小为设计目标进行供水管网优化设计。

供水管网的费用包括管网建设投资费用和建成后的运行管理费用, 可以用供水管网的年费用折算值(管网建设投资偿还期内的管网建设投资费用和运行管理费用之和的年平均值)来表示。因此建立如下的优化模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & W \\ \text{s. t.} \quad & \beta_{\min} \geq \beta_0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: β_{\min} 为供水管网所有节点的抗震可靠度指标的最小值, 可以前面介绍的均值一次二阶矩方法来求解; β_0 为供水管网设计时允许的抗震可靠指标限值; W 为供水管网的年费用折算值, 可用下式表示^[5]:

$$W = \left(\frac{p}{100} + \frac{1}{T} \right) \cdot C + \sum_{i=1}^n P_i q_i h_{pi}, \quad (5)$$

式中: p 为管网的每年折旧和大修的百分率; T 是管网建设投资偿还期; n 是泵站数目; P_i 为泵站的单位运行电费指标, (元/($\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{a})$)); q_i 为泵站 i 设计扬水流量, (m^3/s); h_i 为泵站 i 最大时扬程, (m); C 为管网造价, 可用下式计算得到:

$$C = \sum_{i=1}^m \gamma_i (a_1 + a_2 \cdot d_i^{a_3}) \cdot l_i, \quad (6)$$

式中: l_i 为管线长度(m); d_i 管线的管径(mm); a_1, a_2, a_3 是造价经验系数, 可以分别取 62.105 1、1 979.7、1.486^[6]; γ_i 连通系数, 铺设管线时取为 1, 不铺设时取为 0; m 为管网中管线的数目。

上述模型中采用管网拓扑结构和管径作为优化参数, 这是因为这两者是供水管网的抗震可靠度和建造运营费用的主要影响因素。好的拓扑结构可以以较少的管线来保证管网的日常运营和要求的抗震可靠度, 不仅建设费用低, 而且抗震性能好。同时, 管径增大, 管网造价增加, 但抗震性能好, 运营费用因管段中水头损失减小、水泵所需扬程降低而减小。相反, 管径减小, 管网造价下降, 抗震性能降差, 运营费用增加。

3.2 微粒群算法^[7-8]

在微粒群算法中, 用微粒的位置表示待优化问题的解, 每个微粒性能的优劣程度取决于待优化问题目标函数确定的适应值, 每个粒子由一个速度矢量决定其飞行方向和速率大小。设在一个 d 维的目标搜索空间中, 群体中的第 i 个微粒位置可表示为一个 d 维矢量, $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})^T$, 微粒 i 的速度(位置的改变)用矢量 $V_i = (v_{i1}, v_{i2},$

$\dots, v_{id})^T$ 表示。第 i 个微粒目前所经历过的最好位置用 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})^T$ 表示, 群体目前所经历过最好位置用 $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})^T$ 表示。用上标 t 表示进化代数, 则在微粒群算法中, 对每一代, 微粒 i 的第 j 维的进化方程为:

$$v_{ij}^{t+1} = \omega \cdot v_{ij}^t + c_1 \cdot \text{rand}_1() \cdot (p_{ij}^t - x_{ij}^t) + c_2 \cdot \text{rand}_2() \cdot (p_{ig}^t - x_{ij}^t), \quad (7)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1}, \quad (8)$$

式中: ω 为惯性权重, ω 取较大值可以使算法具有较强的全局搜索能力, ω 取小值则算法倾向于局部搜索; c_1 和 c_2 为加速度常数, 一般在 $[0, 2]$ 取值; c_1 的大小表示单个微粒在运动过程中所经历得最好的位置对微粒的吸引程度, 对微粒下一步飞行的影响; c_2 的大小表示种群中所有微粒所经历过的最好位置对微粒的吸引程度, 对微粒下一步飞行的影响。 $\text{rand}_1()$ 和 $\text{rand}_2()$ 为两个在 0, 1 范围内变化的随机函数。

方程(7)中的第一部分可以理解为微粒先前的速度或惯性; 第二部分可理解为微粒的“认知”行为, 表示个体自身经验对下一步飞行的指导作用; 第三部分可以理解为微粒的“社会”行为, 表示借鉴群体的经验调整下一步飞行。方程(8)表示微粒位置的更新规则。

3.3 供水管网系统的智能化抗震设计^[9]

本文首次将供水管网所在区域的道路信息引入管网优化设计中, 提出了自动生成网络拓扑结构的方法: 在已知管网系统的节点(水源点以及需水节点)位置, 以及管网所在区域的道路信息的基础上, 通过自动生成策略生成节点间的沿道路铺设的管线, 从而形成满足实际工程要求的管网拓扑结构方案。自动生成过程如图 5 所示。

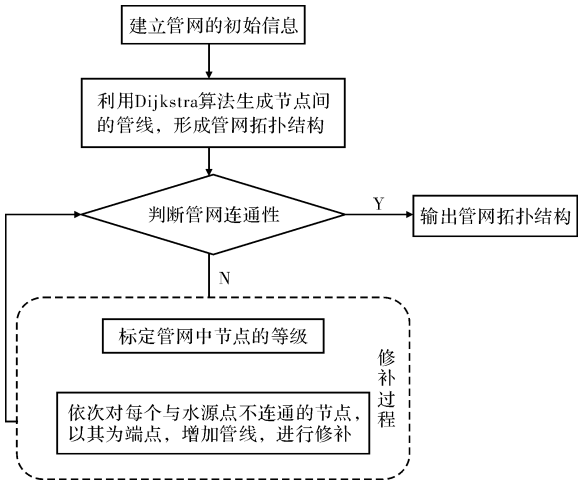


图5 自动生成过程流程图

在供水管网的抗震优化设计过程中，根据系统可靠度要求增加或删除管网中的管线。整个设计过程依托优化算法的大框架，将自动生成策略嵌入此大框架之中，最终给出优化的设计管网。具体过程如下：①管网初始数据的输入，这部分主要包括计算参数的输入和管网的节点属性信息（节点类型，节点需水量，节点高层）的输入，以及管网所在区域的道路信息的输入。②在自动生成策略的指导下完成管网初始拓扑结构的生成，形成优化算法的初始种群；③确定管网种群中各管网的属性数据，计算管网节点的抗震可靠度和各个体的目标函数值。其中管网属性数据包括管线的管径、长度以及连接方式等。④利用优化算法内含的优化机制对当前管网种群进行优化更新；同时，在每个优化迭代步，按前述管网改进方式对当前管网种群的状态进行改进。优化过程产生的无意义的解，采用自动生成策略中的修补方式进行修补。⑤当满足程序终止准则时，输出最优的设计管网。

3.4 数值算例分析

对于所考察的城区供水主干管网，共有 148 个需水节点，2 个水源点，道路节点 248 个(包括管网节点在内)，道路 427 条。基于本文提出的智能化抗震设计方法，采用微粒群算法，考虑地震烈度为Ⅷ度进行管网抗震优化设计。约束条件分别取 $\beta_0 = 1.28$ (对应节点最小可靠度 0.9)，0.84 (对应节点最小可靠度 0.8)，0.53 (对应节点最小可靠度 0.7)。

表 1 给出了各可靠度约束条件下，供水管网的年费用折算值。相对于原始管网方案，优化后的管网年费用折算值在节点最小可靠性指标为 0.53 时，年费用折算值减少了 147.017 5 万元，但节点可靠度指标最小值 0.805 却大于原始规划管网的节点可靠度指标最小值 0.515。这表明，采用基于可靠度的供水管网抗震优化设计方法，以较少的投入获得了较大的管网可靠性。

表 1 各种约束条件下的管网年费用折算值

节点可靠度指标限值	年费用折算值/万元	节点可靠度指标最小值
0.53	2 815.855 2	0.805
0.84	3 104.718 2	0.937
1.28	3 253.285 4	1.293
原始规划管网	2 962.872 7	0.515

然而，当为 0.84、1.28 时，优化后的管网年费用折算值分别增加了 141.845 5 和 290.412 7 万

元，但此时，节点可靠度指标最小值达到了 0.937 和 1.293，远大于原始规划管网的节点可靠度指标最小值。

事实上，相应于节点最小可靠度 0.9、0.8 和 0.7 三个层次的约束性态指标，正是结构或系统性态设计的理念。可以看到，构建高可靠度的网络系统，需要高投入。因此，基于可靠度的抗震优化设计方法为风险 - 投资之间的均衡提供了理论基础，决策者可以据此选择所期望的最佳方案。图 6 ~ 图 8 为在各个约束条件下的供水管网优化方案。



图 6 $\beta_0 = 0.53$ 的供水管网方案

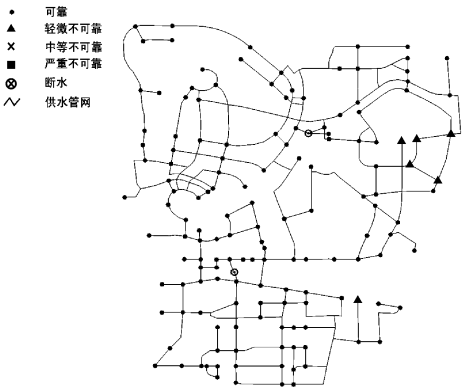


图 7 $\beta_0 = 0.84$ 的供水管网方案



图 8 $\beta_0 = 1.28$ 的供水管网方案

4 结论

本文采用带渗漏管网抗震可靠性分析的一次二阶矩方法, 对华中地区某市主干供水管网进行了基本烈度条件下的可靠度分析。并在此基础上, 将自动生成策略嵌入微粒群算法中, 提出了城市供水管网系统智能化抗震设计方法, 从而实现了供水管网的抗震优化设计。针对三种不同的节点最小可靠度约束条件, 给出了不同的优化供水管网拓扑。结果表明: 本文提出的方法能够为风险-投资之间的合理均衡提供了理论基础, 决策者可以据此选择所期望的最佳方案。因此, 研究结果具有重要的工程实用价值。

参考文献:

[1] 李杰. 生命线工程抗震——基础理论与应用[M]. 北京: 科

学出版社, 2005.

[2] 邢燕, 李杰. 供水管网渗漏模型研究[C]//第16届全国结构工程学术会议, 2007.

[3] 陈伶俐, 李杰. 供水管网渗漏分析研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(1): 115-121.

[4] 卫书麟. 大型供水管网抗震可靠性分析与优化[D]. 上海: 同济大学, 2005.

[5] 严煦世, 赵洪宾. 给水管网理论与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.

[6] 邵知宇. 给水管网分段线性优化模型[D]. 上海: 同济大学, 2001.

[7] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization [C]//Proc. IEEE International Conference on Neural Networks, 1995: 1942-1948.

[8] Kennedy J. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory [C]//The Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1995: 39-43.

[9] 邢燕. 基于可靠性的生命线工程管网智能化抗震设计[D]. 上海: 同济大学, 2007.

Optimal Design and Analysis of Seismic Reliability of Urban Water Distribution Network

Xu Liang^{1,2}, Peng Yongbo³ and Li Jie¹

- (1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China;
3. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Shanghai 200092, China)

Abstract: A first-order second-moment method with pipe leakage model for seismic reliability of water distribution network is proposed in the present paper, which includes the randomness inherent in the occurrence of earthquake damage of pipe network, and integrates the second-order statistics of responses of base-excited pipes. The water distribution network of an urban city in the central China is investigated for illustrative purpose. The reliability analysis of the network under basic seismic intensity is carried out. The results reveal that the nodes in the network are all in the sound state in cases of the lower and medium seismic intensity, some of them, however, are in the state of serious risk even of water break in case of the higher seismic intensity. Further, an optimal design scheme for newly-planned water distribution network is constructed using a particle swarm optimal algorithm. This scheme involves the objective function representing referred value of annual cost of network, the optimization parameters indicating the network topology and pipe diameter, and the conditional quantity with node reliability of network. A strategy of automatic generation of network is then proposed by introducing the road information of the network area into the optimal design scheme, in virtue of which the intelligent seismic design method of water distribution network is achieved. Numerical investigations show that the design method provides a foundation for the rational balance between risk and investment, and a decision-maker can thus get access to the desirable scheme.

Key words: Seismic reliability; first-order second-moment; particle swarm; optimal topology; automatic generation; water distribution network