

大跨度斜拉桥施工风险分析理论研究与应用

巩春领¹, 程进¹, 沈祥福²

(1. 同济大学桥梁工程系, 上海 200092; 2. 鹤岗市交通局公路处, 黑龙江鹤岗 154001)

摘要:结构在施工期的平均风险远远高于使用期, 开展大跨度斜拉桥施工期间的风险分析研究是十分必要的。本文在介绍风险分析基本原理的基础上, 针对斜拉桥施工期风险分析中不存在显式的极限状态函数的问题, 提出了基于人工神经网络-有限元-蒙特卡罗模拟的风险分析方法。运用该方法对某大跨度斜拉桥进行施工风险分析, 结果表明该方法可行、有效。

关键词:斜拉桥; 风险分析; 神经网络; 施工期

中图分类号: U448.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2006)02-0117-04

0 引言

斜拉桥是一个由索、塔、梁三种基本构件组成的组合结构体系, 现代斜拉桥以其良好的结构性能和跨越能力以及优美的建筑造型受到人们的广泛青睐。斜拉桥结构体系为复杂, 伴随着跨径的不断增大, 斜拉桥的结构刚度越来越低, 柔度不断增大, 几何非线性和材料非线性因素对结构的影响变得更为突出。大跨度斜拉桥(尤其是混凝土斜拉桥)多采用悬臂浇注的施工方法, 施工工序多、施工工艺复杂, 施工周期又短。所有这些不利因素使得大跨度斜拉桥在建造期间充满着各种风险, 极易发生各种事故。例如, 1987年施工的四川达州洲河大桥一跨度为190 m+70 m的混凝土独塔斜拉桥, 在跨中合拢时, 主梁混凝土突然破坏坠落, 并造成伤亡16人的重大事故; 1992年7月韩国汉城发生了一起施工即将完成的斜拉桥倒塌事故; 1998年正在建的跨度为258 m的混凝土斜拉桥——招宝山大桥, 在施工过程中发生主梁压溃破坏的严重质量事故。这些在建的斜拉桥事故造成了巨大的经济损失和人员伤亡, 引起国内外学者对施工期间桥梁安全性问题的广泛关注。

风险是特定系统危险事件的发生概率与损失程度的综合描述, 通常以事故发生概率与其造成的后果的乘积来表达^[1]。风险分析是研究风险发生规律和风险控制的—门技术, 它是在风险识别的基础上, 分析风险发生的概率及其可能导致的损失的大小,

确定系统的整体风险水平, 并提出规避风险的对策与措施, 对风险实施有效的控制和妥善处理, 以达到以最小的成本获得最大安全保障的目的。风险分析主要包括风险识别、风险估计、风险评价、风险应对与决策等几部分。常用风险分析方法有很多, 大致可以分为三大类: (1)定性的分析方法, 如专家调查法、层次分析法等; (2)定量的分析方法, 如蒙特卡罗法、敏感性分析法等; (3)定性定量相结合的分析方法, 如 CIM 模型、影响图法等。这些风险分析方法有各自的优缺点和适用范围, 在进行风险分析时, 应该根据具体问题、问题的不同阶段和不同目的、可获得信息量的多少以及分析方法的特点, 来选取适合而有效的风险分析方法。

风险分析研究最早起源于20世纪50~60年代, 应用于欧美核电厂的安全评估中, 随后在诸多领域得到了推广和应用。目前, 国内外学者已对核电工业、化学工业、环境保护、航天工程、海洋石油、经济领域的风险问题展开了较为广泛的研究。然而, 对土木工程尤其是桥梁工程中结构的风险分析进行比较深入的研究仅是近几年的事情, 针对桥梁风险分析的研究较少, 而且主要集中在桥梁营运阶段的船撞、车撞和抗震等相关领域, 以及桥梁管理和维护方面的风险管理方面, 针对桥梁施工期间的风险分析则更少。这些研究, 其深度和水平参差不齐, 研究的目标、流程、研究方法和评价标准各异, 多为定性的分析并带有较为浓重的安全评价色彩, 缺少系统而全面的风险分析研究。

因此, 开展大跨度斜拉桥施工期间结构风险分析研究, 建立系统、有效的风险分析方法, 分析施工期间的各类风险, 制定相应的防范措施以确保大跨度斜拉桥结构在施工建造期间的安全, 具有十分重

收稿日期: 2005-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50408037)。

作者简介: 巩春领(1975-), 男, 黑龙江鹤岗人, 博士生, 从事桥梁结构理论方面的研究。

要的理论价值和现实意义。

1 基于神经网络-有限元-蒙特卡罗模拟的风险分析方法

1.1 大跨度斜拉桥结构失效概率求解问题

大跨度斜拉桥结构失效概率求解的功能函数具有以下两个特征:(1)功能函数对基本随机变量是非闭合的,即功能函数是隐式的。斜拉桥结构分析通常借助于有限元等数值计算方法,在这种情况下进行失效概率分析通常不能给出极限状态函数对于基本随机变量的显式形式。(2)功能函数高次非线性。大跨度斜拉桥除了受本身的几何非线性和材料非线性的影响外,还由于响应量与基本变量的非线性关系、变量的非正态分布、变量的相关性等原因引起求解结构失效概率的功能函数具有高次非线性。处理这类高次非线性隐式功能函数的失效概率问题,使用JC法、中心点法等常规失效概率求解方法就会遇到一定的困难。

针对这类问题,不少学者也提出了利用非线性有限元正交设计算法^[2]、响应面法、随机有限元法^[3](如 Monte-Carlo 有限元法)等来解决。但是,非线性有限元正交设计法和响应面法都是用一个低次多项式来近似替代隐式功能函数,而多项式函数以任意精度逼近非线性映射是不可能的,这会给高次非线性功能函数的可靠性问题带来较大误差。Monte-Carlo 有限元法是分析工程结构荷载效应的重要手段,但该方法需要对确定性有限元程序加以改造,而且对于求解单元数目较多的非线性问题,计算次数多达成千上万次,令人难以忍受。这弊端限制了 Monte-Carlo 有限元法在实际工程中的应用。

人工神经网络的出现,为结构可靠度的研究提供了新的思路和方法。人工神经网络模拟人脑的信息处理机制,采用类似于“黑箱”的方法,通过学习和记忆,找出输入与输出之间的映射关系,它具有高度的非线性映射能力和大规模并行分布处理能力,可以用来逼近结构响应量与随机变量的映射关系。其中,BP算法结构简单,工作状态稳定,具有很强的非线性映射能力。在实际应用中,80%~90%的神经网络模型都是采用BP网络或其变化形式^[4][Hornik,1990],可以解决大多数神经网络所面临的问题。

针对大跨度斜拉桥施工期间的结构特点和隐式功能函数失效概率的求解问题,本文将人工神经网络引入到斜拉桥结构失效概率分析当中,提出了基

于神经网络-有限元-蒙特卡罗模拟的风险分析方法。该方法可直接使用现已广泛应用的确定性结构有限元分析程序而无需任何改动,对于极限状态函数不能用显式表达和高次非线性的大跨度斜拉桥施工期间的失效概率求解问题尤为适用。

1.2 基于神经网络-有限元-蒙特卡罗模拟的风险分析方法解题步骤

基于神经网络的有限元蒙特卡罗风险分析方法以神经网络、有限元和蒙特卡罗(Monte-Carlo)法为基础,构建风险概率分析的新思路,即通过尽可能少的一系列确定性有限元数值计算建立神经网络模型,由其近似替代结构响应量与随机变量映射关系或隐式极限状态函数,然后根据蒙特卡罗模拟法原理,利用神经网络的泛化能力,获得足够多的极限状态函数值,进行风险概率分析。其计算步骤如下:

(1) 确定极限状态方程,确定基本随机变量的概率模型。

(2) 对基本随机变量重复 $p+q$ 次有目的采样(p, q 分别为神经网络学习和检验所需要的次数),进行 $p+q$ 次有限元分析,获得 $p+q$ 组响应量值。

(3) 将 p 次采样的基本随机变量作为神经网络的输入, p 组有限元分析确定的响应量作为输出,进行多次学习;然后用 q 组样本检验网络的性能,确保建立正确的神经网络映射关系。

(4) 对基本随机变量进行 n 次随机采样(n 为蒙特卡罗模拟所需的次数),输入神经网络模型,得到 n 组响应量值,代入极限状态函数,取得 n 个仿真随机样本。

(5) 根据 n 个极限状态函数值,计算结构的失效概率。

2 应用实例

为了验证本文所提出的基于神经网络-有限元-蒙特卡罗模拟的风险分析方法的有效性以及正确性,下面以某座大跨度斜拉桥施工阶段的主梁静力弯曲失效模式为例,分析斜拉桥施工期间的结构风险。

某座大跨度斜拉桥为三跨预应力混凝土斜拉桥,桥跨布置为 143.5 m+320 m+143.5 m,全长 607 m,索塔高 70.5 m,主梁为箱形截面梁,采用挂篮悬臂现浇法施工,斜拉桥总体布置如图 1 所示。

根据大跨度混凝土斜拉桥施工阶段的受力特点以及施工经验,施工期间的结构风险因素主要涉及结构截面特性、材料特性、荷载、环境因素以及施工

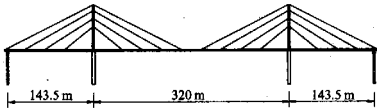


图1 斜拉桥立面布置图

操作等方面。本文以取主梁容重、结构刚度、施工荷载以及温度等风险因素为例,对该桥上部结构施工期间的风险进行分析。根据施工期应力限值准则,建立第*i*个施工阶段的第*j*个梁段的极限状态函数:

$$Z = [\sigma] - \sigma_y = [\sigma] - \sigma_y(\rho, E, I, F, T)$$

式中:[σ]——主梁应力限值

σ_y ——第*i*个施工阶段的第*j*个梁段(这里取中跨合拢前最后一悬浇段施工阶段的靠近桥塔的梁段为例)的应力,显然为设计变量的隐函数

ρ ——主梁容重

E ——主梁的弹性模量

I ——主梁截面惯性矩

F ——施工荷载

T ——温度

在极限状态方程(1)中, ρ 、 E 、 I 、 F 、 T 均视为随机变量,这些随机变量的概率分布、均值和变异系数等统计特性如表1所示。

表1 随机变量的统计特性

| 变量 | 单位 | 概率分布 | 均值 | 变异系数 |
|--------|---------------------------------|------|----------------------|------|
| ρ | $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ | 正态 | 26.0 | 0.10 |
| E | MN/m^2 | 对数正态 | 4.0×10^{-4} | 0.10 |
| I | m^4 | 正态 | 18.9 | 0.10 |
| F | kN | 正态 | 185.0 | 0.15 |
| T | $^{\circ}\text{C}$ | 正态 | 20.0 | 0.12 |

建立一个三层BP神经网络来替代功能函数 Z ,如图2所示。其中输入层有5个节点,分别是 ρ 、 E 、 I 、 F 、 T 5个随机变量,隐含层有10个节点,输出层只有一个节点,对应函数值 Z 。首先利用非线性有限元程序计算得到神经网络的20个学习样本和10个检测样本,然后采用BP算法的改进法Levenberg-Marguardt(L-M)法来进行网络学习,激活函数采用Tansig函数,选取学习步长为0.001,网络误差取 10^{-5} 。通过学习训练与检验,结果显示学习样本和检验样本的神经网络输出值与计算值的相对误差均小于 1.0×10^{-3} ,误差非常小,表明网络建立了正确的映射关系。

生成随机变量 ρ 、 E 、 I 、 F 、 T 各100000个模拟值,输入已训练好的神经网络,得到100000个极限

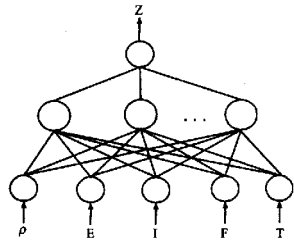


图2 BP神经网络模型

状态函数值,根据蒙特卡罗原理,求得本施工阶段主梁的风险概率为 1.86×10^{-4} 。直接采用蒙特卡罗法计算10000次得到的结果是 1.8×10^{-4} ,两个结果非常接近,说明本文的基于神经网络-有限元-蒙特卡罗模拟的风险概率分析方法是切实可行的。

由于篇幅所限,本文不针对风险后果和风险评价部分展开进一步的论述。对于以上得到的风险概率结果,参照欧洲的风险评定标准,失效概率值介于 $1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$ 者为中级风险,所以本例在此施工阶段斜拉桥处于中级风险水平,应予以关注,必要时采取措施降低施工风险。

3 结论

(1)大跨度斜拉桥在施工期间含有诸多不确定性,存在各类风险。因此,将风险分析理论引入到大跨度斜拉桥施工风险分析中,帮助设计、施工和建设单位充分了解和控制施工期间所面临的风险,对于确保斜拉桥建设的安全性及科学性有着十分重要的意义。

(2)基于神经网络-有限元-蒙特卡罗模拟的风险分析方法对于功能函数不能显式表达的斜拉桥施工期间的结构风险分析特别适用。它解决随机模拟与有限元计算两种计算方法的耦合问题和传统蒙特卡罗有限元法计算量太大的主要弊端提供了一条人工智能的新途径。

(3)基于神经网络-有限元-蒙特卡罗模拟的风险分析方法可直接使用现已广泛应用的确定性结构有限元分析程序而无需任何改动,同时因运用人工神经网络的非线性映射能力而使结构分析的计算次数和计算时间大量减少,提高了风险分析的效率。

(4)基于神经网络-有限元-蒙特卡罗模拟的风险分析方法是利用神经网络的非线性映射能力来逼近结构响应量与随机变量的关系或隐式极限状态函数,因此更接近真实情况,利用该方法进行大跨度斜

非开挖水平定向穿越铺设地下管线施工技术

陈士军¹, 瞿洪海²

(1. 扬州潜龙非开挖基础工程有限公司, 江苏 扬州 215200; 2. 扬州大学水利与建筑工程学院监理部, 江苏 扬州 215200)

摘 要:简要介绍了非开挖水平定向穿越铺设地下管线施工技术的优点, 重点阐述了该施工技术成败关键在于施工前对周围原有管网的勘察、钻进泥浆的选择和配制以及优化设计的最佳轨迹曲线这几个重要环节。

关键词:地下管线; 现场勘察; 钻进泥浆; 水平定向穿越; 曲率半径

中图分类号: TU990.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2006)02-0120-02

0 前言

非开挖水平定向穿越铺设地下管线是一种正在蓬勃发展的新技术, 它综合了传统的道路钻孔、地质钻探及其它定向钻进技术。这项技术已成为一种完善的施工方法, 现广泛应用于穿越河流、街道、公路和铁路、建筑物等来进行石油、天然气、自来水、电力、通信及雨、污水等管道的铺设。与其它管线铺设施工方法相比, 具有对环境影响小、对原有构造物无破坏、对管线覆盖的深度大、对管线的保护作用大等优点。

要保证水平定向穿越的成功, 需注意下述重要环节。

1 对原有现场地下管线进行勘察, 以防止事故发生

(1) 由当地规划设计部门提供现场地下管线资料。由于种种原因, 我国的市政建设中总不能在同一张图纸中全面反映地下管线情况, 所以现场勘察人员应对相关部门提供的现场地下管线资料进行详细的核实, 搞清地下管线的位置及深度。

(2) 现场勘察。应对现场进行全面调查, 方圆 50 m 或更大范围内所有的管道井都需打开调查, 并

详细测量各管线的位置、走向及深度, 做好记录和标识。了解各管线的铺设方法, 以准确管线定位。对采用非开挖铺设或者不能掌握的管线, 应与相关部门联系, 以查清资料或派专人现场确认。

(3) 仪器探测。采用较先进的仪器(探地雷达)对地下管线进行探测。

(4) 开挖探孔。在施工出、入土点及穿越允许部位开挖探孔, 以保证不发生损伤其它管线。

2 钻进泥浆的选择和配制

钻进泥浆的选择和配制是水平定向穿越的重要环节, 它是钻导向孔、预扩孔和回拖管时的“血液”。

(1) 泥浆的主要作用为冷却钻进钻具、携带钻屑并排出地面、稳定孔壁和降低钻进时的扭矩及回拉力。

(2) 其性能参数为密度、粘度和胶结强度。控制好密度可防止孔壁坍塌, 而粘度的大小决定钻进泥浆的外带排屑能力, 胶结强度则是衡量钻进泥浆使固体颗粒处于悬浮状态的能力。只有这三个参数调整到一个适宜的范围时, 钻进浆液才能发挥最大作用。

(3) 泥浆的组成。

泥浆的组成主要有水、膨润土、聚合物、表面活性剂等。

水: 是主要的基本成分。

膨润土: 是一种吸收性强的硅酸铝粘土, 遇水后

收稿日期: 2005-04-29

作者简介: 陈士军(1969-), 男, 江苏扬州人, 工程师, 副总经理, 从事非开挖管道工程、基础工程施工技术工作。

拉桥施工期间的结构风险分析是切实可行的。

参考文献

- [1] 胡二邦. 环境风险评价实用技术和方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
- [2] 王家臣等. 边坡可靠性分析的非线性有限元正交设计算法[J]. 化工矿山技术, 1994, 23(2): 1~4.

- [3] Haldar A, Mahadevan S. Reliability assessment using stochastic finite element analysis [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 2000.
- [4] Hornik K, Stinchcombe M, White H. Multilayer feedforward networks are universal approximators[J]. Neural Networks, 1989, (2): 359-368.