

公路桥梁风险估测方法

朱劲松^{1,2}, 王诗青¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 300072 天津, jszhu@tju.edu.cn;

2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 300072 天津)

摘要: 为了提高公路桥梁风险估测的精度、效率和可操作性, 提出了响应面法与改进德尔菲法相结合的桥梁风险估测方法. 给出了基于响应面法进行桥梁损伤概率计算的流程, 利用改进德尔菲法对专家意见进行最优化调整以实现风险损失等级的定量估测. 通过对内蒙古一座大型自锚式悬索桥运营期地震损伤风险估测, 验证了该方法的有效性与实用性. 实例应用表明: 基于响应面法的桥梁结构损伤概率估测方法既考虑了具体桥梁的受力特性又考虑了客观存在的不确定性, 能定量计算结构损伤风险概率; 改进德尔菲法克服了传统德尔菲法的不足, 在保证专家意见可靠性的同时减少了计算和统计工作量, 提高了风险评估工作的效率.

关键词: 公路桥梁; 风险估测; 响应面法; 改进的德尔菲法

中图分类号: TP183; U447 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)02-0124-05

A method of risk estimation of highway bridges

ZHU Jin-song^{1,2}, WANG Shi-qing¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, 300072 Tianjin, China, jszhu@tju.edu.cn;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, 300072 Tianjin, China)

Abstract: In order to improve the accuracy, efficiency and maneuverability of risk estimation of highway bridges, a response surface method and the improved Delphi method based framework for risk assessment of highway bridges is proposed. The flowchart of damage risk probability analysis of bridges based on response surface method is presented. The improved Delphi method is proposed to estimate the risk of highway bridges. The results of expert survey are adjusted by an optimization model, then the grade of risk loss is estimated quantificationally using the improved Delphi method. The damage risk assessment under earthquake of a self-anchored suspension bridge is carried out for illustrating the application and efficiency of the proposed methodology. The illustrative example indicates that not only the specific characteristics of the bridge but also the objective existence of uncertainty are considered by the response surface method based bridge damage probability estimation method, structural damage risk probability is calculated quantitatively taking full advantage of existing research results; The improved Delphi method overcomes the deficiencies of the traditional Delphi method, the statistical and computational workload are reduced while the reliability of expert opinions are ensured, so the time required for risk estimation is shortened to improve the efficiency of the risk assessment.

Key words: highway bridges; risk estimation; response surface method; improved delphi method

随着公路桥梁面临的风险问题越来越受到政府和公众的关注, 我国的桥梁风险评估研究正在日益得到重视并蓬勃发展. 桥梁风险评估的一般

流程为: 风险辨识→风险估测→风险评价→风险应对, 风险估测是风险评估的核心工作^[1]. 风险估测包括风险概率估测和风险损失估测 2 部分, 风险估测方法可分为基于专家经验、基于事故统计和基于计算分析 3 种^[2]. 张杰对基于专家调查的风险估测方法进行了研究, 提出了风险概率计算的综合法^[3]; Stuart 利用美国联邦公路管理局

收稿日期: 2010-07-30.

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2007AA11Z133);

天津市科技支撑计划重点项目(11ZCKFSF00300).

作者简介: 朱劲松(1975—), 男, 副教授, 硕士生导师.

收集的事故数据计算桥梁的冲刷失效风险^[4]; Jamie E. Padgett 提出将蒙特卡洛法与增量动态分析法结合来计算大跨度桥梁地震风险概率^[5]. 目前,基于计算分析的方法采用过于复杂的数学方法,计算量大,在实际应用时有一定局限性;完全通过历史事故资料统计分析获得风险估测结果是最理想的方法,但由于缺乏系统的桥梁事故统计数据,且每座桥梁的风险环境各异,只能将数据统计作为建立理论模型的辅助工具;基于专家调查的风险估测是目前的主流方法,然而经常会遇到专家调查意见统计时不能满足一致性条件而需进行多轮反复调查,费时费力.

针对上述问题,本文提出基于响应面法的损伤概率计算方法,并对传统的基于专家调查的德尔菲法进行改进,最后通过对内蒙古一座大型自锚式悬索桥运营期地震损伤风险估测,验证本文方法的有效性与实用性.

1 响应面法计算结构损伤风险概率

基于响应面法进行结构损伤风险概率计算的流程如图1所示. 对于复杂桥梁可靠度计算的响应面法可参考文献[6-8],在此不再赘述.

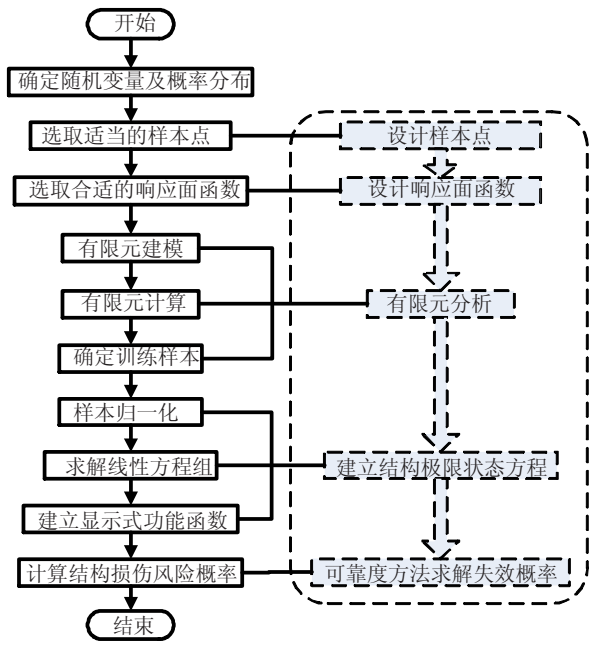


图1 基于响应面法桥梁损伤风险概率计算流程

2 改进的德尔菲法

2.1 德尔菲法

德尔菲法 (Delphi method),即美国兰德公司于1950年创造的“规定程序专家调查法^[3]”. 它是由组织者就拟讨论的问题设计调查表,通过函

件或其他方式分别向选定的专家组成员征询调查意见,按照规定的程序,专家组成员之间只通过组织者的反馈材料匿名地交流意见,通过反复几轮征询和反馈,专家们的意见逐渐趋于统一,最终获得具有统计意义的专家集体判断结果.

2.2 改进的德尔菲法流程

德尔菲法隐含了一个前提,即建立在满足一致性条件的专家群体意见的统计结果才是有意义的,然而要使专家意见满足一致性条件需要多轮的“统计—反馈—再统计—再反馈”的过程,十分耗费时间和精力. 另外,由于参与调查的专家对不同领域的熟悉程度以及知识和能力有别,在专家意见的统计处理时应考虑专家意见的可信度即专家权重,则调查统计的最终结果为加权均值,然而传统德尔菲法并未考虑这点. 专家对自己领域的熟悉程度和能力最清楚,所以调查时请每位专家标出各自对所作估计值的把握程度;但也要考虑有些专家为了碍于面子或是过于自信,可能会将自己的把握程度提高,因此,专家权重还应包括风险评估小组对专家的评价.

针对传统德尔菲法的缺点,本文提出了改进的德尔菲法风险估测方法,具体步骤如下:1) 选择专家成立专家小组. 2) 根据风险辨识建立的风险因素清单,编制专家调查表,向专家小组所有专家提出所要预测的问题及有关要求,将调查表及资料一并分发给专家,进行问卷调查. 3) 对专家意见进行统计处理(详见2.3节),若认为调查结果满意则进行最后一步,否则进行下一步. 4) 对专家意见进行最优化调整(详见2.4节),重新进行统计处理,若认为调查结果满意则进行下一步,否则转向下一轮问卷调查,将各位专家判断意见处理结果再分发给各位专家,让专家比较自己同他人的不同意见,修改自己的意见和判断. 也可请专业更资深的其他专家加以评论,然后把这些意见再分送给各位专家,以便他们参考后修改自己的意见,然后重复第4步. 5) 整理最终的调查报告,给出说明性的意见.

2.3 专家意见统计及满意条件

专家意见的加权均值 $U(x)$ 为

$$U(x) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i, \tag{1}$$

$$w_i = \frac{\frac{S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} + \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}}{2}. \tag{2}$$

式中: w_i 为第 i 个专家的权重, S_i 为专家自评熟悉

程度, W_i 为风评小组对专家权重的评价, n 为专家数量, x_i 为专家意见, 即 P_i (第 i 个专家给出的风险概率评价) 或 C_i (第 i 个专家给出的风险损失评价)。

峰度 E_k 为

$$E_k = \frac{\mu_4(x)}{[\sigma(x)]^4} - 3.$$

(3)

式中: $\mu_4(x) = \sum_{i=1}^n [x_i - U(x)]^4 w_i$ 为 4 阶中心矩;

$\sigma(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [x_i - U(x)]^2 w_i}$ 为根方差(标准差)。

E_k 为专家意见集中程度的一个指标, 它可以反映群体意见的一致性。按照大数定律, 在专家群体足够大的情况下, 专家群体的评价意见逼近正态分布。因此, 专家群体意见的一致性可以标准正态分布为基准, 若一致性程度好于标准正态分布, 则可认为群体意见满足一致性要求。标准正态分布的峰度 $E_k = 0$, 因此, 专家意见满足一致性的条件为 $E_k > 0$ 。

偏度 S_k 为

$$S_k = \frac{\mu_3(x)}{[\sigma(x)]^3}.$$

(4)

式中: $\mu_3(x) = \sum_{i=1}^n [x_i - U(x)]^3 w_i$ 为 3 阶中心矩;

S_k 代表了专家意见关于加权均值的对称性; 若 $S_k > 0$ 为右偏, 说明专家意见位于加权均值右边的比位于左边的多, 若 $S_k < 0$ 为左偏, 说明专家意见位于加权均值左边的比位于右边的多。

专家群体意见变异系数 $V = \sigma(x)/U(x)$, 是代表评价波动大小的重要指标。 V 表明专家们对要素 i 相对重要性认识上的差异程度, 也就是协调程度。 V 越小, 专家们的协调程度越高, 一般认为变异系数小于 10% 具有较好的协调性。

2.4 专家意见最优化调整模型

专家意见最优化调整的目的是寻求快速形成一致性意见的方法, 以便利用少的时间和精力找到专家意见统计的最优解。 本文以专家给出的意见为基础, 综合考虑一致性、协调性和可靠性等因素, 建立专家意见的最优化调整模型, 获得既满足一致性要求、协调性水平, 又满足可靠性条件的结果。

专家意见满足在专家给定评分值意见范围内的正态函数分布, 如图 2 所示, 专家给出的评价 a 代表了专家认为的最可能的值, 不同的专家意见相互独立, 分布函数为

$$F(x) = \phi\left(\frac{x-a}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}} dt.$$

(5)

置信水平为 $1 - S$ 的置信区间为专家允许调整范围, 其中 r 为专家允许调整值。

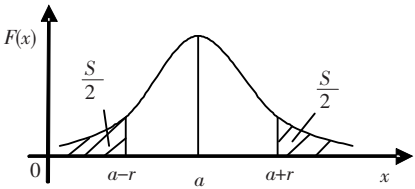


图 2 专家意见分布函数

在给定范围内搜索专家的最优调整方案, 使得总调整量既能达到最小, 又能满足可靠性、一致性和协调性的要求, 即求最优解的问题。建立专家意见最优化模型为

目标函数: $\min F(x) = \sum_{i=1}^n |x_i - a| \cdot w_i;$

约束条件:
$$\begin{cases} x_i - a \leq r, \\ E_k \geq 0, \\ V = \frac{\sigma(x_i)}{U(x_i)} \leq V_0. \end{cases}$$

其中: x_i 为调整后的专家意见; $x_i - a \leq r$ 为调整意见满足可靠性要求, 调整结果应在专家允许调整范围内; $E_k > 0$ 为集成意见一致性条件; $V \leq V_0$ 为协调性条件, V_0 表示设定的变异系数标准。

3 公路桥梁风险评价指标

基于专家经验的风险估测方法直接得到风险概率、风险损失的等级, 因此需预先给出风险评价指标。桥梁风险发生的概率可分为 5 级, 见表 1。

表 1 风险发生概率等级

等级	概率区间	描述
1	$P_f < 0.0003$	不可能发生
2	$0.0003 \leq P_f < 0.003$	难以发生
3	$0.003 \leq P_f < 0.030$	偶然发生
4	$0.03 \leq P_f < 0.30$	可能发生
5	$P_f \geq 0.3$	频繁发生

注: 当概率值难以取得时, 可用频率代替概率, 时间区间可以按照工期考虑。

对风险损失分级, 将潜在损坏程度按照人员伤亡、经济损失、环境影响的严重程度划分为 5 个级别。若多种损失形态共存, 则以就高原则取用。

4 工程应用

以内蒙古某一级公路的一座自锚式悬索桥运营期间地震损伤风险估测为例, 来说明本文提出的风险估测方法在实际工程中的应用。

4.1 工程概况

该桥为主跨 230 m 的 3 跨连续半漂浮体系自锚式悬索桥,主桥全宽 50 m,跨径组合为(90 + 230 + 90)m. 主塔采用门式桥塔,主梁采用单箱八室流线型正交异性板钢箱梁. 锚固区采用预应力混凝土箱梁,通过钢箱梁端部的结合段超厚承压板将钢箱梁端内力传递给混凝土梁.

4.2 风险辨识

该桥场地处于地质历史上长期稳定的构造单元,内部地质结构较为单一,在历史上无中等以上地震的记载. 桥址地段勘察深度范围内不具危害性的不良地质作用和地质灾害(如断裂、滑坡、泥石流等),场地稳定,场地内不存在沉陷和液化的土层.

迄今为止尚未发现悬索桥在地震时遭到毁坏的实例,但局部性损伤时有发生. 该桥为自锚式悬索桥,与一般的地锚式悬索桥不同,它的主缆直接锚固在加劲梁的两端,无需庞大的锚碇,由主梁直接承受主缆中的水平拉力,降低了对工程场地的

要求. 经过分析,根据自锚式悬索桥自身结构构造,在地震作用下,桥梁面临的主要风险有桥塔破坏与主梁挠度过大.

4.3 风险估测

4.3.1 风险概率估测

采用响应面法计算结构损伤风险概率,根据风险辨识结果,主塔和主梁损伤是该桥面临的主要风险,以塔顶位移和主梁挠度达到限值作为极限状态,响应面函数选用不含交叉项的二次多项式表示为

$$Z = g(X) = a + \sum_{j=1}^m b_j \cdot X_j + \sum_{j=1}^m c_j \cdot X_j^2. \quad (6)$$

式中: X_j 为随机变量; a, b_j, c_j 为待定系数,为 $2m + 1$ 个; m 为随机变量数量,本文中 $m = 9$.

对样本点的设计,选择随机变量的统计特性见表 2,假设所有随机变量相互独立,均为正态分布,根据所选响应面函数的特点,每个变量需设 19 个水平,则随机样本点为 19 个变量组.

表 2 随机变量统计表

变量	弹性模量/(N · m ⁻²)		截面面积/m ²		抗弯惯性矩/m ⁴			质量密度/(kg · m ⁻³)	
	主缆	主梁	主缆	主梁	主梁 I _{xx}	主梁 I _{yy}	主梁 I _{zz}	主缆	主梁
均值	2.05 × 10 ¹¹	2.1 × 10 ¹¹	9.2 × 10 ⁻²	2.610	9.750	3.360	555.0	8 005.0	7 850
标准差	2.05 × 10 ¹⁰	2.1 × 10 ¹⁰	9.2 × 10 ⁻³	0.261	0.975	0.336	55.5	800.5	785

对结构进行有限元分析,采用通用有限元软件 ANSYS 以成桥理论线形为基准建立该桥有限元模型,如图 3 所示. 桥塔、混凝土主梁用 Beam188 单元模拟,主缆和吊索用 Link10 单元模拟,钢箱梁采用 Beam4 单元模拟. 桥面铺装、栏杆等附属设施采用加大主梁密度的方式附加到主梁上. 考虑缆索的初应变和应力刚化效应,通过不断调整模型主缆、吊杆、主梁的初应变确定结构的初始平衡状态,模型的初应变经过多次调整后,主梁线形和设计成桥状态的线形比较吻合,两者最大差值为 0.027 m,可以认为是用于动力分析比较理想的模型^[9]. 采用瞬态动力分析法对结构进行一致激励分析该桥地震响应,地震加速度数据采用 19 s 天津波记录. 时程分析可得 19 组参数样本点对应的地震作用下塔顶最大纵向位移和主梁跨中最大竖向位移.

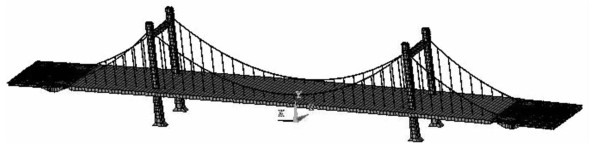


图 3 大桥有限元模型

根据结构需要完成的功能和结构到达极限状态的标志建立结构损伤极限状态方程,取结构损伤风险概率. 取塔顶容许位移限制 $\delta_t = 0.001\ 66H^{[10]}$,对本桥 $\delta_t = 14.5\text{ cm}$;参考日本本州四国连络桥设计标准,悬索桥的竖向容许挠度 $\delta_v = L/350$,对本桥 $\delta_v = 65.7\text{ cm}$.

建立基于响应面法建立损伤极限状态方程,并计算得到主塔与主梁的损伤风险概率 $P_{\beta 1}, P_{\beta 2}$ 分别为 $2.441\ 4 \times 10^{-6}$ 与 1.033×10^{-6} .

主塔和主梁组成串联体系,假设主梁与主塔损伤不相关,则该桥地震损伤风险概率为

$$P_c = 1 - P_s = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(F_i)] = 3.474\ 4 \times 10^{-6}.$$

取地震重现期 $T_k = 475\text{ a}$,则地震损伤风险年发生概率为 $7.314\ 52 \times 10^{-9}$.

根据表 1 可得该自锚式悬索桥地震损伤风险概率等级为 1 级.

4.3.2 风险损失估测

风险损失估测采用本文提出的改进德尔菲法. 选择 15 位桥梁工程专业人员组成专家组参与

专家调查,第 1 轮调查结果见表 3.

表 3 专家意见最优化调整

专家	评分	r	权重	调整后评分	调整量
E1	4	0.3	0.066	4.08	0.08
E2	4	0.4	0.067	3.87	0.13
E3	4	0.3	0.067	4.12	0.12
E4	5	0.2	0.069	4.80	0.20
E5	4	0.2	0.067	3.97	0.01
E6	3	0.4	0.064	3.34	0.34
E7	4	0.2	0.066	4.05	0.05
E8	4	0.3	0.069	3.89	0.11
E9	4	0.4	0.067	3.95	0.05
E10	3	0.5	0.069	3.38	0.38
E11	5	0.3	0.066	4.82	0.18
E12	4	0.3	0.064	3.86	0.14
E13	4	0.2	0.066	3.77	0.23
E14	4	0.3	0.066	3.97	0.03
E15	4	0.4	0.067	4.03	0.02

调查结果统计如下:

1) 风险评估小组对专家权重 w_i 的评价相同,为 1/15,根据式(2) 求各专家的权重,计算结果见表 3.

2) 加权均值 $U(x) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i = 4.002$.

3) 峰度 $E_k = \frac{\mu_4(x)}{[\sigma(x)]^4} - 3 = -0.73 < 0$,不满足一致性条件,故需进行专家意见最优化调整.

根据专家意见优化模型,对专家意见的调整结果见表 3. 可见专家意见调整量均在专家允许调整范围内,故调整结果满足可信性要求,进行新一轮的结果统计.

所有的统计参数均满足条件,专家意见的加权均值 $U(x)$ 则为最终统计结果, $U(x) = 3.995$,参考文献[11] 中的风险损失分级表,风险损失等级为 4 级.

综上所述,可知该自锚式悬索桥运营期间地震损伤风险估测的结果:风险概率等级为 1 级,风险损失等级为 4 级.

5 结 论

1) 基于响应面法的桥梁结构损伤概率估测方法既考虑了具体桥梁的受力特性又考虑了的不确定性,能够充分利用已有的研究成果定量地计算结构损伤风险概率.

2) 改进的德尔菲法可大大减少专家调查的重复次数,减少计算和统计工作量,缩短风险估测需要的时间,提高整个风险评估工作的效率.

3) 对研究成果比较丰富的特定风险估测,定性定量结合的方法能取得比较好的效果.

参考文献:

[1] 巩春领. 大跨度斜拉桥施工风险分析与对策研究[D]. 上海:同济大学,2006.

[2] 阮欣,陈艾荣,石雪飞. 桥梁工程风险评估[M]. 北京:人民交通出版社,2008.

[3] 张杰. 大跨度桥梁施工期风险分析方法研究[D]. 上海:同济大学,2007.

[4] STEIN S M, KENNETH YOUNG G, TRENT R E, *et al.* Prioritizing scour vulnerable bridges using risk[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 1999, 5(3):95 – 101.

[5] PADGETT J E, DENNEMANN K, GHOSH J. Risk-based seismic life-cycle cost;benefit (LCC-B) analysis for bridge retrofit assessment [J]. *Structural Safety*, 2010,32(3):165 – 173.

[6] 朱劲松,肖汝诚. 结构可靠度分析的人工智能响应面法及程序[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(4):169 – 172.

[7] JIN Cheng. An artificial neural network based genetic algorithm for estimating the reliability of long span suspension bridges [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*,2010,46(8):658 – 667.

[8] 程进,肖汝诚. 大跨度悬索桥颤振可靠度分析的改进响应面法[J]. 土木工程学报,2006,39(7):69 – 73.

[9] 周敦,王君杰,袁万城. 自锚式悬索桥地震反应有限元分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008,28(1):66 – 71.

[10] 王喜良,岳振民. 大跨悬索桥塔顶位移控制值分析[J]. 桥梁建设,2003,20(6):38 – 47.

[11] 王诗青. 公路桥梁风险评估关键技术研究[D]. 天津:天津大学,2010.

(编辑 魏希柱)