

大跨悬索桥非线性随机静力分析

石磊¹, 刘春城, 张哲, 杜蓬娟

(大连理工大学桥梁研究所, 辽宁大连, 116024)

摘 要 大跨度悬索桥结构具有显著的几何非线性行为,且存在材料特性、几何尺寸的随机性。先对缆索采用较小抗弯刚度参数的梁单元,对悬索桥进行确定性的几何非线性分析,然后采用响应面法进行非线性随机静力分析;最后针对一座大跨悬索桥,计算了在竖向活载作用下材料、几何尺寸的随机性对主梁跨中位移的影响。结果表明,结构随机性的影响十分明显。

关 键 词： 悬索桥 响应面法 几何非线性 随机性

中图分类号： U448.27 **文献标识码：** A

0 引 言

在悬索桥的设计分析中,有限元法已成为广泛使用的精确数值计算方法。但由于桥梁结构的材料性能、尺寸等存在着不确定性。在悬索桥的设计分析中,有必要考虑材料、几何尺寸等的随机性,且对于悬索桥这种柔性结构,有必要计入结构几何非线性。

目前研究随机性的方法主要是随机有限元法,常用的有限差分 SFEM, Taylor 展开法 SFEM (TSFEM)、摄动法 SFEM (PSFEM)、Neumann 级数展开法 SFEM (NSFEM)。但是随机有限元法必须通过改造确定性有限元并将其与随机场理论结合起来,通过考察每个随机变量在均值附近的摄动来研究结构的随机特性,而且为了确定随机响应的统计特性,必须要有足够容量的个体。因此,对每个个体的计算工作量和计算效率将直接影响到整个随机统计过程特性计算的工作量和效率。Bucher 等^[1]提出的响应曲面法不失为一种有效的研究方法,它不需要改造确定性有限元程序。文献^[2]对斜拉桥进行了非线性分析,但是没有针对大跨悬索桥的非线性随机效应进行分析。文献^[3]则采用 SFEM 法分析了材料变异对悬索桥的随机影响。响应面法通过研究结构响应与结构各种随机因素之间的关系来建立结构响应面方程,运用结构响应面方程就可以进一步研究结构的随机特性。本文运用响应面法,考虑大跨悬索桥的几何非线性效应,材料、几何尺寸、外部荷载等的随机性,对大跨悬索桥进行非线性随机静力分析,以证明响应面法是悬索桥非线性随机静力分析的有效方法。

1 悬 索 桥 的 几 何 非 线 性 分 析

悬索桥的承重结构主要为主缆、塔桥及锚碇构成的大缆系统,其次为加劲梁,吊索用来连接主缆和加劲梁。主缆为几何可变体系,主要靠其自重及恒载产生的初始拉力以及改变几何形状来获得结构刚度,以抵抗荷载产生的变形,缆索受力呈明显的几何非线性性质。目前对于大跨悬索桥,通用的计算方法是以有限位移理论为基础的几何非线性有限元法。关于缆索的单元有杆单元、曲线单元、悬链线单元及抛物线单元。但由于主缆取很多个单元,若采用铰接的缆索单元,则整个结构成为几何可变体系,无法求解。本文采用文献^[4]的方法,即采用节点刚结的梁单元对悬索桥进行几何非线性分析。所采用的梁单元采用较小的抗弯刚度参数,这样可以与主缆柔性变形的实际情况相符合,并对虎门桥进行了确定性的有限元分析。

收稿日期：

作者简介：石磊（1975—），男，博士，E-mail: lei_shi_shi@163.com；张哲（1944—），男，教授，博士生导师

2 响应面法

响应面法是当实验结果与已知参数间的函数关系为隐式时,通过响应面法可以设计实验结果与参数变量之间的关系求得参数变量间的系数,并且可以建立响应与参数变量之间的函数关系。Bucher 等将响应面法引入结构可靠性分析中,提出了用多项式逼近真实响应曲面以减少工作量。Bucher 认为,用独立随机变量 x_i 的二次式

$$R_p(x) = a_i + \sum_{i=1}^n (b_i x_i + c_i x_i^2) \quad (1)$$

来逼近真实的随机响应曲面已足够精确,而且可不必考虑各独立随机变量之间的耦合效应,即可以略去它们的交叉项 $x_i x_j$ 。在实际复杂结构工程中,当结构响应 $R(x)$ 与随机变量 x 之间的关系不能用显式表达时, $R(x)$ 可以近似用 $R_p(x)$ 来代替。这时式 (1) 中: $x_i (i=1, \dots, n)$ 为随机设计变量,本文为材料、几何尺寸等; a_i 、 b_i 、 $c_i (i=1, \dots, n)$ 为待定参数。

为了构造近似的响应曲面,每一个结构响应 $R_p(x)$ 都需要一组随机设计变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。所以为了确定式 (1) 中的 a_i 、 b_i 、 c_i , 需要进行 $2n+1$ 组实验。文献¹建议 x_i 的值可取 $\bar{x}_i$ 和 $x_i = \bar{x}_i \pm f_i \sigma_i, i=1, \dots, n$ 。其中 $\bar{x}_i$ 、 σ_i 分别为随机设计变量 x_i 的均值和标准差,按照工程 3σ 原则 f_i 可取为 3。首先运用确定性有限元方法计算悬索桥的非线性结构响应,然后利用式 (1) 可得到 $2n+1$ 个未知参数的线性方程组,求解出待定参数后,就可以得出结构响应 $R_p(x)$ 与随机变量 x 之间的关系。

响应面法可采用线性或非线性结构分析模型。本文采用的是几何非线性分析模型。

3 算例分析

本文首先用梁单元对主跨 888m 的虎门悬索桥进行了确定性的有限元分析。桥梁的计算模型见下图。

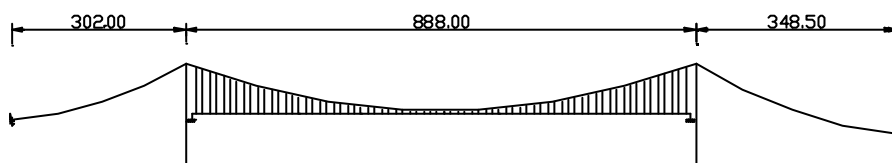


图 1 虎门大桥结构计算模型 (单位: m)

(Fig.1 Calculate model of Humen bridge)

为了有可比性,本文采用的是与文献²相同的模型,作用荷载为竖向均布活载。大小为 25% 的自重荷载即 46.9kN/m。当作用活载时,计算得主梁跨中位移如图 2 所示。

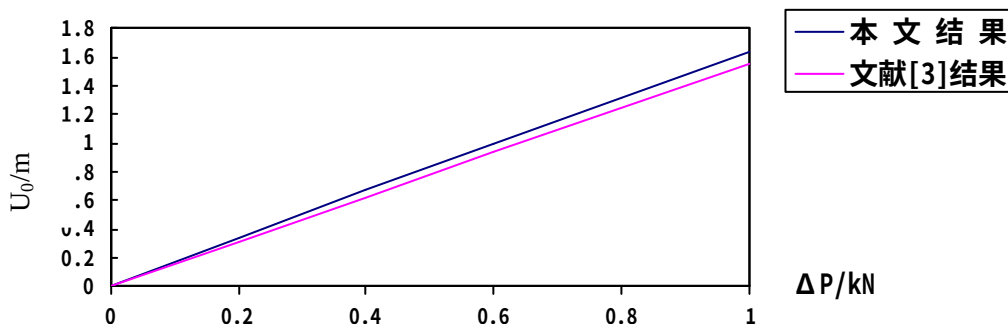


图 2 跨中点位移随加载的变化

为了 (Fig.2 The change of deflection at the sapn midpoint with change of load) 勾随机
变量可取为主缆、塔架、加劲梁、吊索的弹性模量 E_i 、截面面积 A 、抗弯惯性矩 I ，共 8 个
随机变量，统计参数见表 1

表 1 随机变量统计参数表
(Tab.1 Parameters of random variables)

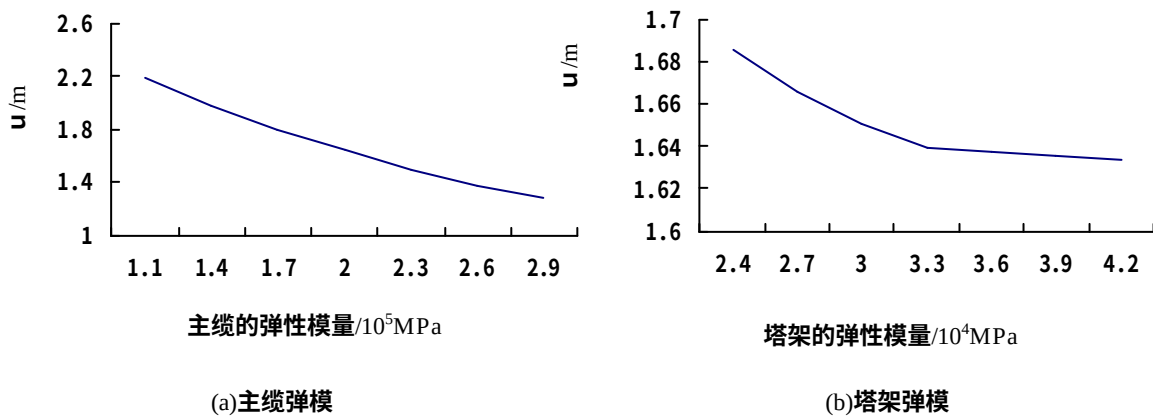
随机变量	构件类型	单位	分布类型	均值	标准差
E_1	主缆	MPa	正态	2×10^5	2×10^4
E_2	塔架	MPa	正态	3.3×10^4	3.3×10^3
E_3	加劲梁	MPa	正态	2.1×10^5	2.1×10^4
E_4	吊索	MPa	正态	1.6×10^5	1.6×10^4
A_1	主缆	m^2	正态	0.593	0.0593
A_2	加劲梁	m^2	正态	1.26	0.126
A_3	吊索	m^2	正态	0.0094	9.4×10^{-4}
I_1	加劲梁	m^4	正态	2.02	0.202

运用响应面法，上述随机变量的值取为均值 $\bar{x}_i$ 和 $\bar{x}_i \pm f_i \sigma_i$ ，共 17 组数据，计算的结构
响应取为跨中挠度。然后求解线性方程组，得出参数 a_i 、 b_i 、 c_i 的值，结果见表 2。

表 2 响应面待定参数值
(Tab.2 Response surface unknown value)

x_i	a	b_i	c_i
E_1	6.03384	-0.9494×10^{-5}	0.1122×10^{-10}
E_2		-0.1899×10^{-4}	0.2428×10^{-9}
E_3		-0.9244×10^{-6}	0.5593×10^{-12}
E_4		0.8726×10^{-6}	-0.6727×10^{-12}
A_1	6.03384	-0.3881×10^1	0.1723×10^1
A_2		-0.8330	0.1599
A_3		0.1223×10^1	-0.2197×10^3
I_1		-0.1573×10^{-1}	0.1362×10^{-2}

数值确定后，可依据式(1)得到跨中挠度结构响应。



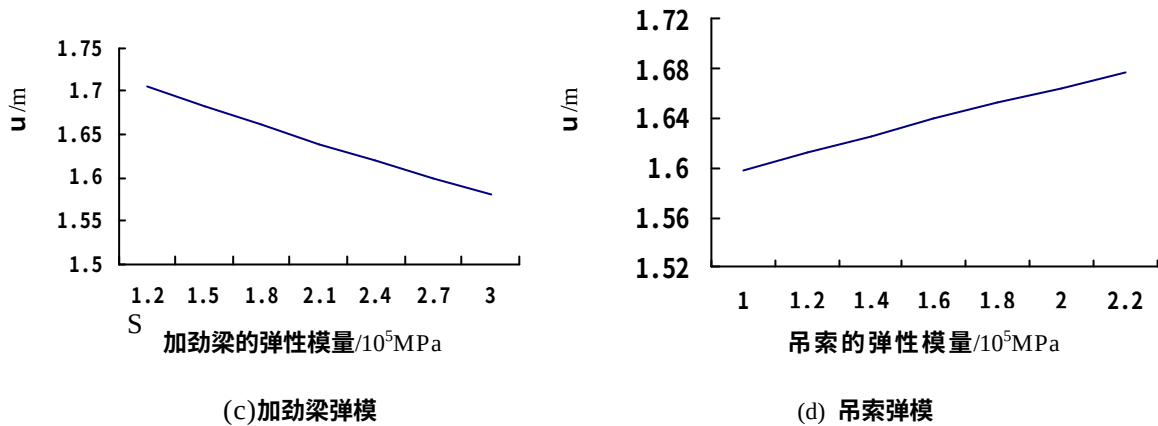


图 3 弹性模量对跨中挠度的影响

(Fig.3 The change of deflection at the sapn midpoint with change of elastic modulus)

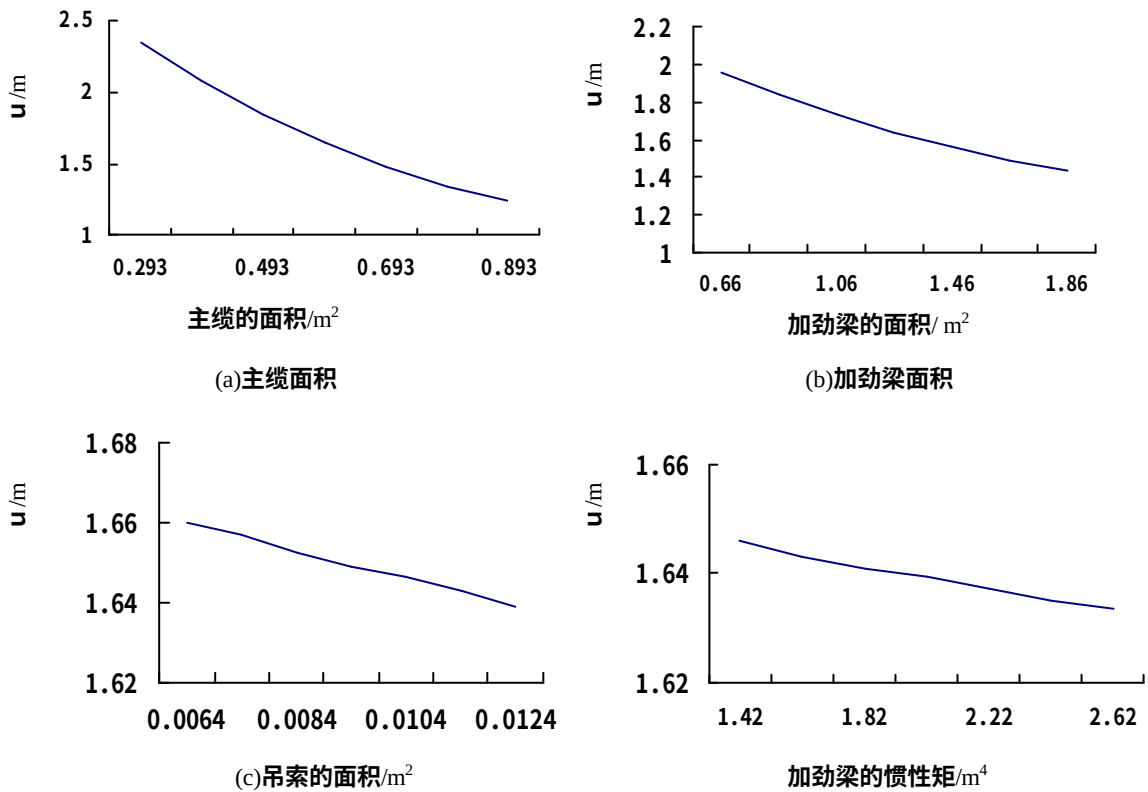


图 4 面积变化时跨中挠度的影响

(Fig.4 The change of deflection at the sapn midpoint with change of area)

图 5 加劲梁惯性矩变化时跨中挠度的变化

(Fig.5 The change of deflection at the sapn midpoint with change of inertia moment)

从图 3~5 可以看出, 悬索桥的主梁跨中挠度与主缆、塔架、加劲梁的弹模, 主缆、加劲梁、吊索的面积, 加劲梁的惯性矩的变化成反比; 与吊索的弹模变化成正比。其中, 主缆的弹模和面积的变化对主梁跨中的挠度影响最大, 非线性影响非常显著, 在工程应用中的 $\pm 3\sigma$ 范围内, 挠度的极大值为确定性位移的 1.23 倍; 加劲梁的面积变化对主梁跨中挠度的影响也很大; 而当吊索的弹模增加时, 吊索的刚性增加, 主梁跨中挠度随之增加。其他因素的

影响相对来说比较小。

4 结 论

- (1) 本文采用较小抗弯刚度参数的梁单元, 对大跨悬索桥进行非线性结构分析, 结果有良好的精度。
- (2) 悬索桥是一种大型柔性结构, 其材料、几何尺寸的随机性对其主梁跨中挠度都有程度不同的影响, 而其中以主缆的影响最大, 本文对虎门大桥成桥状态进行了随机非线性分析, 在工程应用中的 $\pm 3\sigma$ 范围内, 挠度的极大值为确定性位移的 1.23 倍。对于施工阶段, 恒载小、主缆竖向刚度也小, 由于存在材料加工、构件制造等的误差, 结构响应的误差有时更为可观, 所以有必要对其进行随机非线性分析。
- (3) 响应面法是大跨悬索桥非线性随机静力分析的一种有效的方法。

参 考 文 献

1. BUCHER C G, BOURGUNDU. A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems[J]. Structural Safety, 1990, 7(1): 57-66
2. 陈铁冰, 杨炳成, 石洞. 斜拉桥非线性随机静力分析[J]. 西安公路交通大学学报 2000, 20(2), 45-48
3. 刘春华, 秦权. 材料变异时大跨悬索桥的静力分析[J]. 清华大学学报. 1997, 37(6), 91-94
4. 王解军, 杨文华, 刘光栋. 大跨悬索桥几何非线性分析[J]. 湖南大学学报, 1998, 25(3), 70-73

Nonlinear stochastic static analysis of long span suspension bridge

SHI Lei LIU Chun-Cheng ZHANG Zhe DU Peng-Juan

(Department of civil engineering, Dalian university of technology, Dalian 116024)

Abstract: Geometrical nonlinear behaviors are very significant in long span suspension bridges, and the uncertainties of material, physical dimension etc greatly influence the structural response of suspension bridge. Beam element with small EI is used for the certain analysis of suspension bridge. Based on the Response Surface approach, the non-linearity of suspension bridge is researched in this paper. Finally, the mid-span deflection of a long span suspension bridge under vertical live load is analyzed when the elastic module of cable and hangers are assumed to be random correlated variables. Numerical results show that the randomness has a significant effect on the mid-span deflection.

Key words: Suspension bridge; Response Surface approach; Geometric non-linearity; Random

《CIMS 论文的天地》声明

本站免费向大家提供论文全文, 本站论文除了特别说明的以外都是从作者手中征集得到的。目前网上论文网站较多, 有人非法转载本站论文, 在此提出警告, 本站保留对这类行为进行追究的权利。

本站镜像：

欢迎访问《CIMS 论文的天地》

- 1、上海电信镜像：<http://www.cimspaper.com> <主站，付费空间，推荐访问>
- 2、虚拟域名：<http://xcchen.yeah.net>
- 3、广东阳江的镜像：<http://cimspaper.icpcn.com>
- 4、山东泰安的镜像：<http://cimspaper.wy8.net>
- 5、北京虎翼网镜像：<http://cimspaper.51.net>

欢迎您参加我站提供的邮件列表 希网提供的列表 分类首页/科学.技术/另类科学

<http://www.cn99.com/cgi-bin/catalog?viewcat=58>

为您提供《CIMS 论文的天地》更新通知，以及有关的论文和学术信息，每月至少发送一次。