

---

# 不确定干扰下基于代理模型的斜拉桥施工辅助决策方法\*

郑宏利

(中铁十六局集团路桥工程有限公司, 北京 101500)

**[摘要]** 斜拉桥施工时在不确定性因素影响下,可能会引发支座脱空等不安全问题。针对此类不确定性因素影响下的施工辅助决策问题,提出一种基于代理模型的可靠度优化方法,通过调整二期荷载中的桥面铺装层厚度来降低辅助墩支座的脱空风险。首先,针对某顶推施工钢箱斜拉桥体系转换过程中出现支座脱空的问题,分析其失效模式,建立了针对该失效模式极限状态对应的代理模型,利用合理性评价指标对代理模型进行评价,保障了代理模型的分析精度;其次,建立了基于代理模型的可靠度分析方法,通过参数敏感性分析实现了关键影响参数的识别;最后,建立了基于代理模型的优化方法,采用 NSGA-II 对该优化问题进行求解。以一座双塔 3 跨斜拉桥为例进行验证,结果表明,所提方法能有效降低辅助墩支座的脱空失效概率,提高结构可靠度,且主塔、主梁、斜拉索的力学性能在优化前后未发生明显改变,该斜拉桥施工辅助决策方法可用于指导实际工程施工。

**[关键词]** 桥梁工程;斜拉桥;不确定性;可靠度;灵敏度;代理模型;施工技术;决策优化

[中图分类号] U448.27

[文献标识码]

A

[文章编号] 20231024

## Auxiliary Decision-making Method for Cable-stayed Bridge Construction Based on Agent Model Under Uncertain Disturbance

ZHENG Hongli

(China Railway 16th Bureau Group Road and Bridge Engineering Co., Ltd., Beijing, 101500, China)

**Abstract:** Under the influence of uncertain factors during construction of cable-stayed bridges, unsafe issues such as bearing detachment may occur. In view of the construction auxiliary decision-making problem under the influence of such uncertainty factors, this paper proposes a reliability optimization method based on the surrogate model, which reduces the risk of the void of the auxiliary pier support by adjusting the thickness of the deck pavement in the second stage load. First of all, in view of the problem of bearing detachment in the process of system transformation of a steel box cable-stayed bridge constructed by incremental launching, this paper analyzes its failure mode, establishes a surrogate model corresponding to the limit state of the failure mode, and evaluates the surrogate model with rationality evaluation indicators, which effectively guarantees the analysis accuracy of the surrogate model; Secondly, this paper establishes a reliability analysis method based on the surrogate model, which realizes the identification of key influence parameters through parameter sensitivity analysis; Finally, an optimization method based on surrogate model is established, and NSGA-II is used to solve the optimization problem. Taking a double-tower and three-span cable-stayed bridge as an example, the analysis results show that the method proposed in this paper can effectively reduce the probability of hollow failure of the auxiliary pier support, improve structural reliability, and the mechanical properties of the main tower, main girder, and cable-stayed cable do not change significantly before and after optimization. This results prove that the construction auxiliary decision-making method of cable-stayed bridge proposed in this paper can be used to guide actual engineering construction and achieve good results.

**Keywords:** bridges; cable stayed bridges; uncertainty; reliability; sensitivity; surrogate model; construction; decision optimization

## 0 引言

斜拉桥因其较强的跨越能力及外形美观特点，是当前大跨桥梁的主要形式之一，其属于缆索支撑体系，因此施工复杂性高，同时结构施工风险要远远大于结构运营风险<sup>[1]</sup>，在多因素影响下，单一失效模式也有可能导致整个结构瘫痪，当考虑斜拉桥施工过程的不确定性因素影响时，该问题将会更加突出。

目前对斜拉桥施工决策及施工控制方法的研究，形成了一系列斜拉桥施工辅助决策的理论与方法，马文田等<sup>[2]</sup>提出最佳成桥状态法，以索力调整为核心内容，进行斜拉桥施工控制，在调整决策过程中，以最佳成桥状态作为最终目标，将最佳施工阶段作为技术路线，从而实现设计目标状态。

目前在我国常用的斜拉桥施工辅助决策方法为事后调整法<sup>[3]</sup>，这种方法虽使用较多，但并不是最优辅助决策方法，增加了施工阶段工作量，且局部调索对斜拉索的索力控制十分不利，如果操作不当，还可能引发事故，因此该方法只能作为补救措施<sup>[4]</sup>。近年专家对 BIM 技术进行了研究<sup>[5-6]</sup>，但由于该技术相对不够成熟，所以不能大规模应用到斜拉桥的施工过程决策中。

对于斜拉桥这种高次超静定和强非线性结构，其不确定性因素对施工影响显著，传统的确定性计算手段已不能满足要求。本文将在不确定性因素干扰前提下，利用可靠度指标作为结构安全性的衡量指标及不确定性的考虑方法，对斜拉桥施工过程特定阶段施工方案进行优化，建立斜拉桥特定失效模式的辅助决策方法，经工程检验证明该方法合理性。

## 1 基于代理模型的可靠度优化方法

### 1.1 优化框架

本文建立了一种基于代理模型的结构可靠度优化框架（见图 1），主要步骤如下。

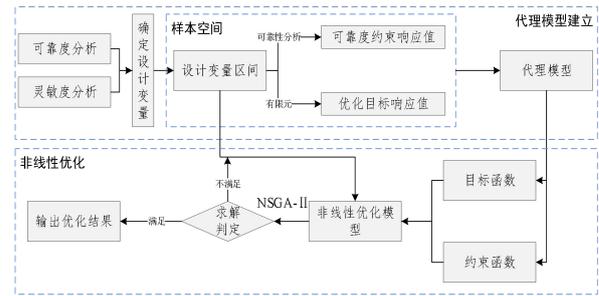


图 1 优化框架

Fig.1 Optimization framework

1)确定设计变量。通过变量可靠度、灵敏度分析，筛选显著影响变量，并确定需优化的设计变量。

2)建立优化模型。将需优化的设计变量记为  $X_{opt}$ ，并确定其优化限定区间，建立优化数学模型如下：

$$\begin{aligned} & \text{find} && X_{opt} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n]^T \\ & \text{minimize} && c(X_{opt}) \\ & \text{subjected to} && \beta(X_{opt}) \geq \bar{\beta} \\ & && [X^0 - |X| < X_{opt} < X^0 + |X|] \end{aligned} \quad (1)$$

式中： $c(X_{opt})$ 为关于设计变量  $X_{opt}$  的目标函数； $\beta(X_{opt})$ 为关于设计变量  $X_{opt}$  的约束函数，即可靠度约束函数； $\bar{\beta}$ 为可靠度指标约束值； $X^0$ 为设计变量的初值（通常使用变量均值）； $|X|$ 为变量初值到变量限定边界的距离。

3)确定目标函数与约束函数。利用 BPNN 代理模型方法建立无法直接获得与设计变量相关的目标或约束函数，对式（1）中的优化模型进行更新，得到最终优化模型。

4)求解优化模型。采用优化算法进行求解，输出设计变量优化结果。

### 1.2 代理模型构建及评价

将实际工程问题转换为研究问题且可精确预测的高效代理模型，建立起该代理模型辅助的非线性不确定性优化模型，对解决实际工程的不确定性优化问题具有重要意义。

#### 1.2.1 抽样方法

与简单随机抽样相比，拉丁超立方体抽样（Latin hypercube sampling, LHS）<sup>[7]</sup>方法为代理模型提供了高质量样本，解决了简单随机抽样无法在

\*中国铁建股份有限公司年度科技计划（18-B07）；  
中铁十六局校期资助基金（07WTX-JSFW-2019-0001）

[作者简介] 郑宏利，正高级工程师，E-mail: Zhenghl\_12567@163.com

[收稿日期]2023-04-29

描述变量整体分布的同时又保证足够的样本数量的问题（见图 2）。

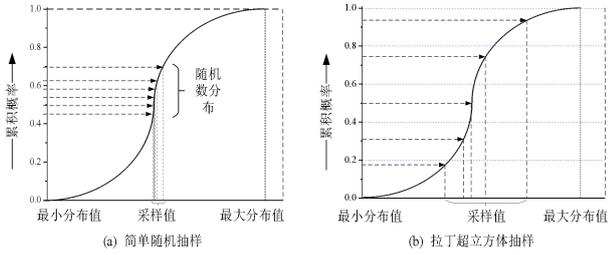


图 2 拉丁超立方抽样

Fig.2 Latin hypercube sampling

### 1.2.2 代理模型构建流程

人工神经网络技术也被称为代理模型。通过不同层间神经元的输入和输出间的映射关系，可有效解决曲线拟合预测问题。构建程序如图 3 所示。

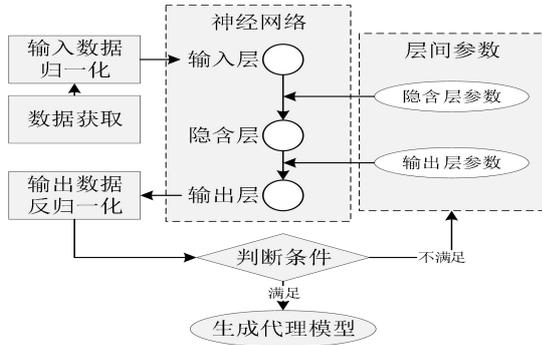


图 3 代理模型构建流程

Fig.3 Construction flow of surrogate model

1) 实测或数值分析获取训练与测试数据，作为输入样本，并对样本进行归一化处理。

2) 神经网络输入层输入归一化样本数据，给定初始权值等层间参数，计算输出层并对输出数据进行反归一化处理。

3) 对输出数据进行误差分析及对训练次数进行统计，判断其训练是否超过最大训练次数或达到误差要求。

4) 如达到误差要求或超过最大训练次数，则输出模型，如未达到要求则调整权值等层间参数，继续训练。

### 1.2.3 代理模型评价

通常借助一些统计参数，如拟合优度 ( $R^2$ )、相对平均绝对误差 (RA) 和相对绝对误差 (RM) 等统计参数，对已建立的代理模型进行合理性评价。

## 1.3 基于代理模型的可靠度分析方法

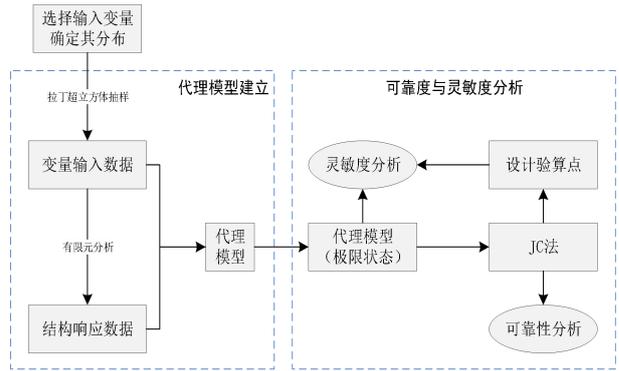


图 4 分析流程

Fig.4 Analysis flow

建立基于代理模型的可靠度分析方法，具体流程如图 4 所示。

1) 确定研究问题失效模式，选取不确定性变量，确定其随机分布，采用 LHS 抽样方法对随机变量指标进行抽样，得到代理模型构建训练样本。

2) 利用该样本进行 BPNN 神经网络代理模型训练，得到关于结构失效模式极限状态的代理模型，对代理模型精度进行验证，满足精度要求后，用以进行可靠度指标计算。

3) 利用建立好的失效模式极限状态代理模型，对其进行可靠度与灵敏度分析，得到结构的可靠度指标与变量灵敏度指标。

灵敏度分析是反映随机变量分布参数变化对结构失效概率变化影响程度的直观方法。本文在计算结构参数灵敏度时采用杨杰等<sup>[8]</sup>所提出的一种新的计算方法，结合 JC 法可得到适用于本文可靠度指标计算方法的灵敏度因子计算公式。

$$S_i = \frac{\left. \frac{\partial G}{\partial x_i} \right|_{x^*} (x_i^* - \mu_i)}{2 \sum_{k=1}^n \left. \frac{\partial G}{\partial x_k} \right|_{x^*} (x_k^* - \mu_k)} \quad (2)$$

其中  $G$  为关于  $x$  的功能函数， $\mu$  为对应均值， $x^*$  为验算点。

## 2 算例分析

某悬臂浇筑密索体系高低塔混凝土斜拉桥跨径布置为 193m+332m+113m，为半漂浮体系<sup>[9]</sup>（见图 5）。主要施工步骤为：下部结构和索塔施工→塔墩梁临时固结→对称分别悬臂浇筑高塔侧主梁，悬臂浇筑过程中分阶段张拉 A1~A17, B1~B17 斜拉

索；对称分别悬臂浇筑高塔侧主梁，悬臂浇筑过程中分阶段张拉 C1~C16, D1~D16 斜拉索→边跨合龙，张拉 A17~A24, B17~B24 斜拉索→中跨合龙，解除塔梁临时固结完成体系转换→桥面铺装及附属结构等二期荷载→通车运营。

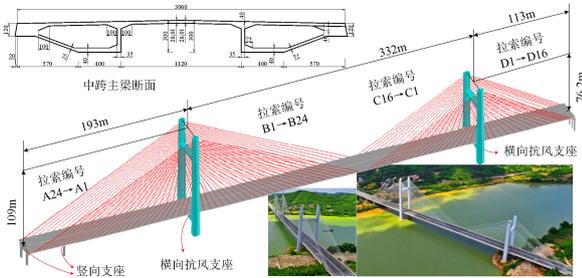


图 5 斜拉桥 (单位: cm)

Fig.5 The cable-stayed bridge(unit:cm)

实际施工中因存在拉索的制造与张拉误差，二期荷载材料与施工误差及施工过程中可能涉及的支模浇筑误差，二期荷载作用后，经过试算得到在特定的误差条件下，辅助墩出现负反力。而设计辅助墩支座为竖向支座，在恒载作用下，出现支座脱空情况可能会导致桥梁施工或运营期的不安全现象。因此，考虑施工期恒载作用时其出现负反力的情况为失效状态，定义其极限状态方程为：

$$G(X) = R_0 \quad (3)$$

其中  $R_0$  为辅助墩支座反力，当  $G(X) = R_0 < 0$  时，即为结构失效，以此作为可靠度失效判断准则用以后续的可靠度分析。

## 2.1 代理模型建立

### 2.1.1 有限元模型

针对失效模式对应工况建立 3D 有限元模型，混凝土主梁和主塔采用空间梁单元模拟，截面按施工图中截面尺寸，分别计算各截面不同参数值，赋予单元。梁单元采用鱼骨梁模型，拉索与梁单元间通过刚臂进行连接。对关键控制点、拉索锚固点及本文所要分析问题区域划分位置设置节点。全桥共有结点 906 个、梁单元 1032 个，其中 320 个梁单元用于拉索与索塔、拉索与主梁间的连接刚臂，其他梁单元用于主梁与桥塔，还有 160 个考虑垂度效应的空间索单元用于斜拉索模拟。其中，主梁横隔板用施加在主梁上的集中力模拟，如图 6 所示。

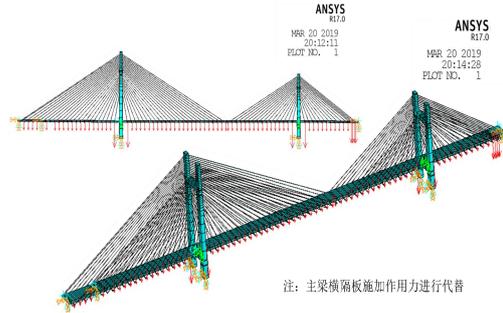


图 6 斜拉桥有限元模型

Fig.6 Finite element model of cable-stayed bridge

### 2.1.2 辅助墩支反力代理模型

考虑斜拉索设计长度 (A1→A24, B1→B24, C1→C16, D1→D16) 的安装与制造误差，以其设计长度作为随机变量，服从正态分布；考虑桥面铺装施工过程中的不确定性，对二期荷载以 20m 一个分区，记每个分区二期荷载量值为随机变量 (见图 7)，分布为正态分布；考虑主梁施工时的容重误差，其变异系数设置为 5%，服从对数正态分布，假设变量间相互独立。

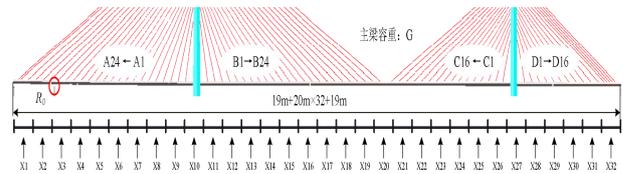


图 7 随机变量示意

Fig.7 Random variables

由代理模型构建方法即流程，建立结构辅助墩处支反力  $R_0$  关于随机变量的代理模型，进行代理模型精度验证即评价，如图 8 所示。

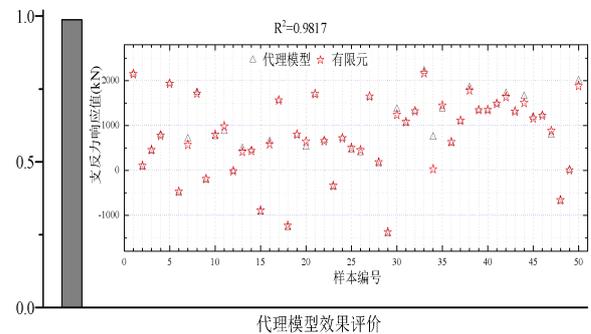


图 8 代理模型评价

Fig.8 Surrogate model evaluation

可看出代理模型拟合优度为 0.9817，且在预测点能良好匹配，故认为能满足工程需求，满足用

建立的基于代理模型的可靠度分析需求。

## 2.2 可靠度与灵敏度分析

按上文介绍的可靠度、灵敏度分析方法及可靠度分析流程，对上述代理模型进行可靠度与灵敏度分析，得到可靠度分析结果，如图 9 所示。

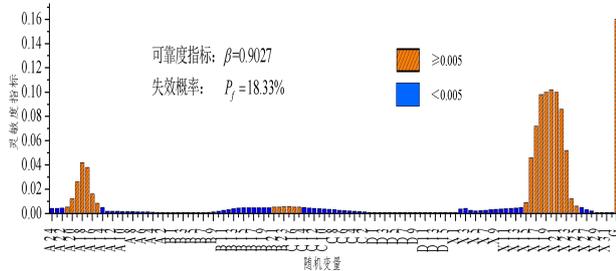


图 9 可靠度与灵敏度分析结果

Fig.9 Reliability and sensitivity analysis results

图 9 考虑了 80 个斜拉索无应力长度变量、32 个桥面二期荷载变量及 1 个主梁容重变量，由计算得到的结果可看出，当考虑这些变量的不确定性时，针对失效模式的可靠度指标结果为 0.9027，对应的失效概率为 18.33%，明显结构存在安全隐患。对辅助墩支反力变化敏感性指标高的变量为靠近辅助墩处的斜拉索 A15~A21 与中跨跨中附近的斜拉索 B21~B24, C15~C6，因辅助墩处索力变化直接影响辅助墩附近主梁挠度情况，因此该处敏感性因子符合工程实际情况，其次跨中拉索索力变化也会影响该部分主梁的挠度变化。由图 9 可看出，对结构辅助墩处影响最显著的部分为跨中二期荷载 X15~X25 及主梁容重误差 G。

根据不确定性筛选准则，图 9 中灵敏度蓝色部分相关的变量可作为确定性指标进行分析。故筛选变量，以 A15~A21, B21~B24, C15~C16, X15~X25, G, 共 25 个变量作为随机变量重新进行可靠度分析，重新进行代理模型的建立及可靠度分析。其结果如表 1 所示。

表 1 筛选变量可靠度分析结果对比

Table 1 Comparison of reliability analysis results for screening variables

对比参数	可靠度指	失效概率
	标	%
113 变量	0.902 7	18.33
25 变量	0.915 4	18.00

由对比结果可看出，当其他变量作为确定性参

数，而只针对灵敏度指标较高的参数进行可靠度分析时，其结构可靠度指标差异很小，故可采用 25 变量时的代理模型对失效模式进行模拟分析。

## 2.3 基于代理模型的二期荷载非线性优化

对结构失效状态的可靠度分析可得到，在原设计情况下，针对失效状态的可靠度指标为 0.915 4，相应的失效概率为 18.00%，在这种可靠度指标下，可能会出现施工期或运营期安全问题，故对结构进行优化。由前述灵敏度分析可知，对结构失效状态影响最大的为主梁容重误差 G。主梁容重受施工工艺限制，只能对其进行误差上的控制，无法实施进一步设计，因此在此基础上，根据第 3 节中提出的优化框架，对索力或二期荷载开展优化设计。

1)确定设计变量。此阶段斜拉索张拉已完成，如对索力进行调整设计，此前的施工阶段均会受到影响，且二期荷载包括附属结构及桥面铺装，附属结构无法进行改变，故只能针对桥面铺装厚度做调整，对结构进行可靠度设计。该桥主桥桥面铺装层构造如图 10 所示，可看出该桥面铺装分为 3 层，其中 A 层（橡胶沥青混凝土表层）与 B 层（橡胶沥青应力扩散层）均为不可变构造，因此只能对 C 层（C50 防水混凝土现浇层）厚度进行优化设计，故选取二期荷载显著影响变量 X15~X25 所对应的桥面铺装中 C 层厚度作为设计变量，记为  $\mathbf{X}_{opt} = [X'_{15} \ X'_{16} \ \dots \ X'_{25}]$ 。

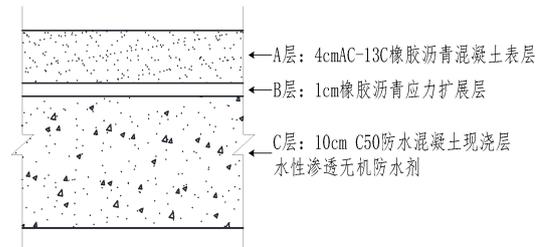


图 10 设计桥面铺装构造

Fig.10 Design bridge deck pavement structure

2)建立优化模型。由于桥面铺装涉及桥梁行车平顺及桥面美观等问题，因此优化值与原设计值相差不能过大以免出现过优化问题，本文取±3cm 为优化上、下限进行计算，即  $[X_0 - 0.03m < X_{opt} < X_0 + 0.03m]$ ，取可靠度约束指标为 2.5，因此建立优化模型如下：

$$\begin{aligned}
 & \text{find} && \mathbf{X}_{opt} = [X'_{15} \ X'_{16} \ \dots \ X'_{25}] \\
 & \text{minimize} && c(\mathbf{X}_{opt}) \\
 & \text{subjected to} && \beta(\mathbf{X}_{opt}) \geq 2.5 \\
 & && [X_0 - 0.03m < X_{opt} < X_0 + 0.03m]
 \end{aligned} \tag{4}$$

式中： $c$  为目标函数； $\beta$  为约束函数； $X_0$  为初始设计方案。

3) 优化结果分析。优化结果如图 11 所示，对优化后桥面铺装用量及结构失效概率进行对比，结果如表 2 所示。

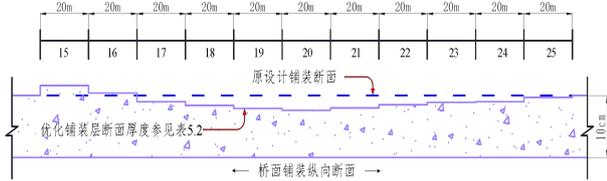


图 11 优化后桥面铺装 C 层示意 (单位: m)

Fig.11 Optimized bridge deck pavement layer C(unit:m)

表 2 优化方案评价

Table 2 Evaluation of optimization plan

方	二期荷载施工完成阶段		优化
	最小支反	失效概	
优	1823.22kN	18.33%	110
优	3164.82kN	0.67%	99
变	73.6%%	—	—

将优化后铺装换算为作用二期荷载，进行可靠度计算，并与未优化前进行对比，得到结果如表 3 所示。

表 3 优化可靠度计算对比

Table 3 Calculation comparison of optimization reliability

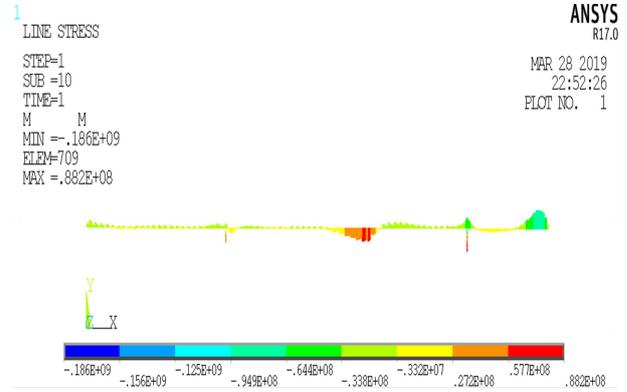
计算方案	可靠度指	失效概率
	标	
优化前	0.902 7	18.33
优化后	2.473 0	0.67

对二期荷载优化后，在显著变量影响的情况下，斜拉桥辅助墩支座脱空的失效概率减小到 0.67%，对应的可靠度指标为 2.473，这与本文设置约束指标 2.5 有差异，主要原因是，结构相关变量太多，再经过变量筛选，误差得到放大，但结果还令人满意，结构失效概率控制在 1% 以内，可认为在众多不确定因素影响下，结构的安全性能得到保证。

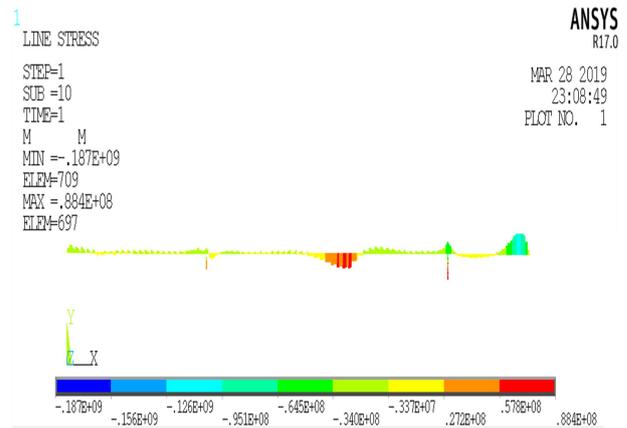
与初始方案相比，在二期荷载完成后，辅助墩支座脱空的概率下降了 96.3%，且在优化后，对桥面铺装的用量还减少 10%，并未增加经济负担。

## 2.4 优化结果分析

对优化前后主梁及主塔弯矩图进行对比，如图 12 所示，可看出优化前后主梁的弯矩图基本未发生变化。



a 优化前

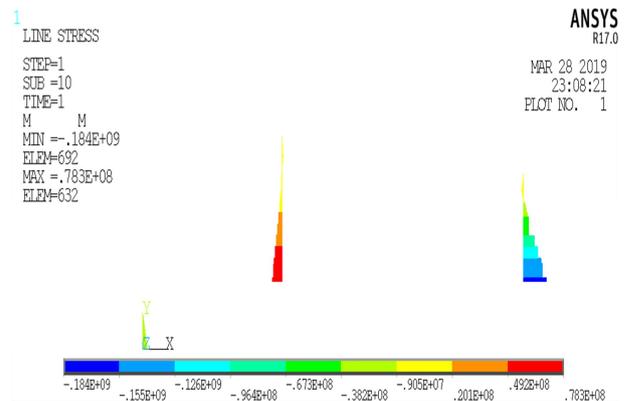


b 优化后

图 12 优化前后主梁弯矩

Fig.12 Bending moment of main girder before and after optimization

主塔弯矩 (见图 13) 在优化前后并没有发生大的改变，且相同位置处结构弯矩差值很小。



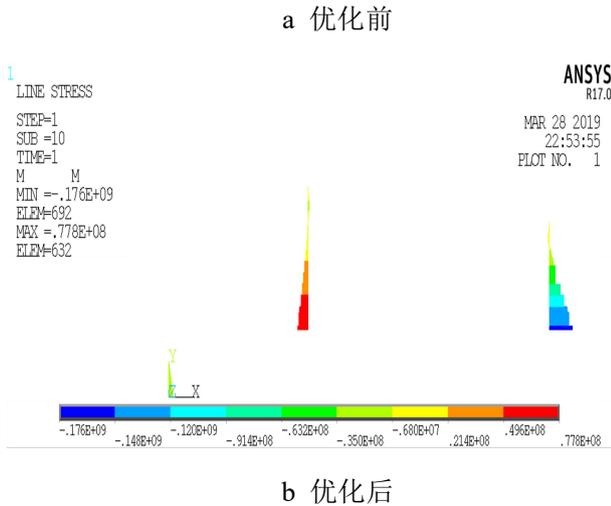


图 13 优化前后主塔弯矩

Fig.13 Bending moment of main tower before and after optimization

对主梁优化前后各位置垂直偏差展开对比（见图 14），可看出主梁整体线形走势在优化前后较接近，最大偏差值减小，桥梁行车平顺性未受到影响。

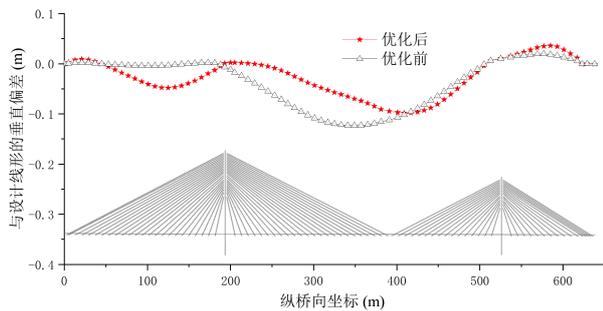


图 14 优化前后主梁垂直偏差

Fig.14 Vertical deviation of main girder before and after optimization

对最后阶段斜拉索力进行对比（见图 15），可看出优化前后斜拉索索力相差很小，进一步说明结构受力性能及力学状态未发生改变，证明该优化方案式合理可行。

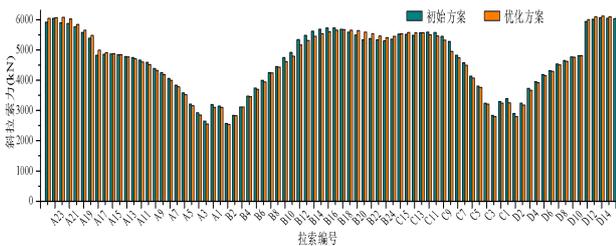


图 15 优化前后斜拉索索力

Fig.15 Cable force before and after optimization

### 3 结语

针对斜拉桥施工过程中存在的不确定性因素而导致支座脱空的施工过程不安全问题，本文提出一种能良好适用于斜拉桥施工过程不确定性干扰下基于代理模型的决策优化方法，并通过工程实例对方法的可行性进行了验证，得出如下结论。

1)本文基于代理模型与 JC 可靠度指标计算方法，建立起基于代理模型的可靠度分析方法。通过对一基准算例的代理模型建立及可靠度分析表明，本文所提方法得出的结果能与已有研究具有较高一致性，证明该可靠度分析方法可行。基于此建立基于灵敏度指标的变量筛选准则，选择影响显著变量。

2)通过已有最小花费优化模型，结合 NSGA-II 优化算法，在已有可靠度分析方法的基础上，建立完整基于代理模型的结构可靠度优化框架与流程，并将其应用到基准算例中。结果表明，该方法能很好地达到优化目标，且优化效率很高，为后续应用到斜拉桥决策优化提供参考。

3)针对某悬臂施工斜拉桥二期荷载施工完毕后出现的辅助墩支座脱空情况，利用本文提出的优化框架对二期荷载中桥面铺装厚度进行优化设计，并通过与原始设计方案对比，表明结构的受力状态合理性并未发生改变，且在目标函数最优条件下，桥面行车平顺性也未受到影响，增加了桥梁施工期与运营中的安全性。

### 参考文献:

[1] 刘西拉. 结构工程学科发展战略研究报告[R]. 1991.  
LIU X L. Research report on structural engineering discipline development strategy [J]. 1991.

[2] 马文田,韩大建.混凝土斜拉桥施工控制的最佳成桥状态法[J].华南理工大学学报(自然科学版),1999,27(11):7-13.  
MA W T, HAN D J. The optimal bridge completion state method for construction control of concrete cable-stayed bridges [J].Journal of South China University of Technology (natural science edition), 1999, 27 (11): 7-13.

[3] 石雪飞,郑信光,张凯生.悬臂浇筑混凝土斜拉桥

---

施工控制[J].桥梁建设,2001(5):36-39.

SHI X F, ZHENG X G, ZHANG K S. Construction control of cantilever poured concrete cable-stayed bridge [J].Bridge construction, 2001(5): 36-39.

[4] 陈务军,关富玲,袁行飞,等.斜拉桥施工控制分析中线性与非线性影响分析[J].中国公路学报,1998(2):52-58.

CHEN W J, GUAN F L, YUAN X F, et al. Analysis of linear and nonlinear effects in construction control analysis of cable-stayed bridges [J].China journal of highway and transport, 1998(2): 52-58.

[5] 宋福春,陈冲,张兴,等.BIM技术在大跨度斜拉桥设计中的应用[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(1):115-123.

SONG F C, CHEN C, ZHANG X, et al. Application of BIM technology in the design of large-span cable-stayed bridges [J].Journal of Shenyang Jianzhu University (natural science), 2016, 32(1): 115-123.

[6] 邱志军,鞠兴华.BIM技术在禹门口黄河公路斜拉桥施工中的应用研究[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(4):160-164.

QIU Z J, JU X H. Research on the application of BIM technology in the construction of cable stayed bridges on Yumenkou Yellow River Highway [J] Highway transportation technology (applied technology edition), 2018, 14(4): 160-164.

[7] STEIN M. Large sample properties of simulations using Latin hypercube sampling[J]. Technometrics, 1987, 29(2): 143-151.

[8] 杨杰,张崎,黄一.结构可靠性灵敏度因子的一种新指标[J].工程力学,2013,30(6):16-21,29.

YANG J, ZHANG Q, HUANG Y. A new index for sensitivity factor of structural reliability[J]. Engineering mechanics, 2013, 30(6): 16-21,29.

[9] 黄少雄,张艳英.广西大冲邕江特大桥设计[J].公路交通科技(应用技术版),2011,7(6):157-160,170.

HUANG S X, ZHANG Y Y. Design of Yongjiang Grand Bridge in Dachong, Guangxi [J].Highway transportation technology (applied technology edition), 2011, 7(6): 157-160,170.