

独塔混合梁斜拉桥参数灵敏度分析

陈孔亮¹, 叶健新¹, 徐郁峰^{2*}, 黄焯彬³, 郭奋涛³

(1.五邑大学 土木建筑学院, 广东 江门 529000; 2.华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640;

3.广东汇涛工程科技有限公司, 广东 佛山 528306)

摘要:为提高桥梁监控单位复核仿真模型的效率,同时研究施工过程中独塔混合梁斜拉桥不同参数对成桥状态的影响,该文以跨径(200+68+46) m的佛山同济路斜拉桥为工程背景,采用单一控制变量法和响应面-蒙特卡罗法对斜拉桥进行灵敏分析,以主梁线形、主塔线形、主梁应力及斜拉索成桥索力变化作为控制目标,研究主梁自重、初张索力等参数变化对成桥状态的影响。结果表明:主梁自重和初张索力属于灵敏参数,施工临时荷载属于较灵敏参数,主梁刚度和索弹性模量属于非灵敏参数。

关键词:斜拉桥;灵敏度分析;响应面法;蒙特卡罗法;仿真分析

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

Parameter Sensitivity Analysis of Single-Tower Cable-Stayed Bridge with Mixed Beam

CHEN Kongliang¹, YE Jianxin¹, XU Yufeng^{2*}, HUANG Zhuobin³, GUO Fengtao³

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Wuyi University, Jiangmen, Guangdong 529000, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology; Guangzhou, Guangdong 510640, China; 3. Guangdong Huitao

Engineering & Technology Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528306, China)

Abstract: To improve the efficiency of the review simulation model of the bridge monitoring unit and study the influence of different parameters of the single-tower mixed beam cable-stayed bridge on the bridge's completed state in the construction process, this paper, taking the cable-stayed bridge of Tongji Road in Foshan with a span of (200+68+46) m as the engineering background, adopted the single control variable method and response surface-Monte Carlo method for sensitivity analysis. Taking the main beam alignment, main tower alignment, main beam stress, and the variation of cable-stayed bridge force as control objectives, this paper studied the influence of the variation of main beam weight, initial tensile force, and other parameters on the state of the completed bridge. The results show that the dead weight of the main beam and the initial tensile force are sensitive parameters. Construction temporary load is a sensitive parameter, and girder stiffness and cable elastic modulus are non-sensitive parameters.

Keywords: cable-stayed bridge; sensitivity analysis; response surface method; Monte Carlo method; simulation analysis

0 引言

混合梁斜拉桥的主梁由两种不同的材料组成,主跨主梁整体或部分为自重较小的钢梁,具有跨越

能力大和抗震性能好的优点^[1-3],边跨主梁整体或部分为自重较大的混凝土梁,对斜拉桥整体起锚固和压重作用,减小主跨梁体的变形和内力^[4]。

混合梁斜拉桥由于结构体系复杂,结构参数对

收稿日期:2023-05-20(修改稿)

基金项目:2019年中央高校基本科研业务费成果转化项目(自然科学类)(编号:X2tjD2192960)

作者简介:陈孔亮,男,博士,讲师.E-mail:532536437@qq.com

*通信作者:徐郁峰,男,博士,副教授.E-mail:1249582297@qq.com

结构的影响复杂且多变^[5]。同时,在混合梁斜拉桥施工监控的仿真分析阶段,监控单位需与设计单位校核仿真分析模型。由于两家单位是独立完成桥梁仿真分析的,监控单位在校核两个模型时存在效率较低,校核参数指向性不明确等问题。

影响混合梁斜拉桥的成桥状态存在诸多不确定因素,如混凝土箱梁自重、钢箱梁自重、施工临时荷载及初张索力等。单德山等^[6]采用分组斜拉桥试验设计降低均匀试验设计难度,在分组参数显著性检验后,将所有显著参数集成在一起进行整体参数显著性检验,最终确定目标结构响应的敏感参数;许皓^[7]运用归一化处理方法,对斜独塔斜拉桥的斜塔容重、主梁容重、吊机荷载、主梁刚度、爬模荷载等因素进行灵敏度分析,结果表明主梁容重、吊机荷载对结构成桥状态的影响最显著;李乔等^[8]在钢结构斜拉桥的施工控制和设计中,考虑施工阶段和混凝土时变效应的影响,采用参数敏感性分析实现了施工控制误差分析和桥梁优化设计,得到了成桥线形和内力状态最优解。有关如何找出混合梁斜拉桥灵敏参数后,提高桥梁监控单位复核仿真模型的工作效率的研究较少。因此,有必要从单一控制变量和概率分析的角度研究斜拉桥仿真模型参数对成桥状态的影响程度。

斜拉桥的施工控制是一个复杂而庞大的系统工程,施工过程中参数的改变将会使施工控制结果发生变化^[9-10]。结构参数灵敏度的研究对有效降低实际成桥状态与理想成桥状态的偏差、科学有效地制定施工控制方案及施工阶段容许误差均具有重要的意义^[11]。同时,校核仿真模型过程中对灵敏参数进行严格把控,也是保证独塔斜拉桥高精度施工的必要条件之一。

1 研究背景

1.1 工程概况

佛山同济路斜拉桥位于广东省佛山市禅城区,主桥为独塔斜拉桥,墩、塔、梁固结,跨径组成为 $(200+68+46)\text{ m}=314\text{ m}$ 。主梁边跨 $(68+46)\text{ m}=114\text{ m}$ 为预应力混凝土箱梁,预应力混凝土箱梁伸过桥塔 11 m ,通过钢混结合段与主跨钢箱梁连接。斜拉索间距在混凝土箱梁侧为 6 m ,钢箱梁侧为 12 m ,边、主跨侧均为双索面。主塔采用“合手”形变截面

塔柱。

1.2 有限元模型

根据施工图设计文件拟定的结构尺寸、配筋情况及施工顺序,采用Midas/Civil 2019大型有限元软件,建立实际结构的有限元分析模型。全桥共离散为737个单元,823个节点,其中主梁135个单元,桥塔542个单元,索单元60个,斜拉索采用桁架单元模拟,其余构件采用梁单元模拟,钢混结合段通过修改结合段材料容重使其与实际重量等效,相应弹性模量通过刚度换算进行等效模拟^[12]。其边界条件为:①通过仅受压弹性连接模拟边跨施工支架,支架底部刚结处理;②斜拉索与桥塔、主梁之间的连接通过刚臂模拟;③支座通过一般弹性支承模拟,支座节点与主梁、桥墩通过刚臂模拟;④桥塔和桥墩底部刚结处理。计算模型如图1所示。

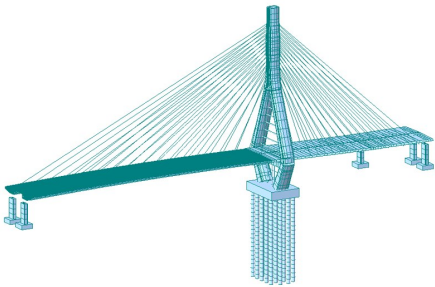


图1 佛山同济路斜拉桥有限元模型
Figure 1 Finite element model of Tongji Road cable-stayed bridge in Foshan

根据施工方案,模型共划分为113个施工阶段进行模拟,包括下部结构施工,主梁、桥塔施工,斜拉索张拉一次张拉等。该桥的边跨混凝土箱梁采用支架现浇施工,主跨钢箱梁利用水上船舶定位,采用桥面吊机悬臂施工。

1.3 监控模型与设计模型对比

在同一施工流程下,监控单位仿真模型与设计单位仿真模型的成桥线形及内力状态存在较大差异,两者的差异如表1和图2~4所示。

表1 监控模型与设计模型成桥状态对比
Table 1 Comparison of bridge status between monitoring unit model and design unit model

成桥状态	主梁线形/mm	主塔线形/mm	主梁应力/MPa
监控模型	-175	54	-95.4
设计模型	-424	84	-106.9

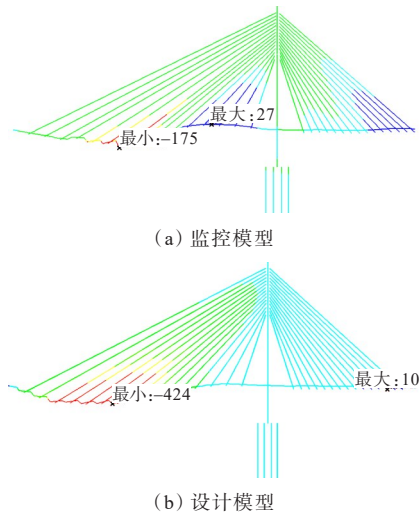


图2 主梁变形(单位:mm)

Figure 2 Main beam deformation(unit:mm)

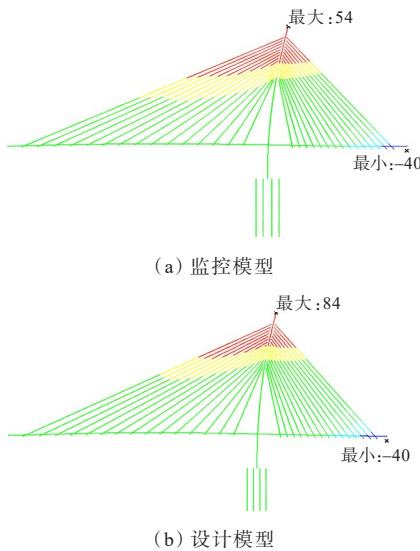


图3 主塔变形(单位:mm)

Figure 3 Main tower deformation (unit:mm)

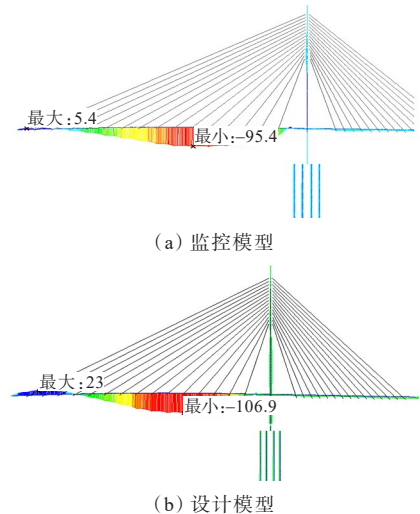


图4 主梁应力(单位:MPa)

Figure 4 Main beam stress(unit:MPa)

2 施工参数灵敏度分析

2.1 参数灵敏度分析概述

由于监控模型与设计模型的施工流程和边界条件一致,导致两者差异的原因主要为结构刚度参数和结构荷载参数。研究不同结构参数对斜拉桥成桥状态的影响程度对分析两个模型间的差异十分重要。因此,在结合佛山同济路斜拉桥实际施工情况基础上,本文对主梁自重、施工临时荷载、初张索力、主梁刚度和斜拉索弹性模量共5个随机参数进行灵敏度分析。由佛山同济路斜拉桥的设计图可知,以180.7 t的钢箱梁标准段自重作为主梁自重;以148 t的桥面吊机作为施工临时荷载;以主跨12号索M12初张索力作为索力初张力;以主跨钢箱梁截面惯性矩作为主梁刚度;以斜拉索弹性模量作为索弹性模量。将斜拉桥参数灵敏度的分析分为两步。首先,以主梁线形、主塔线形、主梁应力及斜拉索成桥索力变化作为控制目标,通过单一变量控制法分析各参数对斜拉桥整体成桥状态下结构线形及内力的影响;然后,综合运用响应面拟合技术及蒙特卡罗法,从概率分析的角度研究斜拉桥施工过程中各参数对控制目标的灵敏度影响。

2.2 单一控制变量法

2.2.1 主梁自重

分别讨论钢箱梁容重增加5%和混凝土箱梁容重增加5%两类情况。两类情况均以初始状态的箱梁容重为基准值,通过改变主梁的容重进而改变钢箱梁的自重,对成桥状态下的控制目标进行分析,结果如图5所示。

由图5及Midas模型计算结果可知:钢箱梁自重增大5%时,主塔线形、主梁线形和主梁应力的差值最大分别为23.6 mm、47.7 mm和8.8 MPa,位于主跨钢箱梁截面下缘处,成桥索力差值最大122 kN;混凝土箱梁自重增大5%时,主塔线形、主梁线形和主梁应力的差值最大分别为2.2 mm、2.9 mm和0.6 MPa,位于边跨混凝土箱梁截面下缘处,成桥索力差值最大38 kN。可见,钢箱梁自重和混凝土箱梁自重变化对结构影响程度不同,钢箱梁自重变化对斜拉桥整体各项施工控制影响更大。

2.2.2 施工临时荷载

通过增加桥面吊机重量的方式,模拟临时荷

载存在偏差的影响。本文将讨论桥面吊机重量增加10%和桥面吊机重量增加20%两类情况。临

时荷载变化对主桥线形和索力的影响结果如图6所示。

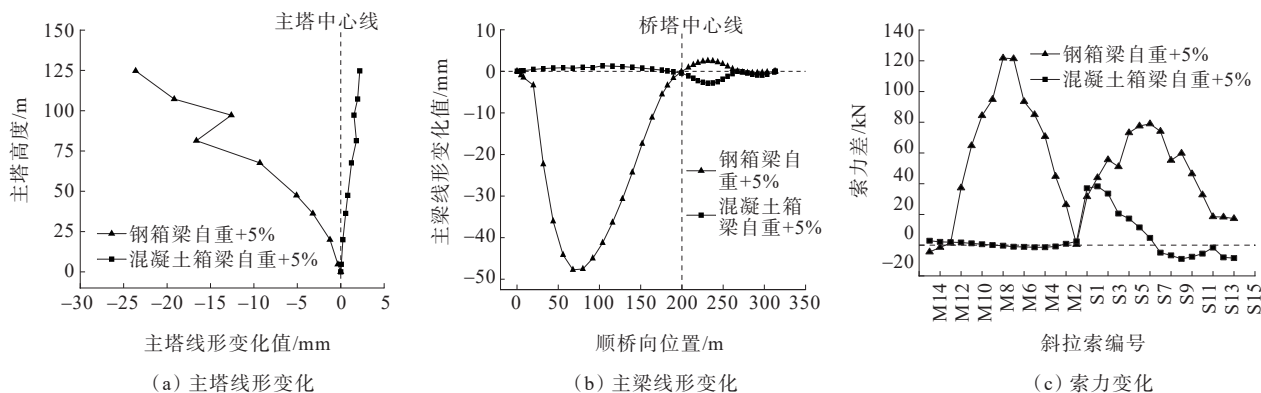


图5 主梁自重变化对主桥线形和索力的影响

Figure 5 Influence of beam weight variation on main bridge alignment and cable force

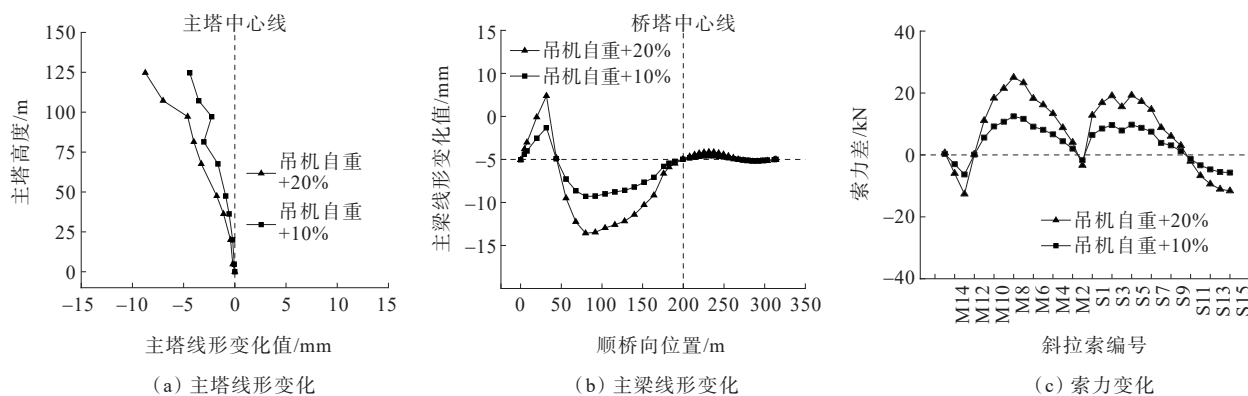


图6 临时荷载变化对主桥线形和索力的影响

Figure 6 Influence of temporary load variation on main bridge alignment and cable force

由图6及Midas模型计算结果可知:桥面吊机重量增加10%时,主塔线形、主梁线形、主梁应力和成桥索力的差值最大分别为4.4 mm、4.3 mm、3.7 MPa和12 kN;桥面吊机重量增加20%时,主塔线形、主梁线形、主梁应力和成桥索力的差值最大分别为8.7 mm、8.6 mm、7.7 MPa和25 kN。可见,施工临时荷载对斜拉桥整体的主梁应力施工控制影响较大,对其余施工控制影响较小。

2.2.3 初张索力

讨论初张索力减少5%和初张索力增加5%两类情况,初张索力变化对主桥线形和索力的影响分析结果如图7所示。

由图7及Midas模型计算可知:初张索力变化对成桥状态影响较大。初张索力减少5%时,主塔线形、主梁线形、主梁应力和成桥索力的最大差值分别为40.5 mm、56.5 mm、13.0 MPa和196 kN。初张索力增

加5%时,主塔线形、主梁线形、主梁应力和成桥索力的最大差值分别为39.1 mm、55.4 mm、12.8 MPa和195 kN。可见,初张索力变化对斜拉桥整体各项施工控制影响较大。

2.2.4 主梁刚度

讨论主梁刚度减少5%和主梁刚度增加5%两类情况,主梁刚度变化对主桥线形和索力的影响分析结果如图8所示。

由图8及Midas模型计算结果可知:主梁刚度增加5%时,主塔线形差值最大为0.5 mm;主梁线形差值最大为3.0 mm;主梁应力差值最大为1.7 MPa;成桥索力差值最大16 kN。主梁刚度减少5%时,主塔线形差值最大为0.5 mm;主梁线形差值最大为3.2 mm;主梁应力差值较小,成桥索力差值最大17 kN。

因此,主梁刚度变化对斜拉桥施工控制的影响较小。

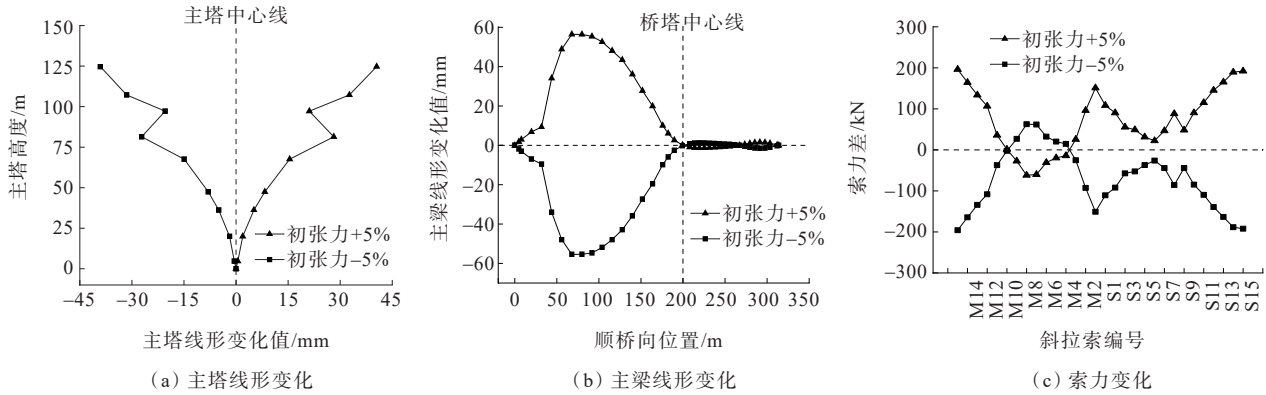


图7 初张索力变化对主桥线形和索力的影响

Figure 7 Influence of initial tensile force on main bridge alignment and cable force

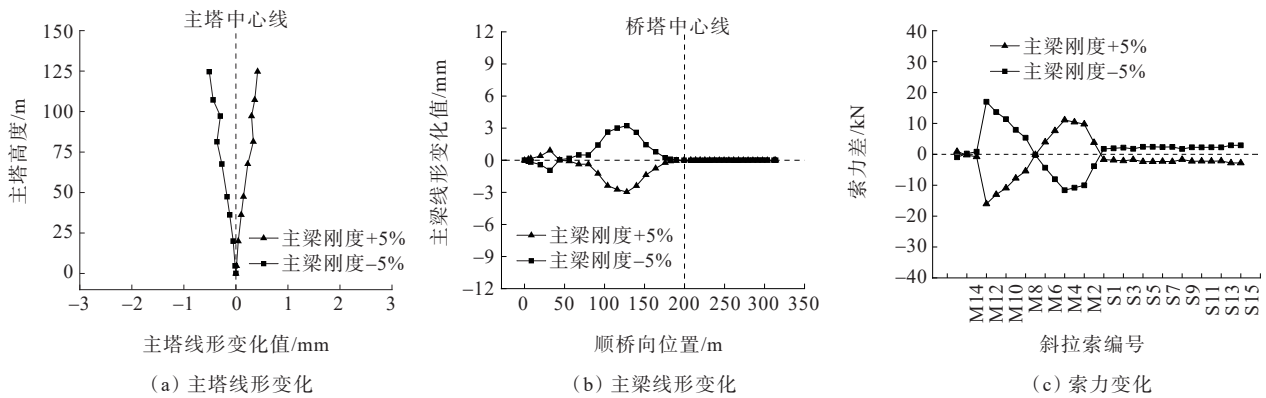


图8 主梁刚度变化对主桥线形和索力的影响

Figure 8 Influence of main beam stiffness variation on main beam alignment and cable force

2.2.5 斜拉索弹性模量

讨论索弹性模量减少5%和索弹性模量增加5%两类情况,分析结果如图9所示。

由图9及Midas模型计算结果可知:索弹性模量增加5%时,主塔线形差值最大为0.4 mm;主梁线形差值最大为0.5 mm;主梁应力差值最大为1.8 MPa;成桥索力差值最大15 kN。索弹性模量减少5%时,主塔线形差值最大为0.4mm;主梁线形差值最大为7.6 mm;主梁应力差值最大为1.9 MPa,成桥索力差值最大16 kN。

因此,索弹性模量变化对斜拉桥施工控制的影响较小。

2.3 响应面-蒙特卡罗法

响应面-蒙特卡罗法是响应面与蒙特卡罗试验的一种结合^[13]。既具备蒙特卡罗法的直观概念和清晰含义,同时又提高了其运算效率,适用于斜拉桥结构施工过程随机分析。该方法具体流程如下:

(1) 为逼近结构真实的施工过程仿真分析结果函数 $r=r(X_1, X_2, \dots, X_n)$,在有限次施工过程的仿真分析结果上,运用数学回归拟合技术,拟合出响应面函数 $R=R(X_1, X_2, \dots, X_n)$,其中, X_1, X_2, \dots, X_n 为结构随机参数。

(2) 求得的施工过程结构响应面函数 $R=R(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 之后,因响应面函数为显式表达,采用蒙特卡罗法进行有限次的样本抽样试验,即可求得结构响应的均值和标准差。

本文的响应面函数采用不含交叉项的四次多项式:

$$R = R(X_1, X_2, \dots, X_n) = a + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n c_i X_i^2 + \sum_{i=1}^n d_i X_i^3 + \sum_{i=1}^n e_i X_i^4 \quad (1)$$

式中: a, b_i, c_i, d_i 和 $e_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为 $4n+1$ 个待定系数。

通过 $4n+1$ 个独立的方程可以完全确定该响应面函数。为此,需要进行 $4n+1$ 次数值试验。

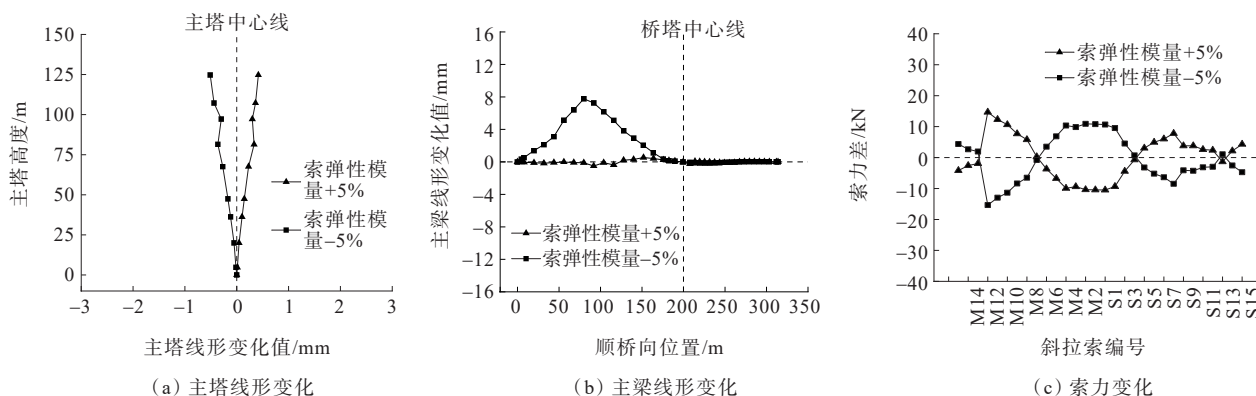


图9 索弹性模量变化对主桥线形和索力的影响

Figure 9 Influence of elastic modulus of cable on main beam alignment and cable force

为有效控制两个模型之间的差异,需将主梁线形、主塔线形、主梁应力及斜拉索成桥索力控制在容许值之内,相应的极限状态方程可表示为:

$$Z = G(X_1, X_2, \dots, X_n) = \Delta_R - |R(X_1, X_2, \dots, X_n) - \bar{R}| = 0 \quad (2)$$

式中: X_1, X_2, \dots, X_n 分别为主梁自重、施工临时荷载、初张索力等,它们均为随机参数; Δ_R 为主梁线形、主塔线形、主梁应力及斜拉索成桥索力的控制容许值; $R(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为考虑主梁自重、施工临时荷载、初张索力等参数变异后的主梁线形、主塔线形、主梁应力及斜拉索成桥索力的实际可能响应值,是一随机变量; \bar{R} 为结构中主梁线形、主塔线形、主梁应力及斜拉索成桥索力的均值。

当 $Z > 0$ 时主梁线形、主塔线形、主梁应力及斜拉索成桥索力满足控制要求;当 $Z < 0$ 时控制失效,失效概率为:

$$P_f = P\{Z < 0\} \quad (3)$$

假定结构响应 $R(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 服从正态分布,则由式(2)可知 Z 也服从正态分布,其均值和标准差分别为:

$$\mu_Z = \Delta_R - \mu_R \quad (4)$$

$$\sigma_Z = \sigma_R \quad (5)$$

式中: μ_R 为主梁自重、施工临时荷载、初张索力等参数的均值; σ_R 为主梁自重、施工临时荷载、初张索力等参数的标准差,可通过施工过程结构响应随机分析求得。

采用上述响应面-蒙特卡罗法,从概率分析的角度研究斜拉桥施工过程中参数对控制目标的灵敏度。分析流程为:由式(1)拟合得到响应面函数,根

据式(2)确定控制容许极限状态方程,分别令各个参数单独变异^[14],变异系数统一取10%左右,然后研究在不同的施工控制相对偏差容许值 Δ_R/\bar{R} 时,施工控制的失效概率,由此判断各个参数的灵敏程度。

2.3.1 随机参数统计及响应面函数

由上述斜拉桥整体的成桥状态灵敏度分析,对于斜拉桥的二期铺装工况,可分别选取5个对结构响应影响相对较灵敏的参数作为随机变量,分别选取4个结构响应相对灵敏的参数作为响应值。

以180.7 t的钢箱梁标准段自重作为主梁自重参数 X_1 ;以148 t的桥面吊机作为施工临时荷载参数 X_2 ;以主跨12号索M12初张索力作为索力初张力参数 X_3 ;以主跨钢箱梁截面惯性矩作为主梁刚度参数 X_4 ;以斜拉索弹性模量作为索弹性模量参数 X_5 ,如表2所示。

表2 随机变量统计参数

Table 2 Statistical parameters of random variables

随机变量	单位	均值	标准差	分布类型
主梁自重 X_1	t	180.7	18.1	正态
施工临时荷载 X_2	t	148.0	14.8	正态
索力初张力 X_3	kN	3 653.0	365.3	正态
主梁刚度 X_4	MN·m ²	2.912 88	0.291 2	正态
索弹性模量 X_5	Pa	1.95×10^8	1.95×10^7	正态

选取斜拉桥主跨第四段钢主梁前端点位移响应函数作为主梁线形响应函数 $R_1(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$;选取斜拉桥主塔塔顶位移响应函数作为主塔线形响应函数 $R_2(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$;选取斜拉桥主跨第一段钢主梁后端点上缘应力响应函数作为主梁应力响应函数 $R_3(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$;选取斜拉桥主跨12号索成桥拉力响应函数作为成桥索力响应函数 $R_4(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$ 。如图13所示。

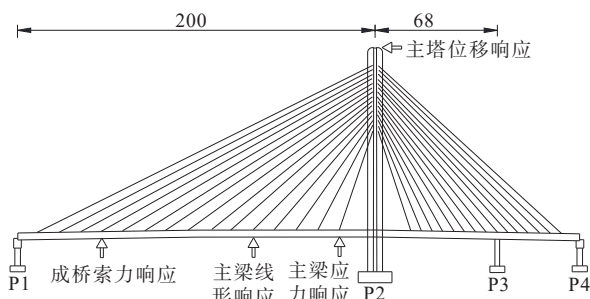


图 10 斜拉桥响应值选取示意图(单位:m)

Figure 10 Selection of cable-stayed bridge response values(unit:m)

定义主梁线形、主塔线形、主梁应力及斜拉索成桥索力的控制容许值分别为 Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 和 Δ_4 。定义结构中主梁线形、主塔线形、主梁应力及斜拉索成桥索力的均值分别为 \bar{R}_1 、 \bar{R}_2 、 \bar{R}_3 和 \bar{R}_4 。综上,主梁线形、主塔线形、主梁应力及斜拉索成桥索力的施工控制极限状态方程分别为 $Z_1=R_1(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$ 、 $Z_2=R_2(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$ 、 $Z_3=R_3(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$ 和 $Z_4=R_4(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$ 。

2.3.2 蒙特卡罗法分析结果

分别令上述5个参数单独变异,变异系数统一取10%左右,采用随机变量概率分布类型及分布参数分别对5个参数进行随机抽样,抽样次数取 1.0×10^5 ,将生成的5组随机变量样本分别代入5个施工控制极限状态方程。利用式(3)计算以主梁线形、主塔线形、主梁应力及斜拉索成桥索力为控制目标相应的失效概率,从而对4种施工控制目标的参数灵敏度进行分析,各种情况下的结构响应失效概率列于表3。

由表3可知:

(1) 相同条件下,主梁自重单独变异时,主梁线形施工控制失效概率最大;初张索力单独变异时,主梁线形施工控制失效概率较大;施工临时荷载、主梁刚度和索弹性模量单独变异时,主梁线形施工控制失效概率较小。说明以主梁线形作为施工控制目标时,主梁自重为灵敏参数,初张索力为较灵敏参数,施工临时荷载,主梁刚度和索弹性模量的影响较小。

(2) 相同条件下,主梁自重单独变异时,主塔线形施工控制失效概率最大;初张索力和施工临时荷载单独变异时,主塔线形施工控制失效概率较大;主梁刚度和索弹性模量单独变异时,主塔线形施工控制失效概率较小。说明以主塔线形作为施工控制目标

表 3 各个参数单独变异时施工控制失效概率

Table 3 Failure probability of construction control when each parameter varies separately

施工控制目标	随机变量	不同施工控制相对偏差容许值(%) 的施工控制失效概率/%				
		1	5	10	15	20
主梁线形	主梁自重	86.05	38.23	8.16	0.86	0.00
	施工临时荷载	11.17	0.00	0.00	0.00	0.00
	初张索力	48.96	0.00	0.00	0.00	0.00
	主梁刚度	6.23	0.00	0.00	0.00	0.00
	索弹性模量	3.61	0.00	0.00	0.00	0.00
主塔线形	主梁自重	81.49	24.04	1.89	0.00	0.00
	施工临时荷载	28.19	0.00	0.00	0.00	0.00
	初张索力	47.02	0.03	0.00	0.00	0.00
	主梁刚度	5.15	0.00	0.00	0.00	0.00
	索弹性模量	1.12	0.00	0.00	0.00	0.00
主梁应力	主梁自重	85.59	35.56	4.48	0.00	0.00
	施工临时荷载	50.67	7.96	4.02	2.45	1.61
	初张索力	64.54	5.87	2.04	1.02	0.53
	主梁刚度	5.32	0.00	0.00	0.00	0.00
	索弹性模量	6.23	0.00	0.00	0.00	0.00
成桥索力	主梁自重	51.64	5.99	2.08	1.03	0.60
	施工临时荷载	2.35	0.00	0.00	0.00	0.00
	初张索力	23.84	0.00	0.00	0.00	0.00
	主梁刚度	5.98	0.00	0.00	0.00	0.00
	索弹性模量	8.54	0.00	0.00	0.00	0.00

时,主梁自重为灵敏参数,初张索力和施工临时荷载为较灵敏参数,主梁刚度和索弹性模量的影响较小。

(3) 相同条件下,主梁自重单独变异时,主梁应力施工控制失效概率最大;初张索力和施工临时荷载单独变异时,主梁应力施工控制失效概率较大;主梁刚度和索弹性模量单独变异时,主梁应力施工控制失效概率较小。说明以主梁应力作为施工控制目标时,主梁自重为灵敏参数,初张索力和施工临时荷载为较灵敏参数,主梁刚度和索弹性模量的影响较小。

(4) 相同条件下,主梁自重单独变异时,成桥索力施工控制失效概率最大;初张索力单独变异时,成桥索力施工控制失效概率较大;施工临时荷载、主梁刚度和索弹性模量单独变异时,成桥索力施工控制失效概率较小。说明以成桥索力作为施工控制目标时,主梁自重为灵敏参数,初张索力为较灵敏参数,施工临时荷载、主梁刚度和索弹性模量的影响较小。

3 调整参数后模型结果对比

根据上述结论,对设计仿真模型的主梁自重和初张索力参数进行调整。采用Midas软件,通过设置主梁材料容重调整模型主梁自重,设置索力荷载调整初张索力。调整这两个参数的工作量较小,调整后,监控模型与设计模型的成桥状态的差异缩小至合理范围之内,监控模型与调整后设计模型成桥状态对比如表4和图11所示。

表4 监控模型与调整后设计模型成桥状态对比
Table 4 Comparison of bridge completed state between monitoring unit model and adjusted design unit model

成桥状态	主梁线形/mm	主塔线形/mm	主梁应力/MPa
监控模型	-175	54	-95.4
设计模型	-187	57	-97.4

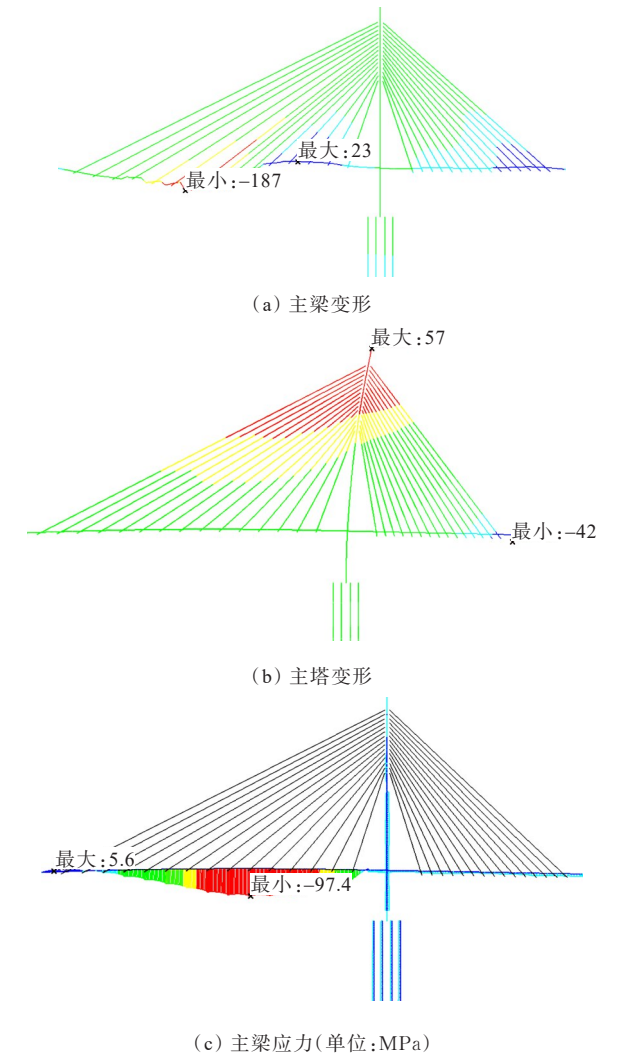


图11 调整后设计模型

Figure 11 Adjusted design unit model

4 结论

(1) 采用单一控制变量法对佛山同济路斜拉桥进行整体分析表明:主梁自重对斜拉桥施工控制的线形和内力状态影响显著,属于灵敏参数;临时施工荷载对斜拉桥施工控制内力状态影响较大,属于较灵敏参数;初张索力对斜拉桥施工控制的线形和内力状态影响较大,属于较灵敏参数。主梁刚度和索弹性模量对斜拉桥施工控制的线形和内力状态影响较小,属于非灵敏参数。

(2) 从概率分析的角度,运用响应面-蒙特卡罗法分析各参数变异性对斜拉桥施工控制的影响。各项施工控制失效概率表明:以主梁线形、主塔线形或主梁应力作为施工控制目标时,主梁自重为灵敏参数,初张索力为较灵敏参数,施工临时荷载、主梁刚度和索弹性模量的影响较小;以成桥索力作为施工控制目标时,主梁自重为灵敏参数,初张索力为较灵敏参数,施工临时荷载、主梁刚度和索弹性模量的影响较小。

(3) 上述单一控制变量法和响应面-蒙特卡罗法分析得出的结果相互吻合。在校核混合梁斜拉桥仿真分析模型过程中,监控单位应重点关注和严格把控上述灵敏参数。既能提高监控单位校核斜拉桥仿真分析模型的效率,同时可为斜拉桥高精度施工提供理论依据。

参考文献:

References:

[1] 龚臻,李翠平,雷洛.复杂艰险条件下钢混组合桥梁设计应用[J].中外公路,2022,42(2):131-137.
GONG Zhen,LI Cuiping,LEI Luo.Design and application of steel-concrete composite bridge under complex and dangerous conditions[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(2):131-137.

[2] 涂光亚,欧阳星.大跨度独塔混合梁斜拉桥主梁纵漂影响分析[J].中外公路,2022,42(4):58-62.
TU Guangya,OUYANG Xing. Analysis on influence of longitudinal drift for long-span cable-stayed bridge with single-tower hybrid main girder[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(4):58-62.

- [3] 田波,宋路兵.混合梁斜拉桥钢-混结合段设计关键技术[J].中外公路,2023,43(2):117-120.
TIAN Bo, SONG Lubing. Key technology for design of composition section of hybrid girder cable-stayed bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 117-120.
- [4] 刘燕飞,朱安静,匡晓明,等.襄阳市东西轴线二跨汉江特大桥主桥设计[J].桥梁建设,2017,47(1):94-98.
LIU Yanfei, ZHU Anjing, KUANG Xiaoming, et al. Design of main bridge of second Hanjiang River bridge on east-to-west axis of Xiangyang city[J]. Bridge Construction, 2017, 47(1):94-98.
- [5] 张义.大跨度混合梁斜拉桥施工控制中的参数敏感性研究[D].成都:西南交通大学,2009.
ZHANG Yi. Parameter sensitivity analysis in construction control of long span hybrid beam cable-stayed bridges[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [6] 单德山,董皓,顾晓宇.大跨度斜拉桥施工控制的多元统计敏感性分析[J].中国公路学报,2021,34(12):68-79.
SHAN Deshan, DONG Hao, GU Xiaoyu. Multivariate statistical sensitivity analysis for construction control of long-span cable-stayed bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(12):68-79.
- [7] 许皓.斜独塔斜拉桥关键施工技术研究及参数敏感性分析[D].济南:山东交通学院,2021.
XU Hao. Research on key construction technology and parameter sensitivity analysis of inclined single tower cable-stayed bridge[D]. Jinan: Shandong Jiaotong University, 2021.
- [8] 李乔,卜一之,张清华.大跨度斜拉桥施工全过程几何控制概论与应用[M].成都:西南交通大学出版社,2009.
LI Qiao, BU Yizhi, ZHANG Qinghua. Introduction and application of geometric control in construction process of long-span cable-stayed bridge [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2009.
- [9] 张紫辰,王根会.混合梁-塔斜拉桥力学特性及参数敏感性[J].兰州交通大学学报,2021,40(4):13-19.
ZHANG Zichen, WANG Genhui. Mechanical characteristics and parameter sensitivity of hybrid girder-tower cable stayed bridge[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2021, 40(4):13-19.
- [10] 刘康康.矮塔斜拉桥静力分析及参数敏感性识别研究[D].合肥:合肥工业大学,2013.
LIU Kangkang. Static analysis and research on parameter sensitivity identification of the low tower-cable-stayed bridge[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [11] 蒋超.大跨度钢桁梁斜拉桥施工过程参数识别及敏感性分析[D].长沙:长沙理工大学,2017.
JIANG Chao. Parameter sensitivity analysis and parameter identification of long span steel trussed cable-stayed bridge[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017.
- [12] 葛俊颖.桥梁工程软件 Midas Civil 使用指南[M].北京:人民交通出版社,2013.
GE Junying. Guide to the use of bridge engineering software Midas Civil[M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [13] 徐郁峰,苏成,陈兆栓,等.考虑施工过程的异形建筑结构概率分析[J].建筑结构学报,2011,32(8):120-126.
XU Yufeng, SU Cheng, CHEN Zhaoshuan, et al. Probabilistic analysis of irregular structures with consideration of construction process[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(8):120-126.
- [14] 徐郁峰,苏成,陈兆栓,等.频率法索力测量的参数灵敏度概率分析[J].中外公路,2010,30(4):132-136.
XU Yufeng, SU Cheng, CHEN Zhaoshuan, et al. Probabilistic analysis of parameter sensitivity for cable force measurement using frequency method [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(4):132-136.