

# 大跨钢箱梁斜拉桥参数敏感性分析

樊新星

(湖南致力工程科技有限公司, 湖南 长沙 410200)

**摘要:** 为提高大跨钢箱梁斜拉桥的施工控制精度, 以某大跨斜拉桥为研究对象建立有限元模型, 分析拉索弹性模量、主梁弹性模量、主梁体积重量、桥塔刚度等主要结构参数变化对结构响应的影响, 以成桥线形、拉索索力、主梁应力、索塔应力、桥塔偏位为控制目标进行结构参数敏感性分析。结果表明, 拉索弹性模量对成桥主梁线形、拉索索力影响较大, 为敏感性参数; 主梁线形、拉索索力、桥塔偏位对结构参数的变化较敏感; 中跨主梁线形比边跨主梁线形对参数变化更敏感; 主梁应力对拉索弹性模量减小较敏感; 桥塔应力对主梁体积重量减少较敏感。

**关键词:** 桥梁; 钢箱梁斜拉桥; 结构参数; 敏感性

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)04-0101-03

大跨度斜拉桥结构受力复杂, 属高次超静定结构, 由于计算分析模型中各设计参数如材料弹性模量、主梁刚度等与工程中参数实际值总是存在一定误差, 结构实际受力状态与理想设计状态总是存在偏差, 结构参数的敏感性分析是降低两者间偏差的重要途径。刘世明等考虑施工过程中各参数变化对无背索曲塔曲梁斜拉桥进行了参数敏感性分析; 李忠三等对大跨度混合梁斜拉桥进行了设计参数敏感性分析; Wang H. 等采用常规有限元计算方法对大跨度悬索桥设计参数进行了敏感性分析; 王生武等分析了桥梁结构自重、砼收缩徐变、整体温度等参数对异形独塔斜拉桥成桥状态的敏感性; 刘榕等对矮塔斜拉桥的结构参数进行了敏感性分析; 张治成通过寻找设计变量与结构响应之间的显示响应方程对斜拉桥结构进行了参数敏感性分析。该文以某大跨度钢箱梁斜拉桥为研究对象, 通过改变拉索弹性模量、主梁弹性模量、主梁体积重量、桥塔刚度等主要结构物理参数, 对主梁成桥线形、拉索索力、主梁应力、索塔应力、桥塔偏位等结构力学行为进行分析, 分析各设计参数的敏感性, 为同类桥梁设计、施工控制提供参考依据。

## 1 有限元计算模型

### 1.1 工程概况

某大跨径双塔双索面半漂浮体系钢箱梁斜拉桥, 跨径布置为  $(100+275+760+275+100)$  m, 全长 1 510 m, 其立面布置见图 1。主梁截面形式为 PK 断面钢箱梁(见图 2), 梁高 4.0 m, 宽 46 m。索

塔为钻石形, 高 233.7 m, 采用整体式承台配大直径群桩基础。采用极限强度为 1 860 MPa 的平行钢丝斜拉索, 全桥共布置  $4 \times 30 \times 2 = 240$  根斜拉索。

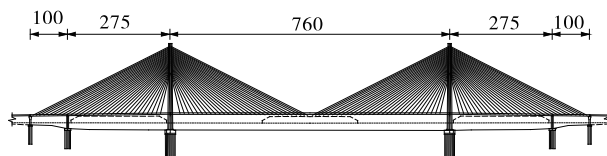


图 1 桥型立面布置(单位: m)

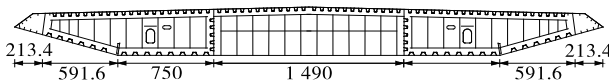


图 2 主梁标准断面(单位: cm)

### 1.2 结构计算模型

采用有限元程序 MIDAS/Civil 建立全桥有限元模型(见图 3), 全桥共离散为 2 105 个节点、1 538 个梁单元、240 个索单元(斜拉索)。主梁和桥塔采用空间梁单元模拟, 斜拉索采用桁架单元模拟, 主梁的边界条件均采用弹性链接模拟, 主梁与边墩之间施加竖向及横桥向弹性连接, 主梁与辅助墩之间施加竖向弹性连接, 桥塔处主梁通过弹性连接竖向支撑于桥塔下横梁上、横向支撑于塔柱上。



图 3 有限元计算模型

### 1.3 结构参数变化

主要考虑拉索弹性模量、主梁弹性模量、主梁体

积重量、桥塔刚度等4个主要结构物理参数变化对大跨度钢箱梁斜拉桥结构响应的影响,参数取值范围见表1。

表1 结构参数变化取值

结构参数	基准状态	变化量/%
拉索弹性模量	$3.45 \times 10^5$ MPa	$\pm 5$
主梁弹性模量	$2.06 \times 10^5$ MPa	$\pm 5$
主梁体积重量	按设计值	$\pm 5$
桥塔刚度	按设计值	$\pm 5$

## 2 结构参数敏感性分析

### 2.1 主梁线形

主梁线形是大跨径斜拉桥在施工阶段及成桥运营阶段的重要参数,了解不同设计参数对主梁位移的影响程度,对主梁线形控制及参数识别至关重要。拉索和主梁弹性模量、主梁体积重量及索塔刚度分别变化 $\pm 5\%$ 时成桥线形的变化见图4和表2。由表2和图4可知:拉索弹性模量的改变对主梁成桥线形影响较大,其中对中跨跨中挠度的影响最敏感,对边跨跨中挠度的影响不大,拉索弹性模量为

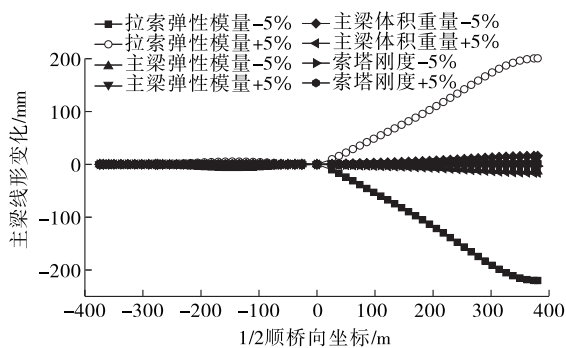


图4 结构参数变化引起的主梁成桥线形变化

表2 结构参数变化引起的主梁成桥线形变化极值

结构物理参数	改变量/%	线形变化/mm	
		极小值	极大值
拉索弹性模量	-5	-220.24	0.07
	+5	-0.07	200.75
主梁弹性模量	-5	-13.52	0.05
	+5	-0.05	12.20
主梁体积重量	-5	-0.01	16.09
	+5	-16.09	0.01
索塔刚度	-5	-3.38	0.00
	+5	-0.00	2.99

成桥线形的主要敏感参数;桥塔刚度变化对主梁成桥线形的影响很小,为主梁成桥线形的非敏感参数。

### 2.2 主梁应力

结构物理参数变化对主梁应力的影响见表3。由表3可知:拉索弹性模量减小5%时对主梁应力的影响较大,主梁最大压应力为77.70 MPa,最大拉应力为4.88 MPa,与设计基准状态下主梁应力相比,其安全储备下降;其他结构参数变化对主梁应力的影响不明显,为非敏感参数。

表3 结构参数变化引起的主梁应力极值

结构物理参数	改变量/%	主梁应力极大值/MPa		主梁应力极小值/MPa	
		上缘	下缘	上缘	下缘
拉索弹性模量	-5	-3.21	4.88	-59.20	-77.70
	+5	-1.53	2.40	-54.80	-71.10
主梁弹性模量	-5	-1.62	2.53	-54.40	-70.40
	+5	-1.62	2.53	-54.70	-70.10
主梁体积重量	-5	-1.60	2.51	-54.60	-69.90
	+5	-1.64	2.56	-54.50	-70.70
索塔刚度	-5	-1.62	2.53	-54.20	-70.80
	+5	-1.62	2.53	-54.50	-70.40
设计基准状态		-1.62	2.53	-54.60	-70.20

### 2.3 拉索索力

结构物理参数变化引起的成桥索力变化见图5和表4。由图5和表4可知:拉索弹性模量的改变对成桥索力影响较大,对最短拉索索力影响最敏感,对最长拉索索力影响较敏感,对一般拉索索力影响较小,拉索弹性模量为成桥索力的主要敏感参数;主梁弹性模量变化对成桥索力的影响很小,为成桥索力的非敏感参数。

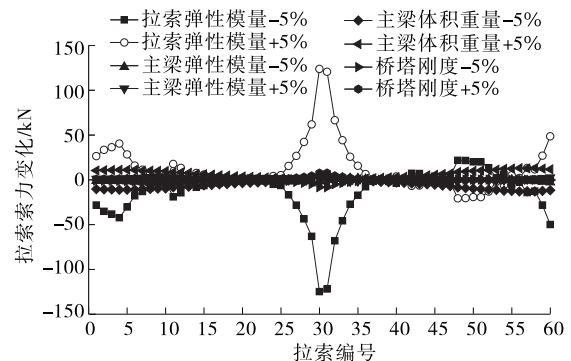


图5 结构参数变化引起的成桥索力变化

表 4 结构参数变化引起的成桥索力变化极值

结构物理参数	改变量/%	线形变化/mm	
		极小值	极大值
拉索弹性模量	-5	-128.88	21.75
	+5	-20.73	123.78
主梁弹性模量	-5	-4.13	2.08
	+5	-1.99	3.71
主梁体积重量	-5	-12.95	3.57
	+5	-3.57	13.02
索塔刚度	-5	-8.41	0.41
	+5	-0.35	7.62

2.4 桥塔纵向偏位

结构物理参数变化引起的桥塔纵向偏位变化见图 6。由图 6 可知:桥塔刚度对索塔顺桥向偏位影响最敏感。桥塔刚度减小 5%时,塔偏最大变化量为 56.77 mm;桥塔刚度增大 5%时,塔偏最大变化量为-51.69 mm。主梁体积重量减小 5%时,塔偏最大变化量为 7.87 mm;主梁体积重量增大 5%时,塔偏最大变化量为-7.14 mm。主梁弹性模量减小 5%时,塔偏最大变化量为-4.11 mm;主梁弹性模量增大 5%时,塔偏最大变化量为 4.11 mm。拉索弹性模量减小 5%时,塔偏最大变化量为 0.77 mm;拉索弹性模量增大 5%时,塔偏最大变化量为-0.66 mm。结构物理参数变化±5%时,桥塔偏位变化量相对于基准设计状态下桥塔偏位变化量基本相等,其中桥塔刚度变化对桥塔偏位的影响较大,为桥塔偏位的主要敏感参数;拉索弹性模量变化对桥塔偏位的影响较小,是可忽略的影响参数。

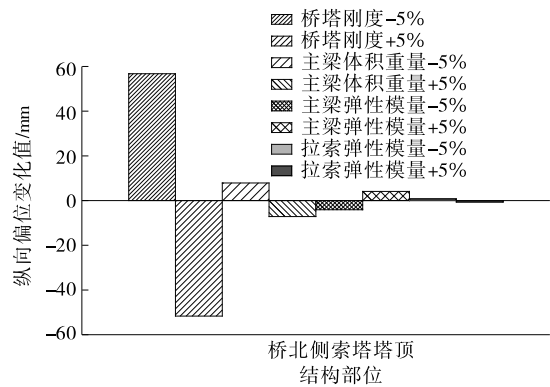


图 6 结构参数变化引起的桥塔纵向偏位变化

2.5 桥塔应力

结构物理参数变化对桥塔应力的影响见表 5。

由表 5 可知:桥塔主要承受压应力,设计基准状态下,索塔最大压应力为 9.040 MPa。拉索弹性模量减小 5%时,索塔应力最大变化量的绝对值为 0.04 MPa;拉索弹性模量增大 5%时,索塔应力最大变化量的绝对值为 0.05 MPa。主梁弹性模量减小 5%时,索塔应力最大变化量的绝对值为 0.01 MPa;主梁弹性模量增大 5%时,索塔应力最大变化量的绝对值为 0.01 MPa。主梁体积重量减小 5%时,索塔应力最大变化量的绝对值为 0.18 MPa;主梁体积重量增大 5%时,索塔应力最大变化量的绝对值为 0.17 MPa。索塔刚度减小 5%时,索塔应力最大变化量的绝对值为 0.01 MPa;索塔刚度增大 5%时,索塔应力最大变化量的绝对值为 0.02 MPa。主梁体积重量变化对桥塔应力的影响较大,为桥塔应力的主要敏感参数。

表 5 结构参数变化引起的桥塔应力极值

结构物理参数	改变量/%	桥塔应力 极大值/MPa		桥塔应力 极小值/MPa	
		上缘	下缘	上缘	下缘
拉索弹性模量	-5	-0.091	-0.091	-4.690	-9.040
	+5	-0.091	-0.091	-4.780	-9.040
主梁弹性模量	-5	-0.091	-0.091	-4.730	-9.030
	+5	-0.091	-0.091	-4.740	-9.040
主梁体积重量	-5	-0.086	-0.086	-4.910	-9.050
	+5	-0.095	-0.095	-4.560	-9.030
索塔刚度	-5	-0.091	-0.091	-4.720	-9.030
	+5	-0.091	-0.091	-4.750	-9.050
设计基准状态		-0.091	-0.091	-4.730	-9.040

3 结论

(1) 拉索弹性模量对成桥主梁线形、拉索索力的影响较大,为敏感性参数;对桥塔偏位的影响较小,是可忽略的影响参数。桥塔刚度对桥塔纵向偏位的影响很大,为敏感参数。

(2) 主梁线形、拉索索力、桥塔偏位对结构参数变化较敏感,主梁应力和桥塔应力对结构参数变化的敏感性小,施工中应加强对索力及线形的控制。

(3) 主梁线形对结构参数变化的敏感性依次为拉索弹性模量、主梁体积重量、桥塔刚度、主梁弹性

(下转第 107 页)

格畸变、应力集中、计算不收敛等问题,严重时甚至导致模型出错无法运行计算,建模分析时应予以重视。在实体模型与杆系模型计算结果对比时,应有取舍,选取能反映其荷载横向分布的特征点结果进行对比。

(3) 横向虚梁的截面特性是梁格法建模能否高精度仿真的关键。采用正方形截面或圆形截面,当横向虚梁抗弯刚度取其相邻纵梁刚度之和的中值时,计算结果最接近实体模型,精度较高。

(4) 横向弯矩的传递对箱梁有重要影响,若减少其横向弯矩传递系数,则计算精度降低,无法真实反映多个纵梁的共同受力特性;按刚接处理,抗弯刚度按上述方式取值可达到较理想的计算精度。

(5) 考虑到实际工程的复杂性及实体模型构建难度,建议以顶板作为关键部位控制分析时按梁格、实体进行建模计算,以底板作为关键部位控制分析时按梁格进行建模计算。三类模型的精度和建模难度及计算耗时从高到低依次为实体模型、梁格模型、单梁模型。

#### 参考文献:

- [1] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [2] CJJ 11—2011,城市桥梁设计规范[S].
- [3] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2001.

- [4] 王富万,杨文兵.梁格法在桥梁上部结构分析中的应用[J].华中科技大学学报:城市科学版,2006,23(增刊).
- [5] 戴公连,李建桥.桥梁结构空间分析设计方法与应用[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [6] 葛俊颖,丁啸宇.梁格法分析铰接板梁桥横向虚拟横梁刚度的取值研究[J].公路,2010(4).
- [7] 黎力韬,朱思蓉.常规桥梁平面梁格法模型横向刚度的精确调整方法[J].西部交通科技,2015(5).
- [8] 王扶义,负森,梁朝伟,等.刚性横梁法计算荷载横向分布系数的简化方法[J].山西建筑,2018,44(1).
- [9] 郭小权,庞浩然,张超.连续小箱梁桥虚拟横梁刚度模拟研究[J].公路交通技术,2018(1).
- [10] 袁义坤.大宽跨比湿接简支T梁桥荷载横向分布系数试验研究[J].天津建设科技,2017,27(1).
- [11] 李贵峰.扁平超宽连续箱梁桥空间受力性能分析与研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(4).
- [12] 张玥,李志成,孟贞,等.连续T形梁桥梁格法分析及梁格模型修正研究[J].中外公路,2017,37(5).
- [13] 季冬良.梁格法在城市桥梁设计中的应用分析[J].山西建筑,2018,44(15).
- [14] 邵祥林.梁格法建模在宽箱梁桥静载试验中的应用[J].城市道桥与防洪,2017(8).

收稿日期:2018—08—05

(上接第103页)

模量,主梁弹性模量对成桥状态线形的影响很小,为非敏感参数;中跨线形变化远大于边跨线形变化。

(4) 主梁应力对拉索弹性模量减小较敏感,而其他结构参数对主梁应力的影响较小,可忽略。设计中应考虑拉索弹性模量对主梁应力状态的影响。

(5) 桥塔应力对主梁体积重量减少较敏感,而其他结构参数对桥塔应力的影响较小,可忽略。

#### 参考文献:

- [1] 刘世明,刘永健.无背索曲塔曲梁斜拉桥参数敏感性分析[J].公路交通科技,2014,31(2).
- [2] 李忠三,雷俊卿,颜东煌.大跨度混合梁斜拉桥参数敏感性分析[J].北京交通大学学报,2012,36(1).
- [3] Wang H, Tao T, Zhou R, et al. Parameter sensitivity study on flutter stability of a long-span triple-tower suspension bridge[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2014, 128(5).

- [4] 王生武,项纯夫,李腾腾,等.异形独塔斜拉桥参数敏感性分析[J].公路工程,2015,40(1).
- [5] 刘榕,伍英,丁延书,等.多塔矮塔斜拉桥结构参数敏感性分析[J].铁道科学与工程学报,2018,15(5).
- [6] Zhong San, Li Jun, Qing Lei, et al. Analysis of parameters' sensitiveness of long-span hybrid girder cable-stayed bridge[J]. Key Engineering Materials, 2012, 517(1).
- [7] Liu Jian, Wang Da. Static parameter sensitivity analysis of long-span cable-stayed bridge based on RSM[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 10(1).
- [8] 张治成.大跨度钢管混凝土拱桥施工控制研究[D].杭州:浙江大学,2006.
- [9] 魏春明,陈淮,王艳.矮塔斜拉桥参数敏感性分析[J].郑州大学学报:理学版,2007,39(3).
- [10] 刘剑,王达.基于响应面法的大跨径斜拉桥静力参数敏感性分析[J].公路交通科技,2015,32(8).

收稿日期:2018—07—30