

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.01.021

# 结构参数变化对大跨度斜拉桥动力特性的影响分析

李云逸

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 以武汉西四环汉江特大桥为研究对象, 利用 ANSYS 有限元软件建立斜拉桥空间动力学分析模型, 分析二期恒载变化、拉索损伤和拉索断裂等结构因素变化对大跨度斜拉桥动力特性的影响。结果表明, 二期恒载的变化和少数拉索的断裂对大跨度斜拉桥动力特性的影响很小, 但拉索损伤会导致大跨度斜拉桥振动频率发生较显著变化, 其中拉索有效面积的变化对斜拉桥动力特性的影响最显著。

**关键词:** 桥梁; 大跨度斜拉桥; 动力特性; 斜拉索; 结构参数

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)01-0111-05

结构动力特性是结构本身的固有特性, 它取决于结构刚度、质量、质量分布及支撑条件等<sup>[1]</sup>。斜拉桥的抗风性能、抗震性能及结构体系问题都与动力特性密切相关, 因此对斜拉桥进行动力特性分析十分必要。针对大跨度斜拉桥动力特性的影响因素分析, Ni Y. Q. 等采用 SVM 技术将温度效应对汀九斜拉桥振动频率的影响进行了量化<sup>[2]</sup>; 张志恒等以某大跨度双塔双索面斜拉桥为例, 在对拉索弹性模量进行修正的前提下, 分析了主梁刚度、主塔刚度及斜拉索截面积变化对斜拉桥动力特性的影响<sup>[3]</sup>; 吴兴邦等分析了加劲梁弹性模量、横向抗风支座及边跨辅助墩等参数对三塔斜拉桥动力特性的影响<sup>[4]</sup>; 赵瀚玮等基于黄冈公铁两用斜拉桥结构振动加速度与结构温度的长期监测数据, 研究了温度对桥梁竖向动力特性的影响<sup>[5]</sup>; 杨志魁研究了自质量、刚度、有无纵向水平索、索力大小对西安富裕路沔河钢拱塔斜拉桥动力特性的影响<sup>[6]</sup>。上述文献主要对宽度较小的斜拉桥动力特性影响因素进行分析, 对大跨度宽幅斜拉桥的研究较少。本文以武汉西四环汉江特大桥为研究对象, 采用 ANSYS 有限元软件建立斜拉桥有限元模型, 分析二期恒载、拉索损伤和拉索断

裂等结构因素对大跨度斜拉桥动力特性的影响。

## 1 工程概况

武汉西四环汉江特大桥主桥为宽幅双塔双索面半漂浮体系混凝土斜拉桥, 长度 714 m, 主跨分布为 77 m + 100 m + 360 m + 100 m + 77 m, 桥面宽度 44 m。主梁为双边箱 II 形梁, 主塔为 H 形, 每个索面有 28 对斜拉索。主要构件的材料参数见表 1、表 2, 拉索编号规则见图 1。

表 1 斜拉桥主要构件的材料参数

构件	材料类型	弹性模量/ Pa	泊松比	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
主梁/横梁	C55	$3.55 \times 10^{10}$	0.20	$2.7 \times 10^3$
主塔	C50	$3.45 \times 10^{10}$	0.20	$2.7 \times 10^3$
桥墩	C40	$3.25 \times 10^{10}$	0.20	$2.7 \times 10^3$
刚臂	—	$3.55 \times 10^{20}$	0.20	0

## 2 斜拉桥有限元分析模型

为确保桥梁模型动力分析的准确性, 在建立有限元模型时, 结构质量、刚度及边界条件的设置应与

表 2 拉索的材料参数

拉索编号	拉索数量/根	拉索面积/ $\text{m}^2$	弹性模量/Pa	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
A'2~A'6, J'2~J'5	43	0.005 977	$1.95 \times 10^{11}$	9 879.538
A'7~A'15, J'6~J'12	55	0.007 645	$1.95 \times 10^{11}$	9 670.373
A'16~A'19, J'13~J'15	61	0.008 479	$1.95 \times 10^{11}$	9 721.665
A'1, A'20~A'28, J'1, J'16~J'28	73	0.010 147	$1.95 \times 10^{11}$	9 734.897

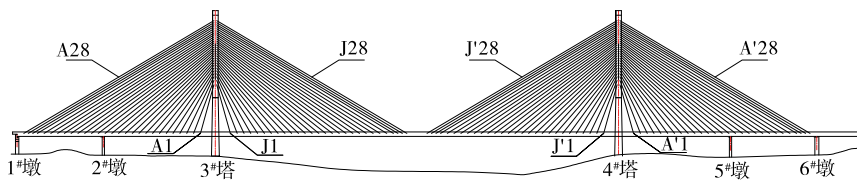


图 1 汉江特大桥梁索编号示意图

工程实际相符<sup>[7]</sup>。采用 ANSYS 有限元软件建立汉江特大桥梁式空间杆系模型,主梁、刚臂(塔柱和塔柱间横梁)和桥墩、桥塔均采用 Beam 188 单元模拟,拉索采用 Link 10 单元模拟,对主塔进行变截面处理。全桥共划分为 1 105 个单元。全桥有限元模型见图 2。

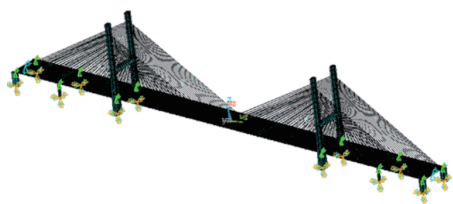


图 2 汉江特大桥梁有限元模型

该桥为半漂浮体系,主梁、主塔固结,桥墩、桥塔底部固结,主梁、桥墩施加横向和竖向约束,对主梁、主塔处作耦合处理。

### 3 结构动力特性分析

汉江特大桥梁前 20 阶振动频率、振型见表 3。根据表 3,汉江特大桥梁的基频为 0.395 75 Hz,不属于长周期(不超过 5 s),对应振型为主梁和主缆的一阶对称竖弯;各阶频率差值较小,频率出现集聚现象,与大跨度半漂浮体系斜拉桥动力特性的一般规律相符;主塔第 3~6 阶模态出现横弯,高耸空心塔柱的抗弯刚度较弱。

表 3 汉江特大桥梁前 20 阶自振频率和振型描述

阶次	频率/Hz	振型描述	阶次	频率/Hz	振型描述
1	0.395 75	中间主梁对称竖弯	11	1.124 42	主塔反对称同向竖弯
2	0.577 40	主梁反对称竖弯,主塔同向竖弯	12	1.224 68	主塔对称同向竖弯
3	0.626 14	主塔同向横弯	13	1.241 61	主塔对称异向竖弯
4	0.626 16	主塔反对称同向横弯	14	1.316 42	主梁对称竖弯,主塔对称异向竖弯
5	0.710 93	主塔反对称异向横弯	15	1.431 22	主梁扭转,主塔反对称异向竖弯
6	0.710 93	主塔异向横弯	16	1.514 47	主梁反对称竖弯
7	0.824 14	中间主梁扭转,主塔异向竖弯	17	1.602 19	主梁反对称竖弯,主塔对称竖弯
8	0.940 19	中间主梁对称竖弯	18	1.608 39	主梁对称竖弯,主塔对称异向竖弯
9	0.976 38	中间主梁对称横弯	19	1.708 64	主塔反对称同向竖弯
10	1.000 00	主梁反对称竖弯	20	1.981 14	边跨主梁反对称竖弯

### 4 结构参数变化对动力特性的影响

斜拉桥自振频率会受到斜拉桥结构质量和刚度的影响<sup>[1]</sup>,桥面更换、斜拉桥二期恒载会因此产生变化。相关研究表明,二期恒载尽管在恒载质量中占比不大,但不可忽略,会改变大跨度斜拉桥的自振频率<sup>[8]</sup>;拉索损伤对桥梁动力性能存在影响<sup>[9-10]</sup>,拉索受到损伤后其有效面积减小,弹性模量折减,拉索损伤程度越大,对动力特性的影响越大<sup>[11]</sup>;拉索断裂后斜拉桥结构内力重分布,会增大结构倒塌的风险,正确评估拉索断裂情况下斜拉桥的动力性能是斜拉

桥抗倒塌研究的重要内容<sup>[12]</sup>。结合汉江特大桥梁的实际情况,对不同二期恒载、拉索弹性模量及拉索断裂时该桥的动力特性进行计算,分析结构参数变化对该桥动力特性的影响。

#### 4.1 二期恒载变化对动力特性的影响

根据该桥可能维修的情况,将二期恒载分别降低和提高 10%、20%进行动力特性计算,分析二期恒载变化对该桥动力特性的影响。不同二期恒载下该桥前 10 阶振动频率见表 4。

由表 4 可知:正负 20%以内二期恒载变化对该桥动力特性的影响较小,各阶振动频率变化率均小

表 4 不同二期恒载下斜拉桥的振动频率

阶次	振动频率/Hz					阶次	振动频率/Hz				
	0.8 倍二期恒载	0.9 倍二期恒载	1.0 倍二期恒载	1.1 倍二期恒载	1.2 倍二期恒载		0.8 倍二期恒载	0.9 倍二期恒载	1.0 倍二期恒载	1.1 倍二期恒载	1.2 倍二期恒载
1	0.395 93	0.395 84	0.395 75	0.395 66	0.395 57	6	0.710 93	0.710 93	0.710 93	0.710 93	0.710 93
2	0.577 61	0.577 50	0.577 40	0.577 29	0.577 19	7	0.824 16	0.824 15	0.824 14	0.824 13	0.824 12
3	0.626 14	0.626 14	0.626 14	0.626 14	0.626 14	8	0.940 56	0.940 38	0.940 19	0.940 00	0.939 82
4	0.626 16	0.626 16	0.626 16	0.626 16	0.626 16	9	0.976 61	0.976 50	0.976 38	0.976 26	0.976 15
5	0.710 93	0.710 93	0.710 93	0.710 93	0.710 93	10	1.000 50	1.000 20	1.000 00	0.999 78	0.999 56

于 0.1%;增大二期恒载,自振频率降低;减小二期恒载,自振频率增大。

4.2 拉索损伤对动力特性的影响

随着桥梁服役时间的增长,拉索会出现损伤。拉索损伤主要包含拉索承载面积减小和材料性能劣化引起拉索弹性模量改变两方面<sup>[13-14]</sup>。拉索弹

性模量变化是拉索刚度改变的可能因素之一。拉索未损伤时的弹性模量为  $1.95 \times 10^{11}$  Pa,考虑拉索性能劣化导致弹性模量分别减小 5%和 10%、拉索锈蚀等导致拉索有效截面积分别减小 5%和 10% 4 种工况,分析拉索损伤对该桥动力特性的影响。各工况下该桥前 20 阶振动频率见表 5。

表 5 拉索损伤对斜拉桥动力特性的影响

阶次	不同拉索损伤程度下该桥的振动频率/Hz					阶次	不同拉索损伤程度下该桥的振动频率/Hz				
	未损伤	弹性模量减小 5%	截面积减小 5%	弹性模量减小 10%	截面积减小 10%		未损伤	弹性模量减小 5%	截面积减小 5%	弹性模量减小 10%	截面积减小 10%
1	0.395 75	0.388 19	0.388 35	0.380 40	0.380 72	11	1.124 40	1.106 31	1.107 06	1.087 43	1.088 92
2	0.577 40	0.570 17	0.570 37	0.562 68	0.563 09	12	1.224 70	1.209 10	1.209 69	1.190 69	1.191 98
3	0.626 14	0.626 14	0.626 59	0.626 14	0.627 05	13	1.241 60	1.218 77	1.219 47	1.197 44	1.198 65
4	0.626 16	0.626 16	0.626 62	0.626 16	0.627 07	14	1.316 40	1.308 76	1.309 03	1.301 18	1.301 70
5	0.710 93	0.710 93	0.711 43	0.710 93	0.711 93	15	1.431 20	1.406 40	1.407 37	1.380 61	1.382 55
6	0.710 93	0.710 93	0.711 43	0.710 93	0.711 93	16	1.510 45	1.504 33	1.504 69	1.494 04	1.494 77
7	0.824 14	0.815 61	0.816 26	0.806 77	0.808 06	17	1.602 20	1.589 66	1.590 05	1.576 95	1.577 71
8	0.940 19	0.933 92	0.934 18	0.927 21	0.927 74	18	1.608 40	1.596 66	1.597 08	1.584 90	1.585 72
9	0.976 38	0.970 21	0.970 51	0.963 36	0.963 97	19	1.708 60	1.699 65	1.700 48	1.690 09	1.691 77
10	1.000 00	0.998 98	0.999 36	0.997 97	0.998 71	20	1.981 10	1.975 48	1.976 01	1.969 72	1.970 79

由表 5 可知:随着拉索损伤程度的增大,该桥振动频率减小,且振动频率变化率增大,对桥梁动力特性的影响增大。拉索损伤对该桥第 3~6 阶及第 10 阶振动频率几乎没有影响;对第 7~9 阶、第 14 阶及第 17~20 阶振动频率有影响,但改变率小于 2.00%;对第 1~2 阶、第 11~13 阶及第 15~16 阶振动频率的影响较显著,最大改变率约为 3.95%。另外,拉索承载截面积变化对该桥动力特性的影响略大于弹性模量变化的影响。

4.3 拉索断裂对动力特性的影响

斜拉桥按超静定结构设计,通常可以经受某根拉索的断裂,但各索力的重新分配会加速拉索的疲劳损伤甚至导致拉索发生断裂。在该桥上游端选取  $9 \times 4 = 36$  根拉索模拟拉索断裂。根据相关研究成果,长索断裂对斜拉桥动力特性的影响较明显。因此,在长索区设置更多的拉索断裂工况,每跨均匀选取 9 种拉索断裂工况进行研究。不同拉索断裂工况下该桥的动力特性变化见图 3~6。

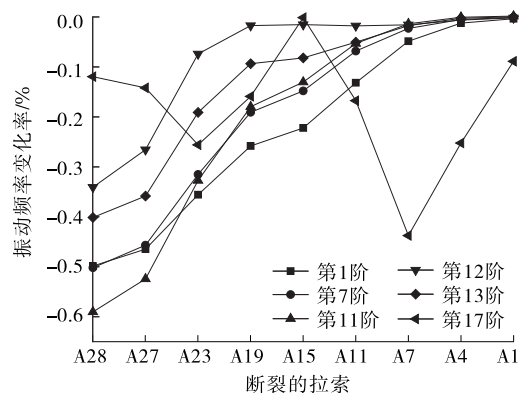
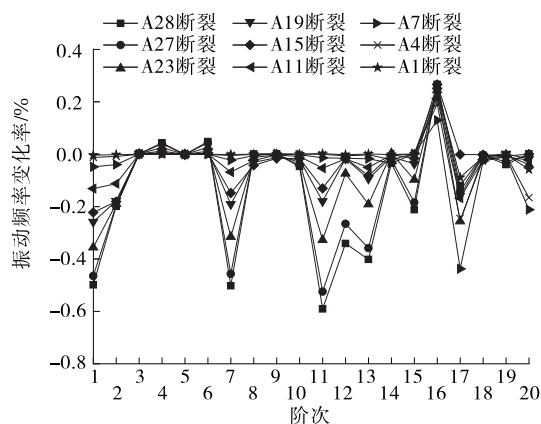


图3 3#塔边跨单根拉索断裂工况下斜拉桥的振动频率变化

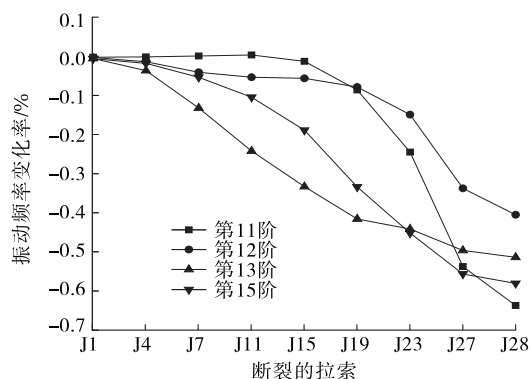
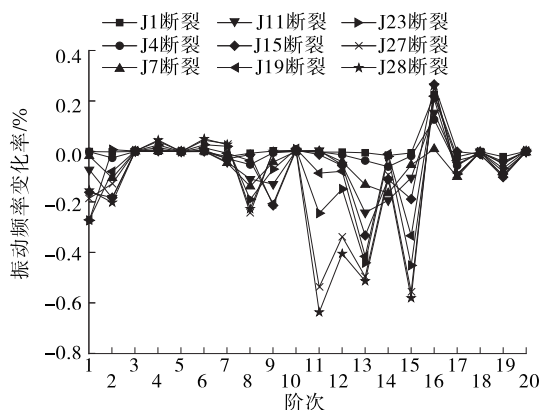


图4 3#塔中跨单根拉索断裂工况下斜拉桥的振动频率变化

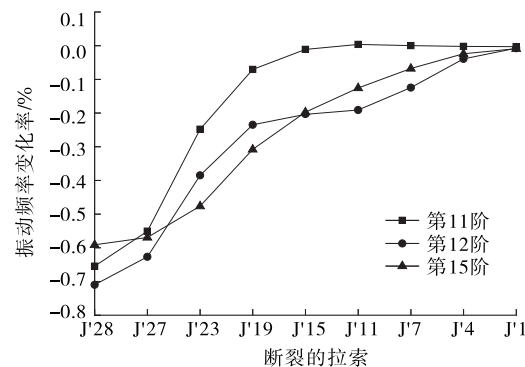
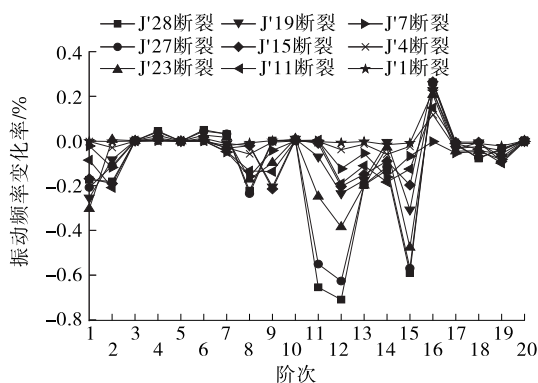


图5 4#塔边跨单根拉索断裂工况下斜拉桥的振动频率变化

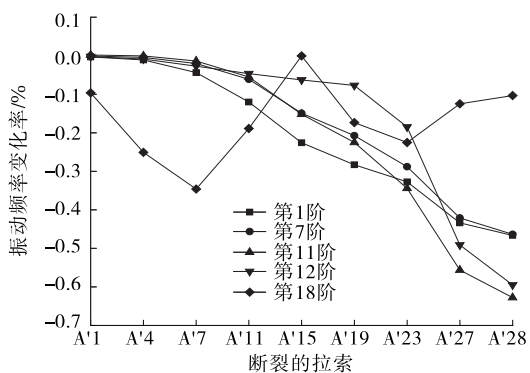
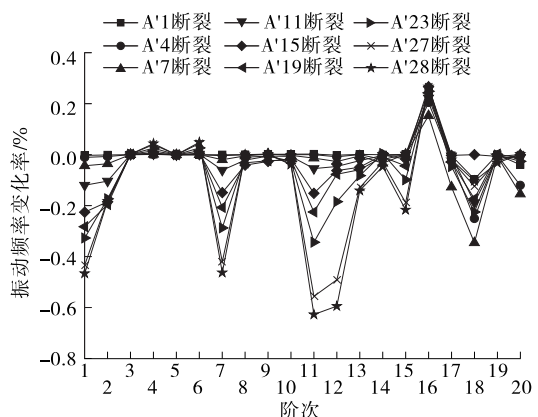


图6 4#塔中跨单根拉索断裂工况下斜拉桥的振动频率变化

由图 3~6 可知:边跨发生拉索断裂,该桥第 1 阶、第 7 阶、第 11~12 阶振动频率变化较明显,变化率大于 0.3%;中跨发生拉索断裂,第 11~12 阶、第 15 阶振动频率变化较明显,变化率大于 0.3%;拉索断裂对第 3~6 阶、第 10 阶、第 19 阶振动频率几乎没有影响。整体来说,拉索断裂后该桥的振动频率减小。长索端发生拉索断裂,桥梁动力特性变化尤其明显,相邻拉索发生断裂,振动频率变化率相差较大;短索端拉索断裂,桥梁动力特性几乎不发生变化。

## 5 结论

(1) 二期恒载变化对斜拉桥动力特性的影响很小,第 3~6 阶振动频率几乎不受二期恒载变化的影响。二期恒载变化对斜拉桥动力特性的影响可不予考虑。

(2) 拉索损伤对斜拉桥动力特性的影响较大,最大振动频率变化率为 3.95%;拉索损伤程度越大,振动频率越小;振动频率变化率越大,对动力特性的影响越大;拉索有效截面积的改变对振动频率的影响最突出。

(3) 单根拉索断裂对斜拉桥动力特性的影响较小,其中长索断裂时动力特性变化较明显,短索断裂时动力特性变化很小。拉索断裂主要考虑长索发生断裂的情况,以中跨长索发生断裂对动力特性的影响最明显。

## 参考文献:

[1] 范立础.桥梁抗震[M].上海:同济大学出版社,1997.

(上接第 110 页)

- [17] Texas Department of Transportation. Highway design manual[S]. Texas Department of Transportation, 2010.
- [18] 裴玉龙,金英群,王宇.考虑主线车道数与匝道车速的快速路出入口最小间距计算方法[J].交通信息与安全,2019,37(4):59-66.

- [2] NI Y Q, HUA X G, FAN K Q, et al. Correlating modal properties with temperature using long-term monitoring data and support vector machine technique[J]. Engineering Structures, 2005, 27(12): 1762-1773.
- [3] 张志恒,李明.基于拉索等效弹模修正的大跨度斜拉桥动力特性及参数分析[J].山西交通科技,2013(2): 40-42.
- [4] 吴兴邦,吕云.三塔斜拉桥动力特性影响参数分析[J].公路工程,2015,40(6):125-128+155.
- [5] 赵瀚玮,丁幼亮,李爱群,等.公铁两用斜拉桥竖向动力特性长期监测分析[J].铁道建筑,2016(11):26-30.
- [6] 杨志魁.钢拱塔斜拉桥动力特性影响参数分析[J].黑龙江交通科技,2022,45(1):64-67+71.
- [7] 彭霞,王洪云,尚念恒.斜拉桥悬臂施工阶段自振频率简化计算方法[J].特种结构,2021,38(1):53-58.
- [8] 郭文华.二期恒载对大跨度斜拉桥车桥耦合振动的影响[J].中南大学学报,2011,42(8):2423-2429.
- [9] 杨相展,易壮鹏,陈洪伟.辅助索对无背索斜拉桥动力学特性的影响[J].公路工程,2021,46(3):244-249.
- [10] 陈侃,毛耀增.拉索对斜拉桥自振特性的影响[J].江苏建筑,2017(6):31-34.
- [11] 张益翔.斜拉桥拉索损伤对桥梁结构性能的影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2015.
- [12] 张羽,方志,卢江波,等.大跨混凝土斜拉桥施工过程中结构的断索动力响应[J].振动与冲击,2021,40(5): 237-246.
- [13] 肖勇刚,熊蓉.索的损伤对斜拉桥动力特性的影响分析[J].公路与汽运,2011(2):146-149.
- [14] 过黄喜.钢-混凝土混合梁三塔斜拉桥结构参数敏感性分析[J].公路与汽运,2022(4):86-88+138.

收稿日期:2022-04-25

- [19] 徐艳,陈景雅,罗冬宇.基于密度指标的最小交织段长度研究[J].交通运输系统工程与信息,2018,18(增刊 1):53-58.
- [20] Highways England. Design manual for roads and bridges[S]. Highways England, 2006.

收稿日期:2022-09-16