

文章编号: 1674-599X(2022)02-0040-05

索损伤对非对称独塔斜拉桥动力特性的影响

肖勇刚, 雷壹

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为研究不同拉索损伤情况对非对称独塔斜拉桥动力特性的影响, 以某预应力混凝土独塔斜拉桥为工程背景, 建立该桥的有限元分析模型, 通过减少拉索弹性模量, 设置ANSYS生死单元命令, 分别模拟全桥拉索均匀损伤和局部拉索断裂损伤, 并对损伤后的桥梁进行动力特性分析。研究结果表明: 桥梁自振频率变化率与拉索均匀损伤程度有明显的线性关系; 主跨区拉索损伤对桥梁自振频率的影响普遍大于边跨区拉索损伤的; 长索损伤对一阶塔横弯频率影响最大, 中长索损伤对一阶梁竖弯频率影响也较大。

关键词: 非对称独塔斜拉桥; 拉索损伤; 有限元模型; 动力特性

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

Influence of cable damage on dynamic characteristic of asymmetric single tower cable stayed bridge

XIAO Yonggang, LEI Yi

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to explore the influence of cable damage on the dynamic characteristic of asymmetric single tower cable-stayed bridge, a prestressed concrete single tower cable-stayed bridge is taken as the engineering background, and the finite element analysis model is established. By reducing the elastic modulus of the cable, ANSYS life and death element command, the uniform damage and local cable fracture damage of the whole bridge are simulated respectively, and the dynamic characteristic of the damaged bridge are analyzed. The results show that there is an obvious linear relationship between the change rate of bridge natural frequency and the uniform damage degree of cables. The influence of cable damage in main span area on bridge natural frequency is generally greater than that in side span area. Long cable damage has maximum influence on the transverse bending frequency of first-order tower, and medium long cable damage has great influence on the vertical bending frequency of first-order beam.

Key words: asymmetric single tower cable stayed bridge; cable damage; finite element model; dynamic characteristics

斜拉桥是现代大跨径桥梁的主要桥型之一。斜拉索作为斜拉桥的生命线, 是其最关键的受力承重构件之一, 也是斜拉桥结构中最容易发生损伤的构件, 在运营阶段, 容易受各种环境因素或意外而损坏^[1-3], 危及桥梁的服役安全, 因此, 探究拉索损伤对桥梁整体结构可靠性的影响十分重要。国内外学者对拉索及其损伤对斜拉桥力学特

性的影响进行了大量研究。ZHANG等人^[4]以赤石特大斜拉桥施工过程中火灾事故为研究实例, 通过现场检查和有限元分析, 得到该桥梁在同一索面9根拉索连续断裂的极端情况下桥梁结构静力性能及桥梁修复建议。LIU等人^[5]研究了斜拉桥拉索在腐蚀、微动和疲劳耦合作用下的行为, 研制一套腐蚀微动疲劳测试系统, 进行了比较测试, 进

收稿日期: 2021-01-28

作者简介: 肖勇刚(1964—), 男, 长沙理工大学教授, 博士。

一步研究了拉索损伤过程、断裂机理、摩擦系数和寿命。HOU等人^[6]使用某斜拉桥一年的索力、温度、风荷载和车辆荷载等监测数据, 得出了拉索可靠性指标。YANG等人^[7]对阿根廷Guazu桥在没有事先预兆的情况下一根拉索突然断裂的事件进行了调查, 并做了相关测试。张建等人^[8]通过有限元模型, 分析断索对斜拉桥加劲梁内力和位移的影响, 发现跨中处加劲梁对拉索断裂较为敏感。谢名滇等人^[9]分析了腐蚀环境下拉索的可靠度与换索时机, 在已有的腐蚀斜拉索分布模型基础上建立了有限元模型, 得到了腐蚀程度对拉索承载力的影响。目前, 针对非对称斜拉桥的动力特性研究较少见。非对称独塔斜拉桥相对于对称斜拉桥的内力更为复杂^[10-11], 拉索不同损伤情况对其结构动力特性影响还有待研究。因此, 本研究以某非对称独塔斜拉桥为工程背景, 拟采用ANSYS有限元分析软件建立模型, 通过斜拉索的弹性模量损失模拟桥梁拉索腐蚀和疲劳老化, 使用ANSYS生死单元命令流杀死拉索单元, 模拟拉索断裂失效等索构件不同损伤情况对非对称独塔斜拉桥动力特性的影响。该研究成果以期对斜拉桥健康状态评估和监测提供借鉴。

1 工程概况

该桥为预应力混凝土独塔斜拉桥如图1所示。采用双索面半漂浮体系桥型, 主桥全长427 m, 跨径布置为252 m+175 m。主梁如图2所示, 主梁顶宽30 m, 横隔板间隔距离6 m, 主梁与横隔板均采用C60混凝土, 边跨端部主梁采用箱型主梁。主塔采用H形C50混凝土索塔, 塔高154.11 m, 设置有纵、横向水平限位装置。全桥共有82对斜拉索, 彩板扇形布置方式, 拉索序号由内而外递增, 主跨区拉索编号为J0~J40, 边跨区拉索编号为A0~A40。

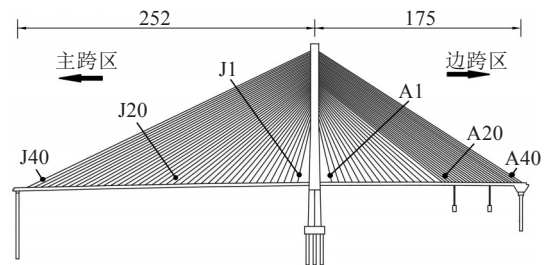


图1 主桥总体布置图 (单位: m)

Fig. 1 Layout of main bridge (unit:m)

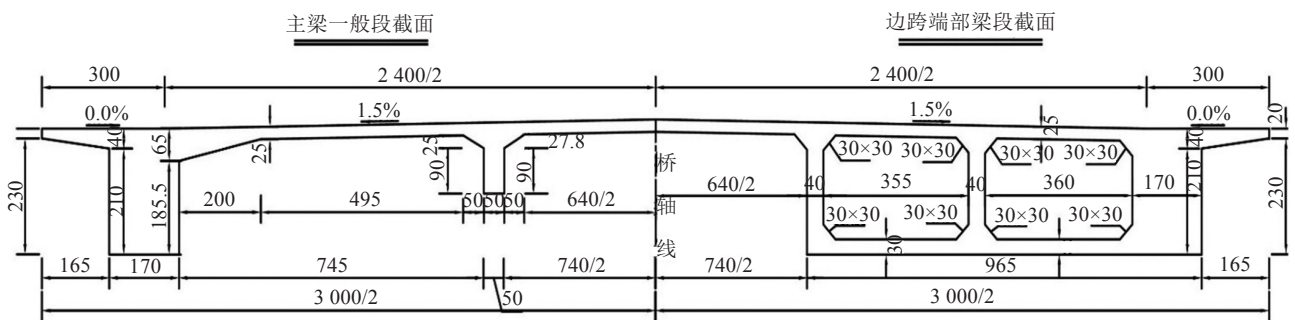


图2 主梁结构示意图 (单位: cm)

Fig. 2 Schematic diagram of main girder structure (unit:cm)

2 桥梁有限元模型的建立

结构自振频率与振型等对桥梁监测、评估具有重要意义。采用ANSYS有限元软件建立全桥有限元模型, 分析桥梁结构的动力特性, 结果如图3所示。主梁、主塔和桥墩都采用BEAM188单元, 斜拉索采用LINK10单元, 考虑非线性拉索对动力特性的影响, 用Ernst公式对拉索原始弹性模量进行换算, 将质量点MASS21加在主梁节点上, 全桥建立617个单元, 376个节点。

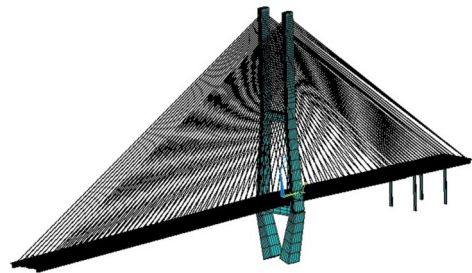


图3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

在结构分析中, 前若干阶的自振频率与振型具有关键作用, 通过ANSYS有限元软件提取非对

称独塔斜拉桥的前 10 阶主振型，如图 4 所示，并记录前 10 阶自振频率与阵型，具体结果见表 1。

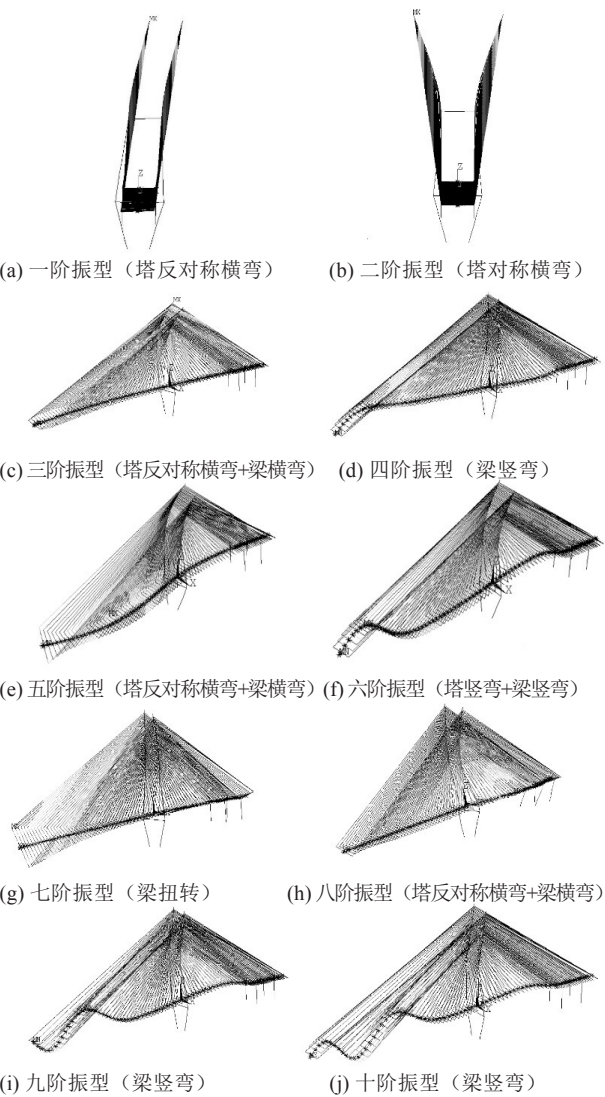


图4 前 10 阶振型

Fig. 4 First ten mode shapes

表1 桥梁前十阶自振频率与振型描述

Table 1 Description of the first ten natural frequencies and modes of bridge

阶数	频率/Hz	振型描述	阶数	频率/Hz	振型描述
1	0.330 51	塔反对称横弯	6	1.205 27	塔竖弯+梁竖弯
2	0.400 98	塔对称横弯	7	1.279 26	梁扭转
3	0.829 70	塔反对称横弯+梁横弯	8	1.636 28	塔反对称横弯+梁横弯
4	0.877 34	梁竖弯	9	1.658 42	梁竖弯
5	1.005 78	塔反对称横弯+梁横弯	10	1.954 87	梁竖弯

由图 4、表 1 可知，该桥梁的主要振型是塔横弯、梁竖弯，梁扭转振型出现的频率很小，表明非对称独塔斜拉桥有着较好的抗扭转能力。

3 拉索损伤对斜拉桥动力特性影响

3.1 全桥拉索均匀损伤的动力特性分析

在未发生火烧、车辆撞击等意外情况下，长期运营斜拉桥的拉索损伤多因腐蚀、疲劳老化等原因导致，全桥拉索的损伤大致均匀。为探究全桥拉索不同程度的均匀损伤对桥梁动力特性的影响，将全桥拉索弹性模量按比例分别减去 10%、20%、30%、40% 和 50% 模拟全桥拉索均匀损伤的动力特性分析。在动力特性分析过程中，前 10 阶的振型都没有发生变化。

记录拉索损伤后前 10 阶自振频率，统计拉索损伤后自振频率变化率，自振频率变化率=（损伤后自振频率-原始自振频率）/原始自振频率，结果见表 2。全桥拉索均匀损伤后自振频率变化率和如图 5 所示。

表2 全桥拉索均匀损伤后自振频率与频率变化率表

Table 2 Natural frequency and frequency change rate of bridge after uniform damage of whole cables

阶数	损伤后的频率/Hz					损伤后的频率变化率/%				
	损伤 10%	损伤 20%	损伤 30%	损伤 40%	损伤 50%	损伤 10%	损伤 20%	损伤 30%	损伤 40%	损伤 50%
1	0.330 51	0.330 51	0.330 50	0.330 50	0.330 49	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01
2	0.400 98	0.400 98	0.400 98	0.400 98	0.400 97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.829 45	0.812 57	0.773 78	0.732 42	0.683 97	-0.03	-2.06	-6.74	-11.72	-17.56
4	0.845 74	0.829 15	0.828 73	0.828 18	0.827 30	-3.60	-5.49	-5.54	-5.60	-5.70
5	1.004 41	1.002 66	1.000 21	0.996 44	0.988 04	-0.14	-0.31	-0.55	-0.93	-1.76
6	1.176 20	1.145 55	1.109 26	1.069 69	1.021 57	-2.41	-4.95	-7.97	-11.25	-15.24
7	1.245 42	1.208 53	1.164 67	1.117 05	1.062 98	-2.65	-5.53	-8.96	-12.68	-16.91
8	1.607 28	1.554 40	1.493 97	1.430 78	1.358 09	-1.77	-5.00	-8.70	-12.56	-17.00
9	1.634 64	1.633 03	1.631 29	1.629 50	1.607 36	-1.43	-1.53	-1.64	-1.74	-3.08
10	1.895 89	1.835 49	1.765 95	1.692 74	1.627 44	-3.02	-6.11	-9.66	-13.41	-16.75

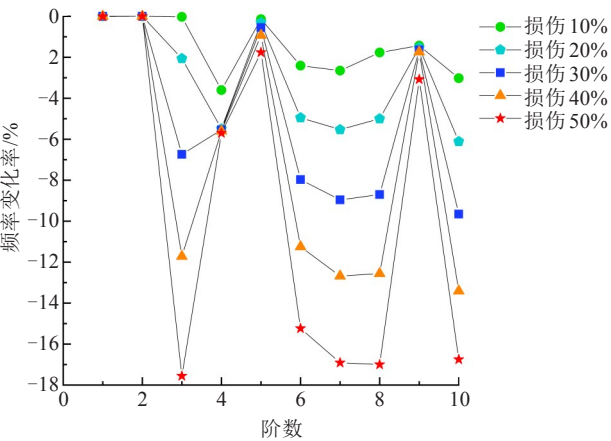


图5 拉索均匀损伤后自振频率变化率

Fig. 5 Changing rate of natural frequency of cable after uniform damage

由表2、图5可知,随着损伤程度的递增,各阶自振频率变化率幅度增大。全桥拉索均匀损伤对第1、2阶自振频率影响极小,对4、5、7阶自振频率有影响但并不明显,对3、6、7、8、10阶自振频率有明显影响。全桥拉索均匀损伤工况下,变幅明显的3、6、7、8、10阶自振频率变化率与损伤程度对应关系如图6所示。从图6可以看出,拉索均匀损伤程度与变幅明显的频率变化率呈线性相关。

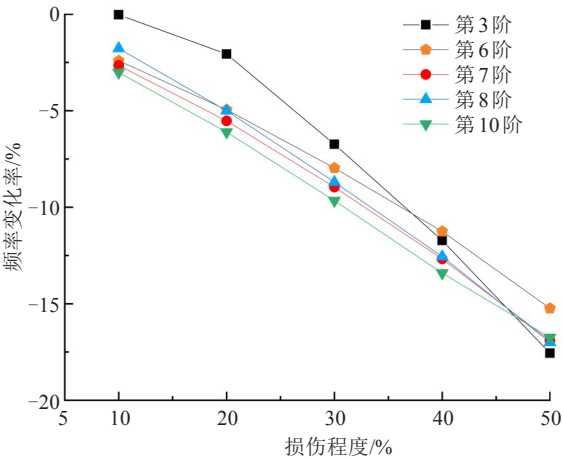


图6 均匀损伤后第3、6、7、8、10阶频率变化率

Fig. 6 The sixth, seventh, eighth and tenth order frequency change rate after uniform damage

3.2 不同侧局部拉索断裂的动力特性分析

斜拉桥运营过程中,因为意外情况导致局部拉索断裂失效的情况时有发生^[2]。为探究局部拉索断裂对斜拉桥动力特性的影响,针对非对称独塔斜拉桥的结构特点,对桥梁主跨区、边跨区两侧分别模拟8种局部拉索断裂工况,见表3。使用

ANSYS生死单元命令流杀死拉索单元,模拟拉索断裂失效,取一阶塔横弯(第一阶振型)频率与一阶梁竖弯(第4阶振型)频率作为典型工况进行统计分析,结果如图7~8和表4所示。

表3 局部拉索失效8种工况

Table 3 Eight conditions of cable fracture

工况序号	工况描述
①	去除一侧编号1~5的拉索
②	去除一侧编号6~10的拉索
③	去除一侧编号11~15的拉索
④	去除一侧编号16~20的拉索
⑤	去除一侧编号21~25的拉索
⑥	去除一侧编号26~30的拉索
⑦	去除一侧编号31~35的拉索
⑧	去除一侧编号36~40的拉索

表4 部拉索失效后的自振频率

Table 4 Natural frequency after cable fracture

工况	一阶塔横弯频率/Hz		一阶梁竖弯频率/Hz	
	主跨区	边跨区	主跨区	边跨区
①	0.330 80	0.330 79	0.877 08	0.877 25
②	0.331 25	0.331 21	0.875 37	0.875 59
③	0.332 09	0.331 99	0.871 40	0.876 31
④	0.333 38	0.333 03	0.863 08	0.846 34
⑤	0.335 76	0.334 58	0.835 45	0.837 71
⑥	0.338 45	0.337 02	0.798 74	0.840 57
⑦	0.343 00	0.340 80	0.799 61	0.839 60
⑧	0.345 10	0.343 79	0.866 52	0.836 49

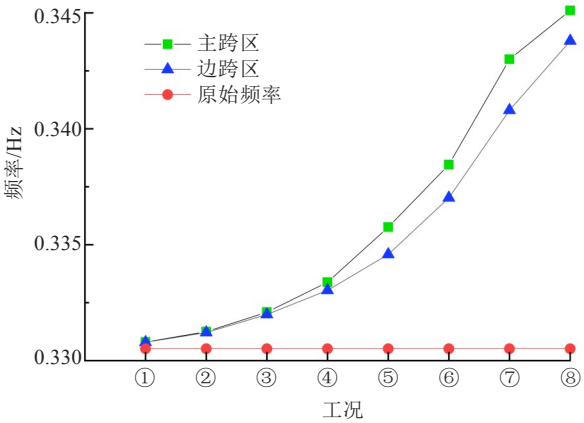


图7 局部拉索失效后一阶塔横弯频率

Fig. 7 First order tower transverse bending frequency after local cable rupture

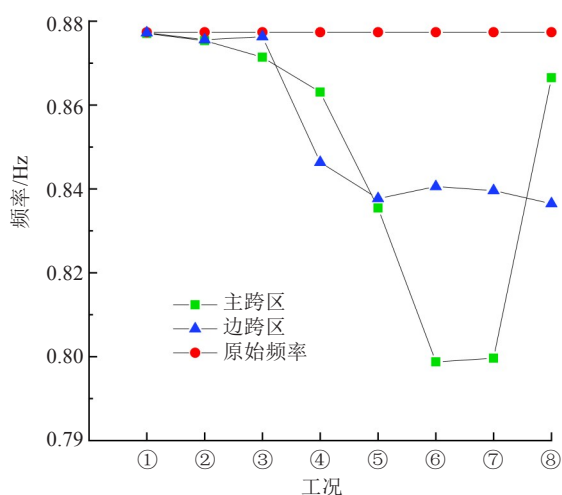


图8 局部拉索失效后一阶梁竖弯频率

Fig. 8 Vertical bending frequency of first order beam after local cable rupture

由表4、图7可知,一阶塔横弯频率随着工况序号的增加而增大,呈类指数型增长。与短索、中索的对比,斜拉桥长索的断裂失效对一阶塔横弯频率的影响更明显,且主跨区工况①的一阶塔横弯频率较边跨区工况①的高0.003 0%,主跨区工况⑧的一阶塔横弯频率较边跨区工况⑧的高0.396 4%,与非对称独塔斜拉桥边跨区的断裂相比,主跨区的局部拉索断裂对一阶塔横弯频率影响更大。

由表4、图8可知,一阶梁竖弯频率变化随着拉索断裂失效工况序号的增加而呈现类似向上开口的抛物线,桥梁一阶竖弯频率均在工况⑥~⑦时较小,故斜拉桥的中长索断裂失效对一阶梁竖弯频率的影响更明显。且主跨区工况⑥的一阶梁竖弯频率较边跨区工况⑥的低4.767 8%,主跨区工况⑦的一阶梁竖弯频率较边跨区工况⑦的低4.558 1%,故非对称独塔斜拉桥主跨区局部拉索断裂较边跨区局部拉索断裂对一阶梁竖弯频率影响更大。

4 结论

分析了多种拉索损伤情况对某非对称独塔斜拉桥动力特性的影响规律,研究结果表明:

- 1) 非对称独塔斜拉桥的前10阶振型主要是塔横弯、梁竖弯,具有良好的抗扭转能力。
- 2) 全桥拉索的均匀损伤对非对称独塔斜拉桥

前10阶振型没有影响,对自振频率整体影响较大,自振频率变化率与拉索均匀损伤程度有较明显的线性关系,可供桥梁结构健康状态监测参考。

3) 无论主跨区还是边跨区,随着局部拉索断裂工况序号的增加,一阶塔横弯频率呈类似指数型递增。在工况⑧时,其达到最大值,斜拉桥的长索局部断裂对其影响最大。一阶梁竖弯频率呈类似上开口抛物线分布,在工况⑥、⑦附近,频率达到较小值,斜拉桥的中长索局部失效对其影响较大。

4) 主跨区拉索断裂损伤对桥梁的一阶梁竖弯频率与塔横弯频率的影响都较边跨区的大。

参考文献(References):

- [1] 舒林,许红胜,曾毅杰,等.影响斜拉索运营寿命的各种因素分析[J].中外公路,2017,37(1):84-88. (SHU Lin, XU Hongsheng, ZENG Yijie, et al. Analysis of various factors affecting the service life of stay cables[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(1): 84-88. (in Chinese))
- [2] 许红胜,胡亚斯,颜东煌.既有腐蚀拉索钢丝蚀坑形态参数的分布特征[J].中外公路,2020,40(1):80-84. (XU Hongsheng, HU Yasi, YAN Donghuang. Distribution character of morphology parameters of pits on existing corroded cable wires[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020,40(1):80-84.(in Chinese))
- [3] 陈治邦,鲁乃唯.斜拉索腐蚀损伤下斜拉桥体系可靠度研究[J].公路工程,2020,45(1):6-11. (CHEN Zhibang, LU Naiwei. System reliability evaluation of cable-stayed bridges considering cable corrosion[J]. Highway Engineering, 2020,45(1):6-11. (in Chinese))
- [4] ZHANG Y, FANG Z, JIANG R N, et al. Static performance of a long-span concrete cable-stayed bridge subjected to multiple-cable loss during construction[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020,25(3):04020002.
- [5] LIU Z X, GUO T, HAN D G, et al. Experimental study on corrosion-fretting fatigue behavior of bridge cable wires[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(12): 04020104.
- [6] HOU N, SUN L M, CHEN L. Cable reliability assessments for cable-stayed bridges using identified tension forces and monitored loads[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020,25(7):1-12.

(下转第101页)

- ZHAO Kang. Topology optimization with design-dependent loads by level set approach[J]. Engineering Mechanics, 2005,22(5):69-77.(in Chinese))
- [10] 易伟建,刘霞. 遗传演化结构优化算法[J]. 工程力学, 2004, 21(3): 66-71. (YI Weijian, LIU Xia. Genetic evolutionary structural optimization[J]. Engineering Mechanics, 2004,21(3):66-71.(in Chinese))
- [11] 周骞,韦凤连,刘菊. 基于遗传禁忌算法的公交线路发车间隔优化[J]. 交通科学与工程, 2015, 31(2): 81-86. (ZHOU Qian, WEI Fenglian, LIU Ju. A bus headway optimization model based on genetic taboo algorithm[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2015, 31(2):81-86.(in Chinese))
- [12] HOLLAND J H. Genetic algorithms[J]. Scientific American, 1992,267(1):66-72.
- [13] 肖美华,薛锦云. 遗传算法机理的研究及应用[J]. 计算机工程, 2003,29(20):137-139.(XIAO Meihua, XUE Jinyun. Research and application of genetic algorithm theory[J]. Computer Engineering, 2003, 29(20): 137-139. (in Chinese))
- [14] 张炳华,侯昶. 土建结构优化设计:第2版[M]. 上海:同济大学出版社, 1998. (ZHANG Binghua, HOU Chang. Optimization design of civil structure - 2nd edition [M]. Shanghai:Tongji University Press, 1998.(in Chinese))
- [15] 张鹤志,张棒,谢献忠,等. 渐进演化类拓扑优化算法的优化准则对比研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(3): 73-79. (ZHANG Huzhi, ZHANG Bang, XIE Xianzhong, et al. Comparative study on optimization criteria of evolutionary topology optimization algorithms [J]. Chinese Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020,42(3):73-79.(in Chinese))
- [16] 张鹤志,蒋滇,谢献忠. 基于拓扑优化的钢筋混凝土复杂受力构件配筋设计[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(3): 84-95. (ZHANG Huzhi, JIANG Dian, XIE Xianzhong. Reinforcement layout design of RC members under complex stress states based on topological optimization[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019,39(3):84-95.(in Chinese))

(上接第44页)

- [7] YANG X Y, GONG J X, WANG Y H, et al. Probability model and reliability analysis of cable stress for cable-stayed bridge[J]. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2017,12(4):248-257.
- [8] 张建,杨德灿,舒鹏. 断索对大跨斜拉桥加劲梁内力的影响分析[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(4): 47-51, 62. (ZHANG Jian, YANG Decan, SHU Peng. Analysis on the internal force of stiffening girder of long-span cable-stayed bridges to a cable loss[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(4): 47-51, 62. (in Chinese))
- [9] 谢民滇,谢发祥,胡星宇,等. 腐蚀环境下斜拉索承载力评价模型研究[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(3): 23-29. (XIE Mindian, XIE Faxiang, HU Xingyu, et al. Study on the bearing capacity evaluation model of stay cables in corrosion environment[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33(3): 23-29. (in Chinese))
- [10] 辛明奇. 某拱形独塔不等跨斜拉桥力学性能分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2019. (XIN Mingqi. Mechanical characteristics analysis of unequal span cable-stayed bridge with arch single tower[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese))
- [11] 杨怡莹,孙全胜. 独塔非对称斜拉桥 π 梁温度监控及受力分析[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 151-155. (YANG Yiying, SUN Quansheng. Temperature monitoring and mechanical analysis of π -girders of unsymmetrical single-tower cable-stayed bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019,39(3):151-155. (in Chinese))