

考虑振动装置影响的斜拉桥拉索索力评估方法研究

阮云龙

(佛山市三水区公路养护中心, 广东 佛山 528100)

摘要: 针对斜拉桥在运营过程中的实际索力标定问题, 本文在原有的频谱法测试索力原理的基础上, 通过考虑拉索减振器的位置, 引入修正的等效索长, 建立考虑减振器位置的斜拉桥索力测试方法。该方法既能满足索力测试过程中通过采集拉索振动基频便捷性, 同时又能考虑拉索减振器布置带来的偏差影响, 因此具有很好的理论意义和工程使用价值。最后, 通过三水大桥的斜拉索实际索力测试, 说明本文提出的方法在工程师具有较好的适用性。

关键词: 斜拉桥; 拉索; 索力; 减振装置; 频谱法

中图分类号: U422.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)12-0222-06

0 引言

斜拉桥索力测试主要用于测试桥梁斜拉索的安全性和结构稳定性。该测试可以通过施加拉力并记录斜拉索的变形来评估斜拉索的力学特性。这项测试可以用于如何更好地设计、建造和维护斜拉桥的决策中。通过该测试的结果, 可以更好地了解斜拉索在自然灾害、如风暴和地震, 以及长期使用时的变形和损耗, 从而确定斜拉索需要更换或维修情况。此外, 斜拉桥索力测试还可以为斜拉桥的使用寿命和可靠性分析提供数据和参考。

斜拉桥索力测试的主要方法是使用应变计或拉力计来测量斜拉索的应力或拉力。斜拉桥索力测试主要几种方法: (1) 直接拉力测试方法; (2) 频率测试方法; (3) 位移法。总体而言, 斜拉桥索力测试方法各有利弊, 因此需要在特定情况下选择合适的测试方法, 以获得最准确、可靠的测试结果。

斜拉桥索力的测试对斜拉桥在换索过程中整个结构的安全性以及斜拉桥在运营阶段的结构性能均有重要影响。本文在传统频谱法测试斜拉桥索力的基础上, 考虑减振器位置的影响, 对既有索力测试方法进行改进, 并在实桥换索工程中进行应用和检验。

1 频谱法基本原理

索力测试采用频谱法, 即利用测试斜拉索在自然环境下(恒载索力时应保证桥面无车辆行驶)的固

有自振频率, 然后根据斜拉索几何参数进行计算得到索力。

索力测试采用频谱法, 按以下简化公式计算:

$$F = 4 \times w \times L^2 \times \left(\frac{f_k}{k}\right)^2 \quad (1)$$

式中: w 为斜拉索的单位长方向上的质量, kg/m ; L 为斜拉索两头锚固点之间的计算长度, m ; f_k 为斜拉索的第 k 阶振动频率; k 为斜拉桥拉索的振动阶次数。

2 考虑减振装置的索力测试原理

从式(1)中进行定性分析可知, 当在斜拉索的索力计算过程中采用等效长度法, 那么计算参数 w 、 k 、 f_k 的取值都应该是实际监测到的具体数值, 所以等效索长 L 的确定核心关键问题。如果将拉索锚固点之间的减振器距离作为等效拉索计算长度(见图1), 则前式可等效为:

$$F = 4 \times w \times L'^2 \times \left(\frac{f_k}{k}\right)^2 \quad (2)$$

$$L'^2 = (1 - v_1 - v_2)L \quad (3)$$

式中: v_1 、 v_2 表征拉索减振器的安装位置; L 为拉索两头锚固点之间实际弦长取值。

等效索长与斜拉索的锚固构造密切相关(见图2)。由图中分析可知, $l_1 = l_0 - \beta l_{\text{rigid}}$ 。其中, 系数 β 的取值范围为 0.35~0.47; l_{rigid} 为两端锚固区域刚性段长度, $l_{\text{rigid}} = l_{a1} + l_{b1} + l_{a2} + l_{b2}$ 。

3 工程应用

3.1 工程概况

三水大桥北接广三高速, 南接广昆高速及白坭镇

收稿日期: 2023-07-11

作者简介: 阮云龙(1987—), 男, 学士, 工程师, 从事路桥检测工作。

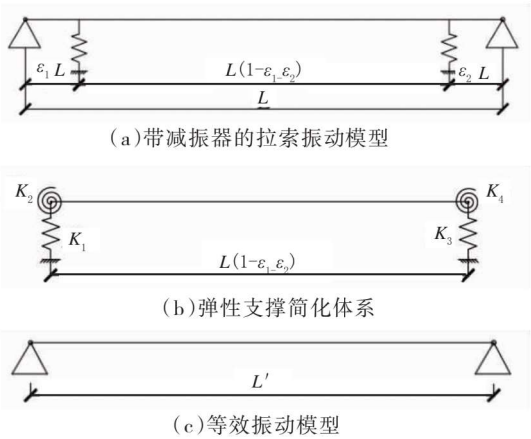


图 1 拉索振动力学模型

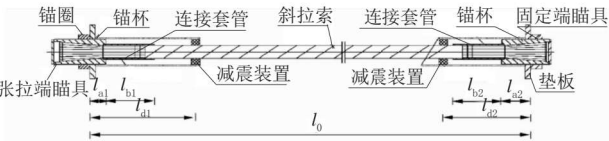


图 2 拉索构造

金白线,横跨东平水道(见图 3、图 4)。全长 1 559.67 m。三水大桥主桥为独塔不对称双索面扇形混凝土斜拉桥,主桥斜拉桥宽 24 m,全长 291.8 m,其中桥塔中心距离北侧(0# 台)梁端 111.8 m,桥塔中心距离南侧(4# 墩)梁端 180 m。

3.2 拉索参数

全桥共 116 根斜拉索,斜拉索布置为平行双索



图 3 三水大桥立面照片



图 4 三水大桥桥面照片

面,主跨和边跨各 29 对,梁上索距除在岸跨(北,0# 台侧)辅助墩间为 1.8 m 外,其余均为 6 m;塔上索距(相邻两根拉索在塔中心的高度方向间距)有 3 m、2 m、1.5 m 三种。横桥向,即上下游两侧的斜拉索在主梁和桥塔上的间距均为 19 m。斜拉索采用 $\phi 7\text{ mm}$ 平行钢丝束,热挤高密度聚乙烯防护,冷铸镦头锚。斜拉索的详细参数见表 1 和图 5。

表 1 斜拉索明细表

岸跨(北,0# 台侧)					河跨(南,4# 墩侧)				
编号	钢丝根数	索长/m	目标索力/kN	引伸量/mm	编号	钢丝根数	索长/m	目标索力/kN	引伸量/mm
A1	109	36.857	1 402.77	62	H1	109	36.857	1 401.80	62
A2	109	42.977	1 023.20	52	H2	109	42.977	1 021.83	52
A3	109	48.850	1 074.56	63	H3	109	48.850	1 077.97	63
A4	109	53.957	1 126.38	72	H4	109	53.957	1 125.18	72
A5	109	59.212	1 199.49	85	H5	109	59.212	1 199.06	85
A6	109	64.614	1 295.87	100	H6	109	64.614	1 296.34	100
A7	121	70.146	1 360.81	103	H7	121	70.146	1 363.21	103
A8	121	75.788	1 400.24	114	H8	121	75.788	1 403.14	114
A9	121	81.523	1 442.42	126	H9	121	81.523	1 445.65	127
A10	121	87.334	1 485.32	139	H10	121	87.334	1 488.87	140
A11	121	92.888	1 545.00	153	H11	121	92.888	1 545.00	154
A12	121	98.517	1 592.50	167	H12	121	98.517	1 597.50	168
A13	121	103.406	1 717.00	190	H13	121	104.206	1 648.50	184
A14	127	105.754	1 813.00	198	H14	127	109.950	1 728.50	197
A15	127	108.104	1 876.50	210	H15	127	115.739	1 784.00	214

表1 (续)

岸跨(北,0#台侧)					河跨(南,4#墩侧)				
编号	钢丝根数	索长/m	目标索力/kN	引伸量/mm	编号	钢丝根数	索长/m	目标索力/kN	引伸量/mm
A16	127	110.453	1 940.00	221	H16	127	121.568	1 841.00	232
A17	127	112.802	2 000.00	233	H17	127	127.432	1 890.00	250
A18	127	115.153	2 061.50	245	H18	127	133.326	1 935.00	267
A19	127	117.502	2 120.00	257	H19	127	139.248	1 985.00	286
A20	127	119.853	2 177.00	270	H20	127	145.194	2 041.50	307
A21	151	122.203	2 246.00	234	H21	151	151.160	2 113.00	273
A22	151	124.554	2 300.00	245	H22	151	157.146	2 160.00	291
A23	151	126.905	2 353.00	255	H23	151	163.149	2 204.00	308
A24	151	129.256	2 406.00	265	H24	151	169.167	2 249.00	325
A25	151	131.608	2 456.00	276	H25	151	175.200	2 346.00	344
A26	151	133.959	2 506.00	287	H26	151	181.245	2 337.00	362
A27	151	136.311	2 555.00	297	H27	151	187.301	2 378.00	380
A28	139	140.085	2 416.00	314	H28	139	193.368	2 295.00	411
A29	139	141.202	2 447.38	323	H29	139	198.994	2 070.66	385

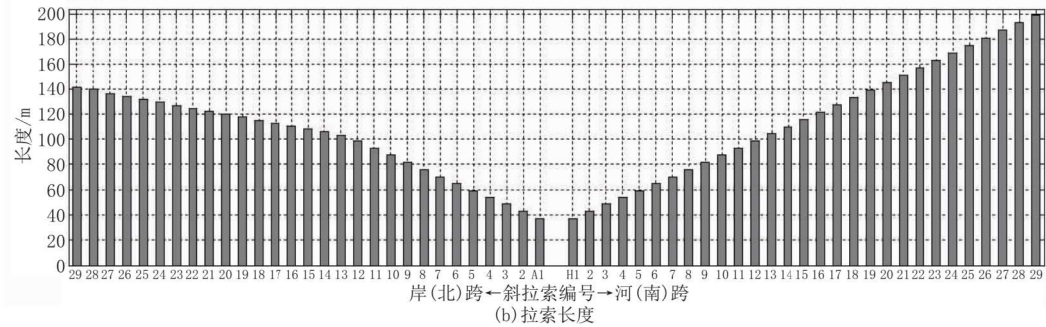
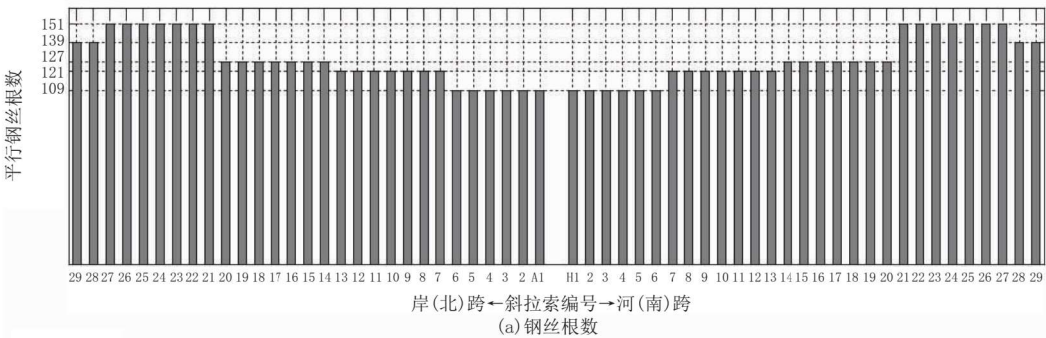


图5 斜拉索几何参数图示

把“ $4 \times w \times L^2$ ”称为索的比例系数。本桥各拉索的比例系数见表2。

3.3 频谱法索力测试

由于斜拉索索力受温度影响很大,本次检测选择在夜间-凌晨进行。为了保证观测结果少受温度影响,分别于2018年11月6日和11月8日的夜间23点

到次日凌晨4点,大气环境温度 $18^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$,湿度 $60\% \sim 65\%$,对每根索分别进行索力检测。加速度传感器经动仪JMM268测量获得的典型振动信号进行频谱分析得到每根斜拉索获得的频率及索力见表3。

3.4 考虑减振器的频谱法索力测试

由式(2)和式(3)分析可知,考虑减振器位置的

表 2 斜拉索的比例系数表

岸跨(北,0# 台侧)					河跨(南,4# 墩侧)				
编号	钢丝根数	索长 /m	单位长质量 /(kg·m ⁻¹)	比例系数 /10 ³ (kg·m)	编号	钢丝根数	索长 /m	单位长质量 /(kg·m ⁻¹)	比例系数 /10 ³ (kg·m)
A1	109	36.857	36.2	196.7	H1	109	36.857	36.2	196.7
A2	109	42.977	36.2	267.4	H2	109	42.977	36.2	267.4
A3	109	48.85	36.2	345.5	H3	109	48.85	36.2	345.5
A4	109	53.957	36.2	421.6	H4	109	53.957	36.2	421.6
A5	109	59.212	36.2	507.7	H5	109	59.212	36.2	507.7
A6	109	64.614	36.2	604.5	H6	109	64.614	36.2	604.5
A7	121	70.146	40.0	787.3	H7	121	70.146	40.0	787.3
A8	121	75.788	40.0	919.0	H8	121	75.788	40.0	919.0
A9	121	81.523	40.0	1 063.4	H9	121	81.523	40.0	1 063.4
A10	121	87.334	40.0	1 220.4	H10	121	87.334	40.0	1 220.4
A11	121	92.888	40.0	1 380.5	H11	121	92.888	40.0	1 380.5
A12	121	98.517	40.0	1 552.9	H12	121	98.517	40.0	1 552.9
A13	121	103.406	40.0	1 710.8	H13	121	104.206	40.0	1 737.4
A14	127	105.754	42.4	1 896.8	H14	127	109.950	42.4	2 050.3
A15	127	108.104	42.4	1 982.0	H15	127	115.739	42.4	2 271.9
A16	127	110.453	42.4	2 069.1	H16	127	121.568	42.4	2 506.5
A17	127	112.802	42.4	2 158.0	H17	127	127.432	42.4	2 754.1
A18	127	115.153	42.4	2 248.9	H18	127	133.326	42.4	3 014.8
A19	127	117.502	42.4	2 341.6	H19	127	139.248	42.4	3 288.5
A20	127	119.853	42.4	2 436.3	H20	127	145.194	42.4	3 575.4
A21	151	122.203	49.6	2 962.8	H21	151	151.16	49.6	4 533.3
A22	151	124.554	49.6	3 077.9	H22	151	157.146	49.6	4899.5
A23	151	126.905	49.6	3 195.2	H23	151	163.149	49.6	5280.9
A24	151	129.256	49.6	3 314.7	H24	151	169.167	49.6	5677.7
A25	151	131.608	49.6	3 436.4	H25	151	175.2	49.6	6 089.9
A26	151	133.959	49.6	3 560.3	H26	151	181.245	49.6	6 517.4
A27	151	136.311	49.6	3 686.4	H27	151	187.301	49.6	6 960.2
A28	139	140.085	45.5	3 571.5	H28	139	193.368	45.5	6 805.2
A29	139	141.202	45.5	3 628.7	H29	139	198.994	45.5	7 206.9

注:“A”代表岸跨侧,“H”代表河跨侧。

影响主要是对等效索长进行修正,因此需明确减振器的位置而得到等效索长。为了达到理想的减震效果,斜拉索减振器位置一般位于全长的 3%左右,因此采用考虑减振器位置的方法测得具体索力结果见表 3。

通过对比分析可知,采用考虑拉索减振器位置

表 3 频谱法是否考虑减振器影响的斜拉索索力检测结果

编号	比例系数 K		上游			下游		
			基频 / Hz	索力 /kN		基频 / Hz	索力 /kN	
	未考虑减振器	考虑减振器		未考虑减振器	考虑减振器		未考虑减振器	考虑减振器
A29	3 628.717	3 206.334	0.918	3 058.0	2 702.048 8	0.877	2 790.3	2 465.509 08
A28	3 571.533	3 155.806	0.934	3 116.8	2 754.004 48	0.926	3 064.7	2 707.968 92
A27	3 686.409	3 257.310	0.904	3 013.7	2 662.905 32	0.910	3 052.0	2 696.747 2
A26	3 560.291	3 145.873	0.906	2 920.4	2 580.465 44	0.926	3 054.0	2 698.514 4
A25	3 436.42	3 036.420	0.912	2 855.3	2 522.943 08	0.899	2 775.3	2 452.255 08
A24	3 314.691	2 928.860	0.927	2 850.1	2 518.348 36	0.937	2 912.3	2 573.308 28
A23	3 195.208	2 823.285	0.935	2 793.3	2 468.159 88	0.949	2 879.6	2 544.414 56
A22	3 077.918	2 719.648	0.940	2 721.8	2 404.982 48	0.965	2 864.5	2 531.072 2
A21	2 962.821	2 617.948	0.952	2 686.8	2 374.056	0.963	2 746.4	2 426.719
A20	2 436.26	2 152.679	1.018	2 526.2	2 232.150	1.018	2 524.8	2 230.913
A19	2 341.62	2 069.055	1.034	2 501.1	2 209.971	1.050	2 580.5	2 280.129
A18	2 248.932	1 987.156	1.044	2 450.4	2 165.173	1.016	2 320.2	2 050.128
A17	2 158.04	1 906.844	1.042	2 344.0	2 071.158	1.069	2 466.1	2 179.045
A16	2 069.097	1 828.254	1.083	2 427.9	2 145.292	1.069	2 363.0	2 087.946
A15	1 982.026	1 751.318	1.051	2 187.7	1 933.051	1.066	2 252.3	1 990.132
A14	1 896.791	1 676.004	1.050	2 091.7	1 848.226	1.048	2 082.7	1 840.273
A13	1 710.848	1 511.705	1.033	1 823.9	1 611.598	1.017	1 769.5	1 563.530
A12	1 552.896	1 372.138	1.085	1 828.1	1 615.309	1.106	1 899.9	1 678.751
A11	1 380.509	1 219.817	1.169	1 884.9	1 665.497	1.119	1 729.2	1 527.921
A10	1 220.356	1 078.306	1.236	1 863.7	1 646.765	1.186	1 715.4	1 515.727
A09	1 063.36	939.584	1.324	1 865.0	1 647.914	1.336	1 898.4	1 677.426
A08	919.011 4	812.038	1.379	1 747.0	1 543.649	1.403	1 810.0	1 599.316
A07	787.273 8	695.635	1.530	1 841.7	1 627.326	1.551	1 894.3	1 673.803
A06	604.535 5	534.167	1.785	1 925.1	1 701.018	1.736	1 822.3	1 610.184
A05	507.677 6	448.583	1.743	1 542.3	1 362.776	1.859	1 753.8	1 549.657
A04	421.564 6	372.494	2.161	1 969.3	1 740.073	1.893	1 511.2	1 335.296
A03	345.539 5	305.318	1.984	1 359.7	1 201.430	2.229	1 716.2	1 516.434
A02	267.448 9	236.317	2.184	1 275.3	1 126.855	2.156	1 243.0	1 098.314
A01	196.701 9	173.805	3.090	1 878.5	1 659.842	3.176	1 984.1	1 753.150
H01	196.701 9	173.805	2.962	1 725.4	1 524.563	3.056	1 837.0	1 623.173
H02	267.448 9	236.317	1.919	985.2	870.522	2.295	1 408.4	1 244.462
H03	345.539 5	305.318	1.908	1 257.3	1 110.950	2.114	1 543.7	1 364.013
H04	421.564 6	372.494	2.368	2 363.2	2 088.123	1.886	1 499.5	1 324.958
H05	507.677 6	448.583	1.720	1 501.9	1 327.078	1.926	1 882.9	1 663.730
H06	604.535 5	534.167	1.752	1 854.6	1 638.724	1.689	1 724.0	1 523.326
H07	787.273 8	695.635	1.479	1 721.7	1 521.294	1.516	1 809.4	1 598.785
H08	919.011 4	812.038	1.335	1 636.7	1 446.188	1.425	1 866.2	1 648.974
H09	1 063.36	939.584	1.320	1 852.0	1 636.427	1.329	1 878.9	1 660.196
H10	1 220.356	1 078.306	1.268	1 962.1	1 733.711	1.203	1 764.8	1 559.377
H11	1 380.509	1 219.817	1.175	1 906.0	1 684.141	1.161	1 859.4	1 642.965
H12	1 552.896	1 372.138	1.138	2 010.6	1 776.566	1.122	1 953.4	1 726.024
H13	1 737.422	1 535.186	1.052	1 922.8	1 698.986	1.070	1 987.9	1 756.508
H14	2 050.295	1 811.640	0.998	2 040.1	1 802.632	1.013	2 105.5	1 860.419
H15	2 271.88	2 007.433	0.974	2 154.2	1 903.451	0.963	2 104.7	1 859.712
H16	2 506.481	2 214.726	0.956	2 289.9	2 023.355	0.922	2 132.3	1 884.100

表 3 (续)

编号	比例系数 K		上游			下游		
			基频 / Hz	索力 /kN		基频 / Hz	索力 /kN	
	未考虑减振器	考虑减振器		未考虑减振器	考虑减振器		未考虑减振器	考虑减振器
H17	2 754.12	2 433.540	0.941	2 440.1	2 156.072	0.927	2 368.4	2 092.718
H18	3 014.779	2 663.858	0.896	2 421.3	2 139.460	0.894	2 411.7	2 130.978
H19	3 288.545	2 905.758	0.886	2 581.5	2 281.013	0.875	2 516.4	2 223.491
H20	3 575.388	3 159.212	0.840	2 520.8	2 227.378	0.837	2 504.8	2 213.241
H21	4 533.31	4 005.632	0.768	2 674.5	2 363.188	0.754	2 580.0	2 279.688
H22	4 899.461	4 329.163	0.733	2 631.3	2 325.016	0.729	2 600.2	2 297.536
H23	5 280.931	4 666.230	0.707	2 642.3	2 334.736	0.705	2 624.1	2 318.654
H24	5 677.707	5 016.821	0.678	2 610.0	2 306.196	0.683	2 646.2	2 338.182
H25	6 089.896	5 381.032	0.652	2 587.4	2 286.226	0.655	2 616.3	2 311.762
H26	6517.39	5 758.765	0.622	2 517.4	2 224.374	0.630	2 586.2	2 285.166
H27	6 960.202	6 150.034	0.593	2 444.0	2 159.518	0.594	2 452.1	2 166.675
H28	6 805.195	6 013.070	0.568	2 197.9	1 942.064	0.580	2 286.5	2 020.351
H29	7 206.947	6 368.058	0.550	2 177.8	1 924.304	0.542	2 113.7	1 867.665

的方法计算索力,由于拉索对称安装减振器,当单侧减振器位置比在 0.0257~0.036 时,在减振器安装前后,索力值误差在 5%范围内均能满足要求。采用考虑减振器位置的索力测试计算方法能够在斜拉桥具体实际工程中更贴近于工程实际,频谱法测得的索力精度有限。因此本文提出的考虑减振器的斜拉桥索力测试方法能够在斜拉桥实际工程应用中具有较好的理论意义和工程使用价值。本文提出的斜拉桥索力计算方法,具有所需计算参数少,计算表达式简洁、明确的特点,因此具有最好的工程实用性。

4 结 论

斜拉桥索力测试主要用于测试桥梁斜拉索的安全性和结构稳定性。可以为斜拉桥的使用寿命和可靠性分析提供数据和参考。本文在原有的频谱法测试索力原理的基础上,通过考虑拉索减振器的位置,引入修正的等效索长,建立考虑减振器位置的斜拉桥索力测试方法。主要工作和所得结论如下:

(1)在既有频谱法测试索力的基础上,通过考虑减振器在斜拉索上的布置位置,对拉索的振动特性进行分析,等效索长的修正项对比例系数有重要影响,对拉索的基频没有影响。

(2)通过三水大桥具体斜拉桥的索力测试结果表明,拉索减振器的位置主要安装在距离锚固构造处

3%位置左右,能够较好地发挥减小拉索振动作用,因此考虑减振器位置的索力测试结果相比于既有频谱法更符合工程实际情况。

(3)本文提出的考虑拉索减振器位置的索力测试方法,既能满足索力测试过程中通过采集拉索振动基频便捷性,同时又能考虑拉索减振器布置带来的偏差影响,因此具有很好的理论意义和工程使用价值。

参考文献:

[1] 刘殿元,齐铁东,王晓雷.考虑套管影响的钢绞线斜拉索索力测试方法[J].公路交通科技,2022,39(3):71-77.
[2] 刘晓雪,蔡曙日,宿健,等.形变雷达在桥梁斜拉索索力测试中的应用初探[J].公路交通科技:应用技术版,2019(5):119-120.
[3] 陈叶.基于频率法的平行钢绞线斜拉索索力测试方法研究[J].青海交通科技,2022,34(1):96-102.
[4] 黄侨,王翼超,任远,等.基于微波干涉雷达的斜拉桥索力测量方法[J].河海大学学报:自然科学版,2022,50(6):144-151.
[5] 郑周练,刘长江,龚文川,等.“三点弯曲法”在线检测缆索张力学模型[J].土木建筑与环境工程,2009,31(2):29-32.
[6] 王卫峰,韩大建.斜拉桥的索力测试及其参数识别[J].华南理工大学学报(自然科学版),2000,29(1):18-21.
[7] 宋一凡,贺拴海,吴小平.固端刚性拉索索力分析能量法[J].西安公路交通大学学报,2001,21(1):55-57.
[8] 李枝军,李爱群,缪长青,等.运营状态下南京长江二桥拉索索力测试与分析[J].东南大学学报,2007,37(6):1057-1660.
[9] 冉志红,李乔.提高斜拉索索力估算精度的一种新方法[J].公路交通科技,2007,24(8):96-98.