

文章编号: 1002-0268 (2007) 01-0069-05

大跨度系杆拱桥柔性吊杆张力 监测和参数识别研究

吴文清¹, 王成树², 刘国昌³, 叶见曙¹

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006;
3. 江苏省南京市公路建设处, 江苏 南京 210008)

摘要: 研究了基于弦振动理论应用频率法进行大跨度系杆拱桥柔性吊杆张力测试的基本方法, 尤其是对影响频率法测定吊杆张力精度的若干参数, 如吊杆的边界条件、减振阻尼器及有效计算长度等进行了较理想的识别。文中推导了张力测试的实用公式, 并通过现场张力标定, 对上述若干参数进行有效识别, 提高了张力测试精度并减少了识别工作量。实测结果表明, 根据文中提供的参数识别方法进行参数识别后所得到的吊杆张力计算值大部分具有较高的监测精度, 可以满足施工和运营期间监测吊杆张力的需要。

关键词: 系杆拱桥; 吊杆; 张力测试; 频率法; 参数识别

中图分类号: U448.22⁺5

文献标识码: A

Flexible Hanger Rods Tension Measurement and Parameter Identification in Large-span Tied Arch Bridge

WU Wen-qing¹, WANG Cheng-shu², LIU Guo-chang³, YE Jian-shu¹

(1. Transportation College of Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China;

2. Zhejiang Provincial Plan Design & Research Institute of Communication, Zhejiang Hangzhou 310006, China;

3. Nanjing Highway Construction Bureau, Jiangsu Province, Jiangsu Nanjing 210008, China)

Abstract: The measurement method to check the flexible hanger rods tension in large-span tied arch bridge is studied with frequency method based on the principle of vibration of tension cable, especially the parameter identification of some factors such as boundary condition, oscillating damper and effective calculation length of hanger rods, which influence the measurement precision of tension in hanger rods, are made clearly as the main part. The research result shows that the above mentioned parameters could be identified effectively by testing the hanger rods force in-situ, so as to raise the measuring precision and working efficiency. The test practice indicates that the precision in flexible hanger rods force calculation, which is based on the identified parameters with the proposed identification method, can meet the needs of monitoring the force in hanger rods during the time of construction and operation of the bridge.

Key words: tied arch bridge; hanger rods; rods force measurement; frequency method; parametrical identification

0 引言

吊杆是系杆拱桥主要传力构件, 桥面荷载要通过吊杆传递给拱肋。因此吊杆是系杆拱桥主要的构件之一, 吊杆能否正常工作, 将会影响到整个桥梁的正常

运营。2002年宜宾市小南门金沙江大桥突然倒塌^[1], 倒塌的原因据分析是主桥中部北端 2[#] 截面下游吊杆先发生断裂, 随即 2[#] 截面上游吊杆也发生断裂, 该截面处横梁与横梁上的桥面板, 随吊杆断口以下部分坠入江中, 随后主桥另一端 3 个截面吊杆也发生断

收稿日期: 2005-08-29

基金项目: 江苏交通科学研究资助项目 (03 Y033)

作者简介: 吴文清 (1964 -), 男, 浙江龙游人, 副教授, 博士, 研究方向为桥梁工程的施工监控和组合结构桥梁. (wqwuxu @vip. sina. com)

裂,造成4孔桥面板垮塌。鉴于吊杆在整个系杆拱桥中作用重大,需要在系杆拱桥施工和运营阶段对吊杆进行监测,以了解吊杆现时所处的受力和变形状况,防患于未然。

国内外对张力测试研究较多,目前测试柔性吊杆张力的方法主要有千斤顶法、压力传感器法、频谱法和磁通量法。

频率法是根据吊杆固有频率和张力的关系,通过测试吊杆振动的固有频率,推算吊杆张力。文献[2]推导吊杆固有频率和张力的关系时,忽略了索的抗弯刚度,得出了索的张力与索固有频率的平方成正比的关系,这种方法对索长度大于40 m时误差较小。但对于小于40 m的索,如南河特大桥的吊杆长度普遍较短,就有很大的误差。文献[3]推导了张力测试的实用公式,考虑了索的抗弯刚度、垂度对张力的影响,但没有对测试张力的具体方法加以讨论,对索的参数(抗弯刚度、计算长度等)如何取值没有说明。

本文的工程背景是宁杭高速公路溧阳段南河特大桥,该桥是国道主干线南京至杭州高速公路跨南河的一座特大桥。主桥为下承式预应力混凝土系杆拱结构,采用刚性系杆刚性拱结构,孔径为130 m。主桥计算跨径 L 为126.28 m,拱轴线为二次抛物线,矢跨比为1/5,矢高25.256 m。拱桥吊杆采用85 7半平行高强钢丝吊杆,吊杆间距为6.3 m,每片拱肋设19根吊杆,采用外径9.5 cm的PE防护套包裹吊杆,桥面以上2 m高度外包不锈钢套管。桥梁立面布置图如图1。

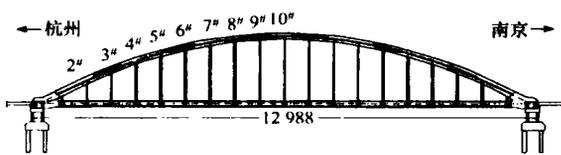


图1 大桥立面布置图(单位:cm)

Fig. 1 The general layout of the bridge (unit: cm)

本论文研究了基于弦振动理论应用频率法进行大跨度系杆拱桥柔性吊杆张力测试的基本方法,对影响频率法测定吊杆张力精度的若干因素,如吊杆的边界条件、减振阻尼器及有效计算长度等进行了较理想的识别,文中推导了张力测试的实用公式,并通过张力标定,对吊杆在考虑抗弯刚度的情况下对边界条件、减振阻尼器等因素进行识别,提高吊杆内力测试精度。

1 测试公式推导

吊杆张力测定的理论基础是弦振动理论^[4-5]。主

要承受轴向拉力的吊杆,如果考虑吊杆的抗弯刚度 EI ,则应用动力学普遍原理可以建立均匀线密度的吊杆在无阻尼时的自由振动方程为:

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} + \frac{w}{g} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

其中, EI 为吊杆的抗弯刚度; $v(x,t)$ 为由振动引起的 y 方向的挠度; T 为吊杆在轴向的张力; w 为吊杆单位长重量; g 为重力加速度。

由式(1)可以导出固端边界条件下根据1阶振动频率计算吊杆张力的实用计算公式:

$$T = \frac{4w^2}{g} f_1^2 l^2 \left[1 - 2.206 \frac{C}{f_1} - 0.552 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right] \quad (4.28 \quad 24.15), \quad (2)$$

其中, $C = \sqrt{(EIg/(wl^4))}$; $= \sqrt{T/EI} \cdot l$ 。

当构件两端的边界条件可以简化为两端铰接时,则微分方程(1)的解为:

$$T = 4wl^2 f_n^2 / gn^2 - n^2 EI / l^2, \quad (3)$$

式中, l 为吊杆的计算长度; f_n 为第 n 阶固有频率; n 为振动阶次。

当吊杆的抗弯刚度 EI 很小即为柔性吊杆时, EI 值与吊杆索长 l 的平方相比,可以忽略不计,则

$$T = 4wl^2 f_n^2 / gn^2, \quad (4)$$

对于1阶振型来讲, $n=1$,此时

$$T = 4wl^2 f_1^2 / g, \quad (5)$$

式中, f_1 为基频。

2 张力测试若干参数的识别

采用振动频率法测试吊杆张力,测试的精度很大程度上取决于频率测试的可靠性和吊杆本身参数的可靠性,吊杆固有频率的测试可以采用脉动法^[6]。吊杆的参数诸如抗弯刚度、计算长度、边界条件等也存在如何取值问题。为提高吊杆张力的测试精度,如何对上述参数进行识别,在此做一些探讨。首先对吊杆长度作出规定如图2所示, L_1 为吊杆上、下锚固端之间的距离; L_2 为拱肋中点到系梁中点的距离; L_3 为上拱肋到系梁的净距。

2.1 吊杆边界条件的识别

南河特大桥的吊杆采用85 7 mm的半平行高强钢丝束,吊杆直径 $D=85$ mm,取吊杆的弹性模量 $E=1.95 \times 10^5$ MPa,根据文献[4]的研究成果,可假设吊杆的抗弯惯性矩为 $I = \frac{D^4}{64} = 2.563 \times 10^{-6}$ m⁴,抗弯刚度为 $EI = 1.95 \times 10^8 \times 2.563 \times 10^{-6} = 499.732$ (kN·m²)。

在上述吊杆张力的计算公式中,分别作了吊杆两

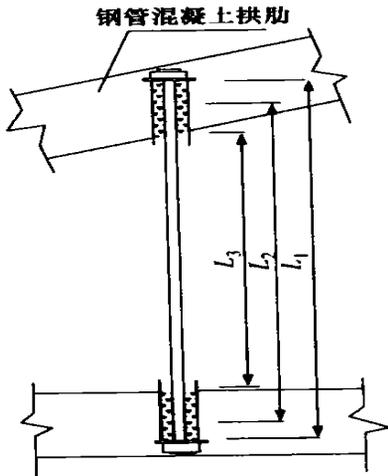


图 2 吊杆构造示意图

Fig. 2 The schematic diagram of hanger rods structure

端固结和铰接的假定。在实际结构中, 吊杆的边界条件并不都是十分明确的。南河特大桥的吊杆在钢管拱内为张拉端, 下端横梁为固定端。锚头弯曲刚度比钢丝绳索股或钢丝要大的多, 但是它们又不能起到严格意义上固定钢丝绳索股的作用。锚头对钢丝绳索股振动的约束作用与吊杆长度、振型有关。一般认为锚头对长索及低阶振型的振动约束较弱, 而对短索及高阶振型的振动约束较强。南河特大桥的吊杆长度如表 1 所示,

表 3 吊杆边界条件识别计算表

Tab. 3 The identification calculation of boundary condition of hanger rods

初始长度	吊杆编号									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
T_0/kN	260	310	310	310	310	310	310	310	310	310
T_1/kN	297.6	333.4	321.1	324.3	298.6	319.4	325.95	324.8	325.3	
L_1 T_2/kN	463.6	461.1	423.1	412.8	375.2	392.7	396.4	393.1	392.9	
T_1/T_0	1.14	1.08	1.04	1.05	0.96	1.03	1.05	1.05	1.05	
T_2/T_0	1.78	1.49	1.36	1.33	1.21	1.27	1.28	1.27	1.27	
T_0/kN	260	310	310	310	310	310	310	310	310	
T_1/kN	193.5	209.9	202.6	203.6	200.1	200	203.5	202.8	203	
L_2 T_2/kN	273.6	331.2	329.3	336.1	332.89	334.5	341.3	340.5	341	
T_1/T_0	0.74	0.68	0.65	0.66	0.65	0.65	0.66	0.65	0.65	
T_2/T_0	1.05	1.07	1.06	1.08	1.07	1.08	1.10	1.10	1.10	
T_0/kN	260	310	310	310	310	310	310	310	310	
T_1/kN	40.9	56.7	61.1	65.3	66.7	68.2	70.4	70.7	71	
L_3 T_2/kN	43.6	179.3	217.1	242.1	251.6	260.3	270.4	272.4	273.6	
T_1/T_0	0.16	0.18	0.20	0.21	0.22	0.22	0.23	0.23	0.23	
T_2/T_0	0.17	0.58	0.70	0.78	0.81	0.84	0.87	0.88	0.88	

根据表 3 的计算结果可知, 吊杆两端的锚固方式按固结或铰接来考虑, 张力计算值与实际张拉值都有误差。以下分为 3 类情况进行比较:

第 1 类: 取初始计算长度为 L_1 时, 如按固结方式处理两端的连接形式, 张力计算值 T_1 与初始张拉值 T_0 比较接近, 除了 2[#] 吊杆的误差相对较大外, 误

与斜拉桥的长度相比属于短索, 锚头对钢丝束股的约束作用应较强, 在力学模式上按固结约束较合理。

表 1 吊杆初始长度 L_i 比较表

Tab. 1 The comparison table of the initial length of hanger rods

吊杆	编号									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
L_1/m	11.267	14.969	18.176	20.887	23.103	24.824	26.052	26.789	27.036	
L_2/m	9.164	12.935	16.204	18.970	21.233	22.993	24.250	25.005	25.256	
L_3/m	6.422	10.245	13.562	16.370	18.668	20.456	21.733	22.500	22.756	

表 2 吊杆初始张拉力以及初始 1 阶自振频率表

Tab. 2 The initial tension and the first-order natural vibration frequency of hanger rods

实测值	编号									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
T_0/kN	260	310	310	310	310	310	310	310	310	
f_1/Hz	5.65	4.17	3.27	2.80	2.48	2.29	2.19	2.12	2.10	

根据表 2 所列的各吊杆初始张拉力以及初始 1 阶实测自振频率, 考虑吊杆两端按固结、铰接的边界条件分别根据吊杆张拉力计算公式 (2)、(3) 计算相应的吊杆张拉力 T_1 (固结)、 T_2 (铰接)。为了研究比较取不同的初始计算长度对吊杆边界条件识别的影响, 本文分别取吊杆长度 L_1 、 L_2 、 L_3 作为初始计算长度考虑, 其对应的吊杆张力初始计算值如表 3 所示, 同时比较了各张力计算值的相对计算误差。

差在 - 4% ~ + 8%, 误差均值在 4% 左右; 而按铰接来模拟吊杆两端的连接形式时, 则误差在 26% ~ 78%。

第 2 类: 取初始计算长度为 L_2 时, 如按固结方式处理两端的连接形式, 张力计算值 T_1 与初始张拉值 T_0 误差较大, 一般为 26% ~ 35%, 相反按铰接来

模拟吊杆两端的连接形式时,计算值与初始张拉值也比较接近,误差在+5%~+10%,误差均值在8%左右。

第3类:取计算长度为 L_3 时,无论按固结还是按铰接来模拟吊杆两端的边界条件,张力计算值与初始张拉值之间的误差都很大,故舍弃不用。

由上比较说明:从吊杆张力计算值与实测值的接近程度和相对误差均值来看,对于大、中跨度的系杆拱桥而言,吊杆的两端连接方式按固结来考虑比较合理,此时初始吊杆长度取为 L_1 。以下在按吊杆两端固接方式连接的基础上,对吊杆的计算长度进一步进行识别研究。

2.2 计算长度的识别

因为吊杆下端被一长2m的无缝钢管包裹着,所以吊杆的计算长度同样存在如何取值问题。以下把吊杆的计算长度作为要识别的参数,研究识别的方法,重点探讨与吊杆若干几何长度 L_1 、 L_2 、 L_3 的关系。有关吊杆若干长度 L_1 、 L_2 、 L_3 参阅图2所示。

为了对其进行识别,需对吊杆进行了现场标定。在吊杆张拉时,可以从千斤顶入油阀的压力表获得张力 T (实测吊杆张力,现场取吊杆设计张力值的100%),而通过张力动测仪测出与 T 相对应的吊杆1阶自振频率 f_1 ,如表2所示。假定利用式(2)计算张力,可以利用该式通过迭代法识别参数 l ,则有计算张力:

$$T = \frac{4W}{g} f_1^2 l^2 \left[1 - 2.206 \frac{C}{f_1} - 0.552 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right], \quad (6)$$

式(6)是以吊杆计算长度 l 为变量的方程,可以很方便地计算出 l_0 ,参数识别成果如表4所示。

表4 吊杆计算长度的第1次识别值 l_0 及计算张力值 T_1

Tab.4 The first identification l_0 of calculation length and calculation tension T_1 of hanger rods

吊杆编号	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L_0/m	10.85	14.61	17.95	20.53	22.85	24.53	25.53	26.29	26.52
L_1/m	11.27	14.97	18.18	20.89	23.10	24.82	26.05	26.79	27.04
$\frac{L_0}{L_1}/\%$	96.3	97.5	98.7	98.3	98.9	98.8	98.0	98.1	98.1
$L_1 \times 98\%$	11.04	14.67	17.81	20.47	22.64	24.33	25.53	26.25	26.49
T_1/kN	277.3	314.1	303.6	307.5	302.6	305.6	309.9	308.8	309.3
T_0/kN	260	310	310	310	310	310	310	310	310
$\frac{T_1}{T_0}/\%$	106	101.3	97.9	99.2	97.6	98.6	99.9	99.6	99.8

在初步对吊杆计算长度 l_0 进行识别以后,再把该识别长度与上、下锚固点之间的距离 L_1 进行比较,可以

看出 l_0 与 L_1 有很好的线性相关关系, l_0/L_1 比值大约在98%左右。如果以 $0.98L_1$ 作为第1次识别值 l_0 的修正值,并以此代入公式(6)可计算出相应的计算张力值 T_1 。由表4中的计算张力值与初始实测张力值的比较值可以看出,两者比较吻合,误差约在-2.6%~+6%。

因此,在吊杆减振器安装以前,吊杆计算长度可取 $l_0 = 0.98L_1$,即与吊杆的上、下锚固点之间的距离相当接近。

2.3 高阻尼减振器对张力测试的影响

由于吊杆在风、雨等激励的作用下,极易产生各种各样的振动。这些振动现象或引起吊杆中应力交替变化,造成吊杆疲劳,或导致行人不安,甚至使人们对吊杆承重结构产生怀疑。因此,南河大桥在吊杆上、下端都安装了高阻尼减振器。为了获得安装减振器以后准确的张力值,需要识别吊杆减振器对张力测试的影响。

下面对减振器系统对吊杆计算长度值影响予以识别。假定吊杆在安装减振器前的状态记为0状态,并假设以式(2)计算张力,则有:

$$T_0 = \frac{4W}{g} f_{10}^2 l_0^2 \left[1 - 2.206 \frac{C_0}{f_{10}} - 0.552 \left(\frac{C_0}{f_{10}} \right)^2 \right], \quad (7)$$

减振器安装后的状态记为1状态,则有

$$T_1 = \frac{4W}{g} f_{11}^2 l_1^2 \left[1 - 2.206 \frac{C_1}{f_{11}} - 0.552 \left(\frac{C_1}{f_{11}} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

如表5为减振器安装前、后吊杆固有频率表。假定减振器的安装过程对张力的影响忽略不计,则有 $T_0 = T_1$ 。依据式(7)、(8)关于 l_1 的方程,可求出高阻尼减振器对吊杆计算长度的影响,即最后安装减振器以后采用的吊杆计算长度值,参见表6。

表5 安装阻尼器前后吊杆1阶自振频率

Tab.5 The first-order natural vibration frequency before and after damper installation

吊杆编号	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_{10}/Hz	7.598	6.195	5.292	4.310	4.174	3.390	3.700	3.299	2.955
f_{11}/Hz	8.901	6.623	5.631	4.700	4.498	3.645	3.945	3.526	3.220

注: f_{10} 和 f_{11} 分别为安装阻尼器前后吊杆固有基频

表6 安装阻尼器前后吊杆计算长度识别值 l_1

Tab.6 The identification value of calculation length l_1 before and after damper installation

吊杆编号	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L_0/m	11.04	14.67	17.81	20.47	22.64	24.33	25.53	26.25	26.49
L_{11}/m	9.68	13.83	16.83	18.91	21.12	22.75	24.04	24.67	24.47
L_2/m	9.164	12.935	16.204	18.970	21.233	22.993	24.250	25.005	25.256
$\frac{L_{11}}{L_2}/\%$	105.6	106.8	103.8	99.7	99.4	98.9	99.1	98.6	96.9

由表 6 可知, 安装减振器以后的吊杆计算长度 L_{j1} 与拱肋中心点到系梁中心点之间的距离 L_2 比较接近, 即可取 $l_{j1} = L_2$ 。

3 吊杆张力实测比较

运用上面介绍的吊杆张力测试方法, 对南河特大桥施工全过程中吊杆张力进行测试。在每个施工工况结束后, 都对吊杆张力进行测量, 并与计算值对比, 以便在施工中及时发现问题, 并尽早解决。现将下游幅桥若干施工阶段部分吊杆的张力监测值与计算值列出, 如表 7、表 8、表 9 所示。

表 7 拆除系杆支架后吊杆张力

Tab. 7 The tension of hanger rods after removing the bracket of tied-beam

吊杆编号	2	3	4	5	6	7	8	9	10
基频 /Hz	6.220	4.730	3.800	2.740	2.990	2.240	2.690	2.500	1.930
实测张力/kN	352	430	425	281	500	295	495	439	274
计算张力/kN	372	395	445	316	473	318	452	417	271
比值/%	94.6	108.9	95.5	88.9	105.7	92.8	109.5	105.3	101.1

注: 比值 = 实测张力/计算张力 (表 8、表 9 同)

表 8 安装中横梁后吊杆张力

Tab. 8 The tension of hanger rods after installation of middle lateral beam

吊杆编号	2	3	4	5	6	7	8	9	10
基频 /Hz	6.720	5.253	4.583	3.480	3.450	2.694	3.104	2.950	2.448
实测张力/kN	440	555	661	498	682	448	679	636	463
计算张力/kN	480	549	616	490	649	492	620	579	431
比值/%	91.7	101.1	107.3	101.6	105.1	91.1	109.5	109.8	107.4

从表 7~9 可以看出, 实测张力和计算张力很接近, 说明用式 (2) 计算柔性吊杆张力是可行的, 也说明各施工阶段吊杆张力符合设计要求。

4 结语

(1) 以吊杆振动方程为基础, 详细讨论了边界条件、弯曲刚度、高阻尼减振器等因素对系杆拱桥柔性

表 9 系杆第 3 批预应力张拉后吊杆张力

Tab. 9 The tension of hanger rods after the third-group prestress tendon stretching in tied-beam

吊杆编号	2	3	4	5	6	7	8	9	10
基频 /Hz	6.890	5.493	4.730	3.730	3.600	2.956	3.210	3.080	2.610
实测张力/kN	471	617	710	584	747	551	731	700	532
计算张力/kN	503	581	655	537	703	553	686	647	498
比值/%	93.6	106.2	108.4	108.8	106.3	99.6	106.6	108.2	106.8

吊杆张力测试的影响, 提出了吊杆张力测试实用计算公式, 并与实测结果进行对比, 证明了实用解析公式的可靠性。

(2) 研究表明, 对于计算跨径在 130 m 以下的系杆拱桥, 锚固端对吊杆的刚度约束较大, 吊杆张力测试计算时其两端边界条件按固结处理较合理。

(3) 研究表明, 在吊杆的减振器安装前, 吊杆计算长度与上、下锚固端之间的距离 L_1 很接近, 实际可取计算长度 $l_0 = 0.98 L_1$; 在减振器安装以后, 吊杆计算长度与拱肋中心点到系杆中心点之间的距离 L_2 很吻合, 实际可取计算长度 $l_0 = L_2$ 。

(4) 通过现场张力标定, 提出吊杆若干参数的识别方法, 有效地提高了张力测试的精度并大大减少了标定的工作量, 同时对吊杆安装阻尼器对吊杆计算长度的影响进行了识别。

参考文献:

- [1] 张秀成, 谢奎, 任毅勇. 浅析宜宾市小南门金沙江大桥桥塌原因与修缮方案 [J]. 河南城建高等专科学校学报, 2002, 11 (2): 35 - 41.
- [2] 吴海军, 陈思甜, 等. 斜拉桥张力测试方法研究 [J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20 (4): 23 - 25.
- [3] HIRONAKA ZUI, et al. Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method [J]. Journal of structural engineering, 1996, 120 (4): 77 - 82.
- [4] 朱卫国, 申永刚, 项贻强, 张亚飞. 梁拱组合体系桥柔性吊杆张力测试 [J]. 中南公路工程, 2004, 29 (1): 21 - 23.
- [5] 王卫锋, 韩大建. 斜拉桥的张力测试及其参数识别 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2004, 29 (1): 18 - 21.
- [6] 胡利平, 凌育洪. 脉动法张力测量技术及相关参数分析 [J]. 中南公路工程, 2004, 29 (4): 56 - 61.