

# 郑万铁路梅溪河特大桥缆索吊装系统荷载试验研究

田仲初<sup>1</sup>, 黄欢<sup>1\*</sup>, 李国华<sup>2</sup>, 杨世湘<sup>3</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.中铁上海工程局建筑公司; 3.湖南省中南桥梁安装工程有限公司)

**摘要:** 梅溪河特大桥是郑万铁路全线重点控制工程,为了验证梅溪河特大桥缆索吊装系统的安全性能,该文基于分段悬链线理论、滑移刚度法对缆索系统进行了验算;同时采用有限元软件对缆塔进行了验算;在缆索吊装系统投入使用前进行了荷载试验,试验中结合在线监测与离线监测方法,测量了承重索垂度和索力、塔顶偏位和缆塔应力、锚碇位移等。试验数据与理论计算值对比分析的结果表明:结合分段悬链线理论及滑移刚度法的缆索系统计算方法准确度高,计算结果可靠;锚碇偏置的特殊缆索吊装系统单线吊重时塔顶会有较大横向偏位,缆塔验算时需要考虑锚碇偏置的影响;该桥缆索吊装系统各部件强度、刚度与稳定性符合设计与规范要求。

**关键词:** 缆索吊装系统;分段悬链线;滑移刚度;荷载试验

随着中国桥梁的大规模建设,存在大量节段吊装施工作业,而缆索吊装系统具有对各种环境适应能力强,起吊能力大等优点,因此缆索吊装系统越来越广泛地应用于桥梁建设领域。

以往工程中,承重索的计算通常采用基于单跨抛物线理论的张力状态方程,忽略了边跨对中跨的影响,有学者提出了将三跨整体考虑的抛物线张力状态方程,这对于较小跨径的缆索系统是足够精确的,但梅溪河特大桥为中国国内在建跨度最大的无砟轨道高铁拱桥,该桥缆索吊装系统的跨径和起吊能力都较大,采用传统算法难以满足工程要求。

该文基于悬索桥中常用分段悬链线计算方法,综合考虑承重索在轮转式索鞍中的滑移,精确计算缆索吊装系统,为荷载试验提供理论支撑。该文通过郑万铁路梅溪河特大桥缆索吊装系统荷载试验研究,对大跨度桥梁施工中缆索吊装系统的设计及推广提供参考。

行走天车、吊具、起重及牵引卷扬机、自动化控制系统等组成(图1)。郑州侧缆塔正后方位置为高铁隧道,锚碇只能布置在缆塔斜向两侧,呈八字形。在单线吊重时,主缆会对缆塔产生较大的侧向水平拉力,引起缆塔顶部明显的横向位移,给施工增加了难度和复杂性,为确保缆索吊装系统施工过程中的安全,在计算时考虑了锚碇偏置引起的缆塔侧向拉力。

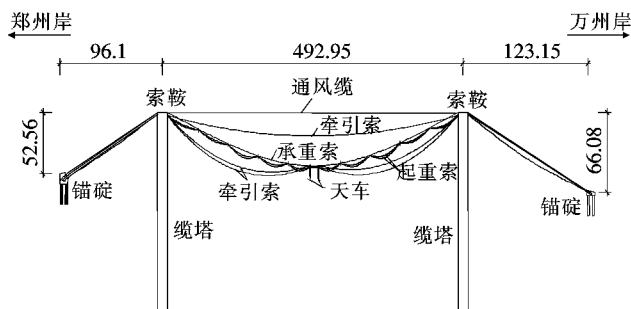


图1 梅溪河特大桥缆索吊装系统布置(单位:m)

## 1 工程概况

河南郑(州)重庆万(州)铁路梅溪河特大桥的缆索吊装系统跨径492.95 m,额定吊重150 t,设计垂度 $L/15$ ,主要由缆塔、锚碇、承重索、起重索、牵引索、索鞍、

## 2 荷载试验理论分析及试验对象

### 2.1 缆索系统验算

#### (1) 悬链线基本方程

图2为无集中力荷载作用的柔性索曲线,只受沿

收稿日期:2019-12-25(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51478049);湖南省科技创新计划项目(编号:2018TP2058)

作者简介:田仲初,男,博士,教授,E-mail:tianzhongchu@163.com

\*通信作者:黄欢,男,硕士研究生,E-mail:718089266@qq.com

索均布的竖向荷载作用,采用满足力学平衡条件和变形相容条件的索曲线线形方程——悬链线。其线形方程为:

$$Y = \frac{qS_0^2 - 2VS_0}{2EA} - \frac{1}{q} [\sqrt{V^2 + H^2} - \sqrt{(V - qS_0)^2 + H^2}] \quad (1)$$

$$X = \frac{HS_0}{EA} + \frac{H}{q} \{ \ln(V + \sqrt{V^2 + H^2}) - \ln[V - qS_0 + \sqrt{(V - qS_0)^2 + H^2}] \} \quad (2)$$

式中:  $q$  为自重均布荷载;  $EA$  为抗拉刚度;  $S_0$  为无应力长度;  $X$ 、 $Y$  为索曲线坐标;  $H$  为水平张力;  $V$  为左端竖向反力。

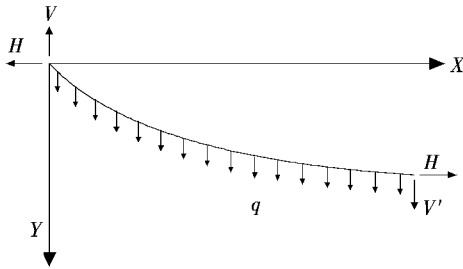


图 2 无集中力的柔性索曲线单元

承重索吊重时,可等效于柔性索受竖向集中外荷载作用。当受到竖向集中荷载作用时,柔性索线形可看作多段柔性索连接,并在连接处作用集中荷载,如图 3 所示。

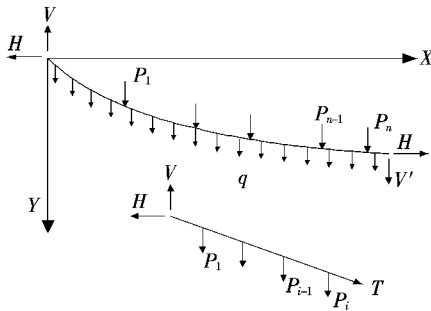


图 3 集中竖向力作用下的柔性索曲线

柔性索分段悬链线线形方程为:

$$V_i = V_{i-1} - P_i - qS_{0i-1} \quad (3)$$

$$H_i = H_{i-1} = \dots = H \quad (4)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + \frac{qS_{0i-1}^2 - 2V_{i-1}S_{0i-1}}{2EA} - \frac{1}{q} \cdot (\sqrt{V_{i-1}^2 + H^2} - \sqrt{(V_{i-1} - qS_{0i-1})^2 + H^2}) \quad (5)$$

$$X_i = X_{i-1} + \frac{HS_{0i-1}}{EA} + \frac{H}{q} \{ \ln(V_{i-1} +$$

$$\sqrt{V_{i-1}^2 + H^2}) - \ln[V_{i-1} - qS_{0i-1} + \sqrt{(V_{i-1} - qS_{0i-1})^2 + H^2}] \} \quad (6)$$

式中:  $i=1,2,3,\dots,n$ ;  $V_i$  为柔性索  $i$  点右端竖向张力;  $H_i$  为柔性索  $i$  点右端水平张力;  $S_{0i}$  为柔性索  $i$  点右端无应力长度;  $X_i$ 、 $Y_i$  为柔性索  $i$  点坐标。

(2) 柔性索在轮转式索鞍中滑移的索长调整

将  $KT_A$  和  $KT_B$  定义为滑移刚度,其力学含义是柔性索无应力索长改变单位长度时所引起的索端 A、B 索力增量(图 4)。 $T_A$ 、 $T_B$  为索段两端张力,放松索鞍支点,让其自由滑动,直至索鞍支点两端索力相等,当索由 A 端向 B 端滑移时,自由滑动量  $\Delta l$  可用下式计算:

$$\Delta l = -\frac{T_B - T_A}{KT_B + KT_A} \quad (7)$$

式中滑移刚度可采用简化方法计算,具体步骤如下:① 假定各点不滑移,用式(1)、(2)计算出 A、B 端索段无应力索长  $S_{0A}$ 、 $S_{0B}$ ,索端张力  $T_A$ 、 $T_B$  等参数;② 给予索段一微小滑移  $\Delta s$ ,例如  $\Delta s = 0.1 \text{ mm}$ ,此时无应力索长  $S_1 = S_0 + \Delta s$ ,继续用悬链线方程计算已知无应力长度下的索端张力  $T_A^1$ 、 $T_B^1$ ;③ 滑移刚度  $KT = (T^1 - T) / \Delta s$ ;④ 计算自由滑动量  $\Delta l$ ,将无应力长度改变量分配至各跨,重新计算索端张力  $T_A^2$ 、 $T_B^2$ ,若此时索鞍支点两端索力差值处于容许范围,结束计算。否则重复步骤①~④。采用上述方式计算的滑移刚度精度可以满足工程要求,且避免了复杂的偏微分方程求解。

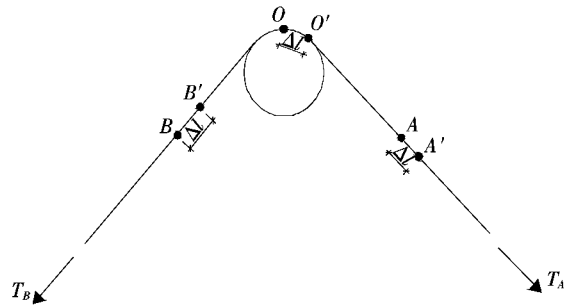


图 4 索段滑移计算示意图

(3) 缆索系统各施工阶段计算

一般由设计给出额定吊重下承重索的跨中垂度,先进行跨中承重索计算,假定一组初始  $[H, V]^T$ ,然后利用式(3)~(6)递推求解出中跨各段索曲线状态,此时终段索曲线高程一般不收敛,可用下式修正  $[H, V]^T$  值:

$$\begin{bmatrix} dH \\ dV \end{bmatrix} = \frac{1}{\xi} \begin{bmatrix} \frac{\partial Y}{\partial V} & \frac{\partial X}{\partial V} \\ \frac{\partial Y}{\partial H} & \frac{\partial X}{\partial H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX \\ dY \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\xi = \frac{\partial X}{\partial H} \frac{\partial Y}{\partial V} - \frac{\partial X}{\partial V} \frac{\partial Y}{\partial H}$$

式中各项偏导数据根据式(1)、(2)可求得,修正索力 $[H, V]^T = [H + dH, V + dV]^T$ ,将其代入式(3)~(6),进行迭代计算,直至终段索曲线高程收敛。

计算完中跨承重索各项参数后,进行边跨承重索计算。忽略缆塔的偏转和索鞍摩擦,索力在索鞍处连续,即边跨塔顶索力等于中跨塔顶索力,此时已知中跨塔顶承重索张力,将边跨塔顶处 $H$ 用式(9)代换后,代入式(1)、(2),可求出边跨承重索各项参数。至此,获得额定吊重下各跨承重索全部参数。

$$H = \sqrt{T^2 - V^2} \quad (9)$$

缆索系统空载状态计算时,在额定吊重下的无应力总长度不会改变,承重索空载状态相对于额定吊重状态而言,中跨承重索处于卸载状态,索力变小,边跨外荷载没有改变,索力不变,因此中跨柔性索会向边跨滑移,各跨无应力长度需要按总长不变原则进行重新调整,按上述滑移刚度计算步骤迭代计算索鞍处无应力长度改变量,而后求出各项参数,至此求出承重索空载线形,确定承重索安装垂度与初始张力。

## 2.2 缆塔验算

缆塔系统采用 Midas/Civil 建立有限元杆系结构模型计算。边界条件为塔底固结,缆索系统对缆塔的作用力按集中荷载形式施加在塔顶,与一般缆塔计算不同的是,郑州岸锚碇偏置,导致边跨缆索偏转,会产生侧向水平分力,其值可按下式计算:

$$H_{\text{侧}} = T \cos \alpha \quad (10)$$

式中: $T$ 为缆索系统在塔顶总张力; $\alpha$ 为锚碇偏置角度。

## 2.3 试验内容

荷载试验检测项目包括缆塔应变、塔顶偏位、承重索垂度、承重索索力、锚碇位移测量和结构目测检查。根据规范及设计要求,荷载试验采用4级加载,荷载等级分别为标准荷载的50%、100%、110%、125%,配重分别为75、150、165和187.5 t,采用钢筋打捆方式配重;其中前3级荷载为动载试验,吊重需在拱桥全跨范围内移动,第4级荷载为静载试验,吊重在跨中起吊,起吊时尽量避免出现冲击现象。试验时先上、下游单独单线试验,检验缆塔抗扭性能;再进行双线联动试验,检验缆索吊机系统的强度、刚度和稳定性。试验时,直接在岸边驳船起吊试验配重钢筋,当吊重钢筋分别移动至1/4跨和1/2跨时,静置30 min,各组进行结构目测检查及采集数据。

## 2.4 试验方法

采用基于通用无线分组业务的在线监测系统测量缆塔应变和锚碇位移,可以实时获取任意加载状态的应变值及位移值。缆塔应变测点布置在缆塔根部与中部截面的缆塔立柱上;锚碇位移测点布置在锚碇前端,需要在锚前土体中提前打入钢管,电子位移计底座焊接在钢管上。

采用传统的离线监测方式测量承重索垂度、索力和塔顶偏位。采用频率法测量钢丝绳索力,由于索鞍中跨方向索力测量不方便,而索鞍处索力有连续性,只测量索鞍边跨方向索力,此处是承重索最大张力位置。使用全站仪测量承重索垂度及缆塔顶部偏位,在测量垂度时,采用无棱镜模式测量承重索垂度。

# 3 试验结果和分析

## 3.1 承重索垂度及索力

试验时,上下游侧各测量4根承重索,其平均索力及垂度监测结果见表1。

表1 承重索垂度及索力监测结果

荷载等级		承重索垂度/m		误差/ %	承重索索力/kN		误差/ %
		实测值	理论值		实测值	理论值	
空载		25.79	25.91	0.40	322.60	319.71	−0.90
50%	1/4 跨	18.78	19.11	1.71	556.91	525.7	−4.03
	1/2 跨	29.95	30.44	1.59	686.31	670.52	−2.35
100%	1/4 跨	24.18	24.74	2.26	690.91	650.91	−4.61
	1/2 跨	32.57	32.67	0.32	850.26	835.56	−1.76
110%	1/4 跨	24.61	25.20	2.35	728.49	701.19	−3.89
	1/2 跨	32.94	33.08	0.41	879.16	866.98	−1.55
125%	1/2 跨	33.42	33.66	0.70	862.55	848.67	−1.49

由表 1 可知:空载状态下,垂度与索力的误差在 1%以内;吊重在 1/4 跨时,垂度和索力误差分别在 2.35%、4.61%以内;吊重在 1/2 跨时,垂度和索力误差分别在 1.59%、2.35%以内。采用分段悬链线理论计算的承重索各项理论值与实测值基本吻合,变化趋势及规律基本一致,计算结果较为可靠,误差均在工程允许的范围之内。

3.2 塔顶偏位

50%和 100%级单线 1/2 跨吊重试验中,以加载前的空载状态为初值,郑州侧塔顶横向偏位如图 5 所示。

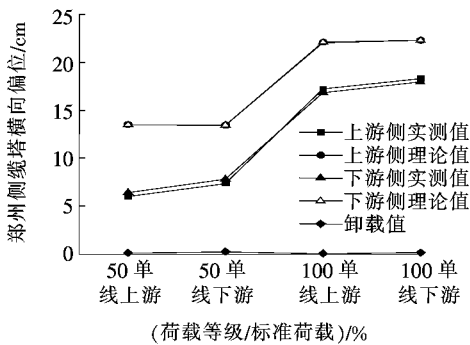


图 5 塔顶横向偏位(郑州侧)

由图 5 可以看出:塔顶横向偏位随荷载等级增加而越来越大,最大横向位移实测值为 17.22 cm;横向偏位实测值小于理论值,卸载后残余变形小,缆塔横向刚度良好,实际横向刚度大于计算刚度。塔顶横向偏位产生的原因是由于锚碇偏置,单线吊重时吊重侧边跨缆索会对缆塔产生较大侧向水平拉力,而另一侧缆索处于空载状态,侧向水平拉力较小,两侧不平衡侧向水平拉力由缆塔平衡,导致缆塔产生横向偏位。可采取增加侧风缆措施,并进行适当张拉,以减小塔顶横向偏位。

双线加载 1/2 跨吊重试验中,缆塔相对于空载状态的塔顶纵向偏位如图 6、7 所示。

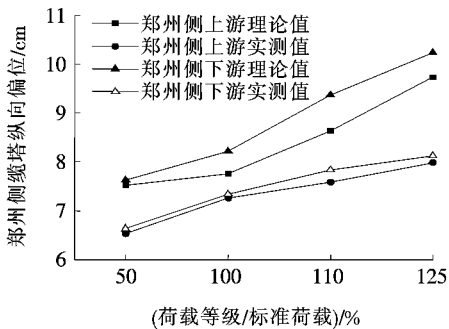


图 6 郑州侧塔顶纵向偏位

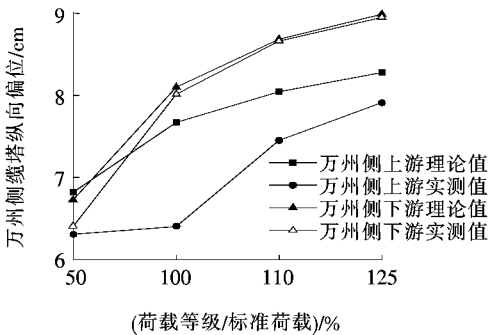


图 7 万州侧塔顶纵向偏位

由图 6、7 可以看出:① 郑州侧上、下游最大理论纵向偏位分别为 9.13、10.23 cm,最大实测纵向偏位为 7.98、8.12 cm;② 万州侧上、下游最大理论纵向偏位分别为 8.28、8.93 cm,最大实测位移为 7.91、8.95 cm。缆索吊装系统加载对缆塔纵向偏位影响明显。建议在缆索吊装系统使用前,使缆塔向锚碇预偏一定数值,以确保缆索吊机加载时,缆塔变形处在安全范围内。

3.3 缆塔应力和锚碇位移

(1) 缆塔应力

在单线加载时,以空载状态为初值,郑州侧缆塔吊重塔底立柱在各个工况下应力增量情况如表 2 所示,单线加载时缆塔最大实测应力增量为-47.89 MPa。

表 2 单线加载郑州侧缆塔应力增幅		MPa	
荷载等级/标准荷载		应力增量/MPa	
		实测值	理论值
50%(1/2 跨)	单线上游	-23.68	-26.31
50%(1/2 跨)	单线下游	-25.31	-27.13
100%(1/2 跨)	单线上游	-46.62	-50.47
100%(1/2 跨)	单线下游	-47.89	-51.64

在双线加载时,以空载状态为初值,郑州侧缆塔塔底截面在各个工况下应力增量情况如图 8 所示。

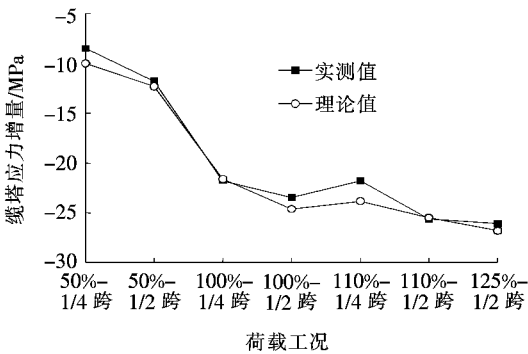


图 8 双线加载郑州侧缆塔应力增幅

由图 8 可知:加载全过程中,缆塔底部一直处于压应力状态;在吊重为 125%标准荷载时,缆塔应力增量最大,数值为 26.1 MPa;实测值与理论值变化趋势一致,略小于理论值;在空载状态时,缆塔塔底最大实测应力为-46.72 MPa,试验过程中,单线加载缆塔最大应力为-94.61 MPa,双线加载缆塔最大应力为-72.82 MPa,缆塔构件均为 Q345 钢材,强度处在安全范围内。

#### (2) 锚碇位移

在试验过程中,两岸锚碇位移方向均为垂直锚面向中跨微动,位移计测量锚碇微小变位值为 0.095~0.151 mm,且卸载后两岸锚碇变位基本复位,锚碇变形为受力后的弹性变形,没有刚体位移,锚碇结构安全。

## 4 结 论

通过对郑万铁路梅溪河双线特大桥缆索吊装系统荷载试验研究,得出以下结论:

(1) 基于分段悬链线理论,并且在空索状态的计算中引入滑移刚度的承重索索力及垂度计算值与实测值吻合较好,准确度较高,结果可靠,可以满足工程要求。

(2) 锚碇布置形式为八字形缆索吊装系统,单线加载时塔顶横向偏位较大,试验中最大横向偏位为 17.22 cm,缆塔计算需要考虑锚碇偏置的影响。若单线吊装时缆塔承载力不足,可通过增加侧风缆,并进行适当张拉的措施,减小缆塔横向偏位。

(3) 在额定吊重下,缆吊系统各部件强度、刚度与稳定性符合设计及规范要求。郑万铁路梅溪河特大桥缆索吊装系统整体受力性能良好,已达到设计及相应规范的要求。

#### 参考文献:

- [1] 常文,朱东升,刘德敬,等.山区大跨径悬索桥施工缆索吊机总体设计[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016(5).
- [2] 许红胜,颜东煌,冉茂学.桥梁施工缆索吊机承载索的设计研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2009(5).
- [3] 冉茂学,许红胜.山区大跨悬索桥施工缆索吊机的设计要点[J].中外公路,2009(4).
- [4] 陈璨.千米级悬索桥缆索吊系统性能分析研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2016.
- [5] 余群.缆索起重机的仿真与优化设计研究[D].武汉理工大学硕士学位论文,2002.
- [6] 唐茂林,强士中,沈锐利.悬索桥成桥主缆线形计算的分段悬链线法[J].铁道学报,2003(1).
- [7] 唐茂林.大跨度悬索桥空间几何非线性分析与软件开发[D].西南交通大学博士学位论文,2003.
- [8] 聂建国,陈必磊,肖建春.多跨连续长索在支座处存在滑移的非线性静力分析[J].计算力学学报,2003(3).
- [9] 彭成明,陈富强,陈鸣.宁波明州大桥 400 t 缆索吊机设计与施工[J].中外公路,2011(5).
- [10] Liu Zhong, Li Fang, Roddis WMK. Analytic Model of Long-Span Self-Shored Arch Bridge[J].Journal of Bridge Engineering, 2002, 7(1): 14-21.
- [11] Choi D H, Gwon S G, Hoon Yoo. Nonlinear Static Analysis of Continuous Multi-Span Suspension Bridges [J].International Journal of Steel Structures, 2013, 13(1): 103-115.
- [12] 黄绍结,李莘哲.红水河特大斜拉桥中跨钢主梁缆索吊装施工关键技术[J].中外公路,2017(3).
- [13] 敬超,郑久建,丁松.空间索面悬索桥主缆线形计算理论探讨[J].中外公路,2017(4).
- [14] 陈林强,王立彬,李立斌.基于振动特性的三塔悬索桥主缆损伤识别研究[J].中外公路,2018(4).