

## 大跨度悬索桥缆索吊装系统承重索性能分析\*

田仲初, 李真颜, 黄欢

(长沙理工大学土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 缆索吊装系统因其对环境适应能力强、吊重大的独特优势, 在大跨度悬索桥施工中应用越来越普遍。文中结合重庆某大桥缆索吊装系统, 对比分析不同计算方法、设计垂跨比和初始安装误差对缆索吊装系统承重索性能的影响, 揭示其受力规律。结果表明, 在实际工程中采用抛物线法对承重索进行计算可满足精度要求; 不同设计垂跨比对承重索索端张力与跨中挠度有较大影响; 承重索初始安装误差对其受力与跑车运行平稳性的影响较小。

**关键词:** 桥梁; 悬索桥; 缆索吊装系统; 承重索

中图分类号: U445.46

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)05-0100-03

随着中国桥梁的大规模建设, 大跨径悬索桥愈来愈多。加劲梁吊装是悬索桥施工中关键工序, 目前主要采用缆载吊机、缆索吊机、桥面吊机及轨索滑移等方式, 其中缆索吊装法对各种环境的适应能力强、起吊能力大, 能将节段精准定位, 是一种适宜的加劲梁吊装方式。缆索吊装系统可直接使用原桥的桥塔与锚碇, 由于桥塔与锚碇是针对全桥进行设计, 其使用风险性极低; 而承重索需单独设计施工, 其风险性较大。该文研究悬索桥施工中缆索吊装系统的承重索计算方法及设计垂跨比和初始安装误差对其性能的影响, 为大跨度悬索桥缆索吊装系统承重索设计和施工提供参考。

## 1 工程概况

重庆某大桥缆索吊装系统采用双塔三跨设计,

跨度设计为 233.25 m (北岸) + 739 m + 240.82 m (南岸), 设计最大吊装重量为 250 t, 垂跨比为 1/14。采用 2 组承重索进行加劲梁吊装, 其横向间距为 10 m, 每组平行布置 10 根直径 60 mm 的钢丝绳, 相邻单根承重索间距为 124 mm, 每组承重索上设置 2 辆起重跑车。采用原桥已修建的主塔为缆索吊装系统的塔架, 承重索索鞍安放于主塔的上横梁上部, 南北两岸承重索均锚固于原桥重力锚顶部, 左右幅承重索锚固系统以桥梁中心线对称布置。钢箱梁在预制工厂制作, 通过水路运输至施工现场, 利用缆索吊装系统吊运从跨中向两端对称安装, 直至合龙。缆索吊装系统布置图 1。

## 2 中跨承重索受力分析

承重索由钢丝绳组成, 相对抗弯刚度较小, 其受

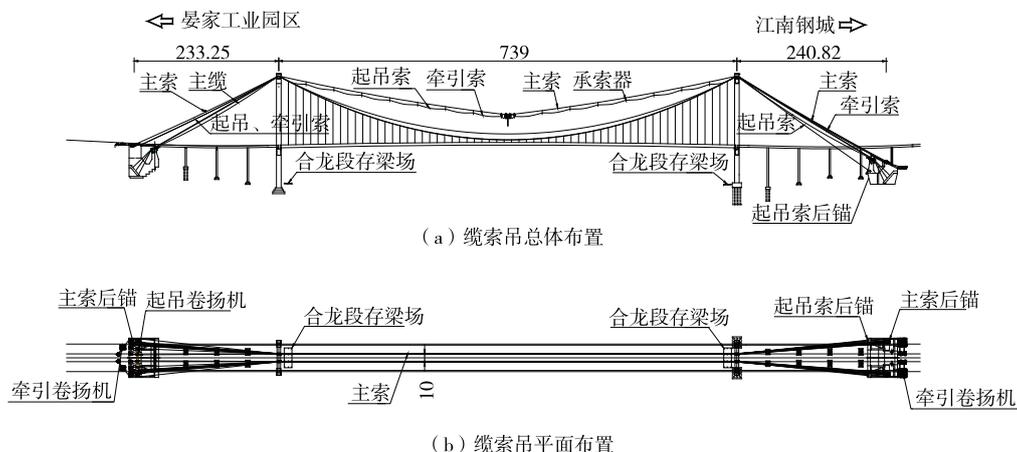


图 1 重庆某大桥缆索吊装系统的布置(单位:m)

\* 基金项目: 湖南省科技创新计划项目(2018TP2058)

力特点可认为是完全柔性。空索状态下,承重索只受自重荷载的作用。根据索所受自重荷载的分布形式,其线形计算方法分为悬链线法与抛物线法,前者假定自重荷载沿索的弧长均布,后者假定自重荷载沿索的弦线均布。不管采用哪种计算方式,其线形与内力都是一一对应的。悬链线法的计算公式为:

$$f = \frac{H}{q} \left( \cosh \frac{ql}{2H} - 1 \right)$$

抛物线法的计算公式为:

$$H = \frac{ql^2}{8f}$$

式中: $H$ 为承重索水平力; $q$ 为承重索自重集度; $f$ 为跨中垂度; $l$ 为承重索跨度。

显然,悬链线理论的假定更贴合实际情况。抛物线理论的假定则作了适当简化,计算更方便,不用计算复杂的双曲函数,便于在工程实际中进行推广。为研究两种计算方法的差别,按两种方法分别计算重庆某大桥缆索吊装系统中跨承重索的受力并进行比对分析。该桥缆索吊装系统中跨两端点等高、跨径739 m,单根承重索自重均布荷载集度为0.154 kN/m。计算结果见表1和图2。

表1 两种算法水平力计算结果对比

垂跨比	跨中垂度/m	水平力/kN		两算法的误差率/%
		抛物线法	悬链线法	
1/20	36.950	284.515	285.458	0.33
1/19	38.895	270.287	271.280	0.37
1/18	41.056	256.061	257.108	0.41
1/17	43.471	241.835	242.943	0.46
1/16	46.188	227.610	228.785	0.51
1/15	49.267	213.385	214.638	0.58
1/14	52.786	199.159	200.500	0.67
1/13	56.846	184.935	186.376	0.77
1/12	61.583	170.710	172.268	0.90
1/11	67.182	156.483	158.178	1.07

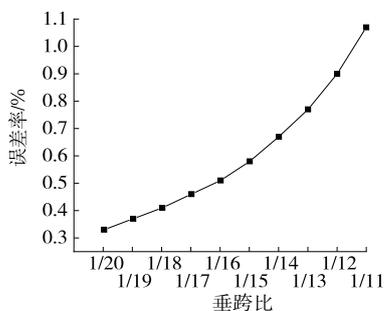


图2 两种算法的水平力误差曲线

表1及图2表明:跨径一定时,抛物线算法与悬

链线算法的相对误差随着承重索跨中垂度的增加而增大,其总体相对误差较小,即便承重索垂跨比达到1/11,两种算法的误差仍在1%左右。实际工程中,承重索垂度设计需考虑诸多因素,其决定牵引索和承重索的受力状况,也影响缆塔高度;缆索吊装系统的承重索设计垂跨比大都按照经验取值,一般取1/14~1/20,属于低垂跨比。因此,两种算法得出的结果相差更小,采用抛物线法进行承重索计算也可满足工程要求。

### 3 承重索设计垂跨比分析

中跨承重索不同的设计垂跨比对承重索受力及挠度有较大影响,小的垂跨比有利于减小缆塔高度和牵引索索力,但会增大承重索索力。为探讨不同承重索垂跨比对缆索吊装系统的影响,以重庆某大桥缆索吊装系统为原型,建立1/6~1/30共25种垂跨比的有限元模型进行计算分析。图3、图4分别为不同垂跨比时中跨承重索的索端张力及跨中挠度变化情况。

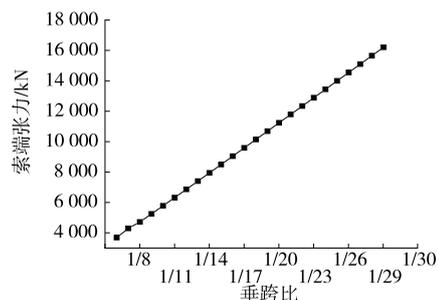


图3 索力与垂跨比关系曲线

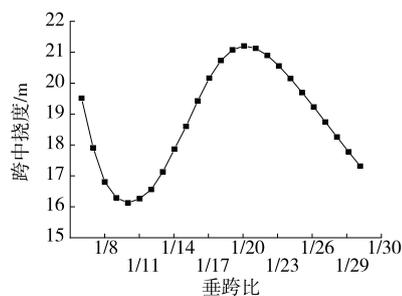


图4 跨中挠度与垂跨比关系曲线

由图3、图4可知:1) 承重索索力基本呈线性增加,即较大的垂跨比对承重索结构受力有利,可减小承重索用量。2) 跨中挠度的变化情况则较复杂,呈非线性变化趋势。垂跨比为1/10时,集中荷载产生的跨中挠度最小,为16.812 m;垂跨比减小时,集中荷载产生的跨中挠度急剧增加;垂跨比减小到1/20时,跨

中挠度增大到 21.221 m,再减小,挠度开始减小。设计时垂跨比不会选择太小,因为这会使承重索受力急剧增大,如该桥缆索吊装系统垂跨比为1/10时中跨承重索张力为 5 775.4 kN,设计垂跨比为 1/25 时中跨承重索张力为 14 004.8 kN,几乎是 1/10 时的 2.5 倍。因此,从承重索自身受力角度考虑,设计时按照经验取值的垂跨比不应低于 1/20。

#### 4 承重索安装误差分析

缆索吊装系统是施工临时结构,其承重索安装方式有并联和串联两种。其中:并联施工方法安装要求高,需单独调整每根承重索的垂度;串联施工方法施工简单,如北盘江大桥缆索吊装系统的承重索就是通过串联方式使各根承重索垂度相同,这样虽然较容易调整垂度,但会增大施工风险,一旦有部分承重索发生断裂等问题,整个系统都将遭到破坏。因此,如果选择串联方式,为降低风险,可将串联调整好的承重索再并联在一起。

承重索的安装精度一般要求在 5 cm 内,施工时一般采用全站仪无棱镜模式放样,会造成一定安装误差。为探究安装误差对缆索吊装系统的影响,以重庆某大桥缆索吊装系统为计算模型,计算垂度有差值的承重索在最大吊重工况荷载作用下达到同一垂度时的索力。安装垂度为实际理论垂度,和其有高差的另一承重索垂度分别取 -0.6、-0.4、-0.2、0.2、0.4、0.6 m(“-”表示比理论垂度低,“+”表示比理论垂度高),不同垂度承重索在承受外加荷载后达到同一水平高度。计算结果见表 2。

表 2 承重索不同安装误差下的索力

跨中垂度 差值/m	基准承重 索最大张 力/kN	偏差承重 索最大张 力/kN	张力差值/ kN	差值占比/ %
-0.6	871	839.62	31.38	3.60
-0.4	871	850.13	20.87	2.40
-0.2	871	861.13	9.87	1.13
0.2	871	881.36	-10.36	-1.19
0.4	871	891.86	-20.86	-2.39
0.6	871	902.07	-31.07	-3.57

表 2 表明:对于跨度 739 m 缆索吊装系统的承重索,安装误差在 0.2 m 左右时,单根承重索张力差值在 10 kN 左右,占比在 1%左右,即使安装误差达到 0.6 m,单根承重索最大张力差值也只有 30 kN 左右,占比不到 4%,而实际施工中承重索的安装误差不到 0.2 m。因此,承重索安装误差对承重索受

力的影响较小。

从起重跑车运行的平稳角度考虑,由于索结构大变形的特性,起重跑车与吊具等的重量很大,较易使有一定高差的承重索齐平,对起重跑车运行平稳性的影响不会太大,实际施工时可采用并联方式施工,以增加承重索的安全性。

#### 5 结论

(1) 缆索吊装系统的承重索设计垂跨比一般取 1/14~1/20,属于低垂跨比。在这个垂跨比范围内,抛物线法与悬链线法计算的承重索水平张力相对误差在 1%以内,可满足工程要求,且抛物线法计算简洁方便,而悬链线法计算复杂繁琐,推荐使用抛物线法进行悬索桥缆索吊装系统承重索计算。

(2) 承重索索端张力与垂跨比线性相关,张力随着垂跨比减小而线性增大;垂跨比为 1/6~1/30 时,在外部荷载作用下,随着垂跨比减小,承重索挠度呈现先减小再增大后又减小的非线性变化趋势,从承重索自身受力角度考虑,一般设计垂跨比不应低于 1/20。

(3) 承重索安装误差对承重索的受力与跑车运行平稳性的影响较小,实际施工中没有必要为减小安装误差而采用串联方式施工承重索,建议采用并联方式施工,以保证承重索的安全性。

#### 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),2016,35(5):13-16.
- [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),2009,28(5):837-839.
- [3] 李德钦,包建武,鲜正洪,等.900 m 大跨径缆索吊验算及荷载试验[J].公路与汽运,2009(1):131-133+151.
- [4] 陈璨.千米级悬索桥缆索吊系统性能分析研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [5] 唐茂林,宋晖,林洽,等.矢跨比对悬索桥受力的影响分析[J].建筑科学与工程学报,2010,27(3):24-28.
- [6] 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,2009,29(4):101-104.
- [7] 郭吉平.北盘江大桥缆吊系统及钢桁梁安装关键技术[J].世界桥梁,2011(6):22-25.