

缆索起重机主索垂度与主索及牵引索张力关系*

The relationship among sag of main cables of cable crane and the tension of main cables and hauling cables

黄扬雄¹ 林境川² 周成军³

(1 福建省特种设备检验研究院漳州分院 漳州 363000 2 漳州市先行交通建设有限公司 漳州 363000
3 福建农林大学交通与土木工程学院 福州 350002)

摘要：缆索起重机主索垂度的大小会直接影响主索、牵引索、背索、地锚及塔架的受力状况。主索垂度常根据经验取值，相关资料虽提供主索垂度的推荐范围，但未给出分析过程。通过分析主索垂度与主索及牵引索张力关系，使用Matlab软件绘图，显示三者之间关系；经分析得出适当增加主索垂度可以降低缆索起重机成本，为优选主索垂度提供科学依据；通过广西来宾市来华大桥的工程实例验证可行。

关键词：Matlab；缆索起重机；主索垂度；最优值
中图分类号：TD563

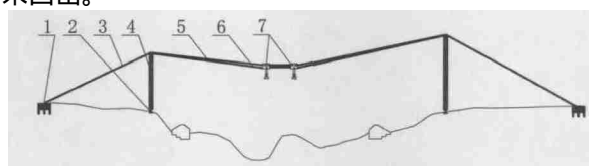
Abstract : In the design process of cable crane , the influences of sag of main cables on the main cables , hauling cables , anchorage and tower must be taken into account . At present , the value of sag is always determined by experience . Although some references give the recommend ranges of values of sag , they don't show the analysis process . This paper analyzes the relationship among sag of main cables , tension of main cables , and tension of hauling cables , then use graphical representation method to display their relationship . The conclusion is that appropriate increasing of the sag of main cables can reduce cost of cable crane , which provide scientific basis for getting optimal value of sag . The feasibility of this analysis is proved , by using the project example of Laihua Bridge in Laibin city , Guangxi Zhuang Autonomous Region .

Key words : Matlab ; cable crane ; sag of main cables ; optimal value

缆索起重机具有运距远、跨越能力强、水平和垂直运输灵活、适应性广、吊装能力大与比较经济等优点，在特殊的地形地质下，常用于拱桥吊装施工^[1]。缆索起重机主要包括主索、塔架、起重索、牵引索、背索及地锚等。其中，两个塔架之间作为起吊物的运输通道的缆索，一般称为承载索或者主索。主索的垂度决定了主索及牵引索的受力情况。主索的垂度常根据经验取值，一般取 $\frac{l_0}{18} \sim \frac{l_0}{14}$ （其中， l_0 为两塔架间的跨度）^[2]，但相关文献并未给出详细的分析过程，以下将对主索垂度与主索及牵引索张力关系进行研究。

1 缆索起重机整体结构

根据拱桥的结构及地形条件的不同缆索起重机有多种不同的形式，图1为典型的缆索起重机结构。为简明起见，起重索、扣索、缆风索等部件在图中未画出。



1.地锚 2.塔架基础 3.背索 4.塔架
5.主索 6.牵引索 7.起重跑车

图1 缆索起重机结构

*科研项目：福建省高校产学研重大资助项目(2010H6003)。

2 计算方法

2.1 主索计算

在架空索道设计中,悬链线被公认为是真实反映实际悬挂在两端固定式钢丝绳的线形,在单集中荷重作用下,悬索线形成2条平顺而又相连续的悬链线形^[3]。由于缆索起重机的矢跨比较小,沿曲线均布的自重荷载可以简化为在主跨内的水平均布荷载。主索具有较好的柔性,除在起重跑车行走轮及索鞍等处须验算主索的弯曲应力外,可假定主索只承受张力^[4]。若将两个起重跑车及其起吊物等效为一个集中荷载P,则缆索起重机的结构简图如图2所示,主索受力简图如图3所示。

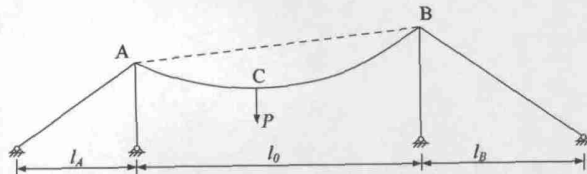


图2 缆索起重机结构简图

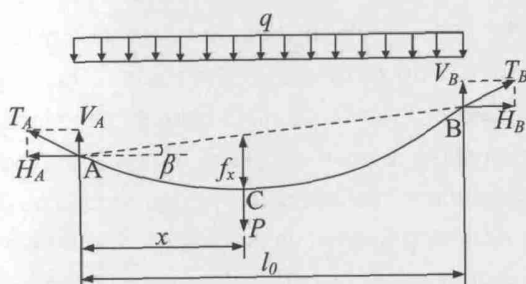


图3 主索受力简图

不考虑图1中两跑车的距离时,根据主索的垂度及曲线方程式可推导出当跑车位于跨中时,主索最大水平张力 H_{max} 的计算公式为^[4]

$$H_{max} = \frac{Pl_0 + \frac{ql_0^2}{8}}{f_{max}} \quad (1)$$

式中: H_{max} 为主索的最大水平张力; q 为两塔架间单位长度缆索的等效重量; f_{max} 为主索的最大垂度。以 f_{max} 为自变量,探析其对主索及牵引索张力的影响。

考虑两跑车间距离时,式(1)可修正为^[4]

$$H_{max} = \frac{Pl_0 + \frac{ql_0^2}{8}}{f_{max}} \quad (2)$$

式中: a 为两跑车间的距离。

由于 a 一般远小于 l_0 ,忽略 a 对主索张力计算结果的影响很小,因此实际计算中仍使用式(1)来计算主索的水平张力。

主索在任意处的水平张力相等^[4],因此

$$H_x = H_A = H_B \quad (3)$$

式中: H_x 为主索在任意处的水平张力。

由图3可知,主索在索鞍处的垂直分力可由下式求得^[4]

$$\begin{cases} V_A = \frac{1}{2}ql_0 + \frac{P(l_0 - x)}{l_0} - H \tan\beta \\ V_B = \frac{1}{2}ql_0 + \frac{Px}{l_0} + H \tan\beta \end{cases} \quad (4)$$

显然,跑车位于任意处时主索在索道高支点处的张力 T_{max} 最大^[4]。

$$T_{max} = T_B = \sqrt{H_x^2 + V_B^2} = f(x) \quad (5)$$

根据主索在不同的荷载(包括荷载的大小及位置的改变)作用下的张力变化,而引起的主索弹性变形与主索的弧长公式,可以求得主索的张力普遍方程式为^[4]

$$\begin{aligned} & H_x^3 + H_x^2 \left\{ \frac{E_k A_n \cos^2 \beta}{24} [P(P+G) + G^2] + H_{max} \right\} \\ & - \frac{x(l_0 - x)P_x(P_x + G)E_k A_n \cos^2 \beta}{2l_0^2} - \frac{G^2 E_k A_n \cos^2 \beta}{24} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: H_x 为跑车在任意位置时主索的水平张力; E_k 为主索的弹性模量; A_n 为主索的钢丝的截面总面积; P_x 为任意荷载($P_x \leq P$); x 为 P_x 与塔架的距离。由于温度变化、弹性伸长及支点位移对主索张力的影响极小,式(6)中未考虑其影响。

2.2 牵引索计算

牵引索拉动跑车沿主索运行,牵引索的张力大小与跑车所处的位置有关,如图4所示。

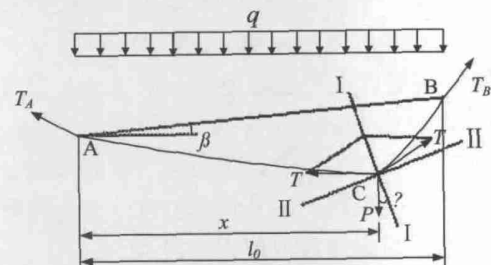


图4 牵引索受力示意图

根据图4,可求出跑车升角^[4]

$$\gamma = \arctan \left[\tan\beta + \frac{(2x - l_0)}{2H_x} \left(q + \frac{P}{l_0} \right) \right] \quad (7)$$

式中： H_x 可由式(6)求得。

跑车行走时，需要克服跑车运动阻力 W_1 ，起重索的运行阻力 W_2 以及后牵引索的自然松弛张力 W_3 ，这三者之和，即为牵引索所提供的牵引力 F_q 。

其中，跑车运动阻力为^[4]

$$W_1 = P \sin \gamma + f P \cos \gamma \quad (8)$$

为简化起见，只计算出 W_1 ，再乘以1.2的经验系数作为 W_2 和 W_3 对牵引力的影响^[4]，即牵引力为

$$F_q = 1.2 W_1 \quad (9)$$

3 实例分析

以广西来宾市来华大桥（主拱跨度220m，单节拱肋最大重量880kN）所用缆索起重机为例，分析主索垂度与主索索力及牵引索索力之间的关系。该缆索起重机主要技术参数如表1所示。

表1 缆索起重机主要技术参数

项目	数值
主索跨度 l_0 (m)	334
两跑车最大等效集中载荷 P (kN)	1250
主索弹性模量 E_k (MPa)	75600
两塔架间单位长度缆索的等效重量 q (N/m)	886.3
弦倾角 β (°)	0

3.1 主索最大水平张力与主索垂度的关系

根据式(1)及表1可知，以最大垂度为自变量，使用Matlab数学软件，可绘出主索最大水平张力 f_{max} 与主索垂度 H_{max} 的关系图。

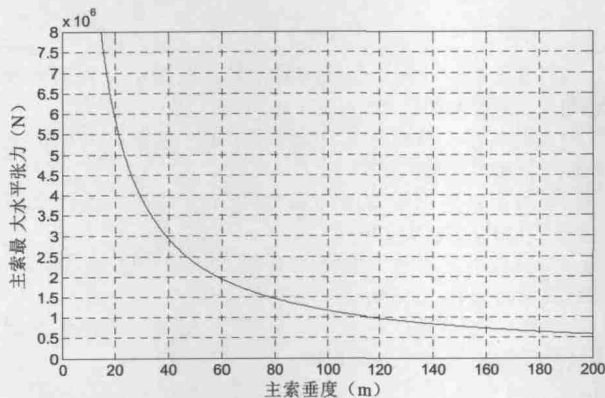


图5 主索最大水平张力与主索垂度的关系

由图5可知，主索最大水平张力随着主索垂度的

增加而减少，但是，随着垂度的增大，主索最大水平张力的减小幅度越来越小。因此，适当增加主索的垂度可以减少主索的张力，也可以减少主索的直径或者用钢量。

3.2 主索张力与跑车位置的关系

式(6)为一元三次方程，且为隐函数。通过Matlab的solve()函数可以解得以跑车位置 x 为自变量、主索任意处水平张力 H_x 为因变量的显函数 $H_x = f(x)$ ，通过ezplot()函数，可绘出二者之间的关系曲线。根据式(5)可求出 x 对应的主索最大张力 T_{max} 。

根据表1数据，使用Matlab可以绘制出图6。

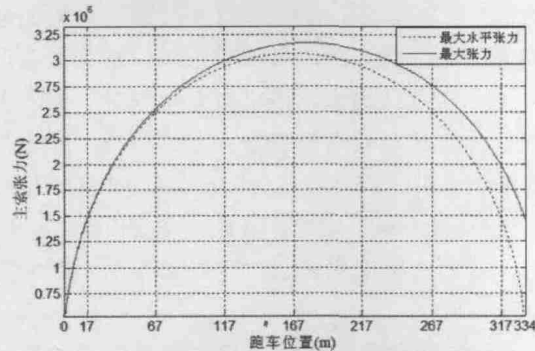


图6 主索张力与跑车位置的关系

部分代码如下：

```
>> syms H_x H x
>>
H_x=solve('H^3+H^2*(1.5636*10^20/3069000^2-3069000)-x*(334-x)*5.523235*10^15-2.328275*10^18','H')
>> ezplot(H_x,[0,334])
>> hold on
>> ezplot(sqrt(H_x^2+V_B^2),[0,334])
```

由图6可知，当跑车位于跨中处时，主索受到的水平张力取得最大值，主索受到的最大张力 T 取得最大值(位于索道的高支点)。

3.3 牵引索张力与跑车位置的关系

当跑车逐渐靠近塔架时，跑车“爬坡”角度(升角)也在随之增加，如图4所示，跑车升角可由式(7)求得。为直观表示跑车行走所需牵引力与跑车位置的关系，绘制其关系如图7所示。

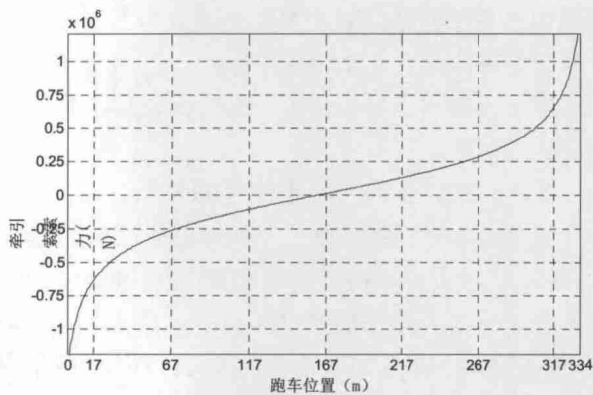


图7 牵引索张力与跑车位置的关系

由图7可知，牵引力随着跑车与塔架距离的减小而增大，而且跑车距离塔架越近时，增加得越迅速。可见，在设计缆索起重机时需根据牵引索的承载能力，确定跑车与塔架的最小允许距离，跑车与塔架的最小允许距离推荐值为 $0.05l_0$ 。跑车与塔架的距离不得小于 $0.05l_0$ ，即跑车在距离系数 $[0.05, 0.95]$ 中运行，否则有因牵引力过大而导致牵引索断裂的可能^[5, 6]。

3.4 主索及牵引索张力与主索垂度的关系

根据式(1)、式(6)、式(7)、式(8)以及式(9)，可以求得以 f_{max} 为自变量、 F_q 为因变量的方程式。通过该方程式可知牵引索张力与主索垂度的关系，而主索最大水平张力与主索垂度的关系可根据式(1)或图5求得。以上三者的关系可由Matlab软件绘图表示，如图8所示。

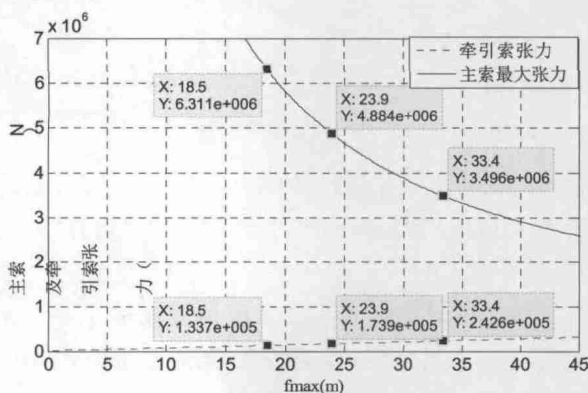


图8 主索及牵引索张力与主索垂度的关系

当主索垂度分别取跨度的 $\frac{1}{18}$ 、 $\frac{1}{14}$ 和 $\frac{1}{10}$ 时，主索垂度分别为：18.5 m，23.9 m和33.4 m，根据图8可知各垂度值对应的主索及牵引索张力，如表2所示。

表2 不同主索垂度值对应的索力

垂度(m)	牵引索张力(kN)	主索最大张力(kN)
18.5	134	6311
23.9	174	4884
33.4	243	3496

由表2可知，随着主索垂度的增加，主索的最大张力迅速减小，减小幅度显著；而牵引索的张力则随主索垂度的增加而增加，但增加幅度不大。这表明适当增加主索的垂度可以大幅降低主索的费用，仅需少量增加牵引索的费用，从而降低缆索起

重机的整体造价。在广西来宾市来华大桥施工中所使用的缆索起重机，其主索垂度取主索跨度的 $\frac{1}{10}$ 。在整个使用过程中，该缆索起重机运行良好，表明缆索起重机主索垂度的取值不必拘泥于主索跨度的 $\frac{1}{18} \sim \frac{1}{14}$ 之间，适当增大主索垂度可以降低缆索起重机的造价。

4 结论

在一定范围内，适当增加主索的垂度，可以显著降低主索的张力，而仅会略微增加牵引索张力。然而，主索垂度的增加会增加主索在索鞍及跑车处的弯曲应力，在设计缆索起重机时需加以校核。另外，主索垂度的增加还会增加背索、地锚以及塔架的受力，因而会提高这部分的费用。因此，只有综合考虑主索、牵引索、背索、地锚以及塔架的受力情况及建造成本，才能找出主索垂度的最优值。

参考文献

- [1]周新年, 巫志龙, 林燕紫, 等. 我国吊装索道研究进展[J]. 起重运输机械, 2010(3): 1-5.
- [2]周水兴. 路桥施工计算手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001. 456-457.
- [3]周新年. 工程索道与悬索桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013. 169-176.
- [4]段良策. 市政工程施工计算实用手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009. 847-864.
- [5]官印生, 周新年, 郑丽凤, 等. 抛物线理论多跨索道设计模型[J]. 起重运输机械, 2007(7): 12-17.
- [6]王小桃, 周成军, 周新年, 等. 基于VB 6.0的抛物线理论多跨索道设计系统[J]. 起重运输机械, 2012(6): 73-76.

第一作者: 黄杨雄 福建省特种设备检验研究院漳州分院

(收稿日期: 2013.8.31)