

文章编号: 0451-0712(2005)10-0073-05

中图分类号: U445.38

文献标识码: B

# 缆索吊的设计安装及使用

李宝东

(路桥集团第一公路工程局一公司 北京市 102205)

**摘要:** 在受施工场地、施工环境,以及其他外部条件限制时,无法使用吊车进行吊装,而又必须进行吊装作业的情况下,可以使用缆索吊进行吊装。缆索吊一般适用于垂直高度较大的垂直吊装和架空纵向运输。起吊重量可以从几吨到几十吨。其使用的塔架可以自行设计,就地制作安装。本文结合云南三界怒江大桥的施工特点,介绍缆索吊的设计、安装及使用过程中的一些注意事项。

**关键词:** 缆索吊; 设计; 安装; 使用

## 1 工程概况

云南三界怒江大桥,全桥长357 m,主桥长288 m,全桥位于直线段内。上部采用挂篮悬臂施工,最大悬臂长为88 m,悬浇箱梁最高9.5 m。0号台位于怒江东岸的高坡上,1号墩在怒江江边,其余墩台在怒江西岸(六库岸),地势落差大,东岸无便道可通,2号墩墩身最高,为34 m。怒江江中明、暗礁密布,江水湍急,平时江水流速为5~6 m/s,下雨或洪水期流速达到8~9 m/s,为不通航河道,平时只有小船摆渡过江,在涨水或风大时,小船便停止摆渡。在这种情况下,我们选用缆索吊进行吊装作业。

缆索吊的总体布置见图1所示。

## 2 缆索吊的设计及验算

### 2.1 几个参数的确定

缆索吊装系统是由主索、主索跑车、起重索、起重滑车组、牵引索、起重及牵引卷扬机、锚碇、塔架、风缆组成。

(1)根据地势及桥型的实际情况,确定塔架的间距为407 m,即 $L=407$  m;进行单点起吊。

(2)桥上的挂篮及混凝土浇注时块件的最大重量为7.5 t,所以缆索吊设计的最大起重吨位为8 t,即 $G=8$  t。

(3)两岸设计塔架的顶面高程相等,西岸塔架高为37 m,东岸塔架高为29 m。主索最大垂度的位置

收稿日期:2005-09-14

气举反循环钻进正常工作状态下的操作要点基本上与泵吸式的相同,需注意的是空压机送风需与钻锥回转同时进行。接钻杆时,需将钻杆稍提升30 cm左右,先停止钻锥回转,再送风数分钟,将孔底钻渣吸尽,再放下钻锥,进行拆装钻杆工作,以免钻渣沉淀而发生埋钻事故。

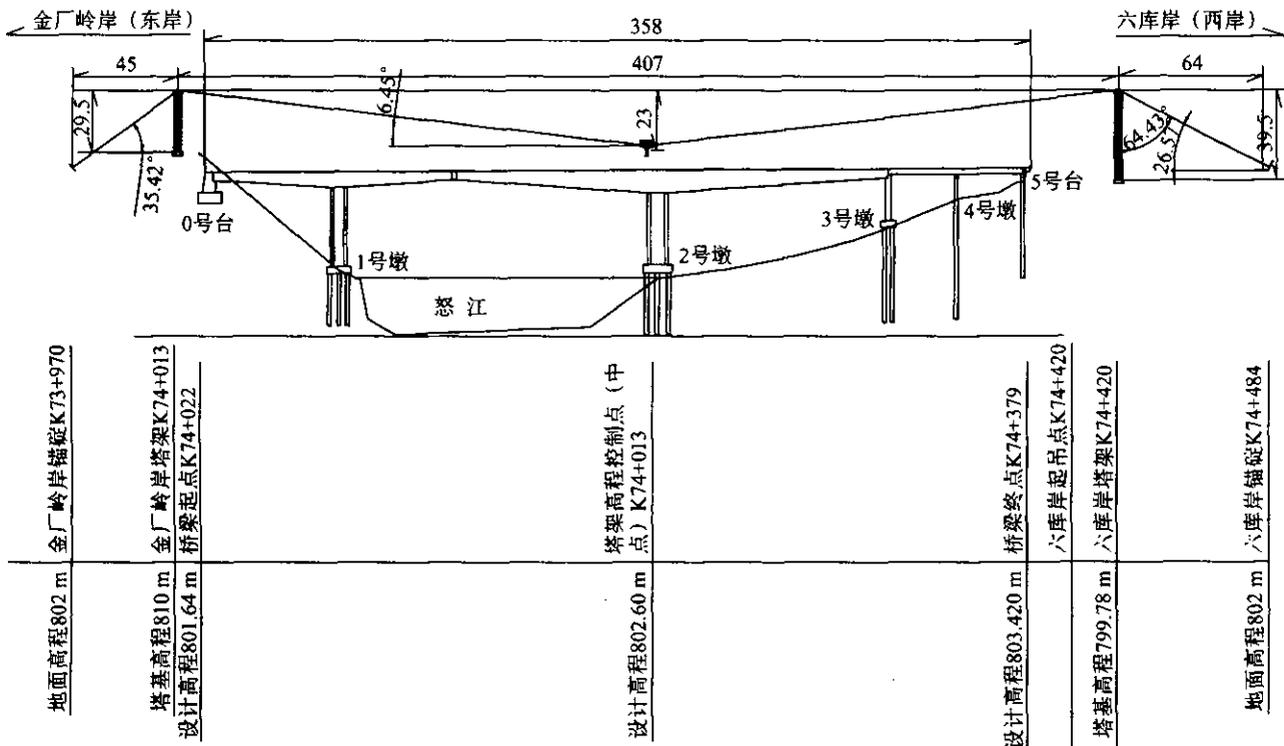
## 3 结语

采用上述气举反循环工艺成孔的130 m超深桩施工,垂直度均符合1/300的质量要求,成桩经超声波检测均为I类桩,说明采用的施工工艺和措施是成功的,为同类型超深钻孔桩在黄河流域顺利施工取得了新的经验。但在施工中也出现了以下较难解

决的问题,需要在今后的工程实践中作进一步的研究探讨。

(1)施工地层为几百年来沉积而成,地层相对比较复杂,即容易缩径,又容易扩孔。由于桩孔很深,钻进时间相对较长,最后提钻时在缩径处由于孔壁被提起钻头的刮擦,掉下的护壁泥块在孔底形成较厚的沉渣,最厚达2~4 m,较浅时也在40 cm左右,如沉渣厚达2~4 m,需回钻并清孔,达到设计孔深和沉渣厚度后再提钻。

(2)由于有老粘土地层,钻头糊钻时候较多,施工中钻进本身转速较慢,采取的减压高转速钻进同时投放碎石效果不明显。



单位:m

图1 三界怒江大桥缆索吊总体布置

在主索的中间,设计最大工作垂度  $f_{max} = L/18 = 22.61$  m,取 23 m,当最大垂度  $f_{max} = 23$  m 时,主索到桥面的距离为 9.2 m,减去滑轮和起吊重物的高度(3 m),再减去挂篮的高度(4.2 m)。吊装的最大安全距离为 3 m,满足要求。

(4) 钢丝绳的弹性模量取 75 600 MPa。

(5) 缆索用各种钢丝绳的规格见表 1。

表 1 缆索用钢丝绳规格

项目	主索	起重绳	牵引绳	工作索
钢绳型号(6×37)	$\phi=42(ZS)$	$\phi=17.5$	$\phi=19.5$	$\phi=28$
截面积 $A/\text{mm}^2$	649.7	111.53	141.16	294.52
单位重 $q/(\text{kg}/\text{m})$	5.308	1.048	1.327	2.768
钢丝直径 $d/\text{mm}$	2.0	0.8	0.9	1.3
钢丝抗拉强度/MPa	1 670	1 670	1 670	1 670
破断拉力/t	1 085	18.70	23.95	482.1

## 2.2 主索的验算

本缆索主索由 2 组组成,每组 2 根。

### 2.2.1 主索的最大拉力和安全系数的验算

主索在自重  $q$  和集中荷载  $Q$  共同作用下(两支座等高,  $\beta=0$ ):

$$G_1 \text{ 吊具配重} = g_{\text{料斗}} + g_{\text{滑车组}} + g_{\text{跑车}}$$

$$= 0.5 \text{ t} + 0.25 \text{ t} + 0.25 \text{ t} = 1 \text{ t}$$

$$Q = G_{\text{最大净吊装重}} + G_1 \text{ 吊具配重}$$

$$= 8 \text{ t} + 1 \text{ t} = 9 \text{ t}$$

$$q = q_{\text{主索}} + q_{\text{起重索}} + q_{\text{牵引索}}$$

$$= (5.308 + (1.048 + 1.327)/2)/1000$$

$$= 0.0064955 \text{ t/m}$$

$$\text{主索最大水平拉力 } H = \frac{qL^2}{8f} + \frac{QL}{4f} = 25.76 \text{ t (单根主绳 } Q=4.5 \text{ t)}.$$

$$\text{主索最大竖向拉力 } V = \frac{qL}{2} + \frac{Q}{2} = 3.57 \text{ t (单根主绳 } Q=4.5 \text{ t)}.$$

$$\text{单根主索最大拉力 } T = \sqrt{H^2 + V^2} = 26 \text{ t}.$$

主索安全系数,取吊重冲击影响的动载系数为 1.2,吊装跨度  $L=407$  m,  $\phi 42$  钢绳破断拉力 108.5 t, 则  $K = \frac{P}{1.2T} = \frac{108.5}{1.2 \times 26.0} = 3.47$ 。

### 2.2.2 主索的最小垂度

主索与两塔架顶部连线的夹角  $\alpha$  决定主索的垂度及受力,如果夹角  $\alpha$  过小,主索将产生过大的力,当  $\alpha=0^\circ$  时,主索的力为无穷大。所以必须控制  $\alpha$  的大小,既控制最小垂度。因吊装时最大的重物是从 5 号台吊往最低处,所以只考虑冲击系数不考虑安全系

数,则主索的允许张力和跨中吊重后的垂度为:

$$T_{\max} = \frac{T_N}{1.2} = \frac{108.5}{1.2} = 90.42 \text{ t}$$

$$H \approx T_{\max}$$

$$f_{\max} = \frac{qL^2}{8H} + \frac{QL}{4H} = 12.43 \text{ m}$$

既主索在吊设计吨位重物时的最小垂度不得小于 12.43 m,否则将发生安全事故。

### 2.2.3 主索的接触应力 $\sigma$ 与安全系数 $K$

$$\sigma = \frac{T/2}{A} + E_K \times \frac{d}{D_{\min}} = 805 \text{ MPa}$$

$$K = \frac{[\sigma]}{\sigma} = 2.07 \quad ([K] \geq 2 \sim 3)$$

式中: $D_{\min}$ 为跑车平滑最小直径,250 mm; $E_K$ 为钢丝绳弹性模量, $E_K = 75\ 600 \text{ MPa}$ ;  $d$ 为主索的钢丝直径,2.0 mm;  $[\sigma]$ 为钢丝抗拉强度,1 670 MPa;  $A$ 为起重绳面积,649.7 mm<sup>2</sup>。

### 2.3 起重索的验算

本缆索主索由 2 组组成,每组 2 根。

#### 2.3.1 起重绳最大拉力( $T_{起}$ )与安全系数( $K_{起}$ )

$$T_{起} = \frac{Q}{n\eta_1^m\eta_2^u} = 2.54 \text{ t}$$

$$K_{起} = \frac{T_{破}}{T_{起}} = 7.36 \geq [K_{起}] = (5 \sim 6)$$

式中: $Q$ 为集中荷载,9 t;  $n$ 为起重索工作绳线数,4;  $\eta_1$ 为滑轮组工作效率,取 0.96;  $\eta_2$ 为转向滑轮效率,取 0.96;  $m$ 为滑轮组轮数,为 2;  $u$ 为转向滑轮组轮数,为 1。

#### 2.3.2 起重绳接触应力( $\sigma_{起}$ )与安全系数( $K_{起}$ )

$$\sigma_{起} = \frac{T_{起}}{A_{起}} \times E_K \times \frac{d}{D_{\min}} = 529.7 \text{ MPa}$$

$$K_{起} = \frac{[\sigma]}{\sigma_{起}} = 3.15 \quad ([K] \geq 2 \sim 3)$$

式中: $d$ 为起重绳钢丝直径,0.8 mm;  $D_{\min}$ 为起重滑车组的最小滑轮直径,200 mm;  $[\sigma]$ 为钢丝抗拉强度,1 670 MPa;  $A_{起}$ 为起重绳面积,111.53 mm<sup>2</sup>。

### 2.4 牵引索的验算

牵引索的牵引力  $W$ ,一般由跑车运动阻力  $W_1$ ,起重索运动阻力  $W_2$  和后牵引索自然松弛拉力  $W_3$  等三部分组成。在跑车运动到塔架时的牵引力为最大,可以按照下面的公式进行近似计算:

$$W = Q\sin\theta + 0.15Q = 3.334 \text{ t}$$

$$\text{其中: } \tan\theta = 4f/L = 0.226$$

式中: $W$ 为牵引拉力; $Q$ 为集中荷载,9 t;  $f$ 为工作垂度,23 m;  $L$ 为牵引索两岸定滑车的距离,为 407 m。

#### 2.4.1 牵引索的最大拉力 $T_{牵}$

$$T_{牵} = (W + 2Lq)(2 - \eta^n) = 4.58 \text{ t}$$

式中: $q$ 为牵引索的单位重量; $\eta$ 为起重索穿过滑车的效率,查表为 0.98;  $n$ 为牵引索穿过的滑车数,为 2。

#### 2.4.2 牵引索安全系数 $K_{牵}$

$$K_{牵} = \frac{T_{破}}{T_{牵}} = \frac{23.95}{4.58} = 5.23 \quad ([K_{牵}] = 3 \sim 4)$$

#### 2.4.3 牵引索拉应力 $\sigma_{牵}$ 和安全系数 $K_{牵}$

$$\sigma_{牵} = \frac{T_{牵}}{A_{牵}} + E_K \times \frac{d}{D_{\min}} = 664.6 \text{ MPa}$$

$$K_{牵} = \frac{[\sigma]}{\sigma_{牵}} = 2.51 \quad ([K_{牵}] = 2 \sim 3)$$

式中: $d$ 为牵引绳钢丝直径,0.9 mm;  $D_{\min}$ 为最小滑轮直径,200 mm;  $A_{牵}$ 为牵引绳截面面积,141.16 mm<sup>2</sup>。

### 2.5 塔架验算

塔架由六四军用梁拼装而成,六四军用梁俗称三角架,是全焊构架、销接组装、双层多片式,由于西岸的塔架高 36 m,而东岸的塔架高 28 m,塔架顶部横梁高均为 1.5 m。而且牵引索及起重索的卷扬机都设在西岸,所以只对西岸的塔架进行验算。塔架按照门字框架组成,中间设置横向风构,以增强整体的稳定性。一般三角桁架拼装的塔架内部有足够的刚度及稳定性,因此验算应以销接节点控制设计。

#### 2.5.1 塔架受力计算

西岸单根主绳对塔顶产生的水平力  $H$  和竖向力  $V$ ,起重绳对塔顶产生的水平力  $H$  和竖向力  $V$  及牵引索对塔顶产生的水平力  $H$  和竖向力  $V$ ,各力的角度见图 1。

经计算在最不利情况下,4 根主索对塔顶产生向河侧水平力  $H = 10.36 \text{ t}$ ,对塔顶竖向力  $V = 58.2 \text{ t}$ ;在最不利情况下,牵引索对塔顶产生向河侧的水平力  $H = 5.04 \text{ t}$ ,对塔顶产生的竖向力  $V = 5.64 \text{ t}$ 。

#### 2.5.2 西岸单根塔柱最不利情况

经计算在最不利情况下,牵引索对塔顶产生向河侧水平力  $H = 7.54 \text{ t}$ ,对塔顶产生竖向力  $V = 12.596 \text{ t}$ 。

#### 2.5.3 销节点计算

销节点的受力图示如图 2 所示。

$$\text{计算式为: } N = \pm \frac{\sum M}{b} = \pm \frac{Qh + Pe}{b}$$

式中: $N$ 为销节点的轴向力; $M$ 为销节点的弯矩; $Q$ 为塔顶所受的总水平力; $P$ 为塔顶所受的总竖

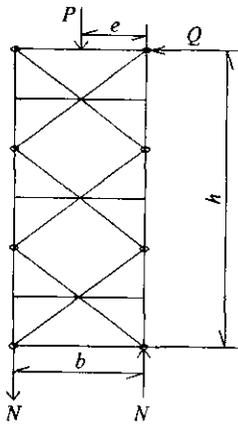


图 2 销节点受力图式

向力,包括塔架自重; $P=V+G=40.69+0.45\times 18=48.79\text{ t}$ ;  $b, e, h$  为力臂,其中  $b=3\text{ m}$ ,  $e=1.5\text{ m}$ ,  $h=37\text{ m}$ 。

$$N = \frac{12.7 \times 37 + 48.79 \times 1.5}{3} = 181\text{ t}$$

查表得单根钢销抗剪强度取 585 MPa,则:

$$S = 3.14 \times \left(\frac{4.85}{2}\right)^2 = 1\ 847\text{ mm}^2$$

单颗钢销抗剪力为 108 t,所以单侧塔架底部销子承受的剪力为  $108 \times 2 = 216\text{ t}$ ,满足销子抗剪的要求。塔架在使用过程中,大部分水平力已由抗风缆索承担,塔架的控制除满足销子抗剪要求外,还应控制顶部的纵向位移。

### 2.6 工作索的验算

工作索采用  $\phi 28$  的钢丝绳,它的主要作用是检查和处理吊装设施时载人、吊运工具、焊接接头设备等用,安装前期可以用作主索的过江索。它一般不与主索同时使用,所以在验算塔架的受力时可以不考虑,但必须验算它载人的抗拉强度,计算方法同主索。

### 2.7 抗风缆索的验算

两岸均采用  $\phi 28$  钢绳作为前抗,每塔架前抗各设 2 根,对称分布,前抗锚碇采用混凝土基础,预埋  $\phi 32$  的钢筋。每个塔架设 2 组后抗,每组采用 4 线  $\phi 17.5$  的钢丝绳并采用链滑车连接,用以调节塔架水平受力,后抗与主索在同一锚碇上锚固。

### 2.8 锚碇的验算

经计算,锚碇所受的力,包括水平力 = 19.63 t,竖向力 = 11.35 t,锚碇自重为 190 t。

因锚碇自重较大,足以满足受力要求,所以只进行锚桩主筋的抗剪计算:

单根锚桩受的最大水平力为 9.815 t。

考虑锚桩配筋受剪(主筋为  $\phi 22$ , 20 根,截面积  $3.799 \times 20\text{ cm}^2$ ),锚桩钢筋可抗剪为  $3.799 \times 20 \times 1.2 = 91\text{ t} > 9.815\text{ t}$ ,满足要求。

## 3 缆索吊的制作和安装过程

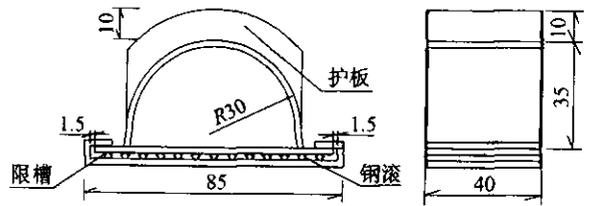
### 3.1 塔架的安装

塔架由基座、塔身、塔顶和索鞍等几部分组成。

基座采用 C25 混凝土,在浇筑混凝土时要预埋与塔身连接的钢板,并要焊好锚固筋,混凝土一定要密实。基座与塔身的连接采用销接,采用六四军用梁的专用销子。塔身采用逐段拼装,即在已拼装好的塔身基础上,设置一独脚扒杆,用扒杆提升桁节进行拼装。拼装时要注意两侧塔架同时进行,安装到一定高度时横向要设置风构,纵向要设置临时抗风缆索。安装完毕后,设置永久抗风缆索。

塔顶纵向用 2 根 I56 工字钢并排焊接,工字钢底部焊接 2 cm 厚的钢板,与塔身用销子连接,在纵向工字钢的上面架设 2 根 I56 工字钢,纵横向的工字钢要焊接牢固,要进行满焊,保证横梁不会翻转。

为保证主索平地地通过索鞍,索鞍顶部做成半弧形,半径为 30 cm。底部放置 13 根可以自由滚动的  $\phi 20$  的钢滚,见图 3 所示,底板与横梁焊接要牢固,底板用反扣的形式与索鞍连接,每侧留有 15 mm 自由滚动的空间。这样在吊重及温度的影响下索鞍有 30 mm 的位移,减少索鞍与主索间的摩擦损失。



单位:cm

图 3 钢滚

### 3.2 缆索安装

#### 3.2.1 主索安装

由于两岸不通航,所以先用船将一根 2 cm 粗的尼龙绳渡过河,用尼龙绳带  $\phi 15$  的钢丝绳,这样,要逐级替换,最后把主索拉过河。拉主索过河时,为减少卷扬机的受力,一定要保证一定的垂度,垂度的计算可以根据卷扬机的功率,利用计算主索水平受力的公式进行计算,既: $H = \frac{gL^2}{8f} + \frac{QL}{4f}$ ,其中  $H = 5\text{ t}$ ,

$Q=0$ , 计算结果  $f=25\text{ m}$ , 实际控制为  $35\sim 40\text{ m}$ 。

为使主索在使用过程中尽可能达到受力均匀, 2根主索并在一起在地锚上绕2圈, 主索可根据垂度和受力状况进行调节。主索的安装垂度应符合设计值, 若小于或过分小于设计值, 造成主索、地锚、索塔等重要部件超载或严重超载, 这是十分危险的。相反, 若缆索安装垂度大于设计值, 则会增大工作垂度, 从而增大构件吊运时的上下坡度, 增大牵引力。若增值过大, 则需要设置辅助牵引, 甚至还不能满足跨越已安装好的桥跨结构物的安全高度, 就要使构件安装工作量增大, 以致造成安装困难。安装主索之前, 必须对安装时的控制应力及初始垂度进行计算。

初始垂度的控制可以利用全站仪采用坐标仰角控制。采用全站仪控制时, 提前把跨中的坐标算好, 拨角对准跨中, 利用竖直仰角进行控制。测站条件允许时, 尽量垂直缆索跨中。测设示意如图4所示。

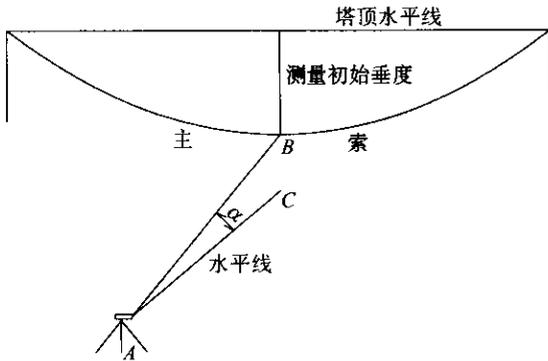


图4 测设示意

### 3.2.2 起重索的安装

滑轮(车)组采用上3轮下2轮, 组成4线的滑轮组, 为避免缠绞现象, 下面的2轮采用分离式轮组。起重索采用 $\phi 17.5$ 的钢丝绳, 起重索的一端固定在卷扬机上, 另外一端绕过吊钩固定在跑车上。要保证起重索的长度, 在起吊最远处时, 保证卷扬机上的钢丝绳不少于6圈。

### 3.2.3 牵引索的安装

牵引索采用 $\phi 19.5$ 的钢丝绳, 采用串联滚动的方式牵引。牵引索的一端固定在跑车上, 然后绕过河对岸的主索及锚碇上的定滑轮, 再绕过该岸主塔及定滑轮, 为增加牵引索与卷扬机的摩擦力, 钢丝绳在

卷扬机上要缠绕6圈, 最后绕过主塔的定滑轮仍固定在跑车上。

### 3.2.4 主索跑车及起重钩的安装

主索跑车采用2门自制跑车, 与主索接触滑轮轮径为25 cm, 定滑轮直径为34 cm。

## 4 缆索吊的使用注意事项

缆索吊与普通的吊车吊装有相同之处, 也有不同之处。在使用过程中应注意以下几点。

(1) 作为带状的起吊设备, 缆索吊由许多小部件组成, 有时其中的任何一个部件出现故障, 都有可能造成缆索吊整个体系的瘫痪或出现安全事故。尤其是钢丝绳必须定期检查, 发现有断丝时, 若是重要部位必须立即更换, 非重要部位也要折减系数使用。缆索吊作为机械设备, 必须进行经常的检修和养护。

(2) 缆索在使用前必须进行试运行, 卷扬机安装应牢固、稳定, 防止受力时有位移和倾斜; 操作时视野必须开阔, 联系要方便。使用卷扬机前应检查钢丝绳、离合器、制动器、保险制棘轮、传动滑轮等, 发现故障应立即排除。通过滑轮的钢丝绳不得有接头、结节和扭绕。钢丝绳在卷扬机上排列必须整齐, 作业中至少保留3圈; 操作人员不得擅自离岗, 操作中如突然停电, 应立即拉开闸刀并将运送物放下; 各种滑轮在使用前, 要检查是否灵活, 绳槽是否平滑。滑轮组应共同承受荷载, 受力不均匀时, 应进行调整; 在使用过程中, 所吊的货物不得超过设计重量, 塔架顶部要注意观察纵向位移, 防止位移量过大时发生安全事故; 吊装时的垂度应控制在最大垂度和最小垂度之间; 抗风缆索必须经常拉紧, 使后抗风缆索始终处于受力状态。吊运货物时要平稳, 起降时速度要均匀, 严禁起重物自由下落。禁止主索与工作索运送人员时同时进行工作。

(3) 缆索吊装与吊车吊装有不同之处, 缆索吊装货物时, 吊装的货物必须完全放松后, 缆索不受力后, 方可卸掉货物, 否则当卸掉货物时, 吊钩会因为主索的弹性, 发生突然反弹, 一是造成安全事故, 二是会造成顶部钢丝绳的脱槽或缠绕。

(4) 制定有效的检修、使用、保管及安全制度, 做好防护措施。