

文章编号: 0451-0712(2003)12-0026-07

中图分类号: U448.222

文献标识码: B

# 巫山长江大桥拱肋钢管桁架安装的关键技术

张佐安, 孙 云, 王铭琪, 马青云, 卢 伟, 何 利

(四川路桥建设股份有限公司 成都市 610071)

**摘 要:** 介绍净跨为 460 m 的中承式钢管混凝土双肋拱桥—巫山长江大桥拱肋钢管节段安装所采用的新设备、新材料及关键施工技术、工艺, 经施工实践证明非常成功, 其成果完善了大跨径桥梁的无支架缆索吊装体系, 可供类似工程参考。

**关键词:** 巫山长江大桥; 大跨径钢管混凝土拱桥; 钢管拱肋安装; 技术创新

巫山长江大桥位于巫峡入口处, 为中承式钢管混凝土双肋拱桥, 主桥净跨径为 460 m, 桥梁全长 612.20 m。

该桥主桥拱肋钢管桁架, 每肋半跨分为 11 个吊装节段, 全桥两肋共 44 个吊装节段(另含 20 道横联), 24 个扣段。节段安装采用无支架缆索吊装系统

吊运就位—扣索系统斜拉扣定其位置的方式见图 1, 图 1 中右半跨的临时扣索未示出。由于该桥跨径大, 拱肋钢管桁架节段吊重大, 配套的缆索吊装系统和扣索系统的设计与施工有许多技术难点, 安装实施过程中, 开发或采用了一系列新材料、新设备、新工艺及新技术, 本文对此做一简要介绍。

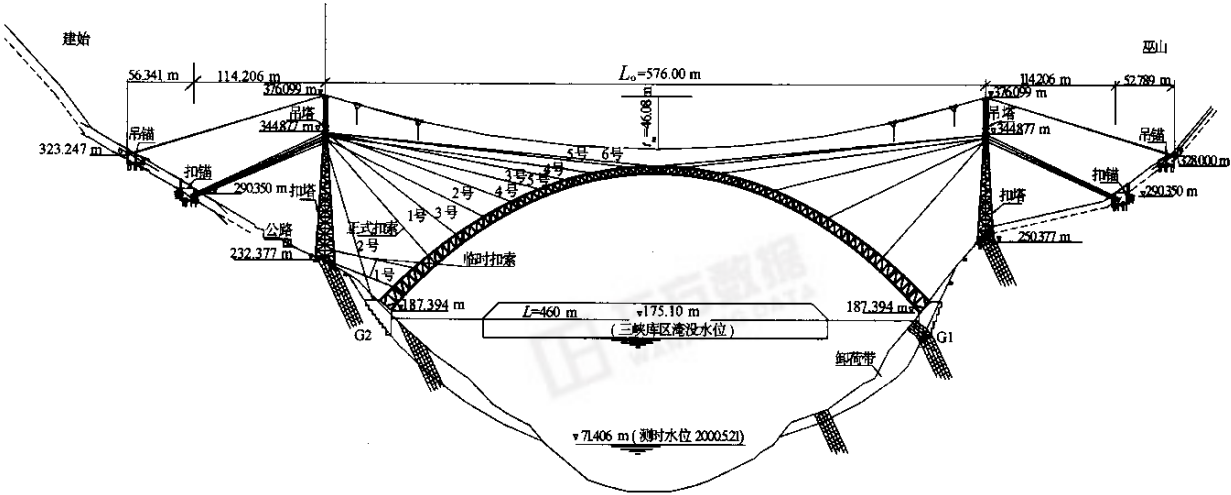


图 1 巫山长江大桥钢管拱肋无支架缆索吊装—扣索斜拉扣定布置示意

## 1 拱肋安装的难点

拱肋钢管桁架的安装有以下难点:

(1) 缆索吊装系统的索跨大, 索跨达 576 m, 系统使用过程中有诸多技术难题;

(2) 吊重大, 节段吊重达 128 t, 加上吊具等重量后, 缆索吊装系统的设计吊重达 170 t, 吊运有较大

难度;

(3) 索塔高度大, 索塔高度达 150.22 m, 如何保证其稳定是难点。

(4) 构件起吊高度大, 起吊高度达 260 m(江水面至节段就位位置间的高度), 用常规设备将导致吊运时间过长, 不安全。

(5)不能断航,桥位位于黄金水道上,处于长江巫峡峡口,风大,江面狭窄,过往船只多,施工期不能长时间断航,只能短时禁航。

基于以上难点,拱肋钢管桁架安装过程中,开发或采用了一系列崭新的、可行的关键施工技术。

## 2 钢管桁架拱肋安装的关键技术

### (1)用辅助支架安装扣塔。

扣塔在施工设计图中已设计,由业主确定的厂家对其分节、分片加工后,船运至桥孔下的水域待安装。由于巫峡口两岸地形陡峭,要起吊、运输位于江面船上的多片钢管到安装扣塔的位置,起吊高度达 180~290 m,并且分片扣塔构件安装后,待焊时间较长,在焊接工作完成前,扣塔上不能承受外力的作用,即不能附着其他构件,否则会产生过大的变形,这是不能允许的。扣塔位置离江水边的水平距离约 200 m。因此,扣塔的安装不能由塔吊来辅助。

经过分析比较后,我们选用万能杆件拼成的支架来辅助安装扣塔,该支架依靠较低处的顺桥向八字抗风索和较高处的通长缆风索(在一岸地锚上固定,经与该岸的支架上连接后再拉至与另岸支架连接,最后固定在另岸地锚上),扣塔随支架的升高而逐渐往上拼,直至拼装结束。在拼装过程中,支架不与扣塔身发生任何依附关系,保证了扣塔身安装位置的准确性;扣塔的分片杆件依靠在支架上布置的缆索吊装系统吊运至扣塔下待拼装,也解决了分片构件的起吊及运输问题。

### (2)缆索索塔直接铰支于扣塔顶面上(见图 1)。

缆索系统如另设独立的吊装用索塔(吊塔)需用万能杆件约 2 100 t,而将吊塔直接铰支拼接于扣塔顶面以上,仅需用万能杆件 320 t。扣塔为钢管支架格构柱,竖向在  $\phi 610 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的钢管内灌注 C60 混凝土。扣塔的主要作用是通过其顶部索鞍作为斜拉扣挂锁定于锚碇的拉索受力的转向点。经计算,扣塔除能承受斜拉扣挂于其上的拉索的力以外,还有富裕,并能再承受支于其上的 750 t 的索塔压力。因此,将吊塔置于扣塔上方,用万能杆件拼装(塔顶设避雷针),缩短了布索工期,节约了成本。

### (3)索塔顶设纵向约束不设横向抗风索。

吊塔抗风索布置见图 2 所示。

索塔为门式索塔,柱中心距为 20 m,塔顶横梁长为 30 m。索塔顶离地面的高度南

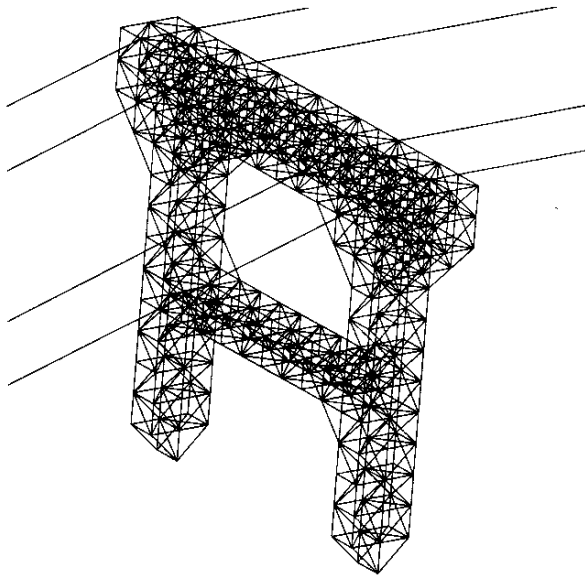


图 2 吊塔抗风(压塔)索布置示意

岸为 150.22 m,北岸为 125.72 m。因地形限制,无法在塔顶上设置沿桥长方向的“八字”抗风索,无法设置横桥向的索塔抗风索。经用通用有限元程序对吊装系统的结构进行受力分析后,确定加设 4 根  $\phi 47.5 \text{ mm}$  压塔索(自一端地锚起,经一岸索塔顶到另岸索塔顶后进入另岸地锚的通长约束钢丝绳),张紧力为 320 kN,在塔顶处塔、索固定,而横桥向可以不设索塔抗风索。但在北岸,由于索塔高度大,并且地形允许,为策安全加设了索塔横向抗风索,初张力为 100 kN。

对塔顶作上述约束后,在缆索布置完成后进行试吊时,索塔偏位纵向最大值为 24 cm,试吊后进行了调整,正式吊装时,索塔最大纵向偏位为 21 cm,横桥向最大偏位为 4 cm,均在允许的范围内。

### (4)塔顶结构索鞍横梁下设置弹性支座。

主吊索鞍处承受集中力  $> 1\,600 \text{ kN}$ ,该力作用于横梁中心,如横梁下与塔顶杆件的支承靴间用刚性支座,将使万能杆件的中间一排柱承受绝大部分的压力,很不合理。为此,我们在中间一个支承靴上加设了一个厚度为 20 mm 的橡胶支座,保证了杆件柱肢在塔顶处受力在 500~1 000 kN 之间。

### (5)吊锚锚碇采用桩锚并加设岩锚。

本桥吊锚受力 1 800 t,分离设置的上、下游锚碇受力各为 900 t。吊锚布置示意图 3 所示。鉴于锚碇处地面倾角  $> 45^\circ$ ,岩石破碎,设重力式锚碇没有前端足够的土抗力作用,不能确保受力安全,基于吊装系统的重要性,我们采用了桩式锚碇(为桩基础

式的结构型式),同时在锚碇后方的岩体内,沿主索尾索的方向上加设平均长度为 20 m 的  $9\phi 15.24$  mm 的无粘结预应力束岩锚,作为安全储备。岩锚前端锚

固于承台上,选用  $R_y^b = 1\ 860$  MPa 的钢绞线,张拉控制应力为  $0.6R_y^b$ 。

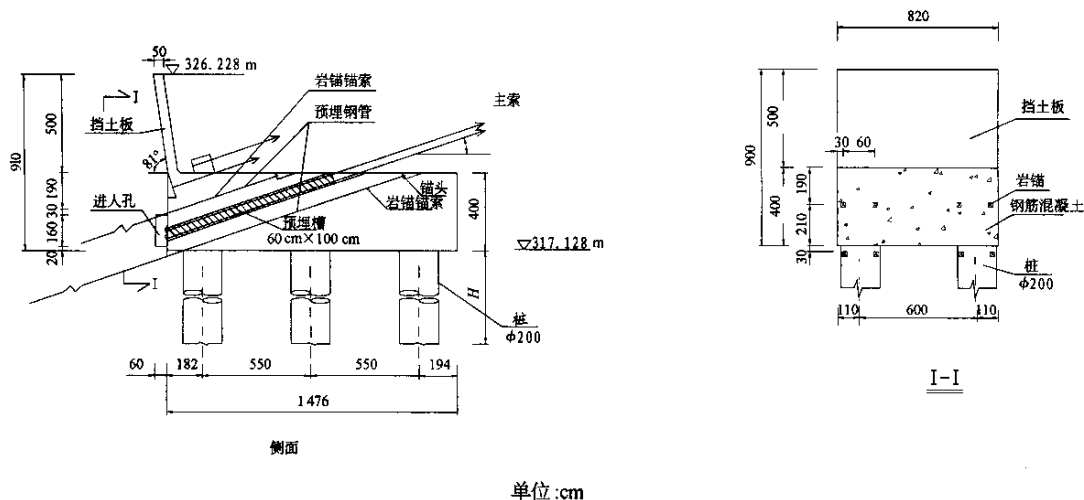


图 3 吊锚布置示意

(6) 启用  $\phi 56$  (CFRC8 $\times$ 36SW+IWR-56 mm) 满充式钢丝绳作承重主索。

这种主索在国内是首次使用,其主要特点是单根索破断拉力大( $\geq 2\ 450$  kN),厂家是应我方需要首次生产。其承重安全系数的选用及可靠连接方式等均无资料可供借鉴,经咨询有关专家和反复试验,我们确定承重主索的受力安全系数 $\geq 3$ ,钢绳的连接采用特殊的索夹,间距为 40 cm。

(7) 采用两组  $4\phi 56$  mm 承重主索同时吊重。

本桥的钢管拱肋节段吊装重量为 128 t,如用一组主索吊重,会使索鞍处产生很大的压力( $P > 3\ 000$  kN),此集中力作用于塔顶结构,受力很不合理。因此,采用间距为 6 m 的两组  $4\phi 56$  mm 主索同时抬吊一个拱肋钢管节段的缆索吊重方式(也便于在钢管节段吊装完成后,拆去一组主索后吊装桥梁上部结构的其他构件),全桥横向两条拱肋布置  $2 \times 2$  组  $4\phi 56$  mm 主索,中距为 19.7 m。在主索纵向设置成双吊点跑车(滑车组型式),间距为 18 m,长度为 16.997~30.011 m 之间的拱肋节段吊装均可适用。

采用两组主索同时吊重,如何保证受力均匀是主要难点,我们采用设置横向受力均匀分配体系,确保一端梁吊点处的力均匀分布在两组主索上,且随时可以自动调整,如图 4 所示。

(8) 设置主动式承索器。

其目的是减小起重索或牵引索在其转线点间的距离,减小其跨间的垂度,从而减小吊点(吊具)的配重。承索器挂于主索上,托起一组主索下的两根起重索和两根牵引绳,承索器间相互用  $\phi 19.5$  mm 钢索相连,进入一台 50 kN 的卷扬机形成循环线,通过卷扬机的开动,主动控制承索器的最佳位置,如图 5 所示。本桥设置主动式承索器后,在起重索垂度为 22 m 时,每个吊点配重仅为 5 t;同样垂度下,如不设承索器,每个吊点配重将达 25 t,设置承索器后的经济性及技术先进性显而易见。在使用中,承索器轮将起吊及牵引索梳理得有条不紊,经过多次 7 级左右的大风后,没有出现起重索或牵引索相互打绞的现象。

(9) 吊点受力平衡系统。

因每节段分为两组主索的 4 个吊点抬吊,如何保证吊点受力均匀是一个重要问题。因为上、下游的前(岸侧)或后(另一岸侧)吊点相互连在一起,应保证前或后的上、下游两个吊点同时均匀受力,而两个吊点受力的均匀性则是由吊点绳与拱肋节段的捆绑点的合理位置来确定的。经过节段重心计算,和各节段逐一分析计算,仅第 4 段捆绑点位置受力最大,为 64.6 t。因此,捆绑点位置确定为上弦靠低端节点及下弦靠高端节点处(见图 4 所示),能满足所有的吊点受力均小于 64.6 t(两个吊点承受),在此情况下,

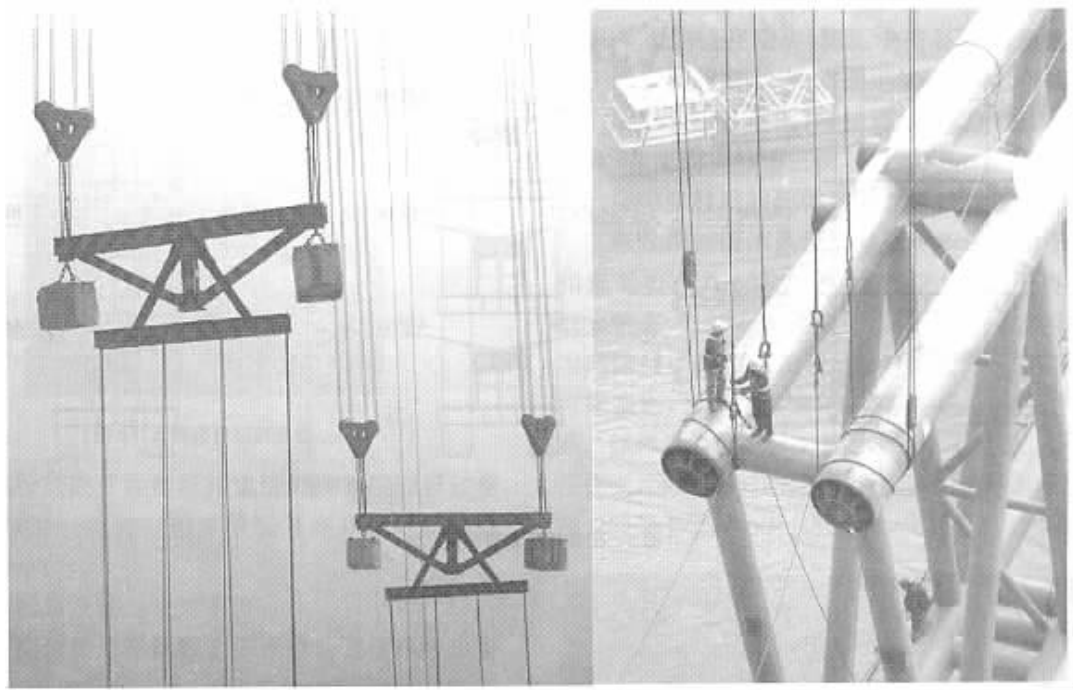


图 4 吊点分配梁及吊索受力自动平衡系统

起吊钢绳及吊点滑车组受力均在设计要求范围内。

(10) 选用恒力起吊、牵引卷扬机。

卷扬机选用摩擦式恒力卷扬机, 附带卷绳器, 根据巫山桥起吊高度大和索跨大的特点, 定制的起吊用卷绳盘卷绳量为 2 200 m ( $\phi 24$  mm 钢丝绳), 牵引用卷绳盘卷绳量为 1 200 m ( $\phi 28$  钢丝绳), 卷绳筒配备 40 N·m 的力矩卷扬机作动力。本桥的这种卷扬机与卷绳器的配套搭配使用在我国是第一次。经应用证明卷扬机牵引可靠, 卷绳筒卷绳、排线均匀, 力矩卷扬机对绳筒的约束也达到了预期要求, 效果好; 同时, 较传统的钢绳“拉梢”方式大大提高了安全度和减少劳动力, 节约了成本。

(11) 采用特制起吊滑轮组。

滑轮(车)组采用上 5 轮下 4 轮, 组成 8 线起吊滑车组, 单个滑轮受力按 200 kN 设计, 外直径为 480 mm,  $\phi 60$  轴用滚柱轴承(42412), 使用前加注弹子盘专用油。经实施观测和检验, 全部滑轮运行平稳、灵活, 至吊装拱肋完成后, 快绳(我们采用单头抽, 即进卷扬机一端的起吊绳为快绳)端经过的滑车轮已运行 21 万转(自重及吊重荷载各占一半), 没有一个滑轮出现问题; 起吊滑车组在吊点绳高度最小为 2.5 m, 最大为 260 m 的情况下运行自如, 起吊钢绳没有出现一次扭绞现象。

(12) 扣塔上采用多个滚轮做成弧形索鞍。

其目的是增大钢绞线的弯曲半径, 使钢绞线受力后不致产生大的弯应力。弧型索鞍轮的半径为 2 962 mm, 每束 6~10 根的钢绞线均通过宽度为 54 mm 的轮槽, 经实施观察, 效果良好, 见图 5 所示。

(13) 扣锚采用桩锚加岩锚作为安全储备。

其创新设计方法, 解决了桩锚前端土体抗力不足的问题。加设岩锚作为安全储备花钱不多, 还增加了可靠性, 同时桩锚承台兼作岩锚的锚固端, 也较为经济。考虑到桩上承台(空心)的前墙上承受扣索的张力共为  $2 \times 12\,500$  kN (上下游扣锚受力之和), 前墙既受弯, 也有上拔力, 因此, 前墙设 8 束水平预应力束, 竖向设 4 束预应力束, 岩锚每一侧(上游或下游肋对应的)布置 12 束  $9\phi 15.24$  mm, 方向与扣索尾索方向平行, 见图 6 所示。经使用观测, 扣锚及岩锚在使用过程中发生的位移  $< 1$  mm。

(14) 设置扣塔平衡索。

为保证扣塔顺桥向位移在使用期不超过规定的 7.5 cm, 因此, 设置扣塔前、后平衡索。在拱肋节段安装前, 设置扣塔前平衡索, 为  $4 \times 3\phi 15.24$  mm, 拉力共计 1 000 kN, 上端锚于扣塔顶, 下端锚固于拱座上; 后平衡索仍为  $4 \times 3\phi 15.24$  mm, 拉力共计 800 kN, 在第 4 号正式扣段扣索张拉前张拉到位, 上端锚于扣塔顶, 下端锚于扣锚顶面, 实施中达到了预期效果。

(15) 拱肋节段起吊前快速定位。



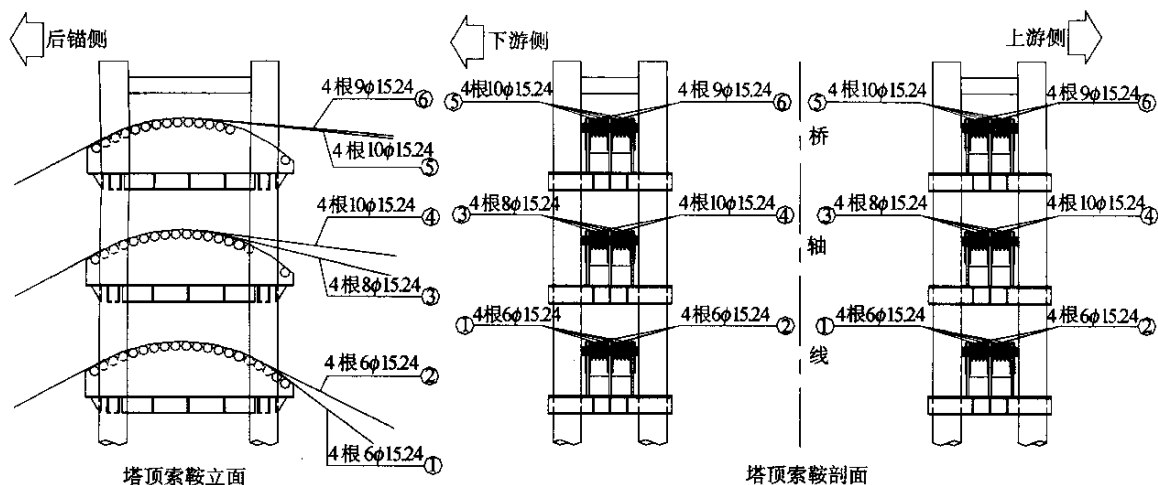
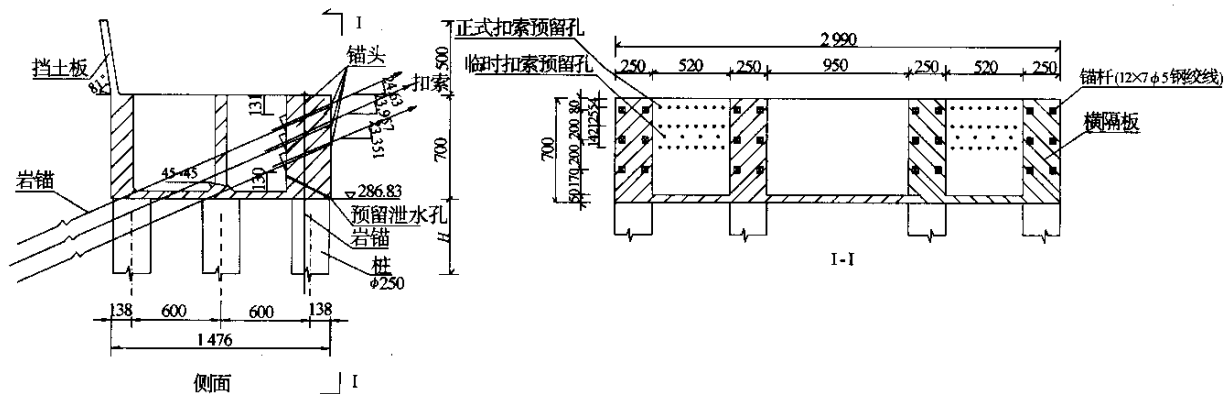


图 5 扣索弧形索鞍位置示意



单位: cm

图 6 吊锚布置示意

钢管桁架节段由工厂加工完毕后,用船运至桥下水域。节段装船时,长度方向与船长方向相同,即顺水流方向,而节段起吊前要求位于与水流向垂直方向的起吊吊点下面,因此应对运输船进行准确定位。

桥位处于长江黄金水道,根据港航要求,每天只能在 10:00~13:00 停航后,水域供拱肋节段运输船定位和缆索吊机空中吊运钢管桁架节段。实施中,在拱肋上、下游的两岸设地锚,机动定位船开行到拱肋附近上游后,用钢丝绳与地锚连接并调整,完成定位船定位,然后开动运输船到定位船下游并通过连接钢丝绳连接、调整,使节段运输船准确就位,此后即可进行拱肋节段的捆绑、吊运工作。

拱肋节段起吊前,运输船的定位用时在 1 h 之

内,节段捆绑约用 0.5 h,起吊至安全高度约 0.5 h,因此,吊装期间一般在 12:00 之前便开放了水域,最大限度地减少了占用黄金水道的时间。

(16) 拱肋节段间接头采用高强螺栓临时连接。

钢管桁架节段端头的弦管内设法兰盘,节段起吊就位安装时,在法兰盘间用 8 颗 M48 的高强螺栓连接,见图 7 所示,紧固后即可将节段受力交给扣索,同时松去起吊吊点的受力。拱脚段设柱形铰轴,安装时与拱座上的铰座紧密贴合,以传递拱肋的压力给拱座。安装后的部分拱肋可绕铰轴转动。

钢管桁架节段之间用高强螺栓临时连接,实现了节段就位后扣定速度快,减少了起吊的节段由缆索体系承载在空中停留的时间,节段之间的嵌填管

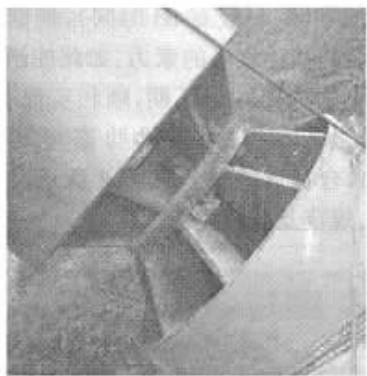


图 7 高强螺栓临时连接

在接头螺栓紧固并在前段扣定后焊接。拱脚设铰便于调整拱轴线,此铰在第 9 段安装完并调好拱轴线形后再固结。

#### (17) 标高及轴线快速测量。

轴线测量采用在轴线上安置仪器及设后视点直接观测法(钢管桁架节段上预先设置轴线及高程观测点),高程采用 2"级全站仪进行观测,并经常进行两岸交叉检测校对,达到了精度要求,并且测量速度快,为加快安装进度提供了条件。

#### (18) 正式扣索、临时扣索分别设置(见图 1)。

1 号、2 号、4 号、6 号、8 号节段上的扣索为临时扣索,3 号、5 号、7 号、9 号、10 号、11 号节段上的扣索为正式扣索。

临时扣索采用  $\phi 47.5$  mm 钢丝绳张拉,锚固于扣塔下或扣锚处,正式扣索均锚于扣锚上。临时扣索的前端用捆绑方式与钢管桁架连接,避免了在桁架上的捆绑位置焊接扣点构件所产生的附加焊接应力,有利于结构受力;正式扣索用钢绞线张拉至扣锚处,用千斤顶进行调节,便于控制钢管桁架的空间位置。正式扣索每肋每一扣点处设 4 束,每束数量有 6、8、9、10 根 4 种,预先制作时编束,每间隔 1 m 用 16 号铁丝绑扎两圈。

(19) 扣索锚固端采用 P 型锚与专门锚具共同锚固。

锚固端位于拱肋钢管桁架上,在其锚点处设置扣点(1~6 号)及转点(拱轴线与扣索方向间的夹角较小时,在 3 号、4 号、5 号、6 号扣索处增设),在扣点下设有 4 个孔穿过的反力梁,孔径分别为 120 mm (1 号、2 号、3 号扣索处)和 140 mm (4~6 号扣索处),反力梁孔的外端面与扣索受力方向正交。

扣索专用锚具由锚头和锚环组成。锚头上根据设计钻有能穿过扣索钢绞线的孔,过孔的所有钢绞

线由 P 型锚锁住端头,施工中主要注意 P 锚位置要处于同一横断面上,扣索固定端安装时,将锚头穿过反力梁的相应孔道后,将锚环(内丝口)施入锚头(外丝口)并使锚头外露三圈丝口即可。

#### (20) 张拉端锚固体系的非常规设置。

张拉端锚固体系设置见图 8 所示。由于钢绞线扣索受力在  $0.08R_y \sim 0.42R_y$  之间,属于典型的低应力状态,张拉端要将其可靠锚固是一大难题。我们为此进行了专题试验研究,开发出了一套既能保证可靠锚固,又能适应放、张拉索的低应力夹片锚固体系。该体系的创新点在于用特制压板由外力(千斤顶)压住夹片,然后将压板与锚头之间的压紧螺栓拧紧,使钢绞线处于低应力时,达到防止夹片松出的目的。

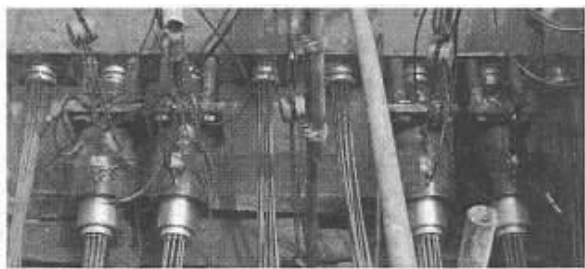


图 8 张拉端锚固体系设置

#### (21) 拱肋钢管桁架节段安装设置少抗风绳系统。

本桥实施方案专家评审时,鉴于桥址处的地形限制和计算上的可行,同意仅在第 5 号拱肋节段处设正式八字抗风索一对,其他节段安装时,仅在需要时设调位(而非稳定用)抗风索。实施中 5 号段正式扣索采用  $4\phi 21.5$  mm 钢丝绳收紧,收紧力约 20 t。但随着悬拼节段的增多,加之巫峡峡口风力很大,在吊安至第 8 号段时,风力引起的偏位约达 10 cm,因此,在 7 号段加设了  $2\phi 28$  mm 的抗风钢丝绳收紧,在吊至第 10 段时,风引起偏位达到约 20 cm,又在 10 号段加设了  $\phi 21.5$  mm 的调位钢丝绳。

根据实际情况,我们认为特大跨径钢管混凝土拱桥拱肋安装时,仅初始的 2~3 段用调位抗风索,此后用较少的横向正式抗风索即可(不需每段均设),实施中(合拢前)不需要再设调位钢丝绳,而拱肋轴线位置的准确应由拱肋的自身刚度及加工精度来保证。

#### (22) 用一对扣索的千斤顶控制调索。

本桥拱肋安装用的正式扣索共 6 对,每岸的一个扣索索号在上、下游肋上各有 4 根索,如每根扣索

上全部设千斤顶(在合拢前),则需千斤顶和配套油泵 96 台,将会耗去许多费用,是不经济的。经我们提出,监控单位同意,实施中只设了一对索的千斤顶,即实有千斤顶共 16 台。其使用方法是,首先安置千斤顶在待安拱肋节段的拉索位置,在该段拱肋钢管桁架(含上、下游节段及横联)安装完毕后,在安装另

岸的节段的期间(一般有 3d 时间),根据监控指令,调整已安装的其他索号的索力。如此控制及布置后,没有因为调索力而耽误工期,顺利实现了本桥拱肋高精度合拢(轴线、两条拱肋高程相对误差均  $\leq 10\text{ mm}$ ),合拢后的全景见图 9 所示,控制结果满足了设计、规范及监控要求。

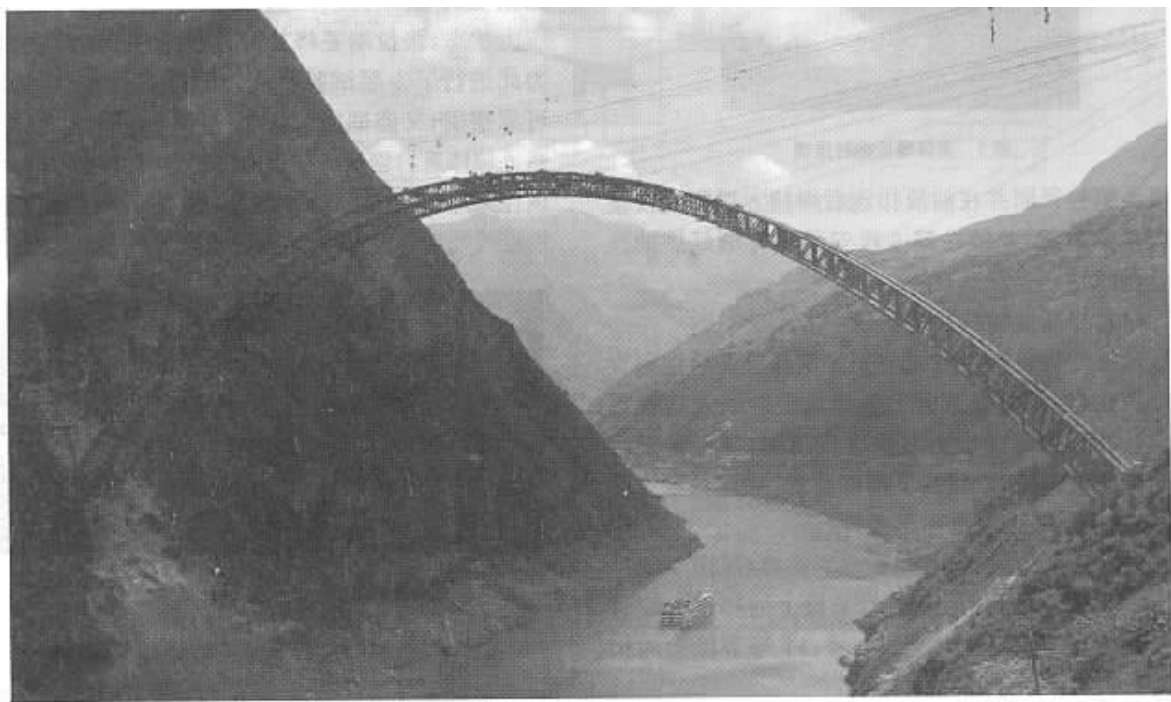


图 9 巫山长江大桥钢管桁架拱肋合拢全景

### 3 结语

巫山长江大桥拱肋钢管桁架节段共 64 个吊装单元,已在 2003 年元月 16 日~4 月 16 日进行安装,2003 年 4 月 17 日成功实现了拱肋合拢。在钢管

拱肋节段安装过程中,大胆进行技术创新,所开发或应用的上述一系列新设备及关键施工工艺、技术,经实施证明是非常成功的,其成果全面完善了大跨径桥梁的无支架缆索吊装体系,可供类似工程借鉴。

## 京珠湖北段 2.5 亿元“叫卖”五年养护权

近日,中国路桥、北京路桥、天津市政、湖北路桥等来自全国各地的 18 家大中型公路施工企业聚集武汉,角逐 339 km 的京珠高速公路湖北段的养护工程施工权,养护施工时间为 2004 年至 2008 年,养护金额高达 2.5 亿多元。

此次养护招标工程的养护里程、工程金额、养护年限在全国都很少见,该工程以长江为界分为 3 个标段,即北段、南段和全线所有的桥梁段,每个标段工程量均近亿元。一次性招标 5 年的养护工程施工,有利于吸引和稳定优秀的养护企业,能创造良好的施工环境和提高养护质量。

京珠高速公路湖北段是湖北省高速公路养护体制改革的试点。湖北京珠高速公路公司为了改变传统的养人不养路的局面,切实将养护经费用在公路养护上,不设专门的养护公司或养护队,而将养护工程面向社会公开招投,按照“公开、公平、公正、竞争、择优”的原则,选择优秀的养护施工队伍。