

摘要：常规悬索桥钢桁梁采用缆载起重机进行吊装，缆索起重机作为一种跨越能力极强的起重设备，在大跨径桥梁施工中也广泛应用。尤其在环境受限的条件下，在经济性和便利性上有着无可比拟的优势。以大跨径超重节段钢桁梁悬索桥上部结构施工为依托，对大跨径重载缆索起重机应用的关键技术进行研究。通过采用缆索起重机安装工艺，解决了跨中部分区域顶面在主缆以上梁段的吊装难题，优化钢桁梁吊装的工序，有利于保证施工安全。

关键词：大跨径；重载；缆索起重机；悬索桥；吊装

中图分类号：TV53+2 文献标识码：A 文章编号：1001-0785（2020）13-0050-05

**0 引言**缆索起重机又叫走线滑车，是挂有取物装置的起重小车沿架空承载索运行的起重机，常用在其他吊装方法不便或不经济的场合。缆索起重机具有起升高度大、起重作业跨度大、作业范围广、在特定条件下可发挥其他起重机械所不能发挥的作用等特点，被广泛应用于水电站建设、公路铁路桥梁建设、港口搬运和渡槽架设等方面的施工，图1为缆索起重机在桥梁建设中的应用。

**1 依托工程概况**温州瓯江北口大桥项目是甬台温高速公路复线和温州市南金公路两大项目跨越瓯江的控制性工程。瓯江北口大桥主桥系国内外首座三塔四跨双层加劲梁悬索桥，主跨跨径为 $2\times 800\text{ m}$ ，三塔均采用钢筋混凝土结构，结构布置如图2所示。主跨跨中部分区域梁段顶面在主缆以下，中跨布置图如图3所示。

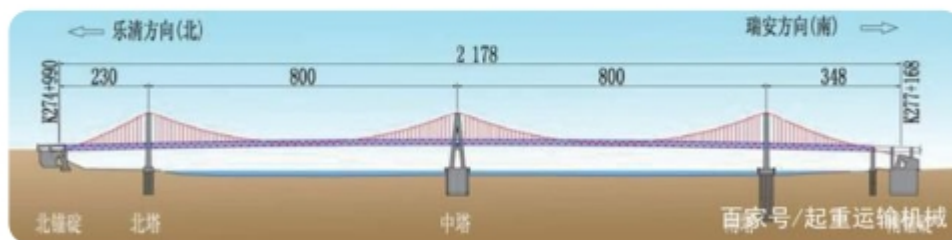


图2 瓯江北口大桥主桥结构布置图

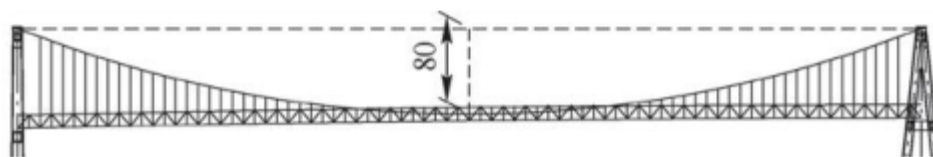


图3 中跨布置图

如图4所示，梁跨布置为 $215+800+800+275=2090\text{ m}$ ，加劲梁采用板桁组合式整体加劲梁，桁宽为 $36.2\text{ m}$ ，吊索距主桁中心为 $2.8\text{ m}$ ，中跨缆径为 $874\text{ mm}$ ，吊索与主桁净距约 $1.85\text{ m}$ ，全桥共110个吊装节段。

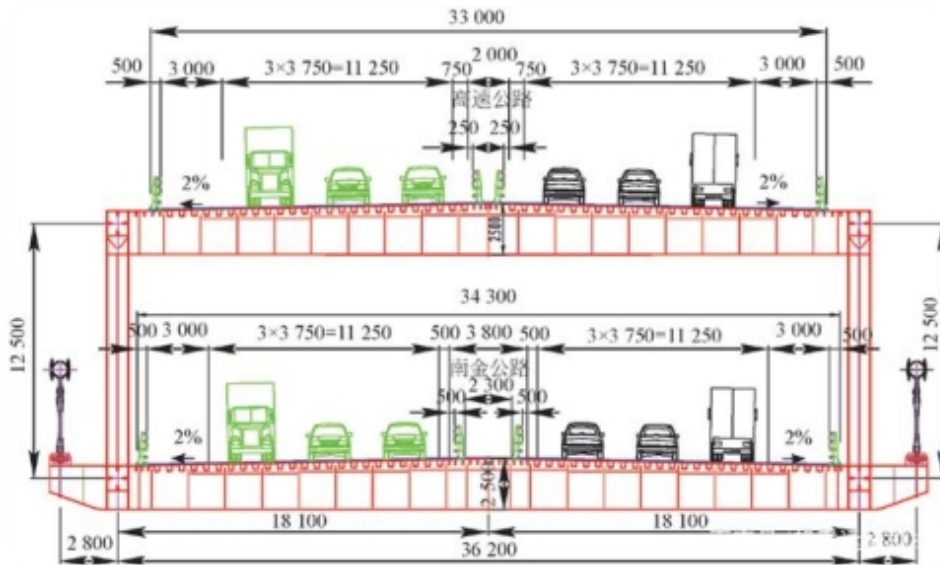


图4 加劲梁布置图

上部结构施工的主要特点有：1) 主跨跨中部分区域梁段顶面在主缆以上，范围约 $220\text{ m}$ ；2) 加劲梁最大重量达到 $813\text{ t}$ ，对缆索起重机的要求高；3) 若利用主缆为支撑结构假设主梁，为满足中塔处主缆钢丝与鞍座槽间抗滑移安全要求，两个主跨应保证对称同步安装加劲梁。

**2 总体施工工艺研究**悬索桥上部结构加劲梁施工采用的施工方法包括桥面起重机施工法、缆索起重机施工法、缆载起重机施工法和轨索移梁法等，或其中的几种方法组合施工。

1) 浮式起重机+缆载起重机提升安装浮式起重机安装跨中比主缆低的钢桁梁，然后利用缆载起重机安装剩下的钢桁梁。该方案的主要问题是浮式起重机的起升高度要求较高，浮式起重机进出工作面时需长距离横移和大角度俯仰，且大型浮式起重机长期横江驻位布置于主缆间，严重影响通航。

2) 桥面起重机悬臂拼装桥面起重机反力主要由桁梁承担，斜杆应力大，随悬臂长度增加，吊索索力增大，主梁和吊索均需加强。

3) 连续千斤顶提升安装从跨中向两侧索塔，采用连续千斤顶倒提升工艺对称安装；每吊装一个节段，需安拆一次临时索夹、提升索、连续千斤顶和泵站；吊索锚固于下横梁，提升设备需布置于横梁下方；该方案施工操作不便，且工效较低。

4) 缆索起重机提升安装目前，在两塔悬索桥中应用较多，在三塔悬索桥应用案例较少。通过对以上方案在安全、工效和使用操作便捷性方面综合考虑，采用缆索起重机提升安装方案[1, 2]。

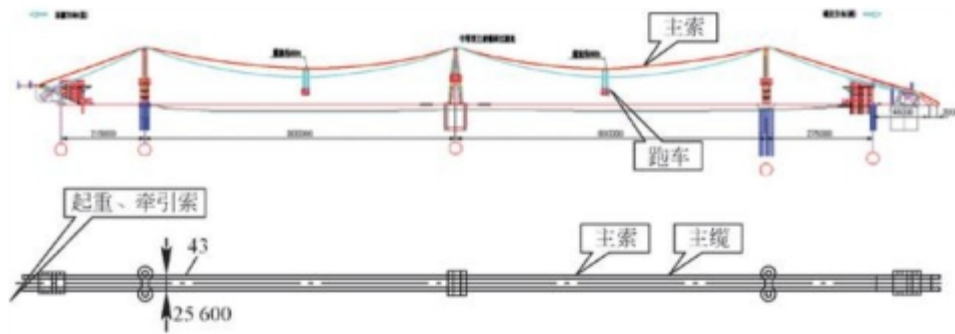


图5 缆索起重机总体布置

缆索起重机主要由埋件系统、主索、起重索、牵引索、起重小车和吊具等组成。埋件系统包括主索在两侧锚碇锚固、卷扬机锚固和塔顶转索鞍锚固。主索是承受起重荷载的直接受力构件，主索的垂度选择决定了起升高度。起重索用于提升加劲梁的起升机构，牵引索用于控制起重小车的调位。起重小车一方面把起重荷载传递至承重索，同时可在承重索上在牵引索作用下移动。吊具的主要作用是实现与加劲梁连接。

缆索起重机安装主梁工效高，能缩短上部结构安装时间，尽早完成合拢。主跨采用从中塔往两侧边塔的架设顺序，提高主缆索股抗滑移能力和主梁安装工效。缆索起重机的主要技术参数有：跨度为800 m，起重量为850 t，起升高度为50 m，主索材质为4-14Φ 64，起重索材质为4-Φ 30，牵引索材质为4-2Φ 30。

为满足850 t起重能力要求，主索数量需达到56根。考虑到结构分块运输安装的便捷性，将56根主索分主索一共分为4组，每组14根直径64 mm钢丝绳组成。其他机构布置也根据主索的布置分为4组单元。主索在主塔顶设置转索鞍，转索鞍横向布置图如图6所示。

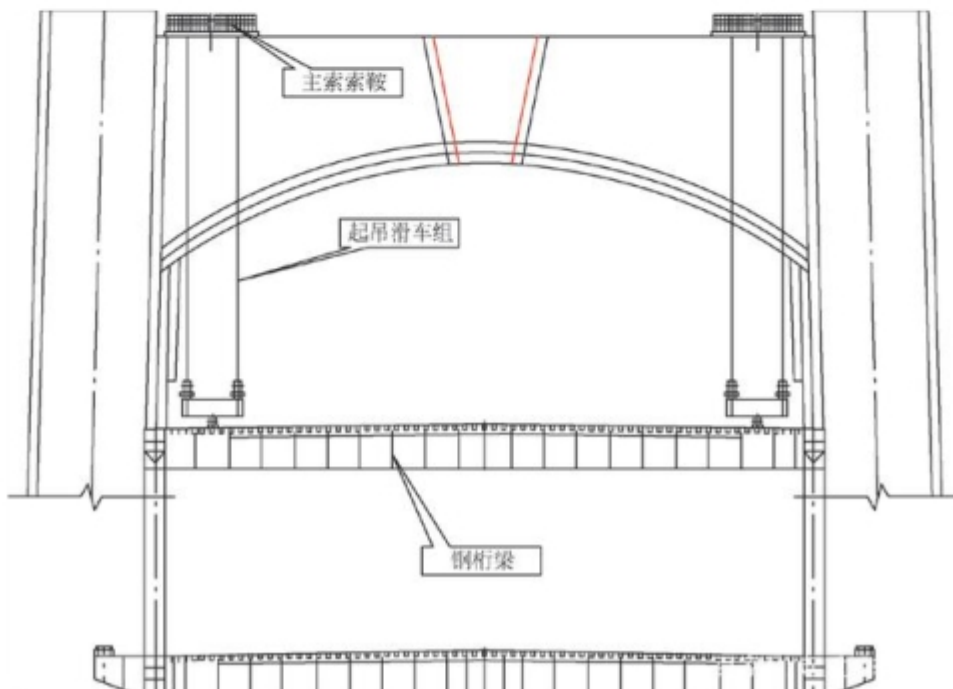


图6 转索鞍横向布置图

示。

边塔塔顶设置转索鞍，主索通过转索鞍后经边跨锚固于锚碇上的埋件上，埋件与主索间设置可调装置，以调整主索的线形，如图8所示。图9为牵引和起重绳索绕线图，牵引系统采用循环牵引系统，牵引绳倍率为8，起重绳倍率为12，每组主索设2台起重和2台牵引卷扬机。

每组起重单元采用4个分离式的跑车，跑车上连接上挂架，吊具上设置下挂架，上下挂架分别设置定滑轮和动滑轮组，跑车及吊具布置如图10所示。



图7 中塔转索鞍布置图

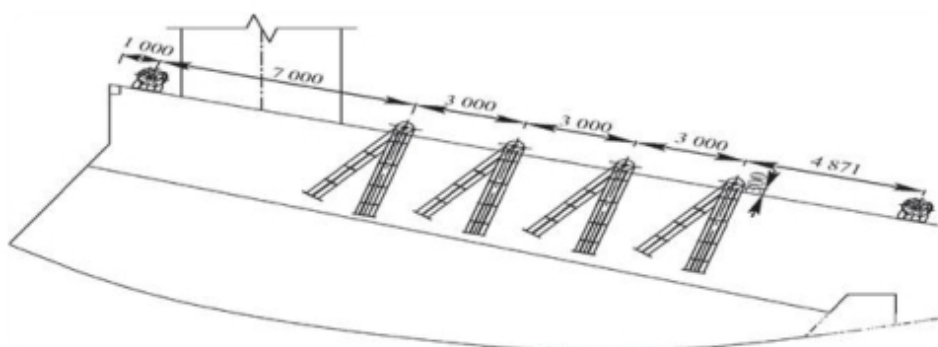
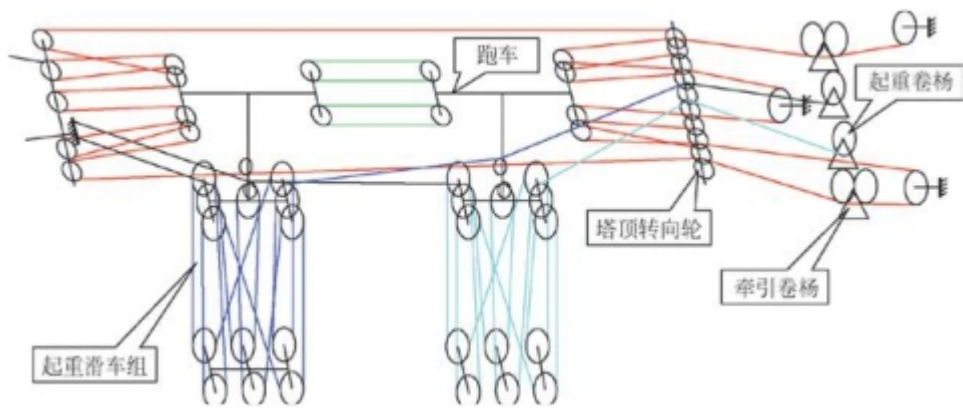


图8 主索锚固



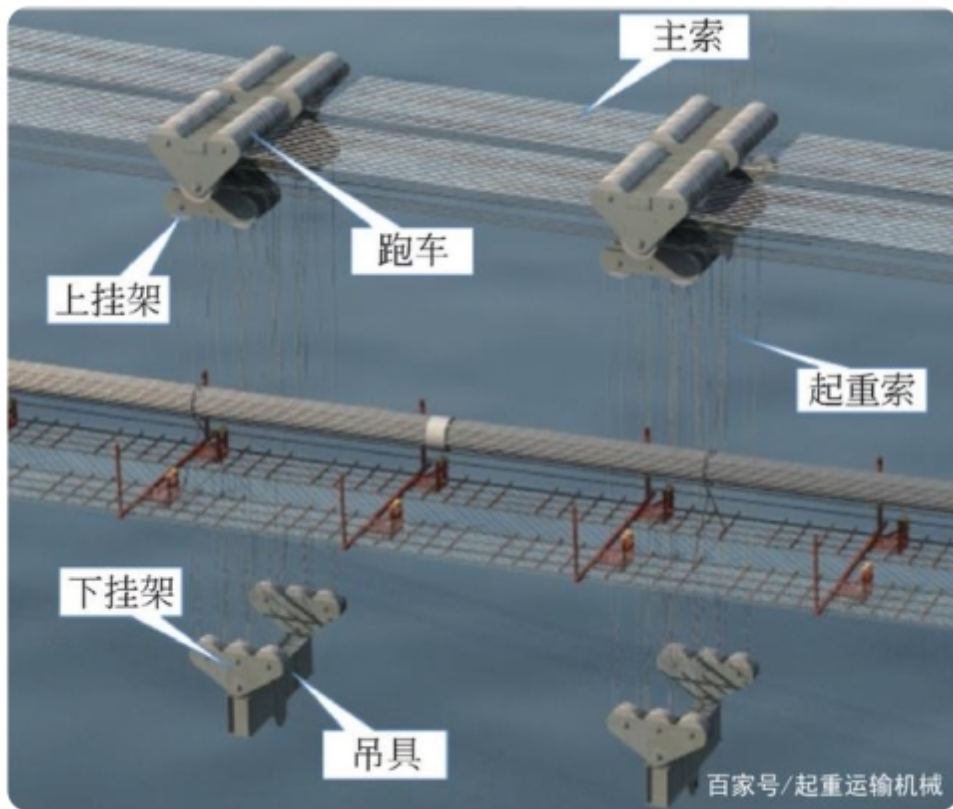


图10 跑车及吊具布置图

较大的跨径和起重能力导致主索及其他绳索直径均较大，为解决这些绳索的安装问题，在塔顶设置专用门架，在门架上设置牵索装置，绳索安装门架见图11[3, 4]。

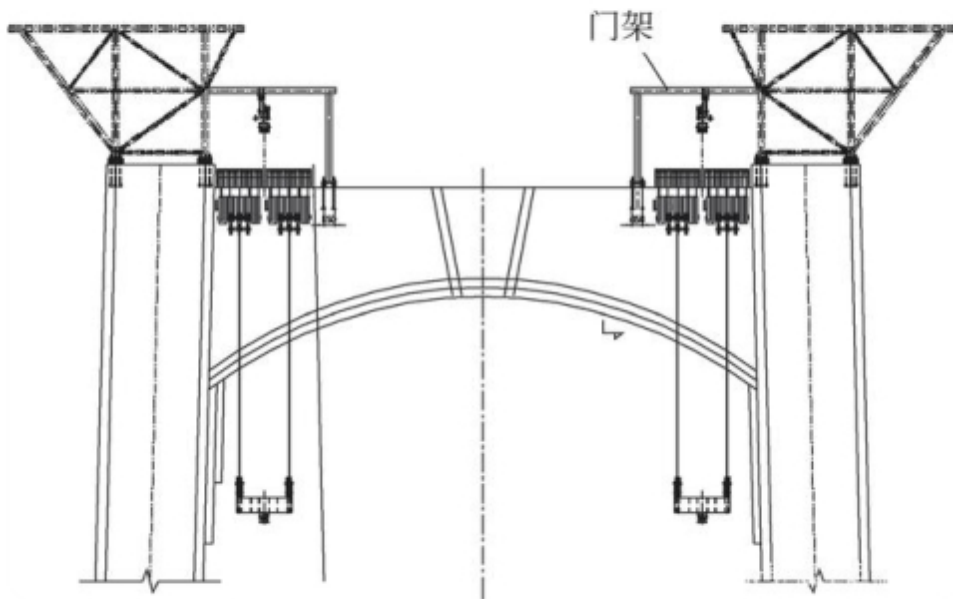


图11 绳索安装门架图

**3.2 总体工艺流程** 1) 主缆架设完成后安装缆索起重机，同步搭设无索区支架；2) 缆索起重机荡移安装中、边塔无索区钢桁梁；3) 缆索起重机依次从中塔向两侧同步吊装钢桁梁，边跨无索区钢桁梁采用倒提升装置吊装转移至安装位置，如图 12 所示；

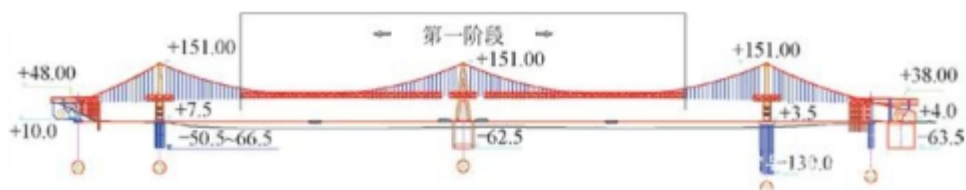


图12 中跨钢桁梁安装图

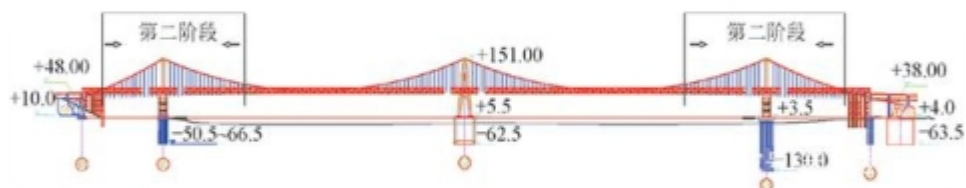


图13 中跨边跨钢桁梁同步安装图

**4 计算分析4.1 主索垂度及锚固** 计算主索垂度和在中塔的锚固形式是两个互相影响的问题。如图14所示，若主索在中塔设置为滑动式，当主索采用1:15垂度，则在两侧同步起吊过程中，主索矢高为53.3m；当单侧起吊时，由于主索滑移，最大矢高为71.3m，无法满足吊高要求。

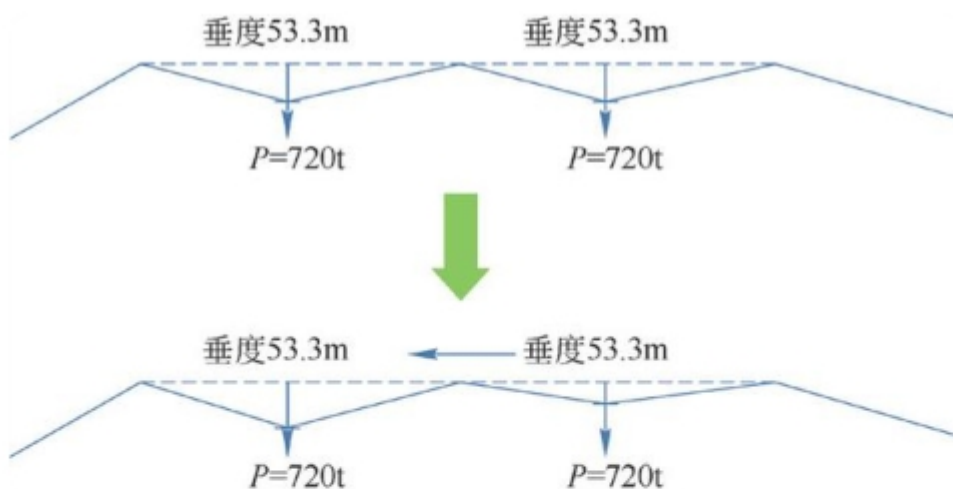


图14 主索1:15垂度时吊装图

若要使吊高满足要求，则应将垂度提升至1:20，此时单侧起吊主索的最大矢高为52.8m，吊高满足要求，但主索的规模增加约30%，经济性降低。

假定主索在中塔定位不滑动式，钢桁梁不同步吊装时会在塔顶产生水平力，复核主塔受力是否满足要求，通过计算，该工况下主索垂度按1:15计算，主塔的应力满足要求，如图15所示。



图 15 主塔应力图

因此，选择主索在塔顶不滑移，主索垂度为 1:15 的总体布置形式。

4.2 中塔顶板局部计算根据规范验算中塔顶板局部受力，单位宽度截面抗弯承载能力  $818 \text{ kN} \cdot \text{m} >$  实际弯矩  $645 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。中塔锚固处上横梁顶板受力满足要求，如图 16 所示。

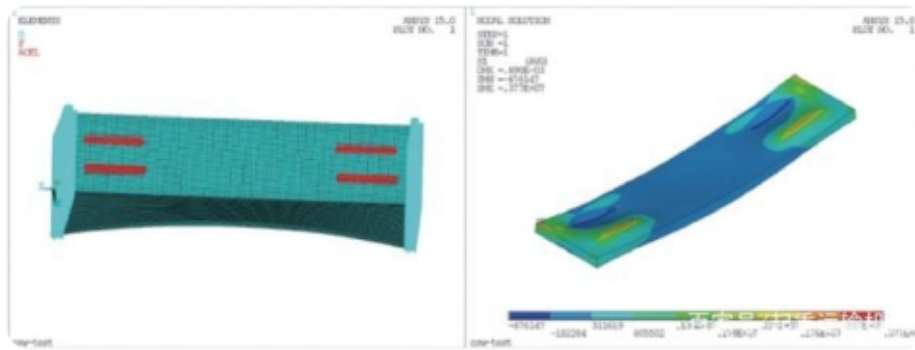


图16 中塔顶板局部应力图

4.3 主要部件计算跑车是起重的重要承载构件，建立完整模型对小车结构进行计算，结构最大应力为154.3 MPa，如图17所示。

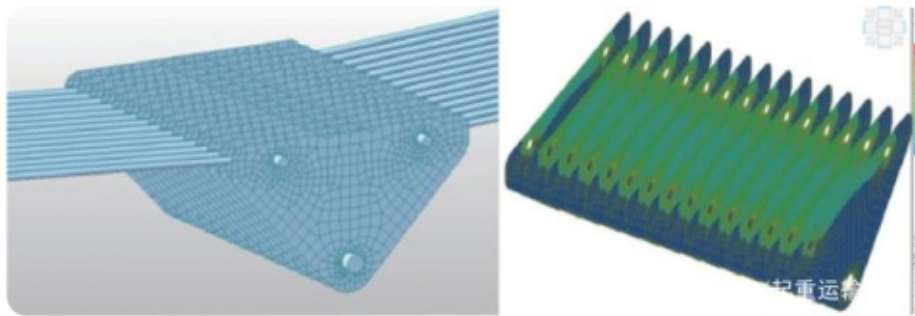


图17 跑车结构应力图

塔顶主索锚固装置涉及主索锚固安全，考虑了锚固区域开孔影响。计算分为两种情况：一是锚固位置考虑一侧按吊重时最大索力（900 kN）加载，另一侧按照空载时索力（500 kN）加载，即单侧起吊工况。二是中塔两侧缆索起重机均按吊重时最大索力（900 kN）加载，即同步起吊工况。计算结构最大应力分别为140 MPa和148.4 MPa，如图18所示，满足规范要求。

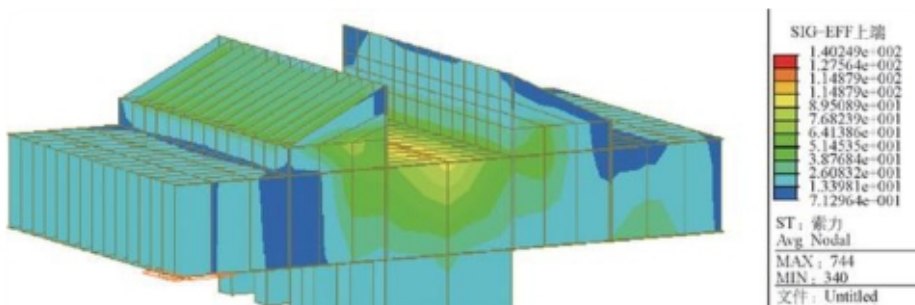


图18 塔顶主索锚固装置应力图

当起吊点越靠近两侧主塔时，跑车与主索之间的角度就会越大，相应地导致牵引索的力增大，吊点离边塔25 m 处主索的线形如图19 所示。主索的转角约为 $25.3^\circ$ ，经计算牵引索的安全系数满足要求[5, 6]。

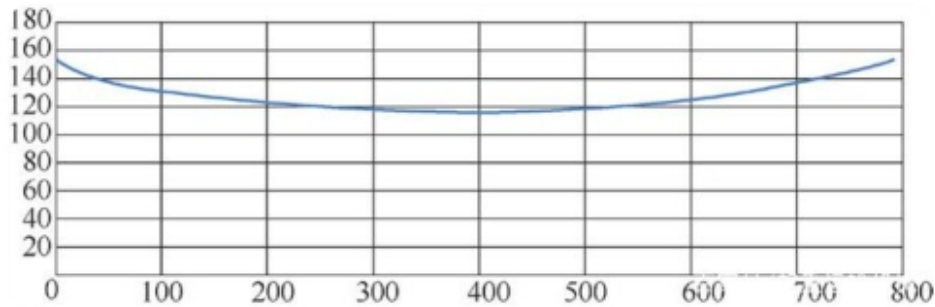


图19 吊点离边塔25m 处主索线形图

**5 结束语**结合温州瓯江北口大桥的实际施工情况，深入研究了钢桁梁的架设工艺，对比了多种不同施工方法的优缺点。缆索起重机在大跨度钢桁梁施工中，虽经济性并非最好，但在受限环境下却是较安全便捷的施工方法。缆载起重机规模庞大，对主塔本身受力影响显著。通过对塔本身及其在塔顶设置的锚固装置等验算分析，确定最优的缆索起重机结构形式。随着我国桥梁建设向大跨径方向的深入推进，类似的桥梁会越来越多，该技术的研究和应用必将得到推广，为国内外类似桥梁的施工提供了更多的思路。

参考文献[1] 付强. 大跨重载缆索起重机在大桥施工中的应用[J]. 施工技术, 2019(4): 111, 112.[2] 李伟, 宁凯. 山区大跨径悬索桥钢桁加劲梁施工技术[J]. 公路, 2015 (9): 127-131.[3] 常磊, 朱东生, 刘德敬, 等. 山区大跨径悬索桥施工缆索起重机总体设计[J]. 重庆交通大学学报, 2016 (10): 13-16.[4] 韩玉, 秦大燕, 黄绍结, 等. 山区斜拉桥中跨主梁缆索起重机安装技术[J]. 公路, 2017 (6): 154-157.[5] 田亚男, 张卫星. 缆索起重机结构有限元分析[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2019 (9): 1-5.[6] GB50017 - 2017 钢结构设计标准[S].