DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.026

悬索桥钢桁加劲梁架设施工关键技术研究

周杜[1]，刘武[2]，石柱[2]
（1.湖南建工集团有限公司，湖南 长沙 410000；2.湖南路桥建设集团有限责任公司）

摘要：杭瑞洞庭湖大桥为世界级大跨径悬索桥，大桥建设要求高，工期紧张，施工环境条件复杂。在加劲梁架设阶段，从设备适用性改造入手，研究了一套具有创造性的钢桁加劲梁架设方法和一系列辅助技术措施，并发明一套适用于悬索桥非通航区加劲梁卸船、荡移就位的施工方法，解决了大跨径悬索桥复杂环境条件下加劲梁架设的关键技术难题。

关键词：悬索桥；钢桁加劲梁；缆载吊机改造；窗口刚接法；临时起吊系统

杭瑞洞庭湖大桥首次在公路悬索桥提出并采用新型的板桁结合型钢桁加劲梁结构，桁架结构和桥面板连接形成整体结构，使桥面系参与结构受力，节省了钢材用量。然而在加劲梁吊装施工阶段，由于桁架结构和桥面板作为整体一起吊装，因而节段吊装重量较大，对施工吊装设备、吊装工艺提出了更高的要求；大吨位钢桁加劲梁的无应力拼接及精度要求也相应更高。

同时由于大桥独特的地理环境，钢桁梁架设施工需跨越湘江航道、滩涂和湿地、沿湖路防洪大堤等，水上、陆上交通繁忙，施工安全风险大；前期施工受汛期影响，大桥建设进度滞后，迫切需要寻求一种更科学、更高效的钢桁加劲梁架设方法，在确保安全和质量的前提下，加快施工进度。

该文结合该项目的工程特点、建设环境条件以及工期要求等问题，就该桥钢桁加劲梁架设的施工关键技术和实施效果进行介绍，总结施工关键技术可为悬索桥加劲梁的架设提供新的方案。

1 工程概况

杭瑞洞庭湖大桥加劲梁采用板桁结合型加劲梁新结构（图1），具有结构刚度大、抗风性能优良、耐久性好、经济技术指标好等优点。

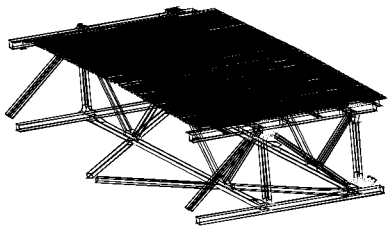


图1 板桁结合型加劲梁三维图

主桁架为带竖腹杆的华伦式结构，由上弦杆、下弦杆、竖腹杆和斜腹杆组成。主桁桁高9.0 m，桁宽35.4 m，节间长度8.4 m；一个标准节段重300 t；钢桁梁由2个节间组成，长度16.8 m。加劲梁断面构造见图2。

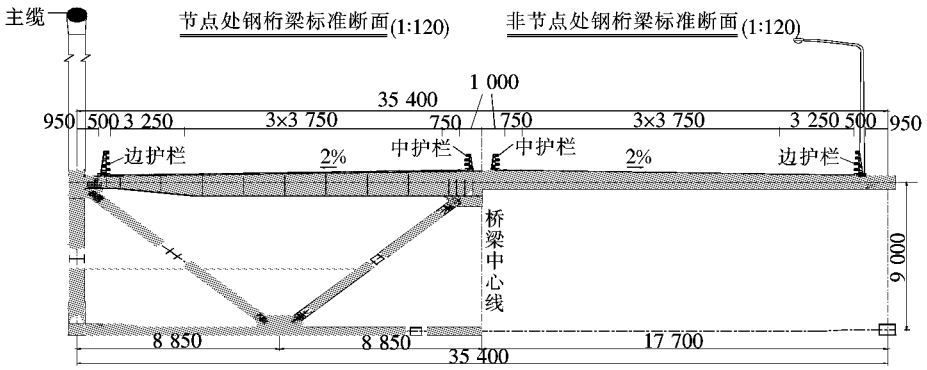


图2 板桁结合型加劲梁断面构造图（单位：mm）

收稿日期：2019－03－29

作者简介：周杜，男，大学本科，工程师.E－mail:494094070@qq.com

桥面系采用正交异性桥面，桥面板厚 16 mm，下设 U 形加劲肋和板式加劲肋。U 形加劲肋肋高 280 mm，板厚 8 mm；板式加劲肋为 180 mm×14 mm。

全桥共 115 个节段，其中中跨 88 个节段，君山侧边跨 27 个节段。

2 施工技术研究背景

2.1 重难点分析

结合该项目的特点，钢桁加劲梁架设施工具有以下难点：

(1) 板桁结合型加劲梁的主要结构特点为主梁的桁架结构和桥面板为整体式结构，节段吊装重量较大，标准节段重 300 t，最大节段重达 544 t。大吨位钢桁加劲梁架设对施工吊装设备、吊装工艺提出了更高的要求，因此如何解决起吊设备能力受限，实现钢桁加劲梁高精度拼装成为需解决的一个主要问题。

(2) 为确保钢桁加劲梁的安装质量和耐久性要求，钢桁梁的安装需在无应力条件下完成节段之间的永久连接。传统施工方法存在施工工期长、桁梁结构施工过程应力过大、需等代荷载配重完成铰固转换等各种弊端。

(3) 前期施工受汛期洪水影响，大桥建设进度整体滞后。为了保证杭瑞高速公路最后关键枢纽工程的节点目标不变，加劲梁架设工期十分紧张，而钢桁加劲梁的吊装、高空拼接以及吊装过程受力体系转换等均为安全风险巨大的施工作业，为确保施工安全、质量和进度要求，传统施工工艺无法满足施工需要，寻求一种更科学、更高效的钢桁加劲梁架设方法势在必行。

(4) 大桥位于洞庭湖出口处的七里山港口区，钢桁梁架设施工需跨越沿湖路防洪大堤、湘江滩涂以及湿地等非通航区。常规的施工方法需额外投入一台大吨位的缆载吊机来实现非通航区加劲梁节段的卸船、荡移就位，然而缆载吊机的荡移受自身结构特点和偏转角限制影响，施工安全风险高。出于安全、经济、高效的目的，需对非通航区加劲梁架设方法进行探索，以解决施工难题。

综上所述，在保证施工质量和安全的前提下，在有限的时间及复杂的建设环境条件下，完成加劲梁吊装任务困难重重，因此研究一整套合理的加劲梁安装方法以解决施工难题为大桥建设的重中之重。

2.2 解决思路

(1) 开展设备适用性研究，根据该桥加劲梁的结构特点，对现有缆载吊机进行适用性技术改造以应用于新的工程，节约工程造价，解决新旧设备之间突出的经济问题。

(2) 创新钢桁加劲梁架设施工技术，在吊装过程中实现钢桁梁永久刚接，节省大桥建设关键工期。

(3) 提出一套与钢桁加劲梁架设新方法相匹配的辅助提升系统和纵向对接控制等施工辅助措施，解决起吊设备能力受限的问题，并实现钢桁加劲梁高精度拼装。

(4) 研究采用一种新的起吊设备和方法，通过主缆尽量利用现有设备完成钢桁梁节段的卸船和荡移就位，降低施工投入，解决悬索桥浅滩及跨线区加劲主梁架设施工安全风险高的难题。

3 施工关键技术

3.1 缆载吊机设备适用性改造技术

3.1.1 概述

采用缆载吊机进行悬索桥加劲梁的安装，在中国已有较多工程实例，技术也比较成熟。但对如何改造现有的缆载吊机，使之能应用于新的桥梁，这方面的研究很少。缆载吊机改造中的很多关键技术，如加劲梁长度变更、起升能力变更、吊具变更、行走机构等，很多问题值得研究。尤其是应用于更大跨径、更大重量加劲梁的安装时，其起升能力及安全性，值得深入研究。

3.1.2 主要改造方案

缆载吊机主要结构包括主桁架梁、行走机构、提升机构、吊具、液压系统、控制系统、动力系统等。改造时需根据悬索桥主缆的大小、间距，以及钢桁梁节段长度、重量等结构特点对原型缆载吊机的主桁架梁、行走机构、吊具、控制系统、液压系统、动力系统等进行功能改造，以满足加劲梁架设需求。

就该项目而言，缆载吊机改造方案如下：

(1) 主桁架梁改造：作为吊机主要承载构件，其强度及刚度应满足设计要求。根据杭瑞洞庭湖大桥主缆间距，需将缆载吊机主桁架跨度由 27 m 变为35.4 m，吊点间距由 21 m 改为 30 m，跨度需增加8.4 m；同时对主桁架梁及两端负重传递梁等部位进行加强改造，提高其起重能力。

(2) 行走机构改造：行走机构主要由行走架，导轨、支腿、液压抱箍装置、行走油缸、顶升油缸、抱箍油缸等组成。首先对缆载吊机的液压抱箍进行改造，以适应主缆尺寸，同时增大液压抱箍的支撑面积，并在支

撑面设置合理厚度的橡胶板，以起到保护主缆的目的；通过增加液压抱箍的数量和油缸推力，提高吊机行走工况和提升工况的抗下滑能力；优化行走机构的结构形式，改善受力情况，减小钢构件自重（图 3）。

（3）吊具改造：吊具的改造首先要增大其起吊能力，然后进行特殊的设计，能在确保安全的情况下，避开主缆。吊具主要由主梁、上拉座、十字铰座、锚具拉座、调整油缸等组成。分配梁通过螺栓与主梁连接，使得分配梁可适应 2.95、5.6、8.4、8.8 m 节段梁吊装。上拉座通过反钩的形式与主梁连接，其一端头设置有调整油缸，通过调整油缸的调节，实现不同梁段的吊装。分配梁上设置有多个绳槽，用于安装吊装无接头绳圈，单个绳圈额定拉力为 630 kN，长度为 5.2 m，绳圈底部通过承重滑轮与钢梁吊耳相连（图 4）。

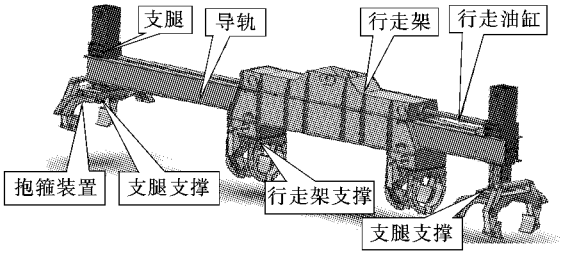


图 3　缆载吊机行走机构

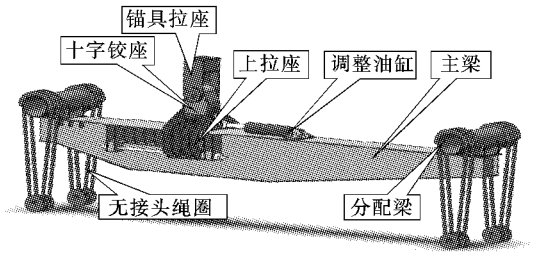


图 4　缆载吊机吊具结构

（4）动力系统改造：该缆载吊机的动力系统主要由一台额定功率为 280 kW 的柴油发电机组组成。柴油发电机组为液压泵站、控制系统及电力照明等提供动力源。

（5）控制系统改造：通过改造，形成由 1 个主控台、2 个泵站启动箱、2 台现场控制箱、若干传感器、若干数据线组成的分部式计算机网络控制系统。设备的工作参数信号经过数据线传送到主控台，主控台根据各种传感器采集到的位置信号、压力信号，按照一定的控制程序和算法，决定油缸的动作顺序，完成多个油缸的协同工作，同时控制比例阀的开口大小，驱动油缸以规定的速度伸缸和缩缸，从而实现油缸的同步控制。

（6）液压系统改造：该缆载吊机液压系统分为主液压系统和吊具液压系统。主液压系统的改造利用柴油发电机组发电，带动组合泵电机，提供三路独立控制回路以及一套辅助回路；三路独立控制回路分别供给行走连续提升油缸、牵引油缸、锚具油缸、支撑油缸以及液压收线马达；辅助循环回路用于对液压系统的油温、油液污染进行控制。吊具液压系统控制采用电磁换向阀＋线控的方式进行控制，实现吊具的双向平衡，保证动作平稳、安全可靠。

3.1.3　缆载吊机改造与新制综合对比

相对于同等规模的悬索桥，一般需投入 2 套 600 t 缆载吊机方可满足施工需求。2 台 600 t 新制缆载吊机需投入约 900 万元。

杭瑞洞庭湖大桥通过设备适用性改造技术研究，将原矮寨大桥的缆载吊机进行改造，成功完成大桥加劲梁的架设，单台缆载吊机投入的改造费用约 240 万元，大大降低了施工成本。

3.2　“窗口刚接法”架设技术

3.2.1　概述

悬索桥的加劲梁架设主要是利用主缆作为加劲梁架设的支承结构和工作平台，由于主缆是柔性的，施工过程中主缆的非线性非常明显，其几何形状随着梁段的架设而不断改变。当所架梁段不多时，梁段的上弦或上翼缘板相互挤压，而梁段的下弦或下翼缘板互相分离而出现“张口”，若过早使下弦或下翼缘板闭合，则梁段结构或连接就有可能因强度不够而破坏，因此悬索桥加劲梁的架设过程与梁段的连接方式有着密切的关系。

目前悬索桥钢桁加劲梁的常规施工方法根据安装时梁段间连接方式的不同分为 3 种：全铰法、刚接法和刚铰结合法。铰接法通过配重方式实现梁段间无应力铰固体系转换，配重的可操作性、经济性、工期压力都有极大的难度。在钢桁梁吊装过程中，主缆变形量大，变形情况复杂，采用刚接法施工可能导致结构中的应力远远大于杆件的极限承载力，并需要配置前端吊索张拉设备，施工难度大、风险高。刚铰结合法需要提前设计、制作大型临时铰，梁段吊装合龙后还需要进行压重等处理临时铰的铰固转换。因此，常规的钢桁梁连接工法均存在一定的使用限制。

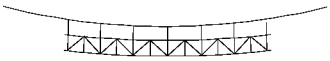
3.2.2　基本原理

“窗口刚接法”是一种利用钢桁加劲梁吊装阶段和吊装后阶段必然出现的无应力刚接窗口实现梁段刚接与吊装同步完成的全新方法（图 5）。该方法利用的无应力刚接窗口可分为两阶段：第一阶段窗口出现在梁

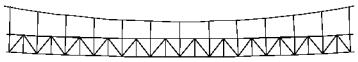
段起吊安装阶段，即部分梁段可直接实现刚接安装，该窗口由吊机自身吊装能力及构件承受变形能力控制；第二阶段窗口出现在铰固转换阶段，即部分梁段通过铰接安装，后期择机刚接，该窗口由主缆线形变化控制。

3.2.3 计算研究

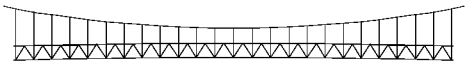
窗口刚接法的铰接口设计需要对加劲梁架设阶段进行分析，以杭瑞洞庭湖大桥为例，采用西南交大开发的桥梁结构非线性计算软件 BNLAS 对铰接口的设置及铰固转换方案进行动态规划设计，同时辅以 Ansys 和 Midas 加以验算。计算荷载考虑跨缆吊机自重荷载与起吊荷载。



(a) 初始阶段—跨中梁段发生下挠



(b) 中间过程—整体线形趋于平缓



(c) 刚接窗口—整体上凸呈无应力拼装线形

图 5 “窗口刚接法”实现原理示意图

对所有设置的临时铰接口施工中的变化规律进行分析，根据每个铰接口在架设阶段出现的无应力拼装机会，综合架梁施工的全过程分析选择最佳转换时机，以实现铰接口的无应力铰固转换。

3.2.4 方案实施

(1) 多节段刚接单元及铰接口形成

通过计算对铰接口数量和位置进行合理设计，即第一阶段刚接窗口的设计。该阶段以吊机起吊荷载与结构受力为控制目标，通过有限元模型计算梁段起吊到位与已安装梁段进行刚接后，是否可以通过缆载吊机及辅助设备提升力抬升，实现与吊索的永久连接，并验算该工况吊索、弦杆、吊耳、桥面板等应力是否超限。一旦某位置出现提升力无法实现吊索连接或者构件应力过大情况，则在该梁段位置设临时铰(图 6)。

(2) 施工过程中窗口的铰固转换

对于铰固转换方案的合理规划，即第二阶段刚接窗口的设计，以铰接口间距在施工过程中的变化规律为分析依据。通过有限元模型计算架设阶段每个铰接口的开口量变化趋势(图 7)，根据吊装过程中的主缆和加劲梁线形变化规律，预测其无应力拼装时机，综合架梁施工全过程结构内力情况分析选择最佳转换时机，以实现铰接口的无应力铰固转换。

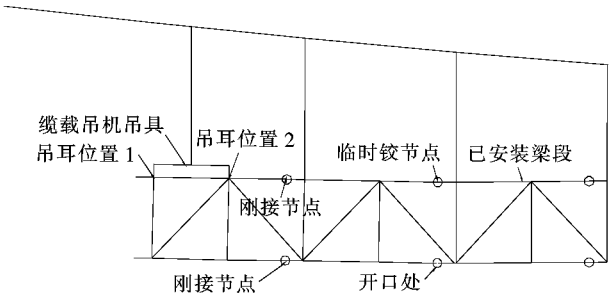


图 6 多节段刚接单元提升示意图

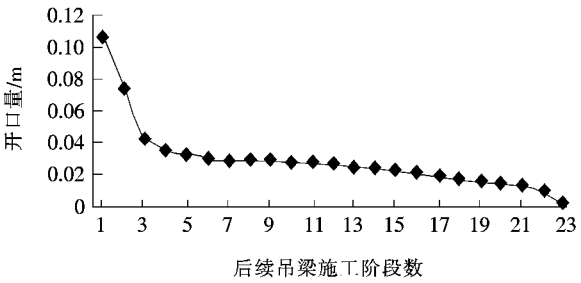


图 7 铰接口开口量变化趋势图(B29～B28 为例)

(3) 大铰铰固转换方案

综合加劲梁等关键结构参数、加劲梁起吊设备起吊能力和吊索的内力等因素后，通过方案优化，杭瑞洞庭湖大桥全桥设置了 53 组临时铰，其中 51 组临时铰在加劲梁段架设过程中完成铰固转换，加劲梁全部架设完成时，位于两侧索塔位置的 2 组大铰无法自动闭合，需通过后期压重来实现铰固转换。

在全桥合龙之后进行压重计算，对压载重量和位置进行计算，使铰接口下弦杆开口量满足刚接条件。

3.2.5 临时铰设置

施工方案研究中提出“冲钉定位，螺栓抗剪”的原则，采用临时冲钉与普通螺栓群的组合作为临时铰(图 8)，利用螺栓与孔壁的间隙及上弦杆的弹性变形使梁段间实现一定程度的转动。

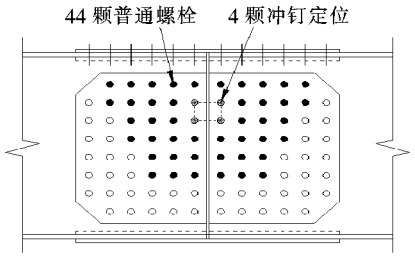


图 8 临时铰设置图

为了提高上弦杆的转动效率，避免相邻梁段桥面

板互相顶紧的现象发生，满足普通螺栓对上弦杆轴力、剪力的传递，并结合现场试验经验，将冲钉、螺栓群中上偏心布置于弦杆节点板。由于螺栓群与孔壁的间隙有限，上弦杆弹性变形量同样需要加以限制，因此，在进行临时铰位置与数量的设置时，也需要充分考虑梁段间的转动需求，控制每个铰接口的下弦杆开口量在吊梁过程中处于一定范围内，以保证施工安全。

3.2.6 方案综合对比

以杭瑞洞庭湖大桥钢桁梁架设施工为例，全桥共 115 个节段。采用“窗口刚接法”进行钢桁梁架设，节省了采用常规施工方法后期需进行体系转换所占用的施工关键工期，全桥钢桁梁架设仅耗时 4 个月，与同类型桥相比，工期缩短 2～3 个月；同时大幅减少了后期铰固转换的配重成本，经济效益显著。

3.3 加劲梁安装过程辅助控制技术

3.3.1 概述

“多窗口刚接法”实施的第一个阶段需将起吊梁段与已安装梁段在起吊过程中刚接，并尽可能多地刚接桁梁，形成多节段提升单元，以减少铰的设置。多节段刚接单元完成后，利用缆载吊机提升与吊索连接进行受力转换。该阶段多节段刚接单元的提升对缆载吊机的起吊能力要求较高，如通过增加缆载吊机的额定荷载来解决，将需对缆载吊机的设计进行重新论证，且缆载吊机的整个设备自重将大幅增加，造成施工成本和安全风险加大。因此提出并采用一套“临时辅助提升系统”配合缆载吊机进行多节段单元提升，以解决缆载吊机起吊能力受限的问题，使多节段刚接得以实现。

由于钢桁梁的结构特点以及节段划分特点，吊装梁段需嵌入已吊装梁段弦杆之间完成拼接，施工过程必须精确调整吊装梁段的平面位置，以确保梁段顺利对接。施工中，创造性地采用“纵向对拉和导向装置”解决梁段高精度拼装的难题。

3.3.2 临时辅助提升措施

在多节段单元梁段提升时，在缆载吊机起吊能力一定的条件下，为解决提升力不足的问题，实施时在主缆上设置临时辅助提升系统（图 9），即利用塔顶 10 t 卷扬机通过 50 t 滑车组走丝以补偿缆载吊机起吊能力，滑车组的下滑轮与加劲梁上的备用吊索孔相连，利用临时辅助提升系统配合缆载吊机同步提升，完成节段单元的提升并与吊索连接。

3.3.3 加劲梁节段高精度对接措施

为解决钢桁梁就位难的问题，在吊装的加劲梁桥面板悬臂段进入已吊装梁段上弦杆之前，通过在吊装梁段和已吊装梁段桥面设置交叉形的手拉葫芦和钢丝绳，对吊装梁段进行平面位置的精确调整，并防止梁段间的碰撞；同时在待吊装梁段的上弦杆上设置导向座，在就位过程中对待吊梁段进行导向，实现大型结构吊装的精细就位。

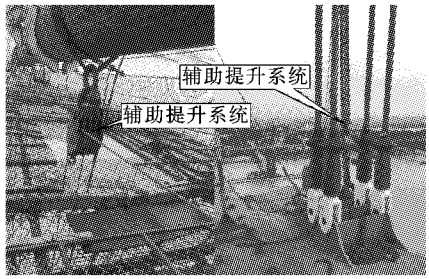


图 9　辅助提升系统

为确保梁段吊装安全，并便于施工操作，一般在吊装梁段和已吊梁段之间预留 50～100 cm 的纵向吊装空间，在吊装梁段提升至指定高度后，对梁段纵向牵引，进行拼装位置的精调，完成梁段间的对接和拼装。

梁段对接采用千斤顶＋精轧螺纹钢筋组成的对拉装置，通过加劲梁左、右幅的两套对拉装置的同步牵引，平稳完成梁段对接。

3.4 非通航区加劲梁架设技术

3.4.1 概述

常规的施工方法一般利用缆载吊机将非通航区的加劲梁节段垂直起吊并完成荡移就位。该方法需增加缆载吊机的投入，施工成本高，且缆载吊机通常采用连续式千斤顶配备钢绞线作为提升装置，在加劲梁节段水平牵引荡移的过程中，由于起吊发生较大的偏角，易造成钢绞线受力不均；同时缆载吊机的偏转也将引起较大的安全隐患。

结合杭瑞洞庭湖大桥钢桁加劲梁的结构特点以及施工环境条件，发明一种新的起吊设备和方法，利用临时索夹和绳索系统等组成的“临时起吊系统”将数百吨梁段荡吊至栈桥上，以解决悬索桥浅滩及跨线区加劲主梁架设问题。

3.4.2 技术原理

采用一套由 25 t 卷扬机及钢丝绳、转向轮、临时索夹、300 t 滑车组、临时吊索等组成的起吊系统将加劲梁节段垂直起吊至一定高度，然后利用设置于岸侧地面的由 2 台 10 t 卷扬机和滑车组组成的水平荡移牵引系统将加劲梁节段水平牵引，完成荡移就位（图 10）。

3.4.3 方案实施

（1）临时起吊系统设计及安装

根据加劲梁节段的设计重量，起吊动力设备选择

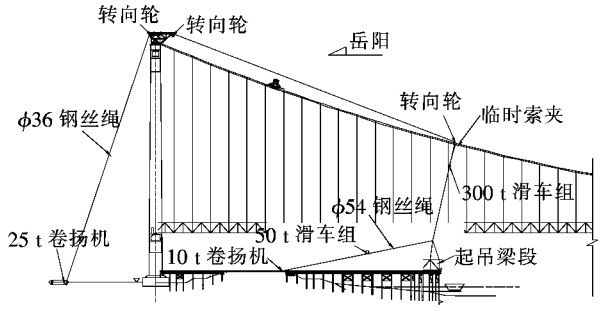


图 10 临时起吊系统工艺原理示意图

JKT25 变频调速卷扬机为主牵引卷扬机。

牵引钢丝绳采用 ϕ36 mm 直径的 1 870 MPa 级钢丝绳，由卷扬机发出，经塔顶门架上的转向轮、主缆处的转向轮，进入临时索夹上悬挂的滑车组。

单侧 2 个转向轮设置在塔顶门架顶的前后端横梁上，为防止牵引钢丝绳与主缆相互干涉，转向轮位置设置在距主缆中心位置向塔外横向偏 1 m 处。

起吊位置设置临时索夹，其设计同永久索夹，安装及张拉均按照永久索夹的施工方法进行，以确保施工安全、可靠。

根据设计梁重，采用 300 t 滑车组，钢丝绳走丝 12 道。滑轮组与临时索夹之间采用销接，临时吊索连接滑车组的下滑车和加劲梁吊耳。临时吊索参照永久吊索制造。

荡移牵引系统由 10 t 卷扬机、50 t 滑车组配 ϕ22 mm 钢丝绳组成，钢丝绳走 6 丝；滑车组前端设置单根 ϕ54 mm 钢丝绳与临时起吊系统的 300 t 滑车组的下滑车相连。

(2) 加劲梁垂直起吊卸船

在浅滩及跨线段的非通航区设置运梁栈桥，运梁栈桥卸船码头位于主航道一侧，以保证施工期运梁船正常停靠。

在运梁船抛锚定位后，通过 25 t 卷扬机下放下滑车及临时吊索，将临时吊索与加劲梁上的吊耳进行连接，然后开动卷扬机垂直提升加劲梁节段至梁底超出运梁栈桥上的移梁支座顶面。

(3) 加劲梁节段水平荡移上栈桥

预先在临时起吊系统 300 t 滑车组的下滑车和水平荡移牵引系统 50 t 滑车组的动滑车之间设置荡移牵引的 ϕ54 mm 直径钢丝绳。在加劲梁节段垂直起吊至指定高度后，开动布置于岸侧地面的 10 t 卷扬机，将加劲梁节段水平牵引至移梁支座上方，然后利用 25 t 卷扬机缓缓下放加劲梁节段，将加劲梁节段落位于移梁支座上。

3.4.4 方案综合对比

采用常规的缆载吊机卸船施工方法需投入 600 t 缆载吊机 1 台，约 450 万元。采用临时起吊系统施工，25 t 卷扬机及钢丝绳、转向轮等均为现有使用中的设备，可不计入直接成本；投入的设备直接成本为临时索夹 2 个、300 t 滑车组 2 套、临时吊索 2 套；通过分析，合计节约直接成本 399 万元。

同时，缆载吊机采用柴油发电机组作为动力设备，能耗高，而临时起吊系统采用用电设备的卷扬机作为动力系统，节能环保。

4 结语

通过对缆载吊机设备适用性改造设计，不仅节约工程造价、实现循环经济，提升企业竞争力，更为缆载吊机的设备发展提供具有可靠价值的设计、科研和施工技术，可加速设备技术革新。

多节段窗口刚接法在杭瑞洞庭湖大桥钢桁加劲梁架设施工中得到了成功运用，有效提高了施工作业效率，大大降低了时间、配重、人力、设备等各类型成本，同时形成的辅助提升和拼装措施确保了拼装精度，解决了缆载吊机起吊能力受限的问题，使多节段刚接得以实现，形成的整套技术可为今后钢桁加劲梁架设施工控制提供新的方案。

结合施工环境条件，发明了一套临时起吊、荡移系统，实现了非通航区加劲梁的顺利吊装，既节省了设备、材料、人工，又实现了循环经济、安全环保，保障了施工安全及进度。

参考文献：

[1] 刘传乐，张国刚.某特大跨径悬索桥跨缆吊机静载试验研究[J].中外公路，2018(5).

[2] 李世伟，杨永清，谢宏伟，等.巽他海峡大桥悬索桥结构体系矢跨比优化设计研究[J].中外公路，2018(6).

[3] 王会利，秦泗凤，张哲.双层钢桁架悬索桥整体节点疲劳试验研究[J].中外公路，2017(2).

[4] 徐刚，王超.大型卷扬机起吊系统在桥梁建设中的应用[J].中外公路，2013(5).

[5] 刘吉晗.大跨度铁路悬索桥加劲梁施工方法研究[D].西南交通大学硕士学位论文，2013.

[6] 王忠彬，沈锐利，唐茂林.悬索桥钢桁架加劲梁施工方法分析[J].石家庄铁道学院学报，2006(1).

[7] 秦顺全.桥梁施工控制——无应力状态法理论与实践[M].北京：人民交通出版社，2007.