DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250809

复杂海域大跨悬索桥钢箱梁吊装与合龙关键技术

陆　鹏
(四川公路桥梁建设集团有限公司,四川 成都 610041)

摘　要: 土耳其1915恰纳卡莱大桥主桥为770 m+2 023 m+770 m双塔三跨连续钢箱梁悬索桥,全桥加劲梁共有87个安装梁段,标准梁段长48 m,最大吊装重量可达838.8 t。同时大桥受地理环境、强风以及通航的影响,钢箱梁安装存在很大的技术难度和安全风险。根据现场情况,钢箱梁主跨由跨中向主塔方向对称吊装,边跨由锚碇向主塔方向对称吊装,后于主塔位置进行合龙。在施工过程中,边跨的非标准梁段采用驳船运输+5 000 t浮吊的方式安装;标准梁段与中跨跨中梁段采用驳船运输+1~2台450 t缆载吊机的方式安装;2#梁段采用驳船就位、反向荡移提升系统+2台450 t缆载吊机同步提升的方式安装;主塔合龙区梁段先使用浮吊吊装在焊接平台调整、焊接,后采用边跨反拉系统+4台450 t缆载吊机同步提升的方式安装。

关键词: 悬索桥;钢箱梁;缆载吊机;浮吊;施工技术
中图分类号: U445.4　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0304-05

Key Technologies for Steel Box Girder Hoisting and Closure of Long-Span Suspension Bridges in Complex Marine Environments

LU Peng
(Sichuan Road and Bridge Group Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: The main bridge of 1915 Çanakkale Bridge in Turkey is a double-pylon three-span continuous steel box girder suspension bridge with the spans of 770m + 2 023 m + 770 m. The entire bridge consists of 87 girder segments for the stiffening truss, with a standard segment length of 48 m and a maximum hoisting weight of up to 838. 8 t. At the same time, the bridge is affected by geographical conditions, strong winds and navigation, which makes the erection of steel box girders highly technically challenging and poses significant safety risks. According to the site conditions, the main span of the steel box girder is hoisted symmetrically from the midspan towards the main pylon, while the side spans are hoisted symmetrically from the anchorages towards the main pylon. Then, the closure is carried out at the position of the main pylon. During the construction process, the non-standard girder segments of the side spans are erected by using barge transportation combined with a 5000t floating crane. The standard girder segments and the midspan girder segments are erected by using barge transportation combined with 1-2 sets of 450t cable-mounted crane. The No. 2 girder segment is erected by using barge positioning, a reverse swing lifting system, and synchronized lifting by 2 sets of 450t cable-mounted cranes. The girder segments in the main pylon closure area are first hoisted by a floating crane onto a welding platform for adjustment and welding, and then erected by using a side span counter-pulling system combined with 4 sets of 450t cable-mounted cranes for synchronized lifting.

Keywords: suspension bridge; steel box girder; cable-mounted crane; floating crane; construction technique

0　工程概况

土耳其1915恰纳卡莱大桥跨越土耳其马尔马拉海西侧的达达尼尔海峡。大桥主桥采用770 m+2023 m+770 m的跨径布置,为双塔三跨连续钢箱梁悬索桥,是目前世界上最大跨径的悬索桥。主桥为双向6车道,桥面总宽45.06 m,设计时速120 km/h,设计使用寿命100年。主桥平面呈直线型,中跨跨中位置设有变坡点,欧洲、亚洲岸边跨坡度均为3%[1-3]。

主桥主缆长度为4 384 m,采用制平行钢丝索股法(PPWS工艺)进行施工,中跨、边跨主缆分别由144根直径为86.9 cm、148根直径为88.1 cm的索股组成。主塔采用H形钢塔,高318 m,基础设计为沉井基础。锚碇为重力式锚碇[1,3-4]。大桥效果图如图1所示。

全桥共有87个梁段(钢箱梁阶段划分见表1,E表示欧洲岸、A表示亚洲岸、S表示边跨、M表示中

收稿日期:2005-08-22
作者简介:陆鹏(1990—),男,本科,工程师,从事道路与桥梁施工工作。



图 1　土耳其 1915 恰纳卡莱大桥效果图

跨、T 表示桥塔），标准梁段长 48 m。梁段重量介于 323.8 t~838.8 t 之间，全桥梁段总重量高达 58 091.6 t。吊杆与梁段之间通过钢销连接。在梁段安装过程中，先进行临时连接，等到主塔合龙段以外梁段安装基本完成之后，再进行栓、焊环形连接[2,5]。标准梁段断面如图 2 所示。

表 1　钢箱梁梁段划分

序号	梁段类型	梁段编号	梁段数量/个
1	边跨无索区梁段	E/AS33-29	10
2	标准梁段	E/AS03-E/AS28,E/AM03-E/AM42	67
3	中跨跨中梁段	MM00	1
4	2#梁段	E/AM02，E/AS02	4
5	主塔合龙段	ES01-ET00-EM01,AS01-AT00-AM01	6

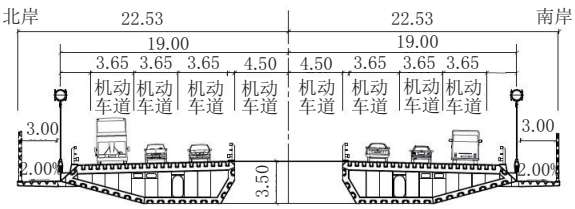


图 2　标准梁段断面示意图（单位：m）

2　钢箱梁梁段安装难点

（1）大桥临近公海，在梁段的运输和安装过程中极易受复杂风场干扰。

（2）大桥地处达达尼尔海峡，为黑海通往印度洋、地中海与大西洋的关键航道，此处通航的大型船只众多，在梁段安装时面临的安全风险很高[6]。

（3）梁段安装包含航道管制、动力驳船运输与定位、缆载吊机安装和工程测量等诸多工序，这些工序彼此需密切配合，对施工组织协调有着很高的要求[7]。

（4）边跨 E/AS33 梁段在安装过程中，浮吊的吊臂会高于空中猫道，梁段在安装时面临的安全风险较大，并且在牛腿上进行定位时，对精度的要求也比较高。在 E/AS32、E/AS31 梁段安装时，需利用浮吊、导向架精确调整梁段的位置，施工控制难度大。

（5）ES01-ET00-EM01，AS01-AT00-AM01 组合的梁段，其提升重量大，在提升过程中梁段与塔肢之间的安全净空距离较小，在进行合龙焊接时，梁段的线形调整工作也比较复杂，需结合布置在 E/AS32-31 梁段的反拉系统与吊杆调节装置相互配合起来发挥作用，施工工序较为复杂。

3　钢箱梁梁段安装方案

考虑三跨连续钢箱梁结构的受力特点，结合相应的计算结果，钢箱梁安装的总体顺序为：1. 利用浮吊吊装塔区梁段至焊接平台（E/AS01，E/AT01，E/AM01）；2. 对称安装边跨无索区梁段和部分中跨梁段（E/AS33-E/AS31，E/AM41-E/AM42、MM00）；3. 对称安装边跨、中跨标准梁段（E/AS30-E/AS03，E/AM40-E/AM03）；4. 对称安装 2# 梁段（E/AS02，E/AM02）；5. 安装塔区合龙梁段（ES01-ET01-EM01，AS01-AT01-AM01）。

根据钢箱梁梁段的划分，钢箱梁梁段总体安装方案如下：

（1）边跨无索区梁段采用驳船运输、5000T 的浮吊吊装施工（其中，E/AS33-31 为无吊索梁段）。

（2）标准梁段与跨中梁段采用驳船运输、1~2 台 450 t 缆载吊机吊装的方案进行施工（其中，中跨跨中梁段 MM00 采用 1 台缆载吊机吊装施工）。

（3）2# 梁段采用驳船运输、2 台 450 t 缆载吊机和反向牵引荡移提升的方案进行施工。

（4）主塔合龙段是先利用浮吊将 3 个单片梁段吊运至承台上的焊接平台，然后将 3 片梁段焊接成大梁段，最后利用边跨反拉和 4 台 450 t 缆载吊机整体提升。

4　钢箱梁安装关键技术

4.1　驳船定位技术

海峡水深 60~90 m，且航道通行繁忙，难以满足常规抛锚定位条件，然而缆载吊机吊点与钢箱梁梁段的连接，对定位精度要求较高。因此，本项目选择动力定位驳船（见图 3）作为钢箱梁梁段运输船，并在驳船两侧布置 4 套侧推系统来辅助船舶定位。

在静态定位过程中，驳船定位效果良好，达到厘米级的定位精度，缆载吊机吊点和梁段的连接顺利。然而，在梁段起吊脱船的瞬间，由于梁段的主动推力作用，驳船会出现加速位移并产生漂移现象。为解决这一问题，经研究后，决定在驳船与梁段之间增设



图3　动态定位驳船效果示意图

一套液压脱船系统，该系统可有效减小梁段脱船减载对驳船的不利影响，确保后续所有梁段起吊作业的顺利进行。

4.2　边跨无索区梁段安装

4.2.1　E/AS33梁段安装

E/AS33梁段长9.8 m，ES33、AS33梁段分别重416.8、418.5 t。E/AS33梁段在吊装前，需在E/AS33梁段上坡侧（主塔方向）的端头，设有2套缓冲梁段导向架，在下坡侧（锚碇方向）的端头，设有2套“V形”导向架。为降低梁段在安装过程中粗定位的误差，在牛腿下坡侧的端头顶部，设有缓冲梁段导向架。

E/AS33梁段在安装时，首先要将其提升至高于牛腿顶面1.6 m的位置，接着沿着顺桥方向缓慢移动，直到梁段端头的“V形”导向架与牛腿上的缓冲梁段导向架接触。使用引桥上配备的工程测量工具，确定E/AS33梁段栏杆立柱基础的中心位置，并且反算出其横轴线。通过手拉葫芦调整梁段的横向位置，等到调整到位后，缓慢卸载浮吊的吊点，在确保梁段底板所标记的位置与临时支座完全重合之后，将E/AS33梁段平稳放置在牛腿顶面，完成该梁段的安装作业（见图4）。

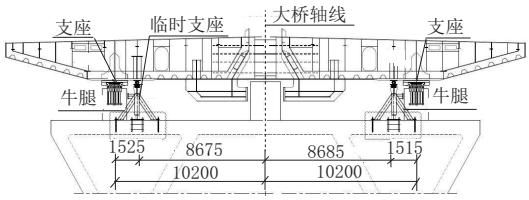


图4　E/AS33吊装布置示意图（单位：mm）

4.2.2　E/AS32–29梁段安装

E/AS32–29梁段长24 m，重量在433.6~471.3 t之间。在E/AS32梁段安装之前，需在下坡侧（锚碇方向）端头，设置“V形”导向架。浮吊先将E/AS32梁段提升至设计高度以下2.0 m的位置，接着沿大桥顺桥的方向缓慢移动，直至“V形”导向架与E/AS32梁段上坡侧（主塔方向）端头的缓冲梁段导向架接触。之后继续将梁段提升至设计高度，匹配临时吊杆与吊耳后，安装连接钢销，将E/AS32梁段的荷载，从浮吊转移至临时吊杆之上。

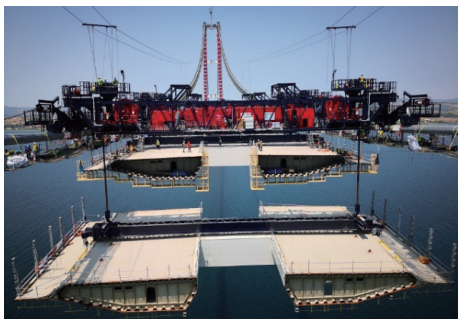
E/AS32梁段与E/AS29–31梁段安装有所不同，E/AS29–31梁段在安装过程中无需设置缓冲梁段导向架，当E/AS31、E/AS29–30梁段分别提升至临时吊杆、永久吊杆的高度时，使用2台10 t的手拉葫芦，沿着顺桥向牵引相邻已安装的梁段，直至与相邻已安装梁段完成临时连接。

4.2.3　标准梁段与中跨跨中梁段安装

标准梁段长48 m，重量在733~838.8 t之间，中跨跨中梁段长21.0 m，重323.8 t，该部分梁段由驳船直接水运至梁段设计位置正下方，采用2台缆载吊机垂直起吊安装（其中，中跨跨中梁段采用1台缆载吊机起吊）。标准梁段和中跨跨中梁段吊装如图5所示。



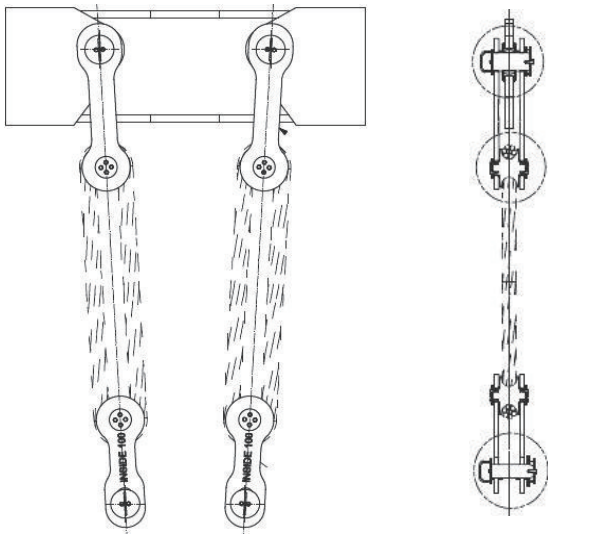
（a）标准梁段



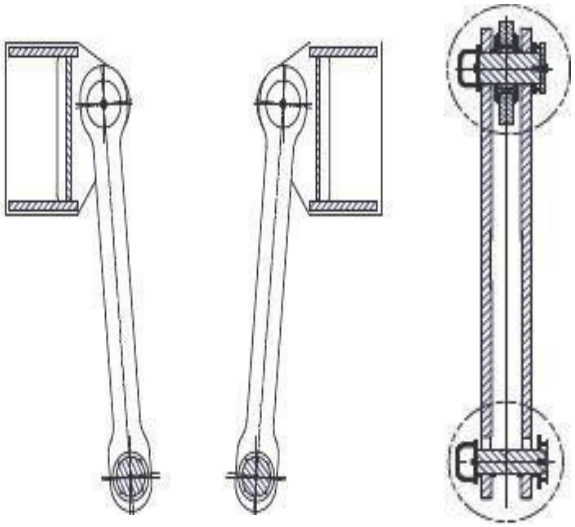
（b）中跨跨中梁段

图5　标准梁段和中跨跨中梁段吊装示意图

根据图纸将缆载吊机移动到指定的位置，就位后下放缆载吊机提升梁，同时利用驳船将待安装梁段运输至指定的位置；当下放提升梁的吊点距待安装梁段锚固吊耳50 cm时，暂停下放，使用15 t的千斤顶顶出末端的滑动梁；然后继续缓慢下放提升梁至待安装梁段锚固吊耳，使用10 t手拉葫芦调整提升梁吊点的位置，调整好后与待安装梁段的锚固吊耳相连。梁段吊耳与缆载吊机提升梁连接方式分为2种（见图6）：第一种为软连接，应用于E/AS03–28，E/AM03–30；第二种为刚性连接，应用于MM00，E/AM31–42。



（a）软连接



（b）刚性连接

图 6　梁段吊耳与缆载吊机提升梁连接示意图

待安装梁段提升接近设计高度后，暂停提升，使用手拉葫芦和吊带将吊杆固定在待安装梁段的立柱上。利用待安装梁段立柱作为手拉葫芦的锚点，通过调节手拉葫芦，将吊杆牵引至待安装梁段吊耳的正上方。待安装梁段缓慢提升至设计高度，完成吊杆与吊耳的精准匹配。此时，先采用钢销过盈安装装置，安装引导销固定定位环，随后再安装永久插销（见图 7）。

4.3　2#梁段安装

E/AM02 梁段长 19.2 m，重约为 385 t，E/AS02 梁段长 16.2 m，ES02 梁段重 346.4 t，AS02 梁段重 337.9 t。E/AM02、E/AS02 梁段均采用 2 台缆载吊机同步提升进行吊装。由于受到主塔平台和 E/AS03、E/AM03 梁段空间的限制，不能垂直起吊。在 2#梁段起吊高度未达到主塔平台存放的主塔合龙段（ES01-ET00-EM01、AS01-AT00-MM00）顶面高度之前，在起吊 2# 梁段的同时，利用布置在 E/AS07、E/AM07 梁段上的反向牵引荡移提升系统（见图 8（a）），向索塔反方向牵引 2#梁段，避免 2#梁段与主塔平台发生碰撞，当 2#梁段起吊高度高于主塔平台存放的主塔合龙段 1.0m 时，释放反向牵引荡移提升系统，然后再垂直起吊进行安装。

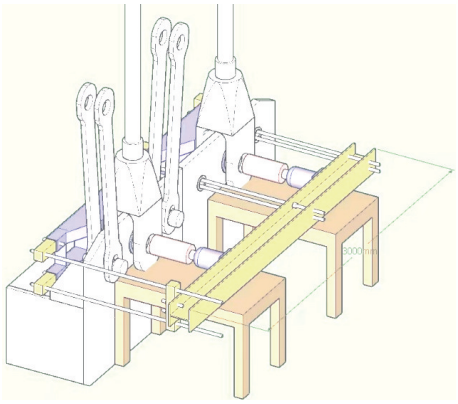
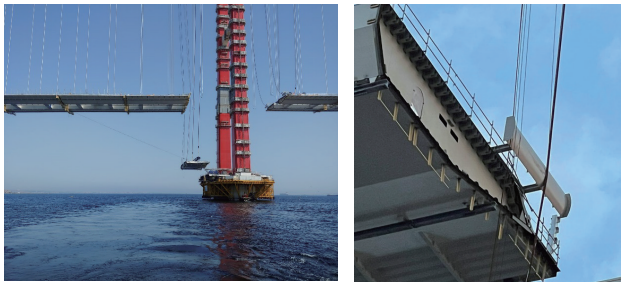


图 7　钢销过盈安装装置[8]



（a）反向牵引提升系统　　（b）钢绞线导轨

图 8　2#梁段吊装布置示意图

反向牵引荡移提升系统由水平导向装置、30 t 卷扬机、钢绳、35 t 卸扣与抑制环板等构件组成，其中 30 t 卷扬机设在 E/AS07、E/AM07 梁段上。反向牵引荡移提升系统的钢绳一端连接在 2#梁段（E/AS02、E/AM02），另外一端连接在 E/AS07、E/AM07 梁段，以确保在吊装过程中 2#梁段的稳定和安全。

为了防止缆载吊机下坡侧起吊钢绞线与 E/AS03、E/AM03 梁段空间位置出现重叠和相互干扰，在 E/AM03、E/AS03 梁段上的指定位置焊接钢绞线导轨（见图 8（b）），缆载吊机下坡侧钢绞线与 E/AS02、E/AM02 梁段焊接的钢绞线导轨最大偏角分别为 4°、12.5°。

4.4　主塔合龙段安装

主塔合龙段由 3 片梁段组合而成（ES01-ET00-EM01、AS01-AT00-AM01），梁段长 43.6 m，重约 1 203.6 t，其中 E/AS01、E/AT00、E/AM01 梁段分别长 14.2、15.2、14.2 m，重量分别约 413.5、344.5、445.6 t。

在施工过程中，首先将 3 片梁段（E/AM01、E/AT00、

E/AS01）借助浮吊依次吊运至主塔承台的焊接平台上。然后，利用千斤顶和三向调梁支座对梁段的线形进行精细调整，调整到位后，将3片梁段焊接成一个整体梁段。待全桥所有的已安装梁段焊接完成，再利用4台缆载吊机进行整体提升合龙作业（见图9）。在提升过程中，梁段与塔肢的最小安全净空距离为10 cm。



（a）主塔单片梁吊装　（b）主塔合龙段整体吊装

图9　主塔合龙段吊装示意图

为了主塔合龙段具有足够的合龙宽度，确保E/AS02、E/AM02梁段的竖向提升值以及下边缘的开口角度，均符合合龙的线形基本要求[9]，需在E/AS32、E/AS31梁段上设置反拉系统，使边跨整体反方向拉移约1.3 m。当主塔合龙段被提升至低于设计位置约4.0 m时，缓慢释放反拉系统，此时主塔合龙段与E/AS02、E/AM02梁段之间的间隙保持在700 mm（见图11）。随后，调整缆载吊机，使主塔合龙段的坡度与其保持一致，同时借助吊杆放张装置，调节E/AS03~E/AS06梁段和E/AM03~M06梁段的线形，闭合主塔合龙段的间隙，完成合龙。之后进行焊接作业，焊接完成至80%时，慢慢卸载缆载吊机的提升吊点，之后继续完成剩余焊接工作。

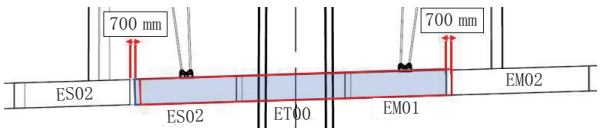


图10　合龙段提升的最终位置

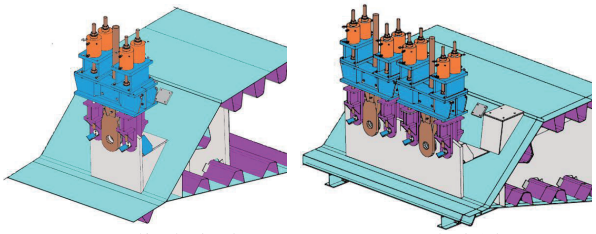
4.5　临时连接安装

在梁段安装时，在已安装梁段与待安装梁段之间，需要预留大小为50~85 cm的间隙，多数维持在50 cm[10-12]。当吊杆与待安装梁段之间的连接销轴安装好后，应该慢慢卸载缆载吊机的提升吊点，同时使用安装在已安装梁段上的手拉葫芦，来牵引待安装梁段，实现梁段的精准匹配。在两梁段高度达到一致后，再进行梁段之间的临时连接。

临时连接的类型共有5种，A型40处，B型4处，C型9处，D型26处，X撑6处。其中设置X撑是为了释放梁段安装时，在风荷载作用下产生的竖向剪力与横向弯矩，适应梁段发生水平偏转，而引发梁段之间的转角与相对位移。

4.6　梁段的精确调整

在主缆架设完成后，钢箱梁的线形就已基本确定。钢箱梁梁段架设完成后，本项目使用208套千斤顶对边跨无索区梁段、主塔合龙段和X撑附近梁段进行放张，调整钢箱梁的高程和线形，保证大桥成桥后线形与设计保持一致。吊杆放张装置分为2种：一种为单吊杆放张装置；第二种为双吊杆放张装置，放张装置示意见图11。



（a）单吊杆放张装置　（b）双吊杆放张装置

图11　吊杆放张装置示意

5　结　语

土耳其1915恰纳卡莱大桥钢箱梁自重和安装工程规模大，同时大桥位于海峡，跨越航道，施工环境复杂，使得钢箱梁梁段在吊装过程中，存在着很大的技术难度和安全风险。考虑到大桥所处海峡的状况以及桥型特点，梁段安装依据实际情况采用了“驳船运输＋浮吊”、“驳船运输＋缆载吊机”、“驳船运输＋缆载吊机+反向牵引荡移”、“单片梁吊装＋调整、焊接成整体+边跨反拉+多台缆载吊机共同吊装”等多种安装方式，在整个施工进程中，质量、安全与进度均处在可控范围之内，在2个月内，就完成了约3.3km长的钢箱梁安装工程。以上技术成功实施，解决了本项目钢箱梁梁段的安装难题，可为今后类似跨海大桥工程施工提供技术参考。

参考文献：

[1]　张妮.土耳其恰纳卡莱1915大桥[J].世界桥梁，2019，47(6)：92-93.
[2]　杜传鹏，卢伟，任海滨，等.土耳其1915恰纳卡莱大桥无索区钢箱梁安装关键技术[J].世界桥梁，2024，52(1)：7-12.
[3]　罗扣，舒思利，万田保.土耳其恰纳卡莱大桥方案设计[J].交通科技，2017，(6)：47-50.
[4]　张妮.土耳其1915恰纳卡莱大桥桥塔基础[J].世界桥梁，2021，49(1)：118.
[5]　赫勇.复杂海域悬索桥分离式钢箱梁吊装施工技术[J].交通科技与管理，2024，5(10)：72-74.
[6]　严汉明，李文娟，郭丰田.好望角型船舶航经土耳其海峡探析[J].交通科技与管理，2020，41(1)：72-74.
[7]　刘源，李鸥，林吉明.复杂海域条件下大跨悬索桥钢箱梁安装关键技术[J].世界桥梁，2021，49(2)：16-21.

（下转第353页）