

DOI: 10.7672/sgjs2025180069

桥-机耦合效应下连续梁悬臂拼装主动控制技术*

王悦¹, 曹虹¹, 孙九春¹, 朱艳²

(1. 腾达建设集团股份有限公司, 上海 201204;

2. 盐城市公路事业发展中心, 江苏 盐城 224000)

[摘要] 为满足大跨度连续梁不对称悬臂拼装施工中结构体系的力学状态控制要求, 保障施工安全和施工质量, 以上海轨道交通 10 号线二期跨越 6 号线节点桥为例, 针对连续梁单 T 构悬臂拼装主动控制技术的实际需求, 提出基于桥-机耦合效应的 T 构力学状态内部主动控制技术。基于影响线加载原理, 通过建立不同施工阶段移动天车荷载下的支点反力影响线力学模型, 寻求最有利的移动天车荷载位置; 基于超静定体系支点变位原理, 通过研究支点变化高度对支点反力的影响关系进行支点反力调整。实践表明, 在施工中通过移动天车布载控制及支腿反力调整可有效控制结构体系力学状态在安全范围内。

[关键词] 桥梁; 连续梁; 悬臂拼装; 影响线; 加载; 主动控制; 支点反力; 超静定体系

[中图分类号] U445.4

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)18-0069-08

Active Control Technology of Continuous Beam Cantilever Assembly Under Bridge-erection Crane Coupling Effect

WANG Yue¹, CAO Hong¹, SUN Jiuchun¹, ZHU Yan²

(1. Tengda Construction Group Co., Ltd., Shanghai 201204, China;

2. Yancheng Highway Development Center, Yancheng, Jiangsu 224000, China)

Abstract: In order to meet the mechanical state control requirements of the structural system in the asymmetric cantilever assembly construction of large-span continuous beams, and ensure the construction safety and quality, taking the node bridge of the second-phase project of Shanghai Rail Transit Line 10 across Line 6 as an example, aiming at the actual needs of the active control technology for the single T-frame cantilever assembly of continuous beams, an internal active control technology for T-frame mechanical state based on the bridge-erection crane coupling effect is proposed. Based on the influence line loading principle, the most favorable position of the moving crown block load is found by establishing the mechanical model of the fulcrum bearing influence line under the moving crown block load in different construction stages; Based on the principle of fulcrum displacement of statically indeterminate system, the fulcrum bearing is adjusted by studying the relationship between the fulcrum change height and the fulcrum bearing. The practice shows that the mechanical state of the structural system can be effectively controlled within the safe range through the load distribution control of the movable crown block and the adjustment of the leg reaction force during the construction.

Keywords: bridges; continuous beam; cantilever assembly; influence line; loading; active control; fulcrum bearing; statically indeterminate system

0 引言

传统的连续梁桥在悬臂拼装施工过程中一般

采用对称拼装, 以保证桥墩两侧平衡受力^[1-2]。由于施工场地受限, 上海轨道交通 10 号线二期跨 6 号线节点桥创造性地采用了架桥机单 T 构悬臂拼装施工^[3]。作为一种非对称受力悬臂拼装施工方法, 该节点桥在架设过程中结构内力和变形连续变化, T 构由于受到差异过大的不对称荷载导致力学状态

* 腾达建设集团股份有限公司重点研发课题(2019-SH-010)
[作者简介] 王悦, 技术研发员, 助理工程师, E-mail: 834133150@qq.com
[收稿日期] 2024-12-30

大幅度波动。因此,在设计及施工中需采取一系列力学状态控制技术,调整结构内力,从而保证结构体系力学状态在安全范围内。

当两侧受力不平衡时,通常采取边跨压重^[4-6]、墩梁临时固结^[7-8]等控制措施处理不平衡荷载。该方法有一定的局限性和滞后性,即只能解决不对称力较小情况下的问题,在吊装跨中节段、架桥机过孔等不平衡力大幅度变动情况下不能适用^[9]。当两侧不对称受力差异较大时,上海轨道交通 10 号线二期跨 6 号线节点桥项目提出单 T 构力学状态控制难点,介绍了基于最大容许控制法和自适应控制技术的主、被动控制技术^[10]。其中,对于复杂的结构体系,主动控制的核心是通过对结构体系力学参数的精准调控确保其在安全范围内,因此可通过调整结构体系力学参数来改变结构内力分布状态,从而实现对接构力学状态的优化和控制。

在研究结构力学状态变化时通常采用影响线法寻求最不利荷载组合^[11-14],从而获得最不利荷载组合下各构件的力学状态。在单 T 构架桥机悬臂拼装施工中,结构所受荷载多为移动荷载,其内力及位移状态受荷载位置的改变而变化,因此可通过影响线分析获得施工过程中桥-机耦合体系的力学状态。在超静定体系中,架桥机支点变位同样会引起悬臂吊装体系各构件受力的变化。为此,本文结合上海轨道交通 10 号线二期跨 6 号线节点桥工程,开展基于桥-机耦合效应的主动控制技术研究,提出一套基于影响线加载原理和超静定体系支点变位原理的 T 构力学状态内部主动控制技术,精准地控制 T 构的力学状态,使其处在安全范围内。

1 工程概况

上海轨道交通 10 号线二期跨 6 号线节点桥设计为 (40+75+40)m 变截面预应力混凝土连续梁桥,全桥采用预制拼装方式施工,共计 38 个预制梁段、2 个现浇段、2 个边跨合龙湿接缝、1 个中跨合龙湿接缝(见图 1)。

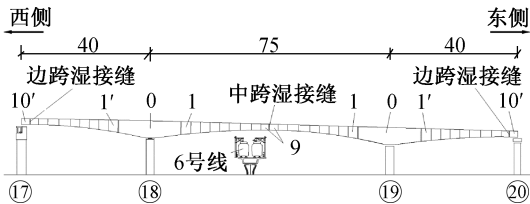


图 1 (40+75+40)m 连续梁节段划分(单位:m)

Fig. 1 Section division of (40+75+40)m continuous beam(unit: m)

施工东侧 T 构 0 号块现浇段,利用该 T 构与边墩布置架桥机等悬臂拼装设备,在边跨起吊各预制节段,分别运至中跨与边跨设计位置旋转后进行拼装,逐渐延长 T 构(见图 2a);东侧 T 构完成后,架桥机过孔至西侧 T 构(见图 2b)进行西侧 T 构施工,最终完成中跨与边跨合龙。

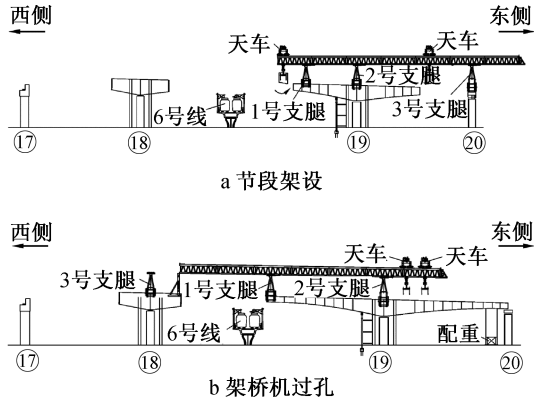


图 2 悬臂拼装工艺

Fig. 2 Cantilever assembly process

2 基于影响线加载的 T 构力学状态主动控制方法

2.1 悬臂拼装阶段的主动控制方法

根据架桥机单 T 构悬臂拼装工艺,1,2 号支腿分别支承于 T 构悬臂梁端与 T 构中部,3 号支腿支承于边墩处。1,2 号天车荷载区间为从边跨起吊位置分别向两侧布载,其中 1 号天车移动荷载主要作用于架桥机主桁梁 1 号支腿外侧的悬臂跨,由架桥机主桁梁悬臂跨与 T 构悬臂端共同承受,形成复合悬臂吊装体系,其吊装体系如图 3 所示。

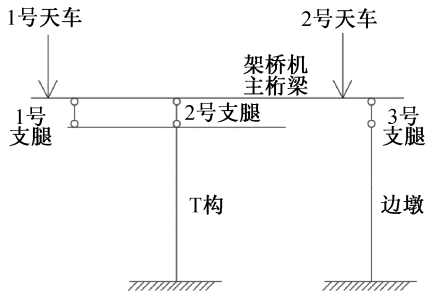


图 3 复合悬臂吊装体系

Fig. 3 Composite cantilever hoisting system

在架桥机与 T 构组成的复合悬臂吊装体系中,当结构体系不变时,可通过移动天车荷载的布载来改变体系内各构件的力学状态;当荷载位置一定时,利用超静定体系中的支点变位原理,通过调节 1 号支腿高度重新分配支腿受力,从而达到降低 1 号支腿反力的目的,充分利用架桥机主桁梁的富余强度分担一部分 T 构所受荷载,优化 T 构的力学状态。

2.1.1 基于影响线最有利位置的移动天车布载控制

承载天车在架桥机主桁梁上移动时,不同运行位置下复合悬臂吊装体系各构件的内力也有所不同。因此,可利用结构力学中的影响线加载原理,通过建立支点反力影响线寻求最有利的移动天车荷载位置,使1号支腿反力降低。

根据1号支腿安放位置,得到不同位置处的1号支腿支点反力影响线,如图4所示。

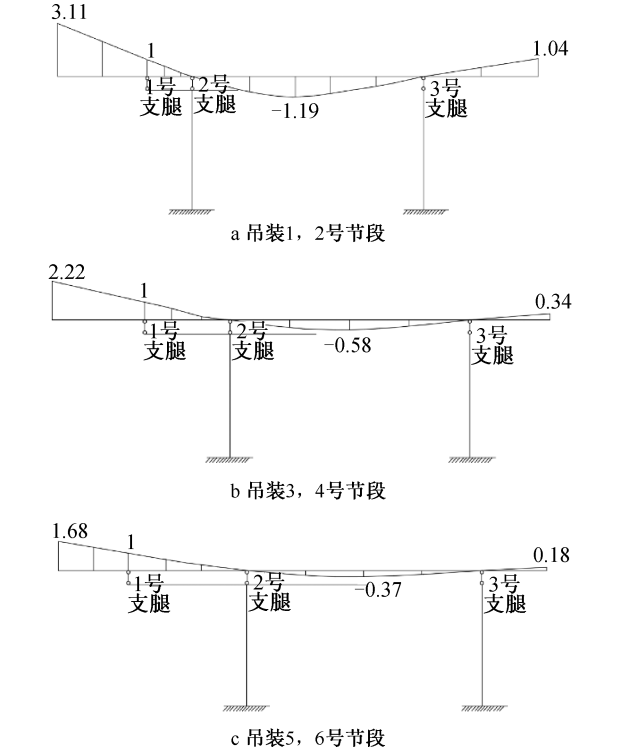


图4 1号支腿反力影响线

Fig. 4 Influence line of reaction forces of No. 1 leg

由1号支腿反力影响线可知,天车运行位置不同,其对支腿反力的影响不同,但各工况下1号支腿反力的最有利位置始终为边跨跨中(见图5)。吊装1,2号节段梁体时,由于1,2号支腿间跨度较小,边跨天车荷载对1号支腿反力影响较大;当边跨天车位于边跨跨中时,最大可降低1号支腿反力的119%;吊装3,4号节段梁体时,1号支腿向前移动2个节段,与2号支腿间的跨度变大,此时边跨天车荷载对1号支腿反力影响变小,边跨天车荷载位于边跨跨中时最大可降低1号支腿反力的58%;吊装5,6号节段梁体时,1号支腿再向前移动2个节段,与2号支腿间的跨度更大,边跨天车荷载对1号支腿反力的影响更小,最大可降低1号支腿反力的37%。

另外,由图4可知,中跨天车从边跨向前运行时1号支腿反力逐步增大,超过1号支腿后反力继续

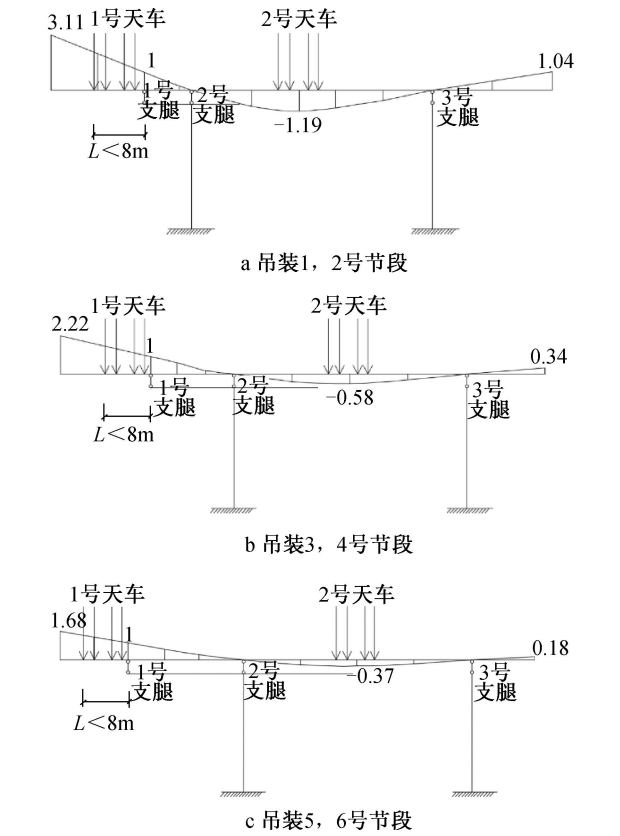


图5 中跨与边跨天车布载

Fig. 5 Load distribution of mid-span and side-span crown block

增大,距1号支腿越远反力增加越大,因此应严格控制中跨天车在主桁梁悬臂端的运行范围;边跨天车作用于主桁梁的边跨跨中时对1号支腿反力最有利,因此可用边跨天车在边跨跨中布载来降低1号支腿反力。

2.1.2 基于超静定体系支点变位原理的支腿反力调整

在悬臂拼装状态下,架桥机为一次超静定、3个支点多跨连续梁,当1个支点发生变位时,梁下所有支点反力会重新分配。基于该原理,通过调节架桥机1号支腿高度,可改变1号支腿反力。对于3个支点连续梁,当边支点发生变位时,边支点变化高度 δ 与边支点反力变化值 F 关系如图6所示。

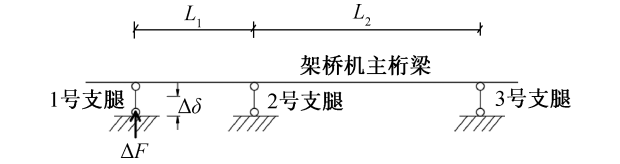


图6 支腿反力调整原理

Fig. 6 Principle of leg reaction force adjustment

根据计算得到1号支腿反力变化值 F 与支腿高度变化值 δ 的关系为:

$$F = -\frac{3EI}{L_1^3 + L_1^2L_2}\delta \tag{1}$$

式中: F 为 1 号支腿反力变化值; δ 为 1 号支腿高度变化值; L_1 为 1,2 号支腿间距; L_2 为 2,3 号支腿间距; E 为弹性模量; I 为截面惯性矩。

1 号支腿反力变化值 F 与支腿高度变化值 δ 成正比关系,与 1,2 号支腿间距成反比关系,且 F 为负表示 1 号支腿高度降低时 1 号支腿反力降低。由于节段吊装期间 1,2 号支腿间跨度在变化,通过计算得到不同 1 号支腿位置处支点反力与支腿高度变化、主桁梁刚度间关系,如图 7 所示。

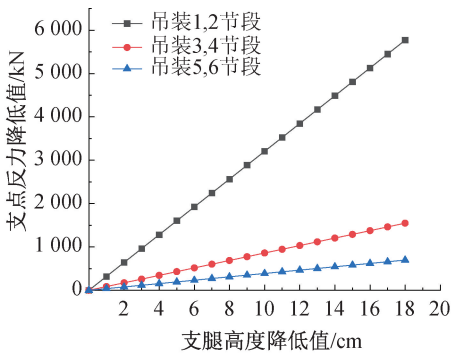


图 7 支腿高度变化值与支点反力变化值关系(1)
Fig. 7 Relationship between the change values of leg height and the change values of fulcrum bearing(1)

架桥机 1 号支腿高度变化越大,支点反力降低越多;1 号支腿距 2 号支腿越远,支腿高度调整对支点反力影响越小。主梁刚度越大,同等支腿降低高度对其反力影响越大。本工程主梁抗弯刚度为 $3.3 \times 10^{16} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$,吊装 1,2 号节段梁时,1 号支腿每降低 2cm,其支腿反力可降低 641kN;吊装 3,4 号节段梁时,每降低 2cm,支腿反力可降低 172kN;吊装 5,6 号节段梁时,每降低 2cm,支腿反力可降低 78kN。

施工时可在 1 号支腿下方设置压力传感器,如图 8 所示。当目标支腿反力 F_1 超过 T 构所容许的安全受力值 $[F]$ 时,将支腿高度 h 降低为 h' ,此时邻近支腿由 F_2 增加至 F'_2 ,目标支腿受力 F_1 减小为 F'_1 ,支腿反力 F'_1 产生的 T 构倾覆力矩降低,如图 9 所示。

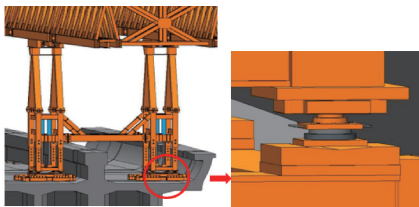


图 8 1 号支腿反力监测装置布置
Fig. 8 Layout of reaction force monitoring device of No. 1 leg

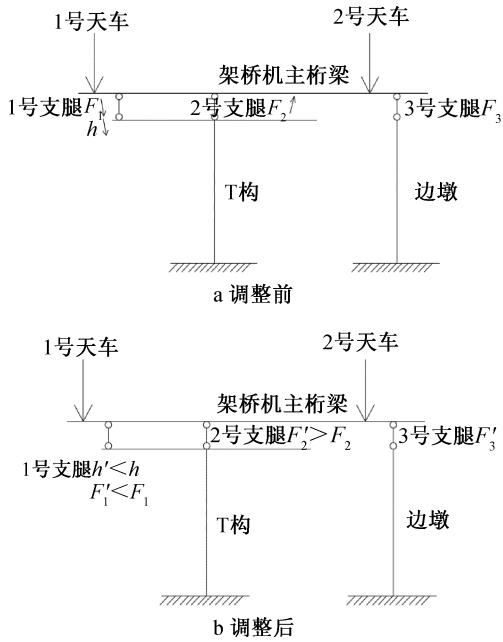


图 9 支腿高度调整
Fig. 9 Leg height adjustment

2.2 架桥机过孔阶段的主动控制方法

过孔时作用于 T 构上的荷载主要为架桥机支腿、主桁梁、天车自重,其中东侧 T 构施工时的 2,3 号支腿可在其与主桁梁分离后采用起重机拆运至西侧 T 构,而 1 号支腿无法拆运,须由主桁梁携带过孔。另外,2 台天车也无法拆运,须通过主桁梁过孔至西侧 T 构,其中 1 号天车还需携带防护系统过孔。

由于 T 构悬臂端设计限载 2 200kN,因此在整个过孔过程中需通过多种方法降低东侧 T 构悬臂端的支腿反力。过孔时架桥机与 T 构的耦合关系较复杂,存在多种结构体系,因此可将过孔过程分为 3 种工况。

1) 工况 1:过孔初期,架桥机通过 1,2 号支腿支承于 T 构上,主桁梁为静定结构体系,天车在架桥机后方配重,如图 10a 所示。

2) 工况 2:架桥机的 3 个支腿分别支承于西侧和东侧 T 构上,主桁梁为 3 个支点超静定结构体系,2 台天车需携带防护棚由东侧 T 构过孔至西侧 T 构,如图 10b 所示。

3) 工况 3:架桥机通过 2 个支腿支承于西侧 T 构墩顶和东侧 T 构悬臂端,由 3 支点超静定体系转变为 2 支点静定体系,2 台天车可在西侧 T 构配重,1 号支腿需随主桁梁一同过孔,如图 10c 所示。

2.2.1 基于影响线最有利位置的移动天车布载控制

对于工况 1,3 中的静定结构体系,可利用影响线加载原理通过移动天车位置配重方式降低支腿

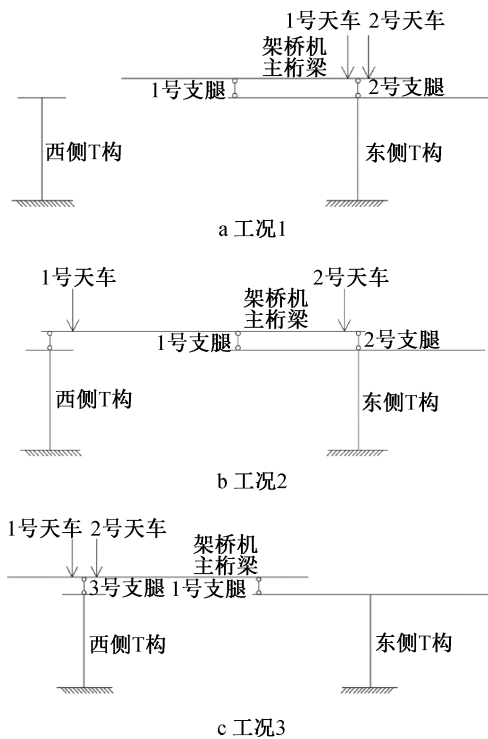


图 10 工况 1~3 力学体系

Fig. 10 Mechanical system of working conditions 1~3

反力,如图 11 所示。

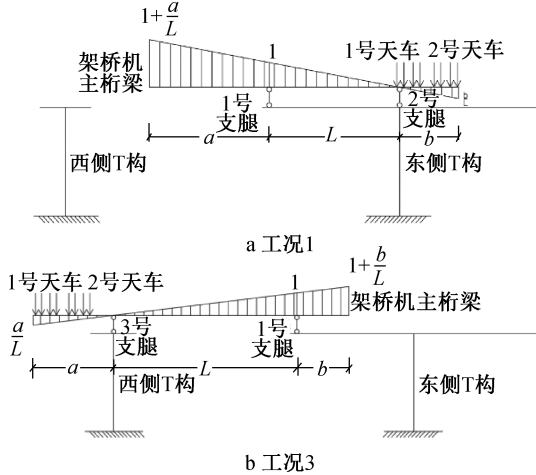


图 11 1 号支腿反力影响线及天车布载

Fig. 11 No. 1 leg reaction force influence line and crane block load

对于工况 1,主桁梁到达西侧 T 构前,2 台天车均移动至主桁梁的最东端,可降低东侧 T 构悬臂端支腿反力;对于工况 3,主桁梁到达西侧 T 构后,2 台天车均移动至主桁梁的最西端,可降低东侧 T 构悬臂端支腿反力。

2.2.2 基于超静定体系支点变位原理的支腿反力调整

对于超静定结构体系,可用支点变位原理,通

过改变西侧 T 构支腿高度的方式降低东侧 T 构悬臂端的 1 号支腿反力。对于 3 支点连续梁,当边支点发生变位时,边支点变化高度 δ 与中支点反力变化值 F 关系如图 12 所示。

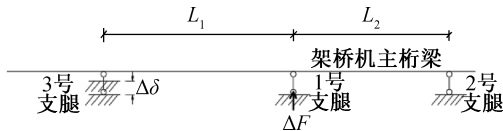


图 12 调整支腿高度力学原理

Fig. 12 Mechanical principle for adjusting leg height

根据计算得到东侧 T 构悬臂端支腿反力变化值 F 与西侧 T 构支腿高度变化值 δ 的关系为:

$$F = \frac{3EI}{L_1^2 L_2} \delta \quad (2)$$

东侧 T 构悬臂端支腿反力变化值 F 与西侧 T 构支腿高度变化值 δ 成正比关系,与 3 个支腿间距成反比关系,且 F 为正表示西侧 T 构支腿高度抬高时东侧 T 构悬臂端支腿反力降低。通过计算得到不同 1 号支腿位置处支点反力与支腿高度变化、主桁梁刚度间关系,如图 13 所示。

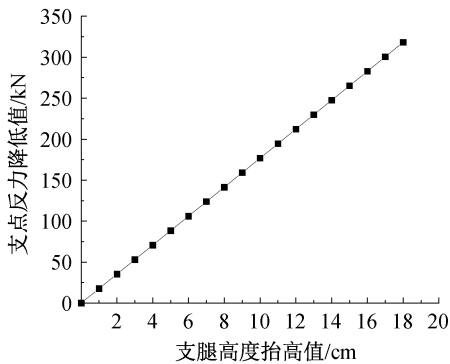


图 13 支腿高度变化值与支点反力变化值关系(2)

Fig. 13 Relationship between the change values of leg height and the change values of fulcrum bearing(2)

在 3 个支腿间距保持不变情况下,主梁刚度越大,同等支腿降低高度对其反力影响越大。本工程主梁抗弯刚度为 $3.3 \times 10^{16} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$,架桥机主桁梁到达西侧 T 构 2 号支腿时,西侧 T 构支腿与东侧 T 构悬臂端支腿的跨度为 40m,东侧 T 构悬臂端支腿与东侧 T 构墩顶支腿的跨度为 35m。根据计算,西侧 T 构支腿高度每抬高 2cm,东侧 T 构悬臂端支腿反力可降低 35kN。

因此,当架桥机主桁梁到达西侧 T 构支腿上时,可通过适当提高该支腿高度来降低东侧 T 构悬臂端的支腿反力。确保主桁梁和天车过孔时 T 构应力不超标,满足 $2.2 \times 10^6 \text{ kN}$ 的设计限载要求。如图 14 所示,当西侧 T 构支腿高度抬高时,西侧 T 构

支腿反力增大,东侧 T 构悬臂端的支腿反力降低。

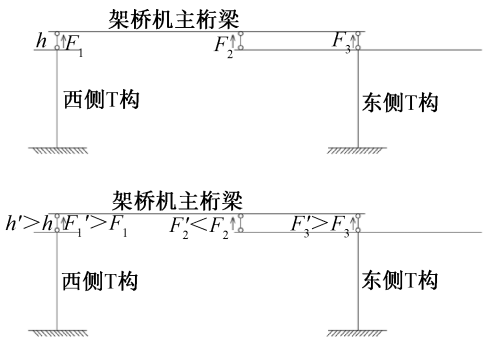


图 14 过孔期间架桥机支腿调整

Fig. 14 Leg adjustment of bridge-erection crane during hole passing

3 主动控制技术在 T 构力学状态控制中的应用

3.1 悬臂拼装期间主动控制技术应用

以东侧 T 构的节段吊装为例进行说明。

3.1.1 吊装 1 号节段

1 号天车携节段前移过 2 号支腿后停止,2 号天车起吊边跨 1'号节段,利用移动荷载的影响线加载原理在边跨加载。预先降低 1 号支腿反力 1 734. 2kN,减少 1 号天车向前移动时增大的支腿反力对 T 构的影响,如图 15a 所示。

3.1.2 吊装 3 号节段

1 号天车竖向提升中跨 3 号节段并旋转 90°后向跨中运行,过 2 号支腿后停止,待边跨侧抗拉束张拉完成后,2 号天车起吊边跨 3'节段,此时 2 号天车通过影响线加载可降低 1 号支腿反力 893. 2kN,如图 15b 所示。

3.1.3 吊装 5 号节段

拆除辅助支腿,1 号天车竖向提升跨中 5 号节段并旋转 90°后,前移过 2 号支腿后停止,2 号天车起吊边跨 5'号节段,通过影响线加载原理降低 1 号支腿反力 495. 8kN,如图 15c 所示。

3.2 架桥机过孔期间主动控制技术应用

过孔前做好随动配重安装,过孔期间 1 号支腿合力预警值 2 200kN,目标值 1 600~2 200kN,主要控制方法是天车移动配重、支腿高度调整。

在架桥机姿态调整前,1,2 号天车应对称位于 2 号支腿两侧,以起到质量平衡作用(见图 16a);在姿态调整完成后,1,2 号天车应全部行驶到边跨配重(见图 16b)。

3.2.1 过孔初期

首先,将主桁梁前端搁置到可调移动式辅助支腿上,通过辅助支腿横梁上设置的 2 台竖向千斤顶将主桁梁向上顶升至无下挠现象,总顶升力 ≤

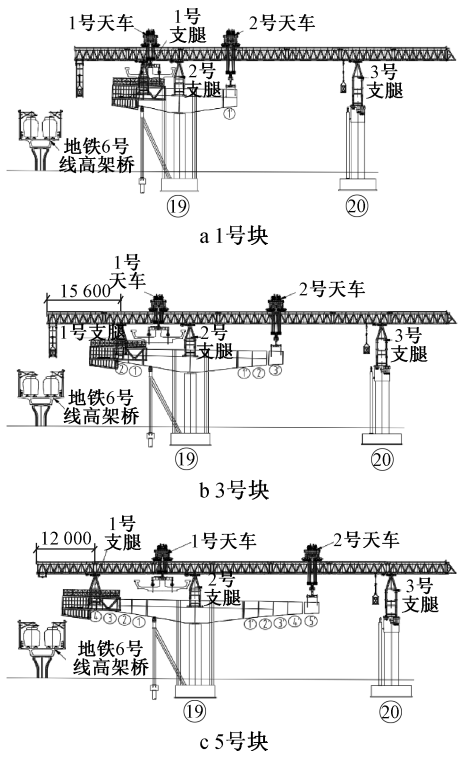


图 15 1,3,5 号块吊装阶段

Fig. 15 Hoisting stage for No. 1,3,5 blocks

300kN,期间实时监测 1 号支腿反力 ≤2 100kN。

将 3 号支腿调高 0. 3m,使辅助支腿不再受力,1 号支腿轴力实测为 2 096kN,如图 16c 所示。

3.2.2 过孔中期

首先,采用 1 号天车将防护棚吊运至 18 号墩 0 号块安装,期间 2 号天车靠近 2 号支腿停放。完成作业后,1 号天车靠近 3 号支腿停放。

之后继续向前顶推主桁梁,前移过程中 2 台天车持续同步后退,1 号天车始终保持在 3 号支腿附近,2 号天车始终保持在 2 号支腿附近,直至主桁梁尾部即将脱离 2 号支腿时停止,如图 16d 所示。

3.2.3 过孔后期

首先,使 1,2 号天车均行驶至 3 号支腿两侧对称布置,继续向前顶推主桁梁,前移过程中 2 台天车持续同步后退,始终对称保持在 3 号支腿两侧,直至主桁梁与 2 号支腿脱离,完成 3 支点超静定体系至 2 支点静定体系的转变,如图 17 所示。

之后拆运 2 号支腿至 17 号墩上,同时将 2 台天车移动至 3 号支腿左侧。继续向前顶推主桁梁,过孔至 2 号支腿,前移过程中 2 台天车持续同步后退,始终对称保持在 3 号支腿左侧,如图 18 所示。

1 号支腿过孔后,先将辅助支腿拆除,继续向前顶推主桁梁,前移过程中 2 台天车持续同步后退,始终对称保持在 3 号支腿左侧,循环往复,直至主桁梁

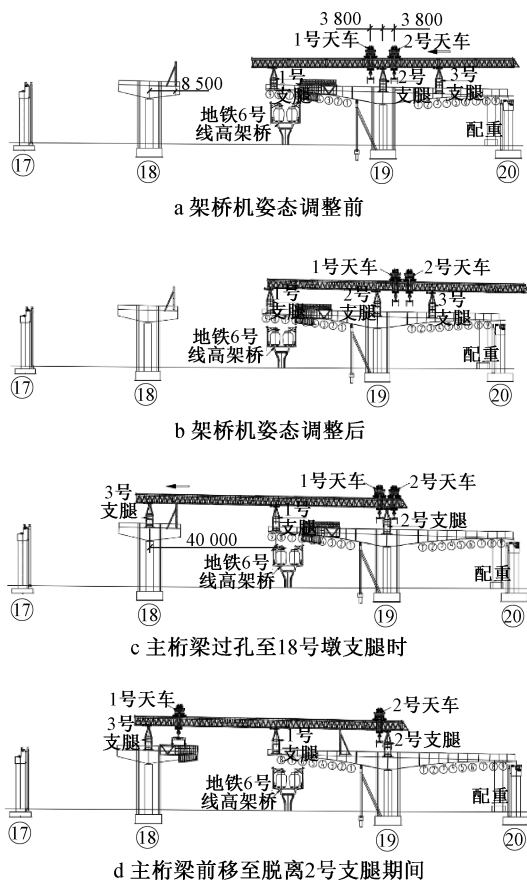


图 16 天车位置

Fig. 16 Position of crown block

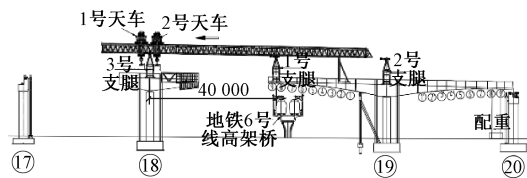


图 17 主桁梁继续前移

Fig. 17 Main truss girder continuing to move forward

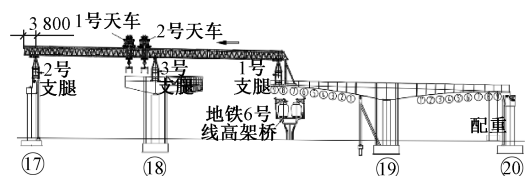


图 18 2号支腿转移、主桁梁脱离1号支腿前的天车位置

Fig. 18 Position of crown block before No. 2 leg transferring and main truss girder separation from No. 1 leg

到达预定位置,完成过孔操作,如图 19 所示。

4 应力及变形监测

为了保证架桥机和桥梁结构安全性,在 U 形梁施工过程中(包括过孔阶段),对架桥机应力、支腿

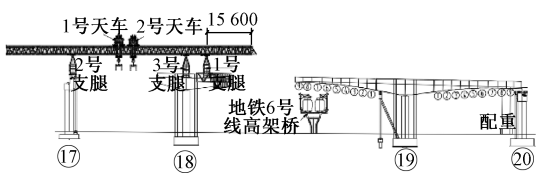


图 19 过孔完成

Fig. 19 Passing through the hole completion

反力及桥梁高程进行实时监测。

4.1 应力监测

根据表 1 所示过孔阶段监测数据,结合 Q345 钢材 172.5MPa 的容许应力值进行结构验算,结果表明:该架桥机在过孔工况下的结构受力状态满足安全规范要求,且前支腿支反力实测最大值为 2 580kN,未超过控制值 2 700kN,可保证主梁受力满足要求。

表 1 过孔阶段监测数据

Table 1 Monitoring data at passing through the hole stage		
工况	架桥机应力/MPa	架桥机前支腿反力/kN
中跨侧主桁梁悬臂 30cm	30.2	2 580
边跨侧主桁梁悬臂 30cm	54.2	2 020
辅助支腿到位	51.8	2 120
辅助支腿卸载	32.8	1 730
过孔到位	12.0	1 500

4.2 线形监测

悬臂拼装过程中,主梁竖向变形控制在约 2cm;主桥合龙后,在桥面压重卸载过程中,主梁竖向变形<2cm(见图 20)。

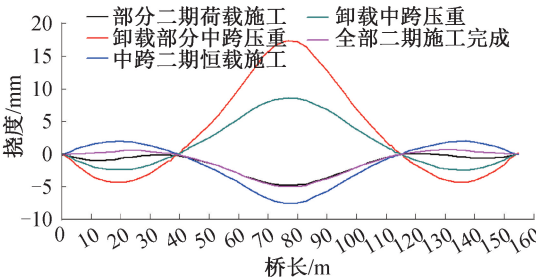


图 20 合龙过程中主梁竖向变形

Fig. 20 Vertical deformation of main girder in closure process

监测数据表明,架桥机单 T 构悬臂拼装工艺可行,采用的主动控制技术有效。主梁各节段均按设计要求顺利完成拼装,线形控制良好,最终桥梁平面与高程合龙误差均控制在 3mm 内。

5 结语

架桥机单 T 构悬臂拼装施工过程中,架桥机与 T 构间形成耦合体系,二者的力学状态相互影响。架桥机的支腿反力不仅会影响 T 构的位移和整体

稳定性,当该支腿反力较大时,对T构内力的影响也不可忽略,甚至成为T构在施工阶段的内力控制工况。本文分析了2类6种工况,讨论了悬臂拼装阶段和架桥机过孔阶段的主动控制方法,通过实际工程验证了该方法有效,所得结论如下。

1)悬臂拼装阶段,根据影响线加载原理,分别建立了吊装1,2号节段和3,4号阶段及5,6号阶段的支点反力影响线,得出了吊装不同节段时天车荷载最有利位置分布,最大可降低1号支腿反力的119%;根据超静定体系支点变位原理,建立了支点变化高度与支点反力变化值关系。

2)架桥机过孔阶段,根据架桥机和T构耦合体系力学状态的不同,分别建立了静定体系下支腿反力影响线及对应天车布载,分析了超静定体系下支点变化高度与支点反力变化值关系,得到了天车最有利布载位置及支腿变化高度。

3)该方法最大降低悬臂拼装阶段1号支腿反力至2 580kN,过孔阶段有效控制了支腿轴力在控制值2 700kN以下。

在主动控制技术的应用中,将架桥机与T构视为一体,充分利用桥-机耦合效应,通过天车的运行控制和支腿高度的调整尽量降低架桥机对T构的影响。实践表明,这种方法只要运用得当,可大大降低支腿反力,减少影响。

参考文献:

- [1] 方蕾. 短线预制悬臂拼装连续梁桥施工线形控制研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.
FANG L. Research on construction alignment control of short-line precast cantilever continuous beam bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2008.
- [2] 武西成. 悬臂法在桥梁施工中的应用探讨[J]. 公路交通科技(应用技术版),2014(6):325-327.
WU X C. Discussion on application of cantilever method in bridge construction[J]. Journal of highway and transportation research and development(application technology edition),2014(6):325-327.
- [3] 曹虹,孙九春,薛武强. 复杂工况下大跨度U形梁悬臂拼装关键技术研究[J]. 公路,2022,67(4):141-146.
CAO H,SUN J C,XUE W Q. Research on the key technology of cantilever assembly of large-span U-shaped beam[J]. Highway,2022,67(4):141-146.
- [4] 彭建萍. 混合梁斜拉桥不对称双悬臂施工技术[J]. 桥梁建设,2018,48(1):118-122.
PENG J P. Techniques of asymmetric two-side cantilever construction for a hybrid girder cable-stayed bridge[J]. Bridge construction,2018,48(1):118-122.

- [5] 姚森. 不对称双悬臂混合梁斜拉桥主梁施工方法研究[J]. 交通科技,2018(6):43-47.
YAO S. Research on construction scheme of main girder of asymmetric double cantilever hybrid girder cable-stayed bridge [J]. Transportation science & technology,2018(6):43-47.
- [6] 刘锋兵. 不对称双悬臂施工混合梁斜拉桥施工技术[J]. 智能城市,2020,6(9):200-201.
LIU F B. Construction technology of hybrid beam cable-stayed bridge with asymmetric double cantilever construction [J]. Intelligent city,2020,6(9):200-201.
- [7] 王忠雷. 连续梁悬臂T构墩梁临时固结施工设计方案[J]. 科技与企业,2011(10):175.
WANG Z L. Design scheme for temporary consolidation of continuous beam cantilever T-shaped pier beam [J]. Science and technology and enterprise,2011(10):175.
- [8] 臧腾. (48+80+80+48)m连续梁桥悬臂施工控制关键技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2017.
ZANG T. Research on key technology of cantilever construction control of (48+80+80+48)m continuous beam bridge [D]. Shijiazhuang:Shijiazhuang Tiedao University,2017.
- [9] 孔燕旭. 大跨度预应力混凝土连续梁悬臂施工技术研究[J]. 科技创新导报,2015,12(33):58-59.
KONG Y X. Study on cantilever construction technology of long-span prestressed concrete continuous beam [J]. Science and technology innovation herald,2015,12(33):58-59.
- [10] 孙九春,薛武强,曹虹. 大跨连续梁桥单T构悬臂拼装施工力学状态控制技术[J]. 桥梁建设,2022,52(4):125-132.
SUN J C,XUE W Q,CAO H. Techniques to control load bearing behavior of T-frame of long-span continuous girder bridge during asymmetrical cantilever assembly[J]. Bridge construction,2022,52(4):125-132.
- [11] 傅志方,华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,2000.
FU Z F, HUA H X. Theory and application of modal analysis [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press,2000.
- [12] 王玉. 组合正交异性桥面板的受力行为研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2013.
WANG Y. Study on mechanical behavior of composite orthotropic bridge deck [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University,2013.
- [13] 薛刚,孙晓燕. 变截面箱型连续梁桥荷载效应有限元分析[J]. 内蒙古科技大学学报,2015,34(3):285-288.
XUE G,SUN X Y. The finite element analysis on the load effect of the continuous variable cross-section box girder bridges[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology,2015,34(3):285-288.
- [14] 李杨. 基于安全系数优化的斜拉桥合理成桥状态研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2021.
LI Y. Research on reasonable completion state of cable-stayed bridges based on safety factor optimization [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2021.