

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202311152024101998

文章编号:1674-599X(2024)05-0008-07

引用格式:陈哲昊,张国文,许鑫,等.螺溪洲大桥非标准梁架桥机稳定性分析[J].交通科学与工程,2024,40(5):8-14.

Citation: CHEN Zhehao, ZHANG Guowen, XU Xin, et al. Stability analysis of bridge erecting machine for non-standard girders of Luoxizhou Bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(5): 8-14.

## 螺溪洲大桥非标准梁架桥机稳定性分析

陈哲昊<sup>1</sup>,张国文<sup>2</sup>,许鑫<sup>2</sup>,雷士玺<sup>2</sup>,贾述祥<sup>2</sup>,刘世忠<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730070;2. 中交第二公路工程局有限公司,陕西 西安 710061)

**摘 要:**非标准梁在吊装作业时,其吊点布局与标准梁存在显著差异,这一差异直接导致了架桥机的受力分布及潜在的最薄弱受力点的变化。为了确保架桥机在吊装过程中的安全性,需对架桥机的受力特点进行分析,并针对其最不利受力位置给出对应的局部加强方案。以螺溪洲大桥项目起吊35 m非标准梁为实际工程背景,采用Midas Civil软件进行有限元分析,对吊装过程中不同工况下架桥机的受力状态进行了数值模拟,通过分析架桥机主梁挠度与应力进而确定其最不利荷载工况。同时,天车在横梁上移动时横向无约束,这可能导致架桥机在偏载情况下发生侧向失稳,因而还需分析其在最不利工况下的整体屈曲强度与局部稳定性。结果表明:在最不利荷载作用下,架桥机主梁的最大应力为140.4 MPa,最大竖向变形为44.4 mm,相较于吊装32 m标准梁体时,其最大竖向变形增幅约12%,最大应力增幅约8%;架桥机整体安全稳定系数为12.8,局部稳定系数远小于整体安全稳定系数。为确保架桥机腹杆的局部稳定性,应对中间区段增设腹杆进行局部加强设计,防止腹杆发生局部屈曲失稳。

**关键词:**非标准梁;架桥机;数值计算;局部稳定性;有限元分析;整体屈曲

中图分类号:U445.36

文献标志码:A

## Stability analysis of bridge erecting machine for non-standard girders of Luoxizhou Bridge

CHEN Zhehao<sup>1</sup>, ZHANG Guowen<sup>2</sup>, XU Xin<sup>2</sup>, LEI Shixi<sup>2</sup>, JIA Shuxiang<sup>2</sup>, LIU Shizhong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. CCCC Second Highway Engineering Bureau Co., Ltd., Xi'an 710061, China)

**Abstract:** Due to the different lifting points of non-standard girders compared to standard girders during the lifting process, the stress situation and the potentially weakest position of the bridge erecting machine change accordingly. For ensuring the safety of the bridge erecting machine during the lifting process, it is necessary to analyze the stress characteristics of the bridge erecting machine and provide local reinforcement suggestions for the most unfavorable stress position. With the hoisting of a 35 m non-standard girder for the Luoxizhou Bridge project as the engineering background, Midas Civil was used for a finite element analysis to numerically simulate the stress states of the bridge erecting machine under different working conditions during the lifting process. The deflection and stress results of the bridge erecting machine beam were analyzed to determine its most unfavorable load working condition. In addition, considering that the overhead crane is unconstrained laterally when moving on the beam, which may lead to lateral instability of the bridge erecting machine under eccentric load, it

收稿日期:2023-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51868040)

通信作者:刘世忠(1962—),男,教授,主要从事桥梁受力性能方面的研究工作。E-mail:645819349@qq.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

is also necessary to analyze its overall buckling strength and local stability under the most unfavorable working condition. The results show that under the most unfavorable load, the maximum stress of the main beam of the bridge erecting machine is 140.4 MPa, and the maximum vertical deformation is 44.4 mm. Compared with those in the case of lifting a 32 m standard girder, the maximum vertical deformation increases by nearly 12%, and the maximum stress increases by about 8%. The overall stability safety factor of the bridge erecting machine is 12.8, and the local stability factor is much smaller than the overall stability safety factor. To ensure the local stability of the web members of the bridge erecting machine, local reinforcement should be adopted by adding web members to the middle section to prevent local buckling instability of the web members.

**Key words:** non-standard girder; bridge erecting machine; numerical calculation; local stability; finite element analysis; overall buckling

近年来,随着交通事业的蓬勃发展,桥梁建设领域迎来了飞跃。为了缩短现场作业周期、加速施工进度并有效控制工程造价,大跨度预制梁在桥梁设计中得到了广泛应用。作为支撑这一创新实践的关键设备,架桥机承担着大跨度预制梁的起吊与运输重任。然而,在架桥机的吊装作业中,吊装构件可能会出现局部应力集中现象,且在偏心荷载下可能会发生整体屈曲,进而导致结构破坏。因此,为保证桥梁施工的安全性,应对架桥机在不同工况下的受力特点及构件的强度进行分析,研究其工作过程中的整体及局部稳定性,并运用有限元分析技术,预先模拟并评估可能发生的失稳模态<sup>[1-3]</sup>。采用有限元法能够准确地计算出架桥机整体结构在各工况下的受力分布与变形规律,同时得出各构件在相互作用下的局部应力值<sup>[4]</sup>。本文选用适用于线弹性假设的特征值屈曲分析法进行架桥机的稳定性分析,该方法能够验证结构的整体屈曲稳定性,模拟一阶失稳模态<sup>[5-6]</sup>。

目前,我国架桥机起吊梁体的标准跨度通常为24、32、40 m。然而,在起吊非标准梁时,梁体重量与吊点位置均发生了变化,因而需进一步分析起吊非标准梁时架桥机的受力特性<sup>[7]</sup>。

以江西省赣州市螺溪洲大桥项目起吊35 m非标准梁为实际工程背景(标准梁长32 m),基于有限元理论,建立架桥机Midas Civil有限元模型,对180 t级架桥机位于吊车梁各危险位置时,梁体的受力情况进行数值模拟。通过静力分析明确了不同工况下结构的变形情况,并精确识别出最大应力出现的具体位置。同时,针对架桥机的整体屈曲稳定性及局部稳定性进行深入分析。结果显示:在最不利的工况下,无论是整体还是局部稳定性,均符合相关

规范要求,确保了架桥机在复杂工况下的安全运行。

## 1 项目概况

螺溪洲大桥主桥采用钢桁架结构,主桥跨径为(70.0+140.0+140.0+70.0) m,标准段桥面宽为40.5 m,由两片主桁架组成,效果图如图1所示。桥面布置双向六车道,两侧设有3.5 m的非机动车道和钢桁架布置区,中间设有0.5 m的中央分隔带。下部桥墩中心间距为26.0 m。



图1 螺溪洲大桥效果图

Fig. 1 Effect picture of Luoxizhou Bridge

## 2 有限元模型

### 2.1 基本模型

架桥机总长70.0 m,双跨结构,其中最大单跨跨度达到40.0 m。该机主要由两根主梁构成上部承重体系,其中两根主梁横向间隔6.5 m,分别位于左右两端。主梁分为六节,由上弦杆、下弦杆、腹杆以及平联等构件组成,各构件间均采用焊接工艺进

行连接。同时,在每两节节间连接处以及中间区段受力薄弱位置(第二节和第三节)相邻斜腹杆间加设直腹杆,主梁支点约束位置处的两根斜腹杆间用槽钢相连以增加稳定性。主梁上弦采用32B规格的工字钢,主梁下弦采用25B规格的槽钢,腹杆部分则由方钢构成,而平联则沿用了槽钢材质。

架桥机设计最大吊重为(90+90) t,采用两部天车协同吊装。图2(a)为左主梁的立面图,图2(b)为左主梁剖面图,图2(c)为天车布置示意图。依据图2对架桥机结构及加载方式进行简化,采用Midas Civil软件建立架桥机有限元模型:主梁、弦杆、腹杆均采用梁单元进行模拟;将吊重简化为节点荷载施加于主梁上,上弦杆轨道重量则以均布荷载的形式施加于主梁上。模拟简支梁的边界条件,将约束设置于架桥机两端及中间位置。架桥机采用高强度Q235钢材进行模拟,虽然其屈服极限达235 MPa,但为了确保结构安全,将容许应力设计为215 MPa。在进行有限元建模的过程中,为了在提高计算效率的同时保证计算精度,本文采用等效截面惯性矩对主梁的上、下弦杆进行了简化。

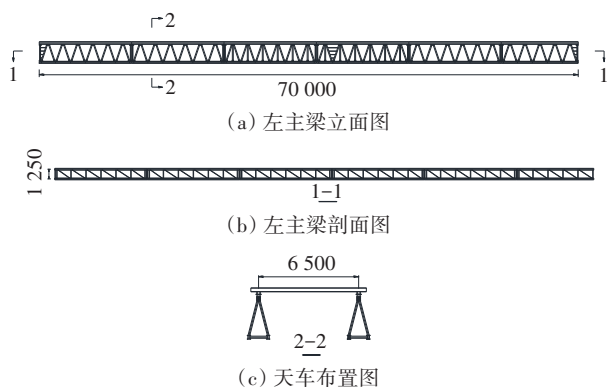


图2 架桥机左主梁上部结构构造图(单位:mm)

Fig. 2 Structural diagram of the upper part of the left main beam of the bridge erecting machine (unit: mm)

## 2.2 计算工况与荷载组合

在起吊35 m长的非标准梁时(梁自重160.7 t),根据架桥机最佳受力情况,本文确定起吊点间距为33 m。施工时由架桥机主梁上的两部天车协同作业进行起吊,每部天车下方配置两根间距为1.72 m的横梁,用以均匀分担并向下传递吊重荷载至主梁。由于每部天车承担1/2的吊重荷载,简化后即每根横梁承担1/4的吊重荷载,为了模拟这一受力情况,在有限元模型中将这部分荷载以总重的1/8分别施加到横梁与主梁接触的8个节点上,具体荷载简化示意图如图3所示。

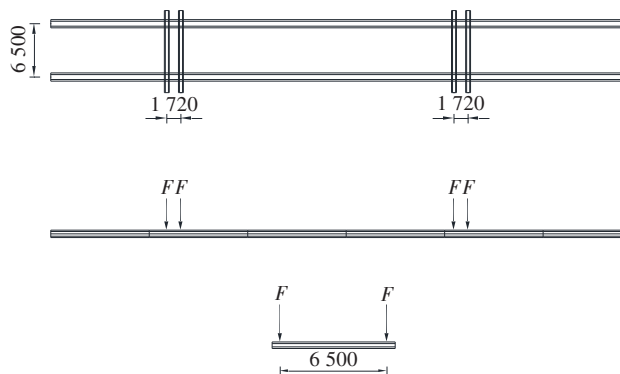


图3 荷载简化示意图(单位:mm)

Fig. 3 Simplified schematic diagram of load (unit: mm)

天车在运输梁体的过程中共有四种危险工况,对其进行简化后的有限元荷载工况如下,其中荷载组合为结构自重和吊重,并考虑了1.2倍的冲击系数。

1) 仅存在一部天车,且其位于30 m架桥机主梁跨中位置处;2) 一部天车位于30 m架桥机主梁跨中位置处,另一部天车位于40 m架桥机主梁上;3) 一部天车位于40 m架桥机主梁跨中位置处,另一部天车位于30 m架桥机主梁上;4) 两部天车均位于40 m架桥机主梁上。上述四种工况下的加载示意图如图4所示。

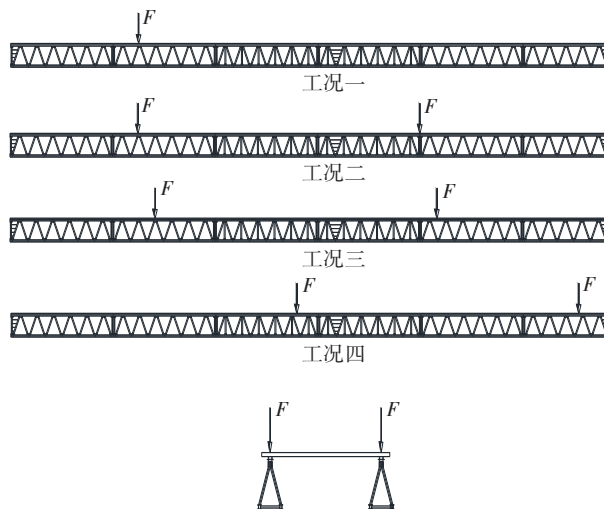


图4 四种工况加载示意图

Fig. 4 Schematic diagram of loading under four working conditions

## 3 架桥机强度分析

### 3.1 各工况下数值模拟结果

工况一为一部天车与运梁车协同作业,用天车起吊35 m梁体的一端并作用于30 m架桥机跨中位置



处,梁体另一端放置于运梁车上,此时天车承担1/2的梁体自重。

有限元模拟结果表明:工况一的最大应力为 $\sigma = 84.3 \text{ MPa} < 215.0 \text{ MPa}$ ,最大应力出现于斜腹杆与下弦杆连接处;主梁的最大挠度出现于30 m跨度梁跨中位置处,跨中挠度最大为 $\omega = 22.5 \text{ mm}$ ,小于 $L/400 = 30\,000.0/400 = 75.0 \text{ mm}$ ,该工况下应力与挠度均满足规范要求。

工况二为两部天车协同作业,共同起吊35 m长的梁体,一部天车位于30 m架桥机主梁跨中位置,另一部天车位于40 m架桥机的主梁上,每部天车承担1/2的梁体自重。

有限元模拟结果表明:工况二的最大应力为 $\sigma = 140.4 \text{ MPa} < 215.0 \text{ MPa}$ ,最大应力出现于下弦杆上;主梁的最大挠度 $\omega = 43.5 \text{ mm}$ ,小于 $L/400 = 30\,000.0/400 = 75.0 \text{ mm}$ ,最大挠度出现于40 m跨度梁内,该工况下应力与挠度均满足规范要求。

工况三为两部天车协同作业,共同起吊35 m长的梁体,一部天车位于40 m架桥机主梁跨中位置,另一部天车位于30 m架桥机的主梁上,每部天车承担1/2的梁体自重。

有限元模拟结果表明:工况三的最大应力为 $\sigma = 139.3 \text{ MPa} < 215.0 \text{ MPa}$ ,最大应力出现于下弦杆上;主梁的变形以竖直向下为主,跨中挠度最大为 $\omega = 44.4 \text{ mm}$ ,小于 $L/400 = 30\,000.0/400 = 75.0 \text{ mm}$ ,该工况下应力与挠度均满足规范要求。

工况四为两部天车于40 m架桥机主梁内共同起吊35 m梁,每部天车承担1/2的梁体自重。结果表明:工况四的最大应力为 $\sigma = 133.1 \text{ MPa} < 215 \text{ MPa}$ ,最大应力出现于斜腹杆上;40 m主梁跨中挠度最大为 $\omega = 29.7 \text{ mm}$ ,小于 $L/400 = 30\,000/400 = 75 \text{ mm}$ ,该工况下强度与挠度均满足规范要求。以工况一为例,该工况下的应力与变形情况如图5~6所示。



图5 工况一应力图(单位:MPa)

Fig. 5 Stress diagram of working condition one (unit: MPa)



图6 工况一挠度图(单位:mm)

Fig. 6 Deflection diagram of working condition one (unit: mm)

3.2 结果分析

对上述四种工况下有限元结果进行整理,并与相同工况下吊装32 m标准梁的结果进行对比,有限元计算结果见表1。

由表1可知,在工况一至三中,受梁体自重及吊点位置的影响,起吊35 m非标准梁时架桥机主梁的最大变形比起吊32 m标准梁时的大,最大挠度增幅近12%,最大应力增幅约6%。在工况四中,梁体位于架桥机40 m跨度内,吊装35 m非标准梁体时,吊点更靠近支点位置,架桥机最大变形略小于吊装标准梁体时的变形,最大应力增幅约8%。由此可见,通过有限元数值模拟可以精确识别结构中的最不利受力区域。并基于分析结果,有针对性地对下弦杆及斜腹杆等关键部位进行局部加强,以确保整体结构的稳定性和安全性。

表1 各工况下结果对比表

Table 1 Comparison of results under various working conditions

工况	应力/MPa		挠度/mm	
	吊装35 m梁	吊装32 m梁	吊装35 m梁	吊装32 m梁
工况一	84.3	80.9	22.5	20.9
工况二	140.4	132.3	43.5	38.9
工况三	139.3	131.0	44.4	43.6
工况四	133.1	122.7	29.7	33.2

4 架桥机稳定性分析

4.1 局部稳定性分析

4.1.1 理论公式

1) 欧拉公式。

杆件的失稳(或称屈曲)是结构或构件稳定性失效的一种表现:当杆件受到的轴向压力增大到某一临界值时,杆件将无法保持其稳定的直线状态,

而是会突然发生显著的弯曲变形,这种变形会导致杆件丧失承载能力。长直杆件的失稳与短杆在荷载作用下发生的强度破坏具有不同的性质。莱昂哈德·欧拉对细长杆件的这一特性进行了深入研究,并成功推导出杆件在临界失稳状态下的荷载值,这一重要发现被后人称为欧拉方程:

$$F_{cr} = \frac{\mu \pi^2 EI}{l^2} \quad (1)$$

式中: $F_{cr}$ 为临界荷载; $E$ 为材料的弹性模量; $I$ 为杆件截面惯性矩; $l$ 为杆件长度; $\mu$ 为长度系数,由杆件两端的约束条件确定。

由于欧拉公式仅适用于计算临界应力 $\sigma_{cr}$ 小于材料的比例极限 $\sigma_p$ 的长直杆的临界失稳荷载,因此引入极限柔度 $\lambda_p$ 作为欧拉公式成立与否的判断依据,当杆件计算柔度 $\lambda$ 大于其极限柔度 $\lambda_p$ 时,欧拉公式成立。

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_p}} \quad (2)$$

式中: $\sigma_p$ 为比例极限(Q235的比例极限 $\sigma_p = 200$  MPa); $\lambda_p$ 为极限柔度。

当杆件计算柔度 $\lambda$ 介于最高界限柔度与最低界限柔度之间,即满足 $\lambda_s \leq \lambda \leq \lambda_p$ 时,此时杆件属于中柔度杆,欧拉公式不再适用,而适用于雅辛斯基经验公式;若 $\lambda > \lambda_p$ 时,杆件属于大柔度杆,可采用欧拉公式计算临界应力;由式(3)计算得到中柔度杆的最低柔度限度 $\lambda_s$ ,若 $\lambda < \lambda_s$ 时,杆件属于小柔度杆,此时临界应力的大小不考虑柔度的影响,可按强度问题进行计算<sup>[8]</sup>。

$$\lambda_s = \frac{a - \sigma_s}{b} \quad (3)$$

式中: $a$ 、 $b$ 是与材料相关的常数; $\sigma_s$ 为材料的屈服应力; $\lambda_s$ 为最低柔度限度。

## 2) 我国抛物线公式。

我国有关单位根据试验结果整理出了抛物线经验公式(4),对于不同的材料其柔度 $\lambda$ 适用范围有所不同<sup>[8]</sup>。

$$\sigma_{cr} = c - d\lambda^2 \quad (4)$$

式中: $\sigma_{cr}$ 为压杆临界应力; $c$ 、 $d$ 为与材料相关的参数; $\lambda$ 为计算柔度。

## 3) 压杆稳定实用公式。

为确保压杆的稳定,还需对压杆进行稳定性校核。通过引入稳定系数 $\phi$ 对材料的许用应力进行折减,可以更加准确地评估压杆的承载能力:

$$\sigma = \phi[\sigma] \quad (5)$$

式中: $\sigma$ 为考虑稳定系数折减后的压杆应力; $\phi$ 为受压构件稳定系数; $[\sigma]$ 为材料许用应力。

## 4.1.2 局部稳定性分析结果

通过对四种不同工况下架桥机的应力及挠度进行分析,可知斜腹杆在极端工况下的最大应力值为133.1 MPa。为确保架桥机在复杂工况中的安全性与可靠性,必须对斜腹杆进行局部稳定性验算。在有限元模型中,为简化计算,腹杆与弦杆的连接被设定为共节点方式,即两端铰接<sup>[9-12]</sup>。

采用式(6)计算斜腹杆的柔度 $\lambda$ ,并与式(2)计算出的压杆极限柔度 $\lambda_p$ 及式(3)计算出的最低柔度限度 $\lambda_s$ 进行对比,以此判断斜腹杆的柔度是否满足欧拉公式的适用条件。

$$\lambda = \frac{\mu l}{i} \quad (6)$$

式中: $i$ 为截面回转半径, $i = \sqrt{I/A}$ ( $I$ 为杆件截面惯性矩、 $A$ 为截面面积); $l$ 为杆件长度; $\mu$ 为长度系数(由于斜腹杆按照偏安全的两端铰接来计算,故 $\mu$ 取1)。经计算可得 $\lambda = 54.7$ , $\lambda_p = 100.8$ , $\lambda < \lambda_p$ ,故该斜腹杆不满足欧拉公式所适用的大柔度杆,采用式(3)计算最低柔度限度 $\lambda_s$ (斜腹杆材料为Q235, $a = 304$  MPa, $b = 1.12$  MPa, $\sigma_s = 235$  MPa)。经计算 $\lambda_s = 61.6 > \lambda = 54.7$ ,由此可知斜腹杆属于小柔度杆,其破坏主要以受压破坏为主,故斜腹杆的局部稳定性满足要求。

同时,采用我国抛物线经验公式(4)计算受压构件临界压力和安全稳定系数,由有限元计算结果可知,斜腹杆应力最大处对应的轴力 $N = 333.3$  kN,腹杆的计算参数: $E = 2.06 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>, $I = 7.53 \times 10^6$  mm<sup>4</sup>, $A = 3.58 \times 10^3$  mm<sup>2</sup>, $l = 2\,509.4$  mm。且腹杆的材料为Q235,取 $c = 235$  MPa, $d = 6.69 \times 10^{-3}$  MPa。

由式(6)计算得到 $\lambda = 54.7$ ,代入式(4)计算得到临界应力 $\sigma_{cr} = 214.98$  MPa,故临界荷载 $F_{cr} = \sigma_{cr} A = 769.6$  kN,腹杆的局部稳定系数为 $F_{cr}/N = 2.3$ ,满足规范要求。

采用式(5)对斜腹杆的稳定性进行进一步校核,根据《钢结构设计规范》(GB 50017—2017)附录D中c类截面的稳定系数表可知, $\phi = 0.918\,6$ ;Q235许用应力取为160.00 MPa。由于斜腹杆最大应力 $\sigma = 133.10$  MPa  $< \phi[\sigma] = 146.98$  MPa,故斜腹杆的局部稳定性满足规范要求。

与斜腹杆的计算方式相同,现对上弦杆的局部稳

定性进行验算,由有限元模型计算得出上弦杆最大应力为112.7 MPa,与之对应的最大轴力为1 658.7 kN。为了确保安全,在计算中将杆件的计算长度设定为2 m(在实际结构中,应力最大点的杆件实际长度小于这一数值)。

经计算可知,上弦杆的柔度 $\lambda = 18.5$ ,故上弦杆也属于小柔度杆,采用式(4)计算得到上弦杆的临界应力 $\sigma_{cr} = 232.70$  MPa,其安全稳定系数为3.84。采用式(5)进一步对上弦杆进行稳定性校核,上弦杆的截面稳定系数 $\phi = 0.974 5$ ,上弦杆的最大应力 $\sigma = 112.70$  MPa  $< \phi[\sigma] = 155.92$  MPa,故上弦杆的局部稳定性满足规范要求。

#### 4.2 架桥机整体稳定性分析

针对架桥机在自重及最不利荷载工况下的整体稳定性进行分析。由表1可知,综合考虑挠度及应力对架桥机主梁的影响后,将最不利荷载工况设置为工况三,此时一部天车位于40 m架桥机主梁跨中位置,另一部天车位于30 m架桥机主梁上。此工况下架桥机的一阶屈曲模态如图7所示,整体安全稳定系数为12.8。



图7 架桥机整体一阶屈曲模态

Fig. 7 First-order buckling mode of bridge erecting machine

由图7可知,架桥机的桁架结构一阶失稳模态表现为40 m架桥机主梁跨中位置的整体内倾,反映出40 m架桥机主梁跨中位置为结构失稳的薄弱部位。同时,屈曲模态的对称性特征不仅体现了架桥机桁架结构本身的左右对称性,也表明了荷载作用方式的对称性,二者相互印证,增强了分析的可靠性。

为确保架桥机在使用过程中的安全性,除了对正常使用情况下最不利工况的整体稳定性进行全面分析外,还应考虑架桥机在偏载情况下的整体稳定性。偏载情况指整体天车形成三点受力的三角稳定体系,即天车一侧由两点支撑共同受力,而另一侧则仅由单点支撑承担荷载。图8为偏载条件下架桥机的整体一阶屈曲模态,其整体安全稳定系数为11.3,因而结构整体稳定性具有足够的安全储备。



图8 架桥机偏载下整体一阶屈曲模态

Fig. 8 First-order buckling mode of bridge erecting machine under eccentric load

由图8可知,当天车一侧仅受单点支撑力作用时,结构的一阶屈曲模态表现为单侧主桁的外倾失稳,这一结果符合结构力学受力特征,此时结构安全稳定系数下降了约10%。因此,为确保结构安全,除了加强主桁结构中各杆件与节点的稳固连接外,还应加强对天车轮轴的日常维护保养,以及保持整体结构的对称受力状态,这对于提升结构的安全性与稳定性至关重要。

## 5 结论

通过建立架桥机三维有限元模型,并对比不同工况下的计算结果与规范值,进而分析出架桥机在非标准梁架设过程中的最不利荷载位置。同时,研究了杆件的局部稳定性,以及架桥机在非标准梁起吊过程中发生偏载时的整体稳定性,结论如下:

1) 基于施工现场架桥机运输梁体过程中的四种危险工况建立有限元模型进行静力分析计算,架桥机主梁及各主要构件强度、刚度、稳定性均能满足规范规定及使用要求。

2) 通过对比架桥机吊装35 m跨度非标准梁与32 m跨度标准梁在不同工况下的有限元数值模拟结果可知,吊装35 m非标准梁时的最大变形与最大应力均有所增加,在运输梁体过程中架桥机主梁最大变形增幅约为12%,最大应力增幅约为8%。针对架桥机最大应力分布位置可对其薄弱部位进行局部加强以确保整体结构安全。

3) 对架桥机整体屈曲进行稳定性分析可知,整体安全稳定系数为12.8;架桥机的局部稳定系数远小于整体安全稳定系数,可对腹杆进行局部加强以确保其局部稳定性。考虑在偏载情况下(天车一侧单点支撑受力)架桥机的整体稳定性,其整体安全稳定系数为11.3,相较于两点支撑体系受力明显增大,因此偏载下的安全稳定系数变小。



## 参考文献(References):

- [1] 谢洪兵. 架桥机架设大跨径 T 梁抗倾覆稳定性分析方法研究[J]. 安徽建筑, 2022, 29(10): 152-153, 186. DOI: 10.16330/j.cnki.1007-7359.2022.10.064.  
XIE Hongbing. Study on stability analysis method of overturning resistance of long-span T-beam erected by bridge erecting machine[J]. Anhui Architecture, 2022, 29(10): 152-153, 186. DOI: 10.16330/j.cnki.1007-7359.2022.10.064.
- [2] 李远. 450 t 级架桥机在不同工况下的静力分析[J]. 甘肃科技, 2022, 38(13): 12-15. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0952.2022.13.005.  
LI Yuan. Mechanical analysis of 450 t bridge erecting machine under different working conditions[J]. Gansu Science and Technology, 2022, 38(13): 12-15. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0952.2022.13.005.
- [3] 杜可, 陈晓飞, 张艺瀚, 等. 列车风压对桥梁施工中架桥机受力性能的影响[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(6): 37-44. DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20221104.002.  
DU Ke, CHEN Xiaofei, ZHANG Yihan, et al. Influence of wind pressure of operating trains on mechanical performance of the bridge erecting machine in construction of the adjacent new railway[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(6): 37-44. DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20221104.002.
- [4] 程晔, 谢瑾荣, 张乐亲. TPZ/48 钢箱梁式架桥机施工状态下屈曲稳定性研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(1): 35-40. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2012.01.06.  
CHENG Ye, XIE Jinrong, ZHANG Leqin. Study on the buckling stability of TPZ/48 steel box girder type bridge erection machine under construction state[J]. China Railway Science, 2012, 33(1): 35-40. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2012.01.06.
- [5] 谢瑾荣, 周翠英, 程晔, 等. 大跨度钢箱梁式架桥机施工状态下的静强度及稳定性能研究[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(2): 38-42. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2013.02.030.  
XIE Jinrong, ZHOU Cuiying, CHENG Ye, et al. Static strength and buckling stability of large-span steel box girder bridging machine in construction condition[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(2): 38-42. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2013.02.030.
- [6] 桂睿, 赵兴宏, 肖永铭. 悬索桥钢桁梁加劲梁局部受力及屈曲特性有限元分析[J]. 特种结构, 2019, 36(2): 48-52. DOI: 10.19786/j.tzjg.2019.02.009.  
GUI Rui, ZHAO Xinghong, XIAO Yongming. Finite element analysis on local stress and buckling behavior of steel truss stiffening girder of suspension bridge[J]. Special Structures, 2019, 36(2): 48-52. DOI: 10.19786/j.tzjg.2019.02.009.
- [7] 何建华. 高速铁路简支箱梁运架一体机的发展与创新[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(10): 90-97. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.202112040001.  
HE Jianhua. Development and innovation of girder-transporting and erecting machine used for simply supported box beams in high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(10): 90-97. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.202112040001.
- [8] 陈世建. 关于压杆稳定的经验公式[J]. 大连轻工业学院学报, 1988, 7(2): 27-45.  
CHEN Shijian. Empirical formula on stability of compression bar[J]. Journal of Dalian Institute of Light Industry, 1988, 7(2): 27-45.
- [9] 王立军. 轴心受压杆件的弯曲屈曲[J]. 建筑结构, 2019, 49(19): 126-135. DOI: 10.19701/j.jzjg.2019.19.015.  
WANG Lijun. Flexural buckling of axially compressed bars[J]. Building Structure, 2019, 49(19): 126-135. DOI: 10.19701/j.jzjg.2019.19.015.
- [10] 袁权, 黄孟阳, 曹吉星. 统一推导欧拉临界压力公式的简单模型[J]. 四川建材, 2021, 47(1): 242-243.  
YUAN Quan, HUANG Mengyang, CAO Jixing. A simple model for unified derivation of Euler's critical pressure formula[J]. Sichuan Building Materials, 2021, 47(1): 242-243.
- [11] 李银山, 郭春霞, 李欣业, 等. 轴向压力和分布载荷联合作用下压杆屈曲问题的实用算法[J]. 工程力学, 2023, 40(7): 49-58. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.11.0905.  
LI Yinshan, GUO Chunxia, LI Xinye, et al. A practical algorithm to buckling analysis of compression bar under axial force and distributed load[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(7): 49-58. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.11.0905.
- [12] 鲁力, 李敏. 基于 CSO-ABC 算法的系杆拱桥吊杆内力优化[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(4): 95-102. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.002.  
LU Li, LI Min. Internal force optimization of the suspender of a tied-arch bridge based on CSO-ABC hybrid algorithm[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(4): 95-102. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.002.

(责任编辑:薛仪)