

基于作业模式的提梁机有限元仿真分析

陈士通¹, 崔晨光², 李义强¹, 张 平¹

(1. 石家庄铁道大学河北省交通应急保障工程技术研究中心, 河北 石家庄 050043;

2. 中铁建大桥工程局集团第一工程有限公司, 辽宁 大连 116033)

摘 要: 既有提梁机设计和结构分析多参考相关规范进行, 未考虑走行轨道不平顺、大车走行不同步等作业工况对整机结构的影响, 不利于提梁机作业安全。针对这一问题, 基于提梁机作业模式分析了影响提梁机结构安全的5种因素, 并假定每种影响因素具有3种取值方式, 采用正交试验设计方法, 通过 $L_9(3^4)$ 正交表合理确定考虑影响因素的工况组合。结合试验结果对MG450型提梁机进行了有限元仿真分析, 与传统方法进行了计算结果对比分析。研究表明: 作业模式对结构分析结果影响明显, 基于作业模式的提梁机有限元分析结果更能够真实地反映结构受力情况。

关 键 词: 提梁机; 作业模式; 结构安全; 有限元; 正交试验设计

中图分类号: U 215.6; TH 213.5 **DOI:** 10.11996/JGJ.2095-302X.2016040502

文献标识码: A **文 章 编 号:** 2095-302X(2016)04-0502-07

Simulation Analysis of Girder Hoisting Machine Based on Working Mode

Chen Shitong¹, Cui Chenguang², Li Yiqiang¹, Zhang Ping¹

(1. Hebei Engineering Research Center for Traffic Emergency and Guarantee, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei 050043, China;

2. China Railway Construction Bridge Engineer Bureau Group 1st Engineering Co., Ltd, Dalian Liaoning 116033, China)

Abstract: The existing design and structure analysis of a girder hoisting machine refer to the design code in general, but the unfavorable factors, such as the running rail irregularity, running asynchronous, etc. are not considered in the process of design and structure analysis. These will even cause the safety accident. Aiming at solving the safety problem of girder hoisting machine, the five factors affecting structure safety are proposed based on the particular working condition, and three values are selected in each factor. In order to scientific arrange the combination of the five factors for structural safety assessment, the orthogonal design are introduced. The optimal combination scheme of the five factors are obtained by using of the $L_9(3^4)$ orthogonal table. A MG450 type girder hoisting machine was taken as example and the ANSYS was used to set up the element model. The comparative of analysis results based on the working mode and the traditional design method was carried out, and the effect of working mode was analyzed with experimental test. The analysis results of girder hoisting machine based on working mode is coincide with the engineering practice.

Keywords: girder hoisting machine; working mode; structure safety; finite element method; orthogonal design

收稿日期: 2015-07-07; 定稿日期: 2015-12-04

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划重大项目(2014G008-A); 河北省教育厅科研项目(QN2014173); 河北省交通工程结构力学行为演变与控制重点实验室开放课题(201511)

作者简介: 陈士通(1977-), 男, 河北蠡县人, 高级工程师, 博士研究生。主要研究方向为桥梁运架设备研究。E-mail: chst@stdu.edu.cn

通讯作者: 李义强(1976-), 男, 河北辛集人, 讲师, 博士研究生。主要研究方向为桥梁工程研究。E-mail: 83001813@qq.com

提梁机是应高速铁路和城际客专建设需要而研发的专用大型门式起重机,具有梁场移梁、跨线提梁和短距离架梁的功能。其传统设计方法是依据功能需要确定结构形式,再参照《起重机设计规范》,结合经验和简化计算给出初步设计,制造样机并根据情况反馈改进设计,传统的设计方法存在诸多局限性。关于提梁机的既有研究多集中介绍其结构组成和功能特点^[1-2],很少涉及有限元结构分析。文献[3]建立了偏轨提梁机的有限元模型,选择10种典型工况进行强度、刚度和稳定性分析,其分析前提是假设提梁机支点为理想状态,未考虑大车走行轨道不平顺、不同步等因素对结构受力的影响,计算结果不能真实反映结构受力状态。文献[4]以造桥机不同构件为研究主体,针对性地选取造桥机就位、制梁前、制梁和调移下导梁4种工况进行仿真分析,并将仿真结果与试验结果进行了对比分析,结果表明合理的参数设置是保障有限元计算结果正确的前提。文献[5]基于提梁机作业需求,分析了提梁机转场改造时支腿高度变化对结构动力特性和起升荷载冲击系数的影响,研究表明支腿高度变化等外部因素对结构动力特性和冲击系数的影响明显,进行结构分析时需要考虑外部因素对结构受力的影响。文献[6]研究表明提梁机边界条件对动力特性影响明显,结合实际作业工况进行结构分析有利于作业安全。文献[7]针对机械装备金属结构有限元分析

提出了8条建模策略,以提高金属结构的建模效率,但建模策略仅针对结构本身几何模型的建立,未涉及荷载施加方式和约束处理的内容。不同于定点作业的门式起重机,提梁机施工条件恶劣,作业环境复杂,存在诸多不安全影响因素,一旦发生事故,将导致灾难性后果。

针对既有研究成果未考虑作业模式对结构的影响问题,本文结合提梁机作业模式,分析了作业过程对提梁机结构受力的影响,引入正交试验设计方法,提出了一种基于作业模式的既有提梁机结构仿真分析建模方法,研究结果对此类设备的设计优化和安全施工具有指导和借鉴意义。

1 提梁机结构和有限元建模

1.1 整机结构

本文所研究的MG450提梁机主要由主梁、“人”字型支腿、起升机构、走行机构、电气系统和安全机构组成(图1)。为降低提梁机走行过程中支腿与轨道间的横向水平力,避免大车走行时啃轨现象的发生,通过优化支腿与主梁的线刚度比,使一侧支腿与主梁的连接方式接近于铰接,形成一侧刚性支腿、一侧“假想”柔性支腿的门架结构。为便于支腿高度调整,以增强提梁机作业环境适应性,刚性支腿和柔性支腿形状相同,均由支腿上横梁、支腿变截面节、支腿分叉节、支腿斜腿和支腿下横梁组成,两侧支腿区别在于截面特性不同。

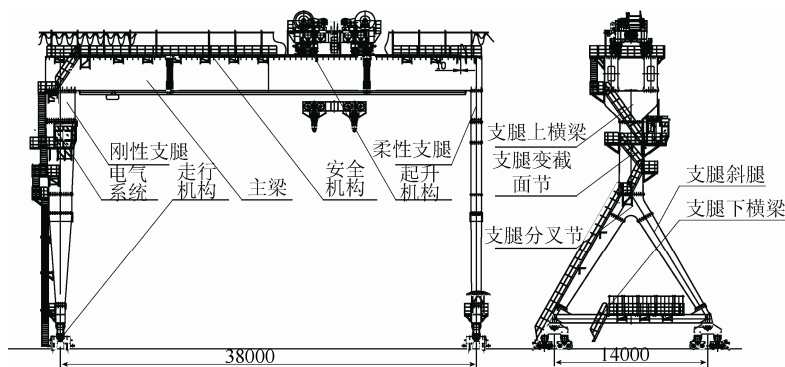


图1 提梁机结构图

1.2 有限元建模

1.2.1 几何建模

根据提梁机的结构形式和受力特点,采用梁单元和壳单元结合的方式进行几何建模,主梁和支腿部分构件受力明确,在其设计满足规范要求的情况下,不会出现局部失稳现象,可采用梁单元;对于荷载传递路径较为复杂的部位,如支腿

分叉节、支腿斜腿与下横梁连接处,可采用壳单元。为保证各条支腿的受力均衡,大车走行采用三级均衡机构,故建模时应以走行机构的横向轴铰为基准确定提梁机结构高度,大车走行机构以截面特性很大的刚臂(梁单元)模拟。同时,在不影响结构受力的前提下,对部分构件和连接进行了简化:①司机室、走台栏杆等采用质量块的方式

施加；②构件间的螺栓群连接采用刚性连接模拟；③箱梁建模以保证截面特性为前提，忽略倒角、螺栓孔等细节特征。具体单元类型如表 1 所示。

表 1 提梁机几何建模单元类型及连接方式

序号	提梁机构件	单元类型
1	主梁、支腿(变截面节、斜腿、下横梁)	梁单元
2	支腿(上横梁、分叉节、下横梁端部)	壳单元
3	司机室、配电柜、走台、栏杆、螺栓	质量单元
4	大桥行走机构	刚臂
5	法兰、拼接板连接部位	刚性连接

1.2.2 荷载处理

将外部荷载等效处理施加于有限元模型相应部位。

(1) 提梁机结构自重。ANSYS 前处理程序中输入材料密度，求解时输入重力加速度，程序可根据所输入的单元截面形状、实常数等信息，自动将其处理为分布载荷施加于结构上。需注意提梁机结构是采用钢板焊接而成，焊缝重量约占结构总重的 5% 左右，因此不能忽略，可以考虑将重力加速度乘以增大系数的方式添加。

(2) 起升荷载。几何建模时可不考虑吊具，故起升荷载应为箱梁和吊具重量之和。考虑起重小车为偏轨走行，其横移轨道位于主梁内侧腹板上，起重小车吊装会对箱梁产生扭矩作用，故起升荷载应包括竖向荷载及竖向荷载偏心所引起的扭矩，施加位置应据起重小车沿主梁横向移动范围确定。

(3) 司机室、配电柜等构件重量。在相应节点位置施加质量单元。

(4) 风载。根据规范计算出各部位风荷载数值，施加到相应位置，由于建模未考虑钢丝绳的影响，箱梁所产生的风力需折算至主梁上。

(5) 冲击荷载。其可通过起升荷载乘以冲击系数的方式施加，冲击系数取值依据前文研究结果确定。

(6) 制动荷载。提梁机整机纵向行走或起重小车沿主梁横移时，走行机构的启动和制动会产生附加荷载。此项荷载根据相关规范求取后施加于结构相应位置。

(7) 运行歪斜侧向力。当两侧支腿走行不同步时，将引发运行歪斜侧向力的出现，如图 2 所示。

1.2.3 约束处理

提梁机有限元分析涉及的约束主要为支点约束条件，而支点约束随作业模式变化。

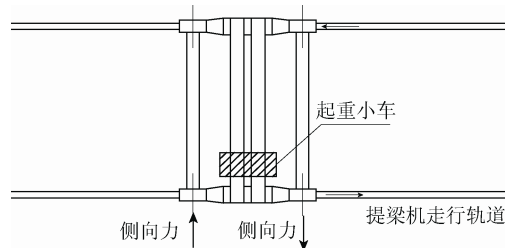
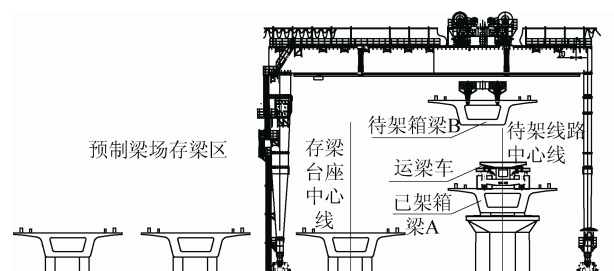


图 2 运行歪斜侧向力图

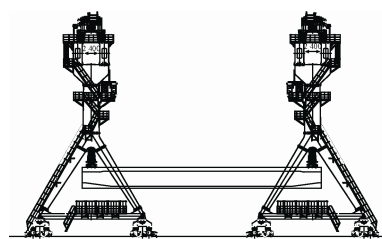
2 作业模式及其对结构性能影响分析

2.1 作业模式

两台提梁机配合可实现提梁、移梁和装梁作业，如图 3 所示。高铁或客专线路一般以高架铺设为主，提梁机需具备跨线提梁的功能。柔性支腿一般位于线路外侧，刚性支腿位于预制梁场内，如图 3(a)所示。桥梁架设初期，需利用提梁机架设 3~4 孔 32 m 跨箱梁，以便于架桥机和运梁车桥上组装，故提梁机纵走轨道长度约为 120 m。



(a) 提梁作业



(b) 纵走移梁

图 3 提梁机作业图

正常架梁程序时，提梁机的主要工况为：

(1) 提梁。起吊提梁机跨内存梁台座上的预制箱梁至设计高度。

(2) 移梁。分为整机移梁(两台提梁机同步纵向行走)和起重小车移梁(起重小车沿主梁上轨道横向移动)两种方式。

(3) 落梁。移梁到位后，起重小车下落箱梁至运梁车。

2.2 对结构性能影响分析

2.2.1 对支点竖向位置的影响

设计计算时，一般假设提梁机支点竖向位置

为同一坐标,而实际作业时,提梁机的4组大车走行机构间存在一定高差,其主要原因是大车走行轨道平整度不满足规范要求所致。大车走行轨道顶面不平整,即提梁机4个支点竖向坐标不一致将导致结构受力的变化。

高速铁路的建设周期约为3年,桥梁施工工期约2年左右,施工结束后梁场还需回填充耕,故提梁机走行轨道的基础施工一般参照临时性基础,轨道顶面平整度往往不满足规范要求。提梁机运行一段时间后,轨道不平现象更加严重,如图4所示。

对既有提梁机结构进行安全评估时,应对大车走行轨道进行实测,得到图4中所示 $Z_1 \sim Z_4$ 的数值,结构分析时予以考虑。

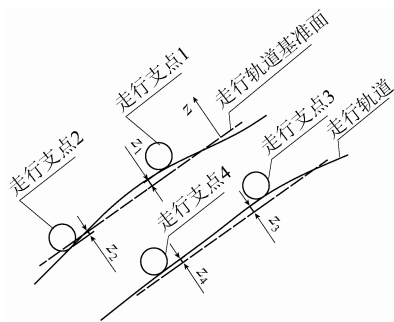


图4 轨道平整度图

2.2.2 对支点横向位置的影响

提梁机设计计算时,两侧支腿间距均按设计跨度 L 取值。实际作业时,3种情况会导致大车走行机构横向位置发生变化,即计算模型前后支点的横向间距与跨度 L 存在一定差值。①提梁机重载提梁:提梁机起吊箱梁时,主梁受载下挠导致支腿下部向外侧张开,但大车走行车轮与走行轨道间的摩擦作用会限制支腿下部的横向变位需求,此时的支点横向位置是否与设计值一致,取决于提梁机提梁前的初始位置;②提梁机重载走行:其大车车轮与走行轨道顶面间的摩擦将由滑动摩擦转变为滚动摩擦,两者之间的滚动摩擦力不能阻止主梁受载下挠引起的支腿下部横向变位需求,支腿下部的大车车轮与走行轨道间将产生横向相对位移(大车走行车轮一般采用双轮缘踏面,踏面宽度大于走行轨道顶面宽度,如图5所示)。两侧支腿下部位移大小与起重小车在主梁上位置有关;③轨道安装误差:轨道安装完毕后,如轨道侧向直线度不符合规范要求,两侧轨道侧向直线度偏差将导致支腿横向间距的变化。

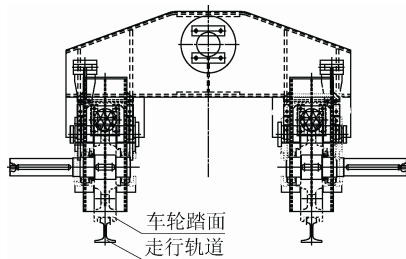


图5 车轮与走行轨道关系图(双轨走行)

2.2.3 对支点纵向位置的影响

理想状态,提梁机整机走行时,两侧支腿应处于同一纵向位置,即提梁机结构不出现整体扭转现象。提梁机整机走行通过大车走行机构的电机驱动实现,依靠安装于走行机构上的编码器采集数据,反馈至控制程序进行走行同步控制。实际作业时,由于编码器精度、质量和控制问题,两侧走行不同步的现象时有发生,两侧走行不同步将产生运行歪斜侧向力,导致结构整体扭转的产生,如图6所示。

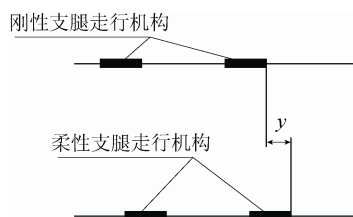


图6 大车走行机构不同步图

2.2.4 对主梁竖向加载位置的影响

移梁作业时,起重小车需沿主梁轨道重载横移,将箱梁落至运梁车或待架孔上。为正确分析整机结构力学性能,需在其横移范围内选取代表性位置作为竖向荷载施加位置(也可将起重小车的横移过程等效为移动荷载进行时程分析)。为避免箱梁起吊与下落时影响支腿安全,箱梁翼缘边沿与支腿内侧间一般预留0.5m的安全距离,故起重小车在主梁上的作业范围为: $(w/2+0.5)\text{m}$ 至 $(L-(w/2+0.5))\text{m}$,其中 w 为箱梁上翼缘宽度, L 为提梁机计算跨度。

2.2.5 对竖向荷载冲击系数取值的影响

轨道不平顺和起重小车起吊、卸载是导致竖向荷载产生冲击的主要因素。其中,轨道的不平顺包括大车走行轨道不平顺和起重小车横移轨道不平顺两种情况,轨道接头引发的冲击作用对结构受力影响最为明显;起重小车起吊时箱梁的突然离地和起重小车负载下落时突然制动均会导致振动的产生,继而产生冲击荷载。对提梁机结构进

行分析计算时,需结合产生冲击荷载的两种影响因素,在合理区间范围内确定冲击系数的取值。文献[5]研究分析得到的冲击系数略大于规范推荐值。

3 结合作业模式的工况组合

依据前述分析结果,将提梁机的支点位置、主梁上竖向荷载施加位置和冲击系数作为分析结构力学性能的影响指标,进行计算工况组合分析。

3.1 影响指标分析

以 U_x 、 U_y 、 U_z 代表提梁机作业时,支点横向、纵向和竖向位置与设计值间的偏差数组,如图 7 所示。

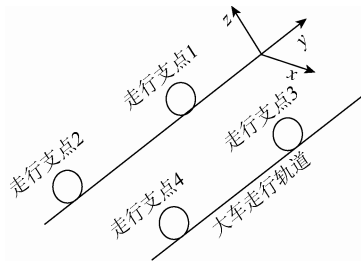


图 7 支点位置各方向偏差图

对既有提梁机结构进行受力分析时,应考虑支点位置变化对结构受力性能的影响,根据作业环境选取代表性的支点位置进行受力分析。本文以每个方向选取 3 个支点位置为例予以说明,如表 2 所示,括号内 4 个数值分别代表走行支点 1~4 在相应方向上与理论值的偏差。

表 2 支点位置偏差表(mm)

位置号	U_x	U_y	U_z
1	(30, -20, -30, 30)	(100, 100, 0, 0)	(10, -10, -10, 10)
2	(-30, -35, 40, 35)	(150, 150, 0, 0)	(20, 0, 25, 0)
3	(-30, -35, 40, 35)	(200, 200, 0, 0)	(20, 0, 25, 20)

为便于理解,竖向荷载施加位置和冲击系数样选取 3 个参数,①荷载位置:以一侧支腿中心为起始坐标,加载位置 F_x 分别取值($w/2+0.5$)m、 $L/4$ 和 $L/2$;②冲击系数:可据轨道平整度情况以及司机操作熟练程度取值;③设冲击系数 ϕ 分别为

1.05、1.10 和 1.15。

3.2 计算工况正交试验设计

结合前述影响指标分析,可将提梁机作业模式归纳为两种:原位作业(含提梁、落梁和起重小车横移)和纵走移梁。当原位作业时,提梁机大车固定不动,支点处仅存在横向和竖向位置偏差;纵走移梁时,起重小车固定不动,支点处将出现横向、纵向和竖向位置偏差。因此,原位作业时,影响指标需要考虑支点位置(横向、竖向位置偏差 U_x 和 U_z)、荷载位置和冲击系数;纵走移梁时,影响指标需考虑支点位置(横向、纵向、竖向位置偏差 U_x 、 U_y 和 U_z)和冲击系数。

对既有提梁机进行结构分析时,需分原位作业和纵走移梁两种作业模式进行。将影响指标子项细分为影响因素,则每种作业模式均需考虑 4 种影响因素进行力学性能分析。各影响因素的具体取值应据现场情况确定,此处以前文所述的 3 种数值为例进行分析。

明确整机结构性能影响因素及取值后,将上述各影响因素的取值一一组合,需进行 3^4 次仿真分析,工作量巨大。为此,引入了正交试验法,其是多因素、多水平的研究方法,特点是根据正交性从全面试验中挑选部分有代表性的点进行试验,这些代表点具有“均匀分散、齐整可比”的特点^[8]。

对于原位作业,将 U_x 、 U_z 、 ϕ 和 F_x 作为影响因素,每个因素的 3 种取值作为因素水平,得到表 3 所示的原位作业模式因素水平表;对于纵走移梁作业,将 U_x 、 U_y 、 U_z 和 ϕ 作为影响因素,同样将每个因素的 3 种取值作为因素水平,得到表 4 所示的纵走移梁作业模式因素水平表。

确定影响因素和其对应水平后,关键是正交表的选取,其不仅可安排试验过程,而对试验结果的处理也至关重要。对于本文的 4 因素 3 水平试验,选取 $L_9(3^4)$ 正交表进行正交试验设计,式中“9”为正交表行数,即将原 3^4 次数值模拟分析降至 9 次;“4”为正交表列数,即试验可以安排的最大因素数量;“3”表示各因素对应的水平数。

表 3 原位作业模式因素水平表

水平	影响因素			
	横向位置偏差(U_x , mm)	竖向位置偏差(U_z , mm)	冲击系数(ϕ)	加载位置(F_x)
水平 1	(30, -20, -30, 30)	(10, -10, -10, 10)	1.05	7.5
水平 2	(-30, -35, 40, 35)	(20, 0, 25, 0)	1.10	$L/4$
水平 3	(-30, -35, 40, 35)	(20, 0, 25, 20)	1.15	$L/2$

表 4 纵走移梁模式因素水平表

水平	影响因素			
	横向位置偏差(U_x , mm)	纵向位置偏差(U_y , mm)	竖向位置偏差(U_z , mm)	冲击系数(ϕ)
水平 1	(30, -20, -30, 30)	(100, 100, 0, 0)	(10, -10, -10, 10)	1.05
水平 2	(-30, -35, 40, 35)	(150, 150, 0, 0)	(20, 0, 25, 0)	1.10
水平 3	(-30, -35, 40, 35)	(200, 200, 0, 0)	(20, 0, 25, 20)	1.15

此处仅以纵走移梁作业模式为例, 说明利用正交表进行工况组合的思路。根据 $L_9(3^4)$ 正交表, 按照表 4 所示因素水平表即可确定纵走移梁作业模式的工况组合, 如表 5 所示。

表 5 纵走移梁模式计算工况组合表

工 况	因素			
	$U_x(\text{mm})$	$U_y(\text{mm})$	$U_z(\text{mm})$	ϕ
1	(30, -20, -30, 30)	(100, 100, 0, 0)	(10, -10, -10, 10)	1.05
2	(30, -20, -30, 30)	(150, 150, 0, 0)	(20, 0, 25, 0)	1.10
3	(30, -20, -30, 30)	(200, 200, 0, 0)	(20, 0, 25, 20)	1.15
4	(-30, -35, 40, 35)	(100, 100, 0, 0)	(20, 0, 25, 0)	1.15
5	(-30, -35, 40, 35)	(150, 150, 0, 0)	(20, 0, 25, 20)	1.05
6	(-30, -35, 40, 35)	(200, 200, 0, 0)	(10, -10, -10, 10)	1.10
7	(-30, -35, 40, 35)	(100, 100, 0, 0)	(20, 0, 25, 20)	1.10
8	(-30, -35, 40, 35)	(150, 150, 0, 0)	(10, -10, -10, 10)	1.15
9	(-30, -35, 40, 35)	(200, 200, 0, 0)	(20, 0, 25, 0)	1.05

纵走移梁时的结构分析, 需参照表 5 对提梁机的支点约束和竖向荷载进行调整。其中, U_x 、 U_y 和 U_z 可通过在支点处施加位移荷载的方式实现, 冲击系数可通过荷载乘以系数的方式实现。

4 模型验证

为了验证作业过程中外部因素对提梁机结构受力的影响, 此处以表 5 中冲击系数 $\phi=1.10$ 的 3 种工况(工况 2、6、7)为例, 与不考虑支点位置影响的工况(即 U_x 、 U_y 、 U_z 数组取值均为 0, $\phi=1.10$)进行对比分析, 设其编号为工况 10。以 MG450 型提梁机为研究对象, 提梁机跨度 $L=38\text{ m}$, 净高 $H=25\text{ m}$, 单台提梁机起吊的箱梁重量为 450 t。首先按传统设计方法, 即工况 10 进行分析, 荷载位置分别取主梁跨中和距柔性支腿 7.5 m 处。仿真分析得到的提梁机最大应力、竖向位移和横向位移结果分别如图 8、9 所示。

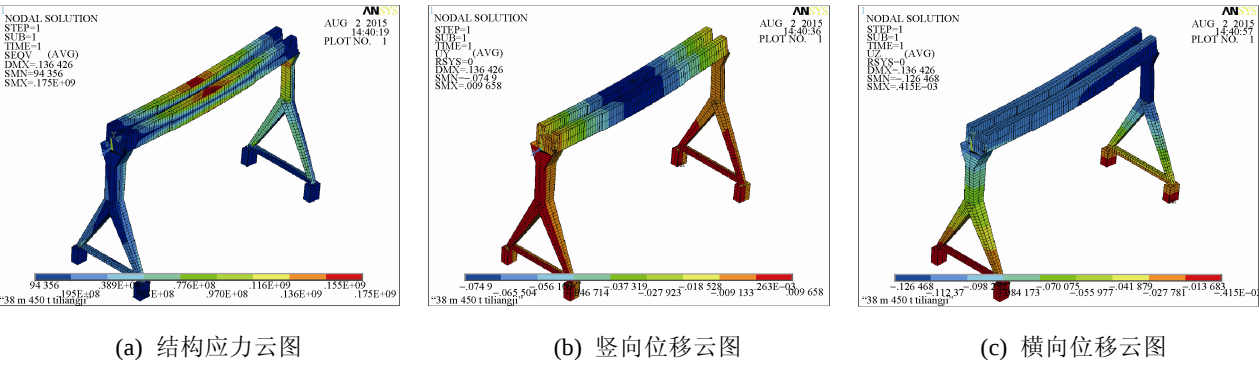


图 8 提梁机有限元仿真结果(荷载位置在主梁跨中)

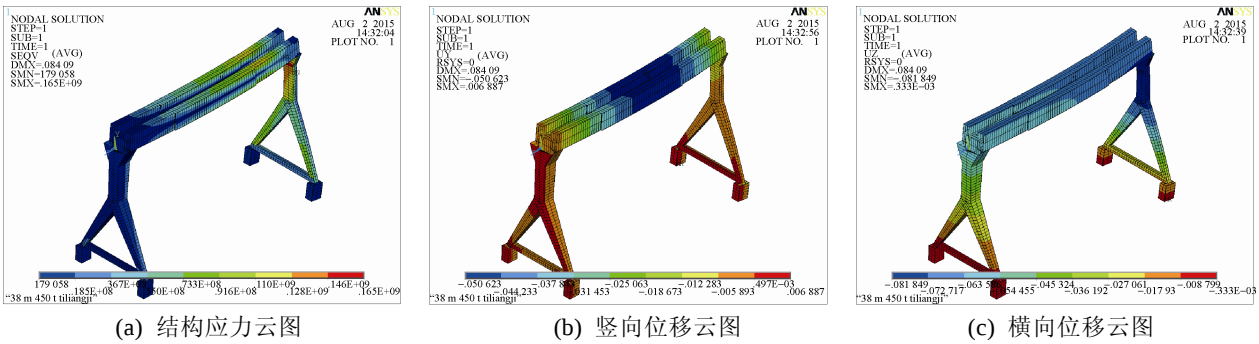


图 9 提梁机有限元仿真结果(荷载位置距柔腿 7.5 m)

分析图 8、9 可知:跨中加载时,提梁机结构最大应力为 175 MPa,最大应力区位于主梁跨中和支腿上横梁下部区域,最大竖向位移为 0.074 9 m,最大横向位移为 0.126 m;柔腿侧加载时,提梁机结构最大应力为 165 MPa,最大应力区位于支腿上横梁下部和支腿变截面节上部区域,最大竖向位移为 0.050 6 m,最大横向位移为 0.082 m。

为便于结果比较,以主梁最大应力、支腿最大应力、提梁机竖向位移和横向位移最大值的增减比 λ 来表示支点位置变化对结构受力的影响。

$$\lambda = R_{i,\max} / R_{\max}$$

其中, $R_{\max}$ 为工况 10 时提梁机结构仿真结果; $R_{i,\max}$ 为工况为 10、2、6、7 时提梁机结构仿真结果。

图 10 为荷载位置在主梁跨中和距柔性支腿 7.5 m 处时的增减比 λ 曲线。分析图 10 可知:①支点位置变化对主梁最大应力影响较小,跨中应力增减比例在 0.98~1.02 之间,但对支腿结构受力影响明显,当支点位置不同于设计值时,支腿应力明显变大,应力最大增加至 1.2 倍(工况 6)。②支点位置变化利于结构最大竖向位移的减小,但会明显加大结构横向位移,如工况 6 时,横向位移分别增大至 1.27 倍(跨中加载)和 1.34 倍(柔腿侧加载)。

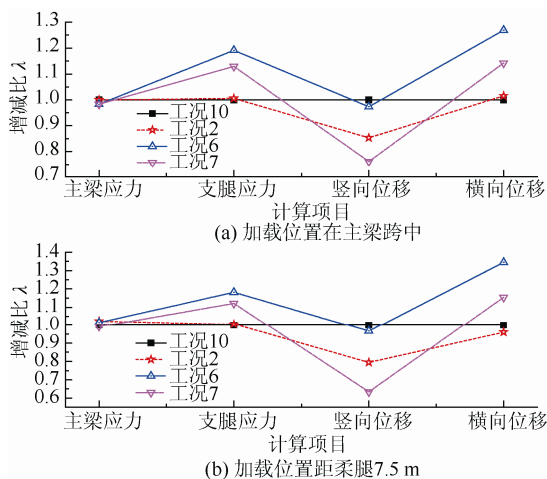


图 10 增减比 λ 曲线

某预制梁场部分走行轨道不符合规范要求,图 11 为此梁场提梁机纵走移梁过程中测试结果极值增减比 λ 曲线。由图 11 可知重载走行过程中存在支腿应力变大和横向位移增加的现象,此现象严重时易引发支腿整体失稳,而支腿整体失稳将导致提梁机发生重大安全事故,故对既有提梁机进行结构分析或安全评估时,不能忽略作业模式

对提梁机结构受力的影响。

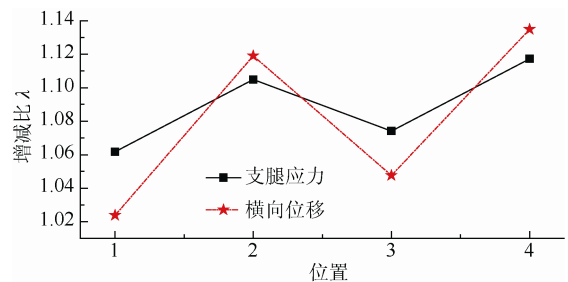


图 11 实测增减比 λ 曲线

5 结 论

从既有提梁机结构安全评估的角度出发,结合提梁机具体作业模式,分析了影响结构受力的影响因素。针对各种因素赋予系列数值,引入正交试验设计方法,构建了影响因素的工况组合,以 MG450 型提梁机为研究对象建立整体有限元模型,通过仿真分析得到了作业模式对提梁机结构受力的影响规律。基于作业模式的提梁机有限元仿真分析已多次应用于既有提梁机结构的安全状态评估,对桥梁提、运、架设备的安全评估分析具有借鉴指导意义。然而,不足之处在于,支点位置偏差的取值需结合现场实测情况酌情处理,具有一定的主观性,需要评估人员具有一定的工作经验。

参 考 文 献

- [1] 吴耀辉,陈浩,张志华,等.铁路客运专线提梁机施工技术[J].铁道标准设计,2008,52(3):30-33.
- [2] 任继新.MG500 型提梁机[J].工程机械,2008,39(4):24-26.
- [3] 李玉杰.450T 偏轨式提梁机结构分析与优化设计[D].西安,长安大学,2011.
- [4] 张建超,王军,刘涛,等.造桥机结构的有限元仿真分析[J].图学学报,2013,34(4):98-104.
- [5] 陈士通,孙志星,李向东,等.基于线刚度比的提梁机结构动力特性分析[J].铁道工程学报,2014,31(11):77-81,97.
- [6] 陈士通,杜修力,王晓放,等.MG450-38 型提梁机结构动态特性分析[J].铁道建筑,2015,(3):34-36.
- [7] 朱会文,黄启良,王宗彦,等.机械装备金属结构有限元建模策略研究与应用[J].图学学报,2013,34(5):143-147.
- [8] 唐启义,冯明光.实用统计分析及其 DPS 数据处理系统[M].北京:科学出版社,2002:94-99.