

基于 ADAMS 的超长超宽梁架桥机行走系统仿真

韩洪举¹, 王永洪², 郭吉平¹, 吴 飞³, 胡 嫒²

(1. 贵州交通建设集团有限公司, 贵阳 550001; 2. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715;
3. 重庆大学机械与运载工程学院, 重庆 400044)

摘要: 随着公路桥梁施工需求的不断提升, 超长超宽梁公路架桥机越来越多地应用在高速公路桥梁的架设施工过程中。针对一种宽度达 10.9 m 的超长超宽梁公路架桥机进行行走系统刚柔耦合仿真研究。通过对超长超宽梁公路架桥机的过跨过程进行步骤划分, 并运用 SolidWorks、ANSYS 和 ADAMS 软件联合建立超长超宽梁公路架桥机行走系统的刚柔耦合虚拟样机模型并对其过跨过程进行仿真分析, 得到架桥机行走系统主梁在过跨过程中的最大应力。通过分析主梁的应力情况得到主梁应力最大点发生在 1 号后支腿第二次前移过程中, 应力最大值为 162.4 MPa。该超长超宽梁公路架桥机行走系统刚柔耦合仿真可为后续改善施工工程、确定施工监测点、降低施工安全风险提供依据。

关键词: 架桥机; 行走系统; 刚柔耦合; 虚拟样机

中图分类号: TU61; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)05-0222-05

公路运输、铁道运输是国民经济大动脉、重要基础设施和主要民生工程项目, 是综合运输的骨干和主要交通运输方式之一, 在经济发展中的战略地位和深远影响重大。公路桥梁的架设是高速路网重要的组成部分之一^[1]。由于桥面跨径的增加和预应力钢筋的大量应用, 基于混凝土的预制安装技术的公路桥梁架设“桥梁预制安装法”的广泛应用大大改善了公路桥梁施工的结构质量, 增加了浇筑速率, 降低了钢筋混凝土的变形, 简单易行, 其中公路桥梁架桥机是实现高质量、高效率架设施工的关键, 对提高架桥效率和安全性具有重要研究价值^[2]。

桥梁架设是一项高风险作业^[3], 同时架桥机一般都为非标设备, 应用技术新、施工要点多、作业环境复杂^[4]。架桥机工作过程中, 对于架桥机结构的仿真分析已经广泛应用到对架桥机安全性和可靠性的验证中。盛宝安和张启贵^[5]应用 ALGOR 软件对 40 m 跨 1 000 t 筒支箱梁架桥机的机械性能进行了分析, 得到了不同工况下架桥机最大应力以及最大位移; 李远^[6]利用 Solidworks 软件和 ANSYS 软件联合对 450 t 架桥机进行有限元建模, 利用应力强度干涉理论与蒙特卡罗法对立柱进行可靠度分析, 为架桥机的进一步优化提供了理论依据; 赵

成龙^[7]运用 Midas/Civil 有限元软件对该架桥机进行了最不利荷载工况下的架桥机受力及稳定性仿真分析, 证明该架桥机设计满足施工要求; 付飞^[8]采用 ANSYS 有限元软件对运架一体式架桥机主梁在两个危险工况下进行静态分析, 证明该架桥机主梁满足施工使用要求; 韩林山等^[9]对架桥机架设过程中起重小车的控制过程进行仿真, 验证了起重过程的可靠性。以上文献大多是在已经确定危险工况的条件下, 对架桥机进行的静力学仿真, 并没有对主要承重结构进动力学仿真。对于本文所研究的超长超宽梁公路架桥机, 行走系统在过跨工况下的运动相对复杂, 难以直接确定其危险工况, 因此本文通过刚柔耦合的建模方式对其过跨过程进行分析, 能在没有确定危险工况的情况下寻找到危险点, 同时对架桥机的可靠性和设计合理性进行验证。

1 刚柔耦合虚拟样机构建

SolidWorks 软件是法国达索系统 (Dassault Systemes) 开发的基于 Windows 系统三维 CAD 软件。依赖于 SolidWorks 强大的三维建模能力, 可以快速便捷地建立超长超宽梁架桥机的三维模型, 从而在 ADAMS 中建立虚拟样机, 同时根据需要对模型的特征进行编辑和修改^[10]。ADAMS 软件是美

收稿日期: 2023-11-28

基金项目: 贵州省科技厅科技支撑计划项目(黔科合支撑[2021]一般 341)

作者简介: 韩洪举(1970—), 男, 仡佬族, 贵州遵义人, 高级工程师, 研究方向为公路施工技术; 王永洪(2000—), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 研究方向为力学与计算方法; 郭吉平(1980—), 男, 湖南益阳人, 工学硕士, 高级工程师, 研究方向为公路施工技术; 吴飞(1987—), 男, 湖南涟源人, 副教授, 博士研究生导师, 研究方向为高性能数值算法; 通信作者胡嫒(1988—), 女, 贵州遵义人, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为力学与计算方法。

国机械动力公司开发的虚拟样机分析软件,是可以构建复杂结构机械系统的虚拟样机并对运动过程进行仿真^[11]。虽然 ADAMS 软件的 ADAMS-FLEX 模块能将一些结构简单的构件柔性化,但是对于结构复杂的部分,使用其他有限元软件如 ANSYS 来完成效果会更好。ANSYS 软件是美国 ANSYS 公司研制的大型通用有限元分析 (FEA) 软件。ANSYS 具有强大的网格划分能力,并且与 ADAMS 软件有对应的数据传输接口,因此可以将生成的模态中性文件(modal neutral file, MNF) 准确导入 ADAMS 软件中^[12],从而生成柔性体,并设置驱动及运动副,以模拟真实的工作情况。因此,采用 SolidWorks 软件、ANSYS 软件和 ADAMS 软件相结合建立虚拟样机,如图 1 所示。

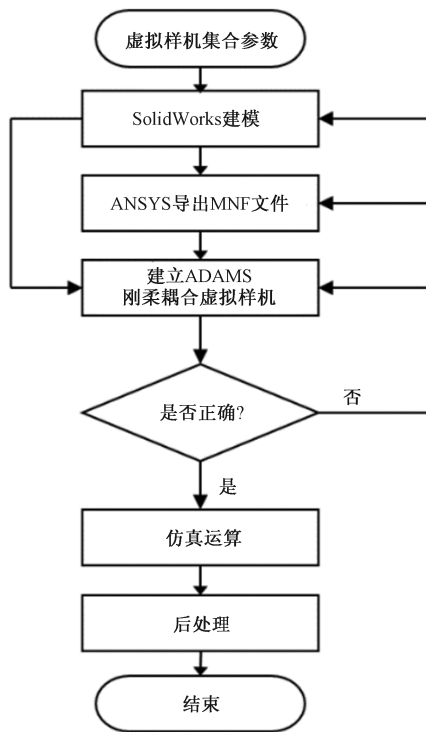


图 1 刚柔耦合虚拟样机构建流程

2 超长超宽梁公路架桥机行走系统分析

2.1 过跨行走过程工况分析

如图 2 所示,超长超宽梁公路架桥机行走系统的过跨过程是由组成架桥机行走系统的两条前支腿、两天后支腿、两架纵向桁车、主梁以及辅助支腿 8 个部件协力完成的。该架桥机采取阶段预制拼装桥梁的悬臂拼装施工,因此存在过跨过程^[13]。可以将新型超宽架桥机行走系统的过跨过程分为 8 个步骤进行分析。图 3 显示了超长超宽梁公路架桥机行走系统过跨步骤。

步骤 1:如图 3(a)所示,2 号后支腿向前支腿方向移动 16 m,至 2/5 跨处。其他各支腿和纵向桁车均锁定并保持位置不变。

步骤 2:如图 3(b)所示,在步骤 1 的基础上,1 号后支腿向 2 号后支腿方向移动 16 m,靠近 2 号后支腿,其他支腿和纵向桁车均锁定并保持位置不变。

步骤 3:如图 3(c)所示,在步骤 2 的基础上先将两台纵向桁车移至 1 号后支腿上方,再启动 2 号后支腿和 2 号前支腿翻滚轮,将主导梁前移到墩柱盖梁之上。

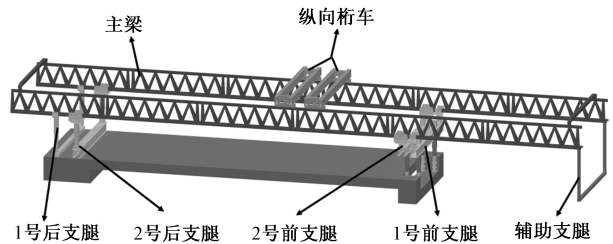


图 2 超长超宽梁公路架桥机行走系统组成

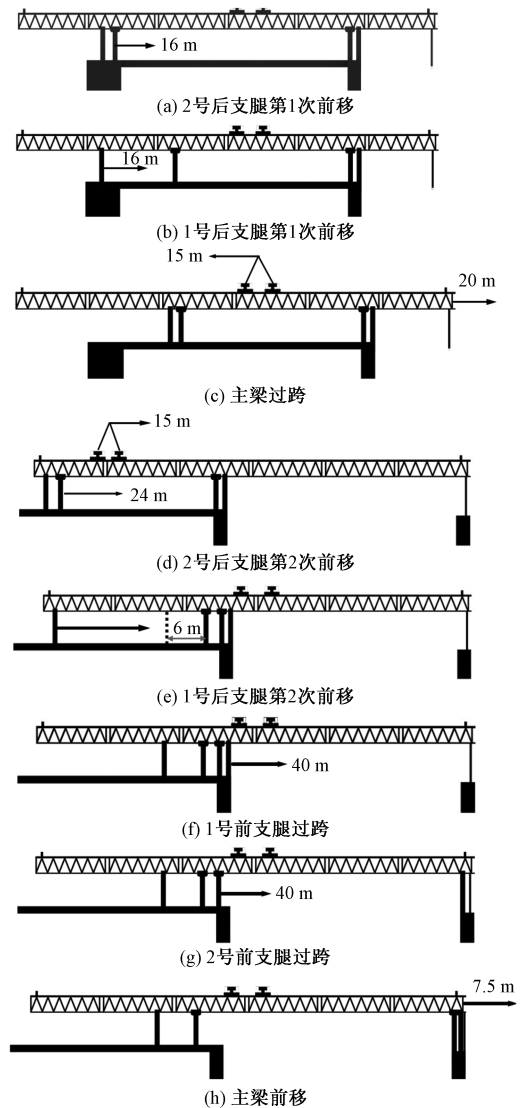


图 3 超长超宽梁公路架桥机行走系统过跨

步骤 4:如图 3(d)所示,在步骤 3 的基础上将两台纵向桁车移至主梁中段,并移动 2 号后支腿约 24 m 至贴近前支腿。

步骤 5:如图 3(e)所示,在步骤 4 的基础上移动 1 号后支腿至距 2 号后支腿 6 m 处,其他支腿和纵向桁车均锁定并保持位置不变。

步骤 6:如图 3(f)所示,在步骤 5 的基础上移动 1 号前支腿过跨(40 m)至靠近辅助支腿,其他支腿和纵向桁车均锁定并保持位置不变。

步骤 7:如图 3(g)所示,在步骤 6 的基础上移动 2 号前支腿过跨(40 m)至靠近 1 号前支腿,其他支腿和纵向桁车均锁定并保持位置不变。

步骤 8:如图 3(h)所示,在步骤 7 的基础上启动 2 号前支腿和 2 号后支腿后翻滚轮使得主导梁前移 7.5 m,各支腿保持与地面的相对位置不变。

2.2 架桥机行走系统力学模型

外力作用于柔性体时,会导致其产生变形。在不同的坐标系下,受力后的变形方程也会有所不同。为了简化变形方程的求解,需要选择合适的坐标系。在研究多柔体系统动力学时,可以将其看作是一个多刚体系统,并按照多刚体系统动力学研究方法对系统进行描述。物体上存在一个始终附着在物体上的坐标系。若描述该坐标系的矢量 p 和方位角 α ,则能得出该物体在全局坐标系中的位置、速度和加速度。接着需要考虑柔性体的变形计算。为此,需要在柔性体上建立一个浮动坐标系,使得其能绕原坐标系移动和转动。该浮动坐标系可用于刚性运动和变形运动的分开描述。在建立方程时,需要尽可能减少二者之间的关联,从而使其更易于求解。在选择时,需要根据实际情况选择合适的浮动坐标系类型。

选取浮动坐标系时要考虑到将物体的刚性运动和变形运动分开,在建立方程时尽可能地减少二者之间的关联,以便于求解。常用的浮动坐标系有主轴框架、局部附着框架和刚体模态框架,具体选择时还要针对不同的问题具体分析。

对于柔性体上的某点 k ,相对惯性系的位置矢量可以表示为

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{A}\mathbf{u}' + \mathbf{r}' \quad (1)$$

式中: \mathbf{A} 为坐标转换矩阵; \mathbf{u}' 为 k 点的相对浮动坐标系的位置矢量; \mathbf{r}' 为浮动坐标系原点的位置矢量。

对于柔性体, k 点可以表示为

$$\mathbf{u}' = \mathbf{u}'_0 + \mathbf{u}'_i \quad (2)$$

式中: \mathbf{u}'_0 为 k 没有发生变形时的相对位置矢量; \mathbf{u}'_i 为 k 点的相对变形矢量。

对式(1)求导得柔性体上一点 k 的速度和加速度矢量表达式为

$$\dot{\mathbf{r}}'^k = \dot{\mathbf{r}}' + \dot{\mathbf{A}}(\boldsymbol{\mu}'_0 + \boldsymbol{\mu}'_i) + \mathbf{A}\boldsymbol{\Phi}_p\dot{\mathbf{q}}_i \quad (3)$$

$$\ddot{\mathbf{r}}'^k = \ddot{\mathbf{r}}'_0 + \ddot{\mathbf{A}}(\boldsymbol{\mu}'_0 + \boldsymbol{\mu}'_i) + 2\dot{\mathbf{A}}\boldsymbol{\Phi}_p\dot{\mathbf{q}}_i + \dot{\mathbf{A}}\boldsymbol{\Phi}_p\ddot{\mathbf{q}}_i \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\Phi}_p$ 为点 k 的假设变形模态矩阵; \mathbf{q}_i 为变形广义坐标。

定义柔性体上的任意点 k 的坐标可以用惯性参考系中的坐标 $x = (x, y, z)$ 和方位角 $\psi = (\psi, \theta, \phi)$ 来表示,同时模态坐标 $\mathbf{q}' = \{q'_1, q'_2, \dots, q'_n\}^T$ 表示,那么柔性体的广义坐标 $\boldsymbol{\xi}$ 可以表示为 $\boldsymbol{\xi} = \{x, \psi, \mathbf{q}'\} = \{x, y, z, \psi, \theta, \phi, q'_1, q'_2, \dots, q'_n\}^T$

柔性体的动力学方程可以从拉格朗日方程导出,即

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \dot{\boldsymbol{\xi}}} \right) - \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \boldsymbol{\xi}} + \frac{\partial \boldsymbol{\Gamma}}{\partial \boldsymbol{\xi}} + \left[\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \boldsymbol{\xi}} \right]^T \boldsymbol{\lambda} - \mathbf{Q}' = 0 \\ \varphi = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: φ 为约束方程; $\boldsymbol{\lambda}$ 为对应于约束方程的拉普拉斯算子; \mathbf{Q}' 为投影在 $\boldsymbol{\xi}$ 上的力; \mathbf{L} 为拉格朗日项, $\mathbf{L} = \mathbf{T} - \mathbf{W}$, \mathbf{T} , \mathbf{W} 分别为系统的动能和势能; $\boldsymbol{\Gamma}$ 为能量消耗函数^[14]。

3 虚拟样机模型的建立与动力学仿真

3.1 基于 SolidWorks 模型搭建

首先根据超长超宽梁公路架桥机行走系统的相关设计图纸和资料,完成各个部件组成零件的建模,采用自上而下和自下而上两种建模思路相结合的方式,分别装配出 8 个部件,再将 8 个部件进行装配建立精准的装配约束。对于尺寸难以精确定位的零件,可根据零件间的装配关系来生成新零件。

3.2 基于 ANSYS 建立行走系统主梁柔性体

在行走系统的各个部件中,主梁为承受整机受力以及连接各部件的重要部件。如果只是将主梁作为刚体进行仿真分析不足以体现主梁的真正变形以及受力情况,因此将主梁在 ANSYS 软件中通过有限元建立为柔性体部件。建立柔性体模型材料信息,见表 1。

3.3 基于 ADAMS 行走系统过跨过程虚拟样机模型建立

在 ADAMS 软件中,建立超长超宽梁公路架桥机行走系统的虚拟样机模型,具体过程可分为以下 3 步。

表 1 行走系统主梁柔性体模型材料信息

单元类型	弹性模量/MPa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3}$)
SOLID45	2.06×10^5	0.3	7.85×10^{-6}

(1)修改部件材料属性。从 SolidWorks 中导出的模型数据中,根据架桥机质量等效换算后的各部件质量来设置部件的材料属性,并将主梁替换为柔性体模型。

(2)添加约束。在超长超宽梁公路架桥机行走系统中,两架纵向桁车,1号、2号前支腿,1号、2号后支腿的运动都与沿主梁方向相同。为了实现这些部件与主梁间的相对运动,并模拟真实情况,这些部件与主梁之间都以两个平移副相连接。同时,支腿与大地之间通过平面副连接。

(3)施加驱动和载荷。驱动是一种特殊的约束,它通过运动副限定了该运动副连接的两个部件间的相对运动情况。超长超宽梁公路架桥机行走系统在过跨过程中,为了确定最危险的步骤,仿真中将架桥机设置为满载状态行走,通过把超长超宽钢主梁的质量换算到纵向桁车上施加加载荷,载荷具体数值通过国家标准^[15]计算得到。同时设置全局重力(9.8N/kg)。超长超宽梁公路架桥机行走系统虚拟样机模型如图4所示。

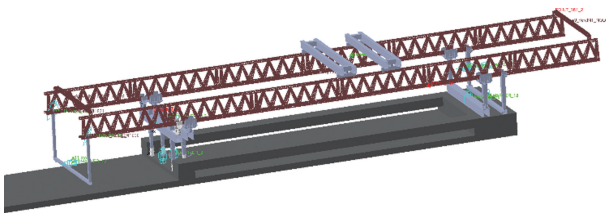


图4 超长超宽梁公路架桥机行走系统虚拟样机模型

3.4 过跨过程仿真结果分析

通过 ADAMS 软件运算得到超长超宽梁公路架桥机行走系统在过跨过程中主梁的应力情况,同时按照第四强度理论生成应力云图并进行排序,从而得到全过程中主梁最大应力。通过 ADAMS/Durability 模块可导出主梁全过程中前10个“热点”^[16]，“热点”的应力应变见表2。应力应变最大情况出现在26.91s时,属于步骤5的过程中,位于主梁第5节处,应力最大值为:162.4MPa。应力最大时架桥机姿态及主梁应力云图如图5所示;“热点”位置的应力云图如图6所示,图6中标记了前3个“热点”位置(a:节点14337,b:节点12837,c:节点12881)。应力最大的前3个“热点”在过跨工况全过程应力曲线如图7所示。

步骤5过程中1号后支腿正在向前移动,同时,1号、2号前支腿,2号后支腿都集中在主梁中部,纵向桁车位于主梁第4、5节处,此时架桥机载荷主要由4条支腿承担,但由于1号、2号前支腿,2号后支

腿过于集中,载荷不能得到有效分担,因此集中在了1号后支腿和1号、2号前支腿,2号后支腿集中处之间,随着1号后支腿的移动而逐渐达到最大值。且从图7中可以看出,在过跨过程后半段,应力最大所在位置一直处于较高应力的状态。

表2 行走系统主梁“热点”的等效应力和应变

热点	应力/MPa	应变/ 10^{-4}	节点编号	时间/s
1	162.468	6.515 0	14337	26.91
2	162.395	6.512 0	13837	26.91
3	162.338	6.509 7	12881	26.91
4	162.259	6.506 6	12865	26.91
5	162.231	6.505 5	14490	26.91
6	162.210	6.504 6	13114	26.91
7	162.108	6.500 5	13833	26.91
8	162.094	6.500 0	14324	26.91
9	162.082	6.499 5	12873	26.91
10	162.041	6.497 8	13837	26.91

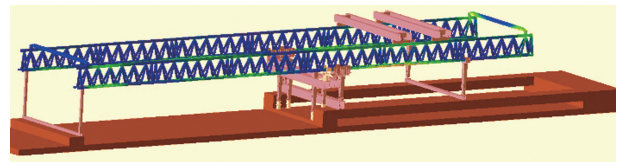


图5 应力最大时刻架桥机姿态及主梁应力云图

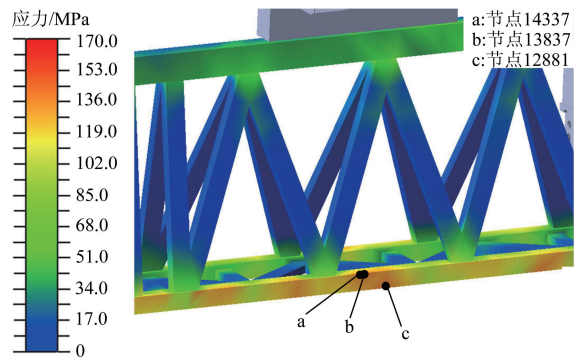


图6 应力最大时刻的“热点”位置应力云图

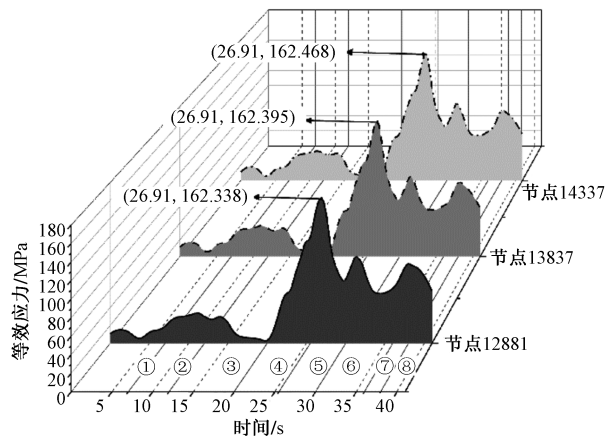


图7 主梁上的前3“热点”的等效应力随时间变化曲线

4 结论

(1) 超长超宽梁架桥机通过创新的多支腿可开合结构解决了超长超宽梁问题,因此该架桥机行走系统工况流程复杂、仿真难度大。为此类公路架桥机的行走系统的工作流程进行仿真,并通过虚拟样机建模验证了全流程下的合理性,并为后续相似结构的架桥机的刚柔耦合仿真分析提供了一定的参考。

(2) 得到了超长超宽梁公路架桥机行走系统过跨过程中主梁的应力情况,在超长超宽梁公路架桥机行走系统过跨过程中的应力最大值为 162.4MPa,出现在步骤 5 过程中,位于主梁第 5 节处。

(3) 主梁材料为 Q235B 钢材,根据标准^[17],其在本文的应用条件下许用应力取 176 MPa,可见在架桥机满载过跨的过程中,主梁应力没有超过许用应力,符合要求。

(4) 考虑到起重机在使用过程中可能出现的突发情况,还应对主梁危险点附近进行加固和监测,防止主梁过度变形影响架桥机稳定性。该超长超宽梁公路架桥机行走系统刚柔耦合仿真为后续改善施工规程、确定施工监测点、降低施工安全风险提供了依据。

参考文献

- [1] 马建,孙守增,芮海田,等. 中国筑路机械学术研究综述·2018[J]. 中国公路学报, 2018, 31(6): 1-164.
- [2] 彭旺旺. 关于桥梁施工技术和质量控制的研究分析与探究实践[J]. 科技风, 2022(2): 57-59.
- [3] 李盛宝, 巩浩洁, 李宗鹏, 等. 架桥机侧翻事故仿真模拟

- 与分析[J]. 建筑安全, 2020, 35(6): 43-46.
- [4] 马英, 李佳璐, 陈红强, 等. 架桥机施工技术在 35 m 长箱梁桥梁工程施工中的应用[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(21): 105-107.
- [5] 盛宝安, 张启贵. 40 m 跨 1000t 简支箱梁架桥机的机械性能分析[J]. 建筑机械, 2019(11): 47-50.
- [6] 李远. 450 t 架桥机有限元分析及可靠度计算[J]. 起重运输机械, 2021(22): 30-34.
- [7] 赵成龙. TJ1600 架桥机设计及可靠度分析[J]. 资源信息与工程, 2022, 37(2): 121-124.
- [8] 付飞. 运架一体式架桥机主梁静态分析[J]. 现代机械, 2022(2): 61-65.
- [9] 韩林山, 刘耀, 迟明, 等. 预制装配式架桥机的起重小车复合滑模同步控制[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(32): 13781-13786.
- [10] 柳李琦, 李艳杰, 卜春光. 五自由度机械臂的建模与仿真[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(29): 12841-12847.
- [11] 潘焕, 赵光明, 万佳先. 基于 ADAMS 的工程机械支腿受力分析[J]. 工程机械, 2020, 51(3): 58-61.
- [12] 李明昊, 牛昊, 范佳艺, 等. 刚柔耦合仿生机器鱼传动轴动态疲劳可靠性分析[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(4): 358-362.
- [13] 李建伟, 卓煜程, 周海东, 等. 节段预制拼装桥梁“梁上运梁”仿真分析研究[J]. 交通科技, 2023(2): 62-66.
- [14] 刁家宇, 李卫民, 袁学庆, 等. 捕捉缓冲机构刚柔耦合多体动力学仿真研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(19): 189-195.
- [15] 架桥机通用技术条件: GB/T 26470—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [16] 裴宝浩, 于蓬, 周娟, 等. 推土机刚柔耦合仿真分析研究[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(1): 12-15.
- [17] 起重机设计规范: GB/T 3811—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

ADAMS-based Simulation on Traveling System of the Bridge Erector for Extra-long and Extra-wide Girder

HAN Hongju¹, WANG Yongqi², GUO Jiping¹, WU Fei³, HU Man²

(1. Guizhou Communications Construction Group Co., Ltd., Guiyang 550001, China; 2. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. School of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: With the increasing demand for highway bridge construction, the bridge erectors for extra-long and extra-wide girder highway bridge has been increasingly used in the process of highway bridge erection and construction. A rigid-flexible coupling simulation study of the travel system is conducted for a bridge erector for extra-long and extra-wide girder bridge with a width of 10.9 meters. By dividing the spanning process of the bridge erector for extra-long and extra-wide girder bridge into steps, and SolidWorks, ANSYS, and ADAMS software are used to jointly establish a virtual prototype model of the travel system of the bridge erector for extra-long and extra-wide girder bridge and simulate the spanning process, the maximum stress of the main beam of the bridge erector travel system in the spanning process is obtained. The maximum stress point of the main girder is 162.4 MPa during the second forward movement of the rear leg No. 1, which provides a basis for improving the construction procedures, determining the construction monitoring points, and reducing the construction safety risks.

Keywords: bridge erector; walking system; rigid-flexible coupling; virtual prototype