

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.04.003

高速铁路救援起重机多支撑机构力学解算研究*

刘 永¹, 李 扬², 张雷雷^{2*}, 赵延治², 刘康荣³, 王渊明⁴, 于跃斌⁵

(1. 中车齐齐哈尔车辆有限公司 大连研发中心, 辽宁 大连 116052; 2. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 3. 武汉铁路局 机务处, 湖北 武汉 430071; 4. 秦皇岛烟草机械有限公司, 河北 秦皇岛 066004; 5. 中车齐齐哈尔车辆有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161002)

摘要:为降低普通铁路救援起重机单支腿的承载力,改善支腿系统的均载特性以便满足高架桥环境下的高铁救援作业要求,提出了一种铁路救援起重机多支撑系统,即在原有起重机4支腿支撑的基础上引入4条辅助支腿,并且使轮轨同时承担载荷。首先基于结构力学空间高次超静定求解原理,对多支撑系统进行了力学解算得到其解析模型;然后用 Matlab 软件对解析模型编程计算了两种起重载荷工况下起重臂回转一周各支腿的受力情况;最后在同样的工况下使用 ANSYS 和 ADAMS 软件对该多支撑系统进行了刚柔耦合仿真模拟起重臂回转一周,仿真结果与计算结果趋势基本一致,从而验证了解析模型的正确性。研究表明:解析模型能够为后续高速铁路救援起重机下车部分支撑机构的设计和优化提供可靠的依据。

关键词:铁路起重机;多支撑结构;支腿反力;高次超静定结构

中图分类号:TH213;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)04-0347-05

Mechanical solution of the multi-braced structure of wreck crane for high speed railway

LIU Yong¹, LI Yang², ZHANG Lei-lei², ZHAO Yan-zhi², LIU Kang-rong³,
WANG Yuan-ming⁴, YU Yue-bin⁵

(1. Dalian r&d center of CRRC Qiqihar Vehicle Limited Corporation, Dalian 116052, China; 2. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 3. Wuhan Railways Bureau Engine Office, Wuhan 430071, China; 4. Qinhuangdao Tobacco Machinery Co., Ltd., Qinhuangdao 066004, China; 5. CRRC Qiqihaer Vehicle Limited Corporation, Qiqihaer 161002, China)

Abstract: In order to lighten the load of single leg and improve the load sharing performance of the ordinary railway wreck crane without the capacity of rescue on the high speed railway, multi-braced structure of wreck crane -having 4 more legs than usual crane and bearing the load by the wheel and rail- for high speed railway was proposed. Firstly, the analytical model of the reaction forces of outriggers was established based on the principle of solving indeterminate structure with high degrees. Then, the analytical model was calculated by the software of Matlab under the two working conditions of the crane boom turning 360 degrees with two different load. At last, the rigid-flexible coupling simulation for multi-braced structure was computed by the cooperation of software ANSYS and ADAMS under the same working conditions. The simulation result and the calculation result are basically coincident. The research result show that the analytical model can direct the optimization design of multi-braced structure.

Key words: railway crane; multi-braced structure; the reaction forces of outriggers; indeterminate structure with high degrees

0 引 言

高速铁路为人们提供方便快捷的同时,也为铁路

救援提出了新的课题。高铁线路桥线比大^[1],救援的关键问题是解决桥梁、线路承载能力的限制。现有国内外铁路起重机下车结构主要采用4支腿的结构形

收稿日期:2017-09-20

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2016M590212);中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2013J009-A)

作者简介:刘 永(1973-),男,黑龙江拜泉人,硕士研究生,高级工程师,主要从事起重运输机械方面的研究。E-mail: cocool_6@163.com

通信联系人:张雷雷,男,博士研究生。E-mail: zhangll2003@126.com

式,由于高铁桥梁承载能力的限制,不仅单个支腿所能承受的最大载荷较地面作业大为降低,此外也对作业起重机多个支腿间载荷均布的程度提出了较高的要求。倘若依然沿用原有结构形式的普通铁路救援起重机,会带来巨大的安全隐患。德国的 GOTTWALD 公司发明的旋转式伸缩平衡重技术是铁路救援起重机的一重大进步,该公司的产品在瑞士、日本、韩国等市场上占有率高^[2]。

为此,一种多支撑系统被提了出来。该系统在原有起重机 4 支腿支撑的基础上引入 4 条辅助支腿,并且使轮轨同时承担载荷,达到降低单个支腿工作载荷目的,满足高铁救援起重工作的严苛条件。

关于 4 支腿支撑结构形式的支腿反力计算已有大量研究人员对此做出研究。李以申^[3]分析了传统 4 支腿模型支腿反力两种不同计算方法的谬误。荣国瑞^[4]应用力学方法在考虑支腿刚度的条件下求解得到了支腿反力,并以反向补偿的方式解决了支腿起翘后的反力计算问题。房晓文^[5]在同时考虑车架大梁扭转及支腿弯曲变形的基础上,推导出了起重机支腿反力的计算公式。但是随着起重机工作环境的变化,例如高架桥、冻原等特殊的作业环境下,使用 4 支腿起重机可能会引起支腿载荷超限、载荷分布不均等问题的出现,这时候就需要增加支撑的数量。王健^[6]提出了一种五支腿起重机支腿反力计算方法。刘振国^[7]使用力学中的相关计算方法得到了一种八支腿起重机支腿反力的计算方法。

针对一种高速铁路救援起重机多支撑机构,本文使用结构力学中的超静定结构力学原理^[8]来进行解析计算,并对实际算例进行刚柔耦合仿真加以验证。

1 高铁救援起重机多支撑结构及其力学模型

整个起重机承载结构由车架大梁、4 个内侧伸缩支腿,4 个外侧摆动支腿以及轮轨支撑组成,整个下车结构为对称布置如图 1 所示。

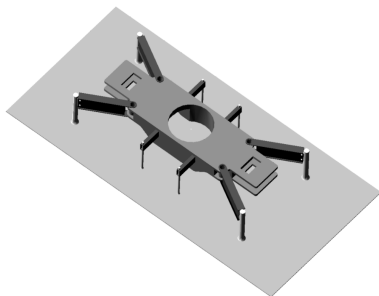


图 1 高铁救援起重机下车结构模型

由于轮轨和车体是通过转向架连接,本研究在把车体简化成受力模型时将轮轨受力集中到前后两个转向架上,即在原 8 支腿支撑结构中增加两个支点,支点在中央主支撑梁上,类似于其他承载支腿,两个支点对负载和力矩进行承载。

受力分别为 F_9 、 F_{10} 如图 2 所示。

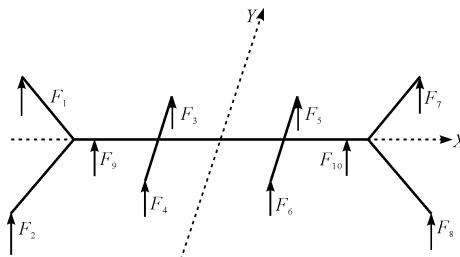


图 2 高铁起重力学模型

该结构为空间七次超静定结构。

2 高次超静定结构的力学计算方法

力法是最为基本的求解超静定问题的方法,力法的基本思想是将超静定结构通过去除多余约束来拆解成静定结构。

一次超静定结构如图 3 所示。

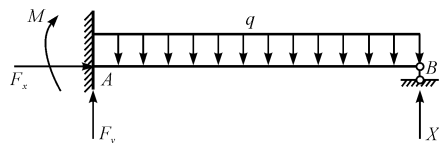


图 3 一次超静定结构

静定结构如图 4 所示。

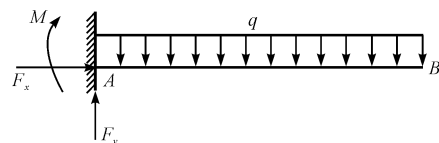


图 4 静定结构

本研究通过在静定结构条件下建立的变形协调方程来过渡到超静定结构。

由受力图可知:静定结构中简支梁受 3 个未知力(或力矩) F_x 、 F_y 、 M ,可用平面任意力系的 3 个平衡方程全部求出;一次超静定结构中简支梁在 B 点受到额外的一个支座反力 X_1 ,此时梁总共受到 4 个约束力无法由 3 个平衡方程求出全部未知力(或力矩)。

在超静定结构中遇到的新问题就是求解超出平衡方程个数的未知力(或力矩)。一般可以通过构造变形协调方程来增补方程个数,从而使方程个数与未知力(或力矩)个数相同。

式中： a_i —代表第 i 条支腿在坐标系中 X 轴方向坐标值； b_i —代表第 i 条支腿在坐标系中 Y 轴方向坐标值；

取两种不同的工况，编写 Matlab 程序计算结果如下。

(1)起重载荷为 160 t，车体质量为 110 t，起重力矩为 $5 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，使起重臂回转一周，所得曲线如图 5 所示。

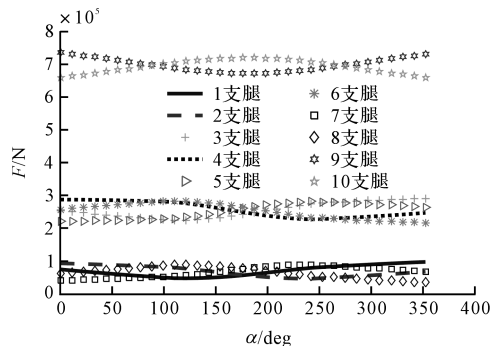


图 5 计算所得 160 t 负载下各支点负载情况

从分析结果可以看到，在给定工况下，受力最大的支腿为前后两个转向架，承载了大部分载荷，负载最大时为 $7.5 \times 10^5 \text{ N}$ ；随着起重机上车起重臂的转动，各支腿受力情况发生变化，与转动方向同一 Y 轴半区的 4 条支腿受力增加，而另 4 条支腿受力减少，反之亦然。在工作过程中，内侧伸缩支腿受力最大值约为 $3 \times 10^5 \text{ N}$ ，外侧伸缩支腿受力最大值约为 10^5 N 。

(2)起重载荷为 200 t，车体质量为 110 t，起重力矩为 $7 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，使起重臂回转一周，所得曲线如图 6 所示。

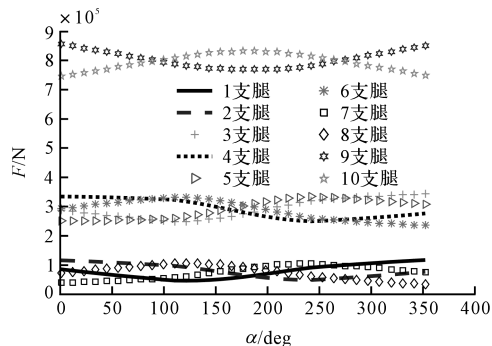


图 6 计算所得 200 t 负载下各支点负载情况

从分析结果可以看到，在给定 200 t 工况下，受力最大支腿依然为前后两个转向架，承载了绝大多数的负载，负载最大时为 $9 \times 10^5 \text{ N}$ ；随着起重机上车起重臂的转动，各支腿受力情况发生变化，与转动方向同一 Y 轴半区的 4 条支腿受力增加，而另 4 条支腿受力减少，反之亦然。在工作过程中，内侧伸缩支腿受力最大值约为

$3.5 \times 10^5 \text{ N}$ ，外侧展开支腿受力最大值约为 $1.2 \times 10^5 \text{ N}$ 。

4 刚柔耦合仿真结果对比

由于引入了转向架作为支撑点，建立了新的三维模型，并对模型重新划分网格^[9]如图 7 所示。

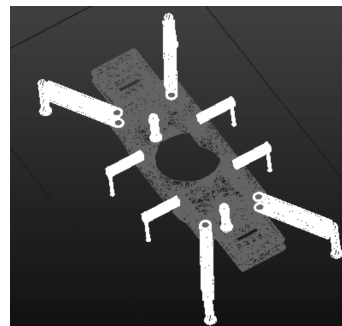


图 7 动力学仿真软件中的柔性体模型

(1)在仿真软件中设定工作条件为：起重量 160 t，起重力矩 $5 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。仿真曲线如图 8 所示。

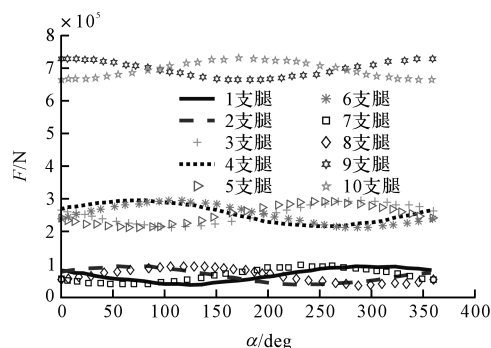


图 8 160 t 时起重臂转动一周支腿受力曲线

从仿真结果看出，受力最大的支腿为前后两个转向架，承载了绝大多数的负载，负载最大时为大约 $8 \times 10^5 \text{ N}$ 。内侧伸缩支腿最大负载为 $2.7 \times 10^5 \text{ N}$ 。

(2)在仿真软件中设定工作条件为：起重量 200 t，起重力矩 $7 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。仿真曲线如图 9 所示。

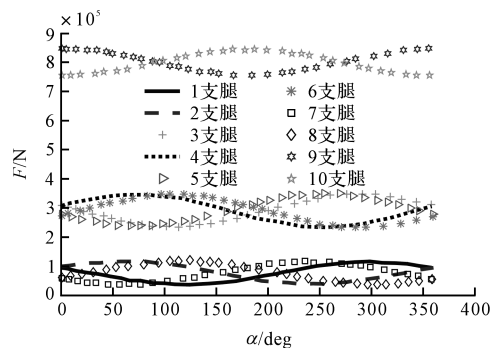


图 9 200 t 时起重臂转动一周支腿受力曲线

从仿真结果看出,受力最大支腿依然为前后两个转向架,承载了绝大多数的负载,负载最大时为大约 9.5×10^5 N。内侧伸缩支腿承载支腿最大负载为 3×10^5 N。

由于建立的是刚柔耦合仿真模型,仿真过程中设定的负载较大时,多支撑结构会出现一定的振动现象,但对支反力的影响不大。软件仿真的整个工作过程中,受力最大的支点为前后两个转向架,负载最大时为大约 7.5×10^5 N。展开支腿的受力的最大值约为 3×10^5 N。

与 Matlab 程序计算的解析解相比,数值和趋势基本一致,验证了解析模型的正确性。

5 结束语

本文利用空间高次超静定原理求解了一种高速铁路救援起重机多支撑机构支撑反力,并对机构进行了刚柔耦合仿真,仿真结果与解析解结果趋势基本一致,验证了解析模型的正确性,该方法可以推广到类似多支撑机构的支撑反力计算中。

在引入轮轨受力之后,相对于八支腿支撑受力,各支腿的受力大为减小,从而降低了高架桥面受到的破坏风险,提升了安全性;同时从计算结果的对比中可以看出,在较大工作载荷下,支腿的起翘现象得到了改善,进一步提升了起重机工作的稳定性与安全性。

在建立支腿系统刚柔耦合模型时,忽略了一些因素的影响,有必要通过实验进行数据的采集,进行更精确的建模。

此外,为了精确分析多支撑结构的动态性能,需要对其进行动力学建模,从而为高速铁路救援起重机下车部分支撑机构的设计提供可靠的依据。

参考文献(References):

- [1] 孟 钢. 沪杭高铁横潦泾大桥快速施工管理实践研究[D]. 成都:西南交通大学土木工程学院,2015.
- [2] EBRAHIMI M, GHAYOUR M, MADANI S M, et al. Swing angle estimation for anti-sway overhead crane control using load cell[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2011, 9(2):300-309.
- [3] 李以申. 试评轮胎式起重机支腿反力的几种计算方法[J]. *建筑机械*, 1989(2):48-52.
- [4] 荣国瑞. 汽车起重机支腿压力的新算法[J]. *重庆建筑大学学报*, 1997, 19(3):49-54.
- [5] 房晓文. 汽车起重机支腿反力简化计算方法与实验验证[J]. *起重运输机械*, 2012(6):89-92.
- [6] 王 健,周 静,崔晓琳,等. 五支腿起重机支腿力计算方法研究[J]. *农业装备与车辆工程*, 2009(11):19-21.
- [7] 刘振国,滕儒民,吴海帆,等. 一种八支腿起重机支腿反力研究[J]. *机械设计与制造*, 2015(5):12-14.
- [8] 龙驭球,包世华,匡文起,等. *结构力学教程(I)*[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [9] 徐国宝,马金凤,王延军,等. 基于 ADAMS 的跌落式装箱机动力学仿真研究[J]. *包装与食品机械*, 2016(1):44-47.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

刘 永,李 扬,张雷雷,等. 高速铁路救援起重机多支撑机构力学解算研究[J]. *机电工程*, 2018, 35(4):347-351.

LIU Yong, LI Yang, ZHANG Lei-lei, et al. Mechanical solution of the multi-braced structure of wreck crane for high speed railway[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(4):347-351.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>