



# 基于虚拟样机技术的门式起重机动力学仿真分析

胡晓光<sup>1</sup>, 隋允康<sup>1</sup>, 丁克勤<sup>2</sup>, 宇慧平<sup>1</sup>

1. 北京工业大学工程数值模拟中心, 北京 100124
2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100013

**摘要** 造船起重机械多根据相关资料和经验公式采用常规的静态设计, 周期长, 成本高, 性能差。基于虚拟样机技术, 本文利用 Pro/Engineer 与 ADAMS 联合建模方法, 建立了 300t 造船门式起重机的三维实体模型, 并将起重机模型导入 ADAMS 软件, 对部件施加相应的约束和载荷, 最终建立起虚拟样机。对虚拟样机进行多刚体系统动力学仿真分析, 实现了门式起重机在各种工况下运行状态随时间变化的过程, 验证了设计的正确性, 预览了产品性能, 重现并分析了典型事故。仿真分析数据可用于估计和准确推断实际运行的各种数据, 为门式起重机结构强度的动态分析和动态设计提供了依据, 为设计经济、可靠、稳定的高性能门式起重机提供了有力的工具和实现方法。

**关键词** 门式起重机; 建模; ADAMS 软件; 虚拟样机; 仿真

**中图分类号** TH210

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)02-0039-07

## Dynamic Simulation of Gantry Crane Based on Virtual Prototype Technology

HU Xiaoguang<sup>1</sup>, SUI Yunkang<sup>1</sup>, DING Keqin<sup>2</sup>, YU Huiping<sup>1</sup>

1. Numerical Simulation Center for Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China
2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100013, China

**Abstract** The design of shipbuilding gantry crane is mostly based on static methods, using statistics of similar products and empirical formula, which often means a long cycle, high-cost and low-quality. In this paper, based on the technique of virtual prototype, a virtual prototype model of 300t shipbuilding gantry crane is established by integrating Pro/Engineer with ADAMS, that is, using the three-dimensional solid modeling software Pro/Engineer to establish three-dimensional model of the system, then importing the model to ADAMS and adding corresponding constraints and loads on the components. With the virtual prototype, dynamic simulation of the multi-body system is carried out, including the running states of the mechanism under various working conditions. The simulation validates the design, shows the performance of production, reproduces typical accidents in true conditions and analyzes the causes of these accidents. Simulation results can be used to estimate parameters related with the gantry crane in actual running conditions, provide a reference for the dynamic analysis of gantry crane's structural strength and dynamic design for economic, credible, stable and high-performance shipbuilding gantry crane.

**Keywords** gantry crane; modeling; ADAMS software; virtual prototype technology; emulation

收稿日期: 2009-10-16

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAK02B04-02-01); 国家自然科学基金项目(10872012); 北京市自然科学基金项目(30933019); 工业装备结构分析国家重点实验室基金项目(GZ0819); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060005010)

作者简介: 胡晓光, 硕士研究生, 研究方向为计算力学和多学科优化, 电子信箱: huxiaoguang\_1985@163.com; 隋允康(通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: S030000050S), 教授, 研究方向为结构和多学科优化, 电子信箱: ysui@bjut.edu.cn



## 0 引言

门式起重机具有起重量大、操作简单、起重灵活、可实现双向移动等特点,被广泛应用于造船厂、露天料场、仓库码头、车站、建筑工地等场所。造船业务迅速发展,决定造船起重机械发展趋势:大型化、高速化、自动化、智能化,对设计和性能要求也越来越高;质量轻、刚度好、工作空间大、工作速度快、作业效率高。由于门式起重机用途广泛,受各种使用和安装条件的影响,规格繁多,结构复杂多样,各构件间关系复杂,产品具有较强的针对性,设计工作量重,采用传统的手工设计方法已无法满足需求。随着计算机技术的不断发展应用以及 CAD 技术在工程各个领域的不断渗透,起重机械的设计必然要与计算机相结合,应用先进的计算方法和设计软件,提高设计精度,缩短设计周期,降低设计成本,提高起重机设计质量。

国内外学者对起重机械的相关研究主要集中在对起重机械结构局部或整体工作过程动作和受载情况的动态仿真。长期以来,起重机设计都是将动态问题简化为静态问题处理,一些国家和国际起重机协会的起重机设计规范均采用一个动载系数来考虑这种动力影响。虽然这样可使问题简单化,但其最大缺陷是不能较为准确地反映起重机的实际工况和动态性能,导致分析和设计计算的不合理及不准确性。

国外学者对起重机起升过程的两个阶段(货载离地前、后)进行动力学分析,初步揭示了起重机结构动力响应问题的实质。Bpayue<sup>[1]</sup>系统地论述了起重机统计动力学的研究方法,以控制论为依据解决动力学问题,并提出概率设计方法。Delft 工业大学<sup>[2]</sup>通过分析桥式起重机建立了运动方程,并用有限元离散法建立的多自由度模型计算了桥架结构的动力变形和起重机运行特性。Tanizumi Kazuya<sup>[2]</sup>运用状态轨迹和 Newton-Raphson 方法确定的速度模式来研究起重机载荷的振荡。日本长冈技术科学大学对装卸机械的特点提出了机能设计的概念,机械的机能、构造、方式等是设计技术的基础。在进行机械系统设计时,由于机械系统是由许多装置组成,所以只能在确定各装置所必须的机能后,才能圆满地设计这些机械装置。对装卸机械与所有工程机械进行动态设计能更好地满足用户的需要,由静态设计向动态设计发展是一个必然趋势,未来机械设计必以动态设计为主。

不断涌现出较为成功的以系统建模与仿真技术为核心的商业软件中,应用最广泛的是美国 MDI 公司的虚拟样机技术商业软件——机械系统动力学分析软件 ADAMS。它集成了多体系统动力学理论成果和参数化的建模工具,可进行静力学、运动学和动力学分析的求解器,功能强大的后处理模块和可视化界面等,极大地提高了机械系统仿真的效率。然而这些软件在建模方面还有很多不足,尤其是一些复杂机械系统零、部件的三维建模很难实现,必须借助专业的 CAD 三维建模软件,联合建立机械系统的仿真模型<sup>[3]</sup>。当前,选用美国 PTC 公司的 Pro/Engineer(Pro/E)和 ADAMS 联合进行复杂机械系统的动力学仿真研究是一种较实用、较流行的仿真方

案。应用这种虚拟样机技术可以建立任何系统模型的动力学数字化虚拟样机模型,并在此基础上进行运动学、动力学分析和仿真,可在产品设计初期检验产品性能、减少产品缺陷、优化设计、缩短研制周期、节约开发成本、提高产品质量。本文利用 Pro/E 和 ADAMS 建立造船门式起重机虚拟样机,对若干工况进行虚拟试验,收到良好的效果。

## 1 建立几何模型

采用 Pro/E 与 ADAMS 联合建模的方法,利用 Pro/E 软件对机械零部件进行三维实体建模、装配;在装配状态下进入 MECHANISM/Pro(MECH/Pro)模块,在该模块下定义刚体,之后还可以根据需要创建 Markers、Forces、Constraints 等;完成模型后,生成 aview.cmd 文件,可以将该文件加载到 ADAMS/Solver(ADAMS 的求解器)中直接进行动力学求解,也可以将该文件加载到 ADAMS/View 或其他专用模块(如 ADAMS/Flex、ADAMS/Car、ADAMS/Engine 等)中,添加更复杂的约束副或驱动后,再用 ADAMS/Solver 进行仿真分析,相关流程如图 1 所示。

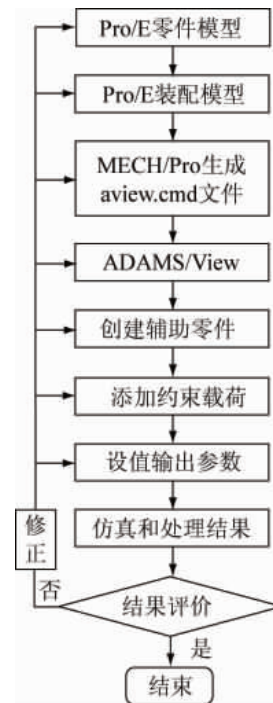


图 1 工作流程图

Fig. 1 Flowchart of the simulation

### 1.1 用 Pro/E 三维建模软件建立样机的几何模型

完整的门式起重机几何模型包括许多零部件,仿真分析建立完整的几何模型既费时,也没有必要。根据门式起重机结构特点,对模型进行了合理简化,模型由主梁、刚性支腿、柔性支腿、上小车、下小车、大车运行机构等组成,如图 2 所示。在导入 ADAMS/View 界面后,可根据具体情况合理修改和补充其余零部件。

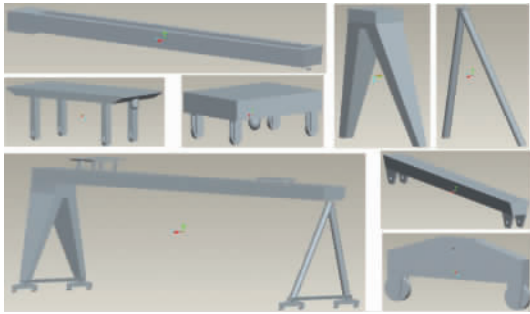


图 2 几何模型

Fig. 2 Geometry model

1.2 Pro/E 模型与 ADAMS 几何模型转换

三维模型转换为 ADAMS 环境下的几何模型通常有两种方法:① 利用 Pro/E 的 MECH/Pro 接口程序导入 ADAMS;② 运用标准格式的图形文件实行几何模型转换。经过对比研究发现,采用 MECH/Pro 无缝接口导入几何模型,如图 3、图 4 所示,可以减少模型转换过程中几何信息的丢失。

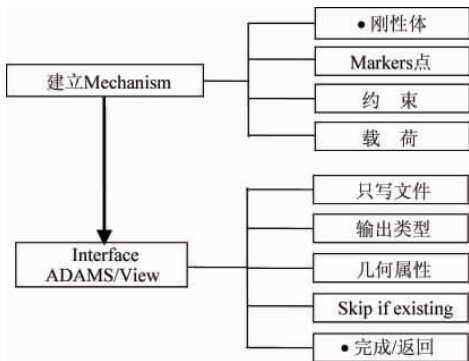


图 3 在 MECH/Pro 接口中的模型转换(带 • 的选项必须执行)

Fig. 3 Conversion operations for a model in MECH/Pro  
(The item following • must be executed)

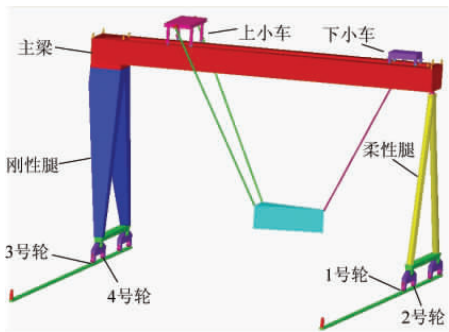


图 4 转换到 ADAMS 中的模型

Fig. 4 Model in ADAMS

2 在 ADAMS/View 下创建虚拟样机

建立能够反映门式起重机真实情况的各种约束关系并施加合理的载荷和各种运动,是基于虚拟样机的门式起重机虚拟仿真是否准确可靠的关键所在,本文在大量试验的基础上,确定了模型各构件间的约束关系、模型所受的风载荷及

模型的运动。

2.1 起重机虚拟样机模型各构件之间的约束关系

刚性支腿上下两端及地平梁为焊接,在样机中简化为固定连接;柔性腿上端与主梁之间为柔性铰,简化为球铰;所有轮子与车体的连接、平衡梁与地平梁的销钉,均简化为旋转副;大车通过 8 个车轮与轨道接触,产生法向接触作用力和切向摩擦力。如果车轮与轨道脱离,则车轮与轨道间作用力为零,在车轮与轨道间施加接触力约束,主动车轮按照指定的转速旋转,车体在车轮与轨道之间摩擦力的作用下行走,两部起重小车车轮接触同理;在大车轨道的端部设置有端部挡块,用来防止大车制动失败时驶出轨道,在缓冲器与挡块之间添加接触力约束,模拟大车与挡块的撞击,上下小车对应的轨道端部挡块同理;门式起重机通过卷筒来卷绕钢丝绳,实现重物提升下降的动作,吊钩所连接的吊物在提升过程中会产生摆动,本文采用球面副和平移副组合的方式,成功地实现重物的起降、摆动,较好地模拟了钢丝绳<sup>[4]</sup>。

2.2 风载荷分析

根据起重机械设计规范,认为风载荷是任意方向的水平力,风载荷可以按照下式计算:

$$p_w = \sum C \cdot K_h \cdot q \cdot S$$

其中, $p_w$  为作用在起重机或物品上的风载荷,N; $C$  为风力系数; $K_h$  为风压高度变化系数,取值 1; $q$  为计算风压, $N/m^2$ ;  $S$  为垂直于风向的迎风面积, $m^2$ 。本文仅分析正面和侧面的风载荷,其他方向的风载荷视为正面和侧面风载荷组合,各部件的风载荷计算如表 1 所示。

表 1 风载荷计算参数

Table 1 Parameters of wind load

| 构件名称 | 正面风载荷 |             | 侧面风载荷 |             |
|------|-------|-------------|-------|-------------|
|      | 风力系数  | 迎风面积/ $m^2$ | 风力系数  | 迎风面积/ $m^2$ |
| 小车   | 1.3   | 6.91        | 1.3   | 5.52        |
| 主梁   | 1.3   | 100.3       | 1.3   | 3.27        |
| 支腿 1 | 1.3   | 13.99       | 1.3   | 13.05       |
| 支腿 2 | 1.3   | 13.99       | 1.3   | 13.05       |

2.3 施加运动

根据门式起重机的工作状态,结合 ADAMS 编程,虚拟样机可实现以下 3 个运动:两个大车在主动轮的驱动下,前后行走;两部起重小车在驱动轮的作用下沿各自的轨道行走,相互配合实现起吊重物的翻转;吊物在卷筒的拉动下起吊或下放。

在 ADAMS 软件中,常用 ADAMS/View 的函数编辑器来创建、修改定义力 (Force)、测量 (Measure) 与运动副转动 (Motion) 的表达式、函数和子程序。函数编辑器主要有两种类型的函数:设计-时间函数 (design-time) 和运动-时间函数 (run-time)<sup>[5-6]</sup>。具体函数根据不同工况具体设置。



### 3 门式起重机虚拟样机仿真试验与分析

#### 3.1 工况 1

工况 1 为在大车行进方向有风的环境下,两个小车满载,处于静止状态,并位于主梁的跨中部位。大车由额定速率 9.29m/min 制动至静止。大车轮施加的制动力较小,未能及时制动,撞击到轨道尽头的挡块。

在此过程中,小车车轮与轨道的接触力发生变化,如图 5 所示(车轮对称,只列出一侧车轮的测量结果曲线)。小车轮

轮 1 的垂直方向(Y 方向)的最大反力为  $4.3199 \times 10^6 \text{N}$ ,小车轮 2 的垂直方向的最大反力为  $4.3108 \times 10^6 \text{N}$ 。

大车运行碰撞端部挡块过程,大车车轮与轨道的接触反力如图 6 所示。碰撞时大车车轮与轨道间发生连续的跳跃碰撞,产生很大的冲击力。

碰撞前后大车车轮抬起高度的变化曲线如图 7 所示。在发生碰撞的瞬间,大车后车轮抬起约 25~30mm,但未倾覆。

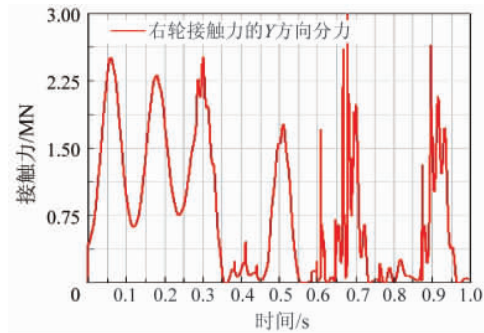
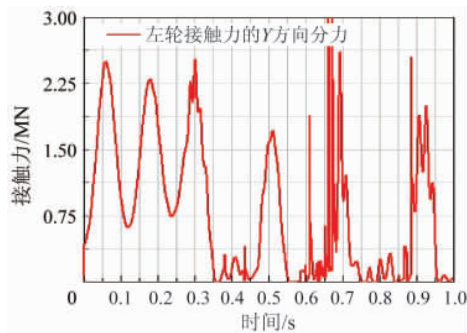


图 5 小车车轮与轨道接触力时间历程曲线

Fig. 5 Force-time curve for contact between two wheels and rail for a small car

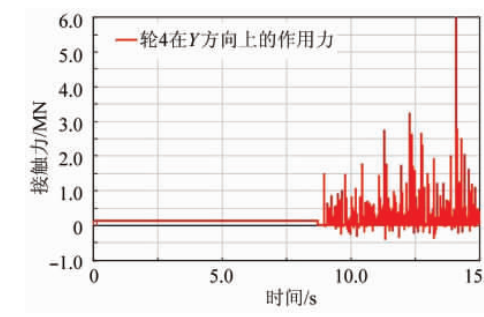
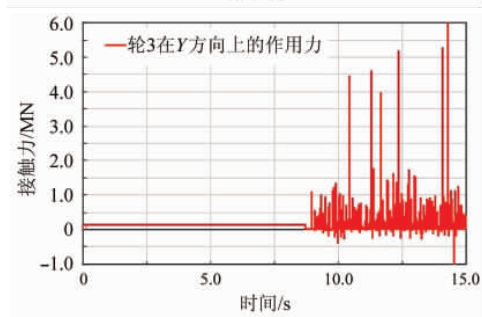
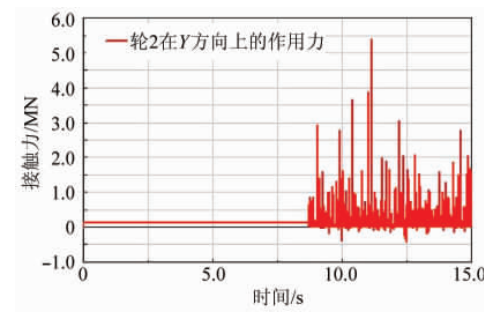
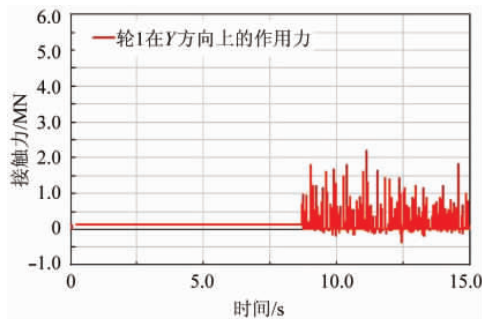


图 6 大车 4 个轮与轨道接触力时间历程曲线

Fig. 6 Force-time curve for contact between four wheels and rail for a big car

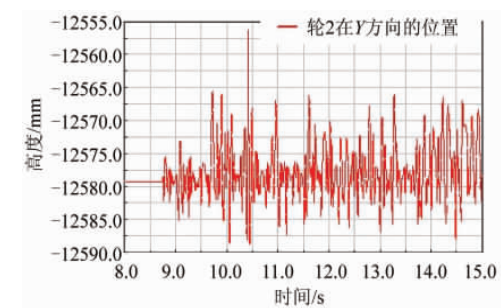
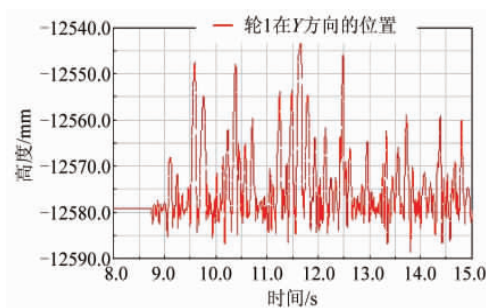


图 7 大车 4 个轮抬起高度的时间历程曲线

Fig. 7 Elevation-time curve of four wheels of a big car

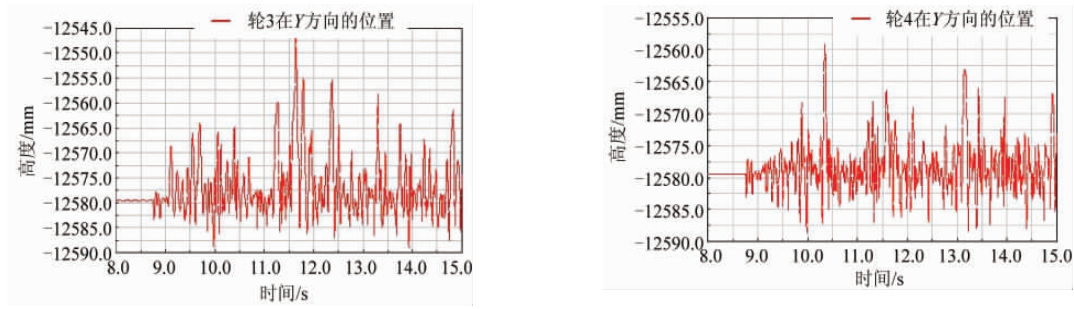


图 7 大车 4 个轮抬起高度的时间历程曲线 (续)

Fig. 7 Elevation-time curve of four wheels of a big car (continued)

### 3.2 工况 2

工况 2 为大车行进方向侧面有较大风, 小车满载静止, 大车以额定速率匀速前进。

图 8 给出了小车车轮接触力变化曲线。由于风载荷比较大, 导致门式起重机结构弹性变形的强烈反弹, 致使小车与

主梁之间产生很大的相互作用力。故应避免大风天气。

大车车轮与轨道的接触反力如图 9 所示。可以看出, 在来风方向的大车车轮与轨道间的作用力较小一些。

碰撞前后大车车轮抬起高度的变化曲线如图 10 所示。大车后车轮抬起较高, 约 120~200mm。但未倾覆。

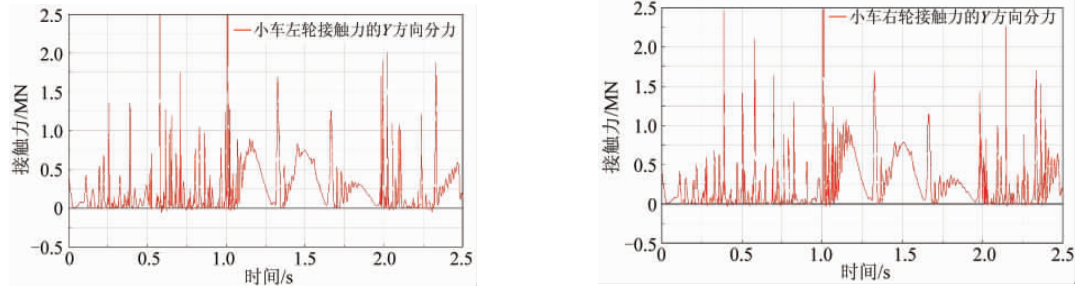


图 8 小车车轮与轨道接触力时间历程曲线

Fig. 8 Force-time curve of contact between small wheels and rail for a small car

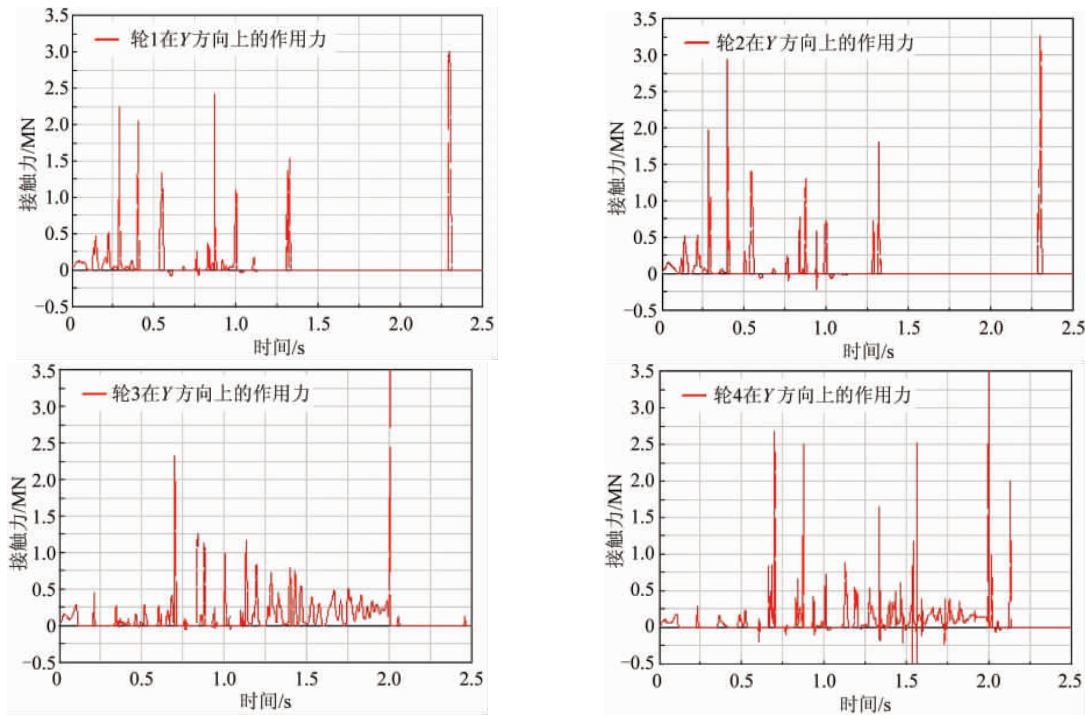


图 9 大车 4 个轮与轨道接触力时间历程曲线

Fig. 9 Force-time curve of contact between four wheels and rail for a big car

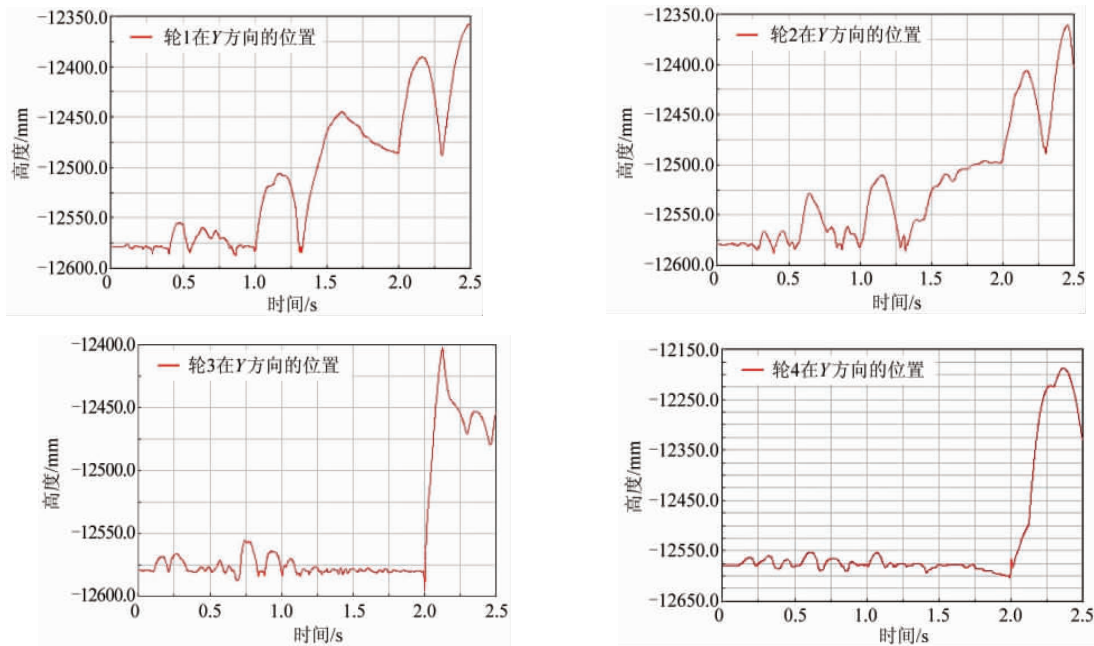


图 10 大车 4 个轮抬起高度的时间历程曲线

Fig. 10 Elevation-time curve of four wheels of a big car

### 3.3 以工况 2 为基础建立新的啃轨可能性评价方法

常规啃轨评价方法是在起重机静止情况下,对大车轨道施工技术参数及起重机的安装技术参数测量,通过测量偏差与允许偏差范围的比较,对起重机的啃轨可能性做出评价。这种方法与起重机的运行状态脱离,不能解释起重机在施工和安装技术参数许可偏差范围内运行时仍发生啃轨情况。

实际工作中,小车不在跨中会引起吊重在两侧端梁上分配不均匀。小车靠近某一侧端梁,该端梁上分配的压力大,另一侧端梁上分配压力小。大车两侧车轮与轨道接触的轮压差过大,引起两侧车轮滚动阻力偶不等,导致两侧支腿不同步现象。本文通过虚拟仿真,计算该工况下理论轮压差值与许可轮压差值,判断起重机在运行中出现啃轨的可能性。

测定该起重机大车车轮与运行轨道滚动摩擦系数,结合

起重机满载功率,可知大车两侧车轮的轮压差值  $|\Delta F| \geq 410\text{kN}$ ,大车行走出现啃轨,取安全系数  $n=1.13$ ,则许用轮压差值  $[\Delta F]=350\text{kN}$ 。

虚拟仿真小车在 1/4 跨中桥架沿轨道方向平稳运行,计算大车两侧轮压与轨道的接触力时间历程曲线,如图 11 所示。

由图 11 可知,起始时刻到 1.67s,桥架为静止到启动的过程;在 1.67~12s 内为起重机平稳运行过程;在 1.67s 时刻,桥架由匀速运行转化为平稳运行,受到吊重冲击力的作用,大车车轮对轨道产生冲击力。进一步考查桥架平稳运行过程中两侧轮压最大差值,从而判断出现啃轨的可能性。

#### 1) 2 号、4 号车轮轮压差值比较

$t=9.5042\text{s}$  时刻,2 号车轮轮压峰值  $F_{2\max}=7.9309 \times 10^5\text{N}$ ,4 号车轮轮压峰值  $F_{4\max}=2.9450 \times 10^5\text{N}$ ,  $|\Delta F|_{2,4}=F_{2\max}-F_{4\max}=5.0859 \times$

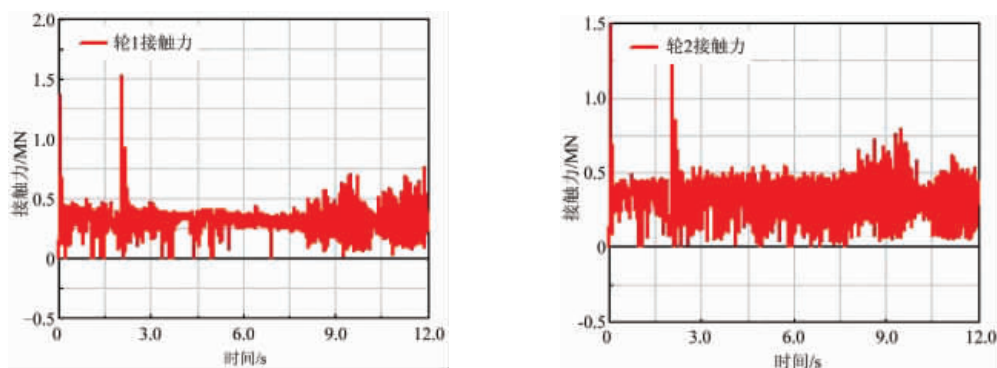


图 11 大车 4 个轮接触力的时间历程曲线

Fig. 11 Force-time curve of 4 wheels of big car and rail



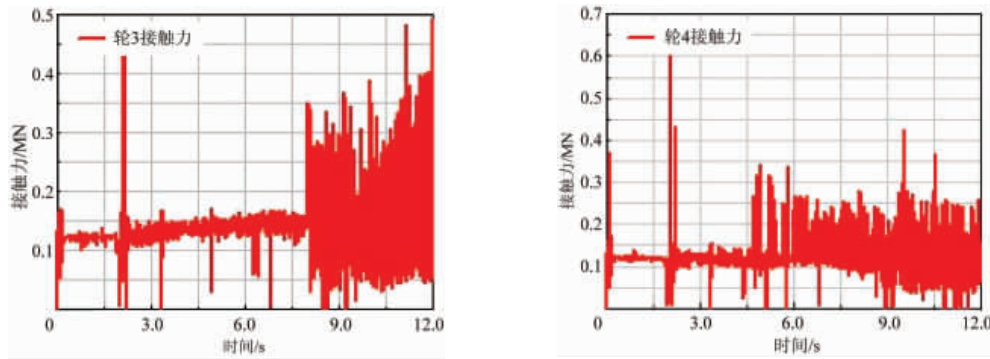


图 11 大车 4 个轮接触力的时间历程曲线 (续)

Fig. 11 Force-time curve of contact between four wheels and rail for a big car (continued)

$10^5\text{N}$ ,  $|\Delta F|_{2,4} > [|\Delta F|]$ 。

$t=9.551\text{s}$  时刻, 4 号轮轮压峰值  $F_{4\max}=6.9947\times 10^5\text{N}$ , 2 号轮轮压值峰值  $F_{2\max}=4.2398\times 10^5\text{N}$ ,  $|\Delta F|_{4,2}=F_{4\max}-F_{2\max}=2.7549\times 10^5\text{N}$ ,  $|\Delta F|_{4,2} < [|\Delta F|]$ 。

#### 2) 1、3 号车轮轮压差值比较

$t=11.9019\text{s}$  时刻, 1 号轮轮压峰值  $F_{1\max}=7.6553\times 10^5\text{N}$ , 3 号轮轮压峰值  $F_{3\max}=4.0125\times 10^5\text{N}$ ,  $|\Delta F|_{1,3}=F_{1\max}-F_{3\max}=3.6428\times 10^5\text{N}$ ,  $|\Delta F|_{1,3} > [|\Delta F|]$ 。

$t=11.9964\text{s}$  时刻, 3 号轮轮压峰值  $F_{3\max}=4.9201\times 10^5\text{N}$ , 1 号轮轮压峰值  $F_{1\max}=3.8025\times 10^5\text{N}$ ,  $|\Delta F|_{3,1}=F_{3\max}-F_{1\max}=1.8751\times 10^5\text{N}$ ,  $|\Delta F|_{3,1} < [|\Delta F|]$ 。

由以上分析结果可以看出, 在 9.5024、11.9019s 时刻, 两侧轮压差值超过许用轮压差值, 会出现啃轨情况。此时, 可采取增加车轮方法, 减轻轮压差值, 防止啃轨现象。

## 4 结论

在造船起重机的设计阶段, 建立虚拟样机, 进行虚拟仿真实验, 首先检验了部件之间是否存在干涉现象, 验证了起重机设计计算的正确性, 预览了产品性能, 为门式起重机结构强度的动态分析和动态设计提供了依据。文中工况 1 模拟了起重机实际工作条件下各部件的运动状态; 工况 2 模拟了起重机啃轨事故, 并得出轮压差过大是导致啃轨事故的因素之一。应用虚拟仿真技术对典型工况下随载荷变化的运行状态

及随时间的变化过程进行仿真模拟, 输出参数和结果, 以此来估计和准确推断实际运行的各种数据, 并对起重机进行动态分析和计算, 为设计经济、可靠、稳定的高性能门式起重机提供了有力的工具和实现方法。

## 参考文献 (References)

- [1] Software MSC. MSC.ADAMS/View 高级培训教程 [M]. 邢俊文, 陶廖忠, 译. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
Software MSC. MSC.ADAMS/View advanced training tutorial [M]. Xing Junwen, Tao Liao zhong, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [2] Kazuya T, Toshio Y, Junichi H. Modelling of dynamic behavior and control of truck cranes [J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers C*, 1995, 60(572): 1262-1269.
- [3] Masoud Z N, Nayfeh A H, Mook D T. Cargo pendulation reduction of ship-mounted cranes[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2004, 35(3): 299-311.
- [4] 李军, 邢俊文, 覃文洁. ADAMS 实例教程 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002: 139-150.  
Li Jun, Xing Junwen, Tan Wenjie. ADAMS example course of study[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002: 139-150.
- [5] 韦树宝. 基于虚拟样机技术的龙门起重机动力学仿真研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学物流工程学院, 2006: 61-62.  
Wei Shubao. The dynamic simulation research on gantry crane based on virtual prototype technology [D]. Wuhan: Institute of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, 2006: 61-62.
- [6] Karihaloo B L, Parbery R D. Optimal control of a dynamical system representing a gantry crane [J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1982, 36(3): 409-417.

(责任编辑 代丽)

## 本期“好玩的数学”答案

方法很简单: 把扑克牌分成两堆, 一堆 20 张, 一堆 34 张。然后把 20 张那堆里的所有牌全部翻过来。

道理也容易理解。我们设在 20 张的那堆中开始有  $x$  张正面朝上, 那么这堆中反面朝上的有  $20-x$  张。现在, 把这堆中的牌全部翻过来, 正面的变反面, 反面的变正面, 于是这堆扑克中正面朝上的扑克数成了  $20-x$  张。

又因为一开始全部正面朝上的扑克有 20 张, 既然在 20 张的那堆中开始有  $x$  张正面朝上, 那么有 34 张扑克的一堆中正面朝上的扑克数是  $20-x$  张。

因此, 在执行了上面的操作后, 两堆扑克牌中正面朝上的扑克数一定一样多。