

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.08.010

# 基于虚拟样机技术的过山车立轴瞬态应力分析\*

叶俊,汪永明\*,宋嵩

(安徽工业大学机械工程学院,安徽马鞍山243032)

**摘要:**针对过山车在高速运行过程中,其连接车架和桥壳的关键件立轴受力具有瞬时多变性特点,传统的静力学分析方法无法满足其安全性评估需求的问题。对过山车基于虚拟样机联合仿真技术进行了三维建模与ADAMS多体动力学分析,获得了关键件立轴在运行过程中所受载荷随时间的变化曲线。利用ANSYS Workbench建立过山车立轴的有限元模型,对其施加从ADAMS中提取出来的力载荷,从而获得了立轴的变形和应力云图,根据有限元分析校核了其安全系数和疲劳强度系数。研究结果表明,其安全性评估均满足国家标准。该方法为后续过山车的设计研发、制造和安装以及提高运行过程中的安全性提供了有力的保障。

**关键词:**过山车;立轴;虚拟样机;多体动力学;有限元分析

中图分类号:TP133.2;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)08-0965-04

## Transient stress analysis of roller coaster vertical shaft based on the virtual prototype technology

YE Jun, WANG Yong-ming, SONG Song

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that in the process of the roller coaster operated with high-speed, the key part of the vertical shaft that connected frame and axle housing, the characteristics of its force was instantaneous changeable, the traditional static analysis method couldn't satisfy their needs of the security assessment, a method based on a joint simulation of virtual prototype technology, 3D model was established and ADAMS multi-body dynamics analysis was carried out on the roller coaster, the vertical shaft's load variation with time during the process of operation was gotten. The finite element analysis model of the vertical shaft was established based on ANSYS Workbench, the force from ADAMS was exerted on it. The deformation and stress distribution of the vertical shaft were obtained, and according to the finite element analysis, its safety coefficient and fatigue strength coefficient were verified. The results indicate that the safety assessment meet the standard of national. This method will provide an effective protection for the roller coaster's design manufacture and installation and also can help improve the safety during operation in the subsequent.

**Key words:** roller coaster; vertical shaft; virtual prototype; multi-body dynamics analysis; finite element analysis

## 0 引言

过山车以其速度快、运动形式多变、刺激性强,深受当代人们的喜爱,有着当代“游艺机之王”的称号。

过山车属于高速运行机械系统设备,其中立轴是连接车架和桥壳的关键件,其安全性关乎整个过山车的运行安全。然而立轴的受力是一个非常复杂的动态

过程,受到过山车运行状态、车辆自重和游客负重、轨道空间结构形式、运行速度和瞬时加速度等多方面的因素影响。受力具有瞬时多变性,传统的静力学方法很难获得理想的动态应力分析结果,无法满足过山车设计要求<sup>[1]</sup>。刘忠胜等<sup>[2]</sup>应用三维虚拟建模技术建立过山车的轨道模型,在ADAMS中得出不同工况下各部件运行时的速度、加速度及载荷变化曲线,提前发现设计中的缺陷,为进一步的强度校核、评估过山车的

收稿日期:2016-03-07

基金项目:安徽省高校自然科学基金重大项目(KJ2015ZD11);安徽省马鞍山市科技计划项目(GX-2013-01)

作者简介:叶俊(1990-),男,安徽安庆人,主要从事现代机械设计理论与方法方面的研究。E-mail:787367406@qq.com

通信联系人:汪永明,男,教授,硕士生导师。E-mail:wym\_ahut@163.com

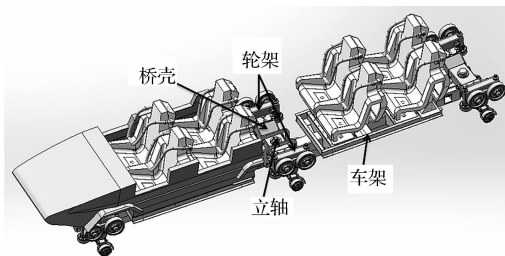
设计方案、安全性分析提供可靠依据。王红军等<sup>[3]</sup>利用传统的静力学分析方法,对过山车车架和桥壳进行有限元分析,根据能量守恒定律和受力分析得出其速度和力载荷大小,利用有限元理论,对过山车的车架和桥壳关键件进行了分析。

本研究结合文献[2]和文献[3]中的方法,针对过山车运行过程中立轴受力具有瞬时多变性,传统静力学分析方法很难获得理想的动态应力分析结果,无法满足国家特种设备研究院对特种设备设计要求<sup>[4,5]</sup>的问题,基于虚拟样机技术的研究与应用,为解决该问题提供有效途径<sup>[6-7]</sup>。

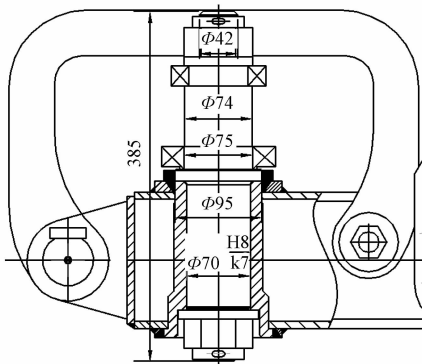
## 1 运动学和动力学仿真

本研究以某研究院开发设计的过山车作为物理样机模型,基于虚拟样机技术对过山车关键件立轴进行分析。首先在 Solidworks 中完成过山车各构件的三维建模,并将其导入 ADAMS 中,为仿真分析做好准备。

过山车三维装配模型(为表示清楚结构,部分构件已省去)及立轴结构示意图如图 1 所示。



(a) 过山车三维装配模型



(b) 立轴结构示意图

图 1 过山车及立轴结构示意图

根据设计要求,轨道全长 567 m,最高高度为 30 m,轨道间距为 960 mm,运行最大速度为 80 km/h。在 ADAMS 全局坐标系下,根据上述要求建立两条定位过山车轨道的空间曲线如图 2 所示。

其中轨道主要由站台、提升段、过渡段、漂环、立环和螺旋环等组成。本研究对各个构件之间添加对应的约束关系。

各构件之间的约束关系如表 1 所示。

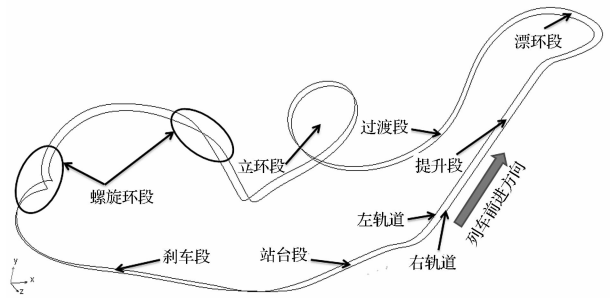


图 2 轨道空间曲线

表 1 约束关系

序号	构件体	约束关系
1	轨道与地面	固定约束
2	左轮与轨道	点线约束
3	右轮与轨道	点线约束
4	左轮架与轮桥	固定约束
5	右轮架与轮桥	固定约束
6	轮桥与车架	旋转约束
7	轮桥与尾部连接器	旋转约束
8	连接杆与连接叉	旋转约束

施加相应的载荷如:重力、车轮和轨道之间的摩擦力、运载小车牵引力和外界风载等<sup>[8-9]</sup>。同时为保证仿真数据采集的准确性,我国最新颁布的游乐设施安全 GB8408-2008《游乐设施安全规范》中对采样频率也作了相应的规定:测量得到的过山车人体加速度变化曲线,必须先经 10 Hz 低通高频滤波器低通滤波处理后方能使用所得到数据。根据采样定理,采样频率必须大于 20 Hz,等价于仿真步长必须小于 0.05<sup>[10]</sup>。根据实际计算机以及仿真时间的综合考虑,仿真步长设置为 0.01。

根据 ADAMS 运动学和动力学仿真,可以得出过山车运行过程中的位移、速度、加速度、制动力、摩擦力、连接件之间的受力与时间的曲线关系。本研究选取中间车立轴上的参考系为测量点,测量立轴所受力。根据仿真结果,笔者提取中间车立轴处 X、Y、Z 方向所受的力。

过山车运行过程中立轴所受 X、Y、Z 方向的力如图 3 所示。

过山车从运行开始到 30.13 s 的时候,立轴所受的力基本保持不变,这是由于过山车在链条提升段,在牵引力的作用下运载小车匀速上升,当运载小车到达最高点的时候,随着牵引钩与运载小车脱钩后,运载小车开始在重力势能的作用下,轨道的半径和高度差的变化以及轨道横向倾角的变化等,立轴开始承受复杂的应力作用。在 30.13 s ~ 46.39 s 这段时间内,轨道的半径和高度差的变化以及轨道横向倾角的变化很小,所以立轴受力波动很小,随着运载小车的前进,慢慢开始发生很大波动。特别是在运载小车在立环最低点的时候,立轴在该过程中受力最大。

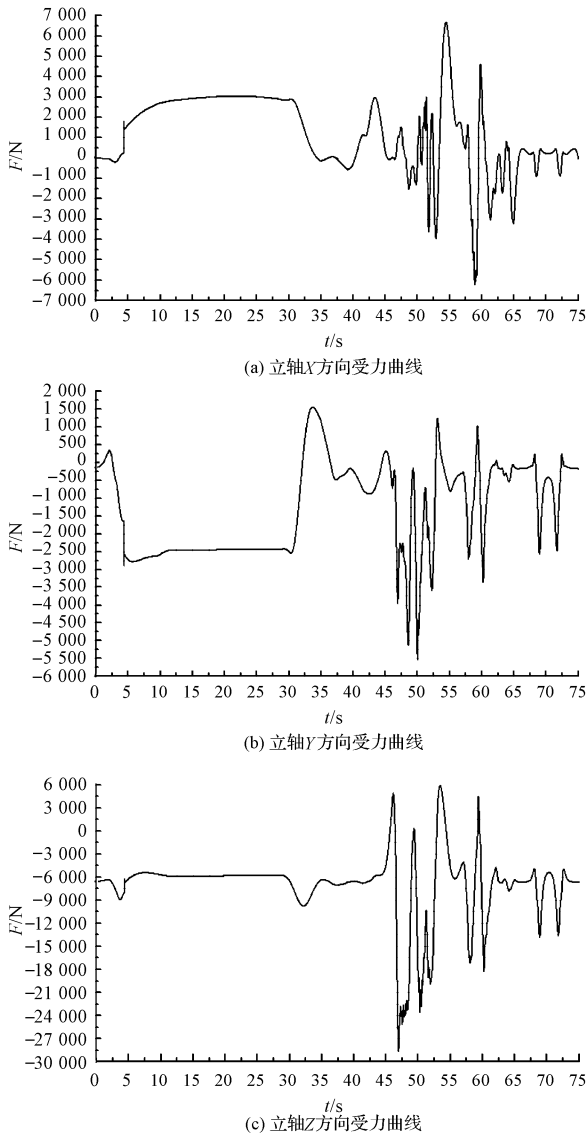


图 3 立轴受力曲线图

如图 3(a) 曲线所示,在 54.43 s 时候,过山车正通过第一个螺旋环位置,除去个别尖点,此时立轴在 X 方向上受力最大为 6 671.01 N。

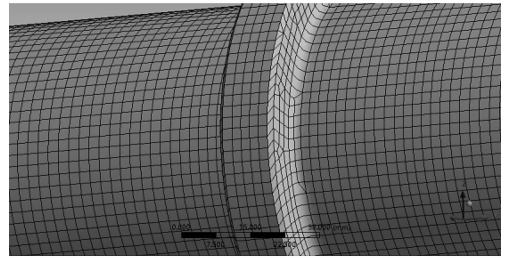
如图 3(b) 曲线所示,在 49.99 s 时,过山车正通过立环位置,除去个别尖点,此时立轴在 Y 方向上受力最大为 5 527.83 N。

如图 3(c) 曲线所示,在 46.92 s 的时候,过山车正从漂环段向下俯冲进入立环的位置,除去个别尖点,此时立轴在 Z 方向上受力最大为 26 949.22 N。

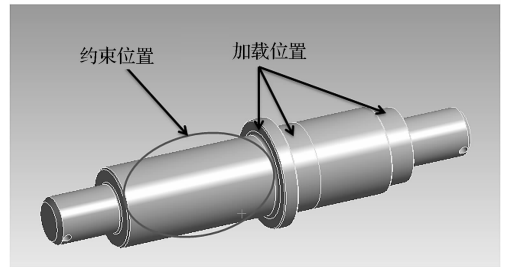
本研究根据以上仿真得出的数据,对过山车中间车的立轴进行强度校核和疲劳强度分析。

## 2 过山车立轴的有限元分析

根据设计图纸资料,本研究将上述立轴的三维模型导入 ANSYS Workbench 中。再对其进行定义分析类型、网格划分、施加约束和载荷、求解、分析结果。过山车立轴网格划分及立轴约束加载位置如图 4 所示。



(a) 立轴网格划分



(b) 立轴约束和加载示意图

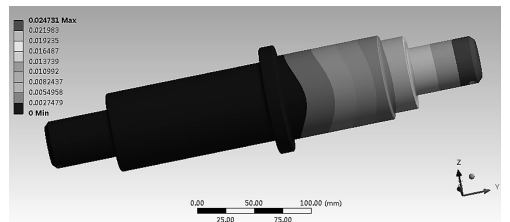
图 4 立轴网格划分及约束加载示意图

根据上述立轴结构示意图,以及立轴在过山车整体结构位置,立轴主要受车架施加的 Y 方向的力和桥壳作用的 X 和 Z 方向的力,其载荷大小根据上述 ADAMS 动力学的仿真结果如表 2 所示。

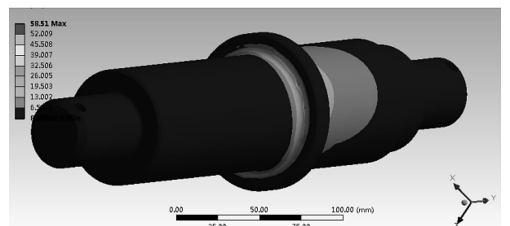
表 2 立轴所受力参数

方向	时间/s	力大小/N
X 方向	54.43	6 671.01
Y 方向	49.99	5 527.83
Z 方向	46.92	26 949.22

本研究利用 ANSYS Workbench 对过山车立轴进行有限元分析,立轴的最大变形在 0.022 0 mm ~ 0.024 7 mm 之间,最大的变形主要出现在立轴和桥壳连接端的上端面,立轴的变形云图如图 5(a) 所示。立轴的等效应力云图如图 5(b) 所示,可见在立轴的轴肩部位有应力集中现象。通过 Von Mises 等效应力分析,其最大应力值为 58.51 MPa。



(a) 立轴的变形云图



(b) 立轴的应力云图

图 5 有限元分析结果

### 3 分析结果与讨论

已知过山车立轴的材料为 42CrMo, 这种材料的机械特性如表 3 所示<sup>[11]</sup>。

表 3 材料的机械特性

材料牌号	力学性能	
	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	屈服点 $\sigma_s$ /MPa
42CrMo	1 080	930

据 GB8408-2008《游乐设施安全规范》, 在过山车立轴设计时, 选取许用安全系数  $[n] = 5$ , 冲击系数  $K = 2$ 。根据设计要求, 过山车立轴的安全系数  $n$  应大于许用安全系数  $[n]$ 。

经计算可知:

$$n = \frac{\sigma_b}{K\sigma_{\max}} = \frac{930}{2 \times 58.51} = 7.95 > [n] \quad (1)$$

根据式(1)的计算结果, 过山车立轴的应力在允许范围内, 满足其强度设计要求。另外, 根据 GB8408-2008《游乐设施安全规范》, 应计算过山车立轴的疲劳安全系数。

而过山车立轴是承受弯矩的轴类零件, 其危险截面疲劳强度安全系数校核公式为<sup>[12]</sup>:

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_\sigma \sigma_\alpha + \varphi_\sigma \sigma_m}{\beta \varepsilon_\sigma}} \geq S_p \quad (2)$$

式中:  $K_\sigma$ —有效应力集中系数;  $\beta$ —表面质量系数;  $\varepsilon_\sigma$ —尺寸影响系数;  $\varphi_\sigma$ —材料拉伸时平均应力折算系数;  $\sigma_{-1}$ —材料疲劳极限应力值, MPa,  $\sigma_{-1} = 0.27(\sigma_s + \sigma_b) = 542.7$ ;  $\sigma_\alpha$ —工作应力幅, MPa;  $\sigma_m$ —平均应力幅, MPa,  $\sigma_m = \sigma_\alpha = K\sigma_{\max}/2 = 58.51$ 。

查阅手册可得到各系数值分别为:

$$K_\sigma = 2.4; \beta = 2.4; \varepsilon_\sigma = 0.68;$$

$$\varphi_\sigma = 0.14; \sigma_m = 58.51 \text{ MPa};$$

$$\sigma_{-1} = 542.7 \text{ MPa}; \sigma_\alpha = 58.51 \text{ MPa}。$$

将数据代入公式(2)计算得:

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_\sigma \sigma_\alpha + \varphi_\sigma \sigma_m}{\beta \varepsilon_\sigma}} = 5.8 \quad (3)$$

根据 GB8408-2008《游乐设施安全规范》, 对应材料较均匀、载荷及应力计算较精确的脉动循环, 材料疲劳强度安全系数  $S_p \geq 1.73$ , 取  $S_p = 2$ 。

可见:  $S_\sigma > S_p$ , 故过山车立轴的疲劳强度也满足设计要求。

### 4 结束语

基于虚拟样机技术, 本研究对过山车进行了三维建模以及运动学和动力学仿真分析, 在此基础上, 完成了过山车立轴的有限元应力分析以及强度和疲劳强度校核。得到以下结论:

(1) 根据动力学仿真结果得出过山车立轴在整个运行过程中的受力随时间变化曲线, 得出立轴在 Y 方向承受车架施加的最大力为 5 527.83 N, 桥壳施加的 X、Z 方向的最大力分别为 6 671.01 N 和 26 949.22 N;

(2) 根据动力学仿真与有限元分析结果, 得出过山车立轴所受的最大应力为 58.51 MPa, 其强度安全系数为 7.95, 疲劳强度安全系数为 5.8, 均满足 GB8408-2008《游乐设施安全规范》, 进而验证了该立轴的结构设计满足其安全性评估要求。本研究所述立轴的安全性评估方法对研发新型过山车和维持现有过山车具有很好的借鉴意义。

#### 参考文献 (References):

- [1] 汪惠群. 基于虚拟样机的刚性体过山车与柔性连接件过山车的动力学仿真比较[J]. 上海机电学院学报, 2009, 12(1): 25-28.
- [2] 刘忠胜, 于泽涛, 屈福政. 过山车动态仿真建模方法[J]. 冶金设备, 2009(S1): 30-31.
- [3] 王红军, 刘国庆. 原子滑车车架和桥壳的有限元分析[J]. 北京机械工业学院学报, 2008, 23(3): 25-29.
- [4] 汪惠群, 郑建荣. 基于虚拟样机仿真的过山车连接件瞬态应力分析[J]. 机械设计, 2010, 27(12): 25-28.
- [5] 梁朝虎, 沈勇, 秦平彦, 等. 滑行车类游乐设施动力学建模与仿真[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(9): 14-20.
- [6] HOSSEINI S A A, KKHADDEM S E. Free vibrations analysis of a rotating shaft with nonlinearities in curvature and inertia [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2009(44): 272-288.
- [7] 梁朝虎, 沈勇, 鄂立军, 等. 游乐设施 G 加速度分析与判别方法[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(11): 31-35.
- [8] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [9] 田红旗, 周丹, 许平. 列车空气动力性与流线型头部外形[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(3): 47-55.
- [10] 国家质量技术监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB8408-2008 游乐设施安全规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [11] 成大先. 机械设计手册(第 1 卷)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [12] 濮良贵. 机械设计[M]. 8 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

叶俊, 汪永明, 宋嵩. 基于虚拟样机技术的过山车立轴瞬态应力分析[J]. 机电工程, 2016, 33(8): 965-968.

YE Jun, WANG Yong-ming, SONG Song. Transient stress analysis of roller coaster vertical shaft based on the virtual prototype technology[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(8): 965-968.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>