第 34 卷　第 1 期　　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　　Vol. 34　No. 1
2021 年 3 月　Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　Mar. 2021

应用惯性释放对过山车结构分析

徐梦超，　张林浩，　王　坤，　邢海军

(石家庄铁道大学 机械工程学院,河北 石家庄　050043)

摘要:按照游乐设施安全规范基本设计规定要求,在 WORKBENCH 软件中应用惯性释放方法对完全无约束的结构进行静力分析,对过山车结构或其他机械结构进行有限元分析有指导作用,用于解决如何确定车体承受最不利的载荷工况、如何确定车体中最危险的位置等问题。首先利用 ADAMS 进行动力学仿真,提取车体所受载荷,并对车体在 WORKBENCH 中进行概念建模,然后运用惯性释放方法对车体进行约束,最后对车体施加载荷进行有限元分析,结果显示这种方法可行。

关键词:有限元分析;惯性释放;WORKBENCH 软件;过山车

中图分类号: TP391　**文献标志码**: A　**文章编号**: 2095－0373(2021)01－0058－05

结构分析是过山车研发中必不可少的科学研究手段。过山车在运行过程中会承受较大的惯性力及惯性力矩,而这些惯性力反映到车体上就是更大的承载力,这就对过山车的结构提出了更严格的要求。过山车的车体结构设计有 2 个难点:①由于过山车运动时,其位移、速度、加速度及运动副的约束力实时变化,如何确定车体承受最不利的载荷工况;②车体承受的载荷包括 3 个方向的力和 3 个方向的力矩,在载荷已知的情况下,如何确定车体中最危险的位置。为解决上述 2 个问题,利用 ADAMS 软件的动力学分析功能确定了过山车连接副承受的实时载荷,按照游乐设施安全规范[1]基本设计规定要求,利用 ANSYS 软件强大的概念建模功能和分析功能完成了车体结构的工作能力分析。

1　过山车车体承受载荷的提取

为了明确过山车连接位置承受的载荷,需要对整个过山车进行动力学建模与仿真计算[2],采用 ADAMS 软件完成这一过程。建模时,将构件建为刚体,每 2 个刚体根据构件关系建立连接副,连接副建立在受力中心点,仿真完成后,提取连接副的载荷(3 个方向的力,3 个方向的力矩),提取的载荷数值必须相对于连接副安装位置的活动坐标系,具体建模时在 ADAMS 中根据连接副的中心坐标建立 MARAKER 点[3],且 MARAKER 点建立在 part 上,将连接副建立在 MARAKER 点上,连接副的坐标系方向应与整体坐标系方向一致。

2　座椅架结构

为了节省篇幅,以座椅架为例进行结构分析,座椅架结构如图 1 所示,其中位置 1 为球铰副,位置 2、3 为座椅架与连接架之间的转动副(绕 Y 轴)。

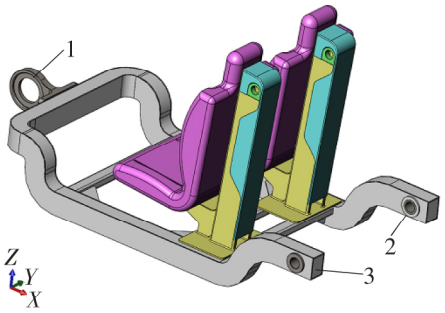


图 1　座椅架结构图

3　座椅架概念建模

板壳单元的力学模型取为结构单元的中性面,即以各中

收稿日期:2019－10－22　　责任编辑:车轩玉　　DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20190178

作者简介:徐梦超(1993—),男,硕士研究生,研究方向为机械设计及理论等。E-mail:727554604@qq.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

徐梦超,张林浩,王坤,等.应用惯性释放对过山车结构分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(1):58-62.

性面来代表不同厚度的板或壳单元的组合体,以此来模拟结构体。将座椅架三维模型导入 WORKBENCH 的 Geometry 中,对其板单元提取中性面,由于提取的中性面较薄,致使板单元之间有间隙,故选择 Surface Extension 对中性面进行延长,使中性面之间接触,所提取的中性面建为一个 part,面对面的中性面建立绑定关系,如图 2 所示,其中单人质量取 78 kg,建模时处理为集中质量。

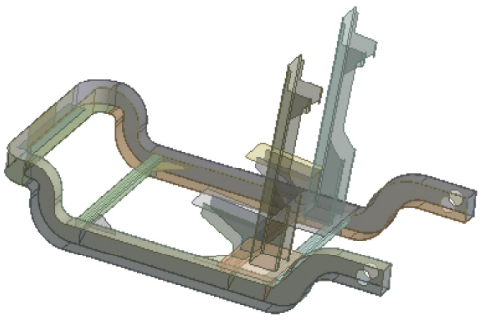


图 2　座椅架有限元模型

4　惯性释放约束的添加

为了准确考虑惯性力、惯性力矩的作用,对座椅架分析时,约束条件的设定采用 WORKBENCH 中的惯性释放方法[4],简单地说就是用结构的惯性(质量)力来平衡外力。尽管结构没有约束,分析时仍假设其处于一种"静态"的平衡状态,即将整体结构设置为静定结构,只约束 6 个自由度,具体方法为:任取结构模型的 3 个点(如图 3 编号 A、B、C)为虚支座(此 3 点不与运动副即载荷作用处重合),其中 A、B 点连线与模型整体坐标的 X 轴平行,B、C 点连线与模型整体坐标的 Y 轴平行,设定约束时令支点 B 的 X、Y、Z 向位移为零,令支点 A 的 Y、Z 向位移为零,令支点 C 的 Z 向位移为零。载荷施加于所计算结构件与其他结构件的连接处(运动副处)。

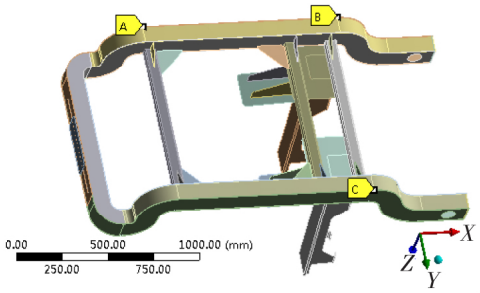


图 3　座椅架约束点位置图

5　载荷的添加

计算载荷作用于 1、2、3 位置(见图 1),其中位置 1 为球铰连接,只承受 X、Y、Z 方向的力,2、3 处为转动副连接[5],ADAMS 动力学建模时,为了避免过约束,只在 2、3 中间位置建立单个转动副,该转动副要承受 X、Y、Z 方向的力及绕 X、Z 轴的力矩,其时间历程见图 4、图 5。由于过山车运动时,其位移、速度、加速度及运动副的约束力实时变化,且同一时刻相同结构的受力也不同,因此应计算多种工况。所以对结构件运动时质心最大 X 向加速度(简称工况 1)、最大 Y 向加速度(简称工况 2)、最大 Z 向加速度(简称工况 3)、最大合成加速度(简称工况 4)4 种工况计算比较,座椅架施加的载荷与约束见表 1 与图 6～图 11,表 2 为强度计算结果。

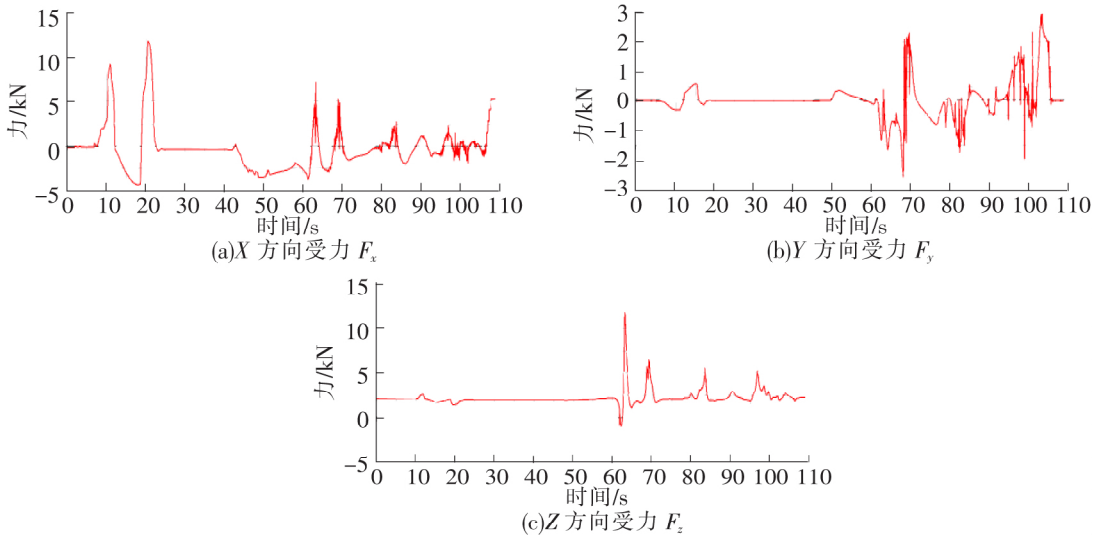


图 4　座椅架位置 1 球铰承受载荷

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

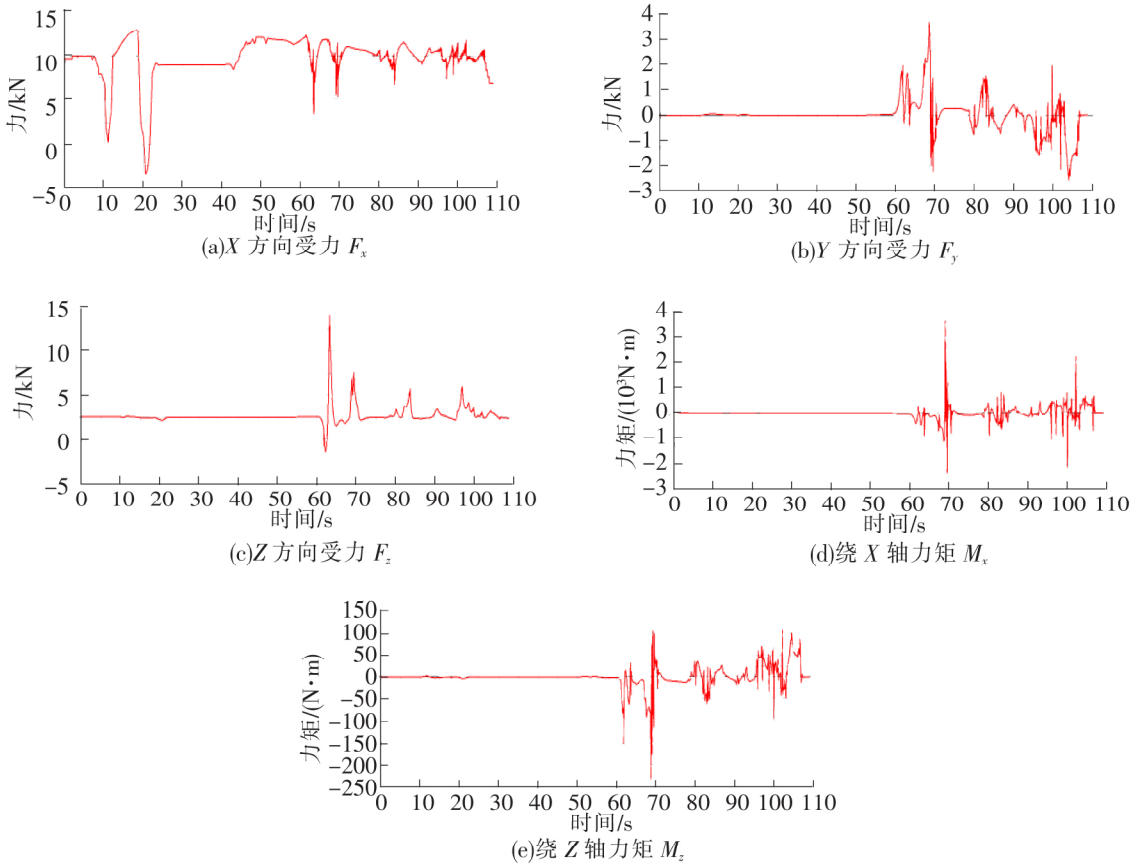


图 5 座椅架位置 2、3 转动副承受载荷

表 1 座椅架承受载荷

工况	位置	F_x/N	F_y/N	F_z/N	合力/N	M_x/(N·m)	M_z/(N·m)
1	1	4 605.91	1 093.85	6 112.02	7 731		
	2、3	−1 718.9	1 635.37	4 982.76	5 518.8	−372.1	−53.62
2	1	1 315.98	2 772.15	3 624.65	4 749.2		
	2、3	−569.29	3 580.09	2 994.93	4 702.2	−1 103.87	−75.59
3	1	7 194.922 9	372.752 1	11 813.218 4	13 837		
	2、3	−6 992.933 1	785.642	14 299.378 8	15 937	−8.894	−54.144 7

注:工况 3 与工况 4 数据相同。

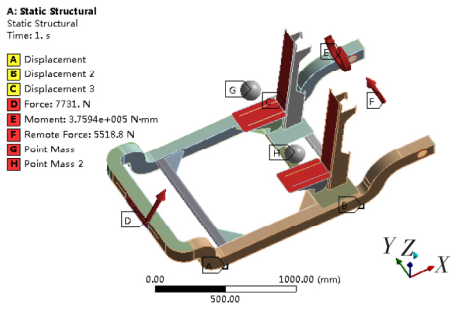


图 6 工况 1 座椅架载荷与约束

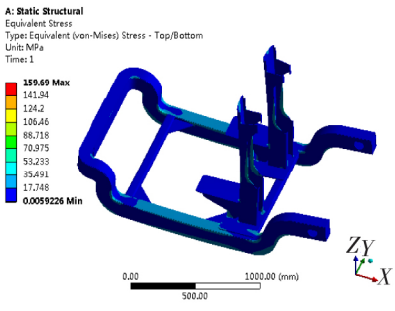


图 7 工况 1 座椅架应力云图

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

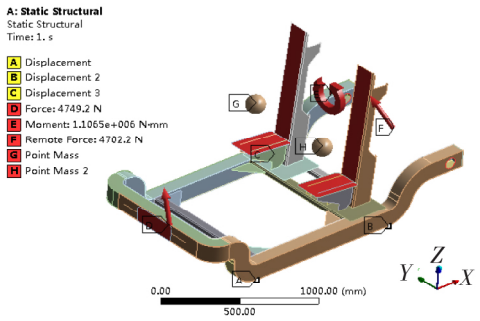


图 8　工况 2 座椅架载荷与约束

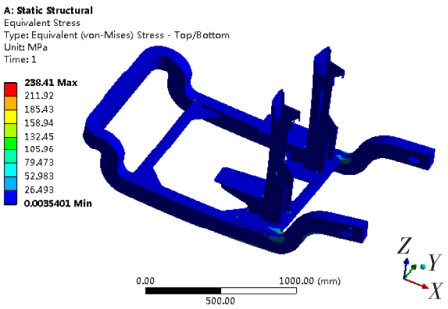


图 9　工况 2 座椅架应力云图

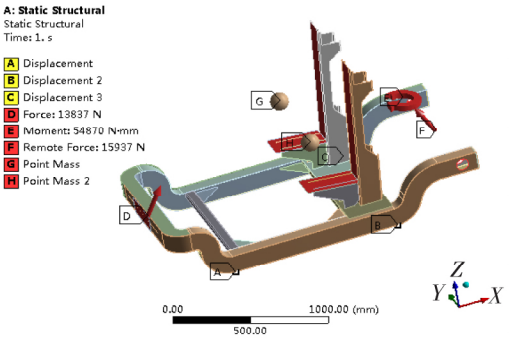


图 10　工况 3 座椅架载荷与约束

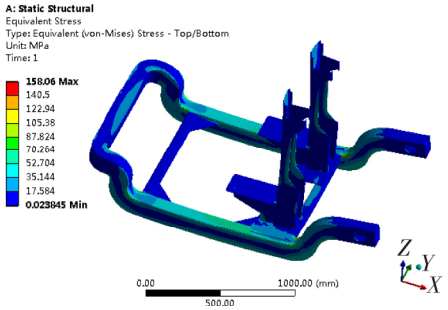


图 11　工况 3 座椅架应力云图

表 2　座椅架强度计算结果

工况	结构名称	材质	σ_b/MPa	应力 σ/MPa	冲击系数	安全系数	许用系数
1	座椅架	40Cr	735	159.69	2	2.301	≥2
2	座椅架	40Cr	735	238.41	2	1.541	≥2
3	座椅架	40Cr	735	158.06	2	2.325	≥2

表 2 的结果显示工况 1、工况 3 符合要求,工况 2 未符合要求。

结果表明了工况 2 为最不利工况,说明在此工况载荷作用下车体有损坏的可能,会对人身安全产生危害,应选择强度更好的材质或对该位置进行修改。

6　结论

该结果表明了过山车在运行过程中最不利工况,便于对过山车最不利载荷工况及受力最不利位置的直观确定,通过有限元分析较为真实地模拟出了座椅架的破坏特征以及受力情况,因此应对所有的载荷工况下的主要车体结构进行分析计算,通过 ADAMS 软件与 WORKBENCH 相结合的方法,完成了所有载荷工况下主要车体结构的分析计算,模拟和预估所设计产品的功能、性能、可装配性及可加工性等各方面的问题。

参　考　文　献

[1]国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. GB 8408—2018 大型游乐设施安全规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2018.

[2]王坤, 邢海军,徐梦超, 等. 基于 ADAMS 的多刚体动力学简化建模与仿真[J]. 图学学报, 2019, 40(4): 733-738.

[3]赵武云. ADAMS 2017 基础与应用实例教程[M]. 北京:清华大学出版社,2015.

[4]管晓伟,李兴. ANSYS Workbench 17.0 结构分析快速入门、进阶与精通[M]. 北京:电子工业出版社,2018.

[5]孙志礼,冷兴聚,魏延刚,等. 机械设计[M]. 沈阳:东北大学出版社,2000.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Analysis of Roller Coaster Structure by Inertia Release

Xu Mengchao, Zhang Linhao, Wang Kun, Xing Haijun

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: According to the regulations of the safety standards of the basic design requirements, static analysis of the inertia release in the WORKBENCH software application method to completely unconstrained structure has a guiding role on finite element analysis carried out on the roller coaster or other mechanical structure, on solving problems such as how to determine the body under the most unfavorable load cases, or how to determine the most dangerous location of the car body. First, ADAMS was used for dynamics simulation to extract the load on the car body, and conceptual modeling was conducted on the car body in WORKBENCH. Then, inertial release method was used to constrain the car body, and finally, finite element analysis was conducted on the load applied on the car body. The results showed that this method was feasible.

Key words: finite element analysis; inertial release; WORKBENCH software; roller coaster

(上接第21页)

Simulation Analysis on the Transient Characteristics of a Flat Tire Vehicle Under Driver Intervention

Lu Yongjie[1], Liu Peng[2], Wang Yang[3]

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structure Jointly Built by the Province and the Ministry, Shijiazhuang 050043, China;
2. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. Office of Development Planning and Discipline Construction, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: On the basis of the original low-pressure tire test, the Dugoff tire model was modified, and the flat tire model was established in Matlab/Simulink software. The vehicle model was built in CarSim software, and the dynamic co-simulation of the flat tire vehicle was carried out by CarSim and Simulink. The simulation results show that the yaw of the rear wheel is more serious than that of the front wheel. Considering the influence of driver intervention on the transient characteristics of the vehicle with a flat tire, the driver conducted emergency steering wheel beating in the opposite direction to correct and emergency braking operation after the simulated flat tire. The driver's emergency braking after a flat tire can also exacerbate the vehicle's yaw. The research shows that the driver's intervention after tire burst has an important influence on vehicle stability, which lays a foundation for considering the stability control of tire burst vehicle under driver intervention in the next step.

Key words: tire burst; tire model; vehicle model; driver intervention

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net