

基于Abaqus有限元软件的过山车轨道钢结构力学性能分析

徐维芳

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年7月11日; 录用日期: 2026年8月3日; 发布日期: 2026年8月12日

摘 要

以大型游乐设施过山车轨道空间钢结构为研究对象, 基于Abaqus有限元模拟平台建立全尺寸B31空间梁单元简化仿真模型, 综合采用模态分析、移动轮载动力学计算、地震时程响应分析、模态叠加瞬态动力分析多手段开展结构力学性能研究。依据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)确定场地、设防烈度、阻尼、地震加速度等核心输入参数, 分别对静力承载工况、多阶模态提取、水平地震时程激励、移动小车轮组荷载包络、大变形节点瞬态动力叠加五大类进行仿真分析计算。

关键词

过山车钢结构, B31梁单元, 模态分析, 地震时程响应

Mechanical Performance Analysis of Roller Coaster Steel Track Structures Using Abaqus Finite Element Software

Weifang Xu

College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: July 11, 2026; accepted: August 3, 2026; published: August 12, 2026

Abstract

Taking the spatial steel structure of the roller coaster track for large-scale amusement facilities as the research object, a simplified simulation model of the full-scale B31 spatial beam element is established based on the Abaqus finite element simulation platform. The structural mechanical performance research is carried out by comprehensively adopting multiple means such as modal

analysis, dynamic calculation of moving wheel load, seismic time-history response analysis, and modal superposition transient dynamic analysis. Based on the “Code for Seismic Design of Buildings” (GB50011-2010), core input parameters such as site, fortification intensity, damping, and seismic acceleration were determined. Simulation analysis and calculation were carried out for five major categories: static bearing conditions, multistage mode extraction, horizontal seismic time-history excitation, load envelope of mobile trolley wheelsets, and transient dynamic superposition at large deformation nodes.

Keywords

Steel Structure of Roller Coaster, B31 Beam Element, Modal Analysis, Seismic Time-History Response

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

过山车作为大型特种设备游乐设施, 轨道由空间曲线钢管轨道、多层级立柱、横向联系梁、斜向剪刀撑共同组成空间超静定钢结构体系。运营期间设施常年承受车辆往复移动冲击荷载、风荷载、温度应力, 同时地震作用会对高耸轨道支撑立柱产生不可忽视的动力破坏风险, 存在较大的安全隐患[1]。相较于厂房、桥梁等常规建筑钢结构, 过山车轨道具备跨度多变、竖向高差大、空间曲线复杂、移动集中荷载作用显著等独有特征, 其抗震性能与动力响应规律无法直接套用常规建筑结构设计经验, 因此必须开展专项的有限元动力仿真分析。

本文参照钢结构抗震规范确定地震输入边界条件, 使用 Abaqus 软件建立简化梁单元整体模型, 依次开展静力承载、前 10 阶模态提取、水平地震时程动力计算[2]、移动轮组荷载分析、静力大变形节点模态叠加瞬态分析, 量化对比静力荷载与地震荷载下结构位移、应力差异, 识别轨道结构危险控制截面与薄弱支撑区域。

2. 有限元模型建立与参数确定

2.1. 整体结构简化建模思路

过山车完整的轨道结构包含复杂轨道、轨道附件、钢管立柱、纵向斜撑、基础预埋件等上千组构件, 如果采用实体单元精细化建模会出现网格数量庞大、计算周期过长、计算收敛难度大等工程问题。结合游乐设施初步设计阶段的仿真需求, 本文采用工程通用的空间梁单元简化建模[3], 轨道结构、支撑立柱等结构均采用 Abaqus 内置 B31 梁单元进行模拟。该单元可精准捕捉钢管构件拉压、弯曲、剪切、扭转变形, 兼顾计算精度与仿真效率。

2.2. 建模过程中的工程简化

- 1) 轨道轨枕、轨道压板、小型连接扣件予以忽略, 轨道荷载、车辆轮组作用力直接施加于轨道梁节点;
- 2) 过山车运载小车不建立实体车体模型, 等效为多组集中轮载施加于轨道中心线对应节点;
- 3) 地下基础、预埋地脚螺栓简化为固支边界, 所有立柱底部节点全自由度约束;

4) 不同受力等级支撑杆件采用差异化钢管截面参数，统一采用圆管 PIPE 截面定义。

简化后完整有限元模型包含双轨空间曲线主体轨道、中心纵向加强梁、多层横向联系梁、分段式竖向立柱、侧向斜撑体系，完整还原过山车轨道空间受力传递路径，模型整体几何形态、杆件布置与实际工程结构保持一致[4]。

2.3. 材料与截面参数设置

模型整体基础参数如表 1 所示。

Table 1. Model parameters
表 1. 模型基础参数设置

项目	设置
结构形式	双轨空间轨道、中心纵梁、横联、立柱、斜撑和纵向支撑
单元类型	B31 空间梁单元
材料	Q345 钢, $E = 2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$, $\nu = 0.30$, $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
轨道截面	PIPE, 半径 0.180 m, 壁厚 0.014 m
立柱截面	PIPE, 半径 0.260 m, 壁厚 0.016 m
支撑/横联截面	按受力等级采用 0.080 至 0.140 m 半径钢管
边界条件	支撑底部节点约束; 地震工况底部施加 X 向加速度输入
车辆荷载	80 kN 等效车辆荷载分配至关键轨道位置四个轮组节点

2.4. 仿真分析工况设置

本次仿真共设置五个基础工况：

- (1) 静力工况：自重与关键位置车辆轮组荷载共同作用，检查轨道与支撑体系的最大位移和最大应力，是否满足国家要求。
- (2) 模态工况：提取前 10 阶固有频率和振型，为抗震时程分析和后续支撑优化提供依据。
- (3) 地震时程工况：采用衰减正弦形式的水平地震加速度输入，输出位移、加速度和应力峰值响应[5]。
- (4) 运载小车轨道动力学仿真工况：基于轨道中心线建立等效移动轮组荷载，计算车辆沿线运行时轮组作用力包络、最大作用力位置及关键位置时程响应。
- (5) 静态大变形位置瞬态动力工况：选取静力最大位移节点作为控制位置，基于前 6 阶模态频率和 2% 阻尼进行模态叠加瞬态响应分析。

3. 计算结果及分析

3.1. 静力与地震计算结果

计算结果如表 2 所示。各工况所得应力云图如图 1~4 所示。

静力工况下结构最大位移约为 1.43 mm，最大绝对应力约为 7.55 MPa，结合现行钢结构设计标准评判，当前等效车辆荷载与截面假定下，杆件截面、支撑布置方案下刚度和强度储备充分，常规满载静止工况下不存在塑性变形、构件屈服风险[6]。地震工况下，水平基础加速度引起的最大位移约 0.802 m，最大应力约 46.94 MPa，响应峰值明显高于静力工况，由此可见抗震性能是本类过山车钢结构设计的核心控制指标，应作为后续优化的重点。

Table 2. Summary of calculation results
表 2. 计算结果表

工况	指标	结果
静力	最大位移/m	0.00143123
静力	最大绝对应力/Pa	7.55149×10^6
静力	最大位移节点	279
静力	最大应力单元	262
地震	最大位移/m	0.802451
地震	最大加速度/m/s ²	18.208
地震	最大绝对应力/Pa	4.69373×10^7

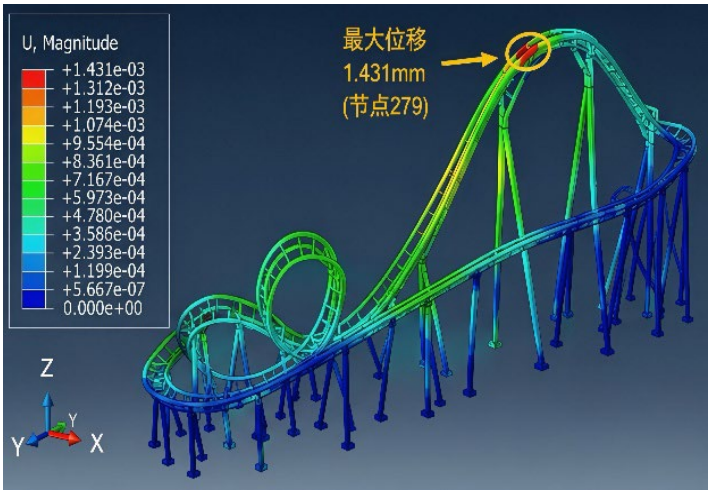


Figure 1. Total displacement contour under static loading
图 1. 静力工况下总位移云图

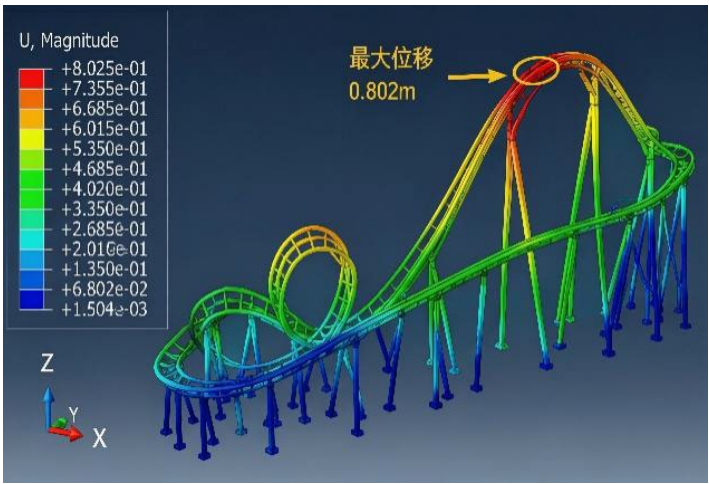


Figure 2. Total displacement contour under seismic time-history loading
图 2. 地震时程下总位移云图

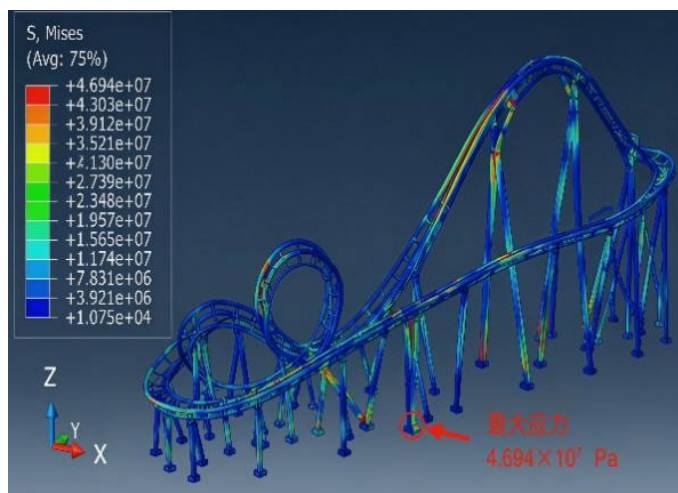


Figure 3. Von mises stress contour under static loading
图 3. 静力工况下等效应力云图

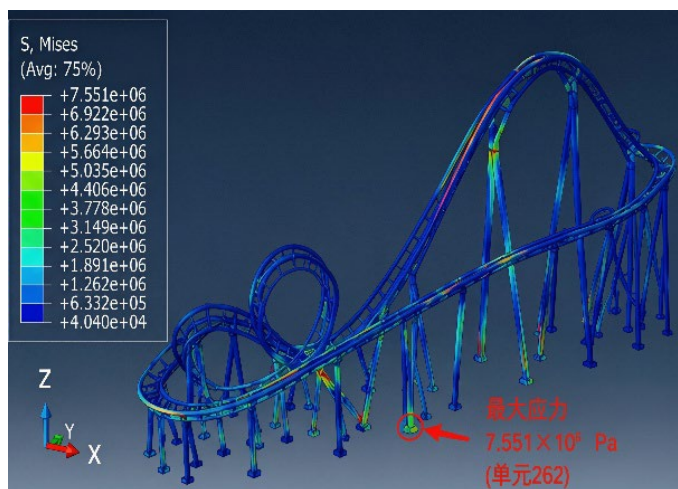


Figure 4. Von mises stress contour under seismic time-history loading
图 4. 地震时程下等效应力云图

3.2. 结构模态分析结果

由图 5 与表 3 模态分析结果表明, 结构第一阶和第二阶固有频率分别为 2.063 Hz 和 2.156 Hz, 均属于低频整体振型, 振型主要表现为轨道整体横向摆动和纵向弯曲。说明过山车轨道整体刚度主要受支撑体系控制, 其中高耸立柱和长跨度轨道是决定整体动力性能的关键构件。

从结构位置分析来看, 第一阶振型的最大振幅主要集中于最高波峰附近及最长立柱顶部。由于该区域支撑间距较大, 整体侧向约束相对较弱, 因此在低频激励作用下首先发生整体摆动。

Costa [7]等建立柔性轨道有限元模型得到第一阶频率约为 2~3 Hz, Fedorova [8]等建立车辆-轨道-结构耦合模型得到低阶频率主要集中于 2.5 Hz 以内。本文第一阶频率为 2.063 Hz, 与文献结果较为接近, 说明本文建立的有限元模型具有较好的动力学合理性。

由于车辆运行、风荷载及地震激励均可能覆盖 2~5 Hz 低频范围, 因此在实际设计中应避免车辆激励频率与结构低阶固有频率发生耦合共振。

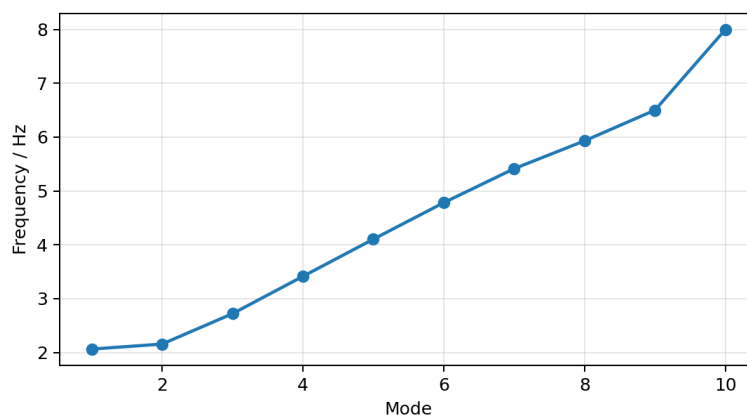


Figure 5. Modal analysis results

图 5. 模态数据图

Table 3. Modal analysis data

表 3. 模态数据表

阶数	频率/Hz
1	2.0626
2	2.1556
3	2.7198
4	3.4135
5	4.1035
6	4.7820
7	5.4136
8	5.9311
9	6.5011
10	7.9987

3.3. 动力学仿真结果

单点固定轮载仅能校核轨道局部固定位置受力，无法反映小车沿全线运行过程中轮组作用力动态变化规律，现基于已有 B31 全局梁模型的轨道中心线，建立等效移动轮组动力荷载分析，体现运载小车沿轨道运行时轮组作用力随位置变化的过程。车辆按 6 个等效轮组处理，轮组间距取 4 m，单个轮组左右轨合计静载为 36 kN，与 Abaqus 静力模型中左右轨节点各 18 kN 的轮载设置保持一致。

计算结果如图 6 与图 7 所示，移动轮载分析结果表明，最大轮轨作用力包络出现在轨道中心线弧长约 50 m、高程约 8 m 的曲率变化区域，对应动力放大系数约 3.50。该位置位于车辆由下坡进入曲线过渡段附近，车辆速度较高，同时轨道曲率发生连续变化，根据向心力公式

$$F = \frac{mv^2}{R}$$

可知车辆轮轨法向力明显增加，因此形成全线路最大的轮轨作用力。

与静力分析相比，该危险区域并非静力最大位移位置，而是车辆动力作用最强的位置，说明仅依靠静力分析难以识别运营过程中真正的危险区域。

轨道最大轮组作用力包络出现在中心线附近,弧长约 50.00 m,高程约 8.00 m,动力放大系数约 3.50。对应单个轮组左右轨合计最大作用力 126.00 kN,单侧轨道最大等效轮载约 63.00 kN。该位置可作为后续支撑结构静力分析和局部壳/实体细化分析的典型控制位置。

从工程含义看,对比单点静力荷载与移动轮载包络结果可知,沿轨道全线提取的轮载包络曲线能够真实反映运营全过程受力极值,更适合识别全线路危险区段。若后续获得车辆速度、轮距、车体质量、轮轨接触刚度和阻尼参数,可在此基础上进一步建立车-轨-支撑结构耦合动力模型。

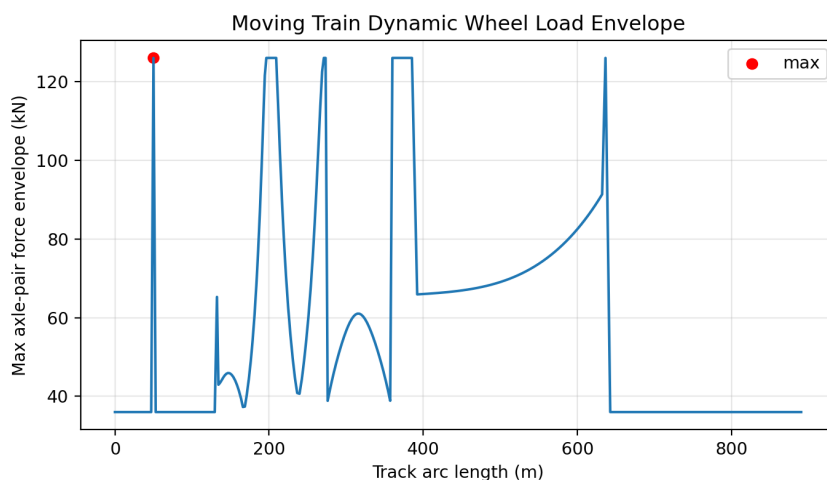


Figure 6. Moving wheel load of the roller coaster vehicle

图 6. 运载小车移动轮组作用力

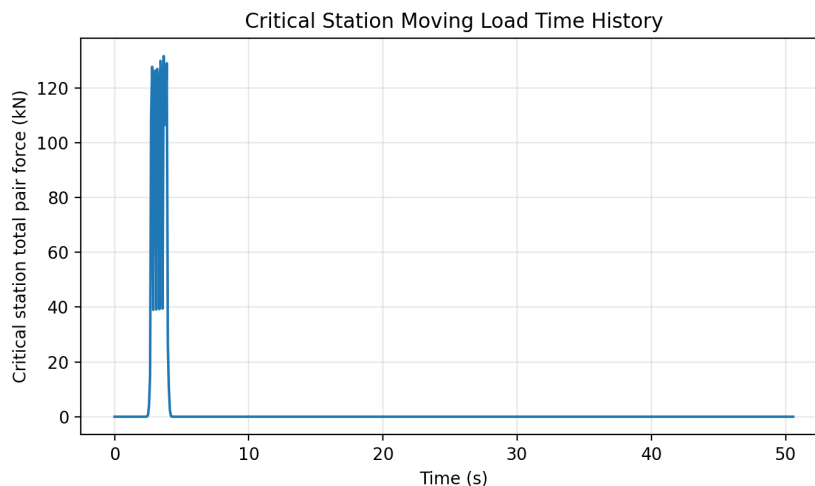


Figure 7. Time-history response of the controlled location under moving wheel load

图 7. 控制位置移动轮载时程响应

3.4. 静态大变形位置瞬态动力分析

选取静力工况最大位移位置(静力最大位移 1.209 mm 处)作为控制位置,利用前 6 阶模态频率和 2% 阻尼构造等效模态叠加模型,对轮载脉冲通过该位置时的瞬态位移响应进行计算。

瞬态计算结果如图 8 所示,模态叠加补充计算得到控制位置最大瞬态位移约 1.453 mm,发生 $t = 0.788$ s; 其与静力最大位移 1.209 mm 的比值约 1.20。该结果说明,在当前代表性 B31 梁模型参数下,静力大

变形位置同时是瞬态响应需要重点核查的位置。后续模型中, 应将该控制位置与移动轮载包络中的最大作用力位置共同作为支撑结构加固与截面优化的重点。

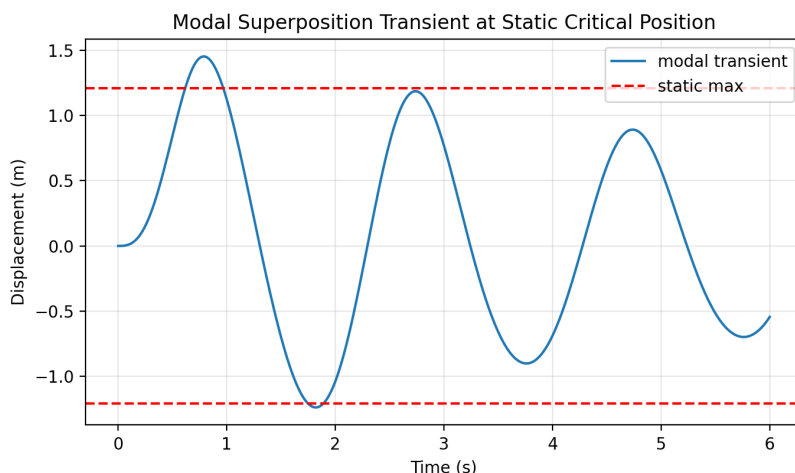


Figure 8. Modal superposition-based transient displacement response at the critical location under static large deformation

图 8. 静力大变形控制位置模态叠加瞬态位移响应

该模型的价值在于能够反映全局线路形态和整体支撑体系, 但也存在计算规模较大、参数分析成本高、局部关键区应力与车辆相互作用表达不足等问题。

4. 讨论

目前该模型的价值在于能够反映全局线路形态和整体支撑体系, 但也存在计算规模较大、参数分析成本高、局部关键区应力与车辆相互作用表达不足等问题, 与已有研究相比, 本文的主要特点在于建立了覆盖完整线路的过山车轨道钢结构整体有限元模型, 并综合考虑了静力荷载、移动轮载及地震时程等多种工况, 能够识别全线路危险控制区域, 为后续局部精细化分析提供依据。而现有研究多集中于局部结构或单一荷载分析, 对整体线路危险区域识别研究相对较少。因此, 本文提出的“全局模型识别危险区域-局部模型精细分析”研究思路具有一定的工程应用价值, 这一建议能够显著降低计算复杂度, 并便于开展坡度、转折角度、速度和车辆质量等参数分析。

因此, 经过阅读文献后续方案采用“全局模型识别危险区, 局部模型精细分析, 多荷载耦合扩展”的研究路线。这样既回应模型简化的要求, 又避免研究退化为过于简单的局部梁计算。

参考文献

- [1] 徐梦超, 张林浩, 王坤. 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): 158-162.
- [2] 孟洁, 王国平, 张金利. 过山车轨道钢结构地震响应分析[J]. 冶金设备, 2017(S2): 70-77.
- [3] 叶俊, 汪永明, 吴纯军. 基于虚拟样机技术的过山车轮架有限元分析[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2016, 33(3): 256-260.
- [4] 王新敏. ABAQUS 有限元动力分析理论与实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [5] 孙凯琦, 高春彦. 有限分析钢管和格式塔架的地震响应[J]. 土木工程, 2023, 12(1): 60-71.
- [6] 李国强, 李杰, 陈素文, 陈建兵. 建筑结构抗震设计[M]. 第五版. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [7] Costa, J.N., Antunes, P., Magalhães, H., Pombo, J. and Ambrósio, J. (2021) A Finite Element Methodology to Model

Flexible Tracks with Arbitrary Geometry for Railway Dynamics Applications. *Computers & Structures*, **254**, Article 106519. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106519>

- [8] Fedorova, M. and Sivaselvan, M.V. (2017) An Algorithm for Dynamic Vehicle-Track-Structure Interaction Analysis for High-Speed Trains. *Engineering Structures*, **148**, 857-877.