

基于 ABAQUS 的轨道振动特性有限元仿真分析

张亮, 胡志仁

(中国船舶重工集团公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要 以某水池轨道系统为研究对象, 考虑支座对轨道固有频率的影响, 采用三维变形体单元、三维变形壳单元、三维变形梁单元分别建立轨道有限元模型。基于特征值法, 计算轨道系统一阶固有频率, 对比评估轨道的振动特性, 找出规律, 指出不同方法的特点及工程中针对不同方法的取舍, 总结可指导设计性的结论。旨在为以后设计中有关轨道振动特性计算及相似平台设计提供参考指导。

关键词 特征值法; 一阶固有频率; 整体振动; 局部振动; 轨道

中图分类号 TH122 **文献标识码** A

Finite Element Simulation Analysis of Track Vibration Characteristics Based on ABAQUS

ZHANG Liang, HU Zhiren

(No. 710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

Abstract Taking a pool track system as the research object, considering the influence of the bearing on the natural frequency of the track, finite element models are established by using 3D deformable body unit, 3D deformable shell element and 3D deformable beam element. The first order natural frequency of the track system is calculated based on eigenvalue method. To find out the law, the evaluation of the vibration characteristics of the track is compared. The characteristics of different methods and the choice of different methods in engineering are pointed out. By summarizing the conclusions that can guide the design, It aims, to provide reference guidance for the calculation of track vibration characteristics and design of similar platform in the future.

Key words eigenvalue method; first order natural frequency; overall vibration; local vibration; track

0 引言

随着人类社会的发展, 科技的进步, 越来越多的理论被付诸于实践, 方便了人们的生活。早在 19 世纪初, 轨道交通已有了初步应用。到 21 世纪, 轨道交通的应用已遍布世界各个角落。关于轨道系统研究的文献颇多, 诸如火车轨道、城际轻轨、矿井运输轨道等^[1-3], 有关轨道的振动特性研究集中于车辆—轨道耦合、不平顺激励、人体舒适度等方面^[4-8], 有关轨道振动特性的模拟研究鲜有文献。

本文以某水池轨道系统为研究对象, 考虑支座对轨道固有频率的影响, 基于有限单元采取不同方法, 对比评估轨道的振动特性, 指出不同方法的特点及工程中针对不同方法的取舍, 旨在为以后设计中有关轨道振动特性计算及相似平台设计提供参考指导。

1 计算模型

轨道系统主要包括安装基础、可调支座和轨道, 已知边界条件轨道为 QU100 钢轨, 通过以一定间距均布固定在可调支座上, 可调支座安装在安装

基础上,安装基础一般通过基建预埋成型。振动设计中,既要避免低频振动引起的人体不适,又要考虑高频振动产生的噪声。

自由状态下,固有频率主要取决于刚度质量

比,在轨道系统中,轨道安装基础间距对轨道刚度影响很大。设轨道系统安装基础间距为 L ,则轨道支撑结构示意图如图 1 所示。



图 1 轨道支撑承载示意图

Fig. 1 Schematic diagram of track support bearing

大型设备中,局部振动较明显,整体振动在低阶频域往往能达到几百赫兹以上,故一般考核其低阶频域特性。本文拟采用三维变形体单元、三维变形壳单元、三维变形梁单元分别建立轨道有限元模型,基于特征值法,计算轨道系统一阶固有频率,对比分析结果,找出规律,总结可指导设计性的结论。

为便于对比计算分析,将 QU100 钢轨截面模型化后如图 2 所示,初取安装基础间距 $L = 1\ 050\text{ mm}$,已知 QU100 钢轨高度 $h = 150\text{ mm}$,则轨道跨高比 $\lambda = \frac{L}{h} = 7$,轨道有限元模型如图 3 所示。

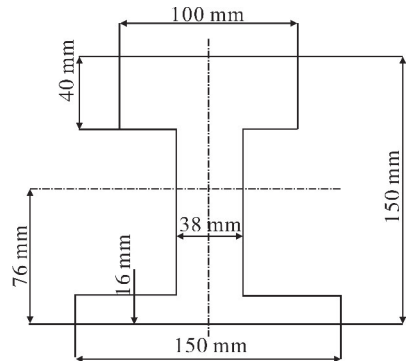
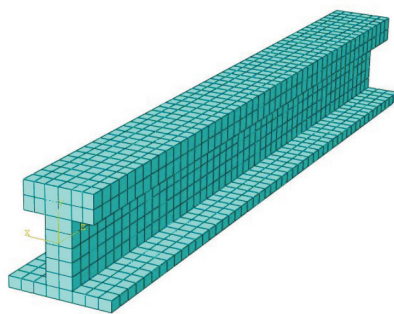
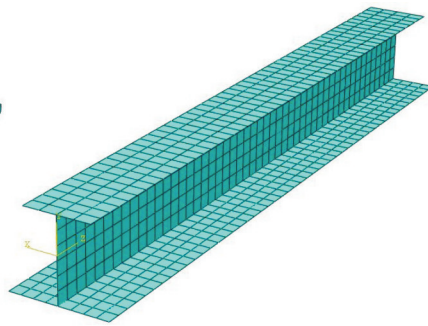


图 2 钢轨模型化后截面

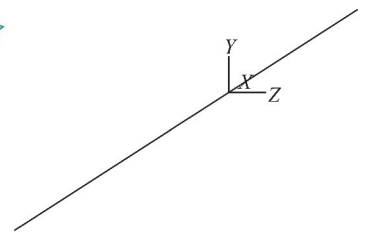
Fig. 2 Cross section of steel track after modularization



体单元



壳单元



梁单元

图 3 轨道有限元模型

Fig. 3 Finite element model of track

2 计算方法

根据经验公式,两端固定等截面杆、梁的横向振动固有频率和纵向振动固有频率为

$$\omega_{Hn} = \frac{a_n^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho_l}} \quad (1)$$

$$\omega_{Zn} = \frac{i\pi}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量,Pa; J 为截面惯性矩, m^4 ; l 为杆、梁长度,m; ρ_l 为线密度, kg/m ; ρ 为密度, kg/m^3 ; a_n 、 i 为振型常数。

该公式适用于大跨度、不会产生局部振动、截面形状简单的梁、杆模型整体固有频率计算,对于比较复杂的结构,采用有限单元法能更好地模拟实际工况。根据虚功原理,可推导出单元的刚度矩阵 k 和质量矩阵 m 为

$$k = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ \frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$m = \frac{\rho Al}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22l & 0 & 54 & -13l \\ 0 & 22l & 4l^2 & 0 & 13l & -3l^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13l & 0 & 156 & -22l \\ 0 & 13l & -3l^2 & 0 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： ρ 、 E 、 A 、 I 和 l 分别为材料的密度、弹性模量、

单元横截面面积、惯性矩和单元长度，根据频率方程，即

$$|k - \omega^2 m| = 0 \quad (5)$$

联合式(3)-(5)，即可求得体系的自振频率。

3 结果分析

根据安装基础间距 $L = 1\ 050\ \text{mm}$ ，跨高比 $\lambda = 7$ ，分别采用三维变形体单元、壳单元、梁单元模拟 QU100 钢轨，设定相同边界条件，基于特征值法，计算轨道一阶固有频率，如图 4 所示。

由图 4 可知，采用体单元模拟的 QU100 钢轨一阶固有频率为 396.8 Hz，壳单元一阶固有频率为 415.3 Hz，梁单元一阶固有频率为 407.0 Hz，三者频率值相近。体单元一阶振型为 QU100 钢轨底面中部局部振动，壳单元和梁单元一阶振型为 QU100 钢轨整体侧向振动，这是由于壳单元和梁单元无法像体单元一样真实反应模型厚度，无法计算厚度方向上局部振动所致。由此可见，当 QU100 钢轨跨高比 $\lambda = 7$ 时，不宜采用壳单元和梁单元模拟轨道计算其振动频率。

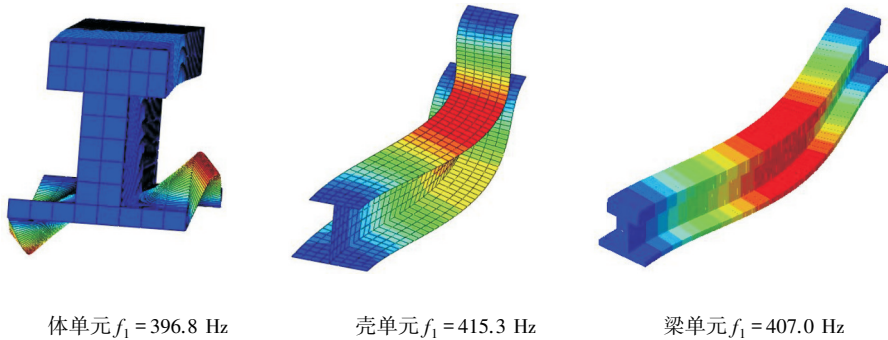


图 4 轨道一阶固有频率

Fig. 4 First order natural frequency of track

为对比分析不同网格密度对计算结果的影响，更改体单元模拟轨道的网格密度，验证计算方式的准确性，如图 5 所示，采用不同网格密度体单元模拟的 QU100 钢轨一阶固有频率计算结果一致。

为进一步研究 QU100 钢轨跨高比 λ 与三维变形体单元、壳单元、梁单元基于特征值法的频率计算特点，设定如表 1 所示工况。

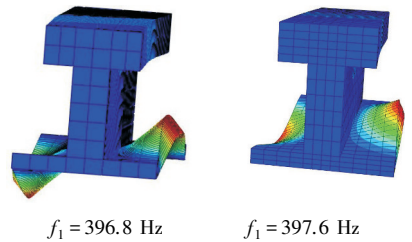


图 5 不同密度网格轨道一阶固有频率

Fig. 5 First order natural frequency of track with grids of different density

表 1 计算工况

Table 1 Calculation conditions

工况编号	安装基础间距 L/mm	跨高比
1	1 350	9
2	1 275	8.5
3	1 200	8
4	1 125	7.5
5	1 050	7
6	975	6.5
7	900	6
8	825	5.5
9	750	5

根据表 1,分别采用三维变形体单元、壳单元、梁单元模拟轨道,施加相同边界条件,计算其一阶固有频率,如表 2 所示。

表 2 不同工况轨道一阶固有频率

Table 2 First order natural frequency of track under different conditions

工况	体单元/Hz	壳单元/Hz	梁单元/Hz
1	269.6	259.7	260.8
2	300.2	289.3	289.4
3	335.8	324.1	322.6
4	375.8	365.5	361.4
5	396.8(局部振动)	415.3	407.0
6	403.0(局部振动)	475.7	460.5
7	407.8(局部振动)	550.2	523.4
8	412.4(局部振动)	643.3	596.8
9	416.8(局部振动)	817.8	682.2

由表 2 可知,当 $\lambda \leq 7$ 时,采用三维变形体单元模拟计算出的轨道一阶固有频率为 QU100 钢轨底面中部局部振动,采用壳单元和梁单元模拟计算出的轨道一阶固有频率为 QU100 钢轨整体侧向振动;且采用壳单元和梁单元模拟计算出一阶固有频率值均大于体单元模拟计算出的频率值,采用壳单元模拟计算出的轨道一阶固有频率值大于梁单元模拟计算出的频率值。当 $\lambda \geq 7.5$ 时,采用三维变形体单元模拟计算出的轨道一阶固有频率和采

用壳单元和梁单元模拟计算出的频率值一致,一阶振型均为 QU100 钢轨整体侧向振动。

由此可知,当 $\lambda \leq 7$ 时,轨道一阶振动首先发生在 QU100 钢轨底面中部局部振动,由于壳单元和梁单元无法真实模拟 QU100 钢轨各个尺寸方向上的厚度,无法计算出局部振动,计算出的 QU100 钢轨整体侧向一阶固有频率大于体单元模拟计算出局部振动频率;由于梁单元无法像壳单元模拟 QU100 钢轨各个方向尺寸,无法模拟尺寸方向引起的刚度不均匀性,计算值较壳单元小。

当 $\lambda \geq 7.5$ 时,由于轨道一阶振动首先发生在 QU100 钢轨整体侧向振动,采用三维变形体单元、壳单元、梁单元模拟计算出的频率值差异不大。

表 3 工况 5~9 轨道整体侧向一阶固有频率

Table 3 First order natural frequency of overall lateral track under condition 5~9

工况	频率/Hz
5	435.2
6	496.7
7	573.7
8	670.5
9	793.7

采用三维变形体单元模拟计算轨道整体侧向一阶固有频率,如表 3 所示,QU100 钢轨底面发生多次局部振动后出现整体侧向一阶振型,并伴有底面振动。对比分析不同跨高比下,不同单元类型模拟计算的轨道一阶振动频率,如图 6 所示。

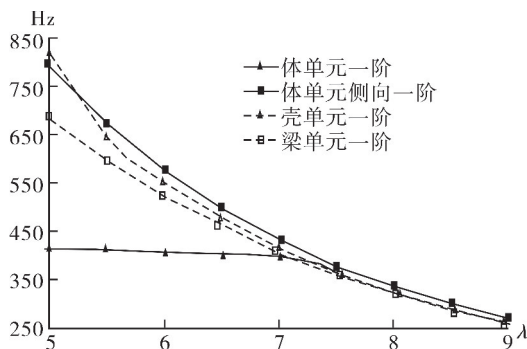


图 6 轨道一阶振动频率

Fig. 6 First order vibration frequency of track

由图 6 可知,轨道一阶固有频率随着跨高比的增大而减小;采用体单元模拟计算轨道一阶固有频

率,当振型为局部振动、跨高比时,频率值变化不明显,当跨高比 $\lambda \geq 7.5$ 时,频率值变化较明显;采用体单元模拟计算轨道一阶固有频率,当振型为整体侧向振动时,频率值变化较平滑,有规律可循,可采用最小二乘法拟合频率关于跨高比的函数;采用壳单元、梁单元模拟计算轨道一阶固有频率,当跨高比 $\lambda \geq 7.5$ 时,轨道一阶振型均为整体侧向振动,其频率值与体单元模拟计算出的频率值一致,变化趋势一致,计算结果具有参考价值;采用壳单元、梁单元模拟计算轨道一阶固有频率,当跨高比 $5 \leq \lambda \leq 7$ 时,梁单元、壳单元与体单元一阶频率值差异较大、变化趋势不一致,壳单元与体单元侧向一阶频率值相近,梁单元、壳单元与体单元侧向一阶频率值变化趋势存在差异,其计算结果不具参考价值。

4 结束语

本文以某水池轨道系统为研究对象,考虑支座对轨道固有频率的影响,采用三维变形体单元、三维变形壳单元、三维变形梁单元分别建立轨道有限元模型,基于特征值法,计算轨道系统一阶固有频率,对比分析结果,找出规律;旨在为以后设计中有关轨道振动特性计算及相似平台设计提供参考指导。主要得出结论如下:

1) 轨道一阶固有频率随着跨高比的增大而减小,当轨道跨高比 $\lambda \geq 7.5$ 时,轨道一阶振动为局部振动,当轨道跨高比时,轨道一阶振动为整体侧向振动;

2) 当轨道跨高比 $\lambda \leq 7$ 时,轨道一阶振动首先发生在 QU100 钢轨底面中部局部振动,壳单元和梁单元无法模拟计算出局部振动;

3) 采用体单元模拟计算轨道一阶固有频率,当振型为局部振动时,频率值变化不明显,当振型

为整体侧向振动时,频率值变化较平滑,有规律可循,可采用最小二乘法拟合频率关于跨高比的函数;

4) 采用壳单元、梁单元模拟计算轨道一阶固有频率,当振型为局部振动时,频率值与体单元模拟计算出的频率值、变化趋势均存在差异,其计算结果不具参考价值,当振型为整体振动时,频率值与体单元模拟计算出的频率值一致,变化趋势一致,计算结果具有参考价值。

参考文献

- [1] 周顺华,张小会,杨新文,等.轨道交通隧道基底刚度对共建结构的振动影响分析[J].同济大学学报,2014,42(6):887-893.
- [2] 石文博,缪林昌,王正兴,等.轨道参数对无砟轨道振动特性的影响分析[J].东北大学学报,2015,36(7):1056-1064.
- [3] 张世怀.矿井轨道运输车辆垂向耦合振动研究[D].西安:西安科技大学,2010.
- [4] 孙文静,周劲松,宫岛.基于 Timoshenko 梁模型的车辆-轨道耦合系统垂向随机振动分析[J].机械工程学报,2014,50(18):134-141.
- [5] 左言言,常庆斌,耿烽,等.轨道高低不平顺激励下的车体振动仿真[J].江苏大学学报,2011,32(6):647-651.
- [6] 张辰辰.高架轨道交通引起的环境振动对人体舒适度的影响研究[D].南京:东南大学,2010.
- [7] 雷晓燕,吴神花,张斌.车辆-轨道非线性耦合系统交叉迭代算法及应用[J].噪声与振动控制,2016,36(4):113-119.
- [8] 徐金辉,王平,汪力,等.基于频域分析方法的轨道高低不平顺敏感波长的研究[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(2):683-689.