

DOI: 10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2023.06.012

柔性车体与构架对车辆运行平稳性的影响研究

张天周

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:为了研究柔性车体、柔性构架对车辆运行平稳性的影响,通过引入国内某型号的动车组车体及转向架构架的有限元模型,分别建立此车型的刚性车体-刚性构架、刚性车体-柔性构架、柔性车体-刚性构架、柔性车体-柔性构架4种动力学模型并进行分析。结果表明:4种模型中,车体、构架的双重弹性效应会提升车体的临界速度,柔性车体的存在能够更好地反映车体的横向、垂向弯曲振型。研究结果可为保证高速列车在整个生命周期中具有良好平稳性提供参考和依据。

关键词:高速动车;刚柔耦合;蛇行运动稳定性;运行平稳性

中图分类号:U266.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)06-0050-04

Study on Influence of Flexible Body and Frame on Vehicle Running Stability

ZHANG Tianzhou

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to study the influence of flexible body and flexible frame on vehicle running stability, four dynamic models of rigid body-rigid frame, rigid body-flexible frame, flexible body-rigid frame and flexible body-flexible frame are established and analyzed by introducing the finite element model of a domestic EMU body and bogie frame. The results show that in the four models, the critical speed of the car body increases under the dual flexible effect of the car body and frame, and the existence of the flexible body better reflects the lateral and vertical bending vibration modes of the body, which provide a reference and basis for ensuring the good stability of the high-speed train in the whole life cycle.

Keywords: high-speed train; rigid flexible coupling; hunting stability; running stability

0 引言

随着高速铁路的快速发展,我国对高速列车的核心技术以及制造工艺提出了更高的要求,同时也对高速列车运行时各项动力学指标的要求也不断严苛^[1]。对于车辆系统而言,车速的提高和轻量化的设计会使车体和构架等主要承载部件的弹性振动越来越显著,对于刚度较低的部位会产生振动恶化等问题。

在以往的研究中,车体、构架等承载部件被视为刚体结构,无法准确地模拟真实的车辆动力学特性,而车辆系统中关键部件的弹性模态日益凸显,各个部件本身的弹性变形已经不能忽略^[2]。所以在对轨道车辆的研究中,应将车体、构架考虑成柔性体,结合相关理论,了解车辆运行过程中刚性体与柔性体对系统的影响,揭示二者对车体运行中平稳性和安全性的影响^[3-4],使仿真结果更加贴合实际。

1 车辆-轨道动力学模型

1.1 动车多刚体模型

本文根据国内某型号动车组的结构参数,利用

Simpack 仿真软件建立其多刚体动力学模型。单车车辆动力学模型主要包括1个车体、2个构架、4个轮对和8个轴箱,共计50个自由度。此车辆模型采用子结构方法进行建模,各刚体部件通过铰、约束和力元与系统或相互之间进行连接,各个悬挂弹簧、减振器均依据实际情况进行建模,并考虑各减振器和轮轨接触的非线性特性。

道路工况设置为半径为8000m,超高为175mm的曲线线路工况,轨道激励设置方面采用与车辆运行轨道实际状态相近的武广线路轨道随机不平顺作为线路激励。

1.2 柔性体模型的建立

以此动车组车体、转向架构架为分析对象,建立二者的刚柔耦合动力学模型。为了提高求解效率,节省计算时间,本文在ANSYS中采用Guyan缩减方法^[5]降低车体有限元模型、构架有限元模型的总体自由度,形成缩减自由度子结构模型。对于整个车体共选取594个节点,3564个自由度,整个构架共选取567个节点,3402个自由度,最后完成主自由度缩减。随后将生成的超单元文件(.sub)调入ANSYS程序中进行模态求解。为了满足动态分析的要求,对主自由度缩减前后的车体截取150Hz以内的模态、构架250Hz以内的模态进行对比分析,发现动车组车体全模态频率和振型与缩减模态十分相近,相对误

作者简介:张天周(1998—),男,河北定州人,硕士研究生,研究方向为车辆系统动力学, ztz181933@163.com。

差控制在 10% 以内,保证了刚柔耦合动力学模型的分析精度^[6]。

在 Simpack 软件中利用有限元计算的.cdb 和.sub 文件生成车体和构架弹性体.fbi 文件,建立如图 1—图 4 所述的 4 种动力学模型。

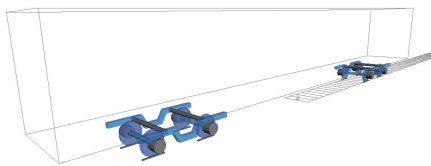


图 1 刚性车体-刚性构架模型

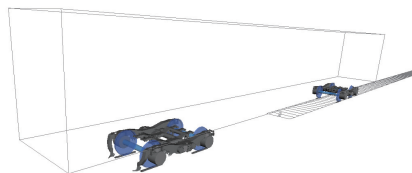


图 2 刚性车体-柔性构架模型

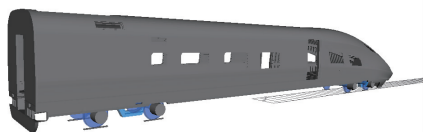


图 3 柔性车体-刚性构架模型

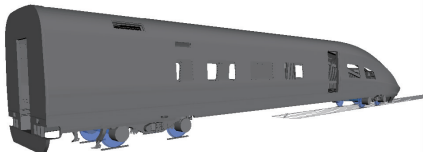


图 4 柔性车体-柔性构架模型

2 蛇行运动稳定性

动车组在线路上高速运行时,临界速度和平稳性是所有研究者关注的焦点。

利用渐进稳定性计算蛇行运动临界速度和分岔图,也就是通过极限环来判断蛇行运动的收敛情况。本文将重点放在非线性临界速度的计算方面,根据文献[7],采用恒速法,即在恒定速度下观察轮对的横移运动,并对出现的情况做后续的升速和降速,通过对轮对横移状态转变的观察来确定临界速度。车辆的临界速度必须远大于其最高运行速度,这样才能保证车辆在实际运行中不会因自激而出现蛇行失稳的危险。此动车组的实际最高运行速度为 370 km/h。

通过以上描述的计算方法,可以得到车辆以某一速度

下通过具有扰动轨道后的轮对蛇行运动幅值,整理可得如图 5 所示的 4 种动力学模型的轮对横移极限环图。

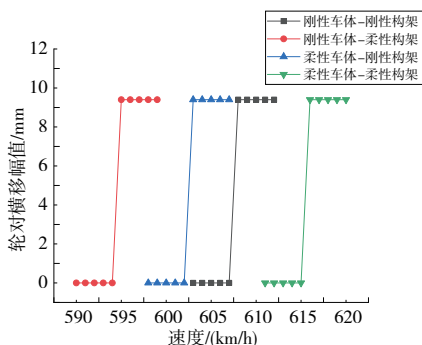


图 5 轮对横移极限环图

由图 5 可以看出刚性车体-刚性构架非线性临界速度为 608 km/h,刚性车体-柔性构架为 595 km/h,柔性车体-刚性构架为 603 km/h,柔性车体-柔性构架为 616 km/h,均大于最高运行速度,能够满足运行要求且稳定性余量较大。除此之外,在同一工况下,多刚体模型的临界速度总是大于车体、构架刚柔耦合模型的临界速度,但小于车体、构架的双重弹性效应下的临界速度。

3 运行平稳性

车辆各部件振动动态响应是衡量车辆系统动力学特性的重要指标,单节车辆运行平稳性主要通过观察车辆运行过程中车体的横垂向振动动态响应反映。本文选取车体底架中心位置作为参考点表征车体的振动特性,对比 4 种模型在同一工况运行时车体的振动动态响应结果以及相关指标计算结果,了解将车体、构架考虑为刚性体和柔性体的区别,观察柔性车体、构架对车辆系统动力学有何影响。

为了方便描述,将刚性车体-刚性构架模型、刚性车体-柔性构架模型、柔性车体-刚性构架模型、柔性车体-柔性构架模型分别以模型 1、模型 2、模型 3、模型 4 进行代替。

3.1 横向运动平稳性

4 种模型以 370 km/h 的速度通过被测线路时车体中部横向振动加速度时域及频域对比如图 6—图 9 所示。为了方便观察,将模型 1—模型 4 的相关曲线放于一起(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

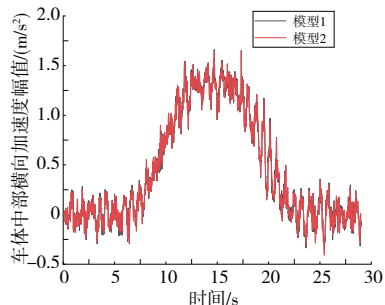


图 6 模型 1、模型 2 车体中部横向加速度时域变化

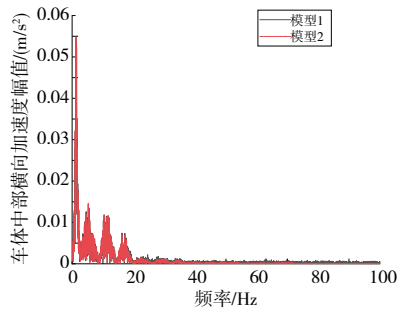


图7 模型1、模型2车体中部横向加速度频域变化

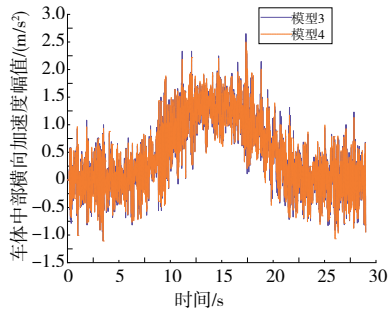


图8 模型3、模型4车体中部横向加速度时域变化

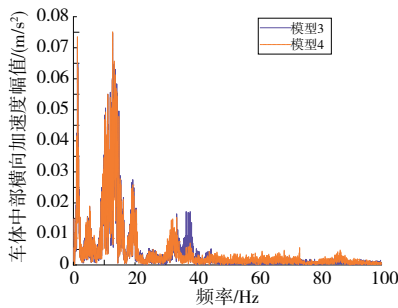


图9 模型3、模型4车体中部横向加速度频域变化

通过对比图6—图9的4种模型车体中部横向加速度幅值时域、频域变化图像可知,模型1、模型2在时域、频域的变化具有很大的相似性,从而说明柔性构架对车体中部横向振动动态响应影响不大;模型3、模型4在具备较大相似性的同时,也在加速度幅值、频域范围方面同模型1、模型2存在较大区别。

从4种模型横向振动时域对比可知,柔性车体的存在使车体的横向振动加速度幅值大于刚性体,单位时间内加速度幅值变化情况也更加剧烈,振动频率也比刚性车体高。从4种模型横向振动频域对比可知,刚性体和柔性体均在1.3 Hz、5.3 Hz、12.2 Hz、18.0 Hz附近发生共振现象,表明车体的横向振动主要集中在20.0 Hz以下的低频段;柔性车体的存在会使12.2 Hz附近频段的振幅急剧增大,同时也增加了32.0 Hz、37.5 Hz的共振频段,其中模型4在37.5 Hz附近频段的振幅要比模型3大。总体来看,柔性车体各频率的振幅均大于刚性车体。与刚性车体相比,柔性车体能够更好地反映车体的横向弯曲振型,由此可知将车体设置为柔性体,更能描述车体的振动特性,使理论研究更加符合实际的情况。

3.2 垂向运动平稳性

4种模型以370 km/h的速度通过被测线路时车体中部垂向振动加速度时域及频域对比如图10—图13所示。

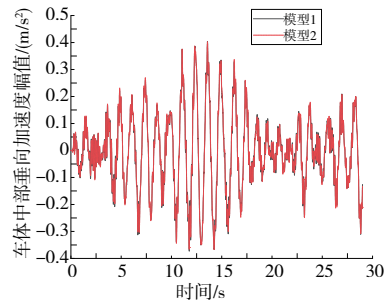


图10 模型1、模型2车体中部垂向加速度时域变化

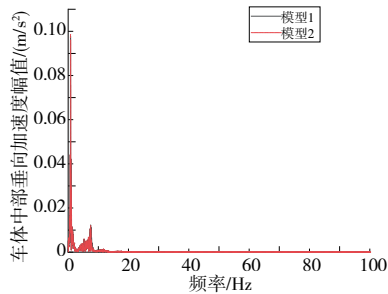


图11 模型1、模型2车体中部垂向加速度频域变化

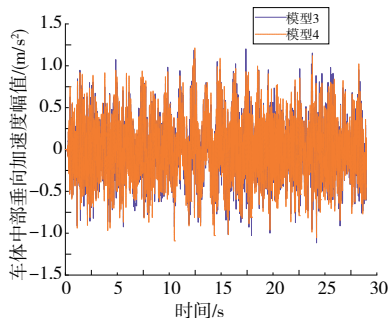


图12 模型3、模型4车体中部垂向加速度时域变化

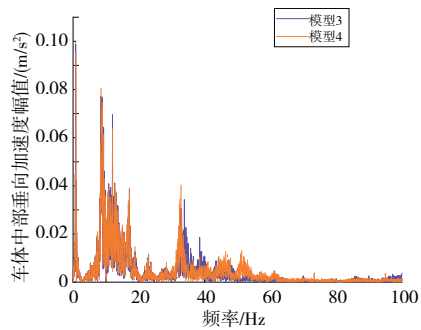


图13 模型3、模型4车体中部垂向加速度频域变化

对比图10—图13,依然能够发现模型1、模型2在时域、频域的变化具有很大的相似性,柔性构架对车体中部垂向振动动态响应影响不大,模型3、模型4的对比同样

也说明了这个道理。

从4种模型垂向振动时域对比可知,柔性车体的垂向振动加速度幅值大于刚性车体,单位时间内加速度幅值变化情况也更加剧烈,振动频率也比刚性车体高。从4种模型垂向振动频域对比可知,刚性车体的振动主频主要集中在0.8 Hz和7.4 Hz附近,柔性车体的振动主频范围明显比刚性车体大,在0.8 Hz、8.5 Hz、12.0 Hz、17.0 Hz、33.8 Hz、45.0 Hz附近均发生共振现象。同时,在车体、构架的双重弹性效应下,模型4在51.3 Hz附近频段也会有较大振幅。总体来看,柔性车体的存在使主频范围往高频段移动,并且各频率的振幅均大于刚性车体。与刚性车体相比,柔性车体能够更好地反映车体的垂向弯曲振型,因此能够更好地研究车体在实际情况下的振动特性。

3.3 平稳性指标对比

评价高速动车运行平稳性一般采用车体振动加速度和 Sperling 指标^[8],通过仿真得到4种模型车体中部横、垂向振动平稳性指标,对比结果如图14、图15所示。

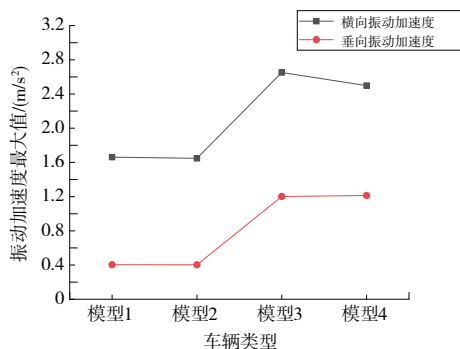


图14 振动加速度最大值对比

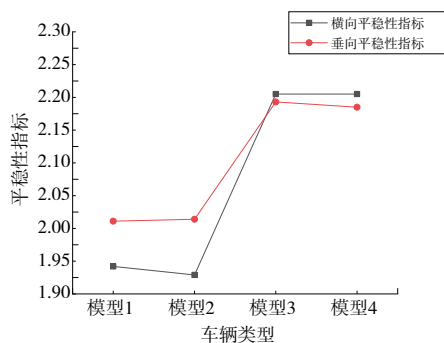


图15 平稳性指标对比

由图14、图15可知,横向振动特性和垂向振动特性

呈现出相同的规律,模型1、模型2在振动加速度最大值以及平稳性指标具有很大的相似性;模型3、模型4在具备较大相似性的同时,其相关指标值也要大于模型1、模型2。

总体而言,柔性车体的存在会使车体的横向、垂向振动加速度幅值增大,平稳性指标增大,即多柔性体模型和模型3运行平稳性要差于多刚体模型和模型2。这主要是由于柔性车体包含较高频率的弹性振动,因此在进行车辆平稳性或舒适度分析时,有必要考虑车体柔性,以保证计算结果更接近实际情况。

4 结语

1) 4种动力学模型的非线性临界速度均高于最高运行速度,能够满足运行要求且稳定性余量较大,其中多刚体模型的临界速度大于车体、构架刚柔耦合模型的临界速度,但是小于多柔性体的非线性临界速度。

2) 在横向振动特性和垂向振动特性方面,多刚体模型和刚性车体-柔性构架模型存在很大的相似性,多柔性体模型和柔性车体-刚性构架模型在具备较大相似性的同时,二者的振动加速度幅值以及主频范围也会增大,柔性车体的存在能够更好地反映车体的横向、垂向弯曲振型,使理论研究更加符合实际情况。

3) 柔性车体的横向、垂向平稳性指标要差于刚性车体,在进行车辆平稳性或舒适度分析时,有必要考虑车体柔性,以保证计算结果更接近实际情况。

参考文献:

- [1] 郝宇. 两种轴式转向架动力学性能对比分析[J]. 铁道机车与动车, 2018(2):17-22.
- [2] 汤劲松,王云鹏,徐聪. 铁道客车关键系统的模态规划研究[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(4):57-63.
- [3] 高浩. 车辆系统刚柔耦合动力学仿真方法及仿真平台研究[D]. 成都:西南交通大学, 2013.
- [4] 宋浩,孟建军,董世昌. 地铁车辆车体关键连接结构振动特性研究[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(6):121-128.
- [5] 王帆. 高速客车转向架构架载荷特性及结构振动研究[D]. 北京:北京交通大学, 2007.
- [6] 黄彩虹,曾京,邬平波,等. 铁道客车车体弹性振动减振研究[J]. 工程力学, 2010, 27(12):250-256.
- [7] 陈杨. 基于 SIMPACK 的高速列车小幅蛇行运动仿真研究[D]. 成都:西南交通大学, 2019.
- [8] 岳鹏. 考虑多柔性体的车辆-轨道耦合动力学分析[D]. 兰州:兰州交通大学, 2019.

收稿日期:2022-05-05