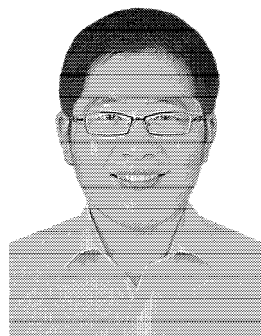


研
究
开
发

动车组转向架空气弹簧支撑模式研究

戚 壮¹, 李 芾¹, 孙树磊¹, 黄运华¹, 虞大联²

(1. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031;
2. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司 国家工程实验室, 山东 青岛 266111)



作者简介: 戚 壮(1988-), 男, 博士研究生, 研究方向为高速列车空气弹簧与系统动力学。

摘 要: 基于空气弹簧的气动力学模型与车辆的多体动力学模型, 对2点支撑模式与4点支撑模式下车辆的动力学性能进行了对比研究。此外, 分析了2种改进的支撑模式: 增加抗侧滚扭杆的4点支撑模式与差压阀可调的前3点支撑模式。研究结果表明, 采用2点支撑模式与4点支撑模式的动车组具有较相似的动力学特性; 增加抗侧滚扭杆的4点支撑模式能够保证故障状态下车辆的运行安全性; 差压阀可调的前3点支撑模式能够在一定程度上提高车辆的曲线通过性。

关键词: 支撑模式; 车辆系统动力学; 动车组; 空气弹簧; 高速列车; 稳定性; 平稳性; 曲线通过性能

中图分类号: U266.2; TH135 文献标识码: A 文章编号: 1000-128X(2013)05-0009-04

A Study on the Air Spring Suspension Morphologies of EMUs Bogie

QI Zhuang¹, LI Fu¹, SUN Shu-lei¹, HUANG Yun-hua¹, YU Da-lian²

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. National Engineering Laboratory for System Integration of High Speed Train, CSR Qingdao Sifang Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China)

Abstract: Based on the pneumatic model of air spring and the dynamics MBS model of EMUs, the dynamics behaviors of EMUs in the 2-point configuration and 4-point configuration were studied contrastively. What's more, two improved suspension morphologies were analyzed, including the 4-point configuration with anti-rolling bar and the front 3-point configuration with the controlled differential pressure valve. The results of the research indicated that: the EMUs with 2-point and 4-point configurations possessed the similar dynamics behaviors; the 4-point configuration with anti-rolling bar could ensure the running safety of EMUs in the fault cases; the front 3-point configuration with the controlled differential pressure valve could improve the EMU's ability of passing curve in certain extent.

Key words: suspension morphology; vehicle system dynamics; EMUs; air spring; high speed train; stabilization; stationary; curve-through performance

0 引言

现代高速动车组的中央悬挂系统多采用无摇枕、无摇动台的空气弹簧多点支撑结构, 该结构有效地降低了转向架自重、节省了安装空间、提高了车辆的动力学性能^[1]。目前, 动车组中央悬挂支撑模式主要有2种: 一种是转向架左右两侧空气弹簧连通、安装抗侧滚扭杆的2点支撑模式, 其广泛应用于欧系动车组, 如ICE系列; 另一种是转向架左右两侧空气弹簧之间安装差压阀的4点支撑模式, 其广泛应用于日系动车组,

如新干线E2系列^[2]。对于我国的高速动车组, CRH₂采用了4点支撑模式^[3], CRH₁、CRH₃和CRH₅均采用了2点支撑模式, 而CRH380A则在4点支撑模式的基础上增加了抗侧滚扭杆。本文基于车辆系统动力学对中央悬挂的不同支撑模式进行对比研究, 以分析支撑模式对车辆动态特性的影响, 并介绍了2种改进的支撑模式, 以期对动车组中央悬挂的优化设计起到一定的借鉴作用。

1 计算模型

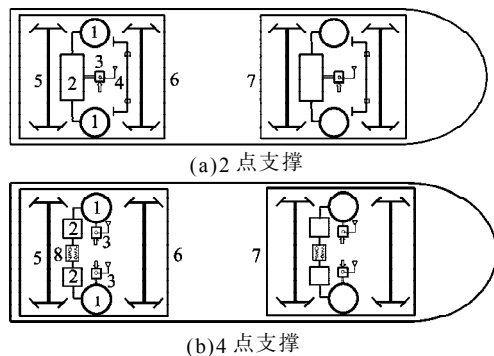
1.1 空气弹簧支撑模式与建模

广泛应用于动车组中央悬挂的2点支撑模式与4点支撑模式的拓扑结构如图1所示。在2点支撑模式下, 同一转向架左右两侧空气弹簧共用一个附加空气室,

收稿日期: 2013-03-26

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金资助(SWJTU11BR022, SWJTU12CX041)

两者保持连通状态。每个转向架上只有一个高度调整阀,同时为转向架两侧空气弹簧充气或放气,以调整车体高度。由于转向架两侧空气弹簧内部压力基本保持一致,2点支撑模式不能为车体提供抗侧滚力矩,因此2点支撑模式必须安装抗侧滚扭杆,以抑制车体的侧滚运动。在4点支撑模式下,同一转向架左右两侧空气弹簧各有一个附加空气室和一个高度调整阀,且两者间装有差压阀。当两侧空气弹簧内压力差未达到差压阀阈值时,差压阀关闭,两侧空气弹簧相互独立;只有当某一侧空气弹簧发生破裂或泄漏使得两侧内压力超过差压阀阈值时,差压阀打开,避免车体倾覆。由于左右两侧空气弹簧内压力可以不一致,因此可以为车体提供抗侧滚力矩,简化了转向架结构。但是,由于抗侧滚力矩由左右两侧空气弹簧提供,为保证车体的抗倾覆性,需要适当增加左右两侧空气弹簧的横向跨距。



1——空气弹簧; 2——附加空气室; 3——高度调整阀; 4——抗侧滚扭杆; 5——轮对; 6——后转向架; 7——前转向架; 8——差压阀

图1 支撑模式拓扑图

空气弹簧悬挂系统是一个多物理变量的非线性气动装置,需要基于流体力学和气动力学原理建立其动力学模型^[4]。假设空气弹簧内部气体为理想气体,满足理想气体状态方程,且将气体的热力学过程视为等熵过程。设定橡胶气囊内任意瞬态气体的压强、体积和质量分别为 p_b 、 V_b 和 m_b ,附加空气室内任意瞬态气体的压强、体积和质量分别为 p_t 、 V_t 和 m_t ,根据气动力学原理,建立橡胶气囊与附加空气室内部压力的微分方程分别为^[5]:

$$\dot{p}_b = -\frac{nRT_{b0}}{V_b} \left(\frac{p_b}{p_{b0}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \dot{m}_b - \frac{np_b}{V_b} \dot{V}_b \quad (1)$$

$$\dot{p}_t = -\frac{nRT_{t0}}{V_t} \left(\frac{p_t}{p_{t0}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \dot{m}_t \quad (2)$$

式中: n 为气体的多变指数; R 为理想气体常数; p_{b0} 和 T_{b0} 分别为橡胶气囊气体的初始压强和温度; p_{t0} 和 T_{t0} 分别为附加空气室气体的初始压强和温度。

橡胶气囊与附加空气室之间连接管路中的气体可视为恒定质量块在管路中的运动,考虑气体的惯性效应和气体与管壁的摩擦损耗,基于流体力学公式,可得到管内气体的运动方程为^[6]:

$$m_p \ddot{x} + \frac{\rho \pi d^2}{8} \left(\lambda \frac{L}{d} + \xi \right) \dot{x}^2 + \frac{\pi d^2}{4} (p_b - p_t) = 0 \quad (3)$$

式中: m_p 为管内气体的质量; x 为管内气体的位移; ρ 为管内气体的密度; L 为连接管路长度; d 为连接管路内径; λ 、 ξ 分别为沿程阻力系数和局部阻力系数。

联立式(1)~(3)建立空气弹簧的非线性气动模型,再根据不同支撑模式的拓扑结构设定模型中各气动元件的连接方式,通过该气动模型计算空气弹簧的非线性悬挂力并输入至车辆动力学模型,实现联合仿真计算。

1.2 动车组动力学模型

将动车组整车动力学模型考虑成一个多刚体系统,共42个自由度,各个刚体的自由度如表1所示。多刚体系统中各刚体运动微分方程的矩阵形式为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + C(x, \dot{x}) + K(x, \dot{x}) = \{F(t)\} \quad (4)$$

式中: $[M]$ 为质量矩阵; $C(x, \dot{x})$ 为非线性悬挂阻尼力; $K(x, \dot{x})$ 为非线性悬挂弹簧力; $\{F(t)\}$ 为激励力矢量; x 为刚体某自由度的状态向量。

表1 车辆动力学模型自由度

刚体	纵向	横向	垂向	侧滚	点头	摇头
车体	✓	✓	✓	✓	✓	✓
构架 × 2	✓	✓	✓	✓	✓	✓
轮对 × 4	✓	✓			✓	✓
轴箱 × 8					✓	

在车辆动力学模型中,考虑轨接触几何关系为非线性单点接触,轮轨间的蠕滑力由Kalker简化蠕滑理论(FASTSIM)进行计算,抗蛇行减振器、横向减振器考虑为非线性力元,抗侧滚扭杆作为子结构植入车辆模型,空气弹簧的垂向力由上述气动模型输入。综上,在SIMPACK环境下建立的某型动车组车辆动力学模型如图2所示。基于此模型,对不同支撑模式下车辆的动力学特性进行分析。

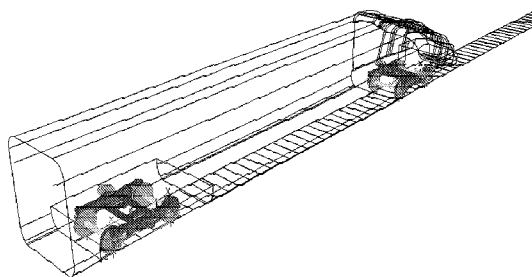


图2 动车组车辆动力学模型

2 2点支撑与4点支撑对比研究

2.1 车辆稳定性

首先对采用2点支撑模式与4点支撑模式的动车组进行稳定性计算。在计算中,设定一段100 m长的轨道激励,令车辆以不同的速度通过该段激励轨道后,观察轮对的横移量是否收敛,轮对横移量收敛下的最高速度即为该车的临界速度。2点支撑与4点支撑下轮对横移量的仿真结果如图3所示。由计算结果可知,2点

支撑模式下车辆的临界速度为788 km/h, 4点支撑模式下车辆的临界速度为806 km/h。在其他车辆动力学参数一致的情况下, 4点支撑比2点支撑的临界速度高2.3%, 可见支撑模式对车辆运行稳定性影响不大。

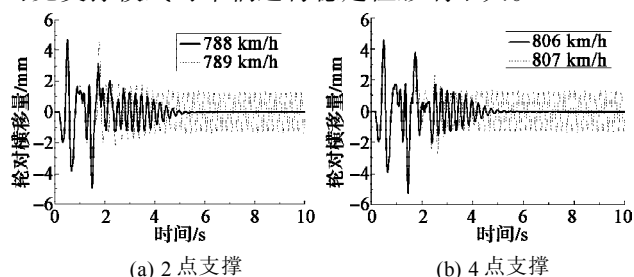


图3 车辆稳定性计算结果

2.2 直线运行平稳性

在对车辆稳定性进行计算后, 再对2种支撑模式下车辆的运行平稳性进行研究。计算中采用的轨道激励为京津高铁轨道谱, 在不同速度工况下计算车体的横向与垂向舒适度。平稳性指标 W 的计算公式为^[7]:

$$W = 7.08 \sqrt{\frac{10}{f} \frac{a^3}{f} F(f)} \quad (5)$$

式中: a 为车体的振动加速度; f 为车体的振动频率; $F(f)$ 为与振动频率有关的修正系数。

2点支撑模式与4点支撑模式的车体横向平稳性与垂向平稳性的计算结果分别如图4所示。由计算结果可知, 2点支撑模式与4点支撑模式下的横向平稳性基本一致, 但4点支撑模式的垂向平稳性略优于2点支撑模式。

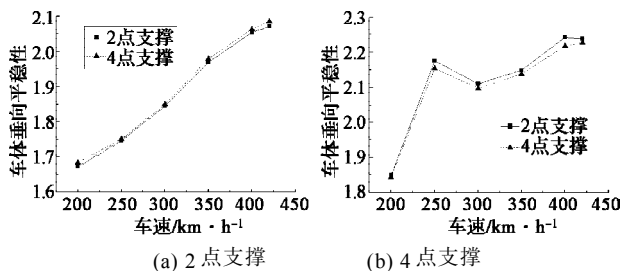


图4 车辆稳定性计算结果

2.3 准静态曲线通过性

将2点支撑与4点支撑模式下的车辆动力学模型以360 km/h的速度通过无扰动曲线, 以便更清楚地观察车辆通过曲线时各项指标的时间历程。设置该曲线为右曲线, 曲线半径为7 000 m, 超高为150 mm, 缓和曲线长度为650 m, 圆曲线长度为1 000 m。经计算, 2点支撑模式下前转向架左右两侧空气弹簧内压力的时间历程如图5(a)所示, 两侧空簧内压力变化基本一致, 内压力波动在1%左右; 4点支撑模式下前转向架左右两侧空气弹簧内压力的时间历程如图5(b)所示, 两侧空簧内压力变化相反, 内压力波动在5%左右。2种悬挂模式下轮对冲角与车体侧滚角的时间历程如图6所示。由图6可以看出, 2种支撑模式在通过曲线时, 轮对冲角基本一致,

但由于抗侧滚扭杆的作用, 2点支撑模式下车体的侧滚角要略小于4点支撑。

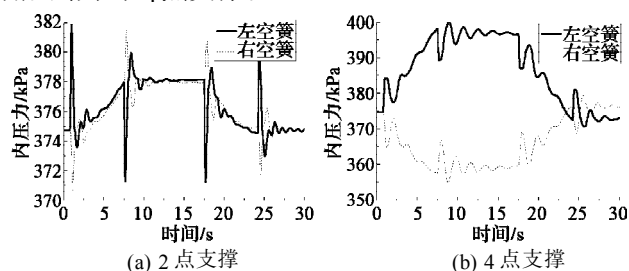


图5 空气弹簧内压力时间历程

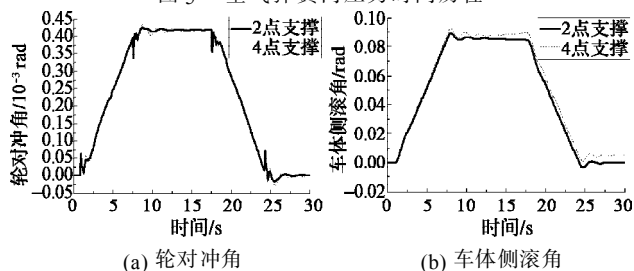


图6 轮对冲角与车体侧滚角时间历程

2.4 曲线通过安全性

对曲线添加轨道不平顺, 计算不同车速下2点支撑模式与4点支撑模式的车辆运行安全性。根据相关规范^[8], 安全性指标主要包括: 轮轨垂向力、轮轴横向力、脱轨系数和轮重减载率。经计算, 将各速度级下2种支撑模式的安全性指标进行对比, 如图7所示。由图7中曲线的变化趋势可知, 当动车组以小于300 km/h的速度通过曲线时, 车辆处于过超高状态; 当动车组以大于300 km/h的速度通过曲线时, 车辆处于欠超高状态。对于轮轨垂向力和轮重减载率2项安全性指标, 在欠超高工况下, 2种支撑模式基本一致。但是在过超高工况下, 2点支撑模式要略大于4点支撑模式; 对于轮轴横向力和脱轨系数2项安全性指标, 无论在何种工况下, 2种支撑模式都基本保持一致。

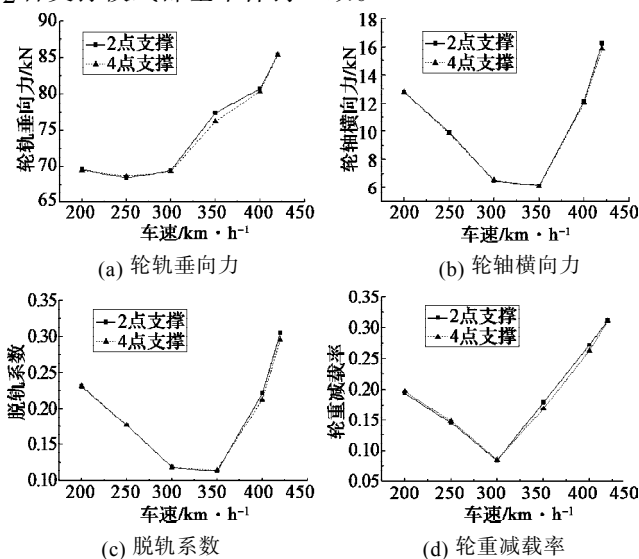


图7 2点支撑与4点支撑下的曲线通过安全性

直线稳定性与曲线通过性的计算结果表明, 虽然在有些工况下2种支撑模式的动力学指标略有差异, 但

这些差异均在较小的范围内。因此可以得出结论,中央悬挂采用2点支撑模式与采用4点支撑模式的动车组具有较相似的动力学特性。

3 2种支撑模式优化方案

3.1 增加抗侧滚扭杆的4点支撑模式

如前所述,2点支撑模式依靠抗侧滚扭杆提供车体的抗侧滚力矩;4点支撑模式依靠差压阀,使左右两侧空气弹簧产生压力差提供车体的抗侧滚力矩。对于2点支撑模式的动车组来说,一旦其抗侧滚扭杆失效,则车体的侧滚运动无法抑制;对于4点支撑的动车组来说,一旦其差压阀失效,则左右空气弹簧连通,相当于一种没有安装抗侧滚扭杆的2点支撑模式。为了避免这种故障支撑模式,可在4点支撑模式的基础上增加抗侧滚扭杆,提高车辆的抗倾覆性,其拓扑结构如图8(图中数字标注同图1)所示。

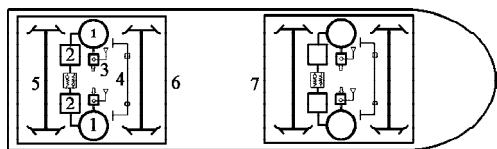


图8 增加抗侧滚扭杆的4点支撑模式

对增加抗侧滚扭杆的4点支撑模式和故障状态支撑模式分别进行曲线通过安全性计算,并将结果进行对比,如图9所示。由图9中的计算结果可看出,故障状态支撑模式的各项安全性指标均高于增加抗侧滚扭杆的4点支撑模式,特别是轮轨垂向力和轮重减载率2项安全性指标,故障状态支撑模式的计算结果要比增加抗侧滚扭杆的4点支撑模式高出约30%,严重影响车辆的运行安全性。对于增加抗侧滚扭杆的4点悬挂,当抗侧滚扭杆或差压阀失效时,仍能保证车辆具有正常的曲线通过性,因此提高了车辆的运行安全性。此外,将增加抗侧滚扭杆的4点支撑模式与未加抗侧滚扭杆的4点支撑模式的车体平稳性进行对比,由图10可以看出,增加抗侧滚扭杆后可提高车辆运行的平稳性。我国自

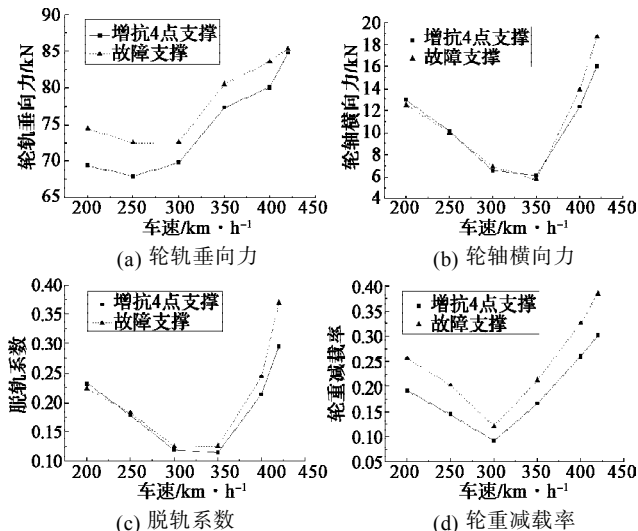


图9 增抗4点支撑与故障支撑的曲线通过安全性

主研制的CRH380A型动车组即采用了这种增加抗侧滚扭杆的4点支撑模式,可在一定程度上提高车辆的运行安全性和平稳性。

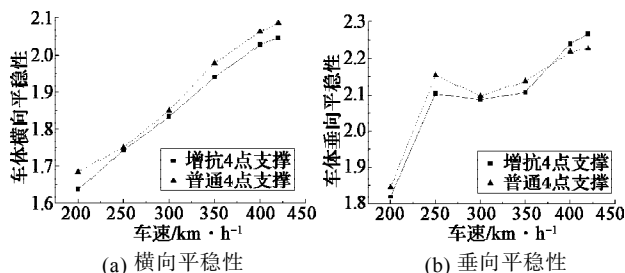


图10 增抗4点支撑与普通4点支撑的直线平稳性

3.2 差压阀可调的前3点支撑模式

借鉴汽车悬挂中的前3点支撑模式,即在4点支撑的基础上,取消前转向架左右两侧空气弹簧间的差压阀,使其连通,并在前后2个转向架上安装抗侧滚扭杆,其拓扑结构如图11(图中数字标注同图1)所示。相比于其他支撑模式,这种结构能够将车体的重量更均衡地分配到4个空气弹簧上,有利于提高车辆的曲线通过性。

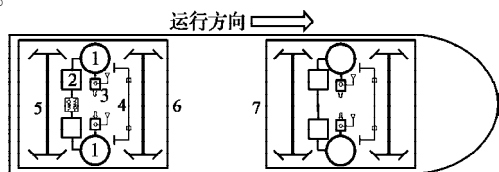


图11 前3点支撑模式

但是,这种支撑模式最大的缺点在于其非对称性。不同于汽车,轨道车辆一般要保证前后两方向均可正常运行。若上述前3点支撑模式的动车组向反方向运行,则前3点支撑将变为后3点支撑。对前3点支撑与后3点支撑的车辆曲线通过性进行计算,结果如图12所示。由图12中结果进行对比可知,相比于一般的2点支撑模式与4点支撑模式,前3点支撑模式可提高车辆的曲线通过性;但是对于后3点支撑模式来说,其曲线通过性反而降低。

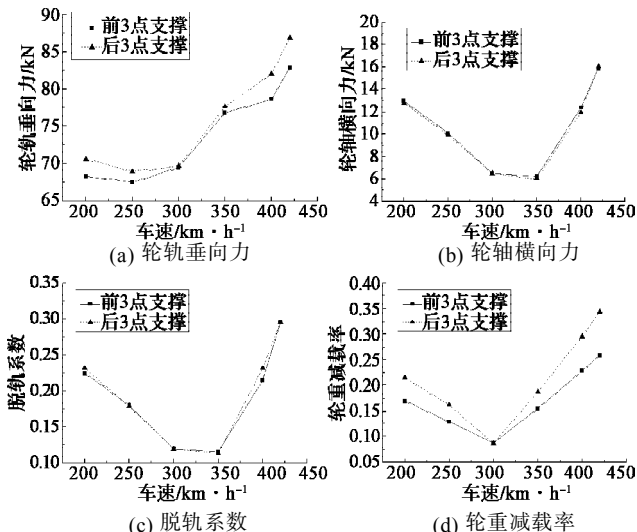


图12 前3点支撑与后3点支撑的曲线通过安全性

我国动车组一般都需要满足双向(下转第16页)

