

文章编号:1005-0523(2019)02-0041-06

空气弹簧失气后地铁车辆动力学性能研究

蒋益平,朱海燕,杨春辉

(华东交通大学机电与车辆工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:为了研究空气弹簧失气对地铁车辆动力学性能的影响,根据车辆系统动力学和非线性接触理论,建立了地铁车辆非线性动力学模型和空气弹簧失气状态下的黏滑接触力元模型,分析了地铁整车空气弹簧失气状态下地铁车辆的临界速度、轮轴横向力、轮轨横向力、脱轨系数、轮重减载率和平稳性指标并与空气弹簧正常状态进行了对比。结果表明:空气弹簧失气会使地铁车辆的临界速度降低,会使地铁车辆的脱轨系数、轮重减载率、横向平稳性和垂向平稳性明显增大,并且空簧失气对脱轨系数和垂向平稳性的影响尤为显著,因此必须密切关注空气弹簧的状态以保证地铁车辆平稳安全运行。

关键词:空气弹簧;失气;地铁;动力学性能

中图分类号:U271.92

文献标志码:A

以地铁为主的城市轨道交通是一种快捷、环保的大运量交通运输方式,经过50多年的发展,目前我国已经有包括北京、上海、广州等在内的一些大城市建成并运营地铁,但是随城市轨道交通而来的振动和噪声不仅影响周围环境,还直接影响到人们的生活和健康^[1]。为缓和振动,提高乘坐舒适性,现代地铁车辆均配备了两系悬挂系统以缓和振动,二系悬挂通常采用较为柔软的空气弹簧。空气弹簧作为地铁车辆二系悬挂的主要部件,不仅支撑车体质量,还起着隔离和衰减轮轨传递到车体的振动的重要作用,因此,一旦空气弹簧出现故障失气会对地铁车辆的动力学性能产生非常大的影响。

鉴于空气弹簧对铁道车辆的重要性,国内外都对空气弹簧开展了研究。Toyofuku^[2]利用理论方法研究了空气弹簧的空气室、附加空气室、节流孔和管路等对空气弹簧动态特性的影响,并进行了试验验证;高红星,池茂儒^[3-4]基于流体力学、空气动力学和热力学等理论,利用气体的质量流量相等原则以及辅助空间法,建立了辅助空间法空气弹簧非线性模型。罗仁^[5]建立了横-垂耦合的车辆系统非线性动力学模型,并结合空气弹簧系统模型分析了空气弹簧对车辆过曲线能力的影响;吴兴文^[6]分别建立了空气弹簧的等效模型、线性模型、非线性模型,并与车辆动力学模型联合仿真研究了空气弹簧模型对车辆动力学的影响。高浩^[7]研究了空气弹簧的刚度衰变特性和空簧失气后的非线性黏滑接触,并据此建立了空簧失气模型,利用该模型分析了空气弹簧失气后高速车辆的临界速度和与空簧失气对车辆动力学性能的影响。高浩,刘丽^[8-9]建立了车辆动力学模型,分析了高速动车组空簧失效过程。杨飞,赵旭东^[10-11]分析了空气弹簧支撑控制模式对车辆曲线通过性能的影响。

以上诸多研究主要集中在对空气弹簧刚度特性及空气弹簧建模的研究,而在空簧失气对地铁车辆动力学性能影响方面的研究较少,因此非常有必要研究空簧失气后地铁车辆动力学性能。基于此,本文以某地铁车辆为研究对象,按照文献[7]的方法建立黏滑接触-弹簧力元模型模拟空气弹簧失效,结合地铁车辆非线性动力学模型,分析整车空气弹簧失气后地铁车辆车辆临界速度、安全性、平稳性指标。

收稿日期:2018-10-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51665015);江西省教育厅项目(GJJ170358)

作者简介:蒋益平(1984—),男,讲师,研究方向为车辆系统动力学。

1 动力学模型

1.1 地铁车辆系统动力学模型

以某地铁车辆为例,建立非线性动力学模型用于计算分析。该地铁车辆一系采用转臂式轴箱定位方式,并有轴箱顶置钢弹簧和一系垂向液压减振器,二系悬挂为空气弹簧、二系垂向液压减振器和一套横向减振器,二系还设有高度控制阀、差压阀以及非线性横向止挡和Z字型牵引拉杆。车辆模型的主要技术参数:轴距 2 500 mm,轨距 1 435 mm,车轮直径 840 mm,采用 LM 型踏面,最大运行速度 100 km/h。

该地铁车辆系统包含 1 个车体、2 个构架、4 个轮对、8 个轴箱,其中车体、构架和轮对各取 6 个自由度,即伸缩、横移、浮沉、侧滚、点头、摇头;每轴箱取 1 个绕轮对旋转的自由度,即点头自由度,整个车辆系统共 50 个自由度,独立自由度 42 个,具体如表 1 所示。

表 1 地铁车辆自由度
Tab.1 Freedom of metro vehicle system

| 自由度 | 伸缩 | 横移 | 浮沉 | 侧滚 | 点头 | 摇头 |
|-------|----|----|----|----|----|----|
| 车体 | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 构架(2) | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 轮对(4) | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 轴箱(8) | — | — | — | — | √ | — |

针对地铁车辆的多刚体系统,可列出各刚体运动微分方程的矩阵如式(1)所示

$$M\ddot{Y}+C\dot{Y}+KY=F \quad (1)$$

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; Y 为自由度变量; F 为广义载荷矢量。

在建模过程中考虑轮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,横向减振器、横向止挡等悬挂元件考虑为非线性力元,轮轨均为新轮新轨状态,车轮等效锥度为 0.1,综合考虑以上因素,在 SIMPACK 环境下建立的地铁车辆非线性动力学模型如图 1 所示,基于此模型进行动力学分析。

1.2 空气弹簧模型

空气弹簧是地铁车辆二系悬挂的主要组成部分,由空气弹簧本体、附加空气室、高度控制阀、差压阀和滤尘器等构成^[12]。空气弹簧本体主要由橡胶气囊、上盖板、应急橡胶堆等零部件组成,且空簧上盖板与应急橡胶堆上的支承座表面均设置有磨耗板。空气弹簧采用左右空簧由差压阀连接的四点支撑方式,当一个空气弹簧失气时,由于差压阀的作用,转向架左右的空气弹簧一起失气,空簧失气后车辆由应急橡胶堆支撑,

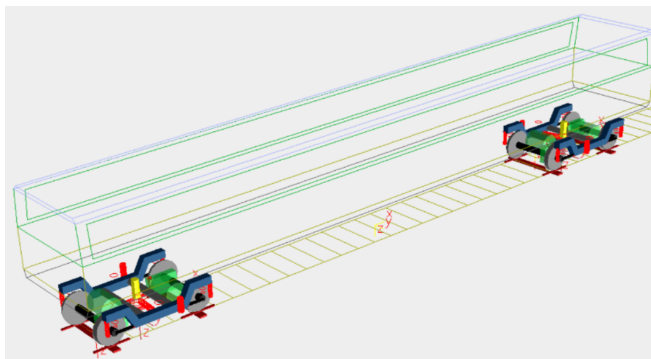


图 1 车辆动力学模型

Fig.1 Nonlinear dynamic model of metro vehicle

此时空簧上盖板下表面与应急橡胶堆上的支承座磨损板接触,磨损板采用特殊制造,确保获得较低的磨擦系数,以便空簧失气情况下顺利通过曲线。

空簧失气时,空簧上盖板与应急橡胶堆上的支承座接触后,垂向有可能发生短暂分离现象,且摩擦面摩擦因数在 0.04~0.01 之间,而应急橡胶堆的水平刚度一般都比较大,因此在水平方向会产生相对滑动,从而具有干摩擦的特点。因而此时的空气弹簧力元在水平方向(横向和纵向)由摩擦与弹簧-阻尼串联的黏滑力元组成,而在垂向,则由正常状态时的弹簧力元变为空簧失气时的非线性黏滑接触力元,即非线性接触力元;由此构成了空气弹簧失气时的黏滑接触力元模型,如图 2 所示。

图 2 中, C_{lc} 是应急弹簧垂向阻尼; K_{lc} 是应急弹簧垂向刚度; C_{lby} 是应急弹簧横向阻尼; K_{lby} 是应急弹簧横向刚度; μ 是上盖板与下支承座之间摩擦面的摩擦因素。

地铁车辆的应急弹簧的横向刚度为 3.44 MN/m,垂向刚度为 1.9 MN/m,摩擦因素取 0.08,本文计算时所指的空气弹簧失气是指整车全部空气弹簧失气的状态。

2 空气弹簧失气状态下的临界速度

利用黏滑接触-弹簧力元模型模拟空气弹簧失气,并结合地铁车辆非线性动力学模型分析地铁车辆空簧失气状态下的临界速度。计算临界速度时,给定一段有限长的轨道谱激励,让地铁车辆运行在不平顺轨道上并激发其振动,然后,让地铁车辆运行在理想光滑轨道上,观察轮对的横向振动能否衰减到平衡位置,来判断地铁车辆系统是否出现蛇行失稳。如在某一车速下轮对的振动不再收敛到平衡位置,则这时的车速即为地铁车辆的实际临界速度。

整车空气弹簧失气状态下的临界速度计算结果如表 2 所示,从表中可以看出空簧失气状态下空车的临界速度为 168 km/h,临界速度高于地铁车辆常规最大运营速度 100 km/h,并且有较大的安全裕量。但是与正常状态下的临界速度 207 km/h 相比,临界速度有较大幅度减小,降幅达到 18.84%,表明空气弹簧失气对临界速度有较大影响。值得说明的是本文计算时采用的是新轮新轨状态,等效锥度为 0.1,轮轨接触状态较好,一般而言,随着车辆运营里程的增大,等效锥度增大,临界速度会降低^[13],即在车轮磨损状态下,此时若空气弹簧失气则地铁车辆临界速度有可能进一步下降,因此在地铁车辆运行过程中应该重点关注并保持空气弹簧的良好工作状态。

表 2 空气弹簧失气时的临界速度

Tab.2 Critical speed while air spring loses air

| 工况 | 正常 | 失气 |
|-------------|-----|-----|
| 临界速度/(km/h) | 207 | 168 |

3 空气弹簧失气状态下的平稳性

地铁车辆的平稳性反映了旅客乘坐的舒适程度,是衡量地铁车辆运行品质的重要依据。利用黏滑接触-弹簧力元模型进行空气弹簧失气模拟,并结合地铁车辆非线性动力学模型计算地铁车辆空簧失气状态下的平稳性。计算平稳性时,车辆运行速度为计算速度选为 30~120 km/h,线路为直线轨道,轨道激励为美国五级

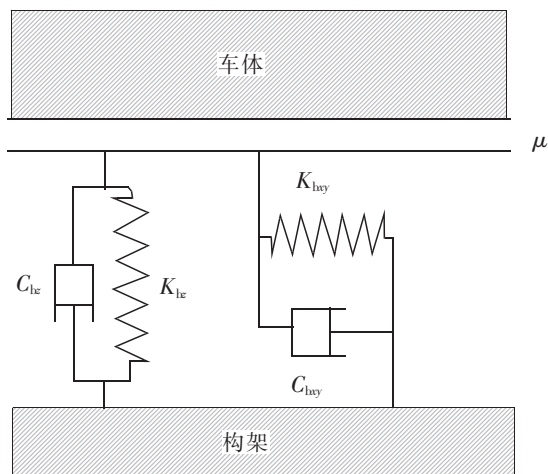


图 2 空簧失气时的黏滑接触模型

Fig.2 Viscous contact force element model while air spring loses air

谱,采用 GB5599-85 标准进行评价。

整车空气弹簧失气状态下的地铁车辆平稳性计算结果如图 3 和图 4 所示。从图 3 可知当空气弹簧失气后,地铁车辆的横向平稳性比空簧正常状态时有所增大。从图 4 可知在各运行速度下,当空气弹簧失气时地铁车辆的垂向平稳性值要显著大于空簧正常状态下的垂向平稳性值。空簧正常状态下,在 30~120 km/h 运行速度范围内,车辆垂向平稳性值均在 GB5599-85 标准的“优”级限度值 2.5 以内。但空簧失气后垂向平稳性指标在速度达到 60 km/h 时已经超过 GB5599-85 标准的“优”级限度值 2.5,在速度 100 km/h 时,已经超过 GB5599-85 标准的“合格”级限度值 3.0,表明在该地铁参数配置情况下,空簧失气对地铁车辆的垂向平稳性影响非常大,因此在地铁车辆运营过程中应加强对空气弹簧状态的监测,以保证地铁车辆安全平稳运行。并且从图 4 还可以看出,地铁车辆运行速度对垂向平稳性的影响也很大,当空气弹簧失气时降低运行速度也会降低垂向平稳性指标。

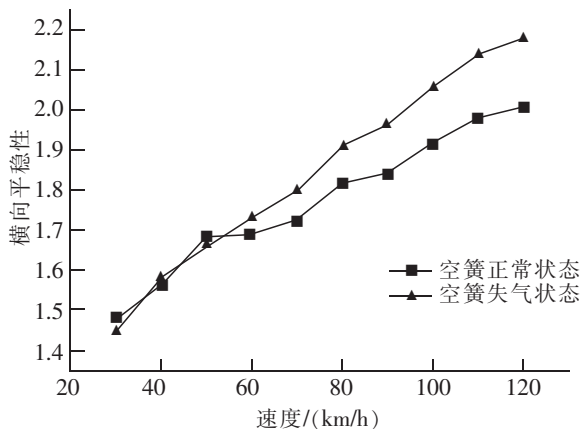


图 3 横向平稳性

Fig.3 Lateral spelling value

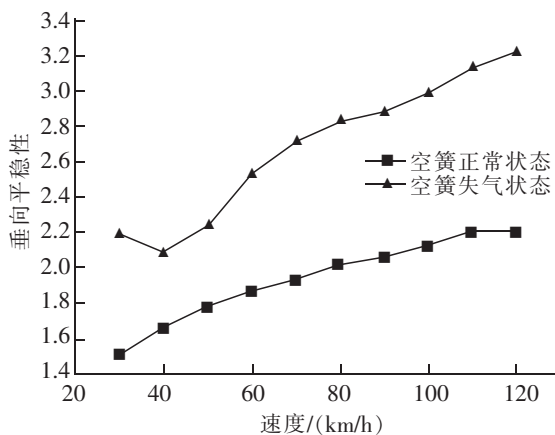


图 4 垂向平稳性

Fig.4 Vertical spelling value

4 空气弹簧失气状态下的安全性

利用黏滑接触-弹簧力元模型进行空气弹簧失气模拟,并结合地铁车辆非线性动力学模型分析地铁车辆空簧失气状态下的安全性。计算安全性时轨道激励为美国五级谱,曲线线路设置及速度如表 3 所示。采用 GB5599-85 标准的轮轴横向力、轮轨横向力、脱轨系数和轮重减载率这 4 个指标来评定车辆运行的安全性。

表 3 曲线线路设置及运行速度
Tab.3 Curve line setting and running speed

| 曲线半径/m | 运行速度/(km/h) | 圆曲线长/m | 缓和曲线长/m | 曲线超高/mm |
|--------|-------------------|--------|---------|---------|
| 300 | 20,30,40,50,60,65 | 300 | 80 | 120 |

4.1 横向力

整车空气弹簧失气状态下的地铁车辆轮轴横向力和轮轨横向力计算结果如图 5 和图 6 所示。从图 5 和图 6 可以看出,在从 20~65 km/h 各运行速度下,地铁车辆在空气弹簧正常状态和空气弹簧失气状态下的轮轴横向力和轮轨横向力相差不大,说明空簧失气对地铁车辆的横向力影响较小。

4.2 脱轨系数和轮重减载率

整车空气弹簧失气状态下地铁车辆脱轨系数计算结果如图 7 所示,从图 7 可以看出,在本文计算条件下,全车空气弹簧失气后,脱轨系数显著增大,其值已经比较接近 GB5599-85 标准规定的限度值 1.0,安全裕量已经非常小了。

整车空气弹簧失气状态下的地铁车辆轮重减载率计算结果如图8所示,从图8可以看出,空气弹簧失气后,轮重减载率显著增大,其值已经比较接近 GB5599-85 标准规定的限度值 0.6,安全裕量较小。

对比图7和图8可知,在本文计算条件下整车空簧失气对脱轨系数的影响程度要大于对于轮重减载率的影响程度,说明空簧失气对脱轨系数的影响更显著,因此在地铁车辆运营过程中应特别关注因空簧失气而引起的脱轨风险。

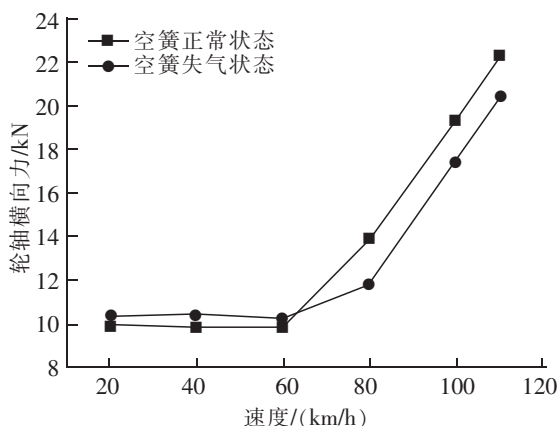


图5 轮轴横向力

Fig.5 Lateral wheelset force

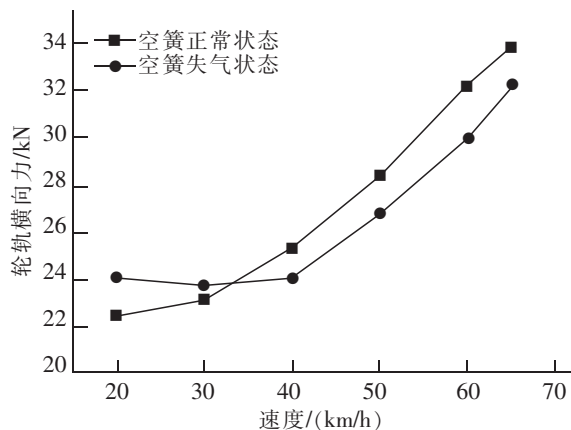


图6 轮轨横向力

Fig.6 Wheel rail lateral force

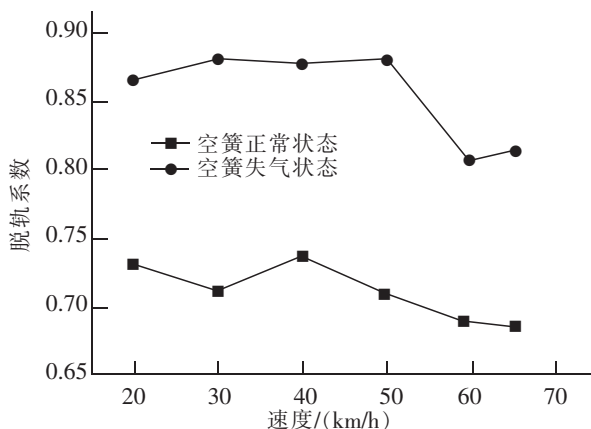


图7 脱轨系数

Fig.7 Derailment coefficient

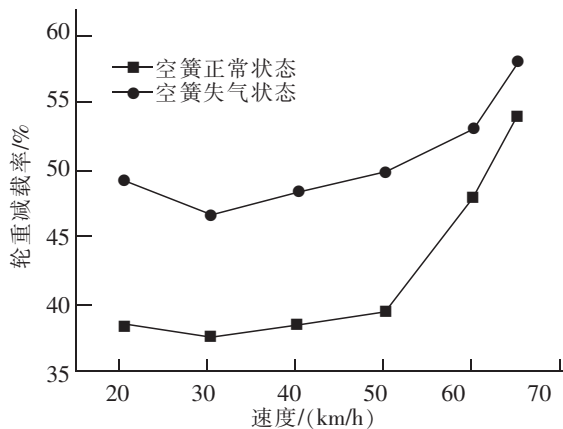


图8 轮重减载率

Fig.8 Wheel unloading rate

5 结语

通过对地铁车辆整车空气弹簧失气状况下的动力学进行分析,并与空簧正常状态下进行对比,表明:

1) 空气弹簧失气会使地铁车辆的临界速度有较大幅度降低,会使地铁车辆的横向平稳性和垂向平稳性指标、脱轨系数和轮重减载率明显增大,对横向轮轴力、横向轮轨力影响较小;

2) 空气弹簧失气对地铁车辆的临界速度、垂向平稳性、脱轨系数和轮重减载率影响较为显著,因此必须密切关注空气弹簧的状态以保证地铁车辆平稳安全运行。

参考文献:

- [1] 陈林,姚林泉. 不同无作轨道类型对车辆动力学特性影响的数值分析[J]. 华东交通大学学报,2016,33(4):1-9.
- [2] TOYOFUKU K,YAMADA C,KAGAWA T,et al. Study on dynamic characteristic analysis of air spring with auxiliary chamber[J]. JSAE Review,1999,20(3):349-355.
- [3] 高红星,池茂儒,朱旻昊,等. 空气弹簧模型研究[J]. 机械工程学报,2015,51(4):108-115.
- [4] 池茂儒,高红星,张卫华,等. 基于辅助空间的空气弹簧非线性模型[J]. 中国铁道科学,2014,35(3):83-89.
- [5] 罗仁,曾京,邬平波. 空气弹簧对车辆曲线通过性能的影响[J]. 交通运输工程学报,2007,7(5):15-18.
- [6] 吴兴文,池茂儒,朱旻昊,等. 空气弹簧模型对铁道车辆动力学性能的影响[J]. 交通运输工程学报,2013,13(2):55-59.
- [7] 高浩,罗仁,池茂儒,等. 车辆系统空气弹簧失气安全性分析[J]. 交通运输工程学报,2012,12(7):60-63.
- [8] 高浩,罗仁,池茂儒,等. 车辆系统空气弹簧失气过程动力学分析[J]. 铁道车辆,2013,51(7):1-4.
- [9] 刘丽,张卫华,梅桂明,等. 铁道车辆空气弹簧漏气故障分析[J]. 铁道车辆,2015,53(9):1-4.
- [10] 杨飞,池茂儒,郭文浩,等. 空气弹簧支撑控制模式对车辆曲线通过性能的影响[J]. 机械,2011,38(8):1-5.
- [11] 赵旭东,胡定祥,包学海. 铁道车辆空气弹簧控制方式的研究[J]. 铁道车辆,2013,51(2):8-11.
- [12] 严隽毫,付茂海. 车辆工程[M]. 北京:中国铁道出版社,2012:80.
- [13] 罗仁,石怀龙. 铁道车辆系统动力学及应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2018:205-206.

Dynamic Performance of Metro Vehicle During the Air Loss of Air Spring

Jiang Yiping, Zhu Haiyan, Yang Chunhui

(School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to study the influence on dynamic performance of metro vehicle during the air loss of air spring, the nonlinear dynamic model of metro vehicles and the stick-slip contact force model of air spring in the state of air loss were established. And the critical speed, derailment coefficient, lateral wheelset force, wheel rail lateral force, wheel unloading rate and Sperling value of the metro vehicle in the normal state of the air springs and the air loss of the whole vehicle air spring were calculated and compared. The results show that the critical speed of the metro vehicle is reduced, and the derailment coefficient, the wheel unloading rate, the lateral wheelset force and wheel rail lateral force, and the lateral and vertical Sperling value of the metro vehicle increases obviously when air spring loses air. Since the derailment coefficient and vertical Sperling value are affected significantly, the state of the air spring deserves more attention to ensure the smooth and safe operation of the metro vehicle.

Key words: air spring; air loss; metro; dynamic performance