

文章编号:1005-0523(2018)06-0008-05

# 跨座式单轨列车动力学分析研究综述

肖乾<sup>1</sup>,陈光圆<sup>1</sup>,李超<sup>1</sup>,许旭<sup>1</sup>,柳子豪<sup>2</sup>

(1. 华东交通大学运载工具与装备教育部重点实验室,江西 南昌 330013; 2. 武汉科技大学机械自动化学院,湖北 武汉 430081)

**摘要:**跨座式单轨列车转向架结构独特,运行、导向机理及轮轨之间的接触关系均有与众不同之处。国内外学者对单轨列车动力学建模以及振动响应特性进行了大量研究,但是缺乏系统性总结。针对已有的研究成果,总结了跨座式单轨列车的动力学模型研究方法和动力学响应特性及其影响因素,由此提出今后研究的重点。

**关键词:**单轨列车;动力学模型;响应特性;轨道梁

**中图分类号:**U211

**文献标志码:**A

跨座式单轨列车具有转弯半径小,爬坡能力强,灵活性较高,运行噪声低,建设周期短等特点,可以适应复杂地形要求,能够提供安全、舒适、方便的乘车环境<sup>[1]</sup>。跨座式单轨列车受到越来越多的城市交通规划的选择,特别是地形较为复杂的山区城市。目前国内外学者主要通过建立耦合动力学模型来分析单轨列车运行的安全性和平稳性等特性,建立跨座式单轨列车模型是分析单轨列车振动响应特性的首要问题<sup>[2]</sup>,对跨座式单轨列车系统的评价标准,国内大多采用 GB50614-2010《跨座式单轨交通施工及验收规范》和 GB50458-2008《跨座式单轨交通设计规范》等。

国内外很多学者开展了跨座式单轨列车动力学问题的研究,但大多集中在分析列车振动响应特性等方面,且缺乏系统性总结,本文对跨座式单轨列车动力学建模理论及方法、动力学响应特性及其影响因素进行阐述,并对进一步的研究提出建议,对跨座式单轨列车在我国的应用和发展具有一定的指导意义。

## 1 单轨列车动力学的建模理论

### 1.1 列车动力学理论研究分析

跨座式单轨列车具有独特的走行系统,转向架结构与传统的转向架有很大的不同,国外学者对其进行了大量的研究。Kenjiro Goda 等<sup>[3]</sup>较早研究跨座式单轨列车,建立车体和转向架结构模型,并假定有横向、侧滚和偏航自由度的刚体,分析机车与拖车导向轮的径向力,但只考虑3个方向的自由度;ChangHunLee 等<sup>[4]</sup>相对全面考虑转向架、走行轮、导向轮和稳定轮的自由度,建立桥梁的有限元模型,研究结果表明桥梁的横向力随着列车速度的增加而增大。列车在轨道梁上运行时车辆和桥梁都会产生振动,LeiNoda 等<sup>[5]</sup>建立机车和桥梁的耦合动力学计算模型,日本的 C.H Lee 和 C.W Kim 等<sup>[6]</sup>学者又作了地震作用下的跨座式单轨列车-轨道梁耦合动力响应分析,对单轨列车动力学模型理论的研究有着重要的意义。

我国较早的是杨威等<sup>[7]</sup>学者从静力学的角度,建立静力学平衡方程,研究在不同载荷作用下轮胎的变形和内力的变化。任利惠等<sup>[8]</sup>运用纯线性化理论建立轮胎模型,考虑走行轮的径向刚度、侧偏效应和纵向滑转等特性,分析列车曲线通过能力和轨道梁的错接头的响应特性。同济大学的张让等<sup>[9]</sup>从车辆动力学的角度,建

收稿日期:2018-04-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51565013);江西省杰出青年人才资助项目(20171BCB23058)

作者简介:肖乾(1977—),男,教授,博士,研究方向为轮轨关系。

立一个考虑所有轮胎的径向力及侧偏特性的动力学模型,并用 Simulink 仿真软件进行稳定性分析和曲线通过性能仿真。马继兵等<sup>[10]</sup>分析轨道梁的结构,用空间梁单元进行离散,采用一致质量矩阵,瑞利阻尼假设,将轨道梁各单元的质量和刚度矩阵进行组集,得到桥梁的振动方程。张建全,黄运华等<sup>[11]</sup>依据浮心理论及动力学仿真得出导向轮、稳定轮的预压力对单轨车的运行安全性、稳定性具有十分重要的作用。张楠、夏禾、郭薇薇等<sup>[12]</sup>采用多刚体动力学方法模拟车辆子系统,用有限元法模拟桥梁子系统,假定和简化的 Kalker 蠕滑理论定义轮轨间竖、横向相互作用力,建立动力相互作用的分析模型。文孝霞等<sup>[13]</sup>运用 Hamilton 理论建立走行轮,导向轮,稳定轮与轨道梁的侧表面的三向附着接触空间耦合动力学模型。

随着研究的深入,从传统的静力学模型发展到建立刚柔耦合模型,更能准确地反映列车运行实际情况,也是目前大多数学者采用的方法。

### 1.2 动力学分析模型

跨座式单轨列车的动力系统是多自由度系统,列车在运行时会产生复杂的振动,从而影响乘客乘坐的舒适性和列车运行的安全性。建立刚柔耦合动力学模型是分析列车的稳定性,安全性和平稳性的重要基础。跨座式单轨列车可以简化为车体和前后 2 个转向架,每个转向架由 2 个走行轮,2 个稳定轮,4 个导向轮和构架组成,其结构如图 1 所示。

走行轮与轨道梁的上表面接触,主要承受垂向载荷,同时传递牵引动力和制动力给轨道梁,4 个导向轮分布在轨道梁构架的上侧的两侧,引导车辆沿轨道运动;2 个稳定轮对称的分布在轨道梁的下侧,主要起稳定的作用。轮胎的径向模型一般可以简化为弹性元件与阻尼元件并联<sup>[14]</sup>,轮胎的径向刚度和阻尼取决于轮胎自身的结构和内胎充气气压。建立动力学模型时,为降低模型复杂度,简化运算,单轨车辆中涉及的弹性元件如空气弹簧、导向轮、稳定轮与走行轮,轮胎特性及牵引橡胶堆等均用线性弹簧模拟,构建列车的拓扑结构如图 2 所示。

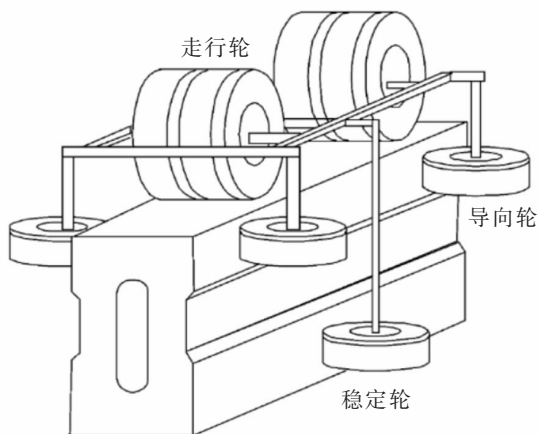


图 1 跨座式单轨转向架结构简图

Fig.1 Straddle-type monorail steering frame structure

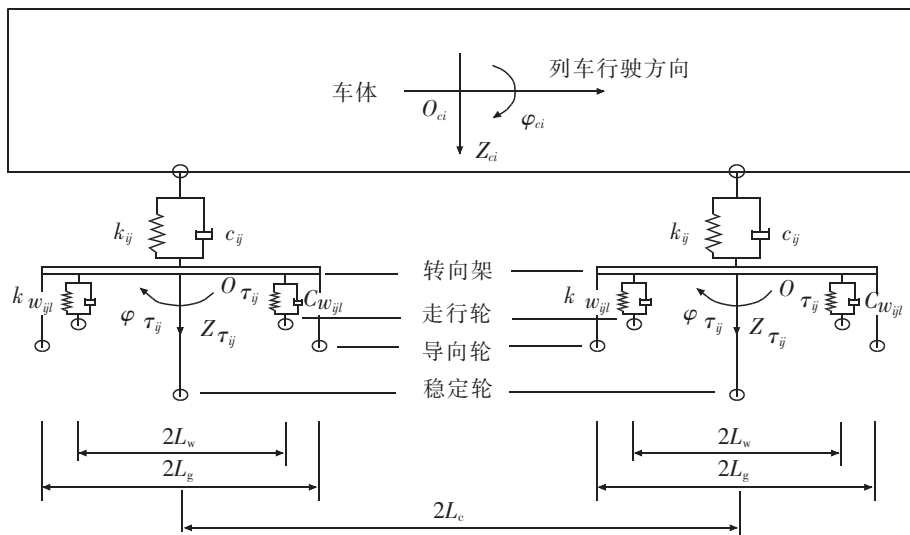


图 2 跨座式单轨列车拓扑结构图

Fig.2 Topological structure of straddle-type monorail

图2中,  $\varphi_{ci}$  为车体点头位移;  $Z_{ci}$  为车体浮沉位移;  $Z_{rj}$  为转向架浮沉位移;  $2L_w$  为走行轮轴距;  $2L_g$  为导向轮轴距;  $\varphi_{rj}$  为转向架侧滚;  $2L_c$  为车辆定距;  $k_{ij}$  为空气弹簧刚度;  $c_{ij}$  为空气弹簧阻尼;  $k_{wz}$  为走行轮刚度;  $C_{wjl}$  为走行轮阻尼;  $O_{rj}$  为转向架侧滚。

王国林等<sup>[15]</sup>运用有限元建立模型,验证轮胎在径向力作用下的变形是线性的假设。轮胎在受到侧向力作用时,车轮发生侧偏造成轮胎胎面中心线轨迹和车轮滚动轨迹形成侧偏角<sup>[16]</sup>,这种现象称为侧偏现象。杨忠坤等<sup>[17]</sup>以重庆跨座式单轨列车为研究对象,建立其有限元离散模型,对构架进行静强度和模态计算,验证了构架设计的合理性,运用车辆运行时采集的各测点动应力值,仿真和试验结果均表明转向架结构设计是合理的。马继兵,蒲黔辉等<sup>[18]</sup>建立跨座式单轨车辆模型和线弹性轮胎模型,研究单轨车辆-直线梁桥耦合系统动力相互作用,推导跨座式单轨车辆-桥梁空间耦合系统动力学运动方程。刘羽宇等<sup>[19]</sup>分析在风荷载作用下的跨座式单轨列车-轨道梁耦合振动响应,轨道梁简化为欧拉梁,建立轨道梁的运动微分方程。而杜子学,左长永等<sup>[20]</sup>利用 ADAMS 动力学仿真软件建立了单轨列车及平移式道岔的仿真模型并通过分析单轨列车与平移式道岔曲线梁的耦合作用力,计算出该连接件所受的最大横向力,进而为准确设计连接件的动载荷强度提供参考数据。

## 2 动力学响应分析

跨座式单轨列车运行时,列车振动直接影响列车运行的平稳性和乘客乘坐的舒适性。单轨列车运行时的速度,轮胎特性,轮轨接触参数等因素影响列车振动响应,针对振动响应特性,国内外学者提出了很多评价指标,例如评价平稳性的 Sperling 指标。一般轨道车辆通过性能的评价指标为脱轨系数、轮重减载率、倾覆系数、轮轨横向力等。但单轨车辆结构的特殊性使得列车曲线通过能力和运行的平稳性,舒适性成为评价的主要指标<sup>[21]</sup>。目前我国还没有一套完整的评价标准,一般采用《铁道车辆动力学性能评定和实验鉴定规范》的标准。

马继兵等分析轨道梁体的横向和竖向位移与车速的关系以及加速度与位移的关系,但是考虑的因素比较单一。杜子学等用 Sperling 平稳性评价指标,分析导向轮和稳定轮在一定的预压力作用下,以汽车和路面的接触方式模拟轮轨与轨道梁的接触方式,对重庆市跨座式单轨车辆运行平稳性进行研究,结果表明列车在 40 km/h 的速度以下,平稳性较好,在大于此速度时,车辆的平稳性有待进一步优化。杜子学和李林等<sup>[22]</sup>分析得出导向轮在不同速度、不同轨道半径下的受力情况,并拟合出了导向轮的受力公式,而后再讨论了线路的超高率,最小曲线半径以及曲线限速等对车辆曲线性能的影响,为今后跨座式单轨车辆曲线通过性能评价指标体系的构建与评价提供了理论依据。赵甲荐等<sup>[23]</sup>建立车辆和轨道梁的空间耦合模型,研究轮轨接触参数对车桥耦合动力学响应的影响,而文孝霞等<sup>[13]</sup>分析了不同速度下车体质心处的加速度的影响,对试验获取的加速度得到功率谱函数,然后按照加速度均方值来评价单轨列车的乘坐舒适性。张凯<sup>[21]</sup>运用单纯扭转理论,推导曲线桥梁的刚度矩阵,采用瑞利法推导了曲线梁桥的阻尼矩阵,建立了 15 个自由度的单轨车辆模型,分析曲线半径、车辆速度对车桥耦合动力响应的影响。结果表明,曲线半径大于 600 m 时,曲线半径对车桥动力响应的影响很小,可以忽略不计;曲线半径小于 600 m 时,随曲线半径减小,车桥振动响应变大。黄运华等<sup>[24-25]</sup>研究转向架的导向力矩,车体的浮心高度以及走行轮的轮重减载率和轮胎的最大垂向作用力等因素对跨座式单轨车辆通过曲线能力的影响,并对各个因素进行了详细分析。杜子学等研究导向轮的最小垂向力,车体的侧滚角等因素,运用 SIMPACK、ADAMS 建立了仿真模型,对跨座式单轨车辆的动力学响应特性进行了研究。

跨座式单轨列车与传统的轨道列车的轮轨接触方式不同,采用橡胶轮胎和轨道梁接触,轮胎特殊性也影响列车的振动响应特性。刘羽翔等<sup>[26]</sup>运用牛顿法建立了考虑轮胎的侧偏特性的运动方程,运用模态综合法建立轨道梁运动微分方程,建立了车辆与轨道梁动力相互作用的竖向耦合运动控制方程。结果表明,车速及不同轨道不平顺条件对轨道挠度的影响较小,但对加速度的影响较大,竖向加速度随着车速的增大而增加。侧向气动特性在很大程度上影响着跨座式单轨列车运行的安全性,杜子学和刘博等<sup>[27]</sup>基于 CFD 方法对

不同侧偏角下单轨气动性分析,计算结果表明随着侧偏角的增大,单轨列车侧向气动力逐渐增大,头车受到侧向力和侧倾力矩最大,因而侧风对头车的运行安全影响最大。而后赵树恩等<sup>[28]</sup>基于空气动力学原理,研究了侧向风作用下跨座式城市单轨车辆的运行平稳性问题,并对不同车速、风速、轨道梁线形下跨座式单轨车辆在侧向风作用时的运行平稳性进行仿真计算和对比分析,结果表明,车速和风速的变化对在侧向风条件下的跨座式单轨车辆横向加速度影响很大,会进一步影响车辆的运行平稳性,且当车速或风速过大时,车辆不满足平稳性指标,会发生失稳现象。

综上所述,大多学者研究在不同工况条件下列车的平稳性、舒适性和安全性,用仿真和试验的方法分析单轨列车的振动响应特性。单轨列车结构与传统的钢轨接触型轨道交通有着明显的不同,橡胶轮与混凝土轨道梁接触,橡胶轮胎的偏磨以及轮胎的结构特性等对列车振动响应特性也有很大的影响,而在这方面研究相对较少,因此轮胎的磨损等对列车振动响应特性值得更加深入和系统的研究。

### 3 问题与展望

1) 跨座式单轨列车近年来在一些国家和地区受到了欢迎,但到目前为止国内还没有一套完整的动力学评价指标,在动力学分析过程中不仅要考虑车辆的参数,还要考虑轮胎结构参数。

2) 汽车轮胎与路面接触的磨损机理研究相对较成熟,但单轨列车橡胶轮胎与轨道梁接触轮胎磨损相对较少,建立具有三向附着接触的空间耦合动力模型,分析轮胎的磨损机理以及对橡胶轮胎的优化设计需要进行进一步的研究。

3) 列车运行在轨道梁的上面,随着车速的增加,车辆运行的噪声也随之增加,如果不能合理控制噪声会对周围的居民造成困扰,后续可以对列车运行时噪声的预测和分析进行研究。

4) 此外地震和风载对单轨列车的影响也较大,将风载或地震作为激励源,分析在这种激励下单轨列车的运行响应特性需要更加深入,国内学者对这方面的研究较少,且缺乏系统的标准,因此,后续工作可以着手研究风载和地震对列车运行平稳性的影响和列车曲线通过能力的影响。

### 参考文献:

- [1] 施洲,蒲黔辉,高玉峰,等. 重庆市跨座式单轨交通系统动力试验研究[J]. 振动与冲击,2008,27(12):101-106.
- [2] 赵晓亮. 跨坐式单轨交通列车动力学仿真研究[D]. 北京:北京交通大学,2008.
- [3] KENJIRO GODA, TAKAOMI NISHIGAITO, MOTOMI HIRAISHI, et al. Monorail car railroad conference [C]//Proce-eding of the 2000171-177A Curving Simulation for a ASME/IEEE Joint,2000.
- [4] CHANG HUN LEE, CHUL KIM, MITSUO KAWATANI, et al. Dynamic response analysis of monorail bridges under moving trains and riding comfort of trains[J]. Engineering Structures,2005,27(5):1999-2013.
- [5] LEI X, NODA NA. Random irregularity Analyses of track of dynamic response of vehicle and track coupling system with vertical profile[J]. Journal of Sound and Vibration,2002,258(1):147-65.
- [6] LEE C H, KAWATANI M, KIM C W, et al. Dynamic response of a monorail steel bridge under a moving train[J]. Journal of Sound and Vibration,2006,294(3):562-579.
- [7] 杨威,朱尔玉,张波,等. 风荷载作用下跨座式单轨交通系统导向轮受力和变形分析[J]. 北方交通大学学报.
- [8] 任利惠,周劲松,沈钢. 跨坐式独轨车辆动力学模型及仿真[J]. 中国铁道科学,2004,25(5):26-32.
- [9] 张让,任利惠,沈钢. 一种基于转臂式摇枕的跨坐式单轨车辆单轴走行部[J]. 铁道机车车辆,2018(1).
- [10] 马继兵,夏招广,蒲黔辉. 跨坐式单轨交通预应力钢筋混凝土轨道梁动力性能试验与分析[J]. 城市轨道交通研究,2008,11(8):30-35.
- [11] 张建全,黄运华,李芾,等. 跨坐式单轨车导向轮稳定轮预压力研究[J]. 铁道机车车辆,2011,31(3):48-52.
- [12] 张楠,夏禾,郭薇薇. 基于轨轮线性相互作用假定的车桥相互作用理论及应用[J]. 铁道学报,2010,32(2):66-71.
- [13] 文孝霞,杜子学,许舟洲,等. 单轨车辆耦合动力学模型与振动响应特性[J]. 振动、测试与诊断,2017,37(3):462-468.

- [14] 冯涛. 高速客车空气弹簧系统减振特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.
- [15] 王国林,林波,安登峰,等. 基于灵敏度分析的子午线轮胎疲劳性能优化[J]. 汽车工程,2008,30(4):354-356.
- [16] 马继兵. 跨座式单轨交通系统结构静动力行为研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.
- [17] 杨忠坤,缪炳荣,陈建政,等. CZ200型单轨转向架构架结构强度分析[J]. 铁道机车车辆,2017,37(4):1-5.
- [18] 马继兵,蒲黔辉. 跨座式单轨交通PC轨道梁车桥耦合振动分析[J]. 西南交通大学学报,2009,44(6):806-811.
- [19] 刘羽宇,王永虎. 考虑轮胎侧偏特性的跨座式单轨车桥耦合振动模型[J]. 重庆交通大学学报,2015,34(3):7-11.
- [20] 杜子学,左长永,何希和. 跨坐式单轨列车与平移式道岔耦合作用力仿真分析[J]. 城市轨道交通研究,2014,17(6):42-45.
- [21] 张凯. 跨座式单轨交通曲线梁桥车桥耦合振动分析[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [22] 杜子学,李宁. 跨坐式单轨车辆导向轮受力仿真分析研究[J]. 铁道机车车辆,2011,31(4):88-90.
- [23] 赵甲荐. 胶轮轨道列车—桥梁系统空间振动响应研究[D]. 广州:华南理工大学,2011.
- [24] 黄运华,丁军君. 跨座式单轨车曲线通过性能评价指标研究[J]. 电力机车与城轨车辆,2013,36(2):1-4.
- [25] 翟婉明. 国际铁道车辆系统动力学研究新进展[J]. 铁道车辆 2004,42(1):1-6.
- [26] 刘羽宇,王永虎. 考虑轮胎侧偏特性的跨座式单轨车桥耦合振动模型[J]. 重庆交通大学学报,2015,34(3):1-6.
- [27] 杜子学,刘博,尉迟志鹏. 不同造型跨坐式单轨车的气动性能比较[J]. 城市轨道交通研究,2011,14(2):29-33.
- [28] 赵树恩,刘浙,杜子学,等. 侧向风作用下跨座式单轨车辆运行平稳性研究[J]. 科技导报,2014,32(22):42-46.

## Research on Dynamic Modeling of Straddle-Type Monorail Train

Xiao Qian<sup>1</sup>, Chen Guangyuan<sup>1</sup>, Li Chao<sup>1</sup>, Xu Xu<sup>1</sup>, Liu Zihao<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Conveyance and Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. School of Machinery and Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** The straddle-type monorail train bogie has unique structures, whose operation, guiding mechanism and contact relationship between the wheel and rail are unusual. Domestic and foreign scholars have conducted a lot of researches on the modeling of dynamics of monorail train and vibration response characteristics, but there were few systematic conclusions. In view of the existing research results, this paper summarized the research methods of dynamic model of straddle-type monorail train and vibration response characteristics and relevant influencing factor. Finally, the research priority in the future was proposed.

**Key words:** monorail train; dynamic model; response characteristic; track beam