

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.043

受电弓弓头滑板侧滚角对城轨车辆弓网动力学性能的影响

董诣峰,周宁,刘久锐,姜杭艳,张卫华

(西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室,四川 成都 610031)

摘 要:针对受电弓弓头运行姿态变化对弓网动力学性能的影响,为进一步考虑这种影响范围,建立一种考虑弓头滑板侧滚角度的城轨车辆受电弓模型。对整个弓头有限元模型进行模态分析与验证,对含一定侧滚角的滑板的弓网耦合模型进行仿真计算,探究弓头滑板侧滚角对弓网耦合动力学特性的影响规律。结果表明:前后滑板接触力的变化会直接受到受电弓前后滑板侧滚角度的影响。

关键词:城轨车辆;受电弓模型;弓头姿态;系统动力学;侧滚角

中图分类号:U264.3⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)02-0229-03

Influence of Rolling Angle of Pantograph Head Collectors on Dynamic Performance of Urban Rail Vehicle Pantograph

DONG Yifeng, ZHOU Ning, LIU Jiurui, JIANG Hangyan, ZHANG Weihua

(State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract:To study the influence of operating posture of pantograph head on the dynamic performance of the pantograph-catenary system, this paper establishes a pantograph model for urban rail vehicles considering the roll angle of the pantograph head collectors. Modal analysis and validation are conducted on the finite element model of the entire pantograph head. Simulation calculations are performed on the pantograph-catenary coupled model with a certain roll angle of the collectors, exploring the influence of the roll angle on the dynamic characteristics of the pantograph-catenary system. The results indicate that the variation in contact force between the front and rear collectors is directly affected by the rolling angle of the pantograph head collectors.

Keywords:urban rail vehicles; pantograph model; posture of pan-head; system dynamics; rolling angle

0 引言

受电弓动力学问题主要是从受电弓建模问题出发,采用不同受电弓模型将对弓网动态性能分析造成一定的差异。受电弓各个零部件对弓网性能产生的影响程度各不相同,部分受电弓零件将在受电弓受流性能上产生明显影响,如受电弓的弓头是影响弓网受流的关键部件。因此,有必要对受电弓弓头姿态以及其对弓网间动力学性能的影响展开研究。李丰良等^[1]建立了考虑受电弓弓头部分运动的受电弓模型,包含受电弓的侧滚、俯仰和垂向运动。赵晨^[2]建立了可以考虑弓头部分点头运动和侧滚运动的受电弓归算质量模型,认为弓头的点头运动对整体受流质量影响较小,而弓头滑板的侧滚运动与接触网拉出值有关,拉出值的增大会导致弓头滑板侧滚运动加剧,而考虑

弓头侧滚运动会使得接触力均值和标准差略微减小,对受流有益。肖嵩等^[3]建立了一种新型滚动弓头,经过验证发现其具有良好的抗冲击性能和温度随弓网相对运行速度提升,有一定的稳定保持效果。BOCCIOLONE 等^[4]将弓头考虑为双滑板,并且弓头悬挂采用带扭簧的连杆作为悬挂,弓头可做点头运动,对不同形状的弓头性能进行了比较。上述在前人建立的考虑弓头姿态的受电弓模型中,很多模型采用质量块受电弓模型,因此缺乏对拉出值影响下以及滑板自身具有一定三维形状等因素的考量;考虑普通受电弓的悬挂形式弹簧筒下的弓头姿态变化,具有较强的现实适用性,弓头经过与试验模态的对比验证也具有试验意义。

本文采用整个弓头部分为弹性体,有关将弹性体作为重要的一部分考虑进受电弓模型中,周

基金项目:国家自然科学基金项目(52072319);国家重点研发计划项目(2022YFB4301201-03);四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0396);西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室自主课题项目(2023TPL-T05)

第一作者简介:董诣峰(1998—),男,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向为弓网系统动力学,365416115@qq.com。

宁等^[5-7]通过建立考虑弹性变形的受电弓模型和接触网模型,验证了弹性体受电弓模型可以考虑弓网间相互作用高频区段的影响;通过对比受电弓的弓头部分采用柔性体与刚性体的效果,验证了将弓头作为弹性体考虑起着重要作用。

目前,弓网耦合的模型验证^[8]主要基于两个方法,1)参照标准 EN 50318《轨道交通受流系统受电弓与架空接触网动态相互作用仿真的验证》^[9]对弓网耦合仿真方法进行确认,但标准中给出的模型一般为柔性网和快速铁路,对于较低速的刚性接触网和城市轨道交通线路则没有给出验证条件,不适合作为验证条件。2)将通过弓网仿真得到的接触力仿真结果与真实线路试验结果进行对比^[10],此种验证方法成本较高、难度较大。当实测接触力数据与线路数据不同时的修正问题也没有在文献中提到。由于本文将受电弓弓头部分考虑为柔性体,柔性体本身就包含了模态信息,因此采用一种模态仿真和试验结果比对的方法来验证受电弓弓头有限元模型的准确性。刘钊等^[11]对带裂纹的受电弓上框架进行模态试验,试验结果表明裂纹对上框架的振动特性存在影响。

传统的弓网系统建模中,较少准确考虑弓头姿态在运行过程中的变化以及弓头姿态对弓网动力学性能的影响,本文设置前后滑板不同的侧滚角度并对不同弓头滑板姿态下的接触力的仿真结果加以提取,建立起不同滑板侧滚角度的弓网耦合模型。结果显示弓头前后滑板不同侧滚角度对弓网动力学性能有显著影响。由于建模精度有限,后续还应进一步对模型进行精细化处理,考虑前后滑板更小的侧滚角度差异给弓网动力学性能产生的影响,以更贴合实际。

1 弓网动力学仿真模型

1.1 刚性接触网模型

对于刚性接触网如图 1,架空刚性接触网系统主要由接触线、汇流排及悬挂机构组成。根据静力平衡条件及动能定理,悬挂机构可以被简化为弹簧质量系统,由于接触线被安置在汇流排上,汇流排自重大且无张力,可统一将汇流排及接触线视为梁结构。刚性接触网的梁结构模型的垂向位移表达式为

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{N_M} \psi(x) q_i(t) \quad (1)$$

式中: x 和 t 分别为位移变量和时间变量; $\psi(x)$ 为模态函数; $q_i(t)$ 为广义坐标; N_M 为模态截断的阶数。

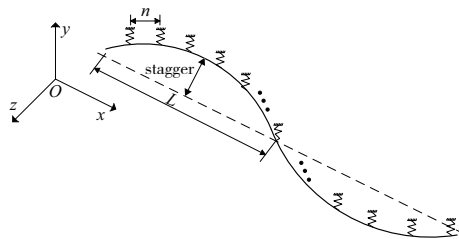


图1 刚性悬挂接触网模型

1.2 受电弓模型

从计算效率和计算准确度方面来看,本文需要考虑弓头滑板的侧滚对弓网间动力学性能的影响。因此,将弓头部分考虑为刚体,而其它部分都考虑成柔性体。受电弓的动力学平衡方程如下所示:

$$M_p \ddot{u}_p + C_p \dot{u}_p + K_p u_p = ff(t) \quad (2)$$

式中: M_p 为质量矩阵; C_p 为阻尼矩阵; K_p 为受电弓刚度矩阵; u_p 为节点位移向量; $ff(t)$ 为受电弓载荷向量。

本文采用受电弓刚柔耦合模型进行弓网耦合仿真。前后滑板出现的不同侧滚角 α_1 和 α_2 ,如图2所示。

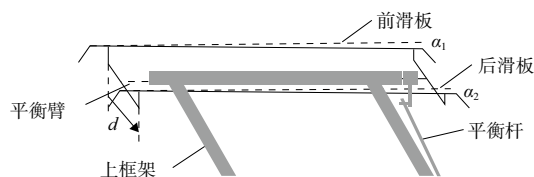
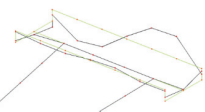
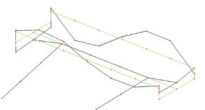
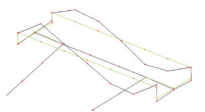
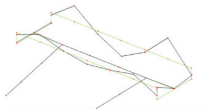


图2 考虑前后滑板侧滚角的受电弓模型

2 模型验证

本试验采用动态信号测试分析系统,并通过单点拾振多点敲击的方式获取结构上各点间的频响函数,在需要测量的节点处标记相应的测点号。对获得的受电弓结构的模态振型与仿真得到的模态振型进行了比对。受电弓板簧滑板垂向模态振型和各阶模态固有频率试验数据与仿真数据的对比结果如表1所示。通过振型的比对可以验证弓头有限元模型的准确性。

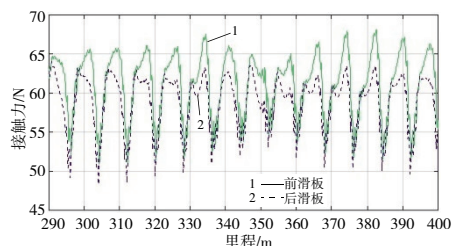
表 1 受电弓板簧滑板垂向模态振型对比 单位:Hz

阶数	试验模态振型	有限元模态振型	试验频率	有限元频率
1			59.1	55.8
2			110	109
3			128	127
4			389	335

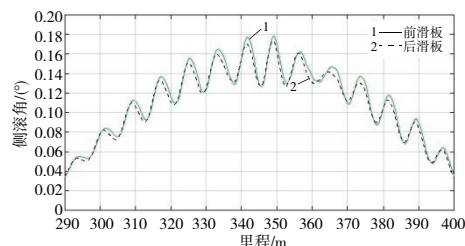
3 动力学分析

具体设定工况为:不考虑前后滑板侧滚角偏离值的模型,即前后滑板侧滚角偏离度数都设定为 0° ,具体的仿真结果如图3所示;还有一种工况将前后滑板侧滚角偏离度数的差值考虑为 4° ,仿真结果如图4所示。

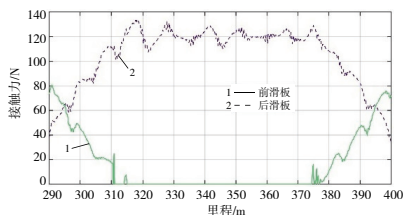
由图3可以看出,当前后滑板侧滚角都偏离 0° 时,前后滑板接触力随运行里程变化平稳,前后滑板接触力都在 $50\sim 70\text{ N}$ 之间变化。前后滑板侧滚角变化也一致,在 $0^{\circ}\sim 0.18^{\circ}$ 之间变化。



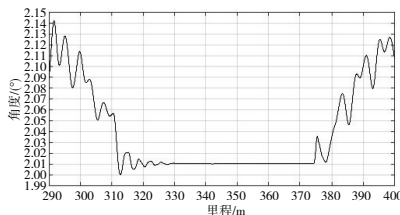
(a) 前后滑板接触力变化图



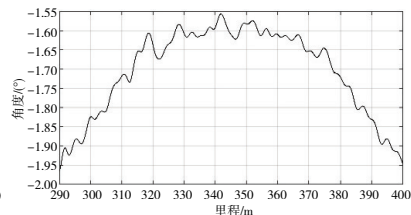
(b) 前后滑板侧滚角变化图

图3 前后滑板侧滚角偏离值 0° 模型的接触力和侧滚角变化情况

(a) 前后滑板接触力变化图



(b) 前滑板侧滚角变化图



(c) 后滑板侧滚角变化图

图4 前后滑板侧滚角偏离值相差 4° 模型的接触力和侧滚角变化情况

前后滑板侧滚角偏离值相差 4° 模型的接触力和侧滚角的仿真结果如图4所示,当前后滑板侧滚角偏离值相差 4° 时,导致了前滑板在运行过程中出现了离线。如图4(a),后滑板在前滑板离线的过程中接触力始终保持在 120 N 左右,相应地,后滑板侧滚角从 -1.95° 变化到 -1.55° ,变化量最大达到了 0.4° 左右,是前后滑板侧滚角偏离都为 0° 时的2倍。如图4(b),从提取到的前滑板侧滚角变化曲线来看,在前滑板离线的这段时间内,前滑板侧滚角没有变化。

研究了不同的前后滑板侧滚角偏离对弓网间接触力和侧滚角变化的影响。结果表明:前后滑

板侧滚角偏离度数的差值达到一定程度时,可以让一侧滑板完全离线,同时另一侧滑板的接触力增大,可能会进一步导致其它损耗现象。

4 结语

本文首先建立了考虑弓头特征的弓网耦合模型,并对受电弓弓头部分模型进行了验证。针对不同的前后滑板侧滚角偏离值模型进行仿真后发现前后滑板侧滚角偏离值会对弓网间动力学性能产生显著的影响,当侧滚角偏离值过大时,会引发一侧滑板的离线,进而可能造成弓网接触界面的损伤。

(下转第236页)

- 收稿日期:2024-01-31

参考文献:

- 收稿日期:2024-04-02