文章编号:1673-0291(2026)04-0033-09 DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20250076

考虑转向架特性的列车灵活编组作业动力学响应研究

朱 戡[1,2],李芍君[3],李 颖[4]

(1.北京市轨道交通建设管理有限公司,北京 100068;2.城市轨道交通全自动运行系统与安全监控北京市重点实验室,北京 100068;3.北京市地铁运营有限公司运营四分公司,北京 100103;4.北京轨道交通技术装备集团有限公司,北京 100068)

摘 要:针对目前研究较少关注灵活编组作业时带来的安全性及舒适性问题,对比传统纵向动力学模型和考虑车厢-构架-轮对的精细纵向动力学模型,分析2种模型下灵活编组作业时的相关指标;以北京3号线为例进行初步的试验对比,分析不同联挂速度下2种仿真模型列车的位移、加速度和冲击率差异.仿真结果表明:当编组速度为3 km/h和5 km/h时,精细模型相比传统模型的列车位移分别增加52.9%和53.1%,振动加速度分别增加12.2%和20.5%;在不同坡道编组时,在下坡进行编组作业的列车位移相比上坡工况最大增加89%,反映出溜逸风险增加、作业安全性降低,但加速度降低了5%,说明乘客舒适度有一定提高.在试验线上开展的联挂试验表明:以5 km/h开展联挂作业时,精细模型的仿真结果与试验结果对比更接近,相对误差较传统模型降低了约30%,验证了精细模型在模拟真实列车联挂场景方面具有可行性.

关键词:铁道车辆;灵活编组;纵向动力学模型;动力学响应

中图分类号:U271.92 **文献标志码**:A

Research on dynamic response of flexible train marshalling considering bogie characteristics

Zhu Kan[1,2], *Li Shaojun*[3], *Li Ying*[4]

(1.Beijing Metro Construction Administration Co.,Ltd., Beijing 100068,China;2.Beijing Key Laboratory of Fully Automatic Operation and Safety Monitoring for Urban Rail Transit, Beijing 100068,China;3.Operation Fourth Branch, Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing 100103,China;4.Beijing Rail Transit Technology Equipment Group Co.,Ltd., Beijing 100068,China)

Abstract: Because the safety and comfort implications of flexible marshalling operations have received limited attention, this study compares a conventional longitudinal dynamics model with a refined model that represents the carbody-bogie-frame-wheelset system. Relevant performance indices are analyzed using both models, and a preliminary comparison with coupling tests on Beijing Metro Line 3 is conducted. Differences in train displacement, acceleration, and jerk predicted by the two models at different coupling speeds are examined. The simulation results show that, at marshalling speeds of

收稿日期:2025-05-20;**修回日期**:2025-09-22

基金项目:国家自然科学基金(U2569210,52372310)

Foundation items: National Natural Science Foudation of China (U2569210,52372310)

第一作者:朱戡(1993—),男,江苏如皋人,高级工程师,硕士.研究方向为城市轨道车辆. **email**:zhukan082102@163.com.

引用格式:朱戡,李芍君,李颖.考虑转向架特性的列车灵活编组作业动力学响应研究[J].北京交通大学学报,2026,50(4):33-41.
Zhu Kan,Li Shaojun,Li Ying.Research on dynamic response of flexible train marshalling considering bogie characteristics[J].Journal of Beijing Jiaotong University,2026,50(4):33-41.(in Chinese)

3 and 5 km/h, the refined model predicts train displacements that are 52.9% and 53.1% greater, respectively, and vibration accelerations that are 12.2% and 20.5% greater, respectively, than those predicted by the conventional model. Under different gradients, downhill marshalling produces a train displacement up to 89% greater than that under uphill conditions, indicating a higher risk of unintended rolling and reduced operational safety; however, acceleration decreases by 5%, suggesting a modest improvement in passenger comfort. Coupling tests on a test track show that, at 5 km/h, the refined model agrees more closely with the experimental results, reducing the relative error by approximately 30% compared with the conventional model. This confirms the feasibility of the refined model in simulating actural train-coupling scenarios.

Keywords: railway vehicle; flexible marshalling; longitudinal dynamic model; dynamic response

轨道交通可以缓解地面交通压力,因此在国内人口较多的城市发展迅速.由于其客流具有空间不均匀和平高峰潮汐特性,为了降低运营成本,目前国内主流做法均是降低平峰时的列车运行间隔[1],但这种做法延长了平峰时乘客的等待时间.为保证运营服务质量,国内很多城市均计划采用灵活编组的模式[2-3],通过高峰采用大编组、平峰采用小编组的灵活方式来达到运营成本和服务质量之间的平衡[4-6].

为进一步提高运营效率,国内针对在线灵活编组/解编开展了较多研究.文献[7]针对不同折返场景分别分析了联挂作业的特点,针对不同配线形式的站型得到了效率最高的联挂方式.文献[8]针对存在支线的线路,对编组方式进行优化,发现在线编组能有效降低运营成本.此外,相关系统如车钩、信号、网络等系统的发展对在线灵活编组的实现具有重大影响.文献[9]分析了信号控车时列车联挂速度、列车换端等方案对联挂效果的影响.文献[10]提出一种车钩自动联挂的方案,可以完全满足在线无人全自动灵活编组作业.文献[11]对4+4灵活编组列车与既有列车同线运行时各类作业工况进行了仿真分析.文献[12]针对在线灵活编组的作业特点,提出了一种新型的列车网络控制系统.

为进一步提高灵活编组模式的实用性,需要对编组的动态过程进行进一步研究[13-14],尤其是为了提升编组过程中的安全性与舒适性,需对联挂过程的纵向动力学进行分析.文献[15]基于多质点耦合的简化动力学模型,综合考虑了牵引、制动、坡度等因素,以列车质心纵向加速度估计纵向力,并与实测数据进行了对比.文献[16]通过建立考虑空气制动机理的多质点纵向动力学方程组,进行列车纵向动力学性能的时域仿真,详细分析了控制制动压力变化和制动系统响应时间对制动过程中的列车纵向动力学特性的影响.文献[17-18]分析了车钩的非线性因素对列车纵向动力学的影响.文献[19]指出传统的单质点制动距离计算模型的不足,并基于多质点模型对制动工况进行制动距离计算.文献[20]则基于不同制动管减压量,分析了列车在坡道上的纵向动力学性能.文献[21]研究了不同重联方式对列车运行稳定性和平稳性的影响.

然而,以上相关研究在分析列车纵向运动特性时,往往将单节车辆模型简化为一个质点,没有考虑复杂的车辆结构.本文针对相关现状,在传统纵向动力学模型的基础上考虑了车体和转向架的内部结构,建立了包含车厢-构架-轮对的纵向动力学模型,并分析了灵活编组作业中的列车安全性和乘客舒适度问题.

1 考虑纵向悬挂刚度的模型

传统的列车纵向动力学模型将车体、构架和轮对视为一个整体,忽略了车体和构架、构架与轮对之间的纵向刚度,两节车体之间通过车钩连接,车钩中的弹性单元(如橡胶堆、胶泥或气液缓冲器等)提供了车厢之间的缓冲.传统的列车纵向动力学模型(以下简称传统模型)将车钩缓冲装置视为弹簧-阻尼单元,传统模型如图1所示.

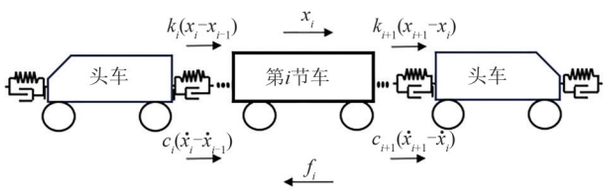


图1 传统列车纵向动力学模型

Fig.1 Traditional train longitudinal dynamics model

单节车厢的动力学方程为

$$m_i\ddot{x}_i-k_ix_{i-1}+(k_{i+1}+k_i)x_i-k_{i+1}x_{i+1}-c_i\dot{x}_{i-1}+(c_{i+1}+c_i)\dot{x}_i-c_{i+1}\dot{x}_{i+1}+f_i=0 \quad (1)$$

式中:m_i为第i节车体(含转向架)的质量;k_i为第i节车体与第$i+1$节车体间车钩缓冲器的刚度;c_i为第i

节车体与第 $i+1$ 节车体间车钩缓冲器的阻尼;x_i、$\dot{x}_i$、$\ddot{x}_i$ 分别为第 i 节车体的位移、速度和加速度;f_i 为列车受到的外部载荷,包括制动力、重力沿坡道的分力等.

由于列车是由车体和转向架(包含构架、轮对及相应的悬挂装置)组成,车体和转向架构架之间通过牵引装置(如中心销套、牵引拉杆等)连接,转向架构架与轮对之间通过轮对纵向定位装置(如转臂节点、金属橡胶堆等)连接.而上述中心销套、牵引拉杆、转臂节点、金属橡胶堆等各个部件之间都是弹性连接,因此其纵向悬挂刚度势必会对列车的纵向动力学响应造成影响.为了更准确地模拟列车实际工况,需要建立包含转向架纵向力学模型的精细化列车纵向动力学模型(以下简称精细模型).

单节车厢的列车模型如图2所示.

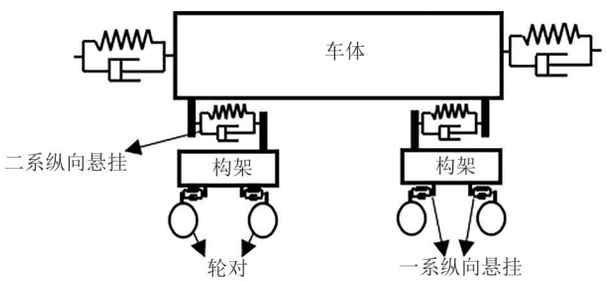


图2　单节车厢的精细纵向动力学模型

Fig.2　Refined longitudinal dynamics model of a single car

相比传统模型,单节车厢的精细模型考虑了车体与构架之间的二系纵向悬挂系统(由中心销、中心销套、牵引拉杆、空气弹簧组成)、构架与轮对之间的一系纵向悬挂系统(由钢弹簧、转臂节点、金属橡胶堆组成).二系纵向悬挂系统和一系纵向悬挂系统均可以表示为弹簧-阻尼系统,结合车体之间车钩的弹簧-阻尼模型,精细化列车纵向动力学方程组可表示为

$$\begin{aligned}&m_i^{\mathrm{c}}\ddot{x}_i^{\mathrm{c}}-k_{i+1}^{\mathrm{c}}(x_{i+1}^{\mathrm{c}}-x_i^{\mathrm{c}})-c_{i+1}^{\mathrm{c}}(\dot{x}_{i+1}^{\mathrm{c}}-\dot{x}_i^{\mathrm{c}})+\\&k_i^{\mathrm{c}}(x_i^{\mathrm{c}}-x_{i-1}^{\mathrm{c}})+c_i^{\mathrm{c}}(\dot{x}_i^{\mathrm{c}}-\dot{x}_{i-1}^{\mathrm{c}})+k_i^{\mathrm{b}}(x_i^{\mathrm{c}}-x_i^{\mathrm{b1}})+\\&c_i^{\mathrm{b}}(\dot{x}_i^{\mathrm{c}}-\dot{x}_i^{\mathrm{b1}})+k_i^{\mathrm{b}}(x_i^{\mathrm{c}}-x_i^{\mathrm{b2}})+c_i^{\mathrm{b}}(\dot{x}_i^{\mathrm{c}}-\dot{x}_i^{\mathrm{b2}})+\\&m_i^{\mathrm{c}}g\delta=0\end{aligned}\tag{2}$$

$$\begin{aligned}&m_i^{\mathrm{b}}\ddot{x}_i^{\mathrm{b1}}-k_i^{\mathrm{b}}(x_i^{\mathrm{c}}-x_i^{\mathrm{b1}})-c_i^{\mathrm{b}}(\dot{x}_i^{\mathrm{c}}-\dot{x}_i^{\mathrm{b1}})+\\&k_i^{\mathrm{w}}(x_i^{\mathrm{b1}}-x_i^{\mathrm{w1}})+c_i^{\mathrm{w}}(\dot{x}_i^{\mathrm{b1}}-\dot{x}_i^{\mathrm{w1}})+\\&k_i^{\mathrm{w}}(x_i^{\mathrm{b1}}-x_i^{\mathrm{w2}})+c_i^{\mathrm{w}}(\dot{x}_i^{\mathrm{b1}}-\dot{x}_i^{\mathrm{w2}})+m_i^{\mathrm{b}}g\delta=0\end{aligned}\tag{3}$$

$$\begin{aligned}&m_i^{\mathrm{b}}\ddot{x}_i^{\mathrm{b2}}-k_i^{\mathrm{b}}(x_i^{\mathrm{c}}-x_i^{\mathrm{b2}})-c_i^{\mathrm{b}}(\dot{x}_i^{\mathrm{c}}-\dot{x}_i^{\mathrm{b2}})+\\&k_i^{\mathrm{w}}(x_i^{\mathrm{b2}}-x_i^{\mathrm{w3}})+c_i^{\mathrm{w}}(\dot{x}_i^{\mathrm{b2}}-\dot{x}_i^{\mathrm{w3}})+\\&k_i^{\mathrm{w}}(x_i^{\mathrm{b2}}-x_i^{\mathrm{w4}})+c_i^{\mathrm{w}}(\dot{x}_i^{\mathrm{b2}}-\dot{x}_i^{\mathrm{w4}})+m_i^{\mathrm{b}}g\delta=0\end{aligned}\tag{4}$$

$$\begin{aligned}&m_i^{\mathrm{w}}\ddot{x}_i^{\mathrm{w1}}-k_i^{\mathrm{w}}(x_i^{\mathrm{b1}}-x_i^{\mathrm{w1}})-c_i^{\mathrm{w}}(\dot{x}_i^{\mathrm{b1}}-\dot{x}_i^{\mathrm{w1}})+\\&m_i^{\mathrm{w}}g\delta+f_{\mathrm{b}}=0\end{aligned}\tag{5}$$

$$\begin{aligned}&m_i^{\mathrm{w}}\ddot{x}_i^{\mathrm{w2}}-k_i^{\mathrm{w}}(x_i^{\mathrm{b1}}-x_i^{\mathrm{w2}})-c_i^{\mathrm{w}}(\dot{x}_i^{\mathrm{b1}}-\dot{x}_i^{\mathrm{w2}})+\\&m_i^{\mathrm{w}}g\delta+f_{\mathrm{b}}=0\end{aligned}\tag{6}$$

$$\begin{aligned}&m_i^{\mathrm{w}}\ddot{x}_i^{\mathrm{w3}}-k_i^{\mathrm{w}}(x_i^{\mathrm{b2}}-x_i^{\mathrm{w3}})-c_i^{\mathrm{w}}(\dot{x}_i^{\mathrm{b2}}-\dot{x}_i^{\mathrm{w3}})+\\&m_i^{\mathrm{w}}g\delta+f_{\mathrm{b}}=0\end{aligned}\tag{7}$$

$$\begin{aligned}&m_i^{\mathrm{w}}\ddot{x}_i^{\mathrm{w4}}-k_i^{\mathrm{w}}(x_i^{\mathrm{b2}}-x_i^{\mathrm{w4}})-c_i^{\mathrm{w}}(\dot{x}_i^{\mathrm{b2}}-\dot{x}_i^{\mathrm{w4}})+\\&m_i^{\mathrm{w}}g\delta+f_{\mathrm{b}}=0\end{aligned}\tag{8}$$

式中:m_i^{c} 为第 i 节车体的质量;m_i^{b} 为第 i 节车体转向架的簧上质量;m_i^{w} 为第 i 节车体轮对的质量;k_i^{c} 为第 i 节车体与第 $i+1$ 节车体间车钩缓冲器的刚度;k_i^{b} 为第 i 节车体和两个转向架之间的二系纵向刚度;k_i^{w} 为第 i 节车体4条轮对和构架之间的一系纵向刚度;c_i^{c} 为第 i 节车体与第 $i+1$ 节车体间车钩缓冲器的阻尼;c_i^{b} 为第 i 节车体和转向架之间的二系纵向阻尼;c_i^{w} 为第 i 节车体轮对和构架之间的一系纵向阻尼;x_i^{c}、$\dot{x}_i^{\mathrm{c}}$、$\ddot{x}_i^{\mathrm{c}}$ 分别为第 i 节车体的位移、速度和加速度;x_i^{b1}、$\dot{x}_i^{\mathrm{b1}}$、$\ddot{x}_i^{\mathrm{b1}}$ 分别为第 i 节车体第一个转向架的位移、速度和加速度;x_i^{b2}、$\dot{x}_i^{\mathrm{b2}}$、$\ddot{x}_i^{\mathrm{b2}}$ 分别为第 i 节车体第二个转向架的位移、速度和加速度;x_i^{w1}、$\dot{x}_i^{\mathrm{w1}}$、$\ddot{x}_i^{\mathrm{w1}}$ 至 x_i^{w4}、$\dot{x}_i^{\mathrm{w4}}$、$\ddot{x}_i^{\mathrm{w4}}$ 分别为第 i 节车体第1个轮对至第4个轮对的位移、速度和加速度;f_{b} 为列车单个轮对受到的制动载荷;g 和 δ 分别是重力加速度和线路坡度.式(2)~式(8)共同组成了一节车厢的纵向动力学模型,其中共有7个自由度(1节车体、2个构架和4条轮对).

对于2列4编组列车进行灵活编组的情况,共有56个自由度,精细模型可转变为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{X}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{X}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{F}=\boldsymbol{0}\tag{9}$$

式中:$\boldsymbol{M}$ 为列车车体、构架、轮对质量组成的质量矩阵;$\boldsymbol{C}$ 为列车车钩系统、二系悬挂、一系悬挂组成的阻尼矩阵;$\boldsymbol{K}$ 为列车车钩系统、二系悬挂、一系悬挂纵向刚度组成的刚度矩阵;$\boldsymbol{X}$、$\dot{\boldsymbol{X}}$、$\ddot{\boldsymbol{X}}$ 分别为列车车体、构架、轮对组成的的位移向量、速度向量和加速度向量;$\boldsymbol{F}$ 为列车受到的载荷(主要包括制动力和重力分力)组成的矩阵;$\boldsymbol{O}$ 为0矩阵.各矩阵分别为 $\boldsymbol{M}=\mathrm{diag}[\boldsymbol{M}_1\ \ \boldsymbol{M}_2\ \ \cdots\ \ \boldsymbol{M}_8]$,diag 为对角阵;$\boldsymbol{M}_i=\mathrm{diag}[m_i^{\mathrm{c}}\ \ m_i^{\mathrm{b1}}\ \ m_i^{\mathrm{b2}}\ \ m_i^{\mathrm{w1}}\ \ m_i^{\mathrm{w2}}\ \ m_i^{\mathrm{w3}}\ \ m_i^{\mathrm{w4}}]$;$\boldsymbol{X}=[\boldsymbol{X}_1\ \ \boldsymbol{X}_2\ \ \cdots\ \ \boldsymbol{X}_8]^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{X}_i=[x_i^{\mathrm{c}}\ \ x_i^{\mathrm{b1}}\ \ x_i^{\mathrm{b2}}\ \ x_i^{\mathrm{w1}}\ \ x_i^{\mathrm{w2}}\ \ x_i^{\mathrm{w3}}\ \ x_i^{\mathrm{w4}}]^{\mathrm{T}}$;$\dot{\boldsymbol{X}}_i=[\dot{x}_i^{\mathrm{c}}\ \ \dot{x}_i^{\mathrm{b1}}\ \ \dot{x}_i^{\mathrm{b2}}\ \ \dot{x}_i^{\mathrm{w1}}\ \ \dot{x}_i^{\mathrm{w2}}\ \ \dot{x}_i^{\mathrm{w3}}\ \ \dot{x}_i^{\mathrm{w4}}]^{\mathrm{T}}$;$\ddot{\boldsymbol{X}}_i=[\ddot{x}_i^{\mathrm{c}}\ \ \ddot{x}_i^{\mathrm{b1}}\ \ \ddot{x}_i^{\mathrm{b2}}\ \ \ddot{x}_i^{\mathrm{w1}}\ \ \ddot{x}_i^{\mathrm{w2}}\ \ \ddot{x}_i^{\mathrm{w3}}\ \ \ddot{x}_i^{\mathrm{w4}}]^{\mathrm{T}}$;

$$\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{K}_{1,1}&\boldsymbol{K}_{1,2}&\boldsymbol{O}&\boldsymbol{O}&\cdots&\boldsymbol{O}\\\boldsymbol{O}&\boldsymbol{K}_{2,2}&\boldsymbol{K}_{2,3}&\boldsymbol{O}&\cdots&\boldsymbol{O}\\\boldsymbol{O}&\boldsymbol{O}&\ddots&\ddots&\ddots&\vdots\\\vdots&\vdots&\ddots&\boldsymbol{K}_{7,7}&\boldsymbol{K}_{7,8}&\boldsymbol{O}\\\boldsymbol{O}&\boldsymbol{O}&\cdots&\boldsymbol{O}&\boldsymbol{K}_{8,8}&\boldsymbol{K}_{8,9}\end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{K}_{i,i}=\begin{bmatrix}\left(k_{i+1}^{\mathrm{c}}+k_i^{\mathrm{c}}+2k_i^{\mathrm{b}}\right) & -k_i^{\mathrm{b}} & -k_i^{\mathrm{b}} & 0 & 0 & 0 & 0\\ -k_i^{\mathrm{b}} & \left(k_i^{\mathrm{b}}+2k_i^{\mathrm{w}}\right) & 0 & -k_i^{\mathrm{w}} & -k_i^{\mathrm{w}} & 0 & 0\\ -k_i^{\mathrm{b}} & 0 & \left(k_i^{\mathrm{b}}+2k_i^{\mathrm{w}}\right) & 0 & 0 & -k_i^{\mathrm{w}} & -k_i^{\mathrm{w}}\\ 0 & -k_i^{\mathrm{w}} & 0 & k_i^{\mathrm{w}} & 0 & 0 & 0\\ 0 & -k_i^{\mathrm{w}} & 0 & 0 & k_i^{\mathrm{w}} & 0 & 0\\ 0 & 0 & -k_i^{\mathrm{w}} & 0 & 0 & k_i^{\mathrm{w}} & 0\\ 0 & 0 & -k_i^{\mathrm{w}} & 0 & 0 & 0 & k_i^{\mathrm{w}}\end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{C}_{1,1} & \boldsymbol{C}_{1,2} & \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} & \cdots & \boldsymbol{O}\\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{C}_{2,2} & \boldsymbol{C}_{2,3} & \boldsymbol{O} & \cdots & \boldsymbol{O}\\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots\\ \vdots & \vdots & \ddots & \boldsymbol{C}_{7,7} & \boldsymbol{C}_{7,8} & \boldsymbol{O}\\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} & \cdots & \boldsymbol{O} & \boldsymbol{C}_{8,8} & \boldsymbol{C}_{8,9}\end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{K}_{i,i+1}=\mathrm{diag}\left[-k_{i+1}^{\mathrm{c}}\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\right];$$

$$\boldsymbol{C}_{i,i+1}=\mathrm{diag}\left[-c_{i+1}^{\mathrm{c}}\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\right];$$

$$\boldsymbol{C}_{i,i}=\begin{bmatrix}\left(c_{i+1}^{\mathrm{c}}+c_i^{\mathrm{c}}+2c_i^{\mathrm{b}}\right) & -c_i^{\mathrm{b}} & -c_i^{\mathrm{b}} & 0 & 0 & 0 & 0\\ -c_i^{\mathrm{b}} & \left(c_i^{\mathrm{b}}+2c_i^{\mathrm{w}}\right) & 0 & -c_i^{\mathrm{w1}} & -c_i^{\mathrm{w}} & 0 & 0\\ -c_i^{\mathrm{b}} & 0 & \left(c_i^{\mathrm{b}}+2c_i^{\mathrm{w}}\right) & 0 & 0 & -c_i^{\mathrm{w}} & -c_i^{\mathrm{w}}\\ 0 & -c_i^{\mathrm{w}} & 0 & c_i^{\mathrm{w}} & 0 & 0 & 0\\ 0 & -c_i^{\mathrm{w}} & 0 & 0 & c_i^{\mathrm{w}} & 0 & 0\\ 0 & 0 & -c_i^{\mathrm{w}} & 0 & 0 & c_i^{\mathrm{w}} & 0\\ 0 & 0 & -c_i^{\mathrm{w}} & 0 & 0 & 0 & c_i^{\mathrm{w}}\end{bmatrix};$$

$$F=\left[F_1\quad F_2\quad \cdots\quad F_8\right]^{\mathrm{T}};$$

$$F_i=\left[m_i^{\mathrm{c}}g\delta\quad m_i^{\mathrm{b}}g\delta\quad m_i^{\mathrm{b}}g\delta\quad m_i^{\mathrm{w}}g\delta+f_{\mathrm{b}}\right.$$
$$\left.m_i^{\mathrm{w}}g\delta+f_{\mathrm{b}}\quad m_i^{\mathrm{w}}g\delta+f_{\mathrm{b}}\quad m_i^{\mathrm{w}}g\delta+f_{\mathrm{b}}\right]^{\mathrm{T}}.$$

2　不同模型下列车动力学响应对比

为对比灵活编组时传统模型与精细模型的差异，以北京 3 号线为例进行分析，在灵活编组作业过程中，去联挂车会以较低的速度与静止的被联挂车进行联挂，被联挂列车将会产生预期之外的位移，给信号系统和列车控制系统带来不确定性，当位移超过一定限度后甚至会引发乘客恐慌．因此从安全性角度出发，需要确保列车不发生较大位移以避免溜逸风险．在舒适度方面，乘客舒适度的评价指标具备多个维度，包括动力学舒适度、温湿度舒适度、压力波舒适度、噪声舒适度等[22-24]．在编组作业时，由于列车发生碰撞，车厢的动力学响应会有较大波动，乘客会明显感觉到动力学舒适度下降．参考文献[25]及文献[26]相关要求，本文采用加速度和冲击率作为动力学舒适度评价的主要指标．

基于相应标准，考虑不同联挂速度和不同线路坡度下 2 种模型在灵活编组作业的位移、加速度和冲击率，并以此评估联挂作业时的安全性和舒适度．列车及环境参数如表 1 所示．

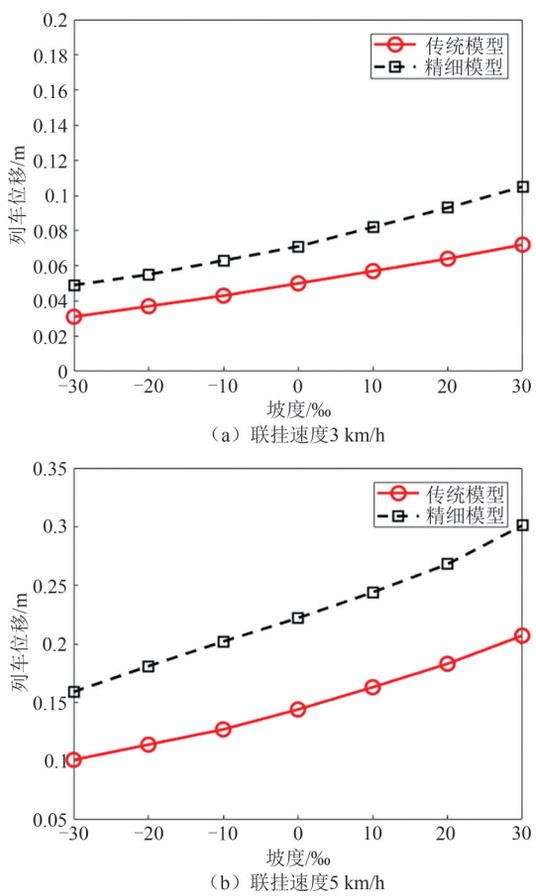
2.1　线路坡度对编组时列车位移的影响

当线路的坡度变化时，分别以 3 km/h 和 5 km/h 速度进行联挂作业，列车进行编组的最终位移如图 3 所示．

表 1　列车及线路参数

Table 1　Train and route parameters

列车及环境参数	数值
车体质量 m_i^{c}/kg	动车：25 500；拖车：29 000
转向架构架质量 m_i^{b}/kg	动车：3 870；拖车：2 450
转向架轮对质量 m_i^{w}/kg	动车：1 865；拖车：1 525
坡度 δ/‰	−30～30
车钩参数：胶泥缓冲器参数	触发力：800 kN；行程：80 mm
车钩参数：自动车钩压溃管参数	触发力：1 100 kN；行程：200 mm
车钩参数：半永久车钩压溃管	触发力：1 050～1 200 kN；行程：380 mm
制动力 f_{b}/kN	96.5
二系悬挂纵向刚度 k_i^{b}/(N/m)	1.3×10^7
二系悬挂纵向阻尼 c_i^{b}/(Ns/m)	9.6×10^4
一系悬挂纵向刚度 k_i^{w}/(N/m)	2×10^7
一系悬挂纵向阻尼 c_i^{w}/(Ns/m)	1.14×10^5



（a）联挂速度3 km/h

（b）联挂速度5 km/h

图 3　不同坡度下的列车位移

Fig.3　Train displacement under different track gradients

由图 3 可知：联挂速度为 3 km/h 时，传统模型的列车位移从 31 mm 增加到 72 mm，精细模型的列车位移从 49 mm 增加到 105 mm，增加 114%；联挂速度为 5 km/h 时，传统模型的列车位移从 101 mm 增加到 207 mm，精细模型的列车位移从 159 mm 增

加到 301 mm,增加 89%;在较大下坡和较大速度下进行编组作业时,列车位移更大,列车溜逸风险更高,安全性降低;精细模型的列车位移更大,这表明在考察编组作业的列车位移时,若采用传统模型,会低估列车的位移,产生潜在的碰撞风险.

2.2　线路坡度对编组时乘客舒适度的影响

在不同坡度下,分别以 3 km/h 和 5 km/h 的速度开展联挂作业,列车车体的最大加速度如图 4 所示.

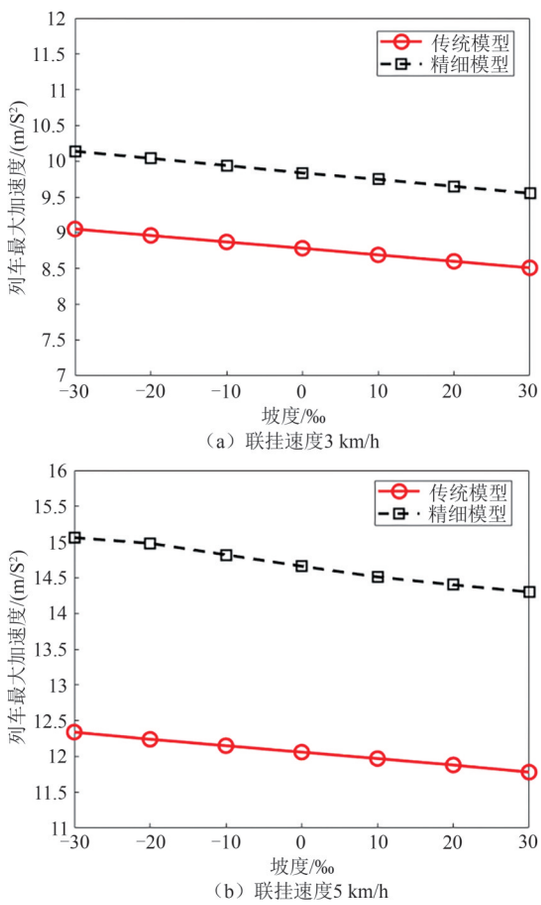


图 4　不同线路坡度下的列车最大加速度

Fig.4　Maximum train acceleration under different track gradients

由图 4 可知:①联挂速度为 3 km/h 时,传统模型的列车最大加速度从 9.05 m/s² 下降到 8.51 m/s²,精细模型的列车最大加速度从 10.14 m/s² 下降到 9.55 m/s²;联挂速度为 5 km/h 时,传统模型的列车最大加速度从 12.34 m/s² 下降到 11.78 m/s²,精细模型的列车最大加速度从 15.06 m/s² 下降到 14.3 m/s²,减少了 5%.②精细模型的列车加速度均高于传统模型,说明在考察编组作业列车加速度时若采用传统模型,会低估车体的振动加速度,从而导致乘客舒适度下降;随着坡度增大,列车车体的最大加速度几乎呈现线性下降的趋势.③2 种模型的车体最大加速度的差异受坡度变化影响较小,受联挂速度影响较大,当联挂速度分别为 3 km/h 和 5 km/h 时,精细模型的最大车体加速度比传统模型的分别增大 1.06 m/s² 和 2.6 m/s².④在较大上坡和较大速度下进行编组作业时,车体最大加速度更大,乘客舒适度更差.

不同坡度下分别以 3 km/h 速度和 5 km/h 速度进行联挂作业时,列车车体的最大冲击率如图 5 所示.由图 5 可知:①联挂速度为 3 km/h 时,传统模型的列车最大冲击率在 204.5 m/s³ 和 235.6 m/s³ 之间波动,精细模型的列车最大冲击率在 420.3 m/s³ 和 455.2 m/s³ 之间波动;联挂速度为 5 km/h 时,传统模型的列车最大冲击率在 385.2 m/s³ 和 458.3 m/s³ 之间波动,精细模型的列车最大冲击率在 562.9 m/s³ 和 652.6 m/s³ 之间波动.②精细模型的列车冲击率均高于传统模型,并且速度较快时,不同坡度下冲击率离散性更大;相比传统模型,精细模型的车体冲击率大于传统模型,乘客舒适度更差.

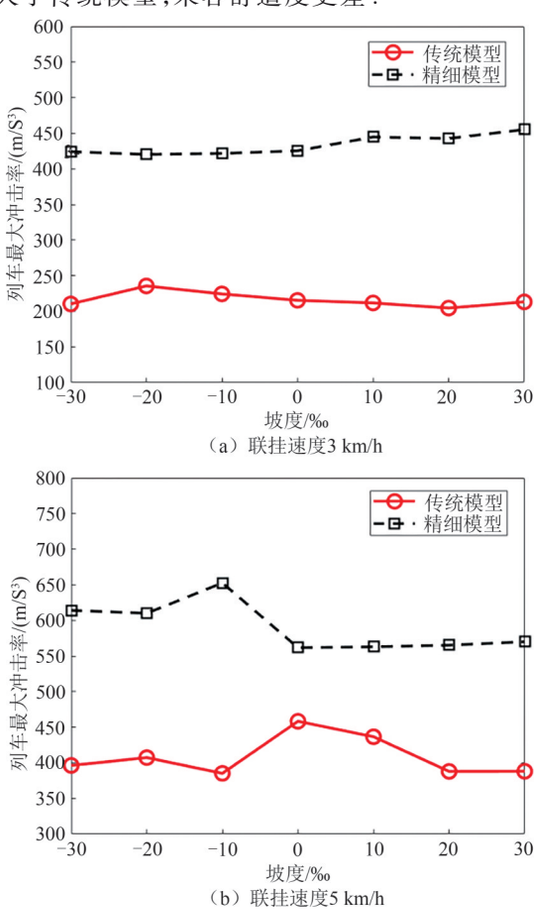


图 5　不同线路坡度下的列车最大冲击率

Fig.5　Maximum train jerk under different track gradients

3　现场试验验证

为进一步对比传统模型和精细模型的差异,对 2 列 4 编组列车进行现场联挂测试,如图 6 所示.图 6

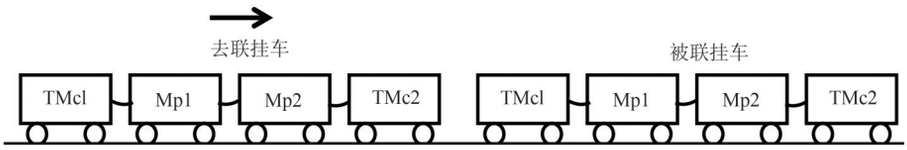


图 6 联挂测试示意

Fig.6 Schematic diagram of coupling test

中：TMc1 和 TMc2 分别代表带司机室的头车和尾车，Mp1 和 Mp2 分别代表带受电弓的 2 节中间车.2 列车均为 AW0 载荷条件，试验线路为平直轨道，其中一列车为静止的 4 编组列车（被联挂车），另一列车为动态行驶的 4 编组列车（去联挂车）.联挂测试时，去联挂车先低速牵引至距离被联挂车 4 米的距离处停止，同时将被联挂车两端主控钥匙推至 OFF 位，此时被联挂车施加紧急制动.将去联挂列车通过网络系统将洗车模式限速值调整至相应作业速度（3 km/h、5 km/h），并在列车网络显示屏操作进入洗车模式.将去联挂列车方向手柄推至前向，牵引手柄推至最大级位，实时追踪车辆速度到达预设编组速度，直至两列车碰撞完成联挂.

列车总体参数如表 2 所示.

在被联挂车车轮与钢轨之间的接触位置用胶带做好标记.联挂前，车轮上的标记与钢轨上的标记在同一位置；联挂后，被联挂列车受到联挂过程中的冲击会向前运动，不同作业速度下的列车位移如图 7 所示.

列车分别采用 3 km/h 和 5 km/h 的速度各自进行了 3 次编组作业.通过测量编组作业后被联挂列车的轮轨接触点位置变化即可得到列车运行的距离.

以 3 km/h 速度进行联挂时，仿真结果与试验结果对比如表 3 所示.由表 3 可知：①当列车以 3 km/h 速度联挂时，3 次编组作业的列车位移分别是 70 mm、55 mm 和 65 mm，平均值为 63 mm；此时传统模型和精细模型的列车位移仿真结果分别为 51 mm 和 78 mm，相比试验平均结果的误差分别为 19% 和 24%.由于试验结果存在一定离散性，2 种模型与试验结果对比差异并不明显.②当列车以 5 km/h 速度进行联挂时，3 次编组作业的列车位移分别是 230 mm、240 mm 和 265 mm，平均值为 245 mm；传统模型和精细模型的仿真结果分别为 145 mm 和 222 mm，相比试验平均结果的误差分别为 41% 和 10%，精细模型仿真的列车位移比传统模型降低了约 30%，与试验结果更接近.

表 2 列车总体参数

Tab.2 Overall train parameters

项目名称	列车参数
额定供电电压/V	DC 1500
受电方式	接触网受电弓受电
最高运行速度/（km/h）	80
空车质量/kg	42 000
列车速度从 0 km/h 增加至 80 km/h 时的平均加速度/（m/s^2）	≥0.6
列车速度从 80 km/h 减少至 0 km/h 时的平均紧急制动减速度/（m/s^2）	≥1.2
轴重/t	17



（a）被联挂列车初始状态 （b）被联挂列车位移(3 km/h) （c）被联挂列车位移(5 km/h)

图 7 不同作业速度下的列车位移

Fig.7 Displacement of the train at different operating speeds

表 3 编组作业时的列车位移对比

Tab.3 Comparison of train displacement during marshalling operations

联挂速度/（km/h）	传统模型位移/mm	精细模型位移/mm	第 1 次编组位移/mm	第 2 次编组位移/mm	第 3 次编组位移/mm
3	51	78	70	55	65
5	145	222	230	240	265

通过在不同速度下进行联挂测试,可以发现试验结果存在一定的离散性,这是列车结构的复杂性与部分参数的不确定性造成的.3次编组作业试验取平均值并与2种仿真模型对比,可知在联挂速度为5 km/h时,考虑了转向架特性的精细模型更接近试验结果.

4　结论

1)传统模型将整个车厢视为一个质点,本文建立了车厢-构架-轮对多自由度的精细纵向动力学模型.精细模型下列车编组作业时的位移和加速度、冲击率均大于传统模型,因而实际编组过程中的列车溜逸风险和乘客舒适度可能高于基于传统模型的评估结果.

2)在不同坡度下进行灵活编组时列车的溜逸风险和乘客舒适度有一定区别.在上坡进行编组作业时,溜逸风险降低,安全性提高,但乘客舒适度降低.

3)当作业速度为5 km/h时,考虑转向架纵向悬挂刚度的列车纵向动力学模型相比传统的纵向动力学模型与实测结果更接近,位移误差比传统模型降低了约30%.

本文内容对灵活编组作业过程中的动力学响应分析有助于在实践中确定合适的作业条件,提升作业过程中的安全性与乘客舒适性.但是没有考虑列车自动控制过程对编组作业的影响.在实际运营中,编组作业往往采用自动控制,而信号防护和自动驾驶受限于传感器精度、响应延时和安全余量等因素,实际列车联挂速度和预期联挂速度存在一定差异,尤其是当速度较低时这种差异更加明显.为了更有效指导实际,后续应充分考虑信号系统-车辆电气系统-车辆机械执行系统的控制与响应,将上述控制器和观测器的特性纳入动力学模型中一并考虑,并通过相应的试验得到实际的控制和机械参数,实现更精细的分析.另外,灵活编组的运营模式会使得列车车钩面对更多的联挂冲击,可能缩短车钩的实际使用寿命,后续需要结合灵活编组的工况对车钩的疲劳可靠性进行更深入的分析.

参考文献(References):

[1] 刘缘,黄慧芳,朱丹坤,等.考虑乘客服务水平的城市轨道交通平峰期节能运行图研究[J].铁道运输与经济,2023,45(9):154－161.
Liu Yuan, Huang Huifang, Zhu Dankun, et al. Energy saving train working diagram considering passenger flow during off-peak periods [J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(9): 154－161.(in Chinese)

[2] 田媛媛,彭磊.双碳背景下城市轨道交通列车灵活编组技术研究[J].城市轨道交通研究,2024,27(9):288－292.
Tian Yuanyuan, Peng Lei. Research on flexible train marshalling technology for urban rail transit under the dual-carbon background [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(9): 288－292.(in Chinese)

[3] 宋占勋,方少轩,饶东,等.北京轨道交通互联互通灵活编组的车辆试验验证方案[J].城市轨道交通研究,2025,28(4):100－103.
Song Zhanxun, Fang Shaoxuan, Rao Dong, et al. Test and verification scheme for interconnected/intercommunicated flexible formation vehicles in Beijing rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(4): 100－103.(in Chinese)

[4] 宋展鹏,田小鹏,牛惠民,等.灵活编组条件下城市轨道交通列车时刻表与车底运用综合优化[J].铁道科学与工程学报,2025,22(7):2960－2972.
Song Zhanpeng, Tian Xiaopeng, Niu Huimin, et al. Integrated optimization of train timetable and rolling stock circulation with flexible composition strategies for an urban rail transit line[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(7): 2960－2972.(in Chinese)

[5] 肖李蔚宁,柏赟.基于虚拟编组技术的城市轨道交通列车联挂与摘挂时距参数研究[J].城市轨道交通研究,2025,28(7):142－148.
Xiao Liweining, Bai Yun. Temporal-spatial parameters for urban rail transit train coupling and decoupling operations based on virtual coupling technology[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(7): 142－148.(in Chinese)

[6] 魏柏全,石海丰,姜璐,等.基于车车通信的城轨列控系统在线编组技术方法研究[J].都市快轨交通,2026,39(2):1－12.
Wei Baiquan, Shi Haifeng, Jiang Lu, et al. Online marshalling technology for of urban rail train control systems based on vehicle-to-vehicle communication [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2026, 39(2): 1－12.(in Chinese)

[7] 范颖慧.不同场景的在线灵活编组联挂作业研究[J].城市轨道交通研究,2024,27(12):333－336.
Fan Yinghui. On-line flexible marshalling and coupling operations in different scenarios[J]. Urban Mass Transit, 2024,27(12):333－336.(in Chinese)

[8] 李伟,黄嘉琪,罗钦,等.面向Y型线路的城市轨道交通在线编解灵活编组运营模式研究[J].铁道学报,2025,47(4):12－24.
Li Wei, Huang Jiaqi, Luo Qin, et al. Research of train schedule using flexible train composition under online coupling/decoupling mode for Y-type lines in urban rail transit[J]. Journal of the China Railway Society, 2025, 47(4): 12－24.(in Chinese)

[9] 李兆龄，严业智．城市轨道交通信号系统灵活编组关键技术研究[J]．铁路通信信号工程技术，2021，18(12)：72－77.
Li Zhaoling，Yan Yezhi. Key technologies of flexible marshalling in signaling system for urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering，2021，18(12)：72－77.(in Chinese)

[10] 马青春，郭燕辉，李雪飞，等．基于灵活编组无人驾驶车辆车钩连挂技术概述[J]．智慧轨道交通，2022，59(4)：67－69.
Ma Qingchun，Guo Yanhui，Li Xuefei，et al. Overview of coupler connection technology of unmanned vehicle based on flexible marshalling[J]. Smart Rail Transit，2022，59(4)：67－69.(in Chinese)

[11] 李茁，邢松龄，穆文雄，等．灵活编组智能列车的钩缓装置选型设计[J]．科技创新与应用，2024，14(17)：112－116.
Li Zhuo，Xing Songling，Mu Wenxiong，et al. Selection and design of hook-and-slow device for intelligent trains with flexible grouping[J]. Technology Innovation and Application，2024，14(17)：112－116.(in Chinese)

[12] 赵鹏，唐化勇，苗津铨，等．基于全自动驾驶灵活编组的列车网络控制系统设计与研究[J]．铁道车辆，2025，63(1)：27－35.
Zhao Peng，Tang Huayong，Miao Jinquan，et al. Design and research of train network control system based on full automatic operation and flexible marshalling[J]. Rolling Stock，2025，63(1)：27－35.(in Chinese)

[13] 徐少红，曹赛男，邵凯兰，等．灵活编组列车乘客信息系统自动编组重构技术研究[J]．智慧轨道交通，2025，62(5)：61－65.
Xu Shaohong，Cao Sainan，Shao Kailan，et al. Study on automatic marshalling reconstruction technology of passenger information system for flexible marshalling trains[J]. Intelligent Rail Transit，2025，62(5)：61－65.(in Chinese)

[14] 杨雨桐，陈志，张伟．全自动运行列车在线重联解编方案设计[J]．机车车辆工艺，2025，61(3)：7－11.
Yang Yutong，Chen Zhi，Zhang Wei. Design of online locomotive double heading and disassembly scheme of fully automatic operated trains[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology，2025，61(3)：7－11.(in Chinese)

[15] 熊芯，张天婴．基于仿真模型与线性回归的重载列车纵向力分析方法[J]．中国铁路，2026(4)：1－9.
Xiong Xin，Zhang Tianying. Longitudinal force analysis method for heavy haul trains based on simulation model and linear regression[J]. China Railway，2026(4)：1－9.(in Chinese)

[16] 周占松，王馨悦，王开云．不同万吨编组列车空气制动特性对纵向动力学性能影响[J/OL]．交通运输工程与信息学报，2026.doi:10.19961/j.cnki.1672-4747.2025.12.003.
Zhou Zhansong，Wang Xinyue，Wang Kaiyun. The influence of air braking characteristics of different 10 000-tonne train formations on their longitudinal dynamic performance[J/OL]. Journal of Transportation Engineering and Information，2026.doi:10.19961/j.cnki.1672-4747.2025.12.003.(in Chinese)

[17] 王建华，金洋，冉祥瑞．2万吨重载组合列车制动操纵对纵向冲动的影响研究[J]．机械，2026，53(2)：39－46.
Wang Jianhua，Jin Yang，Ran Xiangrui. Influence of Braking Operation on Longitudinal Impulse of 20，000-Ton Heavy-Haul Combined Train[J]. Machinery，2026，53(2)：39－46.(in Chinese)

[18] 孟繁彬，齐亚文，朱兴晨，等．基于列车用缓冲器失效后纵向动力学分析[J]．智慧轨道交通，2026，63(1)：18－22.
Meng Fanbin，Qi Yawen，Zhu Xingchen，et al. Longitudinal dynamics analysis based on failure of train buffers[J]. Smart Rail Transit，2026，63(1)：18－22.(in Chinese)

[19] 刁顺，倪文波，王雪梅，等．基于多质点模型的列车制动距离计算方法研究[J]．机械，2025，52(8)：55－61.
Diao Shun，Ni Wenbo，Wang Xuemei，et al. Research on Train Braking Distance Calculation Method Based on Multi-Particle Model[J]. Machinery，2025，52(8)：55－61.(in Chinese)

[20] 黄煜航，付茂海，邓涛，等．长大坡道线路货运列车速度控制研究[J]．机械工程与自动化，2025，54(4)：13－16.
Huang Yuhang，Fu Maohai，Deng Tao，et al. Research on speed control of freight train on long sloping lines[J]. Mechanical Engineering & Automation，2025，54(4)：13－16.(in Chinese)

[21] 张一喆，吕凯凯，寸冬冬，等．重联方式对动力集中动车组动力学性能影响[J/OL]．交通运输工程学报，2025.doi:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.135.
Zhang Yizhe，Lyu Kaikai，Cun Dongdong，et al. The influence of coupled formation on the dynamic performance of power concentrated EMU[J/OL]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2025. doi：10.19818/j. cnki. 1671-1637.2026.135.(in Chinese)

[22] 辜铮，唐兆，胡玉炜，等．移动终端驱动的地铁列车舒适度评价方法[J]．铁道标准设计，2024，68(8)：153－160.
Gu Zheng，Tang Zhao，Hu Yuwei，et al. Evaluation of subway train comfort driven by mobile terminal[J]. Railway Standard Design，2024，68(8)：153－160.(in Chinese)

[23] 张洪，文晓玲，刘东坡，等．旅客列车舒适性评价方法和指标综述[J]．铁道技术标准(中英文)，2024，6(7)：7－15.
Zhang Hong，Wen Xiaoling，Liu Dongpo，et al. An

overview of evaluation methods and indicators for passenger train comfort [J]. Railway Technical Standard (Chinese&English),2024,6(7):7－15.(in Chinese)

[24] 彭勇,许迪雅,范超杰,等.基于心率变异性的高速列车乘员舒适度评价研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(2):453－462.
Peng Yong, Xu Diya, Fan Chaojie, et al. Research on comfort evaluation of high-speed train passengers based on heart rate variability[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(2): 453－462.(in Chinese)

[25] 中华人民共和国国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范:GB/T 5599—2019[S].北京:中国标准出版社,2019.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock: GB/T 5599—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.(in Chinese)

[26] European Committee for Standardization (CEN). Railway applications-Braking-Mass transit brake systems—Part 1: Performance requirements: BSEN 13452-1: 2003. [S]. Brussels: CEN Management Centre, 2003.