



磁浮车桥系统随机振动响应与可靠度分析

李 铮^{1,2}, 毛建锋^{1,2}, 余志武^{1,2}

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 高速铁路建造技术国家工程研究中心, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 随着高速磁浮交通技术的快速发展, 磁浮车辆-桥梁耦合系统在运行过程中面临轨道不平顺、系统参数不确定性等多重随机激励的挑战。这些随机因素显著影响系统的动力响应, 进而关系到行车安全性与乘坐舒适性。传统确定性分析方法难以精确刻画系统非线性行为下响应量的非高斯、非平稳概率演化特征。为此, 文章提出一种融合概率密度演化方法与动力可靠度理论的综合分析框架, 用于研究磁浮车桥系统的随机响应与系统可靠度。首先, 建立了包含210个自由度的精细化磁浮车桥耦合动力学模型; 其次, 采用概率密度演化方法, 通过引入广义概率密度演化方程, 直接求解系统关键响应的瞬态联合概率密度函数, 精确揭示其随机演化过程; 再次, 基于首次超越破坏准则, 定义系统在多维极限状态下的功能函数, 并利用已求得的概率密度信息, 高效计算系统在时变及全寿命周期内的动力可靠度指标; 最后, 通过数值算例, 系统分析不同随机因素对系统响应统计特性与可靠度的影响规律。该研究为磁浮车桥耦合系统的随机动力分析、概率性安全评估与抗风险设计提供了新的理论工具与决策依据。

关键词: 磁悬浮系统; 车桥耦合; 随机响应; 概率密度演化方法; 动力可靠度; 轨道不平顺; 有限元法

中图分类号: U237; U441⁺.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)02-0088-08

0 引言

随着全球城市化进程的加速及区域经济一体化对交通效率要求的提高, 高速磁浮交通系统凭借其速度快、爬坡能力强、噪声低及维护成本低等显著优势, 已成为当代轨道交通技术的重要发展方向^[1-2]。不同于传统的轮轨交通, 磁浮车辆通过电磁力悬浮于轨道梁上, 这种非接触式的支撑特性使得车桥之间的相互作用表现出强烈的非线性与耦合性^[3]。桥梁作为磁浮系统最主要的承载结构, 其动力响应不仅直接影响车辆的运行平稳性与行车安全, 更关乎整条线路的长期服役寿命^[4-5]。因此, 开展磁浮车桥耦合动力学的精细化研究, 是实现磁浮工程安全设计与运维的关键。

在实际运行环境下, 磁浮车桥系统面临着复杂的

不确定因素^[6-7]。首先, 轨道不平顺作为最主要的随机激励源, 其幅值与频率特性具有明显的随机性; 其次, 车辆与桥梁系统的物理参数往往因制造误差、材料老化或环境变化而呈现离散性。这些随机因素在高度非线性的悬浮控制系统与车桥耦合作用下, 会导致系统动力响应表现出显著的非高斯、非平稳特征^[8]。传统的确定性分析方法通常采用定值参数和典型工况, 难以捕捉系统在概率空间内的演化特征, 往往导致设计结果偏于保守或存在未知的安全风险^[9-10]。

针对随机动力系统的研究, 传统的蒙特卡洛模拟虽具有普适性, 但对于包含数百个自由度的高维精细化磁浮模型, 其计算成本高昂, 难以满足工程时效要求。基于随机振动理论的线性化方法虽计算速度较快, 但在处理磁浮系统强非线性行为时精度有限, 且难以获得完整的概率密度函数。由学者李杰、陈建兵提出

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFB4302500); 国家自然科学基金项目 (52478321, 52078485); 湖南省科技创新计划 (2025RC3028); 湖南省自然科学基金项目 (2024JJ5427)

通信作者: 毛建锋, 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事轨道交通车-轨-桥系统随机动力学方面的研究; E-mail: jfmao1@csu.edu.cn

引用格式: 李铮, 毛建锋, 余志武. 磁浮车桥系统随机振动响应与可靠度分析[J]. 机车电传动, 2026(2): 88-95.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.010.

Citation: LI Zheng, MAO Jianfeng, YU Zhiwu. Stochastic vibration response and reliability analysis for maglev vehicle-bridge systems[J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 88-95.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.010.

的概率密度演化方法 (probability density evolution method, PDEM) ^[11-12], 基于状态空间中的概率守恒原理, 建立了广义概率密度演化方程, 能够直接获取系统响应的瞬态概率密度信息, 不仅计算效率高, 而且能精确刻画非线性系统的概率演化规律, 为磁浮系统的精细化随机分析提供了强有力的数学工具。

本文将立足于高速磁浮车桥系统的安全性及可靠性评估, 提出一套融合 PDEM 与动力可靠度理论的综合分析框架。首先, 构建一个包含 210 个自由度的高保真磁浮车辆-桥梁耦合动力学模型, 全面考虑悬浮控制策略与空间振动特性。其次, 引入 PDEM。该方法通过建立并求解广义概率密度演化方程, 能够避免传统统计矩分析的局限, 直接获取系统响应在全时域内的瞬态联合概率密度函数。最后, 结合首次超越破坏准

则, 定量评估系统在复杂随机激励下的时变动力可靠度。

1 精细化磁浮车桥耦合动力学模型

1.1 磁浮列车模型

本磁悬浮列车模型基于德国 TR06 型常规导电高速磁悬浮列车开发, 但在悬浮架结构、电磁铁布置及控制参数上参照了我国速度 600 km/h 高速磁浮试验列车的技术特征, 具有较好的工程代表性, 模型如图 1 所示。数值模型采用以下假设: ①对列车子系统的主要部件 (包括车体、摇臂、悬浮架、悬浮磁铁和导向磁铁) 采用刚体假设, 忽略其弹性变形; ②假设桥梁振动和列车速度不受纵向列车振动影响; ③车体、悬浮

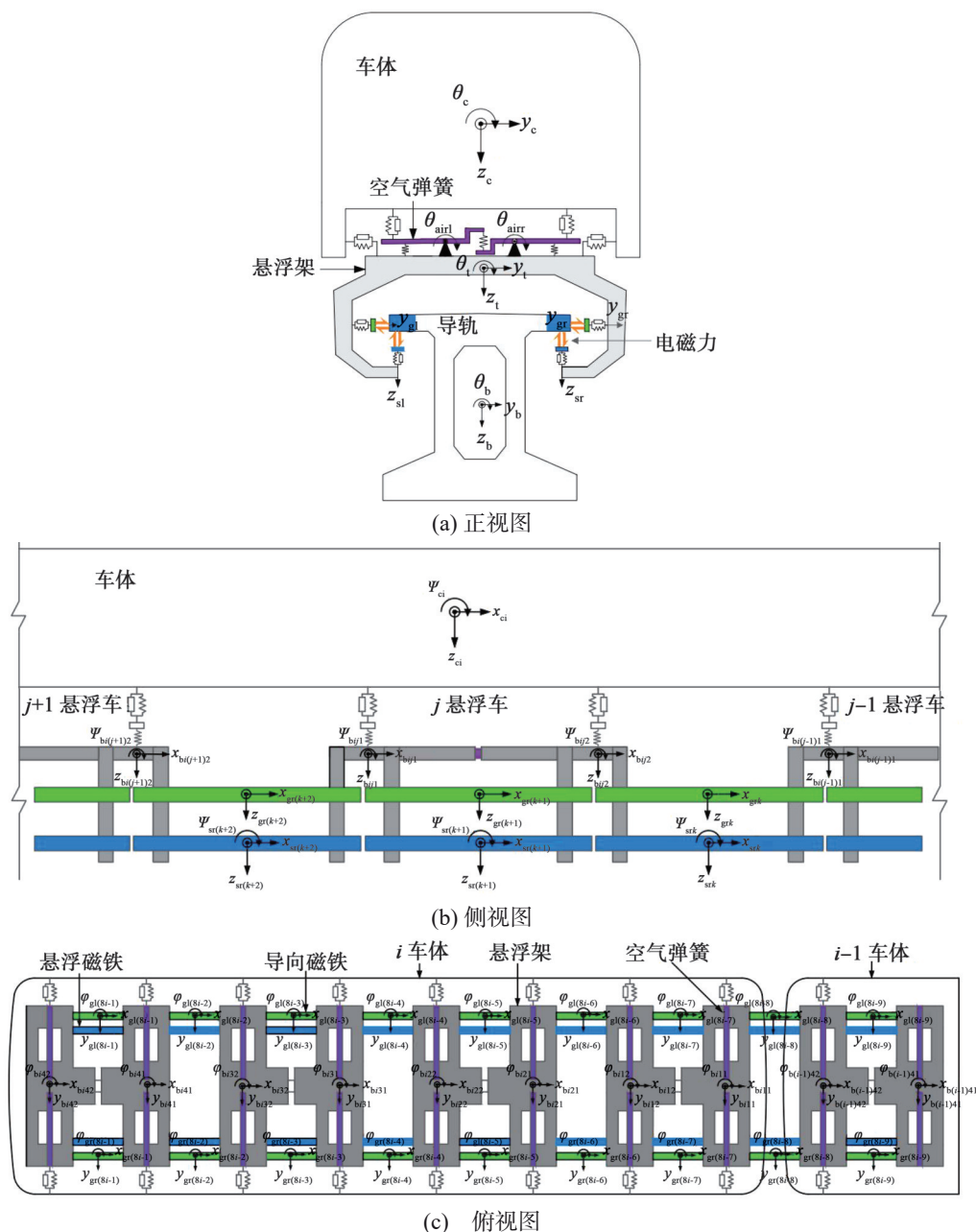


图1 磁悬浮列车模型

Fig. 1 Model of maglev train

架、悬浮磁铁和导向磁铁均受微振动作用，但忽略因横向运动导致悬浮磁铁角振动引发的磁泄漏影响；④采用线性弹簧元件和线性弹簧-阻尼器元件对列车子系统刚体间的连接进行建模。在该模型中，车体被设计为具有5个振动自由度的刚性模块，其纵向运动被给定为匀速平动，不作为系统振动自由度，模块与4个悬浮架相连。每个悬浮架由两个C形悬浮架组成，前后两个C形悬浮架通过中间的梁单元连接。每对悬挂电磁铁和导向电磁铁安装在不同C形悬浮架之间。第*i*列磁浮列车通过弹簧和减振器与16个空气弹簧摇臂相连，每个摇臂配备一个侧倾自由度。每个空气弹簧摇臂还通过铰接、空气弹簧与悬浮架相连。因此，整列列车拥有210个自由度。列车子系统的随机动力学运动方程可表示为

$$\mathbf{M}_{T,\xi_T} \ddot{\mathbf{X}}_T + \mathbf{C}_{T,\xi_T} \dot{\mathbf{X}}_T + \mathbf{K}_{T,\xi_T} \mathbf{X}_T = \mathbf{F}_{T,\xi_T} + \mathbf{F}_{T,\xi_i} \quad (1)$$

式中：下标T代表车辆符号； $\ddot{\mathbf{X}}_T$ 、 $\dot{\mathbf{X}}_T$ 、 $\mathbf{X}_T$ 分别表示列车子系统的加速度、速度、位移向量； $\mathbf{M}_{T,\xi_T}$ 、 $\mathbf{C}_{T,\xi_T}$ 、 $\mathbf{K}_{T,\xi_T}$ 分别表示磁悬浮列车的随机质量矩阵、随机阻尼矩阵和随机刚度矩阵； $\mathbf{F}_{T,\xi_T}$ 表示外力向量； $\mathbf{F}_{T,\xi_i}$ 表示桥梁子系统因轨道不平顺而作用于列车的随机悬浮磁力； $\xi_T \in \Theta$ 表示磁悬浮列车结构参数的随机向量， $\xi_i \in \Theta$ 表示轨道不平顺性的随机向量。

1.2 磁浮轨道梁模型

车桥系统的随机性主要源于列车载荷的随机性、桥梁系统参数的随机性以及轨道不平顺的随机性等因素。轨道梁采用考虑弯曲变形和剪切变形的铁木辛柯梁模型，采用有限元法进行离散化处理，主要考虑梁体竖向弯曲、横向弯曲、扭转以及剪切变形对动力响应的影响。桥墩通过空间梁单元模拟，支座则采用弹簧-阻尼单元表示。轨道梁对应的随机系统参数向量 ξ_B 可表示为

$$\xi_B = \mathcal{E}_B(E_B, \rho_B, k_B, c_B, \dots) \quad (2)$$

式(3)中 $\mathcal{E}_B$ 表示随机桥参数的传递函数，该函数定义了感兴趣的随机参数。考虑到多维随机因素 ξ_B 的耦合效应，轨道-桥梁模型的随机动力学方程可表示为

$$\mathbf{M}_{B,\xi_B} \ddot{\mathbf{X}}_B + \mathbf{C}_{B,\xi_B} \dot{\mathbf{X}}_B + \mathbf{K}_{B,\xi_B} \mathbf{X}_B = \mathbf{F}_{B,\xi_B} + \mathbf{F}_{B,\xi_i} \quad (3)$$

式中：下标B为桥梁符号； $\ddot{\mathbf{X}}_B$ 、 $\dot{\mathbf{X}}_B$ 、 $\mathbf{X}_B$ 分别为轨道梁子系统的加速度、速度、位移向量； $\mathbf{M}_{B,\xi_B}$ 、 $\mathbf{C}_{B,\xi_B}$ 、 $\mathbf{K}_{B,\xi_B}$ 分别为桥梁的随机质量矩阵、随机阻尼矩阵和随机刚度矩阵； $\mathbf{F}_{B,\xi_B}$ 为桥梁自重； $\mathbf{F}_{B,\xi_i}$ 为列车对桥的作用力。

1.3 悬浮控制算法

悬浮系统本质上是一个开环不稳定系统。实现稳定性需要实施精心设计的控制算法，以调节供应给悬浮电磁铁的电流或电压。通过动态调整电磁力，这些

控制策略能够在保持悬浮间隙位于安全运行范围内的同时，确保系统的稳定性。在各种控制方法中，PID（比例-积分-微分）控制因其实用优势而脱颖而出。与基于模型的控制方法不同，PID控制不依赖于对被控系统的精确数学模型。其优势在于数学原理简单、参数调节方便，以及对扰动的强鲁棒性。这些特点使得PID控制成为磁悬浮列车悬浮控制系统中广泛采用的解决方案。本研究采用基于式(4)中电流*i(t)*的闭环反馈控制方案。

$$\Delta i(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

式中： $\Delta i(t)$ 表示瞬时电流波动，定义为 $\Delta i(t) = i(t) - i_0$ ， i_0 为初始电流； k_p 、 k_i 、 k_d 分别为控制器的比例增益、积分增益、微分增益。

参考悬浮间隙记作 c_{ref} ，设定为 $c_{ref} = 0.008$ m。时间*t*时的悬浮间隙误差表示为*e(t)*，定义为 $e(t) = c(t) - c_{ref}$ ，其中*c(t)*为实际悬浮间隙。比例增益 k_p 可以动态调整响应系统偏差，积分增益 k_i 用于提高系统在稳态条件下的性能，而微分增益 k_d 优化以改善系统在动态状态下的表现。

1.4 轨道不平顺激励

轨道不平顺是车桥耦合系统最直接、最主要的外部随机激励源之一，其幅值和频率特征具有明显随机性。对于高速磁浮系统，轨道梁表面不平顺会通过悬浮间隙变化影响电磁力，从而激发车辆和桥梁振动。本文采用文献[13]提出的一个7参数轨道不规则性功率谱密度函数来生成轨道不平顺，具体如式(5)。

$$S(\Omega) = \frac{A(\Omega^2 + B\Omega + C)}{\Omega^4 + D\Omega^3 + E\Omega^2 + F\Omega + G} \quad (5)$$

式中： $S(\Omega)$ 表示轨道不平顺的功率谱密度， $\text{mm}^2 \times \text{m}$ ； Ω 表示空间频率， rad/m ；*A*、*B*、*C*、*D*、*E*、*F*、*G*表示文献[13]中的7个谱特性参数。

由此得出PSD函数的波长范围上下限分别为0.258 m、150 m。因此，上、下空间频率分别为24 rad/m 、0.042 rad/m 。

2 随机动力分析与可靠度理论

2.1 广义概率密度演化方法

对于受随机参数 Θ （如轨道不平顺、结构参数等）影响的多自由度磁浮车桥系统，其非线性动力方程可统一表示为

$$\mathbf{M}(\Theta) \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}(\Theta) \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{f}(\Theta, \mathbf{X}) = \mathbf{F}(\Theta, t) \quad (6)$$

系统的任一关键动力响应*Z(t)*（如位移、加速度或悬浮间隙）均是时间*t*与随机变量 Θ 的函数，即 $Z(t) = f(\Theta, t)$ 。根据概率守恒原理，随机系统响应的联合概率密度函数 $p_{Z\Theta}(z, \theta, t)$ 遵循如下广义概率密度演化方程：

$$\frac{\partial p_{Z\Theta}(z, \theta, t)}{\partial t} + \dot{Z}(\theta, t) \frac{\partial p_{Z\Theta}(z, \theta, t)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

式中: $\dot{Z}(\theta, t)$ 表示响应的变化率。

通过数论选点法选取样本点并结合 TVD 数值格式求解该偏微分方程, 即可获得响应 $Z(t)$ 在各时刻的瞬态概率密度函数 $p_z(z, t)$, 从而精确刻画系统响应的非高斯与非平稳演化特征。

2.2 基于吸收边界条件的可靠度评估

基于首次超越破坏准则, 定义系统在时段 $[0, T]$ 内的安全域为 Ω_s 。若响应 $Z(t)$ 超出该区域则判定系统失效。系统的动力可靠度函数 $R(t)$ 可定义为响应始终保持在安全域内的概率, 见式(8)。

$$R(t)=p\{Z(\tau)\in\Omega_s,0\leq\tau\leq t\}$$
 (8)

为高效求解该指标, 引入吸收边界条件方法。在求解上述演化方程时, 对失效边界外的区域强制取零边界条件, 见式(9)。

$$p_{Z\theta}(z,\theta,t)=0,z\notin\Omega_s$$
 (9)

在此约束下求解得到的概率密度函数称为“剩余”概率密度 $p_z(z, t)$, 则系统在全寿命周期内的时变动力可靠度可简便地通过对剩余概率密度积分获得, 见式(10)。

$$R(t)=\int_{\Omega_s}\hat{p}_z(z,t)dz$$
 (10)

该方法将复杂的首次超越概率问题转化为带有特殊边界条件的演化方程求解问题, 兼顾了计算效率与精度。

3 计算结果分析

研究团队在研究中, 建立了一个高速磁浮列车-桥梁耦合模型, 该模型包括由 5 节车厢组成的磁浮列车通过四跨简支混凝土桥梁。分析的桥梁单跨长度为 24 m。列车全长大于桥梁总长, 属于多跨同时耦合通过工况, 更能反映实际运营中的最不利激励状态。本研究重点分析第二跨的动力响应。1.4 节中提到的轨道不平顺是系统激励的主要来源。桥梁的截面参数如表 1 所示。混凝土弹性模量 E_c 为 $3.45\times10^4\text{ N/mm}^2$, 阻尼比 ω_c 为 0.03, 混凝土线密度 ρ_c 为 $25.5\times10^3\text{ kg/m}$ 。

表1 桥梁截面参数
Table 1 Bridge section parameters

位置	面积/m ²	y 方向惯性矩/m ⁴	z 方向惯性矩/m ⁴
桥梁截面	跨中	3.49	4.13
	梁端	4.09	4.31
桥墩截面	13.24	14.69	2.89

3.1 随机响应分析

为了计算系统响应的概率密度演化, 本研究采用了 Newmark-β 逐步积分方法以及具有总变差减小

(TVD) 性质的双边差分方法。桥梁弹性模量、密度、阻尼和支座刚度等参数受材料离散性、施工误差、服役退化及环境影响而存在不确定性。本文选取混凝土弹性模量作为桥梁结构随机参数代表, 用于分析结构刚度离散性对桥梁位移响应和系统可靠度的影响。磁力系统参数随机性尚未在本文中系统展开, 属于本文当前研究的简化处理。假设同时考虑了轨道不平顺的随机性与桥梁混凝土弹性模量的随机性, 其中混凝土弹性模量的变异系数设定为 0.1, 并服从正态分布。计算列车以 600 km/h 的速度行驶时磁浮列车-桥梁系统的随机振动响应。采用随机谱和函数方法模拟生成 300 组具有概率代表性的轨道不平顺样本, 针对磁浮车桥耦合随机振动系统, 进行不确定性激励下的随机振动分析。

轨道梁桥跨中竖向位移的概率密度分布及 99.74% 概率包络曲线如图 2(a)及图 2(b)所示。在图 2(b)中, 列车尚未进入桥梁时, 位移响应的概率密度主要集中在初始位移 0 的位置。随着列车的行进, 桥梁跨中的位移响应概率分布逐渐扩展。当列车完全通过桥梁后, 桥梁中部的自振响应概率分布回归至初始状态。这一现象与磁浮列车在桥梁上运行时所引起的实际振动响应情况一致。此外, 通过 PDEM 得到概率密度分布较好的包络在上下限值之内。图 2(c)和图 2(d)分别表示轨道梁跨中竖向位移的均值曲线与标准差曲线。由图 2(c)和图 2(d)可知, Monte Carlo 方法模拟 9 999 次确定性计算结果与 PDEM 300 组随机分析结果基本一致, 最大偏差仅为 1.12%, 从而验证了所提方法可靠性与准确性。相同精度下采用 Monte Carlo 方法耗时 9 800 min, 而采用 PDEM 仅需 480 min, 高效的计算效率体现了 PDEM 的优越性。

图 3 给出了列车竖向加速度响应的概率密度演化过程及其统计特征曲线。图 3(a)和图 3(b)分别从三维曲面和二维等高线的角度, 展示了列车竖向加速度概率密度函数随时间的动态演化过程。从图 3 可以看出, 随着时间的推移, 加速度的概率密度分布呈现出显著的变化, 波峰的高度和宽度不断演变, 充分体现了列车竖向振动响应的非平稳随机特征。在图 3(b)中颜色由蓝至黄, 表示随机响应的概率密度逐渐增大, 但在任意时刻的概率总和始终为 1。两条虚线代表了响应均值上下限的包络区间。该区间良好地包络了概率密度的主要等高线区域, 表明响应数据在该区间内具有很高的置信度。图 3(c)和图 3 (d)分别对比了采用 PDEM 300 组与用 Monte Carlo 方法模拟 9 999 次计算得到的列车竖向加速度均值与标准差曲线。对比结果显示, 无论是均值的演化趋势还是标准差的剧烈波动, 采用 PDEM 的计算结果均与采用 MCM 的计算结果高度吻合。这一高度一致性不仅验证了 PDEM 在求解列车非平稳随机动力学问题时的高精度, 而且表明该方法能够准确捕捉系统响应的集中趋势和离散程度的瞬态变化规律。此外, 在相同精度下采用 Monte Carlo 方法耗时 10 000 min,

而采用 PDEM 仅需 500 min, 进一步验证了 PDEM 的高

效性。

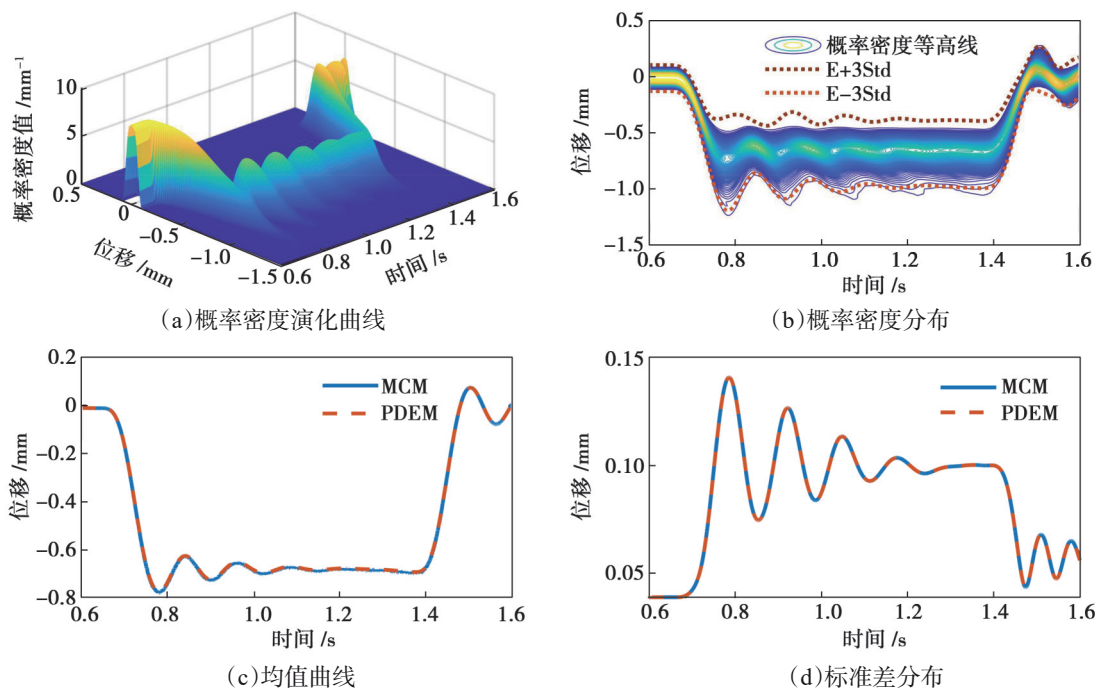


图2 桥梁跨中竖向位移概率密度演化图及其均值、标准差

Fig. 2 Diagram of probability density evolution for bridge mid-span vertical displacement and corresponding mean and standard deviation

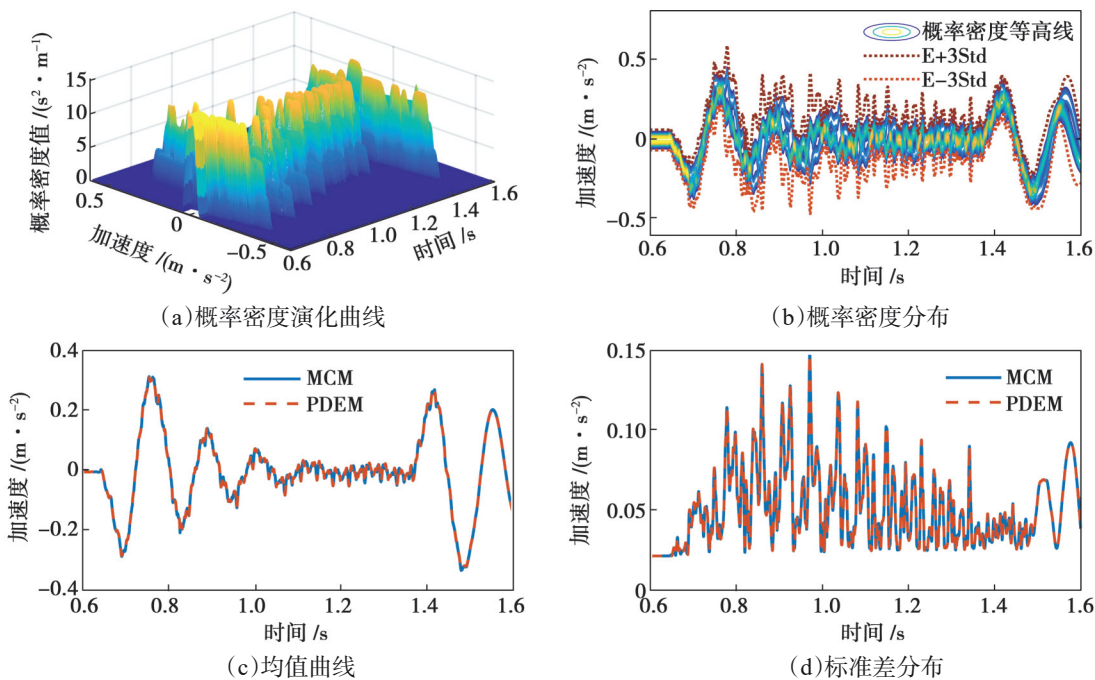


图3 列车竖向加速度概率密度演化图及其均值、标准差

Fig. 3 Diagram of probability density evolution for train vertical acceleration and corresponding mean and standard deviation

3.2 动力可靠度分析

本节通过研究列车响应概率密度在不同阈值水平下的演变来扩展分析。图4给出了在不同位移容许阈值条件下, 引入吸收边界后桥梁跨中竖向位移概率密度等高线的动态演化过程。从整体演化形态可以看出, 位移响应随列车运行距离呈现显著的非平稳动态特征: 在运行距离约 70~190 m 区间, 磁浮列车通过主跨, 导

致桥梁向下位移显著增大并伴随剧烈波动; 列车驶离后系统则进入自由振动衰减阶段。图4中紫色虚线代表设定的位移失效阈值边界, 其直观揭示了不同极限状态对概率密度演化的“截断”效应。具体而言, 当阈值设定为较严苛的 0.8 mm 时, 强振阶段有大量概率密度等高线越过了该边界, 依据首超破坏准则, 这部分超越阈值的概率被边界“吸收”(即判定为结构失效), 导致概率密度分布图的下边缘出现明显的截平现象;

随着阈值放宽至 0.9 mm, 触碰边界的概率密度显著减小, 截断效应相应减弱; 而当阈值进一步提高至 1.0 mm 时, 绝大部分响应样本均处于安全域内, 概率密度的自然演化形态得以完整保留, 几乎未受边界吸收作用的影响。这一现象与物理规律相符, 任何超过限定阈值的随机响应都会转变为确定性状态, 从而退出后续的概率演化过程。

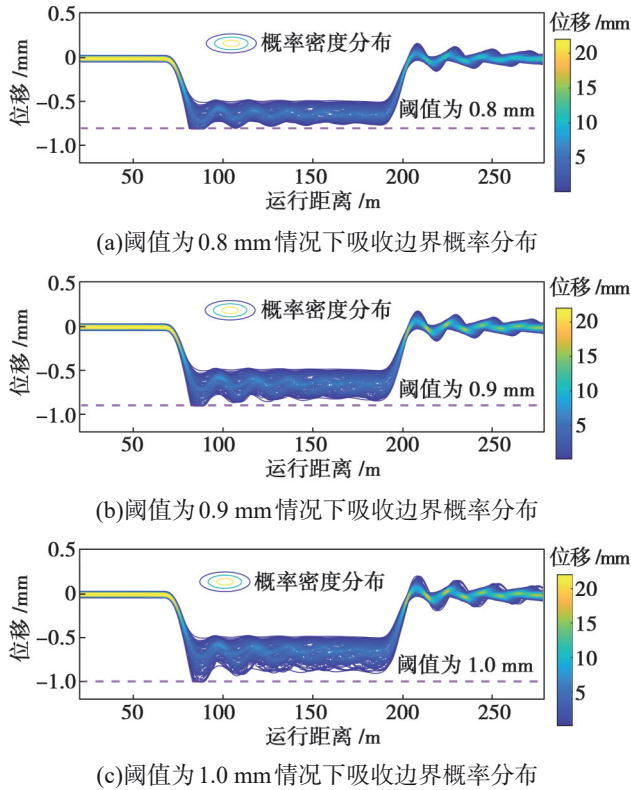


图4 不同阈值下桥梁跨中竖向位移概率密度等高线

Fig. 4 Contour plot of probability density for bridge mid-span vertical displacement with various thresholds

图5给出了在不同加速度容许阈值条件下, 引入吸收边界后第一节列车竖向加速度概率密度等高线的动态演化过程。与桥梁位移响应不同, 列车的竖向加速度主要围绕零均值呈现出高频、剧烈的随机波动特征, 且该波动贯穿于整个列车运行阶段, 充分体现了车桥耦合振动系统中车辆动力响应的强非平稳性。图5中紫色虚线代表设定的加速度失效阈值边界, 其直观展示了不同运行平稳性标准对概率演化的截断效应。当阈值设定为 0.4 m/s^2 时, 大量的概率密度等高线在演化过程中频繁触及该边界, 依据首超机制被边界“吸收”, 导致分布图下边缘出现极其显著的截平现象, 这表明在该阈值下发生加速度超限的概率较高; 随着阈值放宽至 0.5 m/s^2 时, 越界被吸收的概率密度明显减小, 截平效应有所减弱; 而当阈值进一步提升至 0.6 m/s^2 时, 绝大多数加速度样本均包络在安全域内, 概率密度的自然随机波动形态得到了较为完整的保留。这一演化过程清晰地揭示了列车竖向加速度首超失效概率对容许阈值的敏感性, 为定量评估列车运行的舒适性与安

全性提供了直观的概率分布演化依据。

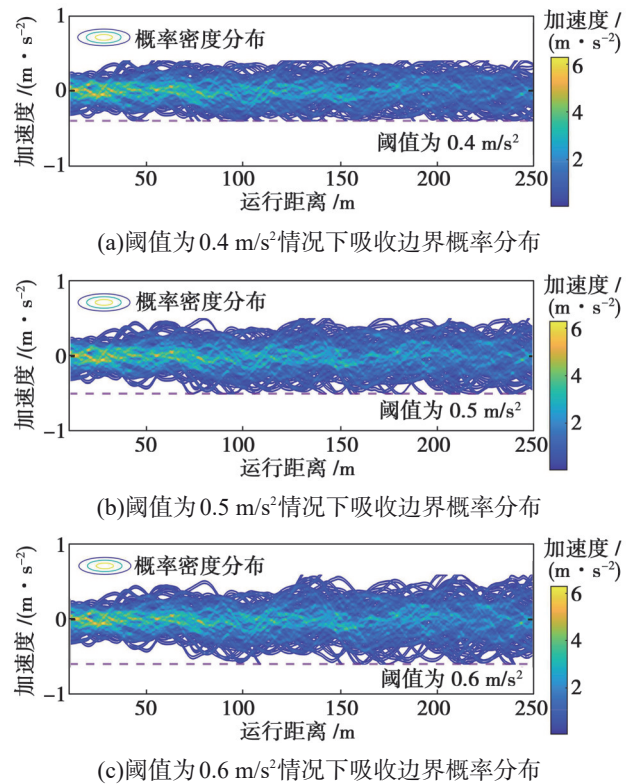
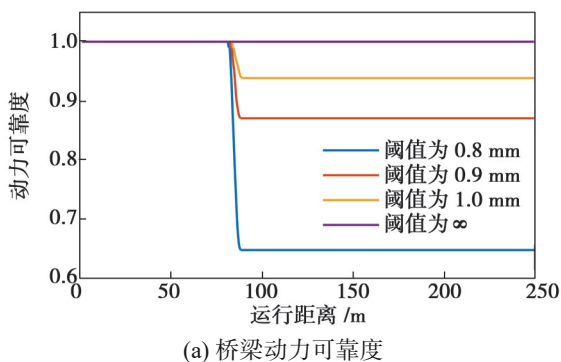


图5 不同阈值下第一节列车竖向加速度概率密度等高线

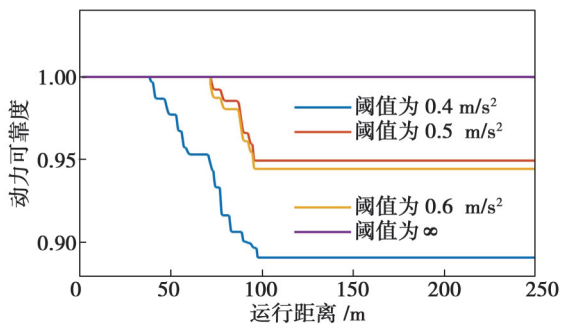
Fig. 5 Contour plot of probability density for first train vertical acceleration with various thresholds

图6为基于前述的概率密度吸收边界演化结果, 进一步给出了不同阈值条件下桥梁与列车系统的时变动力可靠度曲线。整体而言, 系统动力可靠度在列车运行初期保持为1, 随着列车驶入激振区域, 响应超越设定的容许阈值, 可靠度开始呈现不同程度的下降, 并在列车驶离或响应衰减后趋于稳定。

图6(a)展示了桥梁跨中位移的动力可靠度演化。在运行距离约 75~100 m 区间, 列车荷载作用导致桥梁产生较大下挠, 动力可靠度曲线出现显著的骤降现象。容许位移阈值越小, 越早发生首超失效, 可靠度下降的斜率越陡, 且最终稳定后的系统可靠度越低 (降至约 0.65); 随着阈值提高至 1.0 mm, 最终可靠度显著提升至 0.9 以上。图6(b)则反映了第一节列车竖向加速度的动力可靠度变化。与桥梁位移引起的骤降不同, 列车加速度的可靠度曲线呈现出明显的阶梯状下降特征。这主要是由于列车加速度响应具有高频波动的特性, 在运行过程中存在多个局部极值不断触碰并超越吸收边界, 从而导致失效概率的逐步累积。同样地, 加速度容许阈值越严格 (如 0.4 m/s^2), 可靠度下降越早且降幅越大。综上所述, 图6定量揭示了车桥耦合系统在不同性能标准下的时变失效历程, 表明基于 PDEM 和吸收边界条件的方法能够精细化地捕捉系统可靠度的瞬态变化特征, 为车桥系统的动态安全评估与阈值设计提供了直接的理论支撑。



(a) 桥梁动力可靠度



(b) 列车动力可靠度

图6 吸收边界条件获得的系统动力可靠度

Fig. 6 System dynamic reliability based on the absorbing boundary condition

4 结论

本文针对高速磁浮车辆-桥梁耦合系统在复杂随机激励下的动力响应与安全评估问题,构建了包含210个自由度的精细化车桥耦合动力学模型。通过引入PDEM与基于吸收边界条件的动力可靠度理论,系统探讨了轨道不平顺作用下车桥系统的非平稳随机响应统计特征及其时变可靠度演化规律。主要得出以下结论:

①PDEM能够直观地刻画系统关键响应在全时域内联合概率密度函数的瞬态演化过程。适用于高维、强非线性高速磁浮车桥耦合系统的随机振动分析和概率安全评估。

②对高速磁浮简支轨道梁而言,将列车通过主跨阶段的跨中竖向位移响应作为桥梁结构安全设计和运营状态评估的重要控制指标。工程设计中不应仅关注确定性最大位移值,而且应结合首超失效概率和目标可靠度水平合理确定容许位移阈值。

③列车竖向加速度可靠度的阶梯状下降表明,车辆运行平稳性失效并非由单一时刻的峰值响应决定,而是由运行全过程中多个局部极值不断触碰或超越限值所导致的失效概率累积过程。

④概率密度演化过程中的截断效应直观揭示了不同极限状态标准下的失效历程。位移与加速度阈值设定得越严苛,响应概率密度等高线被边界吸收的比例越大,首超失效发生的时刻越早,系统最终稳定后的

可靠度水平越低。

⑤该方法不仅能够定量揭示磁浮车桥系统在高维极限状态下的动态失效累积历程,更能为未来高速磁浮交通系统的随机参数优化、容许响应阈值标准的设计及全寿命周期的概率性安全评估提供直接的理论与科学依据。

对于常导高速磁浮系统而言,悬浮控制增益和电磁力参数的不确定性会改变车辆-轨道梁之间的动态耦合刚度和阻尼,是影响系统稳定性和振动响应的重要因素之一。后续研究将进一步引入悬浮控制增益、电磁铁参数等随机变量,建立更加完整的多源随机磁浮车桥耦合动力可靠度分析模型。

参考文献:

- [1] 翟婉明, 赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 209-226.
ZHAI Wanming, ZHAO Chunfa. Frontiers and challenges of sciences and technologies in modern railway engineering [J]. Journal of southwest jiaotong university, 2016, 51(2): 209-226.
- [2] 龙志强, 窦峰山, 王志强, 等. 高速磁浮悬浮导向控制技术现状及展望[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 78-88.
LONG Zhiqiang, DOU Fengshan, WANG Zhiqiang, et al. Current status and prospects of high-speed maglev suspension and guidance control technology[J]. Science and technology foresight, 2023, 2(4): 78-88.
- [3] MAO J F, LI Z, LI D H, et al. A PDEM-based synchronous iterative algorithm for random vibration analysis of high-speed maglev train-bridge system[J]. Journal of sound and vibration, 2026, 623: 119541.
- [4] 李小珍, 谢昆佑, 王党雄, 等. 中低速磁浮轨道-桥梁系统竖向振动传递特性研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(14): 105-111.
LI Xiaozhen, XIE Kunyou, WANG Dangxiong, et al. Vertical vibration transfer characteristics of medium-low speed maglev rail-bridge systems[J]. Journal of vibration and shock, 2019, 38(14): 105-111.
- [5] ZHAO C F, ZHAI W M. Maglev vehicle/guideway vertical random response and ride quality[J]. Vehicle system dynamics, 2002, 38(3): 185-210.
- [6] 刘伟, 赵春发, 姜会彬, 等. 基于虚拟激励法的磁浮车桥耦合系统随机振动分析[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(4): 823-831.
LIU Wei, ZHAO Chunfa, LOU Huibin, et al. Stochastic vibration analysis of maglev train-bridge coupling system based on pseudo excitation method[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2024, 59(4): 823-831.
- [7] MAO J F, WANG X, LI Z, et al. A PDEM-driven method for stochastic parameter analysis and running safety reliability assessment in high-speed maglev train-bridge coupled

- system[J/OL]. International journal of structural stability and dynamics. (2025-08-09) [2026-02-10]. <https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/S0219455426503918>.
- [8] 时瑾, 魏庆朝, 冯雅薇. 高速磁浮车桥系统随机振动特性仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(7): 1577-1579.
SHI Jin, WEI Qingchao, FENG Yawei. Analysis of random vibration responses characteristics of maglev and elevated-beam guideway[J]. Journal of system simulation, 2005, 17(7): 1577-1579.
- [9] WANG L D, BU X M, HU P, et al. Dynamic reliability analysis of running safety and stability of a high-speed maglev train on a guideway bridge[J]. International journal of structural stability and dynamics, 2024, 24(4): 2450043.
- [10] CHEN R, LU Z R, SU C, et al. Stochastic optimization of levitation control system for maglev vehicles subjected to random guideway irregularity[J]. Journal of sound and vibration, 2025, 594: 118682.
- [11] 李杰, 陈建兵. 随机动力系统中的概率密度演化方程及其研究进展[J]. 力学进展, 2010, 40(2): 170-188.
LI Jie, CHEN Jianbing. Advances in the research on probability density evolution equations of stochastic dynamical systems[J]. Advances in mechanics, 2010, 40(2): 170-188.
- [12] LI J, CHEN J B. Stochastic dynamic of structures[M]. Singapore: John Wiley & Sons, 2009.
- [13] SHI J, FANG W S, WANG Y J, et al. Measurements and analysis of track irregularities on high speed maglev lines [J]. Journal of Zhejiang university-science A, 2014, 15(6): 385-394.

Stochastic vibration response and reliability analysis for maglev vehicle-bridge systems

LI Zheng^{1,2}, MAO Jianfeng^{1,2}, YU Zhiwu^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. National Engineering Research Center of High-Speed Railway Construction Technology, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: With the rapid expansion of the high-speed maglev transportation technology in engineering applications, maglev vehicle-bridge coupled systems face challenges from multiple stochastic excitations during operation, such as track irregularities and uncertainties in system parameters. These stochastic factors significantly affect dynamic responses of these systems, thereby compromising operational safety and ride comfort. However, traditional deterministic analysis methods struggle to accurately characterize the non-Gaussian and non-stationary probabilistic evolution of response variables in nonlinear system behaviors. To address this, this paper proposes a comprehensive analytical framework that integrates the probability density evolution method and dynamic reliability theory to investigate stochastic responses and reliability of maglev vehicle-bridge systems. First, a refined maglev vehicle-bridge coupled dynamical model with 210 degrees of freedom (DoF) was established. Next, the probability density evolution method was employed by introducing a generalized probability density evolution equation to directly solve the transient joint probability density function of key system responses, thereby accurately revealing their stochastic evolution process. Furthermore, based on the first-passage failure criterion, a system performance function for multi-dimensional limit states was defined, and computed probability density information was used to efficiently compute dynamic reliability indices of the system as a function of time and throughout its full life cycle. Finally, the influence patterns of various stochastic factors on the statistical characteristics of system responses and reliability were systematically analyzed through numerical examples. This proposed framework provides new theoretical tools and a decision-making basis for stochastic dynamic analysis, probabilistic safety assessment, and risk-resistant design of maglev vehicle-bridge coupled systems.

Keywords: maglev system; vehicle-bridge coupling; stochastic response; probability density evolution method; dynamic reliability; track irregularity; FEM