



南京工业大学

NANJING TECH UNIVERSITY

地震作用下中低速磁浮车-桥耦合系统动力响应特性

汇报人：黄凤华



1

前言

2

地震作用下磁浮车-桥耦合振动数值模型

3

地震作用下磁浮车-桥耦合振动分析

4

结论与展望



1

前言

2

地震作用下磁浮车-桥耦合振动数值模型

3

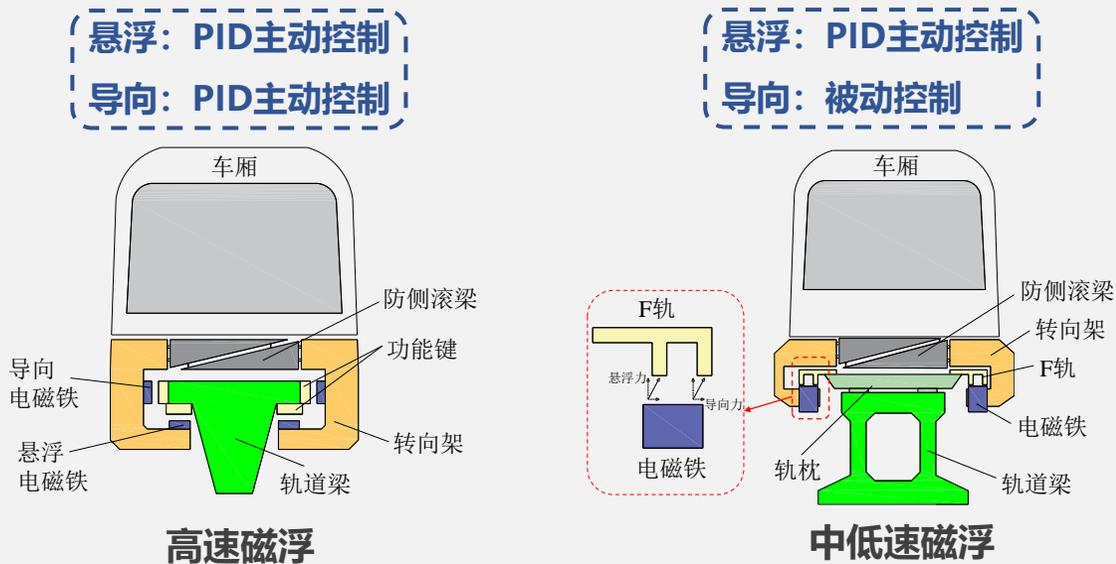
地震作用下磁浮车-桥耦合振动分析

4

结论与展望

研究背景

磁浮车辆悬浮结构



- 依靠电磁力实现悬浮、导向、牵引功能
- 车辆与轨道无任何物理接触
- 轨道磨损低、振动小、噪音低、污染小、爬坡能力强
- 能耗低、速度高，极具竞争力和发展前景

国内现有磁浮运营线



上海



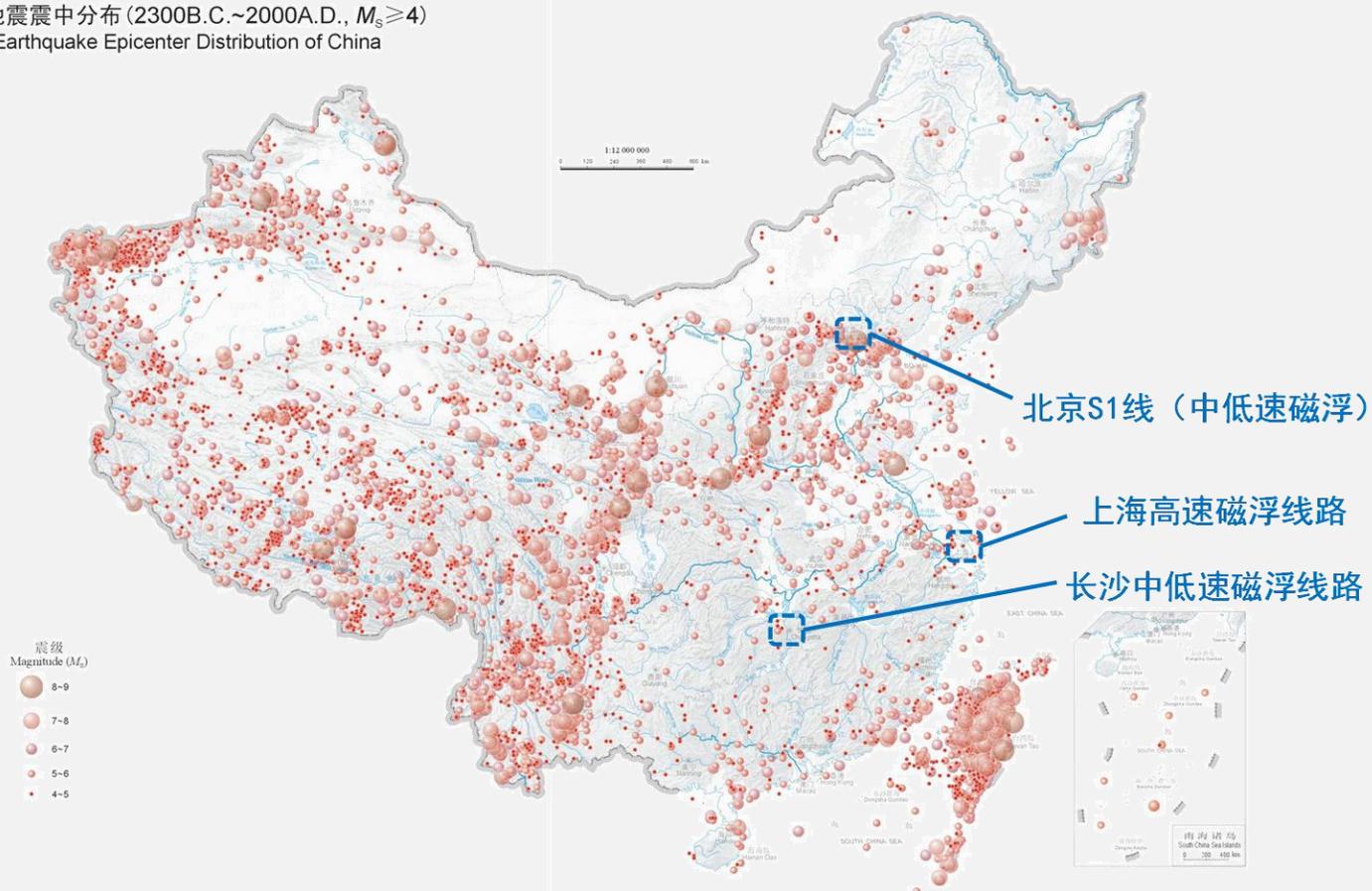
长沙



北京

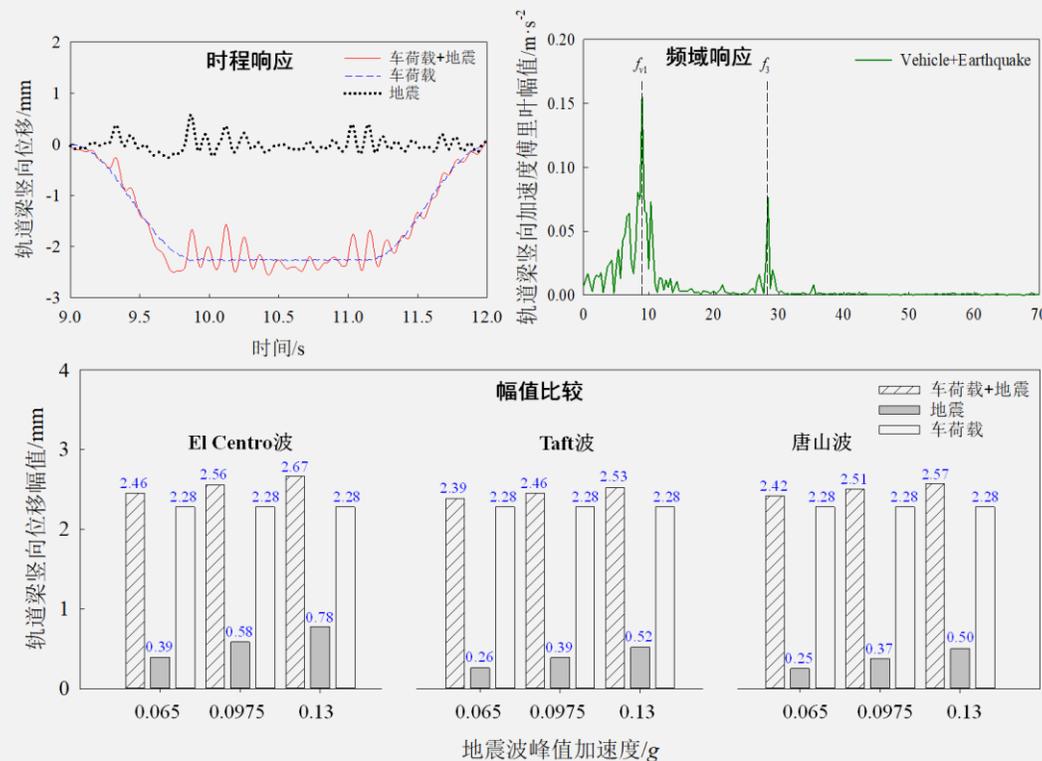
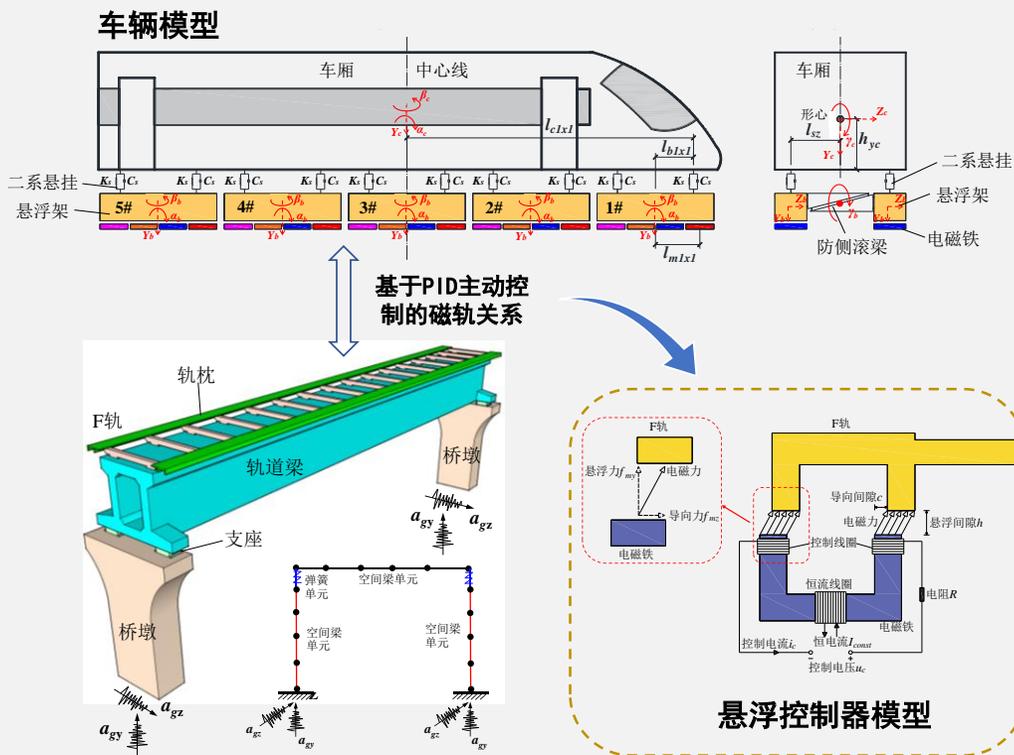
研究背景

中国地震震中分布 (2300B.C.~2000A.D., $M_s \geq 4$)
Earthquake Epicenter Distribution of China



- 高架占线路90%以上
- 桥上运行遭遇地震概率高
- 车-桥抗震分析较少

汇报内容



地震下中低速磁浮车-桥系统耦合振动数值模型建立及计算程序开发

中低速磁浮车-桥耦合系统地震响应特性数值仿真



1

前言

2

地震作用下磁浮车-桥耦合振动数值模型

3

地震作用下磁浮车-桥耦合振动分析

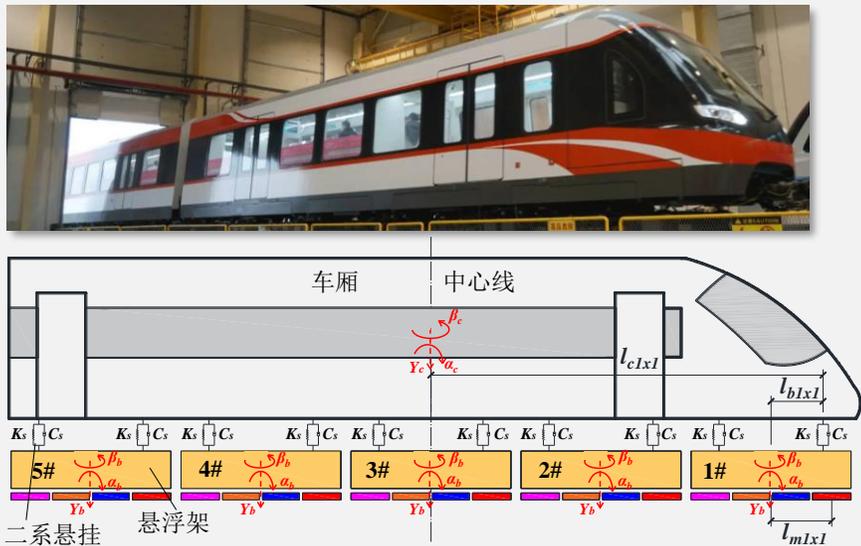
4

结论与展望

地震作用下磁浮车-桥耦合振动数值模型

车辆动力学方程

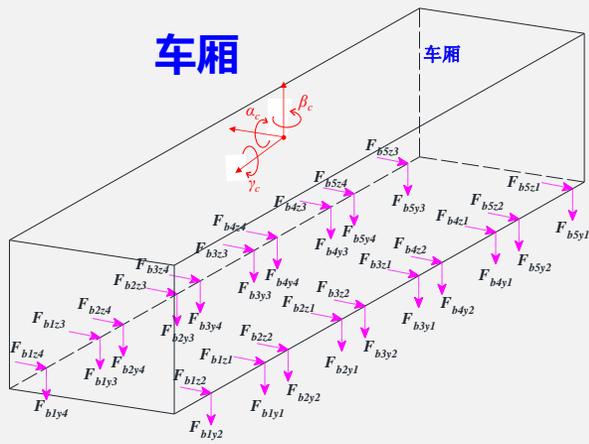
车辆模型



部位	自由度
车厢	沉浮、点头、偏航、摇头、侧滚
悬浮侧架	沉浮、点头、偏航、摇头
悬浮架	侧滚

- 车辆视为**刚体**，不考虑纵向运动
- 二系悬挂简化为**线性弹簧阻尼**
- 50 DOFs

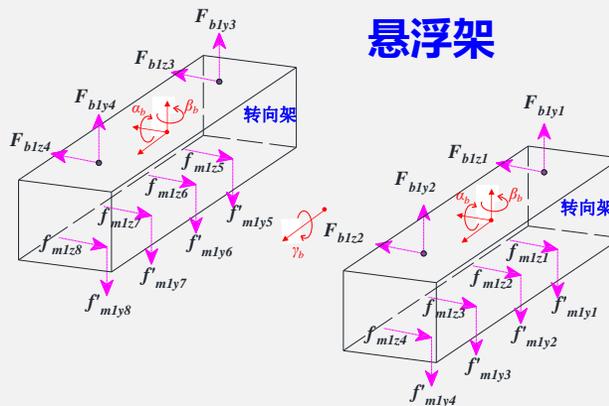
受力分析及运动方程



$$M_c \ddot{Y}_c + \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^4 F_{bjyi} = 0$$

$$J_{ca} \ddot{\alpha}_c - \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^4 F_{bjyi} \cdot l_{cjxi} - F_{b3y1} \cdot l_{c3x1} - F_{b3y3} \cdot l_{c3x3} + F_{b3y2} \cdot l_{c3x2} + F_{b3y4} \cdot l_{c3x4} + \sum_{j=4}^5 \sum_{i=1}^4 F_{bjyi} \cdot l_{cjxi} = 0$$

$$J_{cy} \ddot{\gamma}_c - \sum_{j=1}^5 \sum_{i=3}^4 F_{bjyi} \cdot l_{sz} + \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^2 F_{bjyi} \cdot l_{sz} + \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^4 F_{bjzi} \cdot h_{yc} = 0$$



$$M_{bj} \ddot{Y}_{bj} + \sum_{i=1}^4 f'_{mjyi} - \sum_{i=1}^2 F_{bjyi} = 0$$

$$J_{ba} \ddot{\alpha}_{bj} - \sum_{i=1}^2 f'_{mjyi} \cdot l_{mjxi} + \sum_{i=3}^4 f'_{mjyi} \cdot l_{mjxi} + F_{bjy1} \cdot l_{bjx1} - F_{bjy2} \cdot l_{bjx2} = 0$$

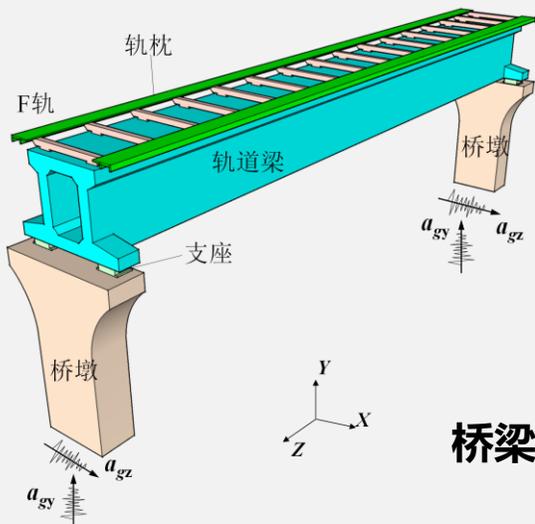
$$M_{bj} \ddot{Z}_{bj} + \sum_{i=1}^4 f_{mjzi} - \sum_{i=1}^2 F_{bjzi} = 0$$

$$J_{bb} \ddot{\beta}_{bj} - \sum_{i=1}^2 f_{mjzi} \cdot l_{mjxi} + \sum_{i=3}^4 f_{mjzi} \cdot l_{mjxi} + F_{bjz1} \cdot l_{bjx1} - F_{bjz2} \cdot l_{bjx2} = 0$$

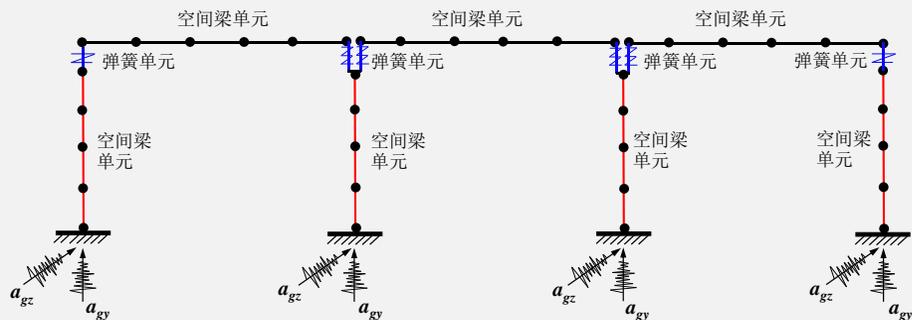
地震作用下磁浮车-桥耦合振动数值模型



桥梁动力学方程



桥梁构造



有限元模型

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sg} \\ M_{gs} & M_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{u}_{gg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sg} \\ C_{gs} & C_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{u}_{gg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sg} \\ K_{gs} & K_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ u_{gg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{B,V} \\ P_{gg} \end{bmatrix}$$

→ 电磁力
→ 支承力

$$M_{ss} \ddot{u} + C_{ss} \dot{u} + K_{ss} u = F_{B,V} - (M_{sg} \ddot{u}_{gg} + C_{sg} \dot{u}_{gg} + K_{sg} u_{gg})$$

相对运动法 (结构相对响应)

$$\begin{cases} u = u^s + u^d & \text{相对位移+拟静力位移} \\ K_{ss} u^s = K_{sg} u_{gg} \end{cases}$$

$$M_{ss} \ddot{u}^d + C_{ss} \dot{u}^d + K_{ss} u^d = - (M_{sg} - M_{ss} K_{ss}^{-1} K_{sg}) \ddot{u}_{gg} - (C_{sg} - C_{ss} K_{ss}^{-1} K_{sg}) \dot{u}_{gg} + F_{B,V}$$

地震加速度波
速度波

$$\ddot{q}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = \frac{[\phi]_n^T F_{B,V}}{[\phi]_n^T M_{ss} [\phi]_n} - \frac{[\phi]_n^T (M_{sg} - M_{ss} K_{ss}^{-1} K_{sg})}{[\phi]_n^T M_{ss} [\phi]_n} (\ddot{u}_{gg} + a_0 \dot{u}_{gg})$$

直接求解法 (结构绝对响应)

$$\ddot{Q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{Q}_i + \omega_i^2 Q_i = \frac{\Phi_i^T F_{B,V}}{\Phi_i^T M_{ss} \Phi_i} - \frac{\Phi_i^T M_{sg} \ddot{u}_{gg} + \Phi_i^T (a_0 M_{sg} + a_1 K_{sg}) \dot{u}_{gg} + \Phi_i^T K_{sg} u_{gg}}{\Phi_i^T M_{ss} \Phi_i}$$

修正公式

$$u_b = \left(R - \sum_{i=1}^n \Phi_i P_i \right) u_{gg} + \sum_{i=1}^n \Phi_i Q_i$$

$$\dot{u}_b = \left(R - \sum_{i=1}^n \Phi_i P_i \right) \dot{u}_{gg} + \sum_{i=1}^n \Phi_i \dot{Q}_i$$

$$\ddot{u}_b = \left(R - \sum_{i=1}^n \Phi_i P_i \right) \ddot{u}_{gg} + \sum_{i=1}^n \Phi_i \ddot{Q}_i$$

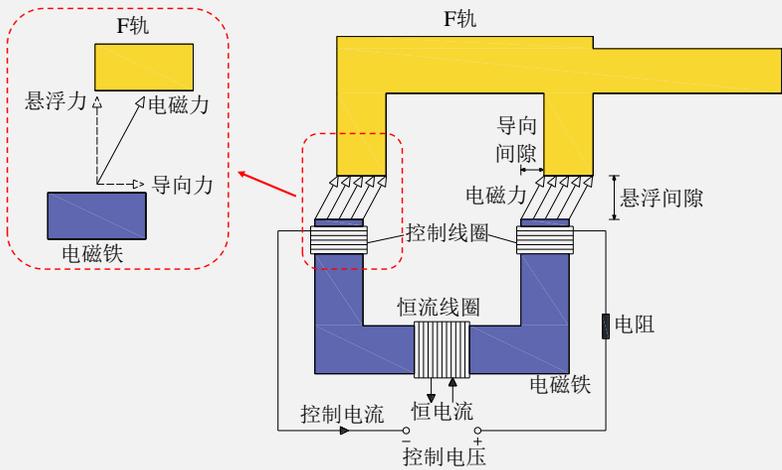
地震加速度波
速度波
位移波



地震作用下磁浮车-桥耦合振动数值模型

磁轨相互作用关系

电磁铁系统模型

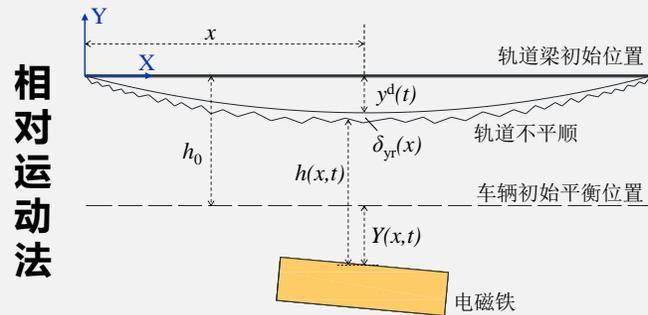


悬浮力、导向力

$$f_{my} = \frac{A_m \mu_0}{4h^2} \left[1 + \frac{2h}{\pi W_m} + \frac{2c}{\pi W_m} \arctan\left(\frac{h}{c}\right) \right] (N_{const} I_{const} + N_c i_c)^2$$

$$f_{mz} = \frac{A_m \mu_0}{2h\pi W_m} (N_{const} I_{const} + N_c i_c)^2 \arctan\left(\frac{c}{h}\right)$$

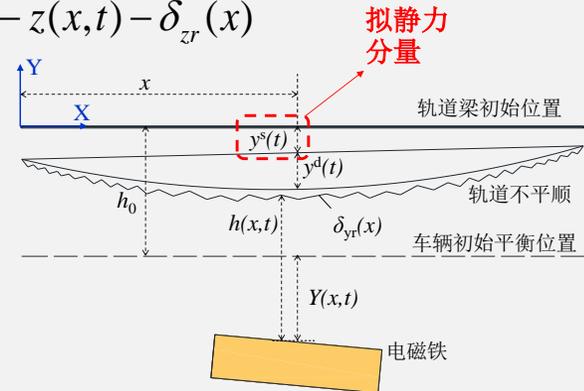
悬浮、导向间隙



相对运动法

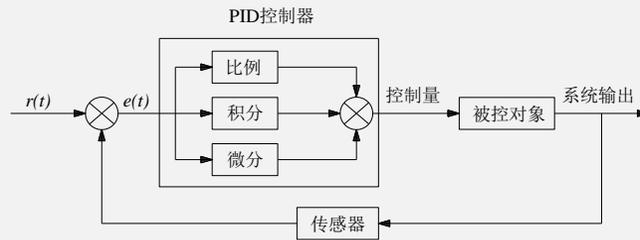
$$\begin{cases} h = h_0 + Y(x,t) - y(x,t) - \delta_{yr}(x) \\ c = Z(x,t) - z(x,t) - \delta_{zr}(x) \end{cases}$$

直接求解法



控制器模型 (悬浮主动、导向被动)

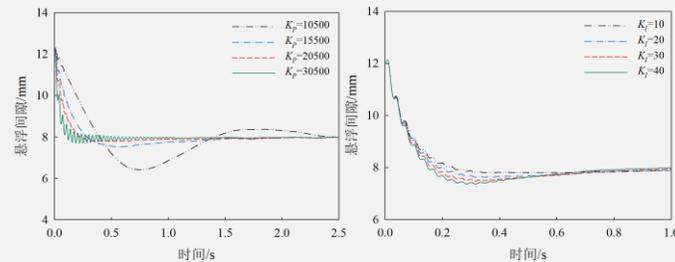
PID控制器模型



$$u_c = K_P [h - h_0] + K_I \cdot \sum_{k=0}^T [h - h_0] + K_D \cdot \dot{h}$$

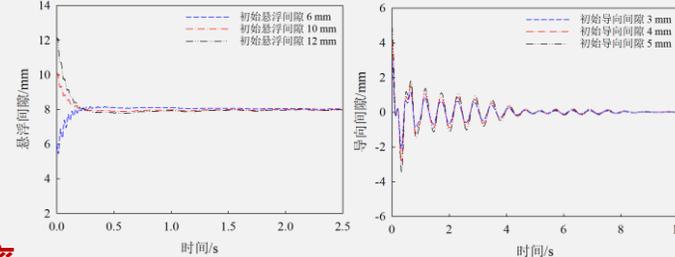
间隙误差

间隙变化率



工程整定法

初始干扰





地震作用下磁浮车-桥耦合振动数值模型

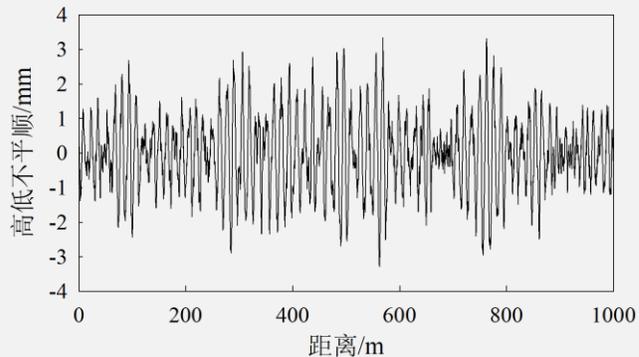
系统激励模型

唐山实测轨道不平顺

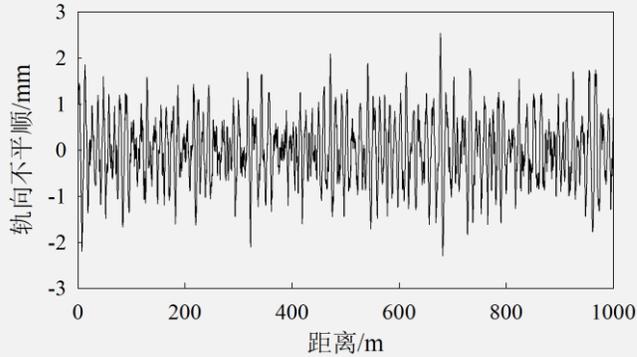
$$s(f) = \frac{A(f^2 + B \cdot f + C)}{f^4 + D \cdot f^3 + E \cdot f^2 + F \cdot f + G}$$

参数	A	B	C	D	E	F	G
高低	0.0038	-0.0875	0.00195	-0.2133	0.0170	-0.00061	8.074×10^{-6}
轨向	0.0027	-0.1509	0.00661	-0.2893	0.0312	-0.00147	2.591×10^{-5}

高低不平顺 (-3mm~3mm)



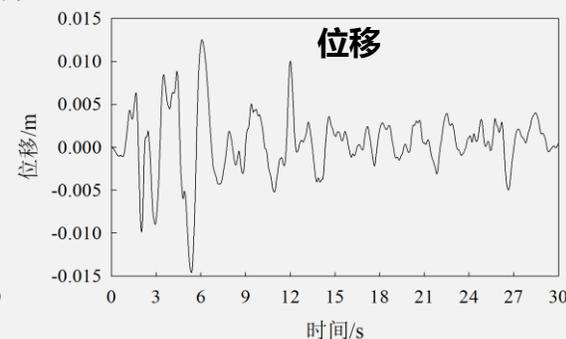
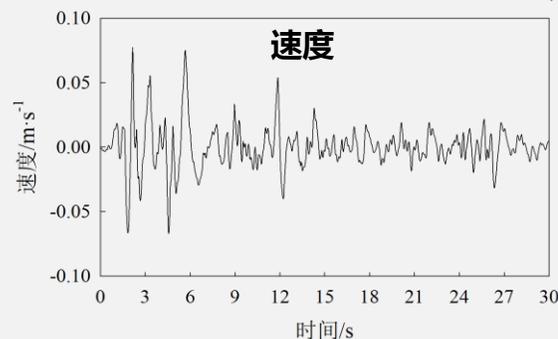
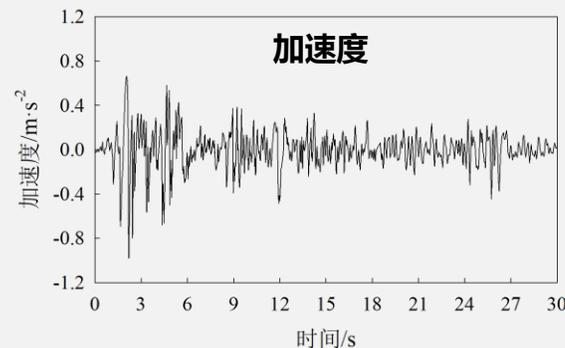
轨向不平顺 (-2mm~2mm)



地震参数：设防烈度为7度，El Centro地震波，横向0.15g、竖向0.0975g

地震波

- 频域积分法，首先去除加速度信号中的低频段，消除信号“零线漂移”，后在频域内对加速度进行积分得到速度、位移。





地震作用下磁浮车-桥耦合振动数值模型

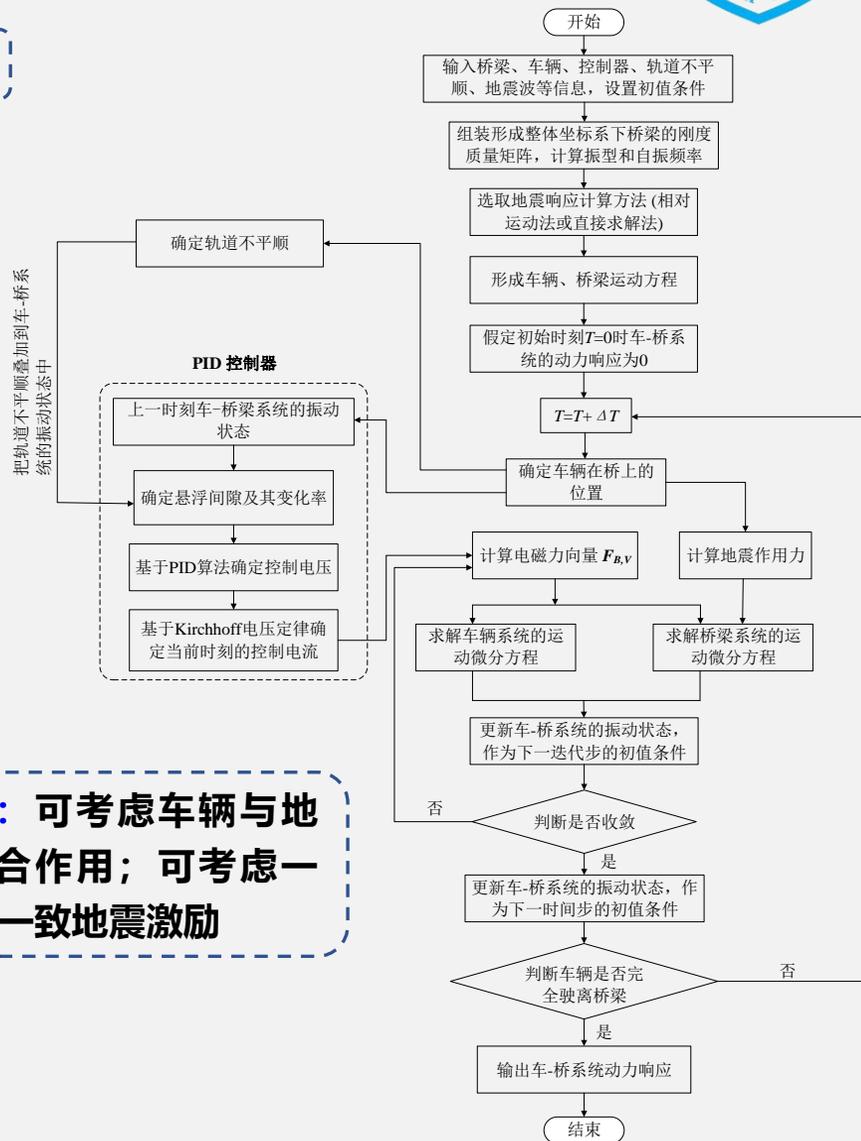
计算程序开发

基于Fortran编程语言开发

- I. 输入车-桥参数、轨道不平顺、地震波信息
- II. 根据上一时刻车-桥振动信息，确定磁浮间隙，基于PID确定控制电流
- III. 开始时间步内迭代，基于上一步骤的控制电流，确定上一时间步或迭代步的电磁力
- IV. 求解车-桥运动方程，并更新系统振动状态
- V. 依据车、桥子系统动力响应向量的范数是否满足要求，判读是否收敛，收敛则进行下一时间步，不收敛返回步骤III。

$$\frac{\|D_V^i - D_V^{i-1}\|}{\|D_V^{i-1}\|} \leq \varepsilon \quad \text{and} \quad \frac{\|D_B^i - D_B^{i-1}\|}{\|D_B^{i-1}\|} \leq \varepsilon$$

- VI. 保存当前时刻车-桥状态，作为下一时刻系统的初值条件
- VII. 判断列车是否完全驶离桥梁，驶离则结束程序，未驶离则返回步骤II

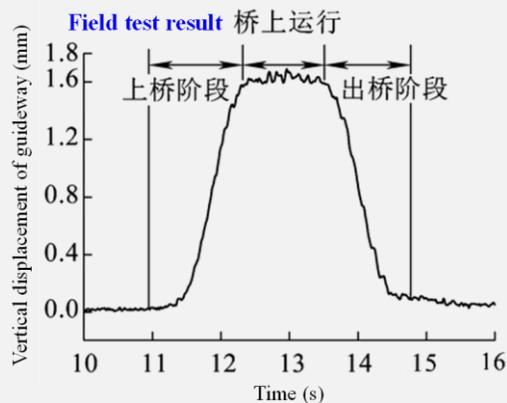
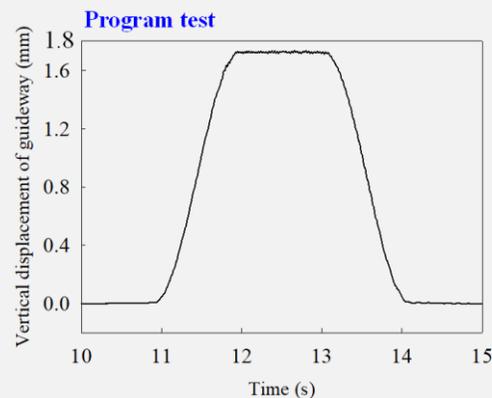
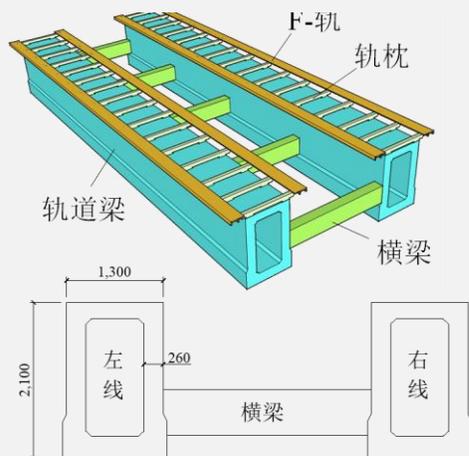


地震作用下磁浮车-桥耦合振动数值模型

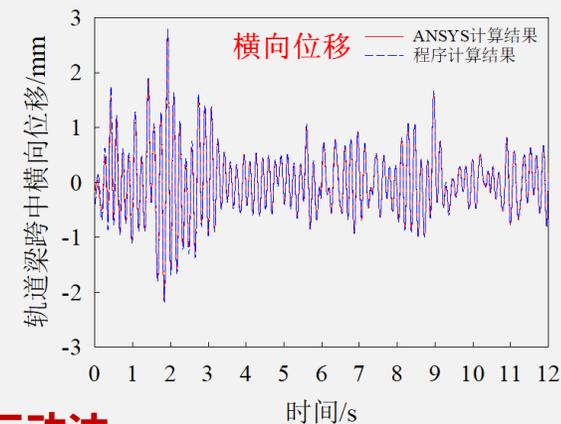
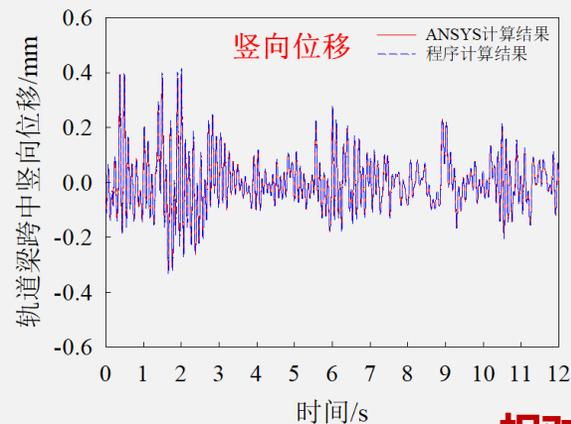


计算程序验证

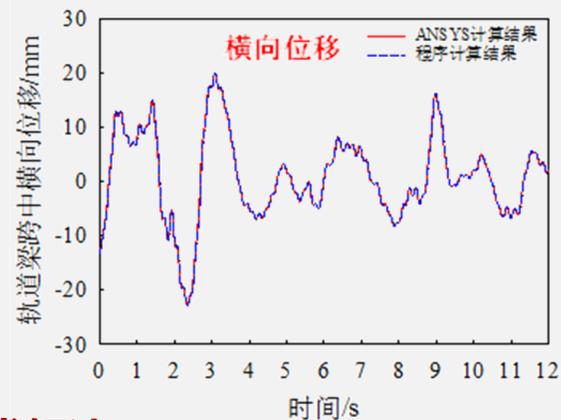
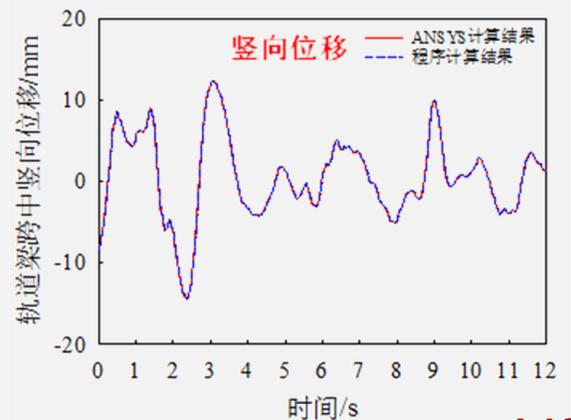
车-桥耦合振动验算



桥梁地震响应验算



相对运动法



直接求解法



1

前言

2

地震作用下磁浮车-桥耦合振动数值模型

3

地震作用下磁浮车-桥耦合振动分析

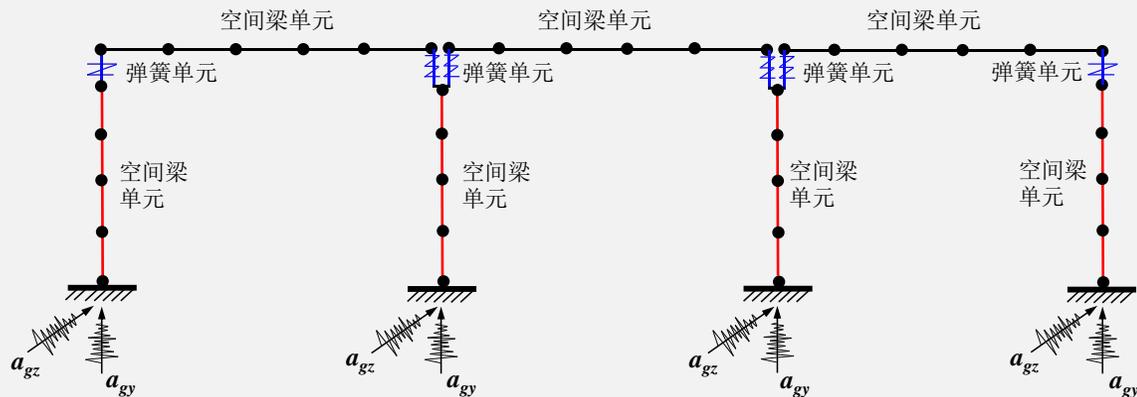
4

结论与展望

地震作用下磁浮车-桥耦合振动分析

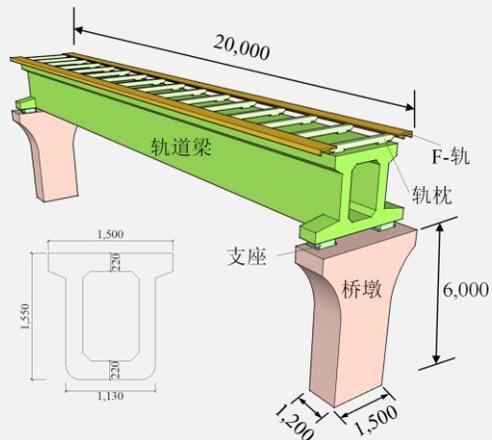
计算模型及参数

三跨简支梁



桥梁参数

部件	名称 (符号)	单位	值
轨道梁	跨度	m	20
	横截面积	m ²	1.1
	单位长度质量	kg/m	2805
桥墩	绕y轴、z轴惯性矩	m ⁴	0.199, 0.313
	高度	m	8
	横截面积	m ²	3.375
支座	单位长度质量	kg/m	8606
	绕y轴、z轴惯性矩	M	1.423, 0.633
	竖向刚度	N/m	1.0×10 ¹⁰
	横向刚度	N/m	1.0×10 ⁸



中低速磁浮车辆 (三节编组)



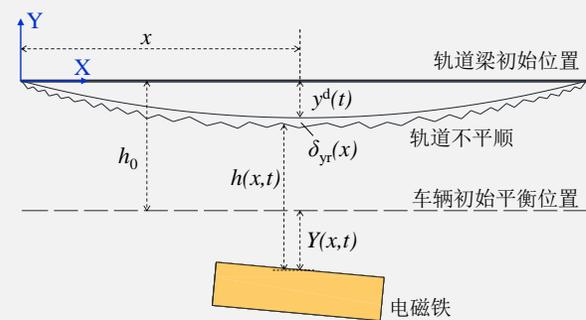
车辆参数

名称 (符号)	单位	值
车辆长度 (L_c)	m	15.75
定员时车厢质量 (M_c)	kg	20×10 ³
悬浮侧架质量 (M_b)	kg	1000
车厢绕x轴转动惯量 (J_{ca})	kg.m ²	3.85×10 ⁵
车厢绕y轴转动惯量 (J_{cb})	kg.m ²	3.88×10 ⁵
车厢绕z轴转动惯量 (J_{cy})	kg.m ²	2.21×10 ³
悬浮架绕x轴转动惯量 (J_{ba})	kg.m ²	1150
悬浮架绕y轴转动惯量 (J_{bb})	kg.m ²	1200
二系悬挂竖向总刚度 (K_{sy})	N/m	1.6×10 ⁶
二系悬挂竖向总阻尼 (C_{sy})	N.s/m	1.0×10 ⁵
二系悬挂横向总刚度 (K_{sz})	N/m	2.4×10 ⁶
二系悬挂横向总阻尼 (C_{sz})	N.s/m	1.05×10 ⁴

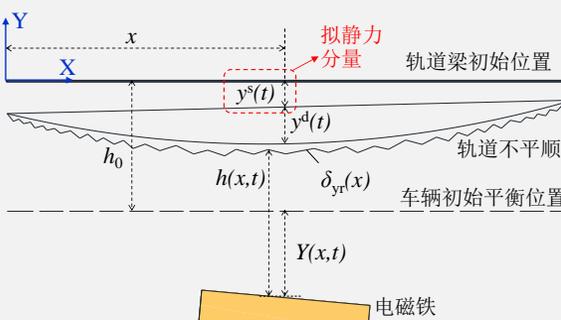
地震作用下磁浮车-桥耦合振动分析

结构拟静力分量的影响

不考虑拟静力分量 (相对运动法)

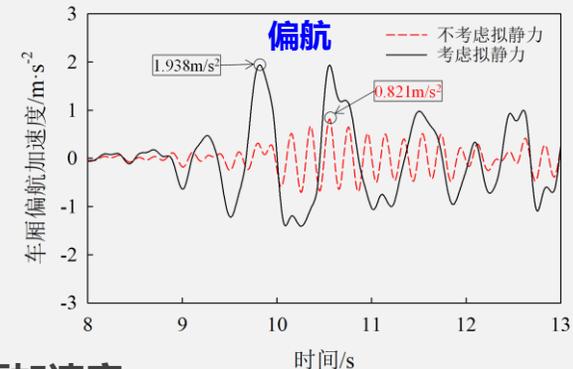
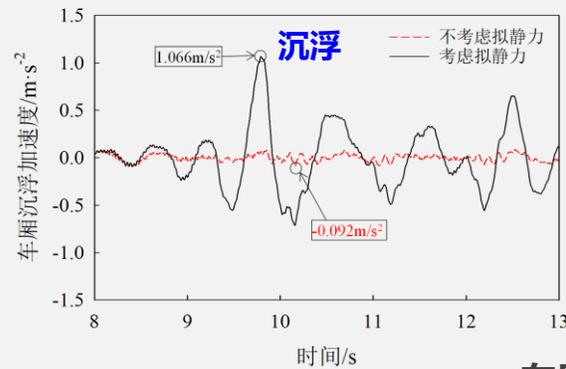


考虑拟静力分量 (直接求解法)

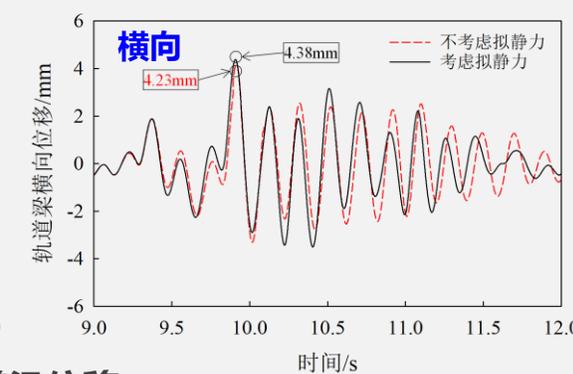
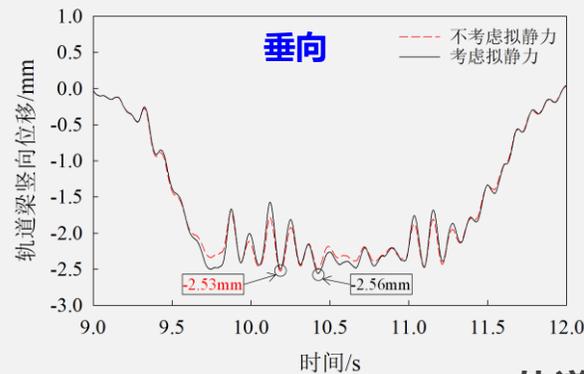


车-桥地震响应幅值

拟静力分量	梁竖向位移/mm	梁横向位移/mm	沉浮加速度/m·s ⁻²	偏航加速度/m·s ⁻²	悬浮间隙波动/mm	导向间隙/mm
考虑	2.56	4.38	1.066	1.939	1.04	16.86
不考虑	2.53	4.23	0.092	0.821	0.94	6.69
Error	1.30%	3.56%	1057%	136%	10.5%	152.21%



车厢加速度



轨道梁位移

- 结构拟静力分量对桥梁结构动力响应的影响较为有限
- 忽略结构拟静力分量会严重低估桥上列车的动力响应

建议采用直接求解法处理车-桥-地震系统的地震动输入!!!

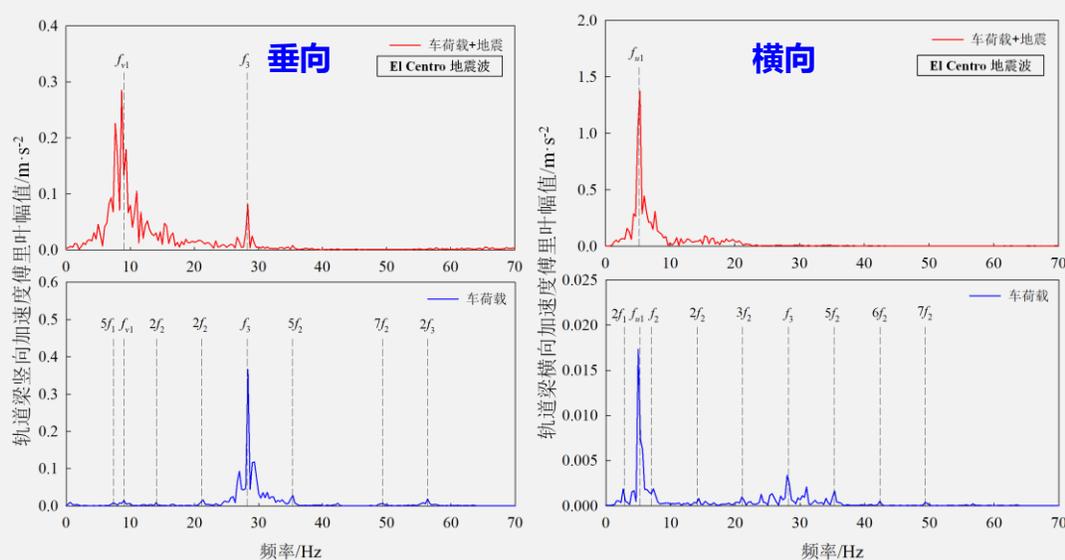
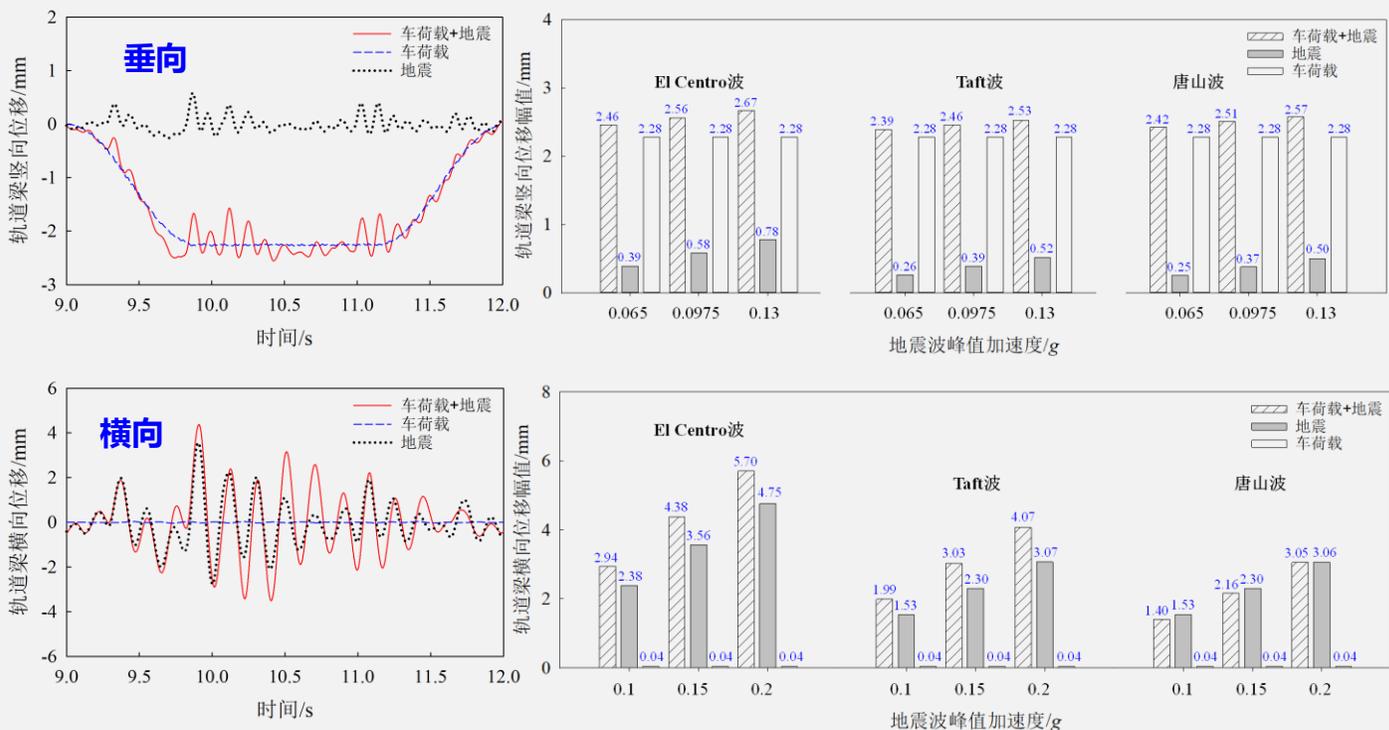
地震作用下磁浮车-桥耦合振动分析



车-桥系统地震响应特性

轨道梁位移时程响应

轨道梁加速度频域响应



- 对于竖向振动，地震、车荷载均是重要激励
- 对于横向振动，地震的影响要远大于车辆荷载的，但忽略车荷载仍会造成动力响应的低估，低估值达27%；

- 无震条件下，轨道梁的频域振动受桥梁固有频率和车荷载频率的影响；遭遇地震后，其频域振动主要受固有频率的影响，车荷载频率的影响被削弱；

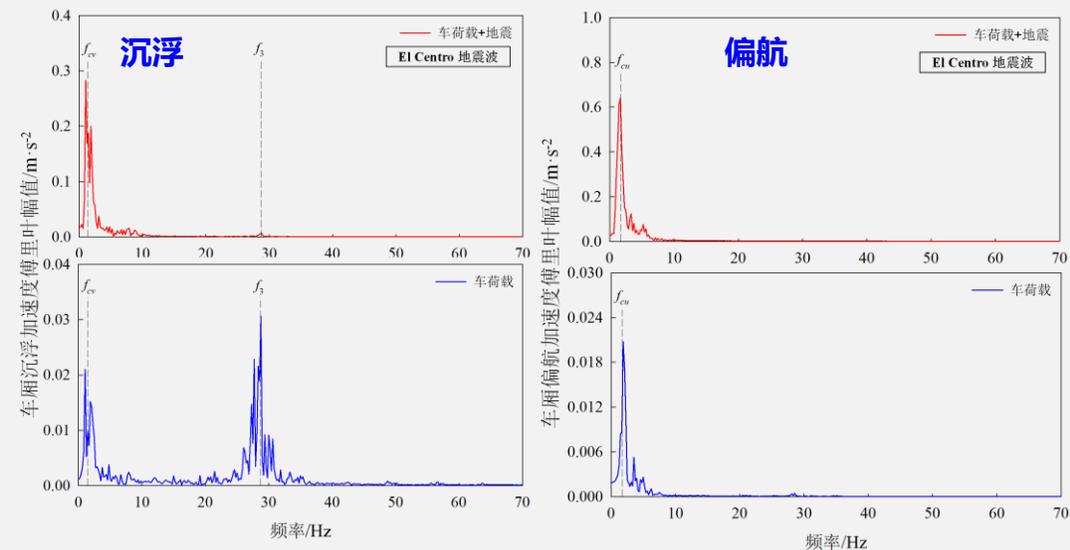
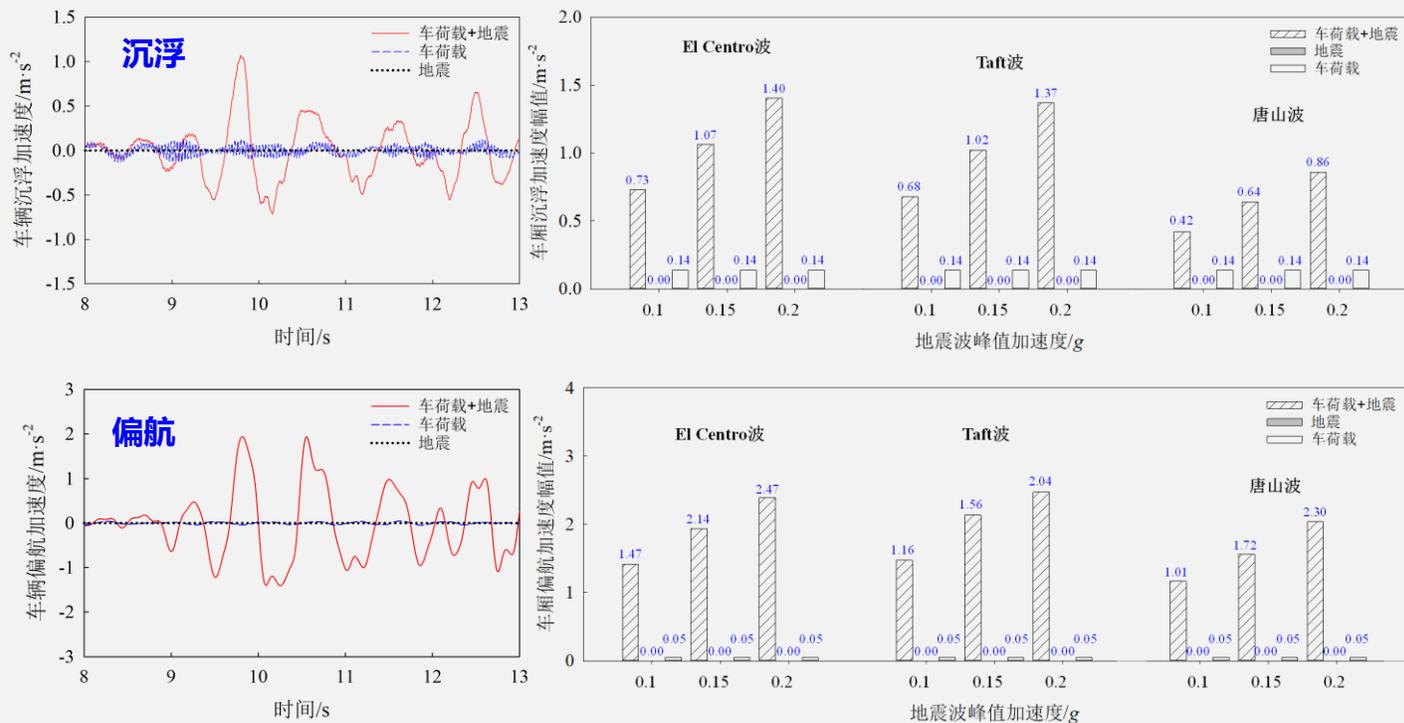


地震作用下磁浮车-桥耦合振动分析

车-桥系统地震响应特性

车厢加速度时程响应

车厢加速度频域响应



➤ 地震作用显著增大了车厢的加速度响应，这是因为地震作用迫使桥梁产生剧烈振动，加剧了车-轨之间磁浮间隙的幅值变化，继而影响电磁力，加剧车辆振动；

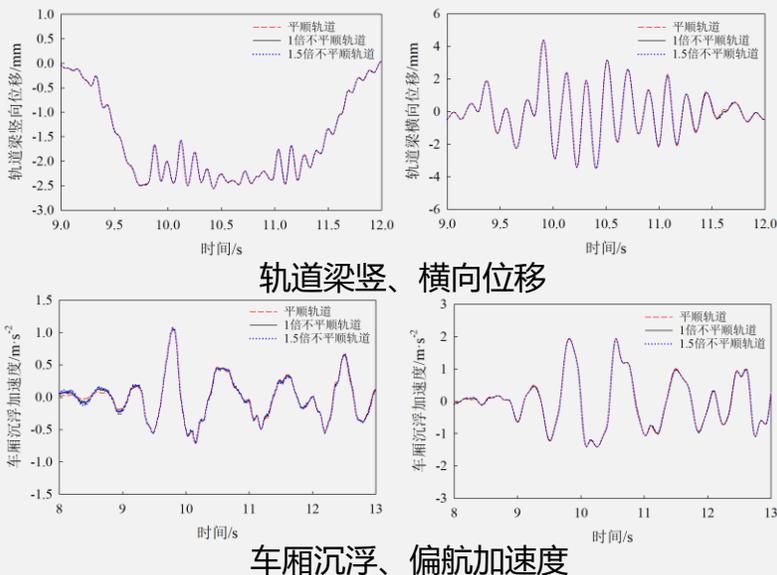
➤ 无震条件下，车厢的频域振动受车辆固有频率和车荷载频率的影响；遭遇地震后，其频域振动主要受固有频率的影响，车荷载频率的影响被削弱；



地震作用下磁浮车-桥耦合振动分析

车-桥系统地震响应特性

轨道不平顺影响



➤ 车-桥系统地震响应几乎不受轨道不平顺的影响，可以忽略轨道不平顺模型的建立

可以忽略!!!

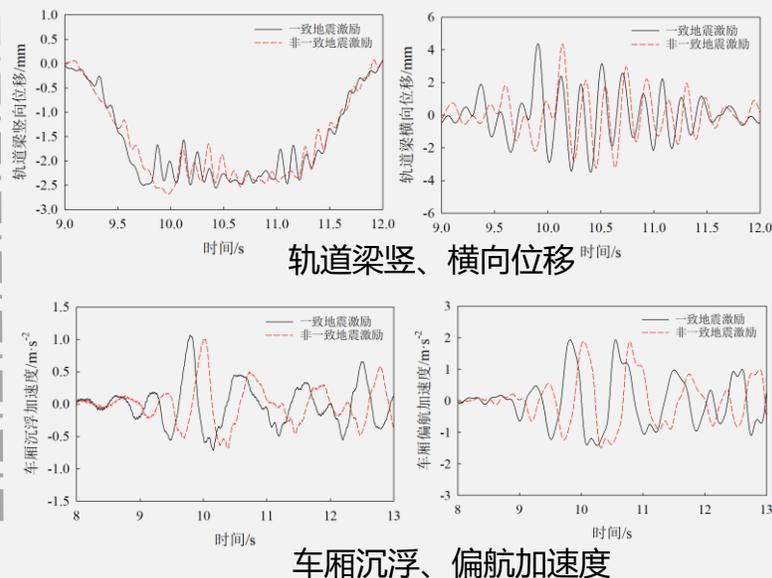
轨道不平顺对响应幅值影响

工况	轨道梁跨中		车厢	
	竖向位移/mm	横向位移/mm	沉浮加速度/ $m \cdot s^{-2}$	偏航向加速度/ $m \cdot s^{-2}$
平顺	2.455	2.955	0.716	1.434
不平顺	2.456	2.942	0.730	1.411
1.5倍不平顺	2.458	2.936	0.741	1.400
Error	-0.04%	0.44%	-1.86%	1.62%
	-0.11%	0.66%	-3.33%	2.44%

非一致地震激励影响

非一致激励对响应幅值影响

工况	轨道梁跨中				车厢	
	竖向位移/mm	竖向加速度/ $m \cdot s^{-2}$	横向位移/mm	横向加速度/ $m \cdot s^{-2}$	沉浮加速度/ $m \cdot s^{-2}$	偏航向加速度/ $m \cdot s^{-2}$
非一致	2.70	1.53	4.45	3.73	1.03	1.94
一致	2.56	1.62	4.38	3.55	1.07	1.91
差异	-5.14%	6.08%	-1.48%	-4.96%	3.15%	-0.16%



➤ 非一致激励与一致激励下的计算结果差异最大仅为6%

➤ 行波效应对车-桥系统地震响应的影响较为有限

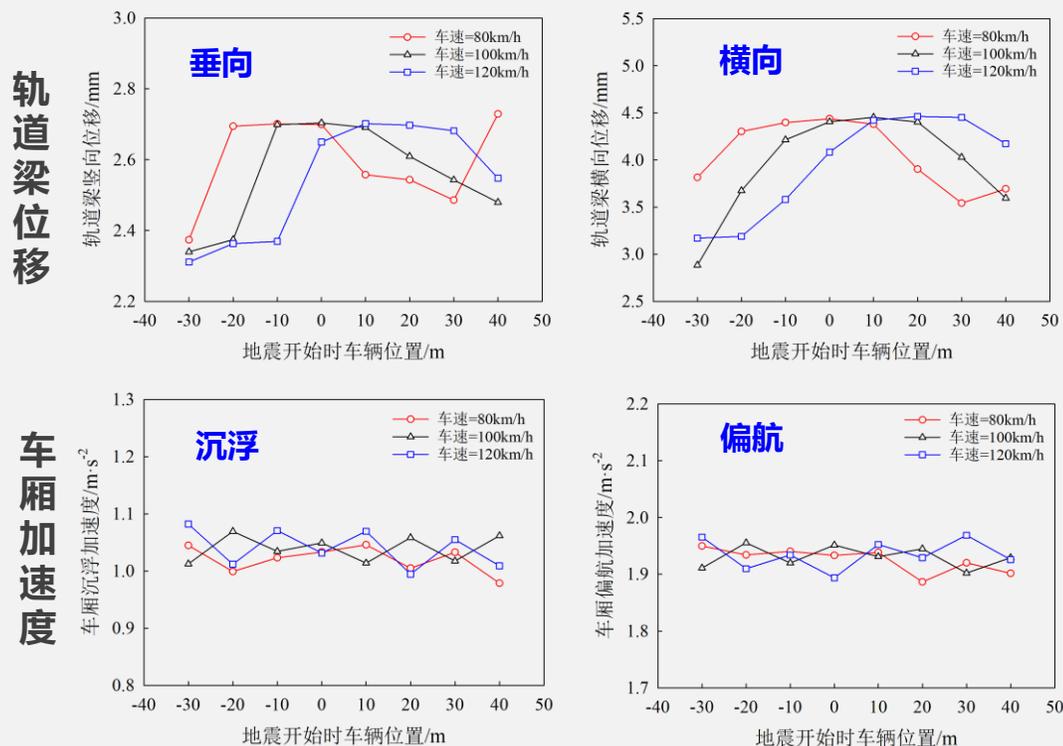
可以忽略!!!

地震作用下磁浮车-桥耦合振动分析

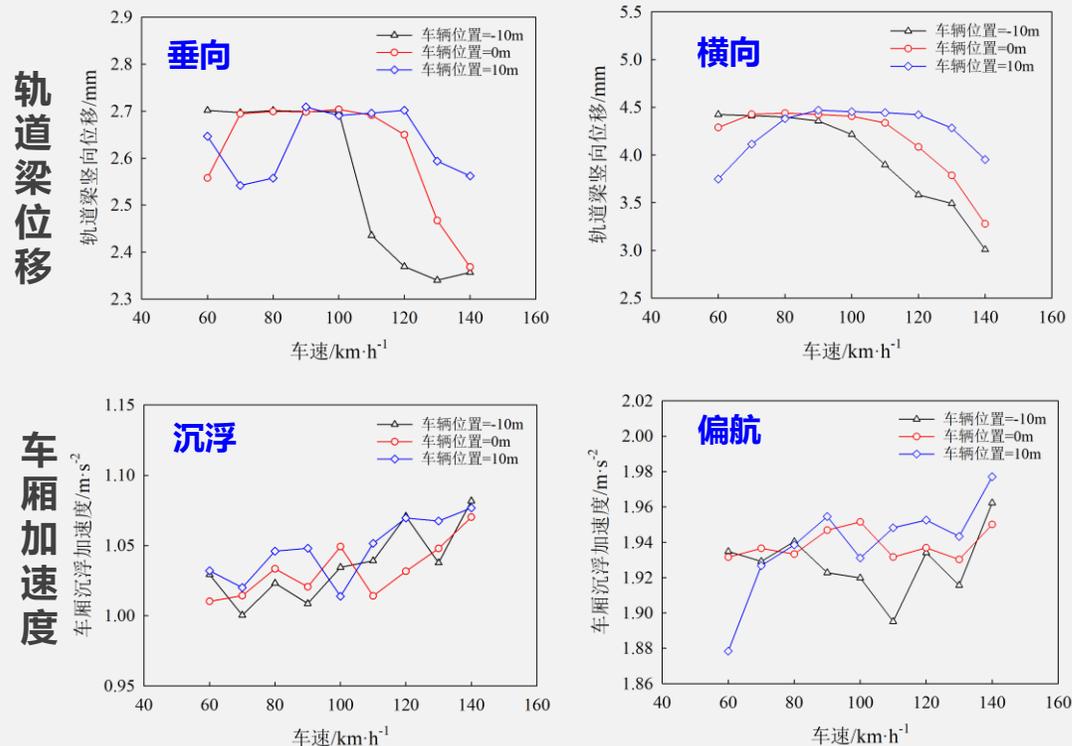


参数分析 — 地震动开始时间&车速

地震动开始时间



车速



- 按地震波峰值时车辆刚满布的原则确定地震发生时刻
- 同时保证地震波峰值时刻附近车辆在桥上运行

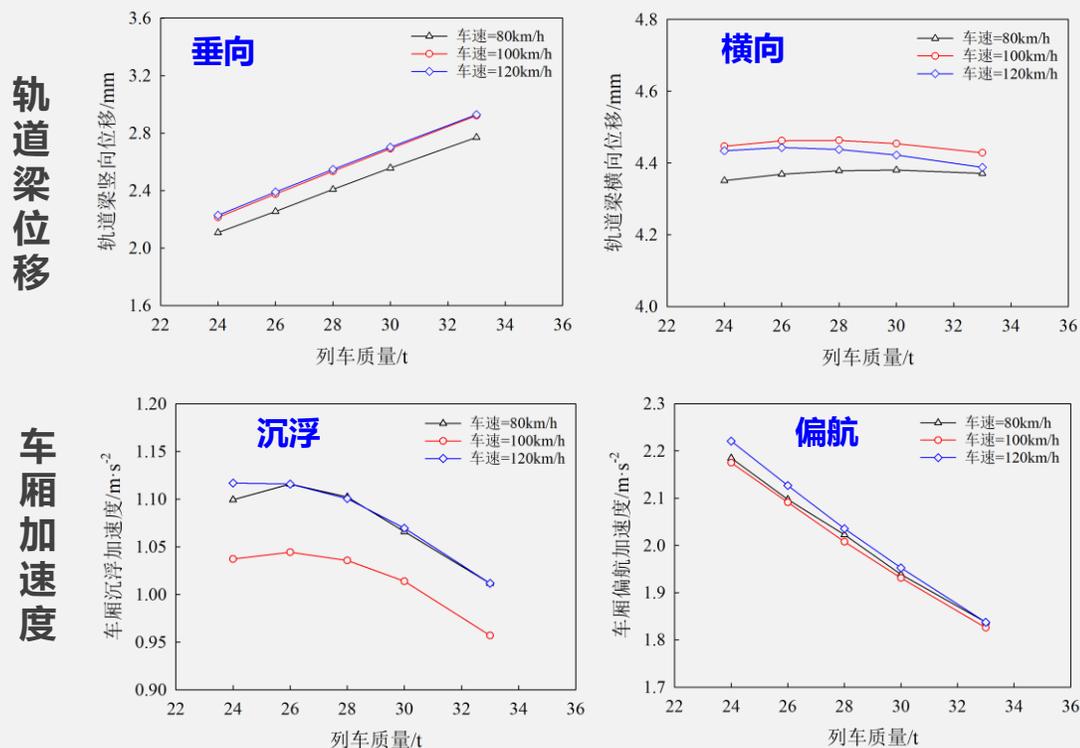
- 轨道梁的动力响应值与车速间没有明确的关系
- 车速提高会加剧车厢的加速度响应，但影响较为有限

地震作用下磁浮车-桥耦合振动分析

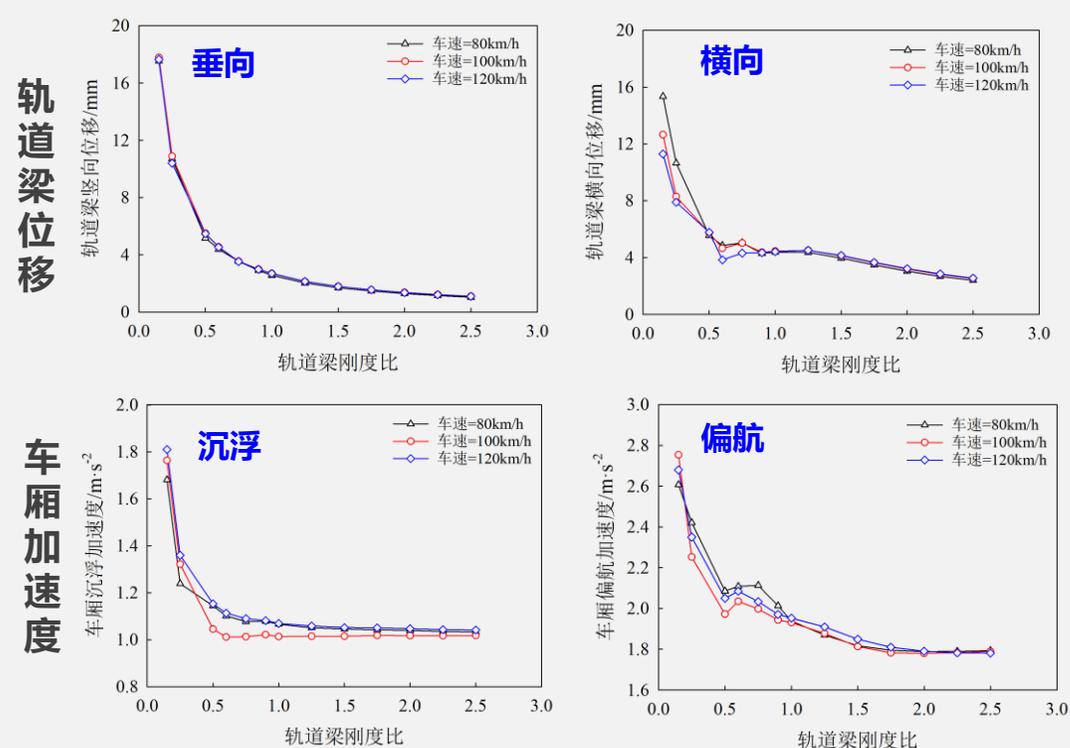


参数分析 — 列车质量&轨道梁刚度

列车质量



轨道梁刚度



- 车重对轨道梁的竖向地震响应影响较大，但对轨道梁的横向地震响应影响是非常小
- 车厢加速度响应随车重的增大几乎线性减小

- 随着轨道梁刚度的增大，车-桥系统的地震响应急剧减小，在刚度比大于某一特定值后，系统地震响应区趋于稳定



1

前言

2

地震作用下磁浮车-桥耦合振动数值模型

3

地震作用下磁浮车-桥耦合振动分析

4

结论与展望

□ 结论

1. 基于主动控制电磁力的磁轨关系，建立了地震作用下中低速磁浮车-桥耦合振动分析模型，并进行了可靠性验证。
2. 轨道不平顺对车-桥耦合振动响应影响较大，但对车-桥系统地震响应的影响非常小。
3. 车-桥地震响应分析时应考虑结构拟静力的影响，建议采用直接求解法处理地震输入。
4. 地震条件下，车-桥系统的频域振动主要受系统自身固有频率的影响，车荷载频率影响被削弱。

□ 展望

1. 车辆模型的进一步完善，考虑悬挂系统非线性、行走架结构
2. 曲线段的磁浮车-桥系统地震响应特性
3. 地震作用下磁浮车辆过桥时的行车安全性评价



南京工业大学

NANJING TECH UNIVERSITY

谢谢

——请各位专家老师批评指正——