

磁浮轨道梁姿态高灵敏监测技术及其应用

张雷^{1,2}, 张家诚¹, 欧冬秀¹

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 200092;

2. 同济大学 上海市多网多模式轨道交通协同创新中心, 上海 200092)

摘要: 针对动/静态运行下的磁浮列车与轨道梁相互作用所产生的振动变形进行了研究; 在没有惯性导航系统的情况下, 提出了使用全球导航卫星系统 (GNSS) 接收机同步多天线组载波相位纠缠差的概念; 利用全球导航卫星系统 (GNSS) 技术的理论与方法融入对磁浮轨道梁三维空间高精度实时监测与定位; 在静态和动态实验中实现了高灵敏且误差累积小的偏航、俯仰角和滚转角姿态的时-空同步监测; 从得到的数据中获得桥面多自由度矢量振动变形的规律; 同时, 对轨道进行多阶模态的建模, 探索在时间同步, 通信协同策略下的“车-桥”耦合动力学的问题, 在“人工智能+交通”的交叉创新领域上形成相关的解决方案和技术体系; 推进桥面发生边坡蠕滑等自然灾害的预警与精准治理, 经过实际应用满足磁浮列车的安全与平稳性运行需求。

关键词: 磁浮轨道; 全球导航卫星系统; 通信协同; 耦合动力学; 边坡蠕滑

High Sensitivity Monitoring Model and Dynamic Calculation of GNSS for Maglev Track Beams

ZHANG Lei^{1,2}, ZHANG Jiacheng¹, OU Dongxiu¹

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Research Institute for Intelligent Autonomous System, Tongji University, Shanghai 200092, China;)

Abstract: The vibration deformation caused by the interaction between maglev trains and track beams under dynamic/static operation is analyzed; In the absence of inertial navigation system, the concept of synchronous multi-antenna group carrier phase entanglement difference using global navigation satellite system (GNSS) receivers is proposed; The theory and method of GNSS technology are incorporated into the high-precision real-time monitoring and positioning of magnetic levitation track beams in three dimensions. In static and dynamic experiments, the time-space synchronous monitoring of yaw, pitch and roll angles with high sensitivity and small error accumulation is realized, and the law of multi-degree of freedom vector vibration deformation of the bridge deck is obtained from the obtained data; At the same time, the multi-order modal modeling of the track is carried out to explore the vehicle and bridge coupling dynamics under time-synchronous and communication cooperative strategies, the solutions and technology systems are developed in the cross-innovation field of artificial intelligence and transportation; The early warning and precise management of natural disasters such as slope creep and slip on bridge decks are promoted to meet the safety and smooth operation requirements of maglev trains after practical application.

Keywords: magnetic levitation track; GNSS; communication collaboration; coupling dynamics; slope creep

0 引言

磁浮轨道导轨与桥梁之间的相互作用是平顺性、舒适性和安全性的重要影响因素。文献 [1] 分别对磁浮列车、轮轨列车与线桥的动力作用进行了对比分析, 表明高速磁浮列车在跨度大于 22 米桥梁时, 桥梁挠度作用加大。列车对桥梁冲击形成的挠度极大程度地造成此动轨道梁振动形变。考虑磁浮轨道梁静态时, 受到所在地理环境地质、自然老化等因素的影响。列车动态运行时, 磁浮车桥耦合振

动影响则会更大。

文献 [2] 在考虑磁浮列车在轨运行时为非接触, 列车与轨道梁容易产生横向失稳, 需研究其三维空间效应。尤其在磁浮列车转向时, 离心力的作用使得轨道导轨与列车之间形成不同程度的作用力, 同时空气摩擦力也发生非均匀性变化。因此, 轨道导轨三维空间特性建模对于磁浮列车平顺性研究极为重要。文献 [3] 阐述了磁浮车辆/轨道系统动力学建模、数值求解及动力响应分析与动力性能评价等方面的研究进展。由于没有磁浮轨道梁振动与形变

收稿日期: 2023-04-21; 修回日期: 2023-05-31。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52172329); 上海市科技创新行动计划 (20511106402)。

作者简介: 张雷 (1978-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

引用格式: 张雷, 张家诚, 欧冬秀, 等. 磁浮轨道梁姿态高灵敏监测技术及其应用[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11): 88-93.

的实时动态数据反馈, 在研究中往往只从控制工程的角度出发, 文献 [4] 给出了在考虑导轨是柔性梁的时候, 车辆的振动会引起导轨的轻微变形, 从而可能引起共振。导轨几何形状的不规则性是车辆随机振动的主要激励源, 在不能客观彻底消除导轨不规范的前提下, 通过数值仿真验证了反馈控制参数对磁悬浮系统稳定性的影响并分析其垂直随机振动及随机激励下悬浮控制性能的可靠性。文献 [5] 提出了针对一维单点问题, 给出了双环 PID 控制算法, 研究了单点悬浮控制系统的渐近稳定性、Hopf 分岔点附近的振动特性和非线性振动的幅频特性。侧重单电磁铁悬浮系统动力学问题研究, 虽解决了车辆及控制器设计问题, 但缺乏实际土建工程应用的针对性。文献 [6] 采用将车辆线路考虑为多自由度刚柔耦合系统的方法, 虽对控制系统进行了一定简化, 但还是专注于车辆和线路动力作用问题, 没有达到磁浮轨道梁数字孪生的技术效果。文献 [7] 提出了在没有惯性导航系统的情况下, 使用全球卫星导航系统 (GNSS) 载波相位纠缠差的概念同时建立授时同步的方法来对实验中产生的失稳现象进行精确定位。该技术的优势在于相较于传统的惯性导航和其他商业产品能够更具实时性, 同时减少了在工程应用中误差的累积。文献 [8] 在使用全球卫星导航系统过程中考虑了特殊因素导致的因信号问题无法使用和惯性导航系统状态误散过快的问题, 提出了使用一种基于连续帧时间差分视觉辅助的方法, 该方法有效的延长了惯性导航的可用时间。但对于磁浮列车的广范围长距离运行当中, 惯性导航的实时性误差问题依然不可忽视它体现在磁浮列车运行的实时安全性上。

文献 [9] 基于磁浮轨道梁振动形变, 针对三维空间高精度定位与多方向姿态, 将非线性磁浮动力学及其系统进行建模, 引入基于时间同步主从多点在线监测方法, 实现高速磁浮试验线 24m 轨道梁的多阶模态高灵敏度位移解算, 为基于磁浮轨道梁数字孪生 [10] 的振动形变探索新技术策略, 进而实现精准计算磁浮轨道梁的沉降与位移, 优化“列车—控制—桥梁”三者之间作用关系, 在磁浮列车与轨道梁多自由度上实现平顺性, 也为在“人工智能+交通”的交叉创新领域上形成相关的解决方案和技术体系。文献 [11] 中详细的将交通物理与信息空间映射、网络通信与时空数据规约问题上进行了论述, 在网络通信和云交互下, 实时实现交通物理实体之间的信息联通。在个体智慧终端、路测边缘设施和云端网络通信等的大规模部署下, 交通事件、状态与数据呈现既关联又独立的处理和运维趋势, 有助于在时空上实时预警与引导, 有效支撑磁浮列车的无人驾驶与人工驾驶的并存发展。文献 [12] 根据当前我国铁路发展成果考虑了铁路道口列车运行情况, 设计了一种安全监测的通信系统, 磁浮轨道未来应用过程当中也要考虑到站停靠的问题, 从动态减速直至停靠静浮的运行上也要考虑结合道口的状态做到平稳性运行。

1 非线性振动形变位移原理

文献 [13] 在研究磁浮轨道梁在电磁吸力作用下产生弹性形变, 引起磁浮列车与轨道梁之间的悬浮气隙变化, 反作用于悬浮控制器工作状态, 使得电磁力随之发生变化, 形成磁浮列车振动和轨道梁相互振动。当磁浮列车沿着轨道梁运行, 虽只有空气摩擦阻力, 但会使得列车与轨道梁一起振动以及轨道梁的形变。由于上海地区土质松软, 雨季持续时间长等天然因素, 磁浮列车在静态悬浮状态也会受到路基边坡蠕滑。文献 [14] 采用有限元软件建立了考虑降雨影响的边坡数值分析模型, 对边坡蠕滑导致的桥梁桩基力学特性变化进行了重点研究。文献 [15] 提出离散元分析方法为滑坡数值模拟提供了新途径, 并由此产生了颗粒流 (PFC)、离散单元法程序 (UDEC)、三维离散单元法程序 (3DEC) 等离散元软件。PFC (particle flow code) 是基于离散元理论建立的数值分析方法, 相比其他离散元软件在土质滑坡模拟中更具优越性。PFC2D 提供了两种黏结模型: 接触黏结模型 (contact-bond model) 和平行黏结模型 (parallel-bond model), 平行黏结模型较接触黏结模型的应用更加广泛, 这是由于平行黏结模型不仅能够传递颗粒接触点之间的力而且可以传递弯矩 [16] 而接触黏结模型只能传递接触力。

文献 [17] 研究了磁浮列车运行存在着点头, 摇头, 侧滚, 沉浮, 横移, 纵向等多方向运动, 是一个复杂的多自由度机电耦合系统。在描述磁浮列车单个车厢状态时, 需要联立至少几十个微分方程。因此, 需要设计最小悬浮单元系统来分析非线性磁浮动力学和系统稳定性。将磁浮轨道梁振动形变位移的微分方程描述成:

$$\frac{d^2 q_n(t)}{dt^2} + 2\epsilon_n \omega_n \frac{dq_n(t)}{dt} + \omega_n^2 q_n(t) = \frac{Q_n(t)}{M_n} \quad (1)$$

式中, $q_n(t)$ 为磁浮轨道梁第 n 阶振动位移; ϵ_n 为轨道梁 n 阶阻尼比; ω_n 为轨道梁第 n 阶固有频率; $Q_n(t)$ 为第 n 阶广义力; M_n 为广义质量; t 为电磁铁产生吸力的瞬时时间。

当磁浮轨道梁第 n 阶模态单独发生振动形变作用时, 式 (1) 所示的位移方程可表示成:

$$\frac{d^2 h_n(t)}{dt^2} + k_n h_n(t) + c_n \frac{dh_n(t)}{dt} = \frac{\Phi_n^2(z_s)}{M_n} f_e(t) \quad (2)$$

式中, $h_n(t)$ 为第 n 阶模态对应的轨道梁位移; $c_n = 2M_n \epsilon_n \omega_n$ 为第 n 阶轨道梁模态对应的轨道梁阻尼; 设 $k_n = M_n \omega_n^2$ 为第 n 阶轨道梁模态对应的轨道梁刚度。

在动力学系统稳定性必要条件的作用下, 结合式 (1) 和式 (2) 可得到轨道梁一阶模态单独发生作用时的基本约束条件:

$$\begin{cases} \frac{c_1}{\Phi_1^2(z_3)} \left(1 + \frac{k_1 k_a}{m_2}\right) + k_1 k_v > c_f > c_s, \\ \frac{k_1}{\Phi_1^2(z_3)} \left(1 + \frac{k_1 k_a}{m_2}\right) > k_f > k_s, \end{cases} \quad (3)$$

式中, α 为泰勒级数展开的高阶项系数, $\alpha > 0$; k_v 为磁浮控制器参数; k_f 为磁浮悬浮力平衡点处等效磁隙刚度; k_s 为二系悬挂刚度; c_f 为平衡点处等效磁隙阻尼; c_s 为二系悬挂阻尼。

由式 (3) 可知, 磁浮轨道梁等效磁隙刚度 k_f 的取值决定着磁浮列车—轨道梁系统稳定性。当 k_f 接近振动变频率, 则引起列车—轨道梁共振, 轨道梁位移振幅变大。当列车—轨道梁系统稳定性降低时, 偏离系统平衡点, 轨道梁位移振幅必然加强。当 $\Phi_1^2(z_3)$ 变小时, 磁浮动力学系统稳定性增强。当 z_3 取值轨道梁长度一半时, 磁浮悬浮系统重心位于轨道梁几何中心, 则轨道梁最大振动形变引发整个磁浮列车—轨道梁系统的最大振动。又当 $\Phi_1^2(z_3) = 1$ 时, 系统稳定性最差。文献 [18] 引入了磁浮轨道梁系统的刚度参数, 当刚度变大, 轨道梁结构阻尼变大, 系统稳定性将增强。对于轨道梁本身而言, 需要综合考虑轨道长度、材料、截面积、轨道线密度与轨道阻尼比等参数以及支撑接合点数量等因素, 来设计与分析磁浮列车—轨道梁非线性振动形变位移和系统稳定性。

2 轨道梁多方向位移监测模型

无接触式的磁浮列车与轨道梁在本质上是磁浮列车机械、电磁物理与悬浮导向控制的多场多系统耦合作用关系。磁浮列车在高速 (如每小时 400 公里) 运行时, 列车车体自身振动加速度以及相应的轨道梁振动加速度较小。因此, 在综合考虑轨道梁扰度、跨度以及几何不平顺性等因素, 高速磁浮列车运行是具有极高的舒适性。利用卫星导航技术, 文献 [19] 提出对桥梁 GNSS 监测点信号数据的测试方案和步骤, 为工程人员较为方便地找到符合要求的监测点提供了简单易行的方法。文献 [20] 给出的选星定位方法也能够有效提升轨道位置变化的参考精度与稳定性。

本文所提出的监测布设如图 1 (a) 所示磁浮轨道梁单元上设置位移监测主点、从点 A 和从点 B 来构建轨道梁振动形变监测面, 进行多自由度耦合设计。主点在轨道梁中轴线上, 从点 A 和从点 B 在轨道梁臂上形成对称, 并且 3 个监测点时间同步。当磁浮列车静态悬浮或运行于轨道梁面时, 构建的等腰三角形振动形变监测面受到多方向位移时可以精准测量与计算。

在磁浮轨道梁位移监测面上定义 X 和 Y 轴分别指向两侧轨道梁臂, 从监测点 A 落在 Y 轴上, 从监测点 B 落在 X 轴方向上, 主监测点坐落在磁浮轨道梁位移监测面的几何中轴线上, 由此构成监测面基线矢量及其几何测姿模型。

设 GNSS 可视卫星数量为 n 颗, 根据磁浮轨道梁在磁浮列车静态悬浮和运行时均存在振动形变位移, 给出了相应的多自由度双差观测方程表达为:

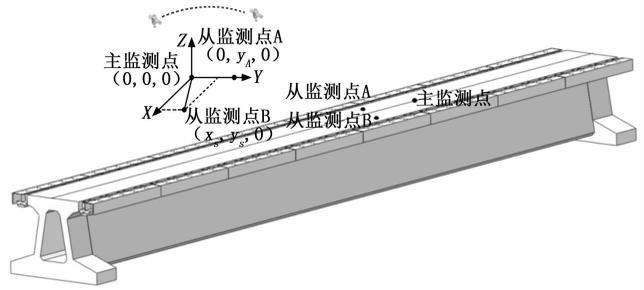


图 1 磁浮轨道梁位移监测面几何模型

$$\sqrt{\left(\nabla \Delta \varphi_{BA}^i - \nabla \Delta \varphi_{主A}^j\right)^2 + \left(\nabla \Delta \varphi_{BA}^j - \nabla \Delta \varphi_{主B}^i\right)^2} = S^{ij} \cdot \begin{bmatrix} b_{\text{点头}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & b_{\text{纵向}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, λ 为 GNSS 信号源对应的波长, 例如 L1 波段 (中心频率 1 575.42 GHz), 则 p 为波长的种类数量; $\nabla \Delta \varphi_{BA}^i$ 为从监测点 B 到从监测点 A 在 i, j 颗 GNSS 可视卫星共同作用下的双差超短基线矢量; $\nabla \Delta \varphi_{主A}^j$ 为主监测点到从监测点 A 在 i, j 颗 GNSS 可视卫星共同作用下的双差超短基线矢量; $\nabla \Delta \varphi_{主B}^i$ 为主监测点到从监测点 B 在 i, j 颗 GNSS 可视卫星共同作用下的双差超短基线矢量; S^{ij} 为在 i, j 颗 GNSS 可视卫星共同作用下的平面波矢量三角形; $b_{\text{点头}}$ 及其 $b_{\text{纵向}}$ 为磁浮列车运行存在着点头, 摇头, 侧滚, 沉浮, 横移, 纵向等多方向运动矢量基线。因此, 式 (4) 左边是 GNSS 平面波在磁浮轨道梁面上的载波观测值, 右边是轨道梁面振动形变位移所产生的多自由度基线矢量解。

本文选择全球导航卫星系统 (GNSS) 作为监测信号源, 在磁浮轨道梁位移监测面上从监测点 A 到主监测点、从监测点 B 到主监测点、从监测点 A 到从监测点 B 构成超短基线矢量, 并同在 GNSS 一个平面波上。在主监测点、从监测点 A 和从监测点 B 构成的共时钟主从同步监测系统, 电文极性始终保持一致。当主监测点存在半周模糊度时, 从监测点 A 和从监测点 B 同样存在半周模糊度, 双差后的半周模糊度被完全消除。轨道梁多方向位移监测的频率为 100 Hz。这对于求解磁浮轨道梁位移监测面的实时高精度姿态位移极为有利。

3 多阶模态高灵敏度位移解算

如图 1 所示, 选择同济大学高速磁浮试验线 24 m 轨道梁为研究对象, 将磁浮轨道梁位移监测面作为最小悬浮单元系统进行位移控制设计。磁浮列车与轨道梁面之间的实际悬浮间隙 δ 和期望间隙 δ_{exp} 形成间隙误差量 $\Delta\delta$, 即 $\Delta\delta = \delta_{exp} - \delta$ 。根据间隙误差量 $\Delta\delta$ 来控制位移, 通常进行比例、积分和微分三个环节进行处理。根据式 (2), 将多自由度

双差观测方程的误差量进行四阶模态解算, 将 GNSS 可视卫星共同作用下的高精度高灵敏度振动形变位移状态观测测量进行线性分解, 得到 $\Delta\delta = \delta_{exp} - \delta = (\Delta\delta_{点头} \ \Delta\delta_{摇头} \ \Delta\delta_{侧滚} \ \Delta\delta_{沉浮} \ \Delta\delta_{横移} \ \Delta\delta_{纵向})$ 。其中, $\Delta\delta_{点头}$ 、 $\Delta\delta_{摇头}$ 、 $\Delta\delta_{侧滚}$ 、 $\Delta\delta_{沉浮}$ 、 $\Delta\delta_{横移}$ 和 $\Delta\delta_{纵向}$ 分别表示六个方向运动 GNSS 观测位移监测误差。

结合式 (2)、(3) 和 (4), 对 n 阶 GNSS 多自由度双差进行降阶和线性化修正, 得到:

$$\begin{cases} \Delta\delta_{点头}/S^{1j} = \lambda_{L_1}^{-1} \frac{\Phi_n^2(z_3)}{M_n} + \Delta\delta / \begin{bmatrix} b_{点头} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & b_{纵向} \end{bmatrix} \\ \Delta\delta_{摇头}/S^{2j} = \lambda_{L_1}^{-1} \frac{\Phi_n^2(z_3)}{M_n} + \Delta\delta / \begin{bmatrix} b_{摇头} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & b_{纵向} \end{bmatrix} \\ \Delta\delta_{侧滚}/S^{3j} = \lambda_{L_1}^{-1} \frac{\Phi_n^2(z_3)}{M_n} + \Delta\delta / \begin{bmatrix} b_{侧滚} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & b_{纵向} \end{bmatrix} \\ \Delta\delta_{沉浮}/S^{4j} = \lambda_{L_1}^{-1} \frac{\Phi_n^2(z_3)}{M_n} + \Delta\delta / \begin{bmatrix} b_{沉浮} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & b_{纵向} \end{bmatrix} \\ \Delta\delta_{横移}/S^{5j} = \lambda_{L_1}^{-1} \frac{\Phi_n^2(z_3)}{M_n} + \Delta\delta / \begin{bmatrix} b_{横移} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & b_{纵向} \end{bmatrix} \\ \Delta\delta_{纵向}/S^{6j} = \lambda_{L_1}^{-1} \frac{\Phi_n^2(z_3)}{M_n} + \Delta\delta / \begin{bmatrix} b_{纵向} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & b_{纵向} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

式中, λ_{L_1} 为 GNSS 的 L_1 波段。

磁浮轨道梁一阶固有频率与磁浮列车荷载主频之间发生共振, 会使得磁浮列车与轨道梁之间产生强烈振动, 形成形变位移。高灵敏度位移研究中, 往往引入不平顺系数来反映横向导向间隙与纵向悬浮间隙。由于磁浮列车与轨道梁面非接触, 横向导向间隙的影响较小。纵向悬浮间隙最大值, 就是磁浮振动形变位移的最大值。

基于图 1 和式 (4), 位移监测主点、从点 A 和从点 B 共同构建的轨道梁振动形变监测面上 GNSS 接收周期采用 100 Hz, 如图 2 所示。GNSS 采集数据直接表达了磁浮轨道梁在现场综合环境下的静态振动形变情况, 基本处于亚毫米级。经过式 (4) 和式 (5) 的解算, 磁浮轨道梁振动形变相对位移基本与静态振动形变情况相当。图 2 中获取了一个尖峰值, 完全对应了磁浮列车在该时刻正在行车试验, 验证了在磁浮列车进过轨道梁振动形变监测面时, 实时引起了亚厘米级的振动形变位移。

从轨道梁受到振动形变的六个方向运动分析与解算, 提取 GNSS 观测位移, 根据轨道梁纵向矢量及其位移作为观测值来考察磁浮列车及其轨道梁在行车时的地基沉降情

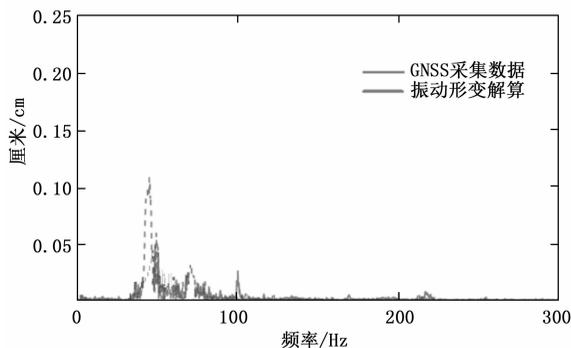


图 2 轨道梁振动形变监测示例

况。如图 3 所示。位移监测主点、从点 A 和从点 B 三者构成的测量平面, 两点间间距均是 1 米, 属于超短测量基线, 纵向矢量位移处于 1.50~2.00 毫米之间, 振动形变位移相对值趋于平顺。

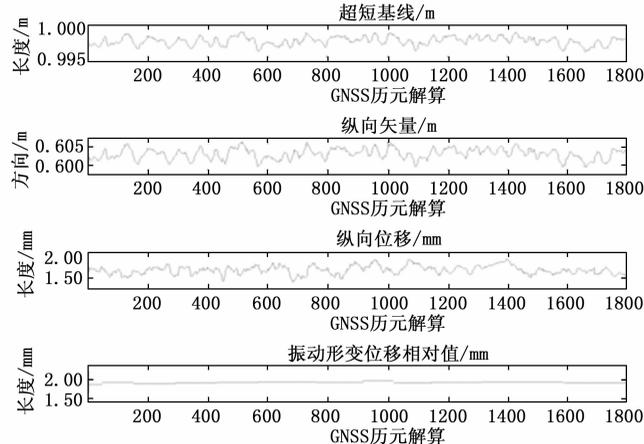


图 3 纵向矢量振动形变解算

根据图 1 所示磁浮轨道梁振动形变监测面上位移监测主点、从点 A 和从点 B 共同构建的多自由度双差观测解算和监测面纵向矢量位移相对值, 将 24 m 轨道梁进行连续四阶垂向模态分析。如图 4 所示, 磁浮轨道梁的第一阶模态为垂向弯曲, 二阶模态为横向弯曲, 三阶模态和四阶模态均为垂向弯曲。在高速磁浮试验线中, 磁浮列车运行过程中的轨道梁一般不会出现高阶弯曲变形。

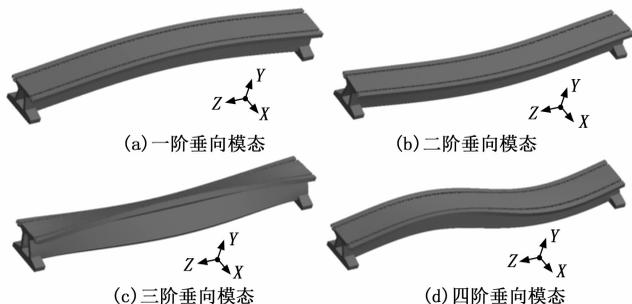


图 4 连续四阶垂向模态

4 设计实验与结果分析

磁浮列车的相关测试可以围绕整体运行步骤来进行，定义采样频率为 1 000 Hz。以车头左前方电磁铁为例进行说明，针对车辆及轨道梁不同部位振动以及耦合间隙（悬浮间隙）进行结果分析。为了保证实验不受其它变量因素干扰，顺利获取影响车轨耦合和平稳性的关键数据，实验的各个测点选取考虑了：（1）符合以往结构分析资料；（2）符合车辆与道岔钢梁结构特点；（3）在实验最高时速 80 km/h 运行和时速 40 km/h 运行下获取磁铁相关振动数据对比及其悬浮间隙变化如图 5 所示。

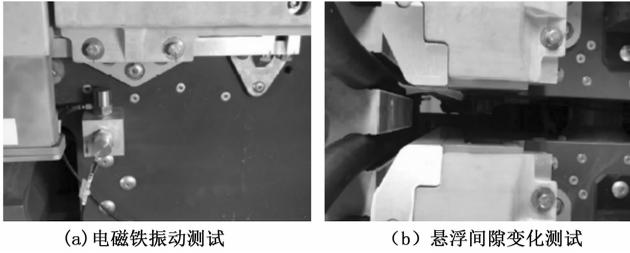


图 5 实验数据采集位置

如图 6~7 所示，随着运行速度的提高，电磁铁振动幅值明显提高，从频域图可以看出，在高速运行时，振动会包含更多的高频成分。而当列车运行速度进一步提高时（如图 7 所示），可以看出大多数振动成分集中在较低的频率段内，但是振幅较大的成分在 180 Hz 和 330 Hz 左右仍有分布。究其原因，一方面是由于轨道梁自激振动通过电磁力向上传递引起，另一方面是由于速度的增加导致扰动频率上升，振动抑制不及时导致不同频率的振动成分叠加，从而导致高频成分的增加。

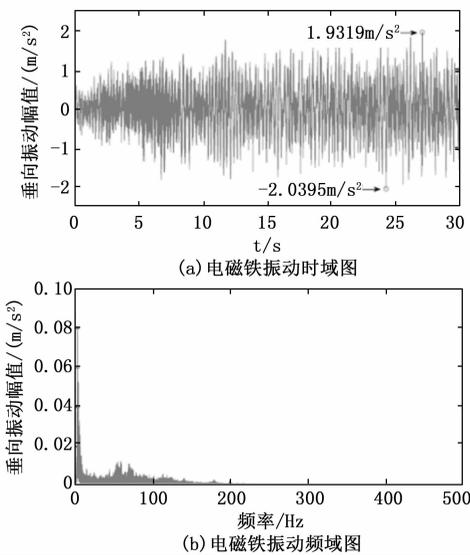


图 6 时速 40 km/h 运行下电磁铁振动频谱

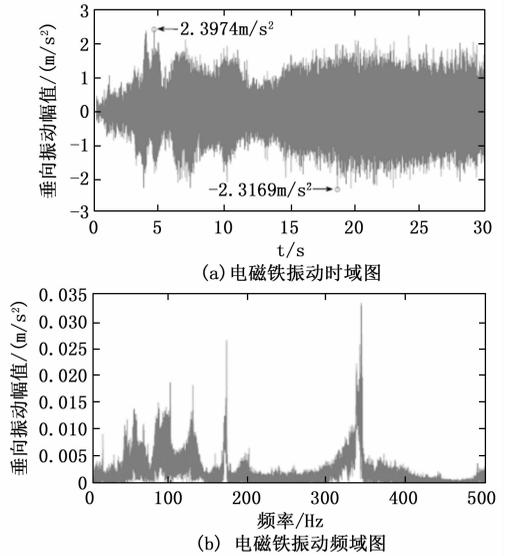


图 7 时速 80 km/h 运行下电磁铁振动频谱

车以 40 km/h 速度运行时具有较好的平稳性，系统能够保持较好的悬浮性能。然而，当列车以时速 80 km/h 速度运行时，虽然在大多数时间内系统仍旧具有较好的悬浮性能，但是经过多次反复试验发现可能会出现偶发性的掉点现象（悬浮间隙达到落车间隙 20 mm）。结合电磁铁振动数据可以得出结论，在面对高速运行所产生的扰动叠加效应时当前控制性能会有所下降，一方面会导致电磁铁振动中的高频成分有所增加，另一方面会导致列车产生偶发性掉点，这表明当前悬浮控制系统在面对高速运行环境所产生的复合扰动时的控制性能有待进一步优化。

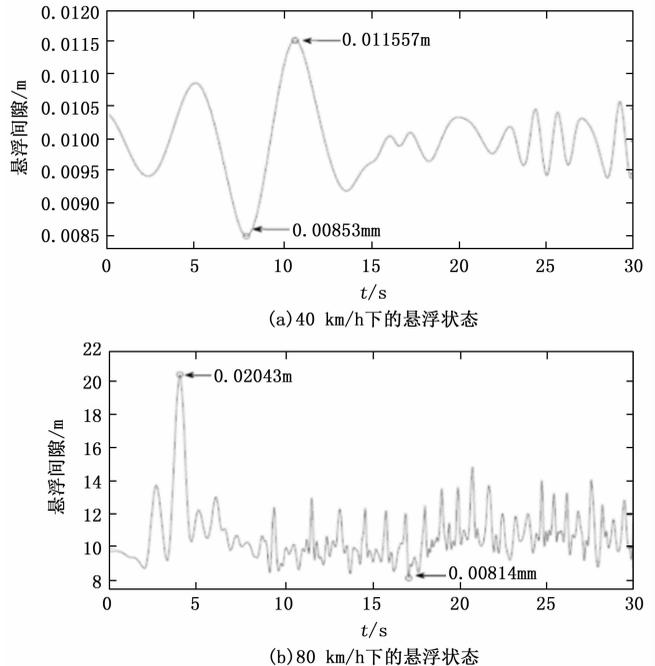


图 8 不同限速下的悬浮间隙

图 8 给出了不同限速下的悬浮状态。如图 8 所示，当列

5 结束语

高速磁浮轨道梁既是磁浮列车的承重结构, 又是驱动磁浮列车的直线电机定子的附着体。结合上海软土地条件, 磁浮轨道线路至少存在着六个方向运动而引起的复杂扭曲与偏转, 就是本文研究的多自由度矢量振动形变。在开放空间的磁浮轨道梁振动形变监测面上设置 GNSS 高灵敏与高精度超短基线监测系统, 使得整个磁浮轨道线获取磁浮线墩柱动态沉降数据。本文提出的研究方法克服了磁浮轨道线局部单点监测的局限, 并在阶 GNSS 多自由度双差进行降阶和线性化修正后, 使得整个磁浮轨道梁的多阶模态分析就显得更有工程应用意义。同时, 在磁浮列车运行时, 由位移监测主点、从点 A 和从点 B 构建的时间同步监测单元直接动态捕捉整个磁浮轨道梁短波数据和长波数据, 进而成为调整磁浮轨道梁支座高程数据和平面数据的依据。以此应用于磁浮轨道梁全生命周期振动形变监测。

而随着磁浮列车技术逐步成熟, 在二维车一轨关系和动态车一轨关系研究中取得了一些成果, 但作为一项新的基础理论研究, 车一轨作用研究尚未形成完整性, 系统性的理论成果。在曲面轨道上列车与轨道的相对三维运动十复杂, 二维空间形态特征显然无法反映其三维作用关系。因此对于反应轨道桥梁的不平顺性需要通过构建三维的空间形态特征及其应力形变模型来表达磁浮车辆悬浮对轨道梁面的振动与形变的数学物理关系。由于实验条件的限制, 高速磁浮在我国目前尚不可进行达速实验。在给定的实验场景周围也存在诸多对于高灵敏实验监测设备的影响。监测到的数据当中也包含了“噪声”, 杂质等需要在后续研究中进行有效地“数据清洗”从而达到预测磁浮列车轨道桥梁振动不平顺所带来的运行影响, 提高磁浮列车运行线路的整体水平。这也有助于准确反应“车一轨”间三维作用的映射关系。

本文所提出的高灵敏度监测与应用旨在推进系统级智能交通向交通云数据方向发展, 对于无人驾驶标准的制定与运营维护可提供更可靠的数据支撑, 有效地保证信息服务在公共安全中得到精准把控。

参考文献:

- [1] 翟婉明, 赵春发, 蔡成标. 磁浮列车与轮轨高速列车对线桥动力作用的比较研究 [J]. 交通运输工程学报, 2001, 1 (1): 7-12.
- [2] 翟婉明, 赵春发. 磁浮车辆/轨道系统动力学 (I) ——磁/轨相互作用及稳定性 [J]. 机械工程学报, 2005 (7): 1-10.
- [3] 赵春发, 翟婉明. 磁浮车辆/轨道系统动力学 (II) ——建模

- 与仿真 [J]. 机械工程学报, 2005 (8): 163-175.
- [4] XU J, CHEN C, SUN Y, et al. Nonlinear dynamic analysis of Maglev Vehicle Based on flexible guideway and random irregularity [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2018: 1-18.
- [5] 施晓红. 常导高速磁浮列车车轨耦合非线性动力学问题研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005
- [6] 唐 语, 刘 放, 邹逸鹏, 等. 中低速磁浮车辆一道岔主动梁刚柔耦合振动分析 [J]. 机械科学与技术, 2022, 41 (4): 500-504.
- [7] ZhG, R. Entanglement difference of GNSS carrier phase for vehicle attitude determination [J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2021, 10 (1): 69-82.
- [8] 王 丰, 李 沅, 李佳潞, 等. 基于改进时间差分的视觉/惯性组合导航研究 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (3): 268-274.
- [9] 周善石, 胡小工, 刘 利, 等. 导航卫星精密定轨与时间同步技术进展 [J]. 天文学报, 2019, 60 (4): 57-66.
- [10] 陈华鹏, 鹿守山, 雷晓燕, 等. 数字孪生研究进展及在铁路智能运维中的应用 [J]. 华东交通大学学报, 2021, 38 (4): 27-44.
- [11] 张 雷, 沈国琛, 秦晓洁, 等. 智能网联交通系统中的信息物理映射与系统构建 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2022, 50 (1): 79-86.
- [12] 夏炳勋, 田学刚. 铁路道口列车运行安全监测系统的研究与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (1): 59-64.
- [13] 李 莉, 孟 光. 电磁型磁悬浮列车动力学研究综述 [J]. 铁道学报, 2003, 25 (4): 110-114.
- [14] 王海恩. 边坡蠕滑影响下桥梁桩基力学特性分析 [J]. 施工技术, 2022, 51 (1): 32-35, 43.
- [15] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock system [C] // Symposium of International Society of Rock Mechanics. Nancy: Scientific Research Publishing, 1971: 128-132.
- [16] Itasca Consulting Group Inc. PFC2D (particle flow code in 2 Dimensions) [M]. version 3. 0. Minneapolis: ICG, 2002
- [17] 苏红建, 刘灿昌, 栾军超, 等. 磁悬浮列车磁轨耦合内共振分析 [J]. 噪声与振动控制, 2023, 43 (1): 173-178.
- [18] 姜卫利, 高芒芒. 轨道梁参数对磁浮车一高架桥垂向耦合动力响应的研究 [J]. 中国铁道科学, 2004 (3): 72-76.
- [19] 安 庆, 吴树森, 张婷婷. 桥梁 GNSS 监测点的布设与信号测试分析探讨 [J]. 科技资讯, 2016, 14 (20): 49-50.
- [20] 王冰洁, 田 申, 钟俞鸿, 等. GNSS 多系统融合相对定位选星方案设计及精度分析 [J]. 北京测绘, 2021, 35 (4): 500-504.