

# 磁浮轨道梁不平顺对悬浮状态的影响分析

李 萍, 胡雯雯

(华东交通大学 轨道交通学院, 江西 南昌 330013)

**摘 要:** 通过建立单磁铁-悬浮系统-轨道梁相互作用模型, 阐述轨道梁特性要求, 从轨道梁长短波不平顺、轨道梁刚度以及车辆运行速度角度出发, 研究单磁铁悬浮状态的变化。结果表明: 单磁铁悬浮间隙变化量随着车速的提高而增大, 短波不平顺对车辆的影响要比长波不平顺影响剧烈, 短波不平顺对单磁铁悬浮间隙和振动加速度均有较大影响; 轨道梁刚度对轨道梁挠度变化最为明显, 而对悬浮间隙、单磁铁振动加速度影响很小。

**关键词:** 轨道梁; 线路不平顺; 悬浮系统; 悬浮状态; 单磁铁悬浮

中图分类号: U292.91<sup>†7</sup>

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.03.016

## Influence Analysis of Magnetic Track Beam Irregularity on the Suspended State

LI Ping, HU Wenwen

(School of Railway Tracks and Transportation, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

**Abstract:** Through the establishment of a single magnet-suspension system-track beam interaction model, characteristic requirements of track beam was described, and state change of a single magnet in suspension was studied from track beam long-wave irregularity, short-wave irregularity, track beam stiffness and speed of vehicles. The results showed that: single magnet levitation gap change increased as the speed increasing; short-wave irregularity impacting on the vehicle was severer than the long-wave irregularity impacting, and short-wave irregularity had a greater impact on a single magnetic levitation gap and vibration acceleration; track beam stiffness of the rail beam influenced the deflection changes the most significantly, but had little effect on the levitation gap and single magnet vibration acceleration.

**Keywords:** track beam; track irregularities; suspended system; suspended state; single magnetic suspension

## 0 引言

磁浮线路大多采用高架桥, 在工程应用中, 为了降低线路成本往往将高架桥做得较为轻盈, 这使得磁浮线路的车桥耦合振动尤为突出, 严重影响磁浮列车的悬浮状态。轨道不平顺是磁浮车辆-轨道梁振动的主要激励源之一, 国内外已发生多起磁浮车辆在轨道上运行时, 车辆与轨道之间相互作用产生耦合振动现象。轨道不平顺作用下的轨道梁与磁浮列车的耦合振动研究已引起国内外许多学者的关注。因此, 需要开展轨道不平顺作用下轨道梁对悬浮状态的影响研究,

为日后磁浮车辆的运行、轨道梁生产安装提供一定的技术参考。

在磁浮轨道梁的建设和安装过程中, 轨道不可避免地产生高低、水平以及挠度弯曲变形等多种形式不平顺, 国内外学者针对轨道梁刚度及轨道不平顺对磁浮车辆振动的影响开展了大量研究工作, 并取得积极的进展。龙志强等<sup>[1]</sup>研究了磁浮线路中确定性的长波、短波不平顺对磁浮列车悬浮状态的影响, 为下一步的轨道维护提供依据。邓亚士等<sup>[2]</sup>建立车桥耦合作用模型, 研究了不同波数、不同波幅和不同波长的正弦作用下轨道梁振动响应规律。蒋海波等<sup>[3]</sup>研究了不同频率的激励对单磁铁车辆振动响应的影响。本文从轨道梁刚度、轨道不平顺以及车桥作用频率角度出发, 研

究磁浮车辆运行中悬浮状态的变化。

## 1 单磁铁 - 轨道梁 - 悬浮系统参考模型

磁浮车辆采用模块化结构, 实现了悬浮系统中各个控制点之间的机械解耦, 由此对悬浮控制系统研究转化为对单个悬浮控制点的研究。每个悬浮控制点可以视为单磁铁悬浮控制, 单磁铁悬浮是磁浮系统中最简单、最基本的模型。磁浮车辆与轨道梁的相互作用可简化成单磁铁与轨道梁的耦合作用模型, 如图 1 所示。

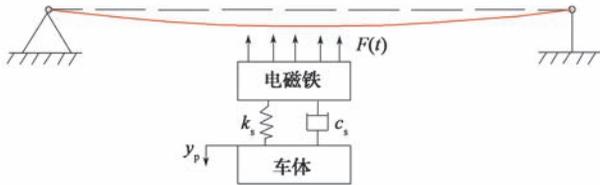


图 1 单磁铁 - 轨道梁耦合作用模型

单磁铁悬浮控制是在垂直方向上一个自由度的控制。假设  $B$  为气隙磁密度,  $A$  为铁心极面积,  $\mu_0$  为空气中磁导率,  $N$  为线圈匝数,  $i(t)$ 、 $c(t)$  分别为单磁铁悬浮系统在  $t$  时刻的线圈电流和悬浮间隙, 根据电磁学原理, 单磁铁在任意瞬时的吸引力可表示为<sup>[4]</sup>

$$F(i, c) = \frac{B^2 A}{\mu_0} = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[ \frac{i(t)}{c(t)} \right]^2 \quad (1)$$

当单磁铁受到外界干扰力为  $f(t)$  时, 设电磁铁系统质量为  $m$ , 其垂向动力学方程为

$$m \frac{d^2 z(t)}{dt} = -F(i, t) + f(t) + mg \quad (2)$$

在名义工作点  $(c_0, i_0)$  处, 系统处于平衡的状态, 此时有

$$mg = F_0(i_0, t_0) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left( \frac{i_0}{c_0} \right)^2 \quad (3)$$

如果电路总电阻为  $R$ , 磁铁的线圈瞬间电压为  $V(t)$ , 根据电磁学原理,  $L(c, i)$  为线圈电感, 线圈控制电压为

$$V(t) = Ri(t) + \frac{d}{dt} [L(c, i), i(t)] = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2c(t)} \cdot \frac{di(t)}{dt} - \frac{\mu_0 N^2 Ai(t)}{2[c(t)]^2} \cdot \frac{dc(t)}{dt} \quad (4)$$

综上所述, 单磁铁悬浮系统的动力学方程如下:

力学方程为

$$m \frac{d^2 z(t)}{dt} = -F(i, t) + f_d(t) + mg \quad (5)$$

电学方程为

$$u(t) = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2c(t)} \cdot \frac{di(t)}{dt} - \frac{\mu_0 N^2 Ai(t)}{2[c(t)]^2} \cdot \frac{dc(t)}{dt} \quad (6)$$

电 - 力学关联方程:

$$F(i, c) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[ \frac{i(t)}{c(t)} \right]^2 \quad (7)$$

对于弹性轨道梁采用 Bernoulli-Euler 简支梁, 将轨道梁重力平衡位置视为其初始位置, 其动力学方程为<sup>[5]</sup>

$$EI \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + \rho \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} + c \frac{\partial \omega}{\partial t} = F(t) \quad (8)$$

式中:  $EI$  为桥梁抗弯刚度;  $c$  为结构阻尼;  $\rho$  为每延米质量;  $F(x, t)$  为悬浮系统的电磁悬浮力。

采用模态叠加法求解, 其垂向挠度可表示为

$$z(x, t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) q_i(t) \quad (9)$$

式中:  $\varphi_i(x)$ — $i$  阶模态幅值;  $q_i$ — $i$  阶模态函数。

## 2 轨道梁特性

### 2.1 轨道梁不平顺类型

磁浮轨道梁不平顺主要包括 2 种类型<sup>[6]</sup>: 一类是由于梁的收缩、徐变及车辆等负载引起的轨道梁挠度弯曲而造成的轨道梁不平顺, 属于长波不平顺; 另一类是由于轨道安装不标准, 轨道松动、轨道接缝、地面的沉降等原因导致的轨道梁小范围的形变, 大多属于轨道的短波不平顺。车辆通过桥梁时, 质量点作用于跨中处外力的大小总是从小到大通过跨中, 其变化规律类似于一个简谐函数, 由此引起的轨道梁的变化近似于正弦曲线, 其变化波长与梁的跨度、频率及车速有关。该类不平顺可表达为

$$h(t) = A \sin \omega t$$

式中:  $A$  为轨道梁跨中在垂向方向最大挠度;  $\omega$  为车桥

作用频率,  $\omega = \frac{2\pi v}{L}$ 。

### 2.2 轨道梁特性要求

轨道梁对结构的刚度和动力学性能有两方面的要求: 一是单跨简支轨道梁的垂向挠跨比要小于  $L/4800$  ( $L$  为轨道梁跨度, mm), 横向挠跨比要小于  $L/18000$ ; 二是为减小轨道结构在磁浮列车运行时的动力反应, 要求轨道梁一阶自振频率  $f$  必须大于 1.1 倍的列车运行速度与轨道梁跨度之比<sup>[3]</sup>, 即

$$f = 1.1 \frac{v}{L}$$

式中:  $v$  为车辆运行速度, m/s;  $L$  为轨道梁一阶固有频率单波距离。

文献 [7] 对轨道梁的安装及加工精度还提出了其他要求: 单直轨道梁的长波误差小于等于 1 mm, 相邻轨道梁梁端定子铁心坡度变化小于等于 0.75 mm/m, 相邻轨道梁梁端定子铁心的垂向错位小于等于 0.6 mm。轨道梁上的支承、导向和滑行功能面的精度要求会直接影响轨道结构的设计、制造, 故在预应力混凝土轨道梁中, 钢筋混凝土材料的收缩、徐变和温度变形等引起的轨道梁跨中竖向变形必须控制在 1 mm 之内。

## 3 计算方法

在 2 种类型的轨道不平顺作用下, 分析轨道梁弹