

磁浮车辆/轨道系统动力学(I) ——磁/轨相互作用及稳定性*

翟婉明

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

赵春发

(西南交通大学应用力学与工程系 成都 610031)

摘要:磁浮车辆/轨道系统动力学问题直接影响磁浮交通的安全性、舒适性和经济性,而这三个性能则是决定其应用前景的重要因素。作为系列文章的第一部分,论述了磁浮系统动力学研究中最基本和最关键的问题——磁/轨相互作用及磁浮系统稳定性。关于磁/轨相互作用研究,目前在电磁铁二维受力理论分析、数值求解及其动态特性研究方面取得了显著的进展,而三维磁/轨作用理论分析与试验研究是其未来的研究方向。磁浮系统稳定性研究由单纯的悬浮稳定性研究、单铁/轨道系统稳定性研究逐步进入磁浮车辆/轨道系统稳定性研究,将来的研究仍需探索新的磁浮系统稳定性分析方法,并结合工程实际开展磁浮列车系统动力稳定性应用研究。

关键词:磁浮车辆 高架梁 耦合动力学 电磁悬浮 反馈控制 稳定性

中图分类号:U266 U237

0 前言

磁浮列车是一种无接触的地面有轨交通工具,它利用电磁吸力或斥力悬浮车辆,以线性电动机牵引列车,具有速度快、爬坡能力强、噪声小、维修少、乘坐舒适和安全等优点。磁浮列车技术研究起始于 20 世纪 70 年代,德国和日本一直处于领先地位^[1~11],其他国家如美国、俄罗斯、罗马尼亚、意大利、瑞士、巴西、中国以及韩国等也相继加入磁浮列车技术研究的行列^[12~16]。我国磁浮列车技术研究起始于 20 世纪 80 年代末,西南交通大学、国防科技大学、铁道科学研究所和中国科学院电工研究所等单位在国内最早开始了常导磁浮列车技术研究^[12~23]。2001 年上海磁浮线动工兴建后,上海国家磁浮交通工程技术研究中心、同济大学、中南大学和北京交通大学等单位也开展了磁浮列车技术研究。

目前,德国高速常导型(EMS)磁浮列车 TR08、日本超导电动型(EDS)磁浮列车 MLX01 及低速 EMS 磁浮列车 HSST-100 都已具备了准商业运营水平,它们分别在 31.5 km 长 Emsland 磁浮试验线、18.4 km 山梨试验线和 1.5 km 名古屋试验线上进行了长期的试验运行^[24~28]。此外,我国国防科技大学 204 m 磁浮

试验线已开始试运行,成都青城山 420 m 磁浮线也已经建成,采用德国 TR08 技术的上海高速磁浮线(最高速度达 430 km/h)已于 2004 年开始正式运营,这表明我国磁浮列车技术开始进入工程应用研发阶段。

磁浮车辆/轨道系统动力学问题直接影响磁浮列车的安全性、舒适性和经济性,是决定其应用前景的重要因素。一方面,磁/轨作用是磁浮车辆/轨道耦合作用的根本,对这一新的研究课题需要开展细致的基础理论研究、仿真分析以及适当的试验研究;另一方面,针对磁浮试验线上出现的磁浮车辆侧悬失稳、钢结构梁上车/轨共振及低速过道岔振动剧烈、特定工况下磁浮车辆横向摇摆问题等现象,需要开展磁浮车辆/轨道系统稳定性分析加以解决。而为了既获得良好的乘坐舒适性,又能显著地降低线路成本,开展磁浮车辆/轨道系统动力学仿真与参数优化显得尤为重要。特别是磁浮车/桥耦合作用研究、车辆动态曲线通过研究,以及高速磁浮列车空气动力学和直线电动机动力学研究,对磁浮列车的工程应用具有现实意义。

基于国内外 30 余年磁浮列车技术研究成果,这里将系统阐述常导磁浮车辆/轨道系统动力学关键问题及取得的研究进展,以期为我国磁浮列车技术研究及其工程应用提供参考与借鉴。文章分两部分,第一部分论述了磁浮车辆/轨道系统动力学研究中最基本、也是最关键的问题——磁/轨相互作用及系统稳定性。

* 国家自然科学基金(50405028)、教育部创新团队计划、四川省应用基础研究计划(02GY029-040)和西南交通大学科技发展基金(2003A14)资助项目。20040630 收到初稿,20050119 收到修改稿

1 磁浮系统动力学研究内容与特点

从大系统动力学角度来看，磁浮列车系统主要包含车辆系统、轨道系统、电磁悬浮(导向)系统和电磁推进(制动)系统，是一个机 - 电 - 土木结构耦合大系统。因此，磁浮系统动力学至少涉及车辆系统动力学、轨道系统动力学、电磁悬浮系统动力学、直线电机动力学以及空气动力学等。由于磁浮列车悬浮气隙很小(常导型 8 ~ 10 mm、电动型 20 ~ 40 mm)，线路又以高架为主，且运行时决不允许磁/轨发生接触，这就要求开展任一子系统动力学研究时，应当尽可能地考虑车辆/高架桥/磁铁控制器之间的耦合作用，即开展磁浮车辆/轨道系统耦合动力学研究。

具体来讲，磁浮车辆系统动力学包括动力稳定性、运行平稳性和动态曲线通过三大问题。磁浮线路动力学主要研究高架桥结构形式及动力性能优化，以及曲线线路、道岔结构的动力学优化。电磁悬浮动力学是磁/轨作用研究的一部分，它主要研究电磁悬浮力学特性、控制系统的动态与稳态特性。其他子系统动力学也都有各自的研究范畴，不再详述。磁浮列车采用了完全不同于传统地面车辆的电磁悬浮、导向与推进方式，因此其动力学研究内容、研究方法与传统地面车辆的区别较大。其中，电磁铁与导轨相互作用研究是磁浮列车系统动力学研究的基础，磁/轨关系在本质上确定了磁浮列车系统的动力特性。因此，考虑非接触电磁悬浮(导向)及其反馈控制，强调车/桥/控制器之间的耦合作用是磁浮列车系统动力学研究的主要特点。磁浮车辆/轨道系统动力学研究内容及其相互关系参见图 1。

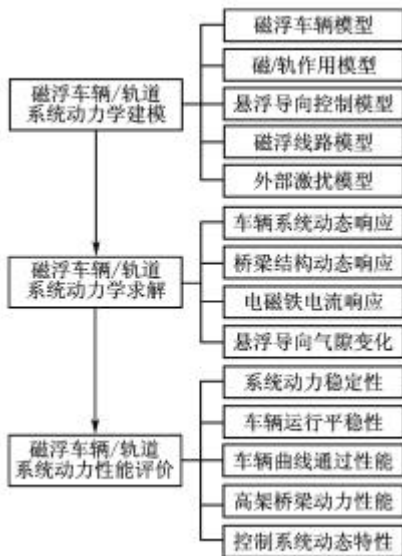


图 1 磁浮车辆/轨道系统动力学研究框图

2 磁/轨相互作用

磁/轨相互作用主要研究磁铁磁极面与导轨面之间的电磁力、气隙以及控制器电流、电压之间的关系(简称磁/轨关系)。磁/轨关系不仅与电磁铁和导轨结构几何形状及其配合方式相关，还与悬浮(导向)控制系统关系密切。

2.1 一维磁/轨关系

尽管研究人员提出过多种常导(EMS)磁/轨作用方式，但目前被磁浮列车工程应用的只有两种：中低速常导磁浮车 U 形悬浮磁铁与倒 U 形导轨配合方式^[5,18,19]，且电磁铁横向错位布置。高速常导磁浮车齿型悬浮磁铁与直线电动机长定子、独立的 U 形导向磁铁与侧轨配合方式^[11,22]。其实不管采用何种磁/轨作用方式，磁/轨力都是空间三维分布力，要精确求解三维电磁力需要进行椭圆积分，求解椭圆方程，目前还无法得到简单的解析式^[29]。因此，在磁浮车辆/轨道系统动力学研究中，根据不同的研究目的采用多种磁/轨相互作用模型^[30-32]。其中，早期文献中磁/轨力通常处理成常力或弹簧 - 阻尼力

$$F_m = F_0 + k_{eq} a + c_{eq} \dot{a} \tag{1}$$

- 式中 F_0 —— 磁铁额定悬浮力
- k_{eq} —— 等效磁隙刚度
- c_{eq} —— 等效磁隙阻尼
- a —— 悬浮气隙

式(1)将非线性主动磁/轨力简化为线性被动悬架力，当悬浮气隙小幅变化时具有一定的精度，但间隙波动较大时，如此等效会有较大的误差。

在常导磁浮列车电磁铁设计和悬浮(导向)控制及其动态特性研究中^[33-39]，磁/轨力求解还广泛采用了电磁力经典公式

$$F_m = \frac{B^2 A}{2 \mu_0} = \frac{\mu_0 (Ni)^2 A}{2 a^2} \tag{2}$$

- 式中 B —— 磁通密度
- A —— 磁极面积
- μ_0 —— 空气磁导率
- N —— 电磁铁线圈匝数
- i —— 电磁铁电流

式(2)基于如下假设：小间隙悬浮，气隙均匀分布，忽略电磁铁磁阻和磁通饱和。它具有计算简单和精度较高的特点，也是目前常导磁浮列车系统动力学研究中常用的一种磁/轨作用模型。式(2)也明显存在以下缺点：只能计算电磁铁总升力，或由此得到

假定的一维纵向均匀分布力,无法计算电磁铁侧向力和摇头力矩,以及不稳定的侧滚力矩和点头力矩。

未考虑电磁铁高速运动对电磁力的影响,不适合极小气隙(磁通饱和、漏磁严重)时电磁力计算。因此,为了尽可能全面地获得电磁铁三维力及其力矩,需要进行二维甚至三维磁/轨作用分析。

2.2 二维磁/轨关系

在 20 世纪 70 年代德国研制低速常导磁浮车过程中, W. Brzezina 和 J. Langerholc^[29]最先开展了复杂磁/轨关系研究。他们将细长型矩形磁极对二维四角问题简化为两个两角问题(图 2),从而避免了四角问题需要处理复杂的椭圆积分以及求解椭圆方程的麻烦,运用保角变换获得电磁升力与侧向力计算公式

$$F_V = F_0 \left(1 + \frac{2a}{p g} + \frac{b_L + b_R}{2g} - \frac{b_L q_L}{p g} - \frac{b_R q_R}{p g} \right) \quad (3)$$

$$F_L = F_0 \frac{a}{p} (q_R - q_L) \quad (4)$$

式中 $F_0 = m_0 (Ni)^2 / (2a^2)$

F_V ——电磁铁抬升力

F_L ——电磁铁侧向力

式(3)、(4)考虑了电磁铁垂向与横向耦合作用,较式(2)的计算结果更为准确,且式(4)可求解电磁铁的侧向力。

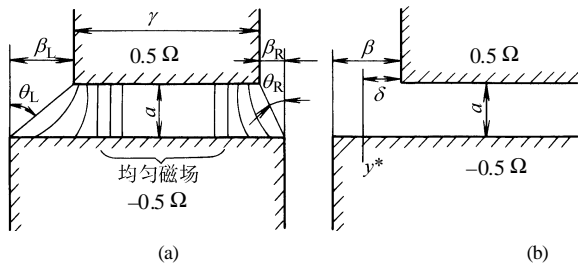


图 2 矩形磁极对四角问题和两角问题模型

谢云德和常文森^[40]采用同样的分析方法,推导出较大侧滚条件下电磁铁升力、侧向力和侧滚力矩计算公式。其算例表明大角度侧滚运动对升力、侧向力影响显著,侧滚力矩与侧滚角近似成正比,形成不稳定的正反馈。在更为详细的静态磁/轨关系研究方面,罗芳和张昆仑^[41]考虑 U 形电磁铁边缘磁场、漏磁场以及电磁饱和等情况,利用有限元软件 ANSYS 分析电磁场的二维分布,从而得到电磁升力、侧向力和侧滚力矩的数值解。他们对青城山磁浮车电磁力的分析结果表明:悬浮气隙大于 6 mm 时,电磁升力的场分析解与式(3)解析解吻合较好;悬浮气隙小于 6 mm 时,因磁通饱和和两者相对误差为 10.8%,悬浮气隙 2 mm 时相对误差高达 298%;磁铁侧滚运动对电磁力与力矩的影响很大(图 3)。

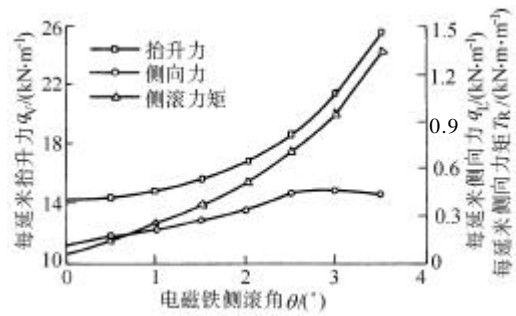


图 3 电磁力和力矩与侧滚角的关系曲线

上述研究表明,运用式(3)、(4)进行悬浮、导向控制器设计及动力学仿真分析时,必须严格区分其适用范围。低速常导磁浮车辆一般安装了防侧滚梁,它有效地抑制了磁铁侧滚运动,因此,其动力学研究采用式(3)、(4)磁/轨关系模型是合适的。

2.3 动态磁/轨关系

第 2.1 节和 2.2 节所述磁/轨关系都是基于开环、静态条件的,还不能反映实际主动控制的、运动状况下的电磁悬浮特性。S. Yamamura 和 T. Ito^[42]考虑运动电磁铁的端部磁场效应,从理论上推导了气隙磁通密度沿纵向、横向的二维分布形式,得出磁浮列车电磁力的速度特性。蒋启龙等^[43]在此基础上计算了低速常导磁浮列车的电磁阻力,其结果表明:电磁阻力与 a/L (气隙与磁铁极面长度之比)成正比;低速时电磁阻力随速度增加而增加,速度达到一定值后电磁阻力随速度增加逐渐减小,接近一稳定值电磁阻力与磁铁运行速度的关系^[43]如图 4 所示。T. Onuki 等^[44]采用有限元和边界元法分析主动悬浮控制且横向错位布置的 U 形电磁铁与导轨间的磁场分布,得到的电磁力速度特性与参考文献^[43]相似,并指出垂向干扰下导轨涡流电动力还会延迟悬浮系统的稳定。

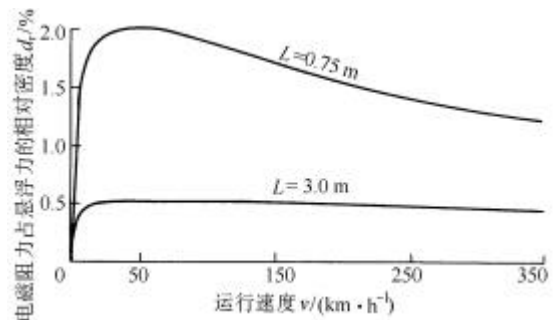


图 4 电磁阻力与速度的关系曲线

在主动磁/轨作用研究方面, D. A. Limbert 等^[45]针对横向错位布置的 U 形电磁铁对(图 5),首先将式(3)、(4)计算的电磁力解析解与试验测试结果进行比较,发现电磁升力解析值比测试值大 10%~20%,而侧向力两者吻合很好;然后,考虑悬浮气隙、磁铁垂向速度和加速度状态反馈悬浮控制,以及磁铁

横向位移、速度反馈导向控制(增加一磁铁电流,同时减小磁铁对另一磁铁电流),分析电磁铁升力与侧向力的耦合影响,寻求其解耦控制的最佳参数。其参数研究结果(图6)表明:当横向位移反馈系数 $k_1=1.193k_1^*$ ($k_1^*=2I_0/y^*$,表示磁铁对横移 y^* 时,一磁铁电流为0,另一磁铁电流为 $2I_0$,磁铁对总升力不变),且横向位移小于2倍悬浮额定气隙时,增加侧向力,升力基本不变,从而达到升力与侧向力解耦的目的。

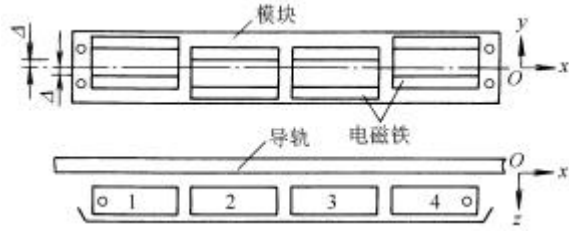


图 5 磁铁模块与电磁铁横向错位安装示意图

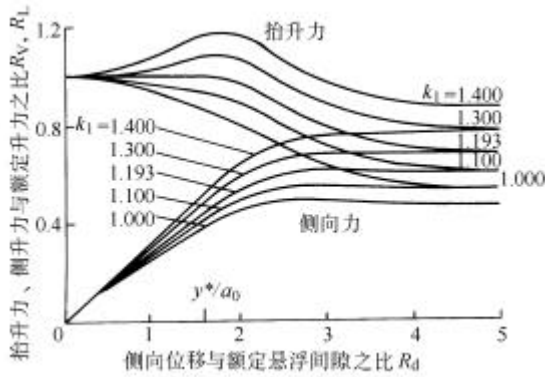


图 6 主动导向电磁铁对的抬升力与侧向力
 a_0 ——悬浮气隙的额定值

同样,参考文献[46]开展低速磁浮车导向方式时,指出U形电磁铁磁极越窄获得的导向力越大,横向位移反馈控制可以增加模块导向刚度,但横向位移反馈对侧轨的平整度提出高精度要求,故工程上一般采用侧向加速度反馈控制。李云钢和常文森^[47]考虑侧向加速度反馈的导向控制,对错位布置磁铁对的侧向力和抬升力进行了数值仿真,其结果表明,侧向加速度反馈控制增加了侧向阻尼,导向控制对抬升力的影响可以被悬浮控制克服(以10mm侧向位移阶跃干扰为例,升力最大波动18%,悬浮气隙最大偏差不超过0.5mm)。赵春发和翟婉明^[48, 49]分析了主动控制悬浮力的动态特性,推导出平衡点(u_0, a_0)处悬浮刚度与阻尼的近似公式

$$k_v = \frac{c_1}{a^2} + \frac{c_2}{a^3} \quad (5)$$

$$c_v = c_0 K_v \frac{u_0 + K_a \omega}{a^2} \quad (6)$$

式中 $c_0 = m_0 N^2 A / 2$

$$c_1 = c_0 K_p (K_p a_0 - u_0)$$

$$c_2 = c_0 K_p (u_0 - K_p a_0)^2$$

K_p, K_v, K_a ——位移、速度、加速度反馈系数式(5)、(6)表明,电磁悬浮刚度和阻尼分别与 K_p, K_v 成正比,而且随平衡点 u_0 值变化而变化(悬浮质量变化而额定气隙不变时, u_0 将随之变化),即悬浮刚度和阻尼还与悬浮荷载相关,如图7所示。

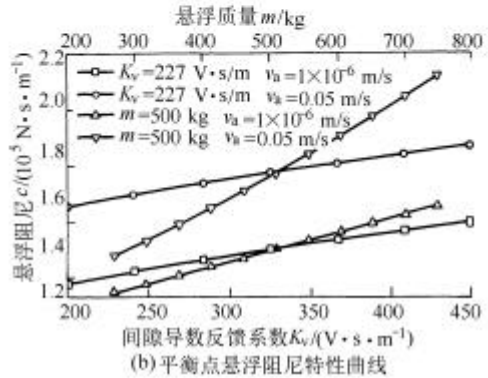
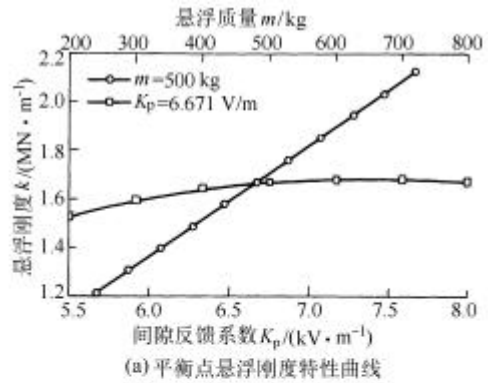


图 7 主动控制电磁悬浮刚度与阻尼特性

综上所述,尽管磁/轨关系是磁浮列车动力学研究的重要基础,但相比于其他磁浮列车技术研究,国内外现有的研究工作较少,缺乏完整性、系统性的研究成果,例如目前的电磁力均考虑为集中力或线性分布力,其三维分布研究至今未见报道。此外,我国需要建立专门的电磁铁综合试验台,开展磁/轨相互作用的相关试验研究,并与理论研究结果进行对比,这对我国磁浮列车工程应用具有重要意义。

3 磁浮系统稳定性

磁浮列车首先要保证在各种工作条件下列车能够稳定悬浮,而常导电磁悬浮本质上是不稳定的,故悬浮稳定性是磁浮列车系统稳定性的首要问题。但磁铁悬浮稳定并不能保证磁浮列车系统动力稳定,磁浮车辆、轨道、控制系统参数匹配不合理以及外部空气动力作用、电动机动力作用等都有可能引起系统动力失稳,因此,磁浮列车系统动力稳定

性才是磁浮系统稳定性研究的主要问题，也是磁浮列车工程应用最需要关注和解决的问题之一。

3.1 单铁系统稳定性

目前，常导磁浮列车都采用了分散独立悬浮控制策略和磁铁结构模块化思想，磁铁模块成为列车悬浮、导向的基本单元^[50]，单个电磁铁及其控制器与刚性或弹性轨道组成的单铁系统成为控制系统设计的理想模型(图 8)。显然，单铁悬浮不稳定，磁浮列车系统一定是不稳定的，因此，单铁系统稳定性是早期磁浮系统稳定性研究的主要内容。

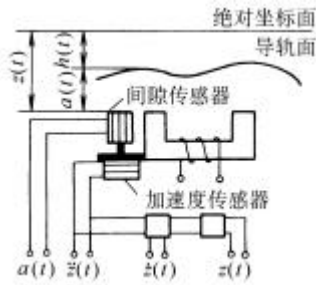


图 8 单铁悬浮系统物理模型

依据牛顿定律与电磁学原理，图 8 所示单铁系统的垂向动力学方程为

$$m\ddot{z} = mg - F_v \quad (7)$$

$$u = R_0 i + \frac{m_0 N^2 A}{2a} \dot{z} + \frac{m_0 N^2 A i}{2a^2} z \quad (8)$$

$$F_v = \frac{m_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i}{a} \right)^2 \quad (9)$$

$$u_c = K_p (a - a_0) + K_v \dot{z} + K_a z \quad (10)$$

式中 m ——单铁和悬浮荷载总质量

R_0 ——磁铁线圈电阻

u_c ——控制电压

z ——磁铁绝对位移

式(10)是以状态(a, \dot{z}, z)反馈的线性控制方程，若采用 H_8 控制、滑模变结构控制等^[51~55]现代控制方法时，控制方程将变得更为复杂。如果进一步考虑弹性轨道，系统动力学方程还需增加 Bernoulli-Euler(B-E)梁方程

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + c \frac{\partial y}{\partial t} + r \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F(x, t) \quad (11)$$

式中 EJ ——梁的垂向抗弯刚度

c ——梁的结构阻尼

r ——梁的每延米质量

$F(x, t)$ ——梁上载荷

B-E 梁动挠度的求解一般采用模态叠加法，由此可将式(11)四阶偏微分方程降阶为二阶微分方程

$$\ddot{q}_k + 2\mathbf{x}_k \dot{q}_k + \mathbf{w}_k^2 q_k = p_k(x, t) \quad k=1 \sim n \quad (12)$$

式中 q_k —— k 阶模态函数

$\mathbf{x}_k, \mathbf{w}_k$ —— k 阶模态相对阻尼和固有频率

$p_k(x, t)$ —— k 阶模态广义力

B-E 梁的垂向挠度表示为

$$z(x, t) = \sum_{k=1}^n j_k(x) q_k(t) \quad (13)$$

式中 $j_k(x)$ —— k 阶模态幅值

式(7)~(10)、(12)组成了单铁/轨道系统非线性动力学数学模型。

将式(9)在平衡点附近线性化，E. Gottzein 等^[33, 34]、P. K. Sinha^[9]、W. Cramer^[56]、江浩和连级三^[37]、张昆仑^[17]、李云钢^[39]开展了悬浮控制策略与方法的研究，他们运用 Routh-Hurwitz 稳定性判据、根轨迹法进行了单铁悬浮稳定性分析，并进行了相关试验研究。E. Gottzein 指出：低速运行或静止悬浮下，磁浮系统稳定性更多地依赖控制参数的调整，而高速运行时由于车辆与轨道的动力相互作用，稳定性问题要复杂得多。W. Cramer 指出，因为状态观测器参数与实际结构并不一定吻合，若将刚性轨道上悬浮稳定的控制系统运用到弹性轨道和车体二级悬架的磁浮系统模型时，磁浮系统可能失稳(图 9)。

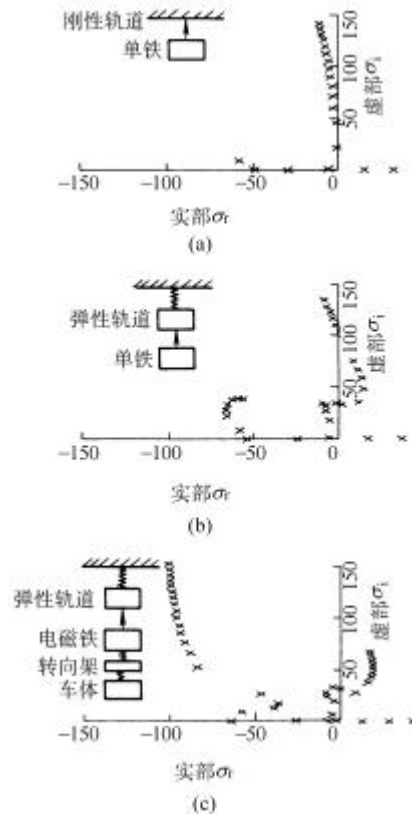


图 9 单铁/轨道系统根轨迹图

直接采用单铁/轨道悬浮系统非线性模型，李云钢^[39]、赵春发和翟婉明^[48, 49]开展了单铁系统动力稳定性数值仿真。参考文献^[49]研究表明：单铁/轨道

系统的三个特征频率——车辆二系悬架频率 f_s 、轨道基频 f_1 和控制系统频率 f_n 任意两者相差不大时，极有可能发生车/轨共振(图 10)；控制器阻尼可以有效地抑制轨道瞬态振动幅值，缩短轨道安定时间；磁浮车/轨系统特征频率的分布设计中，应当使 f_s 、 f_1 和 f_n 相互之间保持尽可能远的距离，从而从根本上避免单铁/轨道静悬共振甚至失稳。

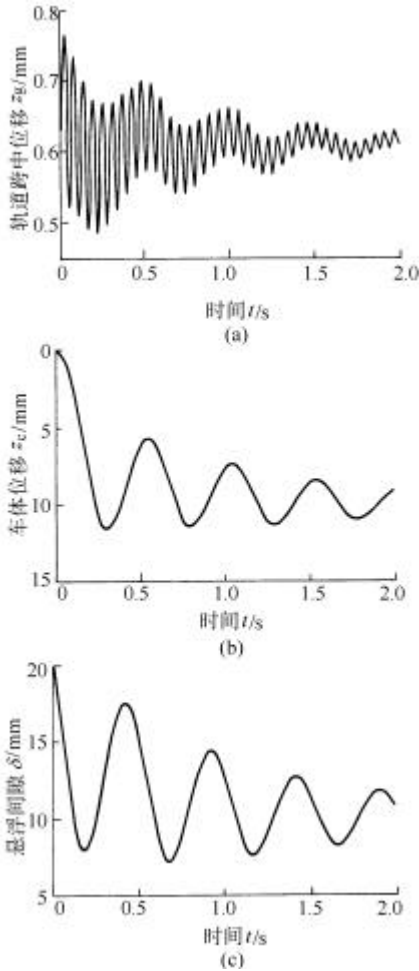


图 10 单铁/轨道系统起浮动态响应
($f_s=1\text{ Hz}$, $f_1=2\text{ Hz}$, $f_n=17\text{ Hz}$)

显然，上述基于线性模型的悬浮稳定性研究不可能揭示系统非线性特征所决定的分岔、颤振、混沌等力学现象。单铁系统非线性仿真研究虽然揭示了单铁/轨道静悬共振原因，但采用单铁模型终究不可能完全模拟磁浮列车系统动力响应，更为细致的研究工作需要考虑整车系统非线性因素对磁浮系统稳定性的影响。

3.2 磁浮车辆/轨道系统动力稳定性

磁浮车辆/轨道系统动力稳定性一直不被重视，这可能有两方面的原因：磁浮试验线上动力失稳现象虽然存在，但比较少见。非线性耦合大系统动力稳定性问题复杂，研究方法和手段不多，但前言中提到的试验线上发生的典型车/桥耦合动力现

象都是系统动力失稳的真实表现。而为了防止高速时车/桥共振，上海磁浮线轨道梁基频 $f_1 > 1.1v/L$ 的限制增加了轨道梁制造成本，这更加需要通过磁浮车辆/轨道动力稳定性分析寻找到适当的工程改进措施。可见，磁浮车辆/轨道系统动力稳定性研究不仅具有重要的理论意义，而且对磁浮交通建设工程具有直接意义。

当悬浮采用线性控制，且电磁力在平衡点处线性化后，磁浮车辆/轨道系统动力学方程可表示为一组非齐次周期变系数常微分方程组

$$\dot{X}(t) = A(t, X)X(t) + B(t, X) \quad (14)$$

式中 $A = A(t + T)$

$B = B(t + T)$

X ——系统状态矢量

T ——周期常数

K. Popp^[57]运用 Floquet 理论求解式(14)动力系统的微扰运动微分方程基础解矩阵的全部特征值，通过判断最大特征值(谱半径)是否大于 1 来评定系统的稳定性，并以 TR05 磁浮车为对象开展了数值分析(图 11)，其结果表明^[57]：谱半径随车速、车/轨质量比的增加以及反馈系数的减小而增大；图 11b 表明：当车/轨质量比 $m = 1.0$ 、反馈系数 $b = 1.42$ 、速度系数 $m = v / (2f_1 l) > 0.9$ 时，谱半径大于 1，系统将动力失稳。Y. I. Chung 和 J. Genin^[58]将电磁力等效为弹簧力，考虑 2 自由度车辆模型和 B-E 梁模型，采用 Floquet 理论研究车速、车/轨质量比、二系悬架刚度与阻尼对磁浮系统动力稳定性的影响，给出了各种参数条件下的系统稳定区域(图 12)，图 12 中：

$$W = (l / (p v)) \sqrt{k_p / (m_s + m_u)}, \quad z = c_s / 2 \sqrt{k_s / (m_s + m_u)},$$

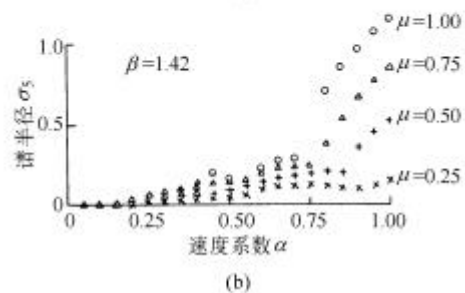
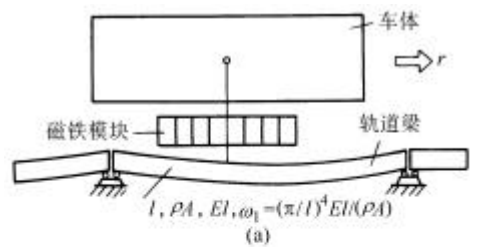


图 11 Popp 动力稳定性分析模型与结果

$$w_1 = (\pi / l)^4 EI / (rA)$$

$\mathbf{h} = (l/(\rho v))\sqrt{k_s/(m_s+m_u)}$, $\mathbf{e} = v/(2f_1 l)$, $\mathbf{D} = \rho d/l$, $\mathbf{g} = (m_s+m_u)/(\mathbf{r}A)$, $\mathbf{m} = m_u/(m_s+m_u)$ 。 d 是磁力分布长度, l 为轨道梁跨度, m_s 、 m_u 表示车辆一、二系质量, k_s 、 c_s 为二系悬架刚度与阻尼, k_p 是等效磁隙刚度。参考文献[58]还指出, 较软的车辆悬架、较高的轨道频率有利于系统稳定, 车辆悬架阻尼对磁浮系统的稳定性影响不大。

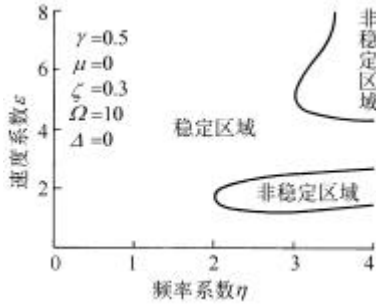


图 12 2 自由度磁浮车辆/弹性轨道系统动力稳定区域

采用传统的 Floquet 理论分析动力系统稳定性, 需要求解基本解矩阵的全部特征根, 这使得高维动力系统稳定性分析的计算量很大。因此, 武建军、郑晓静和周又和^[59-61]引入表征非线性系统混沌运动的 Lyapunov 特性指数, 推导了式(14)动力系统稳定性 Lyapunov 指数判据: 当最大 Lyapunov 指数 $s_1 < 0$ 时, 动力系统是渐近稳定的; $s_1 > 0$ 时, 系统是不稳定的; $s_1 = 0$ 是系统稳定与不稳定的临界条件。采用该方法, 他们对控制参数 K_p 、 K_v 的稳定区域进行了搜索, 其结果表明: 弹性轨道上系统稳定区域与车辆速度、轨道参数相关, 而刚性轨道上与速度无关; 弹性轨道上稳定区域随单铁运行速度增加而增大, 且高速稳定区域包含低速稳定区域; 考虑车辆二系非线性悬架时, 磁浮系统出现混沌运动现象。

上述磁浮系统动力稳定性研究工作虽然提供了较完善的分析理论和方法, 但缺乏一定的工程应用针对性, 如车辆、轨道模型极为简单, 没有考虑悬浮控制器的具体实现环节, 此外横向动力稳定性研究尚未开展。因此, 将来的磁浮系统稳定性研究应建立较完善的车辆/轨道/控制器耦合作用模型, 并需加强其工程应用背景。

4 结论与展望

磁/轨相互作用是磁浮车辆/轨道系统动力学研究的根本。早期的磁/轨作用一般处理为等效弹簧—阻尼力, 或采用经典的电磁力公式计算, 获得的是一维电磁升力, 而无法计算电磁铁纵向阻力、侧向回复力和电磁力矩。因此, 针对低速常导磁浮列车

采用 U 形电磁铁对与反 U 形导轨配合方式, 已有磁/轨作用研究主要开展了二维磁/轨作用理论分析、场分析数值求解以及少量试验研究, 对比研究结果表明: 二维磁/轨作用解析式在磁通未饱和、漏磁不严重的情况下, 可以获得足够精度的电磁升力、侧向力和侧滚力矩; 场分析解可以精确得到各种工况下的电磁力和力矩, 但需要建立有限元分析模型, 数值计算繁杂, 不适合应用于磁浮车辆/轨道系统动力学研究。20 世纪 80~90 年代以后, 随着磁浮列车技术逐步成熟及其工程试验, 主动控制的动态磁/轨作用研究得到发展, 这些研究工作结合了工程实际, 得到的主动悬浮和导向刚度、阻尼特性、磁铁纵向阻尼特性等为磁浮列车悬浮、导向和推进系统结构与控制设计提供了基本数据与指导原则。

虽然二维磁/轨关系和动态磁/轨关系研究取得了一些成果, 但作为一项新的基础理论研究, 磁/轨作用研究尚未形成完整性、系统性的理论成果。今后至少应在如下两方面进一步开展磁/轨作用研究。

(1) 三维磁/轨作用研究。曲线轨道上磁铁与轨道的相对三维运动十分复杂, 二维磁/轨模型显然无法反映其三维作用关系。因此, 三维磁/轨作用研究势在必行。

(2) 磁/轨作用试验研究。根据二维磁/轨关系理论研究的复杂性, 可以推测三维磁/轨关系研究将更为复杂。目前在德国和日本都建有专门的电磁铁综合试验台, 用以开展磁/轨相互作用试验研究。我国相关单位已建立或正在建设类似的磁铁试验台, 但很少有相关试验研究结果发表, 将来的磁/轨作用研究需要加强其试验研究的力度。

稳定性研究是磁浮车辆/轨道系统动力学研究的首要问题。磁浮系统稳定性研究经历了单纯的悬浮稳定性研究、单铁/轨道系统稳定性研究到较为复杂的磁浮车辆/轨道系统动力稳定性研究。其中, 悬浮稳定性的研究导致了电磁铁独立分散控制策略和模块结构概念的产生; 单铁/轨道系统稳定研究初步确立了磁浮列车系统频率设计的基本原则; 磁浮车辆/轨道系统动力稳定性研究给出了运用 Floquet 理论和 Lyapunov 指数法分析磁浮稳定性问题的具体方法。但是, 结合实际工程情况, 采用详细模型的磁浮车辆/轨道系统动力稳定性研究至今尚未开展, 它也直接导致了目前磁浮试验线上某些动力失稳现象还无法加以解释。磁浮车辆/轨道系统动力稳定性研究尚需在如下几方面开展研究。

(1) 磁浮系统动力稳定性理论分析方法的探索。Floquet 理论和 Lyapunov 指数分析法实际上都

是通过求解系统扰动方程基本解矩阵的特征值来判断系统的稳定性。虽然后者较前者计算量大大减少,但对高达数百维的磁浮车辆/轨道系统动力方程,其计算速度和计算精度将受到极大的考验。因此,广泛地探索磁浮动力系统稳定性分析方法仍是其将来的主要研究方向。

(2) 开展磁浮车辆横向稳定性研究。低速磁浮车辆没有专门的导向电磁铁,横向阻尼主要来自车辆二系悬架,故在横向上低速磁浮列车总是欠阻尼的,这使得低速磁浮车辆动力失稳的潜在可能性增加。高速磁浮列车虽然具有专门的导向磁铁和控制器,但其横向稳定性问题仍然存在。磁浮列车的横向和垂向动力学模型和稳定性分析方法是相似的,但已有的研究工作很少,加强此方向研究工作将有利于磁浮系统动力稳定性理论的完善。

(3) 针对磁浮试验线上出现的磁浮车辆/轨道系统动力失稳现象,建立实际车辆与轨道模型,通过理论分析、数值仿真与参数研究及现场测试,探求磁浮系统动力失稳的原因,并提出相应的工程改进对策与应用技术措施。

参 考 文 献

- 1 Kemper H. Schwebebahn mit räderlosen Fahrzeugen, die mittels magnetischer felder an eisernen Fahrschienen schwebend entlang geführt werden. German Patent, 644302, 1937
- 2 Powell J R, Danby G R. High-speed transport by magnetically suspended trains. ASME Paper 66-WA/RR-5, 1966
- 3 Gottzein E, Rogg D. Status of high-speed maglev train in the FRG. In : Proc. Conf. on Maglev Transport : Now and for the Future, Solihull, England, IMechE., 1984 : 23 ~ 36
- 4 Taylor D R D, Goodall R M, Oates C D M. Theoretical and practical considerations in the design of the suspension system for Birmingham maglev. In : Proc. Conf. on Maglev Transport : Now and for the Future, Solihull, England, IMechE., 1984 : 185 ~ 192
- 5 Masada E, Kitamoto M, Kawashima M, et al. Present status of maglev developments in Japan and HSST-03 project. In : Proc. Conf. on Maglev Transport : Now and for the Future, Solihull, England, IMechE., 1984 : 9 ~ 22
- 6 Jayawant B V. Electromagnetic Levitation and Suspension Techniques. London : Edward Arnold, 1981
- 7 Rhodes R G, Mulhall B E. Magnetic Levitation for Rail Transport. New York : Oxford University Press, 1981
- 8 Alscher H, Iguchi M, Eastham A R, et al. Non-contact suspension and propulsion technology. Vehicle System Dynamics, 1983, 17(4) : 259 ~ 289
- 9 Sinha P K. Electromagnetic Suspension Dynamics & Control. London : Peter Peregrinus Ltd., 1987
- 10 正田英介, 藤江恂治, 加藤纯郎, 等. 磁气浮上の铁道技术. 东京 : 才一ム社, 1992
- 11 刘华清, 李志业, 任恩恩, 等. 德国磁悬浮列车 Transrapid. 成都 : 电子科技大学出版社, 1995
- 12 Jufer M. SwissMetro project. In : 15th Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Mt. Fuji, Japan, 1998 : 15 ~ 18
- 13 Kim I K, Yoo M H. Maglev development and commercial application in Korea. In : 16th Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Rio de Janeiro, Brazil, 2000 : 40 ~ 43
- 14 Lian J S, Zhou J W, Zhang K L, et al. General survey of Chinese maglev train. In : 13th Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Argonne National Lab, USA, 1993 : 46 ~ 50
- 15 李强北. 国外磁浮列车述评(上). 国外铁道车辆, 1996, 33(4) : 1 ~ 8
- 16 李强北. 国外磁浮列车述评(下). 国外铁道车辆, 1996, 33(5) : 7 ~ 13
- 17 张昆仑. 电磁悬浮系统及控制 : [硕士学位论文]. 成都 : 西南交通大学, 1990
- 18 西南交通大学. 都江堰青城山磁浮列车工程示范线可行性研究报告. 成都 : 西南交通大学, 1997
- 19 国防科技大学. 磁悬浮列车关键技术研究——悬浮与导向系统技术报告. 长沙 : 国防科技大学, 1996
- 20 尹力明, 谢云德, 陈顺良. 单磁浮转向架的试验研究. 机车电传动, 1997, 6 : 1 ~ 4
- 21 李红, 左鹏, 刘伟志, 等. 6 t 单转向架试验车的研究. 铁道学报, 1999, 21(2) : 26 ~ 32
- 22 吴祥明. 磁浮列车. 上海 : 上海科学技术出版社, 2003
- 23 Yan L G. Progress of high-speed maglev in China. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2002, 12(1) : 944 ~ 947
- 24 Miller L. Test results for the qualification of the maglev vehicle Transrapid08. In : 16th Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Rio de Janeiro, Brazil, 2000 : 111 ~ 114
- 25 Raschbichler H G. Transrapid maglev system-system characteristics and performance potential. In : 16th Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Rio de Janeiro, Brazil, 2000 : 95 ~ 99
- 26 Takao K, Yoshimura M, Tagawa N, et al. Development of

- the superconducting maglev vehicles (MLX01 type) on the Yamanashi test line-carbody structure and equipment of the first train set. Quarterly Report of RTRI, 1996, 37(2) : 63 ~ 70
- 27 Kaminishi K, Takahashi K, Seki A, et al. Main test results on the Yamanashi maglev test line. In : 16th Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Rio de Janeiro, Brazil, 2000 : 83 ~ 88
- 28 Fujino M, Tanaka M, Ishimoto S. Total test operation of HSST-100 and the project of East Hill-Side Line in Nagoya. In : 16th Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Rio de Janeiro, Brazil, 2000 : 35 ~ 43
- 29 Brzezina W, Langerholc J. Lift and side force on rectangular pole pieces in two dimensions. Journal of Applied Physics, 1974, 45(4) : 1 869~1 872
- 30 Richardson H H, Wormley D N. Transportation vehicle/beam-elevated guideway dynamic interaction : a state-of-the-art review. J. Dyn. Syst. Meas. Control, Trans. ASME, 1974, 96(6) : 169 ~ 179
- 31 Kortüm W. Vehicle response on flexible track. In : Proceedings of Conference on Maglev Transport : Now and for the Future, Solihull, England, IMechE, 1984 : 47 ~ 58
- 32 Cai Y G, Chen S S. Dynamic characteristics of magnetically levitated vehicle systems. Applied Mechanics Reviews, 1997, 50(11) : 647 ~ 670
- 33 Gottzein E, Lange B. Magnetic suspension control system for the MBB high speed train. Automatica, 1975, 11 : 271 ~ 284
- 34 Gottzein E, Brock K H, Schneider E, et al. Control aspects of a tracked magnetic levitation high speed test vehicle. Automatica, 1977, 13 : 205 ~ 223
- 35 Mersinger R. Control systems for flexible maglev vehicle riding over flexible guideway. In : IUTAM Symposium on the Dynamics of Vehicles on Roads and Railway Tracks, Amsterdam, Netherlands, 1975 : 531 ~ 555
- 36 Sinha P K. Magnetic suspension for low-speed vehicle. J. Dyn. Syst. Meas. Control, Trans. ASME, 1978, 100 : 333 ~ 342
- 37 江浩, 连级三. 单磁铁悬浮系统的动态模型与控制. 西南交通大学学报, 1992, 27(1) : 59 ~ 67
- 38 蒋启龙. 常导磁浮列车悬浮与导向方式研究 : [硕士学位论文]. 成都 : 西南交通大学, 1995
- 39 李云钢. EMS型磁浮列车悬浮控制技术研究 : [博士学位论文]. 长沙 : 国防科技大学, 1997
- 40 谢云德, 常文森. 电磁型磁浮列车单铁力的计算及运动稳定性和可控性研究. 铁道学报, 1995, 17(1) : 38 ~ 47
- 41 罗芳, 张昆仑. 磁悬浮列车 U 型悬浮电磁铁电磁力的数值计算与分析. 机车电传动, 2002, 3 : 32 ~ 34
- 42 Yamamura S, Ito T. Analysis of speed characteristics of a attracting magnet for magnetic levitated vehicles. IEEE Transactions on Magnetics, 1975, 11(5) : 1 504 ~ 1 507
- 43 蒋启龙, 张昆仑, 连级三. EMS 型磁悬浮列车运行阻力计算. 机车电传动, 1999, 1 : 10 ~ 12
- 44 Onuki T, Nakatsu T, Wakao S, et al. Magnetic field analysis of nonlinear system considering both motion and voltage equations. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(2) : 2 097 ~ 2 100
- 45 Limbert D A, Richardson H H, Wormley D N. Controlled dynamic characteristics of ferromagnetic vehicle suspensions providing simultaneous lift and guidance. J. Dyn. Syst. Meas. Control, Trans. ASME, 1979, 101(9) : 217 ~ 222
- 46 张昆仑, 蒋启龙. 电磁型磁浮列车导向方式研究. 铁道学报, 1999, 21(增刊) : 28 ~ 30
- 47 李云钢, 常文森. 模块结构 EMS 型磁浮列车的导向控制研究. 国防科技大学学报, 1997, 19(3) : 114 ~ 118
- 48 赵春发. 磁悬浮车辆系统动力学研究 : [博士学位论文]. 成都 : 西南交通大学, 2002
- 49 Zhao C F, Zhai W M. Dynamic characteristics of a single magnet system applied to a low-speed EMS maglev vehicle. In : Proceeding of International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems, Tokyo, Japan, JSME No.03-205, Aug. 2003 : 472 ~ 477
- 50 Gottzein E, Mersinger R, Miller L. The 'magnetic wheel' in the suspension of high-speed ground transportation vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1980, 29(1) : 17 ~ 22
- 51 Anselmo B, Robertto M S. H_2 and H_∞ control for maglev vehicle. IEEE Control Systems, 1998, 8 : 19 ~ 24
- 52 Goodall R M. On the robustness of flux feedback control for electromagnetic maglev controller. In : 16th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Rio de Janeiro, Brazil, 2000 : 197 ~ 202
- 53 Sinha P K, Hadjiiski L M, Zhou F B, et al. Electromagnetic suspension : new results using neural network. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(6) : 2 971 ~ 2 973
- 54 李云钢, 常文森. 磁浮列车的模糊反馈控制. 模糊系统与数学, 1998, 12(1) : 54 ~ 59
- 55 李云钢, 常文森. 磁浮列车悬浮系统的串级控制. 自动化学报, 1999, 2 : 247 ~ 251

- 56 Cramer W. Some design criteria for the layout of maglev-vehicle-systems. In : Schiehlen W ed. Dynamics of High-Speed Vehicles. Wien-New York, Springer-Verlag, 1982 : 365 ~ 379
- 57 Popp K. Mathematical modeling and control system design of maglev vehicles. In : Schiehlen W ed. Dynamics of High-Speed Vehicles. Wien-New York, Springer-Verlag, 1982 : 333 ~ 364
- 58 Chung Y I, Genin J. Stability of a vehicle on a multispans simply supported guideway. J. Dyn. Syst. Meas. Control, Trans. ASME, 1978, 100(12) : 326 ~ 332
- 59 武建军, 郑晓静, 周又和. 弹性轨道上二自由度磁悬浮列车的动力特性研究. 振动工程学报, 1999, 12(4) : 439 ~ 446
- 60 周又和, 武建军, 郑晓静, 等. 磁浮列车的动力稳定性分析与 Lyapunov 指数. 力学学报, 2000, 32(1) : 42 ~ 51
- 61 Zheng X J, Wu J J, Zhou Y H. Numerical analyses on dynamic control of five DOF maglev vehicle moving on flexible guideways. Journal of Sound and Vibration, 2000, 235(1) : 43 ~ 61

**DYNAMICS OF MAGLEV VEHICLE/
GUIDEWAY SYSTEMS(I) ——
MAGNET/RAIL INTERACTION AND
SYSTEM STABILITY**

Zhai Wanming

*(Traction Power State Key Laboratory, Southwest
Jiaotong University, Chengdu 610031)*

Zhao Chunfa

*(Department of Applied Mechanics and Engineering,
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)*

Abstract: Dynamic responses of maglev vehicle/guideway system have important influence on running safety, ride comfort and system costs, which are crucial factors for maglev train commercial application. As the first part of the series paper, the essential issue of maglev vehicle/guideway system dynamics is discussed, including the magnet/rail interaction and the dynamic stability. Remarkable advance has been made on the 2-dimensional theoretical analysis and dynamic simulation of magnet/rail interaction. It is necessary to carry out theoretical analyses and experimental studies on the 3-dimensional magnet/rail interaction in the future. The magnet suspension stability, single magnet/guideway system stability and dynamic stability of simple maglev vehicle/guideway system had been investigated in the past thirty years. In order to meet the demand of developing the commercial maglev system, it is suggested to investigate as soon as possible the dynamic stability of the full-scale maglev vehicle/guideway system.

Key words: Maglev vehicle Elevated-beam
Coupling dynamics
Electromagnetic suspension
Feedback control Stability

作者简介: 翟婉明, 男, 1963 年出生, 教授, 博士生导师, “长江学者”特聘教授, 国际车辆系统动力学学会(IAVSD)学术委员会委员, 国家级有突出贡献的中青年专家。主要研究方向为铁路大系统动力学。

E-mail : wmzhai@home.swjtu.edu.cn

赵春发, 男, 1973 年出生, 博士后, 助理研究员。主要研究方向为磁悬浮车辆/轨道系统动力学。

E-mail : cfzhao@home.swjtu.edu.cn