

研  
究  
开  
发

## 高速磁悬浮列车转向能力研究

王汝宁,程 虎,李云钢

(国防科学技术大学 磁悬浮技术工程研究中心,湖南 长沙 410073)



作者简介:王汝宁(1982-),男,硕士研究生,工程师,主要从事磁悬浮列车方面的研究工作。

**摘要:**分析了影响列车转向能力的3个主要因素:导向电磁铁长度、摆杆的摆动范围与拉力、相邻转向架对搭接电磁铁的挤压与拉伸,并提出了保持列车摆式结构不变、取消车辆搭接电磁铁、适当减小转向架和导向电磁铁长度的改进方案,使改进后的高速磁悬浮列车能满足较小转弯半径的要求。

**关键词:**高速磁悬浮列车;转向能力;最小转弯半径

中图分类号:U292.91\*7

文献标识码:A

文章编号:1000-128X(2011)01-0040-03

## Research on Turning Ability of High-speed Maglev Train

WANG Ru-ning, CHENG Hu, LI Yun-gang

(Engineering Research Center of Maglev Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** Three chief factors had been analyzed: the length of guidance electromagnet, range of motion and pulling force of pendulum pole, adjacent bogie squeeze and stretch on the joint electromagnet. And based on the analysis, improved scheme was proposed. By keeping train tilting structure removing joint electromagnet, moderately reducing the length of bogie and guiding electromagnet, the improved vehicles can meet the requirement of smaller turning radius.

**Key words:** high-speed maglev train; turning ability; minimum turning radius

## 0 引言

磁悬浮列车作为一种新型交通工具,具有噪声低、安全可靠、乘坐舒适等优点,尤其是其较强的爬坡能力,很适合组建快速城市轨道交通系统。考虑到城市轨道交通需要穿越建筑物较密集的城区的特点,尽可能地减小车辆的转弯半径有重要的现实意义。

目前,城市轮式轨道运输系统的最小转弯半径大都在100~300 m之间<sup>[1]</sup>。为使磁悬浮列车能在城市内有效运行,设计选择其转弯半径不大于150 m。现有部分型号的中低速磁悬浮列车,如日本的HSST系列和我国的CMS系列,最小转弯半径都已达到100 m,但都受直线感应电机牵引方式的限制,速度难以突破150 km/h<sup>[2-4]</sup>。而在上海运营中的高速磁悬浮列车,已达430 km/h的高速,但最小转弯半径为350 m。本文拟针对此型磁悬浮列车,分析影响高速磁悬浮列车转向能力的几个因素,

并在此基础上提出改进方案,使改进后的列车能满足150 m最小转弯半径的要求。

## 1 转向能力的约束分析与计算

高速磁悬浮列车的总体结构可分为上、中、下3层<sup>[5]</sup>:上层为车体;下层是车辆的走行部,由4个转向架和3个搭接模块交错相连,每个转向架由2个悬浮框通过纵梁连接而成,悬浮框上安装有负责车辆悬浮和导向的电磁铁;中层为摆式结构的二次系,主要包括摇枕、空气弹簧和摆杆。一节列车有16根摆杆连接车体和转向架<sup>[6]</sup>。列车导向电磁铁长度、摆杆的摆动范围与拉力及相邻转向架对搭接电磁铁的挤压与拉伸3个参量对列车转向能力的约束很大。

## 1.1 导向电磁铁长度对列车转向能力的约束

高速磁悬浮列车采用主动导向方式,即列车通过弯道时由导向系统通过导向电磁铁主动对列车提供侧向控制力。导向电磁铁安装在转向架两侧的内壁上,列车运行时位于轨道的两侧。

收稿日期:2010-05-24;收修改稿日期:2010-10-27

导向电磁铁在弯道上的情形如图 1 所示。弯道上, 轨道呈圆弧形, 而导向电磁铁仍保持直线, 磁铁极面不同点相对轨道极面的间隙不同。轨道外侧的磁铁, 端部到轨道极面的间隙大, 中间间隙小(如图 1); 内侧则相反。实际中, 导向电磁铁的间隙传感器安装在磁铁的端部, 若磁铁端部同中间点的间隙差值过大, 会导致通过弯道时导向电磁铁撞击轨道。

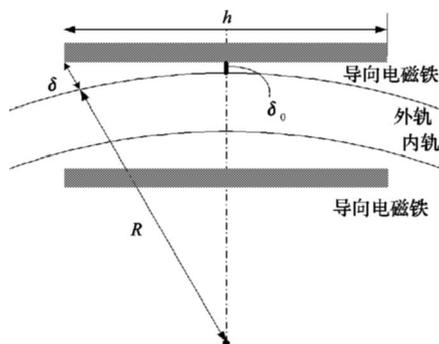


图 1 导向电磁铁在弯道上

由图 1, 导向电磁铁端部与中点处间隙差  $\delta$  可表示为

$$\Delta\delta = \delta - \delta_0 = \sqrt{(R + \delta_0)^2 + h^2/4} - (R + \delta_0) \quad (1)$$

式中:  $R$  为轨道弯道半径;  $h$  为导向电磁铁长度。

又  $R \gg \delta_0$ , 故:

$$\Delta\delta \approx \sqrt{R^2 + h^2/4} - R \quad (2)$$

从(2)易见, 间隙差  $\delta$  只同轨道曲线半径  $R$  和导向磁铁长度  $h$  有关;  $R$  减小时,  $\delta$  增大, 而通过减小导向磁铁长度  $h$  的方法可以减小间隙差  $\delta$ 。

现有列车的结构参数为:  $h = 3.045 \text{ m}$ , 列车允许的最小转弯半径为  $350 \text{ m}^{[5]}$ 。列车在  $350 \text{ m}$ 、 $150 \text{ m}$  弯道上不同长度的导向电磁铁端部同中点处的间隙差如表 1。

表 1 导向电磁铁的间隙差

轨道半径 / m	导向电磁铁长度 / m	间隙差 / mm
350	3.0	3.21
350	2.5	2.23
350	2.0	1.42
150	3.0	7.49
150	2.5	5.18
150	2.0	3.33

以现有列车在  $350 \text{ m}$  弯道上的值为标准, 由表 1 可得, 将导向电磁铁的长度减小到  $2 \text{ m}$ , 列车在  $150 \text{ m}$  弯道上导向电磁铁的间隙差值可以满足要求。

### 1.2 摆杆的摆动范围与拉力对列车转向能力的约束

高速磁悬浮列车在弯道上运行时, 转向架受悬浮和导向磁铁的约束, 将沿轨道呈折线排列; 而车体仍保持直线状态, 车体同转向架会产生侧移。这个侧移是由二次系摆杆的侧向摆动提供的。列车在弯道上车体同转向架的相对位置关系如图 2 所示。

图 2 中记各摆杆的侧移为  $c_i (i = 1, 2, \dots, 8)$   $L$  为转向架长度, 角  $\phi$  定义如图 2 所示。参考文献[6], 可得圆曲线上摆杆侧移  $c_i$  的计算方法如下:

由圆的对称性可知

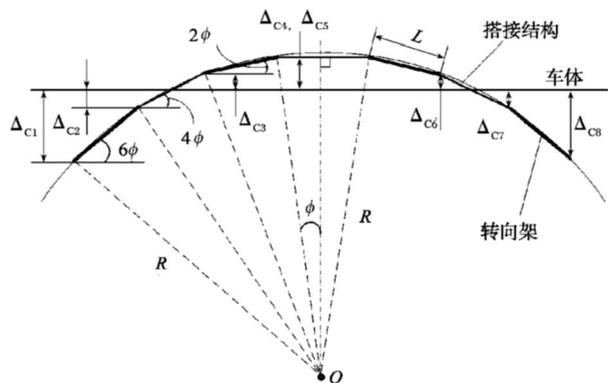


图 2 列车在曲线轨道上

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{C1} = \Delta_{C8}, \Delta_{C2} = \Delta_{C7} \\ \Delta_{C3} = \Delta_{C6}, \Delta_{C4} = \Delta_{C5} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

取指向轨道外侧为  $c_i$  的正方向, 由车体侧向力平衡方程可得

$$\sum_{i=1}^4 \frac{\Delta_{C_i}}{\sqrt{p^2 - \Delta_{C_i}^2}} = 0 \quad (4)$$

又由几何关系可得

$$\left. \begin{aligned} \phi = \arcsin \frac{L}{2R} \\ \Delta_{C2} - \Delta_{C1} = L \sin 6\phi \\ \Delta_{C3} - \Delta_{C2} = L \sin 4\phi \\ \Delta_{C4} - \Delta_{C3} = L \sin 2\phi \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由式(3)~式(5)即可求出  $c_i$ 。

图 3 中  $\beta_i$ 、 $T_i$  分别表示摆杆的摆角和拉力。记摆杆长度为  $p$ ,  $G$  为一根摆杆承受的车体重力。从设计的角度讲, 应使 16 根摆杆尽可能平均分担车体的总重  $G$ , 所以不妨假设  $G = G/16$ 。由图 3 易得

$$\left. \begin{aligned} \beta_i = \arcsin \frac{\Delta_{C_i}}{p} \\ T_i = \frac{G'}{\cos \beta_i} = \frac{G}{16 \cos \beta_i} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

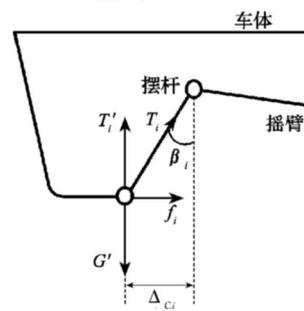


图 3 摆杆拉力分析

保持现有列车摆杆长  $p = 0.24 \text{ m}^{[5]}$  不变, 对不同长度转向架, 在  $150 \text{ m}$  和  $350 \text{ m}$  弯道上摆杆的最大摆角和最大拉力如表 2。

由表 2 可知, 转向架长  $2 \text{ m}$  时, 列车在  $150 \text{ m}$  弯道上的摆杆最大摆角同现有车辆在  $350 \text{ m}$  弯道上的摆杆最大摆角基本

表 2 摆杆的摆角和拉力

轨道半径 / m	转向架长度 / m	最大摆角 / °	最大静拉力 / kN
150	3.0	54.09	29.55
150	2.5	36.09	21.45
150	2.0	26.54	18.76
350	3.0	23.24	28.67

相同; 又考虑到车体重量的减轻, 摆杆的拉力将明显减小。因此将转向架长减为  $2 \text{ m}$ , 列车摆杆的摆动范围

和拉力完全可以满足 150 m 转弯半径的要求。

### 1.3 相邻转向架对搭接电磁铁的挤压和拉伸对列车转向能力的约束

高速磁悬浮列车相邻转向架由搭接磁铁相连。悬浮电磁铁和搭接电磁铁都通过金属橡胶件安装在悬浮框上(如图4)。列车在弯道上运行时,相邻悬浮架的内、外侧会分别产生压缩和拉伸,从而使搭接电磁铁搭接点金属橡胶键发生形变;金属橡胶键能承受的最大形变受其自身材料的限制,不能超过允许范围。金属橡胶键的压缩和拉伸情况如图4、图5所示。

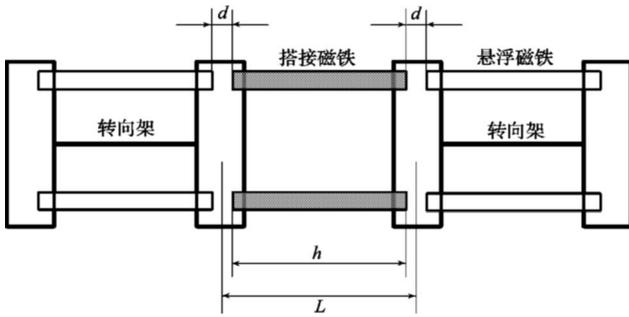


图4 转向架在直道上

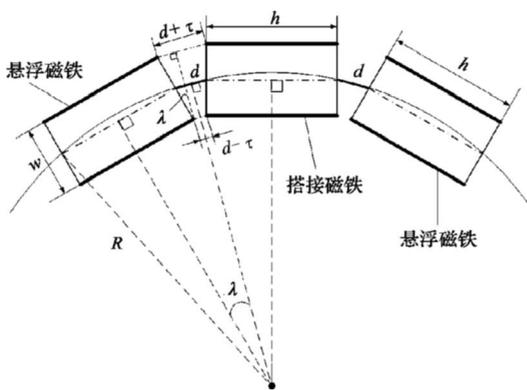


图5 转向在弯道上

图4、图5中,记直道上同一个悬浮框上悬浮电磁铁同搭接电磁铁端部的间隙长度为  $d$ ,  $L$  为转向架长度,  $h$  为悬浮、搭接电磁铁长度。弯道上,假设悬浮架内外侧金属橡胶弹簧的伸长和压缩量同为  $\tau$ , 则内外侧相邻磁铁间的间隙分别变为  $d-\tau$  和  $d+\tau$ 。由图5易得

$$\left. \begin{aligned} \tau &= w \cdot \sin \lambda \\ \lambda &= \arcsin \frac{h}{2R} + \arcsin \frac{d}{2R} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中:  $\tau$  为金属橡胶键的伸长和压缩量;  $R$  为轨道半径;  $w$  为转向架宽度, 角  $\lambda$  如图5所示。

显然,  $h$  和  $d$  都远小于轨道半径  $R$ , 所以  $\lambda$  很小, 故有

$$\tau \approx w \cdot \frac{h+d}{2R} \quad (8)$$

现有列车参数为:  $w=2.22 \text{ m}$   $L=3.096 \text{ m}$   $h=3.0455 \text{ m}$ ,  $d=L-h=50.5 \text{ mm}$ 。计算得列车在 350 m 和 150 m 弯道上, 不同长度转向架对应的金属橡胶键的形变量  $\tau$  如表3。

由表3可知, 即使将转向架长度减为 1.5 m, 在 150 m 弯道上列车金属橡胶键的形变量依然大于现有列车在

350 m 弯道上的最大形变量。因此, 在弯道半径 150 m 及以下时, 采用搭接结构不合适, 应去掉搭接电磁铁, 采用无搭接结构; 为提高相邻转向架连接的紧密度, 可用金属橡胶弹簧连接。

表3 金属橡胶键的形变量

轨道半径 / m	转向架长度 / m	压缩 (拉伸) 量 / mm
150	3.0	22.2
150	2.0	14.8
150	1.5	11.2
350	3.0	9.8

## 2 改进方案

通过以上讨论可知, 为使高速磁悬浮列车满足 150 m 最小转弯半径的要求, 一种可行的改进方案为:

依然可采用主动导向方式, 但要将导向电磁铁和转向架减短到 2 m。

保持车辆二次系摆式结构不变, 且无需改变摆杆长度。

应采用无搭接结构, 取消相邻转向架间的搭接电磁铁; 为提高相邻转向架连接的紧密度, 可用金属橡胶弹簧连接。新结构如图6所示。

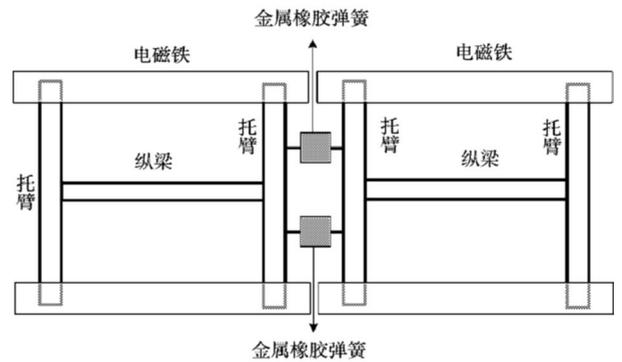


图6 新结构示意图

## 3 关于新结构的几点讨论

新结构的悬浮、导向能力。当转向架和悬浮、导向电磁铁长度同步减小时, 单个电磁铁因长度减小, 承载能力降低, 但列车单位长度上的悬浮、导向能力不会改变。因此新结构完全能够提供足够的悬浮、导向力。

新结构的安全性。取消搭接结构, 会在一定程度上减小相邻电磁铁间的冗余, 但高速磁悬浮列车电磁铁的安全设计是多方面的, 如每个悬浮、导向电磁铁都分为 2~3 个单元, 由多组控制器独立控制, 从而保证一个单元失效并不会影响整个电磁铁的功能; 由多套电网分别给不同的电磁铁单元供电以增加冗余; 通过控制空气弹簧高度可平衡各电磁铁载荷等<sup>[5]</sup>。同时, 考虑中、低速磁悬浮列车电磁铁模块间并未有相互搭接, 而整车仍具有很高的可靠性<sup>[7]</sup>, 所以, 取消搭接结构对列车安全性的影响完全在可接受的范围内。

新结构的承载能力。前面已 (下转第46页)

列车的状态监控。

车载安全计算机可实时检测列车的工况状态,并监控列车的车门状态。

车门的开启授权。

车载安全计算机根据车门状态及对相关信息的判断,可实现车门开启允许的控制与提示。

零速度检测。

车载安全计算机通过多路速度信号的采样、比较和计算,若列车的速度小于0.5 km/h,则认为列车是处于零速度状态,并向列车接口输出零速度信号。

线路尽头防护。

轨道线路末端防护功能允许列车持续运行,直至列车接近轨道线路末端止。

线路尽头防护与超速防护结合使用,以防止列车冲出轨道末端。在车载安全计算机处于完全监控模式时,线路的尽头将被作为移动授权的终点参与模式限速曲线的运算。

但是无论在何种模式下,一旦收到尽头线防护应答器的信息,车载安全计算机都将对列车输出紧急制动指令,控制列车停车,防止列车冲出轨道末端。

列车的溜逸防护。

车载安全计算机通过检测列车运行方向和机车方向手柄指示位置的对应关系,实现列车溜逸的自动防护。

当检测到列车的运行方向与机车方向手柄指示位置不一致或者列车在非牵引工况下由零速状态进入非零速状态(速度 3 km/h,或走行距离 10 m),即列车发生意外移动时,车载安全计算机都将对列车输出紧急制动指令,控制列车停车。

### 3 信号系统运行情况

本信号系统已在上海1.7 km中低速磁悬浮试验线成功应用3年多,经历了试验线实际运用的考验,得到了用户及相关专家的认可。

### 4 结语

本信号系统是国内完全自主研发应用于中低速磁悬浮列车的信号系统,为中低速磁悬浮列车的运行提供了安全防护保障。

本信号系统与传统轮轨信号系统在测速定位、轨道占用检知、道岔控制和防护等方面都存在较大差异,是其技术创新点也是技术难点所在。通过系统研发和上海中低速磁悬浮试验线现场应用考核,这些技术创新点的可行性得到了较好的验证。

当然,由于上海中低速磁悬浮试验线实际线路总长仅1.7 km,积累的实际运行数据有限,且本信号系统不包括列车自动监控(ATS)和列车自动运行(ATO),因此,整个信号系统的功能和性能的稳定和提高有待后续进行深入研究和优化完善。

#### 参考文献:

- [1] 吴祥明. 磁浮列车[M]. 上海:上海科学技术出版社,2003.
- [2] IEC61508,铁路应用:安全相关电子系统[S].
- [3] TB/T 2765-2005,列车运行监控记录装置技术条件[S].
- [4] 张利芝,唐俊同,陈展. CTCS2-200C型车载列车控制系统[J]. 机车电传动,2008(1):11-14.
- [5] 许义景,王连春. 基于FTA的磁悬浮列车牵引系统可靠性分析[J]. 机车电传动,2009(5):23-26.
- [6] 郭敏. 机车行车安全车载设备柜的规范化设计探讨[J]. 机车电传动,2009(5):20-22.

(上接第42页) 经论述,新结构单位长度上悬浮磁铁的承载能力不变,但取消搭接结构后,必须增加转向架纵梁、摇臂和空气弹簧等的数量,从而使单位长度上列车的重量增加,列车承载能力变小。考虑到纵梁、摇臂和空气弹簧数量增加后,可相应地减小其单个的尺寸和重量,所以总的重量不会有大的增加,列车承载能力不会有较大变化。同时,还可以考虑使用永磁电磁混合悬浮的方式来提高列车的承载能力<sup>[8]</sup>。

### 4 结语

本文主要从列车走行机构的几何结构上,讨论了对列车转向能力有较大约束的几个参量,并在此基础上,尝试提出了一种可提高列车转向能力的改进方案。文中的分析和结论为改进高速磁悬浮列车的转向能力提供了一定的理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 顾保南,姜晓明. 论城市轨道交通最小曲线半径标准的选择[J]. 同济大学学报,2003,31(4):428-431.
- [2] H Seino, K Kato, M Azakami, H Yoshioka, H Oshima. The Maglev Bogie System and its Development[C]/Maglev 1995 Proceedings,1995:261-266.
- [3] 唐锐,吴俊泉. 中低速磁浮列车在我国城轨交通中的应用前景[J]. 都市快轨交通,2006(2):12-16.
- [4] 李云锋. 中低速五转向架磁悬浮列车走行机构研究与理论设计[D]. 长沙:国防科技大学,2007.
- [5] 吴祥明. 磁浮列车[M]. 上海:上海科学技术出版社,2003.
- [6] 赵志苏. 摆式悬架高速磁浮列车转向特性研究[J]. 机车电传动,2009(1):43-45.
- [7] 陈贵荣,龙志强. 日本低速磁悬浮列车发展[J]. 国外铁道车辆,2008,45(1):1-3.
- [8] 李云钢,闫宇壮,程虎. 混合EMS型磁浮列车的悬浮磁铁设计与分析[J]. 国防科技大学学报,2006,28(5):94-98.