

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2010.03.015

中低速磁浮交通圆曲线参数影响因素分析

时 瑾 魏庆朝 鲍凤麒
(北京交通大学 北京 100044)

摘 要 在分析中低速磁浮交通车线关系基础上,研究车辆通过圆曲线时悬浮力变化情况,分析转向架结构和圆曲线的几何匹配关系,计算车辆部件偏移量、悬浮力变化量、弹簧变形量等,给出最小圆曲线半径的合理取值,说明满足车辆与线路之间的匹配关系是线路设计的基本要求。实践表明,研究结论为中低速磁浮交通线路设计参数选取提供理论依据。

关键词 城市轨道交通 中低速磁浮 线路 运动学 圆曲线 几何关系

中图分类号 U237 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2010)03-0068-04

常导中低速磁浮交通具有安全、舒适、低噪声的优点,其爬坡能力强,通过的曲线半径小,不依靠轮轨黏着牵引和制动列车,具有很大的加速、减速能力,非常适合城市轨道交通,具有很好的发展前景。自上世纪六七十年代以来,日本对中低速常导磁浮交通技术进行了长期不懈的研究开发,目前日本中低速磁浮交通系统(high speed surface transport HSST)已达到商业应用的程度,并建成了运营线。我国的科研院所经过数十年的不懈努力,已研制成功多辆中低速磁浮样车,并已在试验中在线运行。

目前,中低速磁浮交通线路设计参数的研究大多借鉴轮轨铁路的设计理论和方法,而中低速磁浮车辆在运行时的受力情况和位置关系与轮轨车辆有很大不

同,线路设计参数除需考虑乘坐舒适性要求外,还应充分考虑车辆与线路之间的运动学规律和几何关系。笔者在研究过程中,分析中低速磁浮交通车线关系,计算车辆部件偏移、受力、弹簧变形等情况,研究曲线参数与车辆的匹配关系,为线路设计参数选取提供理论依据。

1 系统组成

投入商业化运营的磁浮车辆目前采用五单元转向架结构,五单元转向架由侧梁、抗侧滚梁、空气弹簧、滑块、牵引拉杆、导向机构等组成,两侧侧梁通过抗侧滚梁连接,转向架侧梁端部装有 4 个空气弹簧,起到支撑车体和减振作用,空气弹簧上部的滑块用来保证车辆通过曲线时的部件偏移,以提高曲线通过能力。侧梁下部安装有悬浮电磁铁,产生电磁力来保证车辆的悬浮和导向。

线路由直线和曲线组成,曲线可分为平曲线、竖曲线以及缓和曲线等,所有这些曲线设置的目的在于使线路转换圆顺,利于列车通过。磁浮交通线路与轮轨铁路相比,既有相似点又有异同点。一方面,与轮轨铁路相似,线路参数取值受车辆结构几何约束和动力学因素的控制;另一方面,由于磁浮列车运行时与轨道间的间隙必须通过悬浮控制系统来维持,所以线路参数也和电磁悬浮力、导向力以及悬浮导向控制系统密切相关。

轨道主要由导轨、轨枕、支撑梁、感应板、连接装置等几部分组成。在轨道顶面两侧的∩形导轨用于实现驱动、悬浮、导向等功能,在导轨上面设有铝制感应板(reaction plate 或称“反作用力板”),作为直线电机地面侧的“转子”部分为车辆提供驱动力。轨枕用来连接导轨和支撑梁,轨枕底端有用于与支撑梁连接的锚栓。轨枕与导轨由张力螺栓连接,并设置垫片以调整高度。

收稿日期: 2009-09-11 **修回日期:** 2009-11-06

作者简介: 时瑾,男,工学博士,从事铁道工程技术的研究, jsh@bjtu.edu.cn

魏庆朝,男,教授,博士生导师

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项基金(20090009120020); 中央高校基本科研业务费专项基金(2009JBM066)

根据以上
推导关系,可
以得到损失面
积为 $2S_1$, 损失
比可得

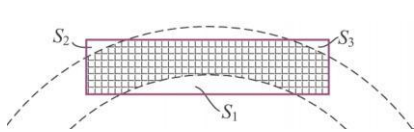


图 5 悬浮面积损失

$$W_s = \frac{S_z - 2S_1}{S_z}$$
$$S_1 = R^2 \cos^{-1} \frac{R-y_1}{R} - (R-y)^2 \tan \left[\cos^{-1} \frac{R-y_1}{R} \right] \quad (5)$$

根据式
(5), 可计算
得到曲线上的
面积损失比,
计算结果如下
图 6 所示, 表 1
还列出了 50
和 70 m 曲线
半径条件下悬
浮面积损失百
分比。

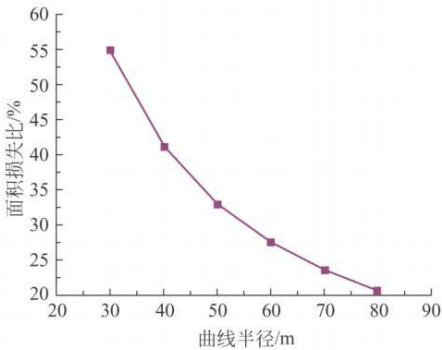


图 6 曲线半径和悬浮面积损失之间的关系

表 1 50 m 和 70 m 半径曲线上面积损失比

模块长度 /m	曲线半径 /m	偏移量 /mm	面积损失百分比 /%
2.8	50	9.8	33
2.8	70	7	24

一般认为,曲线地段悬浮面积损失不宜大于 30%,
据此可以得到最小曲线半径应不小于 50 m。事实上,
由于磁力线是闭合的,即使悬浮面积损失很多,电磁力
并不会损失很多,悬浮导向能力也不会有显著降低。

2.3 滑枕偏移

图 7 为五转向架在曲线地段的排布图。图中设 1、2
转向架相对于
车体侧向位移
为 m_1 、 m_2 , 车体
相对于线路中
心线的偏移为
 m , l 为转向架
长度, α 为任意
模块对应圆心
角的一半。

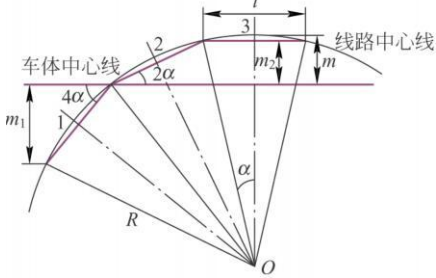


图 7 转向架在曲线地段的排布图

根据几何分析,得到

$$m_2 = l \sin 2\alpha = 2l \sin \alpha \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}$$
$$= 2l \frac{1}{2R} \sqrt{1 - \left(\frac{l}{2R} \right)^2} = \frac{l}{2R^2} \sqrt{4R^2 - l^2} \quad (6)$$

$$m_1 = l \sin 4\alpha$$
$$= 4l \sin \alpha \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} (1 - 2 \sin^2 \alpha)$$
$$= 4l \frac{1}{2R} \sqrt{1 - \left(\frac{l}{2R} \right)^2} \left[1 - 2 \left(\frac{l}{2R} \right)^2 \right]$$
$$= \frac{l}{2R^2} \sqrt{4R^2 - l^2} (2R^2 - l^2) \quad (7)$$

$$m = \frac{l}{2R^2} \sqrt{4R^2 - l^2} + \frac{l}{16R} \quad (8)$$

根据式 (8) 可以得到不同曲线半径条件下的滑枕偏
移距离, 如图 8 所示。图中可以看到, 第一转向架滑枕偏
移最大, 50 m 曲线上最大侧向偏移量为 335.7 mm。如果
最大行程
不能满足
计算值, 车
体和转向
架有可能
瞬间卡死,
部分扰动
力由空气
弹簧剪切
刚度提供。

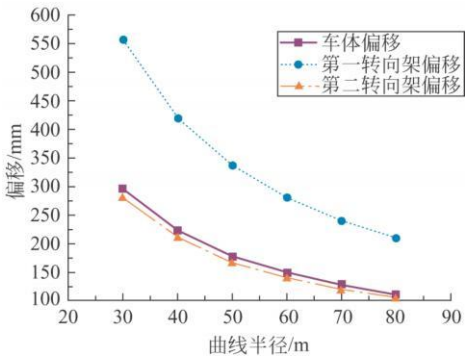


图 8 不同曲线半径条件下滑枕偏移距离

3 竖曲线半径

3.1 竖曲线上悬浮力波动

列车在竖曲线上运行时会产生离心力, 由此导致
悬浮力的重新分布, 车辆受力可按图 1 分析。车辆如果按
1 节满载 30 t 考虑, 假设左右侧导向力相等, 联立式 (1) ~
式 (3), 就可
以得到车辆
在竖曲线地
段悬浮力和
导向力变化
情况。图 9
为 1 500 m
竖曲线、7‰
坡度条件下
悬浮力的变
化情况。

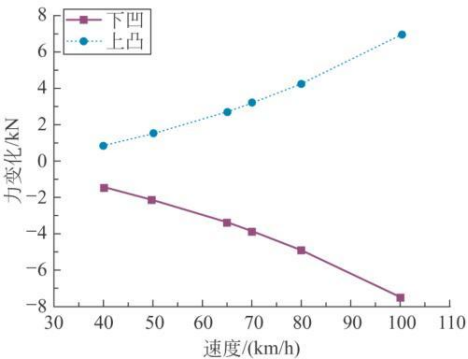


图 9 1500 m 竖曲线、7‰ 坡度
条件下悬浮力变化情况

从图中可见, 由于竖曲线和直线直接相连, 在连接
处垂向加速度有突变, 同时悬浮力将突然改变, 如在
65 km/h 时, 左右侧悬浮力在竖曲线和直线连接处突然
增加约 3 kN。虽然力变化幅度不大, 但突然改变可能
会导致车体抖动, 因此在直线和竖曲线连接处设置一

段缓和曲线十分必要。

3.2 弹簧变形

车辆在竖曲线上,转向架与车厢之间实现相对运动补偿。假设车厢和转向架为刚体,转向架和车体在竖曲线上几何关系如图 10 所示。设 R 为竖曲线半径, l 为模块长度, m 为任意模块对应圆心角, n 为任意模块对应圆心角的一半。由于 l 远小于 R 则

$$m=\frac{l}{R}, \quad n=\frac{m}{2}$$

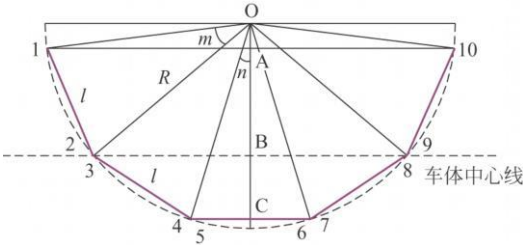


图 10 转向架和车体在竖曲线上的几何关系

第 1 空气弹簧和第 10 空气弹簧拉伸最大,第 5 空气弹簧和第 6 空气弹簧压缩最大。根据几何关系,可得

$$AB=R[\cos(5n)-\cos(3n)] \tag{9}$$

$$BC=R[\cos(n)-\cos(3n)] \tag{10}$$

根据式 (9) ~ 式 (10),可以得到不同竖曲线半径条件下的弹簧变形量,图 11 为不同竖曲线半径

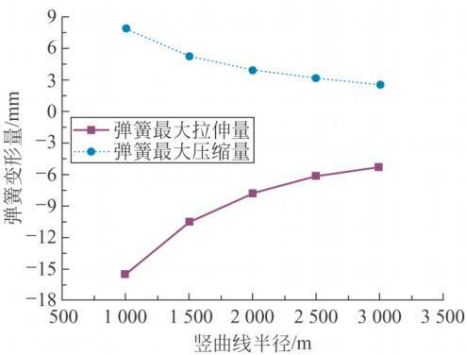


图 11 不同竖曲线半径条件下的弹簧变形量

条件下第 1 和第 10 弹簧拉伸量,以及第 5 和第 6 弹簧压缩量。从图中可见,在竖曲线地段,弹簧拉伸量大于压缩量;随着曲线半径增大,弹簧变形量逐渐变小。在 1 000~1 500 m 曲线半径变化区间内,弹簧变形量波动最大;1 000 m 条件下,弹簧最大拉伸量为 15.6 mm,最大压缩量为 7.84 mm;1 500 m 条件下,弹簧最大拉伸量为 10.45 mm,最大压缩量为 5.227 mm。当曲线半径大于 1 500 m 后,弹簧变形量波动趋缓,因此竖曲线半径不宜小于 1 500 m。

4 结论

笔者分析了中低速磁浮交通车线关系,计算了车

辆部件偏移、受力、弹簧变形等情况,研究了圆曲线参数与车辆的匹配关系,得到如下结论:

- 1) 车辆在较小的平圆曲线上运行时,悬浮力会发生一定程度改变,但变化幅度远小于最大悬浮力,悬浮导向能力能够满足曲线的线路要求。
- 2) 50 m 平圆曲线上悬浮面积损失 33%,滑枕最大偏移量达 336 mm,部分指标可能超过限运行程,建议平圆曲线半径不应小于 50 m。
- 3) 在直线和竖曲线连接处悬浮力会发生突变,为防止力的突然改变,最好设置一段竖缓和曲线过渡。
- 4) 竖曲线半径小于 1 500 m 时,弹簧变形量波动较大,所以竖曲线半径不宜小于 1 500 m。

参考文献

[1] 顾保南.论城市轨道交通最小曲线半径标准选择[J].同济大学学报,2003,(4):428-431.
[2] 李云锋,陈革,李杰.中低速磁悬浮列车五单元转向架曲线通过研究[J].机车电传动,2007(4):26-29.
[3] 黄志辉,高定刚.常导中低速磁浮车辆竖曲线通过分析[J].铁道车辆,2005,43(11):5-6.
[4] 吴祥明.磁浮列车[M].上海:上海科技出版社,2003
[5] 魏庆朝.磁悬浮铁路系统与技术[M].北京:中国科技出版社,2003
[6] 时瑾.高速常导磁浮交通车辆一线路动力响应研究[D].北京:北京交通大学,2006
[7] 姚金斌.中低速磁浮交通线路最小平曲线半径的合理取值[J].都市快轨交通,2007,20(6):17-20

(编辑:郝京红)

Influence Factors of Circular Curve Parameters on Medium and Low Speed Maglev System

Shi Jn Wei Qingchao Bao Fengqi

(Beijing Jiaotong University Beijing 100044)

Abstract: One basic requirement of railway line design is to choose the suitable match between vehicle and track. Based on the analysis of train-track relation of medium and low speed maglev, the paper studies the levitation variation when the train passes a circular curve and analyzes the match relationship between bogies and geometry of a circular curve with vehicle component deviations, levitation variations, spring deformations computed and the appropriate value of minimum circular curve radius obtained. This provides theoretical support to choose design parameters of medium and low speed maglev.

Key words: urban rail transit; medium and low speed maglev; guideway; kinematics; circular curve; geometrical relation