

160 km/h 中低速磁浮交通轨靴受流仿真研究

黄冬亮

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//工程师)

摘要 中低速磁浮交通的车辆牵引供电采用正负极接触轨侧部受流方式。目前,国内中低速磁浮交通最高时速为100 km/h,鉴于磁浮交通作为主城通往市郊的连接线或旅游专用线的重要交通工具,需具备更高时速要求。而接触轨作为唯一和磁浮列车接触的设备,其在满足受流需求下,还应具备高的可靠性。研究采用 ANSYS 软件建模,搭建接触轨、受流靴仿真模型,受流靴按仿真设定车速运行,完成接触过程的仿真研究,得出轨靴动态接触压力仿真数据,为中低速磁浮列车进一步提速到160 km/h 提供轨靴受流适应性理论基础。

关键词 中低速磁浮列车;受流靴;接触轨;接触压力

中图分类号 U237.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.01.036

Current Collecting Simulation of 160 km/h Mid-low Speed Maglev Rail Collecting Shoe

HUANG Dongliang

Abstract The power supply of mid-low speed maglev traffic adopts the side current collection mode of positive and negative pole contact rail. At present, the highest speed of mid-low speed maglev traffic in China is about 100 km/h. As an important means of transportation between the main city and suburbs, or for the tourism purpose, maglev train needs to run at a higher speed. Being the only equipment in contact with maglev train, the contact rail should not only meet the demands of current supply, but also have high reliability. In this study, ANSYS software is used to build a simulation model of contact rail and current collecting shoe, the running speed of the latter is set by simulation. After the completion of contact process simulation, the dynamic contact pressure simulation data of rail and current collecting shoe are obtained, which provide a data basis of the adaptability theory for rail shoe current collection of the maglev train in further speed-up to 160 km/h.

Key words mid-low speed maglev; collecting shoe; contact rail; contact pressure

Author's address China Railway SIYUAN Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

长沙磁浮快线最高运行速度为100 km/h,为国内中低速磁浮交通项目中时速最高的。而中低速磁浮交通作为主城区与郊区的连接线或者旅游专用线,需要时速达到约160 km 才能满足其功能要求。作为与磁浮列车唯一有物理接触的设备,接触轨-受流靴(以下简为“轨-靴”)的动态接触性能改善是磁浮交通进一步提速的理论基础。

1 中低速磁浮技术特征及构成

磁浮列车具有低噪音、无污染、安全舒适和高速高效的特点,具有广阔的发展前景^[1-6]。

中低速磁浮系统一般采用短定子直线电机,其定子绕组安装在车体底部。通过向磁浮列车提供变压变频的电源,由车上的短定子产生行波磁场;轨道上安装了结构较为简单的长转子。这种结构多用于直线异步牵引电动机的驱动系统。

中低速磁浮系统主要由轨道梁、F 轨、感应板、接触轨、磁浮列车等组成,其中磁浮列车包含车本体、悬浮系统及推进系统等^[7-8]。

2 接触轨电压等级及受流方式

目前,国内已开通的长沙磁浮快线及北京地铁 S1 线,中低速磁浮接触轨系统电压标准值一般为 DC 1 500 V,最高电压标称值为 DC 1 800 V,最低电压标称值为 DC 1 000 V。

接触轨受流有上部受流、下部受流和侧部受流等方式。根据磁浮列车上下振幅较小、而横向位移较大的特点,采用侧部受流方式。

3 时速160 km 时的轨-靴动态仿真

3.1 仿真研究主要内容

1) 根据160 km/h 时速磁浮交通的运行要求,建立侧向受流刚性接触轨和受流靴的三维动力学仿真模型^[9-11]。

2) 利用该仿真模型对不同运行参数下侧向受

流的特性进行仿真计算。

3) 以接触轨支撑点跨距、平顺性、受流靴跟随性等为基础进行仿真计算,以对最高目标时速为 160 km 的磁浮交通轨-靴受流系统的适应性进行研究。

3.2 仿真研究的方法

研究主要方法包括:

1) 采用数值模拟的方法,来模拟轨-靴的动态相互作用过程。使用 ANSYS 有限元分析软件,模拟轨-靴模型的动态接触过程,建立参数化的数值模型。

2) 对轨-靴的实物做零件级检测,获得零件的动态参数,为轨-靴数值模型的建立提供依据。

3) 用参数化的轨-靴的耦合动力学仿真模型,运用基于时间历程的瞬态动力学分析方法,完成不同运行参数下轨-靴的仿真分析。

3.3 仿真模型的建立

本次研究的磁浮列车,采用了轨-靴的受流方式。由于需要考虑轨面扭转及不平顺等因素的影响,因而不能将接触轨和受流靴简化为一维单元。本次仿真采用了 ANSYS 单元库中的面-面(Surface-to-Surface)接触单元。

与点-面(Point-to-Surface)接触单元相比,面-面接触单元有如下特点:

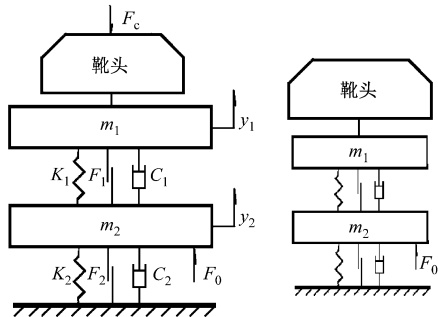
- 1) 可支持低阶单元和高阶单元;
- 2) 可支持有大滑动和摩擦的大变形,以协调刚度矩阵计算,还可支持不对称刚度矩阵等的选项;
- 3) 能提供使工程计算更准确的单元接触结果,例如法向压力和摩擦应力;
- 4) 不限制刚体表面形状,刚体表面的光滑性不是必须的,允许有自然的或网格离散引起的表面不连续;
- 5) 与点-面接触单元相比,需要较多的接触单元,因而需要较大的磁盘空间和 CPU 时间;
- 6) 允许多种建模控制方式,例如:绑定接触、渐变初始渗透、目标面自动移动到初始接触、平移接触面等;
- 7) 支持死活单元。

3.3.1 建立受流靴模型

轨-靴耦合研究,需考虑轨面形状变化的影响,所以采用了面-面耦合方式。故受流靴模型必须包含受流靴靴头的形状特征。

根据动能相等的原理,计算出受流靴的归算质

量。考虑到受流靴的实际结构,将受流靴简化为 m_1 和 m_2 的两质量动力学模型,并增加了顶部的无质量靴头结构,如图 1 所示。



注: y_i 为 m_i 对应的位移; C_i 、 K_i 、 F_i 分别为 m_i 对应的阻尼、刚度、静态抬升力与干摩擦力; F_c 为接触压力; F_0 为静态抬升力

图 1 受流靴模型

在图 1 中, m_1 为靴头平动质量,包括靴头组件、靴头连接座和上下摆臂的部分当量质量; m_2 包括上下摆臂的部分当量质量及弹簧连接件质量。 m_1 可直接通过测量受流靴实物获得; m_2 需将转动惯量转换为平动当量质量,在本研究中通过在 Pro/Engineer Wildfire 4.0 软件模拟测量来获得。

质量块 m_1 和 m_2 为单节点单元,其动力学特征包括 3 个方向的位移自由度和 3 方向的转动自由度。在需要时,每个自由度的质量属性或转动惯量属性可以独立设定。

受流靴的运动微分方程为:

$$M_p \ddot{y}_p + C_p \dot{y}_p + K_p y_p = P_{cp} + F_p$$

式中:

M_p ——受流靴的质量矩阵;

C_p ——受流靴的阻尼矩阵;

K_p ——受流靴的刚度矩阵;

y_p ——受流靴的位移向量;

\dot{y}_p ——受流靴的速度向量;

\ddot{y}_p ——受流靴的加速度向量;

P_{cp} ——轨-靴接触压力向量;

F_p ——受流靴静态抬升力向量与干摩擦力向量。

对于图 2 所示模型,有

$$y_p = \{y_1 \quad y_2\}$$

$$\ddot{y}_p = \{\ddot{y}_1 \quad \ddot{y}_2\}$$

$$\dot{y}_p = \{\dot{y}_1 \quad \dot{y}_2\}$$

$$M_p = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$$

$$C_p = \begin{bmatrix} C_1 & -C_1 \\ -C_1 & C_1 + C_2 \end{bmatrix}$$

$$K_p = \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 \\ -K_1 & K_1 + K_2 \end{bmatrix}$$

$$P_{cp} = \{-F_c \quad 0\}$$

$$F_p = \{-F_1 \quad -F_2 + F_1 + F_0\}$$

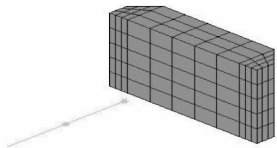


图2 受流靴的两质量/靴头有限元模型

3.3.2 建立接触轨模型

接触轨使用国内运用较多的钢铝复合轨模型,如图3所示。

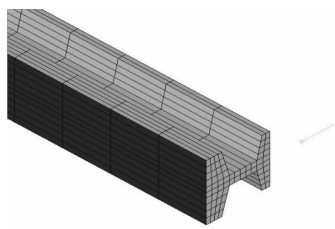
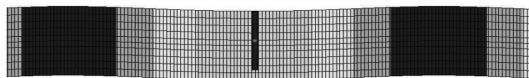


图3 接触轨模型

接触轨由于自身重量,会在跨中产生下垂。在下接触式受流方案中,接触轨下垂方向与受流靴振动方向相同,会成为轨-靴接触力的周期位移激励。在侧向接触式受流方案中,接触轨下垂方向与受流靴振动方向垂直,会在一跨接触轨的移动过程中,使受流靴靴头的中心线与接触轨中心轨迹产生偏差(如图4所示)。



变形/mm
-0.017 631 -0.013 586 -0.009 541 -0.005 496 -0.001 450
-0.015 608 -0.011 563 -0.007 518 -0.003 473 0.000 572

图4 侧向受流接触轨受流靴运行至接触轨跨中的变形

3.3.3 构成轨-靴耦合模型

将受流靴模型与三维接触轨模型使用接触单元耦合,构成三维轨-靴耦合模型(如图5所示),用于对轨-靴相互作用的动力学分析。

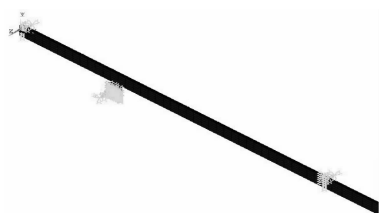


图5 轨-靴耦合模型

3.4 仿真计算

轨-靴耦合模型的仿真计算在ANSYS平台上完成。仿真采用瞬态动力学计算模式。计算过程模拟了实际的轨-靴运行过程,并沿时间轴完成。

轨-靴耦合模型在计算初始处于分离状态。受流靴初始位置位于距接触轨起始第一支持结构1.0 m处,受流靴靴头与接触轨轨面间距为0.1 m;受流靴施加抬升力并向接触轨移动,靴头与轨面接触;受流靴按仿真车速沿轨道方向整体平动,完成仿真计算。

根据磁浮列车运行中列车横向位移对轨/靴动态接触运行的影响,本次仿真计算在磁浮列车上施加了2 Hz的车体振动,并在受流靴基体水平方向规定了10 mm的车体摆动边界位移量(见图6)。

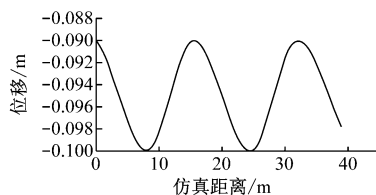


图6 受流靴基座频率为2 Hz的振动位移

3.5 仿真计算结果

在轨-靴耦合模型的计算工况一中,接触轨支撑点跨距取3.0 m,接触轨不平顺取 ± 2.0 mm,车速取160 km/h。工况一的仿真结果见图7。

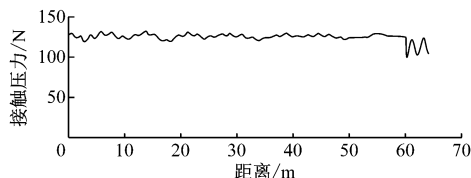


图7 工况一的轨-靴动态接触压力曲线

在轨-靴耦合模型的计算工况二中,接触轨支撑点跨距取4.0 m,接触轨不平顺取 ± 3.0 mm,车速取160 km/h。工况二的仿真结果见图8。

仿真结果显示,接触轨支撑点跨距和接触轨不平顺对轨-靴授流有影响。在160 km/h的仿真车速

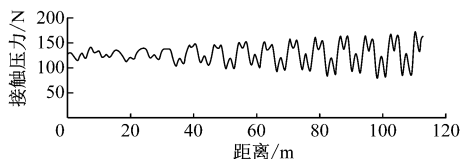


图8 工况二的轨-靴动态接触压力曲线

下,工况二的轨-靴动态接触压力标准差明显高于工

况一。

不同仿真工况下,轨-靴动态接触压力为 50 ~ 200 N。参考 TB 10009—2016《铁路电力牵引供电设计规范》要求,最小动态接触压力大于 0,轨-靴之间没有出现离线状况,磁浮列车能持续稳定地受流运行。

4 结语

利用面-面接触单元,可将三维接触轨有限元模型和三维受流靴模型构成轨-靴耦合有限元模型,以用于轨-靴相互作用研究。

本研究仅基于零件测试数据和仿真数值模拟,建议后续研究进一步开展线路轨-靴实测试验验证。

参考文献

[1] 祝嫣然. 磁浮交通再升温“中低速”不低调 [J]. 城市轨道交通研究,2017 (4):16.

[2] 胡基士. EMS 型磁浮列车悬浮力分析[J]. 西南交通大学学报 (自然科学版),2001(1): 44.

[3] 王素玉,王家素,张庆福,等. 超导磁浮列车的研究与发展 [J]. 低温与超导,1995(4):1.

[4] 李强北. 国外磁浮列车述评 [J]. 国外铁道车辆,1996(4): 1.

[5] 吴祥明. 磁浮列车 [M]. 上海:上海科学技术出版社,2003.

[6] 李希宁,佟来生. 中低速磁浮列车技术研究发展 [J]. 电力机车与城轨车辆,2011(2):1.

[7] 叶玉萍,赵青. 北京市轨道交通房山线直流牵引供电接触轨系统设计 [J]. 铁道标准设计,2011 (1):47.

[8] 周琳. 唐山中低速磁浮既有试验线供电轨改造——钢铝复合接触轨更换的工程实践 [J]. 现代城市轨道交通,2012(2):28.

[9] 刘德生,李杰,常文森. EMS 型磁浮列车模块的运动耦合研究 [J]. 铁道学报,2006(3):22.

[10] 赵春发,翟婉明,王其昌. 低速磁浮列车曲线通过动态响应仿真分析 [J]. 中国铁道科学,2005(3):94.

[11] 谢云德. EMS 型磁浮列车系统动力学建模与仿真的研究 [D]. 长沙:国防科技大学,1998.

(收稿日期:2018-12-26)

(上接第 150 页)

3.4 故障场景试验

1) 蠕动模式。FAM 模式下,列车发生 ATO 与车辆接口故障或 ATO 故障时,控制列车低速运行至目标停车点。通过中央控制中心 ATS(列车自动监控)向故障列车发布蠕动模式命令即可启动车载 ATC 与列车的应急硬线控制通道,列车此时将以低于 20 km/h 的速度运行至计划中的下一个停车点。

2) 车门、屏蔽门对位隔离功能。列车如果在进站前收到车门或屏蔽门的故障信息,列车到站对位后,对应的屏蔽门或车门则保持关闭,不会打开。

3) EB(紧急制动)缓解。列车运行中,如因故障等原因触发紧急制动,若触发紧急制动的原因消失,则 EB 自动缓解。

4) 远程重启车载 ATC。OCC(运营控制中心)操作人员对故障列车可远程进行重启 ATC 的操作。

4 结语

通过对车南京浦镇车辆有限公司既有 GoA0 等级试验线的升级改造,大大提升了该试验线的综合试验能力。该试验线可进行车辆出厂前全自动运行信号系统的综合试验;可提高车辆与信号系统接口问题的解决效率,减少车辆交付后的正线运营调试周期。该试验线为我国全自动无人驾驶系统及技术的应用与推广创造了示范性的成功案例。

参考文献

[1] 李宜芳. 全自动无人驾驶车辆段设计 [J]. 市政技术,2015(增刊2):62.

[2] 王都,孙宁,周兴无. 轨道交通综合试验系统的规划研究 [J]. 中国铁道科学,2007,28(1):131.

[3] 李洁. 简谈全自动无人驾驶系统车辆段/停车场信号系统设计 [J]. 铁路通信信号工程技术,2017(14):48.

(收稿日期:2018-04-29)