DOI: 10.3901/JME.2013.10.008

直线电动机地铁线路感应板安装公差研究*

熊嘉阳^{1,2} 吴磊² 曹亚博¹ 李伟¹ 邓铁松¹

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;

2. 西南交通大学峨眉校区机械工程系 峨眉 614202)

摘要: 直线电动机地铁线路的感应板安装公差是影响转向架下直线电动机感应线圈与道床上感应板间作用距离(电动机气隙)的一个重要参数,采用铁道车辆-轨道耦合系统动力学理论,建立直线电动机地铁车辆-轨道耦合系统动力学模型,调查感应板安装公差的车辆动力学性能影响。在动力学模型中,采用多刚体模拟车辆系统,其由车体、构架、轮对和感应线圈构成,它们之间的连接构件用等效线性弹簧阻尼单元模拟;把轨道系统考虑为柔性结构,包括钢轨、轨道板及道床上表面的感应板,钢轨与轨道板、感应板与轨道板间的连接装置被简化为等效的线性弹簧阻尼单元。应用上述模型,研究在轨道线路不平顺激励作用下,直线电动机不同气隙初始值与感应板安装公差之间的关系。分析直线电动机地铁车辆运行过程中的轮轨力、脱轨系数和电动机气隙的变化规律。

关键词: 直线电动机 感应板 安装公差 电动机气隙 车辆轨道耦合动力学模型

中图分类号: U270

Study on Reaction Plate Installation Tolerance of Metro with Linear Induction Motors

XIONG Jiayang^{1,2} WU Lei² CAO Yabo¹ LI Wei¹ DENG Tiesong¹

(1. Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2. Department of Mechanical Engineering, Emei Campus of Southwest Jiaotong University, Emei 614202)

Abstract: The installation tolerance of reaction plate on a linear induction motor(LIM) metro track is a key parameter having a great influence on the interaction of the LIM rotor hanging from the bogies and the reaction plate(RP) on the track slab, based on the coupling vehicle-track system dynamic theory, a new model of vehicle-track coupling dynamic system considering the LIM behavior is developed to investigate the influence mentioned above. In this model, the vehicle subsystem is treated as a rigid multi-body system, considering a carbody, two bogies, four wheelsets and two LIM, which are connected with equivalent linear spring-damp systems. The track subsystem is considered as an elastic structure, consisting of rails, slab and the RP, the link between rails and slabs, slabs and RP is also treated as equivalent linear spring-damp system. Using this dynamics model the effect of the installment tolerance of the RP on the gap and interaction of the LIM rotor and the RP are analyzed, in which the track irregularities are simultaneously considered. The analyzed dynamical behavior includes the dynamic wheel-rail forces, derailment coefficient and the instant gap variation.

Key words: Linear induction motor(LIM) Reaction plate(RP) Installation tolerance Air gap of the motor
Coupling vehicle-track dynamics model

0 前言

与传统轮轨粘着驱动不同,直线电动机地铁车辆使用转向架下感应线圈与轨道上感应板之间的电磁作用力作为驱动和制动力。感应线圈与感应板间

的距离简称为直线电动机气隙,直线电动机气隙大小对车辆的运行性能有重要影响,需要将其控制到毫米级精度,数值范围为8~12 mm。线路不平顺和感应板上表面高度变化均会影响电动机气隙,进而影响电动机的牵引效率和车辆的动态性能。其中,线路不平顺体现在钢轨沿纵向的起伏和轨距的波动上,感应板表面高度变化受到它的初始安装公差、运营过程中的自身位形变化和轮轨不平顺等影响。

* 国家自然科学基金(51105318)、教育部创新团队(IRT1178, SWJTU12ZT01)和四川省科技支撑计划(2011GZ0090)资助项目。
20121201收到初稿,20130402收到修改稿

感应板安装公差范围直接关系到直线电动机地铁线路的施工难易程度和工程造价,公差范围变大,施工难度减小,工程造价降低。另外,如前面所述,感应板安装公差还直接影响电动机气隙波动,特别是在线路不平顺的复合作用下,电动机气隙变化范围更大,当电动机气隙变小时,感应线圈与感应板间易出现碰撞接触的可能性大大增加,需要对这种现象进行严格控制。另外,电动机气隙变大时,直线电动机的牵引性能下降,不利于提高能效,造成能源浪费。综上,有必要对感应板安装公差的影响进行研究。

研究电动机气隙的方法主要有试验法和数值法两种。日本和加拿大对直线电动机轮轨交通的研究较早,文献[1-2]对直线电动机车辆动力学问题进行了初步介绍,文献[3]分析了直线电动机轮轨车辆的控制问题。文献[4]研究了迫导向转向架直线电动机轮轨车辆的曲线通过性能。文献[5]综合考虑车辆-轨道相互作用,研究直线电动机线路的垂向动力特性,并对电动机气隙和电动机荷载在轮轨间的分布规律进行了探讨。文献[6]根据试验数据,对直线电动机轮轨车辆的电动机三维电磁力做了定性分析,为车辆-轨道动力学中的磁轨关系提供依据。文献[7]对直线电动机轮轨交通的电动机气隙及轨道平顺性进行了试验研究。文献[8]应用车辆-轨道系统动力学研究方法,分析了直线电动机地铁车辆车轮多边形对车辆-轨道运行性能的影响。

虽然感应板安装公差是十分重要的指标,但上述关于直线电动机车辆-轨道的研究没有涉及感应板安装公差的影响。为了调查感应板安装公差的影响,本文采用铁道车辆-轨道耦合系统动力学理论,建立直线电动机地铁车辆-轨道耦合系统动力学模型。在动力学模型中,车辆系统模型考虑了车体、构架、轮对、感应线圈以及它们之间的连接装置构成,采用多刚体模拟;把轨道子系统考虑为柔性结构,包括钢轨、轨道板和道床表面中央的感应板构成,钢轨与轨道板、感应板与轨道板间的连接装置被简化为等效的弹簧阻尼单元。应用上述模型,分析了轨道线路不平顺的激励作用下,不同的电动机气隙初始值与感应板安装公差之间的关系。

1 数学模型

依据铁道车辆-轨道耦合系统动力学理论,建立直线电动机地铁车辆-板式整体轨道耦合系统动力

学模型。车辆子系统包括车体、两个构件、四个轮对和两个轴悬式直线电动机感应线圈共九个刚体,考虑每个刚体的沉浮、横移、点头、摇头和侧滚自由度。钢轨用考虑垂向、横向和侧滚自由度的铁木辛柯梁模拟,轨道板用三维实体有限元模拟。考虑轮轨和直线电动机磁轨两种耦合关系。

1.1 车辆子系统

通常,研究车辆子系统的动力响应时忽略制动、车间连接和车辆内部设施的影响,将车辆子系统重新划分为车体、构架和轮对三类子结构。对于直线电动机地铁车辆,还须考虑转向架下的感应线圈,车辆子系统模型的端视图如图 1 所示,其中 m_c 为车体质量; m_t 为构架质量; m_w 为轮轨质量; i_{cx} 为车体侧滚惯量; i_{tx} 为构架侧滚惯量; i_{wx} 为轮对侧滚惯量; k_{sy} 为二系悬挂横向刚度; k_{sz} 为二系悬挂垂向刚度; c_{sy} 为二系悬挂横向阻尼; c_{sz} 为二系悬挂垂向阻尼; k_{py} 为一系悬挂横向刚度; k_{pz} 为一系悬挂垂向刚度; c_{py} 为一系悬挂横向阻尼; c_{pz} 为一系悬挂垂向阻尼,详细的动力学方程参考文献[9]。

图 1 车辆子系统动力学模型

1.2 轨道子系统

轨道子系统动力学模型如图 2 所示,由钢轨、轨道板和感应板构成。考虑钢轨的垂向、横向和侧滚自由度,用简支铁木辛柯梁模拟,采用模态叠加法求解钢轨的动力学方程,详细的公式推导见文献[10]。

用三维实体有限元法模拟轨道板的动力学行为,采用模态叠加法求解动力学方程;求解轨道板的动力学方程时,首先用大型商用有限元分析软件计算轨道板的振形和频率,然后根据模态叠加法基本原理进行求解,详细推导过程见文献[9]。

图2 轨道子系统动力学模型

只考虑感应板的垂向运动，用自由欧拉梁模拟它，同样是采用模态叠加法求解相应的动力学方程，详细公式推导见文献[8]。

1.3 耦合关系

直线电动机地铁车辆行为研究除了要考虑车轮与钢轨间的耦合关系外还要考虑感应线圈与感应板间的耦合作用。处理轮轨耦合作用时，首先用 Hertz 理论求解轮轨法向作用力，然后用 Kalker 理论对切向力进行预测，最后用沈氏理论对切向力进行非线性修正，详细实现过程见文献[11]。

车辆与轨道的另一个相互作用关系为直线电动机的磁轨耦合作用。磁轨耦合体现在感应线圈与感应板间电磁力的大小和分布上，参考文献[12]给出的电磁力与气隙表达式，电磁力线密度与气隙的关系为

$$f(\delta(x,t)) = \frac{(A_2\delta(x,t)^2 + A_1\delta(x,t) + A_0)}{2l_{\text{limG}}} \quad (1)$$

式中， $f(\delta)$ 为电磁力密度； $\delta(x,t)$ 为气隙分布(x, t 分别为纵向坐标和时间)；参数 A_2 、 A_1 和 A_0 分别为 0.122 69、-3.431 1 和 54.006； l_{limG} 为感应线圈长度。

2 计算与分析

利用前面介绍的直线电动机地铁车辆-轨道耦合系统动力学模型，计算了车辆运行速度为 80 km/h 时，在轨道线路不平顺激励作用下，不同的电动机气隙初始值、不同的感应板安装公差范围内，轮轨力、脱轨系数和电动机气隙的变化规律。线路不平顺数据如图 3 所示。

电动机气隙初始值考虑 8、10、12 和 14 mm 这四种情况，感应板安装公差考虑 -4.5~1.5、-3~1.0 和 -1.5~0.5 mm 这三种情况。

2.1 感应板公差变化的影响

研究感应板安装公差的影响时，取电动机气隙初始值为 10 mm，感应板安装公差为 -4.5~1.5、-3~1.0 和 -1.5~0.5 mm 这三种情况。

图 4 所示为轮轨垂向力变化率与感应板安装公差间的关系。

图3 线路不平顺

轮轨力变化率是反映轨道激励作用下轮轨相互作用强度的指标，其表达式为

$$\frac{F_{\max} - F_{\min}}{\bar{F}} \times 100\% \quad (2)$$

式中， $F_{\max}$ 为轮轨力最大值， $F_{\min}$ 为轮轨力最小值， $\bar{F}$ 为无轨道不平顺激励作用时轮轨力。从图 4 中轮轨力变化率趋势可知，感应板安装公差范围越大，轮轨相互作用越剧烈。但是，在现有的三种安装公差范围内，垂向轮轨力变化率也不到 10%。

图4 轮轨垂向力变化率与感应板安装公差间的关系

图 5 所示为三种感应板安装公差范围内，脱轨系数的变化规律。由图 5 中的数据可知，在本节计算的工况中，感应板安装公差对车辆运行的重要安全指标脱轨系数的影响很小，几乎可以忽略。

图5 脱轨系数与感应板安装公差间的关系

电动机气隙直接影响电动机牵引效率。另外,当气隙过小时,转向架下的感应线圈与轨道上的感应板就容易发生碰撞,损伤车辆轨道部件,增加系统的运营维护成本,严重的情况会影响行车安全。用两个指标来评价电动机气隙变化,其一是电动机气隙变化量,用电动机气隙的最大值减去最小值来描述,这个数值可以间接反映电磁力的变化度;另外一个数值是电动机气隙最小值,它表征的是直线电动机感应线圈与感应板间的接近程度,直线电动机正常运行时,电动机气隙值为正。如果电动机气隙为零时,感应线圈与感应板出现接触现象。图 6 给出了电动机气隙与感应板安装公差间的关系。图 6a 中的电动机气隙变化量表明,感应板安装公差越大,电动机气隙变化量越大,另外,图 6b 中的电动机气隙最小值显示,感应板安装公差越大,电动机气隙的最小值也越小,出现感应线圈与感应板碰撞的可能性越大。

图6 电动机气隙与感应板安装公差间的关系

2.2 感应板初始气隙的影响

研究感应板初始气隙的影响时,取感应板安装公差为 $-3\sim 1$ mm,考虑电动机的初始气隙为 8 mm、10 mm、12 mm 和 14 mm 这四种情况。重点研究初始气隙对轮轨垂向力变化率、脱轨系数和电动机气隙的影响。

图 7 所示为直线电动机初始气隙对轮轨垂向力变化率的影响情况。数据显示,初始气隙越大,轮轨垂向力变化率越小。导致上述现象的原因是电动

图7 轮轨垂向力变化率与电动机初始气隙的关系

机初始气隙变大后,感应线圈与感应板间的电磁力变小,且电磁力随电动机气隙间的增大而按照级数规律减小。进而,电磁力越小,感应板安装公差的影响也就越小。

图 8 所示为电动机初始气隙与脱轨系数间的关系,图 8 的数据显示,在一定条件下,电动机初始气隙对脱轨系数的影响可以忽略。

图8 脱轨系数与电动机初始气隙的关系

图 9 所示为电动机初始气隙与电动机气隙间的关系。图 9a 中的气隙变化量表明,在一定条件下,电动机初始气隙越大,气隙变化量越小。图 9b 中的数据表明,初始气隙越大,气隙最小值越大,电动机越不容易出现碰撞。

2.3 感应板公差与初始气隙的关系

通过计算不同的电动机初始气隙和不同的感应板安装公差条件下轮轨垂向力变化率、脱轨系数和气隙变化来分析感应板安装公差和电动机初始气隙间的关系。其中,电动机初始气隙考虑 8 mm、10 mm、12 mm 和 14 mm 这四种情况。感应板安装公差考虑三种情况,它们分别为 $-1.5\sim 0.5$ mm、 $-3.0\sim 1.0$ mm、 $-4.5\sim 1.5$ mm。

图 10 所示为在不同的感应板安装公差和不同的电动机初始气隙条件下,轮轨垂向力变化率的变化规律。数据显示,电动机初始气隙越大,感应板安装公差越小(第 1 种),则轮轨垂向力变化率就越小,反之则越大。

(a) 电动机气隙变化量

(b) 电动机气隙最小值

图 9 电动机气隙与电动机初始气隙的关系

图 10 感应板公差与初始气隙对轮轨力变化率的影响

图 11 所示为在不同的感应板安装公差和不同的电动机初始气隙条件下,脱轨系数的变化规律。数据显示,在不同的感应板安装公差和不同的电动机初始气隙条件下,脱轨系数几乎保持不变。

图 12 所示为在不同的感应板安装公差和不同的电动机初始气隙条件下,电动机气隙的变化规律。图 12a 中的电动机气隙变化量表明,初始气隙越大,感应板安装公差越小(第 1 种),气隙变化量越小,反之则越大。图 12b 中的数据表明,初始气隙越小,感应板安装公差越大(第 3 种),气隙最小值就越小,越容易出现碰撞现象,反之则气隙最小值越大,越不容易发生碰撞。

图 11 感应板公差与初始气隙对脱轨系数的影响

(a) 电动机气隙变化量

(b) 电动机气隙最小值

图 12 感应板公差与初始气隙对电动机气隙的影响

3 结论

根据铁道车辆-轨道耦合系统动力学理论,建立直线电动机轮轨地铁车辆-轨道耦合系统动力学模型,探索感应板安装公差和电动机初始气隙对轮轨力变化率、脱轨系数和电动机气隙变化的影响,根据计算结果得出以下结论。

(1) 感应板安装公差越大,轮轨力变化率越大;电动机初始气隙越小,轮轨力变化率越大。

(2) 感应板安装公差和电动机初始气隙的变化对脱轨系数的影响很小。

(3) 感应板安装公差越大, 初始气隙越小, 电动机气隙变化量越大。然而, 电动机气隙变化量最大时, 电动机气隙的最小值也越小, 容易出现电动机线圈与感应板发生碰撞。

参 考 文 献

- [1] MAY C, GRAY L W. Vehicle structure for the intermediate capacity transit system vehicles[J]. Institution of Mechanical Engineers Conference Publications, 1985: 23-27.
- [2] MATSUMOTO A. Research & development of linear motor driven metro system[J]. Japanese Railway Engineering, 1988, 107: 8-11.
- [3] RUMSEY A, WALLACE A, JEFFRIES A. Propulsion and control consideration fro and intermediate capacity transit system[C]// IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1981: 274-277.
- [4] FORTIN C, JOSEPH A. Dynamic curving Simulation of forced-steering rail vehicles[D]. Kingston: Queen's University, 1985.
- [5] FATEMI M. Resilient cross-tie track for a transit guide way[D]. Kingston: Queen's University, 1993.
- [6] 庞绍煌, 耿明. 直线电动机在轨道车辆运用中的三维分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2004, 27(11): 31-33.
PANG Shaohuang, GENG Ming. Three-dimensional analyse of linear motor application on rail bound vehicles[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2004, 27(11): 31-33.
- [7] 夏景辉. 直线电动机轮轨交通气隙及轨道平顺性对系统动力响应影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
XIA Jinghui. Study on effects of the gap between LIM and RP and track irregularity on system dynamic response for linear metro[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [8] 李玲. 车轮多边形化对直线电动机车辆动力学行为的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
LI Ling. Influence of polygonal wheel of subway LIM train on dynamic behavior[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [9] 吴磊. 地铁车辆-钢弹簧浮置板轨道耦合动态行为的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
WU Lei. Study on coupling dynamic behavior of metro vehicles and track of steel spring floating slab[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [10] XIAO X B, JIN X S, WEN Z F. Effect of disabled fastening systems and ballast on vehicle derailment[J]. ASME Journal of Acoustic and Vibration, 2007, 129(2): 217-229.
- [11] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2007.
ZHAI Wanming. Vehicle-track coupling dynamics[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2007.
- [12] 顾戌华. 直线电动机列车-桥梁系统动力响应与车辆走行性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
GU Xuhua. Study on dynamic response of linear Induction motor train-bridge system and vehicle runability[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.

作者简介: 熊嘉阳(通信作者), 男, 1969 年出生, 博士研究生, 副教授。主要从事铁道车辆动力学研究。

E-mail: sunny-1996@163.com