

文章编号:1005-0523(2013)02-0058-05

永磁直驱柔性构架转向架的动力学模型研究

薛蔚,漆晖,任利惠,徐琪

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院,上海 201804)

摘要:永磁直驱柔性构架转向架是一种新型的地铁车辆转向架,具有结构简单、紧凑、曲线通过能力强等特点。使用Simpack软件建立了永磁直驱柔性构架转向架两种不同的动力学模型:构架集总参数的多刚体动力学模型和构架的刚柔体动力学模型。在构架集总参数模型中,将柔性构架视为两个通过多向弹簧连接的侧梁。在构架离散参数模型中,将柔性构架作为柔性体处理。仿真分析了装用永磁直驱柔性构架转向架的地铁车辆的蛇形运行临界速度、曲线通过安全性和运行平稳性。仿真结果表明:构架集总参数模型适用于优化柔性构架的刚度参数,进行脱轨安全性分析和车辆稳定性分析,而构架离散参数模型更适用于平稳性分析。

关键词:动力学;模型;构架;刚柔体

中图分类号:U270.11 **文献标志码:**A

1 永磁直驱柔性构架转向架

早期城轨车辆常采用直流电机来实现牵引系统。随着电力电子技术的进步,可变电压(variable voltage and variable frequency, VVVF)逆变器控制的异步电机牵引系统得到了广泛应用,替代了直流电机牵引系统。与直流电机相比,异步电机没有换向器,维修减少,同时可做到小型轻量化。近年来随着永磁材料成本的降低和性能的提高,永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)凭借其高效率和高功率密度的特点,引起了轨道车辆牵引系统开发者的密切关注^[1]。目前国内外从事轨道运输装备设计制造的公司,都已着手这方面的研发工作。在基本完成基础应用技术研究的基础上,大都正在进行或基本完成样机、样车的试验验证工作,并将进入工程和商业运作阶段。

永磁直驱柔性构架转向架融合了2项新技术:永磁直驱技术和柔性构架。永磁电机直驱技术采用了永磁电机抱轴式结构布置,取消了齿轮传递装置,由此减小了转向架的轴距,转向架轴距仅为1.6 m,大大地减小了通过小半径曲线的冲角,提高了曲线通过能力。柔性构架的抗扭转刚度很小,通过构架的弹性变形去适应适应顺坡和三角坑,具有质量小、简化一系悬挂等优点,非常适合用于地铁车辆。其设计方案见图1^[2]。

转向架一系悬挂采用平板橡胶弹簧定位结构,每个轴箱下安置2个矩形平板橡胶弹簧,由其提供一

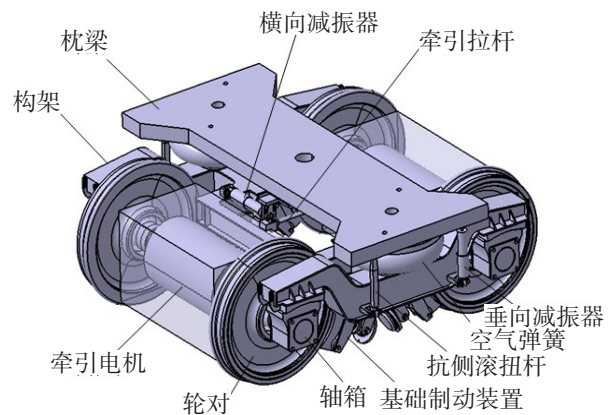


图1 抱轴式永磁同步电机柔性构架转向架设计方案
Fig.1 A design scheme of flexible frame bogie with axial PMSM

收稿日期:2013-03-12

基金项目:863计划基金项目(2011AA110501)

作者简介:薛蔚(1989—),男,硕士研究生,主要研究方向为车辆工程。

系悬挂的垂向刚度、纵向刚度和横向刚度。二系悬挂采用空气弹簧,空气弹簧设置于构架侧梁的中心位置,以减轻垂向偏载产生的构架应力。抗侧滚扭杠采用倒装方式。紧凑型的基础制动装置安装在辅助横向梁的下方。牵引装置采用上、下布置的电机拉杆牵引。上拉杆为Z字型的双拉杆,下拉杆为单根直拉杆。上拉杆一端连接在电机外壳上,另外一端固定在牵引销座上,回转中心在转向架的牵引销座。车体所受到的牵引力和制动力都不经过构架,直接由永磁同步电机通过牵引装置传递给车体。牵引装置同时还负责平衡前、后电机所受到的驱动反力矩。

转向架采用构架外置结构,留出整个轮对内侧空间,便于永磁电机的设计和安装。构架外置的好处还在于可以利用现有的轮对和轴承结构,便于安装和维护。转向架构架采用柔性结构。构架的侧梁为封闭的箱形结构,呈U型。构架的柔性主要由横梁提供,横梁由4块成平行布置的平板组成。在侧梁和横梁之间设置箱形结构的小横梁和纵向梁。

2 永磁直驱柔性构架转向架动力学模型

永磁直驱柔性构架转向架动力学模型的关键是如何处理柔性构架。采用两种柔性构架模型:集中参数模型和离散参数模型,并使用Simpack软件建立柔性构架转向架动力学模型^[3]。

2.1 构架集总参数的动力学模型

由于柔性构架的柔性主要由横梁提供,侧梁的刚度很大,因此可将构架的侧梁作为刚体对待。左、右2个侧梁通过具有6个方向刚度的弹簧元件连接,以模拟构架横梁的柔性。构架集总参数的动力学模型拓扑结构如图2所示。整个车辆动力学模型包括1个车体、4个构架侧梁、4个轮对、8个轴箱、4个抱轴电机和2个扭杠刚体,一系和二系悬挂系统用弹簧和阻尼等力元来模拟其作用,车辆系统自由度总共有56个自由度,以下称为刚体模型。

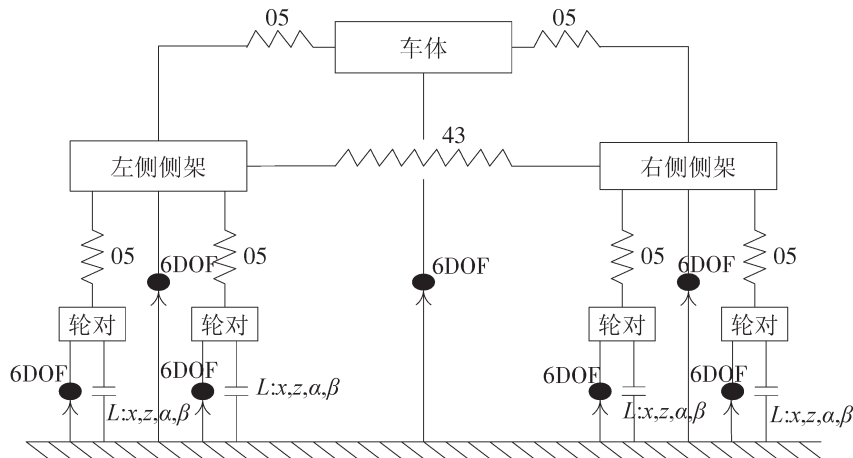


图2 Simpack中柔性构架转向架的拓扑结构图

Fig.2 The topological structure chart of flexible frame bogie at Simpack

图中的数字表示力元的类型^[4]。其中05表示的是并联的弹簧阻尼力元;43表示的是橡胶衬套力元;($L:x,z,\alpha,\beta$)表示约束的4个自由度, L 为约束方向;DOF为自由度。

左、右侧梁连接弹簧的 X 、 Y 、 Z 三个方向的线刚度和角刚度可通过有限元分析得到。连接弹簧的 X 方向线刚度的计算方法为:在构架一侧侧梁施加纵向约束,在构架另一侧侧梁施加纵向载荷 F_X ,通过有限元分析计算出两侧侧梁的纵向位移 ΔX_S ,从而得到 X 方向线刚度 K_X 。

X 方向线刚度的计算公式为

$$K_X = \frac{2F_X}{\Delta X_S} \quad (1)$$

X 方向线刚度直接反映了两侧梁之间的抗菱刚度。所谓抗菱刚度,就是左、右侧梁发生前后错动时受到的约束刚度,它等于施加的剪切力矩与两侧梁中心连线相对于原侧梁中心连线的转角(侧梁的菱形变位角)之比。

抗菱刚度 K_L 与 X 方向线刚度 K_X 的关系为

$$K_L = 4b^2 K_X \quad (2)$$

式中: b 为两侧梁横向间距之半。

连接弹簧的 Y 方向角刚度(扭曲刚度 K_W 的计算方法为:在构架一侧侧梁轴箱处施加纵向约束,在构架另一侧侧梁轴箱处施加反向垂向载荷 F_Z ,通过有限元分析计算出侧梁轴箱处的纵向位移 F_Z ,从而得到 X 方向线刚度。

Y 方向角刚度(扭曲刚度 K_W) 的计算公式为

$$K_W = \frac{F_Z S^2}{2\Delta Z_S} \quad (3)$$

式中: S 为轴距。

2.2 构架离散参数的动力学模型

构架离散参数模型中,将整个构架作为弹性体处理。首先有限元软件 ANSYS 中,采用 Guyan 缩减理论对柔性构架进行子结构分析,得到含有子结构缩减刚度矩阵和质量矩阵等结构信息,然后通过对柔性构架的子结构超单元进行模态分析,提取出模态频率和振型。将上述子结构分析的结果导入到 Simpack 软件中,从而建立刚柔耦合的车辆动力学模型^[5-6]。刚柔耦合动力学模型包括 1 个车体,4 个传统轮对,8 个轴箱,4 个抱轴电机和 2 个扭杆刚体,以及 2 个构架柔性体^[7]。

3 两种模型的仿真结果

3.1 临界速度

图 3 给出了刚体模型和刚柔耦合模型的蛇形运动临界速度,其中 Kalker 因子分别取 0.5, 0.75, 1 三种水平。从图中看出,刚体模型和刚柔耦合模型计算出的结果具有较好的一致性,当踏面等效斜率为 0.4 时,刚体模型计算出的临界速度为 $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,刚柔耦合模型的临界速度为 $106 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,刚柔耦合动力学模型的临界速度略高于多刚体模型。出现这种现象的原因是:构架集总模型中的多向弹簧 X 方向线刚度取比构架离散模型中所对应的 X 方向线刚度偏小。

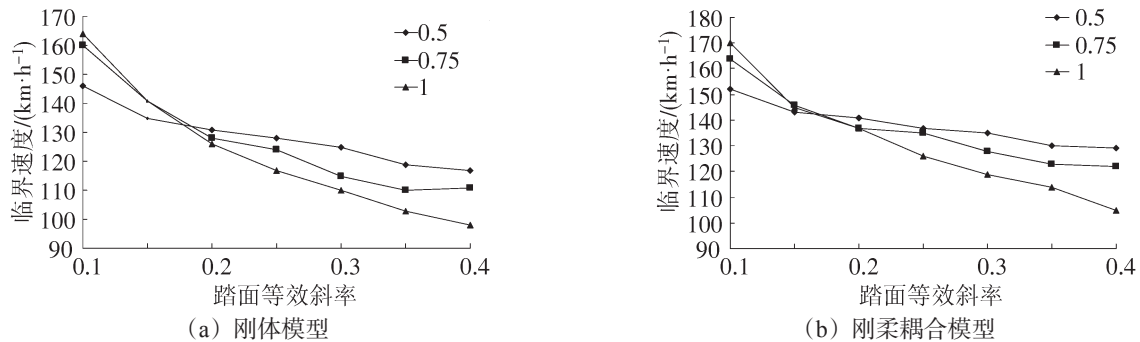


图 3 蛇形运动的临界速度
Fig.3 The critical velocity of hunting

3.2 脱轨安全性分析

脱轨安全性按照 EN14363 规定的试验线路计算^[8]。车轮踏面选为 LM(磨耗)型踏面。

图 4 给出了刚体模型和刚柔体模型仿真得到的脱轨系数。从图中看出,可以发现 2 个模型计算出的脱轨系数非常接近,刚柔体模型的脱轨系数略大于刚体模型,其中刚体模型计算出的脱轨系数最大值为

0.652,刚柔体模型计算出的脱轨系数最大值为0.672。

图5给出了刚体模型和刚柔体模型仿真得到的轮重减载率。从图中看出,可以发现2个模型计算出的轮重减载率非常接近,刚柔体模型的脱轨系数略大于刚体模型,其中刚体模型计算出的轮重减载率最大值为0.278,刚柔体模型计算出的脱轨系数最大值为0.279。

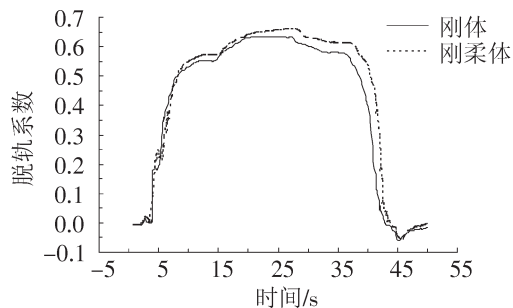


图4 脱轨系数
Fig.4 Derailment coefficient

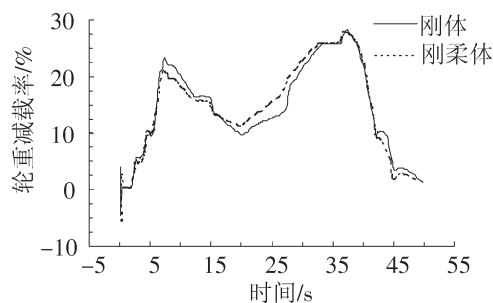


图5 轮重减载率
Fig.5 Rate of wheel load reduction

3.3 平稳性分析

选用美国5级轨道谱作为轨道激励输入。运行平稳性采用Sperling平稳性指标(无单位的常数)评估。采样点选取在转向架中心左侧1 m处的地板面上。

图6给出了刚体模型和刚柔耦合模型计算出的车体前端平稳性指标随速度的变化曲线。从图中看出,对于横向平稳性,由刚体模型和刚柔耦合模型计算值基本一样;对于垂向平稳性,刚柔耦合模型的计算值要大于多刚体模型的计算值,随着速度的提高,这种差异愈加明显。根据国内外的研究,当将车体和构架作为柔性体处理时,车辆的垂向平稳性要差于将其作为刚体处理的结果^[9]。因此,刚柔耦合模型计算更适合准确预测车辆的运行平稳性。

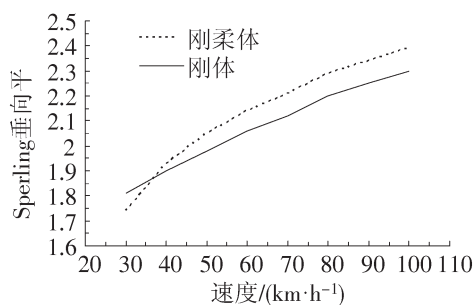
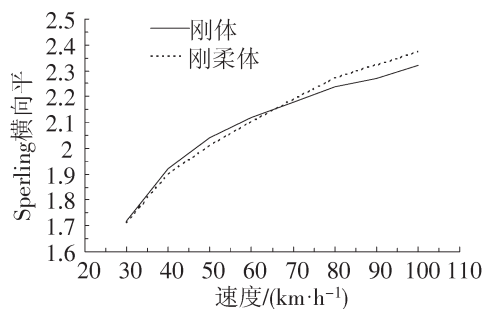


图6 车体运行平稳性指标
Fig.6 Ride comfort index of Sperling

4 结语

永磁直驱柔性构架转向架动力学模型的关键是柔性构架的处理。通过对比构架集总参数和构架离散参数的动力学模型仿真结果,可以得出以下结论:

1) 对于蛇形运动临界速度,由构架集总参数和构架离散参数模型计算得到的值基本相等;对于曲线通过的安全性指标,两种模型计算得到的值也基本相等;对于横向运行平稳性指标,2种模型计算得到的值也基本相等,但垂向运行平稳性指标存在较大差异。

2) 柔性构架集总参数的动力学模型,可用于分析柔性构架的各向刚度对运行稳定性和曲线通过安全性的影响,适用于柔性构架的参数优化;柔性构架离散参数的动力学模型适宜准确预测车辆的运行平稳性。

参考文献:

- [1] 徐英雷,李群湛,许峻峰,等. 城轨车辆永磁同步电机牵引系统研究现状与发展前景[J]. 电机与控制,2009,36(5):7-10.
- [2] 赵洪伦. 轨道车辆结构与设计[M]. 北京:中国铁道出版社,2009:59-86.
- [3] 王渤洪. 创新的直接传动动力转向架 Syntegra[J]. 机车电传动,2007(2):44-51.
- [4] 漆晖,孙继武,伍智敏. 新型永磁直驱式柔性构架转向架研究[J]. 佳木斯大学学报:自然科学版,2012,30(1):53-56.
- [5] 雷晓燕. 轨道动力学模型与数值方法研究进展 [J]. 华东交通大学学报,2011,28(3):1-12.
- [6] 缪炳荣,罗仁,王哲,等. Simpack动力学分析高级教程(轨道车辆)[M]. 成都:西南交大出版社,2010:271-288.
- [7] KAWAI HIROTOSHI. Permanent-magnet synchronous motor propulsion system for Tokyo metro ginza line trains [J]. TOSHIBA Review,2008,63(6):78-94.
- [8] PREN. Railway applications testing for acceptance of running characteristics of railway vehicles-Testing of running behaviour and stationary tests[S]. Europe:CEN Europaisches Komitee fur Normung CEN European,2005.
- [9] 周劲松,宫岛,孙文静,等. 铁道客车车体垂向弹性对运行平稳性的影响[J]. 铁道学报,2009,31(2):32-37.

Study on Dynamic Model for Flexible Frame Bogie with PMSM

Xue Wei, Qi Hui, Ren Lihui, Xu Qi

(Institute of Railway and Urban Mass Transit, Tongji university, Shanghai 201804, China)

Abstract: This paper introduces a new flexible frame bogie with PMSM, which is characterized by the simple structure and good curve passing performance. Two dynamic models of flexible frame bogie with PMSM are built by Simpack software. In the first model, the flexible frame is treated as two rigid side beams which are linked by a multi-direction spring. In the second, the whole flexible frame is treated as a flexible body. The simulation results show that the rigid model is suitable for analyzing hunting stability and derail safety, as well as optimizing stiffness parameters of flexible frame, while the rigid-flexible model is suitable for calculating ride quality accurately.

Key words: dynamics; model; bogie frame; rigid-flexible body