

直线电机车辆机电动力学模型的构建与分析^①

姚代祯^② 闫 军^③ 李炳震

(内蒙古工业大学机械工程学院 呼和浩特 010051)

摘 要 基于直线电机车辆的基本结构及工作原理,利用拉格朗日-麦克斯韦方程,从机械与电磁能量层面进行了直线电机车辆系统机电动力学模型的构建。分析了车辆系统机械部件及电磁部分的相互作用规律,并推导了相关微分方程。根据 Clark 变换,将所得的三相坐标系模型简化为两相坐标系模型。应用 Matlab 求解及仿真,得到相关参数的变化规律。以此方法建立直线电机车辆的机电动力学模型,简单有效地解决了相关的机电动力学问题。

关键词 直线电机车辆;机电动力学;拉格朗日-麦克斯韦方程;仿真;Matlab

0 引 言

轨道交通在现代化城市中扮演着极其重要的角色,是整个城市是否活跃的重要标志,它的运行平稳性及安全性是衡量它是否能够正常服役的决定性因素。直线电机地铁车辆以其独特的工作原理及相比于传统旋转电机车辆的巨大优势,越来越具有发展潜力。

直线电机车辆系统是一个复杂且强耦合的电磁机械系统,其中涉及了诸多学科的理论知识,包括了电磁学和力学以及其演变的交叉学科,想要综合考虑每个环节是很困难的。而机电耦合动力学则是将这些因素巧妙合理地结合起来^[1,2]。利用拉格朗日-麦克斯韦方程,从机械与电磁能量层面进行模型建立,分析车辆机械部件及电磁部分的相互作用规律。通过 Matlab 软件进行模型求解,得到相关参数的变化规律,以此来判断车辆的运行状况,从而分析出车辆服役时的运行安全性及平稳性^[3]。

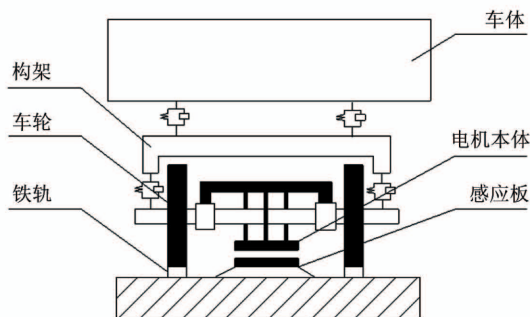
1 直线电机车辆的基本结构及工作原理

大中运量直线电机地铁车辆通常采用 4 节或 6 节车编组,由 A 车和 B 车组成^[4]。该类车辆通常使用二轴转向架,电机的安装及悬挂方式相对复杂,主要通过吊杆将电机悬挂于转向架或车轴上^[5,6]。图 1 为某直线电机车辆单台转向架模型的结构示意图,其中子图(a)为车辆的前视图,子图(b)为侧视图。

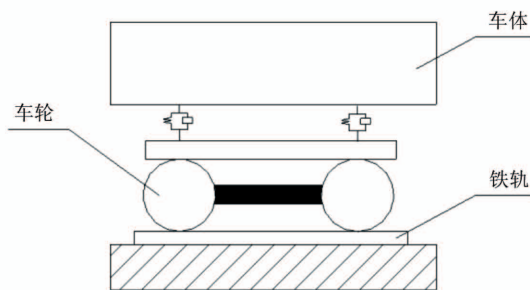
图 2 是直线电机车辆的驱动原理图。车辆启动时,电机动子产生相对于定子的推力,位于直线电机与车辆转向架构架之间的纵向牵引拉杆将此驱动力传递给车辆转向架,从而驱动整车运行。车轮只起到支撑车体及导向的作用,由此车辆才可以选择曲线通过能力更为优良的径向转向架^[7,8]。直线电机车辆的制动一般采用电气制动与摩擦制动相结合的方法,以电气制动为主,摩擦制动为辅,将车辆精确地停靠在站台内的规定位置^[9,10]。

本文所研究的直线电机车辆采用有摇枕、轴箱内置式转向架,驱动电机的悬挂方式为轴悬式,该车

① 国家自然科学基金(51865044),内蒙古自治区自然科学基金(2018LH05039),内蒙古自治区高等学校科学研究(NJZY17096)和内蒙古工业大学科学研究基金(ZD201602)资助项目。
② 男,1994 年生,硕士生;研究方向:机电动力学; E-mail: 2549441477@qq.com
③ 通信作者, E-mail: yan_jun11@163.com
(收稿日期:2020-07-13)



(a) 前视图



(b) 侧视图

图1 直线电机车辆单台转向架结构示意图

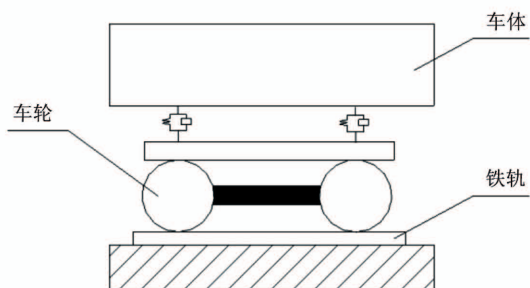


图2 直线电机车辆驱动原理示意图

辆共使用4台直线电机为整车提供动力,本文假设每台车辆电机都是同步的且提供相同的牵引力,故只对车辆的一个转向架模型即一台直线电机模型进行分析研究。

2 直线电机车辆的受力分析

直线电机车辆在运行状态下的受力分布如图3所示。

直线电机车辆由直线电机提供牵引力 F , 车辆整体还受钢轨的支撑力 N 、重力 G 以及运行时所受的阻力 F_D 作用。车辆运行时产生的阻力种类繁多, 其中最主要的是机械阻力 F_f 和空气阻力 F_d [11]。机

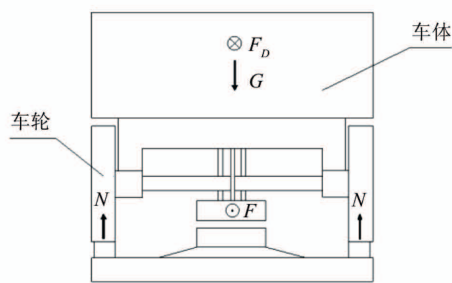


图3 直线电机车辆受力示意图

械阻力主要由轮轨之间的摩擦碰撞产生, 而气动阻力则与车辆的运行速度有关, 随着运行速度的提升, 气动阻力占总阻力的比重不断增加 [12]。以下是空气阻力的计算公式 [13]:

$$F_d = \frac{\rho \cdot S_c \cdot v^2 \cdot (C_d + \frac{\lambda}{d \cdot l})}{2} \quad (1)$$

式中 S_c 为车辆横截面积, v 为车辆运行速度, C_d 为气动阻力系数, λ 为综合水力摩擦系数, ρ 为空气密度, d 为车辆水力直径, l 为列车长度。

3 车辆机电动力学模型的建立

设整个直线电机车辆的质量为 M , 车轮、主轴的转动惯量为 J , 车轮半径为 R , x 为电机动子运动的距离, φ 为主轴转动的角度。

当车辆行驶时, 车辆的动能为

$$E_{k1} = \frac{1}{2} M \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} J \cdot \dot{\varphi}^2 \quad (2)$$

车辆的电磁能为

$$E_{k2} = \frac{1}{2} i_{abc}^T \cdot L_s \cdot i_{abc} + i_{abc}^T \cdot \psi_f \quad (3)$$

式中 i_{abc} 为电机三相交流电流, ψ_f 为电机磁链, L_s 为电机电感。

由式(2)和式(3)相加可得到拉格朗日函数 L 为

$$L = \frac{1}{2} M \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} J \cdot \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} i_{abc}^T \cdot L_s \cdot i_{abc} + i_{abc}^T \cdot \psi_f \quad (4)$$

耗散函数 F 为

$$F = \frac{1}{2} i_{abc}^T \cdot R_s \cdot i_{abc} + \frac{1}{2} D \cdot \dot{x}^2 \quad (5)$$

式中 D 为粘滞摩擦系数, R_s 为电机绕组电阻。

拉格朗日-麦克斯韦方程为^[14]

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{e}_k}\right) - \frac{\partial L}{\partial e_k} + \frac{\partial F}{\partial \dot{e}_k} = U_k (k = 1, 2, 3, \dots, n) \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_j} = Q_j (j = 1, 2, 3, \dots, m) \end{cases} \quad (6)$$

通过拉格朗日-麦克斯韦方程式(6), 分别对式(4)和式(5)做如下求导计算。

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{e}} &= L_s \cdot i_{abc} + \psi_f; \quad \frac{\partial F}{\partial \dot{e}} = R_s \cdot i_{abc}; \\ \frac{\partial L}{\partial e} &= 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} &= \dot{x}\left(M + \frac{J}{R^2}\right); \quad \frac{\partial F}{\partial \dot{x}} = D\dot{x}; \\ \frac{\partial L}{\partial x} &= i_{abc}^T \frac{\partial L_s}{\partial x} i_{abc} + i_{abc}^T \frac{\partial \psi_f}{\partial x}; \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{e}}\right) &= \frac{d}{dt}(L_s \cdot i_{abc} + \psi_f) = \frac{d}{dt}(\psi_f); \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) &= \frac{d}{dt}\left(M \cdot \dot{x} + \frac{\dot{x}J}{R^2}\right) = \ddot{x}\left(M + \frac{J}{R^2}\right); \end{aligned}$$

将以上求导计算结果带入拉格朗日-麦克斯韦方程式(6)中, 可得:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(\psi_f) + R_s \cdot i_{abc} = U_{abc} \\ \left(M + \frac{J}{R^2}\right)\ddot{x} + D \cdot \dot{x} - \left(i_{abc}^T \frac{\partial L_s}{\partial x} i_{abc} + i_{abc}^T \frac{\partial \psi_f}{\partial x}\right) = Q \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)中三相坐标系模型下的磁链、电流、电压通过 Clark 及 Park 变换转换到两相坐标系模型, 可得^[15]:

$$\begin{cases} R_s \cdot i_d + L_d \cdot \dot{i}_d - \dot{x} \cdot L_q \cdot i_q = U_d \\ R_s \cdot i_q + L_q \cdot \dot{i}_q + \dot{x} \cdot L_d \cdot i_d + \psi_f \cdot \dot{x} = U_q \\ \left(M + \frac{J}{R^2}\right)\ddot{x} + D \cdot \dot{x} - \frac{3}{2}[i_q \cdot \psi_f + (L_d - L_q)i_d \cdot i_q] = Q \end{cases} \quad (8)$$

其中 Q 为广义力, 利用虚位移原理求得广义力 Q 所做的功:

$$\delta W = \delta x \cdot Q = \delta x \cdot F + \delta x \cdot F_d + \delta x \cdot F_f \quad (9)$$

可得到广义力:

$$Q = \frac{\delta W}{\delta x} = F + F_d + F_f \quad (10)$$

将式(1)带入式(10), 可得:

$$Q = F - \frac{\rho \cdot S_c \cdot v^2 \cdot (C_D + \frac{\lambda}{d \cdot l})}{2} - N \cdot \mu \quad (11)$$

式中 μ 为轮轨摩擦系数。再将式(11)带入式(8)可得到直线电机车辆系统机电动力学数学模型。

$$\begin{cases} R_s \cdot i_d + L_d \cdot \dot{i}_d - \dot{x} \cdot L_q \cdot i_q = U_d \\ R_s \cdot i_q + L_q \cdot \dot{i}_q + \dot{x} \cdot L_d \cdot i_d + \psi_f \cdot \dot{x} = U_q \\ \left(M + \frac{J}{R^2}\right)\ddot{x} + \frac{\rho \cdot S_c \cdot (C_D + \frac{\lambda}{d \cdot l})}{2} \dot{x}^2 + D \cdot \dot{x} - \frac{3}{2}[i_q \cdot \psi_f + (L_d - L_q)i_d \cdot i_q] + N \cdot \mu = F \end{cases} \quad (12)$$

4 机电动力学模型的仿真与分析

本文使用 $i_d = 0$ 的控制方法, 通过控制 q 轴电流即可控制驱动电机的电磁力。为验证所建数学模型的正确性, 本文通过下面的数据, 使用 Matlab 软件对该机电动力学模型进行仿真分析。涉及参数如表 1 ~ 表 3 所示。

将表 1、表 2 和表 3 的参数代入模型式(12)中, 式(13)可得。

$$\begin{cases} 1.5i_d + 0.033\dot{i}_d - 0.033\dot{x}i_q = U_d \\ 1.5i_q + 0.033\dot{i}_q + 0.033\dot{x}i_d + 0.607\dot{x} = U_q \\ 15474.967\ddot{x} + 0.33\dot{x}^2 + 1.2\dot{x} - 0.893i_q = 26260 \end{cases} \quad (13)$$

表 1 直线电机车辆参数

名称	参数
机车质量 M/kg	14 900
车轮转动惯量 $J/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	76.60
车轮半径 R/mm	365
供电电压 U/V	DC1500
轮轨间摩擦系数 μ	0.08
车辆长度 l/m	17
车辆宽度 w/m	2.89
车辆高度 h/m	3.625

表 2 直线电机参数

名称	参数
极对数 p	12
电器时间常数 t	21.9
粘滞摩擦系数 $D/\text{Ns/m}$	1.2
有效磁链 ψ_f/wb	0.607
动子电感 L/mH	33
电枢电阻 R_s/Ω	1.5
连续推力 F/N	5341
最大推力 F_M/N	12726
极距 τ/m	0.032

表 3 空气阻力的相关计算参数

名称	参数
水力直径 d/m	4.096
空气密度 $\rho/\text{kg/m}^3$	1.20
综合水力摩擦系数 λ	0.0116
气动阻力系数 C_D	0.0525
车辆横截面积 S_c/m^2	10.476

图 4 为车辆直线电机输出的电磁力随时间变化的关系曲线图,由图可以看出车辆刚启动时,电磁力较大,车辆启动后电磁力逐渐趋于稳定。

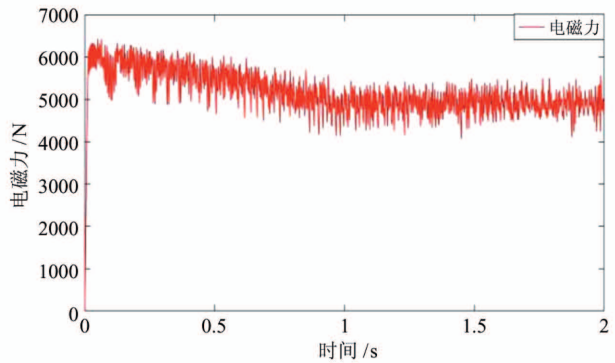


图 4 电磁力图

图 5 为车辆直线电机三相交流电流随时间变化的关系曲线图,可得出电机三相电流在正常范围内波动,符合规律。

图 6 为车辆直线电机交、直轴电流随时间变化的关系图,可知直轴电流在 0 附近波动,交轴电流逐渐趋于平稳,符合 $i_d = 0$ 的控制规律。

图 7 为车辆直线电机的动子加速度随时间的变化规律,车辆刚开始启动时加速度偏大,随之逐渐减小,最后趋于稳定。

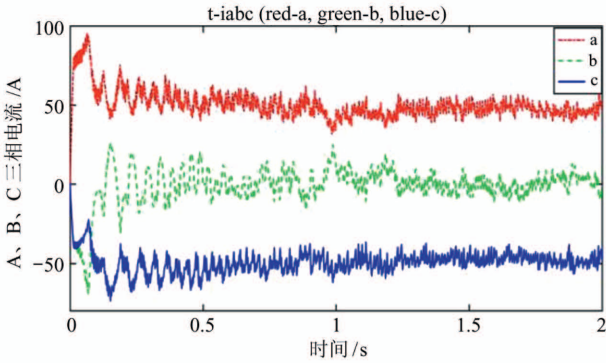


图 5 三相电流图

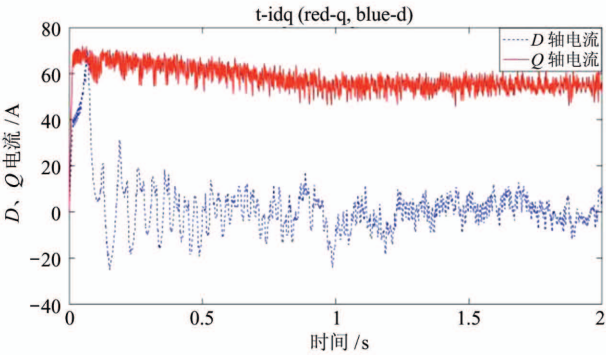


图 6 交、直轴电流图

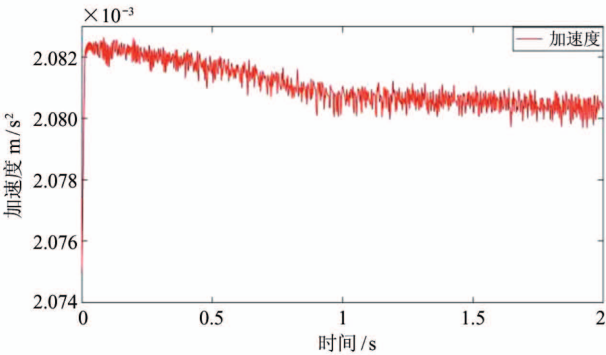


图 7 车辆电机动子加速度图

5 结 论

本文研究了直线电机车辆机电动力学模型的建立方法及仿真分析。分析了有摇枕、轴箱内置式车辆转向架的基本结构及工作原理,在此基础上应用拉格朗日-麦克斯韦方程构建出直线电机车辆的机电动力学模型。通过 Clark 变换简化该机电动力学模型,使用 Matlab 软件中的 ode45 函数求解微分方程组并对其进行仿真分析。根据仿真结果可以看出,车辆直线电机的电磁力、三相电流、交直轴电流

及加速度参数随时间的变化规律合理,建立该机电动力学模型的方法正确有效。

参考文献

[1] 闫军,李强,武建新. 变截面辊弯成型装备的机电动力学分析及其系统控制仿真[J]. 机械设计与制造, 2014(4):79-81, 84

[2] 张元元. 电驱动系统机电耦联动力学研究分析[J]. 黑龙江科技信息, 2016(32):76-76

[3] 闫军,姚代祯,周志霞. 电力机车机电动力学模型的构建与分析[J]. 高技术通讯, 2019, 29(6):602-606

[4] 朱士友. 城市轨道交通大中运量直线电机车辆运用与检修[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社, 2016:18-19

[5] 戴焕云. 直线电机转向架结构型式研究[J]. 内燃机车, 2008(12):1-5, 59

[6] 李磊. 直线电机地铁车辆系统动力学研究[D]. 北京:北京交通大学机械与电子控制工程学院, 2015:33-36

[7] 商佳园. 基于机电耦合的直线电机地铁车辆动力学性能研究[D]. 成都:西南交通大学机械工程学院, 2018:11-16

[8] 王晨,许自强,马卫华,等. 两种米轨机车转向架动力学性能分析[J]. 机械设计与制造, 2017(5):48-51

[9] 庞绍煌,耿明. 直线电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(1):31-33

[10] 徐菲菲. 地铁车辆制动能量回收利用研究[D]. 南京:东南大学电气工程学院, 2017:2-6

[11] Raghu S R, H. -D K, T S. Aerodynamics of high-speed railway train[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2002, 38(6):469-514

[12] 袁修法,林建辉. 直线电机驱动地铁车辆运行阻力试验研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2014, 32(3):387-389, 392

[13] 吴炜,高慧翔,彭金龙. 城市快速轨道交通空气动力学相关问题探讨[J]. 都市快轨交通, 2011, 24(2):63-67

[14] Yan J, Li Q, Zhou Z X. Electromechanical dynamics analysis and simulation on roll forming equipment with both sides variable cross-section[J]. *High Technology Letters*, 2016, 22(1):75-81

[15] 寇宝泉,程树康. 交流伺服电机及其控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2008:221-243

Construction and analysis of electromechanical dynamics model for linear motor vehicle

Yao Daizhen, Yan Jun, Li Bingzhen

(School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051)

Abstract

Based on the basic structure and working principle of linear motor vehicle, the electromechanical dynamics model of linear motor vehicle system is constructed from the mechanical and electromagnetic energy level by using the Lagrange-Maxwell equation. The interaction rule of mechanical components and electromagnetic parts of vehicle system is analyzed, and the related differential equations are derived. According to the Clark transform, the obtained three phase coordinate system model is simplified to two phase coordinate system model. The change rules of the relevant parameters are obtained by Matlab solving and simulating. The electromechanical dynamics model of the linear motor vehicle is established by this method, and the related electromechanical dynamics problems are solved simply and effectively.

Key words: linear motor vehicle, electromechanical dynamic, Iagrange-Maxwell equation, simulation, Matlab