

文章编号:1005-0523(2014)02-0068-04

# 高速弓网耦合系统动态仿真研究

刘仕兵, 汪媛

(华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**采用欧拉-伯努利梁结构的接触网和受电弓的二质量块模型建立了弓网垂直耦合动力学模型,通过拉格朗日方程推导出弓网系统运动微分方程组,并利用Newmark法编写数值仿真程序,在给定的条件下,讨论不同速度下弓网耦合系统的动态性能。采用MATLAB对高速受电弓与接触网的相互作用进行仿真并对结果进行分析,为研究不同速度下受电弓与接触网参数的优化奠定基础。

**关键词:**接触网;受电弓;数值仿真;接触压力

**中图分类号:**U225.3

**文献标志码:**A

高速运行的电力机车通过受电弓与接触网滑动接触取得电能,受电弓与接触网可靠地接触是保证高速受流的重要条件,电气化铁路要实现高速,就必须解决接触网与受电弓的相互匹配及对速度的适应问题。

本文建立基于二元弓的弓网耦合系统垂向动力学模型,利用Newmark法编写了数值仿真程序;研究了弓网动态性能与列车运行速度之间的关系,为优化弓网系统的结构参数提供依据。

## 1 接触线振动微分方程

接触网是沿铁路线上空架设的空间架空线结构,主要由承力索、接触线、定位装置、支柱和基础几部分组成<sup>[1]</sup>,接触网是具有一定抗弯刚度的线索结构,数值模拟仿真中的接触网有限元模型采用的是欧拉-伯努利梁来模拟<sup>[2]</sup>,其中接触线的运动方程为

$$m_c \frac{\partial^2 u_c}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} (EI_c \frac{\partial^2 u_c}{\partial x^2}) - \frac{\partial}{\partial x} (T_c \frac{\partial u_m}{\partial x}) + k_d (u_m - u_c) \delta(x - x_n) = P \delta(x - Vt) \quad (1)$$

式中:  $m_c$ ,  $u_c$ ,  $EI_c$ ,  $T_c$  分别代表接触线的单位质量,位移,抗弯刚度和张力;  $\delta$  为冲击函数;  $u_m$  是承力索的位移;  $k_d$  是吊弦刚度;  $x_n$  是吊弦离运动点处的距离;  $P$  是受电弓对接触网的接触压力;  $x$  是列车运行的位置;  $t$  是运动时间;  $V$  是列车运行速度。

承力索的运动方程为

$$m_m \frac{\partial^2 u_m}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} (EI_m \frac{\partial^2 u_m}{\partial x^2}) - \frac{\partial}{\partial x} (T_m \frac{\partial u_m}{\partial x}) + k_d (u_m - u_c) d(x - x_n) + k_s u_m (x - x_s) = 0 \quad (2)$$

式中:  $m_m$ ,  $EI_m$ ,  $T_m$  分别代表承力索的单位质量,抗弯刚度和张力;  $k_d$  是吊弦的刚度;  $k_s$  表示支持装置的等效刚度;  $x_s$  是支柱处位移;  $x_n$  是支柱点处到运动点处的距离。

收稿日期: 2014-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(11162002)

作者简介: 刘仕兵(1970—),男,副教授,硕士,主要研究方向为接触网技术。

### 2 受电弓质量块模型

目前,研究受电弓的动力学特性常采用归算质量模型,所谓归算质量模型,就是利用动能等效原理将原结构简化成几个具有集总质量的模型<sup>[3]</sup>。本文采用二质量块模型如图1所示。

根据牛顿定律得到受电弓运动微分方程组表达式为<sup>[4]</sup>

$$\begin{cases} M_1 \ddot{y}_1 + C_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + K_1(y_1 - y_2) = -K_s \left[ y_1 - \sum_m B_m \sin \frac{m\pi x_c}{L} \right] \\ M_2 \ddot{y}_2 + C_2 \dot{y}_2 + C_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + K_1(y_2 - y_1) + K_2 y_2 = F_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $M_1, K_1, C_1, M_2, K_2, C_2$  分别为受电弓模型中弓头和框架的质量、刚度、阻尼矩阵;  $y_1, y_2$  分别为受电弓弓头和框架的位移;  $B_m$  是接触线第  $m$  阶振幅;  $x_c$  是接触线的振动位移;  $F_0$  为静态抬升力。

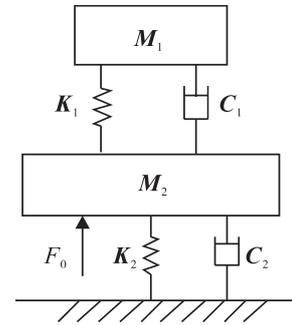


图1 受电弓二质量块模型

Fig. 1 Two mass model of pantograph

### 3 弓网系统耦合动力学模型

受电弓通过接触刚度  $K_s$  与接触网耦合在一起<sup>[5-6]</sup>,图2所示。其耦合通式为

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = F \quad (4)$$

$Y, \dot{Y}, \ddot{Y}, F, M, C, K$  分别为广义位移矩阵、速度矩阵、加速度矩阵、力矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵。取接触刚度  $K_s = 82\ 300$ 。

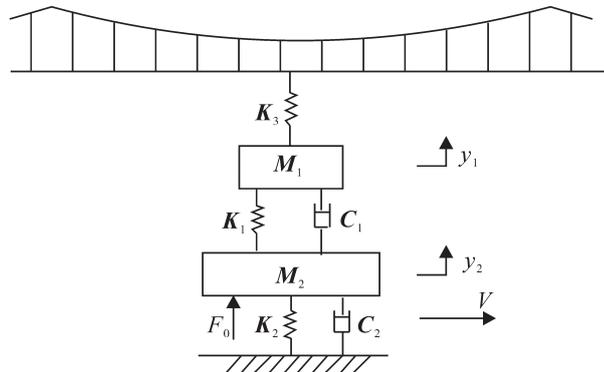


图2 基于二元弓的弓网耦合系统模型

Fig. 2 Two mass model of pantograph's Coupling system model

### 4 弓网耦合系统的数学模型的求解

求解振动微分方程的方法可分为解析法与数值法两大类,解析法由于数学上的困难,通常只有某些简单问题才能得到精确的解答,而对于多数复杂结构问题,还不能得到精确解。由于弓网系统的复杂性,进行弓网耦合振动分析,已远远超出了理论解析的范畴,必须要借助计算机进行数值仿真。

由前面的分析可知弓网系统的数学模型是非常复杂的,当受电弓在接触线上通过时,其弓网系统的刚度矩阵随之不断地改变,其微分方程属二阶变系数常微分方程组,因此必须采用直接积分法求解,本文仿真算法采用Newmark法<sup>[7-8]</sup>。

1) 仿真算法。Newmark法是由线性加速度法引申而来,其假设的速度、位移与加速度的关系如下

$$\dot{Y}_{t+\Delta t} = \dot{Y}_t + [(1-\alpha)\ddot{Y}_t + \alpha\ddot{Y}_{t+\Delta t}]\Delta t \quad (5)$$

$$\dot{Y}_{t+\Delta t} = Y_t + \dot{Y}_t \Delta t + \left[ \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{Y}_t + \beta \ddot{Y}_{t+\Delta t} \right] \Delta t^2 \quad (6)$$

式中,  $\alpha, \beta$  是参数, 它们由积分精度和稳定性来决定的。仿真时取  $\alpha=0.5, \beta=0.25$  是无条件稳定算法, 时间步长  $\Delta t$  的大小不影响解的稳定性。带入式(4)将取如下形式

$$M\ddot{Y}_{t+\Delta t} + C\dot{Y}_{t+\Delta t} + KY_{t+\Delta t} = F_{t+\Delta t} \quad (7)$$

由(6)式, 得

$$\ddot{Y}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} (Y_{t+\Delta t} - Y_t) - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{Y}_t - \left( \frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{Y}_t \quad (8)$$

将式(5)代入式(8), 然后再一并代入(7)式, 则可得到由  $Y_t, \dot{Y}_t, \ddot{Y}_t$  计算  $Y_{t+\Delta t}$  的公式

$$\left( K + \frac{1}{\beta \Delta t^2} M + \frac{\alpha}{\beta \Delta t} C \right) Y_{t+\Delta t} = F_{t+\Delta t} + M \left[ \frac{1}{\beta \Delta t^2} Y_t + \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{Y}_t + \left( \frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{Y}_t \right] + C \left[ \frac{\alpha}{\beta \Delta t} Y_t + \left( \frac{\alpha}{\beta} - 1 \right) \dot{Y}_t + \left( \frac{\alpha}{2\beta} - 1 \right) \Delta t \ddot{Y}_t \right] \quad (9)$$

式中,  $M, C, K$  分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $F_{t+\Delta t}$  为  $t+\Delta t$  时刻节点外激振力列阵;  $Y_{t+\Delta t}$  为  $t+\Delta t$  时刻节点位移列阵;  $Y_t, \dot{Y}_t, \ddot{Y}_t$  分别为  $t$  时刻节点位移列阵、速度列阵、加速度列阵;  $\Delta t$  为时间步长;  $\alpha, \beta$  为决定计算精度和积分稳定性的参数。

2) 初始条件的确定。在仿真计算模型中, 接触网的初始条件取为:  $y(0)=y_0, \dot{y}(0)=0, \ddot{y}(0)=0$ , 分别为接触网初始状态的位移、速度、加速度矩阵,  $y_0$  接触网初弛度, 其计算方法可见参考文献<sup>[9]</sup>。

受电弓的初始条件取为:  $y=[0, F_0/(K_1+K_2)]^T, \dot{y}=0, \ddot{y}=0$ 。式中,  $y, \dot{y}, \ddot{y}$  分别为受电弓初始状态的位移、速度、加速度矩阵。

## 5 弓网动态性能仿真

1) 接触线动态抬升量。在仿真过程中, 由于受电弓-接触网的接触耦合, 引起接触线的垂直方向运动。接触线抬升量的变化以跨距为周期呈现一定的周期性, 跨中的抬升量比定位点的抬升量大即在每跨内, 抬升位移的最大值出现在跨中位置, 最小值位于定位器附近。同时, 还可以看到, 接触网跨中节点的抬升位移呈波动变化<sup>[10]</sup>。

2) 不同运动速度下接触力的变化。为研究受电弓以不同速度通过接触网时各性能参数的变化, 以下分别对 160, 200, 250  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  3种速度工况进行计算。

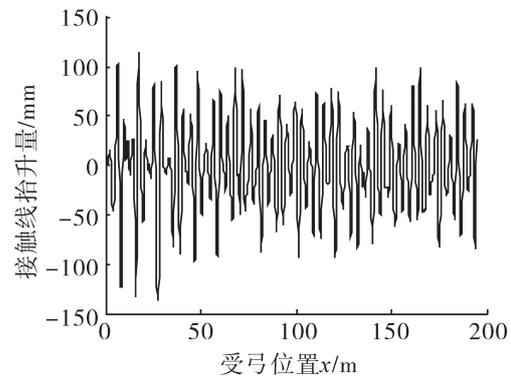
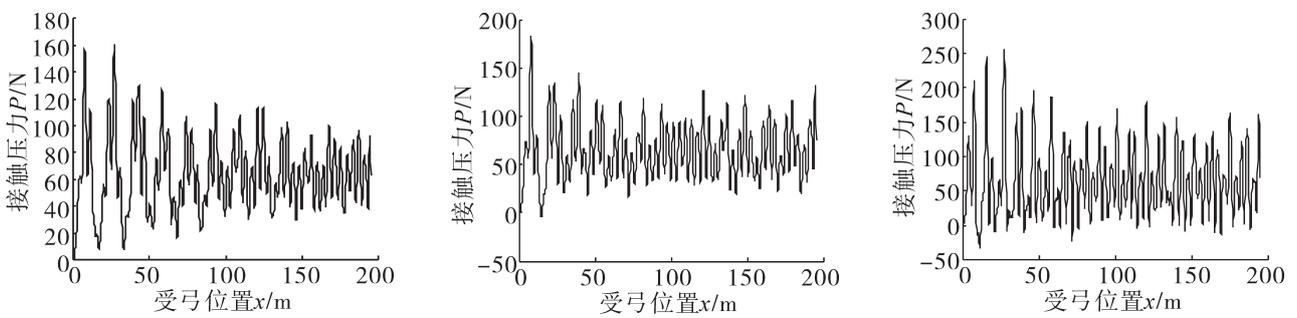


图3 接触线的抬升量变化曲线

Fig. 3 Changing curve of contact wire uplift



(a)  $V=160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时接触压力变化曲线

(b)  $V=200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时接触压力变化曲线

(c)  $V=250 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时接触压力变化曲线

图4 不同运行速度的接触力变化曲线

Fig. 4 The contact force changes of different speed

从图4可知,随着运行速度的提高,接触力的振荡幅度明显增大,当受电弓以 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 速度运行时,在1个位置出现了离线,而当运行速度提高至 $250\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,弓网接触力的振荡更为剧烈,在多个位置出现了明显的离线。由此可见,当受电弓运行速度高于 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,将直接影响弓网系统的安全。

## 6 结论

通过格拉格朗日方程推导出弓网系统振动微分方程组,利用Newmark法编写了弓网数值仿真程序,对接触线的动态抬升量和3种不同工况下的弓网动态接触压力进行了仿真及对比分析。研究结果表明:

- 1) 接触线的抬升量、接触力以跨距为周期不断变化,都随着速度的增大而增大。
- 2) 列车的运行速度对弓网动态性能起着直接的作用,随着速度的提高,接触压力的波动幅度显著增大,最小值减小,最大值增大,离线率增大。
- 3) 接触线动态抬升量最大值出现在跨中位置,最小值出现在定位点附近。

### 参考文献:

- [1] 于万聚.高速电气化铁路接触网[M].成都:西南交通大学出版社,2003:1-415.
- [2] WU T X, BRENNAN M J. Basic analytical study of pantograph-catenary system dynamics [J]. Vehicle System Dynamics, 1988, 30:443-456.
- [3] POMBO J, AMBROSIO J, Pereira M. Influence of the aerodynamic forces on the pantograph-catenary system for high-speed trains [J]. Vehicle System Dynamics, 2009,47(11):1327-1347.
- [4] 于万聚. 高速受接触网—受电弓系统动态受流特性研究[J].铁道学报,1993,15(2):16-27.
- [5] 付秀通,詹斐生.轮/轨—弓/网系统耦合动力学数值模拟分析与试验研究[J].铁道学报,1998,20(3):25-32.
- [6] 张卫华,曹新文.高速受电弓—接触网系统的动力学研究[J].西南交通大学学报,1991,26(1):105-111.
- [7] 翟婉明,蔡成标.机车—轨道耦合振动对受电弓—接触网系统动力学的影响[J].铁道学报,1998,20(1):32-38.
- [8] 周宁,张卫华.基于直接积分法的弓网耦合系统动态性能仿真分析[J].中国铁道科学,2008,29(6):71-76.
- [9] 吴天行.接触网的有限元计算与分析[J].铁道学报,1996,18(3):44-48.
- [10] 衷路生,齐叶鹏,杨辉,等.PSO优化的LS-SVM在列车弓网系统的建模研究[J].华东交通大学学报,2012,29(3):1-6.

# Dynamic Simulation Study on High-speed Pantograph-catenary System

Liu Shibing, Wang Yuan

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013, China)

**Abstract:** This paper uses the Euler-Bernoulli beam structure of catenary and two mass model of pantograph, establishes the vertical coupling dynamics model of the pantograph catenary system, and derives pantograph-catenary system's motion differential equations through the Lagrange equation. Using Newmark method, this paper also writes the simulation program, and in given conditions, discusses the dynamic properties of pantograph-catenary coupling system under different speeds. Using MATLAB, this paper simulates the interaction of high-speed pantograph and catenary, analyzes the simulation results, and lays the foundation for pantograph and catenary's further parameters optimization under different high speeds.

**Key words:** catenary; pantograph; numerical simulation; contact force