

文章编号:1005-0523(2019)05-0016-06

# 高速铁路弓网系统建模与动态性能研究

刘仕兵,李思明,张怡欣

(华东交通大学电气与自动化工程学院,江西 南昌 330013)

**摘要:**采用受电弓的三元集中质量块单元和弹性链型悬挂接触网的接触单元,建立受电弓与接触网的平面耦合动力学模型;以京沪高铁的实际线路为模拟对象,运行速度达到 350 km/h 以上时,在弹性吊索和承力索张力一定时,分析接触网在不同的接触线张力体系下的动态性能参数;依据高速铁路设计规范标准,比较了 4 种运行速度下的弓网系统动态性能参数,运用弓网动态仿真软件,实现了时速 350 km 以上弓网系统的动态响应。研究表明:提高运行速度会导致弓网之间的最大动态接触应力值增加和受电弓在定位点的抬升量偏大。当运行速度超过 350 km/h 时,接触网的动态参数基本满足受电弓单弓运行的速度,在承力索和弹性吊索的张力保持不变的情况下,接触线水平张力会随着速度的提高而增加,受电弓在定位点的抬升量增大,从而影响弓网之间的受流质量和可靠性。

**关键词:**受电弓;接触网;动态性能

**中图分类号:**U225.1

**文献标志码:**A

受电弓与新型简统的弹性链形悬挂接触网的相互作用关系描述了弓网之间的接触状态和程度,反映了弓网系统的运行可靠性,受流质量和使用寿命<sup>[1]</sup>。由于高速电气化铁路具有施工周期长,运营和维护成本较高等特点,因此,建立弓网系统的仿真模型,不仅有利于模拟弓网之间的动态性能,而且是能够提高工作的效率且可行的研究方案,对弓网系统的关键技术的研究提供了一种依据。目前,国内采用的仿真建模方式主要由设计受电弓和接触网的基本结构,建立弓网耦合模型,综合考虑各种因素对弓网系统的影响,评估弓网系统的动态性能。在掌握了弓网系统动态耦合关系的情况下,进一步研究速度为 350 km/h 以上的弓网关系具有重大的现实意义。

文献[2]通过使用欧拉梁结构接触网,受电弓采用二元集中质量块单元,在仅考虑空气阻力的情况下,研究运行速度对弓网受流质量的影响。文献[3]研究了受电弓与接触网的动力学参数匹配规律,分析了桥梁振动对弓网动力学的影响,建立了车和桥共同作用时的弓网大系统分析模型。文献[4]通过 Mathieu 方程建立了单自由度的弓网动力学模型,采用摄动的方法分析了列车在不同运行速度下弓网系统的受流质量特性。文献[5]利用弓网仿真软件,建立弹性链形悬挂接触网模型,分析接触网张力、跨距和接触线坡度对接触网参数的影响。文献[6]利用受电弓的振动实验平台,模拟受电弓的动态特性,开展了在受电弓运行下刚性接触网的动态响应研究,优化了刚性接触网的动态参数指标,为接触网的疲劳可靠性分析提供了前瞻性的指导。文献[7]将空气动力学与有限元方法联系起来,建立了弓网系统的空气动力学模型和有限元模型,采用计算机仿真软件,分析了受电弓的高速空气动力学性能和动态受流特性。文献[8-9]采用半主动控制研究方法建立弓网系统的半主动控制动力学模型,对不同接触网和受电弓的结构类型进行模拟计算,研究了弓网系统的非线性控制策略和可靠性。文献[10]建立脉动风作用下的风-弓-网耦合模型,研究弓网系统在风力作用下的稳定受流特性,并探讨了不同复杂地形作用下的风力与受电弓、接触网之间的相互作用关系。文献[11]建立一

收稿日期:2019-01-14

基金项目:江西省教育厅科技项目(GJJ160488)

作者简介:刘仕兵(1970—)男,教授,研究方向为电气化轨道交通接触网技术研究。

个基于半实物半虚拟相结合的弓网模拟测试平台,进一步研究弓网系统的位移值和各处应力在动态力载荷作用下随着时间或运行速度的变化规律。

### 1 受电弓的动力学模型

由于受电弓机械结构比较复杂,每种动力学模型所需要的参数不相同,所建立的模型的复杂程度也不一样,因此,也需要根据实际运行的情况来合理地选取受电弓的结构和参数。借助于现代控制理论的方法,将受电弓的非线性结构部分等效为线性结构模型,根据文献[2]的建模思路,建立受电弓的三元质量块结构模型,如图 1 所示。

根据理论力学,忽略空气阻力,仅考虑受电弓垂直方向的振动行为,得到受电弓的三自由度系统的振动数学方程

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1(t) \\ \ddot{y}_2(t) \\ \ddot{y}_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & 0 \\ -c_1 & c_1+c_2 & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_2+c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_1(t) \\ \dot{y}_2(t) \\ \dot{y}_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1+k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2+k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_{cp}(t) \\ 0 \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $m_1, m_2, m_3$  分别表示弓头、上框架、下框架的归算质量; $c_1, c_2, c_3$  分别表示弓头、上框架、下框架的归算阻尼; $k_1, k_2, k_3$  分别表示弓头、上框架、下框架的归算刚度; $y_1, y_2, y_3$  分别表示弓头、上框架、下框架的垂向位移; $f_{cp}(t)$  表示弓网接触力; $f_0$  表示静态抬升力;其中位移和接触力为时变量,其余参数为常量。

由公式(1),可以得到受电弓的二阶微分通式方程

$$M_{pa} \ddot{Y}_{pa} + C_{pa} \dot{Y}_{pa} + K_{pa} Y_{pa} = F_{cpa} \quad (2)$$

式中: $M_{pa}$  为归算质量矩阵; $Y_{pa}$  为垂向位移矩阵; $C_{pa}$  为归算阻尼矩阵; $K_{pa}$  为归算刚度矩阵; $F_{cpa}$  为外力矩阵。

### 2 接触网的接触模型

弹性链形悬挂接触网作为一种特殊形式的输电线路,主要由承力索、弹性吊索、接触线等零部件组成,而接触网结构的可靠性与使用寿命主要取决于接触网的关键部件,其主要作用是用于承受外部和内部因素所产生的载荷和环境。由于接触网本身具有弹性,列车在高速行驶的过程中,接触线会上下振动,刚性吊弦与承力索之间会由接触过渡到分离。现为了研究的方便,将承力索、弹性吊索、刚性吊弦和接触线 4 个部分等效为杆单元结构模型,取一定长度且相互独立的三跨距为一锚段作为研究对象,在不受天气变化和空气动力作用的影响下,建立接触网的接触模型,如图 2 所示。其中, $S_A, S_B$  分别表示承力索与接触线的水平张力; $p_1, p_2, p_3, p_4$  分别表示刚性吊弦的 4 个节点; $m_1, m_2, m_3$  分别表示受电弓弓头、上框架、下框架

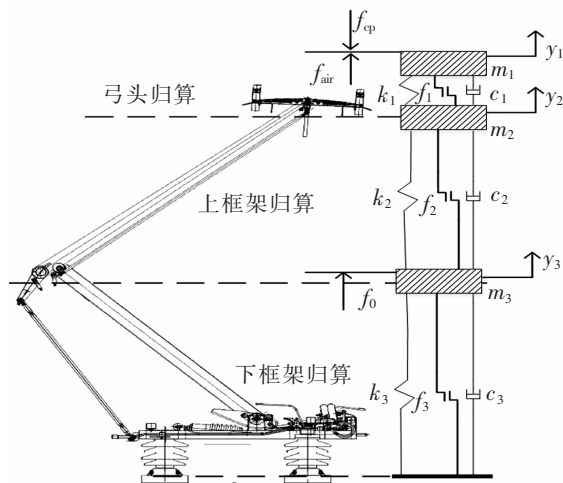


图 1 受电弓的简化模型  
Fig.1 Simplified model of pantograph

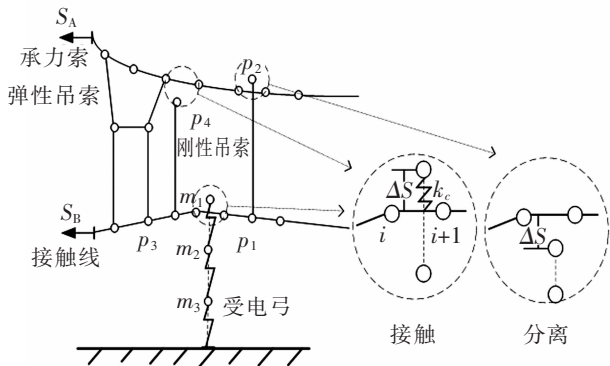


图 2 接触网的接触模型  
Fig.2 Contact model of catenary

节点; $k_c$ 为接触刚度系数; $\Delta S$ 为刚性吊弦节点 $p_4, p_2$ 与承力索下方单元的垂直方向位移;记号 $i-j+1$ 表示接触线杆单元或承力索杆单元。

接触线与承力索通过吊弦连接起来,同属于一个平面内,二者都存在一定的张力,有相似的动力学性能,因此可以利用有限元的方法建立如下基于三维杆单元的动力学微分方程

$$M_c \ddot{U}_c + (K_{ct} + K_c) U_c = F_c \tag{3}$$

式中: $M_c$ 为归算质量矩阵; $U_c$ 为归算位移矩阵; $K_{ct}$ 为归算几何刚度矩阵; $K_c$ 为归算弹性刚度矩阵; $F_c$ 为归算外载荷矩阵。

### 3 弓网耦合系统模型

接触网与受电弓之间的耦合通过接触点来实现,为了进一步研究接触网在时速 350 km 以上的动态参数性能和受电弓与接触线的接触压力与运行速度的关系,通过仅考虑弓网横向与纵向的耦合作用,建立弹性链型悬挂接触网和受电弓系统的耦合模型,如图 3 所示。 $\rho_A, \rho_B$  分别代表承力索密度、接触线密度; $m_{A1}, m_{D1}$  分别表示定位器的等效质量、吊弦的等效质量; $k_{A1}, k_{D1}$  分别表示定位器的等效刚度、吊弦的等效刚度。并得到如下弓网耦合系统的矩阵通式方程

$$M \ddot{U} + C \dot{U} + K U = F \tag{4}$$

式中: $M, U, C, K, F$  分别为弓网耦合系统的归算质量矩阵、归算位移矩阵、归算阻尼矩阵、归算刚度矩阵和外力矩阵。

### 4 弓网的动态性能仿真分析

弓网的动态性能分析不仅与受电弓的结构、数目以及弓间距有关,还与接触网的张力、跨距和列车的运行速度有密切的关系。弓网之间的动态性能将影响受电弓各零部件的使用寿命和接触线的磨耗。根据弓网系统的波动传导理论,列车的最大运行速度与波的传播速度有关。选择以京沪高铁的实际线路为研究对象,采用弹性链型悬挂接触网,在受电弓参数一定的前提下,如图 1 所示,分析弓网之间的接触性能与接触网动态性能的关系。

列车在保持高速运行过程中,接触网的动态性能不仅与承力索和接触线的张力有关,还与接触网的波动传播速度,多普勒系数,反射因素和放大系数等参数有关<sup>[6]</sup>。接触网的波动传播速度为

$$c = \sqrt{\frac{T_j}{g_j}} \tag{5}$$

多普勒系数为

$$\alpha = \frac{c-v}{c+v} \tag{6}$$

反射系数为

$$r = \frac{\sqrt{T_c g_c}}{\sqrt{T_c g_c} + \sqrt{T_j g_j}} \tag{7}$$

放大系数为

$$\gamma = \frac{r}{\alpha} \tag{8}$$

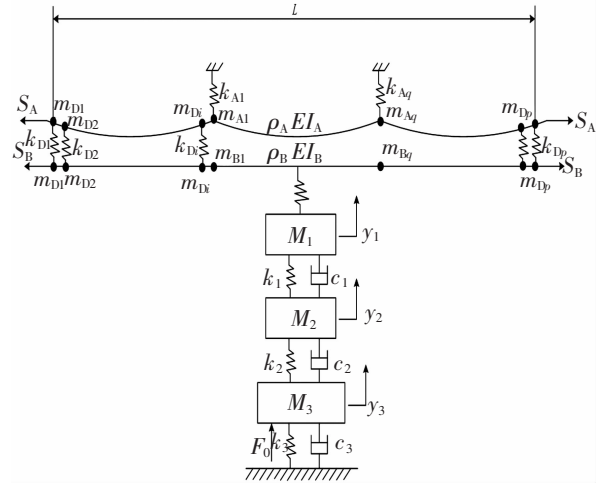


图 3 弓网耦合系统模型  
Fig.3 Model of pantograph-catenary

式中:  $T_j$  和  $T_c$  分别为接触线和承力索的水平张力, N;  $g_j$  和  $g_c$  分别为接触线和承力索的线密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $v$  为列车行驶的速度,  $\text{km/h}$ 。

表 1 受电弓的主要仿真数据

Tab.1 Main simulation parameters of pantograph

受电弓部位	等效质量/kg	阻尼/(Ns/m)	刚度/(N/m)	摩擦力/N
弓头	6.4	0	13 600	8.5
滑板	6.05	0	5 813	3
弓架	14	64.9	0	8.5

通过以上计算分析,得到接触网在不同张力体系和速度下的动态性能指标。新型简统的弹性链型悬挂接触网的动态参数指标如表 2 所示。

表 2 接触网的动态参数指标

Tab.2 Dynamic parameters index of the contact network

运行速度/(km/h)	弹性吊索张力/kN	承力索和接触线张力/kN	波动传播速度/(km/h)	多普勒系数	反射系数	放大系数
350	3.5	20+31.5	550	0.222	0.414	1.865
380	3.5	20+31.5	550	0.183	0.414	2.262
400	3.5	20+34	571	0.176	0.405	2.301
420	3.5	20+37	596	0.173	0.395	2.283

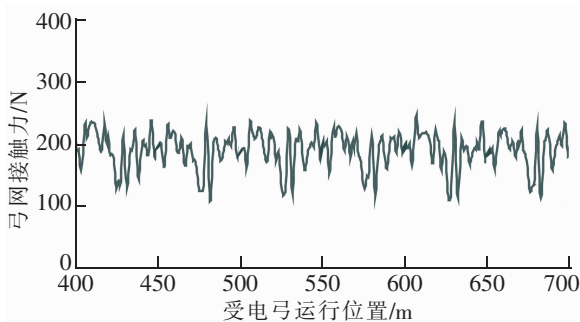
根据标准 IEC62486<sup>[12]</sup>中的受电弓的平均抬升力  $F_m=0.000\ 97v^2+70$  N 计算,单弓运行,比较不同运行速度下的弓网动态性能指标,如表 3 所示。

表 3 不同运行速度下的弓网动态性能指标

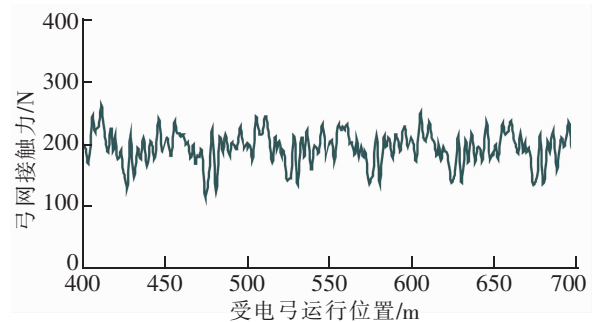
Tab.3 Dynamic performance index of pantograph at different operating speeds

运行速度 $v/(\text{km/h})$	最大动态 接触力值 $F_{\max}/\text{N}$	最小动态 接触力值 $F_{\min}/\text{N}$	平均动态 接触力值 $F_m/\text{N}$	标准偏差 $\sigma/\text{N}$	定位点的 最大抬升 量/cm	$0.3F_m-\sigma/\text{N}$	统计 最大值 $F_m+3\sigma/\text{N}$	统计 最小值 $F_m-3\sigma/\text{N}$
350	260.45	106.90	189.01	26.54	8.41	30.163	268.63	109.39
380	311.72	59.79	208.23	37.86	11.20	24.609	318.81	94.65
400	337.37	74.75	223.02	46.06	12.10	20.846	361.2	84.84
420	371.97	59.47	239.31	54.11	12.2	17.683	401.64	76.98

受电弓与接触网之间的动态接触力在不同速度下的仿真结果,如图 4 所示。



(a)  $v=350$  km/h



(b)  $v=380$  km/h

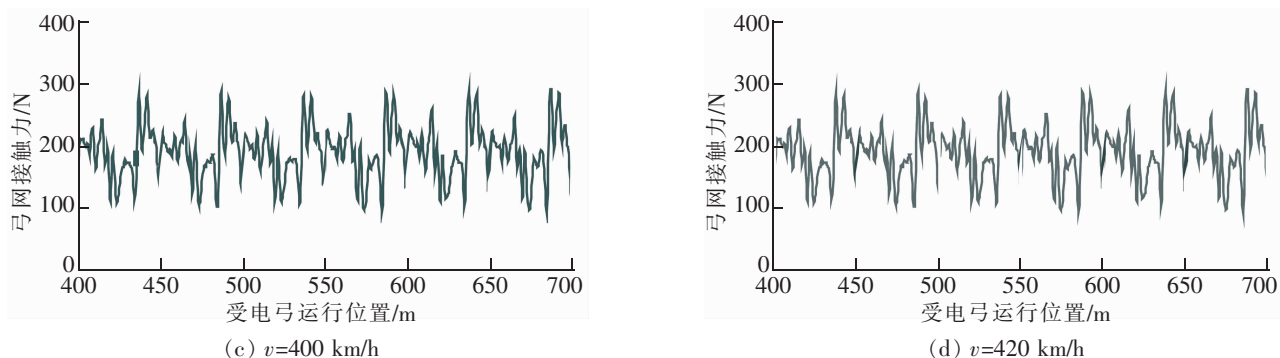


图4 不同运行速度下的弓网动态接触力仿真曲线

Fig.4 Simulation curves of dynamic contact stress of pantograph-catenary at different operating speeds

由表3和图4可知,速度超过350 km/h时,在承力索和弹性吊索张力保持不变的情况下,随着接触线张力从31.5 kN提高到37 kN时,接触网的抬升量也增加,导致接触网的弹性不均匀度系数发生了改变,从而影响了弓网之间的受流质量;同时,放大系数也增加,接触网的振动幅度明显增强;但当运行速度达到420 km/h时,弓网间的最大动态接触力超出了350 N,说明受电弓的动态性能参数还有待进一步的改进;当受电弓的运行速度达到400 km/h时,定位器处的最大动态抬升量会大于12 cm,会影响接触网的疲劳寿命和造成弓网之间燃弧。

## 5 结论

1) 将受电弓作为研究对象,将其等效为质点-阻尼-弹簧的三元集中质量块结构单元,建立了受电弓的三自由度系统的垂直振动方向上的微分方程;选取长度一定并且相互不影响的三跨距为一锚段作为研究对象,建立弹性链形悬挂接触网接触模型,利用非线性有限元建模的思想,建立了基于三维模型的承力索和接触线微分方程。

2) 以京沪高铁实际路线作为模拟对象,运行速度达到350 km/h以上时,对比分析了弓网系统的接触质量与接触网的动态参数指标的关系;接触线的水平张力作用在3种不同的体系下时,基本符合受电弓单弓运行时的速度,在承力索和弹性吊索张力一定的情况下,接触线水平张力会随着运行速度地提高而增加,受电弓在定位点的抬升量也会增大,从而导致接触网的弹性发生改变,进一步影响弓网之间的受流质量和可靠性;同时,放大系数也增加,统计的最大值超过平均值,表明接触网的振动幅度明显增强,会加剧弓网之间的磨损,影响接触网的疲劳寿命。

## 参考文献:

- [1] 刘志刚,宋洋,韩焯,等. 高速铁路接触网研究进展[J]. 西南交通大学学报,2016,51(3):495-517.
- [2] 刘仕兵,汪媛. 高速弓网耦合系统动态仿真研究[J]. 华东交通大学学报,2014,31(2):68-71.
- [3] 王江文,梅桂明,李瑞平,等. 弓网相互作用时受电弓关键部件动载荷研究[J]. 铁道学报,2018,40(3):68-75.
- [4] 郭京波,杨绍普,高国生. 高速机车主动控制受电弓研究[J]. 铁道学报,2004,26(4):41-45.
- [5] 李文豪,崔校玉,陈维荣,等. 弹性链形悬挂高速接触网参数地选取研究[J]. 铁道工程学报,2009,131(8):82-87.
- [6] 关金发,吴积钦. 受电弓与接触网动态仿真模型建立及其确认[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(11):2444-2451.
- [7] 任志玲,林冬,王月,等. 基于预测控制地弓网系统半主动控制策略研究[J]. 系统仿真学报,2017,29(5):1086-1092.
- [8] 刘红娇,张卫华,梅桂明. 基于状态空间法的受电弓主动控制的研究[J]. 中国铁道科学,2006,27(3):79-83.



- [9] 郭京波,杨绍普,高国生. 高速机车主动控制受电弓研究[J]. 铁道学报,2004,26(4):41-45.
- [10] 关金发,田志军,吴积钦. 复杂地形风场下弓网运行状态模拟技术及应用[J]. 2018(6):46-50.
- [11] 杨岗,李芾. 集成 VR 技术的高速受电弓模糊主动控制及仿真[J]. 系统仿真学报,2014,26(2):389-424.
- [12] IEC 62486-2017. Railway applications-Current collection systems-Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access) [S]. US:International Electrotechnical Commission, 2017.

## Study on Modeling and Dynamic Performance of High-Speed Railway Pantograph-Catenary System

Liu Shibing, Li Siming, Zhang Yixin

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

**Abstract:** The plane coupling dynamic model of pantograph and catenary was established by using pantograph's ternary concentrated mass element and elastic catenary's contact element. The actual line of Beijing-Shanghai high-speed railway is taken as the simulation object. When the train running speed reaches more than 350 kilometers per hour, dynamic performance parameters of catenary in different contact line tension systems are analyzed with the constant tension of elastic sling and messenger wire. According to the design specification of high-speed railway, dynamic performance parameters of pantograph system at four kinds of operating speeds are compared, and pantograph dynamic simulation software is used to realize the dynamic response of pantograph system over 350 kilometers per hour. Research shows that: when the running speed reaches more than 350 kilometers per hour, the dynamic parameters of the catenary meet pantograph single bow running speed; as the tension of elastic sling and messenger wire remains unchanged, contact wire level and tension uplifting of pantograph on the anchor point will increase with increase of speed, thus affecting the flow quality and reliability of pantograph-catenary.

**Key words:** pantograph; catenary; dynamic performance