

# 考虑门式悬挂的刚性接触网-受电弓 系统动态性能分析\*

冯晓河<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院, 611756, 成都;

2. 中铁建电气化局集团轨道交通器材有限公司, 213179, 常州//高级工程师)

**摘要** 建立了包含锚段关节的门式悬挂结构刚性接触网有限元模型,并将受电弓等效为集中质量块模型;利用罚函数实现弓网接触,通过 Newmark 数值积分来求解弓网耦合系统动力学方程组。依据铁路标准验证了有限元模型的有效性。通过有限元模型仿真,研究了受电弓结构参数,以及刚性接触网跨距、悬挂结构刚度、静态抬升力与锚段关节对弓网动态性能的影响。仿真结果表明,刚性接触网跨距、悬挂结构刚度及锚段关节对弓网受流质量影响显著。

**关键词** 轨道交通; 刚性接触网; 动态性能; 有限元分析  
**中图分类号** U225

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.013

## Dynamic Performance Analysis of Rigid Catenary and Pantograph System Considering Overlap

FENG Xiaohu

**Abstract** A finite element model of rigid catenary considering overlap is developed. Pantograph is translated into lumped mass model and penalty function is utilized to describe the contact between them. Newmark numerical integration is used to solve the dynamics equations of the pantograph coupling system. The validity of the finite element model is verified according to railway standards. Through finite element model simulation, pantograph structure parameters are studied, as well as the influence of rigid catenary span length, suspension structure stiffness, lifting force and overlap on pantograph dynamic performance. Simulation results show that the rigid catenary span length, suspension structure stiffness and overlap have significant impacts on the pantograph current collection quality.

**Key words** rail transit; rigid catenary; dynamic performance; finite element analysis

**Author's address** School of Electrical Engineering, South-

west Jiaotong University, 611756, Chengdu, China

刚性接触网是隧道内连接牵引变电站与车载用电装置的唯一通道,其具有接触线无张力,无下锚装置,事故率低,零部件少,载流量大,维修工作量小等特点<sup>[1]</sup>。一般而言,为了保障列车取流质量,受电弓滑板与接触线之间应维持一定大小的接触压力。表征弓网动态性能的重要指标之一就是弓网接触压力,其影响着列车运行的性能及安全性。在列车行驶中,弓网系统复杂的振动状况,使接触力的大小处于持续且复杂的变化状态。接触压力过大或者过小,都会对列车受流质量造成较为严重的影响。因此,接触网关键参数的设计与选取对于保证弓网接触力的稳定,进而保证列车良好受流、安全高速行驶有重要的价值。

近年来,国内外学者针对刚性接触网建模与弓网动力学仿真分析已有一定的研究,包括接触网弹性分析<sup>[2]</sup>、环境激扰分析<sup>[3-4]</sup>等。部分学者研究了刚性接触网-受电弓系统结构参数、运行参数对弓网动态性能的影响规律,如弓网动态匹配影响因素<sup>[5]</sup>、受电弓非线性特征影响规律<sup>[6]</sup>等。在刚性接触网-受电弓系统方面,文献[7]建立了刚性接触网计算模型,分析了列车运行速度、接触网跨距及弓网接触刚度等参数对受流质量的影响。文献[8]建立了包含膨胀接头的刚性接触网有限元模型,提出了仅锚段关节处定位点刚度变化下最优定位点刚度取值方案。文献[9]建立了包含锚段关节、刚柔过渡段的刚性接触网有限元模型,并计算分析了影响弓网受流质量指标。文献[10]提出了刚性接触网“√”形布置与交叉布置的两种拉出值布置优化方案,并比较了二者的差异。文献[11]研究了刚性

\* 国家自然科学基金高铁联合基金重点项目(U1734202)

接触网平面布置形式对接触线磨损分布不均匀的影响,并提出了一种地铁运营车辆接触网检测系统。文献[12]推导了刚性接触网-受电弓系统的计算模型,对接触网不平顺进行了数值分析。门式悬挂结构是刚性接触网支撑系统的重要组成部分,对弓网动态特性具有十分直接的影响,但在既有研究中较少考虑。

因此,本文主要针对门式悬挂结构下的刚性接触网-受电弓系统动态特性进行研究;建立了包含锚段关节的门式悬挂结构刚性接触网有限元模型与受电弓集中质量块模型,利用罚函数来实现弓网间接触;使用 Newmark 动态求解来完成弓网耦合模型动力学仿真,通过与铁路标准相对比验证了本模型的有效性;研究了受电弓结构参数、刚性接触网跨距、悬挂结构刚度,以及静态抬升力与锚段关节,对于弓网动态性能的影响。

## 1 刚性接触网-受电弓模型

刚性悬挂接触网主要由支持定位装置、汇流排及接触线等组成。悬挂结构主要有垂直门式悬挂结构和水平柱式腕臂结构。本文针对门式悬挂结构进行了系统分析与研究,其结构示意图如图 1 所示。

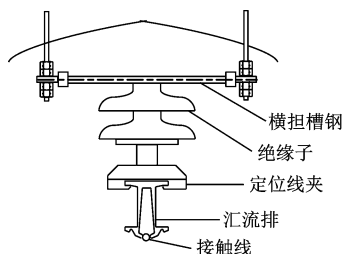


图1 刚性接触网门式悬挂结构示意图

### 1.1 刚性接触网悬挂结构等效模型

门式悬挂结构主要由横担槽钢、悬吊螺栓等部件构成。在建立刚性悬挂接触网等效模型时,将左右悬吊螺栓简化为等效弹簧,其线密度分别为  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ ,刚度分别为  $k_1$ 、 $k_2$ ;将横担槽钢视作梁单元结构,将其长度与抗弯刚度分别设定为  $l$ 、 $EI$ ,在等效简化模型中将其看作为线密度与刚度分别为  $\rho_3$ 、 $k_3$  的弹性梁; $Q$  为施加在  $C$  点的作用力; $\delta_1$ 、 $\delta_2$  分别为左右等效弹簧的伸长量, $\delta_3$  为等效梁的伸长量; $a$ 、 $b$  是  $C$  点与悬点  $A$ 、 $B$  的距离。依据静力学平衡和能量守恒定律,可将刚性悬挂结构简化为等效质量与等效刚度分别为  $m_{eq}$ 、 $k_{eq}$  的一个集中质量、具有刚度的弹

簧系统,如图 2 所示。其中,等效模型的等效质量  $m_{eq}$  为  $2.77 \text{ kg}$ ,等效刚度  $k_{eq}$  为  $6.7 \times 10^7 \text{ N/m}$ 。

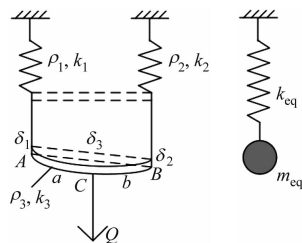


图2 门式悬挂结构等效模型

### 1.2 刚性接触网有限元模型

刚性悬挂接触网无承力索,其接触线被汇流排夹持固定,从而完成电能传输。汇流排主要分为 T 型汇流排和 II 型汇流排两类。本文采用 II 型汇流排,并在建模时对刚性接触网做出如下假设:

1) 接触网水平方向的振动或位移对于弓网接触压力影响很低。故可忽略水平方向振动,只计算其垂直方向振动。

2) 接触线被汇流排 2 个垂直边末端形成的弹性夹口夹持固定。这 2 个夹口的力学特性类似,因此可将两者看作一个整体。

3) 在实际安装中,刚性悬挂接触网虽按照正弦波形式布置,但其拉出值远小于 1 个锚段长度,可忽略不计。故在搭建模型时,锚段内的刚性悬挂接触网按直线布置来模拟。

选用 beam 188 单元建立汇流排与接触线模型。该单元基于 Timoshenko 梁理论,是二次的 2 节点梁单元。设置每个节点有 6 个自由度,插值数据选项选择“二次型”。运用中间节点来提高单元的精度,能够精确地表示线性变化的弯矩,可以较好地应用于线性分析、大偏转和大应力的非线性分析。

汇流排及接触线有限元模型如图 3 所示。汇流排所用材料为铝,接触线所用材料为铜,具体材料参数见表 1。

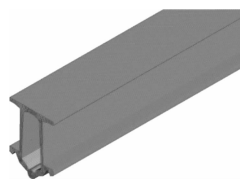


图3 汇流排与接触线有限元模型

刚性悬挂接触网在 2 个锚段间需设置锚段关节。锚段关节的存在使得受电弓在由上一锚段滑动进入下一锚段时可以安全过渡,减缓了受电弓通

表 1  汇流排与接触线有限元模型材料参数				
结构	截面积/ mm <sup>2</sup>	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )
汇流排	2 166	72	0.3	2 700
接触线	150	120	0.3	8 900

过此连接关节处时弓网接触压力的波动。本文建立的断口式锚段关节有限元模型结构,主要依靠刚性悬挂接触网 2 个相邻锚段在同一平面内存在的重叠空间区域来形成过渡关节,其使两相邻锚段在机械关系上是断开且不连续的。锚段关节空间示意图如图 4 所示,有限元模型如图 5 所示。

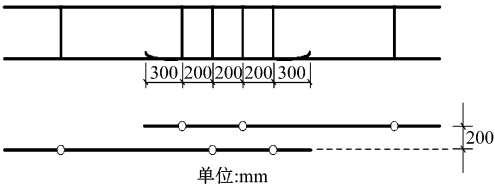


图 4  锚段关节示意图

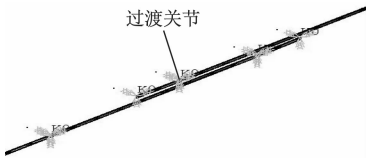


图 5  锚段关节有限元模型

1.3  受电弓有限元模型

受电弓集中质量块模型如图 6 所示。其中,  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  分别代表受电弓弓头、上框架、下框架的等效质量,  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别代表受电弓弓头、上框架、下框架的等效刚度,  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  分别代表受电弓弓头、上框架、下框架的等效阻尼,  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  分别代表受电弓弓头、上框架、下框架的垂向位移,  $f_0$  为施加在受电弓上的静态抬升力,  $f_c$  为弓网接触压力。受电弓集中质量块模型参数见表 2。

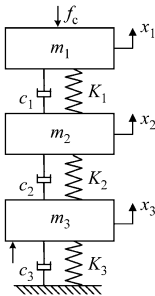


图 6  受电弓集中质量块模型

1.4  刚性接触网-受电弓耦合模型

本文利用罚函数法来建立弓网间的接触,以模

表 2 受电弓集中质量块模型参数						
参数		取值	参数		取值	
$m_1/(m/kg)$	7.12		$K_1/(N/m)$	9 430	$c_1/(Ns/m)$	0
$m_2/(m/kg)$	6.00		$K_2/(N/m)$	14 100	$c_2/(Ns/m)$	0
$m_3/(m/kg)$	5.80		$K_3/(N/m)$	0.1	$c_3/(Ns/m)$	70

拟弓网滑动接触的过程,并利用接触刚度在接触力与接触面穿透量间建立力与位移的关系:

$$f_c = \begin{cases} k_s(y_p - y_c), & y_p \geq y_c \\ 0, & y_p < y_c \end{cases} \quad (1)$$

式中:

- $y_p$ ——受电弓弓头垂向位移;
- $y_c$ ——接触线垂向位移;
- $f_c$ ——弓网接触压力;
- $k_s$ ——弓网间接触刚度。

1.5  刚性接触网-受电弓耦合模型验证

一系列铁路标准规定了不同列车运行速度与电压电流制式下对于弓网接触压力统计值的要求。本文以此作为仿真计算结果的验证依据。经仿真计算,得到的接触压力统计值如表 3 所示。

表 3  接触压力统计值仿真结果				单位:N
指标	数值	指标	数值	
$F_m$	110.26	$0.3F_m - s$	28.09	
$s$	4.99	$F_{max}$	122.73	
$0.1F_m$	11.03	$F_{min}$	100.78	
$F_m - 3s$	95.29			

注:  $F_m$  为接触压力平均值,  $s$  为接触压力标准差,  $F_{max}$  为接触压力最大值,  $F_{min}$  为接触压力最小值。

由表 3 可以看出:  $F_m - 3s > 0$ ,  $F_{max} < 300\text{ N}$ ,  $F_{min} > 0$ , 说明仿真结果满足 EN50119—2009 的要求,  $0.3F_m > s$ , 说明仿真结果满足 EN50367—2006 的要求;  $F_m - 3s > 0.1F_m$ , 说明仿真结果满足欧盟铁路互操作性技术规范 TSI 的要求。由此验证了本刚性接触网有限元模型的有效性。

2  接触网结构参数对弓网系统动态性能的影响

2.1  受电弓弓头质量的影响

将弓头质量设置为 5.12 kg、7.12 kg、9.12 kg 及 11.12 kg,不同弓头质量下的接触压力统计值如表 4 所示。

由表 4 可以看出,随着弓头质量增大,  $F_m$  基本不变,  $F_{max}$  和  $s$  均增大,  $F_{min}$  减小。  $s$  变大表明接触压力的离散程度变大,接触压力波动加大。受电弓弓

头质量越大,意味着弓头的惯性越大,其跟随能力下降,不利于弓网受流。因此,仅从弓头质量变化的角度来看,弓头轻量化是优化弓网动力学特性的有效措施。

表 4 不同弓头质量下接触压力统计值				
弓头质量/kg	$F_m/N$	$s/N$	$F_{min}/N$	$F_{max}/N$
5.12	110.26	4.99	100.783	122.73
7.12	110.22	7.77	89.160	133.39
9.12	109.93	15.64	82.870	138.27
11.12	110.16	21.31	72.510	149.77

### 2.2 受电弓弓头刚度的影响

将弓头刚度设置为 4 kN/m、6 kN/m、8 kN/m 及 10 kN/m,不同弓头刚度下的接触压力统计值如表 5 所示。

表 5 不同弓头刚度下接触压力统计值				
弓头刚度/(kN/m)	$F_m/N$	$s/N$	$F_{min}/N$	$F_{max}/N$
4	109.98	9.15	88.87	132.35
6	110.04	8.37	88.82	133.74
8	110.22	7.77	89.16	133.39
10	110.15	7.11	90.35	131.66

由表 5 可以看出,随着弓头弹簧刚度增大, $F_{min}$  增大, $F_{max}$  和  $s$  减小,平均值基本不变。当弓头弹簧刚度过大时,弓头弹簧无法大限度压缩,受电弓跟随能力下降;当其刚度过小时,弓头弹簧的形变增大,失去了弹簧对于冲击载荷起到的缓冲作用,不利于改善弓网受流。因此,从弓头刚度的角度进行受电弓结构优化设计时,考虑到弓网动力特性,弓头宜选用刚度较小的弹簧。

### 2.3 受电弓弓头阻尼的影响

将弓头阻尼设置为 0、30 Ns/m、60 Ns/m、90 Ns/m 及 120 Ns/m,不同弓头阻尼下的接触压力统计值如表 6 所示。

表 6 不同弓头阻尼下接触压力统计值				
弓头阻尼/(Ns/m)	$F_m/N$	$s/N$	$F_{min}/N$	$F_{max}/N$
0	110.12	8.81	86.39	136.07
30	110.22	7.77	89.16	133.39
60	110.01	7.07	93.59	128.12
90	110.29	6.96	93.74	128.12
120	110.07	6.93	95.66	127.43

由表 6 可以看出,随着弓头阻尼增大, $F_{max}$  及  $s$  变小, $F_{min}$  变大;当弓头阻尼为 0 时,弓头未起缓冲

作用,接触波动较为剧烈。综合考虑,在进行受电弓结构优化设计时,弓头阻尼可选用较小的数值。

### 2.4 接触网跨距的影响

将跨距设置为 6 m、8 m、10 m,不同跨距下的接触压力统计值如表 7 所示。

表 7 不同跨距下接触压力统计值				
跨距/m	$F_m/N$	$s/N$	$F_{min}/N$	$F_{max}/N$
6	110.01	1.60	103.28	116.78
8	110.22	7.77	89.16	133.39
10	110.01	14.01	55.92	148.38

由表 7 可以看出,随着跨距的增大, $F_{min}$  变小, $F_{max}$  及  $s$  均变大,接触波动加剧。随着跨距的减小,各跨的挠度差异减弱,接触网的弹性均匀程度随之提高,有利于弓网更好受流。但跨距的减小将增大接触网建设的成本与工程量,故在设计安装时应合理布置跨距,减少因为跨距布置不合理而引起的弓网受流质量变差。

### 2.5 悬挂结构刚度的影响

将悬挂结构刚度设置为  $3.78 \times 10^3$  N/m、 $3.78 \times 10^4$  N/m、 $3.78 \times 10^5$  N/m、 $3.78 \times 10^6$  N/m 及  $3.78 \times 10^7$  N/m。不同悬挂结构刚度下的接触压力统计值如表 8 所示。

表 8 不同悬挂结构刚度下接触压力统计值				
悬挂结构刚度/(N/m)	$F_m/N$	$s/N$	$F_{min}/N$	$F_{max}/N$
$3.78 \times 10^3$	107.87	15.67	82.26	145.96
$3.78 \times 10^4$	109.64	8.10	87.14	133.36
$3.78 \times 10^5$	109.88	8.87	88.62	131.74
$3.78 \times 10^6$	109.61	8.44	88.89	134.87
$3.78 \times 10^7$	110.22	7.77	89.16	133.39

由表 8 可以看出,当悬挂结构刚度较低时, $s$  较大,说明接触压力波动加剧,整体悬挂“松弛”;当悬挂结构刚度为  $10^4 \sim 10^7$  N/m 时,接触压力各项统计值变化不明显, $s$  变化平稳,接触压力波动平缓。

### 2.6 静态抬升力的影响

将静态抬升力设置为 70 N、90 N、110 N 及 130 N,不同静态抬升力下的接触压力统计值如表 9 所示。

由表 9 可以看出,随着静态抬升力的减小, $F_{max}$  与  $F_{min}$  明显减小, $F_m$  与静态抬升力变化保持一致, $s$  基本不变。

2.7 锚段关节的影响

在有无锚段关节时的接触压力如图 7 和图 8 所示,接触压力统计值如表 10 所示。

表 9 不同静态抬升力下接触压力统计值				
静态抬升力/N	$F_m$ /N	$s$ /N	$F_{min}$ /N	$F_{max}$ /N
70	70.04	8.44	47.37	94.38
90	90.15	7.67	69.75	111.22
110	110.22	7.77	89.16	133.39
130	130.28	7.45	111.18	151.49

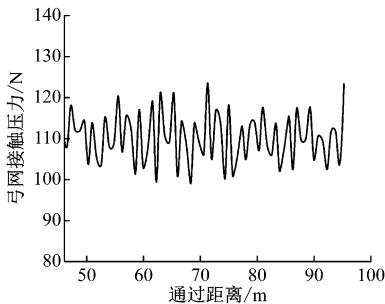


图 7 无锚段关节时接触压力统计值曲线

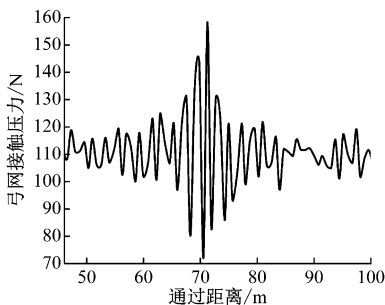


图 8 有锚段关节时接触压力统计值曲线

表 10 有无锚段关节时接触压力统计值				
关节	$F_m$ /N	$s$ /N	$F_{min}$ /N	$F_{max}$ /N
无锚段关节	110.22	7.76	99.16	122.59
有锚段关节	109.92	13.68	72.24	158.26

由图 7、图 8 与表 10 可以看出,当列车通过锚段关节处时,接触压力波动十分剧烈,弓网受流质量变差;在列车通过锚段关节后,接触压力波动逐渐减弱。因此,当列车通过锚段关节部位时,应该将速度控制在合理的范围内,以降低接触压力巨大波动为列车运行带来的影响。

3 结语

本文建立了包含锚段关节的刚性接触网系统

有限元模型,依据相应铁路标准验证了该模型的有效性。通过有限元模型仿真研究了受电弓结构参数、接触网跨距、悬挂结构刚度等弓网结构参数对弓网系统动态性能的影响,结论如下:

- 1) 受电弓弓头质量及弓头刚度的增大,将降低受电弓的跟随能力,加剧接触压力波动,使弓网受流质量变差。故在优化受电弓结构时,可适度降低弓头质量与刚度。
  - 2) 弓头阻尼的增大减缓了弓头的颠簸,使接触压力波动减弱,提升了弓网受流质量。
  - 3) 跨距增大后,接触压力波动明显剧烈,导致受流质量明显变差。
  - 4) 悬挂结构刚度的降低导致接触压力波动较剧烈,受流质量变差。
- 上述结论可为采用门式悬挂结构的刚性接触网优化设计提供参考和依据。

参考文献

[1] 关金发,吴积钦,方岩. 刚性接触网的研究综述及展望[J]. 都市快轨交通,2016 (6):37.

[2] 郝方涛,吴积钦. 基于 ANSYS 的接触网弹性计算 [J]. 电气化铁道,2010 (3):31.

[3] 宋洋,刘志刚,汪宏睿. 高速铁路覆冰接触线气动系数研究与风振响应分析[J]. 铁道学报,2014 (9):20.

[4] 宋洋,刘志刚,鲁小兵,等. 计及接触网空气动力的高速弓网动态受流特性研究[J]. 铁道学报,2016 (3):48.

[5] 孙宁,陈珍宝,梁坤,等. 160 km/h 速度等级刚性接触网受电弓弓网动态仿真分析[J]. 电力机车与城轨车辆,2020 (3):49.

[6] 姜静,刘志刚,宋洋. 考虑受电弓非线性的弓网动态特性仿真研究[J]. 计算机仿真,2015 (2):170.

[7] 梅桂明,张卫华. 刚性悬挂接触网动力学研究[J]. 铁道学报,2003(2):24.

[8] 代洪宇,史海欧,冯超,等. 基于有限元的交流刚性接触网定位点刚度仿真研究[J]. 电气化铁道,2020 (2):40.

[9] 杨艺,周宁,李瑞平,等. 基于有限元法的弓网过渡段处动态性能仿真分析[J]. 振动与冲击,2016 (18):71.

[10] 艾东兵. 城市轨道交通刚性接触网拉出值优化[J]. 城市轨道交通研究,2018 (7):50.

[11] 盛良,赵立峰,张文轩,等. 地铁架空刚性接触网弓网系统运行特征分析[J]. 现代城市轨道交通,2019(8):63.

[12] 韩柱先,王国梁. 刚性接触网的不平顺分析[J]. 铁道工程学报,2007(4):61.

(收稿日期:2020-12-15)