

城市轨道交通车速 160 km/h 刚性接触网 施工误差仿真研究

乔锦新¹ 关金发² 程军营² 罗成² 冯帆²

(1. 中铁第一勘测设计院集团有限公司, 710075, 西安; 2. 西南交通大学电气工程学院, 610031, 成都)

摘要 [目的] 针对我国城市轨道交通车速 160 km/h 刚性接触网施工误差对弓网动态性能的影响, 基于现场实测数据, 结合刚性接触网弓网系统仿真分析, 对车速 160 km/h 受电弓与刚性接触网系统设计出满足条件的技术参数。[方法] 首先, 对广州地铁三北线进行供电接触网导高(接触线至轨面的垂直距离)参数实测, 对导高的概率分布规律进行了分析, 认为导高分布与定位点静态高度分布基本一致, 均服从正态分布; 然后, 在考虑导高施工误差的情况下, 选取 DSA250 型受电弓, 根据 TB/T 3271 标准建立了弓网动态仿真模型; 最后, 仿真分析了不同导高施工误差下的弓网动态性能, 并设计了满足车速 160 km/h 的弓网系统技术参数。[结果及结论] 刚性悬挂装置导高的施工误差服从正态分布的概率分布模型; 导高存在施工误差的接触力标准差是无施工误差的 2~3 倍, 说明导高施工误差对弓网动态耦合性能的影响显著; 对刚性悬挂导高的施工误差, 锚段关节处 6 个定位点高度服从均值为接触线标称高度、标准差为 2 mm 的正态分布, 其他定位点高度服从均值为接触线标称高度、标准差为 3 mm 的正态分布。

关键词 城市轨道交通; 刚性接触网; 施工误差; 仿真分析; 导高; 接触力

中图分类号 U225.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.035

Research on Construction Error Simulation of Rigid Catenary for 160 km/h Urban Rail Transit

QIAO Jinxin¹, GUAN Jinfa², CHENG Junying², LUO Cheng², FENG Fan²

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd. 710075, Xi'an, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] As construction error of the rigid catenary at 160 km/h train speed affects the dynamic performance of the pantograph catenary, the technical parameters that meet the condition for the pantograph and rigid catenary system at 160 km/h are designed based on the on-site measurement data

and the simulation analysis of rigid pantograph catenary system. [Method] Firstly, the guiding height (vertical distance from catenary to rail surface) parameters of Guangzhou Metro Sanbei Line are measured, and the probability distribution of guiding height is analyzed. It is concluded that the guiding height distribution is basically consistent with the static height distribution of the fixed points, both following the normal distribution. Then, in consideration of the construction error of the guiding height, the DSA250 pantograph is selected and the dynamic simulation model of the pantograph is established according to TB/T 3271. Finally, the dynamic performance of the pantograph catenary under different construction errors is simulated and analyzed, and the technical parameters of the pantograph catenary system meeting 160 km/h requirements are designed. [Result & Conclusion] The construction error of rigid suspension device guiding height follows the probability distribution model of normal distribution. The standard deviation of the contact force with construction error is 2 to 3 times that without construction error, indicating that the construction error of the guiding height has significant influence on the dynamic coupling performance of the pantograph catenary. For the construction error of rigid suspension device guiding height, the height of 6 fixed points at the anchor segment joints strictly follows the normal distribution with the mean being the nominal height of the overhead line and the standard deviation being 2 mm, and the height of other fixed points strictly follows the normal distribution with the mean being the nominal height of the overhead line and the standard deviation being 3 mm.

Key words urban rail transit; rigid catenary; construction error; simulation analysis; guiding height; contact force

刚性接触网作为一种安装于地铁隧道内的供电网, 专为列车提供所需电能, 现已被广泛使用。刚性接触网由于刚度较大, 一旦导高方向有较大的施工误差, 可直接引起较大的受电弓垂向振动幅度, 影响弓网动态受流。而刚性接触网导高(接触

线距轨面的垂直距离)变化受到刚性接触网弛度、定位点施工误差、定位点安装卡滞与温度共同作用等因素影响。其中刚性接触网弛度由自身结构与参数决定而不受施工影响,定位点施工误差和安装卡滞是由安装与施工过程造成,但定位点安装卡滞属非工作状态且需避免。因此,本文重点考虑车速 160 km/h 刚性接触网的弛度及定位点的施工误差引起的高度变化。

国内外对刚性接触网悬挂系统弓网动态作用也进行了一些相关研究。如,文献[1]建立了弓网动态仿真模型,通过对弓网动力性能参数的优化,设计出“Y”型刚性悬挂,并通过试验验证了仿真模型。文献[2]基于模态叠加法理论建立了接触网动力模型,并对刚柔过渡及锚段关节复杂位置处的弓网动力性能进行了研究。文献[3]则从建设成本、可靠性、可维修性等方面对刚性接触网优势进行了分析,仿真分析结果表明,刚性悬挂模式可满足 130 km/h 的车速。文献[4]通过建立刚性网模型,确立跨距、定位点刚度值,分别就不同形式锚段关节提出新的拉出值布置方案,形成了车速 200 km/h 的交流刚性接触网方案。目前,国内外学者较多通过建立弓网有限元模型研究弓网动力响应,其影响因素包括运行速度、接触力及受电弓弓头质量等^[5-6]。

综上,国内外学者尚未对刚性悬挂装置导高的施工误差对弓网动态性能的影响进行深入的研究。本文从弓网受流理论出发,研究实际线路刚性接触网导高的概率分布规律,并利用该规律,在考虑导高施工误差的情况下建立了弓网仿真模型,对不同施工误差下的弓网动态作用进行研究,分析满足车速 160 km/h 运行要求的刚性接触网导高施工误差的合理范围,为 160 km/h 运行车速的刚性接触网弓网系统方案研究提供理论基础。

1 实际线路导高概率分布

利用安装在试验地铁列车上的刚性接触网几何参数测试装置测试广州地铁三北线的导高参数。统计上下行线实测数据形成直方图,利用正态分布拟合方法,对上下行实测数据进行分布拟合,得到置信水平为 95% 的拟合曲线,见图 1。整体观察实测数据与拟合曲线可知,实测数据绝大部分落在拟合曲线以内,说明导高基本符合均值 4 040.8 mm、标准差 2.13 mm 的正态分布。

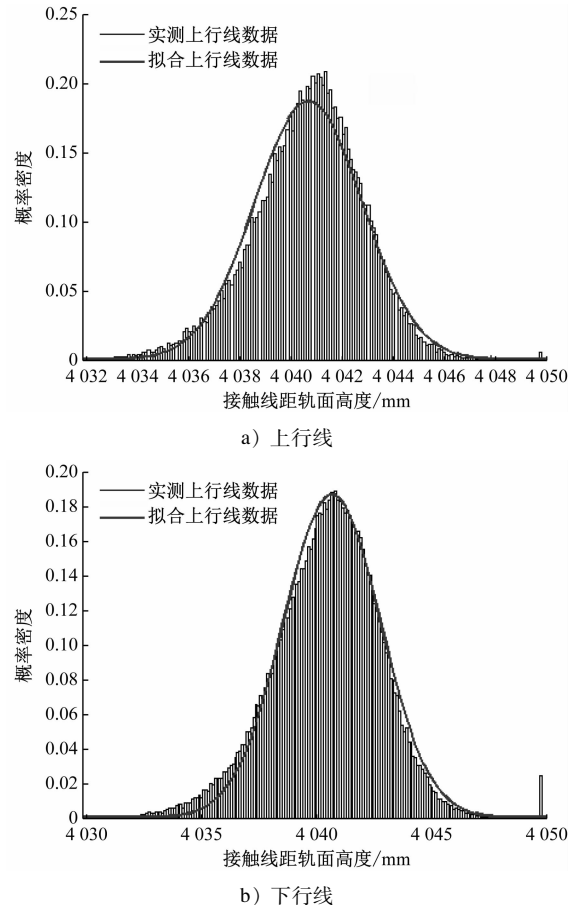


图 1 实测导高施工误差拟合正态分布

Fig. 1 Fitted normal distribution of measured guiding height construction errors

由于广州地铁三北线刚性接触网的跨距为 6 m,其理论最大弛度为 1.5 mm。但从实测结果上看,接触网高度仍有较大的误差,最大误差为 ± 6.4 mm,分析原因主要由于汇流排的定位悬挂点存在高度方向的施工误差,可认为导高分布与定位点静态高度分布基本一致,均服从正态分布。

2 受电弓与刚性接触网动态仿真模型

为适应车速 160 km/h 的运行需求,市域铁路供电制式可选择 AC 25 kV。参考国内外干线铁路的刚性接触网运行经验,选取 DSA250 型受电弓,设计车速 160 km/h 刚性接触网备选方案。根据文献[3]所采用的受电弓模型参数测量方法,对 DSA250 型受电弓模型参数进行测量,得到测量数据如表 1 所示。受电弓三质量块模型如图 2 所示。受电弓三质点模型动力学方程如式(1)所示:

$$M_{pa}\ddot{y}_{pa} + C_{pa}\dot{y}_{pa} + K_{pa}y_{pa} = F_{cpa} \quad (1)$$

式中:

M_{pa} ——受电弓质量矩阵;

C_{pa} ——受电弓阻尼矩阵;

K_{pa} ——受电弓刚度矩阵;

y_{pa} ——受电弓竖向位移;

F_{cpa} ——外力矩阵,其元素包含接触力 f_c 及静态升弓力 f_0 。

表1 DSA250型受电弓模型参数

Tab.1 Parameters of DSA250 pantograph model

构件名称	质量		刚度		阻尼	
	符号	数值/kg	符号	数值/(N/m)	符号	数值/(N·s/m)
弓头	m_3	7.510	k_3	8 380	c_3	0
上框架	m_2	5.855	k_2	6 200	c_2	0
上臂杆	m_1	4.645	k_1	80	c_1	70

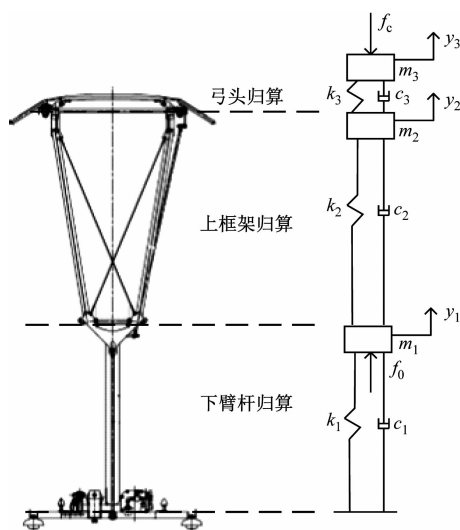


图2 受电弓三质量块模型

Fig.2 Pantograph three-mass-block model

根据 TB/T 3271—2011 标准中的受电弓平均接触力目标曲线^[7], DSA250 型受电弓气动力取 $(0.000\ 97v^2)\text{N}$ (v 以 km/h 计), 静态抬升力取 70 N。

参考国内外干线铁路的刚性接触网运行经验, 设计车速 160 km/h 刚性接触网的备选方案, 其锚段长度取 250 m, 跨距取 8 m, 模型参数如表 2 所示。

由于接触网锚段长度相比其截面大得多, 故刚性接触网可等效为梁单元, 其定位悬挂则等效为弹簧单元, 得到刚性接触网动力学方程为:

$$M_f \ddot{u}_f + C_f \dot{u}_f + K u_f = G_f + F_{cf} \quad (2)$$

式中:

M_f ——质量矩阵;

u_f ——节点位移坐标;

表2 刚性接触网模型参数

Tab.2 Parameters of rigid catenary model

参数名称	数值
汇流排单位长度质量/(kg/m)	5.9
汇流排加接触线截面/mm ²	2279
汇流排加接触线垂向惯性矩/m ⁴	0.347×10^{-5}
跨距/m	8
定位点刚度/(N/m)	6.7×10^6
拉出值/m	0.3
锚段长度/m	250

注: 汇流排为 II 类铝合金; 接触线选 CTA120 型; 锚段过渡结构采用锚段关节。

K ——弹性刚度矩阵;

F_{cf} ——接触力矩阵;

G_f ——重力矩阵;

C_f ——瑞利阻尼矩阵。

常量重力则归算到各单元节点上。当接触力作用在坐标为 $(x_f, 0)$ 的梁单元处, 将式(3)的 $F_{c,e}$ 等效到两节点上。

$$F_{c,e} = \left[0, \frac{f_c(l-x_f)^2(l+2x_f)}{l^3}, 0, 0, 0, \frac{f_c x_f(l-x_f)^2}{l^2}, 0, \frac{f_c x_f^2(3l-2x_f)}{l^3}, 0, 0, 0, -\frac{f_c x_f(l-x_f)^2}{l^2} \right]^T \quad (3)$$

式中:

$F_{c,e}$ ——梁单元的接触力矩阵;

l ——单元长度;

f_c ——接触力。

基于以上分析, 建立弓网接触模型如图 3 所示。弓网动力耦合主要为滑动接触, 可采用罚函数解决接触问题。如图 3 所示, 令接触线质量点 m_3 同单元 i, j 的垂向位移为 $\Delta\xi$, 可计算出弓网相互作用接触力 $f_c(t)$ 计算公式为:

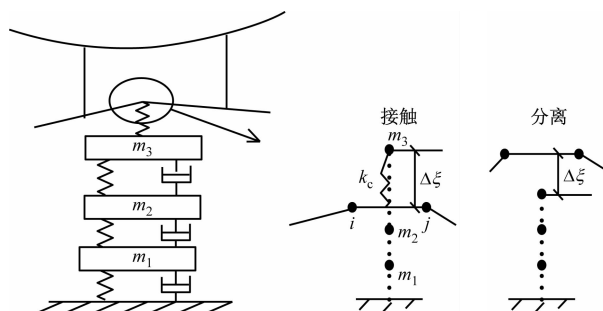


图3 弓网接触模型

Fig.3 Model of pantograph-catenary contact

$$f_c(t) = \begin{cases} k_c \Delta \xi(t), & \Delta \xi(t) \geq 0 \\ 0, & \Delta \xi(t) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

联立式(1)一式(4),利用 Newmark- β 隐式积分算法,采用迭代法对弓网动力方程进行求解,进而求得弓网接触力及节点位移,以对弓网动力性能进行评估。

3 不同导高施工误差下的弓网动态仿真分析

跨距为 6 m 的刚性接触网导高最大施工误差为 ± 6.4 mm(考虑 3 倍标准差)。此处跨距为 8 m,跨距变大,悬挂质量增加,进而对定位点的安装调整难度增加,其导高最大施工误差可适当放大为 ± 9 mm,即标准差为 3 mm。利用 Matlab 软件产生 3 组定位点处的高度施工误差,利用正态分布拟合方法,对 3 种工况下的正态分布曲线进行拟合,其中工况 1 定位点处高度施工误差的概率分布见图 4。计算出工况 1—工况 3 的正态分布曲线标准差分别为 3.0 mm、2.9 mm、2.7 mm,而均值分别为 0.1 mm、0.27 mm、0.02 mm。

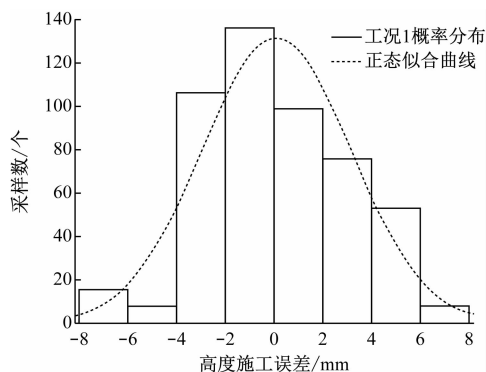


图 4 工况 1 定位点处高度施工误差的概率分布

Fig. 4 Probability distribution of height construction errors at positioning point in Case 1

根据前述的刚性接触网的建模方法与参数,得到理论情况下无高度施工误差的刚性接触网受自重的平衡位移形状,见图 5。可以发现接触网形状规整,每一跨呈一定弛度的半月形,锚段关节处的弛度较小。



图 5 定位点处无高度施工误差的刚性接触网位形

Fig. 5 Rigid catenary displacement at the positioning point without height construction errors

在这 3 种定位点处存在高度施工误差下,建立 3 种刚性接触网结构,得到定位点处高度存在施工误差时受自重影响的位移形状。其中工况 1 的刚性接触网位形见图 6,可以发现,定位点处存在高度施工误差时的接触网形变明显。

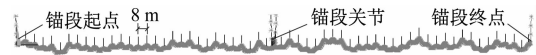


图 6 工况 1 定位点处存在高度施工误差时的刚性接触网位形

Fig. 6 Rigid catenary displacement of height construction errors at positioning points with in Case 1

刚性接触网位形的改变,使得受电弓通过刚性接触网时的力学特性发生变化。根据我国 TB/T3271 标准,接触力大小为 0 ~ 300 N,接触力标准差应低于其平均值的 0.3 倍。

由 DSA250 型受电弓以 160 km/h 通过无施工误差与 3 种施工误差下的刚性接触网仿真模型,得到各种工况的接触力特征值,见表 3。由表 3 可见:与无高度施工误差相比,工况 1—工况 3 接触力标准差大 2 ~ 3 倍;工况 1 和工况 3 的最小接触力均等于 0,弓网发生离线,不满足标准要求,说明所有定位点处高度施工误差服从标准差为 3 mm 的正态分布的刚性接触网不能满足车速 160 km/h 的运行需求。故将锚段关节处 6 个定位点的高度施工误差减小至服从标准差为 2 mm 的正态分布,重新建模仿真校核。得到改进工况后各接触力特征值,见表 3。发现改后的各工况的接触力标准差、最小接触力、最大接触力和 $0.3F_m - \delta$ 均满足标准要求。改进后的定位点处高度施工误差为:锚段关节处 6 个定位点高度施工误差服从均值为接触线标称高度、标准

表 3 不同导高施工误差下的弓网接触力统计值

Tab. 3 Pantograph-catenary contact force statistic with different guiding height construction errors

工况	平均接触力 F_m /N	接触力标准差 δ /N	最小接触力/N	最大接触力/N	$(0.3F_m - \delta)$ /N
无施工误差	93.25	8.08	33.40	141.70	19.89
原工况 1	93.23	21.61	0	220.57	6.36
原工况 2	92.96	18.64	19.66	178.82	9.25
原工况 3	93.31	17.42	0	188.15	10.57
改进工况 1	93.25	14.77	24.89	156.48	13.20
改进工况 2	93.08	20.98	3.67	178.42	6.95
改进工况 3	93.25	15.99	6.71	155.56	11.98

差为 2 mm 的正态分布;其他定位点处高度施工误差服从均值为接触线标称高度、标准差为 3 mm 的正态分布。锚段关节处 99.7% 的定位点处高度施工误差在 ± 6 mm 范围内;其他定位点 99.7% 的定位点处高度施工误差在 ± 9 mm 范围内。

4 结语

1) 通过对现场实测导高值的统计分析,得出刚性悬挂系统导高施工误差服从正态分布模型。

2) 利用刚性悬挂导高施工误差的分布规律,生成正态随机数,建立考虑导高施工误差的刚性接触网仿真模型。通过弓网动态仿真分析,得到导高存在施工误差的接触力标准差是无施工误差的 2~3 倍,说明导高施工误差对受电弓与刚性接触网动态耦合性能的影响显著。

3) 通过弓网动态仿真分析,得到满足车速 160 km/h 的弓网系统技术参数。该弓网系统技术参数可为车速 160 km/h 刚性接触网方案设计与施工提供参考。

参考文献

- [1] VERA C, SUAREZ B, PAULIN J, et al. Simulation model for the study of overhead rail current collector systems dynamics, focused on the design of a new conductor rail[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(8): 595.
- [2] 王世轩. 城市轨道交通弓网建模方法适用性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
WANG Shixuan. Applicability study of pantograph-catenary modeling method in urban transit system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

- [3] MAK M K. Adoption of overhead rigid conductor rail system in MTR extensions[J]. Journal of International Council on Electrical Engineering, 2012, 2(4): 463.
- [4] 代洪宇. 200 km/h 交流刚性接触网方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
DAI Hongyu. Research on 200km/h AC rigid catenary scheme [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [5] 宋博瀚. 地铁刚性接触网弓网关系与优化策略分析[J]. 中国设备工程, 2022(10): 83.
SONG Bohan. Analysis on the relationship between pantograph and catenary and its optimization strategy in metro rigid catenary[J]. China Plant Engineering, 2022(10): 83.
- [6] 关金发. 受电弓与刚性接触网动力相互作用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
GUAN Jinfa. Study on dynamic interaction between pantograph and rigid catenary[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [7] 中华人民共和国铁道部. 轨道交通 受流系统 受电弓与接触网相互作用准则: TB/T 3271—2011[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Railway applications-Current collection systems- Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access): TB/T 3271—2011[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.

· 收稿日期:2021-12-16 修回日期:2022-03-12 出版日期:2024-06-10
Received:2021-12-16 Revised:2022-03-12 Published:2024-06-10
· 第一作者:乔锦新,工程师,61969461@qq.com
通信作者:冯帆,硕士研究生,fflabcde@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 190 页)

- ZHU Chunjie. Research on impact and safety control measures of newly built subway tunnel undercrossing the existing subway station [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2015.
- [4] 张桂彬. 复合地层盾构下穿高架桩基施工安全控制研究[J]. 建筑安全, 2021, 36(4): 26.
ZHANG Guibin. Study on safety control of shield tunneling under elevated pile foundation in composite stratum[J]. Construction Safety, 2021, 36(4): 26.
- [5] 王春凯. 小半径近距离盾构隧道侧穿高架桩基影响研究[J]. 城市道桥与防洪, 2017(6): 282.
WANG Chunkai. Analysis on influence of minor radius short-distance shield tunnel side crossing viaduct pile foundation[J].

- Urban Roads Bridges & Flood Control, 2017(6): 282.
 - [6] 韦巍, 贺建军. 某铁路隧道下穿既有高架站安全性影响分析[J]. 技术与市场, 2015, 22(8): 74.
WEI Wei, HE Jianjun. Analysis on the safety impact of a railway tunnel undercrossing the existing elevated station[J]. Technology and Market, 2015, 22(8): 74.
- 收稿日期:2023-10-30 修回日期:2023-12-11 出版日期:2024-06-10
Received:2023-10-30 Revised:2023-12-11 Published:2024-06-10
· 作者:李志敏,高级工程师,86295464@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license