

不同列车运行速度下架空刚性接触网跨距的选择

周 韬

(重庆轨道交通设计研究院有限责任公司, 401120, 重庆 // 工程师)

摘 要 架空刚性接触网是城市轨道交通常用的接触网方案,其跨距选择对弓网系统受流质量影响较大,因而选择与列车运行速度相匹配的接触网跨距相当重要。考虑弓网系统受流质量影响因素,从刚性接触网波动传播速度及接触网系统整体不平顺度等方面,分析了接触网跨距与列车运行速度的匹配关系,从而得出与列车运行速度匹配的刚性接触网跨距布置原则的建议方案。

关键词 城市轨道交通; 架空刚性接触网; 跨距; 波动速度; 不平顺度

中图分类号 U225.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.06.035

Selection of Overhead Rigid Catenary Span Based on Different Train Operating Speeds

ZHOU Tao

Abstract Overhead rigid catenary is a common catenary scheme in urban rail transit. Its span selection has a great influence on the current collection quality of pantograph-catenary system. Therefore, it is very important to select a suitable span of overhead catenary that matches the train operating speed. Considering the influencing factors of current collecting quality of pantograph-catenary system, the matching relationship between span of catenary and train operating speed is analyzed from the aspects of wave propagation speed of rigid catenary and overall irregularity of catenary system, thus the principle and suggestion scheme of rigid catenary span arrangement matching with train operating speed are obtained.

Key words urban rail transit; overhead rigid catenary; span; fluctuation speed; irregularity

Author's address Chongqing Rail Transit Design & Research Institute Co., Ltd., 401120, Chongqing, China

在已经建成运营和规划的城市轨道交通线路中,直流牵引网系统采用架空刚性接触网形式较为常见。近年来关于刚性接触网跨距的研究日趋增多,如设计速度为120 km/h条件下刚性接触网的跨距选择^[1]、刚性接触网最大支撑间距和最大坡度的

计算方法^[2]等。本文主要针对不同列车运行速度条件下,从接触网波动传播速度及接触网系统不平顺度等方面进行研究分析,得出架空刚性接触网的跨距布置原则的建议方案。

1 刚性接触网跨距选择概述

刚性接触网系统主要由定位装置、汇流排和接触线等组成。弓网受流过程表现为运动的受电弓与接触网进行滑动接触的过程。整个弓网接触系统可视为以跨距为周期的连续系统。

对架空刚性接触网而言,保证弓网之间的受流质量良好,可以从接触网波动传播速度、挠度、悬挂点的定位精度和汇流排接触线不平顺度等方面进行综合考虑。其中:挠度值可由刚性接触网的跨距值及材料属性计算得到,悬挂点的定位精度主要由施工误差等施工因素决定,汇流排接触线不平顺度则由供应商的制造误差等产生的。其中,挠度、定位精度和接触线不平顺度等因素可作为影响接触网系统的整体不平顺度综合进行考虑。

总体而言,跨距值的选取在功能上对接触网系统整体不平顺度及波动传播速度均有影响,从而影响弓网系统受流质量;同时,在经济上会影响接触网系统工程投资。因此,合理地选取刚性接触网的跨距值,不仅需要从改善系统的弓网关系方面考虑,也需在技术合理的情况下考虑工程投资的经济因素,从而实现刚性接触网系统的整体优化。

2 刚性接触网波动传播速度与跨距的关系

接触网波动传播速度是指接触网波动沿着接触网传播的速度,其传播速度具有向前传播和向后传播的双向性。根据国内外的研究及试验成果,当列车运行速度逐渐接近接触网波动传播速度时,弓网关系易恶化,弓网接触压力波动幅度增加,弓网受流质量呈显著下降。

根据接触网波动传播速度的研究^[3],采用梁单

元模型分析,由波动方程求解得到波动传播速度为:

$$c_w = \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{\rho l^2} + \frac{F}{\rho}} \quad (1)$$

式中:

c_w ——波动传播速度;

ρ ——梁的线密度;

F ——接触网张力;

E ——梁的杨氏模量;

I ——梁的惯性矩;

l ——梁的跨距。

考虑到研究对象为刚性接触网,可将其视为一无张力的梁,则波动传播速度的简化求解为:

$$c_w = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (2)$$

由式(2)可知,接触网波动传播速度与跨距成反比。另结合实际运营经验,为保证良好的弓网受流关系,列车最高运行速度与波动传播速度关系一般采用如下经验公式:

$$v_{\max} \leq \alpha c_w \quad (3)$$

式中:

v_{\max} ——列车允许最高运行速度;

α ——量纲为一的系数,取值一般为0.7^[4]。

以城市轨道交通中刚性接触网常用的Ⅱ型汇流排及接触线为输入参数,得到不同跨距下的接触网波动传播速度及列车允许最高运行速度,如图1所示。

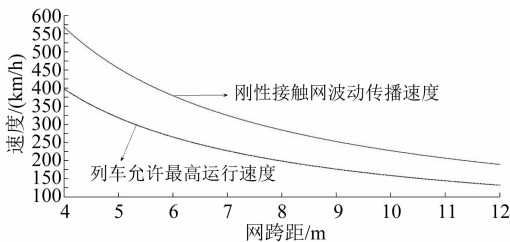


图1 不同跨距下列车允许最高运行速度与刚性接触网波动传播速度的关系图

由图1可见,随着跨距值的增大,列车允许最高运行速度逐渐降低。刚性接触网跨距值为12 m时,列车允许最高运行速度仅为118 km/h。就波动传播速度而言,在设计速度为120 km/h的线路中,刚性接触网跨距值通常不宜选取12 m。

3 刚性接触网整体不平顺度与跨距的关系

刚性接触网的不平顺是指弓网的接触面沿汇流

排延长与理论的平顺的接触面之间的偏差。刚性接触网的整体不平顺情况一般可分为两类:一类为周期性的不平顺,包含如以跨距为波长的跨中挠度及以汇流排单根长度的汇流排中间接头连接产生的不平顺;另一类是随机性的不平顺,如刚性接触网安装产生的硬点导致的不平顺^[5]。刚性接触网的整体不平顺度在不同列车运行速度条件下影响接触网的跨距选择,因而在不同列车运行速度下,需对接触网允许不平顺度、接触网周期性的不平顺度和随机性不平顺度等,就整体不平顺度而言进行综合分析,得出跨距在不同列车运行速度下的建议选取方案。

3.1 刚性接触网允许不平顺度与列车运行速度的关系

无论是刚性接触网悬挂点的安装误差,还是刚性接触网的挠度值,均会导致刚性接触网产生汇流排接触线不平顺度。为分析汇流排接触线不平顺度与列车运行速度的关系,结合相关的研究,并根据工程经验得到满足受电弓无离线取流条件下的刚性悬挂跨距存在以下要求^[6]:

$$\frac{a}{L^2} \leq \frac{g}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{v^2} \cdot \frac{P}{W} \quad (4)$$

式中:

a ——刚性悬挂的凹凸不平顺度;

g ——重力加速度;

v ——列车运行速度;

P ——受电弓静态压力;

W ——受电弓归算质量;

L ——梁的跨距。

由式(4)可以看出,刚性悬挂的跨距选取与列车运行速度及刚性悬挂的凹凸不平顺度有关。经理论计算,在无离线条件下的刚性悬挂的凸凹不平顺度允许值 $[a]$ 如表1所示。

3.2 刚性接触网周期性不平顺度与跨距的关系

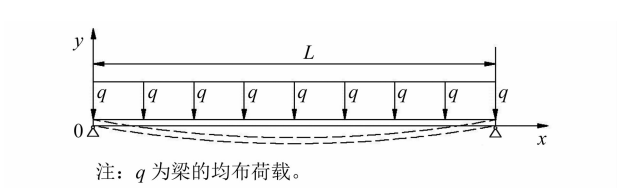
考虑刚性接触网悬挂点布置的特性,刚性接触网由多段汇流排及接触线组成,而各段汇流排通过汇流排中间接头连接,就刚性接触网周期不平顺度而言,主要包含跨中挠度及以中间接头处不平顺度两部分。由于设计施工过程中,中间接头处不平顺度应不大于0.3 mm^[7],同时中间接头一般不设置于跨中区域,故可认为其对刚性接触网周期性不平顺度影响较小,周期性不平顺度可仅计算挠度部分。

就刚性接触网锚段而言,除锚段终端外,可将两悬挂点间汇流排及接触线等效为简支梁。两悬

挂点之间的梁跨挠度计算模型如图 2 所示。

表 1 不同列车运行速度和跨距条件下刚性悬挂的凹凸不平顺度允许值表

L/m	[a]			
	v = 80 km/h 时	v = 100 km/h 时	v = 110 km/h 时	v = 120 km/h 时
5	4.47	2.86	2.36	1.99
6	6.43	4.12	3.40	2.86
7	8.76	5.61	4.63	3.89
8	11.44	7.32	6.05	5.08
9	14.48	9.27	7.66	6.43
10	17.87	11.44	9.45	7.94
12	25.74	16.47	13.61	11.44



注：q 为梁的均布荷载。

图 2 刚性接触网简支梁挠度计算模型

参照相应梁挠度的理论计算公式,可得到刚性接触网挠度与跨距的计算公式:

$$f = \frac{qx^4}{24EI} - \frac{qLx^3}{12EI} + \frac{qL^3x}{24EI} \tag{5}$$

式中:

- f——挠度;
- x——挠度计算点坐标;
- E——梁的杨氏模量;
- I——梁的惯性矩;
- L——梁的跨距。

根据式(5),可得到刚性接触网的挠度最大值 f_{\max} 位于跨中:

$$f_{\max} = \frac{5qL^4}{384EI} \tag{6}$$

经计算可知,刚性接触网挠度值与跨距之间的关系见图 3。

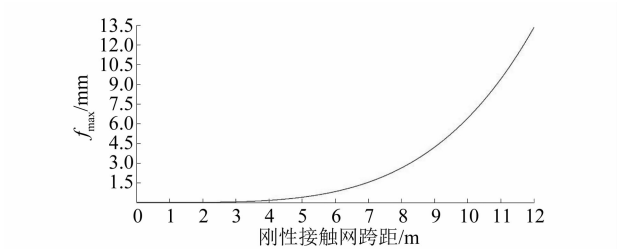


图 3 刚性接触网跨距与跨中最大挠度关系图

由图 3 可见,随着跨距值的增大,跨中挠度最大

值也相应增加。在跨距值为 6 m、8 m、10 m、12 m 时,跨中挠度最大值约为 0.83 mm、2.63 mm、6.42 mm、13.32 mm。

针对锚段终端处,将第 1 个悬挂点与终端间汇流排及接触线等效为悬臂。悬臂梁产生挠度的计算模型如图 4 所示。

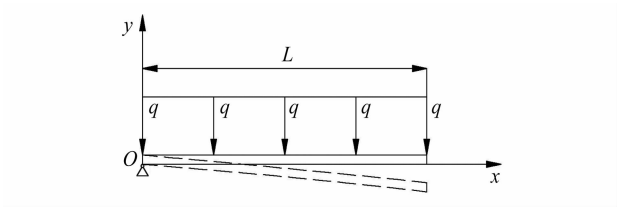


图 4 刚性接触网悬臂梁挠度计算模型

参照相应梁挠度的理论计算公式,可得到刚性接触网挠度与跨距的计算公式:

$$f = \frac{qx^4}{24EI} + \frac{qL^4}{8EI} - \frac{qL^3x}{6EI} \tag{7}$$

根据式(7),可得到刚性接触网悬臂梁的挠度最大值为:

$$f_{\max} = \frac{qL^4}{8EI} \tag{8}$$

结合刚性接触网锚段关节、锚段悬挂点布置原则及汇流排终端长度,根据计算并结合实际情况,得到锚段关节处悬挂点跨距布置,见表 2。

表 2 锚段关节处悬挂点跨距布置表

一般悬挂点 跨距/m	锚段关节处悬挂点跨距/m				
	第一跨	第二跨	第三跨	第四跨	第五跨
6.0	2.0	4.0	4.6	5.7	6.0
8.0	2.0	4.0	4.6	5.4	6.7
10.0	2.0	4.0	5.0	6.0	8.0

注:悬臂端长度为 1.3 mm。

当选用表 2 中匹配的跨距布置时,具体的刚性接触网挠度曲线图见图 5。

由图 5 可知,当刚性悬挂标准跨距增加时,接触网的最大挠度增加明显。而参照经验选取的跨距布置方案,接触网挠度曲线过渡得较为平缓,可有效缓解因跨距不匹配时过渡跨与正常跨之间的冲突,改善了接触网的周期性平顺度。

3.3 随机性不平顺度与跨距的关系

除刚性接触网挠度等产生的周期性不平顺外,不平顺产生的原因还包含接触网安装误差及接触线制造过程中产生的微小误差,结合架空接触网技术标准及实际运营情况^[7],随机性不平顺度类型及幅值如表 3 所示。

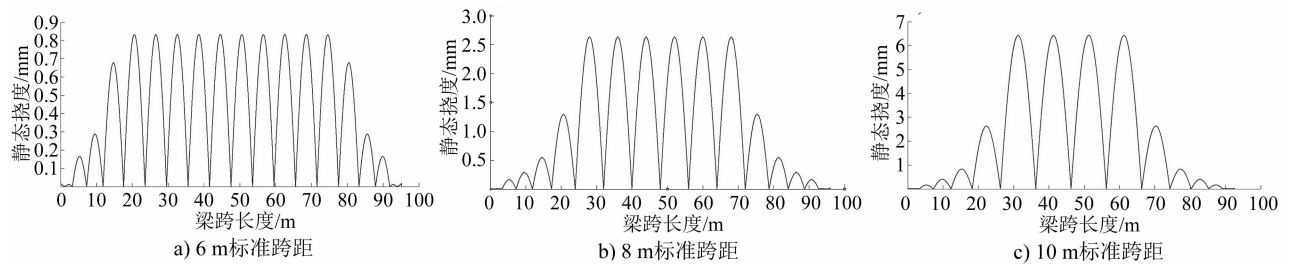


图5 刚性接触网挠度曲线图

表3 随机不平顺类型及幅值表

随机不平顺的类型	不平顺的原因	不平顺幅值/mm
吊点安装误差形成的不平顺	偏斜	$\approx 3(v=80\text{ km/h 时})$ $\approx 2(v=100\text{ km/h 时})$ $\approx 1(v=120\text{ km/h 时})$
建成时的微小不平顺	制造及安装时的调整或卷绕折痕	≤ 0.3
运营后的微小不平顺	起皱	≈ 0.3

3.4 分析及小结

结合上述接触网系统不平顺度计算结果,可得在考虑周期性不平顺度及随机性不平顺度综合作用的情况下,接触网不平顺度余值与列车运行速度的关系,如表4所示。

由表4可知:在仅考虑周期性不平顺度时,当列

车运行速度为120 km/h、跨距为12 m时,不平顺度无法满足弓网无离线取流条件的要求。在考虑周期性及随机不平顺度两方面作用时,刚性接触网在列车运行速度为80 km/h的条件下,理论计算跨距值在5~12 m范围内的不平顺度均满足弓网无离线取流条件的要求;在列车运行速度为100 km/h的条件下,理论计算跨距值在6~12 m范围内的不平顺度均满足弓网无离线取流条件的要求;在列车运行速度为110 km/h的条件下,理论计算跨距值在6~10 m范围内的不平顺度均满足弓网无离线取流条件的要求;在列车运行速度为120 km/h的条件下,理论计算跨距值在6~9 m范围内的不平顺度均满足弓网无离线取流条件的要求。

表4 不平顺度余值与列车运行速度的关系表

跨距/m	仅考虑周期性不平顺度的不平顺度余值/mm				考虑周期性不平顺度及随机不平顺度的不平顺度余值/mm			
	$v=80\text{ km/h 时}$	$v=100\text{ km/h 时}$	$v=110\text{ km/h 时}$	$v=120\text{ km/h 时}$	$v=80\text{ km/h 时}$	$v=100\text{ km/h 时}$	$v=110\text{ km/h 时}$	$v=120\text{ km/h 时}$
5	4.07	2.46	1.96	1.58	0.47	-0.14	-0.14	-0.02
6	5.60	3.29	2.57	2.03	2.00	0.69	0.47	0.43
7	7.22	4.06	3.09	2.35	3.62	1.46	0.99	0.75
8	8.81	4.69	3.42	2.45	5.21	2.09	1.32	0.85
9	10.26	5.05	3.44	2.22	6.66	2.45	1.34	0.62
10	11.45	5.02	3.03	1.52	7.85	2.42	0.93	-0.08
12	12.42	3.15	0.29	-1.88	8.82	0.55	-1.81	-3.48

4 结语

本文从刚性接触网波动传播速度及接触网系统不平顺度等方面,研究架空刚性悬挂跨距与列车运行速度的关系,结合刚性接触网工程投资情况,可得出不同速度下刚性接触网跨距选择的建议如下:

- 1) 在列车运行速度不大于80 km/h时,刚性接触网跨距可选取为5~10 m,宜设置为8 m,不建议设置为12 m,同时相邻定位点间跨距比不宜设置过大。
- 2) 在列车运行速度不大于100 km/h时,刚性接触网跨距可选取为6~10 m,宜设置为8 m,不建

议设置为12 m,尚需保证施工误差较小,同时相邻定位点间跨距比不宜过大。

3) 在列车运行速度不大于120 km/h时,刚性接触网跨距可选取为6~9 m,宜设置为8 m,不建议在高速区段设置9 m以上跨距值,尚需重点保证施工误差,同时相邻定位点间跨距比不宜过大。

另外,由于本文主要从理论上分析了不同列车运行速度下刚性接触网跨距的选择,而实际建设及运营过程中仍存在其他因素的影响,故实际跨距选择可根据实际情况进行模拟仿真及工程试验验证后再综合考虑。

(下转第165页)

表 3 3 种同相牵引供电方案的系统可靠性计算结果

可靠性特征量	方案 1	方案 2	方案 3
平均工作概率/%	97.416 750	97.465 260	97.465 259
平均停工概率/%	2.583 250	2.534 740	2.534 741
平均维修时间/h	2.353 800	2.465 900	2.465 870
维修率/(次/h)	0.424 800	0.405 500	0.405 500
故障率/(次/年)	98.686 900	92.388 300	92.388 300
平均工作时间/h	88.765 600	94.817 200	94.817 200
平均寿命周期/h	91.119 400	97.283 100	97.283 100

通过上述计算结果可知,由于原牵引供电方案的牵引变电所层的正常工作概率比同相牵引供电方案低两个数量级,因此,同相牵引供电的系统可靠性比原供电方案的系统可靠性高。

5 结语

相较于传统牵引供电系统,同相牵引供电系统的可靠性更高。该系统取消了电分相,采用交流供电,同时解决了过分相问题和杂散电流问题。接触网采用的分段供电和检测技术,可以缩短故障维修时间,进一步提高牵引网的供电可靠性。因此,采用同相牵引供电技术方案,在解决既有问题的同时,供电系统的可靠性也有所提升。

(上接第 157 页)

条件,通过实际放样,充分考虑安装后可能出现的问题,在设计阶段进行规避。施工过程中也应对接触网刚柔过渡处予以重视,应减少施工误差,以保证刚柔过渡处良好的弓网关系。

参考文献

[1] 陈佳佳. 地铁接触网关节式刚柔过渡施工技术运用分析[J]. 科技风,2020(7): 125.

[2] 艾晓宇. 困难条件下的接触网刚柔过渡方案的探讨[J]. 科技创新与应用,2017(17): 206.

[3] 陈玮. 上海轨道交通 9 号线一期接触网刚柔过渡方案[J]. 铁

(上接第 161 页)

参考文献

[1] 王洪林. 设计时速 120 km 线路架空刚性悬挂接触网跨距选择[J]. 城市轨道交通研究,2017(10): 79.

[2] 杨理兵. II 型架空刚性接触网技术研究[J]. 城市轨道交通研究,2006(11): 50.

[3] 李夫忠. 接触网波动特性及提高波速利用率途径的研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.

[4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 轨道交通地面装置电力牵引架空接触网:GB/T 32578—2016[S]. 北京:中

参考文献

[1] 于松伟. 城市轨道交通供电系统设计原理与应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2008.

[2] 李群湛. 我国高速铁路牵引供电发展的若干关键技术问题[J]. 铁道学报,2010(4): 119.

[3] 李群湛,贺建闽. 电气化铁路的同相供电系统与对称补偿技术[J]. 电力系统自动化,1996(4): 9.

[4] 解绍锋,李群湛,贺建闽,等. 同相供电系统对称补偿装置控制策略研究[J]. 铁道学报,2002(2): 109.

[5] 陈民武. 基于 GO 法的高速铁路牵引变电所可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制,2011(18): 56.

[6] 赵文龙. 同相供电系统可靠性研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.

[7] 李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报,2014(4): 559.

[8] 李海燕,解绍锋,孙镜堤,等. 统一牵引供电系统可靠性研究[J]. 电气铁道,2018(6): 9.

[9] 郑吉. 地铁牵引供电系统可靠性分析[D]. 成都:西南交通大学,2009.

[10] 赵健. 基于 GO 法的交流牵引供电系统可靠性研究[D]. 西安:西安理工大学,2010.

[11] 林飞. 牵引供电系统可靠性指标体系与可靠性分析[D]. 成都:西南交通大学,2006.

(收稿日期:2019-05-27)

道工程学报,2010(6): 83.

[4] 李丁丁. 关节式刚柔过渡始触点高差研究[J]. 机电信息,2017(24): 151.

[5] 赵海军. 刚柔过渡方式的研究[J]. 电气化铁道,2008(1): 25.

[6] 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.

[7] FURRER B. Process and Apparatus for Coupling Elastic And Rigid Contact Line Systems:US,5957254 A[P]. 1999-09-08.

[8] 关金发,田志军,吴积钦. 基于弓网动力仿真的 160 km/h 刚柔过渡系统方案研究[J]. 铁道学报,2018(9): 48.

(收稿日期:2020-06-18)

国标准出版社,2016:16.

[5] 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.

[6] 尹魁元. 接触网刚性悬挂跨距的选择[J]. 都市轨道交通,2013(8): 105.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通架空接触网技术标准:CJJT 288—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019: 15.

(收稿日期:2019-05-31)