

地铁受电弓动态包络线分析及应用

邓 波

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安)

摘 要 [目的] 地铁供电系统中, 接触网的安全运行高度依赖于合理的受电弓动态包络线设计。然而, 当前行业内尚未就受电弓动态包络线的确定方法和参数达成统一标准, 因此, 深入研究受电弓在不同速度等级下的参数确定问题显得尤为重要。[方法] 分析了现有规范中关于动态包络线的定义, 并指出了这些定义在地铁领域应用时存在的不明确性。通过对欧洲和德国标准中受电弓摆动量的数学模型进行深入分析, 并结合地铁接触网设计的实际参数, 提出了一种估算地铁受电弓在不同运行条件下最大横向摆动量的方法。[结果及结论] 我国地铁受电弓动态包络线标准的缺失对接触网的设计安全性、施工及检修等环节均产生了重要影响。鉴于此, 期望在“十四五”期间, 通过行业协会、车辆制造商、设计单位和施工单位等多方面的协同努力, 结合标准地铁列车的开发工作, 能够制定出统一且准确的受电弓动态包络线标准, 以推动轨道交通行业的高质量发展。

关键词 地铁; 受电弓; 动态包络线; 接触网; 拉出值; 始触区

中图分类号 U231+.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.050

Analysis and Application of Metro Pantograph Dynamic Envelope

DENG Bo

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China)

Abstract [Objective] Safe operation of the catenary system in metro power supply system highly relies on the rational design of the pantograph dynamic envelope, the industry has not yet established a unified method and parameters for determining the pantograph dynamic envelope. Therefore, it is particularly important to conduct in-depth research on the determination of pantograph dynamic envelope parameters under different speed levels. [Method] The definitions of the dynamic envelope in existing specifications are analyzed and their ambiguity in the application in metro field is pointed out. By analyzing the mathematical model of the pantograph swing value in European and German standards in-depth, combined with the actual parameters of metro catenary design, an evaluation method for the maximum lateral swing value of metro pantograph under

different operation conditions is proposed. [Result & Conclusion] The lack of unified standards for China's metro pantograph dynamic envelope has a significant impact on the safety of catenary design, as well as construction, maintenance, and other aspects. In view of this situation, it is expected that during the "14th Five-Year Plan" period, through the joint efforts of industry associations, vehicle manufacturers, design units and construction units, and with the development of standard metro trains, a unified and accurate standard for pantograph dynamic envelope in China can be formulated to promote the high-quality development of rail transit industry.

Key words metro; pantograph; dynamic envelope; catenary; stagger value; initial contact zone

1 概述

受电弓动态包络线是指运行中的受电弓在最大抬升及摆动时可能达到的最大轮廓线^[1], 是关系到地铁供电系统接触网安全和列车运行安全的重要参数指标; 接触网安装的任何设备在任何情况下均不得侵入动态包络线范围内。我国电气化铁路引入受电弓动态包络线的应用始于广深电气化工程, 目前在铁路行业广泛应用, 针对不同速度等级均有较为明确的参数定义。但地铁行业由于受速度等级多样、受电弓形式多样等因素影响, 到目前尚无较为统一的受电弓动态包络线的确定参数和确定方法。

目前地铁主要为 100 km/h 及以下速度等级设计标准, 采用的受电弓主要有两种, 即 1 550 mm 受电弓宽度(以下简称“弓宽”)(有效工作宽度为 800 mm)和 1 700 mm 弓宽(有效工作宽度 1 050 mm), 如图 1 所示。

GB 50157—2013《地铁设计规范》和 CJJ/T 288—2018《城市轨道交通架空接触网技术标准》、GB/T 21561.2—2008《轨道交通 机车车辆受电弓特性和试验 第 2 部分: 地铁和轻轨车辆受电弓》等规范中对动态包络线均未做出明确规定, TB

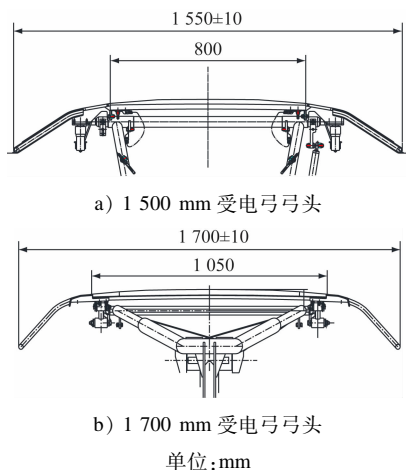


图 1 地铁常用受电弓弓头示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pantograph heads commonly used in metro

10009—2016《铁路电力牵引供电设计规范》第 5.1.10 条中规定,设计速度为 120 km/h 的列车所对应的动态包络线为上下抬升量 120 mm,左右摆动量 250 mm^[2]。上述数据上下抬升量可参考使用,但左右摆动量如也参照执行,对于有效弓宽 800 mm 的线路,则不利于接触网最大拉出值的选取。我国各运营公司对于最大摆动量执行的标准也不一致,如江苏省地方标准《城市轨道交通接触网系统维护与检修技术规范》中规定为 200 mm^[3](速度等级不大于 100 km/h),而西安地铁运维按照 100 mm 执行^[4](速度等级 80 km/h)。

因此,有必要对地铁受电弓动态包络线进行必要的理解和分析,以完善地铁受电弓动态包络线标准,更好地指导接触网设计、施工和运营。

2 动态包络线分析

TB 10009—2016《铁路电力牵引供电设计规范》第 5.1.10 条给出的条文说明为:“本条文明确了受电弓动态包络线的含义,且其取值按照不同速度段分别对待,以作为接触网定位装置的设计依据。条文中上下晃动量和左右摆动量根据弓网关系仿真模拟结果及现场实测数据并考虑一定的裕量确定。”通过相关网络平台查询,尚未找到关于城市轨道交通受电弓摆动量的弓网关系仿真模拟文献以及现场实测数据相关值。

欧洲标准 EN 50367:2006 *Railway applications-Current collection systems-Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to*

achieve free access) 附录 A.3 给出了欧洲标准受电弓动态包络线及其横向摆动极限位置的数学表达式(如式(1)所示),其附录 A.2 和附图 A.7 给出对应的标准受弓宽为 1 600 mm,有效工作宽度为 800 mm。

$$L_1 = 0.74 + 0.04H + 0.15HC - 0.075C + 2.5/R \quad (1)$$
式中:

L_1 ——受电弓横向最大摆动量,单位 m;

H ——接触线现场安装的实际高度 h (包括施工允许偏差)与受电弓最大抬升量 S 之和,单位 m;

C ——外轨超高,单位 m;

R ——曲线半径,单位 m。

受电弓横向最大摆动量为受电弓横向摆动极限位置与受电弓半宽 $B/2$ 之差,即 $L_1 - B/2$ 。从式(1)可以看出,欧洲受电弓横向最大摆动量与接触线安装高度、受电弓最大抬升量、曲线半径等参数有关,与列车运行速度无关。且在其他设计参数和列车运行条件一致的前提下,受电弓的最大横向变动量实际上是相等的,即受电弓的最大摆动量与其宽度也无关。

目前,地铁架空刚性悬挂接触线安装高度一般为 4 050 mm,允许施工误差为 ± 5 mm;正线架空柔性悬挂接触线安装高度一般为 4 600 mm,车辆段架空柔性悬挂接触线安装高度一般为 5 000 mm,允许施工误差为 ± 30 mm。TB 10009—2016《铁路电力牵引供电设计规范》第 5.1.2 条接触网-受电弓相互作用的动态性能指标表中规定,当采用不限位定位器时,定位点处接触线自由和不受限制的抬升空间为 $2S_0$ (S_0 指在列车正常运行条件和设计最高行驶速度下,接触线在定位点处抬升量的理论计算值或实际测量值)。正线线路设计速度值为 100 km/h 时对应的最小曲线半径值为 700 m,外轨超高值为 120 mm;车场线线路最小曲线半径为 150 m,外轨超高值为 0 ~ 15 mm。根据以上数据,参照式(1)进行计算,可得地铁受电弓动态包络线计算示例表,如表 1 所示。

工程实际运用中,直线地段受电弓最大横向摆动量在表 1 的基础上考虑荷重因素,约按 20% 的裕量计算取整。地铁接触网设计时,在接触线导线高度一定的前提下,受电弓最大摆动量如下:正线刚性直线段为 125 mm,曲线段为 170 mm;正线柔性悬挂直线段为 160 mm,曲线段为 220 mm;车场线直线段为 180 mm;曲线段为 170 mm。

表 1 地铁受电弓动态包络线计算示例表

Tab. 1 Example calculation table of dynamic envelope of metro pantograph

接触网安装位置 和安装方式	设计速度/ (km/h)	最小曲线半径 R/m	外轨超高 C/m	受电弓最大抬 升量 S/m	受电弓横向 摆动时的接触线 高度 H/m	直线地段最大 横向摆动量/ mm	曲线地段最大 横向摆动量/ mm
正线刚性悬挂	100	700	0.12	—	4.065 5	102.20	169.76
正线柔性悬挂	100	700	0.12	0.24	4.870 0	134.80	217.03
车场柔性悬挂	150	700	0	0.24	5.270 0	150.80	167.47

3 动态包络线应用

3.1 架空刚性悬挂最大拉出值选取

GB 50175—2013 中规定:“接触线相对受电弓中心线的最大偏移值应小于受电弓工作宽度的 1/2。”当拉出值选取过大时,考虑受电弓最大横向摆

动量,有可能造成接触线滑出受电弓有效工作宽度范围,导致受电弓弓角异常磨损。

目前国内地铁架空刚性悬挂最大拉出值选取主要有 250 mm、280 mm 和 300 mm。针对不同类型受电弓和最大拉出值选取比较表如表 2 所示。

表 2 不同类型受电弓与最大拉出值选取比较表

Tab. 2 Comparison table of different types of pantographs and selection of maximum stagger value

受电弓有效工作宽度/ mm	1/2 受电弓有效工作 宽度/ mm	不同拉出值接触线相对受电弓中心线的最大偏移值/ mm					
		直线段			曲线段		
		250	280	300	250	280	300
800	400	325	405	425	420	450	470
1 050	525	325	405	425	420	450	470

从表 2 可以看出:受电弓有效弓宽为 800 mm 时,直线段拉出值选取 250 mm,曲线段拉出值根据表 2 选取 230 mm;上表虽为理论计算值,但国内地铁工程实际应用中,曲线段拉出值也按照 250 mm 选取,根据运营效果分析能满足工程实际需求;受电弓有效弓宽为 1 050 mm 时,无论直线还是曲线,均可选取 250~300 mm 的任意值,或可根据项目特点和计算结果,进一步加大拉出值。

3.2 始触区范围的确定

始触区,即机车从一条股道向另一条股道运行时,在动态情况下受电弓滑板拐点与相邻股道接触线接触的区域,是由最小与最大两个偏移值确定的一个范围,如图 2 所示^[5]。始触区的最小偏移值 $e_1 = c - a$,最大偏移值 $e_2 = c + a$ 。

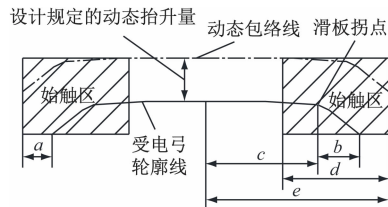


图 2 始触区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the initial contact zone

由于始触区概念一般适用于接触网线岔处,而线岔都在直线区段,故上述 a 值取直线区段受电弓最大横向摆动量。对于 1 550 mm 受电弓, $c = 850/2 = 425 \text{ mm}^{[5]}$;对于 1 700 mm 受电弓, $c = 1\ 050/2 = 525 \text{ mm}^{[6]}$ 。根据上述参数,计算出地铁始触区范围如表 3 所示。

表 3 受电弓与接触网始触区范围表

Tab. 3 Table of the initial contact zone between pantograph and catenary

接触网悬挂方式	始触区最小偏移值 e_1/mm		始触区最大偏移值 e_2/mm	
	1 550 mm 受电弓	1 700 mm 受电弓	1 550 mm 受电弓	1 700 mm 受电弓
正线刚性悬挂	300	400	550	650
正线柔性悬挂	265	365	585	685
车场线柔性悬挂	245	345	605	705

4 结语

我国地铁受电弓动态包络线尚未有统一标准。受电弓动态包络线是接触网设计的输入性资料,其准确性直接影响接触网设计的安全性,同时对接触网施工、运营检修、大修改造等都具有重要的指导意义。本文期望在‘十四五’期间,相关行业协会和车辆制造厂商、设计和施工运营单位,能够借助中国标准地铁列车的开发,通过准确的理论计算和大量的试验,确定出较为统一和准确的受电弓动态包络线范围,以稳定接触网设计输入参数,实现轨道交通高质量的发展。

参考文献

- [1] 中国铁路总公司. 普速铁路接触网运行维修规则: TG/GD 116—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017: 30.
China State Railway Group Co., Ltd. Rules for operation and maintenance of catenary of universal railway: TG/GD 116—2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017: 30.
 - [2] 国家铁路局. 铁路电力牵引供电设计规范: TB 10009—2016 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016: 51.
National Railway Administration. Design specification for railway electric traction power supply: TB 10009—2016 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016: 51.
 - [3] 江苏省质量技术监督局. 城市轨道交通接触网系统维护与检修技术规范: DB32/T 3291—2017 [S]. 南京: 江苏省质量技术监督局, 2017: 24.
Jiangsu Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision. Technical specification for maintenance and repair of urban rail transit contact system: DB32/T 3291—2017 [S]. Nanjing: Jiangsu Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision, 2017: 24.
 - [4] 朱亮. 浅谈西安地铁二号线受电弓动态包络线的理解和实际应用[J]. 中国科技财富, 2011(2): 178.
ZHU Liang. Understanding and practical application of the dynamic envelope line of the pantograph on Xi'an Metro Line 2 [J]. China Science and Technology Fortune Magazine, 2011(2): 178.
 - [5] 薛小强. 地铁柔性接触网线岔检测标准的制定与应用[J]. 都市快轨交通, 2012, 25(2): 53.
XUE Xiaoqiang. Discussion on the adjustment standards of line branches for subway flexible overhead catenary [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2012, 25(2): 53.
 - [6] 李国胜. 城市轨道交通停车场及车辆段内的接触网道岔定位方案设计要点[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(1): 147.
LI Guosheng. Design points of OCS switch positioning in urban rail transit parking lot and depot [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(1): 147.
- 收稿日期: 2022-07-24 修回日期: 2022-08-10 出版日期: 2024-10-10
Received: 2022-07-24 Revised: 2022-08-10 Published: 2024-10-10
· 通信作者: 邓波, 高级工程师, 709783983@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
-
- (上接第 279 页)
- [6] 钟俊平, 刘志刚, 张桂南, 等. 高铁接触网旋转双耳销钉状态检测方法研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(6): 65.
ZHONG Junping, LIU Zhigang, ZHANG Guinan, et al. Condition detection of swivel clevis pinss in overhead contact system of high-speed railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(6): 65.
 - [7] 康高强, 高仕斌, 于龙, 等. 基于深度学习的高铁接触网旋转双耳开口销钉缺失故障检测[J]. 铁道学报, 2020, 42(10): 45.
KANG Gaoqiang, GAO Shibin, YU Long, et al. The missing fault detection of rotating double-ear open pins in high-speed rail contact line based on deep learning [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(10): 45.
 - [8] ZHONG J P, LIU Z G, HAN Z W, et al. A CNN-based defect inspection method for catenary split pinss in high-speed railway [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 68(8): 2849.
 - [9] 张文涛, 许治国, 郑霖, 等. 基于深度自编码多维特征融合的慢动目标检测[J]. 计算机工程, 2019, 45(5): 143.
ZHANG Wentao, XU Zhiguo, ZHENG Lin, et al. Noise reduction and positioning results are self-encoded as multiple noise reduction [J]. Computer Engineering, 2019, 45(5): 143.
 - [10] 安洁. 基于深度学习的接触网管帽及开口销缺陷检测方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
AN Jie. Study on defect detection method of catenary pipe caps and split pinss based on deep learning [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
 - [11] GLOROT X, BENGIO Y. Understanding the difficulty of training deep feed forward neural networks [J]. Journal of Machine Learning Research, 2010(9): 249.
- 收稿日期: 2023-03-18 修回日期: 2023-05-15 出版日期: 2024-10-10
Received: 2023-03-18 Revised: 2023-05-15 Published: 2024-10-10
· 通信作者: 单翀, 高级工程师, 49291709@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