

# 通过调整刚性接触网正弦波拉出值改善运营线路中弓网异常磨损的应用实践

李 杰 王晓博

(西安市轨道交通集团有限公司, 710016, 西安)

**摘 要** [目的]我国早期设计的城市轨道交通线路的刚性接触网以正弦波布置方式为主,运营中普遍存在弓网异常磨损情况。已运营线路受正线轨行区施工条件限制,无法进行大范围施工改造,致使此问题长期得不到解决,需要研究其优化调整措施。[方法]通过计算正弦波拉出值布置方式下受电弓表面各计算段工作时与接触网的滑动摩擦距离,并对各计算段的滑动摩擦距离占比进行了统计分析,找出致使受电弓异常磨损的3个原因。结合运营线路定位点的布置情况,调整拉出值数据,依次对这3个原因提出了优化措施。对比了优化前后的正弦波拉出值,并对优化调整措施的效果进行分析。[结果及结论]与原有正弦波布置方式的拉出值相比,优化后布置方式的拉出值中,受电弓磨损最大倍数由6.23倍下降至1.47倍,受电弓磨损平均值倍数由3.52倍下降至1.08倍。在西安地铁2号线部分区段实施了该优化措施后,2年内弓网无明显异常磨损,受流质量良好。

**关键词** 城市轨道交通; 刚性接触网; 弓网异常磨损; 正弦波拉出值

**中图分类号** U239.5;U225.6

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.04.024

## Application Practice of Adjusting Rigid Catenary Sinusoidal Wave Stagger Value to Ameliorate Abnormal Pantograph-catenary Wear in Operating Line

LI Jie, WANG Xiaobo

(Xi'an Rail Transit Group Co., Ltd., 710016, Xi'an, China)

**Abstract** [Objective] The early-designed rigid catenary system for urban rail transit lines in China adopts a sinusoidal wave arrangement method, leading to a prevalent abnormal wear of PC (pantograph-catenary) during operation. Under the constraints of main-line track zone construction conditions, the operating lines are not susceptible to large-scale renovations, prolonging the resolution of this issue, a research on the optimization and adjustment measures is needed. [Method] By calculating the sliding friction distance between each pantograph surface calculation section and catenary under the arrangement method of sinusoidal wave stagger value, a statisti-

cal analysis of the percentage of sliding friction distance for each calculation section is performed. Three reasons causing pantograph abnormal wear are identified. Considering the layout of positioning points on operating lines, the stagger value data is adjusted, and optimization measures are proposed for these three reasons in sequence. A comparison of sinusoidal wave stagger values before and after optimization is conducted, followed by an analysis of the effectiveness of the optimization and adjustment measures. [Result & Conclusion] In comparison with the stagger value of original sinusoidal wave arrangement method, the maximum multiple of pantograph wear decreased from 6.23 times to 1.47 times in the stagger value of optimized arrangement method, and the average multiple of pantograph wear reduced from 3.52 times to 1.08 times. After implementing these optimization measures in some sections of Xi'an Metro Line 2, no noticeable pantograph abnormal wear is observed within two years, and the current collection quality remains excellent.

**Key words** urban rail transit; rigid catenary; pantograph-catenary abnormal wear; sinusoidal wave stagger value

刚性接触网具有对隧道净空要求低、无断线之忧、日常维护方便等优点,在轨道交通行业被广泛运用。早期的刚性接触网以正弦波布置方式为主,在运营中普遍存在弓网异常情况,严重时甚至出现了受电弓局部凹槽,进而导致弓网关系恶化<sup>[1]</sup>。对此进行总结后发现,影响弓网异常磨损的主要原因为受电弓各段与接触网间的滑动摩擦距离占比不均匀<sup>[2]</sup>。在新线建设中,曾尝试通过改变接触网布置方式使受电弓工作时表面与接触线均匀接触,以降低异常磨损<sup>[3-4]</sup>,但由于运营线路受限于支持定位装置已按照正弦波布置,无法对该布置形式进行改造。而且线路一旦开通运营,很难抽出维修时间进行大范围的接触网改造。

为此,本文通过分析接触网正弦波下受电弓与接触线滑动摩擦距离占比情况,总结出正弦波布置方式

存在的问题,再结合已运营线路的实际条件,在保留其最大拉出值、各定位点间距离及拉出值变化趋势的前提下,对各定位点数据进行人为干预,使受电弓表面在工作时与接触线间的滑动摩擦距离基本相同。

### 1 弓网异常磨耗的原因及危害

刚性接触网由于汇流排具有较大的刚度,现场布置时不能采用柔性接触网“之”字形急剧转弯的方式,因此早期设计的刚性接触网大多采取正弦波布置。

以西安地铁 2 号线为例,其刚性接触网单个锚段的长度为 231 m,共计 33 个定位,2 个定位点的间距大多为 8 m。其最大拉出值为 200 mm,关节拉出值为 100 mm,各定位点拉出值以朝向站台为正。除特殊说明部分,本文涉及的锚段均基于上述数据进行分析。为便于分析,锚段末端上翘部分均不计入滑动摩擦距离。

正弦波曲线的计算式为:

$$y = 200 \sin(\pi x/\lambda) \tag{1}$$

式中:

$\lambda$ ——正弦波半个波长的长度,单位 m;

$x$ ——与拉出值为 0 处定位点的间距,单位 m;

$y$ —— $x$  点处的拉出值,单位 mm。

本文以受电弓上每 20 mm 为 1 个计算段进行分析。基于式(1),计算-200~200 mm 拉出值范围内各计算段与接触网的滑动摩擦距离,以及滑动摩擦距离的占比情况,选取了 20 个计算区段的计算结果,如表 1 所示。表 1 中,各段滑动摩擦距离占比情况与西安地铁 2 号线前期更换的受电弓碳滑板磨耗量基本相同,这一方面佐证了弓网异常磨耗的原因,即:因接触网布置形式造成受电弓工作时各计算段与接触网间的滑动摩擦距离占比不均匀,当不均匀磨耗的滑板通过接触网分段绝缘器、锚段关节等设备时,会与这些设备发生碰撞或产生拉弧,进而损坏接触网设备,造成弓网关系的恶性循环。另一方面,通过各计算段滑动摩擦距离的占比,可间接分析受电弓的磨耗情况。

#### 1.1 受电弓磨耗最大倍数分析

由表 1 可知:滑动摩擦距离占比呈现中间小、两边大的趋势。这是由于受正弦波各计算段变化率不同的影响,拉出值大的区段由于其弯曲半径大,滑动摩擦距离随之较大;拉出值小的区段由于弯曲半径小,滑动摩擦距离随之较小。选取滑动摩擦距离占比最大值和最小值的 2 个计算段相除,用以反映受电弓

磨耗的最大倍数。即:选取拉出值范围为 180~200 mm 时的占比(13.52%),以及拉出值范围为 0~20 mm 时的占比(2.17%)。二者相除后得到受电弓磨耗最大倍数为 6.23 倍,该倍数可间接反映正弦波拉出值布置下受电弓各计算段运行产生的最大磨耗程度。

表 1 基于式(1)计算得到的正弦波滑动摩擦距离及其占比  
Tab. 1 Sinusoidal wave sliding friction distance and its proportion calculated based on equation (1)

拉出值范围/mm	滑动摩擦距离/m	滑动摩擦距离占比/%
[180,200)	30.76	13.52
[160,180)	15.20	6.69
[140,160)	13.11	5.76
[120,140)	12.59	5.54
[100,120)	16.96	7.46
[80,100)	5.18	2.28
[60,80)	5.05	2.22
[40,60)	5.03	2.21
[20,40)	4.94	2.17
[0,20)	4.92	2.17
[-20,0)	4.93	2.17
[-40,-20)	4.93	2.17
[-60,-40)	5.02	2.21
[-80,-60)	5.06	2.22
[-100,-80)	5.18	2.28
[-120,-100)	16.88	7.42
[-140,-120)	12.59	5.54
[-160,-140)	13.11	5.77
[-180,-160)	15.20	6.69
(-200,-180)	30.76	13.52

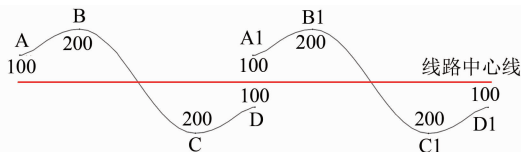
注:滑动摩擦距离占比=(本计算段滑动摩擦距离/锚段总滑动摩擦距离)×100%。

#### 1.2 受电弓磨耗平均值倍数分析

由表 1 可知:-100~100 mm 范围内的滑动摩擦距离占比明显小于-200~-100 mm、100~200 mm 范围内的滑动摩擦距离占比。图 1 为 2 个正弦波锚段部分关键悬挂点的拉出值布置示意图。由图 1 可知:采用正弦波布置方式,其锚段关节为不完整的波形,在关节中间缺失了一段(见图 1 中的 D—A1),锚段关节中磨耗次数比关节外少。

选取-200~-100、100~200 mm 范围内滑动摩擦距离占比的平均值,与-100~100 mm 范围内滑动

摩擦距离占比的平均值相除,即:  $-100 \sim 100$  mm 范围内滑动摩擦距离占比的平均值为 2.21%,  $-200 \sim -100$ 、 $100 \sim 200$  mm 范围内滑动摩擦距离占比的平均值为 7.79%,二者相除可得受电弓磨损平均值倍数为 3.52 倍。该数据可间接反映正弦波拉出值布置受电弓运行产生的平均磨损程度。



注: A、B、C、D、A1、B1、C1、D1 分别为两个正弦波锚段的关键悬挂点;图中数字为各悬挂点处的拉出值,单位为 mm。

图 1 两个正弦波锚段部分关键悬挂点的拉出值布置示意图  
Fig. 1 Diagram of key suspension point stagger layout in two sinusoidal wave anchor sections

### 1.3 磨损异常原因分析

由表 1 还可看出:正弦波布置整体呈两边高、中间低,  $100 \sim 120$  mm 范围内滑动摩擦距离占比为 7.46%,高于相邻 2 个计算段的滑动摩擦距离占比 (5.54%、2.28%)。这是由于锚段关节各定位点均按 100 mm 布置,这使得 100 mm 附近的滑动摩擦距离较其他计算区段增加了 2.0~3.8 m。

## 2 拉出值优化分析

由于刚性接触网存在较大刚度,无论采用何种布置方式,在最大拉出值处均会存在弯曲半径。在部分城市轨道交通的新线设计中,主要通过如“八”字布置<sup>[4]</sup>、“V”形布置<sup>[2]</sup>、变坡“八”字布置<sup>[3]</sup>等布置方式,尽量减少急剧转弯的次数。此外,采取多锚段间的互补,使受电弓各计算段与接触网滑动摩擦距离趋于均匀。由于运营线路的锚段长度已固定,支持定位装置已安装,很难满足调整为上述布置方式的条件。为此,已运营线路需尽量保留最大拉出值、各定位点间距离、拉出值变化趋势等显著特征点。本文针对上述既有问题进行人为干预,以使得受电弓在工作时各计算段与接触网的滑动摩擦距离均匀。

### 2.1 降低滑动摩擦距离占比最高计算段处的滑动摩擦距离

接触网弯曲半径越小,单个计算段内滑动摩擦距离就越短,但对应悬挂点汇流排线夹、绝缘子及支持定位装置所受到的横向力就越大。西安地铁 3 号线设计采用了类似“之”字形拉出值布置方式,其设备与传统正弦波拉出值布置的设备相同,转弯处均

采用 3 个定位点组成最小弯曲半径<sup>[5]</sup>,即最大拉出值 200 mm、次大拉出值 180 mm。该线的接触网设备运行 5 年未出现异常磨损。因此,正弦波拉出值布置转弯处可采用 3 个定位点组成最小弯曲半径的布置方式,该方式可减小弯曲半径,减少滑动摩擦距离占比最高计算段处 (180~200 mm) 的滑动摩擦距离,从而降低该计算段的滑动摩擦距离占比。

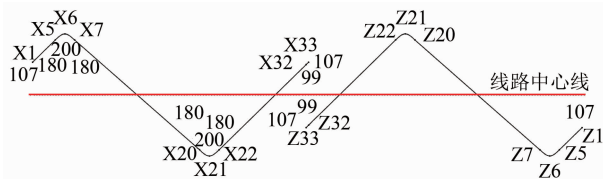
### 2.2 增加滑动摩擦距离占比低计算段处的滑动摩擦距离

在总锚段长度不变、不影响整体变化率的情况下,延长锚段关节并改为错位布置,增加 1 次滑动摩擦距离占比低段处 ( $-100 \sim 100$  mm) 的滑动摩擦距离,可提高这些计算段的滑动摩擦距离占比。

### 2.3 统一各计算段滑动摩擦距离

锚段中除最大拉出值的曲线段外,其他部位 (包括锚段关节) 均采取统一的拉出值变化率,以减少锚段关节处拉出值的异常叠加及不同的拉出值变化率对滑动摩擦距离占比的影响,使受电弓在工作时各计算段的滑动摩擦距离尽量相同。

以 2 个锚段为 1 个单位,制定的优化措施为:在转弯处采用 3 个定位点组成最小弯曲半径,其他区段采用统一的拉出值变化率;将 1 个锚段关节改为交错关节,另 1 个锚段关节保持不变。优化后的拉出值布置如图 2 所示。优化后受电弓各计算段在 1 个锚段内的磨损次数均为 4 次,可保证受电弓工作时各计算段与接触线滑动摩擦距离尽量相等。



注: X1、X5、X6、X7、X20、X21、X22、X32、X33 为第 1 个锚段上的关键悬挂点; Z33、Z32、Z22、Z21、Z20、Z7、Z6、Z5、Z1 为第 2 个锚段上的关键悬挂点;图中数字为各悬挂点处的拉出值,单位为 mm。

图 2 优化后 2 个锚段的拉出值布置示意图

Fig. 2 Diagram of stagger layout in two anchor sections after optimization

## 3 拉出值数据优化与实际运用

由于运营现场的每个定位点均已固定,基于 1 个锚段长度为 227 m、拉出值变化量为 800 mm,可得到 1 个锚段的整体拉出值变化率约为 3.520 mm/m。结合图 1 的关键悬挂点位置,转弯点 B、C 需设置在图 2 的 X6、X21 定位点处,这样各计算段

的拉出值变化率方能与整体拉出值变化率接近。转弯点与两边的定位点组成最小弯曲半径。锚段剩余部分被切分为 3 段直线,如图 2 所示。表 2 为正弦波优化前后拉出值的对比情况。根据表 2 数据,X1—X5 段长度为 18.7 m、X7—X20 段长度为 104.0 m、X22—X33 段长度为 73.7 m。

表 2 正弦波优化前后拉出值对比

Tab. 2 Comparison of sinusoidal wave stagger before and after optimization

定位点 编号	定位点 间距/m	优化前的 拉出值/mm	优化后的 拉出值/mm	拉出值调 整量/mm
X1	2.0	100	107	7
X2	5.0	100	115	15
X3	5.7	109	134	25
X4	6.0	118	157	39
X5	7.0	135	180	45
X6	8.0	155	200	45
X7	8.0	174	180	6
X8	8.0	188	152	36
X9	8.0	197	125	72
X10	8.0	200	97	103
X11	8.0	195	69	126
X12	8.0	180	42	138
X13	8.0	156	14	142
X14	8.0	125	-14	139
X15	8.0	87	-41	128
X16	8.0	45	-69	114
X17	8.0	0	-97	97
X18	8.0	-45	-124	79
X19	8.0	-87	-152	65
X20	8.0	-125	-180	55
X21	8.0	-156	-200	44
X22	8.0	-180	-180	0
X23	8.0	-195	-149	46
X24	8.0	-200	-118	82
X25	8.0	-197	-86	111
X26	8.0	-188	-55	133
X27	8.0	-174	-24	150
X28	7.0	-155	7	162
X29	6.0	-135	34	169
X30	5.7	-118	58	176
X31	5.0	-109	80	189
X32	2.0	-100	99	199
X33		-100	107	207

注:拉出值调整量=|优化后的拉出值-优化前的拉出值|;X1 的定位点间距为 2.0 m,是指 X1 与 X2 间的距离为 2.0 m,余类同。X32、X33 因锚段关节内定位对调,故实际的拉出值调整量为 7 mm。

1) X7—X20 段的长度及其两端的拉出值已固定(-180~180 mm),可求得此段的拉出值变化率为 3.460 mm/m。

2) 为保证各计算段拉出值滑动摩擦距离在叠

加后相同,X1—X5 段、X22—X33 段的拉出值变化率须相同。设  $a$  为 X1、X33 点处的拉出值(这 2 个点位的拉出值相等),单位是 mm,其计算式为:

$$\frac{180 + a}{73\,700} = \frac{180 - a}{18\,700} \tag{2}$$

根据式(2)可求得  $a=107.14\text{ mm}$ ,此时 X1—X5 段、X22—X33 段的拉出值变化率为 3.896 mm/m。

综上所述,在 1 个锚段内除最大拉出值曲线段外,受电弓上根据拉出值变化率为 3.896 mm/m、3.460 mm/m 将其余区段分为 2 部分,以保证受电弓各点与接触网滑动摩擦距离占比均匀。其他各定位点应根据拉出值变化率及跨距计算出拉出值。

3.1 实施优化调整措施的可行性

由表 2 可知:拉出值的最大调整值为 189 mm(关节定位可直接对调),平均调整量为 83 mm;拉出值调整量超过 100 mm 的定位点有 14 个。在西安地铁 2 号线选取了部分锚段,对其拉出值进行调整。虽然调整量很大,但日常检修作业组工作人员能基本胜任此项改造任务,无需进行专项技术改造。

3.2 优化调整措施的效果分析

正弦波优化后受电弓各计算段滑动摩擦距离及其占比如表 3 所示。

表 3 正弦波优化后滑动摩擦距离及其占比

Tab. 3 Sinusoidal wave sliding friction distance and its proportion after optimization

拉出值范围/mm	滑动摩擦距离/m	滑动摩擦距离占比/%
[ 180,200)	15.00	6.60
[ 160,180)	10.91	4.80
[ 140,160)	10.91	4.80
[ 120,140)	10.91	4.80
[ 100,120)	10.91	4.80
[ 80,100)	10.91	4.80
[ 60,80)	10.91	4.80
[ 40,60)	10.91	4.80
[ 20,40)	10.91	4.80
[ 0,20)	10.91	4.80
[ -20, 0)	10.91	4.80
[ -40,-20)	10.91	4.80
[ -60,-40)	10.91	4.80
[ -80,-60)	10.91	4.80
[ -100,-80)	10.91	4.80
[ -120,-100)	10.91	4.80
[ -140,-120)	10.91	4.80
[ -160,-140)	10.91	4.80
[ -180,-160)	10.91	4.80
(-200,-180)	16.00	7.04

按照上文的分析方法对表 3 的数据进行分析,选取拉出值范围为  $-200 \sim -180$  mm 的占比 (7.04%),以及拉出值范围为  $0 \sim 20$  mm 的占比 (4.80%)。二者相除后得到受电弓磨耗最大倍数为 1.47 倍,较优化前的 6.23 倍明显下降。选取  $-100 \sim 100$  mm 范围内滑动摩擦距离占比的平均值为 4.80%,  $-200 \sim -100$ 、 $100 \sim 200$  mm 范围内滑动摩擦距离占比的平均值为 5.20%,二者相除后得到受电弓磨耗平均值倍数为 1.08 倍,较优化前的 3.52 倍也有明显下降。与优化前的磨耗异常部位相比,优化后除最大拉出值处外,其他各计算段滑动摩擦距离占比均为 4.80%,无异常磨耗点。运行轨道交通弓网检测车,观测得到优化后的接触网动态数据无异常,由此可认为在列车运行中,弓网受流质量能够得到保证。

## 4 结语

在已运营线路的刚性接触网中,通过调整定位点的拉出值数据,解决了正弦波拉出值布置方式存在的弓网异常磨耗问题,使受电弓磨耗最大倍数由 6.23 倍下降至 1.47 倍,受电弓磨耗平均值倍数由 3.52 倍下降至 1.08 倍。在西安地铁 2 号线部分区段实施该优化措施后,2 年内弓网无明显异常磨耗,受流质量良好。

本文提出的优化措施调整难度适中,对受电弓磨耗平顺度有较大提高,适合对既有线路在运营期间进行改造。但该优化措施未能完全解决因刚性接触网自身刚度引起的弯曲半径滑动摩擦距离占比较大问题,优化后最大拉出值处的滑动摩擦距离占比

仍然较其他区段高,该优化措施仅供各运营管理部门参考。

## 参考文献

- [1] 黄冬亮. 城市轨道交通架空刚性接触网平面布置优化方案浅谈[J]. 铁道勘测与设计, 2010(4): 27.  
HUANG Dongliang. Discussion on plane layout optimization scheme of overhead rigid catenary of urban rail transit[J]. Railway Survey and Design, 2010(4): 27.
- [2] 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, 21(7): 50.  
AI Dongbing. Optimization of the rigid overhead contact system stagger in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(7): 50.
- [3] 白凯元. 刚性接触网拉出值布置与磨耗分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(6): 149.  
BAI Kaiyuan. Analysis of rigid catenary stagger layout and wear[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(6): 149.
- [4] 尹魁元. 接触网刚性悬挂拉出值布置方式比较[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(2): 81.  
YIN Kuiyuan. On the stagger layout arrangement of overhead rigid suspension[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(2): 81.
- [5] 张权. 刚性悬挂接触网拉出值布置与受电弓磨耗分析[J]. 科学技术创新, 2020(8): 11.  
ZHANG Quan. Layout of pull-out value of rigid suspension catenary and analysis of pantograph wear[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(8): 11.

· 收稿日期:2021-09-22 修回日期:2021-11-19 出版日期:2024-04-10  
Received:2021-09-22 Revised:2021-11-19 Published:2024-04-10  
· 通信作者:李杰,工程师,406609756@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 123 页)

- [9] 刘炜,李富强,唐靖坤,等. 城市轨道交通走行轨过渡电阻测量方法与计算误差[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2856.  
LIU Wei, LI Fuqiang, TANG Jingkun, et al. Measurement method and calculation error of rail-to-earth resistance in urban rail[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2856.

· 收稿日期:2021-10-18 修回日期:2021-11-17 出版日期:2024-04-10  
Received:2021-10-18 Revised:2021-11-17 Published:2024-04-10  
· 通信作者:潘卫国,高级工程师,panweiguo@crscd.com.cn  
· ©《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