

# 钢轨轨底坡对下部授流接触轨安装的影响

刘柏林 张 维

(北京城建设计发展集团股份有限公司武汉分公司, 430062, 武汉 // 第一作者, 助理工程师)

**摘 要** 接触轨是第三轨供电的地铁牵引供电系统的重要组成部分, 接触轨的正确安装是车辆安全受电的前提。针对安装于加长短轨枕上的下部授流接触轨安装形式, 建立几何模型推导出接触轨安装位置与钢轨轨底坡之间的数学关系式, 给出接触轨正确安装时允许钢轨轨底坡安装误差范围的计算方法, 以及两种常见安装参数下接触轨正确安装可接受的钢轨轨底坡范围值。最后, 针对钢轨轨底坡超出接触轨安装允许范围而无法安装的情况, 给出了补救建议。

**关键词** 地铁; 授流接触轨; 钢轨轨底坡

**中图分类号** TM922.6

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2021.01.029

## Influence of Rail Cant on the Installation of Lower Contact Rail

LIU Bolin, ZHANG Wei

**Abstract** Contact rail system is an important component of third rail metro traction power supply system. The correct installation of contact rail is the premise of safe vehicle electrification. For the lower contact rail installation on the longer sleeper, mathematical relationship between installation position of contact rail and rail cant is derived. The calculation method of allowable rail cant displacement when contact rail is correctly installed is given, and the allowable rail cant range under two common installation parameters range is listed. In the end, remedial suggestions are given for the installation failure situation where the rail cant is beyond the allowable installation range of the contact rail.

**Key words** metro; contact rail system; rail cant

**Author's address** Wuhan Branch Company of Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., 430062, Wuhan, China

整体道床是地铁隧道内主要的道床型式。目前, 第三轨供电的地铁牵引供电系统的接触轨在整体道床上的安装基础分为轨枕和道床两种。基于接触轨的安装基础需要保持水平和节约钻孔时间, 目前大部分城市在整体道床区域采用带反向坡度的加长短轨枕作为接触轨设备的安装基础。

因轨道施工的工艺复杂且存在沉降问题, 对钢轨轨底坡需要施工全过程、多工序地进行控制, 但当前对钢轨铺设严格执行 1/40 的轨底坡难度较大, 普遍存在偏差。目前, 国内外对钢轨轨底坡的研究主要集中在轨底坡对钢轨磨耗及轮轨影响关系两个方面, 暂无钢轨轨底坡对供电接触轨安装影响的相关研究<sup>[1-4]</sup>。

本文对接触轨安装位置与钢轨轨底坡值之间的数学关系进行研究, 给出接触轨正确安装所允许的轨底坡安装误差范围的计算方法, 以及两种常见安装参数下接触轨正确安装可接受的钢轨轨底坡范围值, 为接触轨支撑装置优化设计及接触轨安装施工提供参考。并根据工程经验给出钢轨轨底坡超出接触轨安装允许范围时的几条补救建议。

## 1 理论分析

### 1.1 接触轨安装存在的问题

加长短轨枕是接触轨在正线上主要的安装基础。加长短轨枕上的下部授流接触轨安装示意图如图 1 所示。接触轨部件由下至上主要为金属底座、接触轨支架、接触轨、防护罩。短轨枕与钢轨之间采用等高垫板, 钢轨底面与钢轨处的轨枕面平行。

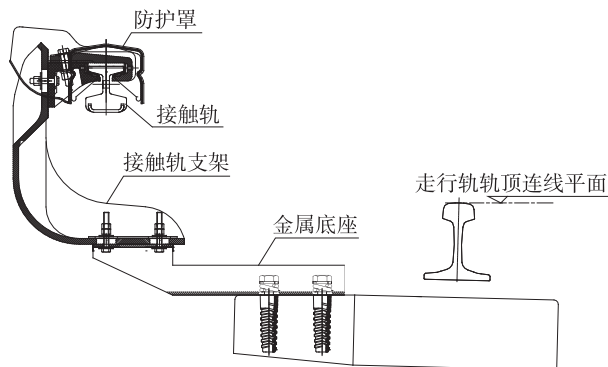


图 1 加长短轨枕上的下部授流接触轨安装示意图

为提高钢轨的横向稳定性和减轻钢轨的不均匀磨耗, 钢轨通常设有轨底坡<sup>[5]</sup>。轨底坡, 即钢轨轨底面与水平面之间的横向坡度, 通常以横向坡度角的

正切值  $\tan \theta$  表示,如图 2 所示。

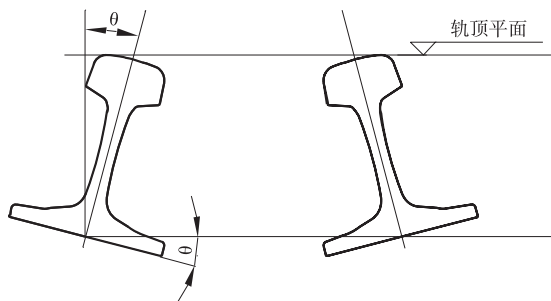


图2 轨底坡示意图

为消除轨底坡对加长短轨枕上接触轨安装造成的影响,轨道专业在短轨枕的加长部分设置 1/40 的反向坡度(如图 3 所示),以保证接触轨安装底面与两股钢轨轨顶平面平行。

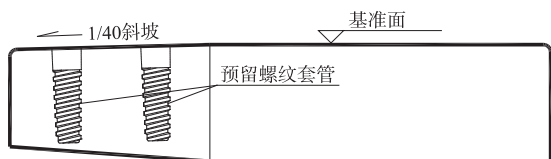


图3 加长短轨枕示意图

实际安装工程中普遍存在钢轨轨底坡偏离设计值 1/40 的情况,严重时必然会导致加长短轨枕上的接触轨无法安装。在某城市地铁项目施工过程中发现部分地段接触轨无法按要求安装,经分析查明为钢轨轨底坡实际值严重偏离设计值 1/40 所致,轨底坡最大达到 1/10。

现对接触轨安装位置与钢轨轨底坡值之间的关系建立几何模型并进行理论分析。

## 1.2 几何模型

$$\begin{cases} L = \sqrt{CD^2 + DE^2} \cos[\arctan(DE/CD) - \theta] + \sqrt{BC^2 + AB^2} \cos[\arctan(AB/BC) + (\theta - \theta_0)] + \frac{1}{2} W \cos \theta \\ H = -\sqrt{CD^2 + DE^2} \sin[\arctan(DE/CD) - \theta] + \sqrt{BC^2 + AB^2} \sin[\arctan(AB/BC) + (\theta - \theta_0)] - \frac{1}{2} W \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\theta_0$  为加长短轨枕反向坡度角;正线通常采用 60 kg/m 钢轨,其  $W$  为 73 mm。

### 1.3.2 曲线段

线路曲线段为平衡车辆行驶时产生的离心力通常设置超高。超高,即曲线段钢轨外轨与内轨的高度差  $h$ 。超高的设置会导致如图 2 所示的两股钢轨轨顶平面不再水平,此时将曲线段模型以两股钢轨轨顶中心连线的中点为中心进行平面旋转  $\arcsin[h/(1435 \text{ mm} + W)]$ ,便可等效为直线段模型。超高并不改变加长短轨枕上接触轨与两股钢轨轨顶平面之间的相对关系,式(1)仍然成立。

接触轨支架布置跨距一般不大于 5 m。轨枕处轨底坡默认沿线路方向不变。现对某一横截面加长短轨枕上的下部授流接触轨安装型式建立几何模型(如图 4 所示)。钢轨轨底坡变化相当于几何模型中  $\triangle ABC$ 、 $\triangle CDE$  整体以  $C$  为中心进行平面旋转。其中, $A$  为接触轨底面中心点, $B$  为加长短轨枕反向坡直线与接触轨垂直中心线的交点, $C$  为加长短轨枕反向坡起点, $D$  为轨枕面直线与钢轨中心线交点, $E$  为钢轨顶面中心点; $H$  为接触轨下部接触面距离钢轨顶面中心的垂直距离, $L$  为接触轨中心线距离近侧钢轨内沿的水平距离; $W$  为钢轨轨头宽。

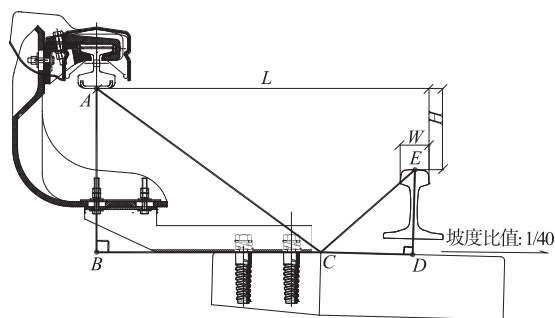


图4 加长短轨枕上接触轨安装的几何模型

## 1.3 几何推导

根据图 4 几何模型,可建立钢轨轨底坡与接触轨安装位置的数学关系,接触轨安装位置采用  $L$  和  $H$  进行度量。现分别对直线段和曲线段给出钢轨轨底坡与  $L$ 、 $H$  的数学关系。

### 1.3.1 直线段

在线路直线段,钢轨倾斜角等于轨底坡角度值。根据图 4 几何模型,将钢轨轨头近似为矩形轨头,可得  $L$ 、 $H$  计算公式如下:

## 1.4 评价指标

对于接触轨下部授流型式,接触轨的安装要求由直流电压等级和车型来确定。根据 GB 50157《地铁设计规范》,下部授流接触轨安装要求如表 1 所示。

表1 接触轨安装要求

电压等级/车型	$L/\text{mm}$	$H/\text{mm}$
750 V/B 型车	$683.5 \pm 6$	$160 \pm 6$
1500 V/A 型车	$832.5 \pm 5$	$200 \pm 5$

接触轨通过接触轨支架和金属底座螺栓长孔调节安装位置,孔洞中心为螺栓安装基准位置。接触轨支架横向调节范围为 $\pm a_1$ ,横向调节长孔如图5 a)所示;金属底座长孔横向调节范围为 $\pm a_2$ ,横向调节长孔如图5 b)所示;接触轨支架竖向调节范围为 $\pm b$ ,竖向调节长孔如图5 c)所示。

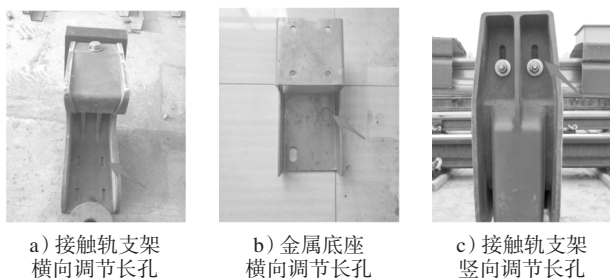


图5 接触轨调节长孔实景图

由上可知,当接触轨支架及金属底座螺栓均安装于基准位置时,即接触轨标准安装时,接触轨横向调节范围为 $\pm(a_1 + a_2)$ ,竖向调节范围为 $\pm b$ 。

为简化计算,现将 $\pm(a_1 + a_2)$ 近似为 $L$ 的调节范围, $\pm b$ 近似为 $H$ 的调节范围。基于补偿近似计算误差及零部件制造误差的考虑,表1中允许误差 $\pm 5\text{ mm}$ 、 $\pm 6\text{ mm}$ 不纳入计算。则表1中接触轨安装要求可近似等效为表2所示。

表2 接触轨安装近似要求

电压等级/车型	$L$	$H$
750 V/B 型车	$683.5\text{ mm} - (a_1 + a_2) \leq L \leq 683.5\text{ mm} + (a_1 + a_2)$	$160\text{ mm} - b \leq L \leq 160\text{ mm} + b$
1 500 V/A 型车	$832.5\text{ mm} - (a_1 + a_2) \leq L \leq 833.5\text{ mm} + (a_1 + a_2)$	$200\text{ mm} - b \leq L \leq 200\text{ mm} + b$

## 2 实例验证

现以武汉城市轨道交通7号线南延线为例,对上述理论分析内容进行验证。该线路采用DC 1 500 V下部授流接触轨供电,车辆为A型车。则有: $AB = 417\text{ mm}$ , $BC = 561\text{ mm}$ , $CD = 230\text{ mm}$ , $DE = 216\text{ mm}$ , $\tan \theta_0 = 1/40$ , $a_1 = 15\text{ mm}$ , $a_2 = 10\text{ mm}$ , $b = 20\text{ mm}$ , $W = 73\text{ mm}$ 。

将以上参数代入表2,接触轨标准安装时 $L$ 、 $H$ 的允许范围如下:

$$\begin{cases} 807.5\text{ mm} \leq L \leq 857.5\text{ mm} \\ 180\text{ mm} \leq H \leq 220\text{ mm} \end{cases} \quad (2)$$

根据实际施工经验,施工中的轨底坡偏差主要为轨底坡值较大的问题,现对轨底坡为 $1/50 \sim 1/10$ 时接触轨安装情况进行对比。接触轨标准安装时,将

不同轨底坡对应的 $L$ 、 $H$ 测量值和计算值进行对比,如表3所示。

表3 不同钢轨的轨底坡下 $L$ 、 $H$ 的测量值与计算值对比表

$\tan \theta$	$L$ 测量值/ mm	$L$ 计算值/ mm	$H$ 测量值/ mm	$H$ 计算值/ mm
1:10	811.6	815.0	265.0	269.3
1:11	814.1	817.4	258.1	261.9
1:12	816.1	819.3	252.2	255.8
1:13	817.9	821.0	247.3	250.6
1:14	819.5	822.3	243.1	246.1
1:15	820.8	823.5	239.4	242.2
1:16	821.9	824.5	236.2	238.7
1:17	822.9	825.3	233.3	235.7
1:18	823.8	826.1	230.8	233.0
1:19	824.6	826.8	228.5	230.6
1:20	825.3	827.4	226.4	228.5
1:21	825.9	827.9	224.6	226.5
1:22	826.5	828.4	222.9	224.7
1:23	827.0	828.8	221.3	223.1
1:24	827.3	829.2	219.9	221.6
1:30	829.6	831.1	213.4	214.7
1:40	831.5	832.8	206.8	207.7
1:50	832.8	833.8	202.9	203.6

根据表3绘图,得 $L$ 、 $H$ 随轨底坡变化曲线如图6、7所示。

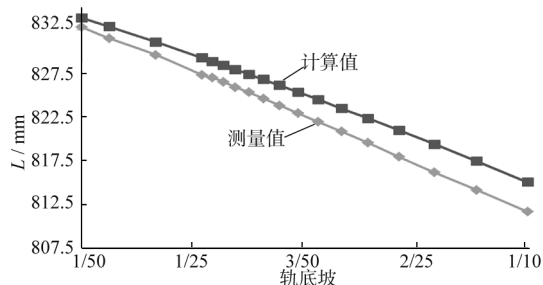


图6  $L$ 随轨底坡变化曲线

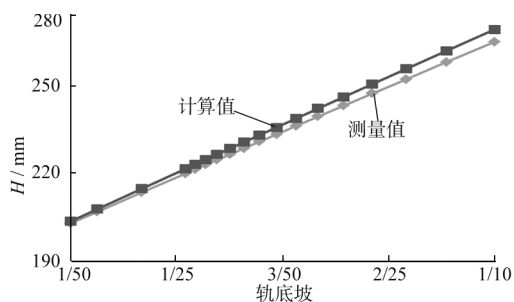


图7  $H$ 随轨底坡变化曲线

结合图6、7,分析表3可知:

1)  $L$ 、 $H$ 随轨底坡单调变化; $L$ 随轨底坡增大而减小, $H$ 随轨底坡增大而增大。

2)  $L$ 、 $H$ 计算误差随轨底坡增大而增大;当轨底坡 $\tan \theta \leq 1/24$ 时, $L$ 、 $H$ 计算误差均 $< 2\text{ mm}$ 。

3) 当  $1/50 \leq \tan \theta \leq 1/10$  时,  $L$  处于接触轨正确安装的允许范围内。

4) 当  $\tan \theta > 1/24$  时,  $H$  测量值超出接触轨正确安装的允许范围; 当  $\tan \theta > 1/25.14$  时,  $H$  计算值超出接触轨正确安装的允许范围。

由此可知, 理论模型计算结果与实际值较为接近, 误差处于可接受范围内, 具有一定的工程适用性。

### 3 几何模型的应用

当接触轨及轨道型式确定时, 由几何模型计算不同轨底坡下接触轨标准安装时的  $L$ 、 $H$ , 可得出接触轨横、竖方向调节值并制成表格, 后续可查表用于接触轨安装粗调。另外, 根据上述制表可得出接触轨安装时可接受的钢轨轨底坡范围, 用于接触轨无法安装时的问题排除。

#### 3.1 应用步骤

1) 数据收集: ①根据设计图纸获得接触轨基准安装时图 4 中的  $AB$ 、 $BC$ 、 $CD$ 、 $DE$ 、 $a_1 + a_2$ 、 $b$  各值; ②根据钢轨种类获取  $W$  值; ③根据供电系统直流电压等级及车辆车型查表 1 得出  $L$ 、 $H$  标准值。

2) 制表: 根据几何推导按式(1)可得出不同轨底坡值时的  $L$ 、 $H$ , 结合表 1 给出接触轨对应调整值制成表 2。后续可通过查表 2 指导接触轨安装粗调。

#### 3.2 常用结果

因篇幅限制现仅给出常见参数下接触轨安装可接受轨底坡范围值。

1) DC 1 500 V 下部授流接触轨供电, A 型车:  $AB = 417 \text{ mm}$ ,  $BC = 561 \text{ mm}$ ,  $CD = 230 \text{ mm}$ ,  $DE = 216 \text{ mm}$ ,  $\tan \theta_0 = 1/40$ ,  $a_1 + a_2 = 25 \text{ mm}$ ,  $b = 20 \text{ mm}$ ,  $W = 73 \text{ mm}$ ; 此时,  $\tan \theta$  允许范围为  $-1/5.60 \sim 1/25.14$ 。

2) DC 750 V 下部授流接触轨供电, B 型车:  $AB = 379 \text{ mm}$ ,  $BC = 414.2 \text{ mm}$ ,  $CD = 230 \text{ mm}$ ,  $DE = 216 \text{ mm}$ ,  $\tan \theta_0 = 1/40$ ,  $a_1 + a_2 = 25 \text{ mm}$ ,  $b = 25 \text{ mm}$ ,  $W = 73 \text{ mm}$ ; 此时,  $\tan \theta$  允许范围为  $-1/4.00 \sim 1/21.17$ 。

### 4 对策建议

当钢轨轨底坡数值超出接触轨正确安装可接受范围时, 为保证接触轨正确安装, 现根据工程经验给出以下几条对策建议:

1) 降低金属底座高度。该方法经济成本较低、耗时较短, 推荐采用。

2) 轨道旁浇筑混凝土支墩作为接触轨安装底座。该方法无需改变既有接触轨安装配件, 但隧道内混凝土养护时间长且存在支墩与道床沉降高差的问题。

3) 扩大接触轨支架长孔尺寸, 增大支架调节能力。该方法需要新制作绝缘支架模具, 成本较高。对支架长孔人为扩孔的方法不可取, 此做法会破坏绝缘支架的力学性能。

4) 将等高垫板替换为带斜坡的楔形垫板。该方法可完全解决轨底坡偏差问题。缺点是此时道床钢轨已铺设完成, 轨道专业配合整改难度较大。

以上建议均为轨道完工后为保证接触轨正确安装的补救措施, 但从根源上解决轨底坡问题还需要轨道施工人员从“人、机、料、法”等多方面采取施工控制、过程调整、完工核查等一系列措施, 以减小钢轨轨底坡安装误差。

### 5 结语

针对安装于加长短轨枕上的接触轨安装型式, 给出了接触轨安装位置与钢轨轨底坡之间的数学关系式, 以及接触轨正确安装允许的钢轨轨底坡安装误差范围的计算方法及两种常见安装参数下接触轨正确安装可接受的轨底坡范围值。为接触轨安装粗调、自身调节裕量设置及问题排查提供了参考, 并针对钢轨轨底坡超出接触轨安装允许范围的情况, 给出了补救建议。

### 参考文献

- [1] 曾向荣, 李文英, 高晓新. 城市轨道交通工程钢轨轨底坡取值的探讨[J]. 都市快轨交通, 2006(6): 57.
- [2] 杨新文, 刘小山, 沈剑罡, 等. 现代有轨电车线路轨底坡对槽型轨磨损的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019(4): 528.
- [3] 都敏, 张军, 王春艳, 等. 城市轨道交通线路轨底坡对钢轨磨损的影响[J]. 铁道机车与动车, 2014(6): 1.
- [4] 钱瑶, 王平, 苏谦, 等. 轨底坡对高速铁路轮轨接触行为影响分析[J]. 铁道工程学报, 2018(3): 18.
- [5] 左书艺, 张涛. 城市轨道交通工程地铁钢轨轨底坡调整技术研究[J]. 铁道标准设计, 2018(5): 21.
- [6] 杨其振. 城市轨道交通曲线轨道超高有关问题探讨[J]. 铁道勘察, 2005(2): 7.

(收稿日期: 2019-03-14)