

# 城市轨道交通调线调坡设计思考

吴世泽

(中国铁路设计集团有限公司, 300142, 天津//工程师)

**摘要** 调线调坡设计工作承上解决土建结构的施工误差, 启下为铺轨及设备安装提供良好的条件, 是轨道交通铺轨前的最后一道工序。经过系统的调整线路中线和坡度, 能使列车运行于良好的三维空间。结合石家庄地铁3号线调线调坡设计经验, 总结调线调坡设计原则、调线调坡过程及注意事项, 剖析具体方法技巧及实际案例, 为工程顺利通车提供良好条件。

**关键词** 城市轨道交通; 线路设计; 调线调坡

**中图分类号** U231.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.047

## Reflection on Urban Rail Transit Line and Slope Adjustment Design

WU Shize

**Abstract** The work of line and slope adjustment design is to treat the construction error of civil structure and provide good conditions for track laying and equipment installation. This work is the last process before rail transit track laying, by systematically adjusting the centerline and slope of the line, it ensures the train running in a well-formed three-dimensional space. Combined with the design experience of Shijiazhuang Metro Line 3, the design principles, process and precautions of line and slope adjustment are summarized, and the specific methods, skills and actual cases are analyzed. Issues that require special attention in the design is tracked backwards and proposed, providing good conditions for the smooth opening of the project.

**Key words** urban rail transit; line design; line and slope adjustment

**Author's address** China Railway Design Corporation, 300142, Tianjin, China

### 1 调线调坡设计概述

#### 1.1 调线调坡设计流程及原则

调线调坡设计是一项系统性较强的工作, 通过系统的调整线路中线和坡度, 使列车运行于良好的

三维空间, 充分解决施工误差带来的侵限问题, 满足接触网净空、轨道结构高度和设备安装的限界要求, 以保证列车安全、良好的运行。

调线调坡设计工作从整理基础资料、现场数据测量开始, 以出具调线调坡报告结束。后续工作是在设计成果的基础上, 完成综合铺轨图, 指导现场铺轨。调线调坡设计工作流程如图1所示。

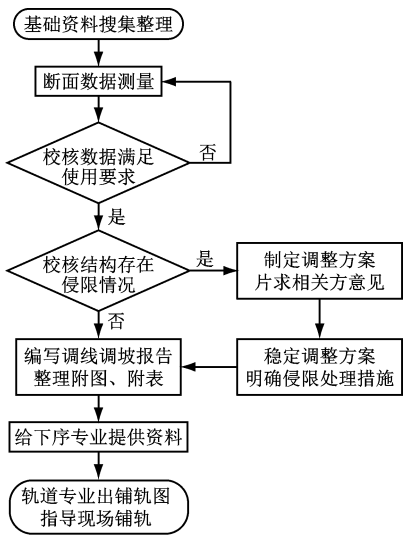


图1 调线调坡设计工作流程示意图

Fig.1 Process diagram of line and slope adjustment design work

其中, 准确的测量数据是调线调坡设计的基础, 为保证测量数据的真实可信, 应注意以下问题:

1) 调线调坡测量前, 应清理线路上的所有障碍, 提供良好的测量条件。

2) 横断面测量时, 横断面的中心要设在线路中线上, 横距为线路中心线(不是隧道中心线)至隧道内壁的距离。

3) 不同工程的实际测点位置(高度)应根据隧道轮廓的大小进行相应的调整, 一般设置在限界最紧张的位置。

4) 除了标准断面外, 在线路五大桩、车站结构

变化处、长短链处、管片有明显变形处、联络通道、区间风井结构处等应加测断面。

实测数据初步核对完毕,下一步便需要根据限界条件、区间断面形式、施工图设计情况等使用软件开展调线调坡设计,具体工作流程如图 2 所示。

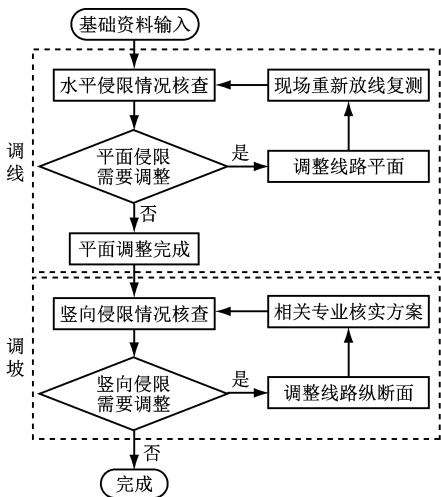


图 2 调线调坡设计具体流程示意图

Fig. 2 Diagram of the specific process of line and slope adjustment design

调线调坡设计工作所需要的基础资料还应包括:

- 1) 线路资料:终版线路平、纵断面图。
- 2) 轨道资料:轨道超高表,减振地段表及轨道结构高度要求等。
- 3) 限界资料:车站、区间限界图,盾构偏移量计算方法,道岔区、明挖地段加宽方法等资料。
- 4) 建筑、结构资料:车站主体建筑总平面图、纵剖面图、横剖面图、分层平面图;含联络通道及泵房设计情况的区间结构施工图、综合管线通用图、疏散平台通用图。
- 5) 轨上净空资料:最小净空要求,接触网支架安装距离等资料。
- 6) 各设备专业支架长度及允许缩短的量。

### 1.2 设计原则

调线调坡设计工作进行时,应该遵循以下基本原则,以保证工程整体的合理性。

- 1) 调线调坡设计应以满足运营要求为目标;
- 2) 应符合 GB 50157—2013《地铁设计规范》相关要求;
- 3) 非必要情况下,不应降低线路标准;
- 4) 应以现场实测数据为准,在线路施工图设计

的基础上,调整线路平面或坡度,使结构尺寸尽量满足限界要求,减少施工处理工作量;

5) 由于车站范围平纵的调整对车站设备影响较大,故一般不予调整,区间范围应满足接触网、设备支架等安装要求以及疏散平台宽度要求。

### 1.3 调线调坡设计工作在工程建设中的时序分析

如图 3 所示,调线调坡设计工作一般在土建结构施工完成且沉降稳定后、铺轨及设备安装前进行,是轨道交通铺轨前的最后一道工序。此阶段承上解决土建结构的施工误差,启下为铺轨及设备安装提供良好的条件,最终达到车辆安全运营的目的。

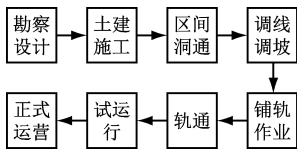


图 3 调线调坡设计工作时序示意图

Fig. 3 Sequence diagram of line and slope adjustment design work

## 2 调线调坡设计的具体方法技巧及实例分析

调线调坡设计一般分为平面调整和纵断面调整两个步骤进行。

### 2.1 调线方法技巧及实例分析

调线针对的是水平方向的侵限情况,一般可以采用调整曲线半径、调整缓和曲线长度、调整交点位置、直线地段增加反向曲线,还有缩短设备支架、调整支架布置位置等措施。

#### 2.1.1 曲线地段平面调整

其中,调整曲线半径或缓和曲线长度是曲线地段比较常用的手段,可通过对线路曲线内移量的计算方法估算出调整后的变化值,预测调整后的侵限情况。内移量计算公式如下:

$$p = \frac{l^2}{24R} - \frac{l^4}{2\ 688R^3}$$

式中:

$p$ ——圆曲线移动量,m;

$l$ ——缓和曲线长度,m;

$R$ ——圆曲线半径,m。

实例分析:石家庄地铁 3 号线水上公园站—柏林庄站区间,在 DK3 + 140—DK3 + 190 范围内区间盾构施工偏差较大,实际轮廓偏离设计位置最大偏差 237 mm,位于断面右侧上部位置,需对平面进行

调整才能满足限界要求,侵限情况见表1。

表1 石家庄地铁3号线水上公园站—柏林庄站区间侵限情况统计表

Tab.1 Statistics of limit violations in Shijiazhuang Metro Line 3 Water Park Station – Bailinzhuang Station interval							
里程	点位	左设计距离/mm	左实测距离/mm	左偏差值/mm	右设计距离/mm	右实测距离/mm	右偏差值/mm
DK3 + 150	上	2.068	2.330	0.262	2.296	2.068	-0.228
DK3 + 150	中	2.586	2.759	0.173	2.814	2.672	-0.142
DK3 + 150	下	2.242	2.316	0.074	2.470	2.401	-0.069
DK3 + 155	上	2.081	2.336	0.255	2.309	2.072	-0.237
DK3 + 155	中	2.585	2.756	0.171	2.813	2.667	-0.146
DK3 + 155	下	2.231	2.315	0.084	2.460	2.390	-0.070
DK3 + 160	上	2.099	2.325	0.226	2.327	2.109	-0.218
DK3 + 160	中	2.585	2.757	0.172	2.813	2.668	-0.145
DK3 + 160	下	2.217	2.324	0.107	2.445	2.380	-0.065
DK3 + 165	上	2.096	2.333	0.237	2.325	2.118	-0.207
DK3 + 165	中	2.585	2.749	0.164	2.813	2.663	-0.150
DK3 + 165	下	2.219	2.324	0.105	2.447	2.385	-0.062

如图4所示,侵限位置位于 $R=350\text{ m}$ 半径的曲线上,靠近圆曲线端部的位置,且侵限范围较小,调整交点位置或者曲线半径对整个曲线的影响均较大,通过分析选择调整缓和曲线长度的方式解决侵限。通过计算,调整方案如下:将曲线要素由原设计的 $R=350\text{ m}$ 、 $L_1=60\text{ m}$ 、 $L_2=60\text{ m}$ 调整为 $R=350\text{ m}$ 、 $L_1=60\text{ m}$ 、 $L_2=55\text{ m}$ 。

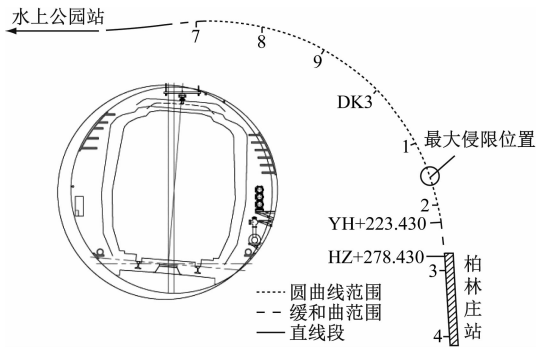


图4 侵限位置示意图

Fig.4 Location diagram of limit violation

配合纵断面调整之后水平最大侵限位于断面左侧上部,最大侵限值为 $70\text{ mm}$ ,将电缆支架长度由 $400\text{ mm}$ 调整为 $350\text{ mm}$ ,满足限界要求。

此处水平侵限位置位于区间小半径曲线上,限界较为紧张,而小半径曲线恰恰为容易出现施工偏差的位置,此种侵限一般可通过调整曲线交点位置、曲线半径、缓和曲线长度等方式实现线路与实际隧道的拟合。

2.1.2 直线地段平面调整

直线地段的水平侵限调整难度较大,一般通过增加反向曲线的方式调整,但是往往需要增加的曲线均为大半径曲线,后期养护维修线型保持困难,一般不宜采用。

实例分析:石家庄地铁3号线位同站—三教堂站区间左DK18+280—左DK18+395段存在水平施工偏差,最大偏差值为 $220\text{ mm}$ ,位于断面右侧上部位置。平面调整方案需增加一对 $R=10\,000\text{ m}$ 的反向曲线,且调整之后仍存在约 $100\text{ mm}$ 左右的水平侵限,调整效果不佳。经综合分析,通过将右侧上部第二排及第三排电缆支架长度由 $400\text{ mm}$ 调整为 $250\text{ mm}$ ,同时控制右侧下部疏散平台的宽度不大于 $620\text{ mm}$ ,解决了施工偏差问题。

2.1.3 与既有工程接轨地段平面调整方案

石家庄地铁3号线分为一期工程首开段、一期工程北段、东段及二期工程4个部分,后续工程铺轨时,前面工程已开通运营,随运营时间的增加,线路的平面线位以及纵断面高程都发生了变化,此时按照原设计图纸接轨,往往会与现场不符。因此,新旧工程接轨需对现场已铺轨段工程进行实测,并以实测数据为依据调整设计方案。

实例分析:石家庄地铁3号线石家庄站为一期工程首开段终点站,同时为东段工程的接轨站,在进行东段工程调线调坡设计工作时,为了保证线路的顺接,对现场已铺轨运营的线路进行了实测,并

以此为依据进行拟合调整。实测偏差情况见表 2 和表 3。

表 2 右线实测数据与原设计对比表  
Tab.2 Comparison of right line field measured data and original design

里程	实测与设计的差值/mm	
	$\Delta X$	$\Delta Y$
DK11 + 762. 901	26	- 1
DK11 + 767. 889	27	- 1
DK11 + 772. 867	29	- 1
DK11 + 777. 839	31	- 1
DK11 + 782. 818	31	- 2
DK11 + 787. 788	33	- 2
DK11 + 792. 744	34	- 2
DK11 + 797. 737	34	- 2
DK11 + 800. 205	34	- 1

注： $\Delta X$ ——横向偏差值； $\Delta Y$ ——竖向偏差值。

根据既有铺轨段实测数据分析,右线已铺轨段线路中心线位置与设计位置的水平偏差约 26 ~ 34 mm,通过微调接轨处及临近交点的位置,使线路与实测平面位置偏差在 1 mm 左右;左线既有轨道与原设计水平偏差约 37 ~ 41 mm,平面微调临近交点(接轨位置在曲线上)坐标位置,对平面线型进行拟合,调线后既有轨道接驳点水平偏差约 3 mm。

通过与实测数据的拟合调整,使后期铺轨工作

表 3 左线实测数据与原设计对比表  
Tab.3 Comparison of left line field measured data and original design

里程	实测与设计的差值/mm	
	$\Delta X$	$\Delta Y$
左 DK11 + 739. 313	39	- 3
左 DK11 + 744. 076	37	- 2
左 DK11 + 748. 910	40	- 2
左 DK11 + 753. 720	41	- 2
左 DK11 + 758. 507	41	- 2
左 DK11 + 763. 282	41	- 3
左 DK11 + 768. 122	41	- 2
左 DK11 + 772. 917	38	- 2
左 DK11 + 777. 714	37	- 2
左 DK11 + 782. 456	40	- 2
左 DK11 + 787. 278	38	- 1
左 DK11 + 790. 336	37	- 1

注： $\Delta X$ ——横向偏差值； $\Delta Y$ ——竖向偏差值。

得以顺利进行,新旧工程顺利贯通。

2.2 调坡方法技巧及实例分析

调坡针对的是竖向的侵限情况,一般可以采用调整变坡点位置、调整变坡点高程、调整竖曲线半径、增加变坡点等方式。侵限无法完全解决时,一般通过采用接触网特设设计或轨道特殊设计来解决。图 5 为接轨位置及调整交点截图。

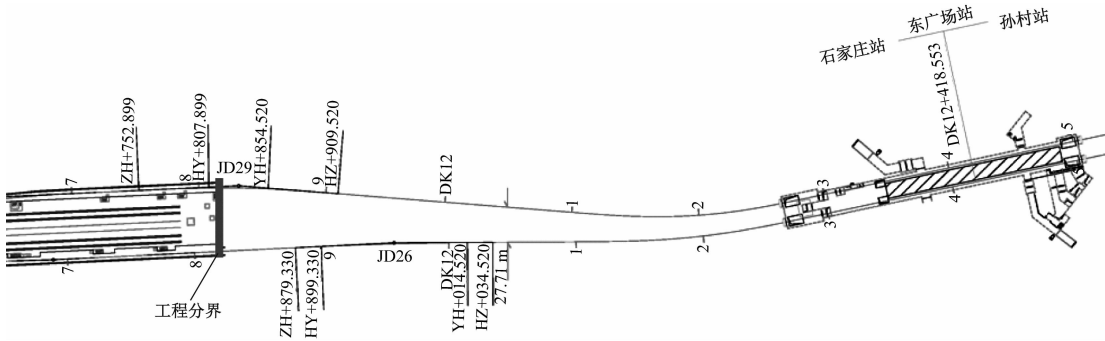


图 5 接轨位置及调整交点截图

Fig.5 Screenshot of rail junction location and adjustment intersection point

纵断面的调整是调线调坡设计中比较常见的,对于变坡点位置和高程的调整比较简单,而对于竖曲线半径的调整,可通过竖曲线修正值预估调整量,竖曲线修正计算公式如下:

$$E_0 = \frac{T^2}{2R} = \frac{R\Delta i^2}{8} 10^{-6}$$

式中:

- $E_0$ ——竖曲线外矢距,m;
- $T$ ——切线长,m;
- $R$ ——竖曲线半径,m;
- $\Delta i$ ——前后坡度差。

实例分析:石家庄地铁 3 号线东广场站—孙村站区间,顶板和底板均存在较大侵限:左 DK12 + 669—左 DK12 + 700 隧道顶最大侵限 234 mm,影响接触

网安装;与之相隔 280 m 的左 DK12 + 738—左 DK13 + 219. 167 隧道底板侵限,竖向最大侵限 157 mm,影响钢弹簧浮置板道床安装。

通过分析计算,纵断面调整如下:① 将左 DK12 + 760 处变坡点向小里程方向移动 31 m,调整至左 DK12 + 729 处,同时竖曲线半径由 5 000 m 调整为 8 500 m;② 在左 DK12 + 900 处增设一处变坡点,变坡点高程设置为 47. 867 m;③ 将左 DK13 + 110 处变坡点高程由 46. 043 m 调整为 46. 229 m。

由于原个别断面竖向偏差较大,调线调坡后个别断面仍存在较大的竖向侵限,经与相关专业协调,采用轨道及接触网做特殊设计的方案解决侵限。调整后底板最大侵限 57 mm,顶板最大侵限 120 mm(见表 4)。

表 4 石家庄地铁 3 号线东广场站—孙村站区间调后竖向侵限情况表

Tab. 4 Vertical limit violations after adjustment of Shijiazhuang Metro Line 3 East Plaza Station – Suncun Station interval		
里程	侵限位置	最大侵限/mm
左 DK12 + 644—左 DK12 + 660	底板	53
左 DK12 + 677—左 DK12 + 692	顶板	120
左 DK12 + 704—左 DK12 + 719	底板	57
左 DK12 + 750—左 DK12 + 756	底板	47
左 DK12 + 768—左 DK12 + 808	顶板	43
左 DK12 + 958—左 DK12 + 963	底板	21
左 DK13 + 083—左 DK13 + 148	顶板	11

调整之后,底板侵限地段轨道做特殊设计,将原设计的长轨枕两侧水沟调整为短轨枕中间水沟,并适当减薄道床厚度。顶板侵限仍较大地段,存在长约 16 m 的隧道净空小于 4 460 mm 区段,需要接触网特殊设计,支架安装位置锚定在“左 DK12 + 679—左 DK12 + 680”和“左 DK12 + 689—左 DK12 + 690”之间,支架间距不超过 10 m,左 DK12 + 685 断面净空最小值为 4. 340 m,满足接触网无支架情况下的最小净空 4. 334 m 的要求。

### 3 对调线调坡设计的思考

城市轨道交通由于限界较为紧张,出现施工误差时(尤其是盾构区间),一般采用调整原设计线位的方式进行拟合,但应注意以下问题:

- 1) 调整过程中非必要不应降低线路标准,尽量不采用缩短缓和曲线,减小平、竖曲线半径等方案。
- 2) 对于与既有结构衔接的工程,在调线调坡设

计阶段除了需要测量实际结构轮廓外,还需要对已铺轨的轨道平面线位和高程进行现场实测,切勿直接使用原设计线位及高程值。

3) 现场测量数据是调线调坡设计工作的基础和最重要的依据,其准确与否对调线调坡设计工作能否顺利完成至关重要。

4) 数据分析及整理、调整方案研究虽是内业工作,但在遇到特殊侵限情况时,应实地踏勘、多方了解实际情况,分析产生侵限的原因,以便制定合理的处理方案。

5) 调整过程中应加强与各专业的配合,横向侵限时应与限界专业、强弱电专业(支架长度及设置位置)、结构专业(疏散平台宽度)等专业沟通;竖向调整时应与轨道专业、接触网专业深度配合,以便稳定方案。

6) 车站内部的二次结构侵限时,以优先选择对结构进行处理,不应因二次结构存在的侵限,轻易调整线路平纵。

7) 同一断面不同位置可接受的侵限值不尽相同,尤其对于区间曲线地段,曲线外侧即便存在结构的侵限,也不影响设备的正常安装,分析侵限数据时,应根据侵限位置,针对性的比选调整方案。

8) 车站配线位置应重点核查道岔加宽地段、转辙机设置处、中间隔墙、立柱等位置是否存在侵限。

9) 设计者应掌握曲线地段偏移和加宽的基本原理和计算公式,必要时手动检核,尤其对于调整平面的情况,应在平面图中画出线路中心线、结构轮廓线、允许偏差范围线,以便直观地查看侵限情况,制定调整方案。

10) 竖向存在侵限时,应优先满足接触网安装净空需求,车站范围一般不调整,区间平面尽量不调整。

11) 调线调坡设计是一项系统性的工作,涉及的专业较多,调整方案应综合分析各方优劣,寻求相对合理的结果,通过调线调坡设计应达到满足后期铺轨和设备安装的空间需求,但不必做到完全不侵限。

12) 对于线路调线调坡之后,限界仍然较为紧张或仍有侵限的位置,务必在铺轨前对结构进行复测,以便发现问题及时调整。对于调后受影响的专业,应提醒其在后续的设计、施工中格外注意。

13) 当调整方案涉及到最低点移动或设备安装位置调整时,应重点提醒其他专业注意,并核实轨

道反坡排水的距离是否可行。

14) 对于人防门、站台板、疏散平台等结构应尽量在调线调坡设计完成之后实施,以保证结构不冲突;对已经实施的二次结构,出现侵限时应以对结构进行处理为优先选择方案。

15) 对于工期较为紧张,部分数据不完整的区间、车站调线调坡范围应预留出足够的后期调整量。

## 4 结语

调线调坡是协调土建施工与设备安装冲突问题的环节。在先期设计及施工中应尽量为调线调坡提供良好的条件,尽量减少对结构进行二次处理或对设备进行特殊设计。

1) 在平纵断面设计时应在满足规范要求的前提下,尽量对圆曲线长度、夹直线长度、平竖曲线距离站台及道岔的距离、最大限制坡度等的设计留有余量,以备施工出现偏差或其他因素需要调整线路平纵时,仍有调整的可能。

2) 不同期实施的工程前期预留终点应尽量选择直线段,尽量避免设置在平、曲线上,以避免后期衔接困难。

3) 地铁设计一般在站端设置节能坡,而盾构收发时姿态控制较难,因此在车站小端应尽量将变坡点移出车站范围,以减低施工难度,减少站端盾构载头或抬头引起偏差。

4) 水平方向的施工偏差,往往发生在平面小半径曲线上,对线路的调整可能会降低线路标准,因此在设计过程中应该尽量减少小半径曲线的应用,尤其是角度较小、曲线较长的情况。

5) 由于高等减振及特殊减振地段对轨道结构高度要求大,占用部分底板允许的施工误差值,因此,对于洞径较小的特殊、高等减振地段,施工时应尽量避免正误差的存在。可采取隧道结构提前下沉一定量的方案,满足后期轨道结构铺设要求。

6) 前期确定盾构尺寸时,应根据当地的地质条件、工程投资、车辆选型等因素,综合考虑盾构的直径,适当的增大洞径,预留后期出现施工偏差时的补救空间。

## 参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB

50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

[2] 欧阳全裕. 地铁轻轨线路设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

OUYANG Quanyu. Metro light rail line design [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.

[3] 孟凡铁. 深圳地铁调线调坡技术研究[J]. 铁道标准设计, 2004, 48(3): 54.

MENG Fantie. Adjustment of route alignment and gradient of Shenzhen Metro [J]. Railway Standard Design, 2004, 48(3): 54.

[4] 刘铮. 城市轨道交通调线调坡方法研究[J]. 交通科技, 2014(3): 176.

LIU Zheng. Research of adjusting alignments and gradient method of urban rail transit [J]. Transportation Science & Technology, 2014(3): 176.

[5] 陈菊. 城市轨道交通线路设计中的调线调坡技术研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(3): 25.

CHEN Ju. Technical study on route alignment and gradient adjustment in route design of urban rail transit [J]. Railway Standard Design, 2014, 58(3): 25.

[6] 郭俊义. 调线调坡设计以及对线路设计的启示[J]. 都市轨道交通, 2011, 24(5): 31.

GUO Junyi. Inspiration for line design from adjusting alignments and grades [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2011, 24(5): 31.

[7] 刘志雄. 无锡地铁调线调坡技术研究[J]. 铁道勘测与设计, 2013(3): 52.

LIU Zhixiong. Research on line adjustment and slope adjustment technology of Wuxi Metro [J]. Railway Survey and Design, 2013(3): 52.

[8] 司耀旺. 地铁线路调线调坡设计探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2016(3): 81.

SI Yaowang. Discussion on design of metro track alignment and gradient rehabilitation [J]. Modern Urban Rail Transit, 2016(3): 81.

[9] 李连生. 地铁既有线改扩建工程中线路调线调坡测量技术的研究与应用[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(3): 107.

LI Liansheng. Survey technology in adjusting route alignment and gradient in the improvement of existing subway lines [J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(3): 107.

(收稿日期: 2022-06-28)