

地铁延伸线线路曲线顺接中的切圆法及对称法

田卫建

(中国铁路设计集团有限公司,300142,天津//工程师)

摘要 为有效解决外部因素发生变化时造成的既有地铁工程预留条件与现状工程条件非一致性的线位问题,提出一种新的顺接地铁延伸线线路方法——对称法。同时,将铁路设计中常用的切圆法应用于地铁线路设计,并在前缓和曲线及部分圆曲线线位不变的情况下,将其设计方法特性与对称法进行了对比。研究结果表明:切圆法同样能够应用于地铁线路设计,能较好地解决施工预留条件与现状的非一致性线位问题;对称法在圆曲线长度确定且前后缓和曲线长度一致的情况下,能够应用于地铁线路设计中,简化线路调整过程。

关键词 地铁;线路顺接;切圆法;对称法

中图分类号 U231.3;U212.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.01.029

Cyclotomic Method and Symmetry Method in Curve Connection on Metro Extension Lines

TIAN Weijian

Abstract To effectively solve the line position problem caused by the inconsistency between existing metro engineering reserved conditions and current engineering conditions when the external factors has changed, a new method of connecting the metro extension line—symmetry method is proposed. At the same time, the cyclotomic method commonly used in railway design is applied to metro line design, and its characteristics are compared with the symmetry method when the front transition curve is gentle and the line position of some circular curves is unchanged. Research results show that cyclotomic method can also be applied to the design of metro lines, and can better solve the problem of inconsistent line position between construction reserved conditions and current situation. Under the condition that the length of circular curve is determined and the length of front and back transition curves is consistent, symmetry method can be applied to the design of metro lines and simplify the process of line adjustment.

Key words metro; line connection; cyclotomic method; symmetry method

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

在城市轨道交通项目建设过程中,由于城市发展需求及项目工程特点,大型建设项目通常需要分期建设,这样既能满足客流服务的需求,又能最大化经济效益。分期建设时,初期建设项目在既有建设条件下应预留二期或远期延伸条件。但由于建设时序、城市发展和设计思路的不同,后期工程在实施时需要深入研究延伸工程起点衔接区段的设计方案。在边界条件未发生变化且设计最优的情况下,后期工程只需沿预留方案延伸即可。但当边界条件发生变化时,需要修改原预留延伸方案,在保证既有工程不改、少改的前提下,实现延伸线与既有线路的顺接。调整地铁线路预留曲线线位常用的方法有切圆法、切线平移法及多参数调整方法等。文献[1]介绍了地铁曲线预留工程线路顺接的常用设计方法及其设计原理。文献[2]以襄渝铁路增建二线施工工程为例,运用直线切圆法解决了在既有车站内改造时需增建临时便线的线路设计问题。文献[3]以深圳地铁9号线香梅站—景田站侧穿鲁班大厦施工工程为例,运用切圆法降低了工程施工风险。

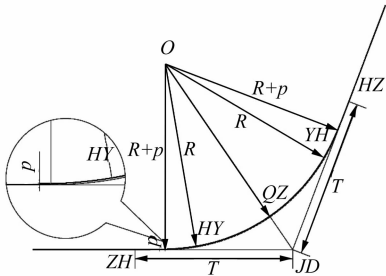
针对地铁曲线预留工程,采用切圆法和对称法解决了预留条件与现状工程条件非一致性的线位问题。以沈阳地铁1号线东延线工程为例,采用切圆法优化调整了原预留线位,节省了工程投资。以大连地铁13号线二期工程为例,采用对称法顺接了既有线,减少了调整既有线引起的工程改造。本文研究可为后续曲线预留或改造工程提供借鉴与参考。

1 设计方法

1.1 平面线型要素

地铁线路平面由直线和曲线构成。为满足曲率过渡、轨距加宽和超高设置的需要,在直线与圆曲线之间需设置缓和曲线。缓和曲线的设计需根据曲线半径、设计速度和超高等因素确定,可参照

GB 50157—2013《地铁设计规范》选取。标准平面曲线要素示意图如图 1 所示^[4]。



注：ZH 为直缓点；HY 为缓圆点；YH 为圆缓点；HZ 为缓直点；R 为圆曲线半径；p 为内移距；T 为切线长；QZ 为曲中点；JD 为交点；O 为圆心。

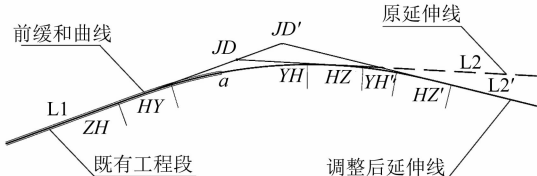
图 1 标准平面曲线要素示意图

Fig. 1 Schematic diagram of standard plane curve elements

1.2 切圆法设计原理及其特点

在地铁线路设计中,由两条切线边即可确定线路走向,通过两条切线的夹角、曲线半径、缓和曲线长等要素可以确定线路的平面线型。当一条切线边、缓和曲线长、圆曲线半径确定后,圆曲线长度就与另一条边的切线方位唯一确定(除了不等长缓和曲线长线型,因其线型较特殊不适用上述情况)。切圆法的基本设计原理为:在既有切线边、前缓和曲线位置及曲线半径数值确定情况下,延长或缩短圆曲线的长度使得前缓和曲线及部分圆曲线位置不变,只改变另一条切线边的方位,以调整后续线位。切圆法的主要特点为:在前缓和曲线及部分圆曲线不变的条件下,调整后段圆曲线及缓和曲线位置,进而达到调整线位走向的目的。切圆法的本质为通过延长或缩短圆曲线长度来改变切线方向,设计中以切线方位判定具体切线位置。

切圆法调整方案示意图如图 2 所示。原设计方案为线路由切线边 L1 直线部分经过 ZH—HY—YH—HZ 转向切线边 L2,现因设计需要将切线边 L2 调整至 L2',该步骤可通过伸长圆曲线 YH 至 YH'实



注：YH' 为调整后的圆缓点；HZ' 为调整后的缓直点；L1 为既有切线边；L2 为预留切线边；L2' 为调整后的切线边；JD' 为调整后的交点；a 为工程限制点。

图 2 切圆法调整方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cyclotomic method adjustment scheme

现,使线位满足在前缓和曲线及 HY—a 点位置不变的同时增大切线夹角。具体方法为:以预留圆曲线圆心 O 为基准,以 R+p 为半径画圆,再以 L2'切线方位做该圆的切线,确定 L2'切线的具体位置,最终获得交点 JD',以此设置相关参数即能顺接既有工程。

1.3 对称法设计原理及其特点

对称法利用曲线线型对称的特点,找到对称轴即可通过前切线确定后切线的位置,从而确定线型位置。该方法主要通过工程边界条件确定圆曲线的终点,以圆曲线的曲线中点和圆心确定对称轴。对称法的主要特点为:对称法设计方案的前提是前后缓和曲线长度一致,曲线线型完全对称。该方法可以满足前缓和曲线及部分圆曲线条件不变下的调整线位走向需求。在边界条件明确,圆曲线长度最长、最短或确定位置时使用对称法调整线路方案过程较为简便。

对称法调整方案示意图如图 3 所示。当边界条件已明确:曲线长度由原设计方案的 YH 位置调整至 a 点时,线路偏角(L1 与 L2'的夹角)为最大值。通过既有圆曲线确定圆心位置,再确定 HY—YH'的曲线中点位置,将上述两点连接即为调整后曲线的对称轴。通过该轴对称的前切线 L1 即可得到 L2'及交点 JD',进而确定调整后的线位。

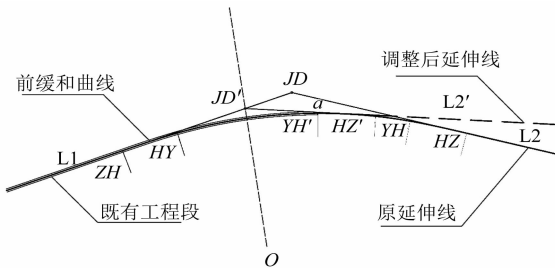


图 3 对称法调整方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of symmetry method adjustment scheme

1.4 切圆法与对称法的适用性分析

根据上述方法原理及特点,两种设计方法特性对比如表 1 所示。

表 1 两种设计方法特性对比

Tab. 1 Characteristics comparison of two design methods

| 调整方法 | 调整目的 | 边界条件 | 适用性 |
|------|---------------------------|-------|-------------|
| 切圆法 | 前缓和曲线和部分圆曲线不变,利用几何关系调整后线位 | 切线方向 | 由切线方向定后续线位 |
| 对称法 | 前缓和曲线和部分圆曲线不变,利用几何关系调整后线位 | 圆曲线位置 | 由圆曲线长度定后续线位 |

2 工程应用

2.1 切圆法设计工程应用

沈阳地铁 1 号线为既有线路,其终点站位于黎明广场站,该车站为一座地下一层侧式车站,站前设单渡线,站后设折返线兼停车线。

2.1.1 预留设计方案

既有沈阳地铁 1 号线工程站后以曲线半径 $R=600\text{ m}$ 绕避和睦路跨北运河桥后,沿和睦路向东敷设。为使线路距离既有建筑风险可控,距离和睦路 58 号 6 号楼既有 7 层居民楼净距为 3.6 m,原设计预留左右线,线路的曲线半径均为 $R=1\,000\text{ m}$,线间距为 5.0 m。在保证夹直线长度满足规范要求后,左右线分开线间距沿和睦路地下敷设。既有沈阳地铁 1 号线终点站及站后区间方案截图如图 4 所示。



图 4 既有沈阳地铁 1 号线终点站及站后区间方案截图
Fig. 4 Screenshot of the terminal station and interval behind station of existing Shenyang Metro Line 1

根据现场施工条件,延伸线第一个区间长度约为 892.0 m,区间施工工法选择暗挖法,断面形式为地下双联拱结构+单洞单线暗挖标准马蹄形结构。在上述条件下,线路平面增加交点由 5.0 m 分开至 11.0 m。在线间距分开约 6.5 m 后,由双联拱结构过渡至标准马蹄形断面,双联拱断面施工段长度约为 305.7 m。

2.1.2 切圆法优化设计方案

延伸线在既有线路的原设计基础上进行线路优化设计,在既有工程条件下尽快拉大线间距,以求缩短双联拱断面的施工长度、缩短施工工期及减小土建投资。线路右线在原设计基础上基本不变,取消左线 JD2(交点 2),提前拉大左右线的线间距。通过切圆法调整左线 JD1(交点 1)位置,使曲线偏角由原设计方案中的 $10^{\circ}31'49''$ 变为 $8^{\circ}07'35''$,满足既有地下隧道工程的线位不变,且距离和睦路 58-6 既有 7 层居民楼净距为 3.6 m,距离建筑物最近点与原设计方案基本无变化。切圆法调整线路前后对比示意图截图如图 5 所示。延伸线在新东三街附近

的线间距约为 6.5 m,施工结构由地下双联拱结构变为单洞单线暗挖马蹄形结构,双联拱施工段长度约为 163.3 m。相比于原设计方案,切圆法优化设计方案中的双联拱施工段长度缩短约 142.4 m。

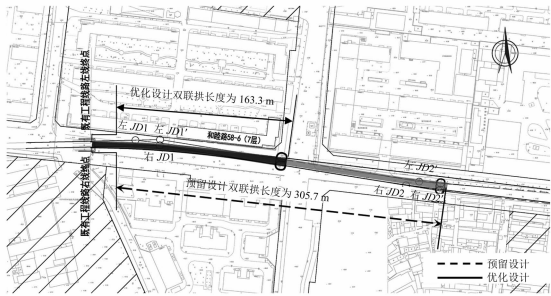


图 5 切圆法调整线路前后对比示意图截图
Fig. 5 Screenshot of comparison before and after the line adjustment by cyclotomic method

预留设计方案与切圆法优化设计方案特点对比如表 2 所示。在该工程项目实施过程中,在保证既有结构所处曲线不变的情况下,运用切圆法优化设计方案优化了续建工程双联拱区段长度,节省了工程投资及施工工期,较好地体现了切圆法的优势和有效性。

表 2 预留设计方案与切圆法优化设计方案特点对比
Tab. 2 Features comparison between reserved design scheme and optimized design scheme of cyclotomic method

| 方案 | 区间长度 | 距居民楼最小水平净距/m | 施工工期 | 工程投资 |
|-----------|--|--------------|----------------|-----------------|
| 预留设计方案 | 305.7 m (双联拱) + 586.5 m (标准单洞单线马蹄形) | 3.6 | — | — |
| 切圆法优化设计方案 | 163.3 m (双联拱) + 728.9 m (标准单洞单线马蹄形) | 3.6 | 约缩短 工期 8 个月 | 约减少 1 220 万元 |

2.2 对称法设计工程应用

大连地铁 3 号线(以下简称“3 号线”)支线自大连地铁 3 号线开发区站接轨,终点至九里站,线路全长为 14.300 km,共设 7 座车站,于 2008 年建成运营。大连地铁 13 号线(以下简称“13 号线”)一期工程南起既有 3 号线支线九里车站,北至普湾新区海湾工业区振兴路站,共设 11 座车站,正线长为 43.152 km,其中高架线长为 23.598 km,地面线长为 18.325 km,地下线长为 1.229 km,于

2021年7月开始试运行,为建设规划中的3号线支线的北延伸线。

13号线一期工程修建前,既有3号线支线末端站为九里站,车站为高架侧式站,正线线间距为5.0 m,站北侧设折返线及出入场线。13号线一期工程为新建线路,与既有3号线支线在九里中桥上的折返线贯通运营。目前,13号线一期工程已基本建设完成。3号线入段线上跨13号线正线,入段线桥墩距离13号线平面线路中心线最近处约4.2 m。迟家沟特大桥位于九里站后入段线与13号线一期立交位置北侧、九里隧道南侧。迟家沟特大桥全长566.26 m,梁部均按曲线曲做,梁部中心与线路左右线的中心线重合。13号线一期工程线路接入后的线位平面图截图如图6所示。

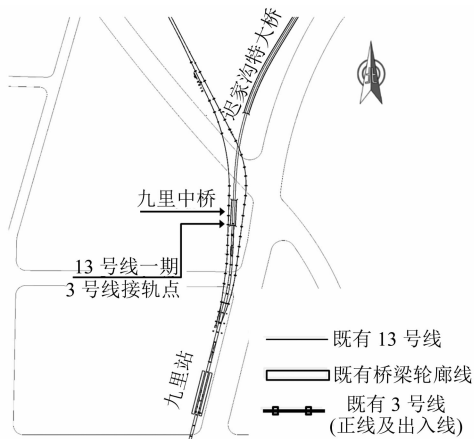


图6 13号线一期工程线路接入后的线位平面图截图

Fig. 6 Screenshot of line location plan after the access of Line 13 phase I project

13号线二期工程现为规划线路,与一期工程的接轨站原建设规划定于十九局站,原方案中线路局部存在敌对进路,还需在既有线线间距为3.6 m的桥梁上新增单渡线,因此需要对整个方案进行专项设计研究。根据方案研究部分成果,文献[5]针对金普城际延伸线接轨方案详尽介绍了接轨的不同方案。在《大连市金普城际铁路工程可行性研究运营组织专题研究报告》专家评审意见中提出在十九局站或九里站设换乘站从本质上没有大的区别。以下以13号线二期接轨点设在九里站方案为研究对象,将预留设计方案和对称法研究方案进行对比分析。

2.2.1 预留设计方案

因线网规划及建设规划调整,13号线二期与

一期工程原设计接轨点不在九里站,无预留线路条件。

2.2.2 对称法研究方案

现就新建13号线二期工程在既有工程条件下在九里站接轨进行方案研究,拟使13号线二期工程自九里站后接轨一期工程,使13号线一期工程与二期工程贯通运营,3号线支线独立运营。13号线二期工程线路接入后的线位平面图截图如图7所示。

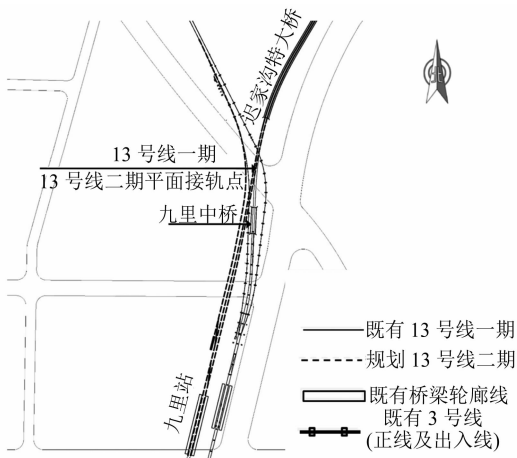


图7 13号线二期工程线路接入后的线位平面图截图

Fig. 7 Screenshot of line location plan after the access of Line 13 phase II project

为了保证13号线二期工程与一期工程平顺衔接、减少对既有工程的改造及废除,考虑既有线路在既有迟家沟特大桥上维持不变,绕避九里中桥接入新的九里换乘站。线路方案在一期工程条件下保持迟家沟特大桥方向边不变,缩短圆曲线长度,由原HY点缩短至HY'点(桥头位置),使得新顺接二期工程的JD'偏角变小,最大限度地绕避九里中桥。因此将HY'与YH曲线中点与圆心相连获得曲线对称轴线及JD'位置,按照调整后的交点位置及既有曲线半径等曲线参数,顺接既有线路方案即可。对称法研究方案确定的13号线二期右线线位示意图截图如图8所示。

调整迟家沟特大桥上线路线位时,考虑以既有桥头作为圆曲线缩短终点为边界条件,通过对称法顺接线路。所提方案确定了圆曲线HY的位置,通过对称法可方便快捷地调整出最小夹角位置处的线路平面位置,并以此作为边界条件。同时,考虑3号线出入线桥墩、九里中桥位置等条件最终确定了线路方案。

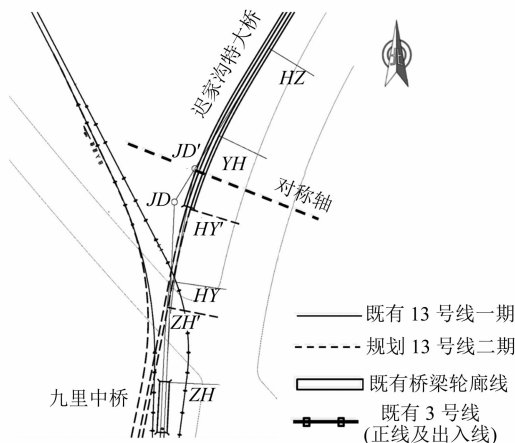


图 8 对称法研究方案确定 13 号线二期右线线位示意图截图
Fig. 8 Screenshot of right line position of Line 13 phase II project determined by symmetry method research scheme

3 结语

在保证平面曲线线位部分不动的前提下,本文提出一种新的顺接地铁延伸线线路方法——对称法。同时,将既有铁路改造或新建二线改造中常用的切圆法应用于地铁线路设计,并在平面前缓和曲线、部分圆曲线线位不变的情况下,将其特点与对称法进行了对比。这两种方法的应用不仅限于地铁延伸线的顺接,在既有铁路改造工程、延伸线工程

及其他线路工程中均可参考应用。

参考文献

- [1] 刘晓峰. 地铁曲线预留工程线路顺接设计方法[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(8): 25.
LIU Xiaofeng. Design method for connection of reserved subway curve projects[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(8): 25.
- [2] 肖强, 郭倩雯. 山区铁路临时便线的线型设计与方案研究[J]. 铁道运输与经济, 2011, 33(11): 30.
XIAO Qiang, GUO Qianwen. Linear design and scheme research of temporary railway lines in mountainous areas[J]. Railway Transport and Economy, 2011, 33(11): 30.
- [3] 卓文海. 地铁线路平面设计切圆法及其应用[J]. 隧道建设, 2017, 37(6): 730.
ZHUO Wenhai. Design and application of tangent circle method for metro lines design[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(6): 730.
- [4] 欧阳全裕. 地铁轻轨线路设计[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
OUYANG Quanyu. Metro light rail line design[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [5] 麻金伟. 金普城际延伸线接轨方案研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(3): 54.
MA Jinwei. Study on track junction of Jinzhou-Puwan intercity railway extension line[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(3): 54.

(收稿日期: 2021-06-16)

(上接第 143 页)

- [2] 魏群. 城市轨道交通 CBTC 系统弹性评估方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
WEI Qun. Research on resilience assessment method of communication-based train control system in urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [3] 潘星, 张国忠, 张跃东, 等. 工程弹性系统与系统弹性理论研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(9): 2006.
PAN Xing, ZHANG Guozhong, ZHANG Yuedong, et al. Review of engineered resilient systems and system resilience theory[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(9): 2006.
- [4] WOLTER K, AVRITZER A, VIEIRA M, et al. Resilience assessment and evaluation of computing systems[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [5] PARIÈS J A, HOLLNAGEL E, PARIÈS J, et al. Resilience engineering in practice: a guidebook[M]. Boca Raton: CRC Press, Inc., 2017.
- [6] DUBROVA E. Fault-tolerant design[M]. New York: Springer, 2013.
- [7] CHENG P, ZHANG H, CHEN J. Cyber security for industrial control systems: from the viewpoint of close-loop[M]. Boca Raton: CRC Press, Inc., 2016.
- [8] 李文. 地铁列车扣车模型及其应用[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(12): 139.
LI Wen. On subway train detainment model and its application[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(12): 139.
- [9] 刘梦茹. 韧性视角下城市地铁网络最优恢复策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
LIU Mengru. Study on optimal recovery strategy of urban subway network from the perspective of resilience[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.

(收稿日期: 2022-09-10)