

成都轨道交通 13 号线电分相段平纵断面设计研究*

张 浩^{1,2} 周虎利^{1,2} 吴明超^{1,2}(1. 轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院), 710043, 西安; 2. 陕西省铁道及地下
交通工程重点实验室(中铁一院), 710043, 西安//第一作者, 高级工程师)

摘 要 成都轨道交通 13 号线为线路等级速度 140 km/h 的市域轨道交通快线, 采用交流 25 kV 供电方式, 需要设置电分相。在电分相区段, 列车需断电惰行通过, 由此产生的速度损失对运营影响较大。结合牵引计算, 分析了电分相设置对速度的影响, 以及对线路坡度、站间距的要求。通过优化该线的平纵断面, 实现了列车在通过该线 3 处电分相的速度损失均小于 10% 的目标。基于 13 号线的设计经验, 提出了市域快线电分相位置设置的几个重要原则。

关键词 市域轨道交通快线; 交流供电; 电分相; 线路纵坡; 牵引计算

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.07.011

Research on Horizontal and Vertical Section Design of Electric Split Phase Section of Chengdu Metro Line 13

ZHANG Hao, ZHOU Huli, WU Mingchao

Abstract Chengdu Metro Line 13 is an urban express line with the line grade speed of 140 km/h, which adopts the AC 25 kV power supply mode and needs to set electric split phase. In the electric split phase section, train needs to power off and slide through, the speed loss caused by which impacts the operation to certain extent. Combined with traction calculation, the influence of electric split phase setting on speed is analyzed, as well as the requirements for line slope and station spacing. By optimizing the horizontal and vertical sections of the line, it has been achieved that the speed loss of train passing through three electric split phases of the line are all less than 10%. Based on the design experience of Chengdu Metro Line 13, several important principles for setting the location of electric split phase of urban express line are put forward.

Key words urban rapid rail transit; AC power supply; electric split phase; line longitudinal slope; traction calculation

Author's address State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization (FSDI), 710043, Xi'an, China

为适应城市空间结构的优化提升, 城市轨道交通涌现出越来越多的市域轨道交通快线(以下简称“市域快线”)。线路等级速度为 100 km/h 或 120 km/h 的线路采用直流供电方式, 不涉及电分相。当速度等级进一步提高到 140 km/h 及以上时, 交流供电相比直流供电更能适应线路运营的需求, 采用交流供电方式的市域快线必须设置电分相。

电分相在国铁线路中应用广泛且成熟。国铁线路采用统一的单向工频交流 25 kV 供电方式, 站间距大, 列车的运行速度高。在电分相区段内列车需断电惰行, 由此产生速度损失, 对运营有较大影响。与国铁线路相比, 市域快线的站间距一般较小, 列车运行速度较低, 电分相无电区长占整个区间的比例较大, 其对运营的影响更为严重。因此, 本文依托成都轨道交通 13 号线项目, 着重研究如何选择合理的区间位置设置电分相, 并结合设置条件优化调整线路的平纵断面, 使列车可以较高的速度通过, 减少对运营的影响^[1-2]。

1 成都轨道交通 13 号线工程项目概况

1.1 线路概况

13 号线是成都市“中心穿越、全局覆盖、远景预留、互联互通”的市域快线网的重要组成部分, 全长 99.7 km, 设站 39 座。该线采用 8 节编组的 A 型车, 线路等级速度为 140 km/h。牵引供电系统采用单相工频 25 kV 交流制、带回流线的直接供电方式, 接触网采用架空柔性接触网^[3-4]。

13 号线分两期进行建设, 其中: 一期工程位于城区, 长度 29.1 km, 设站 21 座, 全为地下线路, 因平均站间距较小, 为 1.39 km, 故线路等级速度定为 100 km/h; 二期工程位于两端的郊区, 平均站间距为 3.92 km, 线路等级速度定为 140 km/h。

* 中国铁建股份有限公司科技研究计划课题(2018-C38)

1.2 供电方案

根据牵引供电需要,在13号线一期工程两端设置培风和龙泉2座牵引所,牵引所间设置新南门分区所,实现越区支援供电。13号线一期线路的供电范围如图1所示。

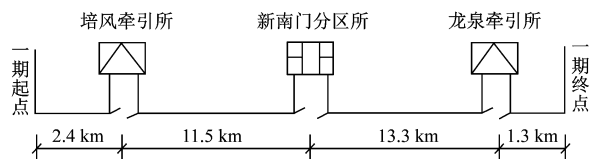


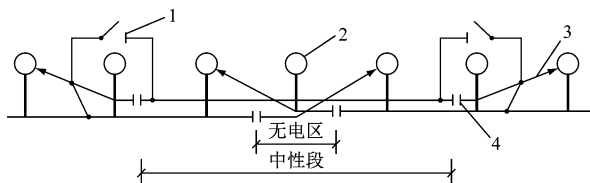
图1 成都轨道交通13号线一期正线供电范围示意图

在交流25 kV供电制式下,供电臂可以满足15~20 km的供电需求。由于三相交流电的相位不同,因此,必须在2个变电所及分区所出口处设置电分相装置,实现不同相位电压的隔离,所设置的电分相分别位于老马堰站—培风站区间、新南门站—望江路站区间、公园大道站—龙华寺站区间^[5-6]。

2 电分相设置

2.1 电分相设置形式

从减少列车速度损失、降低工程投资等角度考虑,推荐采用带中性段的6跨关节式电分相,中性段长度一般为120 m,无电区长度不大于60 m,如图2所示。



注:1—隔离开关;2—支柱;3—下锚补偿装置;4—绝缘子。

图2 6跨关节式电分相示意图

图3为电分相按TG/01—2014《铁路技术管理规程》、TB/T 3197—2018《车载控制自动过分相系统技术条件》的规定设置标识牌和地面磁感应器。图3中, a 为中性段两端垂直投射到钢轨上的位置至第1个磁感应器G2(或G3)的距离为 a ; b 为第1个磁感应器G2(或G3)至第2个磁感应器G1(或G4)的距离^[7-8]。

如图3所示,列车运行至中性段前G1磁感应器处时,由右侧接收设备接收到的定点信号判定为预告信号,列车控制系统进入预告模式;牵引控制系统控制牵引电机电流平稳下降至0,断开辅助供电系统,然后断开主断路器。列车运行至中性段前

G2磁感应器处时,若列车仍未完成断电,则强迫断电信号起作用,牵引控制系统立即封锁牵引电机电流,并断开主断路器。

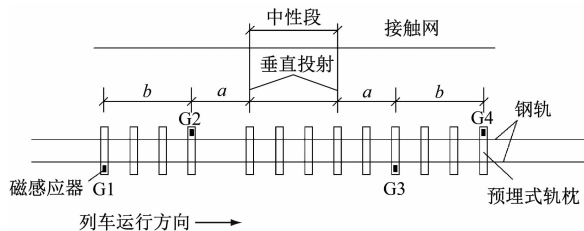


图3 电分相处电磁装置设置示意图

参照TB/T 3197—2018《车载控制自动过分相系统技术条件》的规定,本文取 $a=35$ m, $b=170$ m进行检算^[9]。

2.2 信号系统设置

在适当位置设置信号机,使列车能在分相区防护信号机前加速,列车在进入无电区前具有足够的动能,可以较高的速度惰行通过分相区。电分相处信号系统设置如图4所示,其中: $L_2=2a+2b+L_{\text{中性段}}$ ($L_{\text{中性段}}$ 为中性段的长度)。

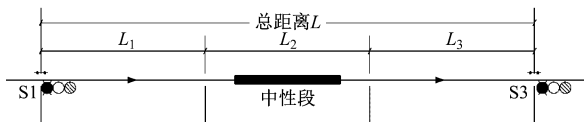


图4 电分相处信号系统设置

以上是结合电分相设置形式,在适当位置安装信号装置,从设备功能方面,为列车能够以适合的速度通过电分相创造条件。下面通过优化线路平纵并结合牵引计算从设计方面,改善列车行驶条件,使列车可以较高速度通过,以减少对运营的影响。

3 线路平纵断面的优化设计

3.1 不同坡度对速度、距离、时间的核算

考虑到列车在区间停车及恢复自启时,若驶入分相区速度较小,就可能会在分相区内停车或驶出速度较小,对运营产生较大影响。为保证列车驶入分相区的速度较高,需针对分相区内不同坡度情况下列车的速度、距离、时间进行核算,如表1所示。

3.2 电分相设置原则

根据表1,本文总结出电分相所在区间的线路平面和纵坡设置原则如下:

1) 线路坡度越缓,列车速度损失量越小;线路

表 1 不同坡度情况下电分相处行车核算

坡度/(%)	驶入分相时的速度/ (km/h)	驶出分相时的速度/ (km/h)	加速距离 L_1 /m	分相长度 L_2 /m	制动距离 L_3 /m	总距离 L /m	总时间/s
5	100	94	615	530	379	1 524	92
	90	83	501	530	295	1 326	84
	80	72	433	530	222	1 185	77
	70	62	375	530	165	1 070	73
	60	51	204	530	111	845	70
	50	38	134	530	62	726	71
	40	25	76	530	27	633	79
10	100	90	615	530	347	1 492	91
	90	79	501	530	268	1 299	83
	80	68	433	530	198	1 161	77
	70	56	375	530	134	1 039	73
	60	44	204	530	83	817	70
	50	29	134	530	36	700	73
15	100	86	615	530	317	1 462	90
	90	75	501	530	241	1 272	82
	80	63	433	530	170	1 133	76
	70	50	375	530	107	1 012	72
	60	35	204	530	53	787	71
	50	13	134	530	7	671	81
20	100	82	615	530	288	1 433	89
	90	70	501	530	210	1 241	81
	80	57	433	530	139	1 102	75
	70	43	375	530	79	984	72
	60	24	204	530	25	759	73
25	100	78	615	530	261	1 406	89
	90	65	501	530	181	1 212	81
	80	51	433	530	111	1 074	75
	70	34	375	530	50	955	72
30	100	74	615	530	235	1 380	88
	90	60	501	530	154	1 185	80
	80	44	433	530	83	1 046	74
	70	23	375	530	23	928	73

注:总时间是指保证列车由零速度起动,以一定速度驶过分相区,最终制动的时间,为列车在 L_1 、 L_2 、 L_3 区段运行的时间之和。

坡度越陡,列车速度损失量越大。因此,电分相宜设置于缓坡段,尽量减少速度损失量。城市轨道交通线路普遍设计成“高站位、低区间”的节能坡,电分相应避免设置在车站端部陡坡段,而应设置在区间凹形坡的缓坡段。

2) 驶入分相区时的速度越高,速度损失量越小;驶入分相区时的速度越低,速度损失量越大。因此,应尽量保证列车以较高的速度驶入分相区。

3) 站间距越大,越有利于列车提速;站间距越小,越不利于列车提速。因此,电分相应尽量设置

在较大站间距的区间中部,站间距应满足列车加速距离及制动距离的要求。

4) 电分相应优先选择在直线段或大半径曲线段,避免设置在小半径曲线限速区间。

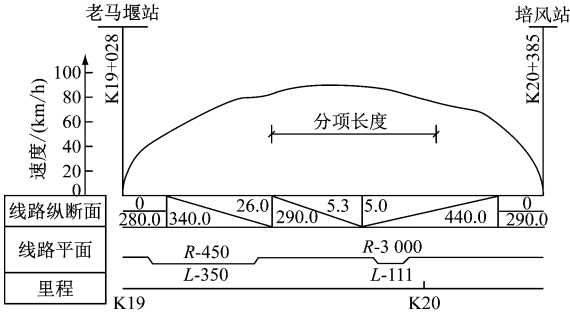
设计中依据上述原则选择适合的区间位置设置电分相,然后再结合牵引计算反复分析验算列车通过电分相区的驶入速度和驶出速度,使速度损失降到最低,即是最佳的电分相位置。

3.3 电分相设置区间线路平纵断面的优化

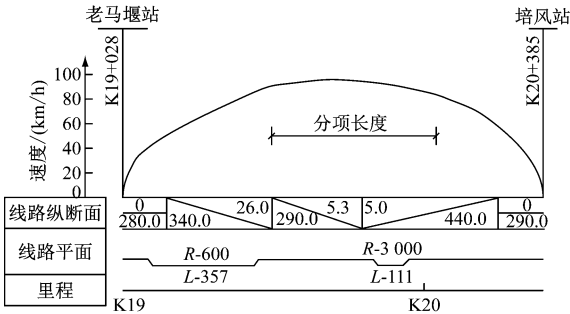
3.3.1 老马堰站—培风站区间

老马堰站—培风站区间的站间距为 1 357 m。培风牵引所电分相断电区选择在该区间中部,分布 1 组半径为 3 000 m 的曲线,不限速;该区间为凹型节能坡区间,纵坡设计为 5.3‰、5.0‰。老马堰站出站端原设计半径为 450 m 曲线,牵引计算及纵坡如图 5 a) 所示。由于半径为 450 m 曲线限速,导致列车驶入电分相的速度为 82 km/h,动能闯坡驶出速度为 71 km/h,速度损失为 13.5%。

优化方案为:加大站端曲线半径至 600 m,其牵引计算及纵坡如图 5 b) 所示。此时列车驶入电分相的速度为 90 km/h,驶出速度为 83 km/h,速度损失仅为 7.8%。



a) 原设计方案



b) 优化方案

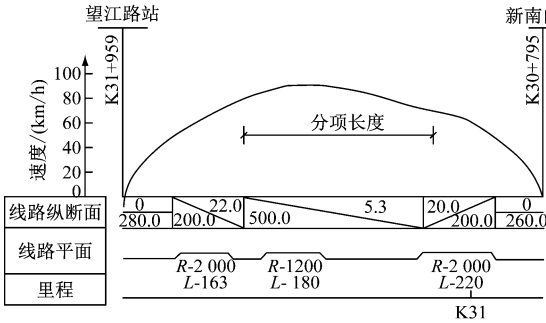
图5 老马堰站—培风站区间的牵引计算及曲线半径优化设计

3.3.2 新南门站—望江路站区间

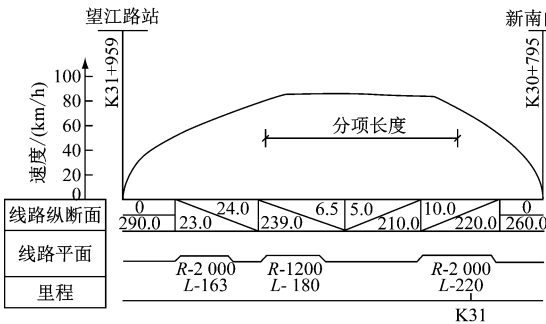
新南门站—望江路站区间的站间距为 1 164

m。原设计方案中,新南门站、望江路站 2 个车站的端部均为大坡度,电分相断电区部分位于 20‰坡段,牵引计算及纵坡如图 6 a) 所示。此时列车驶入电分相的速度为 81 km/h,驶出速度为 71 km/h,速度损失为 12.3%。

优化方案为:优化纵坡,新南门分区所电分相断电区完全位于缓坡段,坡度分别为 6.5‰、5.0‰、10.0‰;分布 2 组曲线,半径分别为 1 200 m 和 2 000 m,不限速,牵引计算及纵坡如图 6 b) 所示。此时列车驶入电分相的速度为 83 km/h,驶出速度为 76 km/h,速度损失仅为 8.4%。



a) 原设计方案



b) 优化方案

图6 新南门站—望江路站区间的牵引计算及纵坡优化设计

3.3.3 公园大道站—龙华寺站区间

公园大道站—龙华寺站区间的站间距为 1 439 m,分布 2 组曲线,半径分别为 800 m 和 1 000 m,不限速;该区间为凹型节能坡区间,缓坡段纵坡设计为 8.0‰、14.1‰。龙泉牵引所电分相断电区选择在公园大道站—龙华寺站区间中部缓坡段,如图 7 所示。该区间站间距较大,利于电分相的设置,列车驶入电分相的速度为 90 km/h,动能闯坡驶出速度为 84 km/h,速度损失仅为 6.7%,电分相位置已为最优,不需再优化。

3.4 牵引计算结果分析

分析牵引计算结果得出,列车在上述 3 处电分

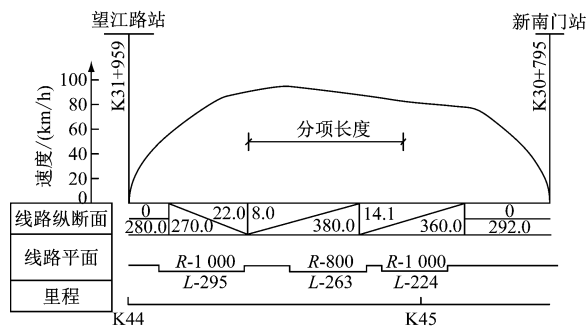


图7 公园大道站—龙华寺站区间的牵引计算及纵坡设计

相设置区间的速度损失均小于10%，列车可以保持较高速度通过，不会在电分相区域内停车，且对旅行速度及旅行时间的影响均较小。这3处的电分相位置为最优方案。

综合上述，列车驶入电分相的速度应尽量高，以不低于80 km/h为宜；电分相应设置于缓坡段，坡度以小于15‰为宜。这样既有利于实现列车以高速通过，也可降低速度损失。

4 结语

本文通过分析市域快线电分相设置对列车速度的影响，以及对线路坡度、站间距的要求，总结出电分相的设置原则。优化了成都轨道交通13号线培风牵引所、新南门分区所和龙泉牵引所3处电分相区间的平纵断面设计方案，并合理设置电分相位置。结合牵引计算进行验算后得出结论，列车通过这3处电分相的速度损失均小于10%，可保证列车以较高速度通过，对运营的影响较小。本文的研究对市域快线的交流供电制式具有一定指导意义，主

(上接第47页)

电磁兼容试验、防尘防水试验、冲击振动试验和高低温等其他环境试验。部件部分功能试验内容与系统组合试验有些重叠，但两者在检验重点和检验方法上是不同的：系统组合试验是所有部件组成系统后测试系统功能是否正常，部件功能试验是通过测试工装或配试设备测试该部件功能是否正常。

3 结语

此次《标准》的制订，是对近10年轨道交通站台门电气系统的全面梳理，明确了产品技术要求、试验方法和RAMS等要求；可为指导企业产品设计和制造，帮助用户验收和使用发挥积极作用；并使站台门行业朝健康、有序、稳定、持续的方向发展。

要结论与建议如下：

- 1) 电分相宜设置于区间凹形坡的缓坡段，尽量减少速度损失量。
- 2) 尽量保证列车以较高速度驶入分相区。
- 3) 电分相应尽量设置在较大站间距的区间中部，以满足列车加速距离及制动距离的要求。
- 4) 电分相应优先选择在直线区段或大半径曲线段落，避免设置在小半径曲线限速区间。

参考文献

- [1] 高国飞,付义龙,沈景炎.基于功能定位和速度效率的市域快线速度目标确定[J].都市快轨交通,2018(5):35.
- [2] 黄树明.城市轨道交通市域线速度目标值研究[J].城市轨道交通研究,2017(7):65.
- [3] 中铁第一勘察设计院集团有限公司.成都市轨道交通13号线一期工程可行性研究报告[R].西安:中铁第一勘察设计院集团有限公司,2018.
- [4] 周宏昌.多重功能复合的市域快轨速度目标值研究——以成都市轨道交通13号线为例[J].铁道标准设计,2020(2):15.
- [5] 张远.锚段关节式电分相过电压分析与抑制研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [6] 周娟.分段式同相供电系统机车自动过分相研究[J].科技创新与应用,2020(17):85.
- [7] 中国铁路总公司.铁路技术管理规程:TB/T 1402—2014[S].北京:中国铁道出版社,2014:162.
- [8] 国家铁路局.车载控制自动过分相系统技术条件:TB/T 3197—2018[S].北京:中国铁道出版社,2018:4.
- [9] 邓志翔.市域轨道交通供电系统设置电分相对于相关专业的的影响分析[J].城市轨道交通研究,2019(12):89.

(收稿日期:2020-10-24)

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.轨道交通 站台门电气系统:GB/T 36284—2018[S].北京:中国标准出版社,2018:1.
- [2] 中华人民共和国国家建设部.城市轨道交通站台屏蔽门:CJ/T 236—2006[S].北京:中国标准出版社,2006:1.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国质量监督检验检疫总局.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国标准出版社,2013:234.
- [4] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.轨道交通 电磁兼容 第5部分:地面供电装置和设备的发射与抗扰度:GB/T 24338.6—2018[S].北京:中国标准出版社,2018:1.

(收稿日期:2019-08-29)