

# 市域轨道交通牵引供电制式的选择与优化

李 剑 刘孟恺 高 宏

(中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 市域轨道交通的车站间距、设计速度目标值等介于干线铁路和城市轨道交通之间,其供电制式的选择直接影响到所建线路的技术和建设标准。不同的供电制式具有不同的特征及故障处理方式,这对市域轨道交通的运营服务水平和可靠性会产生影响。结合不同牵引供电制式的技术特点,对市域轨道交通牵引供电制式选择进行了分析,并从弓网关系、供电故障影响、设备可靠性等方面开展探讨,提出了市域轨道交通牵引供电制式的优化方案。交流牵引供电与刚性接触网的组合,应成为市域轨道交通隧道区段牵引供电制式的发展方向之一。

**关键词** 市域轨道交通; 牵引供电; 弓网关系; 制式优化

**中图分类号** U223.5<sup>+</sup>1

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.06.036

## Selection and Optimization of Urban Regional Rail Transit Traction Power Supply Mode

LI Jian, LIU Mengkai, GAO Hong

**Abstract** The station spacing and targeted speed design of urban regional rail transit is between those of the trunk railway and urban rail transit, the selection of power supply mode directly affects the technical and construction standards of the built lines. Because of different characters and fault handling methods, different power supply modes ultimately affect rail transit operation, service level and reliability. Based on the technical characteristics of different traction power supply systems, the selection of traction power supply system for urban regional rail transit is analyzed from angles of pantograph catenary relationship, impact of power supply failure and equipment reliability, an optimized traction power supply mode for urban regional rail transit is proposed, the combination of AC traction power supply and rigid catenary is regarded as the development trend of traction power supply mode for urban regional rail transit.

**Key words** urban regional rail transit; traction power supply; pantograph-catenary relationship; system optimization

**Author's address** China Railway Eryuan Engineer Group, 610031, Chengdu, China

随着我国城市轨道交通的迅猛发展, 大型城市

的轨道交通已由市区往郊区、市域延伸。如:广州市在结合珠三角城际轨道交通建设的基础上发展市域轨道交通,并与广州地铁互为补充;重庆开始规划主城区与江津、合川等卫星城之间的市域轨道交通;成都开始研究建设兼顾市域轨道交通功能与机场快线功能的18号线、19号线。这些工程都有各自所独有的功能定位,因此具有不同的技术标准和工程特点,在速度目标值、行车组织及运营管理、车辆编组及性能要求、站间距、换乘接驳点、线路走向、线路实施或规划延伸长度、投资及建设运营主体等方面,均与地铁有所区别。对这些项目的建设经验和制式选择进行总结,可逐渐形成市域轨道交通的相关建设标准。本文拟对其中的牵引供电制式进行重点探讨。

## 1 牵引供电制式的比较

国内外多条市域轨道交通线路牵引供电方式见表1。

表1 国内外多条市域轨道交通线路的牵引供电制式

项目	速度目标值/(km/h)	线路长度/km	供电制式	悬挂方式
香港机场线	130	35.0	直流 1 500 V	架空柔性接触网
北京首都机场线	110	28.0	直流 750 V	750 V 接触轨
香港东西铁路	160	64.5	交流 25 kV	架空柔性接触网
曼谷机场快线	160	28.8	交流 25 kV	架空柔性接触网
吉隆坡机场快线	160	57.0	交流 25 kV	架空柔性接触网

关于交流 25 kV、直流 1 500 V(或 750 V)两种制式,有大量文章对此开展了研究比选,比选结论如表2。

当采用集中供电方式时,交流牵引供电与直流牵引供电在系统结构上的区别十分明显,如图1所示。而在实际工程中,牵引供电制式还应综合考虑具体的技术标准、线站位、行车组织及运营管理等因素。

表2 牵引供电制式的比较<sup>[1]</sup>

比较项目	单相工频 25 kV 交流制	直流 1 500 V 供电制
供电形式	一般采用单边供电	双边供电
变电所供电范围	电压等级高,变电所供电范围为 30 ~ 80 km	电压等级低,变电所供电范围为 2.0 ~ 4.5 km
牵引网结构	相同功率电流比直流供电小;牵引网截面积小,结构简单	牵引电流大;牵引网为满足载流量要求,导致截面积大、结构复杂
对隧道净空的影响	电压等级高,对净空要求稍大	电压等级低,对净空要求小
对电力系统的影响	产生三相不平衡和少量谐波,影响电力系统电能质量	产生少量谐波,对电力系统电能质量影响较小
防护处理	存在电磁干扰问题	需杂散电流防护;当速度引起弓网离线时,电弧同样产生电磁干扰
运营费用	变电设施少;电压等级高,电能损耗较大	牵引变电所数量大,电能损耗大;电压等级低,电能损耗较大

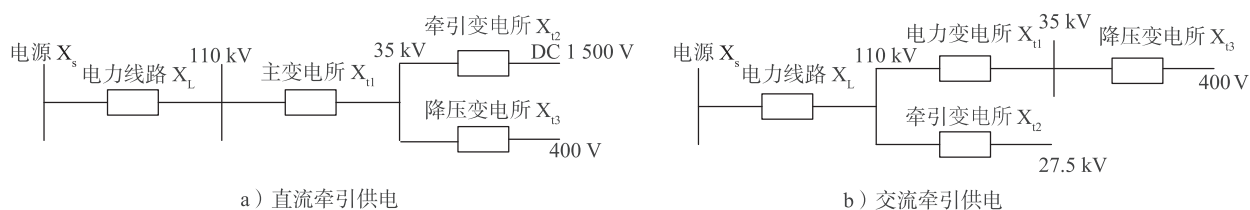


图1 直流、交流牵引供电制式系统结构对比图

## 2 牵引授流方式的比较

牵引授流方式实质上体现了电气和机械两个方面的特点,在满足授流电气需要(载流能力)的同时,由于列车的高速运行,还需要满足授流机械作用(弓网关系)的需要。普通的地铁制式最高速度一般不大于 80 km/h,满足授流电气需要是主要考虑的因素,而市域轨道交通因其运行的速度目标值较大,牵引授流制式受机械作用(弓网关系)影响的比重明显提高。

### 2.1 柔性架空接触网

在我国的干线电气化铁路工程中,得到广泛应用的柔性架空接触网,大多采用全补偿弹性链形悬挂和简单链形悬挂。链形悬挂的接触导线通过吊弦悬挂在承力索上,基本消除了接触导线的硬点,可以满足列车较高运行速度的要求。刚性架空接触网主要由接触导线、汇流排和支持装置等构成。目前,国内外采用链形悬挂接触网的线路,列车的最高试验速度已达到 500 km/h,高速客运专线设计运行速度已达到 350 km/h。

### 2.2 刚性架空接触网

刚性汇流排夹持接触线,通过与受电弓的接触滑动向列车供电。

架空柔性接触网较刚性悬挂接触网对高速度的适应性更好。刚性悬挂对设计、施工质量要求较高。

近年建成的瑞士 Kerenzerzberg 隧道刚性接触网设计速度为 160 km/h,初期试验速度达到了 185 km/h;奥地利 Sittenberg 隧道的刚性接触网初期试

验速度达到了 200 km/h。

### 2.3 不同授流方式接触网对土建净空的要求

在地下线路所占比例较大的情况下,交流 25 kV 架空接触网在经济上缺乏优势。交流 25 kV 接触网供电的主要特点是牵引供电工程本身造价相对较低。但是在地下建筑中,由于架空接触网电压较高,需要的建筑净空高度比直流牵引条件下的净空要高,从而导致地下建筑土建工程造价增加 15% 左右<sup>[2]</sup>。市域轨道交通的土建净空还需考虑空气动力学效应等因素的影响。设计时速为 140 km/h 以上的市域轨道交通线路,接触网和空气动力学效应共同决定其土建的净空高度。

## 3 市域轨道交通车辆与牵引供电的关系

### 3.1 市域轨道交通车辆对供电的适应性分析

根据相关市域轨道交通车辆厂家提供的资料,一旦速度目标值达到 140 km/h 以上,最大加速度达到 1 m/s<sup>2</sup>,8 辆编组列车的功率一般将达到 5 000 ~ 7 000 kW。这已经超过 200 km/h 城际铁路列车 5 000 kW 的常规水平<sup>[3]</sup>。铁路动车组与 8 辆编组市域轨道交通列车的功率曲线分别如图 2 和图 3 所示。

市域轨道交通车辆对交流、直流供电,以及柔性、刚性授流都有较好的适应性。与直流牵引供电相比,交流牵引供电电压较高,车辆电气结构更为复杂,但车辆电气回路承受的电流较小,能有效地减少大功率市域轨道交通车辆的受电弓数量,节能上更具优势。

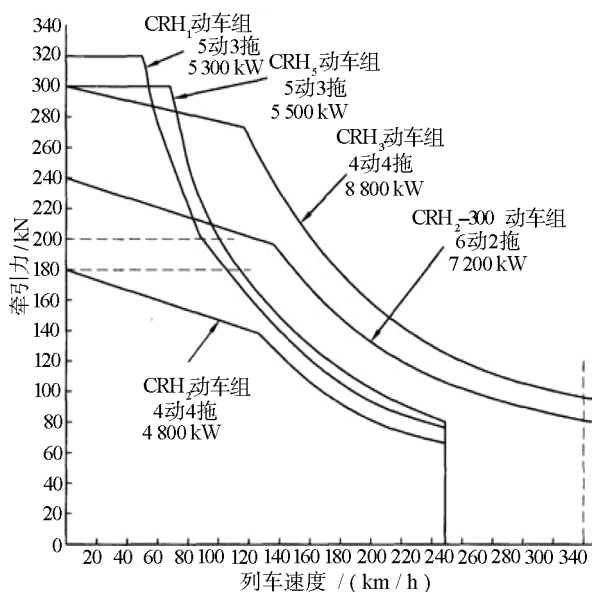


图2 典型铁路动车组功率曲线

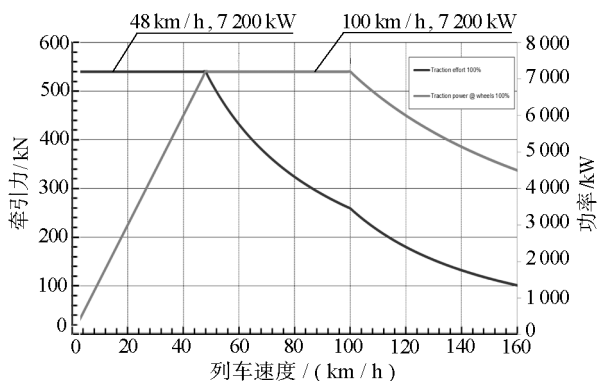


图3 市域轨道交通8辆编组列车功率曲线示例

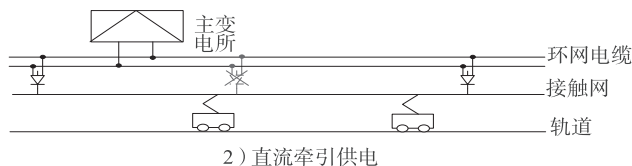
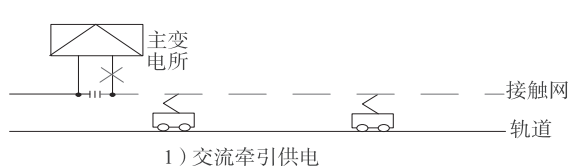


图4 两种供电接触网馈线方式的故障影响示意图

同时，市域轨道交通车辆对柔性悬挂的适应性好于刚性悬挂，尤其是柔性悬挂对车辆受电弓的性能要求较低，磨损较少，能减少车辆受电弓采购成本和运营成本。

### 3.2 供电系统故障特点及影响

市域轨道交通的服务水平要求很高，供电系统不仅要考虑正常运营的供电能力和服务水平，还应重点研究不同制式下故障服务水平和特点。

(1) 主变电所的运行方式对故障产生的影响：铁路的牵引供电系统在正常运行时，一般至少满足越区供电范围内1对动车组运行。在1座主变电所（牵引变电所）故障退出的情况下，是不能满足铁路线路的正常运行的，服务水平因此大幅度下降。城市轨道交通的主变电所故障退出情况下，一般须保证高峰小时的正常供电，不影响列车的正常运营。市域轨道交通主变电所的设置，可根据市区运量和郊区运量的不同需求，通过技术经济比较，合理确定故障情况下的供电能力。

(2) 接触网的馈电结构对故障产生的影响：相比直流牵引供电，采用交流牵引供电时，主变电所直接对接触网供电，减少了环网电缆及牵引所等中间环节，简化了供电结构，相应减少了故障率；但是，一旦交流牵引供电主导回路发生故障，将直接引起主变电所跳闸，影响面积将扩大到整个主变电所供电臂，在供电臂中运行的所有列车都将受到影响。因此，与直流牵引相比，交流牵引故障影响的范围较大，受影响的列车较多。两者故障范围的比较如图4所示。

(3) 授流方式对故障产生的影响：柔性架空接触网一般采用全补偿简单链形悬挂，在具有更好弓网关系和更低磨损特性的同时，也存在较多问题：① 结构较复杂，运营中易产生位移或变形，维护工作量大；② 故障影响范围大，安装调整和事故抢修复杂，需要配备较多的专业检修设备和人员，维护费用高；③ 故障情况下修复时间较长，断线可能较刚性接触网明显增大，断线影响范围至少一个锚段，恢复难度大、时间长。架空刚性悬挂则结构简单，稳定性好，不

需经常调整、维护，运营维护工作量小；事故影响范围小，可局部更换，事故抢修方便、快捷；刚性悬挂的零部件种类很少，相应的备品备件数量也较少，维护费用较低。

综上所述可以看出，柔性架空接触网解决了与车辆相关（如受电弓）的接口问题，但对供电系统本身是不利的；而市域轨道交通的载流能力和服务水平要求都较高，需在实践中验证其可靠性和可用性。



## 4 牵引供电方式的优化

### 4.1 牵引供电方式的优化

综合考虑直流牵引和交流牵引这两种供电制式,可采用以下的供电方式优化方案(如图5所示):主变电所母线不直接对接触网供电,而是在各车站设置分段开关站;主变电所通过供电电缆(或供电线)供至分段开关站,分段开关站对接触网供电,接触网分段与分段开关站一致。

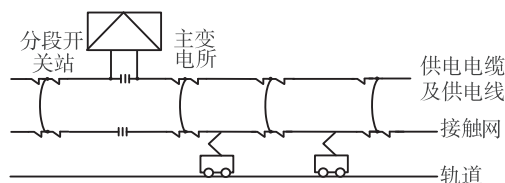


图5 市域轨道交通牵引供电方式优化方案

由于电缆的输电能力相当于相同电压等级架空线或接触网的7倍,电阻较低,供电距离也同比例延长<sup>[4]</sup>。上述优化方案的电缆敷设可结合35 kV环网电缆通道实施。但此方案存在着地下区段电缆通道的设置以及相对较大的投资问题。

### 4.2 车辆对授流方式的适应性优化

目前城市轨道交通列车受电弓允许的最高运行速度为120 km/h,远低于干线电气化铁路新型受电弓允许的最高运行速度,因此,受电弓允许最高运行速度还有很大的提升空间。在隧道内由于气流影响,为保证受电弓的良好取流,需要选用允许运行速度较高的受电弓<sup>[5]</sup>。

国际上开展的相关研究表明,主动适应式受电弓能够较好地改善弓网关系及磨损。

## 5 结语

市域轨道交通在电气、机械两个方面对牵引供

电系统提出的要求,导致供电方式、变电设备、接触网授流方式的变化,对车辆、土建、弱电等的接口产生较大的影响。系统制式的选择,取决于供电系统本身的特点和相关接口的处理技术,以及经济性。

交流牵引供电相比直流牵引供电电压高、电能传输能力强、系统结构简单,具备明显的优势;刚性接触网具有载流能力强、运营可靠性高、维护简单等特点。如果能提高受电弓的适应性,改善弓网关系以满足市域轨道交通的速度要求,则刚性接触网更能满足市域轨道交通的运营特点和可靠性要求。

因此,通过优化各系统的适应性,交流牵引供电与刚性接触网的组合,是市域轨道交通隧道区段牵引供电制式的发展方向之一。地上或高架区段若采用交流牵引供电与柔性接触网,则应对供电分区和运行方式开展进一步的研究,优化系统接口(受电弓、土建等),以提高供电可靠性和安全性。

## 参考文献

- [1] 刘莉蓉,李剑.轨道交通互联互通中牵引供电关键技术探讨[J].建筑电气,2016(2):36.
- [2] 曾志长.市域铁路两种牵引供电制式工程投资对比分析[J].铁路工程造价管理,2013,28(5):9.
- [3] 中铁二院工程集团有限责任公司.成都轨道交通18号线可行性研究报告[R].成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2015:297.
- [4] 李群湛.城市轨道交通交流牵引供电系统及其关键技术[J].西南交通大学学报(自然科学版),2015,50(2):199.
- [5] 关金发,吴积钦.城市轨道交通弓网系统现状分析与建议[J].铁道标准设计,2016(1):144.

(收稿日期:2017-12-10)

## 高速磁浮列车会挤压航空市场吗

中国时速600 km的磁悬浮列车将把航空旅客带回地面吗?5月23日,中国研发团队在青岛展示了一种时速高达600 km的磁浮列车试验样车。研发人员表示,强大电磁使该样车悬浮在距离铁轨一个拇指(约1 cm)的上空,能以接近航空旅行的速度平稳行驶。该高速磁浮课题负责人、中车四方股份公司副总工程师丁叁叁表示,按实际旅行时间计算,在1500 km运程范围内,高速磁浮列车将是最快的交通方式。在他看来,在行程1000至1500 km的城市之间,乘坐高速磁浮将是最优选择。与青岛团队对磁浮列车未来的乐观相比,北京交通大学经济学教授、交通运输分析师陈培红(音)的表态相对谨慎。“市场必须变得更大,仅有技术无法使(该概念)取得成功”。在陈看来,公共交通严重依赖规模经济。她还表示,来自磁浮列车系统的电磁场强度大于高铁系统,对于环境问题的担忧可能将迫使磁浮列车远离人口稠密区。

(摘自2019年5月25日环球网,原载5月23日香港《南华早报》)