

160 km/h 速度级市域(郊)铁路隧道区段 牵引网的技术探讨*

余 韬

(中铁第五勘察设计院集团有限公司, 102627, 北京//正高级工程师)

摘 要 目的:160 km/h 速度级市域(郊)铁路隧道区段的牵引网架设经验较少,应对牵引网的选型及其组成部分、设计要求和施工精度要求等进行重点研究,以优化完善市域(郊)铁路的供电牵引技术。方法:对我国不同速度等级的城市轨道交通线路和市域(郊)铁路线接触网系统的主要应用现状进行统计分析,建议 160 km/h 速度级市域(郊)铁路采用交流供电制式架空接触网。在此基础上结合隧道断面、空气动力学效应及工程造价等因素,以及我国城市轨道交通线路和市域(郊)铁路线的建设和运营经验,进一步建议 160 km/h 速度级市域(郊)铁路隧道区段采用 AC 25 kV 供电悬臂式刚性悬挂架空接触网。随后针对供电悬臂式刚性悬挂架空接触网的支持装置、汇流排组件及膨胀接头等主要部件的组成及设计要求进行了详细的阐述。结果及结论:在满足 160 km/h 弓网相互作用的动态性能指标基础上提出了悬臂式刚性悬挂的主要设计技术标准以及主要施工精度要求,以确保弓网间具有良好的受流性能。

关键词 市域(郊)铁路; 160 km/h 速度级; 牵引网; 架空接触网; 悬臂式刚性悬挂

中图分类号 U223.2; U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.034

Discussion on Traction Catenary Technology for City (Suburban) Railway Tunnel Interval at Speed Level of 160 km/h

YU Tao

Abstract Objective: Experiences for installing traction catenary for 160 km/h speed level city (suburban) railway tunnel interval are insufficient. It is necessary to carry out emphasized research on traction catenary type selection and composition parts, design requirements and construction precision requirements, so that city (suburban) railway power supply traction technology is optimized and improved. Method: The current application status of catenary systems for urban rail transit lines and city (suburban) railway lines at different speed levels in

China is statistically analyzed. It is recommended that the 160 km/h speed level city (suburban) railway adopts an OCS (overhead catenary system) with AC (alternating current) power supply. Based on factors such as tunnel sections, aerodynamic effects, and construction costs, as well as the construction and operation experiences of urban rail transit and city (suburban) railway lines in China, it is further proposed to use a cantilever rigid suspension OCS with AC 25 kV power supply for the above 160 km/h tunnel intervals. Subsequently, the composition and design requirements of the main components such as the support devices, busbar assemblies, and expansion joints of the power supply cantilever rigid suspension OCS are expounded. Result & Conclusion: Upon fulfilling the requirements of dynamic performance indicators for the interaction between the pantograph and catenary at the speed of 160 km/h, the main design technical standards and construction precision requirements for cantilever rigid suspension are proposed to ensure good current collection performance between the pantograph and the catenary.

Key words city (suburban) railway; 160 km/h speed level; traction catenary; OCS; cantilever rigid suspension

Author's address China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 102627, Beijing, China

市域(郊)铁路是连接都市圈中心城区和周边城镇组团,为通勤客流提供快速度、大运量及公交化运输服务的轨道交通系统。目前京津冀、长三角、粤港澳大湾区等都市圈正大力推进市域(郊)铁路建设。

市域(郊)铁路设计速度为 100 ~ 160 km/h^[1]。目前,我国 100 ~ 160 km/h 设计速度等级铁路线的地上牵引网一般采用柔性悬挂架空接触网,其技术方案已非常成熟,但隧道区段的牵引网架设经验很少,需要进行重点研究。考虑到土建工程造价、空

* 中国铁建股份有限公司科技重大专项(2021-A01)

气动力学效应、供电制式和接触网结构等因素,隧道区段牵引网由于设计速度的不同而有所差异。我国已运营的 160 km/h 设计速度等级(以下简称“160 km/h 速度级”)市域(郊)铁路线较少,其隧道牵引网架设的经验也较少,因此本文对 160 km/h 速度级市域(郊)铁路隧道区段的牵引网技术的选型及其组成部分、设计要求和施工精度要求等内容进行深入研究。

1 隧道区段牵引网选型的确定

牵引网由接触网和回流网组成,其中接触网可分为接触轨和架空接触网 2 类。架空接触网按照悬挂类型还可分为柔性悬挂和刚性悬挂 2 种形式。

1.1 接触网系统类型的应用现状及选择

接触轨因受制于靴轨受流匹配、绝缘等因素,一般用于 120 km/h 及以下设计速度等级的 DC(直流)供电制式线路;架空接触网的适应性好,可用于 160 km/h 及以下设计速度等级的 DC 和 AC(交流)供电制式线路。

我国城市轨道交通和市域(郊)铁路部分线路的接触网类型应用现状如表 1 所示。基于表 1 的应用现状,考虑到我国具有丰富的铁路运营经验及成熟的接触网零部件生产技术,160 km/h 速度级市域(郊)铁路接触网系统宜采用架空接触网。

表 1 我国城市轨道交通和市域(郊)铁路的部分线路接触网类型应用现状

Tab.1 OCS main application status of urban rail transit lines and city (suburban) railway lines in China		
接触网类型	设计速度/(km/h)	应用项目
接触轨	100	深圳地铁 3 号线
	120	上海轨道交通 16 号线
	120	广州地铁 14 号线
架空接触网	100	成都地铁 9 号线
	120	深圳地铁 11 号线
	140	成都地铁 18 号线
	160	北京地铁大兴国际机场线
	160	广州地铁 18 号线和 22 号线

1.2 架空接触网悬挂类型的选择

隧道断面、隧道区段空气动力学效应与架空接触网悬挂类型间存在着一定的制约关系。因隧道施工方法不同,隧道断面有盾构圆形隧道断面、明挖矩形隧道断面和矿山法马蹄形隧道断面等不同

型式。由于隧道区间大多采用盾构圆形隧道断面,且与其他断面相比。盾构圆形隧道断面对接触网悬挂的要求最高,因此本文主要针对盾构圆形隧道断面进行分析。

为了满足乘客乘坐舒适度要求,根据空气动力学效应的研究结果,在 100 km/h、140 km/h 及 160 km/h 设计速度等级下,盾构隧道的内径分别为 5 900 mm、7 200 mm^[2]和 7 500 mm^[3]。

对于设计速度为 100~160 km/h 的单线盾构隧道,其架空接触网悬挂可采用 DC 1 500 V 供电垂直刚性悬挂、AC 25 kV 供电弓形腕臂柔性悬挂和 AC 25 kV 供电悬臂式刚性悬挂 3 种方式。这 3 种悬挂方式对应的关键技术指标如表 2 所示。

表 2 架空接触网 3 种悬挂方式对应的关键技术指标
Tab.2 Key technical indicators corresponding to 3 suspension modes of OCS

接触网悬挂类型	最高运行速度/(km/h)	接触线高度/mm	隧道顶至接触线高度/mm	接触网最小净空/mm
DC 1 500 V 供电垂直刚性悬挂	120	4 400	350	4 750
AC 25 kV 供电弓形腕臂柔性悬挂	140	5 300	1 000	6 300
AC 25 kV 供电悬臂式刚性悬挂	160	5 300	960	6 260

注:接触线高度应满足 TB 10624—2020《市域(郊)铁路设计规范》的要求。

对于 120 km/h 及以下设计速度等级市域(郊)铁路线,若盾构隧道内采用 DC 垂直刚性悬挂(以下简称“DC 悬挂”),接触网净空高度小于空气动力学效应要求的最小盾构隧道内径,考虑轨道结构高度、预留变形量等因素,隧道管片内径宜采用 6 000 mm;如采用 AC 弓形腕臂柔性悬挂或 AC 悬臂式刚性悬挂(以下将二者统称为“AC 悬挂”),绝缘距离大,悬挂结构复杂,接触网净空高度大于空气动力学效应要求的最小盾构隧道内径,隧道管片内径宜采用 7 500 mm。采用 DC 悬挂时,隧道开挖工程成本较小,但因其牵引变电所数量多、牵引网截面大,将导致牵引供电专业工程成本的增加。据统计,当隧道长度在线路总长度中的占比等于 29% 时,采用 DC 悬挂和采用 AC 悬挂的铁路线路工程总投资成本基本相当^[4];当隧道长度在线路总长度中的占比大于 29% 时,DC 悬挂较 AC 悬挂在工程成本上具有明显优势。

对于 140 km/h 及以上设计速度等级市域(郊)铁路线,空气动力学效应要求的最小盾构隧道内径大于 AC 悬挂接触网净空高度,AC 悬挂或 DC 悬挂对隧道管片内径要求已无区别,但 DC 悬挂对牵引供电工程成本增加的影响依然存在。因此宜采用 AC 悬挂。

进一步对 AC 悬挂的 2 种方式进行对比。这 2 种方式都是均为 AC 25 kV 供电,与弓形腕臂柔性悬挂相比,悬臂式刚性悬挂具有结构形式简单紧凑、载流量大、无张力悬挂、不用设置下锚装置、最

大允许磨耗值高及不会发生断线等优点^[5],其安全性、稳定性及可维护性均比弓形腕臂柔性悬挂高。

在我国 100~160 km/h 设计速度等级的铁路线中,隧道区段接触网悬挂类型的主要应用情况如表 3 所示。160 km/h 速度级已运营的北京地铁大兴国际机场线、即将开通的广州地铁 18 号线和 22 号线均采用了 AC 25 kV 供电悬臂式刚性悬挂方式,其建设和运营方面的经验可供后续建设的铁路及轨道交通线路借鉴。

表 3 我国 100~160 km/h 设计速度等级隧道接触网悬挂类型的主要应用
Tab.3 Mainly applied tunnel OCS suspension types at speed level of 100-160 km/h in China

设计速度等级/(km/h)	项目名称	接触线高度/mm	管片内径/mm	悬挂类型
100	成都地铁 9 号线	4 200	6 000	DC 1 500 V 供电垂直刚性悬挂
120	深圳地铁 11 号线	4 200	6 000	DC 1 500 V 供电垂直刚性悬挂
140	成都地铁 18 号线	5 000	7 500	AC 25 kV 供电弓形腕臂柔性悬挂
160	北京地铁大兴国际机场线	5 300	7 700	AC 25 kV 供电悬臂式刚性悬挂
160	广州地铁 18 号线和 22 号线	5 300	7 700	AC 25 kV 供电悬臂式刚性悬挂

结合上文所述刚性悬挂的优点,160 km/h 速度级市域(郊)铁路隧道区段牵引网的接触网系统宜采用 AC 25 kV 供电悬臂式刚性悬挂架空接触网。

1.3 回流系统的组成

160 km/h 速度级市域(郊)铁路采用 AC 25 kV 供电,因此牵引网的回流系统由走行轨、大地和回流线共同组成,可利用回流线作为接触网系统的闪络保护和接地保护。回流系统宜接入综合接地系统中。

2 悬臂式刚性悬挂架空接触网的技术要求

悬臂式刚性悬挂架空接触网在我国的应用不多,其主要技术要求主要包括系统组成、设计技术要求和施工精度要求 3 个部分。

2.1 系统组成

悬臂式刚性悬挂架空接触网由接触线、支持装置、汇流排组件、中心锚结、膨胀接头及断口式锚段关节等主要部件组成,其中接触线采用高电导率的铜合金制成。

2.1.1 悬臂支持装置

悬臂支持装置安装于吊柱上,用于悬挂支撑和固定汇流排。悬臂支持装置主要由旋转固定底座(含角钢)、支撑绝缘子、定位线夹连接板及定位线

夹等组成,如图 1 所示。

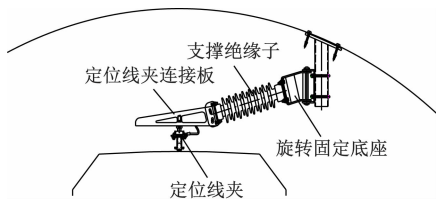


图 1 悬臂式刚性悬挂架空接触网支持装置的主要组成
Fig.1 Main composition of cantilever type rigid suspension OCS support device

2.1.2 汇流排组件

汇流排组件主要由汇流排和中间接头组成。其中:汇流排用于夹持固定接触线并承载电流,一般采用 π 型汇流排;中间接头用于 2 根汇流排间的机械和电气连接,中间接头不应出现在跨距中点左右各 1.0 m 及悬挂定位点左右各 0.5 m 范围内。

2.1.3 中心锚结装置

中心锚结装置用于实现刚性悬挂各锚段中部的锚结固定,以确保各锚段在温度变化过程中两端热胀冷缩的补偿同步。中心锚结装置主要包括锚结悬臂支撑、中心锚固线夹、下锚绝缘子及下锚吊柱等零部件。

2.1.4 膨胀接头

膨胀接头用于补偿锚段内汇流排因温度变化

而产生的纵向膨胀量或收缩量,同时实现锚段间的电气续接及受电弓在锚段间的平滑过渡。图2为膨胀接头的安装方式示意图。膨胀接头中心位于衔接段两端悬挂点(B点和C点)连线的中点,沿线路方向对称布置。B点和C点至股道中心线的水平距离应小于等于100 mm,4个悬挂点(A、B、C、D)的汇流排高度应一致。A、B连线与C、D连线平行,2条平行线之间的水平间距为26 mm。

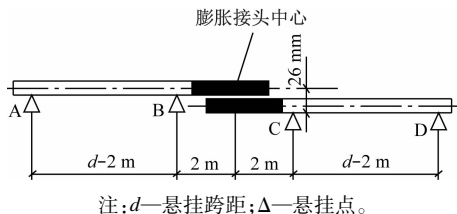


图2 膨胀接头安装方式示意图

Fig. 2 Diagram of expansion joint installation method

2.1.5 断口式锚段关节

断口式锚段关节用于连接2个相邻锚段,2个锚段之间的重叠段长度为6.0 m。组成锚段关节的4处悬挂点应按2个/组分布在线路两侧,相邻悬挂点的间距为1.0 m,锚段末端应留有自由端(长度为1.5 m)。

断口式锚段关节分为绝缘关节和非绝缘关节2种。绝缘关节相邻锚段汇流排中心线间距不应小于450 mm,非绝缘关节相邻锚段汇流排中心线间距不应小于200 mm。

2.1.6 其他设施

悬臂式刚性悬挂架空接触网还包括吊柱、隔离开关、电连接及附加导线悬挂等设施。由于这些设施的安装方式与设计速度等级无关,且与我国既有的地铁线路在安装上差别不大,本文不再赘述。

2.2 设计技术要求

2.2.1 接触线高度

CJJ/T 288—2018《城市轨道交通架空接触网技术标准》中要求:“隧道内接触线距轨顶平面高度不宜小于4 040 mm”。通过对160 km/h速度级铁路线4 300~5 300 mm接触线高度的弓网系统受流性能进行分析,发现在列车运行速度一定的情况下,随着接触线高度的增加,受电弓的接触压力最小值逐渐增大,线路的受流性能更好。结合隧道管片内径及车辆选型等要求,建议接触线160 km/h速度级市域(郊)铁路的接触线高度采用5 300 mm。

2.2.2 接触线坡度

160 km/h速度级市域(郊)铁路的刚性悬挂接

触网的接触线坡度,相关规范的要求如下:TB 10623—2014《城际铁路设计规范》要求坡度不应大于2‰;T/CRS C0101—2017《市域铁路设计规范》要求坡度不宜大于1‰;TB 10624—2020《市域(郊)铁路设计规范》要求坡度不宜大于0.5‰,坡度变化率均为坡度的一半。

接触线坡度越小,对施工精度的要求越高。建议市域(郊)铁路的接触线坡度不宜大于0.5‰。

2.2.3 锚段关节

锚段关节分为非绝缘关节和绝缘关节。其中:非绝缘锚段关节包括断口式非绝缘锚段及膨胀接头;绝缘锚段关节包括断口式绝缘锚段及分段绝缘器。

2.2.3.1 非绝缘锚段关节

列车高速运行时,锚段关节处的接触力波动较大。膨胀接头可将2个锚段从机械上连接起来,膨胀接头两侧的接触线高度应保持一致,以使得列车受电弓可以等高平滑通过,进而提升锚段关节处的弓网动态性能。断口式锚段关节一般用于120 km/h及以下速度等级线路,但断口式锚段关节的接触线没有硬点,受电弓的磨损较小,运营检修方便。

160 km/h速度级市域(郊)铁路区间及越行站的锚段关节均采用膨胀接头方式。膨胀接头元件本体与汇流排材质一致,膨胀量为 1000 ± 500 mm。锚段两端汇流排上的接触线可连续延伸并夹持在膨胀元件对应的线夹上。两侧接触线在锚段关节的重叠区段分为工作支和非工作支2个部分,其中:工作支接触线用以维持受电弓高度,非工作支接触线采用接触线预弯上翘的方式实现弓网分离。市域(郊)铁路中间站两端由于列车的起动速度不快,且为了便于设备检查,可采用断口式锚段关节。

2.2.3.2 绝缘锚段关节

分段绝缘器和断口式绝缘锚段关节在相同的列车运行工况下,其弓网动态性能指标区别不大(见表4),均可满足160 km/h速度级市域(郊)铁路的需求。

分段绝缘器可将2个锚段连接部分进行固定,其整体性好,但滑板磨耗较多,需定期维护。断口式绝缘锚段关节具有2个自由端,锚段关节两侧接触线重叠区段的接触线间距较大,施工时调整接触线的工作量较大、施工难度较高,但受电弓磨损小、技术成熟。建议优先选用断口式绝缘锚段关节。

表 4 分段绝缘器和断口式绝缘锚段关节的弓网动态性能指标对比

Tab. 4 Comparison of pantograph-OCS performance indicators between segmental insulator and broken insulated anchor segment joints

评估项目	单位:N			
	平均接触力	最大接触力	最小接触力	接触力标准差
分段绝缘器	113.70	186.62	43.37	9.93
断口式绝缘锚段关节	93.78	155.72	32.76	32.76

2.2.4 悬挂跨距

悬挂跨距 d 的设置需结合锚段关节的形式,选取 2~3 个锚段进行比较。通过分析受电弓通过不同跨距下 2 种锚段关节的弓网动态性能发现:

1) 若采用断口式关节, $d=8.0\text{ m}$ 时弓网系统的接触力标准差最小,此时弓网系统最小接触力最大,这说明了 $d=8.0\text{ m}$ 时刚性接触网的接触质量最优。

2) 若采用膨胀接头, $d=6.4\text{ m}$ 和 $d=8.0\text{ m}$ 两种情况下弓网系统的接触力标准差、最小接触力和最大接触力均很接近,刚性接触网的接触质量均较优。

除了接触力,还需考虑隧道吊柱预留槽道间距的合理性、跨距大装配数量少的经济性等因素,因此建议市域(郊)铁路采用 8.0 m 的悬挂跨距。

2.2.5 电分相

160 km/h 速度级市域(郊)铁路采用 AC 制式牵引供电,在牵引变电所和分区所处均需设置电分相。由于隧道区段净空有限,电分相处需扩挖隧道断面以增加隧道净空,或占用疏散平台部分宽度,用以放置开关。若占用疏散平台宽度来放置开关,则在列车故障需经由疏散平台进行人员疏散时,存在人员触电或从疏散平台掉落的风险。因此,为了减少电分相的设置,建议采用同相供电技术。

电分相设置还需根据牵引供电能力、列车编组、受电弓分布、线路条件、行车要求及信号布点等特征予以确定,并经线路行车组织检算。电分相由上文的 2 处断口式绝缘关节加中性段组成,中性段长度应根据列车受电弓分布情况确定。

2.2.6 回流系统

牵引网回流系统设置独立的回流线,使之作为钢轨的并联回流通道的。通过吸上线实现回流线与钢轨的相互连接。回流系统宜接入综合接地系统中。

2.2.7 其他设计技术

悬臂式刚性悬挂架空接触网的设计技术标准还包括拉出值、刚柔过渡及锚段长度等,我国在这些方面的相关研究很多,且已形成相关结论,本文不再赘述。

2.3 施工精度要求

160 km/h 速度级市域(郊)铁路列车运行速度高,随之对弓网性能要求也较高,因此对施工精度提出了更高的要求。本文总结了我国已运营的 160 km/h 速度级市域(郊)铁路悬臂式刚性悬挂架空接触网的施工经验和验收标准,以及运营过程中出现的现场问题,以进一步确定悬臂式刚性悬挂架空接触网的主要施工标准。

2.3.1 槽道及吊柱的施工精度要求

每个悬挂点设置 2 条槽道,每条槽道的横向布置轴线应与线路中心线垂直,纵向布置轴线应与线路中心线平行。槽道的施工安装要求主要包括:垂直线路方向偏转误差 $\leq 0.45^\circ$;2 条滑道的间距误差 $\leq 5\text{ mm}$;槽道在设计要求的拉应力、压应力作用下的变形 $\leq 1.0\text{ mm}$,在切向荷载作用下的变形 $\leq 1.0\text{ mm}$;槽道本身不允许移动。

吊柱的施工安全要求主要包括:悬垂吊柱安装应垂直于轨面,垂直线路方向吊柱安装的允许偏差 $\leq 1.0^\circ$,顺线路方向吊柱安装的允许偏差 $\leq 0.5^\circ$;2 个相邻吊柱的横向垂直误差方向不得相反;膨胀接头和分段绝缘器相邻 2 个吊柱在垂直股道方向的夹角施工误差 $\leq 0.1^\circ$ 。

2.3.2 悬臂的施工精度要求

由于汇流排安装完毕后再调整非常困难,且调整的余地很小,因此在汇流排安装阶段悬臂、定位线夹的水平度、高度和拉出值均应按要求安装到位。

腕臂与线路中心线的夹角应根据腕臂安装曲线确定,其允许偏差 $\leq 3.0^\circ$ 。调整板与轨面平行,调整板与轨面的夹角施工误差 $\leq 0.3^\circ$ 。膨胀接头相邻悬挂点调整板应平行,其夹角施工误差 $\leq 0.1^\circ$ 。定位线夹连接板底面应与安装地点的轨平面平行,连接板底面与轨面的夹角施工误差 $\leq 1.0^\circ$ 。

2.3.3 汇流排及接触线的施工精度要求

图纸上的设计锚段长度减去必要的汇流排切割长度后,应是一根标准汇流排长度的整数倍。严格控制施工测量误差,可以极大地减少汇流排切割带来的安装误差。

汇流排中轴线应垂直于所处的轨道平面,汇流

排中轴线与轨道平面的夹角施工误差 $\leq 1^\circ$ 。2段汇流排间夹槽连接处的不平顺度 $\leq 0.3\text{ mm}$ 。2段汇流排接缝处的缝隙 $\leq 1.0\text{ mm}$ 。

普通悬挂点导线高度误差 $\leq 3\text{ mm}$,相邻悬挂点间导线高度偏差 $\leq 3\text{ mm}$ 。拉出值允许偏差 $\leq 5\text{ mm}$ 。

2.3.4 膨胀接头的施工精度要求

膨胀接头处汇流排的施工标准除了满足汇流排施工要求外,还应满足以下要求:①接触线间距为 26 mm ;②断线部位的接触线端头向上翘起,高于工作支接触线 $50\sim 100\text{ mm}$;③膨胀接头悬挂点及两端相邻悬挂点的导线高度应调整至等高,等高的施工误差 $\leq 2\text{ mm}$;④汇流排、膨胀接头与轨平面平行,平行的施工误差 $\leq 0.1^\circ$ 。

2.3.5 断口式锚段关节的施工精度要求

接触线在锚段关节末端汇流排外露的长度为 $150\sim 200\text{ mm}$,沿汇流排终端方向顺延上翘角度为 $30^\circ\sim 35^\circ$ 。

锚段关节处悬挂点导线高度误差 $\leq 2\text{ mm}$,相邻悬挂点导线高度偏差 $\leq 1\text{ mm}$ 。关节内转换悬挂点处非工作支的导线高度不得低于工作支的导线高度,可比工作支的导线高度高出 3 mm ,非工作支高于工作支的导线高度施工误差 $\leq 1\text{ mm}$ 。

2.3.6 其他施工标准

悬臂式刚性悬挂架空接触网的隔离开关、电连接及附加导线悬挂等设施的安装精度与弓网关系无关,可按相关的地铁验收标准执行。

3 结语

现有的市域(郊)铁路牵引网技术已难以满足隧道区段 140 km/h 及以上设计速度等级弓网关系的要求。本文在对隧道断面、空气动力学效应及工程造价等因素进行分析后,建议 160 km/h 速度级市域(郊)铁路隧道区段牵引网采用 $\text{AC } 25\text{ kV}$ 供电悬臂式刚性悬挂架空接触网。

在从基础上,通过分析我国 160 km/h 速度级市

域(郊)铁路悬臂式刚性悬挂架空接触网的应用现状,对悬臂式刚性悬挂各组件的构造进行了详细的阐述,在满足 160 km/h 弓网相互作用的动态性能指标基础上提出了悬臂式刚性悬挂架空接触网的技术要求。基于已运营的 160 km/h 速度级市域(郊)铁路的施工经验及在运营中发现的问题,提出了悬臂式刚性悬挂的主要施工精度要求,以保证弓网间良好受流性能。

参考文献

- [1] 国家铁路局. 市域(郊)铁路设计规范:TB 10624—2020[S]. 北京:中国铁道出版社有限公司,2021:1.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of suburban railway: TB 10624—2020 [S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2021:1.
- [2] 段立新,刘长利,乔锦新,等. 列车速度受限区间的接触网悬挂及隧道断面技术方案[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(12):86.
DUAN Lixin, LIU Changli, QIAO Jinxin, et al. Technical scheme of overhead catenary system and tunnel section in train speed limited interval[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12): 86.
- [3] 周旭. 成都市轨道交通市域快线关键技术研究及应用[J]. 现代城市轨道交通,2020(11):1.
ZHOU Xu. Research and application of key technologies of Chengdu rail transit express line[J]. Modern Urban Rail Transit, 2020 (11): 1.
- [4] 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.
ZENG Zhichang. Investment comparison and analysis of two traction power supply systems in regional railway[J]. Railway Engineering Cost Management, 2013, 28(5): 9.
- [5] 关金发,田志军,吴积钦. 基于弓网动力仿真的 160 km/h 刚柔过渡系统方案研究[J]. 铁道学报,2018,40(9):48.
GUAN Jinfa, TIAN Zhijun, WU Jiqin. Research of 160 km/h transition structure proposal between overhead conductor rail and contact line based on dynamic simulation[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(9): 48.

(收稿日期:2021-02-25)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com