

文章编号: 1674—8247(2024)02—0056—05

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2024. 02. 010

# 跨海湾高速铁路接触网工程关键技术与应用

苏光德

(东南沿海铁路福建有限责任公司, 福州 350000)

**摘 要:** 跨海湾区域的海洋性气候明显, 接触网在跨海湾长大桥梁上沿线架设, 裸露在外且无备用, 时刻承受强台风、强腐蚀盐雾以及大跨度桥梁伸缩、位移等恶劣环境及工程条件的考验, 面临着诸多困难和挑战。本文结合我国东南沿海高速铁路的建设与运营经验, 基于接触网服役特性, 分别从强台风、强腐蚀及大跨度桥梁等服役环境方面, 研究接触网防风、防腐蚀以及与大跨度桥梁伸缩、位移相适配的系列关键技术, 并提出针对性措施及解决方案, 为沿海电气化铁路的建造和运营维护提供指导。

**关键词:** 跨海湾; 接触网; 防风; 防腐蚀; 桥梁伸缩

**中图分类号:** U225

**文献标志码:** A

## Key Technologies and Applications of Overhead Contact System for Cross-bay High-speed Railway

SU Guangde

(Southeast Coastal Railway Fujian Co., Ltd., Fuzhou 350000, China)

**Abstract:** In coastal regions spanning bays, the marine climate is prominent, and the overhead contact system, installed along lengthy sea-crossing bridges with no redundancy, is constantly exposed to severe conditions such as strong typhoons, intense corrosion from salt spray, and the expansion, contraction, and displacement of the long-span bridge. These challenging circumstances pose numerous difficulties and obstacles for the overhead contact system. Based on the construction and operational experience of southeast coastal high-speed railways in China, this paper, grounded in the service characteristics of the overhead contact system, investigated a series of critical technologies addressing wind resistance, corrosion prevention, and compatibility with expansion, contraction, and displacement mechanisms of long-span bridges, and examined the challenges posed by strong typhoons, severe corrosion, and the unique environments presented by long-span bridge structures. Furthermore, it proposed targeted, specific measures and solutions for these issues to guide the construction and maintenance of coastal electrified railway systems.

**Key words:** cross-bay; overhead contact system; wind resistance; corrosion prevention; bridge expansion

近年来,随着我国高速铁路的快速发展,沿海地区铁路网正在逐步建设成型。跨海湾高速铁路因其可以直接连接沿海经济带的重要城市,极大地缩短城市之间的时空距离,对加强区域经济一体化具有战略性意义。跨海湾区域的海洋性气候明显,风大、湿度

高且含盐分,对铁路基础设施的安全可靠、持续稳定运行构成了严峻考验。接触网工程在跨海湾长大桥梁上沿线架设,裸露在外且无备用,时刻承受着强台风、强腐蚀以及大跨度桥梁伸缩、位移等复杂环境及工程条件的考验,服役环境异常恶劣。因此,研究跨

收稿日期: 2024-02-25

作者简介: 苏光德(1973-),男,高级工程师。

引文格式: 苏光德. 跨海湾高速铁路接触网工程关键技术与应用[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(2): 56-60.

SU Guangde. Key Technologies and Applications of Overhead Contact System for Cross-bay High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(2): 56-60.

海湾高速铁路恶劣环境下接触网的服役技术,提出针对性的技术方案及有效措施,在接触网防灾减灾、安全服役保障方面意义重大。

本文依托我国东南沿海地区跨海湾区段的高速铁路,通过深入分析跨海湾区域的环境条件,基于接触网服役特性,研究强台风环境下的接触网防风技术,高温、高湿、高盐强腐蚀环境下的接触网防腐技术,以及接触网与大跨度桥梁的适配技术,提出针对性的技术方案及优化措施,解决跨海湾高速铁路接触网工程面临的系列困难,全方位地保障高速铁路接触网在海洋强风、强腐蚀环境下的持续可靠运行。

## 1 接触网面临的困难与挑战

海湾地区的环境特征由其独有的地理位置和气候条件所决定,海湾地区特别是跨海湾大桥上接触网系统及装备将面临强台风、高湿度、强腐蚀以及大跨度桥梁等复杂而恶劣的环境和工程条件。

风力作为显著的自然现象,强烈的海陆风和偶尔的台风活动,会对接触网工程的结构安全、稳定服役产生极大的挑战。恶劣的气候环境条件对接触网结构的稳定性和运行安全构成了潜在的威胁,将引起接触网支柱、线索和装备等的结构荷载增加,造成接触网的损坏、失效,甚至发生倒塌。因此,接触网工程须采取防强台风技术方案及措施,以减少风力的危害及影响。

海湾地区的高湿度环境,加上盐分含量高的海雾,会引起金属构件的盐雾腐蚀。盐雾中的盐粒将在接触网结构及装备等金属表面形成腐蚀层,加速接触网金属材料的腐蚀进程,从而影响构件的机械强度和电气性能,降低使用寿命,长期运行易导致接触网装备被腐蚀至变形、破坏。对此,接触网的材料选择和构件表面处理极其重要,应具有较高的抗腐蚀性能,同时还应制定清洗和维护计划以降低盐雾造成的侵蚀。

大跨度桥梁用于跨越宽阔的水域,在海湾地区的应用较普遍。桥梁在温度变化下会产生热膨胀和收缩,从而导致结构的顺线路伸缩;列车通过时,对桥梁的负载还将引起结构的竖向位移。如果接触网系统没有足够的适应性,桥梁的伸缩及位移将会引起其线索长度、张力的变化,从而影响接触网弓网受流的可靠性以及悬挂系统的安全性。因此,接触网系统需要充分考虑大跨度桥梁的伸缩与位移以及自身悬挂参数的变化,采取合理的平面布置及适应性强的装备,以保障接触网的结构安全性和弓网受流的可靠性。

综上所述,跨海湾高速铁路接触网工程面临着强台风,高温、高湿、高盐和大跨度桥梁伸缩、位移等环境及工程特征,对接触网工程的安全性、稳定性及耐久性提出了更严苛的挑战。只有在充分分析环境条件特征和接触网服役特性的基础上,针对性地开展接触网防风、防腐以及与长大桥梁的适配性研究,通过采用科学的结构设计、平面布置、材料及装备选型以及采取相应合理的维护策略,才能确保接触网工程在跨海湾这一多变、恶劣的环境中长期安全可靠、持续稳定地运行。

## 2 接触网防风技术

海湾地区常出现强风、台风或季节性大风恶劣气候,部分地区如我国东南沿海的极端结构设计风速高达 75 m/s,远超过内陆和其他非海洋环境的设计标准。恶劣的强风环境将对接触网支柱、线索及零部件产生较大的风荷载,引起接触导线和悬挂装置产生大幅摆动或发送自激振动,从而造成设备的损害或失效。因此,必须针对接触网服役特性研究结构及装备的防风技术,采取针对性的防风减振措施,以减少强风力对接触网结构强度及振动的影响。结合跨海湾高速铁路强风和接触网悬挂、安装特点,可从结构设计、设备选型、安装方式等方面着手,提升接触网结构及装备在强风环境下的安全性和稳定性。

接触网支柱方面,为减少强风对支柱的风荷载影响,应采用截面积小、流线型的支柱,如环形等径支柱或轻小型 H 型钢柱,从结构形式的设计上提升抗风作用。

接触网腕臂结构方面,一是采用更高强度等级的钢材或铝合金材质,提升材料强度;二是在满足弓网受流性能的前提下,优化接触悬挂的结构高度、缩小跨距等方式,降低强风荷载的影响;三是接触网装备应采用避免“钩环”连接方式,减少连接件,降低零部件在强风长期作用下的磨损、松脱,提高接触网零部件运行的稳定性,如图 1 所示。

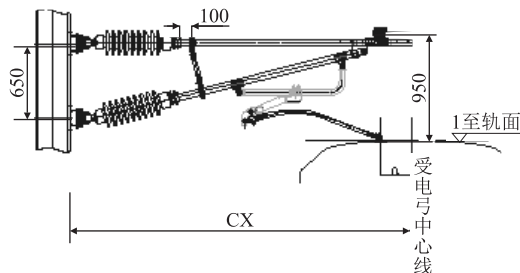


图 1 避免“钩环”连接装置示意图(mm)

接触网下锚补偿方面,一是应采用具有断线功能

的棘轮补偿装置,提升装置可靠性、缩小事故后果;同时,应充分考虑坠砣限制架在强风作用下的安全性和可靠性,采用双根限制导管结构方式,如图 2 所示。这种结构使坠砣限制架与支柱成为整体,大幅增加坠砣限制架在强风环境中的稳定性;此外,可采用双向尼龙轮方式,确保下锚装置的补偿效率和可靠性。



图 2 接触网防风型坠砣限制架示意图

电连接装置在强风作用下,随着接触网线索的大幅摆动,长期运行后易发生线夹松脱、线索断丝、断股。电连接装置一方面可通过提高电连接线材的抗疲劳性能,另一方面可通过电连接与吊弦的整体绑扎的方式,全面提升其抗风稳定性。

附加导线由于未设置补偿,且线索数量较多,其运行的稳定性和可靠性受到严峻考验。为减少附加导线的可能故障,可结合桥梁的防雷功效,综合避雷线、PW 线或回流线、架空地线等功能,从源头上减少避雷线等线索的设置;充分利用桥梁附属设施或电缆沟槽,采用电缆敷设的方式代替架空导线,避免强台风的直接影响;在附加导线的悬挂方面,在悬挂点处绝缘子采用“V”型悬挂,如图 3 所示,在线索固定处优化悬吊或支撑的固定方式,减小线索在强风作用下的摆动,提升附加导线及金具的抗风性能。



图 3 接触网正馈线“V”型悬挂安装示意图

接触网隔离开关一般设置在接触网支柱顶部,其设备本体以及与接触网连接的引线收到强台风的影响更大,容易发生设备固定松脱、引线断裂等事故。对此,可以通过降低隔离开关的安装高度,其连接引

线采用“V”形棒式绝缘子固定,以增加接触网隔离开关本体及连接引线的整体抗风稳定性,如图 4 所示。

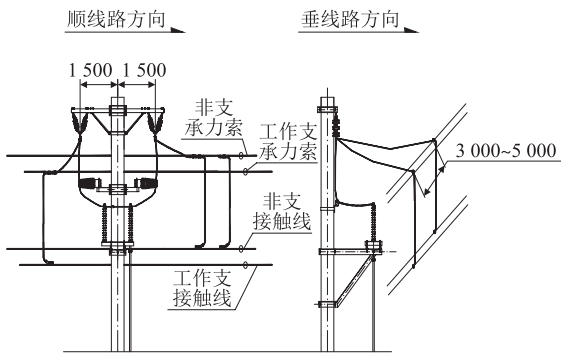


图 4 接触网隔离开关安装固定优化示意图(mm)

3 接触网防腐技术

跨海湾区段气候复杂多变,以我国东南沿海为例,多为典型的亚热带海洋性季风气候并属酸雨多发带;年平均相对湿度>70%,属于湿热海洋大气环境,空气湿度、温差较大,长期受海水飞溅,盐密度高;空气中富含大量的Cl<sup>-</sup>离子,以及SO<sub>2</sub>、HF和NO<sub>x</sub>等酸性气体污染物。根据GB/T 19292.1-2018《金属和合金的腐蚀大气腐蚀性第1部分:分类、测定和评估》<sup>[1]</sup>中列举的影响大气腐蚀的关键因素,并结合我国电气化铁路不同区域、不同环境条件下的运行经验,跨海湾高速铁路接触网结构及装备极易发生金属腐蚀,诱发腐蚀的主要环境因素有湿度、温度、盐雾。在高湿度环境下,湿气中的水分作为电解质,促进了金属表面的电化学反应,形成氢氧化铁等腐蚀产物,这些产物易在金属表面形成层状结构,但并不稳固,容易脱落,导致保护层的缺失,使得腐蚀进一步加剧。温度及湿度的升高使金属表面的水蒸气凝结更为频繁,提高了水膜中腐蚀性气体和盐类的溶解度,降低了水膜的电阻,从而增大了金属腐蚀的速率。盐雾中的氯离子(Cl<sup>-</sup>)具有强穿透性,能够穿透金属表面的氧化物层和腐蚀产物层,直接与金属基体反应;Cl<sup>-</sup>在金属表面形成的局部电池促进了点蚀或缝隙腐蚀的发生,这种腐蚀形式对结构完整性的破坏尤为严重。接触网工程的支柱、线索及装备多采用金属材质,在跨海湾高速铁路长期运行中,极易发生腐蚀。接触网结构及装备须采用针对性的防腐技术,充分考虑海洋大气环境中温度、湿度和氯离子的腐蚀效应<sup>[2]</sup>。接触网主要的防腐技术及措施包括以下几个方面。

(1)耐腐蚀材料的应用。优先选择耐腐蚀性能好的材料,例如316L低碳不锈钢、耐候钢或经过特殊防

腐处理的钢材质,从材料源头提升接触网构件在强腐蚀环境下的抗腐蚀能力<sup>[3]</sup>。

(2) 构件表面防腐的处理。一是通过对金属表面进行涂层处理,如采取加厚镀锌、锌或铝的热喷涂等防腐工艺,形成保护层隔绝湿气和盐分,减缓金属腐蚀过程;二是构件表面外形采用防腐设计,例如避免易积水和死角的结构,确保良好的排水系统或封堵措施,以减少湿气和盐分滞留。同时,还可结合构件金属材质的特性采用阴极保护技术,如钢制零部件采用镀锌渗层、铝合金零部件采用阳极氧化或微弧氧化、铜合金零部件采用铬合致钝等表面防腐措施。

(3) 装备防腐的运营维护。考虑到海湾区域强腐蚀环境以及接触网长期服役的需求,接触网装备采取的防腐技术必须到位,若不重视装备后期防腐方面的运营维护,容易导致设备故障或失效。因此,须结合构件的防腐技术制定接触网装备的维护、保养计划,开展周期性检查,及时处理腐蚀状况,包括清洁、重新涂层和更换受损部件。同时,随着智能化技术的发展,可采取可靠的智能监测技术来实时监控接触网装备的腐蚀状态,包括湿度、温度、氯离子浓度等参数,以实现监控、预警、诊断,为维护、保养及处理提供支撑。

## 4 接触网与大跨度桥梁的适配性技术

海湾区域水面宽阔,电气化铁路一般采用大跨度桥梁跨越,接触网沿桥梁跨海架设。大跨度桥梁多采用钢梁形式,在温度变化下会产生热膨胀和收缩,导致结构的伸缩;同时,在列车通过时,列车负荷将导致桥梁跨中发生竖向位移。接触网平面布置若未充分考虑与桥梁伸缩、位移的配合,与大跨度桥梁的适配不当,将会导致接触网锚段关节内腕臂冲突、张力补偿装置卡滞或失效、电连接线抽脱等设备故障,严重时可能引起接触网或附加导线的断线、塌网等严重事故,危及行车安全。因此,跨海湾高速铁路的大跨度桥梁上接触网与桥梁的适配极其重要,可从接触网平面布置、附加导线安装等方面,结合梁体的伸缩、位移优化线索张力、补偿及其锚段长度的设置,完善接触网与长大桥梁的适配性技术,提高接触网服役的功能可靠性和运行安全性。

### 4.1 接触网平面布置

大跨度桥梁钢梁温度补偿装置的设置方案,主要有中间固定、两侧伸缩方式,以及单侧固定、单向伸缩方式。接触网的锚段关节、锚段长度的设置须结合大跨度钢梁的长度、补偿范围、伸缩方式等<sup>[4]</sup>,科学合理

地进行布置,主要适配性原则如下:

#### (1) 钢梁采用中间固定、两侧伸缩方式

当钢梁足够长,可设置一个接触网锚段时,应优先考虑将该整锚段接触网布置在钢梁上;靠近混凝土梁的伸缩缝处的两侧锚段长度应尽量短,钢梁侧锚段关节布置靠近伸缩缝处,中心锚结设置在靠近伸缩缝的混凝土梁上。当钢梁较长但设置一个完整的接触网锚段较困难时,可将接触网中心锚结布置在钢梁中部即温度伸缩的零值处,两侧的锚段关节布置在靠近伸缩缝的混凝土桥梁上,如图5所示。

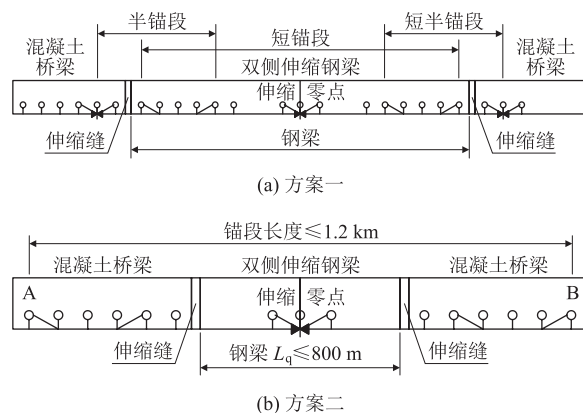


图5 钢梁双侧伸缩且较长时接触网锚段布置方案图

在钢梁长度较短时,可将锚段关节布置在钢梁温度伸缩零值及桥梁中部,两侧中心锚结应布置在混凝土梁上靠近伸缩缝处,如图6所示。

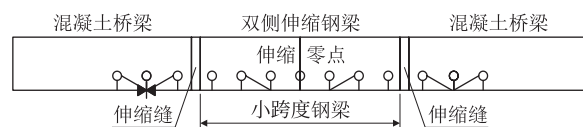


图6 钢梁双侧伸缩且较短时接触网锚段布置方案图

无论钢梁长或短,接触网锚段布置时,须避免跨越钢梁伸缩缝处设置锚段关节、中心锚结等设施。

#### (2) 钢梁采用单侧固定、单侧伸缩方式

对于单侧伸缩的大跨度钢梁,钢梁跨度一般不大于500 m。因此,结合钢梁长度及伸缩、位移特性,接触网锚段关节、中心锚结应尽量避免设置在钢梁上,若无法避免时,可采用以下两种方案:

方案一,接触网中心锚结布置在钢梁温度伸缩零值即钢梁单侧固定处,锚段关节布置在混凝土梁上靠近伸缩缝处,如图7(a)所示。

方案二,接触网锚段关节布置在钢梁温度伸缩零值即钢梁单侧固定处,中心锚结布置在混凝土梁上靠近伸缩缝处,如图7(b)所示。

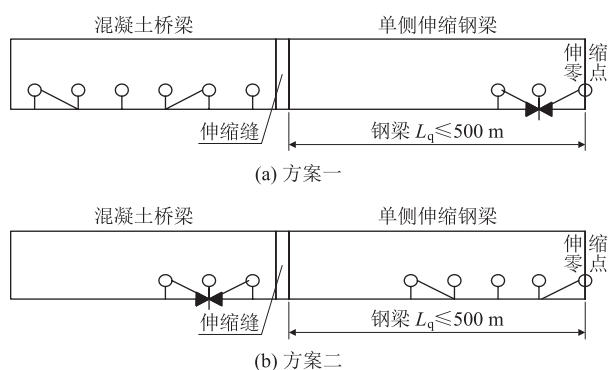


图7 接触网锚段关节布置示意图

上述方案中,接触网锚段长度应尽量缩小,在锚段关节和中心锚结的布置时均应避免跨越钢梁伸缩缝。

#### 4.2 接触网腕臂安装

大跨度钢梁在温度变化及列车负荷时发生伸缩及位移,不仅引起接触网锚段的悬挂参数变化,同时引起接触网支柱产生位移。由于与接触网线索的伸缩变化不一致,将导致其相对中心锚结距离发生改变进而导致接触网腕臂的偏移<sup>[5]</sup>。经核算,大跨度钢梁伸缩位移较大,考虑接触网支柱及线索的不同步位移后,在不利情况下引起的接触网腕臂偏移量可达 $\pm 0.5\text{ m} \sim 1.0\text{ m}$ 。当接触网腕臂偏移过大时,会使接触网拉出值、导高等悬挂参数发生较大变化,高速列车通过时,容易引起定位器、吊弦处产生硬点,燃弧率超标等弓网受流质量恶化问题。双腕臂间距设置不合理时,还会产生腕臂间的结构冲突和绝缘距离不足等系列问题<sup>[6]</sup>。

因此,结合大跨度钢梁的伸缩、位移特性,接触网腕臂安装应重点关注跨梁伸缩缝区段的锚段内腕臂偏移情况。在接触网腕臂偏移为叠加关系时,应优先考虑缩小锚段长度,以有效减小腕臂偏移量;在跨度较大的钢梁伸缩缝两侧锚段关节,可采用双支柱单腕臂安装方式,双支柱间距原则上不宜小于 $2.5\text{ m}$ ;同时,接触网腕臂安装曲线应根据大跨度钢梁区段锚段布置方案进行设计,并充分考虑桥梁伸缩与导线伸缩对腕臂偏移的多因素作用,逐工点、逐线索、逐锚段进行计算,以指导施工和运维<sup>[7]</sup>。

#### 4.3 附加导线布置及安装

附加导线一般采用钢、铝材质的线材,受温度变化的伸缩较大,且工作张力较小。因此,附加导线受海湾区域强风、大跨度桥梁伸缩变化等影响较接触导线更大<sup>[8]</sup>。国内外大跨度钢桁架桥梁伸缩缝区段已发

生过多起附加导线拉脱、拉断的情况,附加导线须充分考虑在大跨度钢梁处的适配性设计,主要的优化设计方案如下:

保护线、回流线应优先采用电缆敷设方式,电缆敷设应充分预留桥梁伸缩引起的长度变化,并加装绝缘套管沿电缆槽敷设,避免桥梁伸缩引起的电缆外皮磨损。

避雷线的设置应结合桥梁结构设施与接触网的高度关系,充分考虑桥梁设施对接触网遮挡、防雷所用,优先考虑取消避雷线的设置;若设置避雷线时,应在钢梁伸缩缝处进行机械断开,避免避雷线跨越钢梁伸缩缝。

AF线应结合技术及经济性,可采用电缆通过或设置类似接触网张力补偿的适配性技术方案。对于跨越钢梁伸缩处带补偿装置的AF线,适配钢梁伸缩缝的处理方案较接触网难度更大,因为AF线一般直接固定安装在支柱上,该种安装方式难以有效消除桥梁伸缩引起导线的长短变化。在采用AF线补偿安装时,应在伸缩缝两端设置AF线的对向下锚,伸缩缝处设置单独一跨的小耐张锚段,该锚段可采用一端无补偿、一端设置弹簧、滑轮、棘轮等补偿装置;同时,其电连接跳线的长度及安装应充分预留桥梁伸缩引起的长度及空气绝缘间隙值等参数变化。

## 5 结束语

海湾区域环境恶劣、工程条件复杂,跨海高速铁路接触网工程面临强台风、强腐蚀及大跨度桥梁适配性等系列技术难题,本文以我国东南沿海跨海湾高速铁路为例,基于海湾区域的环境条件,对接触网工程遇到的关键技术问题进行了研究,分析了强台风引起的结构安全性能减弱,高温、高湿、高盐环境导致的构件耐久性能降低、大跨度桥梁引起接触网状态功能劣化等问题,并结合接触网服役特性,针对性地提出了应对策略及技术方案。该系列接触网防风、防腐及大跨度桥布置等技术方案已在我国东南沿海高速铁路线路中推广应用,通过运营实践论证表明可有效提升跨海湾高速铁路接触网的服役性能,有力保障高速铁路接触网安全可靠、持续稳定的运行。同时,考虑到近年来全球气候更加复杂多变,对于跨海湾高速铁路的接触网系统建设和运维,还应进一步开展并提升以下工作:

第一,做好跨海湾地区影响接触网服役的风速、温度、湿度、污秽以及腐蚀源等环境资料的勘测调查

(下转第81页)

- 技术, 2020, 17(2): 10–15.
- LI Qianshe. Research on Signal Train Control System for Regional Railways [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(2): 10–15.
- [4] 王学贵. 基于都市圈融合发展理念的成都市域快线13号线互联互通方案研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(4): 6–13.
- WANG Xuegui. Research on the Connectivity Scheme of Chengdu City Express Line 13 Based on the Concept of Integrated Urban Development [J]. Railway Standard Design, 2021, 65(4): 6–13.
- [5] TB 10624–2020 市域(郊)铁路设计规范[S].
- TB 10624–2020 Code for Design of Suburban Railways [S].
- [6] TB 10623–2014 城际铁路设计规范[S].
- TB 10623–2014 Code for Design of Intercity Railway [S].
- [7] TB/T 3027–2015 铁路车站计算机联锁技术条件[S].
- TB/T 3027–2015 Railway Station Computer Interlocking Technical Conditions [S].

(上接第60页)

和收集整理,合理确定接触网系统的工程设计及后期运行的边界条件。

第二,加强接触网与桥梁等土建专业的协同设计,将接触网服役需求前置于大跨度悬索桥等特殊桥梁设计中,做到专业间接口融合、功能协调。

第三,积极研发接触网有关防风、防腐及减振等新技术、新装备,采用监测、预警等手段,提升跨海湾特殊地区的接触网防灾减灾、应急恢复的能力。

## 参考文献:

- [1] GB/T 19292.1–2018 金属和合金的腐蚀大气腐蚀性第1部分:分类、测定和评估[S].
- GB/T 19292.1–2018 Corrosion of Metals and Alloys-Corrosivity of Atmosphere-Part 1: Classification, Determination and Estimation[S].
- [2] 马功民. 高速铁路接触网电连接线夹优化方案研究[J]. 电气化铁道, 2019, 30(2): 51–56.
- MA Gongmin. Study on Scheme for Optimizing of Electric Connection Clamps for OCS of High Speed Railway [J]. Electric Railway, 2019, 30(2): 51–56.
- [3] 姚裕春,陈思孝,杨佳. 热带海洋环境高速铁路关键技术研究分析[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(4): 11–16, 37.
- YAO Yuchun, CHEN Sixiao, YANG Jia. Study and Analysis of the Key Technologies of High Speed Railway in Tropical Marine Environment [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(4): 11–16, 37.
- [4] 邓钊. 桥梁伸缩缝宽度计算及其防治措施[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(8): 93–94.
- DENG Zhao. Calculation of Bridge Expansion Joint Width and Its Prevention Measures [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2020, 43(8): 93–94.
- [5] 苏朋飞. 大跨度铁路钢桥梁端伸缩装置设计与研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2021.
- SU Pengfei. Design and Research on the Bridge Expansion Joint of Long-span Railway Steel Bridge [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2021.
- [6] 李军杰. 高速铁路电连接线断裂原因分析及预防措施[J]. 铁路采购与物流, 2020, 15(3): 40–42.
- LI Junjie. Cause Analysis and Preventive Measures of High-speed Railway Electrical Connection Line Fracture [J]. Railway Purchasing and Logistics, 2020, 15(3): 40–42.
- [7] 高秀权,杨策,陈鹏. 铜陵长江大桥接触网施工关键技术分析[J]. 中国铁路, 2016(7): 34–36.
- GAO Xiuquan, YANG Ce, CHEN Peng. Analysis on Key Technologies of Catenary Construction of Tongling Yangtze River Bridge [J]. China Railway, 2016(7): 34–36.
- [8] 杨佳,杨洋,鲁小兵,等. 复杂艰险山区铁路接触网设计技术思考[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(6): 35–38, 61.
- YANG Jia, YANG Yang, LU Xiaobing, et al. Reflections on the Design Techniques for the Railway Overhead Contact System in Challenging Mountain Areas [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6): 35–38, 61.