

文章编号: 1674—8247(2023)01—0043—05

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2023.01.008

# 电气化铁路隧道内接触网电缆挂架优化及安装形式研究

冉惟可

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:** 电气化铁路隧道内电缆的安装结构及敷设形式直接影响供电设施的可靠性, 是确保列车牵引供电安全的关键。为保障隧道内 27.5 kV 电缆的长期稳定运行, 本文在分析传统电缆挂架和安装形式的基础上, 提出了基于复合材料的新型电缆挂架, 从结构形式、力学性能、施工效率、工程经济性等方面探讨了新型电缆挂架的特点, 分析了隧道内电缆安装的不同形式的优缺点和适用范围。研究成果可为电气化铁路隧道内电缆挂架选用及安装形式设计提供借鉴。

**关键词:** 牵引供电; 接触网; 电缆挂架; 隧道; 电气化铁路

**中图分类号:** U225.4      **文献标识码:** A

## A Study on Optimization and Installation Form of Cable Hanger of Overhead Contact System in Electrified Railway Tunnels

RAN Weike

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The installation structure and laying form of cables in electrified railway tunnels directly affect the reliability of power supply facilities and are the key to ensuring the safety of train traction power supply. In order to ensure the long-term stable operation of 27.5 kV cable in the tunnel, this paper put forward a new type of cable hanger based on composite materials on the basis of analyzing the traditional cable hanger and installation form, discussed its characteristics from the aspects of structural form, mechanical properties, construction efficiency, and engineering economy, and analyzed the advantages and disadvantages and application scope of different forms of cable installation in the tunnel. The results can provide a reference for the selection and installation form design of cable hangers in electrified railway tunnels.

**Key words:** traction power supply; overhead contact system; cable hanger; tunnel; electrified railway

随着我国铁路网主干线的形成, 电气化铁路建设逐渐向西南、西北等复杂艰险山区迈进。复杂艰险山区铁路线路的隧道占比极高, 以我国西南地区代表性线路为例, 成贵、贵广和贵昆铁路桥隧占比分别为 81%、87% 和 80%。极大的隧道占比意味着隧道内电缆敷设的增多。然而, 复杂艰险山区地形复杂、人迹

罕至、抢修维护困难, 电缆是为电力机车或高铁列车提供能源的唯一通道。因此, 复杂艰险山区隧道内电缆的可靠性研究是牵引供电系统的重要课题之一。

材料应用方面, 相关文献介绍了复合材料制品在牵引供电系统中的应用方案, 为电缆材料选型提供了借鉴<sup>[1]</sup>; 学者对单相交流交联聚乙烯绝缘电缆进行了

收稿日期: 2022-06-23

作者简介: 冉惟可(1978-), 男, 高级工程师。

基金项目: 中铁二院工程集团有限责任公司科技发展计划项目(KDNQ212002)

引文格式: 冉惟可. 电气化铁路隧道内接触网电缆挂架优化及安装形式研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(1): 43-47.

RAN Weike. A Study on Optimization and Installation Form of Cable Hanger of Overhead Contact System in Electrified Railway Tunnels[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(1): 43-47.

改进<sup>[2]</sup>。智能检测方面,主要针对电缆数字化运维与智能监测关键技术<sup>[3]</sup>,全电流在线监测方案及其基本原理、监测方法和影响因素<sup>[4]</sup>、电缆测温系统及感应电压<sup>[5-6]</sup>、基于分布式光纤的智能电缆<sup>[7]</sup>等进行了研究。故障分析方面主要有分布式行波测距方法<sup>[8]</sup>、故障测距及典型案例分析<sup>[9]</sup>和绝缘状态检测方法<sup>[10]</sup>。另外,也有学者分析了高速铁路全电缆电力贯通线的电容电流及其容性无功补偿<sup>[11]</sup>;针对高桥、深路堑及隧道结构的不同特点,从设计方案合理性、施工难易程度及运营安全性方面,研究了山区高速铁路 27.5 kV 高压电缆典型安装方式<sup>[12]</sup>。

以上文献主要集中于电缆的检测监测、状态评估和故障测距等方面,而对于电缆本身的安装结构和安装方式等研究较少。本文在分析隧道内既有电缆挂架和安装形式的基础上,提出基于复合材料的新型电缆挂架,从结构形式、力学性能、施工效率、工程经济性等方面探讨新型电缆挂架的特点,分析隧道内电缆安装的不同形式的优缺点及适用范围,以期对电气化铁路 27.5 kV 电缆可靠性提升提供思路。

## 1 隧道内 27.5 kV 传统电缆挂架

电气化铁路 27.5 kV 电缆广泛应用于牵引供电系统各关键场景,如供电上网处、分相处。特别在沿线隧道较多且较长时,隧道内电缆使用不可避免。由于隧道内检修维护较为不便,电缆的安装固定及与之相关的安全可靠性就极为重要。

### 1.1 传统电缆挂架的结构形式

当前电气化铁路隧道内 27.5 kV 电缆挂架如图 1 所示。

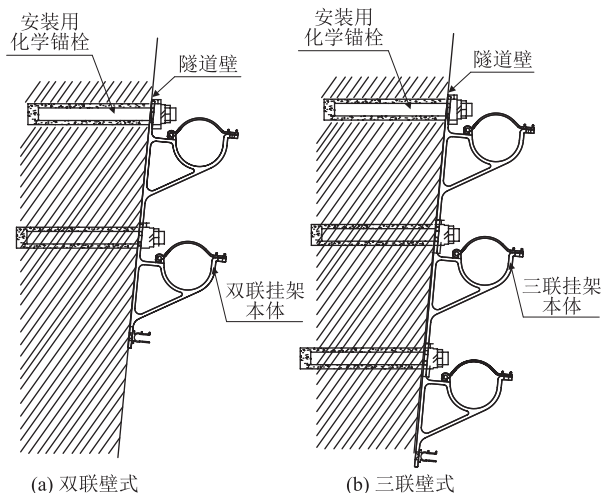


图1 传统电缆挂架示意图

### 1.2 传统电缆挂架的特点

传统电缆挂架有以下特点:

(1) 采用金属角铁或铝合金材质,金属挂架容易形成磁场闭合回路,产生磁力环流,增加电缆电流与支架涡流之间铁损。

(2) 金属材质电缆挂架在隧道中容易出现锈蚀,降低电缆挂架的使用寿命,降低牵引供电的可靠性。

(3) 金属挂架生产过程能耗大、污染大,不符合国家节能减排政策和要求。

(4) 安装过程中,电缆移动调整范围小,挂架自重较大,安装困难,工程量增加。

### 1.3 传统电缆挂架优化分析

基于以上原因,提出了采用复合材料的新型电缆挂架,新型挂架一方面可避免金属材料带来的锈蚀、能耗等问题,提高电缆挂架的可靠性和耐久性,降低运营维护工作量;另一方面,新型结构可以提高安装精度,降低施工安装难度和调整工作量。新型挂架对我国西南、西北地区电气化铁路超长隧道内电缆安装具有重要意义。

## 2 隧道内 27.5 kV 电缆挂架优化技术

### 2.1 新型电缆挂架材质创新

新型电缆挂架采用 SMC (Sheet Molding Compound) 复合材料,即片状模塑料。SMC 复合材料主要由 GF (专用纱)、MD (填料) 及各种助剂组成。我国于 80 年代末引进了国外先进的 SMC 生产线和生产工艺。

SMC 复合材料独特的性能解决了木制、钢制、塑料制品易老化、易腐蚀、绝缘差、耐寒性差、阻燃性差、寿命短的缺点。SMC 复合材料及其模压制品具有优异的电绝缘性能、机械性能、热稳定性、耐化学腐蚀性。SMC 制品的应用范围相当广泛,主要包括:电气工业、汽车工业、铁路车辆、通讯工程和防爆电器设备外壳等。

作为电气化铁路隧道内电缆挂架的制造材料,SMC 材料的显著优势包括:

(1) 耐腐蚀性能。SMC 材料具有很好的耐酸、稀碱、盐、有机溶剂、海水等腐蚀的特性。电气化铁路穿越不同地区,隧道内环境条件完全不同,对材料的耐腐蚀性能要求极高。

(2) 阻燃、无烟、无毒。SMC 材料为阻燃材料,阻燃性为非金属材料的最高级 FV0,在高温下发烟量级别为 15 级(1-100 级),烟气无毒。

(3) 轻质高强。SMC 材料的比模量与钢材相当,但其比强度可达到钢材的 4 倍。电气化铁路隧道

内位置狭窄,电缆安装较为困难,且承受电缆的较大重量,轻质高强是电缆挂架选择中考量的重要因素之一。

(4) 绝缘性能。SMC 材料绝缘电阻(浸水 24 h)为  $1.0 \times 10^4 \text{ M}\Omega$ 、耐电弧 180 s、耐漏电起痕指数  $\geq 600 \text{ v}$ 、绝缘防护和抗爬电指标符合 DIN/VDE 相关标准。SMC 材料不仅具有极佳的电绝缘性,而且在高频下亦能保持良好的介电性能,不受电磁作用,不反射电磁波。

(5) 抗疲劳性能。钢材及大多数金属材料的抗疲劳极限是其拉伸强度的 40% ~ 50%,而纤维增强的复合材料的抗疲劳极限普遍高于这一数值,最高的可达到 70% ~ 80%。

(6) 缺口敏感性。当构件超载并有少量纤维断裂时,载荷迅速分配在未破坏的纤维上重新达到力学平衡。

(7) 热导率低、膨胀系数小。在有温差时所产生的热导率低,是隔热应用的良好材料,热膨胀系数比金属小的多。

(8) 抗老化性能。在非金属材料中,纤维增强聚酯材料有着优秀的抗老化性能。抗老化性能测试表明,使用地点不同,所处气候带不同,表面最大老化厚度为 20 年小于  $50 \mu\text{m}$ 。

## 2.2 新型电缆挂架结构形式创新

为适应不同隧道形式,设计了两种不同结构的电缆挂架,如图 2 所示,固定式电缆挂架和可调式电缆挂架都有二联形式和三联形式。

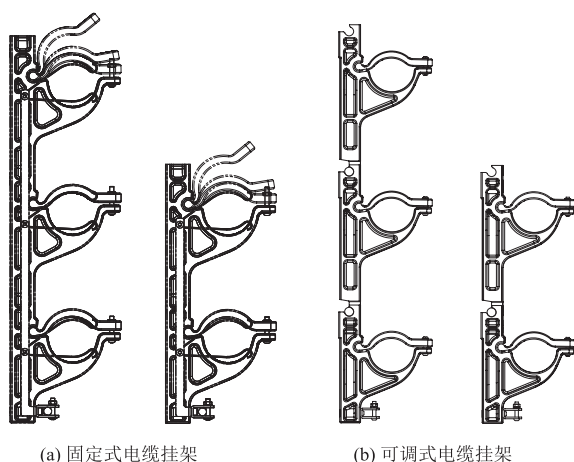


图 2 新型电缆挂架结构形式图

### (1) 固定式电缆挂架

现有电缆挂架由于结构所限,所需安装工序相对较多,增加了操作者劳动强度,且安装后电缆容易窜动。基于以上弊端,提出了一种新型电缆挂架形式。

新型电缆挂架包括竖固定板、半圆形支撑座、活动夹、接地金属板、接地卡子和接地机构。竖固定板的后侧端由上至下具有多个安装孔,多只半圆形支撑座分别间隔一定距离由上至下位于竖固定板的前端。半圆形支撑座的上端内侧具有齿状凸起,每只半圆形支撑座的前侧端由上至下具有固定螺孔,竖固定板的前部由上至下间隔一定距离具有多个柱形套,柱形套的前端横向具有开口,活动夹的下端内侧具有齿状凸起,活动夹的前侧端由上至下具有一个开孔。每只活动夹后侧端柱形部位由左至右套在竖固定板前部一个柱形套内,接地金属板和多只接地卡子安装在竖固定板左侧端,每只接地卡子前端位于每只半圆形支撑座的左侧端,接地机构安装在接地金属板的下部前侧端,接地机构上安装有一根和大地相通的接地线。

新型固定式电缆挂架的活动夹的特殊结构设计,使得电缆安装时极为方便快捷,大大减少了施工难度和调整工作量。需要指出的是,由于竖固定板形式固定,各组半圆形支撑座纵向竖直排列,新型固定式电缆挂架在电气化铁路和城市轨道交通的 U 型槽结构中具有广泛的应用前景。固定式二联电缆挂架结构形式如图 3 所示。

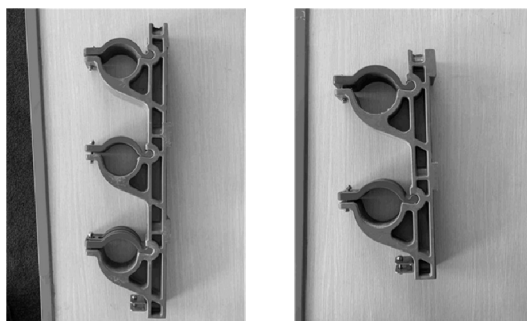


图 3 固定式电缆挂架图

### (2) 可调式电缆挂架

固定式电缆挂架应用于隧道壁为垂直的场景下时安装调整方便,但无法根据隧道壁的形状调整挂架角度,为解决这一问题,提出了可调节式电缆挂架。

可调式电缆挂架包括若干相互独立的固定座,固定座设置有半圆形支撑座,一端开有卡接槽,卡接槽处对应的固定座上具有向下的开口。固定座另一端设有卡接件,卡接件包括设置在固定座另一端的连接部,朝外的一侧设有呈柱形的卡接部,卡接部可经开口刚好卡入卡接槽,卡接部卡入卡接槽内后,可在卡接槽内转动,其圆周角大于  $180^\circ$ 。

安装前,先将各个固定座组装在一起,以相邻两个固定座(A 和 B)之间的安装为例,固定座 B 的卡接



部对着固定座 A 的开口,此时固定座 B 的连接部在卡接部的下部,固定座 B 的卡接部经开口卡入固定座 A 的卡接槽内,将固定座 B 向上翻转,固定座 B 的连接部远离开口所在位置后,卡接部不会从卡接槽内掉出,根据隧道内壁形状的变化,转动各个固定座,使固定座贴合在隧道壁上,从上到下依次将固定座一安装在隧道壁上。可调式电缆挂架可根据隧道壁形状调整固定座位置,调整方便,适应性强,适用范围更广,如图 4 所示。

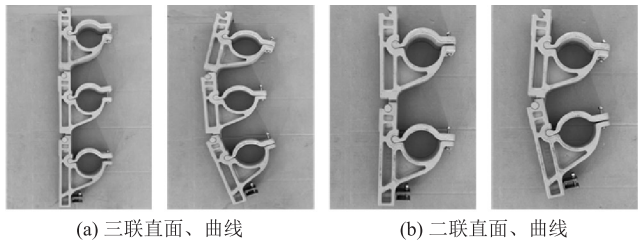


图 4 可调式电缆挂架图

为进一步提高卡接件在卡接槽内转动的可靠性,固定座上设置有限位槽,卡接部在卡接槽内转动时,连接部在限位槽内。卡接部卡入卡接槽内后,将固定座向上翻转,连接部被限制在限位槽内,卡接部不会从卡接槽内掉出。

2.3 新型电缆挂架的力学性能分析

为分析新型电缆挂架的力学性能,确保其受力性能和结构可靠性,根据 GB/T 34182 - 2017《复合材料电缆支架》对其进行力学分析。采用 ANSYS 有限元软件,建立新型电缆挂架的三维模型。材料参数如表 1 所示。

表 1 新型电缆挂架材料参数表				
密度/ (g/cm <sup>2</sup> )	拉伸强度/ MPa	弯曲强度/ MPa	弯曲模量/ MPa	泊松比
1.9	90	170	10 000	0.23

数值模型分析以下两种工况电缆支架的应力和应变情况:

- (1) 电缆支架载荷要求 2 级,垂直载荷 2 kN。
- (2) 电缆支架横向载荷 1 kN。

数值模型分析结果如图 5 所示,两种工况下电缆支架最大应力为 21. 338 MPa,最大的变形为 0. 387 77 mm,

2.4 隧道内电缆安装方式

隧道内电缆安装有两种基本形式:一种是高位安装方式,另外一种低位安装方式,如图 6 所示。

高位安装方式一般距离轨面 5.3 m 以上,此种安装方式不受隧道内扩挖洞室影响,可以平顺架设,但由于距离轨面较高,检修维护不便。低位安装方式位

置较低,易于检修维护,但其若用于有扩挖洞室的隧道,需沿洞室轮廓过渡,增加了施工难度。此外,电缆转弯容易造成损伤,特别在扩挖洞室较多的复杂艰险

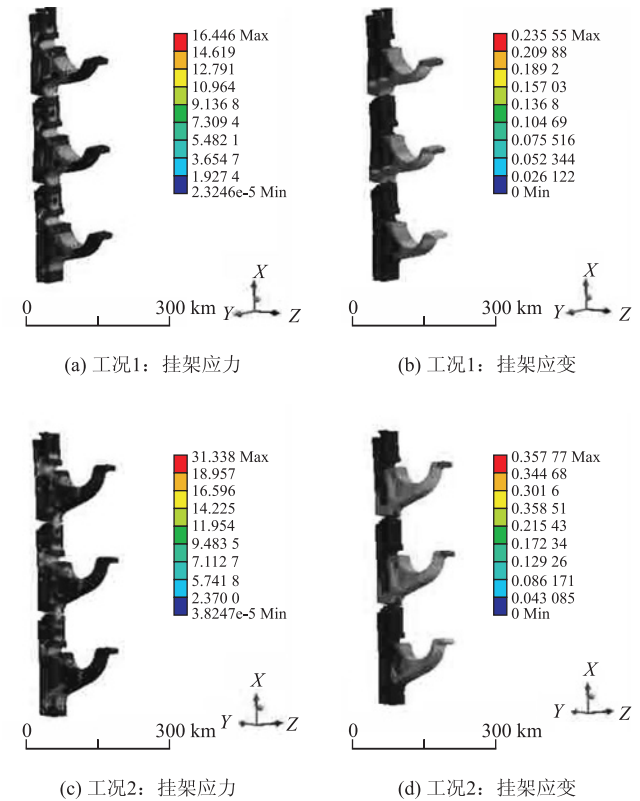


图 5 新型电缆挂架力学性能分析图

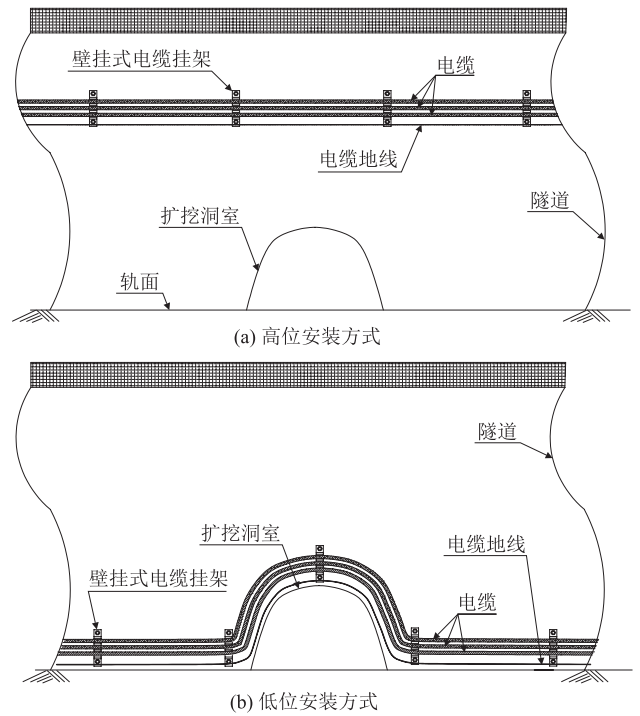


图 6 隧道内电缆安装方式图

山区单线隧道内,大大增加了工程量和电缆损伤风险。综上所述,隧道内电缆安装方式的选择,需综合隧道情况、检修维护需求、施工及其他专业的电缆位置等统筹综合考虑。

### 3 结束语

本文在分析传统电缆挂架的基础上,提出了基于复合材料的新型固定式电缆挂架和可调式电缆挂架,探讨了新型电缆挂架的特点;采用 ANSYS 有限元软件分析了电缆挂架的力学性能,电缆支架的最大应力为 21.338 MPa,最大变形仅为 0.387 77 mm,满足要求;新型电缆挂架可广泛应用于电气化铁路隧道内电缆安装,具有较强的安全性、可靠性和工程经济性。

### 参考文献:

- [1] 王志强,贺毅,尹磊,等. 复合材料制品在铁路牵引供电系统中的应用[J]. 电气时代, 2021(11): 48-49.  
WANG Zhiqiang, HE Yi, YIN Lei, et al. Application of Composite Products in Railway Traction Power Supply System [J]. Electric Age, 2021(11): 48-49.
- [2] 肖云涛,高江涛. 电气化铁路 27.5 kV 单相交流交联聚乙烯绝缘电缆的改进[J]. 电线电缆, 2020(2): 17-19.  
XIAO Yuntao, GAO Jiangtao. Structural Improvement of 27.5 kV Single Phase AC XLPE Insulated Cable for Electrified Railway [J]. Wire & Cable, 2020(2): 17-19.
- [3] 孟思明,易丹. 高速铁路 27.5kV 电力电缆数字化运维与智能监测系统技术研究[J]. 现代计算机, 2021(21): 86-89, 94.  
MENG Siming, YI Dan. Research on the Technology of Digital Maintenance and Intelligent Monitoring System for 27.5 kV Power Cable of High Speed Railway [J]. Modern Computer, 2021(21): 86-89, 94.
- [4] 许云升. 铁路 27.5kV 高压电缆绝缘在线监测探讨[J]. 电气化铁道, 2021, 32(4): 50-52, 56.  
XU Yunsheng. Discussion on Online Monitoring of Railway 27.5 kV High Voltage Cable Insulation [J]. Electric Railway, 2021, 32(4): 50-52, 56.
- [5] 贺毅,代文平,肖琨. 铁道 27.5kV 电缆接头芯温监测系统方案研究[J]. 电气技术, 2020, 21(2): 114-118.  
HE Yi, DAI Wenping, XIAO Kun. Research on the System Scheme for Core Temperature Monitoring of Cable Joints which Used in Electric Railway [J]. Electrical Engineering, 2020, 21(2): 114-118.
- [6] 缪晓宇,胡豪,杨佳,等. 三相电缆护层的感应电压影响因素分析[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(6): 41-44, 86.  
MIAO Xiaoyu, HU Hao, YANG Jia, et al. Analysis on Influencing Factors of Induced Voltage of Three-Phase Cable Sheath [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 41-44, 86.
- [7] 崔艳龙,邓洪,郭琦沛. 基于分布式光纤的电气化铁路 27.5 kV 智能电缆研究[J]. 电气化铁道, 2020, 31(4): 6-9.  
CUI Yanlong, DENG Hong, GUO Qipei. Research on Distributed Optical Fiber Based 27.5 kV Intelligent Cables for Electrified Railway [J]. Electric Railway, 2020, 31(4): 6-9.
- [8] 靳忠福. 高速铁路全电缆贯通线精确故障定位关键技术分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(3): 596-604.  
JIN Zhongfu. Analysis of Key Techniques for Accurate Fault Location of High-Speed Railway Full Cable through Line [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(3): 596-604.
- [9] 陶宇航,张熹,宫祥龙. 10kV 电缆故障测距及定位典型案例分析[J]. 电气技术, 2022, 23(2): 88-93.  
TAO Yuhang, ZHANG Xi, GONG Xianglong. Typical Cases Analysis of 10 kV Cable Fault Location [J]. Electrical Engineering, 2022, 23(2): 88-93.
- [10] 沈建辉,邵岩,谭磊,等. 电气化铁路 27.5 kV 供电电缆绝缘状态检测现状及发展综述[J]. 电气化铁道, 2021, 32(S1): 114-117.  
SHEN Jianhui, SHAO Yan, TAN Lei, et al. Review on the Current Situation and Development of Insulation State Detection of 27.5 kV Power Supply Cable in Electrified Railway [J]. Electric Railway, 2021, 32(S1): 114-117.
- [11] 张凉永. 高速铁路全电缆电力贯通线的电容电流及其容性无功补偿分析[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(1): 27-31, 37.  
ZHANG Liangyong. Analysis of Capacitive Current and Capacitive Reactive Compensation in the Medium-Voltage of All-Cable through Line on High-Speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(1): 27-31, 37.
- [12] 谷元平. 山区高铁 27.5kV 高压电缆安装方式研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2018(4): 80-84.  
GU Yuanping. Installation Schemes Research of 27.5 kV HV Cable for High-Speed Railway in Mountainous Area [J]. Automation & Instrumentation, 2018(4): 80-84.