

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.03.005

引用格式: 谢德心, 王川, 李嘉奇, 等. 架空输电线路导线的应用现状及发展趋势[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(3): 50-65.



# 架空输电线路导线的应用现状及发展趋势

谢德心<sup>1</sup>, 王川<sup>2</sup>, 李嘉奇<sup>3</sup>, 谢世安<sup>1</sup>, 何高辉<sup>4</sup>

(1. 国网重庆市电力公司经济技术研究院, 重庆 401121; 2. 国网重庆市电力公司, 重庆 400015; 3. 重庆广汇供电服务有限责任公司, 重庆 400014; 4. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715)

**摘要:** 架空输电线路是电力系统中典型的电能传输途径和载体, 对“西电东送”和“双碳”国家战略的落地起到关键支撑作用。导线作为架空输电线路中的重要组成部分, 其性能优劣直接决定了架空输电线路电力传输能力的强弱。为满足电能高质量输送和野外复杂环境的需要, 架空导线线路导线在材料组成和结构设计方面进行了不断的革新和优化。针对国内外架空输电线路导线的类型、运行参数及应用情况等进行了总结, 对不同类型导线的技术短板与瓶颈问题进行了分析。进一步针对架空导线的国内外标准进行了归纳和对比, 并参照国内输电线路工程实际分析了不同类型架空输电线路导线的使用情况, 最后, 针对目前架空输电线路导线的使用现状和瓶颈问题进行了总结, 并提出架空输电线路导线未来的技术发展方向及趋势。

**关键词:** 架空导线; 导线材料; 钢芯铝绞线; 新型导线; 经济性分析

中图分类号: TM726.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)03-050-16

## The application status and development trends of overhead transmission line conductors

XIE Dexin<sup>1</sup>, WANG Chuan<sup>2</sup>, LI Jiaqi<sup>3</sup>, XIE Shian<sup>1</sup>, HE Gaohui<sup>4</sup>

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401121, P. R. China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400015, P. R. China;  
3. Chongqing Guanghui Power Supply Service Company Limited, Chongqing 400014, P. R. China;  
4. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, P. R. China)

**Abstract:** Overhead transmission lines are a fundamental means of electric energy transmission within power systems, playing a crucial role in supporting national strategies of “West-to-East Power Transmission” and the “Dual Carbon” initiative. As a key component of overhead transmission lines, conductor performance directly influences power transmission capacity. To meet the growing demand for high-quality energy delivery and to adapt to complex outdoor environments, ongoing innovations and optimizations in the material composition and structural design of overhead transmission line conductors have been pursued. This paper provides a comprehensive review of the types, operational parameters, and applications of overhead transmission line

收稿日期: 2024-11-10

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(52209624000G)。

Supported by Science and Technology Projects of State Grid Corporation of China(52209624000G).

作者简介: 谢德心(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事架空导线经济性分析方向研究,(E-mail)xdxsjy@cq.sgcc.com.cn。

通信作者: 何高辉, 男, 讲师, 主要从事架空输电线路相关研究,(E-mail)hegaohui@swu.edu.cn。

conductors both domestically and internationally. It analyzes the technical shortcomings and challenges associated with various conductor types and presents a comparative analysis of domestic and international standards for overhead conductors. Additionally, the paper examines the practical application of different conductor types in domestic transmission line projects. Finally, it summarizes the current status and challenges of overhead transmission line conductors and outlines future technological development directions and trends in this field.

**Keywords:** overhead conductor; conductor material; aluminum conductor steel-reinforced; novel conductor; economic analysis

在中国经济增长带动下,电网发展完成了从规模扩张到技术创新、从结构优化到能源转型、从市场化改革到国际化发展的全方位跨越。电力系统的良好运行与发、输、变、配、用这5个环节的稳定密不可分。其中,输电环节承担了连接发电厂与负荷中心的桥梁任务,对保障电力系统安全运行具有重要意义。架空线路是输电环节最常用的输电方式之一,参考《中国电力行业年度发展报告》,截止2022年,我国220 kV及以上输电线回路长度变化趋势如图1所示。部分研究表明,架线投资通常会占到工程总体投资的30%<sup>[1]</sup>,选线方案直接影响输电线路整体投资成本与后期维护费用。此外导线选型会对环境造成多方面影响,不同类型的导线在传输电能过程中会产生不同程度的电磁辐射,且会随着电压等级的提升而显著增加,特别是在特高压输电条件下,其电磁强度更为显著,直接影响周围生物体的生理机能<sup>[2]</sup>。同时选线的改变,会导致配套金具、施工方法等技术层面的变化。综上所述,充分认识不同架空导线结构组成、性质特点与适用范围具有经济、环境、技术方面的综合意义。

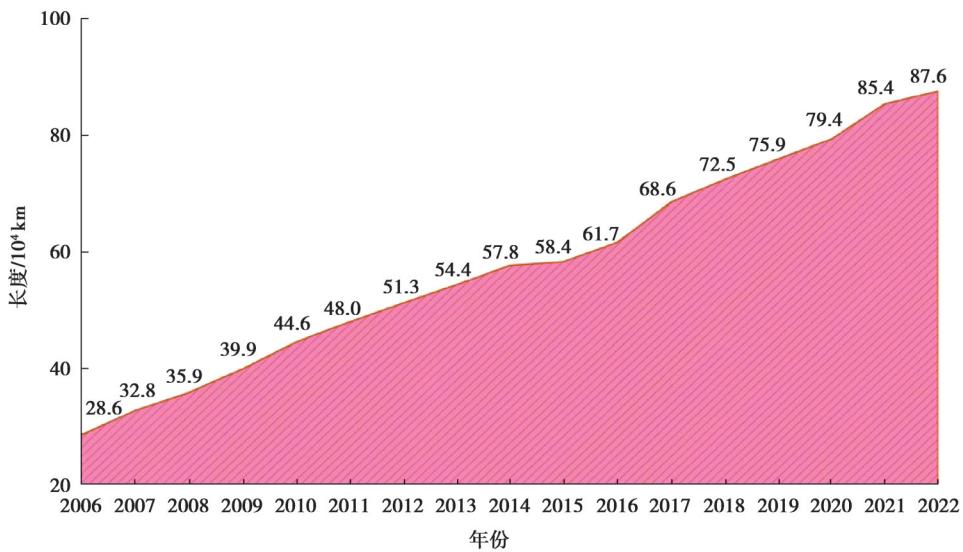


图1 我国220 kV及以上输电线回路长度变化趋势

Fig. 1 The trend of the length of transmission lines of 220 kV and above in China

文中全面归纳了当前广泛应用的架空导线类型,并梳理了架空导线中单线技术的演进历程,对比了经典的钢芯铝绞线(aluminum conductor steel reinforced, ACSR)与现代多种新型导线的特性与关键参数差异,随后对比国内现行的导线标准与国际上的相应规范,展示我国的标准化进展与国际接轨情况;之后以国网重庆市电力公司某分公司为例,展示并分析其架空导线使用情况,最后架空导线发展方向与趋势进行展望并提出研究建议。

## 1 导线单线

工程使用导线往往需要经过绞合,即将2股或多股的导线按照圆周螺旋缠绕在一起,以增大导体面积、

降低涡流损耗、减小断裂可能性<sup>[3-4]</sup>。与绞线相对应的是单线,通常指的是只用一股导体材料(如铜线或铝线)制成的传输线,在绞线之中,构成其每一独立部分的导线均可视为单线,因此了解单线是分析架空导线结构、组成与性质的前提。以下将从材料与截面2个方面对单线发展历程进行介绍。

### 1.1 架空导线材料的历史演变与性能发展

电力工业发展初期,导线的选取原则主要是材料电导率、线路运行能量损耗及材料加工冶炼难度。由表1可知,铜电导率仅次于银,具有较小的能量损耗;铜具有良好的软度与可延展性,可以轻松弯曲和成形,适合安装在各种复杂线路环境<sup>[5]</sup>。因此,在电力工业发展初期,铜导线因其优异的导电性与易加工性,在架空线路的架设中得到了广泛应用。

表1 部分金属导电性能与拉伸强度对比

Table 1 Comparison between electrical conductivity and tensile strength of some metals

金属名称	比重	电导率(%IACS)	比电导率/%	拉伸强度/MPa	比拉伸强度/MPa
金/Au	19.30	71	3.6	127	6.6
银/Ag	10.50	106	10.1	137	13.1
铜/Cu	8.93	98	10.9	333	37.3
铝/Al	2.71	58	21.4	241	88.9

随着架空线路的扩张,铜导线因其价格高昂而难以满足需求。铝逐渐成为替代品,由于电解铝方法的发明,铝的制备效率获得了空前的提高,虽然铜的导电性能略优于铝,但在相同导电截面条件下,铜导线的电导率仅有铝导线一半,因此,从经济性和传输效率对比来看,铝导线具有优良的导电性能,能够满足电力传输的需求<sup>[5]</sup>。后续伴随电力需求的不断增加,超远距离输电工程对传输线的性能要求也在不断提高,传统的铝导线虽然具有良好导电性,但强度较低,难以承受长距离、大跨度的输电需求。1907年,美国铝业公司研发出钢芯铝绞线,钢芯铝绞线的诞生解决了架空导线无法同时保持良好导电性与机械强度的问题。随后钢芯铝绞线逐渐在美国、德国等众多国家开始大量使用,并占据了架空导线的主要市场。钢芯铝绞线常用钢材为镀锌钢,按强度划分为5个等级(1~5级);以标称直径满足 $1.24\text{ mm} < D \leq 2.25\text{ mm}$ 的钢丝为例,其不同等级的物理性能参数对比见表2<sup>[6]</sup>所示。近年来,材料科学与电力科学融合加深,促使多种的铝合金、铝包钢导线随之出现,非金属材料如碳纤维也开始应用于架空导线的制造中<sup>[7]</sup>。可以预见未来架空导线的材料将更加多元化。不同材料将根据其特性被应用于不同的场合下,以满足各种复杂的电力传输需求。

表2 架空导线常用钢材的电导率和抗拉强度对比

Table 2 Comparison of electrical conductivity and tensile strength of common steel materials for overhead conductors

镀锌钢线强度	直径偏差/mm	1%伸长时的应力最小值/MPa	抗拉强度最小值/MPa	伸长率最小值/%	电导率(%IACS)
1级	$\pm 0.03$	1 170	1 340	3.0	9
2级	$\pm 0.03$	1 310	1 450	2.5	9
3级	$\pm 0.03$	1 450	1 620	2.0	9
4级	$\pm 0.03$	1 580	1 870	3.0	9
5级	$\pm 0.03$	1 600	1 960	3.0	9

### 1.2 架空导线截面形状的发展与优化

同心绞架空导线通常采用圆形截面,即圆线同心绞架空导线,具体来说指的是没有绝缘和保护层,单线截面为圆形的导电线材<sup>[8]</sup>。以传统钢芯铝绞线为例,其典型的截面结构见图2所示。圆线同心绞架空线具有价格低廉、安装维修方便、导电性能好、机械强度高等多方面优势<sup>[9-10]</sup>,但在实际应用中,钢芯铝绞线也暴露出一些缺点:如外部环境(温度、冰雪、风速等)会影响钢芯铝绞线的弧垂,造成安全距离的减少,可能会引发导线断股、舞动、覆冰等现象,为抑制上述现象需要在杆塔与基础设施中增加投资<sup>[9]</sup>;在沿海或者重工业腐蚀地

区,钢芯铝绞线的寿命通常只有10~15 a<sup>[11]</sup>,在腐蚀格外严重区域其运行年限甚至不到6 a<sup>[12]</sup>;随着我国大容量、长距离输电线路的不断架设,钢芯铝绞线电导率较低也会导致线损过高问题的出现<sup>[13]</sup>。

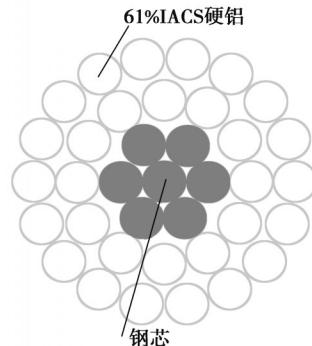


图2 普通钢芯铝绞线截面

Fig. 2 Cross-section of ordinary ACSR

为克服上述存在的缺陷,部分学者尝试改变传统圆形截面结构,得到了截面利用率更大、电晕损耗更低、耐腐蚀性能更优良的型线同心绞架空线<sup>[14]</sup>。型线同心绞架空线的单线具有不变横截面且非圆形。实际中由于加工难度与实用性、稳定性等多种因素,应用最多的截面形状是Z形与梯形<sup>[15]</sup>。其典型的截面结构如图3所示。型线结构相比圆形导线具有更大自阻尼,在等直径条件下,型线可增大截面20%~25%,且单位质量、导体截面积、抗拉力、载流量都大于钢芯铝型线<sup>[16~18]</sup>,在等截面积下,型线能增大截面利用率<sup>[18]</sup>,根据国标GB/T 20141-2018<sup>[19]</sup>,对钢芯铝绞线与钢芯铝型线的性质进行了对比。由表3可知,钢芯铝绞线和钢芯铝型线在直流电阻、额定拉断力、单位长度质量和载流量方面仅存在细微差异;但钢芯铝型线绞线的直径比钢芯铝绞线小约10%,具有更大的导线截面利用率。在我国线路应用中,圆线同心绞架空线占有相当大的比例,约有90%。而型线同心绞架空线属于新工艺,主要应用在导体是软铝的情况下,虽然也有用于硬铝和铝合金的例子,但在我国整体应用较少<sup>[20]</sup>。

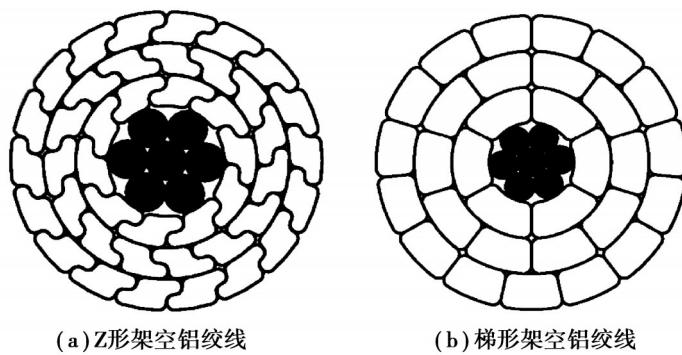


图3 Z形与梯形架空铝绞线截面

Fig. 3 Cross-section of Z-shaped overhead aluminum stranded conductor and trapezoidal overhead aluminum stranded conductor

表3 钢芯铝绞线和钢芯铝型线性能参数对比

Table 3 Comparison of parameters between JL/G1A and JLX/G1A

导线型号	20 °C 直流电阻/ ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	额定拉断力/ kN	单位长度质量/ ( $\text{kg} \cdot \text{km}^{-1}$ )	40 °C 载流量/A	绞线直径/mm
JL/G1A-250/25	0.115 4	68.72	880.6	448	21.6
JLX/G1A-250/25	0.115 3	68.80	880.7	438	19.6

续表3

导线型号	20 °C直流电阻/ ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	额定拉断力/ kN	单位长度质量/ ( $\text{kg} \cdot \text{km}^{-1}$ )	40 °C载流量/A	绞线直径/mm
JL/G1A-400/50	0.072 3	123.00	1 510.0	599	27.6
JLX/G1A-400/50	0.072 1	121.10	1 507.0	587	25.1
JL/G1A-630/80	0.045 9	191.77	2 366.0	792	34.7
JLX/G1A-630/80	0.046 0	191.80	2 369.0	775	31.6

## 2 传统钢芯铝绞线与新型高性能导线比较

与单线技术持续演进的历史轨迹相呼应,导线材料与技术本身亦随着全球电力需求的急剧增长,以及超特高压输电工程的蓬勃发展,经历了深刻的变革与不断创新。一系列具有独特性质与优势的新型导线应运而生。这些新型导线在保留传统导线优点的基础上,通过材料创新、结构优化和先进制造工艺的引入,实现了性能的显著提升。

### 2.1 传统钢芯铝绞线

钢芯铝绞线自1907年问世以来,已经历了一个多世纪的发展与应用,是我国架空线路的架设中使用最多的类型,约占所有导线用量的80%以上<sup>[21]</sup>。钢芯铝绞线共分2部分,钢芯位于绞线的中心,用于承受拉力与压力,钢芯的存在使得钢芯铝绞线具有较高的机械性能。铝绞线位于外层,由于交流电路会产生集肤效应,铝绞线表面的电流密度会远高于其内部,电流主要集中在铝绞线的表面,因此表面铝绞线主要承担传递电能的作用<sup>[22]</sup>。

钢芯铝绞线的国家标准可参考GB/T 1179—2017,标准将钢芯铝绞线所用硬铝分为L、L1、L2、L3共4个等级,对应铝线规定见表4所示;将镀锌钢芯依据厚度分为A、B级,依据强度分为G1-G5共5个等级。此外标准还规定了如绞合工艺、接头处理、拉断力、表面质量、型号表示等一系列要求。值得一提的是,在电线电缆领域从业较久的从业者可能使用旧版本GB/T 1179-1983版本的命名习惯,以“LGJ-XX/YY”来简称钢芯铝绞线,相较于GB/T 1179-2017命名规则无法体现出所用铝与镀锌钢的等级<sup>[23]</sup>。

表4 20 °C硬铝线直流电阻率及电阻温度系数

Table 4 DC resistivity and temperature coefficient of 20 °C duralumin conductor

铝线型号	20 °C时的直流电阻率/ ( $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ )	电导率 (%IACS)	20 °C时的电阻温度系数/ ( $1 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )
L	0.028 264	61.0	0.004 03
L1	0.028 034	61.5	0.004 07
L2	0.027 808	62.0	0.004 10
L3	0.027 586	62.5	0.004 13

### 2.2 新型高性能导线

随着全球经济的蓬勃发展与人口规模的不断扩张,能源需求呈现出持续增长的强劲态势,而环境保护意识的普遍提升则要求在满足能源需求的同时,必须采取更加绿色和可持续的发展方式<sup>[24]</sup>。面对双重挑战,电力行业正经历一场深刻而全面的变革,在这场变革中,导线作为电力传输的关键组成部分,其技术的创新与发展显得尤为重要。为了响应全球能源转型的号召,多种新型导线技术应运而生,如扩径导线、节能导线、增容导线等,它们各自拥有独特的优势与应用场景,共同构成了电力行业转型升级的重要驱动力。

#### 2.2.1 扩径导线

扩径导线通过增大导体的外部直径来削减导体表面的电场强度,降低导线电晕损失,并改善导线周围电磁环境与降低噪声<sup>[25-26]</sup>。此外扩径导线中空结构还具有减轻导线重量、提高抗风能力、增加导线机械强度、减

轻铁塔质量等优点,在电网建设中具有一定经济优势,毕聪来<sup>[27]</sup>通过实验对比发现使用扩径导线替代分裂导线可降低输电线路发生冰灾的概率,扩径导线逐渐成为传统分裂导线的一种高效替代方案<sup>[28]</sup>。

扩径导线按用途分为输电线路和变电站2类,在输电线路中,为达到减小弧垂与降低塔体高度的目的,扩径导线的设计需确保其拉重比达到或接近传统钢芯铝绞线的水平,扩径导线铺设通常采用张力架线法,且放线过程需保证在历经多个滑车后不发生跳股和松股等不利状况<sup>[29]</sup>,因此,输电线路用扩径导线的扩径比设计应趋于合理,避免过大以确保操作的安全性与稳定性。而变电站用扩径导线,其主要目的在于高效地将电流从变压器传输至输电线上,因为传输距离往往局限于数十米之内,故无需考虑弧垂控制与张力调节等因素。此外,变电站母线与线路导线在分裂数上具有明显差异(前者通常较少),且在两者电磁噪声环境限制相近的条件下,变电站母线外径显著大于线路用导线,这一特殊需求促使变电站扩径导线设计呈现出无钢芯但扩径比例相对较大的特点,以满足其独特的电气与机械性能要求<sup>[30]</sup>。

扩径导线按照结构特点可分成2类,分别是层间支撑型和中间空心型<sup>[25]</sup>,结构见图4所示。层间支撑型扩径导线对应型号为LGJK,LGJK钢芯上的硬圆铝线采用疏绞方式支撑扩径,这种结构相对简单,没有金属软管,从而降低了原材料成本。中间空心型扩径导线对应型号为LGKK,LGKK型扩径导线的中心采用镀锌软管涂“FZ903”防蚀脂后支撑扩径,这种设计使得导线在保持一定机械强度的同时,还具有良好的防腐性能。二者差异见表5所示。

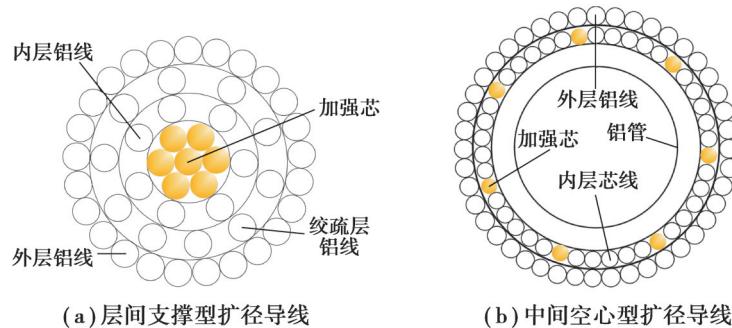


图4 层间支撑型与中间空心型扩径导线截面

Fig. 4 Cross-section of LGJK and LGKK

表5 LGKK与LGJK差异

Table 5 Differences between LGKK and LGJK

差异	LGKK扩径导线	LGJK扩径导线
中心支撑	镀锌金属软管	钢芯
中空结构	是(由金属软管形成)	否(但铝线间有空隙)
铝线排列	绕中心支撑绞合	内层和邻外层有间隙需填充铝线
支撑方式	金属软管支撑	钢芯+硬圆铝线疏绞支撑

我国于2005年在750 kV官亭—兰州东输电工程中首次使用LGJK-300/50型号扩径导线。LGJK-300/50扩径导线是在LGJ-400/50常规导线基础上取出13根铝股线而成的,但通过制造新工艺处理,两者的机械特性相差不大,如表6所示,扩径导线铝线部分截面约300 mm<sup>2</sup>,但导线直径同样达到了27.63 mm,能够满足输电线路电晕放电与环境效应的相关要求<sup>[31]</sup>。

虽然扩径导线在抗风振、抗冰雪等方面具有优势<sup>[32]</sup>,但在实际施工条件下,跳股问题也时有发生,且由于需要特殊安装工艺与额外维护工作,会带来投资成本的上升。此外由表6可知,扩径导线采用了较大的导线截面,导致电能传输过程中电阻与传输损耗增大,特别是在长距离、大容量的输电工程中,损耗的增加会更加明显。

表6 扩径导线与传统导线参数对比

Table 6 Comparison of the parameters between expanded conductors and traditional conductors

参数	常规导线 JL/G1A-400/50	扩径导线 LGJK-300/50
钢芯结构(根数×直径/mm)	7×3.07	7×3.07
铝股结构(根数×直径/mm)	54×3.07	41×3.07
钢芯截面积/mm <sup>2</sup>	51.82	51.82
铝线截面积/mm <sup>2</sup>	399.73	303.40
总面积截面积/mm <sup>2</sup>	451.55	355.22
铝钢截面比	7.71	5.86
20 °C 直流电阻/(Ω·km <sup>-1</sup> )	0.072 44	0.095 33
直径/mm	27.63	27.63
综合拉断力/kN	123.0	110.2
弹性模量/GPa	69.0	76.8
线膨胀系数/(10 <sup>-6</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	19.3	18.7
单位质量/(kg·km <sup>-1</sup> )	1 511.0	1 243.9

## 2.2.2 节能导线

为克服扩径导线损耗明显增加的问题,研究人员提出通过降低导线的直流电阻,即成为节能导线。输电线路的损耗主要由3部分组成,分别是电阻损耗、电晕损耗和部分电磁效应引起的损耗(集肤效应、铁心损耗)。其中电磁效应损耗只占线路损耗的约2%~5%<sup>[33]</sup>,占比较少;电晕损耗与气象条件、环境状况、导线表面电场强度及导线类型等多种因素有关,难以定量分析。节能导线主要是通过降低直流电阻,从而降低电阻损耗来实现节能效果。依据GB/T 15320-2001《节能产品评价导则》规定,节能产品是指在符合产品要求的前提下,与同类产品或完成相同功能的产品相比,其能效指标达到相关标准规定,且具有合理的用户增加投资回收期的产品。在GB/T 15320-2001定义中,节能导线属于间接节能产品,在使用过程中自身不消耗能源,但促使应用该产品的系统降低能耗<sup>[34]</sup>。目前使用较多的节能导线主要有3种,分别是钢芯高导电率硬铝绞线、铝合金芯铝绞线、中强度全铝合金绞线<sup>[35-38]</sup>。其截面如图5所示,节能导线与钢芯铝绞线的参数对比见表7所示。

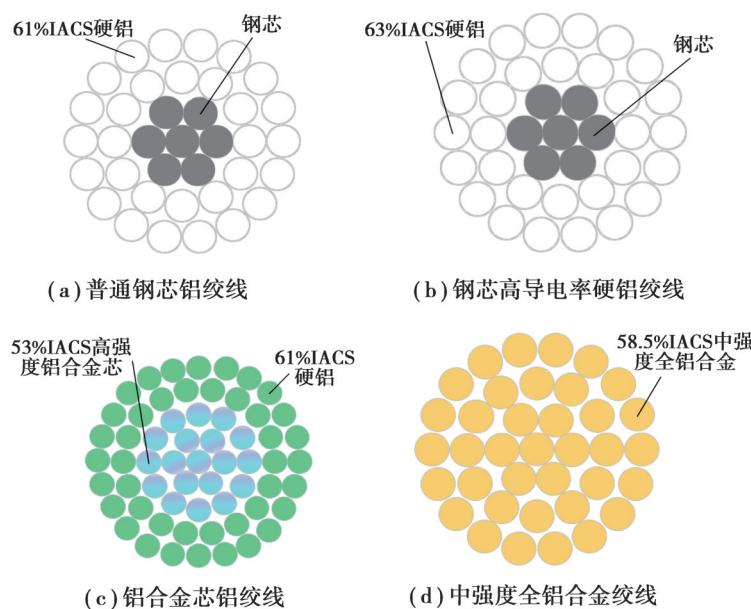


图5 节能导线与普通导线截面对比

Fig. 5 Comparison of cross section between energy-saving conductor and ordinary conductor

表7 节能导线与传统导线参数对比

Table 7 Comparison of parameters between energy-saving conductors and ordinary conductors

参数	钢芯铝绞线 JL/G1A-630/45	钢芯高导电率硬铝绞 线 JL(GD)/G1A- 630/45	铝合金芯铝绞线 JL/ LHA1-465/210	中强度全铝合金绞线 JLHA3-675
钢芯结构(根数×直径/mm)	7/2.81	7/2.81	19/3.75	无
铝股结构(根数×直径/mm)	45/4.22	45/4.22	42/3.75	61/3.75
钢芯截面积/mm <sup>2</sup>	43.41	43.41	无	无
铝线截面积/mm <sup>2</sup>	629.40	629.40	463.88	673.73
铝合金截面积/mm <sup>2</sup>	无	无	209.85	无
总截面积/mm <sup>2</sup>	672.81	672.81	673.73	673.73
20°C 直流电阻/(Ω·km <sup>-1</sup> )	0.045 9	0.044 5	0.044 7	0.044 7
直径/mm	33.75	33.75	33.75	33.75
弹性模量/GPa	63.0	63.0	55.0	55.0
线膨胀系数/(10 <sup>-6</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	18.7	18.7	23.0	23.0
额定拉断力/kN	150.45	150.19	137.02	161.69
单位质量/(kg·km <sup>-1</sup> )	2 079.2	2 078.4	1 860.4	1 860.4

钢芯高电导率硬铝绞线是采用 63%IACS 的硬铝替代普通钢芯铝绞线的 61%IACS 硬铝,进而提高导线整体电导,降低输电损耗;铝合金芯铝绞线是将普通钢芯铝绞线中的钢芯和部分铝线替换为 53%IACS 导电率高强铝合金芯,外层铝线则与普通钢芯铝绞线相同。将本身导电率较低的钢芯(9%IACS)进行替代,降低了导线的电阻;中强度全铝合金绞线将钢芯与 61%IACS 硬铝全部用 58.5%IACS 中强度全铝合金替代,与普通钢芯铝绞线相比,增大了截面积,因此也增强了导电能力<sup>[37,39-40]</sup>。

我国对于节能导线在输电线路中的应用做了大量研究,魏飞<sup>[41]</sup>进行市场调研,将平均成本回收周期时间进行排序为:铝合金芯铝绞线、中强度全铝合金绞线、钢芯高导电率硬铝绞线、钢芯铝绞线;回收时间为 2~3 年、4 年、6.5 年、8 年;张瑞永<sup>[35]</sup>认为高导电率钢芯铝绞线的机械特性与普通钢芯铝绞线完全相同,可以直接取代钢芯铝绞线使用;史成城等<sup>[42]</sup>结合风电场集电线路试点工程,认为中强度铝合金绞线可以替换钢芯铝绞线在风电场线路中的应用,且具有良好的节能效果;徐炳亮等<sup>[43]</sup>通过计算估量了节能导线效果与减少碳排放效果,得出各型节能导线年费用比钢芯铝绞线低约 3%;节能导线使用小时数越多、计算年限越长、电价越高,节电效果与减少碳排放效果越显著。可见,节能导线在节能减排方面具有显著成效,对助力我国实现双碳目标具有重要意义。

虽然节能导线能够显著降低线路损耗,但由于采用了更高导电率的材料或特殊结构设计,其制造成本比传统的钢芯铝绞线高 5%~10%<sup>[40]</sup>。因此,使用节能导线往往会带来初期投资成本的增加,导线的选择需要综合考虑项目的整体投资回报和经济效益<sup>[44]</sup>。

### 2.2.3 增容导线

随着我国经济的快速发展,东部地区的电力需求急剧增加,西电东送工程作为缓解东部地区电力供需矛盾的重要措施,其输电能力需不断提升以满足日益增长的电力需求。传统的输电线路由于多年运行,其输电能力和距离已无法满足当前经济发展的需要。特别是在如“西电东送”类长距离、大容量输电工程中,传统线路的局限性更加凸显<sup>[45]</sup>。随着科技进步和新型材料的研发,增容导线为输电线路的增容改造提供了可能。将老旧线路改造为增容线路,而无需更新或增强杆塔,成为了一种性价比较高的线路改造方式。增容导线是指在与传统钢芯铝绞线相同导线截面积情况下,能够输送更多电能的导线<sup>[46]</sup>。由于导线的增容效果是通过提高导线的运行温度来实现,因此增容导线也被称作为耐热导线。我国使用较多的增容导线主要包括:耐热铝合金导线、间隙型导线(也称松套型导线)、铝基陶瓷复合芯导线和碳纤维复合芯导线<sup>[47-49]</sup>。

耐热铝合金导线通过使用耐热温度更高的铝合金来替代钢芯铝绞线中的硬铝线(HA1),用来替换的铝合金主要包括:耐热铝合金线(58TA1,简称TA1)、60%IACS耐热铝合金线(60TA1)、超耐热铝合金线(UTA1、ZTA1)、高强度耐热铝合金线(KTA1)。各铝线性能见表8所示,其中UTA1与ZTA1、60TA1与TA1除电导率之外不具有其他差异,KTA1机械强度与高强度铝合金线(KA1)相同,而耐热性与TA1相同<sup>[50]</sup>。为弥补钢芯耐热铝合金导线导电率较低与防腐性能低的缺点,可采用铝包钢、特高强度钢芯来代替普通钢芯。日本曾于20世纪80年代研发出的殷钢耐热铝合金导线,使用殷钢芯来代替普通钢芯,因其具有的同弧同径条件下的倍容特性,也被称为“倍容导线”,由于运行稳定,已挂网运行约有30年,但其存在造价较高、工程性价比低的问题<sup>[51]</sup>。

表8 铝线性能对比(直径为2.3~4.8 mm)

Table 8 Comparison of aluminum conductor performance (diameter 2.3~4.8 mm)

铝合金线	型号	导电率(20 °C)(%IACS)	抗拉强度/MPa	允许使用温度/°C		
				连续	短时	瞬时
耐热铝合金线	TA1	58	158~183	150	180	260
60%导电率耐热铝合金线	60TA1	60	158~183	150	180	260
超耐热铝合金线	UTA1	57	158~183	200	230	260
超耐热铝合金线	ZTA1	60	158~183	210	240	280
特耐热铝合金线	XTA1	58	158~183	230	310	360
高强度耐热铝合金线	KTA1	58	218~262	150	180	260
硬铝线	HA1	61	158~183	90	120	180

间隙型导线所使用铝线也为铝合金,依据铝合金是耐热铝合金(TA1)或是超耐热铝合金(ZTA1),间隙型导线分为间隙型钢芯耐热铝合金绞线和间隙型钢芯超耐热铝合金绞线。间隙型导线的结构与钢芯铝绞线略有不同,在钢芯与铝线之间存在一定的间隙并填充有间隙润滑油,润滑油在210 °C以下不滴流,起到防止钢芯销蚀的作用,填充的润滑油能够减少钢芯与内层铝合金之间的摩擦<sup>[52]</sup>,其结构如图6所示。耐热铝合金可在150 °C下持续正常工作,此时间隙型导线载流量约为普通导线的1.6倍,超耐热铝合金可在210 °C下持续工作并达到约2倍的载流量<sup>[53]</sup>。但是间隙型增容导线存在需更换金具、施工不便、内部运行状态不易检测等问题,该类导线在我国应用较少。

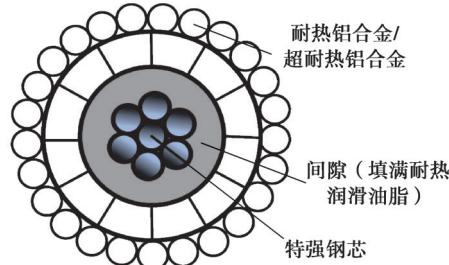


图6 GTACSR或GZTACSR截面图

Fig. 6 Cross section of GTACSR or GZTACSR

铝基陶瓷复合芯导线(aluminum conductor composite reinforced,ACCR)最早由美国3M公司于2001年研发。ACCR内部材料芯是由上万根高强度陶瓷纤维嵌入到高纯度铝中复合而成,外部为铝铝合金,具有较好耐高温性与抗拉强度,二者共同承担导线的机械与电气特性<sup>[54]</sup>。导线截面图见图7所示,铝基陶瓷纤维芯的特性参数见表9所示。

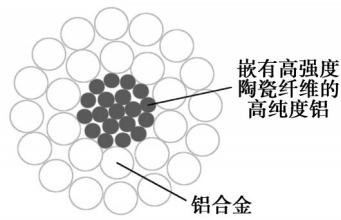


图7 铝基陶瓷复合芯导线截面图

Fig. 7 Cross section of ACCR

表9 铝基陶瓷复合芯的基本性能参数

Table 9 The basic characteristic parameters of aluminum-based ceramic composite core

性能参数	ACCR	性能参数	ACCR
抗拉强度/MPa	1 380	线膨胀系数/( $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )	6.03
密度/( $\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$ )	3.33	硬度/GPa	215~230
电导率(%IACS)	23%~25%	耐受温度/°C	>300

同样使用复合材料芯的导线还有碳纤维复合芯导线,根据复合芯结构不同,又可分为棒型和绞合型2种<sup>[53]</sup>,二者的截面见图8所示。棒状碳纤维复合芯导线(aluminum conductor composite core, ACCC)内芯采用覆盖有玻璃纤维的棒型碳纤维芯,这种材料最大耐受温度超过2 000 °C,并且可保持机械强度不降低,外层通常采用经过处理的软铝线或耐热铝合金型线<sup>[55-57]</sup>。ACCC导线具有强度高、质量轻、导电性强、弧垂低等优势,载流量可到达普通钢芯铝绞线2倍左右,碳纤维材料不同于铁磁性材料,因此也不存在磁滞损耗与涡流损耗,同时导线还可提高电晕的起始电压,抑制电晕现象<sup>[56,58]</sup>。碳纤维本身是一种脆性材料,虽然有较高的硬度,但韧性却较差易于断裂,因此在架线过程中需严格避免大角度的折弯,这加大了施工难度;且该材料具有价格较高问题<sup>[59]</sup>。绞合型碳纤维复合芯导线外层与ACCC导线完全相同,内层采用绞合结构能一定程度上缓解ACCC导线较显著的断裂缺陷,更有利于施工与运输。由于二者的材料相同,绞合型碳纤维复合芯导线也具有ACCC导线的高强度、质量轻等优势。ACCR与ACCC这2种复合材料芯导线在美国已经有了相当多应用案例,但由于碳纤维复合芯材料本身抗扭、抗弯、径向耐压等性能差,对施工要求较高,目前国内应用较少<sup>[51]</sup>。

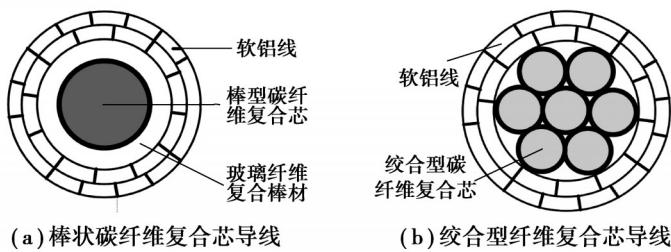


图8 碳纤维复合芯导线截面图

Fig. 8 Cross-section of carbon fiber composite core conductor

#### 2.2.4 特殊用途导线

除去上述介绍的导线类型,实际应用中还存在一些特殊用途的导线,如光电复合型线缆、抗复杂环境导线。光电复合型导线包括光纤复合相线(optical phase conductor, OPPC)、光纤复合架空地线(optical fiber composite overhead ground wire, OPGW),其中OPPC在传统的输电线中复合光纤单元,兼具电力传输与通信功能<sup>[60]</sup>。抗复杂环境导线如稀土导线、防舞动导线、耐腐蚀导线、亚光导线、抗冰雪导线等,这些导线经过特殊工艺处理,如抗冰雪导线通常在导线中添加特殊材料或发热元件,通过产生热能融冰,降低冰雪对导线的

黏着力<sup>[61]</sup>;此外,部分欧美国家要求机场等场合下需使用亚光导线,以减少光污染对飞行员起降过程的影响<sup>[62]</sup>。

### 3 国内外标准对比

在电气领域,目前受国际广泛认可的标准是 IEC 标准,IEC(International Electrotechnical Commission,国际电工委员会),是全球最为权威的三大国际标准化与评定组织之一。我国于 1957 年加入了 IEC,我国制定国标参考 IEC 标准,也有修改使之更符合我国国情,部分我国架空导线领域国标与 IEC 对应标准见表 10 所示。

在国际电线尺寸规格标准方面,美国线规(American wire gauge, AWG)具有较高影响力,成为众多国家和地区输电工程中导线选型与设计的重要参考。AWG 从 1857 年开始在美国使用,AWG 前的数字表示导线形成最后直径前要经过的孔的数目,这个数字是基于一个特定的、逐步减小的孔径序列来确定的,因此数字越高的 AWG 编号对应越细的导线。AWG 通过编号来表示导线的粗细规格,面积采用千圆密耳(kcmil)作为单位,其与我国的公制单位 mm<sup>2</sup> 的换算关系为:1 kcmil=0.507 mm<sup>2</sup>,AWG 规格与国标线径换算见表 11 所示。

表 10 我国架空导线国标与 IEC 标准对应

Table 10 Comparison of China's national standard and IEC standard

导线/试验方法	我国国标	IEC 标准
圆线同心绞架空导线	GB/T 1179-2017	IEC 61089:1991
型线同心绞架空导线	GB/T 20141-2018	IEC 62219:2002
含有一个或多个间隙的同心绞架空导线	GB/T 30550-2014	IEC 62420:2008
架空绞线用镀锌钢线	GB/T 3428-2012	IEC 60888:1987
架空绞线用硬铝线	GB/T 17048-2017	IEC 60889:1987
架空绞线用耐热铝合金线	GB/T 30551-2014	IEC 62004:2007
架空绞线用铝—镁—硅系合金圆线	GB/T 23308-2009	IEC 60104:1987
架空导线蠕变试验方法	GB/T 22077-2023	IEC 61395:1998

表 11 美线规换算对照

Table 11 AWG conversion table

AWG 编号	外径长度		截面积		电阻值/(Ω·km <sup>-1</sup> )
	单位/mm	单位/inch	单位/mm <sup>2</sup>	单位/kcmil	
1	7.35	0.289 3	42.41	83.7	0.42
2	6.54	0.257 6	33.62	66.4	0.53
3	5.83	0.229 4	26.67	52.6	0.66
4	5.19	0.204 3	21.15	41.7	0.84
5	4.62	0.181 9	16.77	33.1	1.06

### 4 典型应用场景下导线的实际运行分析

以国网重庆市电力公司某分公司 110~220 kV 运行线路为例,探究各类导线实际运行中的使用情况,为保证数据真实性,仅考虑单一导线线路,忽略多导线组合线路。线路使用情况见图 9 所示。由图可知,国网重庆市电力公司某分公司架空导线使用仍是以钢芯铝绞线为主,占比约 94%。正如前文所述,钢芯铝绞线因其优良的导电性、机械强度和经济性,成为架空输电线路中最常用的导线类型。此外中强度全铝合金绞线也占有较大比重,其具有密度小、重量轻、导电性好等优点,有助于减轻线路重量,降低杆塔负荷,提高电网整体经济性。稀土钢芯铝绞线与碳纤维复合芯软铝型线绞线共占总线路约 0.5%,较少使用是由于该类型导线存

在造价较高和运行稳定性较低的问题,体现了重庆电网对于运行经济性和安全性的重视。

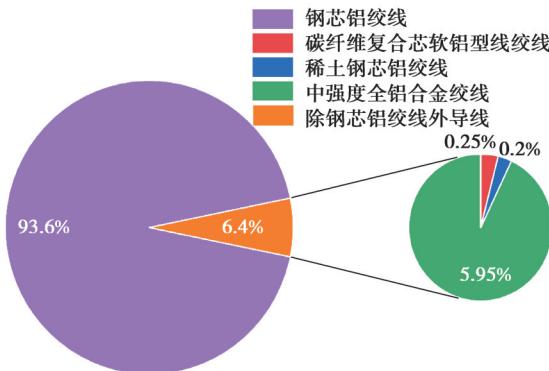


图9 国网重庆市电力公司某分公司架空导线使用情况

Fig. 9 Usage of Overhead Conductors in a Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company

国网重庆市电力公司该分公司对于架空输电导线的使用情况一定程度上也反映出我国架空导线的整体使用状况,钢芯铝绞线在全国架空导线市场中占据主导地位,成为电网建设中的首选材料,但全国范围内还广泛使用了包括碳纤维复合芯软铝型线绞线、稀土钢芯铝绞线、中强度全铝合金绞线等在内的多种新型或特殊类型的导线,这些导线在不同地区、不同应用场景下发挥着各自的优势,但各地出于经济因素或运行安全稳定性考虑,使用比例较少;未来在相关研究较为成熟后,新型导线所占比重有望不断增大。

## 5 结 论

文中总结了架空输电线路导线在使用材料和结构设计方面的迭代和优化,并对不同类型导线的结构特点、使用情况和瓶颈问题进行了分析。同时根据目前国内外标准和实际工程情况对架空输电线路导线的发展趋势进行了研究。结论如下:

1)在传统导线方面,钢芯铝绞线因其具有良好的导电性能、机械强度与经济性,在我国架空输电线路建设中占较大比重。但其也具有线损过高、不耐腐蚀和易受环境影响等缺点。

2)在新型导线方面,扩径导线通过增大等效直径而在减小导线电晕和降低噪声等方面表现良好,但实际施工过程中会有跳股问题,且由于需要特殊安装技术与制造工艺,增加了投资成本;节能导线通过提高导线的电导率来降低导线的损耗,部分导线具有与钢芯铝绞线相同的机械强度可以直接替代使用。但其在降低线路损耗的同时也会增大初始投资,具体使用与否需根据设计及施工时的多方面经济因素决定;增容导线在改造已有线路而不增加输电走廊占地面积方面具有良好的应用前景,但部分导线如ACCC导线材料本身较脆,在我国输电线路的实际应用还有待进一步研究。

虽然,当前架空输电线路导线的制备和应用已经取得了显著的进步,但是,面对极端的自然环境影响和未来复杂的工程应用场景,架空输电线路导线仍具有巨大的发展潜力与广阔的提升空间,未来我国架空输电线路导线的发展方向包括:

1)加强新型导线如碳纤维复合芯导线在我国输电环境下应用的研究,该类导线具有独特优势,我国需加强对导线长期运行性能和工程应用技术等的深入研究,确保其能满足实际工程需求。

2)进一步提高电工铝导电性能,如提高铝的纯度至99.996%,则电导率可以达到65%IACS,远高于当前导线制造用铝导电率的61%IACS,将减少能量损耗,从而带来经济效益与环境效益的提升。

3)加强导线新材料的研究,创造更多“资源节约型,环境友好型”导线,加快我国电网建设发展方式转变。

## 参考文献

- [1] 姜云霄. 导线选型专题报告[J]. 科技与创新, 2014(4): 19-20.

- Jiang Y X. Cable type project report[J]. Science and Technology & Innovation, 2014(4): 19-20. (in Chinese)
- [ 2 ] Fernie K J, James Reynolds S. The effects of electromagnetic fields from power lines on avian reproductive biology and physiology: a review[J]. Journal of Toxicology and Environmental Health Part B, Critical Reviews, 2005, 8(2): 127-140.
- [ 3 ] 金榕, 李艳, 尤伟任, 等. 哈郑工程大跨越用导线制造工艺及质量控制研究[J]. 中国电力, 2015, 48(2): 76-80.
- Jin R, Li Y, You W R, et al. Study on manufacturing process and quality control of extra high strength steel reinforced aluminum-alloy conductors in the Yellow River long-span section of hazheng transmission project[J]. Electric Power, 2015, 48(2): 76-80. (in Chinese)
- [ 4 ] Dong X Z, Wang Q M, Zhou Z M, et al. Technical and economic analysis of aluminum conductor with multi-stranded composite core and its application[C]//2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia). May 21-24, 2019. Chengdu, China. IEEE, 2019: 2634-2638.
- [ 5 ] 谭恢曾. 架空输电导线的变迁[J]. 湖南电力, 2005, 25(2): 60-62.
- Tan H Z. Transition of overhead transmission lines[J]. Hunan Electric Power, 2005, 25(2): 60-62. (in Chinese)
- [ 6 ] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 架空绞线用镀锌钢线: GB/T 3428—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Zinc-coated steel wires for stranded conductors: GB/T 3428—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese)
- [ 7 ] Ali Jaffrey N, Hettiarachchi S. Corrosion detection in steel reinforced aluminium conductor cables[C]//2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). September 28 - October 1, 2014, Perth, WA, Australia. IEEE, 2014: 1-6.
- [ 8 ] 赵艳, 刘清华. 圆线同心绞架空导线相关技术指标的计算[J]. 电线电缆, 2009(1): 43-46.
- Zhao Y, Liu Q H. Calculation of the technical parameters of the round wire concentric-lay-stranded conductors[J]. Electric Wire & Cable, 2009(1): 43-46. (in Chinese)
- [ 9 ] 黄豪士. 环境友好型输电线路用导线之一: 导线的特性[J]. 电线电缆, 2010(2): 13-16, 22.
- Huang H S. Environmental-friendly conductor for transmission lines part I: conductor characteristics[J]. Electric Wire & Cable, 2010(2): 13-16, 22. (in Chinese)
- [ 10 ] Kopsidas K, Rowland S M. Evaluating opportunities for increasing power capacity of existing overhead line systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(1): 1-10.
- [ 11 ] 夏开全, 于俊超, 邓元婧, 等. 在役输电线路钢芯铝绞线腐蚀状态评估与分析[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(5): 495-499.
- Xia K Q, Yu J C, Deng Y J, et al. Analysis of corrosion conditions of in-service ACSR[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(5): 495-499. (in Chinese)
- [ 12 ] Calitz J. Overhead conductor corrosion study[D]. Pretoria: Tshwane University of Technology, 2004.
- [ 13 ] 耿江海, 周松松, 岑小梅. 碳纤维复合芯导线与钢芯铝绞线的起晕特性对比试验[J]. 中国电力, 2015, 48(1): 76-80.
- Geng J H, Zhou S S, Qi X M. Contrastive study on corona characteristics of aluminum conductor composite core and aluminum conductor steel reinforced[J]. Electric Power, 2015, 48(1): 76-80. (in Chinese)
- [ 14 ] Rashmi, Shivashankar G S, Poornima. Overview of different overhead transmission line conductors[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(10): 11318-11324.
- [ 15 ] 刘斌, 党朋, 季世泽. 型线同心绞架空导线技术发展与应用[J]. 电线电缆, 2008(6): 9-12.
- Liu B, Dang P, Ji S Z. The development and application of the formed wire concentric-lay-stranded overhead conductors[J]. Electric Wire & Cable, 2008(6): 9-12. (in Chinese)
- [ 16 ] 江建华. 钢芯铝型线绞线与钢芯铝绞线的主要性能对比[J]. 电线电缆, 2012(1): 19-22.
- Jiang J H. Main performances compare between steel reinforced formed aluminum conductor and steel reinforced aluminum conductor[J]. Electric Wire & Cable, 2012(1): 19-22. (in Chinese)
- [ 17 ] Munaswamy K, Haldar A. Self-damping measurements of conductors with circular and trapezoidal wires[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 604-609.
- [ 18 ] 万建成, 李新民, 刘龙, 等. 型线与圆线的电晕和空气动力特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(S1): 241-248.
- Wan J C, Li X M, Liu L, et al. Corona and aerodynamic characteristics analysis on round line and profile line[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S1): 241-248. (in Chinese)
- [ 19 ] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 型线同心绞架空导线: GB/T 20141—2018[S]. 北京: 中国标准出版社,

- 2019.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Formed wire concentric lay overhead electrical stranded conductors: GB/T 20141—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)
- [20] 万建成,李健,陈媛,等.铝合金芯铝型绞线在大容量直流线路中的应用[J].电力建设,2013,34(8): 105-111.  
Wan J C, Li J, Chen Y, et al. Application of aluminum alloy cored aluminum stranded wire for UHVDC transmission line with large capacity[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(8): 105-111. (in Chinese)
- [21] Cardou A, Cloutier L, Lanteigne J, et al. Fatigue strength characterization of ACSR electrical conductors at suspension clamps[J]. Electric Power Systems Research, 1990, 19(1): 61-71.
- [22] Farzaneh M, Savadjiev K. Evaluation of tensile strength of ACSR conductors based on test data for individual strands[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 627-633.
- [23] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.圆线同心绞架空导线:GB/T 1179—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Round wire concentric lay overhead electrical stranded conductors: GB/T 1179—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [24] 康重庆,杜尔顺,郭鸿业,等.新型电力系统的六要素分析[J].电网技术,2023,47(5): 1741-1750.  
Kang C Q, Du E S, Guo H Y, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750. (in Chinese)
- [25] 马俊,廖龙飞,喻建波,等.覆冰地区分裂与扩径导线表面电场特性[J].重庆大学学报,2023,46(8): 1-10.  
Ma J, Liao L F, Yu J B, et al. Surface electric field characteristics of bundle wire and expanded wire in icing area[J]. Journal of Chongqing University, 2023, 46(8): 1-10. (in Chinese)
- [26] 吴海涛,韩兴波,蒋兴良,等.基于水滴碰撞效率的扩径导线防冰特性分析[J].电工技术学报,2023,38(11): 3033-3040, 3051.  
Wu H T, Han X B, Jiang X L, et al. Analysis of anti-icing characteristics of expanded diameter conductor based on water droplet collision and freezing efficiency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(11): 3033-3040, 3051. (in Chinese)
- [27] 毕聰來.采用扩径导线防止输电线路发生冰雪灾害的方法研究[D].重庆:重庆大学,2019.  
Bi C L. Research on the method of using diameter-expanded conductors to prevent ice and snow disasters in transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [28] Si J J, Rui X M, Liu S C, et al. Stability analysis study on diameter-expanded conductor with fewer inner wires[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 3536-3546.
- [29] 毕庶达.750 kV输电线路扩径导线跳股原因的分析[J].电力建设,2006,27(9): 1-3.  
Bi S D. Analysis on causes of strand jumping of extended diameter conductor for 750 kV transmission line[J]. Electric Power Construction, 2006, 27(9): 1-3. (in Chinese)
- [30] 万建成,刘臻,孙宝东,等.扩径导线的分类与扩径方式的选择[J].电力建设,2010,31(6): 112-118.  
Wan J C, Liu Z, Sun B D, et al. Classification and applicability of diameter-expanded conductor[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(6): 112-118. (in Chinese)
- [31] 马钦国,张宁刚,江岳,等.750 kV输电线路扩径导线工程应用深化研究[J].电网与清洁能源,2016,32(5): 70-77.  
Ma Q G, Zhang N G, Jiang Y, et al. An in-depth study on the engineering application of expanded-diameter conductors in 750 kV transmission lines[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(5): 70-77. (in Chinese)
- [32] 王新宽,喻建波,刘振华,等.等效扩径导线与分裂导线覆冰比较[J].高电压技术,2022,48(7): 2698-2705.  
Wang X K, Yu J B, Liu Z H, et al. Comparison of icing between equivalent expanded diameter conductor and bundle conductor[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2698-2705. (in Chinese)
- [33] 丁广鑫,孙竹森,张强,等.节能导线在输电线路中的应用分析[J].电网技术,2012,36(8): 24-30.  
Ding G X, Sun Z S, Zhang Q, et al. Analysis on application of energy-saving conductors in transmission lines[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 24-30. (in Chinese)
- [34] 陈洋,高翔,蒋华君,等.节能型架空导线及其节能效果评估[J].电线电缆,2011(4): 14-16.

- Chen Y, Gao X, Jiang H J, et al. Energy-saving type overhead electrical stranded conductors and energy-saving effect appraises[J]. Wire & Cable, 2011(4): 14-16. (in Chinese)
- [35] 张瑞永, 赵新宇, 李明, 等. 输电线路新型节能导线的推广应用[J]. 电力建设, 2012, 33(6): 89-92.
- Zhang R Y, Zhao X Y, Li M, et al. Polarization and application of the new-type energy-saving conductors in transmission lines[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(6): 89-92. (in Chinese)
- [36] Li B, Liu L, Li T W, et al. Technical and economic research on energy saving conductors for UHVDC project[C]//2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). May 10-12, 2024, Harbin, China. IEEE, 2024: 2629-2634.
- [37] Shao B R, Liu J, Feng Y M, et al. Analysis on selecting application of energy-saving conductors in overhead transmission line construction[C]//2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). August 10-13, 2016, Xi'an, China. IEEE, 2016: 1-8.
- [38] Li X, Zhu K, Liu B. Experimental research in wind tunnel of aerodynamic characters for new-type energy-saving conductor [C]//Information Engineering Research Institute, USA. Mechanical Materials and Manufacturing Engineering III: Selected, Peer-Reviewed Papers from the 2013 3rd International Conference on Mechanical Materials and Manufacturing Engineering (ICMME 2013), October 1-2, 2013, Shanghai, China. Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 2014: 557-562.
- [39] 万建成, 董玉明, 刘龙, 等. 3类节能导线性能对比与适用范围[J]. 中国电力, 2016, 49(1): 102-108, 165.
- Wan J C, Dong Y M, Liu L, et al. Performance comparison and application scope of three kinds of energy-saving conductors[J]. Electric Power, 2016, 49(1): 102-108, 165. (in Chinese)
- [40] Gao M, Song B, He Y C. A comparative analysis of the economic performance of new energy-saving wires based on life cycle cost[J]. DEStech Transactions on Computer Science and Engineering, 2017.
- [41] 魏飞. 节能导线在高压输电线路设计中的应用[J]. 集成电路应用, 2022, 39(12): 248-249.
- Wei F. Application of energy saving conductor in high voltage transmission line design[J]. Application of IC, 2022, 39(12): 248-249. (in Chinese)
- [42] 史成城, 陈勇. 中强度全铝合金绞线在风电场集电线路中应用的技术经济分析[J]. 供用电, 2016, 33(12): 75-78.
- Shi C C, Chen Y. Technical and economic analysis of medium strength all aluminum alloy conductor in wind farm collecting lines[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(12): 75-78. (in Chinese)
- [43] 徐炳亮. 节能导线分析[J]. 电工技术, 2023(1): 75-77.
- Xu B L. Analysis of energy saving traverse[J]. Electric Engineering, 2023(1): 75-77. (in Chinese)
- [44] 袁启发. 探究电力输配电线路中节能导线对工程造价的影响[J]. 电气技术与经济, 2024 (5):235-236,239.
- Yuan Q F. Explore the impact of energy-saving conductors on project cost in power transmission and distribution lines[J]. Electrical Technology and Economics, 2024(5):235-236, 239.(in Chinese)
- [45] 李斌, 王国利, 刘磊, 等. 输电线路增容导线弧垂特性真型试验研究[J]. 南方电网技术, 2017, 11(6): 35-41.
- Li B, Wang G L, Liu L, et al. Full scale test study on sag characteristics of augmented capacity conductors for transmission line[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(6): 35-41. (in Chinese)
- [46] He Y C, Song B, Gao M. Comparison of the mechanical properties of a new capacity-expanding and energy-saving conductor and traditional conductors[C]//Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Automation, Mechanical and Electrical Engineering (AMEE 2017). September 17-18, 2017. Shenzhen, China. Atlantis Press, 2017:52-56.
- [47] Liu B, Zhang R, Li B. Selection method and application of augmented capacity conductors for transmission line[C]//The 16th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2020). July 2-3, 2020, Online Conference. London: IET, 2020: 1121-1126.
- [48] Qiao K, Zhu A P, Wang B M, et al. Characteristics of heat resistant aluminum alloy composite core conductor used in overhead power transmission lines[J]. Materials, 2020, 13(7): 1592.
- [49] 宋浩, 陈志华, 宋欣欣. 基于耐热增容导线的输电线路抗风能力对比研究[J]. 武汉理工大学学报, 2024, 46(1): 55-59.
- Song H, Chen Z H, Song X X. Research on wind resistant capacity of transmission line system with heat-resistant and uprating conductors[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2024, 46(1): 55-59. (in Chinese)
- [50] 李梦琳, 陈保安, 韩钰, 等. 耐热铝合金导线的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(1): 16-20.
- Li M L, Chen B A, Han Y, et al. Research progress on thermal-resistant aluminum alloy wire[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2024, 44(1): 16-20. (in Chinese)
- [51] 黄豪士, 滕筠, 黄杰彦. 光伏风力新能源用节约型倍容量导线[J]. 电线电缆, 2024(1): 36-39.

- Huang H S, Teng Y, Huang J Y. Energy-saving double-capacity conductor for photovoltaic wind power and new energy[J]. Wire & Cable, 2024(1): 36-39. (in Chinese)
- [52] Bedialauneta M T, Fernandez E, Albizu I, et al. Sag-tension evaluation of high-temperature gap-type conductor in operation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(1): 19-26.
- [53] 赵春明,艾威,孙勇,等.间隙型钢芯超耐热铝合金绞线在输电线路工程中的应用[J].吉林电力,2015,43(6): 32-34.  
Zhao C M, Ai W, Sun Y, et al. Application of clearance type steel reinforced heat-resisting aluminum alloy conductor in transmission line engineering[J]. Jilin Electric Power, 2015, 43(6): 32-34. (in Chinese)
- [54] Ujah C O, Von Kallon D V, Aikhuele D O, et al. Advanced composite materials: a panacea for improved electricity transmission[J]. Applied Sciences, 2022, 12(16): 8291.
- [55] 沈楚莹,尹芳辉,燕秀,等.绞合型碳纤维复合芯导线的弧垂特性研究[J].电网技术,2021,45(12): 4964-4970.  
Shen C Y, Yin F H, Yan X, et al. Sag characteristics of stranded carbon fiber composite core conductor[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4964-4970. (in Chinese)
- [56] Cao J M, Wang Z H, Zhang Y B, et al. Aging life evaluation of a new carbon fiber composite core wire[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 167: 012054.
- [57] Ryuta O. Revamped high ampacity low sag stranded carbon fiber composite core--aluminum conductor fiber reinforced conductor (ACFR)[J]. Power Engineer Journal, 2018, 20(2): 4-8.
- [58] Alawar A, Bosze E J, Nutt S R. A composite core conductor for low sag at high temperatures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2193-2199.
- [59] 于广辉,邓云坤.碳纤维复合导线发展综述[J].热加工工艺,2019,48(20): 1-5.  
Yu G H, Deng Y K. Review on development of carbon fiber composite conductor[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(20): 1-5.(in Chinese)
- [60] 徐志钮,李先锋,郭一帆,等.基于温度滞后相位的输电线路覆冰监测方法[J].电力工程技术,2022,41(6): 91-100.  
Xu Z N, Li X F, Guo Y F, et al. Icing monitoring method of transmission lines based on temperature lagging phase[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 91-100. (in Chinese)
- [61] 余静成.新型抗冰雪耐候平行集束架空电缆研制[J].现代制造技术与装备,2024,60(2): 179-181, 188.  
Yu J C. Development of a new type of ice-snow resistant and weather-resistant parallel bunching overhead cable[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2024, 60(2): 179-181, 188. (in Chinese)
- [62] 郑秋,张传省,王诗勇,等.经喷砂处理后亚光架空导线的铝单线性能[J].电线电缆,2012(2): 19-22.  
Zheng Q, Zhang C S, Wang S Y, et al. The properties of aluminum wires of matte overhead conductors after sandblasting processing[J]. Electric Wire & Cable, 2012(2): 19-22. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)