

电力设计线路中新型导线材料应用及输电效率提升研究

申屠军泷

桐庐电力开发有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i4.8855

[摘要] 随着全球能源结构的转型与“双碳”目标的推进，构建高效、绿色、智能的现代化电网已成为电力行业发展的核心任务。导线作为输电线路的“血管”，其材料性能直接决定了线路的载流量、机械强度、损耗水平及全寿命周期成本。传统钢芯铝绞线（ACSR）在满足日益增长的负荷需求时，逐渐显露出载流能力不足、弧垂大、电晕损耗高等局限性。本文系统综述了新型导线材料在电力设计线路中的应用现状与发展趋势，重点分析了耐热铝合金导线、碳纤维复合芯导线（ACCC）、高温超导导线等前沿材料的物理特性、力学性能及工程应用效果。文章深入探讨了不同新型导线对输电效率的提升机制，包括降低电阻损耗、减少电晕放电、提高输送容量及优化线路走廊利用率等方面。同时，针对新型导线在工程设计、施工安装及运维管理中的关键技术难点进行了剖析，提出了相应的优化策略。研究表明，合理选型并推广应用新型导线材料，是突破现有输电瓶颈、提升电网运行效率、实现节能减排的关键路径，具有显著的经济效益与社会价值。

[关键词] 电力设计；输电线路；新型导线；输电效率；耐热铝合金；碳纤维复合芯；高温超导；损耗控制

Research on the Application of Novel Conductor Materials in Power Transmission Lines and Improvement of Transmission Efficiency

Shentu Junlong

Tonglu, Tonglu Power Development Co., Ltd.

[Abstract] With the global energy transition and the advancement of the "dual carbon" goals, building an efficient, green, and intelligent modern power grid has become a core mission for the power industry. As the "blood vessels" of transmission lines, conductor materials directly determine the current-carrying capacity, mechanical strength, power loss levels, and lifecycle costs of transmission lines. Traditional aluminum-conductor steel-core wires (ACSR) have increasingly revealed limitations in meeting growing load demands, including insufficient current-carrying capacity, significant sag, and high corona losses. This paper systematically reviews the current applications and development trends of novel conductor materials in power transmission systems, focusing on analyzing the physical properties, mechanical performance, and engineering applications of cutting-edge materials such as heat-resistant aluminum alloy conductors, carbon fiber composite core conductors (ACCC), and high-temperature superconducting conductors. The study delves into how these advanced conductors enhance transmission efficiency through mechanisms including reduced resistance losses, minimized corona discharge, increased transmission capacity, and optimized corridor utilization. Additionally, it identifies key technical challenges in engineering design, installation, and operational maintenance of these materials, proposing corresponding optimization strategies. The research concludes that rational selection and widespread adoption of novel conductor materials represent a critical pathway to overcoming existing transmission bottlenecks, improving grid efficiency, and achieving energy conservation and emission reduction, with significant economic and social benefits.

[Key words] power design; transmission lines; novel conductors; transmission efficiency; heat-resistant aluminum alloy; carbon fiber composite core; high-temperature superconductivity; loss control

引言

电力传输是连接电源与负荷的纽带，而导线则是这一纽带中最关键的组成部分。长期以来，钢芯铝绞线（ACSR）凭借其成熟的工艺、低廉的成本和可靠的性能，占据了输电线路导线的绝对主导地位。然而，面对全球能源消费总量的持续增长以及新能源发电的间歇性波动，传统导线已难以适应现代电网对大容量、低损耗、高可靠性及环境友好性的严苛要求。特别是在特高压输电、城市密集区供电及老旧线路增容改造场景中，传统导线的载流瓶颈、热稳定性差及弧垂过大等问题日益凸显，制约了电网整体效能的发挥。

近年来，材料科学的飞速发展为导线技术的革新提供了坚实基础。以耐热铝合金、碳纤维复合材料及高温超导材料为代表的新型导线应运而生。这些材料在保持或提升机械强度的同时，显著降低了电阻率，大幅提高了允许工作温度，从而实现了在不更换杆塔、不拓宽走廊的前提下大幅提升输送容量。此外，新型导线还能有效抑制电晕放电，减少无线电干扰和可听噪声，改善生态环境影响。尽管新型导线在实验室及少量示范工程中展现了巨大潜力，但在大规模工程应用中的设计规范、选型依据、经济性评估及运维标准等方面仍存在诸多待解之谜。

本文旨在全面梳理新型导线材料的技术特征与应用进展，系统分析其在提升输电效率方面的作用机理，探讨电力设计过程中如何科学选型与优化配置，并对未来发展趋势进行展望。通过理论分析与工程实践相结合，为电力设计人员提供决策参考，推动输电线路技术向更高效、更绿色的方向迈进。

一、新型导线材料的技术特征与分类演进

（一）耐热铝合金导线的性能突破与传统替代

耐热铝合金导线是在传统铝绞线基础上，通过添加稀土元素（如钇、锆等）并进行特殊热处理工艺，使铝基体晶粒细化并析出强化相，从而显著提高其抗蠕变性能和耐热等级。此类导线通常分为两种类型：一种是工作温度可达 150℃-180℃的耐热铝合金绞线，另一种是工作温度可达 200℃-260℃的高温耐热铝合金绞线。与传统钢芯铝绞线相比，耐热铝合金导线最大的优势在于其线膨胀系数小，在高温下弧垂增加量极小，且无需钢芯即可承受较高的张力。这使得其在同等截面下，长期允许载流量可比传统导线提高 30%-50%。此外，由于去除了钢芯，其重量减轻，减少了杆塔的垂直荷载，特别适用于山区大跨越及老旧线路的增容改造。

（二）碳纤维复合芯导线的轻质高强与低损耗特性

碳纤维复合芯导线（ACCC, Aluminum Conductor Composite Core）代表了当前导线材料技术的最高水平之一。其结构采用高强度、低热膨胀系数的碳纤维复合材料棒作为芯部，外层包裹高导电率的铝绞线。碳纤维芯材的抗拉强度是镀锌钢丝的 4-5 倍，而密度仅为钢的 1/4，且具有极低的线膨胀系数。这意味着 ACCC 导线在相同外径下，其载流量可提升 2-3 倍，且

在大风、覆冰及高温工况下，弧垂增长微乎其微，极大地提高了线路的安全裕度。更重要的是，由于碳纤维芯材不导电，全部电流由外层铝线承担，且铝线截面积占比更大，使得交流电阻显著降低，从而大幅减少了线路的有功损耗。该材料特别适用于城市核心区扩容、跨江跨海大跨越及高寒地区输电。

（三）高温超导导线的革命性潜力与技术挑战

高温超导导线利用钇钡铜氧（YBCO）等第二代高温超导带材，在液氮温区（77K）下实现零电阻输电。理论上，超导导线可实现无损输电，且单位截面的载流量是常规导线的几十倍甚至上百倍。若应用于实际电网，将彻底改变输电线路的设计范式，大幅缩小线路走廊宽度，解决土地资源的稀缺问题。然而，目前高温超导导线仍面临高昂的制造成本、复杂的低温冷却系统维护以及长距离接头处理等技术难题。尽管已在部分示范工程中成功运行，但其大规模商业化应用仍需等待材料成本的进一步下降及低温系统的成熟化。

二、新型导线提升输电效率的作用机理与量化分析

（一）降低电阻损耗与优化经济运行区间

输电线路的电能损耗主要由电阻引起的焦耳热（ I^2R ）构成。新型导线通过优化导体材质和结构设计，从源头上降低了单位长度的直流电阻和交流电阻。例如，ACCC 导线因去除了钢芯，铝层截面积占比更高，且采用了高纯度铝，其电阻率较同规格 ACSR 导线降低约 15%-20%。对于长距离、大容量的输电线路，这种电阻的微小降低累积起来将产生巨大的节能效益。此外，耐热型导线允许在更高的温度下运行，虽然高温会略微增加电阻，但由于其载流量大幅提升，在输送相同功率时，电流密度相对降低，或者在相同电流下电压降减小，从而优化了线路的经济运行区间，降低了单位电能的传输成本。

（二）抑制电晕放电与减少电磁环境影响

在高电压等级输电线路中，导线表面的电场强度超过空气击穿阈值时会发生电晕放电，导致能量损耗、无线电干扰及可听噪声。新型导线往往具有更大的等效直径或更优化的表面光洁度，能够有效降低表面电场强度。特别是扩径型导线或采用分裂导线配合新型材料时，电晕起始电压显著提高，从而大幅减少电晕损耗。这不仅提升了输电效率，还改善了周边的电磁环境质量，满足了城市及周边居民区对环保的严格要求。对于特高压线路，新型导线的广泛应用是降低线路总损耗、提升系统稳定性的关键措施。

（三）提升输送容量与缓解走廊资源约束

输电效率不仅体现在损耗降低，更体现在单位走廊资源下的输送能力提升。新型导线的高载流量特性，使得在原有杆塔、基础及通道条件下，无需新建线路即可实现输送容量的倍增。例如，将传统的 ACSR 导线替换为同规格的 ACCC 导线，输送容量可翻倍。这意味着在土地资源日益紧张、环保审批趋严的背景下，利用新型导线进行“内涵式”扩容，避免了征用新土地的巨大成本和漫长的审批周期，极大地提升了电网建设的整体

效率和经济效益。

三、电力设计中的选型策略与关键技术难点

(一) 基于全寿命周期成本的综合选型模型

在电力设计中,新型导线的选型不能仅看初始投资,必须建立基于全寿命周期成本(LCC)的综合评价模型。虽然新型导线的单位造价通常高于传统导线,但考虑到其带来的增容效益、损耗降低收益、运维成本减少及避免扩建走廊的隐性成本,其长期经济性往往更优。设计人员需结合项目所在地的电价水平、负载增长率、线路长度及运行年限,构建动态经济模型,计算净现值(NPV)和内部收益率(IRR),科学决策是否采用新型导线。对于重载线路、城市核心区及高电价区域,新型导线的投资回报周期明显缩短,应优先推荐。

(二) 配套金具与杆塔承载力的适应性设计

新型导线的应用并非简单的“换线”,往往涉及整个线路系统的重新匹配。首先,新型导线的机械强度、弹性模量及热膨胀系数与传统导线差异巨大,原有的悬垂线夹、耐张线夹及防震锤可能无法适配,甚至存在损伤导线的风险。设计时必须选用专用的防磨损、防电腐蚀金具,并重新计算断线张力及不平衡张力。其次,虽然新型导线自重轻,但其张力可能更大,需校核杆塔的纵向承载力及绝缘子串的受力情况。对于耐热导线,还需考虑高温下的弧垂变化对电气间隙的影响,确保满足安全距离要求。

(三) 施工工艺创新与质量控制体系

新型导线的施工技术要求远高于传统导线。例如,ACCC导线严禁弯曲半径过小,否则会导致碳纤维芯材断裂;耐热铝合金导线在压接时需严格控制压接模具和压力,防止铝股软化。设计阶段应制定详细的专项施工方案,明确施工机具、工艺流程及验收标准。同时,建立严格的质量控制体系,引入在线监测技术,对导线的张力、弧垂及压接质量进行实时监控,确保施工质量符合设计要求。此外,还需加强对施工人员的专业技能培训,提升其对新型材料特性的认知和操作技能。

四、面临的挑战与未来发展趋势展望

(一) 标准化体系尚不完善与成本制约

尽管新型导线技术已取得长足进步,但相关的国家标准、行业标准及设计规范尚不完善,缺乏统一的测试方法和验收标准,导致工程应用中存在标准不一、互认困难的问题。此外,高性能碳纤维材料及超导材料的生产成本依然较高,限制了其在普通线路中的大规模推广。未来亟需加强产学研合作,加快标准体系建设,推动规模化生产以降低制造成本,促进新型导线的普及。

(二) 智能化运维与状态感知技术的融合

随着新型导线在电网中的比例增加,其运维管理面临新的挑战。传统的人工巡检难以实时掌握新型导线的运行状态。未来应将新型导线与智能传感技术深度融合,开发集成温度、应

力、振动及弧垂监测功能的智能导线或配套传感器,构建全天候、全覆盖的状态感知网络。利用大数据分析与人工智能算法,实现对导线健康状态的预测性维护,及时发现并消除潜在隐患,延长导线使用寿命。

(三) 向极端环境与多场景应用拓展

未来,新型导线的应用场景将更加多元化。一方面,在极寒、高海拔、强腐蚀等极端环境下,研发适应性强、耐候性好的特种新型导线将成为重点;另一方面,结合分布式能源接入及微电网建设,开发适用于配电网的小型化、模块化新型导线也将成为趋势。同时,随着超导技术的成熟,高温超导电缆有望在城市地下管廊、数据中心等高密度用电区域率先实现商业化应用,引领电力传输技术的又一次革命。

结语

新型导线材料的应用是电力工业技术进步的重要标志,也是提升输电效率、构建新型电力系统的关键支撑。从耐热铝合金到碳纤维复合芯,再到高温超导,每一种新材料的出现都带来了输电能力的飞跃和能效水平的提升。本文通过系统综述表明,科学合理地选择和应用新型导线,不仅能有效解决传统输电线路的瓶颈问题,降低网损,节约资源,还能显著提升电网的安全性和可靠性。然而,新型导线的全面推广仍面临标准缺失、成本高昂及施工复杂等挑战。未来,随着材料科学的突破、制造工艺的改进及标准体系的完善,新型导线必将在更广阔的领域发挥重要作用,为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系贡献强大动力。电力设计人员应紧跟技术前沿,勇于创新实践,推动新型导线技术在工程中的深度应用,共同谱写电力事业高质量发展的新篇章。

[参考文献]

- [1]李立涅,罗兵,董旭柱,等.高电压技术发展现状及展望[J].高电压技术,2025,51(08):3682-3720.DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20251193.
- [2]陈新岗,谭悦,赵蕊,等.基于内外环磁芯结构的输电线路型感应取能CT设计[J].磁性材料及器件,2022,53(04):48-54.DOI:10.19594/j.cnki.09.19701.2022.04.009.
- [3]陈明哲.10kV配电网带电作业并沟线夹遥控电动安装工具的研制[D].合肥工业大学,2022.DOI:10.27101/d.cnki.ghfgu.2022.001014.
- [4]于玉铭,陈常涛,邹振宇,等.负载对CT取能的影响分析及实验研究[J].中国电力,2016,49(04):97-102.
- [5]刘嵘,贾然,周超,等.几起输电线路复合相间间隔棒闪络原因分析[J/OL].电瓷避雷器,1-13[2026-05-06].https://link.cnki.net/urlid/61.1129.TM.20260423.0948.002.
- [6]吴保华.分布式光伏并网功率超标治理策略研究[D].沈阳农业大学,2025.DOI:10.27327/d.cnki.gshnu.2025.001938.