

架空与电缆线路的受力特性及安全提升技术研究

杜俊兴

广东 广州 510000

DOI:10.61369/WCEST.2025100013

摘要：本文围绕电力工程中电缆相关问题展开。分析电缆与绝缘横担力学特性，介绍电缆载流量计算、静力学与动力学分析方法，探讨导体抗拉强度、绝缘横担结构性能、新型导体材质（AACSr）强度-导电率平衡等受力影响因素，阐述线路设计优化策略、高强铝合金与AACSr导体开发等优化技术，指出分布式光纤传感等监测技术及数字孪生平台开发的意义，同时说明研究现状与发展方向。

关键词：电缆受力分析；电力工程优化；监测技术

Cable Stress Analysis and Its Influence on Power Engineering

Du Junxing

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : This paper focuses on cable related issues in power engineering. It analyzes the mechanical characteristics of cables and insulated cross-arms, introduces cable ampacity calculation, static and dynamic analysis methods, discusses the stress-influencing factors such as conductor tensile strength, structural performance of insulated cross-arms, and strength-conductivity balance of new conductor materials (AACSr), expounds optimization technologies including line design optimization strategies and development of high-strength aluminum alloy and AACSr conductors, points out the significance of monitoring technologies such as distributed optical fiber sensing and the development of digital twin platforms, and describes the research status and development direction.

Keywords : cable stress analysis; power engineering optimization; monitoring technology

引言

《国家电网公司电力工程电缆设计规范（2023年版）》强调了保障电力工程稳定运行的重要性。在架空线路与电缆线路相关研究中，导线力学特性及电缆载流量、受力分析等方面均关乎电力工程安全。如解析导线悬挂状态需精准计算各类荷载，电缆载流量计算依赖热平衡方程等。风振、舞动、温度、机械载荷等多种因素影响电缆受力，绝缘横担的力学响应及AACSr等新型导体材质的性能表现也不容忽视。同时，动态增容等优化技术可提升电力工程性能。当前虽存在温度-机械耦合效应研究瓶颈，但借助政策指导，结合新兴技术有望突破局限，推动电力行业高质量发展。

一、电缆受力理论基础与载流量特性

（一）架空线路导线力学特性

在架空线路中，电缆与绝缘横担的协同力学特性至关重要。解析导线悬挂状态时，垂直荷载计算模型需考虑导线自身重力，这直接影响导线在垂直方向的受力情况。水平张力计算模型则与导线两端的支撑条件、档距及绝缘横担的承载能力等因素相关，精准计算水平张力对保证导线稳定运行意义重大^[1]。风荷载与冰载对导线力学特性影响显著，其影响系数的确定方法复杂且关键。风荷载影响系数要综合考虑风速、风向、地形地貌等因素，通过大量试验和理论分析得出。冰载影响系数则与覆冰厚度、密度、形状等密切相关，需根据不同地区的气候条件和线路实际情况

精准确定，从而全面评估其对导线力学特性的影响，为电力工程的稳定运行提供坚实理论支撑。

（二）电缆线路载流量计算原理

在电缆线路载流量计算方面，IEC 60287标准中的热平衡方程是重要依据^[2]。该方程精准地描述了电缆运行时的热平衡状态。其中，导体温度、介质损耗与环境热阻之间存在紧密关系。导体通过电流会产生焦耳热，导致温度升高，其产热功率与电流平方、导体电阻相关。介质损耗也会产生一定热量，影响整体热平衡。而环境热阻则决定了电缆向周围环境散热的能力。这些因素共同构成热平衡方程中的各项。通过该方程的表达式，能清晰量化三者关系，即导体温度受介质损耗与环境热阻的共同作用，介质损耗产生的热量以及环境热阻对散热的限制，都直接影响导体

最终达到的稳定温度，进而决定电缆的载流量。

二、电缆受力分析方法与技术

(一) 静力学分析方法

静力学分析方法是电缆受力分析的重要手段。通过构建线路张力弧垂计算数学模型，可精确描述电缆在不同工况下的力学形态。在该模型中，考虑导地线自身重力、风荷载等多种荷载作用，同时纳入绝缘横担的支撑约束特性，运用力学原理来确定电缆的张力与弧垂关系。分析导地线悬挂点约束条件下的应力应变分布特性也至关重要。悬挂点作为电缆的关键支撑部位，其约束条件直接影响电缆的受力状态。借助静力学理论，结合材料力学知识，深入探究应力应变在悬挂点附近的分布规律，从而全面了解电缆在该区域的力学响应^[3]。这种分析方法为评估电缆在实际运行中的力学性能提供了坚实的理论基础，对保障电力工程的安全稳定运行具有重要意义。

(二) 动力学仿真技术

动力学仿真技术在电缆受力分析中发挥着关键作用。借助ANSYS建立三维有限元模型，能够有效研究复杂荷载下电缆与绝缘横担的动态协同受力机制^[4]。通过在软件中精确设置电缆的材料属性、几何参数等，模拟真实环境下的风荷载、舞动激励等条件。该模型可以动态呈现电缆在不同工况下的力学响应，如应力、应变分布以及位移变化。例如，可直观观察到风振时电缆局部应力集中区域，以及舞动过程中电缆各部位受力随时间的波动情况。动力学仿真技术为深入理解电缆在复杂环境下的动态受力特性提供了有力手段，有助于更精准地评估其对电力工程稳定性的影响。

三、电缆受力影响因素研究

(一) 温度效应作用机制

1. 导体温升与机械强度退化

电缆运行过程中，导体因电流通过产生电阻热进而温升。随着负载率的变化，导体温度改变，其内部微观结构也随之变动，进而影响抗拉强度。在高负载率下，导体温度快速上升，原子热振动加剧，晶格缺陷增多，导致位错运动更容易发生，使导体的抗拉强度下降。分析不同负载率下导体抗拉强度变化规律可知，两者呈现非线性关系。同时，温度并非瞬间作用，而是存在时间累积效应。建立温度-时间累积效应数学模型^[5]，该模型综合考虑温度随时间的变化以及对导体机械性能的持续影响，能够更准确地描述导体在长期运行中的机械强度退化情况，为评估电缆在不同温度条件下的使用寿命和可靠性提供有力依据。

2. 绝缘材料热老化特性

在电缆受力影响因素研究中，温度效应作用机制下的绝缘材料热老化特性至关重要。XLPE材料作为电缆常用绝缘材料，其热膨胀系数与弹性模量具有显著的温度依存性。随着温度变化，XLPE材料热膨胀系数改变，在电缆运行过程中，温度升高会使材

料膨胀，导致内部结构产生形变。同时，弹性模量也受温度影响而变化，这进一步改变材料抵抗形变的能力。材料形变会引发结构应力改变，通过研究XLPE材料热膨胀系数与弹性模量的温度依存性，可量化这种材料形变对结构应力的影响，为准确分析电缆受力状况提供关键依据，帮助深入了解电缆在温度效应下的老化特性，进而优化电力工程电缆铺设与运行维护等工作^[6]。

(二) 机械载荷复合影响

1. 交变载荷疲劳特性

在电缆受力影响因素研究的机械载荷复合影响中，交变载荷疲劳特性不容忽视。风振等交变载荷作用下，电缆导体不断经历拉伸与压缩等循环应力。借助Wöhler曲线，可深入评估导体在风振循环载荷下微观裂纹的扩展规律^[7]。该曲线能直观呈现应力水平与疲劳寿命之间的关系，当电缆承受不同幅值和频率的风振交变载荷时，依据Wöhler曲线可分析导体内部微观结构变化。随着交变载荷循环次数增加，导体内部微裂纹逐渐萌生、扩展，最终可能导致导体性能下降甚至断裂，严重影响电力工程中电缆的安全稳定运行，因此研究交变载荷疲劳特性对保障电缆可靠工作至关重要。

2. 绝缘横担力学响应

绝缘横担的力学响应在电缆受力分析中至关重要。相较于传统钢横担，复合材料制成的绝缘横担因自身材质特性，对线路垂直荷载分布呈现出不同影响特性^[8]。绝缘横担的结构形式、尺寸参数会改变其力学响应。例如，不同的横担长度和截面形状，在承受垂直荷载时，应力和应变分布不同，进而影响电缆所受拉力。此外，绝缘横担与杆塔的连接方式也会产生作用，刚性连接和柔性连接在相同垂直荷载下，传递给电缆的力有差异。环境因素也不可忽视，温度变化会导致绝缘横担材料性能改变，影响其力学响应，最终影响电缆受力，所以在分析电缆受力影响因素时，绝缘横担力学响应中的诸多方面都需深入考量。

四、电力工程优化技术研究

(一) 线路设计优化策略

1. 动态增容技术应用

在电力工程优化技术研究的线路设计优化策略中，动态增容技术应用至关重要。基于实时气象数据的动态载流量控制算法在智能电网应用广泛。该算法依据实时获取的气象信息，如温度、风速、日照等，精准计算电缆的动态载流量。通过这种方式，可充分挖掘电缆的输电潜力，避免因保守设计造成的资源浪费。比如在夏季高温时段，传统设计可能限制电缆输电能力，但借助该算法，根据实际气象条件调整载流量，能实现电缆的安全高效运行。同时，这一技术与智能电网相融合，实现对电力系统的智能调控，提升电力供应的稳定性与可靠性^[9]。

2. 张力分段调节技术

在电力工程线路设计中，张力分段调节技术至关重要。提出差异化张力区段设计方法，能有效降低转角度数较大杆塔的横向荷载。由于在不同的线路段，电缆所受张力存在差异，通过对线

路进行合理分段，依据各段实际情况精准设定张力参数，可使杆塔受力更为均匀合理。比如在转角度数较大区域，杆塔横向荷载往往过大，而此技术能够针对该特殊地段，调整电缆张力分布，优化杆塔受力状态。如此一来，不仅可增强线路的稳定性与安全性，还能减少杆塔因受力不均而产生的损坏风险，进而降低维护成本与潜在安全隐患，为电力工程的稳定运行提供有力保障^[10]。

（二）材料改良创新研究

1. 高强铝合金导体开发

在高强铝合金导体开发过程中，对6201-T81与AACSR导体的强度-导电率平衡特性进行对比意义重大。6201-T81铝合金导体凭借其独特的成分与热处理工艺，展现出较高的强度性能，能更好地应对电缆在复杂环境下所受的拉力。然而，在导电率方面，它与传统的AACSR导体存在差异。AACSR导体以钢芯为支撑，外层铝绞线负责导电，在导电率上具有一定优势。通过深入对比两者强度-导电率平衡特性，有助于明确不同应用场景下的最佳选择。若在长距离输电且环境条件恶劣区域，可能更注重导体强度，6201-T81铝合金导体或许更适用；而在对导电率要求极高，环境相对温和的区域，AACSR导体可能是更好的选择。

2. 复合绝缘材料应用

在电力工程中，复合绝缘材料应用意义重大。以硅橡胶复合横担用于500kV线路为例，对其机械性能与电气特性匹配度的评估极为关键。从机械性能看，需考量横担在不同气象条件、线路张力等作用下的强度、韧性及抗疲劳能力，确保能长期稳定承载线路重量与外力。在电气特性方面，关注其绝缘电阻、介电常数、耐电晕及沿面闪络特性等，保证良好的绝缘性能，防止电气事故。只有当机械性能与电气特性达到高度匹配，硅橡胶复合横担才能在500kV线路中可靠运行，提升电力工程整体稳定性与安全性，降低维护成本，延长使用寿命，推动电力工程技术的进步与发展。

（三）智能监测系统构建

1. 分布式光纤传感技术

分布式光纤传感技术在电缆应力场监测方面具有独特优势，其中布里渊散射光时域分析在电缆应力场三维重构中发挥着重要

作用。该技术基于布里渊散射效应，当激光在光纤中传输时，光纤与周围介质相互作用会产生布里渊散射光，其频率会随光纤所受应力变化。通过对散射光频率的精确测量与分析，可获取光纤沿线应力分布信息。利用该原理，结合先进算法与测量设备，能够实现对电缆应力场的三维重构，精准定位应力集中区域与变化趋势。这为电力工程中电缆运行状态评估提供了可靠依据，有助于提前发现潜在故障隐患，从而采取针对性措施优化电力工程，保障电力系统稳定、安全运行。

2. 数字孪生平台开发

在电力工程优化技术研究中，数字孪生平台开发至关重要。通过采集电缆实际运行中的各类数据，如受力数据、环境参数、运行状态等，利用先进的建模与仿真技术，在虚拟空间构建与实际电缆线路高度相似的数字孪生模型。该模型能精准模拟电缆在不同气象条件、负载工况及材料特性下的力学行为，直观呈现电缆的受力分布、形变情况等。借助数字孪生平台，运维人员可提前预测电缆可能出现的问题，评估不同工况对电缆的影响，从而为电力工程优化提供准确依据，优化电缆线路设计与运维策略，提高电力系统运行的安全性与可靠性。

五、总结

电缆受力分析对电力工程的安全稳定运行至关重要。通过系统归纳电缆受力分析的关键技术指标，我们得以清晰了解电缆在不同工况下的力学特性。各类优化措施在提升电力工程经济性与可靠性方面成效显著，为电力系统的高效运行提供了有力支撑。然而，当前在温度-机械耦合效应研究中，仍存在技术瓶颈，这限制了对电缆复杂运行环境下力学行为的精准把握。值得期待的是，人工智能在电缆状态评估中的应用前景广阔，有望借助其强大的数据处理与分析能力，突破现有局限，实现对电缆状态的实时、精准评估，为电力工程的智能化运维提供创新途径，推动电力行业的高质量发展。

参考文献

- [1] 吴振贤.沥青路面层间约束状态及其对结构受力的影响分析 [D].东南大学, 2022.
- [2] 黄文正.轴线与高程偏差对钢管混凝土拱桥受力影响分析研究 [D].重庆交通大学, 2022.
- [3] 张兴.电压波形对电缆绝缘击穿特性的影响研究 [D].南京航空航天大学, 2021.
- [4] 张伟.梁式转换层洞口设置对其受力性能影响的分析研究 [D].太原理工大学, 2021.
- [5] 黄艺英.基于有限元耦合模型的谐波对电缆及其接头影响研究及试验验证 [D].华南理工大学, 2021.
- [6] 周震海.矩形开孔对电缆排管工井顶板受力的影响 [J].建筑技术开发, 2021, 48(22):141-143.
- [7] 唐凯, 陈锋, 陆应辉, 等.水平井桥射联作电缆及其弱点的受力分析 [J].测井技术, 2021, 45(4):445-450.
- [8] 林颖, 袁铜森, 郑辉.发热电缆融冰温度荷载对混凝土T梁受力的影响 [J].公路工程, 2021, 46(6):81-85, 91.
- [9] 杨武, 李传武, 杨东勇.电力工程电缆穿河冲刷计算分析 [J].电力系统装备, 2022(1):75-77.
- [10] 唐万春.电力工程中配电电缆敷设技术分析 [J].模型世界, 2023(19):77-79.