

# 电力输电线路间隔棒多体非线性性能分析

于 奇

内蒙古送变电有限责任公司 内蒙古 呼和浩特 010020

**摘要：**文章聚焦于电力输电线路间隔棒的多体非线性性能分析，通过综合运用有限元分析、多体动力学理论及实验验证等手段，深入探讨间隔棒在复杂工况下的力学行为。研究揭示间隔棒的材料、结构、接触与连接等因素对其性能的影响机制，并提出针对性的优化策略。结果表明，优化后的间隔棒在承载能力、稳定性及抗疲劳性能方面均有显著提升，为输电线路的安全稳定运行提供有力保障。

**关键词：**电力输电线路；间隔棒；多体非线性；性能分析；结构力学

## 1 电力输电线路间隔棒的作用

电力输电线路中的间隔棒是一种至关重要的防护金具。其主要作用是固定分裂导线间的间距，确保导线束保持相对位置，以满足电气性能要求，并降低表面电位梯度。在线路正常运行时，间隔棒能够防止导线因微风振动或电磁力而相互鞭击，从而减少导线间的磨损和潜在的短路风险，在短路情况下，间隔棒能确保导线束间不会因电磁力产生相互吸引碰撞，或即使发生瞬间的吸引碰撞，事故消除后也能迅速恢复正常状态。间隔棒通常安装在档距中间，每隔50~60m设置一个，以确保其防护效果。根据工作特性，间隔棒可分为阻尼间隔棒和非阻尼间隔棒两类，前者在减少导线振动方面表现出更优异的性能。间隔棒在电力输电线路中扮演着不可或缺的角色，其可靠性和耐用性对于保障电网的安全稳定运行至关重要。

## 2 多体非线性性能分析在间隔棒设计中的应用价值

多体非线性性能分析在间隔棒设计中具有重要的应用价值。通过这种方法，可以对间隔棒在复杂工况下的力学行为进行精确模拟和分析，从而揭示其静态和动态性能。例如，在导线覆冰或短路等极端条件下，间隔棒需要承受巨大的拉压载荷和向心力载荷，而多体非线性分析能够考虑材料非线性和接触非线性等因素，准确预测间隔棒的变形、应力和失效模式<sup>[1]</sup>。这不仅为间隔棒的设计提供了科学依据，还能够优化其结构参数，提高整体的可靠性和耐久性。因此多体非线性性能分析已成为间隔棒设计和改进的重要手段，有助于推动输电线路系统的精细化仿真分析和优化设计。

## 3 间隔棒多体非线性静力分析

### 3.1 静力分析模型建立

间隔棒作为电力输电线路的关键组件，其设计需确保在各种工况下均能保持结构完整性和功能有效性。进

行多体非线性静力分析是评估间隔棒性能的重要手段。在建立静力分析模型时，首先需根据间隔棒的实际结构，利用先进的计算机辅助设计（CAD）和有限元分析（FEA）软件，构建高精度的三维模型。该模型应详细包括间隔棒的各个部件，如夹持件、连接杆和阻尼器等，以及它们之间的连接方式和材料属性。在模型建立过程中，需特别注意以下几点：一是确保模型的几何精度，以准确反映间隔棒的实际形状和尺寸；二是合理划分有限元网格，在保证计算精度的基础上提高计算效率；三是准确设置边界条件和加载方式，以模拟间隔棒在实际工作中的受力状态，还需考虑导线与间隔棒的相互作用，以及可能存在的风载、温度变化等外部因素，使模型更加贴近实际情况。

### 3.2 材料非线性分析

材料非线性是间隔棒静力分析中不可忽视的重要因素。由于间隔棒通常采用高强度钢材或合金材料制成，这些材料在受力过程中会表现出明显的非线性特性，如屈服、塑性变形和断裂等。在静力分析中，必须考虑材料的非线性本构关系，即应力-应变关系。为实现材料非线性分析，首先获取间隔棒所用材料的力学性能参数，如弹性模量、屈服强度、塑性应变等。然后，将这些参数输入到有限元分析软件中，以建立材料的非线性本构模型。在分析过程中，软件会根据材料的非线性特性，自动调整应力-应变关系，从而更准确地预测间隔棒的变形和应力分布。另外，还需考虑材料的应变硬化和应变率敏感性等高级非线性特性，以进一步提高分析的准确性。

### 3.3 接触非线性分析

接触非线性是间隔棒静力分析中的另一个重要方面。由于间隔棒通常由多个部件组成，这些部件在受力过程中会发生相互接触和摩擦。导线与间隔棒之间也存在接触问题。这些接触现象会导致间隔棒的受力状态发

生变化, 从而影响其整体性能。为处理接触非线性问题, 需采用先进的接触算法和摩擦模型, 在有限元分析软件中, 可以设置接触对来模拟部件之间的接触行为, 并定义接触面的摩擦系数和接触刚度等参数。在分析过程中, 软件会根据接触面的变形和相对运动情况, 自动调整接触力和摩擦阻力, 从而更准确地预测间隔棒的受力状态和变形情况。还需考虑接触面的间隙和润滑等因素, 以进一步提高分析的准确性。

### 3.4 静力分析结果与讨论

通过多体非线性静力分析, 我们可以获得间隔棒在复杂工况下的详细受力状态和变形情况。这些结果对于评估间隔棒的性能和优化设计具有重要意义。可以根据分析结果, 判断间隔棒在特定工况下的承载能力和安全裕度。例如, 在导线覆冰或短路等极端条件下, 间隔棒需要承受巨大的拉压载荷和向心力载荷。通过静力分析, 可以准确预测间隔棒在这些条件下的变形和应力分布, 从而评估其承载能力和可靠性。可以根据分析结果, 优化间隔棒的结构参数和材料选择<sup>[2]</sup>。例如, 通过调整夹持件的形状和尺寸, 可以减小应力集中现象; 通过选择合适的材料和热处理工艺, 可以提高间隔棒的强度和耐久性。这些优化措施可以显著提高间隔棒的整体性能, 降低故障率和维护成本。还可以将静力分析结果与其他分析方法相结合, 如动态分析、疲劳分析等, 以更全面地评估间隔棒的性能。例如, 通过动态分析可以预测间隔棒在风载或地震等动态载荷下的响应情况; 通过疲劳分析可以评估间隔棒在长期工作过程中的疲劳寿命和可靠性。这些分析结果可以为间隔棒的设计、制造和维护提供有力的技术支持。

## 4 电力输电线路间隔棒多体非线性动力学分析

### 4.1 动力学分析模型建立

在电力输电线路中, 间隔棒的多体非线性动力学分析是评估其在动态载荷作用下性能的关键步骤。为了进行这一分析, 需要建立一个精确的动力学模型。这个模型不仅要反映间隔棒本身的几何结构和材料属性, 还需考虑输电线路的动态特性, 如导线的弹性、阻尼以及风载、温度变化等外部激励因素。在模型建立过程中, 采用先进的计算机辅助设计 (CAD) 和有限元分析 (FEA) 技术, 结合多体动力学理论, 构建间隔棒及其与导线相互作用的三维动态模型。模型中, 间隔棒的各个部件, 如夹持件、连接杆和阻尼器等, 都被详细表示, 并赋予相应的材料属性和连接条件。同时采用接触算法来处理间隔棒与导线之间的相互作用, 确保模型能够准确反映实际工作中的动态行为。为了模拟外部激励因

素, 在模型中引入风载、温度变化等动态载荷, 并设置相应的边界条件和初始条件。这些条件的设置基于实际输电线路的运行环境和历史数据, 以确保分析的准确性和实用性。

### 4.2 动力学响应分析

在动力学模型建立的基础上, 进行了间隔棒的动力学响应分析。这一分析旨在评估间隔棒在外部激励作用下的动态行为, 包括位移、速度和加速度等响应参数。通过仿真计算, 获得了间隔棒在不同工况下的动力学响应曲线。这些曲线清晰地展示了间隔棒在风载、温度变化等外部激励作用下的位移、速度和加速度变化。注意到, 在风载作用下, 间隔棒会发生明显的振动, 而温度变化则会影响其整体刚度和稳定性。此外还分析了不同激励频率和幅值对间隔棒动力学响应的影响。结果显示, 当激励频率接近间隔棒的固有频率时, 会发生共振现象, 导致间隔棒的振动幅度显著增大。这一发现对于优化间隔棒的设计和减少振动对输电线路的影响具有重要意义。

### 4.3 稳定性与振动特性分析

在动力学响应分析的基础上, 进一步对间隔棒的稳定性和振动特性进行了深入分析。这一分析旨在评估间隔棒在动态载荷作用下的稳定性表现, 以及振动对其性能的影响。通过分析间隔棒的振动模态和频率响应函数, 获得了其振动特性, 结果显示, 间隔棒具有多个振动模态, 每个模态对应不同的振动频率和振型<sup>[3]</sup>。在外部激励作用下, 这些模态会被激发并产生相应的振动响应。同时还对间隔棒的稳定性进行评估。通过计算其临界失稳载荷和失稳模态, 确定了间隔棒在不同工况下的稳定性边界。这一边界对于指导间隔棒的设计和防止其在动态载荷作用下发生失稳具有重要意义。

### 4.4 动力学分析结果与讨论

通过多体非线性动力学分析, 获得了间隔棒在复杂动态载荷作用下的详细性能表现。这些结果对于评估间隔棒的性能、优化设计以及指导实际输电线路的运行和维护具有重要意义。首先, 根据动力学响应分析结果, 评估了间隔棒在不同工况下的位移、速度和加速度响应。这些响应参数为评估间隔棒的动态性能和优化其设计提供了重要依据。其次, 通过稳定性和振动特性分析, 确定间隔棒的临界失稳载荷和失稳模态, 以及振动模态和频率响应函数。这些结果为指导间隔棒的设计、防止其在动态载荷作用下发生失稳和振动提供有力支持。最后, 将动力学分析结果与实际情况相结合, 提出优化间隔棒设计的建议。这些建议为优化间隔棒的设计

和提高其性能提供有益参考。

## 5 电力输电线路间隔棒多体非线性性能优化

### 5.1 材料与结构设计优化

在电力输电线路间隔棒的多体非线性性能优化中,材料与结构设计的优化是核心环节。间隔棒作为确保输电线路稳定运行的关键组件,其性能直接关系到线路的可靠性和安全性。针对间隔棒的材料选择和结构设计进行深入研究,是实现其性能优化的重要途径。在材料选择方面,关注高强度、耐腐蚀、耐磨损且具有良好的韧性的材料。通过对比分析不同材料的力学性能、疲劳寿命以及成本效益,我们为间隔棒选择了最优的材料组合。同时,还在夹持件等关键部位使用了耐磨损材料,以延长间隔棒的使用寿命。在结构设计方面,运用多体非线性有限元分析方法,对间隔棒的几何形状、尺寸以及各部件之间的连接方式进行优化。通过模拟不同工况下的受力状态,发现合理的结构设计能够有效降低应力集中现象,提高间隔棒的整体刚度和稳定性。此外还优化了连接杆的设计,使其在满足强度要求的同时,具有更好的柔韧性和抗疲劳性能。

### 5.2 接触与连接优化

接触与连接是间隔棒多体非线性性能优化的另一个关键方面。在输电线路中,间隔棒与导线之间的接触和连接状态直接影响其传力效率和稳定性。因此对接触面的处理和连接方式的优化是实现间隔棒性能提升的重要环节。在接触面处理方面,采用先进的表面处理技术,如喷丸强化、渗碳淬火等,以提高接触面的硬度和耐磨性。这些技术不仅延长接触面的使用寿命,还减少因摩擦而产生的热量和磨损,有利于保持间隔棒与导线之间的良好接触状态<sup>[4]</sup>。在连接方式优化方面,考虑了多种连接方式,如焊接、螺栓连接和铆接等,并通过对比分析不同连接方式的优缺点,选择最适合间隔棒实际应用的连接方式。同时还优化了连接杆与夹持件之间的连接方式,使其具有更好的抗疲劳性能和传力效率。

### 5.3 综合考虑与应用前景

在电力输电线路间隔棒的多体非线性性能优化中,需要综合考虑材料、结构、接触与连接等多个方面的因素。通过深入分析这些因素之间的相互作用和影响,我们能够制定出更加全面和有效的优化方案。优化后的间隔棒在性能上得到了显著提升,不仅具有更高的承载能力和稳定性,还具有良好的抗疲劳性能和耐腐蚀性。这些性能的提升使得间隔棒能够更好地适应复杂多变的输电线路环境,确保线路的可靠运行。从应用前景来看,优化后的间隔棒具有广阔的市场前景和显著的经济效益。一方面,随着电力行业的发展和输电线路的不断升级,对间隔棒的性能要求也越来越高。优化后的间隔棒能够更好地满足这些要求,提高线路的可靠性和安全性。另一方面,优化后的间隔棒具有更长的使用寿命和更低的维护成本,能够为电力企业节省大量的运营费用。

### 结束语

综上所述,电力输电线路间隔棒的多体非线性性能分析对于确保线路的安全稳定运行具有重要意义。通过深入研究和优化设计,不仅能够提升间隔棒的整体性能,还能为电力行业的发展和输电线路的升级提供科学依据和技术支持。未来,随着技术的不断进步和应用的深入,间隔棒的性能优化将更具挑战性和创新性。

### 参考文献

- [1]刘竹丽,王祝新,周浩,等.电力输电线路间隔棒多体非线性性能分析[J].机械强度,2019,41(1):221-225. DOI:10.16579/j.issn.1001.9669.2019.01.035.
- [2]李相栋,孙洗凡,李清泉,等.500kV线路间隔棒断裂原因分析及预防措施[J].黑龙江电力.2023,45(4). DOI:10.13625/j.cnki.hljep.2023.04.010.
- [3]曹先慧,欧阳克俭,陈军君,等.220kV三跨输电线路子导线间隔棒脱落原因分析[J].湖南电力.2020,(4). DOI:10.3969/j.issn.1008-0198.2020.04.009.
- [4]张鸿武,冯楠楠,刘蕊,等.核电站主变压器设备线夹断裂原因分析[J].机械强度.2022,44(5).DOI:10.16579/j.issn.1001.9669.2022.05.012.