

面向智能电网的电力金具设计优化与可靠性研究

吕迪

中国电建集团四平线路器材有限公司, 吉林 四平 136000

摘 要： 电力金具是连接和固定电力系统中各类电气设备、导线、绝缘子等的关键部件，它在电力传输和分配过程中起着不可或缺的作用。当前在智能电网环境下，电力金具不仅要能够满足传统的机械和电气性能要求，并且还需要适应智能电网的特殊运行条件，如更高的电压等级、更大的传输容量、复杂的电磁环境以及与智能监测系统的协同工作等。因此优化电力金具设计与提高其可靠性，对于保障智能电网的安全稳定运行是至关重要的。

关 键 词： 智能电网；电力金具；设计优化；可靠性

Design Optimization and Reliability Research of Power Fittings for Smart Grid

Lv Di

China Electric Power Construction Group Siping Line Material Co., Ltd. Siping, Jilin 136000

Abstract： Power fittings are key components that connect and fix various electrical equipment, conductors, ins, etc. in the power system, playing an indispensable role in the process of power transmission and distribution. In the current context of smart grids, power fittings not only to meet the traditional mechanical and electrical performance requirements, but also need to adapt to the special operating conditions of smart grids, such as higher voltage levels, larger transmission capacity complex electromagnetic environment, and coordinated work with intelligent monitoring systems. Therefore, optimizing the design of power fittings and improving their reliability are crucial for ensuring the safe and stable operation smart grids.

Keywords： smart grid; power fittings; design optimization; reliability

引言

智能电网作为现代电力系统的发展方向，当中融合了先进的信息技术、通信技术和电力技术，因此具有高度自动化、信息化和互动化的特点。其发展旨在提高电力系统的安全性、可靠性、经济性和环保性，以及满足日益增长的电力需求和能源可持续发展的要求。

一、智能电网对电力金具的要求

（一）电气性能要求

1. 高电压绝缘性能

智能电网之中不断提高的电压等级，对于电力金具的绝缘性能提出了更高要求^[1]。即金具必须具备良好的绝缘材料和合理的绝缘结构，才能够防止电网在高电压下发生绝缘击穿、沿面放电等现象，以确保电力系统的安全运行。

2. 低电阻与低能耗

为了降低电力传输过程中的能量损耗，电力金具应具有较低的电阻，才能有效地减少发热和功率损耗。对此应采用优质导电材料和优化的接触结构，如此就能够降低金具的电阻，达到提高电力传输效率的目的。

（二）机械性能要求

1. 高强度与高稳定性

智能电网中的电力金具需要承受导线的张力、风力、覆冰等

各种机械载荷，同时其还要适应不同的地理环境和气候条件。因此金具必须具有足够的强度和稳定性，才能够确保电网在长期运行过程中不发生变形、断裂等损坏现象^[2]。

2. 耐疲劳性能

由于电力系统的运行会使金具承受周期性的载荷作用，此时极易导致金具产生疲劳损伤。而提高金具的耐疲劳性能，即选择合适的材料和制造工艺，即能延长金具的使用寿命，从而减少维护成本。

（三）智能化要求

1. 与智能监测系统的融合

智能电网中的电力金具需要具备与智能监测系统相融合的能力，才能够实时地采集自身的运行状态信息，如温度、应力、振动等，并且将这些信息传输给监测系统，以便于及时地发现潜在的故障隐患，进而实现状态检修。

2. 自适应调节功能

对于实践来说，部分电力金具应具备自适应调节功能，即自

身能够根据电网运行状态的变化自动地调整自身的参数。如张力调节金具可根据导线的热胀冷缩自动调整张力，以保证导线的安全运行。

二、现有电力金具设计存在的问题

（一）材料问题

1. 材料性能不足

因为一些传统的电力金具采用的材料在强度、耐腐蚀性、导电性等方面存在一定的局限性，所以其难以满足智能电网对金具高性能的要求。例如某些金属材料在恶劣环境下容易发生腐蚀，此时将会影响金具的使用寿命和可靠性。

2. 材料选择不合理

在金具设计过程当中，有时会存在材料选择不合理的情况。其原因在于工作人员没有充分地考虑金具的实际使用工况和性能要求，最终导致金具在运行过程中出现过早损坏等问题。

（二）结构设计问题

1. 结构不合理导致应力集中

部分电力金具的结构设计不合理，导致在承受载荷时会出现应力集中现象，进而降低了金具的强度和可靠性。如一些连接金具的连接处设计不合理，进一步导致局部应力过大，最终将会引发断裂。

2. 缺乏对复杂工况的考虑

现有金具结构设计往往没有全面地考虑智能电网中复杂的运行工况，如强电磁干扰、高频振动等，最终金具在实际运行中极可能会出现性能下降或故障的情况^[3]。

（三）制造工艺问题

1. 制造精度不高

现下存在一些电力金具，其制造工艺水平较低，并且制造精度难以保证。如此会导致金具的尺寸偏差较大，从而影响了金具的装配质量和性能。比如金具的接触表面不平整会增加接触电阻，接着将会导致发热问题。

2. 表面处理工艺不完善

金具的表面处理工艺对于其耐腐蚀性和使用寿命有着重要影响。目前部分金具的表面处理工艺不完善，如镀锌层厚度不均匀、附着力不足等，该问题容易导致金具在使用过程中发生腐蚀的情况。

三、电力金具设计优化策略

（一）材料优化

1. 新型材料的应用

在智能电网不断发展的背景之下，传统的电力金具材料逐渐难以满足日益增长的性能需求，对此积极地探索和应用新型材料成为了必然的趋势。而高强度铝合金便是其中极具潜力的一种。它主要以铝为基体，通过添加如铜、镁、锌等合金元素，并经过特定的热处理工艺，最终具备了密度小的显著特点。相较于传统的钢材来说，其密度大幅降低，因此在电力金具的实际应用中便能够有效地减轻金具自身重量，且降低杆塔等支撑结构的负荷压力，从而减少建设成本和维护难度。同时高强度铝合金的强度还可与部分优质钢材相媲美，它能够承受较大的机械载荷。如在耐

张线夹、接续管等需要承受导线拉力和张力的金具部件制造中，高强度铝合金的应用就能够确保金具在长期复杂受力情况下，依然保持其结构的稳定，确保其不发生变形或断裂。

2. 材料性能改进

除了引入新型材料以外，对于现有材料进行改性处理也是提升电力金具性能的重要途径。对于金属材料来说，热处理是一种常用且有效的改性方法。该方法主要是借助控制加热温度、保温时间和冷却速度等工艺参数，来改变金属的内部组织结构，进而改善其性能。例如淬火处理就可以提高金属的硬度和强度，进而使金具在承受较大外力时不易变形。回火处理则能消除淬火后的内应力，有效地提高材料的韧性，以防止金具在使用过程中发生脆性断裂。而表面合金化也是一种有效的手段，其主要通过在金属表面形成一层合金层，如渗碳、渗氮等，达到提高金属表面硬度、耐磨性和耐腐蚀性的目的，最终可增强金具在复杂环境下的适应能力^[4]。

（二）结构设计优化

1. 基于有限元分析的结构优化

有限元分析作为一种强大的数值计算方法，其在电力金具结构优化设计中发挥着关键作用。该方式的基本原理是将复杂的金具结构离散为有限个单元，再通过对每个单元的力学分析，建立起整个结构的数学模型，进而可求解在不同载荷工况下结构的应力、应变分布情况。有限元分析在实际应用中，首先需要利用三维建模软件精确构建电力金具的几何模型，然后再将其导入到专业的有限元分析软件中，如 ANSYS、ABAQUS 等。最后在软件中即可对金具模型进行材料属性定义、网格划分、载荷和边界条件设置等操作。

以悬垂线夹为例，对其进行有限元分析时，先要模拟悬垂线夹在承受导线张力、风力、覆冰等多种载荷工况下的力学响应。接着就是分析结果，从结果中可以清晰地看到金具结构中应力集中的区域，如线夹与导线接触部位、线夹本体的某些拐角处等^[5]。此时针对这些薄弱环节，设计人员就可以对结构形状进行优化操作，如采用圆滑过渡的曲线代替尖锐的拐角，以增加应力集中区域的材料厚度。或者是对尺寸参数进行调整，如优化线夹的长度、宽度和厚度比例，进而使结构受力更加均匀。经过多次的优化迭代，最终得到的悬垂线夹结构在承受导线张力时应力分布更加均匀，有效地提高了金具的强度和可靠性，且降低了因应力集中导致的断裂风险。

2. 考虑复杂工况的结构设计

由于智能电网的运行环境复杂多变，所以电力金具在实际工作中会受到多种复杂工况的影响，因此在结构设计过程中必须全面地考虑多种因素。就强电磁环境来说，在靠近变电站、高压输电线路交叉处等位置的时候，电力金具就容易受到电磁干扰，而这可能会影响到金具的电气性能和通信功能（对于智能监测型金具）^[6]。若想要减少电磁干扰对于金具性能的影响，相关人员可采用屏蔽结构设计。即在金具表面覆盖一层金属屏蔽层，如铜、铝等导电性良好的金属材料，其原理是利用金属对电磁波的反射和吸收特性，将外界的电磁干扰屏蔽在金具外部，以此确保金具内部的电气元件和通信模块正常工作。

（三）制造工艺优化

1. 提高制造精度

显而易见的是，先进的制造工艺和设备是提高电力金具制造

精度的关键。而数控加工设备通过计算机程序控制刀具的运动轨迹，能够精确地完成各种复杂形状的加工任务^[7]。即在电力金具制造中，数控车床可以精确地加工金具的轴类零件，以保证其尺寸精度在微米级；数控铣床则能对金具的复杂轮廓进行铣削加工，从而确保表面质量和尺寸精度符合设计要求。与传统加工方式相比来说，数控加工减少了人为因素对加工精度的影响，且提高了加工的一致性和稳定性。

除此之外，精密铸造和锻造工艺也在提高金具内部质量和性能一致性方面发挥着重要作用。具体而言，精密铸造工艺（如熔模铸造、消失模铸造等）能够制造出形状复杂、尺寸精度高的金具零件。其中熔模铸造是通过制作精确的蜡模，然后在蜡模表面涂覆多层耐火材料，再经过高温焙烧使蜡模熔化流出，最终形成型腔，借助将金属液浇入型腔中即可成型。因为这种工艺能够生产出表面光洁、尺寸精度高的金具，所以有效地减少了后续加工余量，还提高了材料利用率^[8]。

2. 完善表面处理工艺

热浸镀锌是一种当前常用的提高金具耐腐蚀性的表面处理技术。此技术需将经过前处理的金具浸入熔融的锌液中，进而使金具的表面能够形成一层锌铁合金层和纯锌层。由于锌层具有良好的电化学保护作用，即当金具表面的锌层与空气、水等介质接触时，锌会优先发生氧化反应，从而形成一层致密的氧化锌保护膜，因此该技术能够阻止氧气和水分进一步侵蚀金具基体，以延长金具的使用寿命。

对于降低金具接触电阻、提高导电性能方面而言，化学镀镍、镀银等工艺得到了广泛地应用。化学镀镍是在无外加电流的前提下，利用化学还原反应在金具表面沉积一层镍磷合金层。而镍磷合金具有良好的导电性和耐磨性，所以能够降低金具接触部位的电阻，从而减少发热现象，以及提高电力传输效率。镀银工艺则需要金具表面镀上一层银，因为银具有极高的导电性，所以镀银能够显著地降低金具的接触电阻，进一步提高其导电性能。

四、电力金具可靠性评估方法

（一）可靠性评估指标

1. 失效概率

失效概率表示在规定的时间内和条件下，金具发生失效的可

能性，它主要是衡量电力金具的可靠性^[9]。相关人员通过对金具的失效数据进行统计分析，再结合其故障模式和影响分析（FMEA），就可以计算出金具的失效概率。

2. 可靠度

可靠度是指在规定的时间内和条件之下，金具完成规定功能的概率。并且可靠度与失效概率互为补数。

3. 平均无故障时间（MTBF）

平均无故障时间意为金具在相邻两次故障之间的平均工作时间。它反映了金具的可靠性和稳定性。若 MTBF 越长，就说明金具的可靠性越高。

（二）可靠性评估方法

1. 基于故障树分析（FTA）的评估方法

故障树分析的原理是建立金具的故障树模型，并将金具的故障现象作为顶事件，再分析导致顶事件发生的各种直接和间接原因，直至找出最基本的底事件为止。借助对故障树的定性和定量分析，相关人员可以确定出金具的薄弱环节和失效概率^[10]。

2. 基于贝叶斯网络的评估方法

贝叶斯网络是一种基于概率推理的图形化模型，它能够有效地处理不确定性信息。而将贝叶斯网络应用于电力金具可靠性评估，需要先建立金具的贝叶斯网络模型，然后利用先验知识和样本数据对于金具的可靠性进行推理和预测。如此才能够更加准确地评估金具在不同工况下的可靠性。

3. 基于可靠性试验的评估方法

通过对电力金具进行可靠性试验，如寿命试验、环境试验、力学性能试验等，即可获取金具的失效数据和性能参数，从而能够评估金具的可靠性。

五、结语

电力金具作为智能电网的重要组成部分，其设计优化与可靠性对于保障智能电网的安全稳定运行具有重要意义。本文针对现有电力金具设计存在的问题，从材料优化、结构设计优化、制造工艺优化等方面提出了设计优化的策略，并且还研究了电力金具可靠性评估方法和提高可靠性的措施。

参考文献

- [1] 李宜莎, 孙轲. 电网调度自动化系统的优化与智能化升级路径探究 [J]. 科技资讯, 2024, 22(23): 93-95. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2410-5042-6057.
- [2] 邢星, 袁朝洋. 面向智能电网业务的窄带物联网技术研究及应用 [J]. 物联网技术, 2024, 14(12): 132-136+140. DOI: 10.16667/j.issn.2095-1302.2024.12.032.
- [3] 刘柱, 欧清海. 面向智能配电网的电力线与无线融合通信研究 [J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(02): 1-6.
- [4] 宋清魁. 面向智慧城市的智能电网电力需求预测技术研究与应用 [D]. 东北大学, 2016.
- [5] 李新鹏. 面向国内智能电网的电力调度控制系统异常智能检测方法与故障定位技术研究 [D]. 北京市: 北京邮电大学, 2023. DOI: 10.26969/d.cnki.gbydu.2023.000374.
- [6] 黄鼎昌. 面向智能电网的数据中心需求响应策略选择与电力成本优化 [D]. 青海省: 青海大学, 2021. DOI: 10.27740/d.cnki.gqhdx.2021.000372.
- [7] 赵经纬. 基于智能电网的电力管理系统的设计与优化 [J]. 自动化应用, 2023, 64(S02): 80-82.
- [8] 张少鹏. 高可靠性配电网中智能电源管理系统的设计与优化 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(05): 85-87. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.05.027.
- [9] 董秋军, 吴布托, 邹昊凯. 基于特高压技术的智能电网优化设计与运行策略研究 [J]. 办公自动化, 2024, 29(20): 11-13.
- [10] 王实, 路健, 李灿岑, 等. 面向智能电网的配电自动化数据质量管理与决策支持系统设计 [J]. 科技风, 2024, (31): 4-6+13. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.202431002.