

特高压金具结构优化设计与机械强度性能分析

陈国华

湖州泰仑电力器材有限公司

DOI : 10.32629/jpm.v7i5.8908

[摘要] 随着我国特高压输电工程持续向高寒、重覆冰和高海拔等极端环境区域拓展，相关工程对电力金具的结构结实程度和承受外力的能力提出了更为严苛的标准。传统电力金具在低温下容易变脆、通电时产生不必要的电磁发热损耗、容易被环境腐蚀损坏以及在承受重量和拉力的能力上，无法适配新型电网安全稳定运行的实际需求。针对电力金具开展结构优化和承受外力能力相关研究，可以提升输电系统整体的安全水平与运行经济性，另外还可以促进新材料和新工艺在电力装备领域的推广使用，为国家能源战略的顺利实施提供切实的支撑作用。文章研究了特高压金具结构设计的关键要素、机械强度性能分析方法，针对性地提出了设计优化策略，期望能为相关人员提供参考。

[关键词] 特高压；电力金具；结构优化；机械强度；有限元分析

Optimization Design and Mechanical Strength Analysis of Ultra-High Voltage Electrical Components

Chen Guohua

Huzhou Tailun Electric Power Equipment Co., Ltd.

[Abstract] As China's ultra-high voltage (UHV) power transmission projects continue to expand into extreme environments such as high-altitude regions, areas with severe ice accumulation, and cold climates, stringent requirements have been imposed on the structural robustness and external load-bearing capacity of electrical components. Traditional UHV components exhibit vulnerabilities—including brittleness at low temperatures, unnecessary electromagnetic heat generation during operation, susceptibility to environmental corrosion, and inadequate resistance to weight and tensile loads—making them unsuitable for the safety and stability demands of modern power grids. Research on structural optimization and enhanced load-bearing capabilities of electrical components not only improves overall system safety and operational efficiency but also facilitates the adoption of advanced materials and manufacturing technologies in power equipment, thereby supporting national energy strategy implementation. This study identifies key design elements for UHV component structures, develops mechanical strength analysis methodologies, and proposes targeted optimization strategies to provide practical references for industry professionals.

[Key words] Ultra-high voltage; Power hardware components; Structural optimization; Mechanical strength; Finite element analysis

特高压输电属于国家能源输送的核心骨干网络，其中作为关键连接部件的电力金具，在复杂运行工况下需要承担固定输

电导线、传递线路拉力以及实现电气连接等多项作业任务。随着线路电压等级提升、导线截面扩大以及极端气候出现频次增

加，电力金具需要承受的外力压力和环境腐蚀损坏程度明显加重。现有电力金具在材料选择、结构形式和制造工艺等多个环节存在明显不足，容易引发疲劳断裂、电晕放电和连接失效等各类问题。基于上述情况，迫切需要从结构受力原理和材料特性相互配合的角度出发，系统性提升电力金具的整体使用能力。

一、特高压金具结构设计的关键要素

(一) 力学承载结构设计

特高压金具的力学结构设计要搭建多层次的安全防护框架，运用有限元模拟技术精准还原复杂荷载工况下的应力分布情况，要让各个关键承力位置的应力值不超过材料屈服强度的七成，并且预留出一点二倍以上的额定破坏载荷安全余量。在整个设计过程中要充分考虑到导线张力、风振、覆冰和短路时出现的电磁力等静态和动态荷载的叠加影响，结合耐张类、悬垂类等不同类型金具的受力特点调整力流的传递路径，避免出现应力集中的情况。对于承受交变荷载的部件，要严格控制抗疲劳使用的寿命标准，运用结构圆角过渡、截面渐变这类设计方法提升抗疲劳的能力，保障金具在整个使用周期内的机械运行可靠性。

(二) 电气性能优化设计

特高压金具的电气设计重点是抑制电晕放电和实现电场均匀分布，要运用三维电场模拟技术对金具表面的电场强度进行精准测算，将最高电场强度维持在空气被击穿的最大电场强度允许的区间内。通过增大金具表面的曲率半径，优化用于均匀电场的屏蔽环的管径和环径参数，消除棱角毛刺等结构调整手段，可以有效降低电晕起始电压和无线电干扰的水平。在设计过程中要综合考虑金具和绝缘子串、导线和杆塔之间的相互影响，运用一体化的电场优化方案，同时严格控制电气接触位置的单位面积电流大小不超过 0.15 A/mm^2 ，要保障载流连接的可靠性和低损耗的特点。

(三) 材料与工艺适配设计

特高压金具的材料选型要同时满足机械强度、导电性能和耐候性的相关要求，关键的承力部件选用高强度锻造钢和高强铝合金，载流的部件优先挑选导电性能出色的铝合金材料，不同金属的连接位置要采用可靠的防止不同金属接触产生腐蚀的处理方式。表面处理的工艺运用热镀锌、锌铝合金喷涂和达克罗涂层这类长效防护手段，在沿海、工业污染等严酷环境中可以采用复合防护体系。除此之外，制造工艺方面要推行精密

锻造技术取代传统的铸造工艺，去除内部存在的缺陷，并且严格控制螺栓拧紧的力度参数和压接操作的相关参数，要保障金具的装配质量和连接的可靠性。

二、机械强度性能分析方法

(一) 有限元精细化仿真分析

有限元精细化仿真分析要构建高精度的三维实体模型，运用以六面体网格为主的网格划分方式，对需要承受主要力量的区域进行局部的网格加密处理，要将网格尺寸控制在 0.5 mm 到 2 mm 的范围内，将计算精度保障好。在开展分析的过程中，要将材料的非弹性变形特性、物体发生较大形状变化的情况以及各接触部位之间的摩擦情况都纳入考虑，使用随温度变化的材料属性参数，完成力、热、电三种物理因素相结合的联合计算。经过调整计算时设定的限制条件和加载的步骤间隔，还原金具在拉拽、弯折、扭转这几种不同受力情况下的内部受力和变形分布情况，准确找到受力高度集中的区域和结构的薄弱部位，并且检查设计的安全系数能不能达到额定破坏载荷值 1.2 倍以上的规定。

(二) 全工况试验验证分析

全工况的试验验证分析要严格按照 GB/T2317 系列的国家标准来开展，按顺序进行静力破坏试验，握力试验，弯曲试验和振动疲劳试验。静力试验使用分多次逐步增加载荷的方式，每加一次载荷后停留 60 秒，并且记录下物体变形的相关数据，直到金具出现损坏断裂，用来测出真实能承受的最大力量。振动疲劳试验设置振动的频率区间为 10 Hz 到 150 Hz ，振动幅度为 0.35 mm ，连续不断地加上一百万次反复变化的受力之后，检查金具有没有出现裂纹或者连接松动的情况。极端环境试验要还原覆盖冰层、高温、腐蚀这几种恶劣环境，评价金具在实际使用中的复杂环境下受力能力下降的变化规律和长时间使用的可靠程度。

(三) 概率可靠性评估分析

概率可靠性的评估分析要将材料本身性能的不一致性、生产过程中产生的误差以及受力情况的变化这些随机因素都纳入考虑，构建用蒙特卡洛计算方法的受力可靠程度计算模型。在开展分析的过程中，要将电线的拉力、风吹动产生的振动、覆盖冰层以及电路短路时产生的冲击力这些多种不同受力情况同时出现的影响都算出具体的数值，弄清楚各个受力参数的数值变化的概率规律和各个参数之间的关系情况。经过算出可

靠程度的衡量标准和出现损坏的概率，评价金具在整个使用的寿命周期内的安全富余程度，找出对可靠程度影响最大的因素，给结构的优化设计提供具体的数值参考，保证金具在设计使用的30年时间内出现损坏的概率低于百万分之一。

三、特高压金具结构优化设计策略

(一) 拓扑与参数协同优化

拓扑与参数协同优化要从概念设计层面重构金具的力流传递路径，运用变密度法拓扑优化技术去除非承载区域的冗余材料，初步制定符合基础力学要求的轻量化结构整体轮廓，在这个基础之上搭建全参数化三维模型来开展精细化的参数调整优化。本次优化流程要构建多目标优化函数，并且兼顾结构质量最小化、整体刚度最大化以及应力集中系数最小化三项主要目标，同时设置多类硬性约束条件，包括安全系数不能低于1.2倍额定破坏载荷，表面电场强度不能超出规定限值，并且满足制造工艺的实际可行性要求。运用混合智能优化算法，结合遗传算法的全局搜索能力和序列二次规划法的局部收敛精度，完成数千组参数组合的自动迭代计算和性能评估工作。要综合考虑静态拉伸，动态风振以及短路冲击在内的多种工况下的载荷耦合效应，确保优化得到的结构在全部设计工况中都能满足强度相关要求，并且同步完成拓扑优化结果的工程化转化工作，对复杂曲面和薄壁结构进行调整，使其适配传统制造的实际需求，在轻量化效果和生产可行性之间找到合理的平衡。

(二) 多物理场耦合全局优化

多物理场耦合全局优化要突破单一物理场优化的局限性，结合特高压金具同时承受机械载荷、强电场作用以及焦耳热效应的实际服役特性，搭建力，电，热多场耦合的仿真分析体系，完成不同物理场之间的双向数据传递和迭代计算工作。优化流程中需要考虑材料的力学性能，导电性能和导热性能随温度变化的非线性特征，并且兼顾接触界面的法向压力，接触电阻和热阻之间的耦合关系，来精准还原金具在实际运行中的复杂物理响应。通过全局灵敏度分析识别影响多场综合性能的关键结构参数，筛选出对机械强度，电晕特性和温升性能都有明显影响的主要变量，搭建高精度代理模型，来提升优化计算的整体效率。要重点关注极端工况下的多场耦合效应，包括短路电流产生的瞬时大电动力和急剧温升，覆冰载荷和低温环境的叠加影响，确保优化得到的结构在全工况范围内都能拥有良好的综合表现，防止因为单一性能优化而造成其他性能下降，引发安

全隐患。

(三) 制造工艺逆向驱动优化

制造工艺逆向驱动优化要颠覆传统“先设计后工艺”的正向设计模式，要将制造工艺的约束条件放到结构设计的初始阶段，从根源上解决可制造性不足，生产成本偏高，质量一致性不佳这类行业普遍存在的问题。深入研究包括精密锻造，数控加工，冷压成型以及焊接装配在内的主流制造工艺的技术边界和成本特性，将工艺上的限制转化为结构设计的量化边界条件，防止出现无法加工或者加工成本过高的尖角，深腔，薄壁这类结构特征。进行工艺参数和结构参数的协同优化工作，搭建工艺，结构和性能一体化的映射关系，通过调整金具的截面尺寸，过渡圆角和连接方式等结构参数，匹配出最优的工艺实施窗口，降低内部气孔，裂纹和残余应力这类制造缺陷的产生概率。积极推广标准化，模块化以及系列化设计，提升零部件的互换性和通用程度，减少生产准备的成本和库存的压力，并且对金具的装配结构进行优化，降低现场安装需要的螺栓数量和调整的步骤，提高现场施工的整体效率。要兼顾全生命周期的成本，通过结构优化降低易损件的使用数量，提升金具的可维修程度和更换的便捷性，减少30年设计寿命周期内的综合运维成本。

结语

特高压金具相当于电网的关节和韧带，特高压金具的结构可靠程度直接影响整个输电系统的安全和稳定运行。当前相关研究已经从单一的强度校核，转向多目标的协同优化方向，结合新材料技术，数值仿真方法和智能算法，明显提升了金具的机械性能和环境适应能力。未来，随着数字孪生，在线监测和自修复材料这项技术的不断发展，金具会朝着智能化，长寿命和高可靠的方向发展。并且搭建覆盖全生命周期的设计，制造和运维的标准体系，可以进一步支持我国特高压电网的高质量发展，为全球能源互联提供扎实的技术基础。

[参考文献]

- [1]李智旺,周鹏.特高压输电线路工程的“三跨”区段施工技术研究[J].模型世界,2025(3):222-224.
- [2]商利,李新梅,路国闯,等.特高压输电线路磁场对电力金具材料摩擦磨损的影响[J].表面技术,2024,53(3):132-141.
- [3]朱潇,王谦,肖前波,等.特高压输电线路悬垂金具串脱冰响应分析[J].清华大学学报(自然科学版),2026(3):597-607.