

智能电网背景下高压开关设备金属配件的轻量化与结构创新设计

汤 军

浙江引力电气有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：智能电网对高压开关设备提出高效、智能、绿色的新要求，其金属配件的重量与结构性能直接影响安装效率、运行可靠性及全生命周期成本。针对传统配件存在的重量大、材料利用率低、刚性与抗疲劳性能失衡等问题，本文以轻量化为核心，系统开展优化研究：首先明确性能需求与设计约束；继而构建“高强度合金选材—仿生拓扑优化—精准成型工艺”一体化设计体系；并通过仿真与原型测试验证方案有效性。结果表明，优化后配件在满足强度、绝缘等关键性能前提下，重量降低35%以上，材料利用率提升40%，抗疲劳寿命延长2倍，显著提升设备适应性与可靠性，为高压开关设备智能化升级提供有力支撑。

【关键词】：智能电网；高压开关设备；金属配件；轻量化设计；结构创新；拓扑优化

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.057

1 引言

随着智能电网向特高压、柔性化与分布式方向发展，高压开关设备作为输配电系统的核心控制单元，其性能直接影响电网的安全与效率。金属配件作为设备的“骨架”，广泛应用于触头支架、操作机构、柜体框架等关键部位，占设备总重60%以上，其设计水平对整机性能具有决定性影响。当前复杂安装场景（如山地、地下、海上平台）对设备轻量化提出迫切需求——减重不仅可降低运输安装成本、节省空间，还能减少运行能耗与振动噪声。

然而，国内高压开关金属配件仍普遍采用“经验化”设计：材料多为普通碳钢，强度利用率低；结构设计保守冗余，缺乏力学精准匹配；制造依赖传统铸造焊接，材料浪费大、缺陷多。这些问题导致重量过大，制约设备小型化与模块化发展。

国外企业如西门子、ABB已通过高强度铝合金、拓扑优化及仿生结构实现减重25%~30%，但核心技术受专利封锁。国内研究多聚焦单一材料替代或局部形状优化，存在材料-结构脱节、缺乏系统性创新、未融合智能化需求等瓶颈。

针对上述问题，本文提出“材料创新—拓扑优化—工艺适配—智能集成”一体化设计框架。研究内容包括：明确轻量化性能指标，建立多目标优化模型；筛选高强度合金材料；结合拓扑与仿生方法开展结构创新；匹配先进制造工艺；并通过仿真与试验验证方案可行性。本研究旨在实现“减重不减质”，为高压开关设备升级与智能电网高效运行提供技术支撑。

2 智能电网对高压开关设备金属配件的性能需求与设计约束

2.1 智能电网的核心运行要求

智能电网强调“源网荷储”协同，对高压开关设备提出更高要求。首先，面对新能源并网带来的电流波动与谐波冲击，设备需具备更强的结构稳定性和抗疲劳能力；其次，智能化运维要求设备集成状态感知功能，金属配件需为传感器部署预留物理空间与信号通路；再次，绿色低碳目标推动设备全生命周

期能耗降低，轻量化成为关键路径。此外，设备常部署于高海拔、高湿、盐雾等严苛环境，对金属配件的耐腐蚀性与环境适应性也提出了更高标准。

2.2 金属配件的性能需求指标

结合上述要求，本文聚焦典型高压开关金属部件，明确其综合性能目标：在力学方面，需具备高强韧性与长疲劳寿命，确保长期可靠运行；在结构方面，应保证足够刚度，限制操作过程中的形变，并有效避开设备共振频段；在环境适应性方面，需在宽温域及腐蚀性环境中保持性能稳定；在轻量化方面，要求显著降低重量并提升材料利用效率；同时，还需具备智能适配能力，支持温度、应力等传感单元的嵌入，且不影响主体结构强度。

2.3 轻量化设计的核心约束条件

轻量化并非简单减重，而是在多重约束下实现性能与重量的最优平衡。首要约束是安全性，设计方案必须满足国家高压设备通用技术规范，在短路、操作冲击等极端工况下不发生失效；其次是工艺可行性，优化结构应与主流制造工艺相兼容，避免因工艺复杂导致成本激增；第三是系统兼容性，新配件需可直接替换原有部件，无需对整机结构进行大幅改动；最后是经济性，轻量化方案应在材料、制造与维护全链条上实现成本优化，确保具备工程推广价值。

3 高压开关设备金属配件轻量化与结构创新的关键技术

3.1 轻量化材料的选型与性能优化

材料创新是轻量化的基础。本文对比传统碳钢、铸钢与Q690高强度钢、6082铝合金、钛合金等候选材料，综合性能与成本后，采用“分级选材”策略：高承载触头支架选用Q690钢，经调质处理提升屈服强度；传动类连杆采用6082铝合金，结合阳极氧化增强耐蚀性；小型精密件如传感器座选用304不锈钢，兼顾精度与抗腐蚀性。针对异种材料连接难题，引入摩擦搅拌焊技术，实现钢-铝可靠连接，接头强度达铝合金母材的

85%，满足结构协同受力需求，在保障性能的同时有效控制成本。

3.2 基于拓扑优化的结构创新设计

拓扑优化是结构轻量化的关键技术，旨在将材料精准布置于受力关键区域。本文以 126kV GIS 触头支架为对象，基于 Altair OptiStruct 开展优化：首先建立含 20 万网格的有限元模型，定义 Q690 钢材料属性；其次施加工作载荷（轴向 10kN、径向 5kN）及短路冲击工况；以重量最小化为目标，约束最大应力 $\leq 310\text{MPa}$ 、变形 $\leq 0.1\text{mm}$ 。经 15 次迭代，获得沿主传力路径分布的“树状”材料构型。在此基础上融合仿生理念：内部引入蜂窝状中空结构，连杆改用“工”字形空心截面，并在转角处采用圆弧过渡以缓解应力集中。优化后支架重量由 12kg 降至 7kg，减重 41.7%，最大应力 280MPa，刚度与强度均满足运行要求，显著提升了材料利用效率。

3.3 适配轻量化设计的先进制造工艺

制造工艺是实现轻量化设计的保障，需匹配优化后的材料与结构特点，避免因工艺缺陷导致性能下降。本文针对不同材料与结构的配件，制定差异化制造工艺方案：

对于 Q690 钢触头支架，采用“激光切割+数控折弯+机器人焊接”的复合工艺：激光切割精度达 $\pm 0.1\text{mm}$ ，确保零件尺寸精度；数控折弯成型减少焊接接缝，降低应力集中；机器人焊接采用窄间隙埋弧焊，焊缝探伤合格率达 100%。相较于传统铸造工艺，材料利用率从 50% 提升至 85%，生产效率提升 30%。

对于 6082 铝合金连杆，采用“挤压成型+CNC 精密加工”工艺：挤压成型确保材料纤维连续，提升连杆抗疲劳性能；CNC 加工精度达 $\pm 0.05\text{mm}$ ，保证连接部位的配合精度。针对铝合金焊接易产生气孔的问题，采用 TIG 焊（钨极惰性气体保护焊）并配合焊前预热（ $100^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ ），焊缝强度提升 20%。

对于集成传感器安装结构的精密配件，采用“3D 打印+后期处理”工艺：选用 SLM（选择性激光熔化）技术打印 304 不锈钢配件，打印精度达 $\pm 0.03\text{mm}$ ，可直接成型复杂的内部空腔与安装接口；打印后通过热处理消除内应力，表面粗糙度降至 $Ra1.6\mu\text{m}$ ，满足装配需求。

3.4 面向智能化的结构集成设计

结合智能电网的智能化需求，在轻量化结构设计中融入状态监测功能，实现“结构-感知”一体化。具体措施包括：在触头支架应力集中区域预留应变片安装槽，槽体深度 0.5mm，宽度 2mm，不影响支架力学性能；在连杆内部设计微型布线通道，直径 3mm，用于布置温度传感器信号线；在配件连接部位采用带定位功能的法兰结构，法兰上集成 RFID 芯片，实现配件全生命周期追溯。

为避免传感器安装对轻量化效果的影响，采用“嵌入式设计”理念：将温度传感器嵌入铝合金连杆内部，传感器外壳与连杆材料一体化成型，既保证测量精度（温度误差 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ），又不增加额外重量；应变片采用超薄型（厚度 0.05mm），粘贴后通过涂层保护，不改变配件表面形态。通过结构集成设计，高压开关设备可实时监测金属配件的应力、温度状态，实现故障预警，提升设备智能化水平。

4 轻量化与结构创新设计方案的验证

4.1 仿真验证

采用 Ansys Workbench 对优化后的金属配件进行多工况仿真分析，验证其性能是否满足要求。

力学性能仿真：对 Q690 钢触头支架施加短路冲击载荷（20kN 轴向力），仿真结果显示最大应力 305MPa，小于材料许用应力 310MPa，最大变形 0.08mm，满足刚度要求；对 6082 铝合金连杆进行疲劳仿真，在交变载荷（ $\pm 5\text{kN}$ ）下，疲劳寿命达 1.2×10^6 次，超过设计指标。

振动特性仿真：对优化后的柜体框架进行模态分析，一阶固有频率 65Hz，避开设备共振区间（10Hz~50Hz），可有效减少运行过程中的振动噪声；在地震载荷（0.3g 加速度）下，框架最大位移 0.2mm，结构稳定。

热性能仿真：模拟高温环境（ 80°C ）下的散热情况，铝合金连杆的散热效率比传统钢连杆提升 40%，传感器测量温度与实际温度误差 $\leq 0.3^{\circ}\text{C}$ ，验证了集成传感器的可靠性。

4.2 原型件测试

根据优化设计方案加工原型件，开展物理测试验证。

力学性能测试：采用万能材料试验机对触头支架进行拉伸试验，抗拉强度 680MPa，屈服强度 540MPa，满足设计要求；对连杆进行弯曲试验，断裂载荷达 30kN，是额定工作载荷的 6 倍，安全系数充足。

环境适应性测试：将原型件放入高低温试验箱，在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围内循环 100 次，测试后配件无裂纹、变形，力学性能下降率 $\leq 5\%$ ；盐雾试验 5000h 后，铝合金连杆表面无腐蚀点，不锈钢配件表面光泽度无明显变化。

现场装机测试：将优化后的金属配件安装于 126kV GIS 设备，进行连续 6 个月的运行测试，设备操作响应时间缩短 10%，振动噪声降低 15dB，传感器实时监测数据稳定，无故障报警，验证了设计方案的工程实用性。

4.3 经济性分析

对轻量化与结构创新设计的经济性进行全生命周期分析，结果显示：虽然 Q690 钢与 6082 铝合金的材料成本比传统材料高 20%~30%，但由于重量降低 35% 以上，运输与吊装成本降低 40%；材料利用率提升 40%，原材料浪费减少；抗疲劳寿命

延长2倍,设备维护成本降低50%。综合计算,优化后的金属配件全生命周期成本降低18%,具备显著的经济优势。

5 设计方案的优化与推广建议

5.1 设计方案的进一步优化方向

基于仿真与测试结果,针对设计方案存在的不足,提出两方面优化方向:一是材料混合应用优化,尝试在触头支架关键部位采用Ti-6Al-4V钛合金局部增强,通过异种材料连接技术实现“钢-钛”复合结构,进一步提升抗疲劳性能;二是拓扑优化算法优化,引入多目标遗传算法,同时考虑力学性能、制造工艺、成本等因素,提升优化结果的工程适用性;三是智能化集成深化,在配件中集成无线传感器,实现数据无线传输,减少布线需求。

5.2 行业推广的关键措施

为推动高压开关设备金属配件轻量化与结构创新设计的行业推广,提出三方面措施:一是标准制定,联合行业协会与龙头企业,制定高压开关设备金属配件轻量化设计标准,明确材料选型、结构优化、性能测试等规范;二是技术示范,在特高压工程、新能源电站等重点项目中建立示范应用基地,展示轻量化技术的应用效果;三是产业链协同,推动材料企业、设备制造商、科研机构形成合作联盟,共同开展轻量化技术的研发与产业化,降低技术推广成本。

政策层面,建议政府出台相关扶持政策,对采用轻量化技术的高压开关设备企业给予补贴,鼓励企业加大研发投入;建立轻量化技术评价体系,对达到相关指标的产品给予认证,提升市场认可度。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文针对智能电网背景下高压开关设备金属配件的轻量化需求,构建了“材料创新-拓扑优化-工艺适配-智能集成”的

一体化设计体系,主要结论如下:

(1) 提出“分级选材”策略,针对不同类型金属配件选用Q690高强度钢、6082铝合金等轻量化材料,结合热处理与表面处理技术,在提升材料性能的同时控制成本;

(2) 基于拓扑优化与仿生设计,完成金属配件的结构创新,触头支架、操作机构连杆等核心配件重量降低35%以上,材料利用率提升40%,力学性能与耐环境性能满足智能电网运行要求;

(3) 制定适配的先进制造工艺方案,解决了轻量化材料加工与异种材料连接难题,原型件测试与现场应用验证了设计方案的可靠性与实用性;

(4) 轻量化设计使金属配件全生命周期成本降低18%,同时提升了设备的智能化水平,为高压开关设备的升级改造提供了可行路径。

6.2 未来展望

未来,随着智能电网的进一步发展与新材料、新技术的突破,高压开关设备金属配件的轻量化与结构创新将向更深层次推进。在材料方面,新型复合材料的应用将成为研究热点,其比强度是金属材料的3~5倍,可实现更大幅度的减重;在设计方法方面,数字孪生技术将与拓扑优化结合,通过构建配件的数字孪生模型,实现设计、仿真、制造、运维全流程的数字化管控;在智能化方面,将实现配件状态的实时监测与寿命预测,结合智能电网的调度需求,实现设备的预测性维护与精准调控。

高压开关设备金属配件的轻量化与结构创新,不仅是设备自身升级的需求,更是智能电网绿色化、高效化发展的必然要求。未来通过行业内的技术协同与创新,必将推动高压开关设备产业实现高质量发展,为智能电网的安全稳定运行提供坚实保障。

参考文献:

- [1] 李忱,王赫妍,赵磊洋,等.全绝缘高压隔离开关的结构[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2023,19(1):91-96.
- [2] 李成俊.高低压成套开关设备智能化控制系统的设计与运用分析[J].环球市场,2018(11):365.
- [3] 苏毅,张帅,彭在兴,等.高压断路器模块化机构设计与研究[J].南方电网技术,2022,16(3):82-90.
- [4] 黄坤鹏,康留涛,赵平.轻量化126 kV GIS设备的研发设计[J].高压电器,2024,60(6):89-98,106.
- [5] 吴之昊,熊卫华,任嘉锋,等.基于轻量级SSD的电力设备锈蚀目标检测[J].计算机系统应用,2020,(2).