

真空断路器弹簧操动机构的优化

马千里 史玲 王立桓 王帅 许畅

摘要：真空断路器作为电力系统中的关键保护和控制设备，其操动机构的性能直接关系到断路器的可靠性与使用寿命。本文针对弹簧操动机构常见问题，提出了优化措施，旨在提升操作性能与稳定性，为真空断路器的设计和改进提供理论支持和实践指导。随着技术进步，12kV真空断路器将朝着更小型化、高可靠性和少维护的方向发展。

关键词：断路器；弹簧操动；优化策略

在电力系统中，真空断路器扮演着至关重要的角色，其性能直接影响电网的稳定性和安全性。而作为其核心构件的操动机构，其结构与性能的优化对保证其工作效率至关重要。但目前该系统仍面临着操纵力不稳定、损耗大、维修费用高等问题，制约着其工作效率与寿命。

一、弹簧操动机构现状分析

弹簧操动机构作为真空断路器的核心组成部分，其性能的优劣直接关系到断路器的整体可靠性。但是其弹簧的疲劳性能却是一个很大的问题。在多次受压、卸荷时，其材质特性会逐步退化，从而造成操作力劣化，对开关动作特性产生不利影响^[1]。另外，由于运行时所受的作用力非均布，导致开关在一些特殊情况下失效，同

时对维修人员的技能也提出了更高的要求。温、湿等外界条件对弹性元件的工作特性也有重要的作用。在恶劣的工作条件下，绝缘体的力学特性会出现较大的改变，从而影响到开关的正常工作。比如，温度升高会使弹簧的弹性模数下降，而潮湿会加快其锈蚀进程。以上几个方面的综合影响，给弹簧操动机构的工程实践带来了许多困难。在对上述问题进行详细的剖析时，必须注意到在设计中存在着一定的限制。为了实现开关的微型化设计人员往往忽略了对其性能的要求。同时由于缺乏对外界环境的适应能力，导致其在复杂的自然环境下难以发挥应有的作用。比如在一场极端高温天气中，因弹性特性突变而引发的多个开关失效事件，对电网安全和检修工作造成很大威胁。（如表1所示）

表1 弹簧操动机构性能测试数据表

序号	测试项目	初始状态值	测试后状态值	变化率 (%)	测试条件	备注
1	弹簧弹性模数 (GPa)	200	195	-2.5	温度: 25℃, 湿度: 50%	初始基准测试
2	弹簧弹性模数 (GPa)	200	180	-10	温度: 60℃, 湿度: 50%	高温影响测试
3	弹簧弹性模数 (GPa)	200	175	-12.5	温度: 25℃, 湿度: 90%	高湿影响测试
4	操作力 (N)	500	480	-4	温度: 25℃, 湿度: 50%	初始基准测试
5	操作力 (N)	500	450	-10	温度: 60℃, 湿度: 50%	高温影响测试
6	操作力 (N)	500	440	-12	温度: 25℃, 湿度: 90%	高湿影响测试
7	疲劳寿命 (循环次数)	10000	9500	-5	温度: 25℃, 湿度: 50%	初始基准测试
8	疲劳寿命 (循环次数)	10000	8000	-20	温度: 60℃, 湿度: 50%	高温影响测试
9	疲劳寿命 (循环次数)	10000	7500	-25	温度: 25℃, 湿度: 90%	高湿影响测试

作者简介：

1. 马千里 (1988.12——) 男，汉族，本科，工程师，主要从事高压开关相关装配和制造工艺研究方面的工作。
2. 史玲 (1996.12——) 女，汉族，硕士研究生，助理工程师，主要从事高压开关相关装配和制造工艺研究工作。
3. 王立桓 (1996.08——) 男，汉族，本科，助理工程师，主要从事高压开关相关工程技术方面的研究工作。
4. 王帅 (1996.10——) 男，汉族，硕士研究生，助理工程师，主要从事高压开关相关工程技术方面的研究工作。
5. 许畅 (2000.05——) 男，汉族，本科，主要从事高压开关相关装配和制造工艺研究工作。

二、优化策略

1. 材料优化

在真空断路器弹簧操动机构的材料优化领域，业界正致力于采用高性能合金材料，以显著提升弹簧的疲劳寿命和抗腐蚀能力。（如图1所示）



图1 真空断路器弹簧操动机构示意图

该材料的选择是建立在对长周期载荷作用下弹性性能衰减规律认识的基础上。根据试验结果，可以计算出弹簧的疲劳寿命： $\text{疲劳寿命} = \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_a}\right)^n$ ，其中， σ_f 代表材料的疲劳极限， σ_a 为实际应用中弹簧承受的平均应力，而 n 则是疲劳寿命指数。通过选择具有更高 σ_f 的合金材料，可以显著提高 σ_a 的容许值，从而延长弹簧的使用寿命。另外，在高湿、高盐浓度的条件下，金属合金材料的耐腐蚀性也是至关重要的。采用电镀、涂装等方法对其进行表面处理，可以提高其抗腐蚀性能。实例证明在同等工况下，使用特殊的合金和表面处理，其耐用性可提高30%左右。在选材方面，目前国际上的研究主要集中于弹性体的组织设计，例如通过调控弹性体的晶粒度等来改善弹性体的强韧化。通过对其显微组织进行调控，既可提高其机械强度，又可提高其在复杂使用条件下的稳定性^[2]。值得一提的是，材料优化并非孤立进行的，而是能够与弹簧的设计和制造工艺进行紧密相连。利用精锻、冷弯等先进加工工艺，保证产品的几何尺寸及内

部微观结构的一致性，进而提升产品的综合性能。

2. 结构改进

在真空断路器的弹簧操动机构中，结构设计的优化是提高其稳定性和可靠性的关键。在进行操动装置时，要综合分析各部件的受力情况及弹簧的分布情况。利用现代CAD与有限元分析（FEA）技术，可对各种工况下的弹性体进行受力与变形模拟，进而优化其结构与参数形状和数值。通过对弹性元件进行非线性优化，使其能更好地满足工作过程中受力的变化，减小高载荷下的应力集中问题。比如通过调节中间直径及末端形状，使其更有效地适应不同操作阶段的力变化，减少发生疲劳破坏的危险。其中操纵装置的导引控制也是其结构改造中的一个重要方面。利用高精度引导装置，例如利用小摩擦材料、精密匹配容差等，降低加工时的摩擦，提升系统的反应速率与准确度。这个改善不但提高了开关的运行效率，而且还降低了维修要求。以一家动力设备企业为实例，采用模块化设计思想，将其拆分为若干可交换的组件，既可使加工与组装流程简单化，又可方便维修与快速替换^[3]。该模块化的结构使得驱动装置可以满足各种需要，从而增强了系统的柔性和适应性。采用具有温度、应力、振动等特征的智能传感技术，实现对传动系统运行状况的实时监控。利用这些测试结果，对弹簧进行了疲劳寿命及隐患预报，达到了预期维修的目的，降低了非预期停产次数。（如表2所示）

3. 智能监测系统

智能监测系统的引入在真空断路器弹簧操动机构的维护和管理中发挥着至关重要的作用。通过对弹簧的受力状况及磨损状况进行在线监测，可以对可能出现的失效故障进行预警和防范，对提升电力开关运行的可靠性与安全性具有重要意义。采用FBG检测弹性体中的应变是一种先进的方法。光纤光栅作为一种新型的传感器，

表2 真空断路器弹簧操动机构优化设计性能提升数据表

序号	测试项目	改进前数值	改进后数值	改善率 (%)	测试条件	备注
1	最大应力 (MPa)	800	650	-18.75	温度: 25℃, 湿度: 50%	使用有限元分析优化结构设计
2	疲劳寿命 (循环次数)	10000	13000	+30	温度: 25℃, 湿度: 50%	采用非线性优化减少疲劳破坏
3	系统响应时间 (ms)	120	90	-25	温度: 25℃, 湿度: 50%	高精度引导装置降低摩擦
4	维修频率 (次/年)	4	2	-50	温度: 25℃, 湿度: 50%	模块化设计简化维修与更换
5	操作力变化率 (%)	±10	±5	-50	温度: 25℃, 湿度: 50%	调节弹簧中间直径及末端形状
6	系统故障率 (%)	2	0.5	-75	温度: 25℃, 湿度: 50%	智能传感技术实现实时监控与预警

具有良好的抗干扰能力，具备体积小、质量轻等特点，被越来越多的用于电力设备监控。比如在板簧的重要位置加装光纤光栅，实现了对板簧的实时测量，并利用无线通讯技术将测量到的信息传送到中心监测中心。在此基础上通过对采集到的大量数据进行深度分析，进而辨识出其退化规律。比如利用机器学习的方法，通过对弹簧的运行状态进行识别，从而预测其剩余使用寿命，并对其进行维修或替换。在实践中一家供电公司采用该方法后，开关失效率下降40%左右，预计维修费用下降30%左右。该研究结果既说明了该智能监控技术对提升设备运行效率的作用，又展示了其在降低运营成本方面的潜力。其中用户界面（UI）设计是实现智能化监控的关键。该系统具有直观易用的用户界面，可使运维人员迅速了解监控资料，作出准确的决策。综合了图像显示及报警功能，使整个设备的运行状况及存在的问题一目了然，大大提升了维修工作的效率。

4. 环境适应性增强

环境适应性是真空断路器弹簧操动机构设计中不可忽视的关键要素。面对日益增多的气候和恶劣气象灾害，对电力设备提出了更高的要求。首先要做的就是要保证操纵装置可以承受非常恶劣的环境条件。其中一项重要的方法就是利用密闭的材质与结构，使之达到防潮、防污染的目的。比如采用高效的硅橡胶、氟橡胶等密封材料，在不影响弹性及运动装置弹性及耐用性的前提下，对其进行长效保护。另外在提高系统的环境适应能力方面，对系统进行了优化设计。在此基础上提出利用热管或辐射板等方法来改善系统的传热性能^[4]。一种应用实例显示，将微热管与操纵装置结合，可使其在较高温度下的热稳定度提升20%左右。对于室内湿度的调控，可以通过添加干燥剂或薄膜等方法来减少室内水分。这种方法不但可以预防金属零件的锈蚀，而且也可以降低水

分对其绝缘特性的作用。综合运用智能化监控体系，提高了对环境的适应能力。该方法通过对温、湿度等多个因素的监控，能够对装置的工作状况进行动态调节，使其能够根据外界的情况做出判断从而适应环境。比如，在监测到空气中的水分超出了一定的临界值时，就会自动开始除湿，从而达到防止机器损坏的目的。这种材质的耐候性也应该被纳入到设计改良之中。选用耐紫外线、耐氧化、耐化学腐蚀的材质，能够有效地改善机械性能的长效稳定性能。比如，通过对特定的阳极氧化法、涂料等进行表面改性，可以改善其抗老化性能。

总结语

总而言之，通过对真空断路器弹簧操动机构的深入分析和优化，可以有效提升其操作性能和稳定性，延长使用寿命。本文提出的优化措施，不仅基于理论分析，也结合了实际应用中的案例，如某电力公司在采用新材料和结构改进后，显著降低了断路器的故障率和维护成本。这些措施的实施，将为真空断路器的未来发展提供坚实的基础，推动电力系统向更高效、更可靠的方向迈进。

参考文献

- [1] 刘晓明, 梁澳, 陈海, 史红菲, 李培源, 史政凯. 真空断路器弹簧机构凸轮优化与虚拟样机验证分析[J]. 真空科学与技术学报, 1-7.
- [2] 于宁, 曾建斌, 游一民, 施政前, 王永鑫. 真空断路器弹簧操动机构的优化[J]. 高压电器, 2024, 60(03): 25-31.
- [3] 王志高. 一种40.5 kV高压真空断路器操动机构的设计研究[J]. 电力学报, 2023, 38(04): 344-351.
- [4] 张晓东. EIB机构真空断路器主轴故障分析探讨[J]. 电器工业, 2023, (08): 29-33+42.