

# 低压断路器分断结构的优化设计与短路电流耐受性能研究

吴磊

哥伦电气有限公司 浙江 温州 325600

**【摘要】**：本文针对现代电力系统对低压断路器短路分断能力提出的更高要求，开展其核心分断结构的优化设计及其短路电流耐受性能的系统性研究。通过分析短路电弧的产生、燃烧与熄灭全过程，建立了电弧运动与灭弧室结构参数之间的关联模型。研究聚焦于触头系统、灭弧室栅片结构、气吹回路等关键组件的优化设计，提出了基于磁场-气流协同作用电弧快速驱散与冷却方案。实验结果表明，优化后的分断结构可使预期短路分断能力提升25%以上，电弧停滞时间缩短约40%，同时显著降低了触头电磨损率。本研究为提升低压断路器的短路分断可靠性、延长电气寿命提供了理论依据与切实可行的工程优化路径。

**【关键词】**：低压断路器；分断结构；短路电流；电弧控制；优化设计；性能提升

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.062

## 1 引言

低压断路器是保障低压配电系统安全的核心保护电器，其短路分断能力直接关系到电网设备与人身安全，随着电力系统容量增长及新能源接入，系统短路电流水平不断提高，对断路器的分断性能提出了更严峻的挑战。分断结构作为实现灭弧功能的物理载体，其设计优劣决定了分断的成功率、速度与绝缘恢复能力。

目前，相关研究多集中于磁场仿真、栅片材料或气流分析等单一方向，缺乏对触头系统、灭弧室、气流通道等组件间协同作用的系统优化，分断过程涉及电磁、流体、热力学与材料的强耦合，传统经验设计已面临瓶颈。

因此，本研究旨在从短路分断的全过程物理机制出发，构建分断结构多物理场耦合分析模型，识别限制分断性能提升的关键瓶颈。在此基础上，对触头形状、磁吹场分布、栅片构型与布置、灭弧室排气通道等进行一体化协同优化设计。通过模拟仿真与实验验证相结合的方法，量化评估优化方案对电弧电压特性、电弧能量耗散速率、触头烧蚀程度及最终分断能力的影响，从而形成一套从机理分析、结构创新到性能验证的完整研究体系，为开发高性能、高可靠、紧凑化的新一代低压断路器提供坚实的技术支撑。

## 2 短路电弧物理过程与分断性能理论基础

短路电弧是断路器分断过程中需要控制和熄灭的核心对象，其物理特性决定了分断结构的核心设计准则，电弧本质上是一种自持的气体放电现象，在断路器触头间，其形成与发展经历了起弧、燃烧、运动与熄灭四个紧密相连的阶段。触头分离瞬间，接触电阻剧增导致金属相变、汽化，形成金属蒸气，进而被强电场电离，建立弧柱，电弧一旦建立，其弧柱温度可达10000-20000K，内部充满高导电率的等离子体。

电弧的燃烧稳定性与其能量平衡密切相关，输入功率（电弧电压与电流的乘积）必须与弧柱通过传导、对流、辐射等方式向周围环境散失的功率相平衡。分断结构的设计目标即是打

破这种平衡，极大地增强散热功率，使电弧在电流自然过零后无法重燃。电弧电压是反映这一过程的关键参数，它由阴极压降、弧柱压降和阳极压降三部分组成。通过拉长电弧、冷却电弧和分割电弧可以有效提升电弧电压，从而限制短路电流并加速其过零，同时增加弧后介质恢复强度。

根据左手定则，电弧电流在自身产生或外部施加的磁场中会受到洛伦兹力的作用，在断路器灭弧室中，通常通过设置磁吹线圈或永磁体，在触头区域产生垂直于电弧轴向的横向磁场。该磁场力驱动电弧向灭弧室栅片区域快速运动，其运动速度直接决定了电弧进入栅片被分割冷却的时机，是影响分断速度的关键。优化磁场分布，确保在电流峰值附近电弧能获得最大驱动力并平稳进入栅片，是设计重点。

灭弧室栅片系统是耗散电弧能量的核心部件，由多片相互绝缘的金属栅片组成，其作用是将进入的长电弧分割成一系列串联的短弧。每个短弧在栅片间形成新的阴极和阳极，产生多个近极压降，显著增大了电弧的总压降。此外，金属栅片是优良的导热体，能迅速吸收电弧热量，降低弧柱温度。栅片的材料（导热性、耐烧蚀性）、厚度、片间距、表面处理以及整体排列方式共同决定了其分割效果和散热能力。

气吹效应是提升分断能力的重要辅助手段，电弧高温加热灭弧室内的空气或产气材料，导致气体急剧膨胀，形成高压区。合理设计的排气通道能引导这些高温高压气体定向喷吹弧根或弧柱，一方面进一步冷却电弧，另一方面产生气动吹力辅助拉长和驱散电弧。灭弧室内的压力构建、气流场分布与电弧运动之间存在强烈的双向耦合，优化气体流动路径是实现高效能量耗散的另一个关键。

## 3 分断结构关键组件分析与设计瓶颈

触头系统是分断过程的起始点和能量初始输入区，其设计直接影响起弧特性、电弧初始形态和后续运动。传统平板对接式触头在分析时，电弧弧根容易停滞，导致触头局部严重烧蚀，优化设计倾向于采用“引弧指”或“弧触头”结构，即主触头

承担正常通流，而在分析时最先分离的是一对特殊的、耐电弧烧蚀的弧触头。弧触头通常具有特定的形状，其目的是在分析瞬间利用自身形状和磁场作用，将电弧弧根快速从接触区域引至预设的引弧片上，从而保护主触头。

磁吹系统是驱动电弧的“引擎”，电流自励式磁吹线圈结构简单，其磁场强度与分断电流成正比，但在小电流时分断能力可能不足；永磁体磁吹提供恒定磁场，能改善小电流分析性能，但需防止在大电流时因磁场过强导致电弧运动过快、撞击灭弧室壁面引起重燃或压力过高。混合式磁吹系统结合了两者的优点，磁吹系统的设计瓶颈在于如何在整个触头开距范围内，尤其是在电流变化剧烈的短路过程中，为电弧提供适中且方向稳定的洛伦兹力，磁路的设计需精确仿真，避免磁饱和或磁场畸变。

灭弧室栅片阵列是能量耗散的“主战场”，现有设计瓶颈包括：（1）栅片热饱和：在极高能量电弧持续注入下，栅片温度迅速升高，散热能力下降，可能导致电弧无法被有效冷却而停滞或重燃。（2）电弧堵塞：栅片间隙过小或排列过密，可能被熔融的金属颗粒或电离气体堵塞，阻碍后续电弧进入和分割。（3）电弧“滑出”：栅片边缘设计不当，电弧可能从栅片末端滑出，未能被充分分割。（4）材料烧损与变形：长期分断后，栅片尖端烧蚀变形，改变间隙距离，影响长期分断稳定性。栅片表面镀层可改善初始导电和散热，但镀层质量与附着力是关键。

灭弧室整体结构与气吹通道是内部环境的“调控器”，灭弧室腔体尺寸需在容纳电弧运动与限制体积之间取得平衡。排气通道的位置、数量和截面积设计至关重要，理想的排气应引导高温气体和金属粒子远离触头系统和栅片间隙，同时避免形成对电弧不利的湍流或回流。产气材料的运用可以主动增加气吹压力，但其产气特性、绝缘性能和机械强度需与分断过程相匹配，当前瓶颈在于难以精确模拟和调控这一瞬态、可压缩、多相的复杂流动过程。

#### 4 分断结构一体化优化设计方案

基于上述瓶颈分析，本研究提出一套分断结构一体化优化设计方案，强调各组件间的协同作用。

（1）触头-磁吹协同优化：设计具有非对称轮廓的弧触头，结合精细化磁路仿真，实现电弧的“定向引爆”与驱动。具体而言，将弧触头设计为具有一个尖锐的“引弧角”，该角度与磁吹磁场方向配合，确保在触头分离瞬间，电弧弧根在洛伦兹力和电极形状效应的共同作用下，被精准地“抛射”向引弧片的入口。磁路采用“渐变式”磁轭设计，在触头刚分区域提供较强磁场以快速起弧和驱动，在电弧进入栅片区域后，磁场强度适度减弱，避免电弧以过高动能撞击栅片根部造成反弹或金属喷溅。同时，在主触头区域设置磁屏蔽或弱磁区，减少主触

头区域的磁场强度，降低主触头间的电动斥力，有利于提高触头系统的动稳定性。

（2）栅片系统的创新构型与材料组合：提出“多级渐缩-扩张”栅片阵列，靠近电弧入口处的第一级栅片采用较厚、片距稍大的U型镀铜钢片，目的是承受电弧的初始冲击，并利用U型结构对电弧进行初步“收拢”和稳定引导。中间级栅片采用片距渐缩的V型铁镍合金片，铁镍合金具有更高的热容和耐烧蚀性，渐缩片距有利于逐级增强对电弧的压缩和分割效果，提升电弧电压。最后一级栅片片距再次适度增大，形成扩张出口，有利于已被充分冷却和分割的剩余电弧顺利排出，并降低内部背压。在栅片表面采用激光微织构技术，制造微米级的沟槽阵列，这些沟槽可以增加散热表面积，同时引导金属蒸气凝结附着，减少游离金属粒子对绝缘的污染。

（3）灭弧室流场与压力场的主动调控设计：优化灭弧室腔体形状，使其符合电弧运动轨迹，减少无效空间，设计“主-辅”双通道排气系统，主排气通道位于灭弧室顶部，正对栅片阵列出口，截面较大，用于快速排出高温主气流和大部分游离粒子。辅助排气通道位于灭弧室侧下方，截面较小，与一个内置的小型产气腔相连。在分析初期，辅助通道因压力差较小而排气量少；当内部压力升高到一定阈值，产气腔材料受热剧烈产气，推动辅助通道形成一股向上斜喷的辅助气流，这股气流恰好吹拂栅片中后部的电弧，起到补充冷却和防止电弧回流的作用。通过计算流体动力学（CFD）仿真，优化双通道的截面积比和开口角度，实现压力构建与释放的平衡，避免压力峰值过高或出现破坏性压力振荡。

（4）集成仿真与验证：建立包含电磁场、流场、温度场和动网格技术的多物理场耦合瞬态仿真模型。该模型能模拟从触头分离、电弧起燃、在磁场驱动下运动、进入栅片被分割、与气体相互作用直至熄灭的全过程。通过仿真，可以直观观察优化前后电弧的运动速度、形态变化、压力分布和温度场演化，定量比较电弧电压曲线、能量沉积分布等关键参数，从而在物理样机制作前对优化方案的有效性进行预测和迭代改进。

#### 5 实验验证与性能评估

为验证优化设计方案，搭建了符合标准的短路分断实验平台，实验依据 GB/T14048.2（等同 IEC60947-2）标准，对优化前后的断路器样机进行预期短路分断能力（ $I_{cu}$ ）和运行短路分断能力（ $I_{cs}$ ）测试，实验电路采用合成回路法，可精准控制短路电流的幅值、功率因数和相位角。

（1）分断能力测试：在相同的预期短路电流条件下，对比传统结构与优化结构的分断结果，实验数据显示，优化结构样机成功分断电流，且燃弧时间平均缩短了约 40%。电弧电压峰值提高了约 30%，表明电弧能量被更快速地消耗。所有测试后的样机均顺利通过了工频耐压和脉冲耐压验证，证明其绝缘

恢复完全。

(2) 高速摄像与电参数同步测量: 利用高速摄像机透过灭弧室的观察窗, 记录电弧运动全过程, 同步采集触头两端电压、回路电流、灭弧室内关键点压力信号。对比分析可见, 优化结构的电弧从触头分离后, 运动轨迹更加清晰、迅速, 几乎无停滞地进入栅片区。在栅片内, 电弧被均匀分割成多段, 亮度随时间迅速衰减。而传统结构的电弧在触头区域有明显滞留, 进入栅片后分布不均匀, 部分栅片间隙未被有效利用。电压波形与高速影像的同步分析证实, 电弧电压的每次跃升均对应电弧成功进入新的栅片间隙。

(3) 触头与栅片烧蚀分析: 分断实验后, 解体样机, 使用电子显微镜 (SEM) 和能谱分析 (EDS) 观察触头及栅片表面的烧蚀形貌与成分变化。优化结构的弧触头烧蚀区域集中于预设的引弧角, 主触头表面完好; 栅片表面烧蚀均匀, 尖端形状保持良好, 镀层无明显大面积剥落。传统结构的触头烧蚀面积大且深, 主触头出现熔焊痕迹; 栅片出现局部熔穿、变形, 部分片间隙被金属飞溅物堵塞。烧蚀产物的量化也表明优化结构的材料磨损率降低了约 50%。

(4) 温升与寿命验证: 优化设计在提升分断能力的同时,

需确保不影响断路器的正常温升性能和机械寿命。按照标准进行额定电流下的长期温升试验, 优化样机的接线端子温升低于标准限值, 且与优化前相当, 说明优化未对正常导电回路造成不利影响。经过数万次机械操作循环试验, 触头系统、操作机构和灭弧室结构均保持完好, 功能正常。

## 6 结论

本研究通过对低压断路器分断结构的系统性优化, 显著提升了其短路电流耐受与分析性能, 研究提出的一体化协同设计方案, 聚焦于触头-磁吹系统配合、栅片构型创新及灭弧室流场调控, 实现了电弧的快速驱动、高效分割与冷却。

实验验证表明, 优化后的分断结构使预期短路分断能力提升超过 25%, 燃弧时间缩短约 40%, 关键部件电磨损率降低约 50%, 同时保持了良好的温升特性与机械寿命。该成果为开发更高分断等级、更小体积、更长电气寿命的低压断路器提供了可靠的技术路径。

本研究所采用的多物理场耦合仿真与协同设计方法, 对开关电器技术发展具有借鉴意义, 未来可进一步探索混合式分断模式与智能控制策略, 推动低压保护电器向更高性能与智能化方向发展。

## 参考文献:

- [1] 张威,张宇,麻玉林,等.低压断路器的电场分析与优化设计[J].电器与能效管理技术,2024,(08):45-49+99.
- [2] 郎建才.关于低压断路器短路分断能力检测的验证方法的探讨[J].低压电器,2009,(17):53-54.
- [3] 汤金华.低压断路器几种特殊的短路保护[J].电工电气,2012,(08):28-31+60.
- [4] 陆辉.低压断路器分断能力校验的简化方法[J].电气应用,2013,32(18):57-59.