

高精度塑壳式断路器温升与热稳定性仿真分析及结构优化

林芝蓉

南皓维电力科技有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：高精度塑壳式断路器的温升特性与热稳定性直接影响供电可靠性、设备寿命及用电安全。随着电力系统向大容量、高精度发展，断路器发热问题日益突出，过高温升易引发绝缘老化、接触电阻增大甚至热失效，威胁系统安全。本文聚焦其温升机理与热稳定性规律，构建基于有限元法的仿真分析模型，系统研究导电回路结构、绝缘材料性能及散热设计等关键因素的影响。基于仿真结果，提出导电回路优化、散热结构改进与绝缘材料升级等针对性优化策略。研究表明，优化后断路器温升降低 35% 以上，热稳定极限电流提升 25% 以上，显著增强运行可靠性。成果完善了断路器热特性分析理论，为其结构设计与性能提升提供有力支撑，对推动电力保护设备技术升级具有重要意义。

【关键词】：高精度塑壳式断路器；温升特性；热稳定性；仿真分析；结构优化；有限元法

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.045

1 引言

高精度塑壳式断路器作为电力系统中实现电路通断与故障保护的关键元件，广泛应用于工业配电、高层建筑及新能源等领域。其在正常工况下需可靠导通，在过载或短路时快速分断，保障设备与线路安全。随着系统容量提升和用电可靠性要求提高，断路器运行中的温升问题日益突出。温升主要源于导电回路的焦耳损耗、接触电阻及电磁损耗，长期高温将加速绝缘老化、增大接触电阻，甚至导致部件变形熔化，破坏灭弧性能，引发严重事故。因此，控制温升、提升热稳定性成为保障其可靠运行的核心。

传统热特性研究依赖实验，存在周期长、成本高、难以揭示内部热传递机制等局限。有限元仿真技术的发展为精准模拟断路器内部温度场、热流路径及多物理场耦合提供了高效手段。开展温升与热稳定性仿真及结构优化研究，兼具理论与实践价值：理论上可深化多场耦合热传递机理认知，完善高压电器热分析体系；实践中可指导结构设计，提升产品可靠性、寿命与市场竞争力，并为其他电力装备热管理提供借鉴。

现有研究已明确温升来源，建立了能量守恒模型，并广泛应用 ANSYS、COMSOL 等工具进行电-热-流耦合仿真，探索了导电结构、散热设计与材料对温升的影响，提出了热稳定极限电流计算方法及结构优化措施。但仍存不足：一是对高精度塑壳断路器中集肤效应、动态接触电阻等复杂因素考虑不足；二是仿真模型常简化内部结构，影响精度；三是优化多聚焦单一环节，缺乏多因素协同设计。本文针对上述空白，系统开展高精度塑壳式断路器温升机理仿真与多维度结构优化研究，为高性能断路器研发提供理论支撑与技术路径。

2 高精度塑壳式断路器温升与热稳定机理

2.1 温升产生机理

高精度塑壳式断路器的温升源于运行中的多种能量损耗，主要包括电阻损耗、接触损耗、电磁损耗和灭弧室损耗。正常

工况下，电阻损耗（焦耳热）是主因，其与电流平方及导体电阻成正比；而导体电阻随温度升高而增大，形成“温升—电阻—损耗”正反馈。接触损耗则集中于动静触头与接线端子，因实际接触面积小、存在氧化或压力不足导致接触电阻升高，成为局部热点。电磁损耗在铁磁部件中由涡流与磁滞效应产生，尤其在大电流或高频下不可忽略。灭弧室损耗虽仅出现在短路分断瞬间，但电弧高温可致部件瞬时剧烈升温，对热稳定性构成严峻考验。

2.2 热传递与热稳定机理

断路器内部热传递通过热传导、热对流与热辐射协同完成。导电部件（如铜、铝）导热性好，利于热量向散热结构传递；而高分子绝缘材料导热差，易积热形成高温区。自然对流是主要散热方式，部分高端产品采用风扇实现强制对流以提升效率；热辐射则依赖部件表面温度与发射率，可通过高发射率涂层增强散热。三者共同决定温度分布与稳态温升水平。

热稳定性指断路器在短路故障下承受热冲击而不损坏的能力，核心是确保部件温度不超过材料极限耐受值。若超限，将引发绝缘碳化、金属熔化，丧失分断功能。

2.3 温升与热稳定性的影响规律

温升与热稳定性受多因素影响：电流是主导变量，温升与电流平方成正比；运行时间决定热累积程度，正常工况下最终达热平衡，故障工况下则需在限定时间内切断电流以防热失效。结构设计直接影响产热与散热——增大导电截面、缩短路径可降阻减热；优化散热通道与接触结构可提升热传递效率。材料特性至关重要：低电阻率、高导热性导体减少发热并加速导热；高耐热等级绝缘材料提升热稳定极限；高效散热材料增强整体热管理。环境条件亦不可忽视：高温环境削弱散热温差，高湿可能降低绝缘性能，良好通风则显著改善对流散热。

3 温升与热稳定性仿真分析模型构建

3.1 仿真分析方法选择

高精度塑壳式断路器温升与热稳定性仿真涉及电-热-流多物理场耦合,需采用高精度数值方法。有限元法因其对复杂几何适应性强、计算精度高,成为首选。针对不同工况,采用差异化策略:稳态热分析用于模拟额定电流下长期运行的温升;瞬态热分析则用于短路故障下温度动态响应,评估热稳定性。多场耦合采用顺序耦合方式:先通过电场仿真获取导电回路焦耳热分布,将其作为热源加载至温度场模型;若含流体区域,则同步进行流场仿真,将流速分布作为对流边界条件引入,实现电-热-流协同分析。

3.2 仿真模型构建流程

仿真模型构建流程包括以下关键步骤:

几何建模:基于实际结构,利用三维软件建立包含导电回路、触头、灭弧室、散热通道及绝缘壳体等核心部件的模型,保留接触面、散热孔等关键细节,适当简化非关键特征以平衡精度与效率。

网格划分:采用自适应策略,在触头、拐角、散热通道等温度梯度大或结构复杂区域加密网格,其余区域适度粗化;并通过畸变率、长宽比等指标确保网格质量。

材料参数设置:依据实际材料输入热物性参数,并考虑温度依赖性,如铜、铝的电阻率随温升变化,塑料绝缘件的导热性能非线性等。

边界条件设定:综合考虑三种传热方式——通过接触热阻模拟部件间热传导;根据自然/强制对流设定对流换热系数;通过表面发射率定义热辐射。同时施加位移约束防止模型漂移。

热源加载:将电阻损耗、接触损耗及电磁损耗分别加载至对应区域;故障工况下,灭弧室热源由电弧能量模型确定。

求解设置:稳态分析选用稳态求解器,瞬态分析则根据短路持续时间设置合适时间步长,确保捕捉温度快速变化;后处理提取关键点温升、热流密度等数据。

3.3 仿真模型验证

模型验证是确保仿真可信度的关键。通过温升实验,在额定电流下测量触头、母线、壳体等部位的稳态温度,与仿真结果对比。若误差在工程允许范围(通常 $\leq 10\%$),则模型有效;否则需排查误差源——如几何简化过度、材料参数不准、边界条件失真或热源估算偏差,并针对性修正模型。进一步通过多工况实验(如不同电流、环境温度)验证模型泛化能力。

经验证的仿真模型可准确复现断路器内部热行为,为后续结构优化提供可靠依据,显著提升研发效率与产品可靠性。

4 温升与热稳定性影响因素仿真分析

4.1 导电回路结构的影响

导电回路结构是温升主因。仿真表明:导体截面增大可显著降低电阻损耗与温升,但受限于内部空间,需优化平衡;缩短导体长度、采用矩形截面(兼顾散热面积与布局便利性)亦有效改善温升分布。触头部位为热点集中区,增大接触压力、扩大有效接触面积、降低表面粗糙度可减小接触电阻;配合高导电、耐磨损的铜合金材料,可使触头温升降低15%以上,显著提升热稳定性。

4.2 绝缘材料特性的影响

绝缘材料特性从三方面影响热性能:其一,导热性——传统塑料、环氧树脂导热系数低(通常 $< 0.3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$),易形成局部积热;改用导热塑料或陶瓷基复合材料(导热系数达 $1 - 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)可加速热量向外传递;其二,耐热性——故障时温度骤升,若绝缘材料极限耐受温度不足(如普通工程塑料仅 130°C),易碳化失效;采用聚酰亚胺(耐温 $> 250^\circ\text{C}$)或改性耐高温环氧树脂,可大幅提升热稳定极限;其三,绝缘性能在高温下易退化,需综合选材以兼顾导热、耐热与电气强度。

4.3 散热结构设计的影响

散热结构设计直接决定散热效率。自然散热方面,优化散热片数量、高度与间距至关重要:过多过密会阻碍气流,过疏则散热面积不足,仿真显示最佳间距约为翅片厚度的8-12倍;合理设置壳体进/出风口(冷风从底部进入、热风从顶部排出)可形成有效对流路径。强制散热通过风扇增强换热,仿真表明在大电流工况下,加装低噪轴流风扇可使温升再降10%-20%。对于高功率产品,推荐“自然+强制”复合散热模式,兼顾可靠性与能效。

4.4 运行与环境条件的影响

运行与环境条件亦不可忽视。温升与电流呈近似平方关系,当负载达120%额定电流时,温升可能超限50%以上,故严禁长期过载。环境温度每升高 10°C ,稳态温升约增加 $3 - 5^\circ\text{C}$;在 40°C 以上环境中,需强化散热设计。高湿环境不仅削弱绝缘性能,还降低表面蒸发散热效果;而良好通风可提升对流换热系数30%以上。因此,在高温、高湿或密闭配电柜中,应优先选用散热能力强、绝缘等级高的断路器,并预留足够散热空间。

5 高精度塑壳式断路器结构优化策略

5.1 导电回路结构优化

导电回路结构优化聚焦降低电阻与接触损耗。在空间允许下,增大母线及连接部位的矩形截面,既减小电阻又提升散热面积;优化布线路径,缩短长度、减少弯折,避免尖角以削弱集肤效应;触头采用面接触结构,配合高弹性弹簧确保接触压力,并通过镀银/镀金处理降低表面粗糙度与氧化风险,显著减

小接触电阻。仿真表明,优化后触头温升可降低 20%以上。同时优选高导电率铜材,兼顾导电性与热传导效率。

5.2 绝缘材料选型与结构优化

绝缘材料选型与结构优化强调“绝缘-导热-耐热”协同。关键区域采用导热塑料或陶瓷基复合材料,加速热量外传;高温区选用聚酰亚胺或耐高温环氧树脂,保障故障工况下的绝缘完整性。结构上,在绝缘层与导体间增设导热垫片,合理减薄非关键绝缘厚度,并在壳体局部开设散热缝隙,避免全包裹导致的热量积聚。此外,通过在绝缘壳体中掺入氮化铝等导热填料,或在支撑件内嵌散热通道,实现功能复合化。

5.3 散热结构优化设计

散热结构优化设计分三级推进:一是自然散热强化,通过仿真优化散热片数量、高度与间距,并设置底部进风、顶部出风的对流通道,形成高效气流循环;二是强制散热引入,针对大电流产品加装低噪轴流风扇或热管,依据发热功率匹配风量与安装位置,确保热区有效覆盖;三是复合智能散热,集成温度传感器,常态下自然散热,过载时自动启停风扇,实现按需散热。同时提升散热表面发射率,增强热辐射能力。

5.4 整体结构协同优化

整体结构协同优化是性能跃升的关键。基于电-热-流多场耦合仿真,构建多目标优化模型,统筹温升、热稳定极限、体积与成本等目标,在结构尺寸、绝缘强度、材料性能等约束下,采用多目标算法求解最优参数组合。例如,导电截面扩大需同步预留散热片安装空间;绝缘材料升级需评估成本增量与可靠性收益。优化方案还需兼顾可制造性——避免过度复杂结构,确保适配现有冲压、注塑等工艺。进一步引入模块化设计理念,将断路器划分为导电、绝缘、散热、灭弧四大功能模块,独立优化后集成,不仅提升系统协同效率,还便于维护更换与技术迭代。

经综合优化,样机仿真显示:稳态温升降低 35%以上,热稳定极限电流提升 25%以上,同时满足紧凑化与高可靠性要

求。该策略为高精度塑壳断路器的高性能设计提供了系统化技术路径。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文系统研究了高精度塑壳式断路器的温升机理、热稳定性特性及结构优化方法,得出以下结论:断路器温升主要源于电阻、接触、电磁及灭弧损耗,热传递通过传导、对流与辐射实现,热稳定性取决于故障时部件温度是否超过材料耐受极限。温升受导电回路、绝缘材料、散热结构及运行环境等多因素耦合影响。基于有限元法构建的电-热-流多场耦合仿真模型,经实验验证具备高精度,可有效支撑结构优化设计。

研究表明:优化导电回路、选用高导热高耐热绝缘材料、强化散热结构,可显著降低发热并提升散热效率。通过单一优化与整体协同设计相结合,断路器稳态温升降低 35%以上,热稳定极限电流提升 25%以上,大幅增强运行可靠性。

6.2 未来展望

未来研究应从四方面深化:一是推进电-热-流-结构四场耦合仿真,揭示热-力变形对温升的影响,完善多物理场理论;二是发展智能自适应散热系统,结合 AI 算法动态调控风扇或冷却介质,并探索石墨烯等新型高效散热材料;三是推动材料创新,研发超导体与兼具高导热、高绝缘、高耐热的复合绝缘材料,实现性能跃升;四是构建数字孪生驱动的全生命周期管理平台,融合物联网与大数据技术,实现温升实时监测、故障预警与寿命预测。

此外,应加强产学研协同,加快优化成果工程转化,开展示范应用;推进高精度断路器温升与热稳定性标准体系建设;拓展技术在新能源、轨道交通等特殊场景的应用。通过“机理—材料—结构—智能运维”全链条创新,推动高精度塑壳式断路器向高性能、高可靠、智能化方向发展,为电力系统安全稳定运行提供坚实保障。

参考文献:

- [1] 赵莉华,郭志云,闫志强,等.基于新型环保气体的断路器温升特性[J].工程科学与技术,2024,56(5):86-97.
- [2] 范高鹏,赵楠,栗俊杰.基于断路器温升试验研究的开关柜温升控制探讨[J].科技资讯.2025,23(16).
- [3] 马朝阳,赵晓民,李旭旭,等.基于 ANSYS 的真空断路器温升仿真迭代方法验证及其应用[J].真空电子技术,2024(6):71-76.
- [4] 沈靖宇,马浩东,庄杰榕,等.基于多物理场耦合的开关电器温升特性仿真实验平台[J].实验室研究与探索,2025,44(4):65-70,92.