

# 低压断路器温升特性分析与热管理优化设计

李振贺 胡定清

浙江华昌电气有限公司 浙江 温州 325000

**【摘要】**：低压断路器是低压配电系统核心保护与控制设备，其运行温升特性影响设备寿命、绝缘性能与动作可靠性。长期承载额定电流或短时承受过载电流时，断路器内部因焦耳热、接触电阻热等升温，若超过允许阈值，会引发触头烧蚀等故障，威胁系统安全运行。本文针对温升控制需求，开展温升特性分析与热管理优化设计研究。剖析温升产生机理与分布规律，构建多物理场耦合模拟模型，探究触头参数等关键因素对温升特性的影响。基于模拟结果，提出导电回路优化等多维度热管理优化方案。研究成果完善了相关理论体系，为提升断路器可靠性、延长寿命提供技术支撑，对保障系统安全高效运行有重要工程应用价值与理论意义。

**【关键词】**：低压断路器；温升特性；热管理；多物理场耦合；导电回路优化；散热结构

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.025

## 1 引言

工业自动化与民用电力需求增长导致低压配电系统负荷密度上升，对低压断路器运行可靠性提出更高要求。导电回路温升直接影响其性能与寿命，过高温升易引发电气故障。在高负荷与紧凑化趋势下，传统热管理难以应对。开展温升特性分析与热管理优化，理论上可揭示热行为规律，完善模拟方法；实践上有助于提升可靠性、延长寿命、保障系统安全。

国内外研究从试验测试发展至有限元模拟，热管理优化聚焦导电回路、散热结构与材料选型。但现有研究仍存不足：多物理场耦合效应考虑不足，接触电阻热模拟精度低；优化缺乏系统性与全流程协同；复杂工况下温升控制研究薄弱；热管理与其他性能协同匹配机制尚不明确。本文旨在提升模拟精度，构建覆盖设计-材料-控制的全流程协同优化方案，填补现有研究空白。

## 2 低压断路器温升特性机理分析

### 2.1 温升产生的核心机理

低压断路器温升源于电能向热能转化，核心产热机理有焦耳热与接触电阻热，受散热制约形成动态温度平衡。焦耳热是电流通过导体因固有电阻产生，产热功率与电流平方、导体电阻成正比，母线是主要来源。接触电阻热主要产生于触头、螺栓连接等部位，因接触面微观不平产生大电阻而发热，其大小受多种因素影响，运行中动态变化，加剧温升波动。散热包括热传导、热对流与热辐射，温升最终状态由产热与散热功率平衡决定，产热大于散热温度升高，两者相等则温度稳定。

### 2.2 温升分布规律与影响因素

低压断路器温升分布不均，核心发热区在触头系统、母线连接部位、脱扣机构附近，温度明显高于其他部位，外壳等部件温度低，形成温度梯度。影响因素分电气、结构、环境三类。电气参数如负荷电流、频率、过载时长等，电流大、过载长则温升高，频率影响集肤效应。结构参数包括导电回路、接触压

力等，合理布局、增大压力、优化散热可抑制温升。环境参数如温度、湿度、通风等，高温、高湿、通风差会使温升升高，设备运行时长和通断频率也会影响温升。

### 2.3 温升对断路器性能的影响机制

温升过高从电气、机械、材料性能三方面影响运行可靠性。电气性能上，高温使导体电阻增大、绝缘老化、触头氧化，引发故障。机械性能方面，脱扣机构部件热变形影响精度，外壳等变形影响操作。材料性能上，导电材料强度随温度下降，长期高温导致部件变形。绝缘材料使用寿命随温度升高指数下降，显著缩短设备整体使用寿命。

## 3 低压断路器温升特性模拟模型构建

### 3.1 模拟模型的理论基础

低压断路器温升特性模拟以电-热-流多物理场耦合合理理论为核心，结合电路、热传导、流体力学理论构建模型。电路理论计算导电回路电流与电阻分布确定焦耳热功率；热传导理论用傅里叶定律描述固体热量传递；流体力学理论用纳维-斯托克斯方程描述空气流动与热对流散热。采用接触电阻动态模型结合 Holm 理论精准模拟接触电阻热产热，用斯蒂芬-玻尔兹曼定律提升辐射散热模拟精度，通过耦合求解多物理场方程动态模拟温升全过程。

### 3.2 多物理场耦合模型构建

构建涵盖电场、温度场、流场的多物理场耦合模型全面精准模拟温升特性。电场模型用欧姆定律与基尔霍夫定律计算电流分布与焦耳热功率，考虑集肤与邻近效应优化电流密度计算。温度场模型用热传导方程结合内热源描述温度分布，考虑热对流与热辐射边界条件模拟热量传递。流场模型用不可压缩流体的纳维-斯托克斯方程结合连续性方程描述空气流动，考虑自然与强制对流耦合，有通风结构时引入强制对流散热模型。电场的焦耳热与接触电阻热影响温度场，温度场影响电场电流分布，温度场驱动流场空气流动，流场影响温度场热对流

散热，形成多场耦合关系。

### 3.3 边界条件与初始条件设定

合理设定边界与初始条件是保证模拟精度的关键。边界条件包括电气、热、流动边界。电气边界设定输入电流或电压，考虑交流电流正弦特性，设定接地边界。热边界包括固-固、固-气界面与表面热辐射边界，分别按不同规则设定。流动边界设定为外壳表面压力与速度边界。初始条件包括初始温度、压力、速度与电势，分别设定为环境温度、大气压力、零、零。同时考虑动态运行特性，将负荷电流变化、通断操作时序作为动态边界条件模拟温升变化。

### 3.4 模拟方法与求解策略

采用高精度有限元法离散化多物理场耦合控制方程，将断路器结构划分为有限单元。采用分步耦合求解策略：先求解电场方程获得电流密度分布及焦耳热；将热产热功率作为内热源代入温度场方程计算温度分布；据此修正导体电阻、接触电阻及流场源项；再求解流场方程获得空气流速分布；最后将对流换热系数反馈至温度场进行迭代计算，直至各物理场参数收敛（残差小于设定阈值且温度变化量低于允许误差）。

为提升计算效率与精度，采用两项关键技术：自适应网格加密技术，在触头接触、母线连接等温升梯度大区域加密网格，在外壳、绝缘支撑等温升平缓区稀疏网格；时间步长自适应调整技术，在温升快速变化阶段采用小步长，稳定阶段增大步长。该方法有效平衡了计算精度与效率，为断路器热管理优化提供可靠模拟工具，准确捕捉关键部位温度分布特征，为结构优化设计奠定基础。

## 4 基于模拟的温升特性影响因素分析

### 4.1 导电回路参数对温升特性的影响

导电回路参数是影响低压断路器温升特性的核心因素，通过模拟分析导体截面尺寸、接触压力、导电回路布局对温升的影响。增大导体截面尺寸可降低稳定温升，但过大则会增加设备体积与成本且受安装空间限制，需合理匹配；增大接触压力可减少接触电阻热产热，但达到一定阈值后，继续增大压力对温升改善有限且可能加剧触头磨损；不合理的导电回路布局会导致局部温升加剧，采用对称式布局等可优化电流分布，提升温升分布均匀性。

### 4.2 散热结构对温升特性的影响

散热结构直接决定温升水平，通过模拟分析散热鳍片设计、外壳通风结构、导热通道设置对温升的影响。增加散热鳍片数量和高度可降低稳定温升，需合理设计鳍片间距等；在外壳设置通风孔可促进空气对流，需合理设计位置与尺寸，在防尘与散热间平衡；设置导热垫等可构建高效热传导路径，降低高温部件温度。

### 4.3 材料特性对温升特性的影响

材料的导电与导热性能影响产热与散热，模拟分析导电材料、绝缘材料、导热材料特性对温升的影响。铜质导电部件温升低于铝质，铜合金适用于对强度要求高的部位，需合理选型；选用耐高温、低导热系数的绝缘材料可降低绝缘部件温度，但需配合高效散热结构；导热材料导热系数越高、耐高温性能越匹配，越能降低高温部件温度。

### 4.4 环境与工况参数对温升特性的影响

环境与工况参数影响温升特性，模拟分析环境温度、通风条件、负荷电流对温升的影响。环境温度升高，断路器稳定温升升高且达到稳定时间缩短，高温环境需降低载流能力或增强散热；良好通风条件可降低稳定温升，封闭或通风不良环境会使温升显著升高；负荷电流增大，稳定温升显著升高。过载电流会使温升快速上升，若过载时间过长，可能导致设备过热损坏；高频通断操作会造成热量积累，每次通断产生的电弧热与接触电阻热叠加，使稳定温升高于连续运行工况。

## 5 低压断路器热管理优化设计

### 5.1 导电回路优化设计

基于温升特性模拟结果开展导电回路优化，从源头减少热量产生。导体截面尺寸采用“分级匹配”设计，依电流分布规律调整截面大小，平衡材料用量与温升控制；采用异形导体结构，提升载流能力。接触系统采用“低接触电阻”设计，选用铜铬合金触头材料，优化触头形状，用碟形弹簧提供稳定接触压力，定期维护部位用可拆卸式触头结构。导电回路布局采用“短路径、对称式”设计，缩短电流路径、确保电流分布均匀、减少分支回路与连接点，分支回路连接处用汇流排设计。

### 5.2 散热结构协同优化

开展散热结构协同优化，构建全流程高效散热体系。散热鳍片采用“不等距、变截面”设计，依外壳温度分布调整鳍片密度与高度，鳍片表面阳极氧化处理。外壳通风结构采用“上下对流”设计，进、出风口用百叶窗式，通风通道内设导流板。导热通道采用“多点式”设计，在高温部件与外壳间设导热柱。紧凑型低压断路器采用“内置散热风扇”设计，风扇由温度传感器控制，合理设计位置与转速，优化安装结构。

### 5.3 材料选型与适配优化

开展材料选型与适配优化，提升产热控制与散热传递效果。导电材料选无氧铜或铜银合金，触头表面银镀层处理。绝缘材料选聚酰亚胺、环氧树脂等，接触面涂耐高温绝缘导热硅脂。导热材料选石墨导热垫、铜质导热柱等，外壳材料选铝合金并作氟碳涂层处理，密封材料选耐高温硅橡胶。

### 5.4 智能热管理控制策略优化

开展智能热管理控制策略优化，实现温升动态精准控制。

针对低压断路器在过载或频繁通断时可能出现的异常电弧与温升骤升问题，本文引入基于信号比较与逻辑判别的电弧识别机制，结合温度 - 电流双参数反馈，构建闭环热管理控制系统。

如图 2 所示，弧判断电路系统由采样、比较、逻辑异或门及控制器四部分组成。采样电路获取主回路电流信号，滤波后送比较电路；比较电路将信号与预设的第一、第二基准信号比对，输出两路结果；两路信号输入异或门，仅当状态不一致时，异或门输出高电平脉冲，表明存在疑似电弧特征。该判别逻辑时间响应特性如图 1 所示：电信号在两基准信号间振荡或突变时，两比较器输出有相位差，异或输出有效触发脉冲，为控制器提供电弧预警依据。

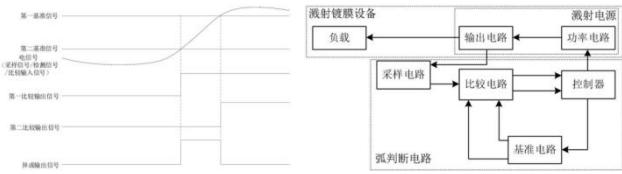


图 1 信号时序图

图 2 弧判断电路框图

为提升判别精度与抗干扰能力，比较电路采用高共模抑制比运算放大器，具体结构如图 3 所示。图中，U1 与 U2 构成双通道电压比较器，输入端接 RC 低通滤波网络抑制高频噪声，参考电压由精密稳压源提供，确保基准信号稳定，提高对微弱电弧信号敏感度，避免电磁干扰误动作。

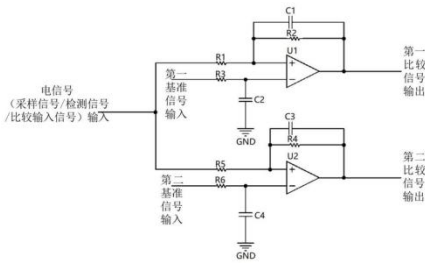


图 3 比较电路原理图

在此基础上，系统采用“温度 - 电流”双参数自适应控制策略：温度传感器检测到触头区域温升速率异常或电流信号触

发弧判别逻辑时，控制器启动散热风扇或发降负荷预警指令；结合脱扣机构热 - 磁特性，动态优化过载脱扣曲线，在温升达危险阈值前切断故障电流。此外，二次控制回路采用低功耗、耐高温电子元件，引入光电隔离技术，提升高温环境控制可靠性与抗电磁干扰能力。

### 5.5 优化设计效果理论验证

通过温升特性模拟与理论分析验证优化效果。模拟显示，优化后的导电回路降低接触与导体电阻，焦耳热与接触电阻热产热功率降超 30%；优化后的散热结构提升散热效率超 40%，额定负荷电流下，断路器稳定温升降超 25%，触头最高温度在允许阈值内。

过载时，优化后的热管理系统快速响应温升，通过强制散热与预警避免超标；智能热管理控制策略能耗降超 20%，实现节能与温控平衡。理论分析表明，优化后的低压断路器在复杂工况下稳定温升低，绝缘材料与机械部件寿命延长超 50%，运行可靠性显著提升。

## 6 结论与展望

本文针对低压断路器温升特性与热管理优化展开研究。分析表明，设备核心产热源于焦耳热与接触电阻热，散热通过传导、对流与辐射实现，温升分布不均，触头与母线连接部位为关键发热区，过高温升显著降低运行可靠性。研究构建了电-热-流多物理场耦合模拟模型，创新性地考虑接触电阻动态变化与多场耦合效应，模型精度优于传统方法，为热管理优化提供可靠工具。模拟结果揭示：合理设计导电回路参数、优化散热结构、选用高性能材料及改善环境工况可有效降低产热并提升散热效率。据此提出的多维度热管理优化方案成效显著：产热功率降低超 30%、散热效率提升超 40%、额定负荷下稳定温升降低超 25%、设备寿命延长超 50%。未来研究将深化接触电阻动态演化模型、开发新型散热材料与结构、融合人工智能算法实现智能热管理，并推进产业化与标准化进程。通过多维度创新，持续提升低压断路器热管理水平与运行可靠性，为低压配电系统安全稳定运行提供坚实保障。

### 参考文献:

[1] 杨文强,张蓬鹤,张保亮. 小型断路器温升预测与仿真分析[J]. 电器与能效管理技术,2020(6):25-29.  
 [2] 葛瀚明,许志红,姚国华.小型断路器导电回路温度场的仿真与分析[J].电器与能效管理技术.2017,(4).  
 [3] 时宝朋,侯春光,曹云东,等.12 kV 开关柜载流回路热分析与温度预测[J].电器与能效管理技术.2023,(8).  
 [4] 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):81-83.  
 [5] 王冰青,高孝天,周英姿. 低压断路器健康管理试验与研究[J]. 电器与能效管理技术,2024(5):30-35.