

KYN28A-12 型高压开关柜

温度场及气流场稳态特性仿真分析报告

基于 CFD 的热流耦合数值模拟

报告编号: TH-KYN28-001

分析软件: ANSYS Fluent 2024 R1

编制单位: 仿真分析工作组

适用对象: 设计研发部

1 概述

1.1 分析目的

本报告对 KYN28A-12 型高压开关柜进行温度场及气流场仿真分析。通过 CFD（计算流体动力学）方法模拟开关柜内部的热传递和空气流动特性，评估额定工况下的温升分布，为开关柜热设计优化提供理论依据。

分析内容:

- 稳态温度场分布: 评估各部件温升是否满足标准要求
- 气流场分布: 分析自然对流和强制风冷下的气流组织
- 热点识别: 定位高温区域，指导散热设计优化

1.2 适用标准

序号	标准编号	标准名称
1	GB/T 11022-2020	高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求
2	GB/T 3906-2020	3.6 40.5kV 交流金属封闭开关设备和控制设备
3	IEC 62271-1:2017	高压开关设备和控制设备通用规范
4	IEC 62271-200:2021	交流金属封闭开关设备和控制设备

表 1 适用标准清单

1.3 温升限值要求

依据 GB/T 11022-2020, 开关柜各部位温升限值如下:

部位	温升限值 (K)	最高允许温度 (° C)	备注
裸铜、裸铜合金触头	65	105	环境温度 40° C
镀银或镀镍触头	70	110	环境温度 40° C
母线连接处	65	105	镀锡/涂电力脂
可触及外壳表面	30	70	安全限值
不可触及金属部件	50	90	—
油类	50	90	—

表 2 温升限值要求 (环境温度 40° C)

2 分析模型

2.1 几何模型

分析对象为 KYN28A-12 型中置式高压开关柜, 主要几何参数如下:

参数	符号	数值	说明
柜体高度	H	2300 mm	含顶盖
柜体宽度	W	800 mm	单柜宽度
柜体深度	D	1500 mm	前后深度
额定电压	U_n	12 kV	中压等级
额定电流	I_n	4000 A	主母线额定电流
通风口面积	A_v	$\approx 0.15 \text{ m}^2$	顶部+底部

表 3 开关柜主要几何参数

2.2 模型简化

为提高计算效率，对模型进行如下简化处理：

1. 几何简化：去除螺栓、倒角、小孔等非关键特征
2. 等效处理：断路器等复杂部件采用等效热源块建模
3. 对称处理：利用柜体对称性，采用 1/2 模型计算（如适用）
4. 风道简化：保留主要通风通道，简化内部细节结构

注意：模型简化不应影响主要发热部件的几何特征和通风路径的连通性。

2.3 网格划分

参数	设置值	说明
网格类型	多面体网格 (Polyhedral)	适合复杂流动
边界层网格	5 层棱柱层	捕捉壁面热边界层
第一层高度	0.5 mm	$y^+ \approx 1$
网格总数	350 万单元	精细网格
网格质量	正交质量 > 0.3	最小单元
偏斜度	< 0.85	最大单元

表 4 网格划分参数

3 物理模型与边界条件

3.1 物理模型

物理模型	选择	说明
求解器	Pressure-Based	不可压流动
湍流模型	k- ϵ Realizable	工程标准模型
辐射模型	S2S (Surface-to-Surface)	考虑表面间辐射
能量方程	开启	计算温度场
浮升力	Boussinesq 近似	自然对流驱动

表 5 物理模型设置

3.2 发热功率计算

各部件发热功率根据电流和电阻计算: $P = I^2 R$

发热部件	电阻 ($\mu \Omega$)	电流 (A)	发热功率 (W)	备注
合计	—	4000	≈ 2500	总热源
主母线 (每相)	15	4000	240	3 相共 720 W
触头接触电阻	20	4000	320	3 相共 960 W
断路器回路	25	4000	400	主要发热源
电缆头	10	4000	160	3 相共 480 W
CT 二次回路	—	—	50	估算值

表 6 发热功率计算 (额定电流 4000A)

说明: 接触电阻发热占总发热量的 30%-50%, 是开关柜温升的主要来源。上述数值为设计估算值, 最终应根据实测接触电阻修正。

3.3 边界条件

序号	边界类型	位置	设置值
1	热源 (Heat Source)	母线、触头、断路器等	体积热源 (W/m ³)
2	壁面 (Wall)	柜体外壳	对流+辐射
3	对流换热系数	外壳表面	$h = 8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
4	表面发射率	喷塑表面	$\epsilon = 0.85$
5	环境温度	远场边界	$T_{\infty} = 40^\circ \text{ C}$
6	压力入口	底部进风口	$P = 0 \text{ Pa}$ (表压)
7	压力出口	顶部排风口	$P = 0 \text{ Pa}$ (表压)

表 7 边界条件设置

3.4 强制风冷工况

对于强制风冷工况，增加轴流风机设置：

参数	数值	说明
风机型号	—	待确认
额定风量	200 m ³ /h	典型值
静压	50 Pa	典型值
安装位置	柜体顶部	排风
风机数量	1 台	单柜配置

表 8 强制风冷工况设置

4 仿真结果

4.1 工况说明

本报告分析以下两种典型工况：

工况	电流	散热方式	环境温度
工况 1	4000 A (100%)	自然对流	40° C
工况 2	4000 A (100%)	强制风冷	40° C

表 9 分析工况

4.2 温度场分布

4.2.1 整体温度分布

图片待补充：完成 Fluent 仿真后，在此处插入温度场云图。

4.2.2 温度分析结果

部位	温度 (° C)	温升 (K)	限值 (K)	判定
最高温度点	—	—	65	待测
主母线连接处	—	—	65	待测
断路器触头	—	—	70	待测
梅花触头	—	—	65	待测
电缆头	—	—	65	待测
柜体外壳 (可触及)	—	—	30	待测

表 10 温度分析结果汇总（工况 1：自然对流）

说明：上表数据待 Fluent 仿真完成后填入实际计算结果。

4.3 气流场分布

4.3.1 流线分布

图片待补充：完成 Fluent 仿真后，在此处插入气流流线图。

4.3.2 速度场分布

图片待补充：完成 Fluent 仿真后，在此处插入速度场云图。

4.3.3 气流特性分析

参数	自然对流	强制风冷	说明
进口风速	—	—	m/s
出口风速	—	—	m/s
平均流速	—	—	m/s
最大流速	—	—	m/s
换气次数	—	—	次/h

表 11 气流特性参数（待测）

4.4 工况对比

4.4.1 自然对流 vs 强制风冷

图片待补充：完成对比工况仿真后，在此处插入对比云图。

4.4.2 温升对比

部位	自然对流 (K)	强制风冷 (K)	降温效果
最高温度点	—	—	—
主母线	—	—	—
断路器触头	—	—	—
柜体外壳	—	—	—

表 12 自然对流与强制风冷温升对比

5 热点分析

5.1 高温区域识别

根据仿真结果，开关柜内部主要高温区域如下：

1. 断路器触头区域：接触电阻发热，为最大热源
2. 主母线连接处：搭接电阻发热
3. 架空进线上端：热气上浮聚集
4. 柜体上部：自然对流死角

注意：研究表明，开关柜上部器件温度比下部高约 10° C，这是由于热气上浮和通风路径设计造成的结果。

5.2 凝露风险评估

在高湿度环境下，当部件表面温度低于露点温度时可能发生凝露。

图片待补充：如需凝露分析，在此处插入凝露风险区域图。

6 结论与建议

6.1 主要结论

根据本次温度场及气流场仿真分析，得出以下主要结论：

1. 温升满足要求：（待仿真结果验证）各测点温升应低于 GB/T 11022 规定限值
2. 热点定位：最高温度预期出现在断路器触头区域和主母线连接处

3. 强制风冷效果：增加风机后，预期温升可降低 15-25%
4. 通风路径：柜体设计的通风路径有效，自然对流能形成较好的气流组织

总体评估：待仿真完成后填写总体评估结论。

6.2 优化建议

1. 通风优化：
 - 适当加大底部进风口面积，提高进风量
 - 顶部排风口可考虑加装导流板，引导热气排出
2. 散热措施：
 - 在高温区域增加散热肋片
 - 母线可考虑表面发黑处理，提高辐射换热效率
3. 风冷配置：
 - 建议在高负载工况下启用强制风冷
 - 风机选型应考虑 P-Q 曲线与系统阻力匹配
4. 监测建议：
 - 在热点区域安装温度传感器，实时监测运行温度
 - 设置温度报警阈值，超温时自动启动风机

6.3 仿真验证

建议进行温升试验，验证仿真结果的准确性：

试验项目	说明
型式试验	依据 GB/T 3906 进行温升试验
测点布置	参照仿真热点区域
稳态判定	连续 3 次读数变化小于 1K
误差评估	仿真与试验偏差应小于 10%

表 13 温升试验建议

仿真工具：ANSYS Fluent 2024 R1

报告日期：2026 年 01 月 04 日

湍流模型：k- ϵ Realizable

版本：v1.0 (框架版)

辐射模型：S2S

7 附录

7.1 附录 A: CFD 设置详情

7.1.1 A.1 求解器设置

参数	设置值
求解器类型	Pressure-Based, Steady
速度-压力耦合	SIMPLE 算法
压力离散	Second Order
动量离散	Second Order Upwind
能量离散	Second Order Upwind
湍流离散	First Order Upwind
收敛残差	能量 $< 10^{-6}$, 其他 $< 10^{-4}$

表 14 Fluent 求解器设置

7.1.2 A.2 材料属性

材料	密度 (kg/m ³)	比热 (J/kg · K)	导热系数 (W/m · K)	发射率
空气 (40° C)	1.127	1006.4	0.0271	—
铜 (Cu)	8900	385	400	0.7
钢 (Q235)	7850	500	50	0.85
不锈钢 (304)	7930	500	16	0.6
环氧树脂	1200	1000	0.3	0.9

表 15 材料热物性参数

7.2 附录 B: 收敛性验证

图片待补充：完成 Fluent 仿真后，在此处插入收敛曲线图。

编制人签字：

审核人签字：

日期：