

开关柜金属隔板涡流损耗仿真分析报告

涡流场仿真 (Eddy Current)

1 概述

本报告对 KYN28-12/4000A 型高压开关柜的金属隔板在三相交流母排电流作用下的涡流损耗进行有限元仿真分析。通过 ANSYS Maxwell 涡流场求解器计算隔板上的感应涡流及其产生的热损耗，为开关柜的热设计提供理论依据。

分析目的：评估不同隔板材料对涡流损耗的影响，为材料选型提供数据支撑，指导开关柜热设计优化。

2 仿真模型

2.1 几何模型

参数	数值	单位
母排宽度 (Bus_W)	120	mm
母排深度 (Bus_D)	10	mm
母排高度 (Bus_H)	600	mm
母排间距 (Space)	160	mm
隔板厚度 (Plate_Th)	3	mm
过孔间隙 (Gap)	20	mm

表 1 几何模型参数

2.2 网格划分

为保证隔板孔洞边缘与母排表面处的电磁场梯度得到充分分辨，网格在边缘和薄壁区域进行了局部加密；两种材料方案采用一致的网格策略，以保证损耗对比的公平性。

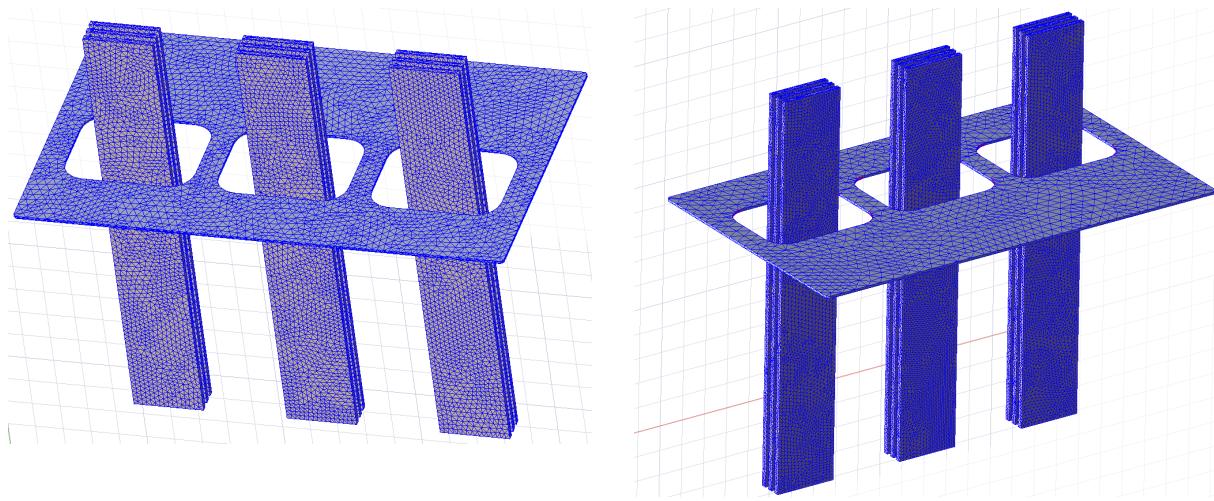


图 1 网格划分对比（左：覆铝锌板方案，右：不锈钢方案）

2.3 材料参数

零件	材料	电导率 (S/m)	相对磁导率 μ_r
母排	铜 (Copper)	5.8×10^7	1
隔板 (原方案)	覆铝锌板 (Galvalume)	4.032×10^6	4000
隔板 (优化方案)	不锈钢 (SS304)	1.137×10^6	1

表 2 材料电磁参数

说明：覆铝锌板本质是冷轧钢板镀铝锌涂层，基材具有铁磁性 ($\mu_r=4000$)。不锈钢 (304/316 奥氏体) 为非铁磁材料 ($\mu_r=1$)。

2.4 激励条件

参数	数值	说明
电流幅值	4000 A	有效值 (RMS)
工作频率	50 Hz	工频交流
A 相相位	0°	参考相
B 相相位	-120°	滞后 120°
C 相相位	+120°	超前 120°

表 3 三相激励条件

2.5 激励与边界设置

三相母排采用同幅值交流电流激励，保证两种材料方案的外部激励条件一致。仿真区域设置为真空域并适当留出边界裕量，以减小边界对涡流分布的影响。

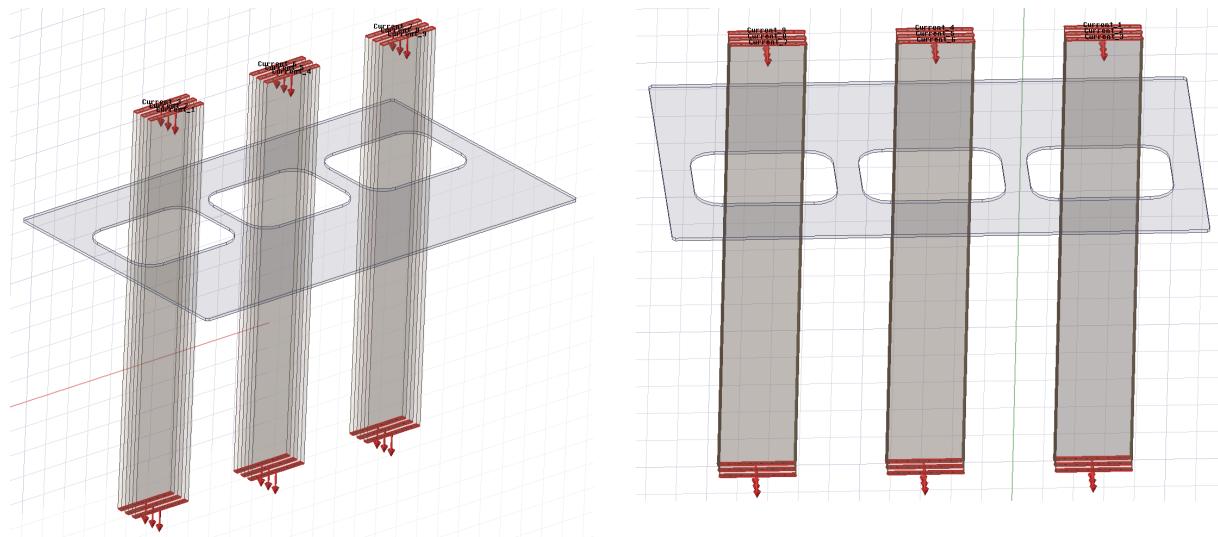


图 2 三相电流激励设置对比（左：覆铝锌板方案，右：不锈钢方案）

3 理论分析

3.1 趋肤深度计算

趋肤效应使交变电流集中在导体表面。趋肤深度 δ 由下式计算：

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}}$$

其中： f 为频率 (Hz)， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m， μ_r 为相对磁导率， σ 为电导率 (S/m)。

材料	趋肤深度 (50Hz)	备注
铜 (Copper)	9.35 mm	非铁磁材料
覆铝锌板 (Galvalume)	0.56 mm	铁磁材料
不锈钢 (SS304)	66.8 mm	非铁磁材料

表 4 不同材料趋肤深度

关键结论：覆铝锌板的趋肤深度仅 0.56 mm，远小于隔板厚度 (3 mm)，涡流高度集中于表面，导致局部损耗密度极高。

4 场分布云图

4.1 场分布对比（左覆铝锌板，右不锈钢）

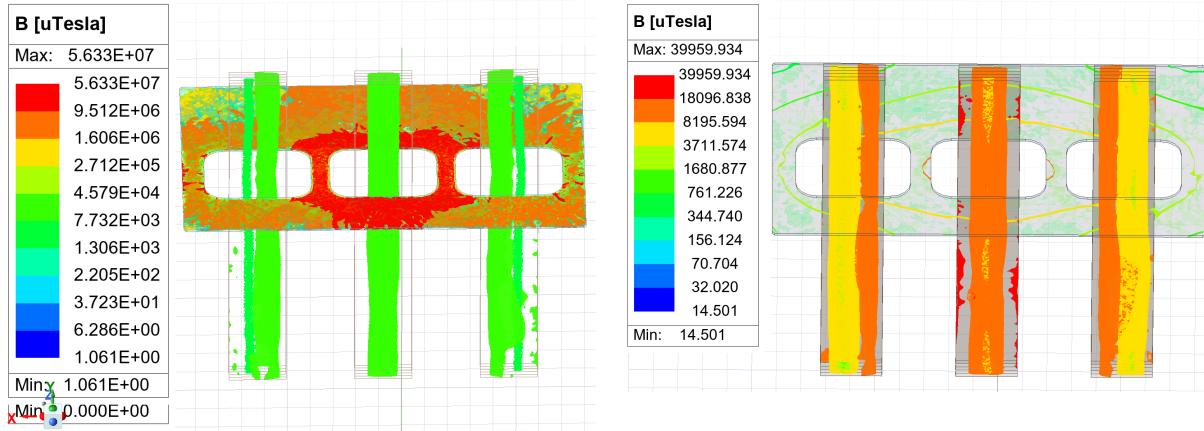


图 3 磁通密度 B 分布对比（左：覆铝锌板，右：不锈钢）

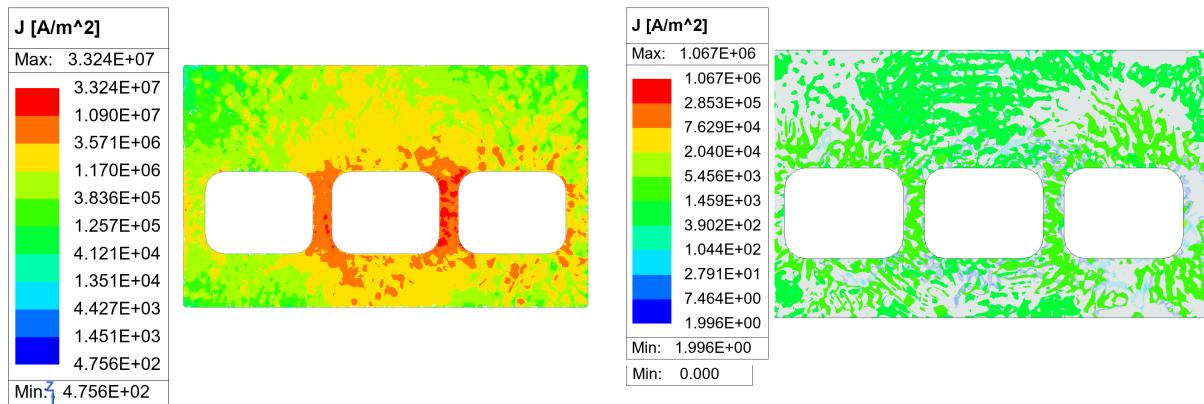


图 4 电流密度 J 分布对比（左：覆铝锌板，右：不锈钢）

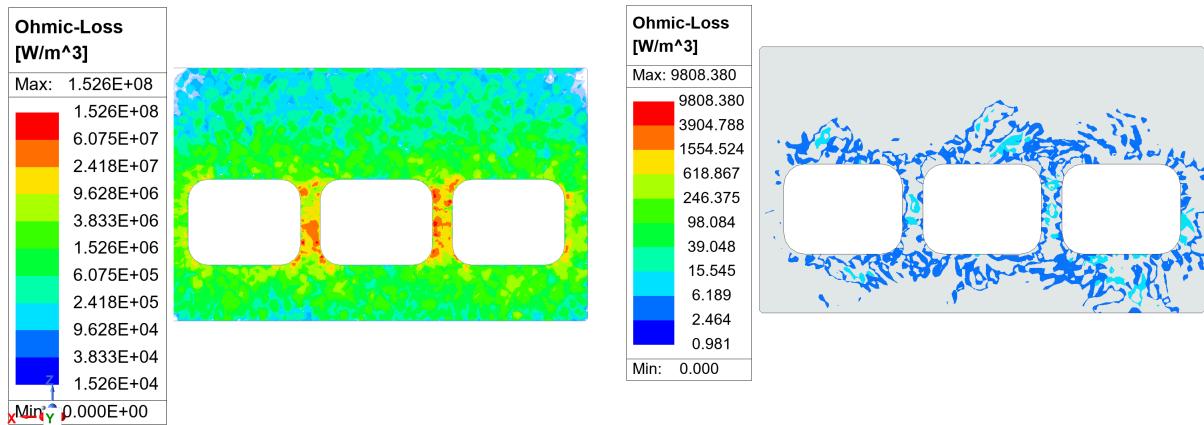


图 5 欧姆损耗 OhmicLoss 分布对比（左：覆铝锌板，右：不锈钢）

4.2 场分布特征分析

4.2.1 欧姆损耗密度分布 (OhmicLoss)

损耗密度集中在隔板孔洞边缘，这是因为：

1. 涡流路径最短：孔洞边缘的涡流环绕路径长度最短，感应电流密度最大。

2. 磁通变化率最大：三相母排产生的交变磁场在孔洞边缘区域梯度最大。
3. 趋肤效应：交变电流集中在导体表面薄层区域（趋肤深度 = 0.56 mm）。

4.2.2 磁通密度分布 (B)

磁场分布呈对称特性，符合三相交流电流产生的旋转磁场预期。主要分布特征：

1. 磁通密度最大值位于母排表面附近。
2. 三相母排间的磁场存在复杂的叠加与抵消效应。
3. 隔板表面存在明显的磁通集中现象（铁磁材料时）。

4.2.3 电流密度分布 (J)

在 50 Hz 工频下，铜母排的趋肤深度 (9.35 mm) 接近导体厚度 (10 mm)，电流分布较为均匀，趋肤效应不明显。

5 仿真结果与工程意义

5.1 涡流损耗汇总

Core Loss[W]	Solid Loss[W]	Stranded Loss[W]	Stranded Loss R[W]	Stranded Loss AC[W]	Core Loss[W]	Solid Loss[W]	Stranded Loss[W]	Stranded Loss R[W]	Stranded Loss AC[W]
0	1156.3	88.174	0	0	0	0.0027065	88.174	0	0

图 6 总损耗分布对比（左：覆铝锌板方案，右：不锈钢方案）

5.2 材料对比分析

隔板材料	μr	隔板损耗 (W)	备注
覆铝锌板 (结构钢, 铁磁材料)	4000	1156.3	原方案
不锈钢板 (非铁磁材料)	1	0.0027	优化方案

表 5 不同隔板材料涡流损耗对比

关键发现：采用非铁磁材料（不锈钢， $\mu r=1$ ）替代覆铝锌板（铁磁钢板， $\mu r=4000$ ）后，隔板涡流损耗从 1156.3 W 降至 0.0027 W，降幅达 99.9998%。

5.3 损耗与发热

根据仿真结果，对于额定电流 4000 A 的开关柜如下。

参数	覆铝锌板	不锈钢板
隔板涡流损耗功率	1156.3 W	0.0027 W
等效发热量 (1 小时)	4162.7 kJ	0.0097 kJ

表 6 损耗与发热对比

5.4 热设计建议

1. 材料替换：采用不锈钢（304/316）等非铁磁材料替代覆铝锌板/钢板，可有效降低涡流损耗达 99.9998%。
2. 通风散热：覆铝锌板隔板产生的涡流损耗约 1156.3 W，需考虑增加通风散热措施。
3. 过孔优化：适当加大过孔尺寸可减少孔洞边缘的磁通集中，降低局部损耗密度。
4. 温度场仿真：
 - 不锈钢隔板方案：涡流损耗可忽略不计，温升主要由铜排焦耳热决定。
 - 覆铝锌板方案：须将涡流损耗作为重要热源参与温度场计算。

6 结论

根据本次仿真分析，主要结论如下。

1. 在 4000 A、50 Hz 工况下，采用覆铝锌板（铁磁钢板）作为隔板，涡流损耗功率约 1156.3 W。
2. 采用不锈钢板（非铁磁材料）作为隔板，涡流损耗功率仅 0.0027 W，降幅达 99.9998%。
3. 趋肤深度对比：覆铝锌板 $\delta = 0.56 \text{ mm}$ ，远小于隔板厚度（3 mm），电流集中于表面；不锈钢 $\delta = 66.8 \text{ mm}$ ，远大于隔板厚度，电流分布更均匀。
4. 涡流损耗主要发生在隔板上，损耗集中在孔洞边缘区域，与理论分析一致。
5. 铁磁材料（覆铝锌板/钢板）对磁场具有明显增强作用，大幅增加涡流损耗。
6. 建议：采用非铁磁材料（304/316 不锈钢）作为金属隔板材料，可有效限制涡流损耗，是优化开关柜热设计的有效手段。