

高压开关柜抗震性能仿真分析报告

抗震分析 (Seismic Analysis)

1 概述

1.1 分析背景与目的

高压开关柜作为电力系统中的关键设备，其在地震作用下的结构安全性直接关系到电网的可靠运行。随着我国电力基础设施建设向高烈度地震区域延伸，以及核电、轨道交通等特殊行业对设备抗震性能要求的不断提高，开关柜的抗震设计与验证已成为产品研发的重要环节。

本次针对 KYN28-12/1250A 和 KYN28-12/4000A 高压开关柜的母线、触头盒、手车导轨三处关键部位，按核电项目开关柜安装工况进行抗震性能仿真分析。

1.2 适用标准与规范

本分析严格依据国家标准、行业标准及国际标准进行，确保分析方法和评判准则的权威性：

序号	标准编号	标准名称
1	GB/T 13540-2009	高压开关设备和控制设备的抗震要求
2	GB 50011-2010	建筑抗震设计规范
3	HAF J0053-1996	核电厂设备抗震鉴定

表 1 适用标准清单

1.3 抗震设防要求

根据设备使用场景的不同，本分析考虑两种抗震设防水准：

设防类别	峰值加速度	适用场景
民用标准工况	0.40g (水平)	常规变电站、工业配电
核电极限工况	7.80g (水平)	核电站、重要军事设施

表 2 抗震设防水准

2 有限元建模

2.1 材料属性

开关柜各部件采用的材料及其物理力学参数如下表所示。所有材料参数均取自材料供应商提供的质量证明书或相关国家标准。

部件名称	材料牌号	弹性模量 (GPa)	泊松比	密度 (kg/m ³)	屈服强度 (MPa)
主母线	T2 紫铜	110	0.34	8900	200
绝缘支撑(触头盒)	环氧树脂(玻纤增强)	18	0.30	1900	180
手车导轨	Q235B	206	0.30	7850	235

表 3 开关柜材料特性参数表

材料说明：

- 铜母线材料屈服强度为 200 MPa，抗拉强度为 395 MPa
- 触头盒采用玻纤增强环氧树脂材料，屈服强度为 180 MPa
- 手车导轨采用 Q235B 钢材，屈服强度为 235 MPa

2.2 网格划分

结合仿真模型的外形特征，对母线及触头盒模型选择六面体网格划分方法，对手车导轨模型选择四面体网格划分方法，经优化调整后均得到了贴体程度良好的网格。母线及触头盒模型的网格尺寸为 5mm，其中网格节点 416846 个，网格数量 234315 个。手车导轨模型的网格尺寸为 5mm，其中网格节点 75512 个，网格数量 39232 个。网格质量均符合计算要求。

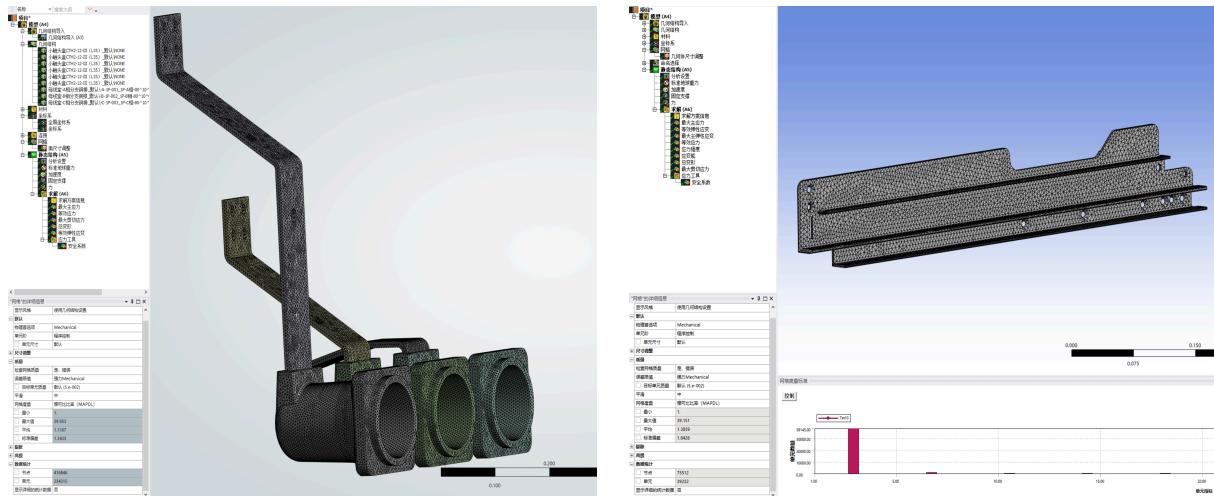


图 1 网格剖分情况 (左: 母线及触头盒模型网格, 右: 手车导轨模型网格)

2.3 求解器设置

参数	设置值
求解器类型	ANSYS Mechanical APDL
分析类型	静力学分析 (Static Structural)
大变形	关闭 (Off)
惯性释放	关闭
并行计算	8 核 Distributed

表 4 求解器设置参数

3 载荷与边界条件

3.1 地震载荷计算

3.1.1 民用标准工况

依据 GB 50011-2010《建筑抗震设计规范》，按 8 度抗震设防烈度（设计基本地震加速度 0.20g）计算，考虑设备重要性系数 1.5 和场地放大系数 1.33，得到等效静力地震载荷：

载荷参数	符号	数值	计算依据
水平地震系数	α_h	0.40 g	$0.20 \times 1.5 \times 1.33 \approx 0.40$
竖向地震系数	α_v	0.26 g	$= 0.65 \times \alpha_h$
水平加速度	a_h	4 m/s ²	$= 0.40 \times g$
竖向加速度	a_v	3 m/s ²	$= 0.26 \times g$
重力加速度	g	10 m/s ²	标准重力加速度

表 5 地震载荷参数 (民用标准工况)

3.1.2 核电极限工况

对于核电站等高安全要求场合, 依据 HAF J0053-1996《核电厂设备抗震鉴定》, 采用安全停堆地震 (SSE) 载荷进行分析:

载荷参数	符号	数值	备注
水平地震系数	α_h	7.80 g	SSE 极限工况
竖向地震系数	α_v	5.07 g	$= 0.65 \times \alpha_h$
水平加速度	a_h	80 m/s ²	$= 7.80 \times g$
竖向加速度	a_v	50 m/s ²	$= 5.07 \times g$

表 6 地震载荷参数 (核电极限工况)

3.2 边界条件设置

开关柜通过底座上的 4 个安装孔与基础地面采用螺栓连接固定。在有限元模型中, 边界条件设置如下:

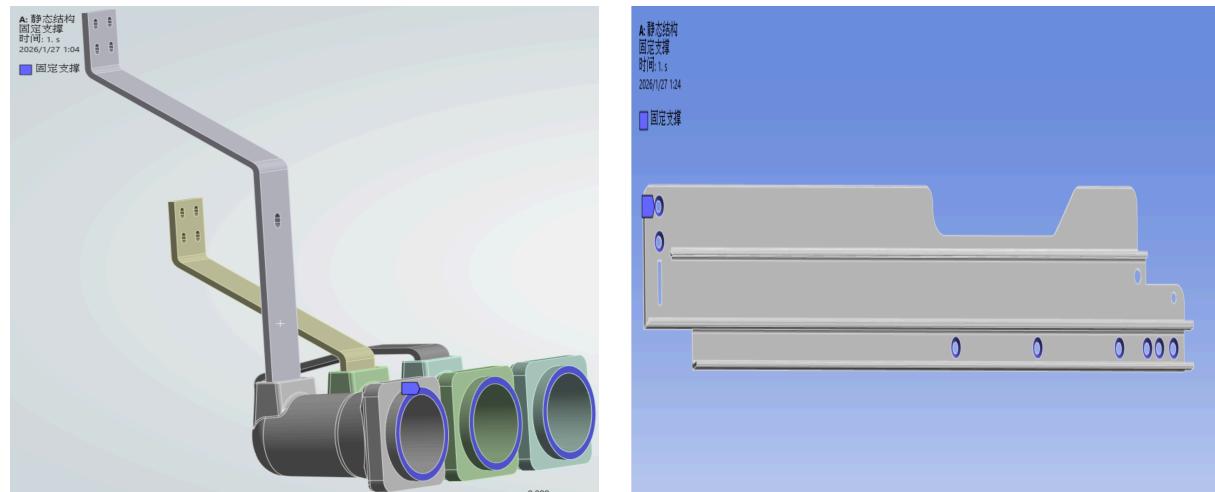


图 2 约束位置示意图 (左: 母线与触头盒; 右: 手车导轨)

序号	边界类型	施加位置及说明
1	固定支撑	手车导轨螺栓孔、穿墙套筒安装孔固定约束
2	重力载荷	全局坐标系-Z 方向, $g=10 \text{ m/s}^2$
3	水平地震加速度	全局 X 方向 (前后方向)
4	竖向地震加速度	全局 Z 方向 (垂直方向)

表 7 边界条件设置

载荷组合原则：

- 采用静力等效法，将地震惯性力作为静载荷施加
- 重力载荷与地震载荷同时作用，进行线性叠加
- 水平和竖向地震载荷同时施加，考虑最不利组合
- 分析 X 方向（前后）和 Y 方向（左右）两种水平地震工况

4 求解参数设置

按核电项目开关柜安装工况综合考虑，地震时的加速值按 $7.8g$ 计算。

4.1 母线及触头盒设置

A 相母线（最左端）加触头盒重量： $m=15.585\text{Kg}$ ，重力 $G=mg=15.585\times 9.8=152.74\text{N}$ ，受到加速力 $f=ma=15.585\times 7.8\times 9.8=1191.38\text{N}$ ，故 A 相母线所受垂直方向力 $F=mg+ma=1344.128\text{N}$ ，方向为垂直向下，水平方向的力为 $ma=1191.38\text{N}$ ，方向水平向内。

B 相母线（中间）加触头盒重量： $m=17.919\text{Kg}$ ，重力 $G=mg=17.919\times 9.8=175.61\text{N}$ ，受到加速力 $f=ma=17.919\times 7.8\times 9.8=1369.73\text{N}$ ，故 B 相母线所受垂直方向力 $F=mg+ma=1545.38\text{N}$ ，方向为垂直向下，水平方向的力为 $ma=1369.73\text{N}$ ，方向水平向内。

C 相母线（最右端）加触头盒重量： $m=19.46\text{Kg}$ ，重力 $G=mg=19.46\times 9.8=190.71\text{N}$ ，受到加速力 $f=ma=19.46\times 7.8\times 9.8=1487.52\text{N}$ ，故 C 相母线所受垂直方向力 $F=mg+ma=1678.22\text{N}$ ，方向为垂直向下，水平方向的力为 $ma=1487.52\text{N}$ ，方向水平向内。

4.2 手车导轨设置

断路器小车重量 $m=220\text{kg}$ ，重力 $G=mg=220\times 9.8=2156\text{N}$ 。受到加速力 $f=ma=220\times 7.8\times 9.8=16816.8\text{N}$ ，故导轨所受合力 $F=mg+ma=18972.8\text{N}$ 。左右导轨两边对称，右导轨受力为合力一半即为 $18972.8/2=9486.4\text{N}$ 。

断路器小车与导轨的接触方式为前后两条直线。每条直线加载荷为 $9486.4/2=4743.2\text{N}$ ，加载荷的方式如图 4 所示，力 A 与力 B 之间直线距离为 320mm ，为手车的等效长度距离。

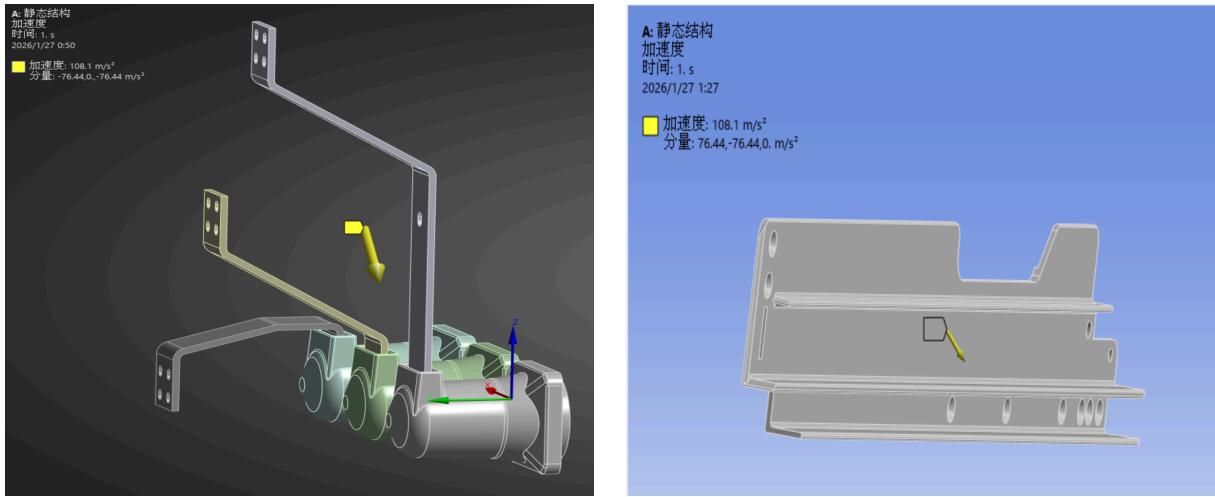


图 3 载荷施加图示（左：母线及触头盒载荷，右：手车导轨载荷）

5 分析结果与评价

5.1 等效应力应变分布图

5.1.1 母线及触头盒模型

母线及触头盒模型的最大主应力为 142.08MPa，主要集中在最长分支母线 C 相转角处，分布如图 5 所示；最大剪切应力为 81.64MPa，集中在触头盒与螺栓接触及过渡区域，分布如图 6 所示。

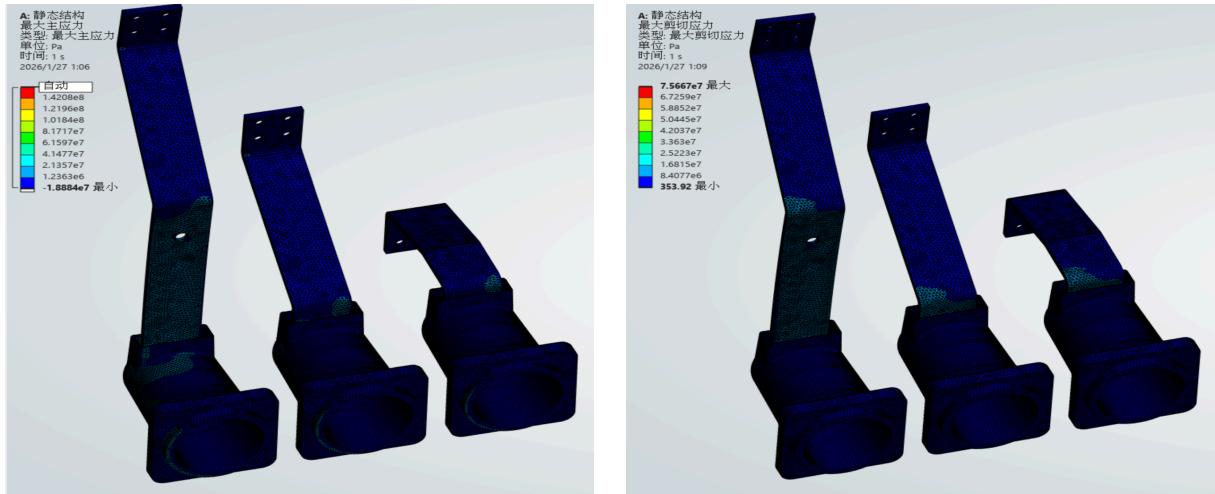


图 4 母线及触头盒应力分布图（左：最大主应力，右：最大剪切应力）

5.1.2 手车导轨模型

手车导轨的最大主应力为 175.73MPa，集中在力 A 的直线处，最大剪切应力为 67.91MPa，集中在力 A 的直线处及其上方的拐角处。

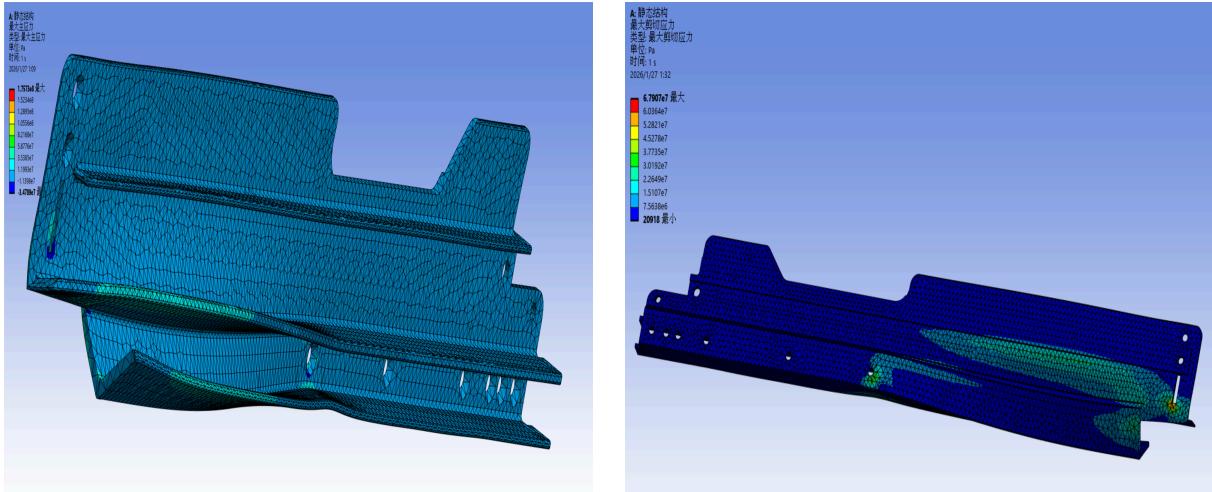


图 5 手车导轨应力分布图（左：最大主应力，右：最大剪切应力）

5.2 最大变形与安全系数

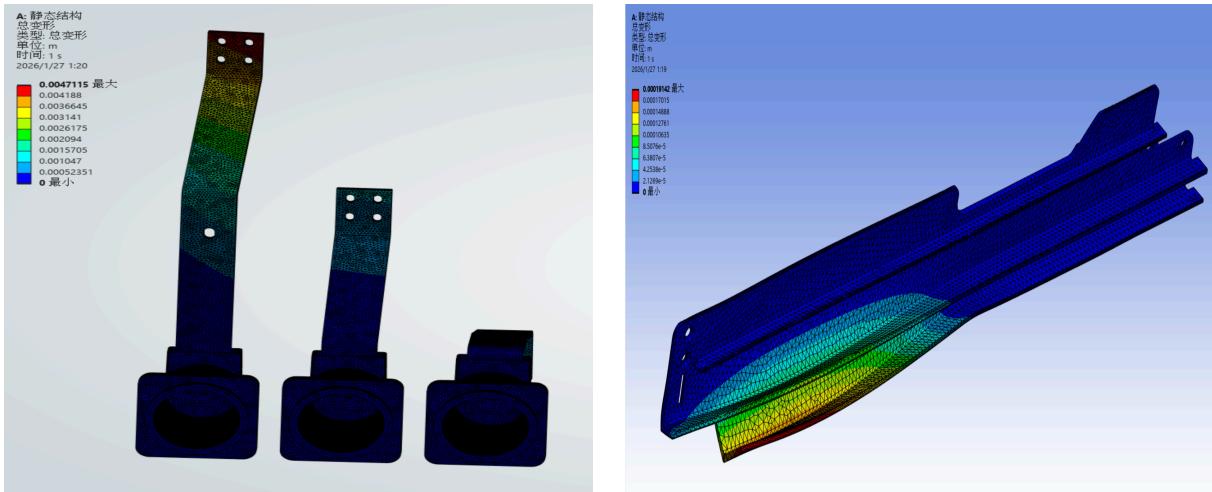


图 6 最大变形结果图（左：母线与触头盒；右：手车导轨）

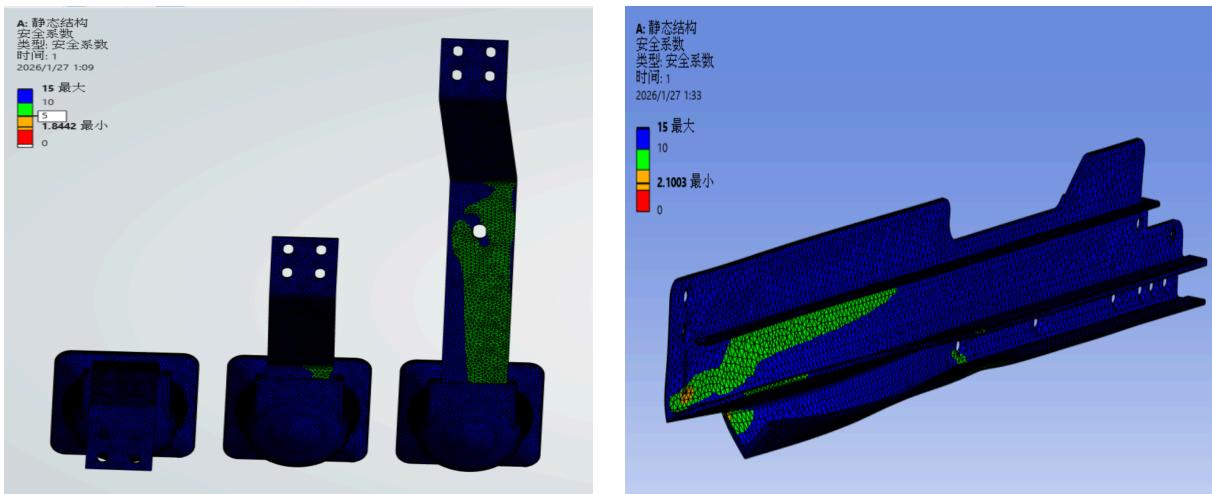


图 7 安全系数结果图（左：母线与触头盒；右：手车导轨）

最大变形结果显示，手车导轨的变形主要集中在加载区域及其附近的结构过渡处，母线与触头盒的变形集中在转角与连接过渡区域，属于局部集中变形。安全系数结果显示，两类部件的最小安全系数均大于 1，整体满足抗震强度与稳定性要求。

5.3 应力结果汇总

评估部位	最大主/剪切应力 (MPa)	许用应力 (MPa)	安全系数	判定
母线 (C 相转角处)	142.08	395	2.78	合格
触头盒与螺栓固定处	81.64	180	2.20	合格
手车导轨	175.73	235	1.34	合格

表 8 应力分析结果汇总

应力评价：母线部分最大主应力为 142.08MPa，应力集中于分支母线拐角处，安全系数为 2.78；触头盒部分最大剪切应力为 81.64MPa，安全系数为 2.20；手车导轨最大主应力为 175.73MPa，安全系数为 1.34，满足核电项目开关柜的抗震强度要求。

6 结论

母线部分最大主应力为 142.08MPa (T2 紫铜材料许用应力为 395MPa)，安全系数为 2.78；触头盒部分最大剪切应力为 81.64MPa (玻纤增强环氧树脂材料许用应力为 180MPa)，安全系数为 2.20；手车导轨最大主应力值为 175.73MPa (Q235B 钢材许用应力为 235MPa)，安全系数为 1.34。以上三处关键部位应力值均小于其材料许用应力，满足核电项目开关柜的抗震强度要求。最大变形主要集中在导轨加载区域与母线转角处，安全系数均大于 1，满足抗震强度要求。

通过针对移开式开关柜的母线、触头盒、手车导轨三处关键部位，按核电项目的要求开展地震工况仿真模拟，分析结果表明，以上所有部位均满足地震烈度 8 度 (AG5) 抗震水平的设计要求。