[环网柜]

12 kV共箱式充气环网柜气箱结构优化及抗震研究

文/常州博瑞电力自动化设备有限公司　王晋凯　李　钊　顾晓贺　周卫丰

气箱作为12 kV SF_6气体绝缘环网柜的核心部分，在充气压力下的形变程度对开关的性能有着重大影响。近些年共箱型环网柜因其良好的经济性得到广泛应用，同时较单气箱环网柜而言，共箱型环网柜存在变形过大的缺点。针对四共箱环网柜的气箱结构进行了优化，并采用有限元分析对气箱进行静力及抗震分析，识别出气箱结构本体的薄弱处，并验证气箱的抗震性能。

随着12 kV SF_6气体绝缘环网柜行业的发展，共箱型充气柜因其结构紧凑、重量轻及成本低等优点，迅速被配电网所接受并广泛使用。相对于单气箱结构，四共箱结构可减少成本20%左右，然而其稳定性及可靠性有待验证。气箱作为环网柜的核心元件，在一定的充气压力下，其变形直接影响内部开关的性能，从而影响开关的配合及动作。另外，四单元气箱的结构特点是否满足8级烈度抗震要求也有待验证。

目前，气箱设计基本依靠经验，缺乏理论支撑，本文基于仿真软件对气箱建立仿真模型，找出气箱变形的最大位置及应力集中点，进而判断共箱型气箱结构在充气条件下是否会对开关本体造成影响，并评判其抗震性能。

气箱结构优化

如图1、图2所示，四共箱气箱与两共箱气箱相比，宽度增加为原来的2倍。在气箱内气体压强不变的情况下，四共箱前后上下四面的形变量会显著增大，而气箱前板的变形会直接对开关和机构的应力及配合产生影响。本文研究在充气压力和振动作用下，气箱前板变形对机构及开关动作与配合的影响。

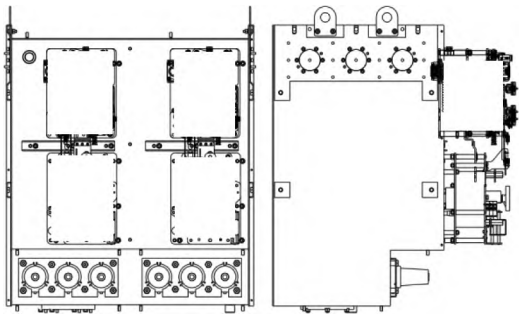


图1　两共箱气箱结构

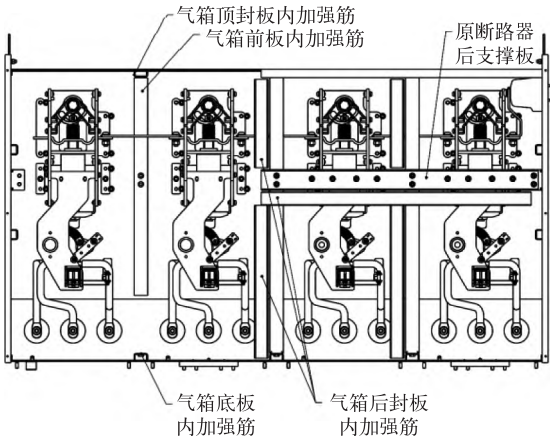


图2　四共箱气箱结构

为改善气箱前板形变对开关及机构的影响，对气箱结构进行优化，将原气箱内侧前后上下加强筋改为一块整板——气箱中隔板，将气箱一分为四，通过对腰孔满焊工序，将上封板、后封板和中隔板焊接成一个整体，如图3所示。理论上气箱的强度接近于单柜，现对气箱进行静力学仿真，验证气箱前板形变对开关及机构的影响。

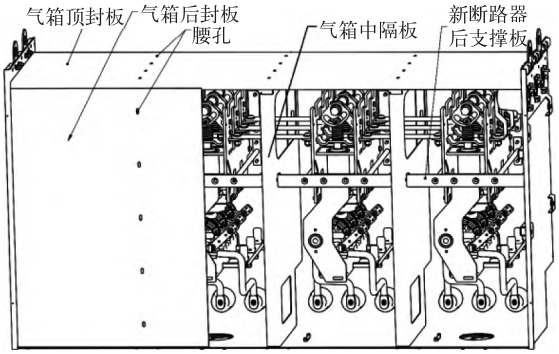


图3　优化后气箱结构

气箱仿真分析

VVVV（四个断路器单元）模块是四个单元的组合，是共箱型环网柜的常见配置，该气箱采用3 mm厚不锈钢板折弯并封闭焊接制成，气箱内侧壁焊接加强筋对气箱结构进行加强，以减小气箱在充气条件下的变形，气箱前折板加强筋采用装配方式，并使用焊接螺柱及配套螺母紧固。

共箱式环网柜气箱的抗震性能应满足GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》中的地震要求。根据标准要求，并基于仿真软件对气箱建立仿真模型，通过静力分析、模态分析及谱分析研究气箱形变程度及抗震强度。

1. 荷载、荷载组合及边界条件

共箱型环网柜气箱承受由内向外的气压0.06 MPa。地震荷载根据GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》，II类场地基本地震动（即相应于50年超越概率为10%的地震动）峰值加速度值为0.3 g，基本地震动加速度反应谱特征周期值为0.35 s，见表1、表2。地震烈度为8度。

综上所述，抗震设防烈度8度，场地类型II类，设计地震分组为第一组，特征周期值为0.35 s，阻尼系数为0.05。

荷载组合：$S=S_{GE}+S_E$。其中，S_{GE}为重力载荷；S_E为地震载荷。四共箱充气柜气箱底部安装面为固定端位移边界条件。

表1　水平地震影响系数最大值

抗震设防烈度	6	7	7	8	8	9
设计基本地震加速度/g	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
地震影响系数最大值	0.125	0.250	0.375	0.500	0.750	1.000

表2　特征周期值

设计地震分组	场地类别				
	I0	I1	II	III	IV
第一组	0.20	0.25	0.35	0.45	0.65
第二组	0.25	0.30	0.40	0.55	0.75
第三组	0.30	0.35	0.45	0.65	0.90

2. 仿真模型

采用仿真软件，对气箱进行静力分析、模态分析和谱分析，分析过程如图4所示。

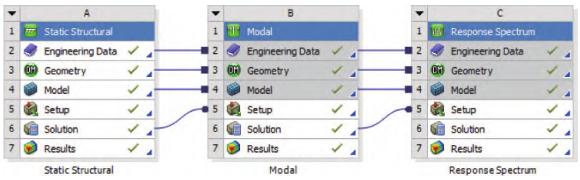


图4　分析过程

对四共箱充气柜气箱的结构进行简化，删除对抗震设计影响较少的部件，模型如图5所示。

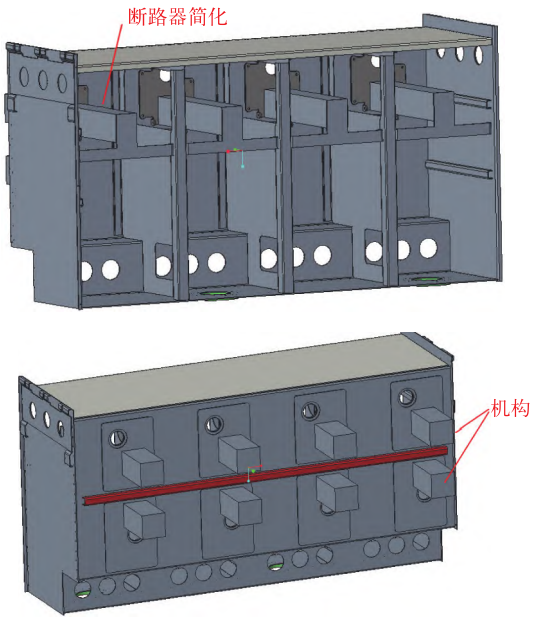


图5　四共箱充气柜气箱仿真模型

模型共70个零件，零件间共约100处连接点，除断路器后支撑板外均为刚性连接，断路器后支撑板和气箱侧板及中隔板之间存在水平前后方向的一个自由度，所以处理过程中采用接触部分离连接，即水平前后方向可移动，如图6所示。

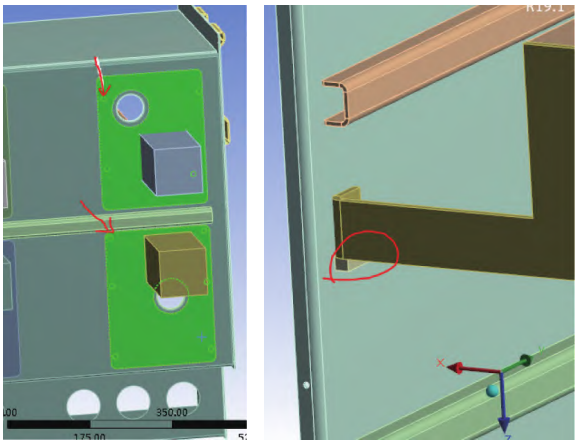


图6　断路器后支撑板处理

3. 材料定义及网络划分

材料参数见表3，网格划分通过对部分钣金件中面简化，计算模型分割为30万个节点，15万个单元，如图7所示。

表3　四共箱充气柜气箱断路器及机构参数

项目	质量/kg
断路器操作机构	15.2
隔离开关操作机构	11.7
断路器本体	32.3

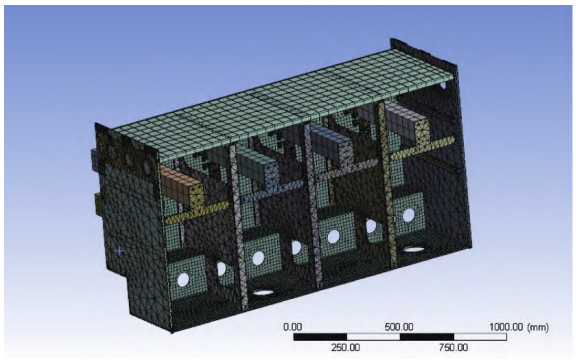


图7　网格划分

4. 静力分析

基本载荷为设备自重+气压，计算结果最大的变形发生在气箱后部，数值为5.2 mm。气箱机构侧钢板的最大变形量为1 mm。

结合静力仿真云图和四共箱气箱结构分析可知，气箱内壁贴合的隔离开关钣金（有一定结构加强作用）为月牙形状，该弯曲形状把变形最大的板中心位置绕过去了，造成了该单元气箱前折板下部左右变形的不对称，导致隔离开关后部向图示右侧偏斜，在后支撑板左右无自由度的条件下，该偏斜趋势会对隔离开关部分产生应力作用，从而影响开关，如图8所示。

因此，将断路器本体与气箱前侧内壁贴合的钣金改为如图9所示的对称机构，并进行仿真。

计算结果机构侧存在0.8 mm的变形，较月牙形非对称内衬板的机构侧气箱折板变形减小。

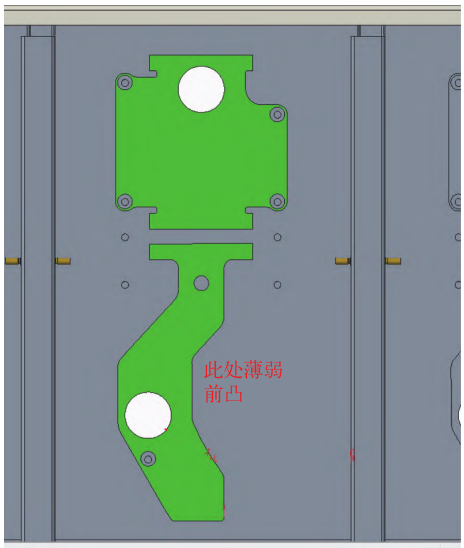


图8　气箱及断路器前板

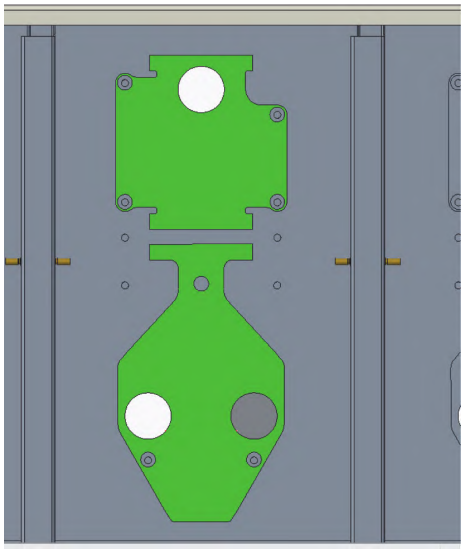


图9　气箱及断路器对称前板

5. 模态分析

为确定共箱式环网柜气箱结构在地震力作用下的响应，需要对其结构进行模态分析。应用仿真软件中的模态分析模块对气箱结构进行模态分析，由于地震对结构的破坏作用主要是低频，因此模态计算到6阶，模态频率见表4，前6阶频率逐渐增大，对气箱结构的影响逐次递减。

表4　前6阶模态频率

阶数	频率/Hz
1	57.3
2	64.1
3	71.0
4	74.5
5	79.7
6	88.2

6. 谱分析

对共箱式环网柜气箱通过反应谱法进行结构抗震分析，采用SRSS组合。通过标准反应谱拟合的标准激励时程波对模型进行加载。

在有限元模型中，*X*方向为宽度方向，*Y*方向为长度方向，*Z*方向为环网柜的高度方向。加载方式为*X*、*Y*、*Z*同时加载，最大加速度1∶1∶0.65，加速度谱曲线如图10所示。由表4数据拟合反应谱如图11所示。计算结果如图12所示。

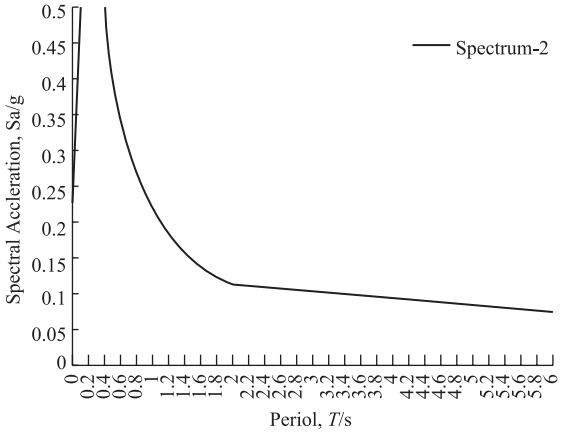


图10　加速度谱曲线

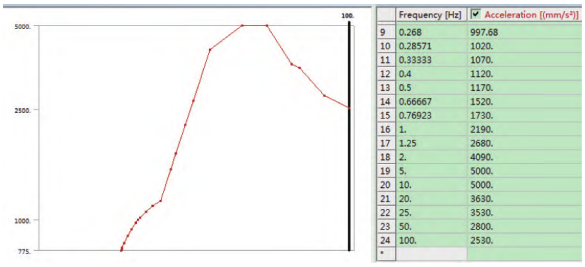
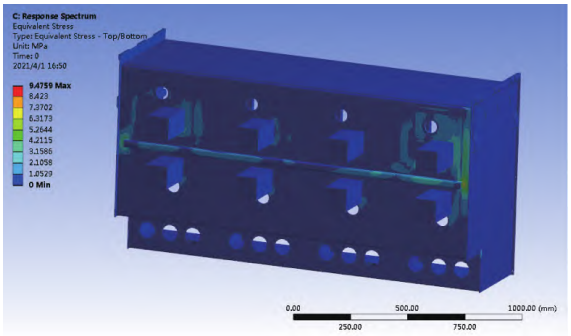


图11　反应谱拟合的标准激励时程波



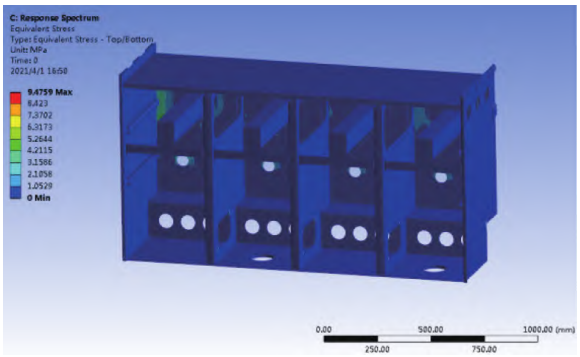


图12　四单元充气柜气箱应力响应

结束语

响应谱地震分析时仅能考虑惯性力带来的预应力，外加载荷引起的应力和变形不能计入在内，故直观上震动仿真的应力和变形小于静态结果。本震动仿真气箱各部件应力和应变值均很小，机构侧的变形在0.03 mm左右，非常小，满足使用要求。通过静力学分析、模态分析及谱分析等受力的仿真分析结果评定，四共箱充气柜气箱满足8级（0.3 g）烈度抗震要求。EA

（收稿日期：2021-09-22）