[开关设备]

# 基于ANSYS Workbench断路器罐体结构灵敏度分析

文/沈阳工学院　韩　义

*运用三维软件对断路器罐体进行参数化建模，然后利用ANSYS Workbench软件对其正常工作状态下机械强度进行仿真计算，再利用Response Surface模块对罐体结构尺寸与罐体机械强度的响应关系进行响应曲面分析，最后通过灵敏度直方图得到罐体结构各参数对罐体最大等效应力和总变形的敏感程度。*

随着高压开关设备在高压电网中的广泛应用，电网对于开关设备工作的可靠性要求日益增加。断路器是高压开关设备中最重要、最复杂的设备，断路器的可靠性是开关设备稳定运行的关键因素。罐式断路器是断路器中的一种典型结构，而罐体作为罐式断路器的关键部件，其结构的合理性，直接影响断路器能否长期运行。因此在设计阶段，针对断路器罐体结构参数对罐体可靠性影响的分析计算，就显得尤为重要。

本文是针对某型号罐式断路器罐体，应用三维建模软件建立三维参数化模型，然后利用仿真软件ANSYS Workbench对该罐体在正常工作情况下的机械强度进行计算，最后利用Response Surface模块对罐体结构尺寸与强度及变形参数进行响应曲面灵敏度分析，探究罐体结构参数对罐体可靠性的影响程度。

## 断路器罐体参数化建模

某型号罐式断路器主要由操动机构、传动机构、灭弧机构、罐体、套管和互感器等元件组成，如图1所示。

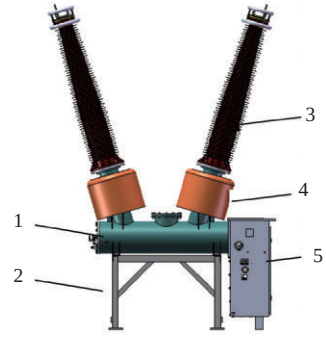


图1　罐式断路器结构图

1—罐体　2—支架　3—套管　4—互感器　5—操动机构

由于罐式断路器元件较多，接触关系复杂，为了使计算轻量化，去掉套管、电流互感器和操动机构等零部件（将删减的零部件转化为等效载荷，施加在罐体上），仅剩下断路器罐体。罐体模型采取整体铸造工艺生产，支撑板与罐体采取焊接方式连接，其模型如图2所示。

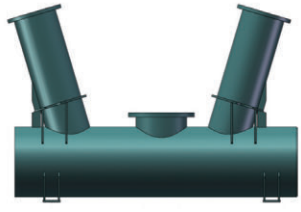

图2　断路器罐体结构图

## 断路器罐体强度计算

1．材料参数

断路器罐体的材料为铝合金5083，具体材料属性如表1所示。

表1　铝合金5083材料属性

| 名称 | 弹性模量/Pa | 泊松比 | 密度/(kg/m³) | 许用强度/MPa |
|---|---|---|---|---|
| 断路器罐体 | $7.1\times10^{10}$ | 0.33 | 2770 | 125 |

2．边界条件

罐体在正常工作情况下承受边界条件如下：①断路器罐体内压0.7 MPa；②套管出线通过螺栓给罐体的拉力：水平纵向力2 kN、水平横向力1.5 kN、垂直方向力1.5 kN；③电流互感器对罐体的重力11 000 N；④内部机构的重力10 000 N；⑤套管的重力20 000 N；⑥罐体与支架采用绑定接触，支架底部固定约束。

3．计算结果

根据上述边界条件，对断路器罐体进行计算，得到罐体应力和变形的云图，如图3和图4所示。

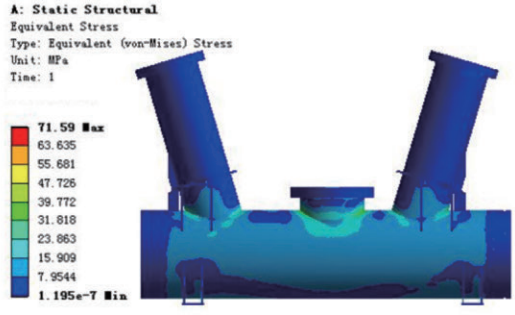


图3　断路器罐体等效应力

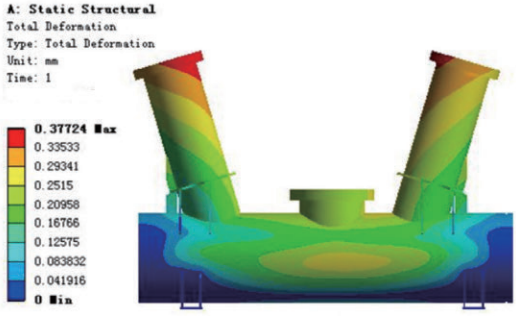


图4　断路器罐体总变形

通过对上面罐体应力和变形云图进行分析可知，罐体最大等效应力出现在支板与罐体焊接处，最大值为71.59 MPa，总变形最大值出现在罐体与套管连接法兰处，最大值为0.377 24 mm。最大等效应力小于材料的许用强度，因此罐体各参数满足设计和使用要求。

## 断路器罐体多变量灵敏度分析

1．灵敏度分析相关参数的确定

影响断路器罐体应力和变形的因素主要是罐体的几何尺寸和所受载荷的大小，因此选取罐体结构尺寸作为灵敏度分析的设计参数，具体如表2所示。根据机械设计手册设计标准和原则，结合相关参考文献得知，罐体结构尺寸参数偏差大致服从正态分析。

表2　随机变量参数设置

| 随机变量 | 参数符号 | 设计值 | 变化范围 |
|---|---|---|---|
| 罐体长度/mm | $P1$ | 2 018 | 1 950～2 150 |
| 罐体中间法兰中心长度/mm | $P2$ | 350 | 335～365 |
| 罐体中间法兰厚度/mm | $P3$ | 8 | 7.2～8.8 |
| 罐体两侧法兰厚度/mm | $P4$ | 10 | 9～11 |
| 罐体两侧法兰中心长度/mm | $P5$ | 1 087 | 999～1 155 |
| 罐体支撑板厚度 mm | $P6$ | 10 | 9～11 |
| 载荷/N | $P7$ | 5 450 | 4 905～5 995 |

2．罐体灵敏度分析

灵敏度分析是分析由于结构尺寸参数的变化引起的响应特征变化率的分析方法，是确立系统可靠性评估和结构优化的重要条件。利用ANSYS Workbench中灵敏度Local Sensitivity，可以观察输入参数对输出参数的影响程度，直方图的面积越大表明敏感影响程度越大。罐体结构的尺寸参数对输出参数最大等效应力的灵敏度图，如图5所示。从图中可看出$P1$、$P4$和$P6$参数变量对罐体强度影响较大，所以研究在罐体受力情况时，应优先考虑这3个灵敏度因素。

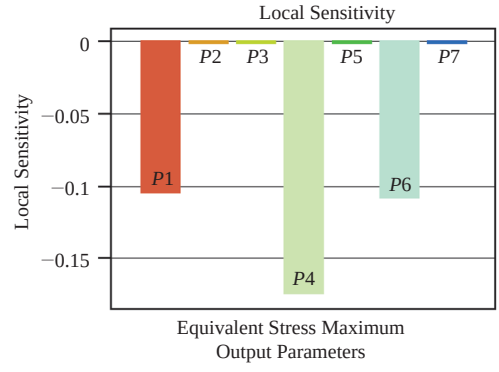


图5　等效应力灵敏度

以罐体最大等效应力为$Z$轴，$P1$为$X$轴，$P4$和$P6$分别为$Y$轴，得到应力响应云图，如图6所示。共中显示等效应力随罐体长度$P1$的增大而减小，两侧法兰厚度$P4=9.8$ mm时应力值最大，支撑板厚度$P6$越大罐体可靠性能越好。

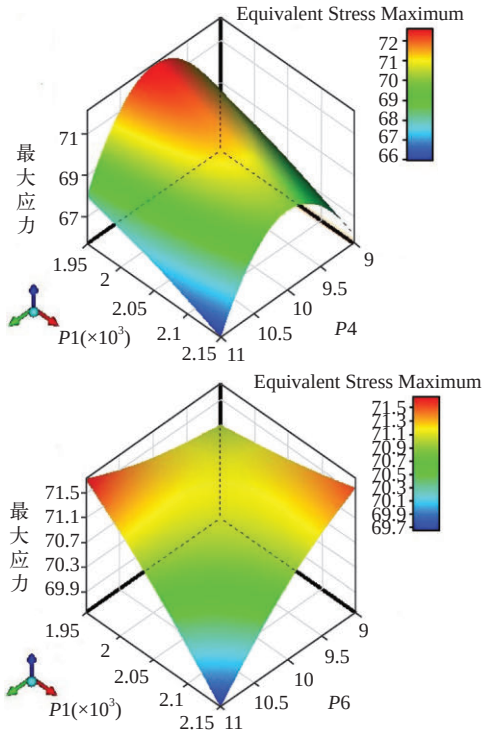


图6　等效应力响应云图

随机变量对罐体变形影响灵敏度如图7所示，在尺寸变化范围内影响结构变形的灵敏度因素较多，其中*P*3和*P*5敏感影响程度最大。

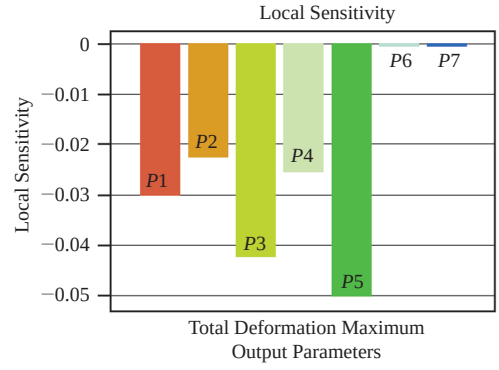


图7　总变形灵敏度

以罐体最大总变形量为*Z*轴，*P*1为*X*轴，*P*2、*P*3、*P*4和*P*5分别为*Y*轴，得到变形响应云图，如图8所示。*P*1和*P*2、*P*3随着结构尺寸的减小变形量逐渐增大，*P*5随尺寸变化呈凹形分布变形量先减小后增大，*P*4变化不规则取值为9.5 mm时最大总变形最小。

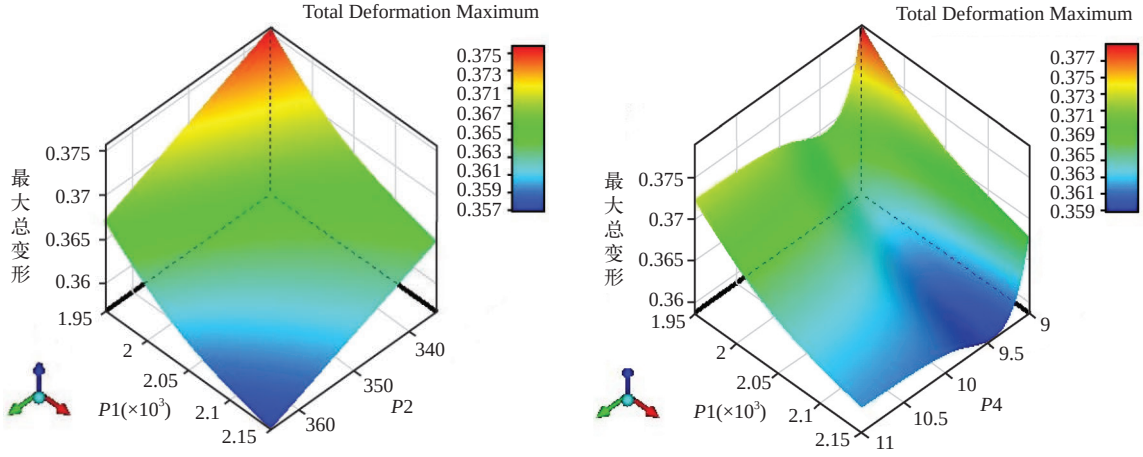


图8　总变形响应云图

在忽略其他外界因素影响的前提下，通过随机变量参数对罐体等效应力和最大总变形位移的灵敏度图，结合响应曲面分析云图，罐体长度*P*1和两侧法兰厚度*P*4对结构强度和刚度可靠性影响较大，在对罐体可靠性研究分析时这两个参数应是主要的分析对象。

## 结束语

本文通过利用ANSYS Workbench软件对断路器罐体正常工作条件下的机械强度进行计算，然后Response Surface模块对罐体结构尺寸与强度及变形参数的灵敏度进行响应曲面分析，可得如下结论。

1）在断路器罐体结构尺寸参数中，罐体长度以及两侧法兰厚度对结构强度和刚度的可靠性影响较大。

2）本文对断路器罐体的计算方法，可以为高压开关设备设计人员在断路器罐体设计阶段提供借鉴。EA

（收稿日期：2020.04.10）
（编辑：朱金凤）