

Stochastic vibration analysis of transformer transportation process based on MIL-STD-810F

Shifang Lin

Xiamen Luyang Environmental Technology Co., Ltd., Xiamen, Fujian, 361101, China

Abstract

The transformer will be subjected to various working conditions such as starting, stopping, steering, and sudden braking during automobile transportation, which will cause the transformer to be subjected to vibration and shock. In this paper, the random vibration analysis method is used to calculate the high-voltage silicon rectifier transformer for electrostatic removal, and the equivalent stress results of the transformer due to the acceleration load during transportation are obtained, so as to verify the structural strength of the transformer.

Keywords

transformer; Transport; Stochastic vibration analysis

基于 MIL-STD-810F 的变压器运输过程随机振动分析

林仕芳

厦门绿洋环境技术股份有限公司, 中国·福建 厦门 361101

摘要

变压器在汽车运输过程中会受到启动、停止、转向、急刹车等多种工况下的载荷作用,使变压器受到振动和冲击。本文运用随机振动的分析方法对电除尘用高压硅整流变压器进行计算,得到了变压器在运输过程中由于加速度载荷作用产生等效应力结果,以校核变压器的结构强度。

关键词

变压器; 运输; 随机振动分析

1 引言

振动是指物体在平衡位置附近的往复运动^[2]。各种机械设备和结构产生振动的原因是这些系统不但具有质量,而且具有一定的弹性,当系统受到外部载荷作用时会产生振动。随机振动是振动的一种特殊形式,振动规律虽然不能用时间的确定函数来描述,却存在着一定的统计规律,可用概率统计方法来描述。车辆在不平的路面上行驶时的振动就属于随机振动。

电除尘用高压硅整流变压器(以下简称变压器)是运用于电除尘领域的升压设备,通常采用油浸式结构。由于本身外形尺寸和重量不是很大,因此在国内通常采用车辆运输。变压器运输过程中不可避免地会受到运输冲击,运输冲击有可能造成变压器内部器芯构件发生位移或变形、或者导致变压器箱体强度超限导致变压器漏油,造成变压器不能正常运行。变压器在运输过程中的数值分析可以采用随

机振动分析、谐响应分析等方法进行仿真计算,本文采用 SOLIDWORKS Simulation 有限元分析软件对某一变压器的运输过程进行随机振动分析,考核变压器的结构强度。

2 建模

本文对 1 台型号为 MPPS06-3.0A/90kV 的变压器进行运输过程中的随机分析。该变压器的外形尺寸为 1720mm×1960mm×1530mm,采用平板车公路运输,总重量为 2835kg,其中,油重 1150kg。分析模型见图 1。

该变压器在运输过程中采用底座 4 个定位板通过螺栓紧固在木质包装箱上,包装箱固定在平板车上进行公路运输。变压器油箱材料为 Q235-A,变压器油介质处理为静载荷,并应用等效质量法^[3],将油的质量直接加到油箱上,即把液体的质量均布到变压器油箱上。在使用 SOLIDWORKS 建模时,将油箱的密度进行改变即可。同时,对大量不必要的螺栓孔和定位孔都压缩起来,以简化分析的网格划分和计算。

【作者简介】林仕芳(1987-),本科,工程师,从事变压器开发设计研究。

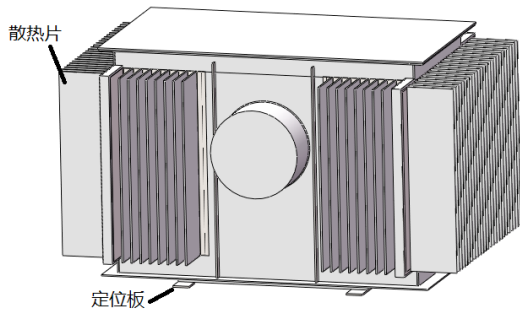


图1 变压器分析模型（简化）

3 固有频率分析

3.1 加载约束

公路运输时，变压器油箱底部的四个定位板紧固于木头上，木头放在平板车上并用绳子固定。因此，建模分析时，对四个定位板底面进行固定约束即可。

3.2 连结

变压器箱体均为钢板焊接而成，器芯放在箱体底部上，并通过螺栓与顶部变压器盖板进行紧固，而变压器油的质量等效到箱体上。因此，对该模型的连结设置为全局接触（接合）。

3.3 远程质量

变压器油箱的材料为 Q235-A，厚度最小为 6mm，但与油箱焊接在一起的散热片厚度只有 1.2mm，而且变压器的散热片数量比较多（本设计实例为 92 片）。因此对变压器的散热片采用远程质量的方法施加到油箱上。

3.4 划分网格

采用【基于曲率的网格】参数对该模型进行网格划分。因为随机振动分析主要研究变压器箱体的强度，因此，变压器内部的器芯在网格划分时，采用网格控制可设置为“粗糙”，箱体的网格控制设置为“良好”。

3.5 频率分析

运行 40 个模态的频率分析，使用 Direct sparse 解算器。前 6 阶的共振频率如下表 1 所示，质量参与因子见表 2，三个方向的质量参与因子的累积数值均达到 0.8 的值。

表 1 变压器前 6 阶共振频率

阶数	1	2	3	4	5	6
频率 (HZ)	34.7	40.9	46.2	48.8	51.5	54.4

表 2 列举质量参与因子（总和）

质量参与 X 方向	质量参与 Y 方向	质量参与 Z 方向
0.9871	1.0066	0.99908

4 随机振动分析

随机振动分析求解动力学问题^[4]，其关联的载荷很难（或不可能）使用普通的数学方程式来描述，这样的载荷被

称为不确定的。图 2 所示为载荷时间关系曲线图的样例。

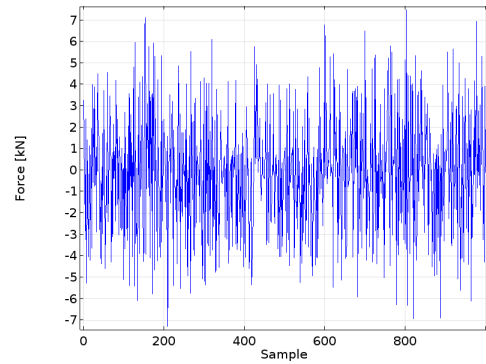


图 2 载荷历史曲线

由于确切地描述载荷时间关系曲线图非常困难或不可能，因此通常使用它的统计特征来进行表示，假设随机载荷时间关系曲线图满足高斯概率分布，则在随机振动理论中使用的基本统计特征如下：

$$\text{平均值: } m = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

$$\text{方均根值: } RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

$$\text{方差: } \sigma^2 = RMS^2 - m^2$$

$$\text{标准差: } \sigma$$

当 $m=0$ 时，方差和标准差就相等。RMS 是从随机振动分析中获取的两个主要结果量之一，从上述公式可知，它代表最终幅值（位移、速度、加速度或应力）的一个标准方差（ 1σ ）。

由于随机载荷不能在时间域中完全求解，它将通过使用傅里叶变换传递到频率域中，这样将放松关于周期的信息，但是会获取载荷信号的频率内容信息。如此分散的信号随后可用于随机振动分析的输入，和谐波分析类似，随机振动分析将在频率域中执行。

由于傅里叶变换在数学上的限制，上面提到的步骤没有办法直接应用，但是，作为一个替代的方案，可以使用时间载荷历史首先构建一个所谓的自动相关函数。然后，这个自动相关函数的傅里叶变换会产生一个关于功率谱密度（PSD）的函数。工业标准一般使用加速度的 PSD 作为输入的载荷描述。本文所研究的变压器是基于 MIL-STD-810F 的方法 514.5，对于固定在公路平板车环境下的随机振动，变压器将经受垂直、横向和纵向的加速度 PSD，见图 3。

设置阻尼和结果选项后，运行此算例。即可得到位移、速度、加速度等的 RMS 结果。

图 4 所示为变压器模型自求解频率范围内的最大等效应力云图，等效最大应力值为 129MPa，位于变压器底座定位板与底座槽钢的焊接位置。

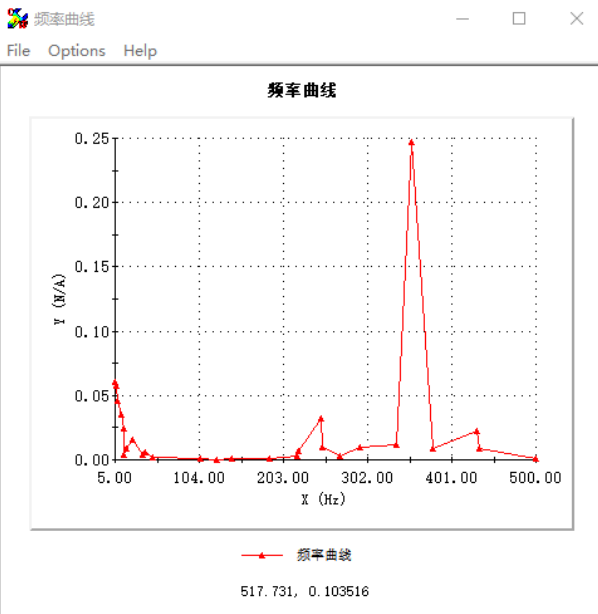


图 3 纵向加速度 PSD 激励曲线

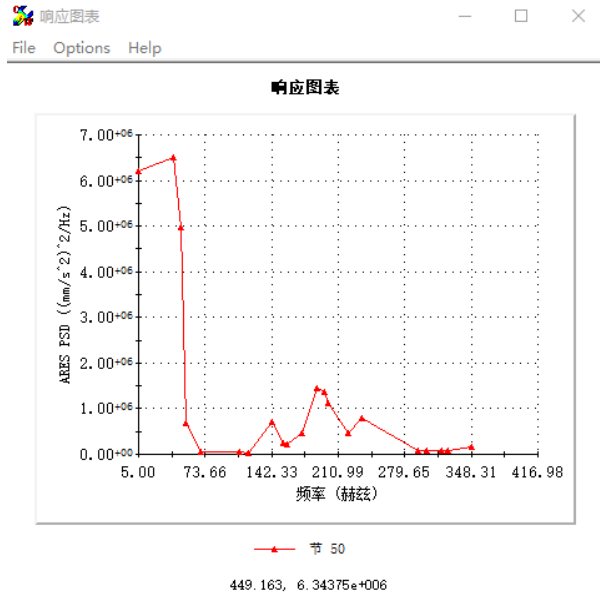


图 6 加速度 PSD 的响应图表

从图 4~6 可以得出如下结论：

变压器将在 40.9HZ 处发生显著振动；

1 σ 的加速度幅值为 5.707g，变压器定位板的等效应力最大值为 129MPa，有 68.2% 的时间幅值将小于等于此值；

2 σ 的变压器定位板的等效应力最大值为 258MPa，有 95.4% 的时间幅值将小于等于此值；

3 σ 的变压器定位板的等效应力最大值为 387MPa，有 99.6% 的时间幅值将小于等于此值；

对变压器进行垂直和横向的随机振动分析，结果均小于纵向随机振动。这表明变压器在公路运输过程中，受到纵向随机振动影响最大。即在汽车前进或后退（Y 方向）时，变压器由于共振产生的应力值最大。

5 结构改进后的随机振动分析

原有结构在 2 σ 时定位板与底座槽钢的焊接位置等效最大应力值为 258MPa，大于材料的屈服极限 157MPa(1.5 倍安全余量)，设计不合理。需要对原有结构进行改进，把底部四个定位板改成两根 10# 槽钢，如图 7 所示。

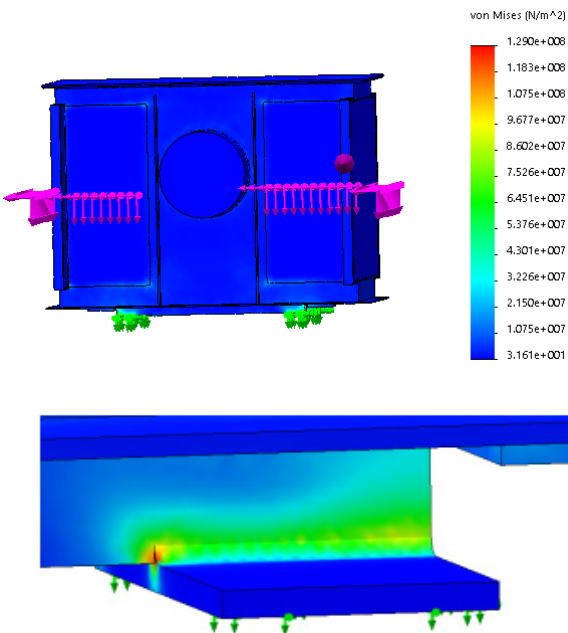


图 4 von Mises 应力的 RMS 结果

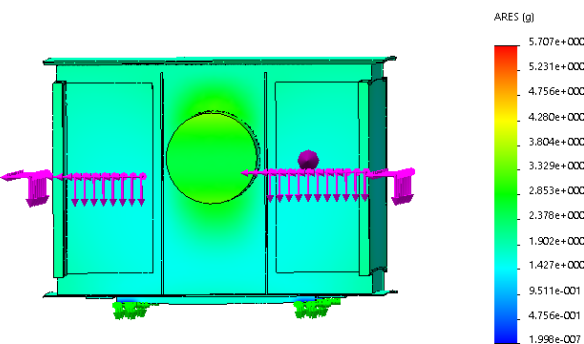


图 5 加速度的 RMS 结果

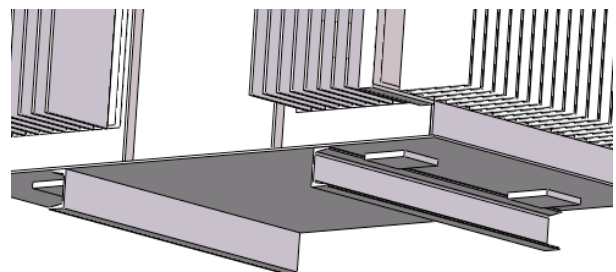


图 7 改进后的底部定位槽钢

对改进结构后的变压器重新进行随机振动分析计算，得到图 8 所示的变压器模型自求解频率范围内的最大等效应

力云图, 等效最大应力值为 31.50MPa, 位于变压器底座定位槽钢位置。 3σ 的变压器定位槽钢的等效应力最大值为 94.5MPa, 满足强度要求。

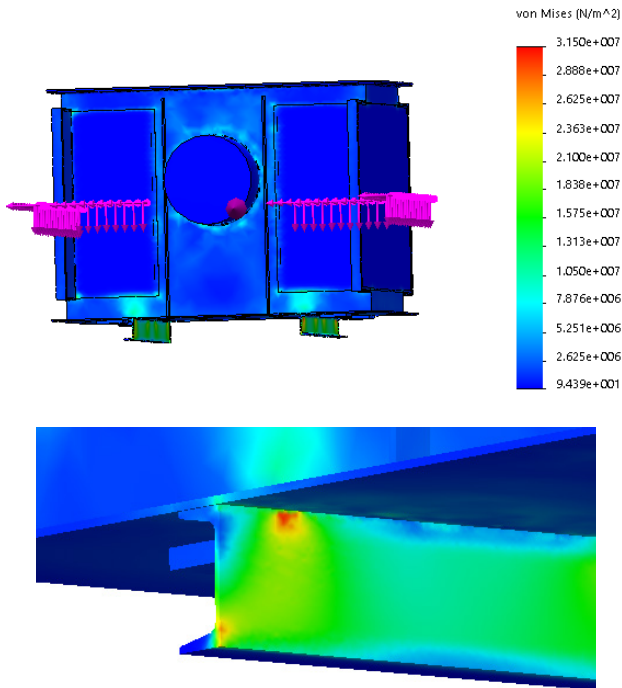


图 8 von Mises 应力的 RMS 结果

6 结语

结构改进后的变压器, 满足运输强度的需求, 但本文分析是基于 MIL-STD-810F 的组合轮式车振动作用下 PSD 功率谱密度进行。在实际运输过程中, 可采用安装 (3 维) 冲撞记录仪根据真实公路运输路线测量随机振动功率谱密度数据,

随机振动分析过程中, 系统设置的阻尼比对分析结果影响比较大, 对不同模型的变压器需要测量真实的阻尼比, 才能使分析结果更符合真实的情况。

变压器的运输是一个复杂的系统性工程, 是保证变压器正常运行的一个重要环节, 对变压器运输过程进行准确地分析能减少运输时产生的振动对变压器结构的影响。基于 MIL-STD-810F 的变压器运输过程随机振动分析能准确分析出变压器在运输过程中结构的薄弱环节, 从而采取相应的改进措施, 提高变压器结构强度。

参考文献

- [1] 王革鹏 杨春 郭家元, 基于数值仿真的变压器运输强度计算[J]. 能源研究与管理 2018 (4)
- [2] 张立军 何辉, 车辆随机振动[M]. 东北大学出版社, 2007
- [3] 刘忠亮, 液化气体运输车的强度分析及液体晃动的数值模拟[D]. 北京化工大学, 2015
- [4] DS SOLIDWORDS公司 SOLIDWORDS Simulation Premium教程[M]. 机械工业出版社, 2017。