

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.03.016

基于多物理场耦合的车载空心电抗器 振动特性研究

应承伟¹, 李水清², 王文华³, 金立军^{1*}

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 上海正泰电气有限公司, 上海 201614;
3. 浙江省电力公司 嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 车载空心电抗器在其运行过程中会受到列车的随机载荷和自身电磁力以及热应力的多重载荷的影响。针对空心电抗器多重载荷下的振动稳定性问题, 首先建立了车载空心电抗器受列车随机载荷的三维有限元数学模型, 分析了其绕组固有频率的分布特征; 其次, 考虑空心电抗器载流时电磁力和热应力的相互影响, 构建了空心电抗器的多物理场模型, 通过多物理场耦合计算将随机载荷、电磁力和热应力等多重载荷影响因素融合并进行了求解。研究表明: 多重载荷共同作用使得空心电抗器共振频率增大, 同时共振幅值也变大, 其结构强度因此降低, 电气性能也会下降。

关键词: 空心电抗器; 随机载荷; 电磁力; 热应力; 多物理场耦合

中图分类号: TH113.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2018)03-0293-05

Random vibration characteristics of air core reactor based on multi-physics field coupling theory

YING Cheng-wei¹, LI Shui-qing², WANG Wen-hua³, JIN Li-jun¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Chint Electric Co., Ltd., Shanghai 201614, China; 3. Jiaying Power Supply Company,
State Grid Zhejiang Power Supply Company, Jiaying 314000, China)

Abstract: The vehicle air core reactor can be influenced by the random load from the train along with the electromagnetic force and thermal stress of the reactor itself during its operation. Aiming at the vibration stability problem of air core reactor under the influence of multiple loads, firstly the 3D finite element model of air core reactor influenced by random load from the train was established to analyze the distribution characteristics of the natural frequency of winding of the reactor. Secondly considering the mutual influence of electromagnetic force and thermal stress of current-carrying air core reactor, the multi-physics model of air core reactor was built, and solved through the multi-field coupling calculation by fusing random load, electromagnetic force and thermal stress together. The research results show that the combined effect of multiple loads increases resonance frequency of the air core reactor with the resonance amplitude becoming larger. The structure strength is thus reduced, the electrical performance will drop.

Key words: air core reactor; random load; electromagnetic force; thermal stress; multi-physics field coupling

收稿日期: 2017-09-26

作者简介: 应承伟(1993-), 男, 湖北赤壁人, 硕士研究生, 主要从事磁性元器件优化设计方面的研究工作。E-mail: tjycw@foxmail.com

通信联系人: 金立军, 男, 博士, 教授。E-mail: jinlj@tongji.edu.cn

0 引 言

空心电抗器结构简单、散热快且安全可靠,常应用于轨道交通车辆上,一般悬挂于车厢底部。在列车行进时空心电抗器会受到电磁力和温度差异以及列车随机载荷的影响而发生振动,故有必要对其进行振动分析以确保其不会处于共振状态而影响寿命甚至损坏。

通常对于列车上设备的振动分析描述参数是固有频率(特征值)和对应的振型(特征矢量),当载荷的频率与设备固有频率相接近、载荷方向与振型相一致时,会引起设备大的振动,甚至共振,最终导致设备的损坏。因此对于设备固有频率及相关振型的研究有着非常重要的现实意义,二者共同构成了描述振动件的模态^[1]。文献[2]结合二维磁场和机电耦合系统的 Lagrange 方程建立了变压器绕组轴向机电耦合的动力学模型,得到变压器绕组耦合振动方程。文献[3]通过基于“磁-机械”耦合场理论仿真分析,得到了变压器绕组在电磁力激励下正常与松动状态下的振动特性。文献[4]研究了轴向安培力对于变压器绕组固有频率的影响,并分析了由振动产生的动生电动势成分。目前大部分研究都是针对常见变压器设备以及其绕组故障诊断方面的分析,很少有对列车上电气设备进行振动特性研究分析。

本文对空心电抗器进行随机振动特性分析。

1 车载空心电抗器随机振动特性

现实中列车运行时所受到的载荷是不确定的,悬挂于车厢底部的空心电抗器受到的振动载荷也是不断变换的^[5]。由于时间历程的不确定性,需要从概率统计学角度出发,将时间历程的统计样本转变为功率谱密度(power spectral density, PSD)函数。在功率谱密度函数的基础上进行随机振动分析,得到响应的概率统计值。设空心电抗器载荷历程为 $F(t)$, 则其功率谱密度函数为:

$$P(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{2\pi f \tau} d\tau \tag{1}$$

式中: f —频率; $R(\tau)$ — $F(t)$ 的自相关函数, $R(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T F(t) F(t + \tau) dt$ 。

根据文献[6] 可得该空心电抗器的 PSD 频谱如图

1 所示。

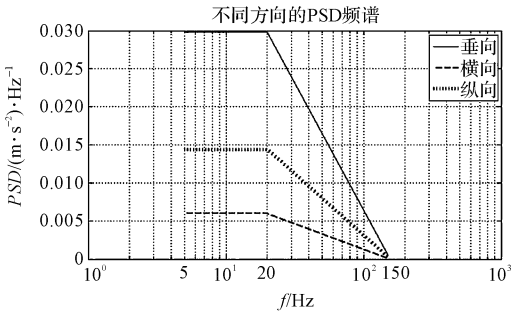


图 1 3 个方向的 PSD 频谱

图 1 中垂向、横向和纵向在 5 Hz ~ 20 Hz 的 PSD 值分别为 0.029 8、0.0006、0.014 4, 在 20 Hz ~ 150 Hz 均以 -6 dB/oct 的斜率下降。

在进行随机振动分析之前先要对空心电抗器进行模态分析,以得到其结构的固有频率。为此需要建立空心电抗器的有限元模型进行分析。

由于空心电抗器的结构不含阻尼机制,其阻尼比小于 10%, 阻尼对其结构的固有频率影响很小,可进行不考虑阻尼的实模态分析^[7]。空心电抗器是一个复杂多自由度机械系统,其无阻尼模态分析的运动方程为^[8]:

$$[M] \{x''\} + [K] \{x\} = \{0\} \tag{2}$$

式中: M —模型单元质量矩阵; K —模型单元刚度矩阵; x —模型节点位移矢量; x'' —模型节点加速度矢量。

模型的自由振动为简谐振动,即:

$$x = x_m \sin(\omega t) \tag{3}$$

代入式(2) 得:

$$([K] - \omega^2 [M]) \{x\} = \{0\} \tag{4}$$

其中,经典的特征值问题,其特征值 ω_i 对应的特征向量 $\{x\}_i$ 为自振频率 $f = \omega_i/2\pi$ 对应的振型。

本文以实体空心电抗器为研究对象建立了其三维有限元模型,并对其进行了精细的网格剖分,空心电抗器的有限元模型如图 2 所示。

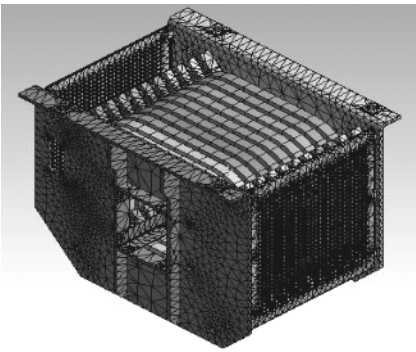


图 2 空心电抗器的有限元模型

本研究根据公式(4)对有限元模型进行模态分析计算可得空心电抗器的前6阶模态频率以及对应的振型,结果如表1所示。

表1 空心电抗器的前6阶模态

Mode	f/Hz
1	67.63
2	69.764
3	76.357
4	111.95
5	115.35
6	125.01

本研究在模态分析基础上再进行随机振动分析得到PSD响应结果,其中垂直方向的响应出现明显的极值,垂向PSD响应曲线如图3所示。

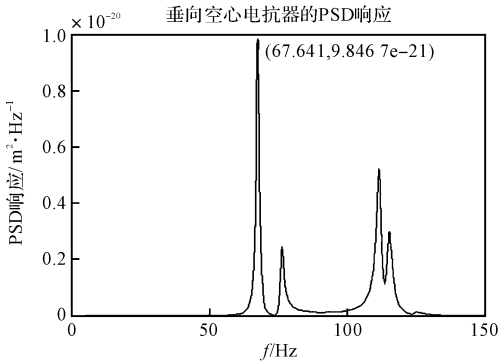


图3 垂向PSD响应曲线

从图3可以看出:垂直方向的PSD位移响应会在67.63 Hz、76.357 Hz、111.95 Hz和115.35 Hz频率处出现极值,即在这几处频率空心电抗器会发生共振,最大响应值为 $9.8 \times 10^{-21} \text{ m}^2/\text{Hz}$ 。

2 空心电抗器载流时电磁力和热应力

运行中的空心电抗器在结构上除了受到电磁力的影响外,还会受到热应力的影响。两者对空心电抗器的结构影响不可忽视^[9]。

首先本研究在电磁场中计算绕组所受电磁力和绕组损耗。对绕组施加电流作为激励,整个电抗器施加磁力线平行边界条件,其余为自然边界条件。空心电抗器绕组受到的电磁力 F_d 为其有限元分析模型中任一单元的电磁力^[10],即:

$$F_d = \sum_{i=1}^n F_{di}^e$$

(5)

$$F_{di}^e = \int J^e \times B^e (dV)^e$$

(6)

式中: F_{di}^e —绕组第*i*个单元所受电磁力; J^e —单元内的电流密度; B^e —单元内磁感应强度,可根据矢量磁位计算得到; $(dV)^e$ —单元体积。

绕组中单元体积的焦耳热有:

$$Q^e = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \alpha J_k^2$$

(7)

式中: Q^e —单元体积的焦耳热; α —电阻率矩阵; J_k —单元积分点*k*的电流密度。

根据式(6~7)进行电磁场有限元计算,即可得绕组所受电磁力 F_d 和绕组损耗 Q 。

将绕组损耗作为热载荷导入温度场中,由热传导方程和边界条件可求出温度分布^[11]。对于三维物体,其内部的热传导方程为:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T_e}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T_e}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T_e}{\partial z^2} + Q^e = \rho c \frac{\partial T_e}{\partial t}$$

(8)

式中: T_e —该单元温度; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ —单元*x*、*y*、*z*方向的导热系数; ρ —该单元的密度; c —单元比热容; t —时间,边界条件 $T(0) = T_s$,初始温度为 T_s 。

由公式(8)进行温度场有限元计算可求解出空心电抗器温度分布,将温度分布和电磁力代入机械场,对电抗器顶部安装孔施加位移全约束边界条件,根据热弹性力学方程即可求出形变和应力^[12]。计算方程为:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{1 - 2\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) + 3\beta T_e$$

(9)

$$[K] \{x\} = \{F_d^e\}$$

(10)

式中: ε —单元应变; E —单元材料的弹性模量; σ —单元应力; β —线热胀系数。

基于上述计算公式对图2所示的模型进行有限元计算可得空心电抗器受电磁力和温度影响的形变分布,其云图如图4所示。

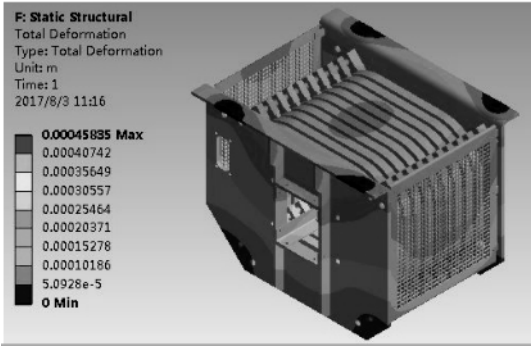


图4 空心电抗器载流时形变分布云图

由图 4 看出;空心电抗器运行时各部分存在一定温度差异,而在电磁力和热应力的影响下空心电抗器各部分出现大小不一的形变。

3 多物理场耦合空心电抗器振动特性分析

相比于第 2 部分的随机振动分析,这部分将引入空心电抗器运行时受到的电磁力和热应力影响因素,使振动特性分析更符合实际情况。无论是电磁力还是热应力都会影响到结构的刚度,进而影响到模态分析的结果^[13]。式(2)的刚度矩阵 K 满足:

$$K = \sum K_e = \int V B^T D B dV \tag{11}$$

式中: K_e —单元刚度矩阵; D —单元材料特性矩阵; B —单元应变矩阵。

多物理场耦合迭代计算过程如图 5 所示。

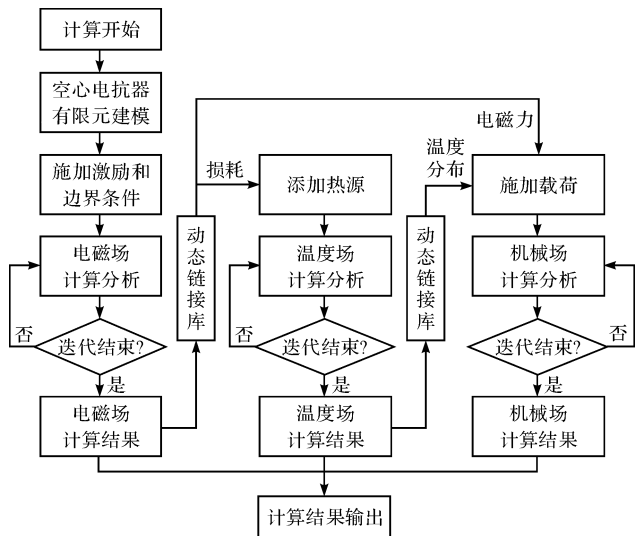


图 5 多物理场耦合迭代计算流程

在所建立的变压器有限元模型中,电磁场、温度场和机械场计算所用的三维有限元模型完全相同,且具有相同的几何结构与节点编号,采用顺序耦合法进行计算,即前一个场的计算结果作为激励施加至后一个场的计算中,进而输出计算结果,实现多物理场的耦合迭代^[14]。

最后本研究在机械场中进行随机振动分析,得到的模态分析结果如表 2 所示。

表 2 改进后空心电抗器的前 6 阶模态

Mode	Frequency/Hz
1	68.345
2	72.859
3	80.791
4	111.93
5	118.95
6	130.85

可以看到:前 6 阶的模态频率发生了改变,这也影响到了其共振频率的改变。

随机振动分析的结果如图 6 所示。

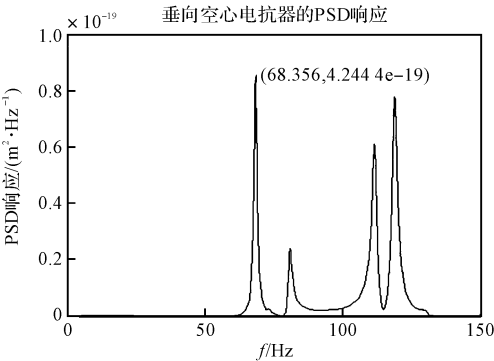


图 6 改进后垂向的 PSD 响应曲线

同样地共振点发生了改变,出现在了 68.356 Hz、80.791 Hz、111.93 Hz 和 118.95 Hz 处,说明空心电抗器在工作状态和非工作状态下的结构特性不同,导致共振频率也不一样,相应的最大响应值增大到 $4.2 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{Hz}$ 。

在实际设计空心电抗器过程中,考虑电磁力和温升的影响,通过采用机械强度更好的材料,例如 Q345 型号的材料,能够承受较大应力和形变,以及通过改变其结构,像减小电抗器高度等措施,可改变其固有频率避免和列车发生共振。同样地,一台三相电抗器样品在进行相关振动试验时发生结构上的破坏,通过考虑电磁力和热应力的因素对其结构进行了相应的改造,使其散热更好并且受到的电磁力更小,改进后的电抗器可以成功地通过振动试验,说明考虑了电磁力和热应力的分析计算结果更贴合实际结果。

4 结束语

基于多物理场耦合计算,本文对空心电抗器进行了振动特性分析,结果表明:

(1)不考虑电磁力和热应力的车载空心电抗器随机振动分析只探讨了列车运行时的随机载荷对空心电抗器的影响,在 67.63 Hz、76.357 Hz、111.95 Hz 和 115.35 Hz 这几处频率空心电抗器会发生共振,最大响应值为 $9.8 \times 10^{-21} \text{ m}^2/\text{Hz}$;

(2)在考虑了电磁力和热应力后,振动分析更符合空心电抗器实际运行情况。电磁力和热应力明显地影响了空心电抗器结构特性,其共振频率因此也改变为 68.356 Hz、80.791 Hz、111.93 Hz 和 118.95 Hz,最大响应值也增大到 $4.2 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{Hz}$,即共振幅值变大,更可能引起空心电抗器结构损坏以及绕组变形进而引发其电气故障,可知在空心电抗器更应避免该分析下的共振点。

参考文献 (References):

- [1] 王世山,汲胜昌,刘家其,等. 电缆绕组变压器轴向振动模态特性的分析研究[J]. 电工技术学报,2004,19(10):6-11.
- [2] 王璋奇,王 孟. 电力变压器绕组轴向振动稳定性分析[J]. 中国电机工程学报,2002,22(7):24-28.
- [3] 王丰华,段若晨,耿 超,等. 基于“磁-机械”耦合场理论的电力变压器绕组振动特性研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(9):2555-2562.
- [4] 刘宝稳,马宏忠,李 凯,等. 大型变压器绕组轴向固有频率振动分布特性与试验分析[J]. 高电压技术,2016,42(7):2329-2337.
- [5] 吴会超. 高速动车组车体与车下设备耦合振动研究[D]. 成都:西南交通大学机械工程学院,2012.
- [6] IEC-61373-2010. 铁道车辆设备冲击和振动试验标准[S]. 日内瓦:国际电工委员会,2010.
- [7] NARANPANAWA L, EKANAYAKE C. Finite element modelling of a transformer winding for vibration analysis[C]. Australasian Universities Power Engineering Conference, Brisbane: IEEE,2016.
- [8] 周 宇,马宏忠,李 凯,等. 基于相空间重构的大型变压器绕组松动的振动特征识别[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):169-175.
- [9] 张 彬,徐建源,陈江波,等. 基于电力变压器振动信息的绕组形变诊断方法[J]. 高电压技术,2015,41(7):2341-2349.
- [10] 弓杰伟,马宏忠,姜 宁,等. 电力变压器的有限元建模与绕组松动分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):78-84.
- [11] 李 辉,陈江波,曹 辰,等. 基于多物理场耦合方法的变压器绕组振动仿真与试验研究[J]. 东北电力技术,2015,36(2):6-9.
- [12] 汲胜昌,王俊德,李彦明. 稳态条件下变压器绕组轴向振动特性研究[J]. 电工电能新技术,2006,25(1):35-38.
- [13] BAGHERI M, PHUNG B T. Frequency response and vibration analysis in transformer winding turn-to-turn fault recognition[C]. International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems, Bali: IEEE,2017.
- [14] SHAO P, LUO L, LI Y, et al. Electromagnetic Vibration Analysis of the Winding of a New HVDC Converter Transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012,27(1):123-130.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

应承伟,李水清,王文华,等. 基于多物理场耦合的车载空心电抗器振动特性研究[J]. 机电工程,2018,35(3):293-297.

YING Cheng-wei, LI Shui-qing, WANG Wen-hua, et al. Random vibration characteristics of air core reactor based on multi-physics field coupling theory[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018,35(3):293-297.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>