

基于超模型的有载分接开关零部件的动力学模型确认

刘志远¹,邹洪森¹,缪辉²,陈大鹏³,臧朝平²

(1. 国网宁夏电力有限公司 检修公司,宁夏 银川 750000; 2. 南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016; 3. 南京优能特电力科技发展有限公司,江苏 南京 211100)

摘要:提出一种有载分接开关零部件的动力学模型确认方法。该方法以有限元超模型的分析结果为参考基准,采用基于灵敏度的优化方法对分接开关零部件的有限元简化模型进行修正,以获取与超模型动力学特性一致的简化模型,该模型可进一步用于建立分接开关的整机动力学模型。以分接开关底座的动力学建模为实例,对该方法进行了验证。该方法对工程中复杂结构的动力学建模具有广阔的应用前景。

关键词:有载分接开关;模型确认;超模型;有限元;换流变压器

中图分类号:TB122 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2019)05-0131-05

Dynamic Model Validation for On-load Tap Changer Component Based on Super-model

LIU Zhiyuan¹, ZOU Hongsen¹, MIAO Hui², CHEN Dapeng³, ZANG Chaoping²

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Maintenance Company, Yinchuan 750000, China;

2. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Nanjing Unitech Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: A method for model validation of on-load tap changer (OLTC) component is presented. Based on the simulation results of the finite element (FE) super-model, a sensitivity-based updating method is used to correct the FE simplified model of OLTC component, and the simplified model can be adopted in the modeling of the whole OLTC model, then, its dynamic characteristics are updated and made to agree with that of the super-model. Taking the dynamic modeling of OLTC base for example, this method is validated. The method has broad application prospects for dynamic modeling of complex structures in engineering.

Keywords: on-load tap changer; model validation; super-model; finite element; converter transformer

0 引言

有载分接开关(on-load tap changer, OLTC)是换流变压器实现有载调压的关键部件,其频繁动作时承受着巨大的机械和电流冲击,从而导致使用过程中出现触头过热烧损、紧固件松动脱落及操作机构卡涩失灵等电气或机械故障^[1-2]。随着换流变压器在电网应用的增多,有载分接开关故障发生率也随之增加。据统计,国内有载分接开关的故障率占变压器故障率的20%以上,而机械故障约占分接开关总故障的70%^[3]。因此,有必要对分接开关的机械故障进行研究,以提高其运行的安全性和可靠性。

有载分接开关频繁操作过程中,机构零部件之间的碰撞或摩擦导致的机械振动是引起分接开关机械故障的主要原因。目前,对有载分接开关振动故障机理方面的研究主要包括试验研究和理论研究。在试验研究方面,文献[4]提出了集合经验模态分解(EEMD)方法,实现了对触头松动故障的检测。文献[5]围绕分接开关的测试原理,提出了测试结果分析的方法和原则。文献[6]通过开展运行中±660 kV换流变压器器身振动情况测量,给出了换流变压器振动的测试系统及方法,分析了换流变压器振动

信号的主要特征。在理论研究方面,文献[7]应用小波包总能量和小波包特征熵的方法,分析切换开关切换过程触头闭合期间振动信号的小波包总能量值以及特征熵值,发现了明显的故障特征信号。文献[8]用经验模态分解(EMD)结合希尔伯特变换的时频分析方法有效提取了变压器有载分接开关振动信号的故障特征。由以上研究可知,建模是进行理论研究的前提,由于有载分接开关结构复杂,传统的解析建模方法很难直接获得准确反映结构动力学特性的模型。近年来,随着计算机技术的发展,有限元分析越来越广泛地被应用于工程中复杂结构的模拟,但复杂结构的有限元仿真需耗费大量的计算资源,效率较低,而且在有限元建模过程中由于某些因素的影响,仿真的精度也受到较大影响^[9]。因此,如何建立能同时兼顾计算效率和精度的有载分接开关有限元模型是工程中亟待解决的问题。

本文基于模型确认理论对某型号有载分接开关的动力学建模方法进行研究,提出基于超模型的动力学模型确认方法,建立可用于分接开关整机动力学分析的简化模型,使其在整机分析中能同时兼顾计算的精度和效率。以分接开关底座的建模为例,采用模型修正方法对其简化模型进行修正,并对修正结果的合理性进行了验证。

1 基于超模型的模型确认方法

1.1 模型确认基本流程

有限元模型作为实际结构的离散和简化,在建模过程中由于不确定性因素影响,如单元类型、材料属性、网格质量以及边界条件等,计算结果与实际情况往往存在一定的偏差,从而影响仿真的精度,因此,需借助模型确认方法改善模型精度,提高模型的准确性。工程中复杂结构的建模精度基本都以试验数据为参考,而在缺少试验数据的情况下,模型的准确性将无法保证,这时采用超模型的数据为参照,对结构进行模型确认可以显著提高模型预测的精度。超模型^[10]是一种具有较高自由度的合理的三维有限元模型,其具有足够的精度以反映实际结构的物理特性,它不仅精确描述了结构的几何特征,而且精确反映了结构的动态特性,能够作为参考模型在设计阶段对结构仿真模型进行修正,使之在要求精度范围内准确反映实际结构的动力学特性。

基于超模型的模型确认方法主要利用结构的超模型数据对有限元模型进行校准、相关分析和模型修正,从而使预测模型和参考模型动力学特性的差异在可接受的范围内^[11]。基于超模型的模型确认流程如图1所示,主要流程包括结构的有限元建模及预分析,超模型的建模及动力学分析,超模型结果对有限元模型预测数据的校验、相关分析、修正参数的选取、模型修正以及修正结果的评价等,最终获得确认的有限元模型。

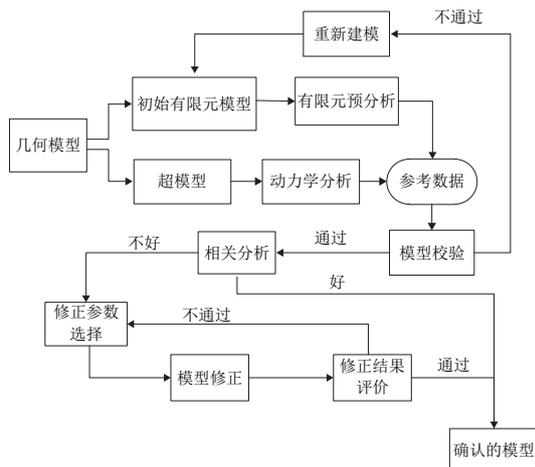


图1 基于超模型的模型确认流程

1.2 超模型建模方法

超模型的建模原则主要从两个方面考虑:首先,模型精度足够高,模型精度是衡量超模型质量最重要的指标,超模型应精确反映实际结构的动力学特性;其次,模型规模尽量小,在保证模型精度的前提下,尽可能降低有限元模型的自由度,提高超模型的仿真效率。

对于单个部件,超模型的建模流程可按照下列步骤进行:

1) 几何清理:对几何模型进行检查、清理,消除几何

建模过程中产生的误差、几何建模软件(例如UG)和有限元软件(例如ANSYS)之间的兼容性问题,确保几何模型与设计预期保持一致,可以进行网格划分;

2) 初始模型分析:设定一个较粗的网格尺寸,以二阶四面体单元进行有限元网格划分,在关心的频率范围内进行自由-自由边界条件下的模态分析;

3) 网格尺寸迭代分析:按照均匀的网格尺寸逐步细化有限元网格,并将前一网格尺寸的参考模型与当前网格细化模型进行相关分析,分析匹配模态的频率差异;

4) 模型收敛性分析:根据模型的收敛性指标检查分析结果的收敛性,如果不收敛则继续细化网格。采用当前模型和参考模型的平均频率误差与最大频率误差衡量网格的收敛性。为了定量地描述模型的收敛性,当前模型的平均频率误差(η)和最大频率误差(δ)可表示为:

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |f_{i,j} - f_{i+1,j}| \quad (1)$$

$$\delta = \max |f_{i,j} - f_{i+1,j}|, j=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中: $f_{i,j}$ 表示第*i*次迭代计算的模型的第*j*阶模态频率;*n*为模态的阶数。

5) 确定超模型:根据超模型精度指标(平均频率误差和最大频率误差)确定合适的网格尺寸,进行有限元建模,并予以参考模型相关分析,满足指标要求即确定为超模型。

1.3 模型修正及相关分析

在模型修正过程中,预测模型修正参数的变化必须满足实际结构物理意义的约束条件,因此,模型修正又可以看成是一类约束优化问题,可表达成如下形式:

$$\begin{cases} \min & g(x) = \|WR(x)\|_2^2 = \|W(f_r - f_a(x))\|_2^2 \\ \text{s.t.} & x^L \leq x \leq x^U \\ & f_a^L(x) \leq f_a(x) \leq f_a^U(x) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $g(x)$ 为目标函数; W 为加权系数矩阵, R 为残差向量, f_r 与 f_a 分别为参考向量和预测向量, $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$ 为待修正的设计变量,上角标*L*和*U*分别表示变量的下界和上界。对于这一类约束优化问题,可通过基于灵敏度分析的优化方法进行求解^[12]。

由于待修正模型与参考模型存在一定的误差,在动力学分析中,模态参数 $f_a(x)$ 为待修正参数*x*的非线性函数,为了将非线性问题转化为线性问题,在初始设计点将参考向量 f_r 表达为待修正参数*x*的一阶泰勒展开式

$$f_r = f_a(x) + S\Delta x + o(\Delta x) \quad (4)$$

式中: S 为模态参数对设计参数的灵敏度矩阵; Δx 代表设计参数的误差; $o(\Delta x)$ 为高阶项,可忽略不计,式(4)可转化为如下形式:

$$S\Delta x = R \quad (5)$$

式中: $R = f_r - f_a(x)$,为参考模型与修正模型的残差。当残差维数大于修正变量的维数时,式(5)为超定方程组,其结果可采用最小二乘法求解,得到参数增量

$$\Delta x = S^+ R \quad (6)$$

式中 S^+ 为灵敏度矩阵的广义逆。模型修正是一个迭代优化的过程,将本次迭代得到的参数作为下次迭代分析的有限元模型的初始参数,反复迭代后,有限元模型与参考模

型的误差满足收敛条件后最终收敛。

在模型修正过程中,一般采用模态置信准则(modal assurance criterion,MAC)来评估预测模型和参考模型的模态振型相似程度^[13]。MAC的定义为:

$$MAC(\phi_{r,i}, \phi_{a,j}) = \frac{|\phi_{r,i}^T \phi_{a,j}|^2}{(\phi_{r,i}^T \phi_{r,i})(\phi_{a,j}^T \phi_{a,j})} \quad (7)$$

式中: $\phi_{r,i}$ 为参考模型第*i*阶振型向量, $\phi_{a,j}$ 为预测模型的第*j*阶振型向量,*T*代表转置。 $MAC=1$,表示参考振型与预测振型完全相关; $MAC=0$,表示不相关。 MAC 的值越接近1,两者的相关性越好。

2 简化模型的模型确认

2.1 超模型的建模

有载分接开关结构复杂,包含大量的零部件,如底座、连杆、绝缘板、吊挂板、过渡电阻、动静触头等,各零部件通过螺栓、螺钉、销钉等紧固件连接,如图2所示。以有载分接开关底座的模型确认为例,建立底座的超模型,在自由-自由边界条件下,采用10节点2阶四面体单元对底座进行有限元建模,并对其前10阶模态进行分析。由于超模型的网格较密,因此可采用均匀的网格尺寸分网后进行迭代分析,不考虑局部加密,初始网格尺寸步长选为10mm,网格尺寸增量为-1mm,逐步细化至1mm。平均频率误差设为0.3%,最大频率误差设为0.5%,匹配模态对的模态相关系数均>0.95。通过迭代改变网格尺寸得到的超模型如图3所示,该模型的网格尺寸为5mm,自由度数为979248。设底座的杨氏模量为 2.1×10^5 MPa,泊松比为0.3,密度为 7850 kg/m^3 。图4给出了底座的前10阶模态频率和振型。

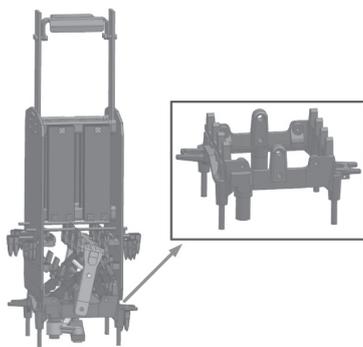


图2 有载分接开关的底座

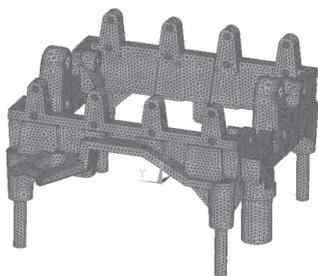


图3 底座的超模型

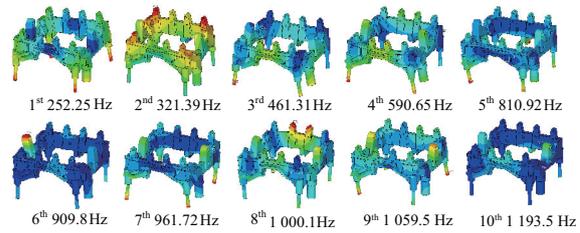


图4 底座的前10阶模态

2.2 简化模型的建模

虽然超模型具有较高的精度,可用于分接开关整机动力学分析,但是计算规模巨大,需要耗费大量的计算资源,效率极低。若基于超模型数据建立修正的简化模型进行分接开关的整机动力学分析,可同时保证计算精度和效率,因此在工程中更具有应用前景。有限元简化建模主要基于以下原则:

1) 几何结构简化:去除一些细小的几何特征,如尺寸较小的孔、凸台、倒角和倒圆等,这些特征对结构的动力学特性影响较小,却使有限元模型局部自由度急剧增加,严重影响计算效率。在建立简化模型时,随着网格尺寸的增大,细小几何特征的网格质量急剧恶化,会使局部网格划分变得很困难,这时可以将其去除,使几何结构更加平整,从而减少畸形网格的产生。

2) 有限元网格简化:以超模型的网格尺寸为参考,选择1个较大的网格尺寸作为简化模型的初始网格尺寸,对于模型中一些几何特征较小而对结构动力学特性影响较大的结构,可适当减少网格尺寸,以减少畸形网格的产生。为了方便控制不同几何特征的网格尺寸获得简化模型,可根据几何特征对结构进行分块,如图5a)所示,然后对各个分块的几何结构进行分网,相邻的分块结构必须保持网格的连续性,简化模型的计算规模通过调整分块结构的网格尺寸进行控制,获得自由度数为超模型的1/10左右的简化模型,如图5b)所示。

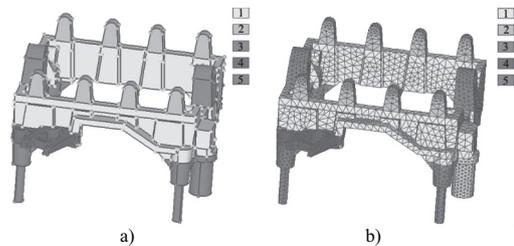


图5 底座的有限元网格

表1对比了简化模型和超模型的频率和振型,由表1可知,简化模型与超模型的前10阶频率的最大误差为3.91%,通过计算可知平均频率误差是2.46%,简化模型与超模型的MAC值都在0.9以上,振型相关性很高,因此,有限元模型简化方法是合理的。表2给出了简化模型与超模型的计算规模对比,模型简化后的自由度数为超模型的11.2%,计算时间减少为超模型的10.34%,模型简化后计算效率得到很大的提升。

表 1 简化模型和超模型的频率和振型对比

阶次	超模型 频率/Hz	简化模型 频率/Hz	频率 误差/(%)	MAC
1	252.25	262.12	3.91	0.99
2	321.39	326.98	1.74	0.99
3	461.31	473.85	2.72	0.99
4	590.65	606.18	2.63	0.98
5	810.92	837.54	3.28	0.98
6	909.80	934.19	2.68	0.99
7	961.72	986.51	2.58	0.90
8	1 000.10	1 015.00	1.49	0.92
9	1 059.50	1 072.50	1.23	0.96
10	1 193.50	1 221.90	2.38	0.98

表 2 简化模型与超模型的计算规模对比

对比参数	超模型	简化模型	百分比/%
自由度数/个	979 248	109 647	11.20
计算时间/s	472.10	48.80	10.34

2.3 简化模型的修正

分接开关底座模型简化后与超模型的动力学特性存在一定的误差,这部分误差主要由几何简化以及网格离散引起的,导致简化模型与超模型的质量和刚度分布不一致。因此,采用超模型的结果修正简化模型,可以使简化模型的动力学特性与超模型一致。由于底座模型简化后的频率相对误差较大,因此,对底座的前 10 阶模态频率进行修正,修正参数分别为图 5b) 中 5 个区域的杨氏模量,分别对应修正变量 E_1-E_5 ,初始值都为 210 GPa。采用基于灵敏度分析的优化方法对底座的修正参数进行优化,经过 16 次迭代,修正参数趋于收敛,如图 6 所示。修正后底座修正区域的弹性模量 E_1-E_5 分别为 191 GPa、601 GPa、175 GPa、600 GPa 和 552 GPa。各修正参数均发生不同程度的变化,说明底座模型简化后刚度分布发生了变化,通过修正杨氏模量对简化后模型的刚度变化进行了补偿,使简化模型与原模型的动力学特性一致。修正后简化模型

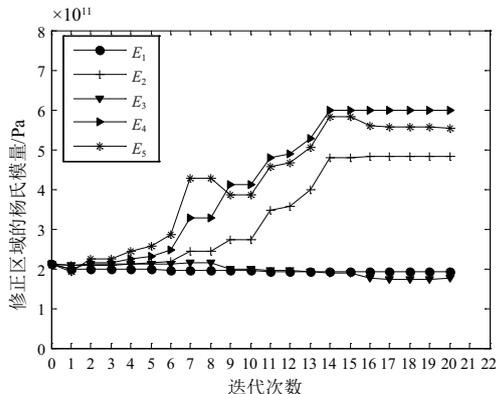


图 6 修正参数的收敛曲线

与超模型的结果对比如图 7-图 8 所示。由图 7 可知,简化模型修正后与超模型的最大频率误差由修正前的 3.91%减小到修正后的 0.97%,平均频率误差由修正前的 2.46%减小到修正后的 0.59%。由图 8 可知,简化模型修正后与超模型的模态振型相关性相对于修正前变化较小,匹配模态振型的相关系数均 >0.9 。修正后模型的动力学特性与超模型结果基本一致,修正后模型的预测精度得到了较大的改善。

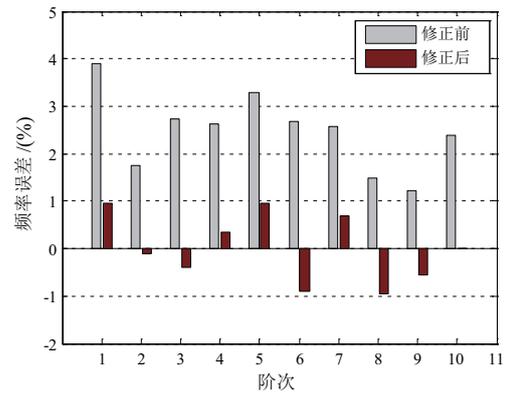


图 7 修正前后的频率误差对比

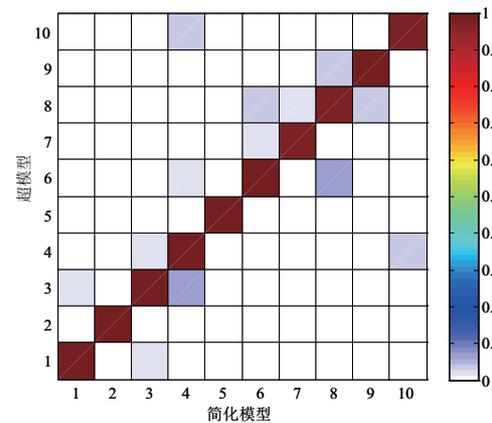


图 8 修正后简化模型与超模型的 MAC 图

2.4 简化模型的动力学响应预测

为了进一步对模型修正方法的有效性进行检验,对比修正后模型与超模型在简谐载荷激励下响应是否一致。图 9 给出了底座的激励点和响应点位置,以及底座定位销轴的固定位置,图 10 和图 11 分别给出了修正前后底座简化模型的幅频特性和相频特性的对比。在 1000 Hz 频率范围内,修正后简化模型与超模型的幅频特性和相频特性曲线十分吻合,这表明修正后的模型能够比较准确反映超模型的振动特性,显著提高了在感兴趣频率范围内频响函数的预测精度,取得了比较满意的效果。

3 结语

提出了基于超模型的有载分接开关的动力学模型确认方法,以分接开关底座的动力学建模为例,基于超模型

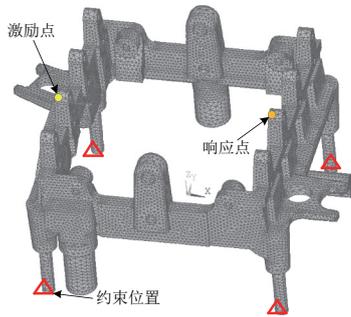


图9 结构激励点和响应点的选取

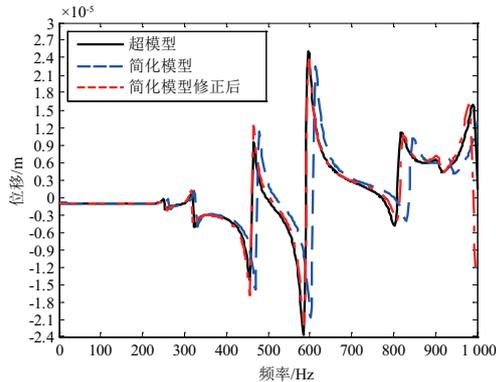


图10 修正前后简化模型幅频特性曲线对比

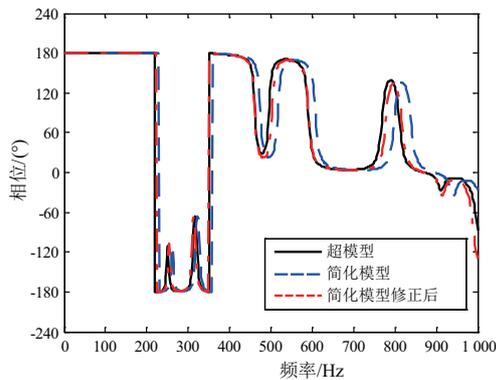


图11 修正前后简化模型相频特性曲线对比

分析结果,采用基于灵敏度分析的模型修正方法对简化模型进行修正,获得了与超模型动力学特性相一致的简化模型。该方法在动力学响应预测中得到了很好的验证,主要结论如下:

1) 简化模型的误差主要由几何模型简化误差和网格离散误差组成,根据形状特征分块选择杨氏模量作为修正参数是可行的,可以获得比较好的结果。实际上,简化模

型的误差主要由质量和刚度两部分组成,若同时选择修正密度和杨氏模量可以进一步提高修正的精度。

2) 采用基于灵敏度分析的模型修正方法可以快速获得满足收敛条件的简化模型,但是在优化过程中会不收敛或者陷入局部最优解,故需要根据模型简化过程中对动力学模型产生误差的影响,调整修正参数的初始值以及状态变量的约束范围来获得最优的简化模型。

3) 采用超模型的结果可以指导简化模型的修正,超模型的仿真数据代表设计的预期结果,与实际结构相比,未考虑模型的材料物理参数、加工制造误差、边界条件等不确定因素的影响,后期可以进一步考虑这些因素对修正结果的影响。

参考文献:

- [1] 耿伟, 耿洁宇. 变压器有载分接开关常见问题的分析和处理 [J]. 变压器, 2012, 49(3): 71-72.
- [2] 张德明. 分接开关触头过热性故障及其诊断 [J]. 变压器, 2008, 45(4): 40-44.
- [3] 胡惠然, 魏光华. 湖北电网 110 kV 及以上有载分接开关统计分析 [J]. 湖北电力, 2001, 25(1): 38-39.
- [4] 洪祥, 马宏忠, 高鹏, 等. 基于 EEMD 的有载分接开关触头松动故障诊断 [J]. 华电技术, 2012, 34(1): 12-15.
- [5] 刘振华, 安冰, 罗涛, 等. 变压器有载分接开关试验波形分析 [J]. 电气工程学报, 2014(2): 58-60.
- [6] 周加斌, 陈玉峰, 朱文兵, 等. 银东±660kV 换流变压器振动特性分析 [C]. 北京: 中国电机工程学会年会, 2014.
- [7] 陆琳, 崔艳华. 基于振动信号的变压器分接开关触头故障诊断 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(1): 93-97.
- [8] 张惠峰, 马宏忠, 陈凯, 等. 基于振动信号 EMD-HT 时频分析的变压器有载分接开关故障诊断 [J]. 高压电器, 2012, 48(1): 76-81.
- [9] Mottershead J E, Friswell M I. Model updating in structural dynamics: a survey [J]. Journal of Sound & Vibration, 1993, 167(2): 347-375.
- [10] Fotsch, Wesley D. Development of valid FE models for structural dynamic design [D]. Imperial College London, University of London, 2001.
- [11] Zang C, Ewins D J. Model validation for structural dynamics in the aero-engine design process [J]. Frontiers of Energy & Power Engineering in China, 2009, 3(4): 480-488.
- [12] Mottershead J E, Link M, Friswell M I. The sensitivity method in finite element model updating: A tutorial [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2011, 25(7): 2275-2296.
- [13] Allemang R J. The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse [J]. Spie Proceedings, 2003, 37(8): 14-23.

收稿日期: 2018-06-01