

换流阀用饱和电抗器紧固件松动仿真研究

张思鲁豫¹, 刘云鹏¹, 来庭煜^{1,2}, 张晓龙³, 孙天舒³

(1. 河北省输变电设备安全防御重点实验室(华北电力大学), 保定 071003;

2. 国网冀北电力有限公司工程管理分公司, 北京 100070;

3. 先进输电技术全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 102209)

摘要: 饱和电抗器长期振动可能产生的松动会危害换流阀正常工作, 掌握饱和电抗器的振动特性是消除其带来安全隐患的前提。为此, 该文对一种已投运的饱和电抗器开展振动特性及其仿真计算方法研究。首先, 建立了与实物等尺寸的有限元仿真模型, 对正常工况下饱和电抗器的磁场-固体力学耦合场进行仿真计算, 并基于修改铁芯杨氏模量的方式模拟紧固件不同松动状态并再次进行仿真计算; 其次, 搭建了振动试验平台, 对饱和电抗器在正常工况和多种松动工况下的振动进行试验测量; 第三, 对比分析了试验数据与仿真结果。对比表明: 二者振动加速度峰值的误差在 8%以内, 该模型可以对不同状态下的饱和电抗器振动特性进行模拟。该文研究方法可为后续换流阀层与阀塔的振动仿真奠定了基础。

关键词: 换流阀; 饱和电抗器; 磁致伸缩; 多物理场; 紧固件松动; 振动加速度

Simulation Research on Fasteners Loosening of Converter Valve Saturable Reactor

ZHANG Siluyu¹, LIU Yunpeng¹, LAI Tingyu^{1,2}, ZHANG Xiaolong³, SUN Tianshu³

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defence(North China Electric Power University),

Baoding 071003, China;

2. Engineering Management Branch, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100070, China;

3. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology(China Electric Power Research Institute),

Beijing 102209, China)

Abstract: Long-term vibration of the saturable reactor may lead to loosening, thereby posing a threat to the normal operation of converter valves. Understanding and mastering the vibration characteristics is essential to mitigating potential safety hazards. Therefore, the vibration characteristics of a saturable reactor which has been put into operation and its simulation calculation method are studied in this paper. Firstly, a full-scale model is established, and magnetic-solid mechanic coupling simulation is conducted under normal working conditions. Loose conditions are then calculated by adjusting Young's modulus of the core. Secondly, vibration tests are carried out on a vibration testing platform under both normal and loose conditions. Thirdly, the experimental data and simulation results are analyzed and compared. The results indicate that there is less than 8% error in peak vibration acceleration between the simulation and experiment results, demonstrating that the model effectively simulates vibration characteristics under different states. The research methodology presented in this paper can serve as a foundation for the subsequent vibration simulation of the converter valve layer and valve tower.

Key words: converter valve; saturable reactor; magnetostriction; multifield; fasteners loosening; vibration acceleration

0 引言

高压直流输电由于其独特优势, 在远距离大容量输电工程中得到了大规模应用^[1]。晶闸管作为传统换流阀作为实现交直流转换的核心设备, 其正常开断关系到直流输电线路的能否正常运行。饱和电抗器(anode saturable reactor, ASR)作为保护晶闸管的重要设备, 起到了晶闸管开通过程中限制电流变

化率、在过电压冲击下进行分压以及阻止高频振荡电流第一波谷电流过零的作用^[2-4]。饱和电抗器受晶闸管开断产生的脉冲电压影响, 会在磁不饱和与磁饱和状态下快速切换, 进而引起振动^[5]。长时间剧烈振动可能会造成紧固件松动、铁芯下沉、接触磨损等多种故障, 危害换流阀甚至电网的正常运行, 目前工程运行中已有此类的故障报告及分析^[6-7]。因此, 有必要研究饱和电抗器在紧固件松动状态下的

振动特性, 为设备状态评估提供参考依据。

目前学者通过实验与有限元仿真结合的方法开展了相关研究, 已掌握了电磁振动是由铁芯的磁致伸缩效应和麦克斯韦力产生。文献[8]和[9]通过对单个铁芯施加正弦激励, 提出电磁力所引起的振动远小于铁芯磁致伸缩振动, 振动的主频为激励的二倍频。文献[10]和[11]分别对麦克斯韦力和磁致伸缩现象进行了研究, 研究验证了磁致伸缩效应为振动的主要原因, 同时发现两者对振动的影响并不是单纯的数值叠加, 而存在抵消作用。文献[12]指出, 硅钢片的磁化饱和与磁致伸缩都是非线性的物理过程。上述因素均会加剧饱和电抗器铁芯振动的复杂程度。

除了铁芯自身因素, 紧固件对铁芯振动的影响也是不可忽略的[13], 不仅会对铁芯振动产生直接影响, 还会导致铁芯磁致伸缩效应发生变化[14-15]。目前常用的研究方法是通过调整螺钉紧固力矩, 测量不同的松动条件下的振动数据, 研究紧固件松动对振动的影响[16-19], 而较少有学者针对紧固件松动进行仿真研究。文献[20]将变压器模型的下侧设定为固定约束, 将上铁芯轭面作为松动故障的研究对象进行仿真计算并分析。文献[21]对电抗器的紧固件松动进行仿真, 通过修改预紧力来模拟不同松动程度。文献[22]提出了可以通过改变铁芯的杨氏模量来模拟铁芯松动故障的方法。上述文献提出了3种不同的松动故障的仿真模拟方法, 第1种方法仅能对松动状态下的振动进行定性分析, 无法对不同松动情况进行定量计算; 第2种方法适用于拉杆紧固下的仿真, 对采用螺栓预紧力作为紧固方式的模型不适用; 第3种方法与前两种方法相比具有普适性, 可以对不同紧固类型进行定量计算。

基于上述分析, 本文搭建了振动实验平台, 对饱和电抗器在正常状态和松动状态下开展了实验研究, 并且使用有限元仿真软件进行饱和电抗器的等尺寸建模, 对其正常状态下振动状态进行计算, 还通过修改铁芯杨氏模量的方式实现了多种不同松动工况的振动模拟分析, 获得了饱和电抗器在不同松动情况下的振动变化规律。

1 理论分析

1.1 固体力学分析

根据前文分析, 饱和电抗器振动主要由铁芯的麦克斯韦力和磁致伸缩效应产生, 因此主要对这两

种力进行分析。

电工设备中的磁质通常由铁磁材料或永磁材料组成, 磁质处于磁场中将受到力的作用, 麦克斯韦力应力法指出作用在磁质上的力可以由式(1)计算得出[23]:

$$\mathbf{F}_{\max} = \oint_S \mathbf{T}_{\max} \cdot d\mathbf{s} = \oint_S \begin{bmatrix} B_x H_x - \frac{1}{2} BH & B_x H_y & B_x H_z \\ B_y H_x & B_y H_y - \frac{1}{2} BH & B_y H_z \\ B_z H_x & B_z H_y & B_z H_z - \frac{1}{2} BH \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} d\mathbf{s} \quad (1)$$

式中: \mathbf{F}_{\max} 表示麦克斯韦力; \mathbf{T}_{\max} 为麦克斯韦应力张量; B_x 、 B_y 、 B_z 、 H_x 、 H_y 、 H_z 表示某点在 x 、 y 、 z 方向上的分量; n_x 、 n_y 、 n_z 为各方向的法向量。

磁致伸缩效应是铁磁材料在外加磁场作用下, 在磁化过程中材料内部的磁畴发生旋转导致材料在磁化方向上的伸长或缩短的现象。根据弹性力学中的应力应变关系, 将磁致伸缩等效为体载荷进行分析[24]。三维弹性体的应力应变关系如下:

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{ms}} = \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ms}} \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu \\ \nu & 1-\nu & \nu \\ \nu & \nu & 1-\nu \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}_{\text{ms}}$ 为磁致伸缩应力张量; $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ms}}$ 为磁致伸缩应变; ν 为泊松比; \mathbf{D} 为弹性矩阵; E 为材料的杨氏模量。磁致伸缩应力 \mathbf{F}_{ms} 可以通过对应力张量求散度得到:

$$\mathbf{F}_{\text{ms}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\text{ms}} \quad (4)$$

1.2 磁场-固体力学耦合分析

任意连续多自由度系统振动的微分方程可以表示为[25-26]:

$$\mathbf{m} \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} + \mathbf{c} \frac{d\mathbf{x}}{dt} + \mathbf{k} \mathbf{x} = \mathbf{F}(t) \quad (5)$$

式中: \mathbf{m} 为质量矩阵; \mathbf{c} 为阻尼矩阵; \mathbf{k} 为单元刚度矩阵; \mathbf{x} 表示位移; $\mathbf{F}(t)$ 为广义电磁力, 即磁致伸缩力和麦克斯韦力的合力。

将上式进行离散, 得到电磁-机械耦合矩阵:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J} \\ \mathbf{F}(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: \mathbf{M} 为电磁刚度矩阵; \mathbf{K} 为总体刚度矩阵; \mathbf{B} 为位移对物质磁化特性的影响矩阵; \mathbf{C} 为物质磁化过程对位移的影响矩阵, 满足 $\mathbf{C} = \mathbf{B}^T$, \mathbf{A} 为矢量磁位。

分析中可以令 B 和 C 为 0, 得到:

$$\begin{cases} \mathbf{MA} = \mathbf{J} \\ \mathbf{Kx} = \mathbf{F}(t) \end{cases} \quad (7)$$

计算时, 根据硅钢片的磁化曲线、磁致伸缩曲线以及材料的弹性模量等数据迭代计算铁芯的应变, 计算得到 F_{ms} 和 F_{max} , 即可求解铁芯位移。

1.3 有限元模型建立

本文分析的饱和电抗器为在哈郑、锦苏特高压直流工程中得到应用的饱和电抗器, 其型号为 ARS-350/700-84, 本文按照 1:1 比例进行建模, 其三维模型如图 1 所示。

饱和电抗器铁芯采用超薄取向硅钢片和绝缘层交替叠放绕制而成, 如果按照实际进行建模将会导致网格剖分过密并且增大计算量, 因此对铁芯部分采用均一化建模的方法, 采用均质化参数进行计算^[27]。7 个铁芯均匀环绕在外绝缘浇筑上, 相邻两个铁芯夹角为 45° 。铁芯外侧通过一根与铁芯同宽紧固带进行捆扎, 使用螺钉进行紧固, 因此在 COMSOL 中引入薄层接口, 根据图纸设置薄层厚度为 2 mm, 并调整接口设置将薄层设置在铁芯的外表面。设定气隙的厚度为 1 mm。绕组部分采用螺旋线建模, 并忽略掉内侧冷却水管。由于设备固定在平台上, 设备底部并不会出现大幅度的振动, 因此设定模型底侧的盖板为固定约束以模拟实验对应条件。网格采用分块剖分, 对铁芯和薄层采用精细化剖分, 绕组、环氧树脂和其他对振动影响较小区域以及大块区域采用粗化剖分, 这样设置可以减少计算量同时增快计算速度。剖分后的网格如图 2 所示, 剖分后的完整网格包含 68 844 个域单元、14 119 个边界单元和 3 793 个边单元。

材料属性设置如表 1, 其中线圈部分直接调用 COMSOL 内置材料。

选用与饱和电抗器铁芯材质相同的硅钢片材料进行测量, 得到的 B-H 曲线如图 3 所示。

将图 4 的电流波形作为饱和电抗器仿真的激励, 其峰值电流为 1 280 A。在理想状态下, 六脉动或十二脉动逆变电路中, 单个晶闸管的开通时间为 $1/3$ 个周期。由于饱和电抗器在晶闸管开通和关断期间的振动较大, 在晶闸管完全开通或完全关断时的振动幅值较小, 不是主要的研究对象, 因此在设置波形时将晶闸管完全开通时的时间缩短, 保留晶闸管开通和关断期间。

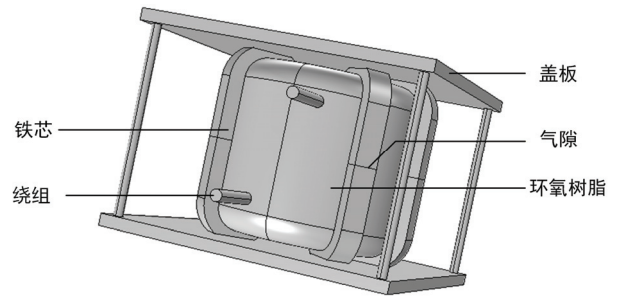


图 1 三维有限元仿真模型

Fig.1 3D finite element model

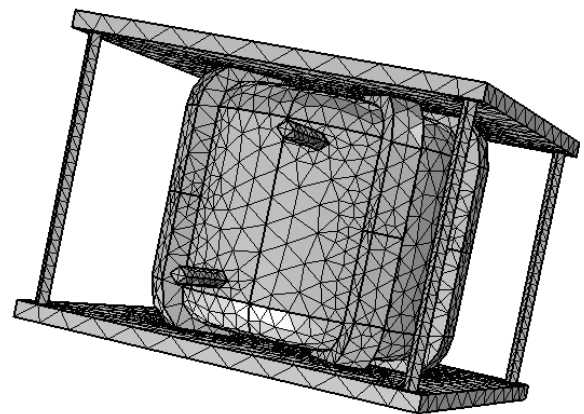


图 2 网格剖分图

Fig.2 Grid division

表 1 材料属性

Table 1 Material properties

材料域	杨氏模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	电导率/(S·m ⁻¹)	相对磁导率	相对介电常数
铁芯	195	0.27	7 870	10^{-5}	BH 曲线	1
环氧树脂	10	0.38	1 673	10^{-5}	1	4
薄层	205	0.28	7 850	4.03×10^6	1	1
空气				10^{-5}	1	1

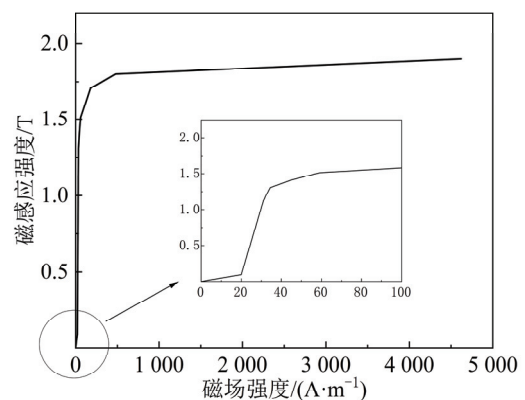


图 3 B-H 曲线

Fig.3 B-H curve

2 有限元仿真结果

2.1 振动位移加速度

对正常紧固的工况下的铁芯振动加速度进行仿真计算, 为便于后续试验验证, 选择铁芯外侧某点作为参考点, 其位置如图 5 所示。振动加速度的时域波形如图 6 所示。

通过图 6 可以观察到, 仿真计算结果显现出了两个相对独立的峰: 第 1 个峰对应了电流激励上升阶段的铁芯振动; 其后的若干小峰是电流激励在峰值时的振动; 第 2 个峰对应电流激励下降时的铁芯振动。由于电流下降段的电流变化率比上升段更大, 且铁芯已经达到磁饱和状态, 在铁芯变化幅度相同的情况下, 电流下降段时间更短, 因而第 2 个振动波峰具有更大的峰值。在电流激励归零后, 振动源消失, 铁芯自由振动, 在自身阻尼和外部约束的共同作用下逐渐停止振动。

2.2 不同松动条件的仿真设置

在饱和电抗器中, 铁芯外侧被紧固层约束, 紧固螺钉的预紧力通过紧固层传递到铁芯上, 当紧固螺钉发生松动故障时, 铁芯所受到的预紧力减小。根据广义胡克定律 $E\varepsilon=\sigma$, 应力变化造成的应变变化可以等效成杨氏模量的变化。因此在仿真中, 杨氏模量的数值变化将会影响变压器铁芯在仿真中振动的大小^[22]。因此可以通过改变材料的杨氏模量变化来反映预紧力的变化。

材料的应力-应变关系为^[28]:

$$\sigma = a\varepsilon + b\varepsilon^3 \quad (8)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; a 为线性常数; b 为硬化系数。

材料的杨氏模量 E 可以表示为:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = a + 3b\varepsilon^2 \quad (9)$$

根据上式即可计算出不同松动程度的铁芯弹性模量。

查询手册得到饱和电抗器正常状态下紧固力矩为 11 N·m, 为了对多种松动状态进行模拟, 选取 8、6、4 和 0 N·m 4 种不同的紧固力矩。在本研究中, 不同的紧固力矩大小与铁芯松动程度、仿真中设置的铁芯杨氏模量对应关系如表 2 所示。

由于在实际运行过程中, 同时出现两个及以上铁芯出现松动的概率较低, 因此仅更改其中一个铁芯的杨氏模量来模拟松动故障。不改动有限元模型的其他设置, 即可对不同松动程度的铁芯振动进行

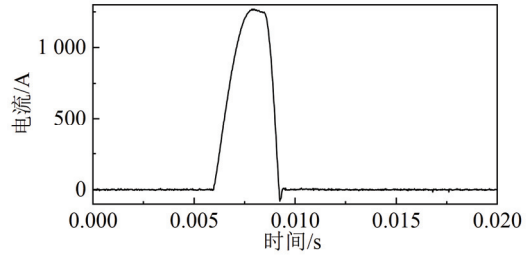


图 4 激励电流

Fig.4 Excitation current

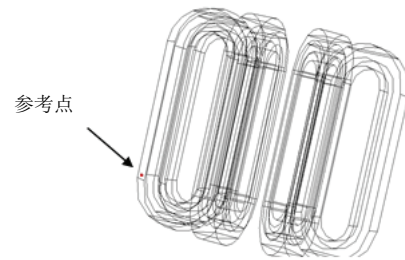


图 5 参考点示意图

Fig.5 Reference point

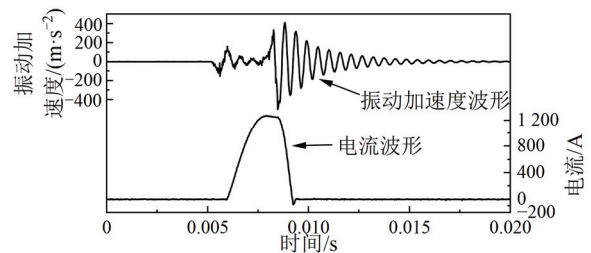


图 6 振动加速度仿真时域图

Fig.6 Time domain vibration acceleration simulation

表 2 饱和电抗器紧固力矩、铁芯杨氏模量与松动程度对照表

Table 2 Comparison table of tightening torque of ASR, Young's modulus of core and degree of loosening

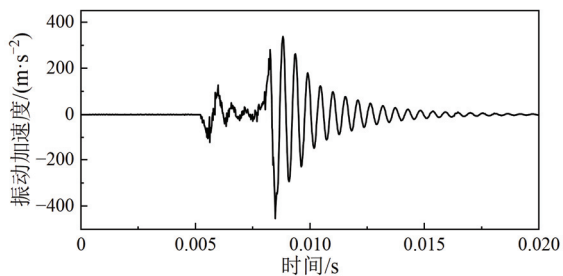
紧固力矩/(N·m)	铁芯杨氏模量/GPa	松动程度
11	195	无松动
8	180	轻微松动
6	160	严重松动
4	140	完全松动
0	100	螺钉脱落

仿真计算。

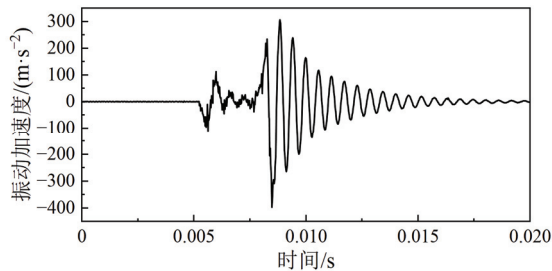
2.3 不同松动条件的仿真结果

不同铁芯松动程度的仿真结果如图 7, 表 3 给出了不同松动程度下的振动加速度峰值。紧固件正常无松动的仿真结果如前文图 6 所示。

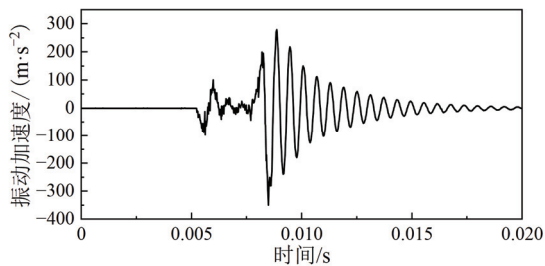
根据图 7 和表 3 中的数据, 可以观察到在不同的松动程度情况下, 所选取的参考点的振动加速度曲线相近, 峰值逐渐减小。产生这一情况的原因是, 在激励源大小不发生改变的情况下, 铁芯的杨氏模量减小, 铁芯所受到的磁致伸缩应力减小, 振动幅度降低, 振动加速度的峰值减小, 但振动加速度曲线的趋势未发生改变。



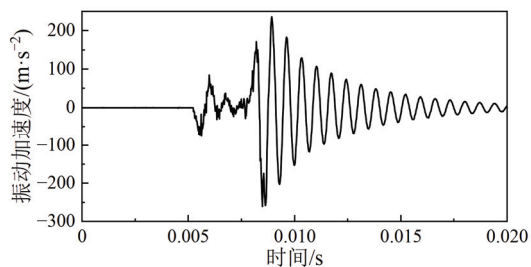
(a) 轻微松动



(b) 严重松动



(c) 完全松动



(d) 螺钉脱落

图 7 不同铁芯杨氏模量下的振动加速度对比图

Fig.7 Comparison of vibration acceleration under different Young's modules

3 试验验证

3.1 振动试验平台

为对前文仿真结果进行验证, 课题组在中国电科院北京市大功率电力电子实验室搭建振动平台, 开展了铁芯振动试验, 并采集了正常情况下和多种不同松动状况下的振动信号^[29]。

振动试验平台如图 8 所示, 试验平台的电压源为高压直流充电电源。试验平台供电电源为 220 V 交流电, 在设备柜中布置有隔离变压器和串联电抗器对 IGBT 组件进行供电。接入电压经整流后为饱和电抗器提供电压激励, 用于模拟饱和电抗器的持续运行工况。该激励可以模拟晶闸管开通、关断瞬间所产生的脉冲电压, 且在饱和电抗器上产生的电流波形近似为梯形波, 能够较好模拟饱和电抗器的振动特性。试验中所采用的饱和电抗器已在多条特高压直流工程中应用。试验过程中铁芯裸露, 无阻尼弹性体及外壳, 基本参数如表 4 所示。采用压电式振动传感器对振动数据进行测量, 测量数据通过光纤传输到接收机。试验接线满足绝缘要求。传感器布置在铁芯紧固带外侧, 位置与仿真中所选择的参考点相对应。具体位置已在图 8 中标注出。

表 3 不同铁芯杨氏模量下仿真计算振动加速度峰值对比
Table 3 Comparison of simulation vibration acceleration peak values under different Young's modules

铁芯杨氏模量/GPa	振动加速度峰值/(m·s ⁻²)
195	498.48
180	452.68
160	396.78
140	328.94
100	260.67



图 8 试验平台

Fig.8 Test platform

3.2 振动试验方案

饱和电抗器的铁芯轴向通过紧固带固定，紧固带靠螺钉进行连接固定，主要起到限制铁芯振动强度过大、防止出现振动散片、脱落故障的作用。本试验采用的饱和电抗器共有七对铁芯，放射式的均匀环绕在外绝缘浇筑。由于实际运行中，同一台饱和电抗器上有两个或以上铁芯同时发生松动的概率较小，因此只考虑单个铁芯松动的情况。试验采用松动累计的力矩调整方式，即松动之后不再复原，直到紧固带松动故障试验结束。选择的紧固力矩如表 2 所示，采用力矩扳手依次对螺钉进行松动，并采集振动数据。试验过程中铁芯已经充分磁化，因此本试验可以用于模拟饱和电抗器振动。图 9 为饱和电抗器螺钉脱落故障的示意图。

3.3 振动试验结果与分析

测量得到的不同松动情况下的振动加速度时域图如图 10 所示，峰值数据如表 5 所示。

根据图 10 和表 5 可知，在不同紧固力矩下，测量得到的振动加速度波形相似。紧固力矩大小对铁芯振动产生影响，呈现出紧固力矩越小振动越弱

表 4 饱和电抗器材料参数

Table 4 Material parameters of saturable reactor

参数	数值及型号
饱和电抗器型号	ARS-350/700-84
持续运行工况时的电峰值/kA	2
持续运行工况时的电流有效值/A	700
电压时间面积/(m·Vs)	84×(1±10%)
一次线圈绕组/mW	≤1
额定电感/mH	350×(1±10%)
铁芯个数	7
绕组匝数	5
质量/kg	100
冷却方式	水冷



图 9 饱和电抗器故障示意图

Fig.9 Schematic diagram of saturable reactor fault

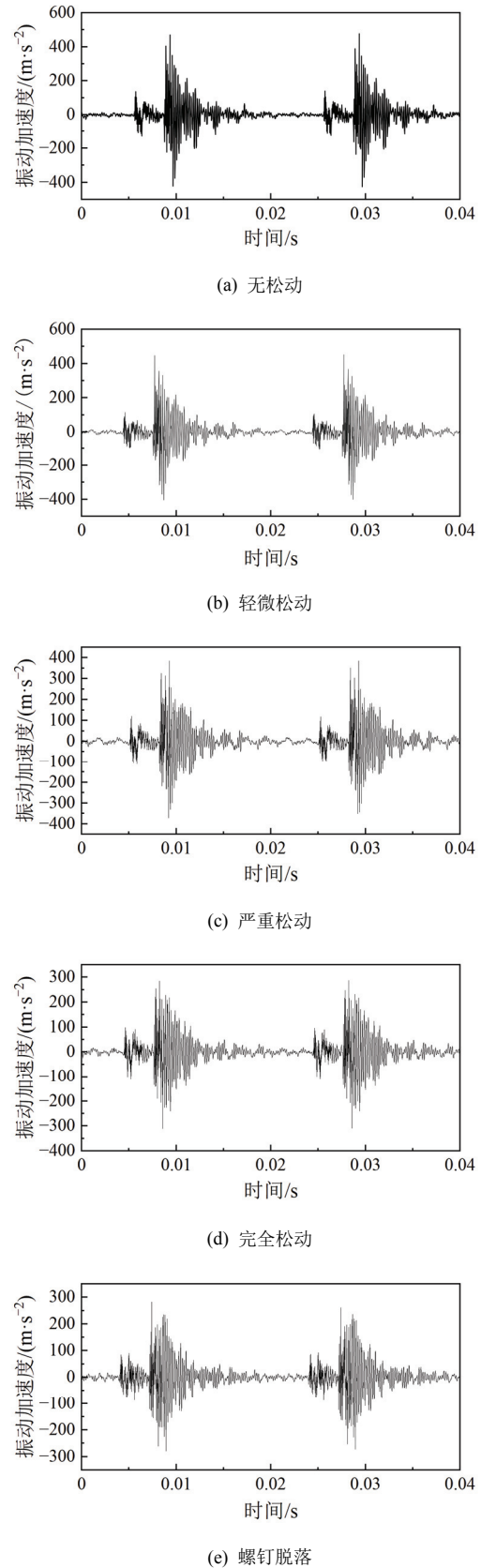


图 10 不同紧固力矩下的振动加速度时域图

Fig.10 Time domain diagram of vibration acceleration under different tightening torque

表 5 不同紧固力矩下的振动加速度峰值对比

Table 5 Comparison of peak vibration acceleration under different tightening torque

螺钉紧固力矩/(N·m)	振动加速度峰值/(m·s ⁻²)
11	476.93
8	447.84
6	385.30
4	310.12
0	282.79

的规律。产生这一规律有两种可能。从试验测点布置的角度看, 由于本试验中振动传感器布置在外侧紧固带上, 螺钉力矩减小的同时紧固带与铁芯之间的作用力减小, 紧固带与铁芯之间的缝隙增大, 紧固带受铁芯振动影响减小从铁芯的角度看, 由于硅钢材料的铁磁性质受应力影响较大, 呈现出应力越大磁化曲线畸变程度越大的性质。当铁芯所受预紧力减小, 铁芯的磁化曲线畸变程度降低, 振动幅度减小, 因此呈现出紧固力矩越小振动越弱的现象。根据模态分析和振动频率分析的结果, 并未产生共振。

3.4 试验测量与仿真结果对比与分析

振动加速度峰值的对比如表 6 所示。不同松动程度的试验测量与仿真结果的对比如图 11 所示。大图参见附录 A。

图 11 给出了仿真计算结果与实验结果的对比如图。由于仿真计算相较于试验为理想条件, 在图中表现出波形的边缘十分平滑, 而试验数据所绘制的波形边缘则较为杂乱。仿真计算波形的峰值与实验结果相近, 时域波形的特征和趋势相同, 包络线相近, 以此可以说明本仿真方法边界条件设置较为合理, 能够对饱和电抗器铁芯在正常工况下的振动进行较好的仿真计算。

表 6 给出了不同紧固力矩下仿真计算与试验测量的振动加速度峰值对比, 峰值所在位置在图 11 中框出。振动加速度的正负代表铁芯处于拉伸或收缩状态。根据数据, 仿真与试验的峰值误差在 8% 以内, 说明通过改变铁芯杨氏模量来对饱和电抗器进行模拟的方法是可行的。

仿真计算与试验实测数据存在一定的误差, 这些误差一部分来源于有限元软件算法的局限性, 无法准确计算铁芯在磁饱和与高频激励下的振动畸变; 一部分来源于模型的简化, 如建模过程中忽略了紧固螺钉、计算过程中没有考虑紧固层与铁芯之间的摩擦等因素。此外饱和电抗器在试验过程中的

表 6 不同紧固力矩下仿真计算与试验测量的振动加速度峰值对比

Table 6 Comparison of vibration acceleration peak values measured by simulation and test under different tightening

torques			
螺钉紧固力矩/(N·m)	试验测量结果/(m·s ⁻²)	仿真计算结果/(m·s ⁻²)	误差/%
11	476.93	498.48	4.52
8	447.84	452.68	1.08
6	385.30	396.78	2.98
4	310.12	328.94	6.07
0	282.79	260.67	7.82

一些偶然因素也可能造成仿真与试验数据之间的误差。

4 结论

本文针对饱和电抗器松动故障开展试验与有限元仿真计算, 通过分析试验数据与仿真计算结果, 得到结论如下:

1) 依据某一型号的饱和电抗器建立 1:1 有限元模型, 并开展多场耦合计算。仿真结果表明饱和电抗器铁芯在电流上升和电流下降时会产生剧烈振动, 电流降为零之后会进行自由振动, 在自身阻尼和外部约束共同作用下, 振动加速度峰值逐渐减小到零。

2) 采用改变铁芯杨氏模量的方法对铁芯不同程度的松动振动进行了仿真, 不同松动情况的振动加速度结果对比表明, 随着松动程度增加, 仿真计算得到的振动加速度峰值逐渐降低。

3) 仿真数据与试验数据, 仿真结果的振动加速度趋势与测量结果相同, 二者峰值的误差在 8% 以内, 说明该仿真方法可以对饱和电抗器振动进行模拟。本文研究为后续饱和电抗器的松动故障识别以及换流阀层、阀塔振动奠定了基础。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn>)。

参考文献 References

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2011: 294-298.
ZHAO Wanjun. HVDC transmission engineering technology[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Electric Power Press, 2011: 294-298.
- [2] 莫作权, 袁佳歆, 王伊帆, 等. 换流阀用阳极饱和电抗器温升特性及优化[J]. 高电压技术, 2024, 50(5): 2177-2186.
MO Zuoquan, YUAN Jiixin, WANG Yifan, et al. Temperature rise characteristics and optimization of anode saturable reactor for converter valve[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2177-2186.

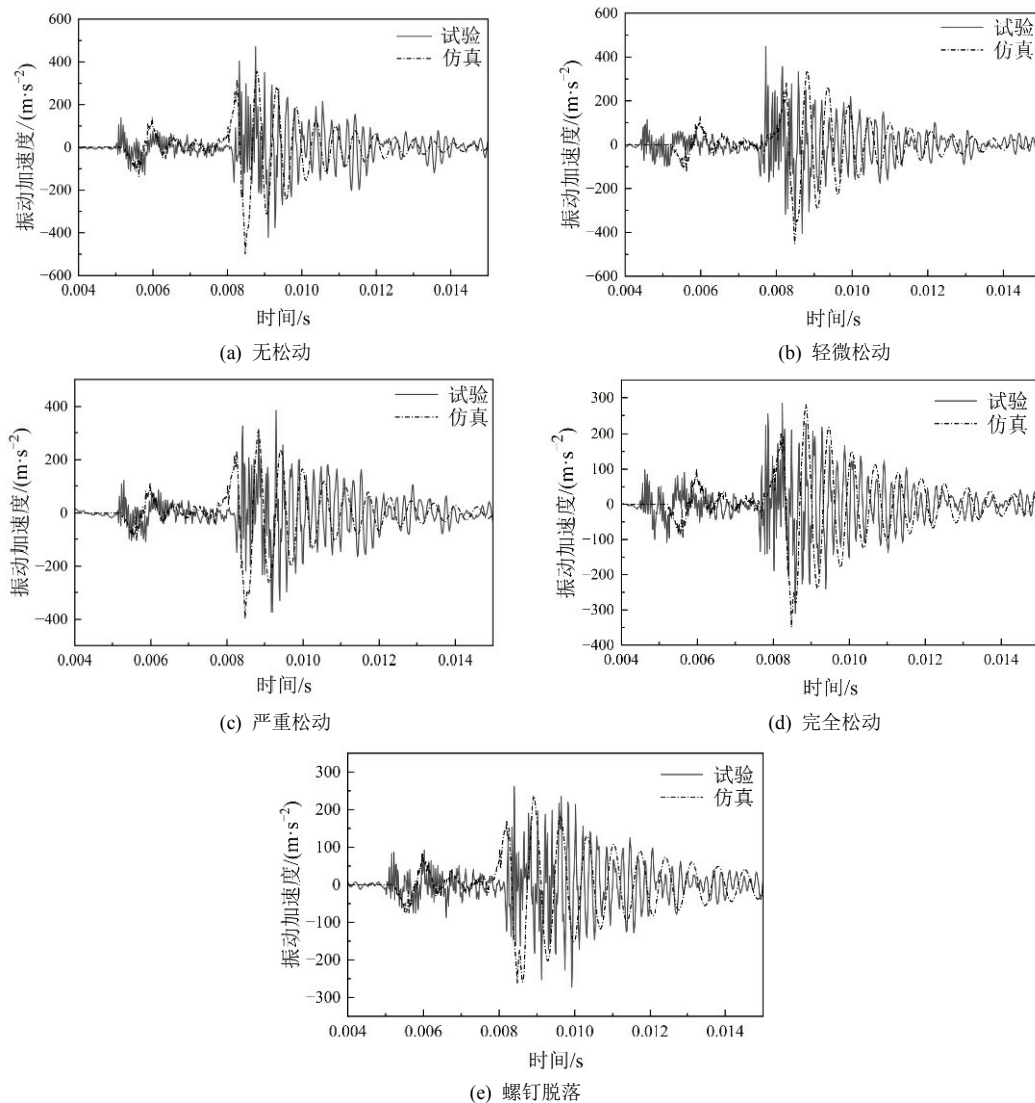


图 11 不同紧固力矩下的振动加速度对比图

Fig.11 Comparison of vibration acceleration under different tightening torques

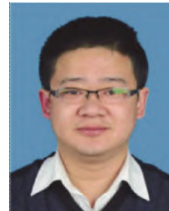
- [3] 郑力, 张翔, 赵赢峰, 等. 基于参数拟合的饱和电抗器散热模型[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 946-952.
ZHENG Li, ZHANG Xiang, ZHAO Yingfeng, et al. Thermal model of saturated reactor based on parameter fitting[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 946-952.
- [4] 陈鹏, 曹均正, 魏晓光, 等. 高压直流换流阀用饱和电抗器的暂态电路仿真模型[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 288-293.
CHEN Peng, CAO Junzheng, WEI Xiaoguang, et al. Transient circuit simulation model of saturable reactors for HVDC converter valves[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 288-293.
- [5] 纪锋, 曹均正, 陈鹏, 等. 高压直流输电系统逆变侧阀饱和电抗器电气应力研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2579-2585.
JI Feng, CAO Junzheng, CHEN Peng, et al. Research of electrical stress on saturable reactor in inverter valve of high voltage direct current transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2579-2585.
- [6] 巴秀秀, 周继红, 李茂堂, 等. 一种换流阀饱和电抗器金属水管振动磨损的改进设计[J]. 机械研究与应用, 2023, 36(4): 111-114.
BA Xiuxiu, ZHOU Jihong, LI Maotang, et al. Improvement design of vibration wear of metal water-pipe in converter valve saturable reactor[J]. Mechanical Research & Application, 2023, 36(4): 111-114.
- [7] 马元社, 董妍波, 姜彦涛, 等. 一种方形壳体式新型饱和电抗器研
制与工程应用[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 8-13.
MA Yuanshe, DONG Yanbo, LOU Yantao, et al. Development and engineering application of a new square shell type saturated reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 8-13.
- [8] ZHANG P N, LI L. Vibration of saturable reactor core used in HVDC converter valve system[J]. The Journal of Engineering, 2017, 2017(14): 2584-2590.
- [9] 张鹏宁, 李琳, 纪锋, 等. HVDC 阳极饱和电抗器阻尼弹性体降振降噪试验研究[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3839-3845.
ZHANG Pengning, LI Lin, JI Feng, et al. Test study on reduction of vibration and noise to damping elastomer in HVDC anode saturable reactor[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3839-3845.
- [10] YUAN J X, LI X Z, MO Z Q, et al. Research on vibration of the reactor for HVDC thyristor protection[J]. Energy Reports, 2022, 8(13): 321-329.
- [11] 李旭哲. 阳极饱和电抗器的振动噪声特性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
LI Xuzhe. Study on vibration and noise characteristics of anode saturable reactor[D]. Lanzhou, China: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [12] ZHANG X L, WEI X G, ZHENG L, et al. Research on vibration data-driven fault diagnosis for iron core looseness of saturable reactor in UHVDC thyristor valve based on CVAE-GAN and multimodal feature

- integrated CNN[J]. *Energies*, 2022, 15(24): 9508.
- [13] 廖才波, 黎凯, 邱志斌, 等. 干式铁芯电抗器振动特性数值模拟及试验研究[J]. *高电压技术*, 2024, 50(3): 962-973.
LIAO Caibo, LI Kai, QIU Zhibin, et al. Numerical simulation and experimental research on vibration characteristics of dry-type iron-core reactor[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(3): 962-973.
- [14] 赵小军, 张凌云, 刘洋, 等. 机械应力对取向硅钢片综合磁性性能影响的实验研究[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(22): 5776-5787.
ZHAO Xiaojun, ZHANG Lingyun, LIU Yang, et al. Experimental study on the effect of mechanical stress on the comprehensive magnetic properties of the grain-oriented silicon steel[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(22): 5776-5787.
- [15] 王振, 张艳丽, 龚园, 等. 机械应力下无取向电工钢片磁致伸缩特性研究[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(21): 5682-5690.
WANG Zhen, ZHANG Yanli, GONG Yuan, et al. Study on magnetostrictive properties of non-oriented electrical steel sheet under mechanical stress[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(21): 5682-5690.
- [16] 薛健侗, 马宏忠, 倪一铭, 等. 基于混沌理论与蜉蝣优化 K-means 算法的变压器绕组松动故障特征分析方法[J]. *高电压技术*, 2024, 50(8): 3783-3792.
XUE Jiantong, MA Hongzhong, NI Yiming, et al. Analysis method of transformer winding looseness fault based on chaos theory and K-means algorithm optimized by mayfly optimization algorithm[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(8): 3783-3792.
- [17] 王春宁, 耿志慧, 马宏忠, 等. 基于振动的电力变压器铁芯松动故障诊断研究[J]. *高压电器*, 2015, 51(12): 59-65.
WANG Chuning, GENG Zhihui, MA Hongzhong, et al. Fault diagnosis of transformer core loosening based on vibration[J]. *High Voltage Apparatus*, 2015, 51(12): 59-65.
- [18] 刘岳松. 变压器铁心和绕组振动特性及故障诊断研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
LIU Yuesong. Research on the vibration characteristics and fault diagnosis of transformer core and winding[D]. Ji'nan, China: Shandong University, 2023.
- [19] 董正予. 基于振动分析的变压器铁芯故障诊断[D]. 天津: 河北工业大学, 2021.
DONG Zhengyu. Fault diagnosis of transformer core based on vibration analysis[D]. Tianjin, China: Hebei University of Technology, 2021.
- [20] 陈朝阳. 基于振动分析的配电变压器机械故障诊断研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2022.
CHEN Chaoyang. Research on mechanical fault diagnosis of distribution transformer based on vibration analysis[D]. Tianjin, China: Hebei University of Technology, 2022.
- [21] 张宗喜, 张星海, 黄勤清, 等. 紧固件松动对高压并联电抗器振动特性的影响研究[J]. *大电机技术*, 2024(1): 80-85.
ZHANG Zongxi, ZHANG Xinghai, HUANG Qinqing, et al. Influence of fastener looseness on vibration characteristics of high voltage shunt reactor[J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2024(1): 80-85.
- [22] 曹辰, 路敦林, 徐博文, 等. 基于弹性力学-热力学的变压器铁芯磁致伸缩振动模型与松动故障诊断方法[J]. *高电压技术*, 2024, 50(5): 2146-2157.
CAO Chen, LU Dunlin, XU Bowen, et al. Magnetostrictive vibration model and loosening fault diagnosis method of transformer core based on elastodynamics-thermodynamics[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(5): 2146-2157.
- [23] 谢德馨, 杨仕友. 工程电磁场数值分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 176-178.
XIE Dexin, YANG Shiyu. Numerical analysis and synthesis of engineering electromagnetic field[M]. Beijing, China: China Machine Press, 2009: 176-178.
- [24] 何青, 刘静静. 材料力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 200-204.
HE Qing, LIU Jingjing. Mechanics of materials[M]. Beijing, China: China Machine Press, 2013: 200-204.
- [25] 张鹏宁, 李琳, 程志光, 等. 并联电抗器与变压器模型铁芯振动仿真与试验对比[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(22): 5273-5281.
ZHANG Pengning, LI Lin, CHENG Zhiguang, et al. Vibration simulation and experiment comparison of shunt reactor and transformer model core[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(22): 5273-5281.
- [26] 袁发庭, 陈步康, 陈炜, 等. 基于电磁-结构力场耦合的铁芯电抗器振动特性分析及优化方法[J]. *高电压技术*, 2023, 49(6): 2374-2384.
YUAN Fating, CHEN Bukang, CHEN Wei, et al. Vibration characteristic analysis and optimization method of iron core reactor based on electromagnetic-structural force field coupling[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(6): 2374-2384.
- [27] 张长庚, 王家俊, 李永建, 等. 特高压换流阀阳极饱和电抗器动态铁芯损耗模拟[J]. *高电压技术*, 2021, 47(6): 2158-2168.
ZHANG Changgeng, WANG Jiajun, LI Yongjian, et al. Dynamic core loss simulation of the anode saturable reactor of UHVDC converter valves[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(6): 2158-2168.
- [28] 赵莉华, 程胤璋, 武立平, 等. 基于模态分析的变压器铁芯故障诊断[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(11): 8-13, 25.
ZHAO Lihua, CHENG Yinzhang, WU Liping, et al. Transformer core fault diagnosis based on modal analysis[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(11): 8-13, 25.
- [29] 刘云鹏, 来庭煜, 刘嘉硕, 等. 特高压直流换流阀饱和电抗器振动声纹特性与松动程度声纹检测方法[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(5): 1375-1389.
LIU Yunpeng, LAI Tingyu, LIU Jiashuo, et al. Vibration voiceprint characteristics and looseness detection method of UHVDC converter valve saturable reactor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(5): 1375-1389.



ZHANG Siluyu

Corresponding author



LIU Yunpeng

Ph.D., Professor

张思鲁豫(通信作者)

2000—, 男, 硕士生

主要从事特高压换流阀饱和电抗器方向研究

E-mail: zhang793997132@163.com

刘云鹏

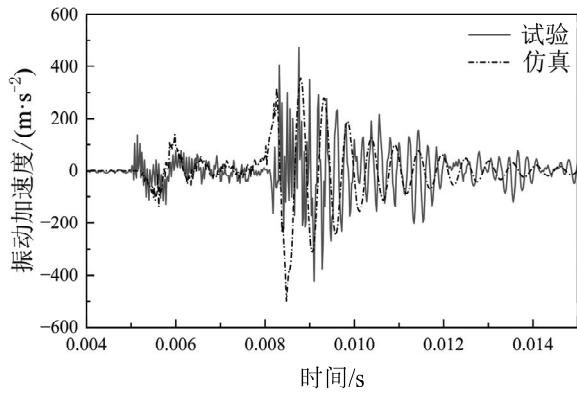
1976—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事特高压输电及电力设备故障检测与诊断方面的工作

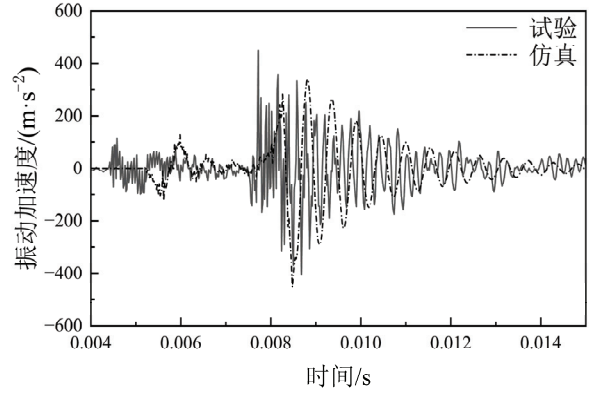
E-mail: liuyunpeng@ncepu.edu.cn

收稿日期 2025-02-13 修回日期 2025-03-27 编辑 陈蔓

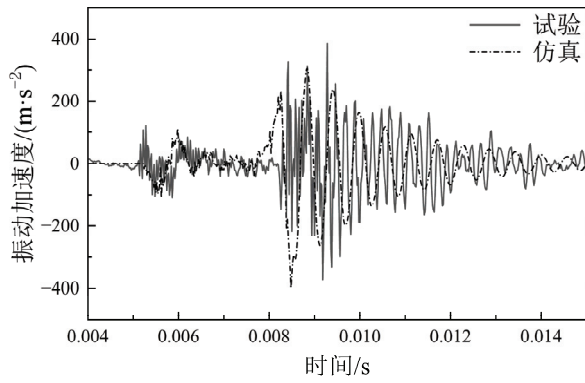
附录 A



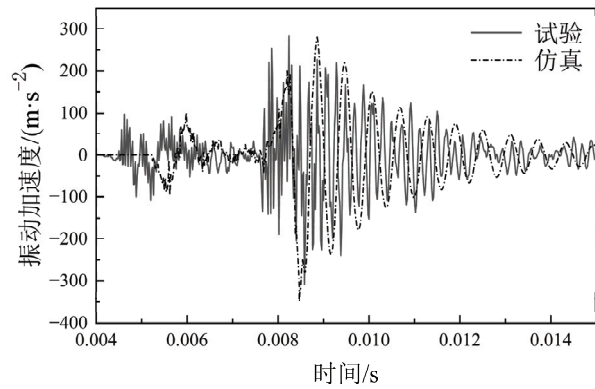
(a) 无松动



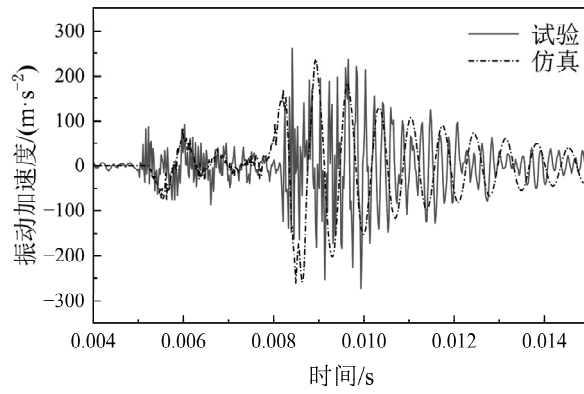
(b) 轻微松动



(c) 严重松动



(d) 完全松动



(e) 螺钉脱落

图 A1 不同紧固力矩下的振动加速度对比图

Fig.A1 Comparison of vibration acceleration under different tightening torques