

电气设备在线振动监测中传感器布置位置的优化研究

陈海军¹, 韦鹏¹, 吕金华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:为了用有限的传感器有效地采集振动信号,需要对传感器的布置位置进行优化。首先基于有效独立-驱动点残差法建立了传感器测点优化程序;随后将其应用于隔离开关、分接开关,选出隔离开关、分接开关的最佳传感器布置位置;最后,通过隔离开关的模式测试验证程序的有效性。

关键词:振动在线监测;传感器;测点优化;隔离开关;分接开关;模式试验

中图分类号:TP277 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2019)05-0193-03

Research on Location Optimazition of Sensors for On-line Vibration Monitoring of Electrical Equipment

CHEN Haijun¹, WEI Peng¹, LV Jinhua², 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: On-line vibration monitoring technology is widely used in the modern electrical equipment maintenance. The number of sensors are located at the electrical equipment for its on-line vibration monitoring. To effectively collect the vibration signals, it is necessary to optimize the location of the sensors. This paper uses the effective independent-drive point residual method to establish the optimal program for its monitoring point. Then, the program is applied to the isolation switch and the split switch, in order to select the optimal position of the sensor for them. The effectiveness of the program is verified in modal test of the isotation switch.

Keywords: online vibration monitoring; sensor; measurement point optimization; isolation switch; split switch; modal test

0 引言

电气设备运行时产生的振动信号包含了设备运行中机械方面的大量信息,可以利用振动信号对电气设备的运行状态进行监测^[1]。在线振动监测技术就是对电气设备的振动信号进行采集、分析处理,从而实现故障识别与预报的技术,现已被广泛运用于电气设备的维修管理工作,如风力发电机组或大型汽轮发电机组的故障监测与预防^[2]。

在电气设备的在线振动监测中,通常采用传感器采集振动信号,但是布置在电气设备上的传感器数量是有限的^[3]。所以希望用有限个传感器采集尽可能多的线性无关的振动响应数据,并且测量点的响应越大,越有利于信号的采集和参数的识别^[4]。因此对传感器安装位置应该合理选择,安装位置是否合理将直接影响到被测信号的好坏以及是否能够准确反映被测对象的振动特征^[5]。

1 传感器位置优化理论与方法

1.1 基础理论

结构模态是由结构本身的特性与材料特性所决定的,

与外载荷和初始条件无关。在结构模态分析中,实际的结构可以看成是一个多自由度的振动系统,对于一个多自由度的系统,其运动微分方程可表达为

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = F \quad (1)$$

其中: M 、 C 、 K 分别为 α 系统的质量、阻尼及刚度矩阵, \ddot{x} 、 \dot{x} 、 x 分别为加速度、速度和位移, F 为外界激励向量。

对式(1)两边进行初始条件为0的拉氏变换,可得

$$(Ms^2 + Cs + K)x(s) = F(s) \quad (2)$$

式中 $x(s)$ 、 $F(s)$ 分别为位移响应与激励力的拉氏变换。

令 $s = j\omega$, 则式(2)变为

$$(K - M\omega^2 + j\omega C)x(\omega) = F(\omega) \quad (3)$$

这是一组耦合方程组,为了解耦,引入模态坐标

$$x = \phi q \quad (4)$$

式中: ϕ 为振型矩阵, q 为模态坐标。

将式(4)带入式(3)可得

$$(K - M\omega^2 + j\omega C)\phi q = F \quad (5)$$

模态振型的归一化方法有多种,常用的模态质量归一化振型是通过对模态质量归一来实现的,如果 ϕ 为模态质量归一化振型,则有:

$$\begin{aligned}\phi^T M \phi &= I \\ \phi^T K \phi &= \text{diag}(\omega_i)\end{aligned}\quad (6)$$

式中: ω_i 为第 i 阶固有频率。

1.2 有效独立-驱动点残差法

对传感器位置优化主要是基于有限元仿真模型展开。一般采用的优化方法为有效独立法。其基本思想为选择对结构目标振型独立性贡献最大的节点^[6]。但是这种方法并未考虑测量点的响应,因而有可能选择了一些平均响应低的测量点。本文采用有效独立-驱动点残差法,即将各点加速度响应加权有效独立分配矩阵,从而克服这一缺陷。其数学表达式如下所示:

$$F_{n \times n} = \phi^T \phi \quad (7)$$

$$E_{n \times n} = \phi F_{n \times n}^{-1} \phi^T \quad (8)$$

$$\bar{A}(i) = \sum_{r=1}^m \frac{(\alpha_r^i)^2}{\omega_r} \quad (9)$$

$$E_{n \times n}^a = E_{n \times n}(i) \times \text{diag}(\bar{A}) \quad (10)$$

其中: $F_{n \times n}$ 为 Fisher 信息矩阵, $E_{n \times n}$ 为有效独立分配矩阵, 反映候选测点对目标模态的线性无关性。 $\bar{A}(i)$ 是 i 测点的各阶平均加速度响应, α_r^i 为 i 测量点第 r 阶振型, ω_r 为第 r 阶频率。加权有效独立分配矩阵主对角线数值大的点不但对目标振型的空间分辨率贡献高,而且具有较大的平均响应。

1.3 逐步消减法

有效独立-驱动点残差法只是提供了一种测试模型中各点是否适合做测量点的方法,还需要特定的搜索算法挑选出所需数量的最适合的测量点。传统的搜索最优测量点的算法为直接法,即根据加权有效独立分配矩阵对角线元素大小一次性选出所需数量的测量点位置,这种方法的优点是效率高,因为不需要循环,但是通过这种方法选择的测量点不能增大所有目标振型的空间分辨率。本文采用的是逐步消除法,即每次循环都选出一个最小的分配矩阵对角线元素,然后取出该元素,重新计算分配矩阵,如此循环直到剩余位置为所需位置。利用这种方法选出的测量点可以较好地平均各阶振型的能量分布,包含较多的模态参数信息,有利于模态振型的识别^[7]。采用有效独立-驱动点残差法为优化方法,以逐步消减法为搜索方法,通过 matlab 编译的最优测量点搜索程序的流程图如图 1 所示。

2 案例分析

本文基于有效独立-驱动点残差法,运用 matlab 编译了传感器布置位置优化程序,并将其运用于剪刀式隔离开关与有载分接开关上。

2.1 隔离开关的最优测点

剪刀式隔离开关由于操作灵活方便,被广泛应用于变电站中^[8]。剪刀式隔离开关一般包括底层支承、传动机构、动触头以及静触头^[9]。因为本文仅考虑剪刀式隔离

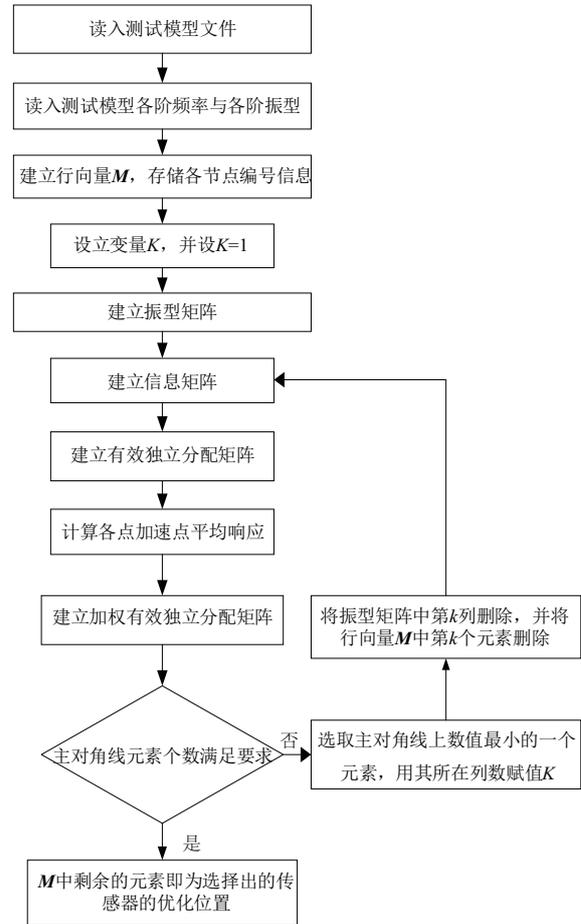


图 1 传感器测点优化程序流程

开关闭合时的模态参数,为了分析方便,将底层支承与传动机构简化为固定约束,建立的有限元模型如图 2 所示。通过有限元分析可知剪刀式隔离开关的前 5 阶振型分为 x 向与 y 向 2 个方向。因此,模态试验也需要分为 x 向与 y 向 2 组试验。



图 2 隔离开关的有限元模型

基于模态分析的前 5 阶振型,利用传感器布置位置优化程序得到 x 向与 y 向 2 组试验中的最优测点都集中于

静触头右支撑的底部。因此在模式试验中应将传感器布置于静触头的右下端。

2.2 有载分接开关的最优测点

有载分接开关是变压器中的重要设备^[10]。本文利用激光建模技术,建立了某一型号有载分接开关的几何模型。在此基础上,建立的有限元模型,如图3所示。基于有限元模型的模态分析振型,利用传感器布置位置优化程序得出分接开关的最优测点集中于顶部,所以在模式测试中,应将传感器布置于上半板块的顶端。



图3 分接开关的有限元模型

3 试验验证

3.1 隔离开关有限元模型计算结果

对于图2所示的隔离开关的简化有限元模型,在静触头顶端,动触头底端固支的边界条件下,进行模态计算,图4给出了隔离开关简化有限元模型前5阶的振型与频率。

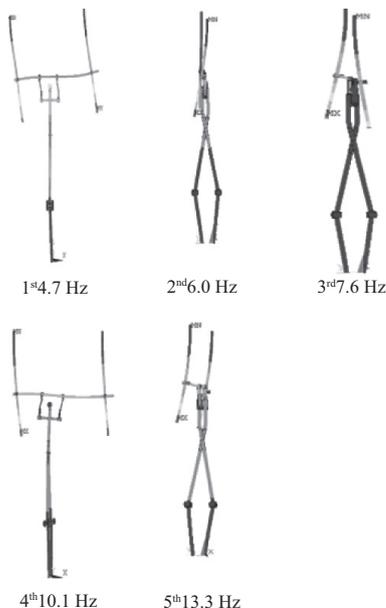


图4 隔离开关有限元模型分析结果

由图4可以看出,隔离开关的前5阶模态中,第1阶与第4阶是x方向的弯曲振动,第2阶、第3阶和第5阶是y方向的弯曲振动。

3.2 隔离开关的x向模态试验

根据2.1节的分析,隔离开关传感器的最优测点集中在静触头左右支撑杆的底端。因此,在隔离开关的x向模态试验中,将加速度传感器布置于右支撑杆的底端,进行模态测试,对得到的频响函数进行分析,所得的试验频率与有限元模型的计算频率对比如表1所示。

表1 x向模态测试结果和有限元计算结果的频差

有限元阶次	有限元频率/Hz	试验阶次	试验频率/Hz	相对误差/(%)
1	4.7	1	4.4	6.00
4	10.1	2	11.0	-8.99

通过表1可知,模态试验所得的1、2阶测试频率与有限元模型x方向的前2阶频率最大频差为-8.99%,<10%,满足一般工业要求。

通过对右支撑杆底端的传感器采集的振动数据进行分析,准确地获得了隔离开关x方向的模态频率。这说明在模态试验中,右支撑杆底端的传感器有效地采集了隔离开关x方向的模态参数。

3.3 隔离开关y向模态试验

在隔离开关y向模态试验中,将加速度传感器同样布置于右支撑杆的底端,进行模态试验。试验频率与有限元模型的计算频率对比如表2所示。

表2 y向模态测验结果和有限元计算结果的频差

有限元阶次	有限元频率/Hz	试验阶次	试验频率/Hz	相对频差/(%)
2	6.0	1	5.6	7.10
3	7.6	2	7.8	-2.78
5	13.3	3	12.8	-3.48

通过表2可知试验频率与有限元的分析频率最大频差<10%,说明在模态试验中,右支撑杆底端的传感器同样可以有效采集隔离开关y向的模态参数。

4 结语

本文首先在有效独立-驱动点残差法的基础上编译了传感器测点优化程序,并将其应用于隔离开关和有载分接开关,选出了隔离开关与分接开关用于在线振动监测的最佳传感器布置位置。最后,通过隔离开关的模态试验证明了本文程序的有效性。

(下转第214页)