

采用拉索连接惯容系统的在运断路器减震改造

薛松涛^{1,2}, 车兴儒¹, 谢丽宇¹

(1. 同济大学土木工程学院结构防灾减灾工程系, 上海 200092; 2. 日本东北工业大学建筑学部, 日本 仙台 982-8577)

摘要: 在发生地震灾害时, 变电站中瓷型电气设备如断路器、互感器等易发生破坏。为保证电气设备在地震荷载作用下能够安全正常工作, 以某110 kV断路器为研究对象, 对其进行原位动力特性测试和有限元建模, 采用拉索连接的电涡流阻尼惯容系统对在运的断路器进行减震改造设计并进行了工程应用, 对设备减震改造前后的模态响应和地震响应进行了计算和分析。结果表明: 在地面峰值加速度为0.4g的地震荷载作用下, 使用惯容系统对断路器进行改造, 可以使套管根部应力减小44%, 位移峰值减小47%, 实现约40%的减震效率。应用惯容系统是提高断路器结构抗震性能的有效措施。

关键词: 断路器; 惯容器; 电涡流阻尼; 地震作用; 减震

Shock Absorbing Retrofit of Operated Circuit Breaker with Cable-bracing Inerter System

XUE Songtao^{1,2}, CHE Xingru¹, XIE Liyu¹

(1. Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Japan)

Abstract: In the event of an seismic disaster, the porcelain type electrical equipment in substation such as circuit breakers and instrument transformers are prone to damage. For assuring safe and normal operation of the electrical equipment under the action of seismic loads, a 110 kV circuit breaker is taken as the research object, of which the in-situ dynamic characteristics test as well as finite element modeling are performed. The operated circuit breaker is subject to shock absorbing retrofit design and the engineering application is performed by using the cable bracing eddy current inerter system. The modal response and seismic response of the equipment before and after the shock absorbing retrofit have been calculated and analyzed. The results show that under the seismic load with the ground peak acceleration of 0.4g, use of the inerter system to retrofit the circuit breaker can reduce the stress at the bottom of the bushing by 44%, the peak displacement by 47%, and achieve a shock absorbing efficiency of about 40%. The use of inerter system is an effective measures to improve the seismic performance of circuit breaker structure.

Key words: circuit breaker; inerter; eddy current damping; earthquake; shock absorbing

0 引言

电力系统作为生命线工程的关键组成部分, 它的工作状态关系到社会生产和社会生活能否正常进行^[1-7]。高压断路器在电力系统中具有重要的控制和保护功能。

国内外大量地震灾害表明断路器在地震中具有较高的易损性^[8-9], 破坏的原因主要有2个: 一是断

路器瓷套高度较高且为脆性材料, 地震时易断裂; 二是断路器的自振频率与地震波的卓越频率接近, 主体结构易因共振的影响遭受破坏^[10-11]。对在运的断路器抗震性能进行提升时, 为降低经济投入与减少施工可能造成的安全问题, 应尽量减少现场施工操作。采用能够减少原结构地震输入和耗散地震能量的减隔震措施是提高断路器抗震性能的有效方法。

收稿日期: 2022-04-02; 修回日期: 2022-06-05

基金项目: 政府间国际科技创新合作重点专项(2021YFE0112200); 上海市自然科学基金面上项目(20ZR1461800)。

Project Supported by Key Projects of Intergovernmental International Scientific and Technological Innovation Cooperation (2021YFE0112200); General Project of Shanghai Natural Science Foundation (20ZR1461800).

惯容器作为1种新型的被动控制减震装置,具有两 endpoints 连接、可调谐、可实现较大的质量放大效应等优势^[12]。为更好地发挥惯容器的减震效果,通常需与阻尼器共同使用组成惯容系统,可以提高阻尼器的能量耗散效率^[13]。电涡流阻尼依据电磁感应原理产生阻尼,具有结构简单、可靠性高、耐久性好、阻尼系数易调节等优点,是1种理想的与惯容器配合的阻尼器形式^[13-14]。班鑫磊等提出了拉索式旋转电涡流阻尼器,丰富了惯容装置的安装方式^[15-16]。

由于断路器为支柱式结构,支柱高度大,地震作用下结构不同高度处动力响应差异较大,且基座下方空间充足,可以使用拉索连接原结构与惯容系统,将结构的动力响应传递到惯容系统上,故选择拉索连接的电涡流阻尼自平衡惯容系统作为减震装置对断路器进行抗震性能提升^[17]。

文中首先建立了110 kV 断路器的有限元模型并在原结构上进行了原位动力特性测试,其次根据有限元计算结果对比分析了安装减震装置前后结构固有频率的变化,之后根据断路器所在区域的场地条件,选取了7组地震波进行计算,对比分析了地震荷载下套管根部应力和顶部位移、加速度响应,计算了减震效率,最后给出了惯容系统用于断路器等支柱类设备减震改造的设计优化建议。

1 有限元模型的建立

1.1 断路器有限元模型

某断路器采用三相极柱支柱式结构,单个极柱高度为2.985 m,外部套管为陶瓷材料,外径220 mm,壁厚30 mm。3个极柱通过法兰处的螺栓连接安装于基座上,基座为4.5 m长的槽钢,基座与支柱之间采用螺栓连接。支柱为2.2 m高的槽钢,支柱底板与混凝土基础中的预埋螺栓连接。

在电气设备正常工作状态时,不考虑陶瓷套管的塑性,钢材若进入塑性阶段,断路器顶部位移过大,本仿真中不考虑材料进入塑性阶段,整体模型采用线弹性计算。

为获得该断路器在地震作用下的准确响应,根据设备图纸与现场测量数据对断路器进行1:1精细化建模,各构件均使用实体单元建模,机构箱的质量为130 kg,简化为集中质量,布置在基座底部。本模型中,垂直于断路器整体平面的方向设为X向,平行于基座的方向设为Y向,竖直方向设为Z向,整体有限元模型见图1。各构件的材料性能见表1。有限元仿真模拟阻尼选用Rayleigh阻尼,《电力设施抗震设计规范》(GB 50260—2013)^[18]规定电瓷类设备阻

尼比不宜超过2%,本研究中取阻尼比为2%。



图1 110 kV 断路器及其有限元模型

Fig. 1 110 kV circuit breaker and its finite element model

表1 有限元模型中的主要材料参数表

Table 1 Material parameters in finite element models

部件	材料	弹性模量/ GPa	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比
法兰	铝	70	2 700	0.3
套管	陶瓷	120	4 700	0.3
钢材	Q235	210	7 850	0.3

1.2 惯容系统的模型

惯容元件受力图见图2。惯容元件作为1种两端点惯性元件,其出力与两端点的相对加速度成正比^[19]

$$F_{in} = m_{in}(\ddot{u}_1 - \ddot{u}_2) \quad (1)$$

式(1)中: F_{in} 为惯容元件的惯性力; \ddot{u}_1 、 \ddot{u}_2 分别为两端点处的加速度; m_{in} 为惯容元件的表观质量,对于滚珠丝杆惯容器,表观质量的大小为^[14]

$$m_{in} = \frac{2\pi^2}{L_d^2}(r_1^2 + r_2^2)m \quad (2)$$

式(2)中: L_d 为丝杆的导程; r_1 、 r_2 分别为飞轮的内外半径; m 为飞轮的物理质量。

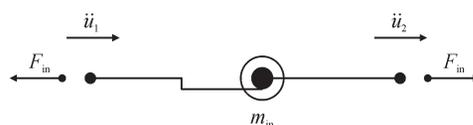


图2 惯容元件受力图

Fig. 2 Force diagram of inerter element

为更好地利用惯容原理实现结构减震的目的,需要有阻尼元件与弹簧元件的配合,通过滚珠丝杆将平动转化为转动能够同时放大电涡流效应和惯

容效应^[20],通过拉索的形式将惯容器与断路器结构进行连接,以充分利用支柱顶部与基础的相对加速度与相对速度。文中采用的惯容系统为自平衡滚珠丝杆惯容器与电涡流阻尼器并联^[21-22],其力学模型见图3,实物图见图4,安装惯容系统的结构见图5。

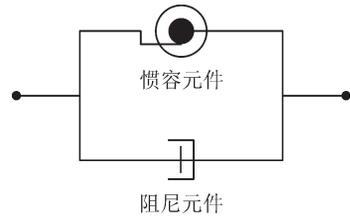


图3 惯容系统力学拓扑模型

Fig. 3 Mechanical topology model of inerter system

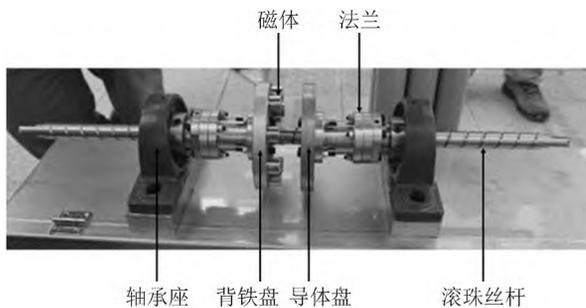


图4 惯容实物图

Fig. 4 Figure of an inerter

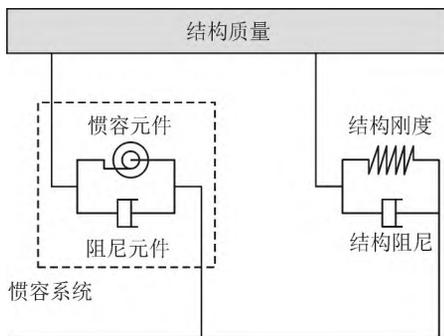


图5 安装惯容系统的结构示意图

Fig. 5 Structure with inerter system

由于惯容系统中丝杆螺母副中丝杆只能沿轴向运动,故在结构X方向与Y方向分别设置惯容系统,对2个方向的地震响应分别进行控制。使用Ikago等提出的基于定点理论的惯容系统设计方法^[23]对惯容系统参数进行优化,得到的惯容系统设计参数见表2。

表2 惯容系统设计参数

Table 2 Inerter system design parameters

惯容	组数	表观质量/kg	阻尼系数/ [(N·s)·m ⁻¹]
X向惯容	2	850	10 000
Y向惯容	1	2 220	10 000

设计丝杆直径与导程均为 20 mm;磁体数量

8个,直径与高度均为 20 mm;导体盘与背铁盘直径均为 130 mm,X向与Y向导体盘与背铁盘厚度分别为 15 mm与 45 mm,导体材质为铜。

根据楞次定律,导体盘中产生的电涡流会形成1个与原磁场极性相反的电磁场,削弱原磁场的作用,所以电涡流阻尼器的阻尼扭矩与转速的关系呈现出非线性的特性^[24]。在多物理场仿真软件COMSOL中对设计的惯容系统在不同转速下进行模拟,得到阻尼扭矩与相对转速的关系,根据丝杆的结构与受力特征将阻尼扭矩与相对转速的关系转化为轴向阻尼力与轴向相对速度的关系^[25],见图6。

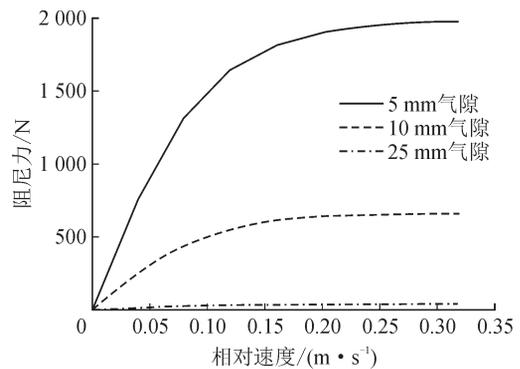


图6 不同相对速度下电涡流阻尼力

Fig. 6 Eddy current damping force at different relative speeds

由图6可知,当导体盘与磁体的相对转速达到一定值时,产生的阻尼力趋于稳定。选取5 mm气隙时得到的COMSOL模拟数据,计算得到相对速度在0~0.3 m/s时,等效阻尼系数为9 731 (N·s)/m,可以满足设计要求。

在Abaqus有限元软件中可使用Dashpots单元模拟惯容系统的阻尼元件,将阻尼力—相对速度表输入inp文件中,得到非线性阻尼单元。由于软件内无内置惯容单元,使用以用户单元(user element)定义一两节点的质量矩阵的方式模拟惯容元件,使两节点端部的出力方向相反且与两节点的加速度差值成正比,可以很好地模拟惯容元件的性质。

2 模态分析

结构的模态信息包含了自振频率和振型,是描述结构自身动力特性的重要指标。原断路器结构的前3阶振型具有不同的形式,1阶振型为支柱弯曲引起的整体结构绕支柱底部Y轴的XZ平面内弯曲变形,基座以上的上部结构整体向X方向倾斜;2阶振型为以支柱中部为反弯点的XY平面内弯剪变形,上部结构为YZ平面内平动;3阶振型中两侧支柱向Y方向异向弯曲,引起上方极柱向X方向异向倾斜,

整体结构为绕Z轴扭转变形。结构的1阶自振频率为2.71 Hz,明显低于2阶和3阶频率,2阶和3阶频率相近,分别为4.17 Hz和4.47 Hz。

为便于Y向惯容系统的工作,改造时在基座底部,两支柱外侧的位置需分别焊接一长度为2 m的工字钢梁作为工作平台,该梁增强了对基座槽钢的约束,限制了断路器向平面外的弯曲,将工作平台梁进行建模,原结构1阶自振频率提高至2.88 Hz。惯容元件的安装增加了结构的自重,使得结构各阶振型的频率有所降低,建立安装惯容系统的断路器结构有限元模型,得到改造前后断路器前3阶振型见图7,对应自振频率及特点见表3。

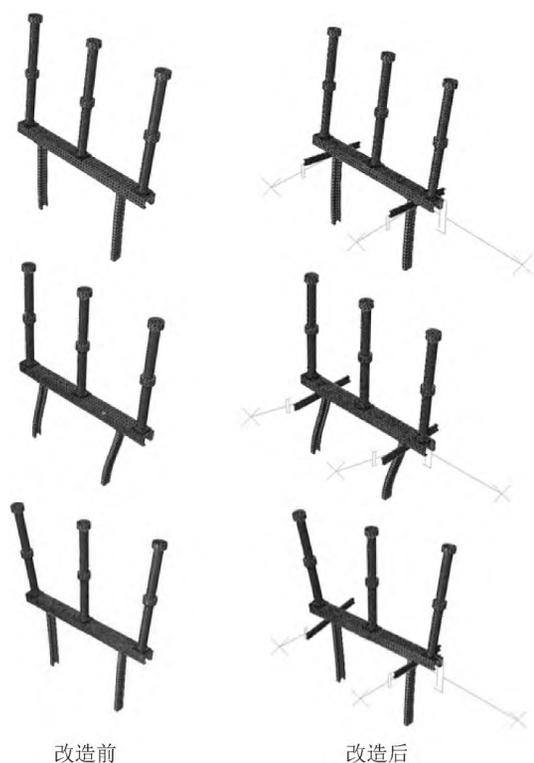


图7 结构前3阶振型图

Fig. 7 The first three order modes of structure

表3 结构前3阶模态

Table 3 The first three modes of structure

参数	改造前	改造后
1阶频率/Hz	2.71	2.76
特征	结构平面外弯曲	
2阶频率/Hz	4.17	4.11
特征	结构平面内平动	
3阶频率/Hz	4.47	4.36
特征	结构平面外扭转	

其中1阶振型在X向平动方向的参与系数为0.874,在绕Y轴弯曲方向的参与系数为0.951,2阶振型在Y向平动方向的参与系数为0.992,在绕X轴弯曲方向的参与系数为0.824,前3阶振型可以有效

表示结构振动形式。

3 地震响应分析

3.1 选取地震波

根据《电力设施抗震设计规范》和《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[26]的要求,选取适用于II类场地的5组天然地震波El-Centro、Xinsong、Chichi、Landers、Taft和2组人工地震波RSN-1101、RSN-4031进行时程分析,将这7组地震波的平均反应谱与《电力设施抗震设计规范》提供的II类场地地震影响系数曲线进行对比,见图8。由图8可知,文中选取的地震波平均反应谱可以包络规范反应谱,因此,地震波的选择具有合理性。

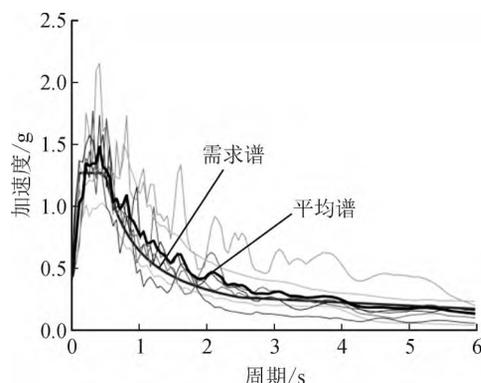


图8 地震波的平均反应谱和需求谱对比图

Fig. 8 Comparison of average response and required spectrum of seismic waves

输入地震波时,对地震波三向进行X:Y:Z=1:0.85:0.65的调幅后输入模型,输入点为两支柱底面。主震方向(X向)加速度峰值PGA (peak ground acceleration)为0.4g,Y向与Z向PGA分别为0.34g和0.26g。

3.2 结构加速度响应分析

取Taft地震波荷载下数据,对断路器改造前后的加速度放大系数进行分析。加速度放大系数可以反映地震作用对设备不同高度处加速度响应的的作用效果和影响,选取中间极柱分析,测点分别位于极柱根部、中部与顶部,对应的加速度放大系数见图9。

从图9可知在X与Y方向,结构加速度放大系数随高度变化较大,在不同测点处,改造后的加速度放大系数相比于改造前均有所降低。在X方向,减震改造主要减轻了基座在X方向的平动和绕Y轴的转动,测点越高,改造前后加速度放大系数降低越明显,顶部加速度放大系数从5.29下降到3.03;在Y方向,减震改造主要减轻了基座在Y方向的平动,改造后极柱上不同测点处加速度放大系数降幅接

近,顶部加速度放大系数从3.01下降到2.08。

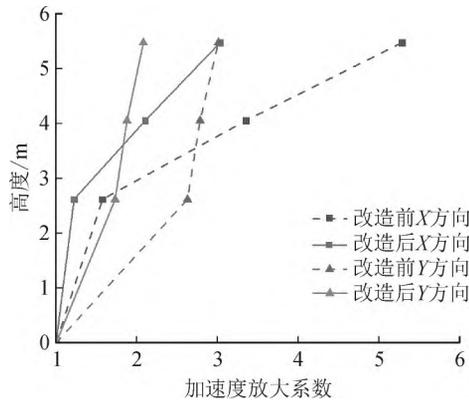


图9 改造前后加速度放大系数对比图

Fig. 9 Comparison of acceleration amplification coefficient before and after retrofit

3.3 应力、位移响应分析

断路器极柱的主要材料为陶瓷,该材料脆性明显,抗弯与抗剪能力弱,极柱根部在地震荷载作用下应力较大,根据以往的震害调研结果,套管根部出现断裂是断路器设备在地震作用下常见的破坏模式^[27-28]。选取减震前后 Taft波作用下边缘极柱与中间极柱的套管根部X向与Y向应力进行对比,见表4。

表4 应力及位移峰值

Table 4 Maximum of stress and displacement

项目	极柱类型	应力峰值/MPa		位移峰值/mm	
		X	Y	X	Y
改造前	边缘极柱	7.09	6.72	71.58	17.43
	中间极柱	8.88	6.13	73.79	15.28
改造后	边缘极柱	4.10	3.50	40.57	12.10
	中间极柱	4.94	3.91	39.15	10.58

由表4可知,断路器在地震作用下应力与位移的峰值均出现在中间极柱的X方向。改造前中柱根部X方向处应力峰值为8.88 MPa,在地震作用下易损性较高。在采用惯容装置进行减震改造后,应力峰值为4.94 MPa,应力减小幅度为44.37%。采用惯容减震的方式,可以明显地减小套管根部的最大应力,保证断路器的安全、正常运行。

同时中柱顶部X方向的位移峰值从改造前的73.79 mm减小为改造后的39.15 mm,位移减小幅度为46.96%,可以有效避免地震作用下设备顶部位移过大而引起的牵拉破坏。

3.4 减震效率

结构在 Taft波作用下,改造前后中间极柱顶部与基础在X方向上的相对加速度见图10。

从图10可以看出,结构的响应在整个地震加载周期内都有所降低,使用均方根RMS (root mean square)来表示随机变量的能量水平,这是对仅使用

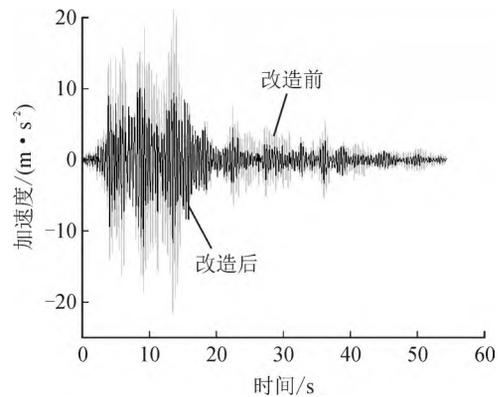


图10 改造前后相对加速度对比图

Fig. 10 Comparison of relative acceleration before and after retrofit

响应峰值来描述结构反应特性的1种补充^[29]。均方根的表达式为

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (3)$$

式(3)中: x_i 为整个时间历程的样本点所对应的加速度值或其他反应分量; N 为样本点数量。

计算在7条地震波作用下改造前后断路器顶端在X方向与Y方向相对基础的位移、速度、加速度3个参数的均方根的平均值以分析减震效率,见表5。

表5 参数均方根

Table 5 RMS of parameters

项目	相对加速		相对速		相对位	
	度/(m·s ⁻²)		度/(m·s ⁻¹)		移/mm	
	X	Y	X	Y	X	Y
改造前	4.41	2.06	0.255	0.078	15.35	3.13
改造后	2.71	1.01	0.152	0.038	9.19	1.73
减震效率/%	38.50	50.90	40.36	51.10	40.16	44.78

由表5可知,根据改造后与改造前断路器顶端相对于基础的X方向与Y方向的加速度、速度、位移的均方根结果,惯容系统达到了40%左右的减震效率,且对Y方向的减震效果优于X方向。

4 工程应用

使用设计的惯容减震装置,对某断路器进行减震改造。惯容器工作平台与原结构的连接均采用焊接,X向惯容工作平台为与基座正交的工字钢梁,Y向惯容工作平台为两支柱间的槽钢,工作平台见图11、12。连接Y向惯容器与断路器的拉索的吊环安装于与支柱顶部焊接的附加角钢上,连接X向惯容器与断路器的拉索的吊环安装于与支柱底板焊接的附加槽钢,通过导向滑轮改变角度后与滚珠丝杆两端连接。改造后得到的X向与Y向惯容系统均

为一端与断路器基座连接,一端与地面连接,构造见图13。



图 11 X向惯容系统工作平台

Fig. 11 Working platform of X-direction inerter system

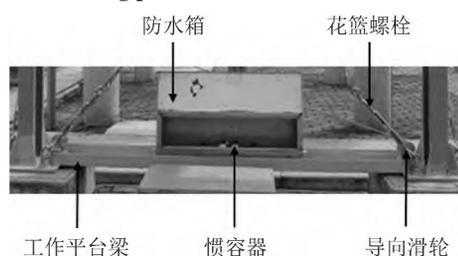


图 12 Y向惯容系统工作平台

Fig. 12 Working platform of Y-direction inerter system

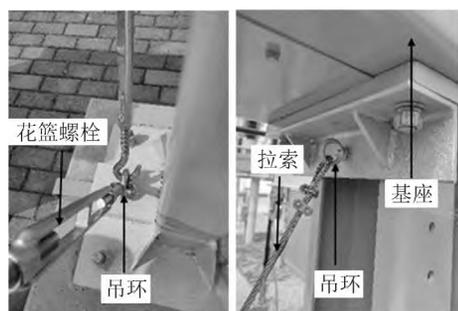


图 13 惯容系统与断路器的连接

Fig. 13 Connection between inerter system and circuit breaker

安装惯容减震装置后的断路器整体照片见图14,对于结构简单的在运断路器技术改造,安装采用拉索连接的惯容减震装置的工程应用可以在1个变电站的检修期内顺利完成。



X向惯容系统 Y向惯容系统 X向惯容系统

图 14 改造前后的断路器

Fig. 14 Circuit breaker before and after retrofit

在安装惯容系统前,通过在断路器支柱的不同位置布置加速度传感器,利用敲击法施加瞬时激

励,获得结构的动力特性^[30]。改造前在套管底部法兰处分别布置X方向和Y方向的加速度传感器,由于改造后场地条件限制,改造后仅布置Y方向传感器。在套管顶部X方向和Y方向分别施加冲击荷载,测得加速度时程数据,对加速度时程数据进行傅里叶变换处理^[31],可以得到改造前结构在X方向自振频率见图15,得到改造前后结构在Y方向自振频率见图16。

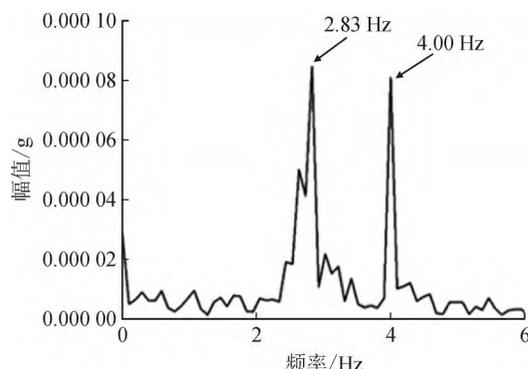


图 15 改造前X方向信号的傅里叶变换

Fig. 15 Fourier transform of X-direction signal

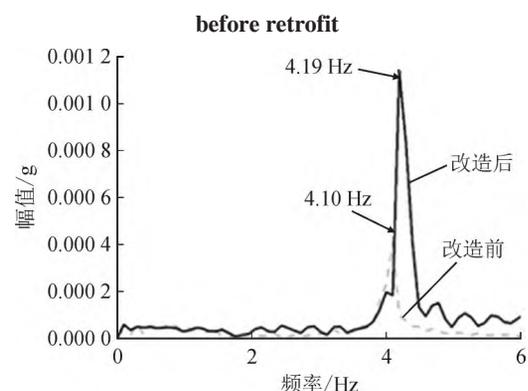


图 16 改造前后Y方向信号的傅里叶变换

Fig. 16 Fourier transform of Y-direction signal before and after retrofit

由图15、16可知有限元计算得到的自振频率接近实测值,可以较好地模拟原结构。由于现场施工对原结构部分位置进行了焊接加固和测量误差的存在,改造后结构在Y方向的自振频率从4.10 Hz增加到4.19 Hz。

5 结论

文中通过建立110 kV断路器的精细化有限元模型以及原位动力特性测试,对比分析了惯容系统安装前后结构在7组地震波输入作用下套管根部应力、顶部加速度和位移响应,并计算了减震效率。得到以下主要结论:

1)在峰值加速度为0.4g的地震作用下,使用拉索连接的惯容系统的惯容器可以降低套管根部应

力的最大值与结构顶端位移,并降低结构动力响应,具有较高的减震效率。

2)在具体应用拉索连接惯容系统时,应分析结构特性与施工条件,设计便利、安全的安装位置与连接方式。

3)在不更换原有构件的条件下,通过安装惯容减震装置的方式提升在运断路器抗震性能是1种兼顾了经济性与安全性的改造方法,为更好地发挥惯容系统的调谐和阻尼放大作用,在后续的研究和改造中,可以加入弹簧元件。

参考文献:

- [1] ALIREZA Z S, MAHMOOD H, MOHSEN G A. The role of equipment in seismic risk of power substations[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Energy, 2017, 170(4):150-162.
- [2] 翁智敏,朱振山,温步瀛,等.高比例新能源电力系统研究综述[J]. 电器与能效管理技术, 2021(11):1-7.
WENG Zhimin, ZHU Zhenshan, WEN Buying, et al. Review of power system with high proportion of renewable energy[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(11):1-7.
- [3] 文劲宇,周 博,魏利岫.中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7):1-10.
WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7):1-10.
- [4] 卜 云,高传海,李文芳,等.大数据架构下电力系统风险评估[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(1):77-83.
BU Yun, GAO Chuanhai, LI Wenfang, et al. Power system risk assessment based on big data[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1):77-83.
- [5] 周东清,王一峰,葛宏伟.基于协同进化的电力系统多目标优化[J]. 电测与仪表, 2020, 57(20):73-80.
ZHOU Dongqing, WANG Yifeng, GE Hongwei. Multi-objective optimization of power system based on co-evolution[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(20):73-80.
- [6] 孙志媛,梁水莹,傅裕斌.基于PSNodeRank算法的电力系统关键节点辨识方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2):157-162.
SUN Zhiyuan, LIANG Shuiying, FU Yubin. Research on identification method of key nodes of power system based on PSNodeRank algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2):157-162.
- [7] 朱 罡,王茂春.含新能源发电的电力系统状态估计研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(4):32-40.
ZHU Gang, WANG Maochun. Review on state estimation for power system containing renewable energy generation[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4):32-40.
- [8] XIE Qiang, ZHU Ruiyuan. Damage to electric power grid infrastructure caused by natural disasters in China[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2011, 9(2):28-36.
- [9] 尤红兵,赵凤新.芦山7.0级地震及电力设施破坏原因分析[J]. 电力建设, 2013(8):100-104.
YOU Hongbing, ZHAO Fengxin. M7.0 earthquake in Lushan and damage cause analysis of power facilities[J]. Electric Power Construction, 2013(8):100-104.
- [10] 谢 强,王健生,杨 雯,等. 220 kV 断路器抗震性能地震模拟振动台试验[J]. 电力建设, 2011, 32(10):10-14.
XIE Qiang, WANG Jiansheng, YANG Wen, et al. Shake table test on seismic performance of 220 kV circuit breaker[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(10):10-14.
- [11] 曹枚根,周福霖,谭 平,等.地震作用下断路器动力时程分析及阻尼效应研究[J]. 高压电器, 2010, 46(7):27-35.
CAO Meigen, ZHOU Fulin, TAN Ping, et al. Analysis on dynamic time-history of circuit breaker and damping ratio effect under earthquake[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7):27-35.
- [12] 吴应雄,郑祥浴,翁锦华,等.长周期地震动作用下惯容—层间隔震结构地震响应分析[J/OL]. 振动工程学报:1-12 [2021-12-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1349.TB.20211210.1204.002.html>.
WU Yingxiong, ZHENG Xiangyu, WENG Jinhua, et al. Seismic response analysis of inerter-inter-storey isolated structure under long-period ground motions[J/OL]. Journal of Vibration Engineering: 1-12 [2021-12-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1349.TB.20211210.1204.002.html>.
- [13] 张瑞甫,曹嫣如,潘 超.惯容减震(振)系统及其研究进展[J]. 工程力学, 2019, 36(10):8-27.
ZHANG Ruifu, CAO Yanru, PAN Chao. Inerter system and its state-of-the-art[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(10):8-27.
- [14] 汪志昊,程志鹏,王 浩,等.电涡流惯质阻尼器对斜拉索振动控制研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(12):53-63.
WANG Zhihao, CHENG Zhipeng, WANG Hao, et al. Eddy-current inertial mass damper for cable vibration control[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(12):53-63.
- [15] 班鑫磊,谢丽宇,薛松涛,等.拉索式旋转电涡流阻尼器的理论模型及频域响应分析[J]. 地震工程学报, 2018, 40(5):941-945.
BAN Xinlei, XIE Liyu, XUE Songtao, et al. Theoretical model and analysis of the frequency response of a rotational eddy current damper with cable bracing[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5):941-945.
- [16] 薛松涛,班鑫磊,谢丽宇,等.拉索式电涡流阻尼器力学模型及性能试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(2):317-322.

- XUE Songtao, BAN Xinlei, XIE Liyu, et al. Theoretical model and performance tests of rotational eddy current dampers with cable[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(2):317-322.
- [17] 薛松涛, 康建飞, 谢丽宇. 用于结构减震控制的拉索式惯容系统跨层布置优化研究[J]. 动力学与控制学报, 2020, 18(5):74-80.
XUE Songtao, KANG Jianfei, XIE Liyu. Study on optimization of cross-layer cable-bracing inerter system for structural seismic response control[J]. Journal of Dynamics and Control, 2020, 18(5):74-80.
- [18] 电力设施抗震设计规范:GB 50260—2013[S].2013.
Code for seismic design of electrical installations: GB 50260—2013[S].2013.
- [19] SMITH M C. Synthesis of mechanical networks: the inerter [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(10): 1648-1662.
- [20] 刘良坤, 潘兆东, 谭平, 等. 旋转惯容阻尼伸臂控制体系减震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(2):37-45.
LIU Liangkun, PAN Zhaodong, TAN Ping, et al. Research on damping performance of damped outrigger control system with rotation inertia damper[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(2):37-45.
- [21] ARAKAKI T, KURODA H, ARIMA F, et al. Development of seismic devices applied to ball screw.Part 1: Basic performance test of RD-series[J]. Journal of Technology and Design, Architectural Institute of Japan, 1999, 5(8):239-244.
- [22] 汪志昊, 田文文, 王浩, 等. 非线性电涡流惯质阻尼器力学性能仿真与试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(6): 171-177.
WANG Zhihao, TIAN Wenwen, WANG Hao, et al. Numerical simulation and experimental study on mechanical properties of a nonlinear eddy-current inertial mass damper[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(6): 171-177.
- [23] IKAGO K, SAITO K, INOUE N. Seismic control of single degree of freedom structure using tuned viscous mass damper[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(3):453-474.
- [24] 莊初立. 五十子幸树, 张永山. 极端地震下惯容器—弹簧—阻尼装置对隔震结构减震效果研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(12):112-117.
CHONG Cholap, KOHJU Ikago, ZHANG Yongshan. Effectiveness of an inerter-spring-damper device in the seismic response control of a isolated structure under extreme earthquakes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(12): 112-117.
- [25] 田文文. 电涡流阻尼惯容减振系统及其应用分析[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- TIAN Wenwen. Development and application of vibration control system based on eddy-current damping and inerter [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019.
- [26] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].2010.
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S].2010.
- [27] 刘如山, 张美晶, 邬玉斌, 等. 汶川地震四川电网震害及功能失效研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(s1):200-211.
LIU Rushan, ZHANG Meijing, WU Yubin, et al. Damage and failure study of Sichuan electric power grid in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(s1):200-211.
- [28] 石高扬, 唐程, 梁黄彬, 等. 特高压GIS复合套管地震模拟振动台试验研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(2):116-122.
SHI Gaoyang, TANG Cheng, LIANG Huangbin, et al. Seismic performance of UHV GIS composite bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2):116-122.
- [29] 楼梦麟, 吴和霖, 马恒春, 等. 电磁耗能TMD结构减震效率的振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(4):158-164.
LOU Menglin, WU Helin, MA Hengchun, et al. Study on efficiency of electromagnetic energy dissipation TMD to suppress structural vibration by shaking table model test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(4): 158-164.
- [30] 赵鸿铁, 张凤亮, 薛建阳, 等. 探讨木结构古建筑结构模型固有频率的几种计算方法[J]. 西安建筑科技大学学报, 2012, 44(2): 159-163.
ZHAO Hongtie, ZHANG Fengliang, XUE Jianyang, et al. Discussion on the calculation methods of ancient timber structure's nature frequency[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2012, 44(2): 159-163.
- [31] 杨丽娟, 张白桦, 叶旭桢. 快速傅里叶变换FFT及其应用[J]. 光电工程, 2004, 31(s1):1-3.
YANG Lijuan, ZHANG Baihua, YE Xuzhen. Fast fourier transform and its applications[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(s1):1-3.
- 薛松涛(1963—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事结构抗震研究(E-mail: xue@tongji.edu.cn)。
车兴儒(1995—), 男, 硕士研究生, 从事电力设备抗震研究(E-mail: 2032586@tongji.edu.cn)。
谢丽宇(1978—), 男, 博士, 副教授, 博导, 主要从事结构振动控制及健康监测研究(通信作者)(E-mail: Liyuxie@tongji.edu.cn)。