

# 瓷柱型电气设备支架地震响应动力放大系数研究

孙刚<sup>1,2</sup>, 柏文<sup>1,2</sup>, 戴君武<sup>1,2</sup>, 赵霄扬<sup>1,2</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;  
2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**地震中瓷柱型电气设备的损坏是电力供应中断的重要原因。准确评估瓷柱型电气设备的抗震性能是评估电力系统抗震能力的重要基础,而支架动力放大系数取值的合理性对评估瓷柱型电气设备抗震性能的准确性有着重要影响。为了得到瓷柱型电气设备支架动力放大系数,文中选取了隔离开关、电压互感器及电流互感器等3种瓷柱型电气设备,开展了设备-支架系统的振动台试验,得到了不同地震动和峰值地面加速度作用下的支架动力放大系数。在此基础上,采用有限元方法,分析了支架刚度等参数对设备-支架系统自振频率的影响,讨论了不同周期的设备支架体系的支架动力放大系数。结果表明:在研究的范围内,支架的动力放大系数随着设备支架整体周期的增加而增加,当设备-支架的整体周期大于 $T_g$ 时,系统的整体地震响应仍然处于较高的水平,明显高于设计谱谱值,且远大于规范规定的1.2,当前规范的放大系数取值保守,建议瓷柱型电气设备的支架动力放大系数取值不宜小于2.0,支架频率不宜小于30 Hz。

**关键词:**瓷柱型电气设备;振动台试验;支架动力放大系数;地震;自振频率

中图分类号:TM773; P315.9

文献标志码:A

## Study on seismic dynamic amplification factor of porcelain cylindrical electrical equipment support

SUN Gang<sup>1,2</sup>, BAI Wen<sup>1,2</sup>, DAI Junwu<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiaoyang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

**Abstract:** The failure of porcelain cylindrical electrical equipment during earthquakes is a key factor contributing to power supply outages. The meticulous assessment of the seismic resistance of these devices is a foundational requirement for accurately gauging the overall seismic robustness of power systems. The judicious choice of the support dynamic magnification coefficient plays a crucial role in precisely appraising the seismic behavior of porcelain cylindrical electrical equipment. In this research, to derive the support dynamic magnification coefficients for these devices, vibration tests were carried out on three main types of porcelain cylindrical electrical installations: including disconnect switches, voltage transformers, and current transformers, all of which were evaluated as integrated units with their respective support structures under various seismic excitations and different peak ground acceleration levels. Based on these empirical results, finite element analysis was used to examine the effect of parameters such as the stiffness of supports on the natural frequencies of the equipment-to-support system configurations. This analysis also included a discussion on how the support dynamic magnification coefficients vary with different periodic characteristics of the equipment-support assembly systems. The study findings indicate that, within the scope of this study, the support dynamic magnification coefficient tends to increase as the combined or overall period of the equipment-support system increases. Notably, when the total system period exceeds  $T_g$ , the

收稿日期:2023-11-16; 修回日期:2024-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(52008382)

作者简介:孙刚(1997—),男,博士研究生,主要从事结构抗震研究。E-mail:15755584868@163.com

通信作者:柏文(1990—),男,副研究员,博士,主要从事结构抗震研究。E-mail:baiwen@iem.ac.cn

seismic response of the system remains at a relatively high level, significantly exceeding the reference values set by design spectra and clearly surpassing the conservative 1.2 limit established by present guidelines, thus implying a potential underestimate of safety margins. Therefore, it is proposed that the support dynamic magnification coefficient for porcelain cylindrical electrical equipment should optimally not be less than 2.0, and concurrently, the frequency of the supports should not be below 30 Hz to ensure enhanced seismic safety measures.

**Key words:** porcelain cylindrical electrical equipment; shaking table test; support dynamic magnification coefficient; earthquake; natural vibration frequency

## 0 引言

电力系统是生命线工程的重要环节,瓷柱型电气设备是电力系统的重要组成部分,保障瓷柱型电气设备的正常工作对生命线工程运行至关重要。近年来发生的多次强震对瓷柱型电气设备造成了严重的损坏<sup>[1]</sup>。2008年我国汶川地震造成瓷柱型电气设备出现断裂倾倒、本体变形等损伤,共有405.07万用户供电受到影响,直接经济损失71亿元<sup>[2-3]</sup>。2010年智利第二大城市康塞普西翁发生里氏8.8级地震造成瓷柱型电气设备大量损毁,导致中部电网停止工作<sup>[4-5]</sup>。2013年我国芦山地震电网系统遭受严重损伤,大量互感器与避雷器断裂,雅安地区近12.6万户停电<sup>[6-7]</sup>。

瓷柱型电气设备结构瘦高,设备质量较大、支架质量相对较小,设备元件之间通过法兰连接,设备的套管和绝缘子为脆性陶瓷材料构成,与其他材料连接处变形不协调,设备的自振频率与地震卓越频率相近,是造成设备在地震中大量损毁的主要原因<sup>[8-20]</sup>。为研究并降低瓷柱型电气设备震害,国内外学者进行了大量的振动台试验。林森等<sup>[21-22]</sup>对瓷柱型电气设备及加装减震器的瓷柱型电气设备结构进行了振动台试验研究,试验结果表明,减震器可有效降低设备的应力、加速度和顶部相对位移,且地震动峰值加速度越高,减震器表现出的减震效果越显著。孙宇晗等<sup>[23-24]</sup>对110 kV复合外绝缘套管进行了地震模拟振动台试验,试验结果表明,底部支柱绝缘子和套管连接部件是设备抗震性能的薄弱环节,应在设计阶段增强绝缘子和连接部位的结构强度,从而提高设备的整体抗震性能。卢智成等<sup>[25]</sup>对特高压TYD1000型电容式电压互感器进行了地震模拟振动台试验,结果表明,在地震波激励作用下,瓷套与金属法兰之间连接的水泥胶装部位出现塑性变形或损伤,对该类型设备进行抗震能力评估时,需要考虑非线性特征。

瓷柱型电气设备一般安装在一定高度的支架上,支架会对传递到电气设备上的地震作用有一定的放大<sup>[26-28]</sup>。我国标准GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》<sup>[29]</sup> 6.2.6条规定:当支架设计参数缺乏时,对于预期安装在室外、室内底层、地下洞内、地下变电站底层地面上或低矮支架上的电气设施,其支架的动力反应放大系数的取值不宜小于1.2,且支架设计应保证其动力反应放大系数不大于取值。日本JEAG 5003—2019《变电所等电气设备抗震设计指南》<sup>[30]</sup> 5.5节中规定:对于重要性较高的设备,支架的放大系数为1.5;地面振动不敏感设备支架放大系数为1.0。美国IEEE 693—2018<sup>[31]</sup> 5.10节规定:当支架尺寸等信息缺乏时,支架动力放大系数取2.5;当得知支架具体信息时,建议通过分析与试验相结合的方式对设备的抗震性能进行评定。首先通过建立完整的与实际一致的支架与设备有限元模型,分析得到设备与支架连接处的加速度时程曲线,以此作为支架与设备抗震试验的输入时程,为考虑未知的不确定性,并对该输入乘以1.1的放大系数。欧盟IEC 61463—2016附录B中给出:对于常见的支架结构,其动力放大系数一般在1.5~3.0之间<sup>[32-33]</sup>。

针对支架对设备的影响,国内外学者做了大量的研究。MOHAMMADI等<sup>[34]</sup>评估了不同支架设备组合的动力放大系数,与IEEE 693中的目标动力放大系数进行了比较,得到了支架-设备的最小刚度比。LI等<sup>[35]</sup>通过对支架设备体系进行时程、模态和参数分析,研究了支架结构对设备的弯矩和位移影响,给出了钢支架的抗弯刚度取值方法。WHITTAKER等<sup>[36]</sup>根据试验数据建立了隔离开关绝缘子柱的单自由度模型,分析了开关安装在不同高度和刚度的支架上的放大效应。李黎等<sup>[37]</sup>基于支架-设备体系的特性,提出了一种考虑分布参数的2E-4D简化模型,用于分析刚度比、高度比等特征参数对该体系动力特性的影响,结果表明支架对上部设备的响应有明显的放大效应,且放大系数大于1.2。姜斌等<sup>[38]</sup>针对设备-支架耦合体系提出了考虑分布参数和柔性节点的串联体系模型,分析了不同参数对体系动力特性及地震响应的影响,认为支架存在一个最优刚度比,提高体系抗震性能的同时兼顾经济性。程永锋等<sup>[39]</sup>通过对特高压电气设备数值分析,得出不同参数对支架动力放大系数的影响规律,给出了支架动力放大系数不宜小于1.4,支架频率宜控制

在 15~20 Hz 的建议。陈巍等<sup>[40]</sup>采用有限元方法对单柱电瓷型高压电气支架设备进行了时程分析和谱分析,建议电气设备支架动力放大系数在 1.24 以上。

我国现行规范设定的电气设备支架动力放大系数相较于欧美日等国家的相关规范偏低。近年来,在实际地震灾害中暴露出的瓷柱型电气设备大量损毁的现象,进一步印证了我国规范中对该支架动力放大系数取值的局限性。目前,对于瓷柱型电气设备支架地震响应动力放大系数研究多采用有限元方法,振动台试验研究较少。本文首先选取了户外敞开式变电站中 3 种常见的瓷柱型电气设备作为研究对象,开展了设备-支架振动台试验,得到了不同地震动激励以及不同地震动输入地震峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)激励作用下的支架动力放大系数,然后建建设备-支架有限元模型,通过与试验结果对比确保模型的准确性,研究支架-设备的刚度比对支架动力放大系数的影响,给出支架动力放大系数以及支架设计频率的取值范围。

## 1 3 种瓷柱型电气设备-支架振动台试验

### 1.1 试件介绍

互感器和隔离开关是变电站中常见的瓷柱型的电气设备。本文试验中采用实际的 220 kV 双柱水平伸缩式户外高压隔离开关、220 kV 电压互感器以及 220 kV 电流互感器,3 种电气设备现场安装图如图 1 所示。隔离开关动侧由法兰连接的 2 节旋转瓷瓶、2 节支柱瓷瓶和导电杆组成;电流互感器由 1 节支柱瓷瓶、油箱及油量观察窗组成;电压互感器由油箱,法兰连接的 2 节旋转瓷瓶组成,3 种电气设备均坐落在圆钢管柱上。

3 种电气设备质量、高度及钢管柱尺寸如表 1 所示。

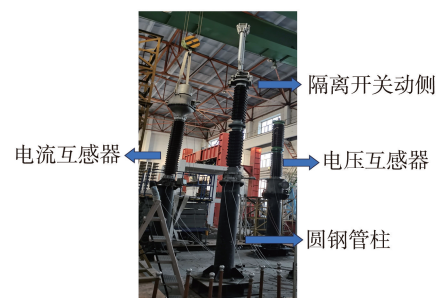


图 1 3 种电气设备试验安装

Fig. 1 Test installation of three types of electrical equipment

表 1 设备及支架参数

Table 1 Device and support parameters

设备名称	高度/mm	质量/kg	支架直径/mm	支架厚度/mm	支架高度/mm
隔离开关	3 040	1 010	325	10	2 000
电压互感器	3 400	750	426	10	2 000
电流互感器	3 800	790	426	10	2 000

### 1.2 传感器布置

3 种瓷柱型电气设备-支架振动台试验关键的测量指标主要包括三个方面:加速度监测、位移监测以及应变测量。其中,加速度测量环节具体细分为对支架顶部和设备顶部的加速度测定,采用的是三轴向加速度传感器,能够同时获取 3 个方向的加速度数据。位移测量主要为设备顶端 X 向和 Y 向位移测量,对于每一台试验设备的顶部,均配置了一个沿 X 轴和一个沿 Y 轴的拉线位移传感器。考虑到瓷柱型设备通常在瓷瓶根部易于出现断裂的情况,试验过程中特意在设备瓷瓶根部对称位置粘贴了 4 片应变片,以便实时捕捉到可能发生的局部应力集中和应变变化情况。试验时传感器布置图如图 2 所示。

### 1.3 试验地震动选择与输入

本次试验在中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室进行,使用尺寸为 5 m × 5 m 的振动台,该振动台的工作频率为 0.5~40 Hz,满载承载力为 300 kN。在满载条件下,台面水平方向满载最大加速度为 1.0 g,在竖直方向上的最大加速度则为 0.7 g。

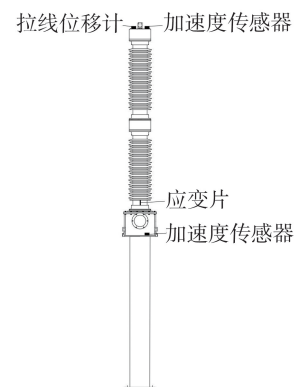


图 2 试验测点布置图

Fig. 2 Layout of test points

国家标准 GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》<sup>[29]</sup> 建议采用反应谱建立用于鉴定变电站设备的地震动。设计需求谱是一个综合了多种因素的平均结果,要选择在整体频带与设计需求谱都很相近的强震记录是难以实现的,因此只能选择主要频段内与设计需求谱相近的强震记录<sup>[41-42]</sup>。本次试验选择了4条实际强震记录及3条人工地震。4条实际强震记录分别为 El Centro 地震动、Kobe 地震动、Northridge 地震动及 Wolong 地震动。El Centro 地震动和 Kobe 地震动为中长周期地震动, Northridge 地震动和 Wolong 地震动为短周期地震动。3条人工地震动根据 GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》<sup>[29]</sup> 场地特征周期取为 0.40 s, 阻尼比为 0.05 的设计谱生成, 其中 Loma Prieta 地震动由实际强震记录 Loma Prieta 地震记录调整生成, R1 地震动和 R2 地震动为依据设计谱生成。所选 7 条地震动 X 向反应谱如图 3 所示。

GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》<sup>[29]</sup> 无三向地震动输入 PGA 的比例, 所以本次试验所选地震动输入采用 IEEE 693—2018<sup>[31]</sup> 中规定的水平和竖向相互正交的三向输入, 输入 PGA 的比例为 1:1:0.8。7 条地震动输入 PGA 从 0.1 g 调幅至 0.3 g。

## 2 试验结果分析

本文主要研究瓷柱型电气设备的支架地震响应动力放大系数, 所以本文重点讨论不同设备的支架顶端加速度情况。

### 2.1 设备自身特性

通过输入 PGA 为 0.08 g 的三向白噪声, 测得 3 种设备的频率以及阻尼比, 3 种设备的频率与阻尼比如表 2 所示。

隔离开关因其体积较大且材质特性, 其自振频率相对较低。这主要是由于隔离开关主体结构多由陶瓷和铝合金材料构成, 不含油箱, 相较于电压互感器和电流互感器, 其内部阻尼效果略显不足。电流互感器的构造特点决定了其自振频率更低。不同于隔离开关, 电流互感器往往在其顶部设置有油箱, 这样的结构布局导致其重心较高, 自振频率最低。

### 2.2 设备-支架动力响应

3 种设备在 Wolong 地震动, 输入 PGA 为 0.3 g 时, 支架顶端加速度响应如图 4~图 6 所示。由图可知, 支架顶端的加速度峰值远大于输入地震动峰值, 表明支架对设备的地震动作用有放大效应。

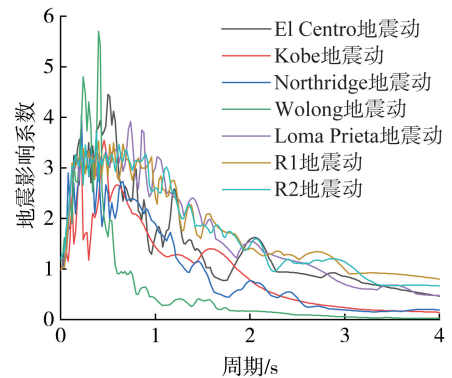


图 3 试验地震动 X 向反应谱

Fig. 3 X-direction response spectrum of test ground motion

表 2 3 种设备的频率与阻尼比

Table 2 Frequencies and damping ratios of the three types of devices

设备名称	频率/Hz	阻尼比
隔离开关	3.31	0.028
电压互感器	4.41	0.032
电流互感器	3.01	0.031

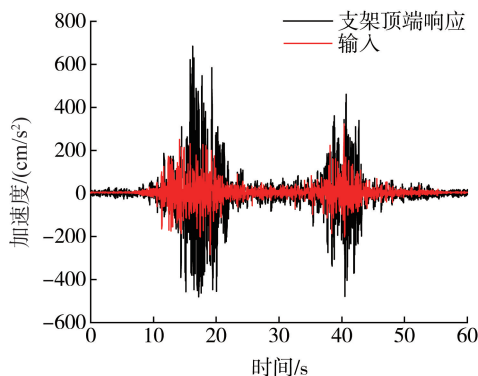


图 4 隔离开关支架顶端加速度响应

Fig. 4 Acceleration response at the top of disconnector switch support

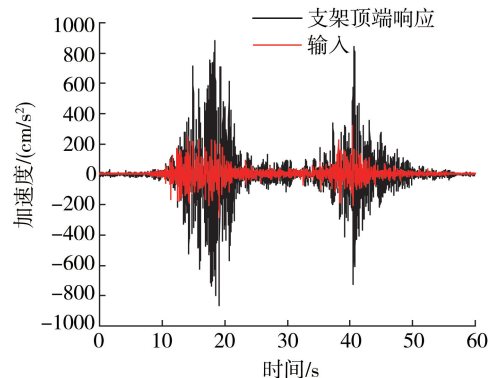


图 5 电压互感器支架顶端加速度响应

Fig. 5 Acceleration response at the top of potential transformer support

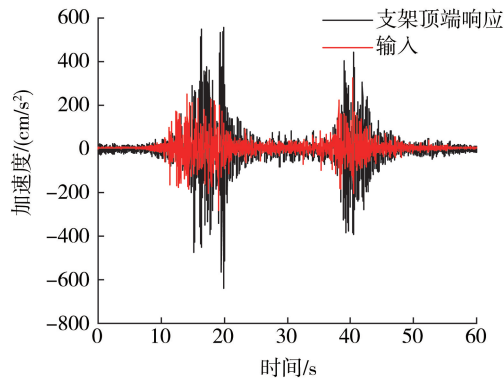


图 6 电流互感器支架顶端加速度响应

Fig. 6 Acceleration response at the top of current transformer support

为定量分析支架对设备动力作用放大效应,定义支架对设备动力放大系数为

$$\eta = \frac{\ddot{x}_a}{\ddot{x}_g} \tag{1}$$

式中:  $\eta$  为支架对设备动力放大系数;  $\ddot{x}_a$  为支架顶端加速度峰值 ( $\text{cm/s}^2$ );  $\ddot{x}_g$  为输入地震动峰值 ( $\text{cm/s}^2$ )。

3 种设备在不同地震动、不同输入峰值激励作用下的支架动力放大系数如表 3 所示,支架动力放大系数的正态分布的箱型图如图 7 所示。

表 3 支架动力放大系数

Table 3 Support dynamic amplification factors

输入地震动	隔离开关	电压互感器	电流互感器	输入地震动	隔离开关	电压互感器	电流互感器	输入地震动	隔离开关	电压互感器	电流互感器
El Centro(0.1 g)	2.47	2.24	1.44	Wolong(0.2 g)	2.01	2.52	1.95	Loma Prieta(0.3 g)	2.25	2.33	1.13
El Centro(0.2 g)	2.06	1.91	1.35	Wolong(0.3 g)	2.07	2.61	1.93	R1(0.1 g)	2.46	1.81	1.56
El Centro(0.3 g)	2.04	1.96	1.57	Kobe(0.1 g)	2.17	2.32	2.20	R1(0.2 g)	2.25	2.08	1.67
Northridge(0.1 g)	2.61	2.47	1.14	Kobe(0.2 g)	1.72	2.05	1.69	R1(0.3 g)	2.29	1.78	1.62
Northridge(0.2 g)	2.62	2.68	1.47	Kobe(0.3 g)	1.61	2.35	1.49	R2(0.1 g)	2.04	2.17	1.70
Northridge(0.3 g)	2.50	3.43	2.16	Loma Prieta(0.1 g)	2.11	2.11	1.09	R2(0.2 g)	1.82	2.74	1.25
Wolong(0.1 g)	2.01	2.41	1.71	Loma Prieta(0.2 g)	1.84	2.29	0.89	R2(0.3 g)	1.88	2.66	1.25

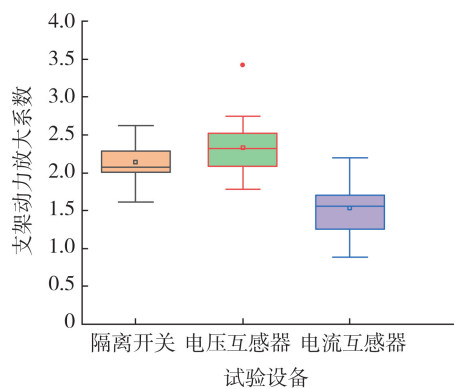


图 7 支架动力放大系数分布图

Fig. 7 Distribution diagram of the power amplification factors of the support

由表 3 和图 7 可知,隔离开关的支架动力放大系数的中位数为 2.07,上四分位数为 2.38,下四分位数为 1.95;电压互感器的支架动力放大系数中位数为 2.32,上四分位数为 2.57,下四分位数为 2.07;电流互感器的支架动力放大系数中位数为 1.56,上四分位数为 1.70,下四分位数为 1.25。虽然电压互感器的自振频率高于电流互感器的自振频率,但电压互感器的支架动力放大系数远大于电流互感器的支架动力放大系数,其因为电压互感器的油箱位于底部,支架顶部有集中质量,因此电压互感器的放大系数更大,所以设备的支架动力放大系数与设备自身的质量分布有关。

由试验得到的 3 种设备的支架放大系数可知,无论是支架动力系数的中位数,还是下四分位数都大于我

国 GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》<sup>[29]</sup>中规定的支架动力放大系数 1.2,而试验中所选用的支架的直径与壁厚大于实际工程中普遍使用的支架规格,鉴于此结果,为确保瓷柱型电气设备-支架体系的安全性,有必要对现行规范中的支架动力放大系数做出上调。

为研究支架对支架-设备体系动力放大系数的影响的机理,对支架-体系进行有限元模拟。

### 3 有限元模拟

本文采用 ANSYS 软件建立设备的有限元模型,如图 8 所示。有限元模型由支架、绝缘子套管、油箱和法兰等部件构成。所有部件均采用壳单元建立,油体采用等效质量单元均匀附加在箱体。支架与法兰等金属部件均采用 Q235 钢材,绝缘子套管等均采用电工陶瓷,具体材料性能参数如表 4 所示。

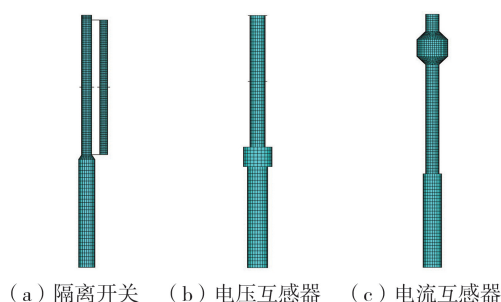


图 8 3 种设备有限元模型

Fig. 8 Finite element models of the three types of devices

表 4 模型材料参数

Table 4 Model material parameters

材料	弹性模量/GPa	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	泊松比
Q235 钢	210	7800	0.3
电工陶瓷	90	4070	0.3

#### 3.1 模拟结果与试验对比

为验证有限元模型的正确性,通过对比设备的频率和质量等参数进行验证。模拟与试验设备参数对比如表 5 所示。

由表 5 可知,3 种设备的质量和频率模拟结果与试验结果相差不大,误差均小于 5%,结果显示,有限元模型与试验模型之间的一致性得到了验证。

为进一步验证有限元模型的准确性,本文选取了试验地震动中 El Centro 地震动、Wolong 地震动及 R1 地震动进行了有限元模型的动力特性分析。在 Wolong 地震动,输入 PGA 为 0.1 g 时,支架顶端模拟与试验加速度时程对比如图 9~图 11 所示。

表 5 模拟与试验设备参数对比

Table 5 Comparison of simulation and test device parameters

设备	参数	模拟	试验	误差/%
隔离开关	频率/Hz	3.21	3.31	3.02
	质量/kg	1056	1010	4.55
电压互感器	频率/Hz	4.48	4.41	1.59
	质量/kg	722	750	3.73
电流互感器	频率/Hz	3.08	3.01	2.33
	质量/kg	805	790	1.90

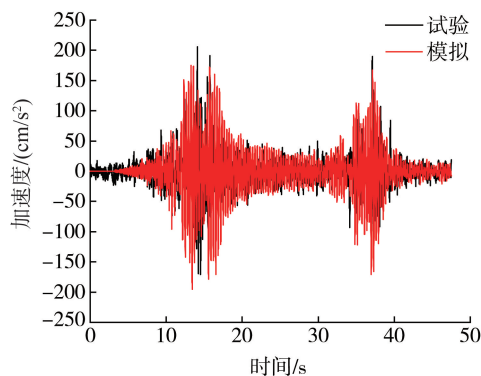


图 9 隔离开关模拟与试验时程对比

Fig. 9 Comparison of simulation and test time histories for disconnector switch

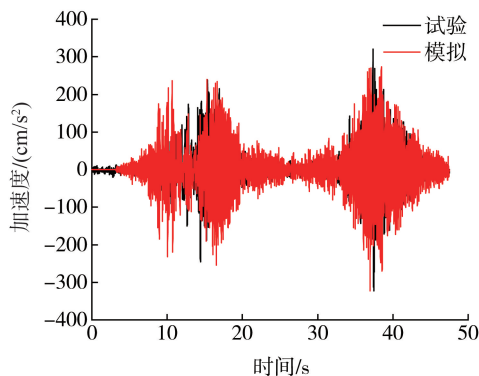


图 10 电压互感器模拟与试验时程对比

Fig. 10 Comparison of simulation and test time histories for potential transformer

由图 9~图 11 可知,支架顶端的模拟加速度时程曲线和试验得到的加速度时程曲线波形基本一致,且峰值也相差不大。

隔离开关、电压互感器和电流互感器在 3 条地震动激励作用下的支架顶端动力放大系数模拟结果与试验结果对比如表 6~表 8 所示。

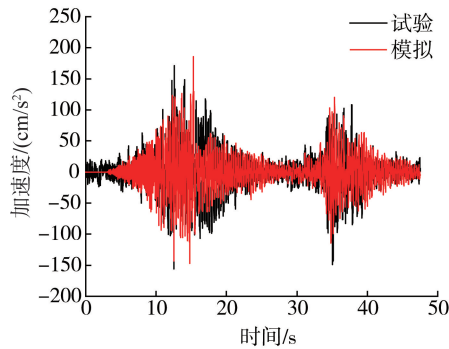


图 11 电流互感器模拟与试验时程对比

Fig. 11 Comparison of simulation and test time histories for current transformer

表 7 电压互感器模拟与试验支架放大系数对比

Table 7 Comparison of support amplification coefficients between simulation and test for potential transformer

输入地震动	模拟值	试验值	误差/%
El Centro(0.1 g)	1.92	2.24	14.29
El Centro(0.2 g)	1.92	1.91	0.52
El Centro(0.3 g)	1.92	1.96	2.04
Wolong(0.1 g)	2.48	2.41	2.90
Wolong(0.2 g)	2.48	2.52	1.59
Wolong(0.3 g)	2.48	2.61	4.98
R1(0.1 g)	1.81	1.81	0
R1(0.2 g)	1.81	2.08	12.98
R1(0.3 g)	1.81	1.78	1.69

表 6 隔离开关模拟与试验支架放大系数对比

Table 6 Comparison of support amplification coefficients between simulation and test for disconnector switch

输入地震动	模拟值	试验值	误差/%
El Centro(0.1 g)	2.08	2.47	15.79
El Centro(0.2 g)	2.08	2.06	0.97
El Centro(0.3 g)	2.08	2.04	1.96
Wolong(0.1 g)	1.95	2.01	2.99
Wolong(0.2 g)	1.96	2.01	2.49
Wolong(0.3 g)	1.95	2.07	5.80
R1(0.1 g)	2.18	2.46	11.38
R1(0.2 g)	2.18	2.25	3.11
R1(0.3 g)	2.18	2.29	4.80

表 8 电流互感器模拟与试验支架放大系数对比

Table 8 Comparison of support amplification coefficients between simulation and test for current transformer

输入地震动	模拟值	试验值	误差/%
El Centro(0.1 g)	1.49	1.44	3.47
El Centro(0.2 g)	1.49	1.35	10.37
El Centro(0.3 g)	1.49	1.57	5.10
Wolong(0.1 g)	1.85	1.71	8.19
Wolong(0.2 g)	1.85	1.95	5.13
Wolong(0.3 g)	1.85	1.93	4.15
R1(0.1 g)	1.60	1.56	2.56
R1(0.2 g)	1.60	1.67	4.19
R1(0.3 g)	1.60	1.62	1.23

由表 6~表 8 可知,随着输入地震动的加速度峰值的增加,支架的动力放大系数模拟值并没有改变,其原因是输入强度未达到使设备-支架体系进入塑性阶段的程度,目前体系仍处于弹性响应范围,因此,支架顶端的加速度峰值与输入地震动的加速度峰值是线性关系,所以支架的动力放大系数模拟值基本没有变化。试验得到的支架动力放大系数主要因为试验过程中振动台噪声干扰和一定的随机性,导致支架放大系数有一定的波动。除去几个试验中的几个异常值,模拟得到的支架顶端动力放大系数与试验结果误差最大在 8%左右,模拟结果与试验结果误差不大。

综合有限元模型与试验模型的质量、频率以及动力分析的结果,误差较小,验证了有限元模型模拟结果的可信性。

### 3.2 支架频率对放大系数的影响

建立单独支架的有限元模型,通过改变钢管柱的直径和厚度改变支架的频率,然后在设备-支架整体有限元模型中改变支架的直径及厚度,支架直径与厚度改变的大小与单独支架的有限元模型相对应,用以研究支架频率的改变对设备-支架整体周期的影响。支架频率与设备-支架整体周期之间的关系如图 12 所示。

由图 12 可知,随着支架频率的增加,3 种电气设备-支架的整体周期呈现下降的趋势,支架频率越低,下降趋势越明显。当支架的频率超过 100 Hz 时,设备-支架的整体周期趋于稳定,由于支架频率超过 100 Hz 时,支架趋于刚体,所以支架-设备体系的整体周期主要取决于设备自身的周期,而设备自身的周期为一个定值。

改变设备-支架的整体周期,在输入地震动 PGA 为 0.1 g 时,支架的动力放大系数如图 13~图 15 所示。

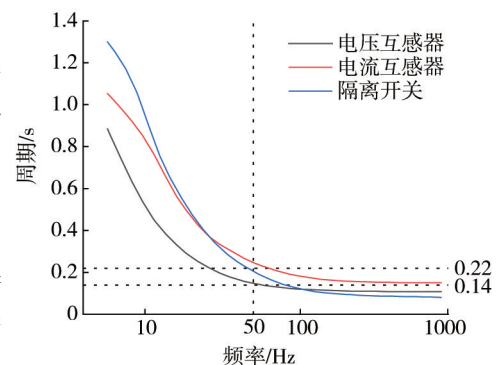


图 12 支架频率-整体周期变化

Fig. 12 Support frequency-overall cycle variation

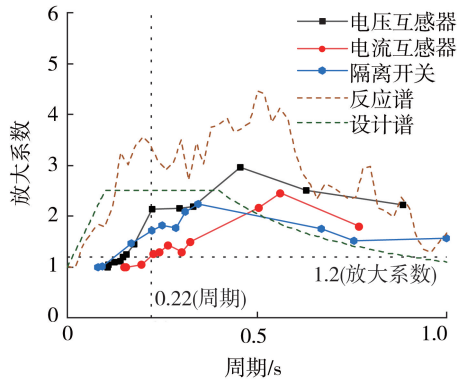


图 13 El Centro 地震动支架放大系数

Fig. 13 El Centro ground motion support amplification factor

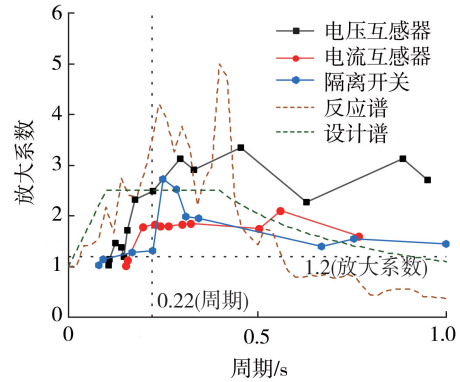


图 14 Wolong 地震动支架放大系数

Fig. 14 Wolong ground motion support amplification factor

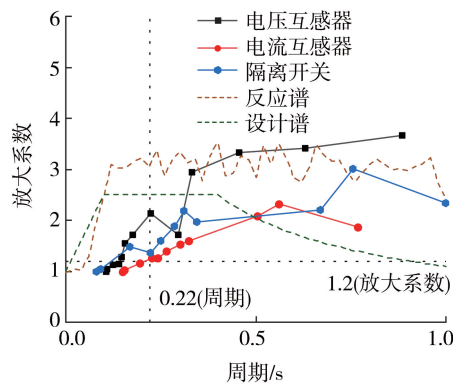


图 15 R1 地震动支架放大系数

Fig. 15 R1 ground motion support amplification factor

图中设计谱 GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》<sup>[29]</sup>中给定的地震影响系数曲线,其中地震影响系数最大值按照输入 PGA 为  $0.1g$  时取  $0.25$ ,场地特征周期取为  $0.40s$ ,阻尼比为  $0.05$ 。由图 13~图 15 可知,随着设备-支架的整体周期的增加,支架的动力系数是逐渐增大的。支架的动力放大系数不仅与整体周期有关,同时也与激励地震动的频谱特性相关,整体周期位于激励地震动卓越周期附近时,支架放大系数是最大的。

按照我国规范中给出的支架动力放大系数  $1.2$ ,此时的隔离开关的整体周期要低于  $0.22s$ ,电压互感器的整体周期要低于  $0.14s$ ,电流互感器的整体周期要低于  $0.22s$ ,即图 13~图 15 中对应的最左侧的点,而此时要求支架的频率必须高于  $50Hz$ ,使得支架的直径与壁厚远超过常规支架,极大地增加了建造成本,实际工程中难以实现。

当设备-支架的整体周期远离地震动的卓越周期时,支架动力放大系数略有降低,但仍大于设计谱的谱值。由图 16 电压互感器的傅里叶频谱图可知,不仅主振型的频谱值较高,高阶振型的频谱值也较大。设计谱是基于单自由度结构动力反应得到的,而实际结构往往是多自由度结构,到结构周期变大时,高阶振型的参与加大了支架的动力放大效应,导致在结构周期较高时支架动力放大系数大于反应谱谱值。

为了兼顾瓷柱型电气设备和支架的安全性与经济性,综合试验与有限元模拟结果,建议当下部支架尺寸无法确定,需要开展不带支架的瓷柱型电气设备的抗震性能进行分析时,支架的动力放大系数取值不宜小于  $2.0$ ,而此时对应的支架的频率低于  $30Hz$ 。在开展设备抗震分析时,宜同时对支架进行设计,按照电压等级给出必要的支架高度、直径和壁厚等参数,以保证支架的频率不宜小于  $30Hz$ 。

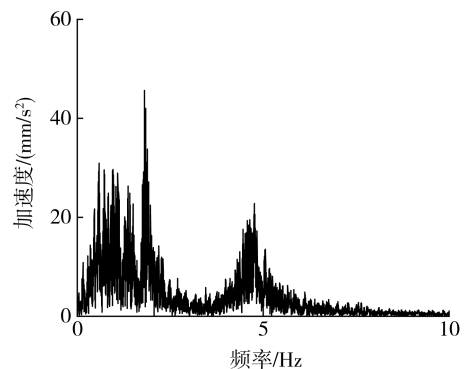


图 16 电压互感器频谱

Fig. 16 Potential transformer spectrum

## 4 结论

针对当前变电站常见的瓷柱型电气设备类型,本文选取了 3 种典型瓷柱型电气设备,开展了设备-支架系统的振动台试验和有限元分析,研究了设备的支架地震动力放大系数。得出以下主要结论:

1) 本文三类设备的支架平均放大系数为 1.52~2.40,且重心低的电气设备的支架动力放大系数要大于重心高的设备的支架动力放大系数。随着支架的频率的增加,设备-支架的整体周期逐渐降低,然后趋于稳定;支架的动力放大系数随着设备-支架的整体周期增加而增加,在地震动卓越周期附近时最大。GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》中支架动力放大系数的取值为 1.2,明显偏低。在后续的规范修订中应调整该系数,以提高设备的抗震要求,进而保障设备在地震时的安全以及电力的正常供应。

2) 对于瓷柱型电气设备的抗震性能分析,宜根据工程情况开展支架-设备的整体分析,当下部支架尺寸无法确定,需要开展不带支架的瓷柱型电气设备的抗震性能进行分析时,支架的动力放大系数取值不宜小于 2.0。

3) 实际工程中,支架的高度相对容易确定,其直接与设备电压等级等相关。支架的直径和壁厚等参数往往取值偏小。当支架动力放大系数取值不小于 2.0,在开展设备抗震分析时,宜同时对支架进行设计,按照电压等级给出必要的支架高度、直径和壁厚等参数,以保证支架的频率不宜小于 30 Hz。

## 参考文献:

- [1] 曹永兴,邓鹤鸣,蔡炜,等. 电力设施应对地震及其次生灾害的研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1962-1974.  
CAO Yongxing, DENG Heming, CAI Wei, et al. Research progress in prevention of earthquake and secondary disasters on power facilities[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1962-1974. (in Chinese)
- [2] 于永清,李光范,李鹏,等. 四川电网汶川地震电力设施受灾调研分析[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 5-10.  
YU Yongqing, LI Guangfan, LI Peng, et al. Investigation and analysis of electric equipment damage in Sichuan power grid caused by Wenchuan earthquake[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 5-10. (in Chinese)
- [3] 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(增刊 1): 200-211.  
LIU Rushan, ZHANG Meijing, WU Yubin, et al. Study on earthquake damage and function failure of Sichuan power grid in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(Sup. 1): 200-211. (in Chinese)
- [4] ARANEDA J C, RUDNICK H, MOCARQUER S, et al. Lessons from the 2010 Chilean earthquake and its impact on electricity supply[C]//2010 International Conference on Power System Technology. Zhejiang, China. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1-7.
- [5] COWAN H, BEATTIE G, HILL K, et al. The M8.8 Chile earthquake, 27 February 2010[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2011, 44(3): 123-166.
- [6] 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, 34(8): 100-104.  
YOU Hongbing, ZHAO Fengxin. M7.0 earthquake in Lushan and damage cause analysis of power facilities[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(8): 100-104. (in Chinese)
- [7] 刘如山,刘金龙,颜冬启,等. 芦山 7.0 级地震电力设施震害调查分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(5): 83-90.  
LIU Rushan, LIU Jinlong, YAN Dongqi, et al. Seismic damage investigation and analysis of electric power system in Lushan M<sub>s</sub>7.0 earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(5): 83-90. (in Chinese)
- [8] 程永锋,朱祝兵,卢智成,等. 变电站电气设备抗震研究现状及进展[J]. 建筑结构, 2019, 49(增刊 2): 356-361.  
CHENG Yongfeng, ZHU Zhubing, LU Zhicheng, et al. Research state and development of seismic performance of substation electrical equipment [J]. Building Structure, 2019, 49(Sup. 2): 356-361.
- [9] 谢强,王亚非. 软母线连接电气设备地震模拟振动台试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 112-118.  
XIE Qiang, WANG Yafei. Shake-table test on earthquake simulation of substation equipment interconnected by flexible bus[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 112-118. (in Chinese)
- [10] 谢强,马国梁,何畅,等. 1100 kV 气体绝缘开关设备瓷套管抗震性能振动台试验研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2596-2604.  
XIE Qiang, MA Guoliang, HE Chang, et al. Shaking table test study on seismic performance of 1100 kV gas insulated switchgear porcelain bushing[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2596-2604. (in Chinese)
- [11] 柏文,唐柏赞,戴君武,等. 考虑地震和材料强度不确定性的瓷柱型电气设备易损性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2594-2605.  
BAI Wen, TANG Baizan, DAI Junwu, et al. Fragility analysis of porcelain cylindrical electrical equipment considering material strength and seismic uncertainties[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2594-2605. (in Chinese)
- [12] 何畅,何紫薇,江力强,等. 多重不确定性对特高压变压器瓷套管地震失效风险的影响[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5763-5775.

- HE Chang, HE Ziwei, JIANG Liqiang, et al. Effects of different sorts of uncertainties on seismic failure risk of ultra-high-voltage porcelain transformer bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5763-5774. (in Chinese)
- [13] 何畅, 谢强, 杨振宇. 1100 kV 特高压气体绝缘开关套管-支架体系抗震性能加固试验研究[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 2016-2022. HE Chang, XIE Qiang, YANG Zhenyu. Tests on seismic retrofitting of 1100 kV UHV GIS bushing-supporting frame system[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 2016-2022. (in Chinese)
- [14] 谢强, 张玥, 何畅, 等. 管母连接±800 kV 复合支柱绝缘子的抗震性能分析及试验研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 626-633. XIE Qiang, ZHANG Yue, HE Chang, et al. Experimental study and analysis on seismic performance of ±800 kV UHVDC composite post insulator interconnected by rigid bus[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 626-633. (in Chinese)
- [15] 文波. 配电楼—电气设备系统的地震反应及减震控制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008. WEN Bo. Study on seismic response and damping control of power distribution building-electrical equipment system [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008. (in Chinese)
- [16] 展猛. 基于SMA-压电复合减震系统的电抗器结构地震响应控制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017. ZHAN Meng. Seismic response control research for reactor structure based on SMA and piezoelectric hybrid damping system [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] 张丽珍, 展猛, 王社良, 等. T形高压断路器结构模型抗震性能试验及有限元分析[J]. 南方电网技术, 2021, 15(11): 94-102. ZHANG Lizhen, ZHAN Meng, WANG Sheliang, et al. Seismic performance test and finite element analysis of T-shaped high-voltage circuit breaker structure model[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(11): 94-102. (in Chinese)
- [18] 曹枚根, 范荣全, 李世平, 等. 大型电力变压器及套管隔震体系的设计与应用[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 130-135. CAO Meigen, FAN Rongquan, LI Shiping, et al. Design and application of seismic isolation system of large power transformer and bushings system[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 130-135. (in Chinese)
- [19] 曹枚根, 高政国, 张健, 等. 高压瓷绝缘子振动疲劳试验及损伤识别[J]. 高压电器, 2017, 53(10): 7-11, 18. CAO Meigen, GAO Zhengguo, ZHANG Jian, et al. Vibration fatigue test and damage identification of high-voltage porcelain insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 7-11, 18. (in Chinese)
- [20] 韩超, 丁志锋, 王越, 等. 长时强震对电力基础设施的致灾影响[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(6): 83-90. HAN Chao, DING Zhifeng, WANG Yue, et al. Disaster characteristics of long duration ground motion and its effects on electric power facilities[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(6): 83-90. (in Chinese)
- [21] 林森, 程永锋, 卢智成, 等. ±1100 kV 换流站内避雷器抗震及减震研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3198-3207. LIN Sen, CHENG Yongfeng, LU Zhicheng, et al. Investigation on seismic performance and shock absorption of arrester in ±1100 kV converter station[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3198-3207. (in Chinese)
- [22] 林森, 程永锋, 孟宪政, 等. 1000 kV 电容式电压互感器抗震性能优化研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(24): 91-100. LIN Sen, CHENG Yongfeng, MENG Xianzheng, et al. A study on the seismic performance optimization of a 1000 kV capacitor voltage transformer[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(24): 91-100. (in Chinese)
- [23] 孙宇晗, 卢智成, 刘振林, 等. 1100 kV 特高压套管地震模拟振动台试验[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 4139-4144. SUN Yuhan, LU Zhicheng, LIU Zhenlin, et al. Earthquake simulation shaking table test for 1100 kV UHV bushing [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 4139-4144. (in Chinese)
- [24] 孙宇晗, 卢智成, 刘振林, 等. 特高压变电站内 110 kV 电容器组模型地震模拟振动台试验[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 879-884. SUN Yuhan, LU Zhicheng, LIU Zhenlin, et al. Shaking table test on model of 110 kV capacitor bank in UHV substation [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 879-884. (in Chinese)
- [25] 卢智成, 邱宁, 程永锋, 等. 特高压 TYD1000 型电容式电压互感器抗震试验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3694-3701. LU Zhicheng, QIU Ning, CHENG Yongfeng, et al. Study on seismic experiment of ultra high voltage TDY1000 capacitive voltage transformer [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3694-3701. (in Chinese)
- [26] 程永锋, 邱宁, 卢智成, 等. 硬管母线连接的 1000 kV 避雷器和电容电压式互感器抗震性能振动台试验[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3882-3887. CHENG Yongfeng, QIU Ning, LU Zhicheng, et al. Shake table test on seismic performance of 1000 kV arrester and capacitor voltage transformer interconnected by tube bus [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3882-3887. (in Chinese)
- [27] 邱宁, 程永锋, 钟珉, 等. 1000 kV 特高压交流电气设备抗震研究进展与展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1732-1739. QIU Ning, CHENG Yongfeng, ZHONG Min, et al. Progress and prospect in seismic research of 1000 kV UHV AC electrical equipment [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1732-1739. (in Chinese)
- [28] 程永锋, 刘振林, 卢智成, 等. ±800 kV 支柱复合绝缘子抗震试验研究[J]. 中国电力, 2017, 50(10): 89-96. CHENG Yongfeng, LIU Zhenlin, LU Zhicheng, et al. Experimental study on seismic performance and structural characteristics of ±800 kV composite post insulators [J]. Electric Power, 2017, 50(10): 89-96. (in Chinese)
- [29] GB 50260—2013 电力设施抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013. GB 50260—2013 Code for seismic design of electrical installations [S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)
- [30] JEAG 5003—2019 変電所等における電気設備の耐震設計指針 [S]. 東京: 日本電気協会, 2019. JEAG 5003—2019 Guidelines for seismic design of electrical equipment in substations [S]. Tokyo: Japan Electrical Manufacturers Association (JEMA), 2019. (in Japanese)

- [31] IEEE Power Engineering Society. IEEE recommended practice for seismic design of substations: IEEE Std 693-2018[S]. New York: Substation Design Criteria Committee, 2018.
- [32] IEC TS 61463-2016 IEC technical specification on bushings-seismic qualification. IEC publications [S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2016.
- [33] 官贞珍, 朱全军, 樊习英, 等. 中美欧电气设备抗震设计规范研究[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(3): 184-193.  
GUAN Zhenzhen, ZHU Qianjun, FAN Xiyang, et al. Study on Chinese, American and European codes for seismic design of electrical installations[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(3): 184-193. (in Chinese)
- [34] MOHAMMADI R K, AKRAMI V, NIKFAR F. An improvement to seismic design of substation support structures[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2013, 45(6): 821-835.
- [35] LI S, TSANG H H, CHENG Y F, et al. Considering seismic interaction effects in designing steel supporting structure for surge arrester[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 132: 151-163.
- [36] WHITTAKER A S, FENVES G L, GILANI A S J. Seismic evaluation and analysis of high-voltage substation disconnect switches[J]. Engineering Structures, 2007, 29(12): 3538-3549.
- [37] 李黎, 汪国良, 胡亮, 等. 特高压支架-设备体系动力响应简化分析及参数研究[J]. 工程力学, 2015, 32(3): 82-89.  
LI Li, WANG Guoliang, HU Liang, et al. Simplified analysis and parametric study of dynamic response for uhv electrical support-equipment system[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(3): 82-89. (in Chinese)
- [38] 姜斌, 郝群岩, 谢强, 等. 变电站设备-支架耦合体系的地震响应建模与参数分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2506-2514.  
JIANG Bin, HAO Qunyan, XIE Qiang, et al. Theoretical modelling and parameter analysis on seismic responses of electrical equipment-support structural system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2506-2514. (in Chinese)
- [39] 程永锋, 卢智成, 邱宁, 等. 特高压支柱类瓷质电气设备支架动力放大系数研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3651-3658.  
CHENG Yongfeng, LU Zhicheng, QIU Ning, et al. Study on support dynamic magnification coefficient about UHV pillar type porcelain electrical equipments[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3651-3658. (in Chinese)
- [40] 陈巍, 高政国. 高压电气设备支架动力放大系数取值研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(6): 182-186.  
CHEN Wei, GAO Zhengguo. Study on the value of dynamic magnification factors for high-voltage electric equipment support[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(6): 182-186. (in Chinese)
- [41] 尤红兵, 张郁山, 赵凤新. 电气设备振动台试验输入的合理确定[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 118-124.  
YOU Hongbing, ZHANG Yushan, ZHAO Fengxin. Reasonable determination of input waves for shake-table test of electrical equipments[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 118-124. (in Chinese)
- [42] 程永锋, 朱祝兵, 邱宁, 等. 特高压电气设备抗震试验共振拍波适用性及合理地震动输入研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1753-1759.  
CHENG Yongfeng, ZHU Zhubing, QIU Ning, et al. Research of resonance beat wave applicability and reasonable seismic input used in seismic test of UHV electrical equipments[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1753-1759. (in Chinese)