

# 变压器一套管体系的动力模型及抗震加固分析

鲁翔<sup>1</sup>, 陈向东<sup>1</sup>, 潘国洪<sup>1</sup>, 黄雄辉<sup>1</sup>, 姜斌<sup>2</sup>, 谢强<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网超高压输电公司, 广州 510700; 2. 同济大学建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:** 为研究变压器一套管体系的动力响应机理,提高其抗震性能,建立了某220 kV变压器加固和未加固时的精细化有限元模型,并输入满足IEEE 693—2005需求反应谱的地震波进行计算。提取了加固前变压器一套管体系的振型及各关键点的加速度,分析了各关键点加速度的反应谱;采用支撑升高座的方式来加固变压器,对比加固前后套管的地震响应,发现支撑对控制升高座摆动效果明显。进一步分析可得到如下结论:变压器一套管体系 $X$ 、 $Y$ 方向的前两阶振型以套管—升高座的耦合振动为主,对系统的动力响应起主导作用;变压器箱体可简化为刚体,升高座和套管可简化为欧拉梁,箱体—升高座和升高座—套管之间的连接可简化为转动弹簧;支撑可以很好地限制升高座绕箱体的摆动,提高体系基频,减小升高座顶部的加速度放大系数,同时安装方便,具有很好的适应性。

**关键词:** 变压器一套管体系;精细化有限元模型;动力响应机理;支撑升高座;升高座摆动

## Dynamic Model and Seismic Reinforcement Analysis of Transformer-bushing System

LU Xiang<sup>1</sup>, CHEN Xiangdong<sup>1</sup>, PAN Guohong<sup>1</sup>, HUANG Xionghui<sup>1</sup>, JIANG Bin<sup>2</sup>, XIE Qiang<sup>2</sup>

(1. CSG Extra High Voltage Power Transmission Company, Guangzhou 510700, China; 2. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** For studying the dynamic response mechanism of transformer -bushing system and improving its seismic performance, a refined finite element model of a 220 kV transformer with and without reinforcement is set up and the seismic wave that meets demand response spectrum of IEEE 693—2005 is input for calculation. The vibration modes and acceleration of each key point of the transformer-bushing system before reinforcement are extracted and the response spectrum of acceleration of each key point is analyzed. The way of supporting the elevating seat is adopted to strengthen the transformer and the seismic response of the bushing before and after the reinforcement is compared, finding that the support has obvious effect on controlling the swing of the elevation seat. It is concluded through further analysis that the first two modes of transformer-bushing system in  $X$  and  $Y$  directions are mainly coupled vibration of bushing- elevation seat, which plays a dominant role in the dynamic response of the system. The oil tank of transformer can be simplified as a rigid body, the elevation seat and bushing can be simplified as Euler beam, and the connection between tank-elevation seat and between the elevation seat-bushing can be simplified as rotating spring. The support can effectively control the swing of the elevation seat around the tank, improve fundamental frequency of the system and reduce the acceleration amplification factor on top of the elevation seat and, at the same time, have convenient installation and good adaptability.

**Key words:** transformer-bushing system; refined finite element model; seismic response mechanism; the support elevation seat; swing of elevation seat

## 0 引言

中外学者对大量变压器震害调查发现套管在

地震中最容易受损,其次油枕、散热器也有存在破坏问题。1994年的美国北岭地震中,变压器套管出现了严重破损<sup>[1]</sup>。1999年集集地震,变压器套管移

收稿日期:2022-04-25; 修回日期:2022-06-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878508);国家重点研发计划资助项目(2018YFC0809400)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51878508), National Key R & D Program of China (2018YFC0809400).

位、漏油<sup>[2]</sup>。2008年汶川地震中四川电网遭受史无前例的破坏,大量变压器出现倾覆、套管断裂等破坏<sup>[3-6]</sup>。2010年墨西哥地震,位于美国帝国谷的一座高压变电站内500 kV和220 kV变压器陶瓷套管橡胶垫圈挤出、漏油、破裂<sup>[7]</sup>。2013年芦山地震,变电站主变损坏,导致芦山、天全、宝兴三县电网全部垮网<sup>[8]</sup>。

大型变压器架构复杂,组成部件众多,已有研究大多偏向于变压器一套管体系的地震响应机理。1999年,Villaverde测得安装在变压器上的230 kV套管和500 kV套管自振频率分别为6.3 Hz,阻尼比均在2%~4%<sup>[9]</sup>。2003年A. Filiatrault对一台525 kV变压器进行了振动台试验,试验表明,变压器顶盖的柔度严重降低了套管的固有频率,是导致套管根部加速度放大的主要原因<sup>[10]</sup>。2007年,孟敏婕等用Ansys软件建立了变压器模型,得到了变压器的动力特性、地震中的薄弱环节、破坏模式和震害率曲线<sup>[11-12]</sup>。2009年,梅柳用有限元分析了汶川地震中破坏的一台500 kV高压变压器,结果表明,套管根部的加速度放大系数较规范值偏大,且与场地类别有密切关系;套管顶端较大的位移主要是由套管和升高座的变形引起;在升高座和箱体之间设置支撑能够有效减小套管地震响应<sup>[13]</sup>。2011年,中国电科院的曹枚银,设计了一台变压器试验模型,进行振动台试验,提出了三等级变压器抗震能力考核水平的概念<sup>[14]</sup>。2011—2013年,同济大学朱瑞元等针对变压器及套管体系进行了振动台试验研究,研究表明,由于套管振动与顶盖、箱壁的面外振动耦合,箱体局部刚度对基本频率的影响较大<sup>[15-16]</sup>。2013年,Koliou等人针对变压器箱体顶板加设加劲肋进行了数值仿真及试验研究,证明了通过增加加劲肋数量、优化其布置能显著减小变压器箱体及其升高座对套管的动力放大作用<sup>[17-18]</sup>。2018年,马国

梁等研究发现,加固变压器升高座可减小变压器箱体与升高座之间的动力相互作用<sup>[19]</sup>。2018年,谢强、何畅等人发现地震下套管顶部位移较大,可能造成设备间牵拉破坏;套管应力、加速度及位移放大系数不一致<sup>[20]</sup>。对于变压器一套管体系,虽然目前已经有许多研究成果,但大多针对其动力特性、抗震薄弱点。一方面,没有明确给出变压器箱体、升高座和套管的简化模型;另一方面,变压器的加固也没有具体可参考的模型。

文中对一台仿真变压器进行精细化有限元建模,得到其动力特性及关键点的动力响应。对地震影响范围内的模态进行分析,并对比各部分输入和输出加速度的频谱关系,总结得到各部分的动力简化模型。在此基础上针对变压器一套管体系的抗震薄弱环节提出合理的加固措施设计方法,最后验证了措施的有效。

## 1 变压器有限元模型及模态分析

### 1.1 变压器一套管体系结构简介

大型变压器的主体结构一般是箱体—升高座—套管,同时包含大量用于控制、维持正常运行和监测的二次设备,以往震害调查和分析发现这些设备对变压器抗震性能的影响可忽略不计,套管的破坏是变压器失效的主要原因。

### 1.2 变压器参数

去掉次要设备,同时保证体系的动力特性不变,整个变压器(包括支架)总高7.046 m,长4.575 m,宽3.862 m,各部分的参数见表1。钢材密度为7 850 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为2×10<sup>5</sup> MPa,泊松比为0.3,屈服强度为235 MPa,破坏强度为460 MPa;高强陶瓷,密度为7 500 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为100 GPa,泊松比为0.32,抗弯强度为30 MPa。

表1 变压器各组成部分参数

Tab1 Parameters for transformer-bushing system

部件	尺寸	质量	材料
箱体	高2.5 m,长2.9 m,宽1.5 m	充水总重15 070 kg	Q235钢材
顶盖升高座	外直径0.652 m,内直径0.64 m,高1.156 m	总重190 kg	Q235钢材
侧壁升高座	外直径0.652 m,内直径0.64 m,悬臂段长1.14 m,高1.84 m	充水总重986 kg	Q235钢材
套管	空气侧长3.2 m,油侧长1.38 m,外直径0.26 m,内直径0.22 m	总重572 kg,油侧重87 kg,阀侧重485 kg	高强陶瓷
油枕	长3.02 m,外直径0.812 m,内直径0.8 m	总重1 902 kg	Q235钢材
散热器	由多个散热片组成,悬臂1.056 m,高1.7 m	25 kg	Q235钢材

变压器结构示意图见图1。

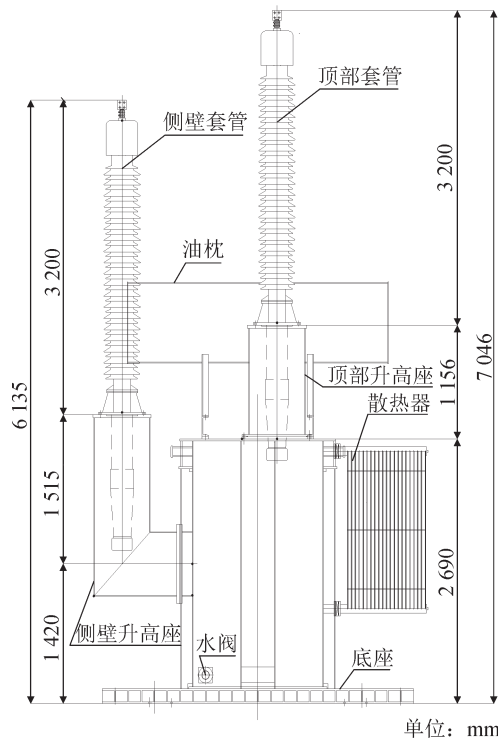


图1 变压器结构示意图

Fig. 1 Diagram of transform

仿真变压器的箱体由薄钢板焊接而成,采用实体单元模拟可以精确模拟箱体板的动力表现;箱体和加劲肋通过tie连接来模拟焊接。对变压器油采用的近似模拟方法是将其质量均匀对称地加到油箱侧壁上,使其重心与油箱内变压器油的实际重心近似重合。升高座的结构一般为短粗的空心圆柱,文中计算采用实体单元,并建立法兰等结构,法兰盘通过24个螺栓与箱体连接,可以将法兰与箱体tie来模拟真实的连接情况。变压器套管属于细长结构,适合用梁单元模拟,将套管简化为一个具有一定厚度的空心圆柱,中部固结有金属法兰的结构。

### 1.3 变压器模态分析

按照上述参数取值和单元选取建立220 kV变压器有限元模型见图2。

通过Abaqus分析得到变压器一套管体系的前14阶频率见表2。体系的1、4阶振型为侧壁套管的Y、X向振动,频率为2.52、3.91 Hz,与文[15]中的试验结果不符,这主要是因为侧壁套管与箱体连接处缺少盖板,减小了箱体的面外刚度。体系的5、6阶振型为顶盖套管的Y、X向振动,频率为5.15、5.37 Hz,结果与文[14]中试验结果接近,这是因为顶盖箱壁的面外刚度与文[14]中试验模型相似,故该模型合理。

为分析变压器一套管体系各阶振型的特点,提取关键点处的幅值,得到变压器箱—升高座—顶盖套管X向的前两阶振型见图3。

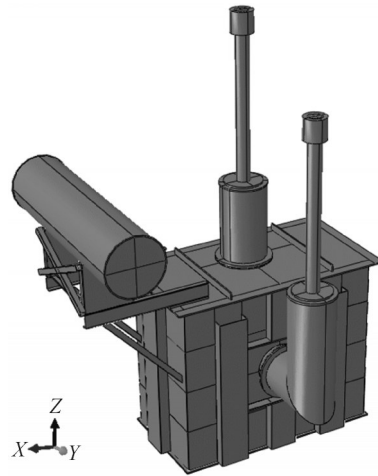


图2 变压器有限元模型示意图

Fig. 2 FEM of transformer

表2 仿真模型前14阶频率

Table 2 First 14 natural frequencies of the transformer

模态	频率/Hz	模态	频率/Hz
1	2.52	8	9.11
2	3.03	9	9.53
3	3.29	10	10.85
4	3.91	11	11.33
5	5.15	12	13.65
6	5.37	13	15.67
7	5.83	14	18.12

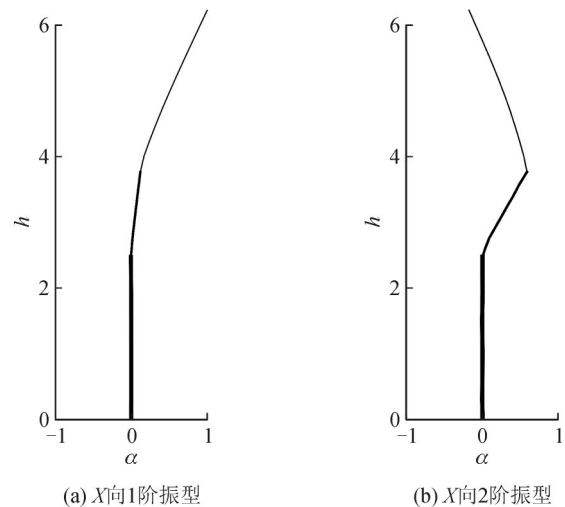


图3 变压器箱体—升高座—顶盖套管X向前两阶振型图

Fig. 3 Two forward modes of transformer tank-turreted bushing in X direction

图3中纵坐标h表示相应测点距离基础的高度,横坐标 $\alpha$ 为归一化的振幅。分析图3可知:

- 1) 变压器箱体未发生整体振动,仅在与升高座连接位置发生面外振动;
- 2) 变压器升高座的变形主要是绕箱壁的转动,弹性变形不明显;

3)套管的变形主要为自身弯曲和绕升高座根部法兰的转动。

由于顶部升高座和顶部套管X、Y向刚度相同,且箱体顶盖沿X、Y向的面外转动刚度相近,因此顶部升高座和顶部套管沿X、Y向的动力特性相近。从以上分析可知,套管作为变压器抗震的薄弱环节,X、Y方向的前两阶振型以套管—升高座的耦合振动为主,对系统的动力响应起主导作用。

### 2 地震波选取

文中计算根据我国规范《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)和美国规范 IEEE 变电站抗震设计推荐实施规程(IEEE Std693—2005)选取3条波,修正后的 Joshua Tree 地震波称为人工波,天然波 Tak 波记作 T;天然波八角波记作 B。人工波的时程和反应谱见图4。这3组波考虑了场地类型、安装支撑后变压器的动力特性改变,具有较好的代表性;3组地震波的平台段在1~10 Hz,与变压器各部件的基频范围吻合,可以充分的激励变压器的各个部件。

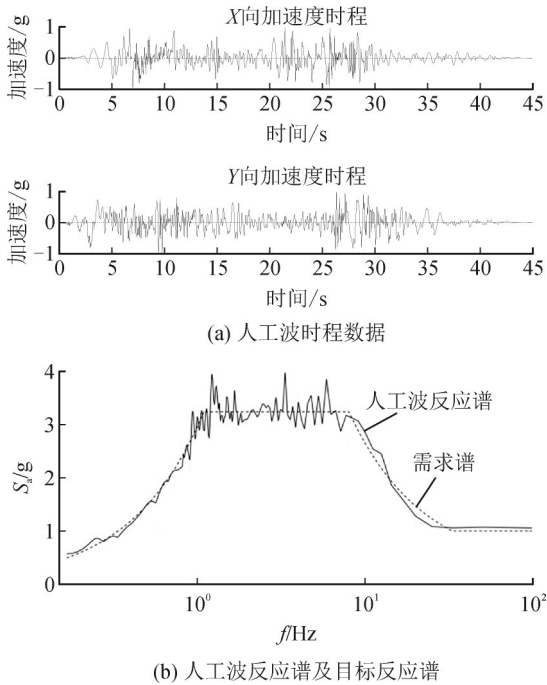


图4 标准化人工波时程及反应谱

Fig. 4 Normalized time history of artificial wave and the response spectra

### 3 变压器一套管体系各部分地震响应及机理分析

#### 3.1 箱体的响应分析

加速度时程峰值分析往往容易受局部波动的影响,为了更清楚的分析箱体对变压器一套管体系动力响应的规律,提取人工波作用下变压器箱

体顶盖的水平向加速度,并按照2%的阻尼比计算得到箱底(输入)和箱体顶部加速度(输出)反应谱见图5。

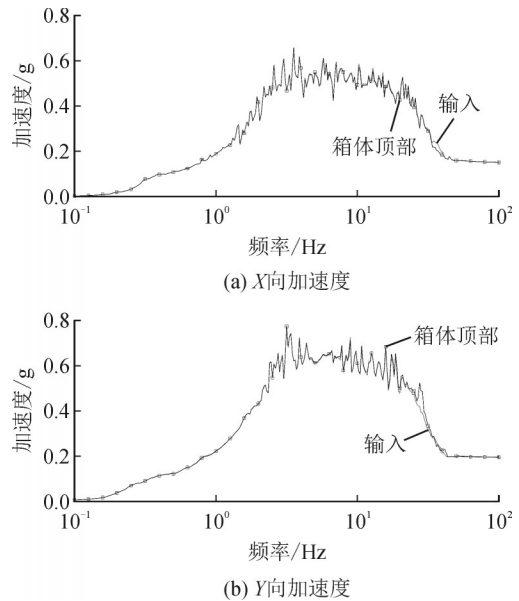


图5 人工波作用下加速度反应谱对比

Fig 5 Spectral acceleration of the tank

分析图5可以得到以下结论:箱体对输入水平地震振动10 Hz以下的成分几乎没有影响,对10 Hz以上成分虽有影响,但输入和输出加速度频谱曲线的形状基本没有改变,其影响可以忽略,所以对变压器一套管体系进行地震响应分析时可以将箱体当作刚体,不考虑其整体弯曲变形和剪切变形。

#### 3.2 升高座的响应分析

变压器套管通过升高座与箱体连接,用于满足绝缘距离的要求,但是其放大了套管的输入加速度,对套管抗震十分不利。根据顶盖套管X、Y向的前两阶振型并考虑到箱体的面外转动,可以将升高座考虑为根部带有转动弹簧的悬臂结构<sup>[21]</sup>见图6。升高座顶部的位移 \$U\_t\$ 由根部平动位移 \$U\_b\$、根部转动引起的位移 \$U\_r\$ 和弹性变形 \$U\_d\$ 3部分组成,对于升高座而言弹性变形主要是升高座的弯剪变形。

由图6知升高座顶部的位移可以分解为

$$U_t = U_b + L \frac{R}{D} + U_d \tag{1}$$

式(1)中:\$R\$为升高座根部法兰中心与边缘点之间相对位移;\$L\$为升高座长度沿平动方向的投影长度;\$D\$为升高座根部法兰的直径。对式(1)求二阶导数,并记 \$A\_1 = (U\_t - U\_b)''\$,得

$$A_1 = L \frac{A_{diff}}{D} + A_d \tag{2}$$

式(2)中:\$A\_{diff}\$为升高座根部法兰边缘点的面外相对加速度,与式(1)中相对位移 \$R\$ 相对应;\$A\_1\$为升

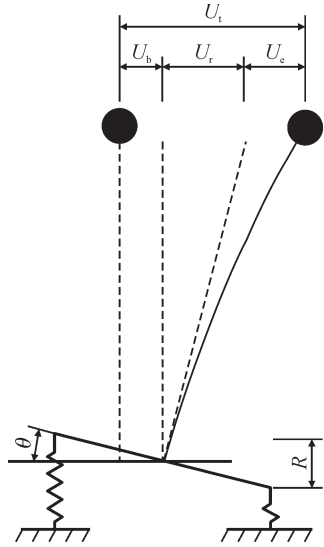


图6 升高座顶部位移分解示意图

Fig. 6 Displacement at top of turret

高座顶部相对于箱体顶盖加速度;  $A_r$  为升高座摆动加速度分量;  $A_d$  为弹性变形加速度分量。

按照式(2)计算得到人工波输入下的  $A_t$ 、 $A_r$  和  $A_d$  见图7。图7中摆动分量  $A_r$  和升高座顶部相对加速度  $A_t$  的波形一致, 只在局部存在差异, 弹性变形引起的加速度幅值很小, 这说明升高座对加速度的放大主要是升高座的摆动引起的。按照2%阻尼比计算得到其加速度反应谱见图8。

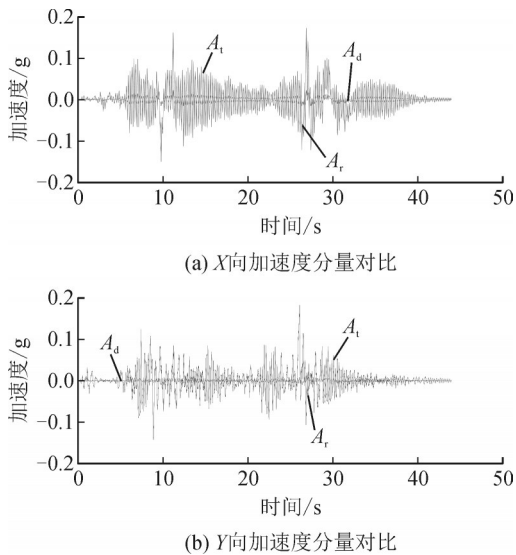


图7 人工波作用下加速度时程对比

Fig. 7 Acceleration time histories of turret

分析图8可以得到以下结论:

1) 反应谱曲线只在各方向的前两阶频率处有较高的峰值, 因此变压器—套管体系中套管的地震响应主要由对应方向前两阶振型决定;

2) 升高座顶部的相对加速度可以分解为摆动分量和弹性分量, 对三者的时程和加速度反应谱进行

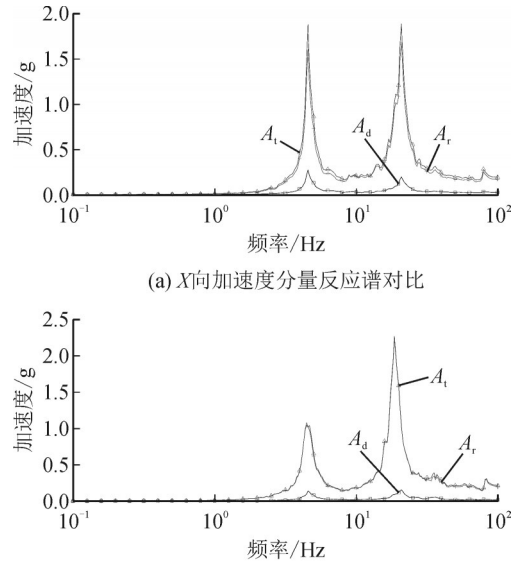


图8 人工波作用下加速度反应谱对比

Fig. 8 Spectral acceleration of the turret

分析, 发现升高座顶部对加速度的放大主要由摆动分量引起, 弹性分量的贡献很小, 因此升高座在地震中的变形主要为其绕箱壁的转动。

### 3.3 套管的响应分析

套管作为变压器的重要部件, 其在地震中表现出极高的地震易损性。套管为细长结构, 其通过法兰与升高座连接, 研究发现法兰处应看做柔性连接<sup>[22]</sup>。通过有限元分析得到顶盖套管X、Y向的前两阶振型如图3, 可以发现套管除表现出一般悬臂结构的弯曲振型外, 其绕根部法兰的转动在二阶阵型中不可忽略。套管绕升高座的转动显著的放大了加速度响应。图9(a)为人工波作用下的套管顶部和升高座顶部相对箱体顶盖的加速度时程图, 按照2%的阻尼比计算得到二者的反应谱如图9(b)。由图9(a)可知套管本身对加速度的放大明显, 在0.2g人工波的峰值输入下顶部加速度放大系数达到了5.4; 由图9(b)可知套管顶部相对加速度的反应谱在体系一阶频率处存在明显的峰值, 这是因为波峰处对应频率接近套管自振频率, 引起类共振效应。

输入峰值0.2g时, 套管根部应力响应见表3。表3中侧壁套管和顶盖套管根部应力的峰值相近, 最大达到8.12 MPa。因此, 在地震峰值为0.8g时, 套管根部应力将超过30 MPa, 导致套管根部破坏。

变压器作为变电站的关键设备, 通常与其他设备通过母线相连, 若套管顶部位移过大, 则可能由于与相邻设备相对位移过大导致牵拉破坏。表4给出了输入峰值为0.2g时套管顶部的位移, 表中最大位移为101.90 mm, 在0.4g时将超过200 mm, 位移过大若超过母线冗余度将导致牵拉破坏。

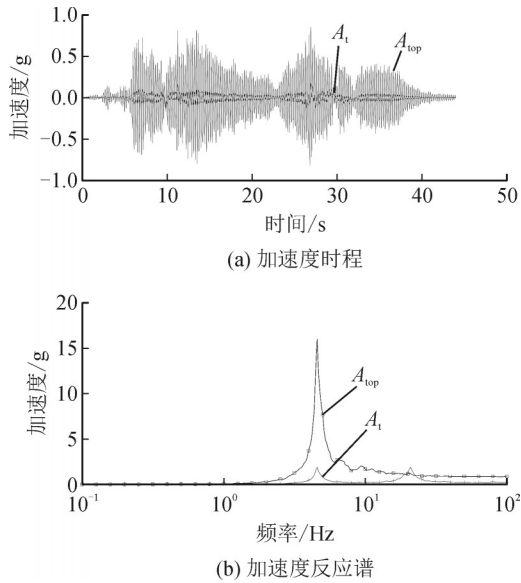


图9 人工波作用下套管顶部和根部的相对加速度时程及反应谱图

Fig. 9 Spectral acceleration and acceleration time histories of the bushing

表3 套管根部应力

Table 3 The peak stress at the root of the bushing MPa

输入地震波时程	侧壁套管	顶部套管
人工波	7.57	7.33
八角波	8.12	8.02

表4 套管顶部位移

Table 4 The peak displacement at the top of the bushing mm

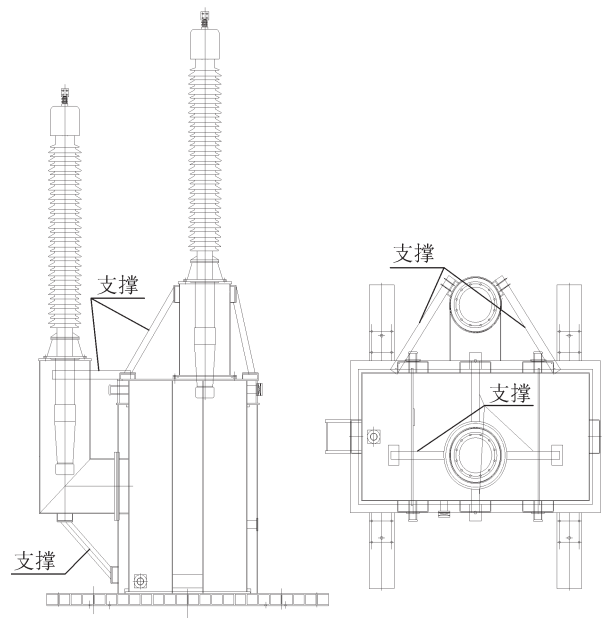
输入地震波时程	顶部套管		侧壁套管	
	X	Y	X	Y
人工波	33.41	23.42	69.22	39.07
八角波	38.82	24.14	101.90	31.92
Tak波	46.71	27.21	88.07	35.81

## 4 支撑式加固措施

### 4.1 支撑式加固措施的简介及有限元模型

有限元分析发现升高座的摆动放大了套管的震动响应,而有学者发现当套管法兰弯曲刚度较大时,变压器箱体箱壁的面外刚度不足引起套管动力响应放大和升高座摆动,套管振动与升高座摆动耦合在一起,两者绕升高座根部整体摆动<sup>[19,23]</sup>。为降低套管和升高座的整体摆动,增强其整体性,拟采用加固措施见图10。

图10中支撑安装在升高座顶部与变压器箱体侧壁加强板之间,通过螺栓和耳板连接在一起,便于安装,避免了在箱体上打孔和焊接,保证了箱体



(a) 支撑安装结构示意图 (b) 理论模型示意图

图10 变压器—套管体系串联分布参数模型

Fig. 10 Model of Transform-bushing structure system

的密封性和电器功能。考虑到侧壁升高座存在的悬臂段显著减小了其基频,在悬臂端安装斜向支撑来减小其影响。支撑根据地震响应机理设计,通过增加连接件来增加升高座和箱体的整体性。

为验证支撑措施的有效性,建立了该变压器的精细化有限元模型。用梁单元来模拟支撑,支撑与箱体和升高座的连接设为tie。建立顶盖套管支撑有限元模型见图11。

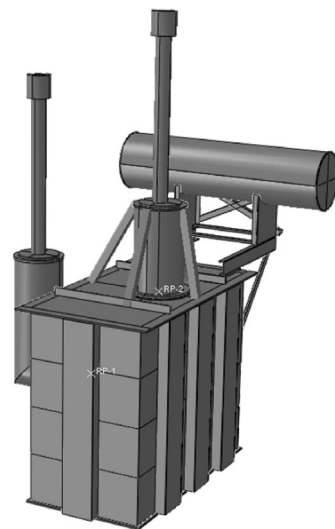


图11 带支撑变压器—套管体系的有限元模型

Fig. 11 FEM of transformer retrofitted by supportor

### 4.2 模态分析

安装支撑后该220 kV变压器—套管体系前14阶频率见表5。对比表2可知安装支撑后,侧壁套管和顶盖套管的基频均超过7 Hz,顶盖和侧壁套管的

基频已经比较接近。顶盖套管的前两阶振型见图12,由图12可知安装支撑后,升高座的摆动已经得到控制,各方向的前两阶振型均为套管的弯曲振动。

表5 加固后变压器前14阶频率

Table 5 First 14 natural frequencies of the retrofitted transformer

模态	频率/Hz	模态	频率/Hz
1	3.29	8	9.11
2	7.27	9	11.31
3	7.70	10	12.21
4	7.71	11	12.25
5	8.77	12	18.18
6	8.81	13	19.19
7	8.92	14	23.31

图12 顶盖套管前两阶振型

Fig. 12 The first two mode shapes of top bushing

### 4.3 地震响应结果对比

安装支撑后的变压器—套管体系各关键位置的地震响应见表6-8。升高座顶部的加速度放大系数平均下降了35.8%;套管顶部绝对位移也有了很大幅度的下降,最多下降了70.26%;套管根部应力作为评价套管是否损坏最直接判据,其值平均下降了38.48%。综合模态分析结果可知,支撑可以有效控制升高座的放大作用,减小套管的震动响应。

表6 加固后升高座顶部加速度放大系数

Table 6 The peak acceleration at the top of the retrofitted turret

地震波时程	X	降幅/%	Y	降幅/%
人工波	2.89	11.08	1.60	14.44
八角波	2.80	10.26	1.69	23.53
Tak波	2.68	7.90	1.67	25.78

表7 加固后套管顶部位移

Table 7 The peak displacement at the top of the retrofitted bushing mm

地震波时程	X	降幅/%	Y	降幅/%
人工波	27.24	18.47	17.46	25.45
八角波	29.24	24.68	19.06	21.04
Tak波	29.11	37.68	18.23	33.00

## 5 结论

文中对一台220 kV变压器进行精细化有限元建模,并输入符合规范的三向地震波,提取其动力特性及关键点的动力响应。对变压器箱体、升高

表8 加固后套管根部应力

Table 8 The peak stress at the root of the retrofitted bushing MPa

地震波时程	顶部套管	降幅/%
人工波	4.59	37.38
八角波	5.90	26.43
Tak波	5.55	24.39

座、套管的输入和输出加速度响应进行了分析,总结了其响应规律和动力模型。在此基础上针对变压器—套管体系的抗震薄弱环节提出合理的改善措施设计方法,并与未采取改善措施的变压器—套管体系的地震响应作对比,证明了其合理性。分析总结得到以下结论:

1)既有变压器—套管体系,X、Y方向的前两阶振型以套管—升高座的耦合振动为主,对系统的动力响应起主导作用。

2)在进行变压器—套管体系的简化计算时变压器箱体可看作刚体,升高座和套管可看作欧拉梁,箱体—升高座和升高座—套管之间的连接可简化为转动弹簧。

3)文中采取了支撑式加固措施加固升高座,该方法可以很好地限制升高座绕箱体的摆动,提高体系基频,减小升高座顶部的加速度放大系数,同时安装方便,具有很好的适应性。

### 参考文献:

- [1] ASCE-TCLEE. Northridge earthquake lifeline performance and post-earthquake response[R]. New York: American Society of Civil Engineering Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, 1997.
- [2] ASCE-TCLEE. Lifeline Performance from the September 21, 1999 Jiji earthquake in central taiwan[R]. New York: American Society of Civil Engineering Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, 1999.
- [3] 张子引,赵彪,曹伟伟,等.四川汶川8.0级地震电网受灾情况调研与初步分析[J].电网技术,2008,20(4):1-4. ZHANG Ziyin, ZHAO Biao, CAO Weiwei, et al. Investigation and preliminary analysis of damages on the power grid in the Wenchuan earthquake of M8.0[J]. Electric Power Technologic Economics, 2008, 20(4): 1-4.
- [4] XIE Qiang, ZHU Ruiyuan. Damage to electric power grid infrastructure caused by natural disasters in China: Earthquake, wind and ice[J]. IEEE Power and Energy Magazine 2011, 9(2): 28-36.
- [5] FUJISAKIE E, TAKHIROV S, XIE Q, et al. Seismic vulnerability of power supply: Lessons learned from recent earth-

- quakes and future horizons of research[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Structure Dynamics. Porto, Portugal: Eurodyn, 2014: 345-350.
- [6] 谢 强. 5.12 汶川大地震电力系统震害调查初步报告[R]. 上海: 同济大学, 2008.  
XIE Qiang. Preliminary report on earthquake damage investigation of power system in 5.12 Wenchuan earthquake [R]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [7] JOHNSON F, ILIEV K. Earthquake effects on SDG and E's 500/230 kV imperial valley substation[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2012: 6345210.
- [8] 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.
- [9] VILLAVERDA R, PARDOEN G, CARNALLA S. Ground motion amplification at base of bushings mounted on electric substation transformers[R]. California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, Pacific Gas and Electric Corporation, University of California, Irvine, 1999.
- [10] MATT H, FILIATRAULT A. Seismic qualification requirement for transformer bushings[R]. California: Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, 2003.
- [11] 孟敏婕. 油浸式变压器有限元建模与抗震可靠性分析[D]. 上海: 上海大学, 2007.  
MENG Minjie. Seismic reliability analysis and FEM of transferomers[D]. Shanghai: Shanghai University, 2007.
- [12] 孟敏婕, 陈伶俐, 叶志明. 油浸式高压变压器地震易损性分析[J]. 世界地震工程, 2007, 23(3): 163-167.  
MENG Minjie, CHEN Lingli, YE Zhiming. Mode ling and seismic fragility analysis of transformers[J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(3): 163-167.
- [13] 梅 柳. 500 kV 大型变压器震害机理与抗震性能分析 [D]. 上海: 同济大学, 2009.  
MEI Liu. Study on the seismic behavior of 500 kV transformers[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [14] 曹枚根, 周福霖, 谭 平, 等. 大型电力变压器及套管振动台抗震试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 122-129.  
CAO Meigen, ZHOU Fulin, TAN Ping, et al. Shaking table test on seismic performance of large power transformer with bushings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 122-129.
- [15] 朱瑞元. 变压器一套管体系抗震分析与振动台试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2013.  
ZHU Ruiyuan. Seismic response analysis and shaking table tests of transformer - bushing system[D]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [16] 朱瑞元, 李喜来, 颜士海, 等. 变压器一套管体系振动台试验与数值模拟对比研究[J]. 变压器, 2017, 54(11): 49-55.  
ZHU Ruiyuan, LI Xilai, YAN Shihai, et al. Comparative study between shaking table test and numerical simulation of transformer - bushing system[J]. Transformer, 2017, 54 (11): 49-55.
- [17] KOLIOU M, FILIATRAULT M, REINHORN A. Seismic response of high-voltage transformer-bushing systems incorporating flexural stiffeners I: Numerical study[J]. Earthquake Spectra, 2013, 29(4): 1335-1352.
- [18] KOLIOU M, FILIATRAULT M, REINHORN A. Seismic response of high - voltage transformer - bushing systems incorporating flexural stiffeners II: Experimental study[J]. Earthquake Spectra, 2013, 29(4): 1353-1367.
- [19] MA Guoliang, XIE Qiang, WHITTAKER A. Dynamic interaction of high-voltage power transformer bushings, turrets, and tanks[J]. Earthquake Spectra, 2018(34): 397-421.
- [20] 何 畅, 谢 强, 马国梁, 等.  $\pm 800$  kV 换流变压器-套管体系的抗震性能[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1878-1883.  
HE Chang, XIE Qiang, MA Guoliang, et al. Seismic behavior of  $\pm 800$  kV UHV converter transformer and bushing system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1878-1883.
- [21] 谢 强, 马国梁, 朱瑞元, 等. 变压器一套管体系地震响应机理振动台试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5500-5510.  
XIE Qiang, MA Guoliang, ZHU Ruiyuan, et al. Shaking table test research on earthquake response mechanism of a transformer-bushing system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5500-5510.
- [22] 杨亚弟, 张其浩. 具有柔性结点的有限元法及其应用[J]. 工程力学, 1988, 5(3): 83-90.  
YANG Yadi, ZHANG Qihao. The FEM with flexible nodel point and its application[J]. Engineering Mechanics, 1988, 5 (3): 83-90.
- [23] FILIATRAULT A, MATT H. Experimental seismic response of highvoltage transformer - bushing systems[J]. Earthquake Spectra, 2005, 21(4): 1009-1025.

鲁 翔(1985—), 男, 本科, 教授, 高级工程师, 长期从事高压直流输电工程建设管理工作(E-mail: dianqi\_lu@126.com)。