

# 既有 750 kV 避雷器中间层隔震改造 仿真与性能研究

熊超诣,刘 匀,石高扬,谢 强

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

**摘要:**2023年12月18日积石山地震震害发现750 kV避雷器遭受破坏。为了提升变电站既有750 kV避雷器的抗震性能,提出选取中间层为隔震部位进行抗震改造。提出钢丝绳阻尼器及复合隔震支座2种中间层隔震方案,建立原避雷器及隔震结构ABAQUS有限元模型,三向输入10组地震波进行有限元分析,提取各结构套管根部应力、顶部加速度及位移响应,对比分析中间层隔震效率。结果表明:地震作用下,钢丝绳阻尼器中间层隔震结构能有效降低避雷器套管根部应力及顶部加速度,但对顶部位移放大作用过大,易造成导线牵拉破坏;复合隔震支座的中间层隔震方案能够提升中间层结构竖向刚度,使原结构套管根部应力及顶部加速度峰值下降幅度均超40%,同时控制顶部位移峰值仅提升12.56%,达到良好的隔震效果;带有复合隔震支座的中间层隔震装置具有较好的隔震效率,是提升既有750 kV避雷器抗震性能的有效改造措施。

**关键词:**既有结构;避雷器;隔震改造;地震响应控制

**中图分类号:**TU352.1<sup>+</sup>2

**文献标志码:**A

## Simulation and performance study on seismic isolation retrofit of existing 750 kV surge arrester intermediate layer

XIONG Chaoyi, LIU Yun, SHI Gaoyang, XIE Qiang

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** On December 18, 2023, the Jishi mountain earthquake revealed damage to 750 kV surge arresters. In order to improve the seismic performance of existing pillar-type electrical equipment in substations, the intermediate layer was selected as the isolation part for modification. Two intermediate isolation schemes were proposed: steel wire rope damper and composite seismic isolation bearing. The original surge arrester and isolation structure were modeled using the ABAQUS finite element method. Ten sets of seismic waves were input for finite element analysis, and the stress of bushing root, top acceleration and displacement responses of each structure were extracted to compare and analyze the isolation efficiency of the intermediate layer. The results show that under seismic action, the intermediate isolation structure of the steel wire rope damper can effectively reduce the stress of bushing root and top acceleration of the surge arrester, but it has a significant amplifying effect on the top displacement, which can easily cause wire tension damage. The intermediate isolation scheme with composite seismic isolation bearing can improve the vertical stiffness of the intermediate layer structure, so that the root stress and top acceleration of the original structure bushing decrease by more than 40%, and the peak displacement of the top is only increased by 12.56%, so as to achieve a good seismic isolation effect. The intermediate isolation device with composite seismic isolation bearings exhibits good seismic isolation efficiency and is an effective retrofit measure to improve the seismic

收稿日期:2024-04-26; 修回日期:2024-07-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF0608904);国家自然科学基金项目(51878508)

作者简介:熊超诣(2000—),男,硕士研究生,主要从事变电站设备减隔震研究。E-mail:2232390@tongji.edu.cn

通信作者:谢 强(1971—),男,教授,博士,主要从事电力系统基础设施防灾减灾、韧性评估方面的研究。E-mail:qxie@tongji.edu.cn

performance of existing 750 kV surge arrester.

**Key words:** existing structure; surge arrester; seismic isolation retrofit; seismic response control

## 0 引言

变电站在电力系统中扮演着至关重要的角色,其电力设备的安全运行直接关系到整个电力系统的可靠性。建设于地震频发及高烈度地区的变电站面临着极大的抗震挑战,近年来,国内外多次震害结果记录表明:变电站设备的地震易损性较高。这种损坏不仅仅局限于设备本身,更可能引发电气设备功能受损乃至电网瘫痪等严峻情况,直接危及生命线系统的安全性<sup>[1-3]</sup>。

支柱类设备是变电站中最常见的电力设备类型,包括避雷器、旁路开关和平波电抗器等。既有的支柱类设备通常是由底部的支承结构(钢结构支架或钢支柱)、中间层连接结构以及上部维持电气功能的设备主体结构组成,展现为高耸的柱状结构,具有高、柔的结构特性<sup>[4]</sup>。地震作用下,支柱类设备底部支承结构具有显著的动力放大效应<sup>[5-6]</sup>,上部电气结构包含由陶瓷或玻璃纤维等脆性材料组成的绝缘构件,应力过大易发生根部断裂破坏。随着支柱类设备电压等级的升高,此类结构特性愈发得到彰显,设备地震下的损坏风险大幅增加<sup>[7-8]</sup>。

为减小设备受损的可能性,降低地震响应导致的破坏,减隔震技术及装置被逐渐应用于支柱类设备<sup>[9]</sup>,钢丝绳阻尼器是较为成熟的减隔震装置,其优秀的减震性能已得到众多学者的验证<sup>[10-12]</sup>。进一步地,为提升减隔震技术的减震效率,CHENG 等<sup>[13]</sup>开始尝试支柱类设备中间层减隔震方法,使用铅合金减震螺栓阵列安装在支柱类设备底部连接支承结构,减震效率突破 50%。GÖKÇE 等<sup>[14]</sup>开发了一种新型低成本聚氨酯弹簧隔震支座,随着阻尼比的优化,减震效率可从 20%提升至 70%。张毅等<sup>[15]</sup>对于中间层隔震技术,提出了模块式金属隔震支座的设计方法,中间层减隔震技术的可行性得到充分论证。

目前对既有支柱类设备抗震性能的提升已成为其研究的关键内容。以往学者的研究主要集中在进行设备底部基础减隔震装置的设计以及加强设备结构部件性能<sup>[16-18]</sup>,包括增大构件截面、研发新型绝缘材料等,考虑到既有支柱类设备既定的结构形式与材料组成,进行此类抗震改造会带来较大的改造成本及施工难度<sup>[19-20]</sup>。因此,对于已经通过抗震设计考核的既有支柱类设备,提升其抗震性能的改造措施亟需进一步的研究,改造的有效性有待得到验证与应用。

本文对既有 750 kV 避雷器进行中间层连接结构减隔震改造,采取钢丝绳阻尼器及高强弹簧进行中间层减隔震设计,根据现场测试设备动力特性建立 750 kV 避雷器减隔震改造前后仿真有限元模型,对比分析多组地震动下减隔震前后设备基频及关键部位地震响应(顶部位移及根部应力)变化情况,最终得到 750 kV 避雷器设备中间层隔震的隔震效率并给出中间层隔震设计的建议及设计方法。

## 1 有限元建模仿真

### 1.1 避雷器有限元模型建立

2023 年 12 月 18 日积石山地震震害发现 750 kV 避雷器受损严重,见图 1。本文以某既有 750 kV 避雷器为研究对象开展研究。

避雷器为长悬臂支柱类设备,其组成包括钢支柱、安装法兰、连接法兰、套管和均压环等构件,套管内部包含动作部件及连接元件等电气构件。该避雷器设备总高 12.9 m,结构质量为 1 500 kg,设备主体包含三节套管,单节套管长度 2.5 m,直径为 0.4 m,主体部分通过安装法兰与固定在基础之上的钢支柱连接,其结构组成及尺寸数据见图 2。

本研究采用有限元软件 ABAQUS 对该 750 kV 避雷器进行有限元模型的建立,为了对地震作用下避雷器结构响应进行尽可能真实的模拟,进行结构构建,并对连接部位进行精细化建模,对于套管伞裙及内部电器元件,考虑到其对结构分析影响较小,将其质量等效于套管之上,整个有限元模型采用壳单元(shell)对各个电气结构构件进行建模组装。



图 1 2023 年积石山地震避雷器震害

Fig. 1 Lightning arrester damage during the 2023 Jishi mountain earthquake

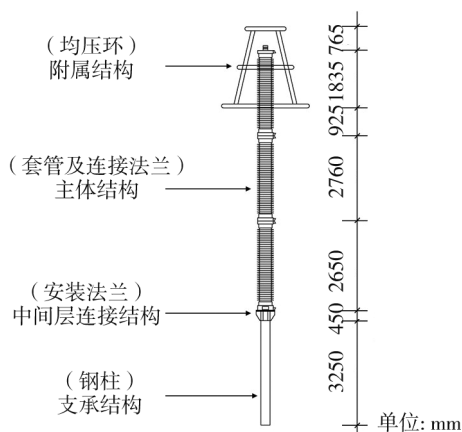


图2 避雷器结构关系及尺寸图

Fig. 2 Structural relationship and size diagram of lightning arrester

据以往震害数据表明,避雷器套管根部的地震易损性极高<sup>[21]</sup>。主要由于套管结构为达到电气绝缘的目的采用陶瓷材料,且对于超高压设备,套管的体积和质量随着电压等级的升高而不可避免的逐渐增大,在地震作用下易造成根部脆性破坏。安装法兰及连接法兰通常为钢材,刚度较大,避雷器构件具体材料参数见表1。根据GB 50360—2013《电力设施抗震规范》<sup>[22]</sup>中对电瓷类设备阻尼比的规定,取避雷器结构阻尼比为2%,在ABAQUS中采用Rayleigh阻尼进行仿真模拟。

### 1.2 中间层隔震设计

传统的隔震设计通常将隔震支座布置在设备底部基础之上,根据设备结构形式的不同选用相应的减震或隔震装置。既有避雷器设备由于下部支承结构已经施工完成,底部基础不便于进行减隔震改造,因此对于既有避雷器隔震设计应从中间层入手。对于该类支柱类设备,其地震作用下的动力响应符合长悬臂结构的特点,薄弱位置处于弯矩较大的根部,目前应用较为普遍的隔震装置主要包括钢丝绳阻尼器、高强弹簧以及粘滞阻尼器等等,考虑到粘滞阻尼器常安装于结构外侧,为节约空间并保障电气设备间绝缘距离要求,宜采用钢丝绳阻尼器安装于层层之间来约束转动方向的自由度,见图3(a)。

钢丝绳阻尼器及高强弹簧的有限元模型通常利用其力学模型进行模拟,钢丝绳阻尼器耗能在平动及转动方向上具有非线性的滞回特性,见图3(b),其力学模型一般采用Bouc-wen模型<sup>[23]</sup>进行拟合,其表达式为

$$F = -k_0 u - (k_0 + k_1) z \quad (1)$$

$$\dot{z} = \{A - [\beta \text{sign}(z \cdot \dot{u}) + \gamma] \cdot |z|^n\} \cdot \dot{u} \quad (2)$$

式中: $F$ 为恢复力; $k_0$ 、 $k_1$ 分别为钢丝绳阻尼器屈服前后刚度,文中取 $k_1/k_0$ 为10; $u$ 为钢丝绳阻尼器位移; $z$ 为滞回曲线相关函数,选取型号为WR40-200的钢丝绳阻尼器<sup>[24]</sup>,其滞回参数取 $A$ 为1, $\beta$ 为28, $\gamma$ 为-40, $n$ 为1。

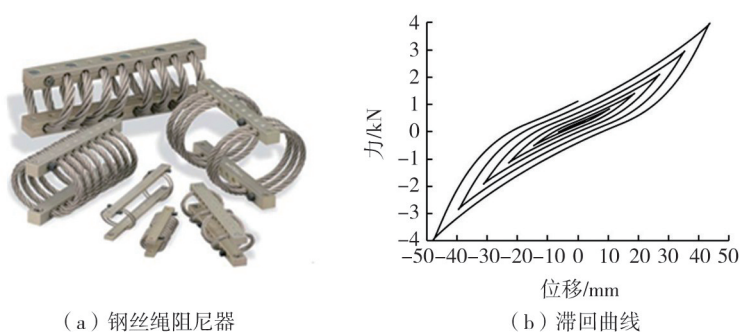


图3 钢丝绳阻尼器及其滞回曲线

Fig. 3 Wire rope damper and its hysteresis curves

表1 避雷器有限元模型构件材料参数

Table 1 Material parameters of surge arrester finite element model components

构件	材料	质量密度 /(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量 /GPa	泊松比
支柱	钢材	7890	70.0	0.33
法兰	铸铝	2700	32.5	0.20
套管	陶瓷	9580	18.0	0.30

采用钢丝绳阻尼器的中间层隔震装置,可将阻尼器安装于平台板四角处,呈中心对称,见图 4。通过钢丝绳之间的摩擦作用消耗部分地震所传递的能量。

考虑到 750 kV 避雷器为超高压电气设备,设备质量较大,仅使用钢丝绳阻尼器隔震在减小地震下设备根部弯矩的同时,也会使得设备中间层竖向刚度下降<sup>[4]</sup>。较弱的竖向刚度会带来设备结构顶部位移的增大,对于共同协作工作的电气设备,其顶部通过导线相连,较大的顶部位移会导致导线与设备之间的牵拉作用,破坏导线与设备的正常运行。因此,有必要辅以高强弹簧以提高钢丝绳阻尼器隔震的竖向刚度。取高强弹簧劲度系数为 20 kN/mm,与钢丝绳阻尼器组成复合隔震支座见图 5,在平台板四边中心及四角各对称布置 4 个高强弹簧共 8 个,用以减弱地震作用下平台板间的转动。

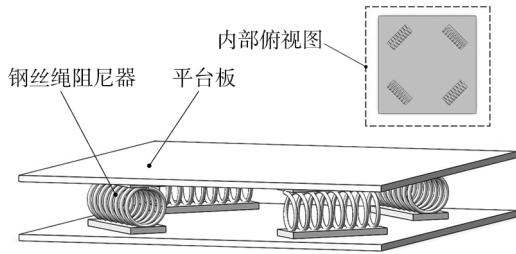


图 4 钢丝绳隔震结构布置形式

Fig. 4 Wire rope seismic isolation structure layout

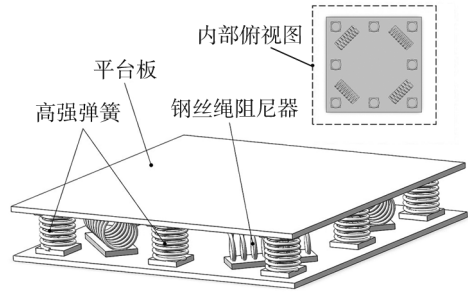


图 5 复合隔震结构布置形式

Fig. 5 Composite seismic isolation structure layout

为实现上述隔震结构有限元模型,在 ABAQUS 中采用了连接器模拟钢丝绳阻尼器及高强弹簧构件,连接截面为中间层上下结构安装连接板内表面相应位置,连接位置见图 6(a)。高强弹簧选用单元弹簧连接器,设置弹簧弹性刚度为 20 kN/m,阻尼取 0.05,共设置 8 个。钢丝绳阻尼器采用笛卡尔连接器配合对齐模拟,其  $x$  向及  $y$  向弹性刚度设置为 4.5 kN/m,  $z$  向设置为 13.5 kN/m,阻尼均取值 0.05,塑性刚度设置为 11.5 kN/m,共设置 4 个。单独提取该复合隔震结构进行有限元滞回模拟,得到的滞回曲线见图 6(b)。

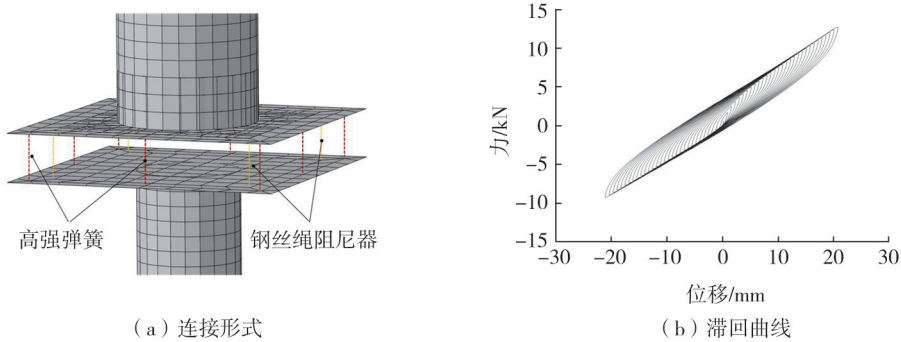


图 6 复合隔震结构 ABAQUS 连接形式及滞回曲线

Fig. 6 Connection form of composite seismic isolation structure in ABAQUS and hysteresis curve

## 2 模态对比分析

模态分析用以了解设备结构的动态响应特性,通过振型和频率评估结构的振动特性,了解振动模式,是判断结构稳定性和安全性的重要因素。利用 ABAQUS 模拟得到该避雷器设备各阶模态,提取前 3 阶模态及频率,由于避雷器设备轴对称的结构特性,可以观察到其 1 阶、2 阶模态频率相差较小,为 1.029 3 Hz,振动形式相似,结构 1 阶振型为避雷器在  $x$  向和  $y$  向设备整体的弯曲,其中与法兰连接的上部设备主体弯曲较大。3 阶模态所对应结构 2 阶振型为设备以套管中下部为反弯点的弯曲,频率明显高于 1 阶振型,达到 5.228 2 Hz,见图 7(a)。

对避雷器设备进行中间层隔震,将避雷器有限元模型连接法兰替换为隔震装置,分别替换钢丝绳阻尼器进行隔震和安装复合隔震支座进行隔震,同样模拟得到隔震后避雷器设备的各阶振型。对于钢丝绳阻尼器隔震的避雷器设备,由于中间层竖向刚度的降低,其 1 阶振型由原结构的弯曲变形转变为设备主体绕中间层的转动,引起的结构顶部位移以转动为主,频率降低至 0.515 2 Hz。2 阶振型表现为下部支柱弯曲减小,进一

步说明中间层隔震装置的设置降低了上部设备与下部支承结构的耦合度,上部结构地震下动力响应减弱,见图7(b)。为缓解这种竖向刚度减小带来的结构顶部位移的失控以及转动位移占比过大的现象,在钢丝绳阻尼器两侧及附近安装高强弹簧以提高中间层的竖向刚度,提取复合隔震装置下避雷器设备的振型及频率。对比发现,安装高强弹簧后,设备1阶振型依旧是绕中间层的偏转,但偏转幅度有所削弱,且设备结构弯曲更为显著,见图7(c),其频率小幅提高,达到0.6437 Hz,在降低地震所带来的能量输入的同时,保障设备结构中间层竖向刚度的可靠性。

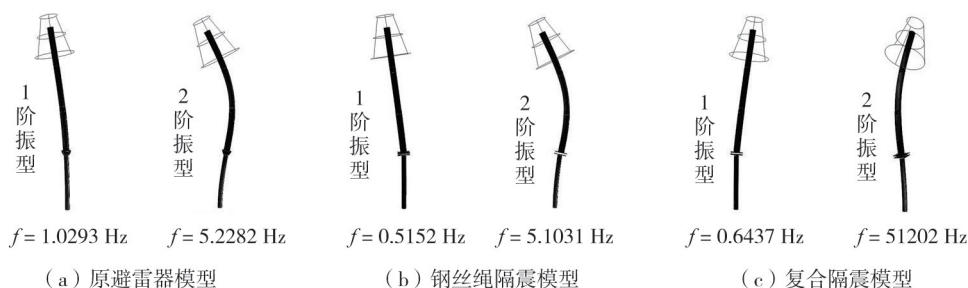


图7 隔震前后结构模型振型对比图

Fig. 7 Mode shapes of structural models before and after isolation comparison diagram

### 3 地震响应分析

#### 3.1 选波依据

本文所研究750 kV避雷器设备位于青海某地区,该区域地震烈度为Ⅷ度,对于超高压电气设备,其设计时的抗震设防要求应提高一度进行设防<sup>[4]</sup>,故该750 kV避雷器采用Ⅸ度进行抗震设防设计。该场地类别为Ⅱ类,场地基本加速度为0.4 g,场地特征周期为0.45 s, International Building Code 2015<sup>[25]</sup>中对Ⅱ类场地进行分类,依据该指标于peer地震动数据库中筛选下载所需地震波共10条。在ABAQUS中将其峰值加速度调幅为0.4 g,并按照1:0.85:0.65的比例进行x、y、z三向输入,作用于避雷器有限元模型钢支柱底部。所输入的10条地震波加速度反应谱以及场地需求反应谱见图8,选取的地震波加速度反应谱能够很好地达到包络场地需求反应谱的要求,使得有限元模拟更接近真实地震下设备结构响应,为后续对比分析提供合理性保障。

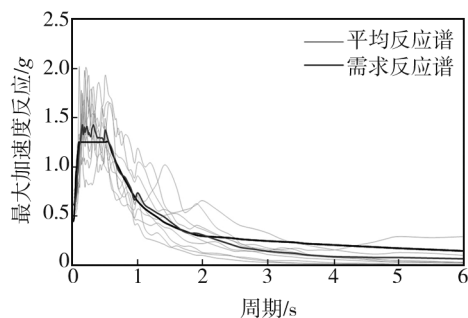


图8 10条地震波加速度反应谱及需求反应谱  
Fig. 8 10 earthquake waves acceleration response spectra and demand response spectra

#### 3.2 根部应力对比分析

由于支柱类设备的结构特点以及套管部分陶瓷的材料特性,地震作用下避雷器主体设备的套管根部由于应力较大,更易发生破坏现象,导致结构失效。以El Centro波为例,将调幅后峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)为0.4 g的地震动数据在有限元软件中进行三向输入,作用于上述各有限元模型支承结构底部,得到套管根部应力响应时程,见图9。

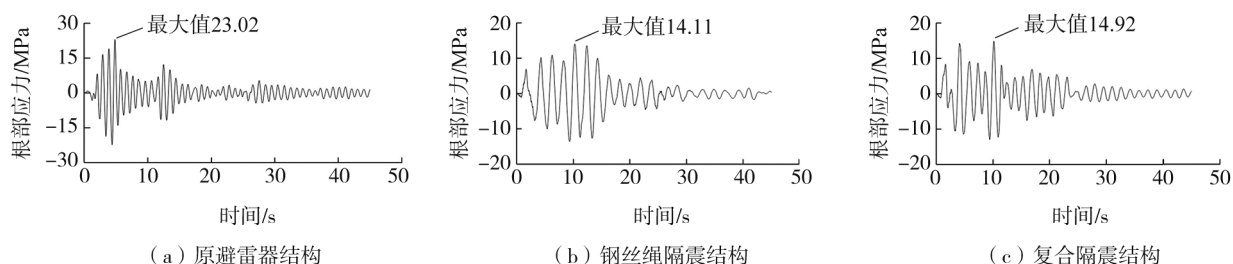


图9 各结构模型套管根部应力响应时程图

Fig. 9 Time-history diagram of stress response at bushing root in each structural model

有限元模拟结果显示,在 PGA 为 0.4 g 的地震动作用下,原避雷器结构套管根部应力峰值达到 23.02 MPa,地震过程中结构处于非线性状态,进入塑性,2018 年 IEEE 最新版标准中,对套管材料最大许用应力进行了规定,其可达极限应力的 50%<sup>[26]</sup>,根据避雷器制造厂家所提供,陶瓷材料极限强度为 50 MPa,有限元模拟结果接近陶瓷材料破坏强度 25 MPa,安全系数较低,地震作用下结构处于不安全状态。安装施加钢丝绳阻尼器进行中间层隔震后,套管根部应力峰值降低至 14.11 MPa,减小 8.91 MPa,下降幅度为 38.71%,具有较好的隔震效果。而对于安装复合隔震支座的隔震结构,套管根部应力由于竖向刚度的提升有小幅增大,达到 14.92 MPa,仅升高 5.74%,且相较于原结构应力峰值下降依旧较为显著,下降幅度仍然达到 35.19%,结构处于安全状态。

### 3.3 加速度对比分析

考虑到支柱类设备结构特性,地震作用下结构加速度随高度升高而增大,设备顶部加速度响应是结构在地震作用下的另一参考指标,顶部加速度过大易导致设备结构失效。提取各有限元模型在 PGA 为 0.4 g 的 El Centro 波下其结构顶部加速度响应,时程曲线见图 10。

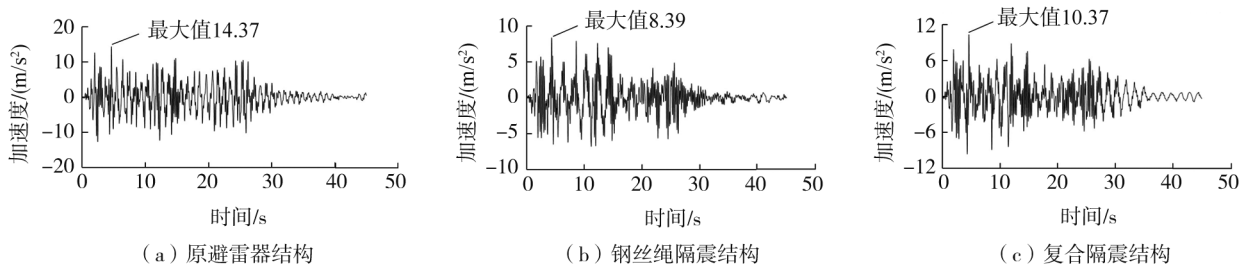


图 10 各结构模型顶部加速度响应时程图

Fig. 10 Time-course diagram of top acceleration response in each structural model

由图 10 可知,原避雷器结构顶部峰值加速度为 14.37 m/s<sup>2</sup>,设备易损性较高<sup>[21]</sup>。在进行钢丝绳阻尼器隔震后,结构顶部加速度峰值下降至 8.39 m/s<sup>2</sup>,共减小 5.98 m/s<sup>2</sup>,下降幅度为 41.61%,在加速度控制方面,钢丝绳阻尼器依旧可以达到较好的隔震效果。对于安装复合隔震支座的隔震结构,其顶部加速度峰值存在小幅回弹,达到 10.37 m/s<sup>2</sup>,但该中间层隔震效率仍保持良好,峰值加速度下降幅度达到 27.84%,结构安全性得到提升。

为探究结构峰值加速度随设备高度的变化情况,采用设备结构各部位峰值加速度比对隔震效率进行进一步表征。提取设备沿高度变化部分关键部位的峰值加速度,包括基础、套管根部、套管中部以及上述结构顶部,见图 11,进行分析比对。由对比图可知,设备结构加速度峰值随高度呈现非线性增长,且中间层隔震装置的施加显著减弱了套管根部的加速度响应,进而导致上部结构的加速度响应同步下降,对下部支承结构并未有显著的影响,在中间层达到隔震的效果。

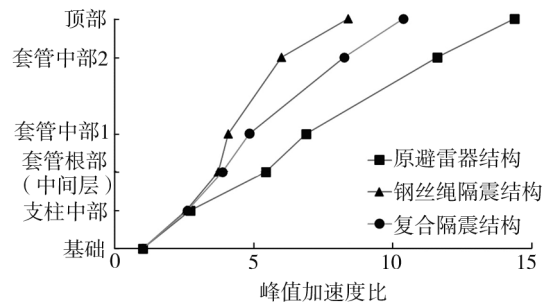


图 11 各结构模型关键部位峰值加速度

Fig. 11 Peak acceleration of key parts of each structural model

### 3.4 位移对比分析

避雷器设备在工作状态下通常与其余电气设备在顶部通过导线相连接,设备间处于耦合状态,并非独立工作。地震状态下,支柱类设备顶部会产生较大位移,当位移过大时,易导致导线的牵拉破坏至结构失效,因此设备的顶部位移亦是需要关注的指标。提取各有限元模型在 PGA 为 0.4 g 的 El Centro 波下其结构顶部位移响应,时程曲线见图 12。位移时程显示,原避雷器结构顶部位移峰值为 0.182 m,可被导线伸缩冗余度所覆盖,而钢丝绳阻尼器隔震结构的顶部位移峰值高达 0.383 m,较原结构上升 110.32%,虽在根部应力及顶部加速度方面达到了较好的控制效果,但结构位移响应过大,仍会导致设备出现结构破坏。对于安装复合隔震支座的隔震结构,在增设高强弹簧后,其顶部峰值位移较钢丝绳阻尼器隔震结构有较为显著的下降,降低至 0.226 m,下降幅度为 41.08%,但仍略高于原避雷器结构,上升幅度控制在 23.93%,结构受导线牵拉作用较小,达到位移控制的目的。

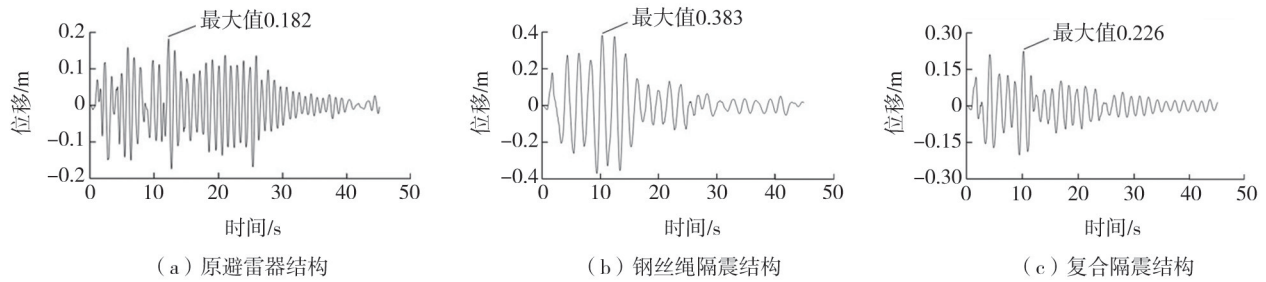


图 12 各结构模型顶部位移响应时程图

Fig. 12 Time-history diagram of top displacement response in each structural model

采用设备结构各关键部位与基础相对位移峰值对比进一步体现位移控制效果,提取设备沿高度变化部分关键部位的相对位移峰值,见图 13。对比各结构关键部位相对位移峰值,钢丝绳隔震结构相对位移峰值在中间层处增长趋势最快,且显著高于其余 2 种结构,说明钢丝绳阻尼器对结构的位移放大效果过大,不利于保障结构安全性。对于安装复合隔震支座的隔震结构,其位移增长趋势与原结构类似,保持小幅增长,至结构顶部仅相差 0.04 m,是在达到较好隔震效果的同时,对位移进行的有效控制。

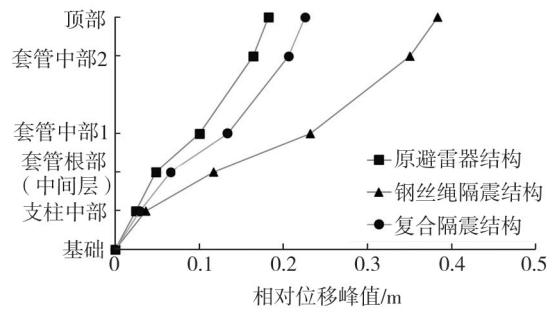


图 13 各结构模型关键部位峰值位移

Fig. 13 Peak displacement of key parts of each structural model

### 3.5 隔震效率分析

为进一步讨论该中间层隔震装置的适用性,消除偶然性案例,对所选取的 10 条地震波按前述方法依次输入有限元软件进行分析,选取的地震波对应编号见表 2。得到各地震波下各有限元模型的根部应力响应、顶部加速度响应以及顶部位移响应,并提取各响应峰值各 10 组进行比对,计算钢丝绳隔震结构与复合隔震结构根部应力隔震效率、顶部加速度隔震效率以及顶部峰值位移比,见图 14~图 16。

表 2 10 组地震波及其编号

Table 2 10 groups of seismic waves and their numbers

序号	PEER 编号	地震波	台站	震级	震中距/km
1	RSN66	San Ferando	Hemet Fire Station	6.61	154.35
2	RSN4031	San Simeon	Templeton-1-story	6.52	6.22
3	RSN11	Northwest Calif-03	Femdale City Hall	5.8	56.85
4	RSN1158	Kocaeli	Duzce	7.51	15.37
5	RSN1527	Chi-Chi	TCU100	7.62	43.51
6	RSN82	San Fernando	Port Hueneme	6.61	81.25
7	RSN22	El Alamo	El Centro Array #9	6.8	122.27
8	RSN1184	Chi-Chi	CHY010	7.62	51.84
9	RSN1101	Kobe	Amagasaki	6.9	11.34
10	RSN35	Northern Calif-06	Hollister City Hall	5.2	39.53

在 10 组地震波下,钢丝绳隔震结构根部应力隔震效率分布于 38.7%~87.2%,顶部加速度隔震效率分布于 27.7%~59.5%;顶部位移控制存在不稳定现象,峰值位移普遍放大,峰值位移比最大可达 2.37。而复合隔震结构相较于钢丝绳隔震结构,在根部应力及顶部加速度隔震方面,根部应力隔震效率分布于 35.2%~68.1%,

顶部加速度隔震效率分布于 27.4%~55.6%,性能依旧保持良好;顶部位移控制效果得到改善,峰值位移比最大降低至 1.67,部分地震波下,隔震前后位移峰值不增反降,达到位移控制的目的。

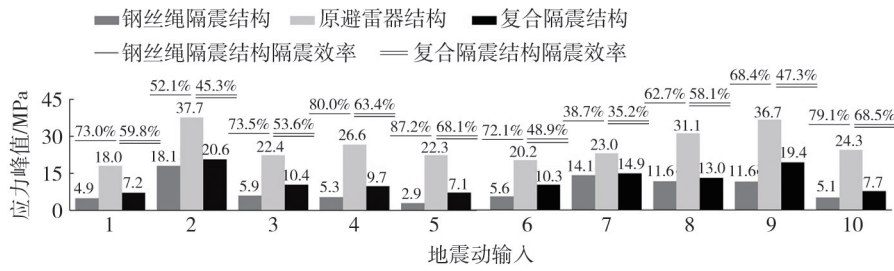


图 14 10 组地震波下各结构根部应力峰值及隔震效率

Fig. 14 Peak stress at the root and seismic isolation efficiency of each structure under 10 seismic waves

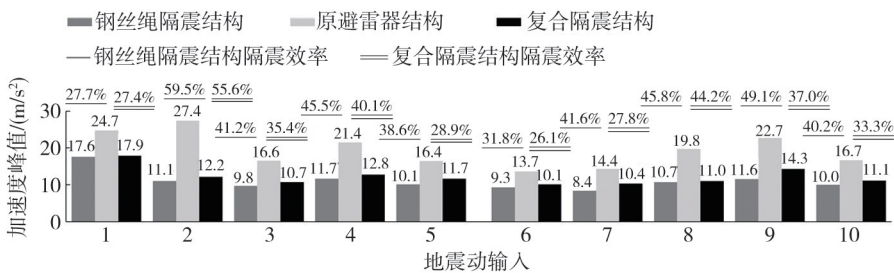


图 15 10 组地震波下各结构顶部加速度峰值及隔震效率

Fig. 15 Peak top acceleration and seismic isolation efficiency of each structure under 10 seismic waves

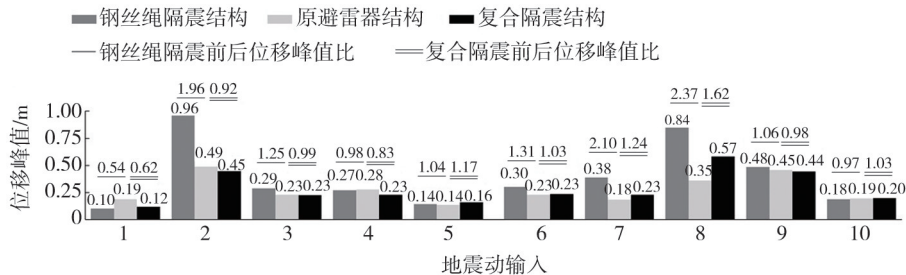


图 16 10 组地震波下各结构顶部位移峰值及隔震前后比

Fig. 16 Peak top displacement and seismic isolation ratio of each structure under 10 seismic waves

为概括性描述 10 组样本数据,控制数据离散型,引入其统计值  $N$ ,假定各地震响应峰值符合正态分布,且置信区间为 95%,则

$$N = \mu + 1.645\sigma \tag{3}$$

式中:  $\mu$  为样本数据平均值;  $\sigma$  为样本数据标准差。

按上述方法根据各有限元模型地震响应峰值数据,得到 10 组应力峰值、加速度峰值及位移峰值统计值。

在 10 组地震波作用下,原避雷器结构根部应力峰值统计值为 36.80 MPa,钢丝绳隔震结构和安装复合隔震支座的隔震结构均不同程度降低套管根部应力,其统计值分别为 16.29、19.64 MPa,后者下降幅度达到 46.63%;原避雷器结构顶部加速度峰值统计值为 26.53 m/s<sup>2</sup>,隔震结构顶部加速度峰值统计值分别为 16.29、19.64 m/s<sup>2</sup>,安装复合隔震支座的隔震结构与钢丝绳隔震结构在加速度方面提升幅度较应力更小,仅提升 3.35 m/s<sup>2</sup>,于原结构仍保持较高的下降幅度,达到 40.17%;在位移方面,原避雷器结构顶部位移峰值统计值为 0.46 m,钢丝绳隔震结构顶部位移峰值统计值远高于原结构,达到 0.84 m,安装复合隔震支座的隔震结构可以有效遏制位移提升过大的现象,其统计值为 0.51 m,较原结构仅上升 12.26%。

综上,10 组地震响应数据排除了单条地震波分析带来的偶然性,表明安装复合隔震支座的隔震结构对避雷器套管根部应力有较大的减弱作用,同时可以遏制顶部位移的进一步增大,达到良好且有效的隔震作用。

## 4 结论

本文通过对既有 750 kV 避雷器原始结构及 2 种中间层隔震结构进行有限元建模,对比分析各结构在 10 组 PGA 为 0.4  $g$  地震波下应力、加速度及位移响应,分析隔震结构隔震效率。得到以下结论:

1) 地震作用下,钢丝绳阻尼器中间层隔震结构能有效降低避雷器套管根部应力及顶部加速度,但对顶部位移放大作用过大,易造成导线牵拉对设备的不利影响。

2) 带有复合隔震支座的中间层隔震方案能够提升中间层结构竖向刚度,使原结构套管根部应力及顶部加速度峰值下降幅度均超 40%,同时控制顶部位移峰值仅提升 12.56%,达到良好的隔震效果。

3) 带有复合隔震支座的中间层隔震装置具有较好的隔震效率,是提升既有 750 kV 避雷器抗震性能的有效改造措施。

## 参考文献:

- [1] 谢强. 变电站换流站设备抗震理论及工程应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.  
XIE Qiang. Anti-seismic theory and engineering application of converter station equipment in substation [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2023. (in Chinese)
- [2] XIE Q, ZHU R Y. Earth, Wind, and Ice [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2011, 9(2): 28-36.
- [3] 程永锋, 朱全军, 卢智成. 变电站电力设施抗震措施研究现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 84-89.  
CHENG Yongfeng, ZHU Qianjun, LU Zhicheng. Progress and development trend on seismic measures of electric power equipments in transformer substation[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 84-89. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] HEC, XIE Q, YANG Z Y, et al. Seismic evaluation and analysis of 1100-kV UHV porcelain transformer bushings[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 123: 498-512.
- [6] 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)
- [7] 孙宇晗, 程永锋, 卢智成, 等. 1100 kV 复合外绝缘套管地震模拟振动台试验研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3224-3230.  
SUN Yuhan, CHENG Yongfeng, LU Zhicheng, et al. Study on earthquake simulation shaking table test of 1100 kV composite external insulation bushing[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3224-3230. (in Chinese)
- [8] 王晓游, 谢强, 罗兵, 等.  $\pm 800$  kV 穿墙套管的 seismic 响应与振动控制[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 16-22.  
WANG Xiaoyou, XIE Qiang, LUO Bing, et al. Seismic responses and vibration control of  $\pm 800$  kV wall bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 16-22. (in Chinese)
- [9] ALESSANDRI S, GIANNINI R, PAOLACCI F, et al. Seismic retrofitting of an HV circuit breaker using base isolation with wire ropes. Part 1: Preliminary tests and analyses[J]. Engineering Structures, 2015, 98: 251-262.
- [10] YANG Z Y, XIE Q, HE C, et al. Isolation design for slender ultra-high-voltage composite equipment using modal parameters considering multiple responses[J]. Engineering Structures, 2019, 200: 109709.
- [11] 谢强, 杨振宇, 何畅. 带减震支座的 T 型开关设备地震响应分析及试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(1): 54-61.  
XIE Qiang, YANG Zhenyu, HE Chang. Seismic responses analysis and experimental study of T-shape switch equipment with base isolation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(1): 54-61. (in Chinese)
- [12] 石高扬, 谢强. 在运变电站电流互感器隔震改造仿真及应用研究[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 189-195.  
SHI Gaoyang, XIE Qiang. Simulation and application research on seismic isolation transformation of current transformer in operated substation[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 189-195. (in Chinese)
- [13] CHENG Y F, LI S, LU Z C, et al. Seismic risk mitigation of cylindrical electrical equipment with a novel isolation device[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 111: 41-52.
- [14] GÖKÇE T, YÜKSEL E, ORAKDÖĞEN E. Seismic performance enhancement of high-voltage post insulators by a polyurethane spring isolation device[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2019, 17(3): 1739-1762.
- [15] 张毅, 夏旭忆, 李海洋, 等. 模块式金属隔震支座设计方法与试验研究——以电流互感器为例[J]. 工程力学, 2024, 41(10): 212-224.  
ZHANG Yi, et al. Design method and experimental study on modular metal seismic isolation bearing a case study of current transformer[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(10): 212-224. (in Chinese)
- [16] 李吉超, 尚庆学, 罗清宇, 等. 厚层橡胶支座的力学性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(9): 157-165.  
LI Jichao, SHANG Qingxue, LUO Qingyu, et al. Tests for mechanical performance of thick rubber bearings[J]. Journal of Vibration and Shock,

- 2019, 38(9): 157-165. (in Chinese)
- [17] BAI W, MOUSTAFA M A, DAI J W. Seismic response of potential transformers and mitigation using innovative multiple tuned mass dampers[J]. *Engineering Structures*, 2018, 174: 67-80. (in Chinese)
- [18] 柏文, 戴君武, 周事蒙, 等. 基于 MRTMD 的瓷柱型电气设备减震技术研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 36(3): 111-117.  
BO Wen, et al. Damping method for porcelain cylindrical electrical equipment based on MRTMD[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2016, 36(3): 111-117. (in Chinese)
- [19] 石高扬, 谢强. 支柱类电气设备中间层三维隔震振动台试验研究[J]. *土木工程学报*, 2025, 58(2): 1-9.  
SHI Gaoyang, XIE Qiang. Shaking table test study of post-electrical equipment with three-dimensional isolation in the intermediate layer [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2025, 58(2): 1-9. (in Chinese)
- [20] XIEQ, YANG Z Y, HE C, et al. Seismic performance improvement of a slender composite ultra-high voltage bypass switch using assembled base isolation[J]. *Engineering Structures*, 2019, 194: 320-333.
- [21] 李吉超, 尚庆学, 罗清宇, 等. 基于双对数正态分布的电瓷型电气设备地震易损性研究[J]. *工程力学*, 2024, 41(2): 125-136.  
LI Jichao, SHANG Qingxue, LUO Qingyu, et al. Double logarithmic distribution based seismic fragility analysis of porcelain electrical equipment [J]. *Engineering Mechanics*, 2024, 41(2): 125-136. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] DEMETRIADES G F, CONSTANTINOU M C, REINHORN A M. Study of wire rope systems for seismic protection of equipment in buildings[J]. *Engineering Structures*, 1993, 15(5): 321-334.
- [24] 何清清, 杨振宇, 谢强, 等.  $\pm 800$  kV 直流旁路开关地震响应及减震措施[J]. *高压电器*, 2018, 54(2): 39-45.  
HE Qingqing, YANG Zhenyu, XIE Qiang, et al. Seismic responses and seismic resistance measure of  $\pm 800$  kV direct current bypass switch[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(2): 39-45. (in Chinese)
- [25] International Code Council. International building code (IBC) [S]. International Code Council, 2015.
- [26] International Code council. 2018 International building code (IBC) [S]. International Code Council, 2018.