第 50 卷 第 11 期：5005-5013　　高电压技术　　Vol.50, No.11: 5005-5013
2024 年 11 月 30 日　　High Voltage Engineering　　November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240636

甘肃积石山6.2级地震750 kV避雷器震害统计及损伤机理分析

石高扬[1]，薛志航[2]，谢　强[1]，刘　凡[2]
（1. 同济大学土木工程学院，上海 200092；2. 国网四川省电力公司电力科学研究院，成都 610041）

摘　要：变电站避雷器在地震作用下具有较高的易损性。2023 年 12 月 18 日，甘肃积石山发生 M_S 6.2 级地震，造成 750 kV 变电站的避雷器破坏。为了研究 750 kV 避雷器的地震破坏机理，对该变电站进行了震害现场调研，给出了避雷器不同的破坏现象和地震易损性，采用有限元分析模拟地震作用下避雷器的地震响应，分析震害机理，给出抗震性能提升措施。结果表明：避雷器的破坏模式有根部法兰处瓷套断裂、顶部导线牵拉变形、相邻设备碰撞引起的短路故障等；避雷器瓷套根部的应力响应随着支架刚度的增加呈现出先下降后保持水平的趋势，电流互感器-避雷器耦联结构的基频差异导致设备顶端相对位移过大进而引起导线牵拉破坏；采用格构式钢支架和减隔震装置可以增加避雷器的地震安全裕度，提升电气设备的抗震性能。
关键词：积石山地震；避雷器；震害调研；损伤机理；减隔震措施

Disaster Investigation and Seismic Damage Mechanism Analysis of 750 kV Arresters in the Jishishan 6.2-Magnitude Earthquake in Gansu Province

SHI Gaoyang[1], XUE Zhihang[2], XIE Qiang[1], LIU Fan[2]
(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: Substation arrester has a high vulnerability to earthquakes. An M_S (surface wave magnitude) 6.2 earthquake occurred in the Jishishan region (in Gansu Province of China)on December 18th, 2023. The massive arresters in a 750 kV substation lost electrical function by the earthquake. In order to study the seismic damage mechanism of the 750 kV arrester, this paper conducts a field investigation on the seismic damage of the substation and gives different damage modes and seismic vulnerability of the arrester. The finite element analysis is used to simulate the seismic response of the arrester under the action of earthquake, and the mechanism of seismic damage is analyzed. The results show that the failure modes of the arrester include the fracture of porcelain sleeve at the bottom of bush, the traction deformation of the conducting wire, and the short-circuit fault caused by the collision of adjacent equipment. With the increase in the stiffness of the steel support, the stress response at bottom of porcelain sleeve shows a trend of decreasing first and then maintaining the level. The relative displacement at the top of coupling structure with different fundamental frequencies (current transformer and arrester connected by conduct wire) reaches its maximum allowable displacement value, which leads to traction damage. The use of lattice steel support and seismic isolation devices can increase the seismic safety margin of arresters and improve the seismic performance of electrical equipment.
Key words: Jishishan Earthquake; arresters; seismic disaster investigation; damage mechanism; seismic isolation measures

0　引言

2023 年 12 月 18 日在甘肃临夏州积石山县发生 6.2 级地震，震源深度为 10 km，地震最大烈度达到Ⅷ度，地震造成了人员伤亡和房屋倒塌等破坏[1-2]。“西电东送”解决了我国电力生产与消费呈逆向分布的问题，为经济发展提供了能源保障[3]。然而，输电线路中的变电站往往不可避免地建立在地震频发的地区，电气设备在地震中具有高易损性，影响着电力系统的安全运行[4-5]。

历次震害调研表明电气设备损坏会造成变电站功能受损，进而造成电力系统的失效。1976 年唐

基金资助项目：四川省科技计划项目(2023YFG0089).
Project supported by Science and Technology Program of Sichuan Province (2023YFG0089).

山 7.8 级地震中，33 座变电站功能失效，数量众多的瓷质套管出现断裂和错位的情况，避雷器的损害率达到 66%[6]。2008 年汶川 8.0 级地震造成 90 座 110 kV 及以上电压的变电站停运，包括变压器、避雷器、隔离开关等多种类型的电气设备均遭受严重的损害[7]。2013 年芦山 7.0 级地震造成 24 座变电站和 224 条输电线路遭受破坏，其中包括 2 座 500 kV 的变电站部分受损[8]。2022 年泸定 6.8 级地震造成 6 座 110 kV 以上变电站停运，其中包括 3 台 500 kV 变压器套管漏油[9]。国外地震灾害调研中，地震除了造成电力设备的破坏，还出现了严重的次生灾害，如 1989 年 Oakland 地震造成停电，引发了大面积火灾[10]；1994 年 Northridge 地震引发场地液化和滑坡，进而引发输电塔的倒塌[11]；2011 年东日本大地震引发海啸，进而引起福岛核泄漏事故[12]；2023 年土耳其地震造成大规模停电，进而引发交通运输中断[13]。

支柱类设备是变电站最常见的电气设备，包括避雷器、隔离开关、电流互感器、电压互感器等由套管和支架组成的长悬臂结构，该类设备套管一般采用瓷质或环氧树脂等脆性材料组成，设备整体质量集中于支架以上，具有重心高、抗弯刚度低等特点，在地震作用下易发生脆性断裂。近年来很多学者采用有限元模拟和振动台试验的方式对电气设备的支架放大效应以及套管的抗震能力进行研究[14-15]，提出了提升电气设备抗震性能的有效方式[16-18]。

本文对受到积石山地震影响的 750 kV 超高压变电站进行震损调研，与汶川地震进行对比，利用有限元模型模拟地震作用下设备的破坏过程，研究避雷器设备的地震受损机理和抗震性能提升措施，对地震后电气设备的评估和避雷器的抗震加固提出合理的依据和措施。

1 地震灾害调研

1.1 避雷器震害特征

避雷器主要是由钢支架、安装法兰、多段瓷套、均压环组成的支柱类设备，这一类设备在结构形式属于长悬臂类结构，且顶部具有集中质量。避雷器设备瓷套根部在地震作用下承受较大的弯矩，容易造成陶瓷材料的断裂以及胶装法兰的撕裂等破坏；同时避雷器顶部位移过大会导致导线引起瞬时的冲击荷载作用，引起相邻设备之间的牵拉破坏，超高压 750 kV 变电站地震后现场如图 1 所示。

在 2023 年积石山 6.2 级地震的灾害调研过程中，距离震源 20.8 km 的超高压变电站内电气设备遭受严重损害，其中包括 1 支 750 kV 变压器高压侧套管、21 支 750 kV 避雷器、9 支 750 kV 电压互感器、30 支 330 kV 避雷器、33 支 330 kV 电压互感器。根据现场调研数据，避雷器破坏情况可分为 4 种：1）瓷套管根部完全断裂；2）胶状法兰处出现裂纹；3）母线与设备连接处脱开；4）相邻设备碰撞引起短路故障。

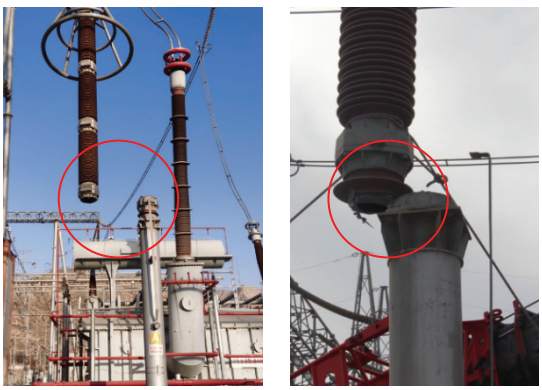
1.1.1 瓷套根部完全断裂

此类破坏主要表现为避雷器的瓷套管根部的出现脆性断裂破坏，破坏原因为地震作用下根部瓷套管承受的弯矩作用急剧增加，导致陶瓷材料的应力超过其极限强度，发生脆性断裂破坏。如图 2 所示，避雷器瓷质套管与钢支架完全脱离，形成 2 个分离的部分，底部支架不再为避雷器套管提供支撑作用，此时瓷套重力完全由避雷器顶部的连接母线承受。当连接母线承受拉力时，会进一步引起相邻设备的牵拉破坏，造成灾害在电气设备之间的蔓延。



图 1 超高压变电站震后设备现场图

Fig.1 Post-earthquake equipment scene of EHV substation



(a) 短瓷套顶部法兰处断裂 (b) 短瓷套底部法兰处断裂

图 2 避雷器瓷套根部断裂破坏

Fig.2 Fracture at the bottom of arrester porcelain sleeve

1.1.2　胶装法兰处裂纹

此类破坏主要发生在避雷器的法兰连接部位，表现为法兰连接处的断裂或移位。由于法兰连接的横截面面积不足或法兰与瓷质套管连接不紧密，导致连接强度不满足要求，使得地震作用下法兰连接处发生断裂移位。如图 3 所示，避雷器陶瓷套管为脆性材料，在地震作用下，当其受到的应力超过极限承载力时，瓷质材料不进入塑性阶段而发生裂纹，引起瓷套的整体倾斜。

1.1.3　母线与设备连接处脱开

在变电站中，避雷器通常通过母线与不同的电气设备连接，组成具有特定功能的回路。地震作用下，不同类型的电气设备由于顶部位移响应的差异，导致连接母线的突然张紧或松弛，并通过母线传递相互作用力。当连接母线的相互作用超过连接金具的承载能力极限时，电气设备顶端的母线连接件被拉断。如图 4 所示，避雷器顶部软母线在连接处脱落，当母线与绝缘子连接处较薄弱时，软母线连接金具被相互作用力拉断，造成断路进而影响电气功能。

1.1.4　相邻设备碰撞引起短路故障

此类破坏主要发生在相邻设备断裂倾倒后，与相邻电气设备的金属导体处碰撞，造成输电线路的短路故障。如图 5 所示，电压互感器倾倒后与避雷器法兰处碰撞引起短路故障，过大的电流引起电压互感器和避雷器瓷套根部外表面灼烧变黑，导致整个回路故障进而影响整体变电站功能。

1.2　与历次地震破坏情况对比

根据四川电力公司关于汶川 M_S 8.0 级地震各变电站避雷器损害状况统计[7]，110 kV 以上避雷器瓷套根部断裂 23 具，整体倾倒 24 具，其他类型的破坏 6 具。图 6 为汶川地震中的避雷器破坏类型，典型的破坏特征为瓷套根部断裂和整体倾斜。从破坏类型上看，瓷质材料强度不足和顶部牵拉破坏为主要的震害模式，这 2 次地震都属于逆冲型、浅源地震，对电气设备造成的损伤程度高，破坏特征具有高度的相似性。不同的是，汶川地震遭到破坏的避雷器设备采用混凝土支架或钢管支架，与本次避雷器设备支架相比，支架的加速度放大效应更加明显，破坏的数量和破坏程度更加严重。

本次地震与近 3 年以来的 M_S 6 级以上地震相比，具有以下特点：

1）地质条件不同。地震引发的大规模黄土液化流滑位于青海省中川乡，液化源区场地的平均剪切波速为 202 m/s[19]。变电站所在场地距离液化流滑区的直线距离为 3.52 km，所属场地为Ⅱ场地第 3 组。

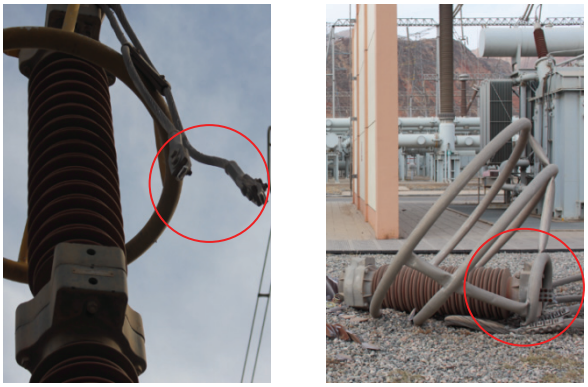
2）最大峰值加速度为历次之最。本次地震测得最大加速度的观测台站位于青海省官亭镇，最大



(a) 瓷套整体倾斜　(b) 法兰连接处断裂

图 3　避雷器法兰连接处破坏

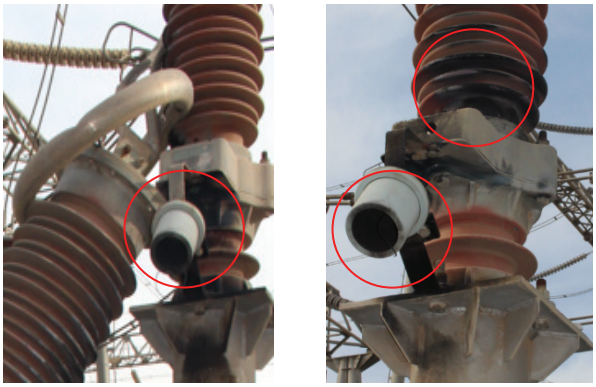
Fig.3　Damage at the connection flange of arrester



(a) 设备断裂后母线脱开　(b) 顶部软导线断裂

图 4　避雷器母线与设备脱开破坏

Fig.4　Disconnect damage of conduct wire and arrester



(a) 相邻设备碰撞　(b) 短路引起灼烧

图 5　相邻设备碰撞引起短路故障

Fig.5　Short circuit failure caused by collision of equipment

加速度为 1.195g[2](g=9.8 m/s² 表示重力加速度)，明显大于漾濞 Ms 6.4 级即地震(0.7g，2021 年)，大于芦山 Ms 6.1 级地震(0.5g，2022 年)，也大于泸定 Ms 6.8 级地震(0.9g，2022 年)。

3）抗震设防烈度小于实际遭遇地震动。变电站所在区域中Ⅱ类场地基本地震动峰值加速度值为 0.1g[20]，抗震设防烈度提高一度(0.2g)与实际遭遇地震存在较大差异，结构设防水平无法抵抗罕遇地震。

1.3 避雷器的地震易损性

结构的地震易损性可以描述地震动强度与结构破坏概率之间的关系，通过经验法、专家判断法、解析法和混合法[21]求得。采用震害调研是获取电气设备地震易损性最直接的方法，但该方法依赖大量完整的震害统计数据；在实际的设备地震易损性评估中，往往采用有限元和理论分析的方法进行。

假设在某一特定的地震强度下，避雷器结构的地震响应超过特定限值的概率密度服从自由度为 $n-2$ 的 t 分布，采用概率地震需求模型可以求解得到每一个谱加速度对应的设备地震失效概率[21-22]。选取变电站所在场地类型下的天然地震波，采用增量动力分析方法(incremental dynamic analysis，IDA)求解每一个地震强度下避雷器设备的关键地震响应，对结果数据进行分析。将选择的 30 条Ⅱ类场地天然地震波的平均反应谱与需求反应谱进行对比，选取阻尼比为 2%，如图 7 所示；所选地震波的反应谱与规范中的需求谱相符度高，所选地震波可以用于评估避雷器设备的地震易损性。

根据上述震害调研结果，选取 2 种不同的失效模式作为 750 kV 避雷器设备的失效判据：避雷器瓷套根部的最大应力达到 40 MPa 时，结构发生根部陶瓷断裂失效；避雷器顶部位移达到 200 mm 时，顶部连接母线发生牵拉破坏导致避雷器失效。利用概率地震需求模型得到不同谱加速度值下失效概率，计算得到避雷器的地震失效易损性曲线如图 8 所示。根据变电站周边观测台站的谱加速度值与自振周期的关系曲线[23]，积石山地震中避雷器设备自振周期对应的谱加速度值 S_a 为 8.34 m/s²，通过易损性计算获得失效概率 p 为 40.5%，而实际震害调研中地震易损性的概率为 42.5%，易损性的误差主要来源于 2 个方面：1）与地震动选取相关，积石山地震存在明显的软土特征，本文选用 30 条地震动中包含Ⅱ类场地中不同剪切波速，地质条件的差异引起易损性误差；2）损伤条件的判断，地震破坏应力和破坏位移取自于试验值，与本次易损性失效判据存在误差。



(a) 根部断裂　　(b) 整体倾倒

图 6　2008 年汶川地震中的避雷器破坏

Fig.6　Damage of arrester in Wenchuan earthquake (in 2008)

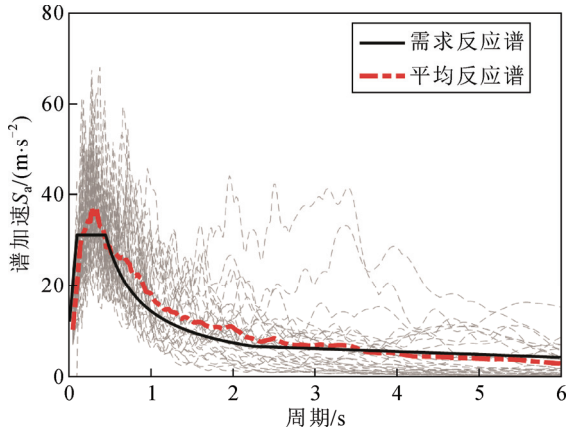


图 7　场地设计谱与平均反应谱对比

Fig.7　Comparison of site design spectrum and average response spectrum

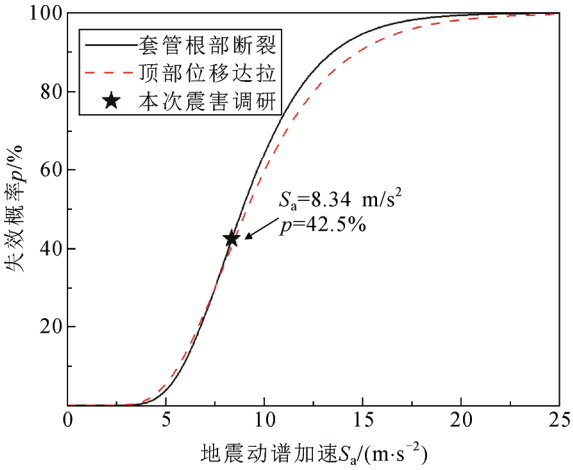


图 8　不同失效判据下的易损性曲线

Fig.8　Vulnerability curves under different failure criteria

2　避雷器震害机理分析

2.1　设备的基本频率

根据国家地质安全监测台网加速度监测点位置，本次调研变电站所在场地与积石山地震震中距为 20.8 km，地震科学数据中心的数据显示震中距为 12~22 km 之间的强震观测台站共有 3 个，分别是 GS.N002B 台站(地震动峰值加速度为 1.10*g*)、GS.N0028 台站(地震动峰值加速度为 0.91*g*)、GS.B0040 台站(地震动峰值加速度为 0.41*g*)，变电站所在场地与观测台站的位置关系如图 9 所示。根据积石山 M_S 6.2 级地震烈度区划图[2]，变电站所在区域为地震烈度Ⅷ度区。

根据地震观测记录[23]，最大加速度台站采集到的地震的卓越频率为 1~10 Hz，与超高压电气设备的基本频率接近，地震动的中高频成分丰富，反应谱在 0.1~1.0 s 周期段远超当地设防烈度 7 度对应的罕遇地震设计谱，也超过了《电力设施抗震设计规范》(GB50260—2013)中 9 度设防烈度对应的罕遇地震设计谱[24]，如图 10 所示。750 kV 避雷器设备基频 f=1.28 Hz，周期 T=0.78 s，与地震影响系数的峰值区域重合，在地震作用下易发生类共振反应，造成电气设备的地震响应增大。电气设备遭受超过设防水平的地震作用、设备基频与地震卓越周期接近、设备自身的抗震设防水平不足是造成本次震害的主要原因。

2.2　支架的放大作用

避雷器等支柱类设备采用预制混凝土管、圆钢管以及格构式钢支架等作为电气设备的支承结构，这种钢支架的弯曲刚度受到焊接材料选用和结构形式的影响。不同的钢结构支架设计会导致抗弯刚度不同，如图 11 所示。从而引起避雷器设备在地震作用下的响应差异，根据《电力设施抗震设计规范》中的规定[24]，若仅作电气设施本体的抗震设计时，地震输入加速度应乘以支承结构动力反应放大系数，其支架的动力反应放大系数的取值不宜小于 1.2。根据 750 kV 避雷器有限元分析结果，原设备支架放大系数在水平 2 个方向和竖直方向的值分别为 1.44、1.19 和 1.01。支架的放大系数和地震动时程有关，不同地震输入时放大系数可能远超 1.2，大于规范取值[25]。建议规范可以适当提高放大系数取值以提升罕遇地震下电气设备的抗震裕度。

采用有限元方法建立不同支架的有限元模型，

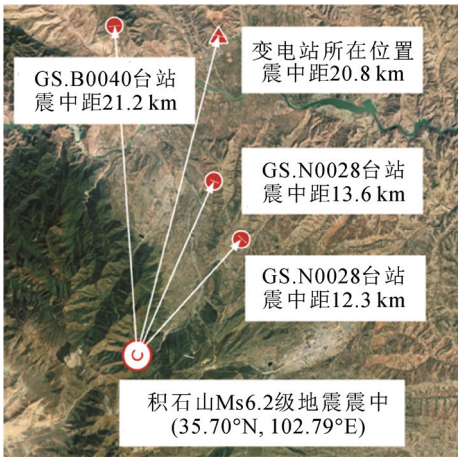


图 9　积石山地震观测台站分布图

Fig.9　Map of observation station of Jishishan Earthquake

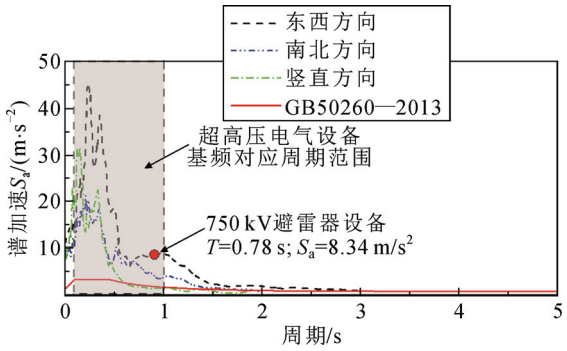


图 10　地震谱加速度与设备基频关系图[23]

Fig.10　Relationship between spectral acceleration and fundamental frequency of equipment[23]

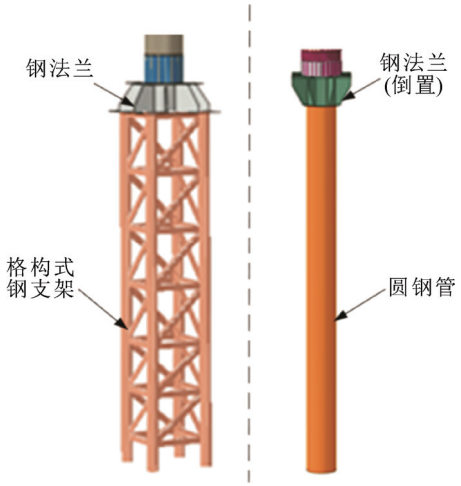


图 11　不同形式的避雷器设备支架

Fig.11　Different types of arrester steel support

通过改变支架的形式用以改变支架的抗弯刚度，对不同抗弯刚度的支架进行地震响应的求解，选取套管根部应力和顶部位移为测量点进行参数分析。在

5 条天然地震动输入情况下，避雷器瓷套根部的应力与支架抗弯刚度的关系如图 12 所示。不同地震波输入情况下，避雷器套管的响应具有较强的离散性；选取所有地震响应的平均值进行参数影响趋势分析可以发现，随着避雷器支架抗弯刚度的增加，避雷器瓷套根部的应力呈现出先下降后保持水平的趋势。本次震害避雷器采用的支架设计弯曲刚度值为 3.47×10^7 N·m，用格构式支架代替圆钢管支架可以增加抗弯刚度，降低避雷器设备的抗震性能；但刚度增加到 1.66×10^8 N·m 时，继续加固支架对抗震性能的提升微弱。

2.3 均压环质量的影响

超高压及其以上电压等级的电气设备顶部结构除了几何尺寸较小的导线连接装置之外，还具有一定不可忽略的均压环结构，具有明显“高、大、重、柔”的结构特点，含有顶部集中质量的高阶振型对设备动力响应的影响不可忽略。

支柱类设备顶部集中质量和转动惯量对地震响应的影响可以使用分布参数的理论模型进行计算得到[17]，在结构顶部加速度、顶部位移和根部应力这 3 个地震响应中，加速度响应是以上 3 个响应中唯一与集中质量变化呈负相关的响应，其减小趋势具有非线性特征：加速度减小趋势由快变慢，最终趋于稳定；对于位移响应和应力响应而言，顶部均压环的质量与这 2 种地震响应呈线性增加的趋势，如图 13 所示。均压环质量的增加降低了避雷器的前 3 阶频率，支柱类设备地震响应中前 3 阶模态往往占比超过 90%。避雷器顶端位移响应取决于电气设备整体刚度比值以及集中质量的变化，结构顶部的集中质量却增加了支柱类电气设备的地震易损性。

2.4 根部短瓷套的影响

根据不同变电站的调研发现，避雷器瓷套根部的结构分为有、无根部短瓷套 2 种结构形式，通过对本次地震中的支柱类设备震害调研，避雷器和电压互感器分别为有、无短瓷套的不同结构形式，均存在根部断裂的破坏形式。通过对不同结构的有限元建模分析，得到地震作用下 2 种不同结构的应力分布情况，如图 14 所示。在高度一致的情况下，分别对 750 kV 套管进行有、无短瓷套建立有限元模型，动力特性分析结果如表 1 所示。短瓷套的存在使避雷器基本频率提升了 2.92%，却降低了 0.48%的 2 阶频率。由于金属法兰的转动刚度大于瓷套，短瓷套对于避雷器整体瓷套根部的刚度有一定程度的增加作用。

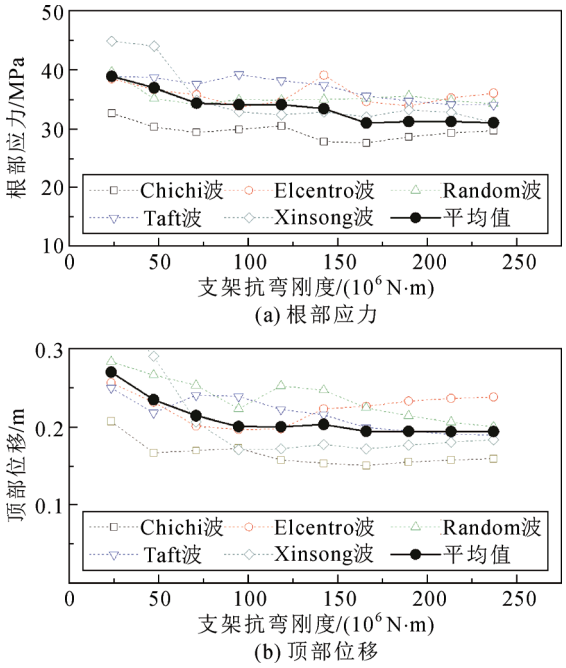


图 12 不同支架抗弯刚度下避雷器地震响应

Fig.12 Seismic response of arrester under different flexural stiffness of steel support

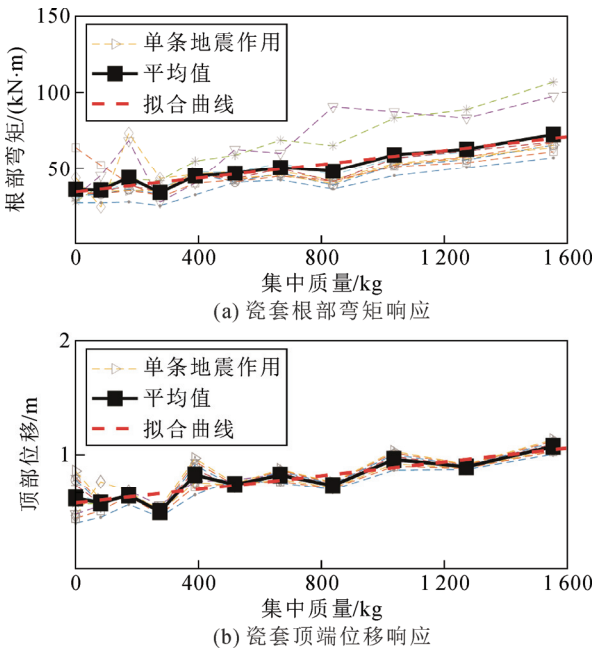


图 13 避雷器地震响应与集中质量相关性

Fig.13 Correlation between seismic response and lumped mass of arrester

表 1 有无短瓷套对避雷器频率影响

Table 1 Effect of short porcelain sleeve on frequency

阶数	无短瓷套频率/Hz	有短瓷套频率/Hz	差值/%
1 阶	1.027	1.057	2.92
2 阶	5.228	5.203	−0.48
3 阶	12.934	12.995	0.47

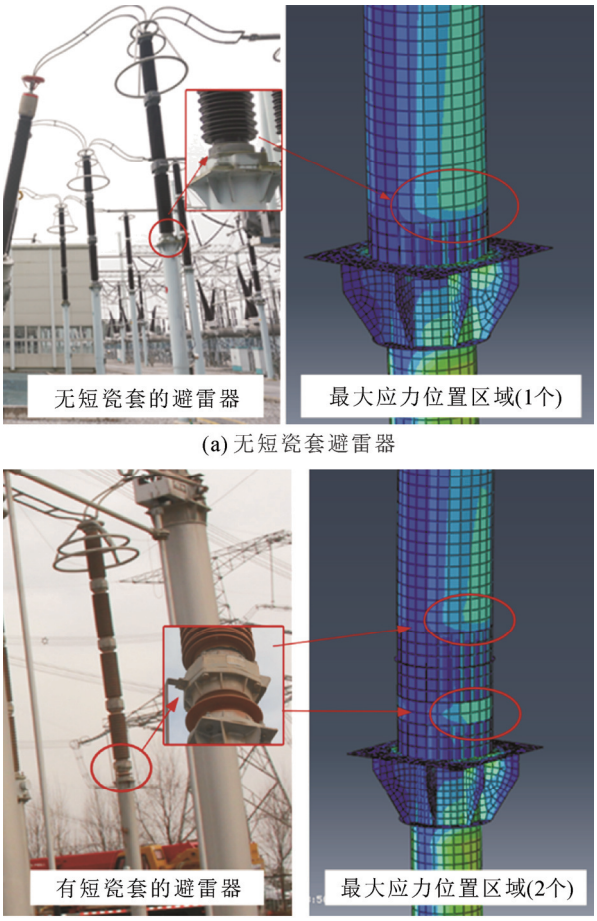
选取 5 条天然地震动对不同的结构进行地震响应分析，在最大峰值时刻选取不同的应力状态进行对比分析，如图 14 所示。无短瓷套的避雷器在地震作用下的最大应力截面在 1 个高度，位于瓷套根部与金属法兰连接处。含有短瓷套的避雷器结构，短瓷套上方的金属法兰将原本的 1 个最危险截面分割成 2 个危险截面，分别为短瓷套根部和长瓷套根部，处于 2 个不同的高度。由于短瓷套的存在，避雷器套管的应力不再沿高度方向逐渐减小，套管应力在 2 个不同的高度出现峰值，其破坏模式由原来 1 个高度处危险截面转变成 2 个危险截面，且 2 个危险截面的破坏概率相近，地震作用下不同高度处的瓷套断裂均有发生。

2.5　牵拉破坏的影响

避雷器设备通过软导线与电压互感器或变压器等设备连接，地震作用时，与避雷器相邻的设备顶端相对位移超过导线长度时会产生牵拉破坏。软导线的突然绷紧或松弛相当于对避雷器设备顶部的施加冲击荷载，这种冲击力会引起瓷套根部的弯矩响应突然增大，导致陶瓷材料因强度不够而产生裂纹或断裂。

根据电气设备现场布置图，建立电流互感器-避雷器耦联设备模型，见图 15。避雷器和电流互感器的套管、法兰和圆钢管采用壳单元进行建模，设备顶部的均压环和连接母线采用梁单元进行模拟，龙门架横梁采用两端固定连接的方式进行模拟。选取不同的地震波进行地震响应求解，得到连接导线的位移时程曲线。以人工波作用下的避雷器响应为例，其地震输入参考地震模拟振动台的试验输入[15,18,26]，选取国网人工波的时程分析，其中瓷套根部的最大应力为 35.7 MPa，而电流互感器的最大应力为 26.2 MPa，如图 16 所示；避雷器的地震易损性高于电流互感器，与本次地震的统计结果一致。

本次地震灾害调研中，电压互感器断裂后掉落，仍保持顶部软导线的连接，此时断裂瓷套的重力通过软导线传递到避雷器顶部。地震作用下，避雷器顶端作为 1 个悬吊设备的受力点，承受方向和大小随时间变化的动力荷载，增加了避雷器瓷套的根部应力响应。此外，相邻电气设备的倾斜或倒塌会引起短路故障，灼烧套管表面甚至可能进一步引发火灾。



(a) 无短瓷套避雷器

(b) 有短瓷套避雷器

图 14　不同类型避雷器套管最大应力区域图

Fig.14　The maximum stress area of different types of arrester bushings

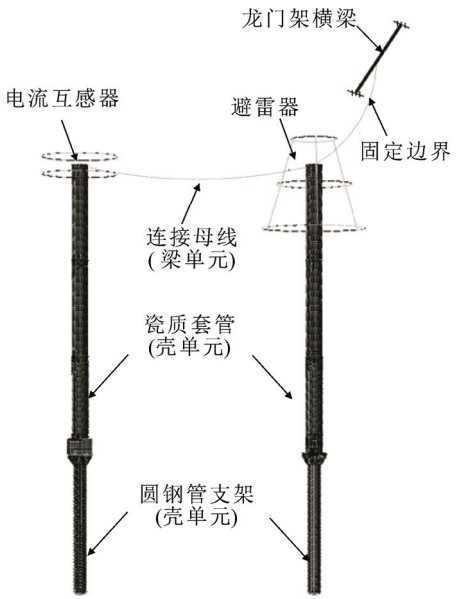
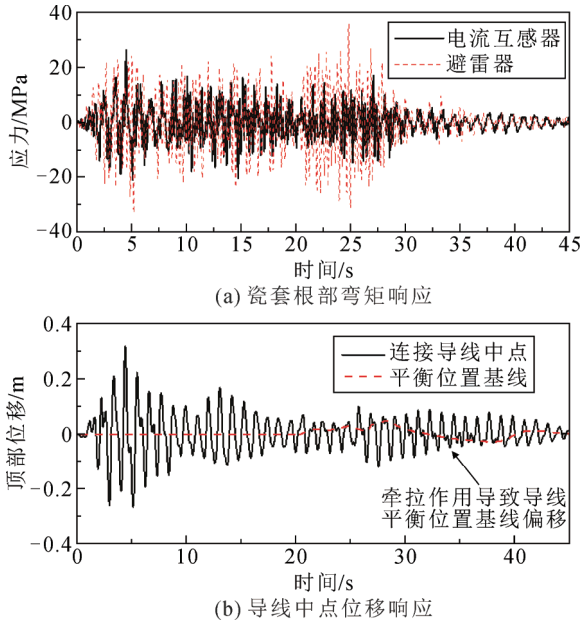


图 15　避雷器-电流互感器有限元模型图

Fig.15　Finite element model of arrester-current transformer coupling equipment



(a) 瓷套根部弯矩响应

(b) 导线中点位移响应

图 16 避雷器-互感器耦联设备地震响应时程曲线

Fig.16 Seismic response time history curve of arrester-current transformer coupling equipment

3 抗震性能提升措施

高地震烈度地区的变电站设备可以采用抗震加固或减隔震等措施增大设备的抗震性能。在一定范围内增加支架的弯曲刚度可以降低套管根部的加速度放大系数，从而降低地震作用对瓷套的影响。增加支架刚度的方式[26]包括：增加圆钢管的外径及壁厚、选用格构式钢支架、增加连接法兰板厚以及加劲肋个数等方式。

当电气设备面临高地震烈度设防和高海拔绝缘的要求时，单一的增加结构刚度和套管直径已经无法满足抗震需求。采用减隔震措施可以有效地降低电气设备的地震响应，保障支柱类设备在地震下的安全性[27-28]。避雷器设备选用隔震支座应具备以下特点：转动方向上的耗能能力、水平方向上的低刚度以保证隔震效率，竖直方向上的足够刚度以保证重力作用下的承载力以及具有自复位能力以防止地震作用后出现残余变形。

4 结论

1）避雷器设备是变电站中震损数量最多的设备，其破坏模式主要有瓷套根部法兰断裂、瓷套顶部连接母线牵拉、相邻设备碰撞造成短路等破坏模式。

2）积石山地震中避雷器设备破坏的主要原因有支架的放大作用、地震卓越频率与电气设备基频接近、顶部母线冗余度不足、支架顶部的存在短瓷套等影响因素。

3）避雷器瓷套根部的应力响应随着支架刚度的增加呈现出先下降后保持水平的趋势，采用导线连接的不同类型设备因顶部位移响应不同导致相对位移过大，引起导线牵拉破坏。

4）与历次震害统计比较，本次地震在地质条件、最大峰值加速度以及谱加速度等因素造成避雷器严重损坏。

参考文献 References

[1] 应急管理部. 应急管理部发布甘肃积石山 6.2 级地震烈度图[N]. 中国应急管理报，2023-12-23(001).
Ministry of Emergency Management. Ministry of emergency management: Gansu Province Jishishan Ms 6.2 earthquake intensity map[N]. China Emergency Management News, 2023-12-23(001).

[2] 王立朝，侯圣山，董 英，等. 甘肃积石山 M_S 6.2 级地震的同震地质灾害基本特征及风险防控建议[J]. 中国地质灾害与防治学报，2024，35(3)：108-118.
WANG Lichao, HOU Shengshan, DONG Ying, et al. Basic characteristics of co-seismic geological hazards induced by Jishishan M_S 6.2 earthquake and suggestions for their risk control[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(3): 108-118.

[3] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京：中国电力出版社，2013.
LIU Zhenya. Ultra-high voltage AC & DC grid[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2013.

[4] XIE Q, ZHU R Y. 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] 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.

[6] 刘恢先. 唐山大地震震害：2 卷[M]. 北京：地震出版社，1989：742-748.
LIU Huixian. Seismic disasters of Tangshan earthquake Ⅱ[M]. Beijing, China: Seismological Press, 1989: 742-748.

[7] 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，2023：11-33.
XIE Qiang. Seismic damage, seismic theory and engineering practice of substation converter station equipment[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2023: 11-33.

[8] 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_S 7.0 earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(5): 83-90.

[9] 文 学，刘湘钒，熊德兵. 四川电网因地震受损的输电线路全部恢复正常运行[N]. 国家电网报，2022-09-22(2).
WEN Xue, LIU Xiangfan, XIONG Debing. All transmission lines damaged by the earthquake in Sichuan power grid returned to normal operation[N]. State Grid News, 2022-09-22(2).

[10] SHINOZUKA M, ROSE A, EGUCHI R T. Engineering and socioeconomic impacts of earthquakes-an analysis of electricity lifeline

disruptions in the new Madrid area[R]. New York, USA: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), 1998.

[11] SCHIFF A J. Northridge earthquake: lifeline performance and post-earthquake response[R]. New York, USA: American Society of Civil Engineers, 1995: 23-30.

[12] KAMIYA K, OHTO H, MAEDA M. Health effects of the Fukushima nuclear disaster[M]. London, UK: Academic Press, 2022: 81-98.

[13] OZEN C, KAYA K. Earthquake effects on electricity network: a case study in Turkish grid[C]//Proceedings of the 5th Global Power, Energy and Communication Conference. Nevsehir, Turkey: IEEE, 2023: 333-338.

[14] 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.

[15] 谢　强，何　畅，杨振宇，等. 1 100 kV 特高压变压器瓷套管地震作用破坏试验与分析[J]. 高电压技术，2017，43(10)：3154-3162.
XIE Qiang, HE Chang, YANG Zhenyu, et al. Tests and analyses on failure mechanism of 1 100 kV UHV transformer porcelain bushing[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3154-3162.

[16] 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.

[17] XIE Q, SHI G Y, LIU Y. Influence of lumped mass and rotary inertia on seismic isolated post equipment[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 199: 107604.

[18] 孙宇晗，程永锋，卢智成，等. 1 100 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 1 100 kV composite external insulation bushing[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3224-3230.

[19] 王兰民，许世阳，王　平，等. 2023 年积石山 6.2 级地震诱发大规模黄土液化流滑的特征与启示[J]. 岩土工程学报，2024，46(2)：235-243.
WANG Lanmin, XU Shiyang, WANG Ping, et al. Characteristics and lessons of liquefaction-triggered large-scale flow slide in loess deposit during Jishishan M6.2 earthquake in 2023[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(2): 235-243.

[20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图：GB 18306—2015[S]. 北京：中国标准出版社，2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Seismic ground motion parameters zonation map of China: GB 18306—2015[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2016.

[21] 李　圣，卢智成，朱祝兵，等. 变电站复合材料绝缘子的动力特性与地震易损性研究[J]. 工程力学，2016，33(4)：91-97.
LI Sheng, LU Zhicheng, ZHU Zhubing, et al. Dynamic properties and seismic fragility of substation composite insulators[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4): 91-97.

[22] SHOME N. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures[D]. Stanford, USA: Stanford University, 1999.

[23] 中国地震局工程力学研究所. 应急产出：甘肃积石山 6.2 级地震(第 2)[R/OL].[2023-12-19]. https://www.iem.net.cn/detail.html?id=2965.
Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. Emergency reresults: M6.2 earthquake in Jishishan, Gansu (2nd Report)[R/OL]. [2023-12-19]. https://www.iem.net.cn/detail.html?id=2965.

[24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 电力设施抗震设计规范：GB 50260—2013[S]. 北京：中国计划出版社，2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of electrical installations: GB 50260—2013[S]. Beijing, China: China Planning Press, 2013.

[25] 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/OL]. 土木工程学报，2023：1-10[2024-03-14]. https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb. 23080712.
SHI Gaoyang, XIE Qiang. Shaking table test study of post-electrical equipment with three-dimensional isolation in the intermediate layer[J/OL]. China Civil Engineering Journal, 2023: 1-10[2024-03-14]. https: //doi. org/10.15951/j. tmgcxb. 23080712.

[26] 陈俊翰，谢　强，吴思源. 基于韧性分析的特高压换流站地震后快速修复算法[J/OL]. 电网技术，1-12[2024-09-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20240613.1751.004.html..
CHEN Junhan, XIE Qiang, WU Siyuan. Resilience-based fast recovery algorithm for post-earthquake UHV converter station[J/OL]. Power System Technology. 1-12[2024-09-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20240613.1751.004.html.

[27] 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.

[28] 刘振林，程永锋，卢智成，等. 安装剪切型铅减震器的特高压标准化避雷器地震模拟振动台试验[J]. 高电压技术，2018，44(8)：2595-2602.
LIU Zhenlin, CHENG Yongfeng, LU Zhicheng, et al. Shake table test on UHV standardization lightning arrester installed with shear-type lead dampers[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2595-2602.



石高扬
1991—，男，博士生
主要从事电气设备抗震及减隔震技术研究
E-mail: shigaoyang@tongji.edu.cn

SHI Gaoyang
Ph.D. candidate



谢　强(通信作者)
1971—，男，博士，教授，博导，IEEE693 标准委员会委员，ASCE 学会生命线工程抗震联合会(TCLEE)委员
主要从事电网基础设施防灾减灾研究
E-mail: qxie@tongji.edu.cn

XIE Qiang
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2023-04-25　修回日期　2024-08-27　　编辑　曾文君