

特高压穿墙套管—阀厅—防火墙耦联体系减震机理研究

陈炜玲^{1, 2, 3}, 聂 催^{1, 2, 3}, 谢金程^{1, 2, 3}, 杨宇萍^{1, 2, 3}, 杨振宇^{1, 2, 3}

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510000; 2. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广州 510000; 3. 工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广州 510000)

摘要: 特高压穿墙套管与阀厅、防火墙耦联体系的抗震性能直接决定换流站运行安全, 现有研究多聚焦于单体抗震性能研究, 缺乏耦联体系协同减震控制方案。文中建立穿墙套管—阀厅—防火墙耦联体系的等效理论模型, 开展黏滞阻尼器、金属阻尼器和摩擦阻尼器的参数优化分析。结合 ABAQUS 有限元模型, 选取 7 条地震波验证减震控制方案的有效性并对比不同阻尼器的减震控制效果。结果表明: 所建立的等效理论模型与有限元模型结果吻合良好, 可实现各类阻尼器核心参数的高效优化; 3 类阻尼器均能有效控制穿墙套管动力响应, 其中摩擦阻尼器耗能效率与耦联体系震动频率无关, 减震控制效果最优, 可使穿墙套管应力响应峰值降低 50%~60%, 可使穿墙套管加速度放大系数降低 30%~40%。

关键词: 穿墙套管; 阀厅结构; 防火墙结构; 减震机理研究; 动力响应分析

Research on Seismic Damping Mechanism of UHV Wall Bushing-valve Hall-fire Wall Coupled System

CHEN Weiling^{1, 2, 3}, NIE Cui^{1, 2, 3}, XIE Jincheng^{1, 2, 3}, YANG Yuping^{1, 2, 3}, YANG Zhenyu^{1, 2, 3}

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center of Guangzhou University, Guangzhou 510000, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology, Guangzhou 510000, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Resistance, Earthquake Mitigation and Structural Safety, Ministry of Education, Guangzhou 510000, China)

Abstract: The seismic performance of the coupled system comprising wall bushing, valve hall and firewall in converter stations is critical to operational safety. While existing research predominantly focuses on the seismic behavior of individual components, there is a notable lack of collaborative seismic mitigation strategies for the structural system as a whole. This paper establishes an equivalent theoretical model for the structural system integrating wall bushing, valve hall, and firewall, and conducts parametric optimization analyses for viscous dampers, metallic dampers, and friction dampers. Utilizing ABAQUS finite element models, seven seismic waves were selected to validate the effectiveness of the proposed seismic mitigation schemes and to compare the control efficacy of different damper types. The results indicate that the established equivalent theoretical model aligns well with the finite element analysis outcomes, enabling the rapid optimization of core parameters for various damper types. All three damper types effectively control the dynamic response of the wall bushing; notably, the energy dissipation efficiency of friction dampers is independent of the vibration frequency of the coupled system and presents the optimal seismic control performance, which can reduce the peak stress response of wall-through bushings by 50%~60% and lower the acceleration amplification factor by 30%~40%.

Key words: wall bushing; valve hall structure; firewall structure; seismic damping mechanism; dynamic response analysis

0 引言

中国新型电力系统具备安全高效、清洁低碳、柔性灵活、智慧融合四大重要特征^[1]。应用越来越广泛的特高压输电技术, 具有输送距离远、电能损耗低等

显著优势, 是构建新型电力系统的关键技术^[2-3]。阀厅是特高压换流站中的实现交流电与直流电相互转换的核心枢纽, 穿墙套管是换流站内连接阀厅内换流阀和外部直流场的关键设备。因此, 深入探究地震作用

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52308488); 广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515010072, 2022A1515110561)
Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52308488), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation(2023A1515010072, 2022A1515110561).

下穿墙套管和阀厅的抗震性能具有工程意义。

国内外学者在钢混型阀厅和全钢型阀厅抗震性能的研究基础上^[4-8],进一步围绕阀厅减隔震技术展开研究,徐文汉^[8-9]采用橡胶隔震支座对低端阀厅进行隔震设计,显著提高了低端阀厅主体结构的抗震性能。曹枚根^[10]和陈寅^[11]等分析了特高压高端阀厅在屈曲约束支撑消能减震方案下的减震效果,表明该方案既能满足结构抗震性能目标要求,且有较优的经济指标。刘素丽^[12]对采用黏滞阻尼器消能减震方案的阀厅进行抗震性能分析,表明黏滞阻尼器在罕遇地震作用下耗能性能良好,能够有效保护阀厅主体结构。同时,针对阀厅内的电力设备换流阀,冯志伟^[13-14]、杨宇萍^[15]等学者提出悬吊阀上部阻尼减震、支撑阀摩擦摆基底隔震等单体减震技术,并有显著减隔震效果。

相较于阀厅减隔震技术的多样性,穿墙套管的减隔震措施仍相对单一。Xie等^[16]分析了 ± 800 kV穿墙套管的抗震性能,发现套管在地震作用下的应力放大系数超出我国规范给出的安全系数,存在安全裕度不足的问题。谢强^[17]、王晓游^[18]、罗兵^[19]等学者针对性提出在套管珐琅处设置金属摩擦阻尼器的减震方案,并通过振动台试验验证其可有效降低穿墙套管根部应力响应。随后,穿墙套管抗震性能研究逐步深入到易损性分析。Seyed等^[20-21]建立了轻度、中度损伤状态下的穿墙套管地震易损性曲线,梁黄彬等^[22]采用多样条易损性分析方法,揭示了穿墙套管抗震薄弱位置位于其根部。邱有强等^[23]采用非线性最小二乘回归方法对阀厅回路进行地震易损性分析,得出地震易损性曲线说明套管根部易损性仅次于阀塔悬吊绝缘子。

然而,现有研究多聚焦于阀厅与穿墙套管的单体抗震性能及减隔震措施,针对穿墙套管—阀厅耦合体系的协同抗震研究不充分,其减隔震措施研究存在明显空白。何畅等^[24]采用数值分析及有限元模拟研究穿墙套管—阀厅耦合体系抗震性能,提出山墙整体浇筑混凝土增强阀厅侧向刚度的优化方案。杨大峰等^[25]建

立7种穿墙套管与阀厅等不同耦合方式的有限元模型,分析其地震响应规律。曹聪等^[26]考虑阀厅厂房柱与防火墙连接弹簧支撑节点的不同连接刚度,揭示其对穿墙套管地震响应的影响规律。

基于上述围绕穿墙套管和阀厅结构的研究,文中考虑穿墙套管、钢结构阀厅、钢筋混凝土防火墙的协同作用,提出在阀厅钢柱柱顶与钢筋混凝土防火墙顶部间分别设置黏滞阻尼器、金属软钢阻尼器、摩擦阻尼器的3种减震控制方案。通过建立穿墙套管—阀厅结构—防火墙耦合体系的等效理论模型进行动力时程分析,研究各类型阻尼器关键参数对耦合体系动力响应的影响。最后建立有限元模型对采用3种减震控制方案的耦合体系进行动力时程分析,验证等效理论模型的准确性以及3种阻尼器对穿墙套管的减震效果。

1 耦合体系介绍和减震控制方案

1.1 穿墙套管—阀厅—防火墙耦合体系介绍

换流站穿墙套管—阀厅—防火墙耦合体系的位置关系见图1。阀厅内部设置了穿墙套管、换流阀、桥臂电抗器等重要电力设备,是集电气设备布置、能量转换、安全防护于一体的电力行业工业建筑。穿墙套管是换流站内连接阀厅内换流阀和外部直流场的关键设备,套管固定在阀厅结构的非防火墙一侧墙上。而钢筋混凝土防火墙结构紧邻阀厅结构外墙设置,工程中设缝将两种结构隔开,用于隔离电力设备因故障引发的火灾;同时作为约束构件与阀厅结构相连,提供侧向约束与边界条件。

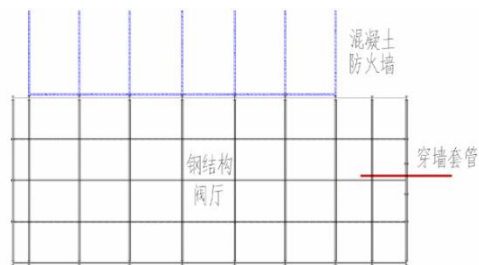


图1 穿墙套管—阀厅—防火墙耦合体系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wall bushing-valve hall-firewall coupled system

1.2 减震控制方案

目前,工程中常用的阻尼器根据耗能机制的不同分为速度型阻尼器(例如:黏滞阻尼器)、位移型阻尼器(例如:摩擦阻尼器、金属阻尼器)、加速度型阻尼器(例如:惯容阻尼器)。

速度型阻尼器的主要代表是黏滞阻尼器,黏滞阻尼器是一种与速度相关的无源能量耗散装置,其工作原理是活塞随着结构的运动而运动,迫使气缸内的黏性流体通过活塞头上的孔,地震能的耗散通过将动能转化为热能来实现。金属阻尼器是通过金属材料的塑性变形来消耗能量的阻尼器,具有屈服位移小、耗能能力强等特点。摩擦阻尼器的工作原理基于滑动摩擦耗能机制,其核心是通过两个接触面之间的相对滑动产生摩擦力,将地震能量转化为热能消散。

文中拟在阀厅钢柱柱顶与钢筋混凝土防火墙顶部之间,采用上述不同类型阻尼器替换原耦联体系中的弹簧铰支座,结合阀厅钢柱与防火墙的空间布置,共设置7个阻尼器,分别对应各钢柱位置布设。探究其对阀厅墙上重要电力设备穿墙套管的减震效果。阀厅钢柱与防火墙连接节点处弹簧铰支座示意图见图2。

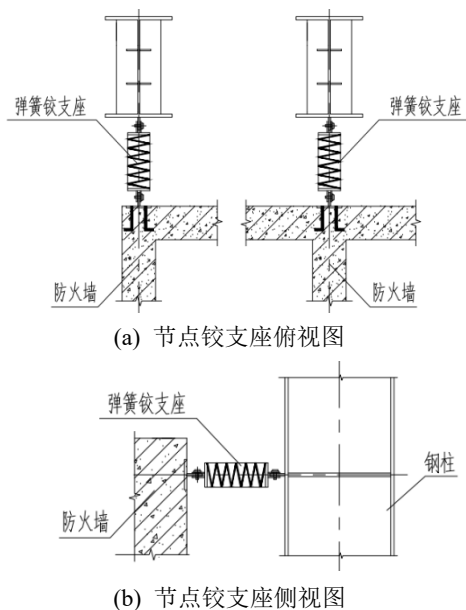


图2 阀厅钢柱与防火墙连接节点处弹簧铰支座示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spring-hinged supports at valve hall steel column-firewall connection nodes

2 等效理论模型的建立

2.1 穿墙套管—阀厅—防火墙结构等效理论模型

对于全钢结构的阀厅,把钢结构阀厅主结构与钢筋混凝土防火墙结构进行模型简化处理,即可将两个独立受力单元视为等高的相邻结构。穿墙套管安装在阀厅结构其中一侧的墙上,因此穿墙套管的简化模型应刚接在阀厅结构简化模型上,以真实反映结构的约束条件。因采用有限元模型进行参数优化设计工作量较大,为了快速且准确地确定各减震方案的目标控制参数,对复杂的空间结构进行了合理的力学简化,建立了三自由度穿墙套管—阀厅—防火墙耦联体系的等效理论模型见图3。

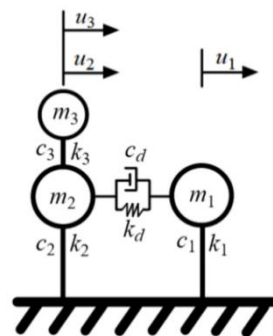


图3 穿墙套管—阀厅—防火墙耦联体系等效理论模型
(三自由度体系)

Fig. 3 Equivalent theoretical model of wall bushing-valve hall-firewall structural system(three-degree-of-freedom system)

由于钢材和混凝土材料性能方面的不同,钢结构的阀厅主体为柔性建筑物,而钢筋混凝土防火墙为刚性构筑物。在地震作用下,两种结构的顶部位移显著不一致,钢结构阀厅主体的顶层位移往往大于钢筋混凝土防火墙结构顶部位移。这样的位移差使得两者相邻距离减小,从而引发碰撞风险,导致节点应力集中甚至结构局部破坏。此外,阀厅结构是一个地震响应的放大器,当遭遇地震时,放置在其内部的电气设备地震响应更加剧烈,从而导致电力设备破坏。

若是在阀厅结构钢柱顶部和钢筋混凝土防火墙顶部之间的弹簧铰支座替换为适当的阻尼器,再定义穿墙套管加速度放大系数为:在穿墙套管基频下,安

装在阀厅墙上的套管根部加速度反应谱与各方向基底输入地震动加速度反应谱的比值。通过研究穿墙套管加速度放大系数的变化趋势,可以判断所采取的穿墙套管减震控制方案是否有效果,且可确定穿墙套管—阀厅—防火墙耦联体系减震控制方案中最高效的阻尼器及阻尼器参数。

建立等效理论模型时只考虑体系在 X 方向上的平面运动,将防火墙、阀厅、穿墙套管分别等效为一个质量点 m_1 、 m_2 、 m_3 。定义 k_1 、 k_2 、 k_3 分别为等效防火墙、等效阀厅、等效穿墙套管的刚度, c_1 、 c_2 、 c_3 分别为等效防火墙、等效阀厅、等效穿墙套管的阻尼系数。等效阀厅和等效防火墙之间通过阻尼器连接,定义 k_d 为弹簧铰支座的弹簧刚度, c_d 为阻尼器的阻尼系数。定义 u_1 、 u_2 、 u_3 分别为等效防火墙、等效阀厅、等效穿墙套管的水平位移,共3个自由度。

考虑水平地震作用,根据达朗贝尔原理建立整个耦联体系在地震作用下的运动方程

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + F(u, \dot{u}) = -M\ddot{u}_g \quad (1)$$

式(1)中: M 、 C 、 K 为整个结构的质量、阻尼和刚度矩阵; F 为阻尼器在地震作用下产生的非线性恢复力向量; $\ddot{u}_g$ 为地震动输入; $\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$ 、 u 分别为结构相对于地面的加速度、速度和位移响应。

文中通过python语言编写时程计算程序并采用多线程计算进行参数分析。时程计算使用中心差分法,该方法能够简化计算过程且无需刚度迭代。

质量矩阵 M 与位移无关,表达式为

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & & \\ & m_2 & \\ & & m_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

总刚度矩阵 K 的表达式为

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_d & -k_d & 0 \\ -k_d & k_2 + k_3 + k_d & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

借助ABAQUS有限元软件分别对钢筋混凝土防火墙、钢结构阀厅、穿墙套管三个单独模型进行模态分析后获取基频 $f_{0i}(i=1, 2, 3)$,分别依次对应等效防火墙、等效阀厅、等效穿墙套管),即可根据式(4)计算等效理论模型中等效防火墙、等效阀厅、等效穿墙套管的刚度 k_1 、 k_2 、 k_3 。

$$k_i = m_i (2\pi f_{0i})^2 \quad (4)$$

阻尼矩阵 C 的表达式为

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_d & -c_d & 0 \\ -c_d & c_2 + c_3 + c_d & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中: $c_i = 2\xi_i \sqrt{k_i m_i}$ ($i=1, 2, 3$)。其中,钢

筋混凝土防火墙阻尼比取 $\xi_1 = 0.05$,钢结构阀厅阻尼比取 $\xi_2 = 0.02$,电力设备阻尼比取 $\xi_3 = 0.01$ 。

阻尼器产生的非线性恢复力向量为

$$F = [F_{yr} \quad -F_{yr} \quad 0]^T \quad (6)$$

2.1.1 黏滞阻尼器的理论模型

黏滞阻尼器的恢复力由黏滞系数和两端自由度的相对速度组成,其相关力学表达式为:

$$F_{yr}(t) = c_d v_{rel}(t) \quad (7)$$

$$v_{rel}(t) = v_1(t) - v_2(t) \quad (8)$$

式(7)、(8)中: $v_{rel}(t)$ 为等效阀厅与等效防火墙同一时间下的速度插值。

2.1.2 金属阻尼器的理论模型

采用Bouc—Wen模型描述金属阻尼器在地震作用下的滞回现象,其相关表达式为:

$$F_{yr}(t) = \alpha k_i(t) + (1 - \alpha) k_i Z(t) \quad (9)$$

$$\dot{Z}(t) = \dot{u}(t) \{A - [\beta \text{sign}(Z(t)\dot{u}(t)) + \gamma] |Z(t)|^n\} \quad (10)$$

式(9)、(10)中: $\alpha = k_y/k_i$ 为金属屈服后刚度和初始刚度的比值,根据软钢阻尼器的性质取 $\alpha = 0.1$; Z 为金

属阻尼器的滞回位移； A 、 n 、 β 、 γ 为控制金属阻尼器滞回形状的参数，文中取 $A=100$ 、 $n=1.0$ 、 $\beta=3\ 150$ 、 $\gamma=350$ 。

2.1.3 滑动摩擦阻尼器的理论模型

采用Bouc—Wen模型描述摩擦阻尼器在地震作用下的滞回现象，其相关表达式为：

$$F_{yr}(t) = \mu N \frac{(\beta + \gamma)}{A} Z(t)$$
 (11)

$$F_f = \mu N$$
 (12)

$$\dot{Z}(t) = \dot{u}(t) \{ A - [\beta \text{sign}(Z(t)\dot{u}(t)) + \gamma] |Z(t)|^n \}$$
 (13)

式(11)-(13)中： μ 为摩擦阻尼器的摩擦系数； N 为施加于摩擦阻尼器的正压力； F_f 为摩擦阻尼器的滑动摩擦力； Z 为摩擦阻尼器的滞回位移； A 、 n 、 β 、 γ 是控制摩擦阻尼器滞回形状的参数，文中取 $A=1$ ， $n=1$ ， $\beta=\gamma=750$ 。

2.2 案例建模

以某高原地区换流站中±800 kV穿墙套管—钢结构阀厅—钢筋混凝土防火墙耦合体系为原型建立等效理论模型并进行参数分析。在该耦合体系中，钢结构阀厅的长、宽、高分别为86、36、31.6 m，主要采用Q235B和Q345B的钢材；钢筋混凝土防火墙设置于换流变一侧，墙厚为300 mm，采用C30混凝土整体浇筑；±800 kV的穿墙套管长20 m，其根部距离地面16 m。穿墙套管与钢结构阀厅一侧墙面刚接，套管安装倾角为10°。钢筋混凝土防火墙顶部与钢结构阀厅钢柱柱顶通过弹簧铰支座连接，共设置7个。

2.3 地震波选取

选取7条地震波进行时程分析，其中从PEER地震波数据库^[27]中选取6条天然地震波，通过SeismoMatch软件对该6条天然地震波的波形进行调整以匹配电力设施抗震设计规范(GB 50260—2013)^[28]错误!未找到引用源。需求谱。项目中需求谱的地面峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)为0.4g，即3.92 m/s²。另外加入一条符合电力设施抗震设计规范(GB

50260—2013)反应谱的人工波AW。人工波信息与调整后的天然地震波信息见表1。

表 1 地震波信息

Table 1 Seismic wave information

编号	地震名称	震级	原始 PGA/g	调制后 PGA/g
AW	人工波	—	0.40	—
RSN6	Imperial Valley	6.95	0.23	0.41
RSN15	Kern County	7.36	0.16	0.48
RSN125	Friuli	6.50	0.32	0.53
RSN139	Tabas	7.35	0.41	0.46
RSN639	Whittier Narrows	5.99	0.35	0.65
RSN848	Landers	7.28	0.36	0.37

选取X向作为地震输入主方向，三向输入地震波的加速度峰值比值为1：0.85：0.65，等效理论模型中只输入X向。7条地震波三向的加速度平均反应谱和规范需求谱见图4。

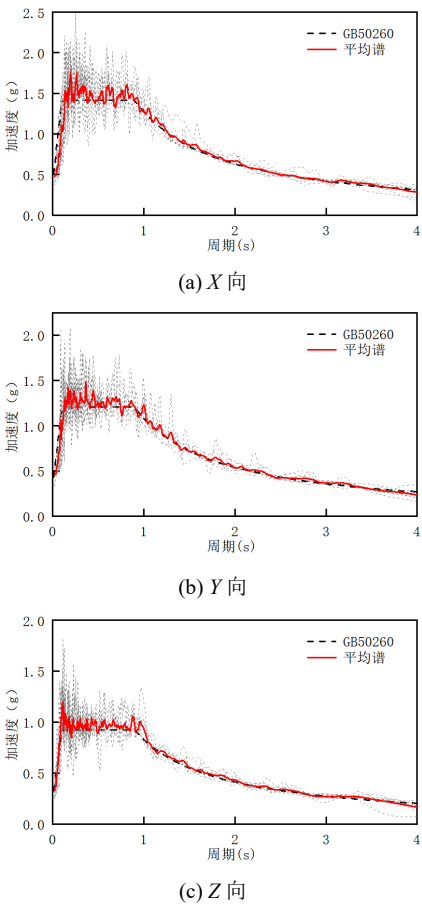


图 4 7 条地震波平均谱与规范需求谱

Fig. 4 Average spectrum of 7 seismic waves and the standard demand spectrum

3 等效理论模型的参数分析

基于图3建立的穿墙套管—阀厅—防火墙耦联体系的等效理论模型，本节选取人工波AW作为地震动输入，对耦联体系等效理论模型开展动力时程分析，提取不同工况下结构地震响应并开展系统性参数分析，通过python时程计算程序锁定核心参数有效区间。

3.1 黏滞系数 c_d 对加速度放大系数的影响与选取

根据式(7)黏滞阻尼器恢复力公式可知，黏滞阻尼器关键影响参数是黏滞系数 c_d 。如图5所示，黏滞阻尼器的黏滞系数 c_d 对穿墙套管加速度放大系数峰值具有显著的调控作用，整体呈现先是快速衰减再是趋于平稳的两阶段特征。当黏滞系数 c_d 过小时，黏滞阻尼力明显不足，无法有效耗散地震输入能量，加速度放大效应显著。随着 c_d 增大，黏滞阻尼力与耗能效率同步提升，可有效减小耦联体系变形，显著降低结构动力响应。但当 c_d 超过一定临界值后，过大的黏滞阻尼力会限制耦联体系的相对变形，导致阻尼器耗能效率难以继续提升，同时耦联体系等效附加刚度增大使得放大系数出现微弱抬升，此时增大 c_d 对电力设备减震效果不再明显提升。因此，黏滞系数 c_d 最优取值区间为20 000~30 000 kN·s/m。

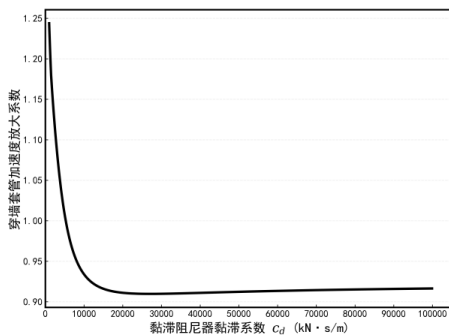


图5 不同黏滞系数 c_d 下的穿墙套管加速度放大系数峰值
Fig. 5 Acceleration amplification factor of wall bushings under different viscous damping coefficients c_d

3.2 金属刚度 k_i 对加速度放大系数的影响与选取

根据式(9)金属阻尼器恢复力公式可知，金属阻尼器关键影响参数是金属元件自身弹性刚度 k_i 。金属阻

尼器依靠金属的塑性变形耗散能量，金属刚度 k_i 直接决定其屈服特性与耗能效率。金属刚度 k_i 对穿墙套管加速度放大系数的影响规律见图6，整体呈现先降后升的单波谷非线性特征。当 k_i 过小时，金属阻尼器初始刚度不足，无法有效约束结构位移，穿墙套管加速度响应显著。随着 k_i 增大，金属刚度与耗能能力逐渐匹配，可有效限制耦联体系变形并耗散地震输入能量，穿墙套管加速度放大系数快速下降至波谷。当 k_i 超过一定值后，金属阻尼器刚度过大导致耦联体系难以进入金属屈服耗能阶段，甚至只停留在弹性阶段，此时金属阻尼器的耗能能力显著降低，同时显著增大耦联体系整体刚度，导致穿墙套管加速度相应增大，穿墙套管加速度放大系数显著回升。因此，金属刚度 k_i 最优取值区间为35 000~45 000 kN/m。

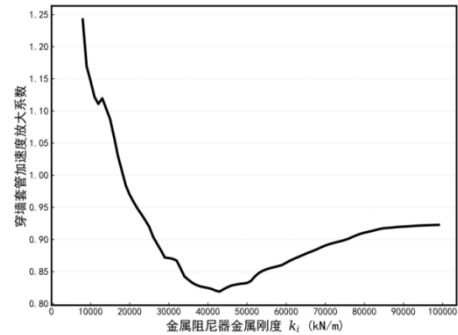


图6 不同金属刚度 k_i 下的穿墙套管加速度放大系数峰值
Fig. 6 Acceleration amplification factor of wall bushing under different metal stiffness k_i

3.3 滑动摩擦力 F_f 对加速度放大系数的影响与选取

根据式(11)、(12)摩擦阻尼器恢复力公式可知，摩擦阻尼器以滑动摩擦力 F_f 作为阻尼器耗能效率的主要影响参数。摩擦阻尼器通过接触面滑动摩擦来耗散地震输入能量。由图7可见，摩擦阻尼器的滑动摩擦力 F_f 对穿墙套管加速度放大系数的影响呈现快速衰减、小幅回升、趋于稳定的三阶段特征。当滑动摩擦力 F_f 过小时，摩擦阻尼器的摩擦起滑力远低于耦联体系相互作用力，其耗能能力十分有限，对耦联体系变形的抑制作用微弱，穿墙套管加速度放大系数较高。随着 F_f 增大，摩擦阻尼器耗能能力显著提升，显著降低穿

墙套管加速度放大系数。当 F_f 超过一定值，摩擦起滑力过大导致摩擦阻尼器逐渐趋近于刚性连接，耗能能力有所下降，穿墙套管加速度放大系数有小幅回升。继续增大 F_f 时，摩擦阻尼器完全成为耦联体系的刚性约束，穿墙套管加速度放大系数趋于稳定。因此，滑动摩擦力 F_f 最优取值区间为1 000~1 500 kN。

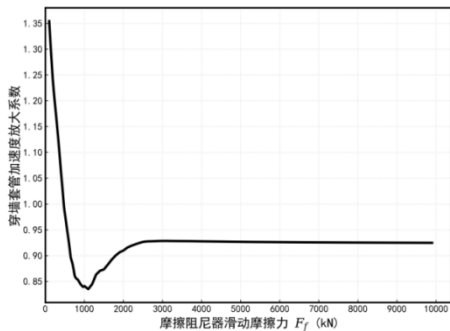


图 7 不同滑动摩擦力 F_f 下的穿墙套管加速度放大系数峰值
Fig. 7 Acceleration amplification factor wall bushing under different sliding friction force F_f

4 有限元仿真分析

4.1 有限元模型

文中以某换流站中±800 kV穿墙套管、钢结构阀厅、钢筋混凝土防火墙原型作为研究对象，采用ABAQUS有限元软件建立穿墙套管—阀厅—防火墙耦联体系。建模过程以贴近真实耦联体系为原则，对整体体系进行适当简化处理。穿墙套管整体采用B31梁单元模拟，通过MPC BEAM连接器单元实现其与阀厅侧向构件的刚性约束连接。钢结构阀厅整体采用B31梁单元建立，利用软件内的附加质量模块，对实际阀厅非结构附加质量进行等效模拟。钢筋混凝土防火墙采用S4R壳单元建立。阀厅结构钢柱顶部和钢筋混凝土防火墙顶部的弹簧铰支座和各类型阻尼器采用Bushing连接器单元进行有限元模拟。Bushing连接器单元可定义弹性、黏滞、塑性和摩擦4种属性，可以分别模拟弹簧铰支座、黏滞阻尼器、金属阻尼器和摩擦阻尼器。简化后的穿墙套管—阀厅—防火墙耦联体系有限元模型见图8。

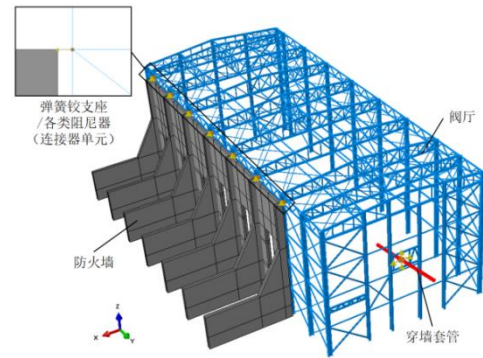


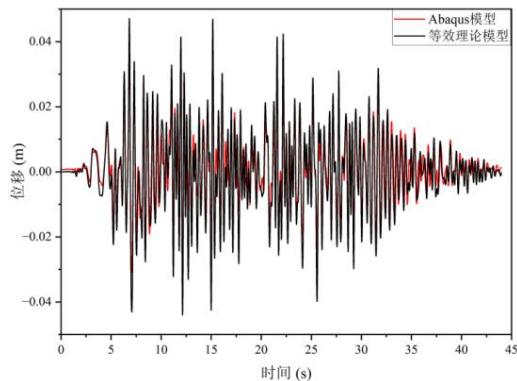
图 8 穿墙套管—阀厅—防火墙耦联体系有限元模型
Fig. 8 Finite element model of wall bushing-valve hall-fire wall coupled system

4.2 等效理论模型验证与工况参数选取

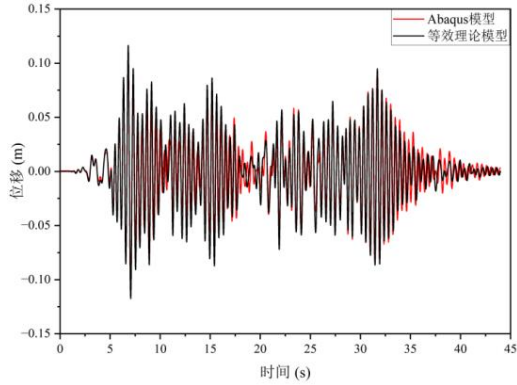
4.2.1 等效理论模型与有限元模型验证

等效理论模型在原模型的基础上进行了高度力学简化与自由度缩减处理，仅保留耦联体系核心动力特性以实现阻尼器参数的快速迭代优化，借助等效理论模型进行参数分析后还需要通过有限元模型验证其准确性。设置弹簧铰支座后，耦联体系整体具有明显的非线性，有限元模型采用隐式动力时程分析方法，结构阻尼采用瑞利阻尼矩阵，通过独立的设备模型、结构模型前两阶振型计算其瑞利阻尼系数。

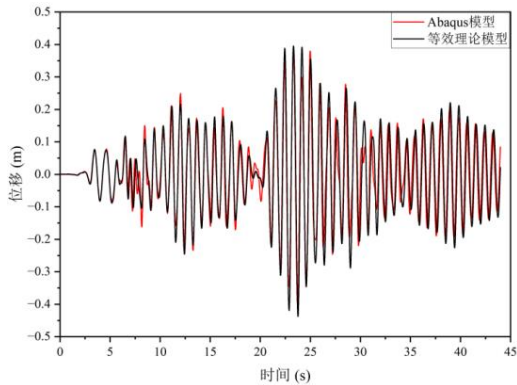
弹簧铰支座工况下等效理论模型和有限元模型的位移时程图见图9。等效理论模型与有限元模型的位移变化趋势、峰值数值和时程波动规律计算结果接近，验证了等效理论模型的准确性。



(a) 防火墙位移曲线对比图



(b) 阀厅位移曲线对比图



(c) 穿墙套管位移曲线对比图

图 9 有限元模型和等效理论模型位移时程曲线对比

Fig. 9 Comparison of displacement time history of finite element model and equivalent theoretical model

4.2.2 工况参数选取

结合上述参数分析结果,对各类阻尼器相关参数进行合理选取。其中弹簧铰支座为基准工况,仍沿用工程原设计的弹簧刚度参数;其余计算工况的各项参数,均参照第3节的最优取值区间进行合理选定。不同工况对应的具体参数取值汇总见表2。

表 2 不同工况的参数取值

Table 2 Parameter values for different working conditions

工况 编号	阀厅—防火墙 节点连接类型	核心参数类型	核心参数数值
1	弹簧铰支座	弹簧刚度 $k_d/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	17 500
2	黏滞阻尼器	黏滞系数 $c_d/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	21 000
3	金属阻尼器	软钢刚度 $k_f/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	42 000
4	摩擦阻尼器	滑动摩擦力 F_f/kN	1 000

4.3 耦联体系地震响应分析

为评估不同方案对穿墙套管动力响应的减震控

制效果,选取第2.3节中的6条天然地震波与1条人工波对有限元模型进行地震响应分析。分析指标为穿墙套管的Mises应力峰值和加速度放大系数,计算结果见表3、4,减震效果见图10、11。

表 3 不同工况下穿墙套管 Mises 应力峰值

Table 3 Peak Mises stress of wall bushing under different working conditions

地震波类型	穿墙套管 Mises 应力峰值/MPa			
	弹簧	黏滞	金属	摩擦
	铰支座	阻尼器	阻尼器	阻尼器
AW	100.2	46.6	55.6	44.8
RSN6	11.0	4.7	5.7	4.5
RSN15	9.0	3.2	5.0	3.2
RSN125	9.3	4.6	6.0	4.9
RSN139	8.2	4.0	6.0	4.2
RSN639	6.7	4.3	5.5	4.3
RSN848	9.2	4.1	5.6	4.1

表 4 不同工况下穿墙套加速度放大系数

Table 4 Acceleration amplification factor of wall bushing under different working conditions

地震波类型	穿墙套管加速度放大系数			
	弹簧	黏滞	金属	摩擦
	铰支座	阻尼器	阻尼器	阻尼器
AW	3.10	1.91	2.18	1.78
RSN6	2.90	2.22	2.65	2.13
RSN15	3.36	2.21	2.79	2.27
RSN125	3.45	1.90	2.87	2.00
RSN139	3.30	2.05	2.82	2.10
RSN639	3.35	1.89	2.86	1.95
RSN848	2.75	1.87	2.54	2.04

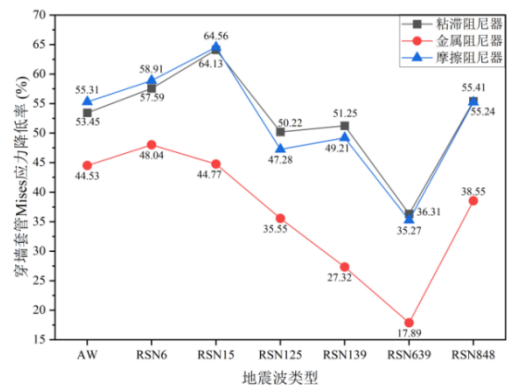


图 10 不同工况下穿墙套管 Mises 应力峰值降低率图

Fig. 10 Peak Mises stress reduction rate graph of wall bushing under different working conditions

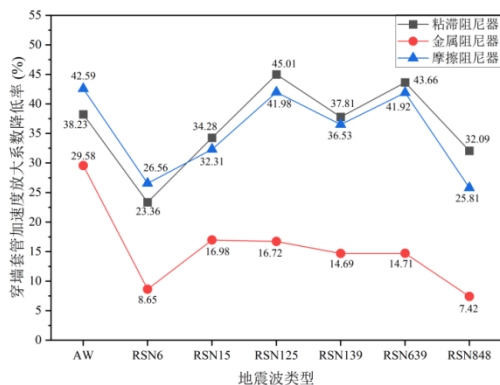


图 11 不同工况下穿墙套管加速度放大系数峰值降低率图

Fig. 11 Acceleration amplification factor reduction rate graph of wall bushing under different working conditions

4.3.1 穿墙套管动力响应分析

如图10所示,黏滞阻尼器和摩擦阻尼器可显著削弱穿墙套管的应力响应峰值,金属阻尼器减震控制能力较弱。在7条不同地震波中的最不利受力状态下,摩擦阻尼器可将Mises应力峰值控制在44.8 MPa,减震幅度达55.3%;黏滞阻尼器可将Mises应力峰值控制在46.6 MPa,减震幅度为53.5%;而金属阻尼器仅能将Mises应力降至55.6 MPa,减震幅度仅为44.5%。多条地震波下的对比结果进一步验证:黏滞阻尼器与摩擦阻尼器在Mises应力控制上表现稳定且高效,多数工况下减震幅度接近;金属阻尼器应力降低率波动大、整体偏弱。

加速度放大系数直接关系电气设备抗震安全性,3种阻尼器对穿墙套管加速度放大系数的控制效果显著。如图11的对比结果表明,摩擦阻尼器对加速度放大效应的控制能力最优,黏滞阻尼器次之,金属阻尼器最差。多条地震波下的结果均表明:摩擦阻尼器可将加速度放大系数控制在较低水平,平均降幅约为35%。黏滞阻尼器对穿墙套管加速度响应的减震控制效果整体表现优良,但其耗能稳定性略低于摩擦阻尼器。金属阻尼器对穿墙套管加速度响应的减震控制能力明显劣于黏滞阻尼器和摩擦阻尼器,金属阻尼器工

况下的穿墙套管加速度放大系数的平均降幅仅为15%。

综上分析,在穿墙套管Mises应力响应峰值和加速度放大系数减震控制方面,摩擦阻尼器和黏滞阻尼器的减震控制效果在同一水平,金属阻尼器的减震控制效果较差。

4.3.2 不同阻尼器减震控制效果讨论

穿墙套管整体刚度大,在地震作用下以低频震动响应为主,高频震动分量微弱。结合三类阻尼器的阻尼耗能频率特性和能量耗散机制的本质,可全面解释其减震性能差异。

摩擦阻尼器属于频率无关型耗能构件,依靠界面库伦摩擦耗能,其滞回曲线饱满、接触面刚度稳定,耗能能力不受震动频率、震动速度影响,在全频段震动下均能保持稳定的耗能效果,能同时兼顾穿墙套管应力响应控制和加速度放大系数控制,对耦联体系响应减震控制均衡且高效,综合表现最优。

黏滞阻尼器是速度相关型阻尼器,依靠流体黏滞阻力耗能,对高频震动分量耗能能力较强,但对穿墙套管在低频段震动的耗能效率有所衰减,减震控制效果小幅下降,对穿墙套管加速度放大系数的减震控制效果略弱于摩擦阻尼器,整体表现良好。

金属阻尼器依靠金属塑性变形耗能,在塑性发展过程中会发生金属屈服后刚度退化和残余变形的现象,金属屈服点的存在使滞回曲线为菱形形状,耗能面积减小,且自身附加刚度会扰动耦联体系原有动力特性,使得耗能效率降低,虽然金属阻尼器能在一定程度上降低穿墙套管应力响应,但加速度放大系数减震控制效果不足。

上述结果充分表明,将弹簧铰支座替换为阻尼器可有效控制穿墙套管地震响应,针对低频震动响应为主的穿墙套管,可优先选择摩擦型阻尼器为减震控制方案。研究结论可为穿墙套管—阀厅—防火墙耦联体系阻尼器减震控制方案选型提供理论依据。

5 结论

文中建立穿墙套管—阀厅—防火墙耦联体系的三自由度等效理论模型,分析了黏滞阻尼器、金属阻尼器、摩擦阻尼器的最优核心参数范围,并通过有限元模型验证了等效理论模型的准确性和不同阻尼器的减震控制效果,得到以下主要结论:

1)构建的穿墙套管—阀厅—防火墙三自由度等效理论模型,经有限元模型对比验证,耦联体系位移响应高度吻合,可快速完成不同类型阻尼器核心参数优化,为耦联体系减震设计提供高效的参数分析方法。

2)减震控制效果对比表明,将阀厅钢柱顶部与混凝土防火墙间布设的弹簧铰支座替换为阻尼器,可有效控制穿墙套管地震响应。三类阻尼器综合减震控制性能排序为:摩擦阻尼器>黏滞阻尼器>金属阻尼器。其中,摩擦阻尼器和黏滞阻尼器可使穿墙套管应力响应降幅达50%~60%,加速度放大系数降幅达30%~40%,减震控制效果优异。

3)不同类型阻尼器减震控制效果与其耗能机制与阻尼耗能频率特性有关。穿墙套管地震响应以低频振动为主。摩擦阻尼器耗能性能与频率无关,低频工况下性能稳定,减震效果最优;黏滞阻尼器虽高频耗能性能更突出,但套管低频地震振动仍具备有效往复速度,使其可保持高效耗能,减震效果与摩擦阻尼器基本相当。二者可兼顾穿墙套管应力响应和加速度响应减震控制。金属阻尼器减震性能与振动频率无相关性,其狭长菱形滞回特性、屈服后刚度退化及残余变形等固有力学特征,导致自身耗能容量有限,减震控制效果显著弱于摩擦阻尼器与黏滞阻尼器。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 新型电力系统发展蓝皮书[R].2023-06-02.
National Energy Administration of China. Blue book on the development of new power systems[R].2023-06-02.
- [2] 邹常跃, 韦嵘晖, 冯俊杰, 等. 柔性直流输电发展现状及应用前景[J]. 南方电网技术, 2022, 16(3): 1-7.
- [3] 饶宏, 周月宾, 李巍巍, 等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 1-11.
Rao Hong, Zhou Yuebin, Li Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [4] 张立红, 胡晓, 曾迪, 等. 基于抗震性能的高烈度区高端阀厅选型研究[J]. 工程力学, 2018, 35(s1): 320-324.
Zhang Lihong, Hu Xiao, Zeng Di, et al. Research on selection of high voltage side valve hall in high seismic intensity area based on seismic performance[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(s1): 320-324.
- [5] 何勇, 刘超, 冯仁德. 高烈度地震区±500 kV换流站阀厅结构选型分析[J]. 电力勘测设计, 2018(4): 60-65.
He Yong, Liu Chao, Feng Rende. Structure selection for valve hall of ±500 kV converter station in high intensity earthquake region[J]. Electric Power Survey & Design, 2018(4): 60-65.
- [6] 韦文兵, 吴轶, 蔡健, 等. 大型换流站阀厅结构地震响应弹塑性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(5): 113-120.
Wei Wenbing, Wu Yi, Cai Jian, et al. Elasto-plastic analysis of seismic responses of valve-hall structure with suspended valves of large-scale converter station[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(5): 113-120.
- [7] 陆祝贤, 吴轶, 杨春, 等. 基于IDA的阀厅结构地震易损性分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(s1): 263-267.
Lu Zhuxian, Wu Yi, Yang Chun, et al. Seismic fragility analysis of valve hall structure based on IDA[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(s1): 263-267.
- [8] 徐文汉. 特高压阀厅结构抗震性能及减震技术研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2020.
Xu Wenhan. Research on seismic performance and damping technology of UHV valve hall structure[D]. Beijing: North China University of Technology, 2020.
- [9] 徐文汉, 曹枚根, 唐志琼, 等. 特高压换流站低端阀厅隔震设计及地震响应分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(17): 349-353.

- Xu Wenhan, Cao Meigen, Tang Zhiqiong, et al. Seismic isolation design and seismic response analysis of low-end valve hall of UHV converter station[J]. Building Structure, 2020, 50(17): 349-353.
- [10] 曹枚根, 徐文汉, 娄杨剑. 特高压高端阀厅防屈曲支撑结构地震响应分析[J]. 南方电网技术, 2020, 14(9): 17-23.
- Cao Meigen, Xu Wenhan, Lou Yangjian. Seismic response analysis of buckling-restrained brace structure of UHV high-end valve hall[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(9): 17-23.
- [11] 陈寅, 李志, 曹加良, 等. 防屈曲支撑在高烈度地区柔直阀厅抗震性能化设计中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(s1): 1-5.
- Chen Yin, Li Zhi, Cao Jialiang, et al. Application of buckling restrained brace in seismic performance design of flexible DC valve hall in the high seismic intensity areas[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(s1): 1-5.
- [12] 刘素丽, 陈寅, 李志, 等. 基于黏滞阻尼器的柔性直流背靠背阀厅消能减震分析[J]. 电力勘测设计, 2024(9): 5-9.
- Liu Suli, Chen Yin, Li Zhi, et al. Energy dissipation analysis of flexible DC back-to-back valve hall based on viscous fluid damper [J]. Electric Power Survey & Design, 2024(9): 5-9.
- [13] 冯志伟, 杨振宇, 马玉宏, 等. 特高压悬吊换流阀上部约束减震控制体系研究[J]. 高压电器, 2026, 62(5): 175-179.
- Feng Zhiwei, Yang Zhenyu, Ma Yuhong, et al. Research on the upper constrained damping control system of UHV suspended converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2026, 62(5): 175-179.
- [14] 冯志伟. 特高压悬吊换流阀摩擦节点与上部约束体系研究[D]. 广州: 广州大学, 2024.
- Feng Zhiwei. Research on friction joint and upper constraint system of ultra high voltage suspension converter valve[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2024.
- [15] 杨宇萍, 梁展豪, 杨旭, 等. 柔性直流支撑式换流阀摩擦摆水平隔震体系研究[J/OL]. 高压电器, 1-14[2026-09-16].https://link.cnki.net/urlid/61.1127.TM.20251024.1549.002.
- Yang Yuping, Liang Zhanhao, Yang Xu, et al. Investigation of friction pendulum horizontal isolation system for voltage sourced converter post valves[J/OL]. High Voltage Apparatus, 1-14[2026-09-16].https://link.cnki.net/urlid/61.1127.TM.20251024.1549.002.
- [16] Xie Qiang, Liang Huangbin, Wang Xiaoyou, et al. Seismic performance improvement of ± 800 kV UHV DC wall bushing using friction ring spring dampers[J]. Earthquake Spectra, 2021, 37(2): 1056-1077.
- [17] 谢强, 王晓游, 胡蓉, 等. 带有减震装置的 ± 800 kV 特高压直流穿墙套管振动台试验研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3368-3374.
- Xie Qiang, Wang Xiaoyou, Hu Rong, et al. Shaking table tests on ± 800 kV UHV DC wall bushing with damper devices[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3368-3374.
- [18] 王晓游, 谢强, 罗兵, 等. ± 800 kV 穿墙套管的地震响应与振动控制[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 16-22.
- Wang Xiaoyou, Xie Qiang, Luo Bing, et al. Seismic responses and vibration control of ± 800 kV wall bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 16-22.
- [19] 罗兵, 饶宏, 卓然, 等. ± 800 kV 滇西北特高压直流工程穿墙套管抗震性能研究[J]. 南方电网技术, 2017, 11(12): 1-8.
- Luo Bing, Rao Hong, Zhuo Ran, et al. Seismic performance study on DC wall bushing of ± 800 kV Dianxibei UHVDC transmission project[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(12): 1-8.
- [20] Zareei S A, Hosseini M, Ghafory-Ashtiany M. Evaluation of power substation equipment seismic vulnerability by multivariate fragility analysis: a case study on a 420 kV circuit breaker[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017(92): 79-94.
- [21] Zareei S A, Hosseini M, Ghafory-Ashtiany M. Seismic failure probability of a 400 kV power transformer using analytical fragility curves[J]. Engineering Failure Analysis, 2016(70): 273-289.
- [22] 梁黄彬, 谢强, 何畅, 等. ± 800 kV 特高压直流穿墙套管的地震易损性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(2): 91-100.
- Liang Huangbin, Xie Qiang, He Chang, et al. Seismic vulnerability analysis of ± 800 kV ultra-high voltage direct current (UHVDC) wall bushing[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2020, 40(2): 91-100.

[23] 邱有强, 李 强, 杨 旭, 等. 特高压换流阀厅回路地震易损性分析[J]. 高压电器, 2026, 62(3): 191-198.

Qiu Youqiang, Li Qiang, Yang Xu, et al. Seismic vulnerability analysis of ultra-high voltage converter valve hall circuit[J]. High Voltage Apparatus, 2026, 62(3): 191-198.

[24] 何 畅, 谢 强, 杨振宇, 等. 特高压直流穿墙套管-阀厅体系地震响应及抗震性能提升措施[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3215-3223.

He Chang, Xie Qiang, Yang Zhenyu, et al. Seismic responses and retrofitting countermeasures for UHVDC wall bushing-valve hall system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3215-3223.

[25] 杨大峰, 孙 松, 陈 峰, 等. 钢结构阀厅与设备耦联效应对换流站 800 kV 穿墙套管地震响应影响研究[J]. 工业建筑, 2024, 54(4): 99-107.

Yang Dafeng, Sun Song, Chen Feng, et al. Research on the influence of coupling effect between steel valve hall structure and equipment on the seismic response of 800 kV wall bushing[J]. Industrial Construction, 2024, 54(4): 99-107.

[26] 曹 聪. 高烈度区换流站阀厅结构与电气设备耦联抗震性能与减震措施研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2025.

Cao Cong. Research on coupling seismic performance and seismic reduction measures of valve hall structure and electrical equipment in high seismic intensity area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2025.

[27] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). PEER ground motion database[DB/OL]. [2026-09-16]. <https://ngawest2.berkeley.edu/>.

[28] GB 50260—2013 电力设施抗震设计规范[S].

GB 50260—2013 Code for seismic design of electrical installations[S].

陈炜玲(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力基础设施防灾减灾(E-mail: chen-willing@foxmail.com)。

聂 催(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力基础设施防灾减灾。

谢金程(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力基础设施防灾减灾。

杨宇萍(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力基础设施防灾减灾。

杨振宇(1993—), 男, 副教授, 研究方向为电力基础设施防灾减灾(通信作者)(E-mail: yang_zy@gzhu.edu.cn)。