

# 户内 LRB 隔震半刚性钢结构变电站振动台试验

胡宇鹏<sup>1</sup> 方 瑜<sup>1</sup> 吴祖咸<sup>1</sup> 徐晨耘<sup>2</sup> 罗金辉<sup>2</sup> 郭小农<sup>2,\*</sup>

(1. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 杭州 310000; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘 要** 本文通过振动台试验, 对全户内铅芯橡胶隔震支座(LRB)隔震半刚性钢结构变电站的抗震性能进行了研究。研究选取了 1:3 缩尺模型, 遵循相似理论设计模型结构, 并通过振动台试验获取了结构与设备的加速度响应以及支座位移信息。试验结果表明, LRB 能有效延长结构的自振周期, 避开地震波中的卓越周期, 减少结构响应, 且阻尼增加明显, 起到了较好的减震效果。然而, 电气设备的加速度放大现象较为显著, 其加速度放大系数最大值达到了 6.76, 表明电气设备的安全和稳定性需要特别关注。特别是在带有脉冲效应的近场地震波作用下, 地震波对电气设备的峰值加速度影响更为显著。本研究为全户内半刚性钢结构变电站的减隔震研究提供了试验依据。

**关键词** 端板连接, 振动台试验, 变电站, GIS 电气设备, 减隔震

中图分类号: TU352.1 文献标志码: A DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.202601.0013

## Shaking Table Test of Indoor LRB Isolated Semi-Rigid Steel Structure Substation

HU Yupeng<sup>1</sup> FANG Yu<sup>1</sup> WU Zuxian<sup>1</sup> XU Chenyun<sup>2</sup> LUO Jinhui<sup>2</sup> GUO Xiaonong<sup>2,\*</sup>

(1. Zhejiang Huayun Power Engineering Design Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** This study investigates the seismic performance of a fully indoor semi-rigid steel-structured substation equipped with Lead-Rubber Bearings (LRBs) for seismic isolation through a shaking table test. A 1:3 scaled model was adopted, and the model structure was designed in compliance with the similarity theory. Shaking table tests were conducted to obtain the acceleration responses of the structure and electrical equipment, as well as the displacement data of the supports. Test results demonstrate that the LRB isolation bearings can effectively extend the natural vibration period of the structure, avoid the dominant period in seismic waves, and reduce structural responses. Additionally, the damping capacity of the structure is significantly enhanced, thereby achieving a favorable seismic mitigation effect. However, the acceleration amplification effect of electrical equipment is relatively notable, with the maximum acceleration amplification factor reaching 6.76. This indicates that special attention must be paid to the safety and stability of electrical equipment. In particular, under the action of near-field seismic waves with pulse effects, the impact of seismic waves on the peak acceleration of electrical equipment becomes more pronounced. This research provides an experimental basis for the study on seismic isolation and mitigation of fully indoor semi-rigid steel-structured substations.

**Keywords** end plate connection, shaking table test, substation, GIS electrical equipment, seismic isolation

收稿日期: 2025-06-03

作者简介: 胡宇鹏, 男, 高级工程师, 主要研究方向为变电站结构设计。E-mail: 523694794@qq.com

\* 联系作者: 郭小农, 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为铝合金结构和钢结构。E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

## 0 引言

在城市化进程的推进以及工业和居民用电需求日益增长的背景下,变电站在电力系统中扮演着日益关键的角色。半刚性连接作为一种结构设计手段,能够有效地调整梁柱的弯矩分布,进而优化截面设计和调整结构的周期特性。国内外众多学者已经对半刚性框架结构进行了广泛的研究,包括静力、拟动力、动力实验以及数值分析<sup>[1-3]</sup>。这些研究为半刚性框架的理论建模与工程应用提供了重要支撑,但振动台试验的缺乏成为明显局限。振动台试验是模拟真实地震动、揭示结构动力响应规律最直接有效的手段,现有研究对强震作用下半刚性钢框架的整体动力行为、节点与结构的协同工作机制仍缺乏足够的试验验证。变电站作为“主结构(厂房)-子结构(电气设备)”的耦合体系,其抗震性能不仅取决于主结构的承载能力,还与主-子结构的动力相互作用密切相关。文波等学者通过振动台试验发现,地震作用下主结构虽能保持较好的抗震性能,但子结构(如变压器、断路器等)因自振特性与主结构的动力耦合,往往产生更大的加速度响应和位移反应<sup>[4-6]</sup>。后续研究进一步探索了变电站的减隔震技术,如通过基础隔震、设备减震等手段降低地震响应<sup>[7-9]</sup>。现有变电站抗震研究多聚焦于传统混凝土结构,对全户内钢结构变电站的针对性研究较少。钢结构与混凝土结构存在显著差异,混凝土结构的研究结论难以直接迁移至钢结构场景。户内变电站的电气设备通常布置密集、体型复杂,且对振动敏感,但现有研究对户内环境下电气设备的减隔震方法缺乏系统探究,导致工程实践中设备抗震设计的理论依据不足。

基于现有研究的局限性,本研究以考虑结构-设备相互作用的户内半刚性钢结构变电站为对象,开展 1:3 缩尺模型的 LRB(铅芯橡胶支座)基础隔震振动台试验。通过该试验,本研究获取了结构与设备的加速度响应以及支座位移信息,为全户内半刚性钢结构变电站的减隔震研究提供了基础数据和理论支撑。

## 1 试验模型

### 1.1 相似比设计

在进行模型设计、制造以及地震动激励选择

的过程中,必须严格遵循相似理论的指导原则。首先,必须明确模型结构试验中涉及各个物理量的相似常数,进而推导出能够反映整个物理过程的相似条件。只有当模型满足这些相似理论的要求时,才能利用相似关系从模型试验的结果中推算出原型结构的地震响应。本研究在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行,该实验室拥有一个 4 m×6 m 的试验平台,本研究将长度相似常数设定为 1:3 的比例。在模型设计阶段,加速度相似常数对于确保模型结构能够真实反映原型结构在不同地震烈度下的响应至关重要。通常情况下,加速度相似常数的控制范围介于 1 至 3 之间,本研究中加速度相似比被设定为 1:2。考虑到振动台试验模型与原型模型均采用 Q355B 材料,因此弹性模量相似比为 1:1。基于以上三个相似比,可以进一步计算出其他相关参数的相似比值。具体相似关系见表 1。

表 1 结构模型动力相似关系

Table 1 The dynamic similarity relationship of the model

物理性能	物理参数	关系表达式	相似常数	备注
几何性能	长度	$S_l$	1/3	控制尺寸 1/3
	线位移	$S_l$	1/3	
	角位移	$S_\beta = S_\sigma / S_E$	1	
材料性能	弹性模量	$S_E$	1	控制材料
	应力	$S_\sigma$	1	
	应变	$S_\epsilon = S_\sigma / S_E$	1	
	质量密度	$S_\rho = S_E / (S_a \cdot S_l)$	3/2	
荷载性能	质量	$S_m = S_\sigma \cdot S_l^2 / S_a$	1/18	
	集中力	$S_F = S_E \cdot S_l^2$	1/9	
	线荷载	$S_p = S_E \cdot S_l$	1/3	
	面荷载	$S_q = S_E$	1	
动力性能	力矩	$S_M = S_E \cdot S_l^3$	1/27	
	阻尼	$S_c = S_E \cdot S_l^{1.5} \cdot S_a^{-0.5}$	$\sqrt{6}/18$	
	周期	$S_T = S_l^{0.5} \cdot S_a^{-0.5}$	$\sqrt{6}/6$	
	频率	$S_f = S_l^{-0.5} \cdot S_a^{0.5}$	$\sqrt{6}$	
	速度	$S_v = S_l^{0.5} \cdot S_a^{0.5}$	$\sqrt{6}/3$	
	加速度	$S_a$	2.00	控制试验

### 1.2 模型尺寸

本研究选取实际变电站结构中的一个三跨子结构,并对其进行 1:3 的比例缩放,以模拟 7 度地震设防条件下的结构响应。所研究的结构主体为一个双层单跨四榀框架,其几何尺寸为长 6 m、宽 3.5 m、高 4.5 m,其中一层的高度为 1.67 m,二层的

高度为 2.83 m。框架的梁柱均采用热轧 H 型钢制成,具体的截面尺寸详见表 2。在结构的连接方式上,主梁与柱以及边次梁与柱的连接采用端板连接。

表 2 模型截面尺寸

Table 2 Model cross-sectional dimensions

截面	材料	名称
H 型钢柱	Q355B	H200×200×6×10
主梁/边次梁	Q355B	H280×100×5×10
次梁	Q355B	H165×60×5×5

楼板采用 50 mm 厚 C30 混凝土预制楼板。模型与底座采用焊接+柱脚加劲耳板的固定连接,底座与振动台台面预留孔洞使用大尺寸螺栓连接。框架整体现场安装如图 1 所示。



图 1 框架整体图

Fig.1 Overall view of the framework

### 1.3 节点设计

梁-柱连接采用不设置耳板的外伸式端板连接。均采用厚度为 10 mm 的端板,并通过 10.9 级 M12 高强螺栓进行紧固,其排列方式为四排两列。在边次梁的端板连接中,端板与柱的弱轴腹板盖板相连,而在柱的腹板盖板内部,配置有十字形加劲肋,以增强节点的承载能力。构造示意图如图 2 所示。相关现场连接的详细构造如图 3 所示。

### 1.4 电气设备

采用的电气设备为按比例缩小的 220 kV 气体绝缘开关设备(GIS),如图 4 所示。该设备的全部结构构件均采用 Q355B 级钢材制造。各电气单元通过焊接工艺连接成一个整体结构,并进一步与共用底板焊接固定,以确保整体的稳定性。为了控制底板的变形,共用底板的下部特别设计有横梁和纵梁结构。

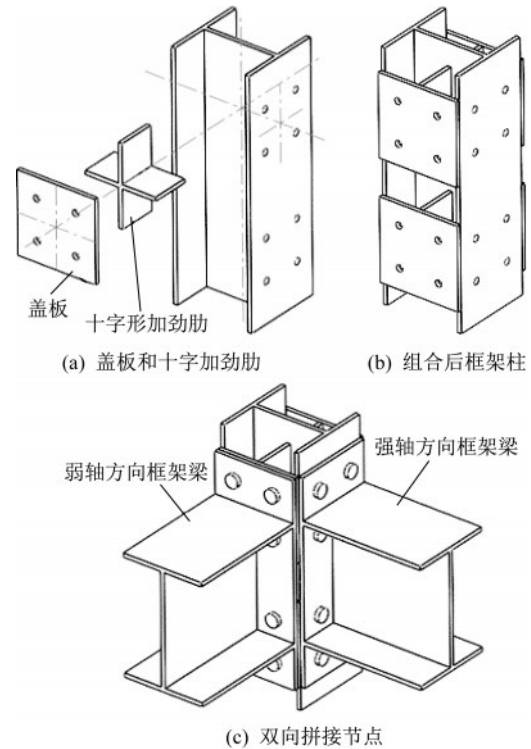


图 2 改进端板节点构造示意图

Fig.2 Schematic diagram of the improved end-plate joint



图 3 端板连接现场图

Fig.3 End plate connection site photo



图 4 电气设备图

Fig.4 Picture of electrical equipment

共用底板安置于 4 个专用设备支座之上,每个支座通过 4 个 M14 级高强度螺栓与底板连接。这些支座进一步与主体结构楼面板中预埋的钢板焊接,从而实现电气设备与主体结构的稳固连接。连接部位的详细构造可参考图 5。



图5 设备连接图

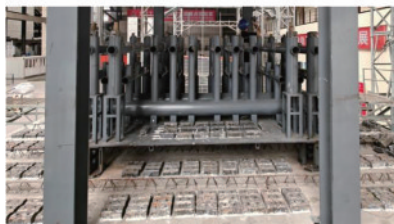
Fig.5 Connection of electrical equipment

### 1.5 模型质量

由于模型采用缩尺模型,实际重量与荷载比例有所变化,因此需要附加质量块。人工质量块单块重 7.5 kg,楼面共布置质量块 343 块,电气设备共布置质量块 123 块,楼面共布置质量块 405 块。最终楼板重 5.35 t,框架重 4.0 t,设备重 1.85 t,人工配重 7.35 t,刚性基础重 4.0 t,总重(含底座) 22.55 t。附加质量布置如图 6 所示。



(a) 屋面附加质量



(b) 楼面及设备附加质量

图6 附加质量现场布置图

Fig.6 Additional quality site layout

### 1.6 隔震支座设计

隔震技术通常应用于具有较高上部结构刚度的建筑物。在工程实践中,橡胶隔震支座(LNR)和铅芯橡胶隔震支座(LRB)是两种广泛采用的隔震装置类型。这些装置通过增加结构的自然振动周期,以期避开地震波中的卓越周期,从而减少结构响应。特别地,铅芯橡胶隔震支座(LRB)能够有效利用其内部铅芯产生的黏滞阻尼效应,有效地耗

散地震能量,进而降低上部结构的变形和加速度响应。本研究选用LRB作为研究对象。

本文隔震设计的加速度响应目标设定为 0.5g,隔震层的最大允许位移设定为 55 mm。基于 20% 阻尼比条件下的加速度和位移反应谱分析,推导出结构的目标设计周期为 1.0 s。依据《建筑抗震设计标准》(GB/T 50011—2010)<sup>[10]</sup>第 12 章的相关规定,对隔震支座的关键参数进行计算,见表 3。

表3 LRB参数  
Table 3 LRB parameters

参数	数值
屈服前刚度	1 267 N/mm
屈服后刚度	104 N/mm
屈服力	1 170 N
LRB 隔震支座数量	6
LRB 隔震支座直径	100 mm

### 1.7 隔震支座布置

本试验将隔震支座通过一刚性底座连接到振动台上,隔震支座上方与主体结构的刚性底座通过螺栓连接,如图 7(a)所示。总共布置 6 个 LRB 铅芯橡胶隔震支座,现场布置位置如图 7(b)所示,平面布置图如图 8 所示。



(a) 连接局部图



(b) 布置位置图

图7 隔震支座布置图

Fig.7 Site layout of seismic isolation bearings

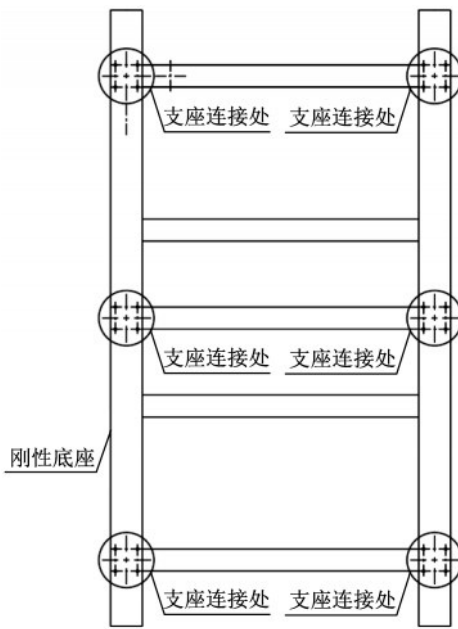


图8 支座平面布置图

Fig.8 Bearings layout plan

## 2 材性试验

对次梁、主梁/边次梁、柱翼缘分别取样进行屈服强度、抗拉强度、断后伸长率和弹性模量的测量。板状拉伸试件样胚根据《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975—2018)<sup>[11]</sup>标准执行制备。检测标准为《金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)<sup>[12]</sup>。应力-应变曲线如图9所示。屈服强度、抗拉强度、断后伸长率及弹性模量试验结果见表4。

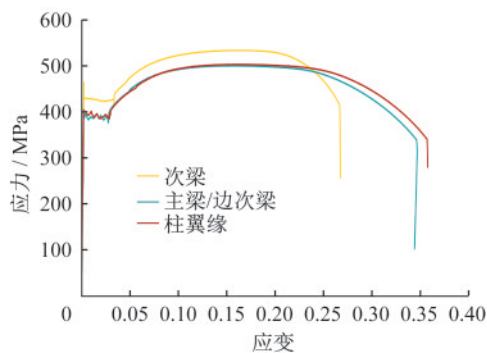


图9 应力-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves

## 3 测点布置方案

楼层位移、楼层加速度以及设备加速度是重要的地震响应参数。为获得完备的加速度以及位

表4 钢材材性试验结果

Table 4 Steel material properties test results

试件部位	屈服强度	抗拉强度	断后伸长率	弹性模量
次梁	442 MPa	533 MPa	28.5%	217 GPa
主梁/边次梁	398 MPa	500 MPa	33.0%	208 GPa
柱翼缘	402 MPa	503 MPa	33.0%	215 GPa

移数据,试验采用的测试设备和仪器有 MTS-STEX Pro 数据采集处理系统、CA-YD 压电式加速度传感器以及 ASM 拉线式位移传感器。

布置加速度传感器 33 个,分别在刚性底座、楼面板、屋面板、设备顶部及设备底部,以获取主体结构各层楼面的加速度响应,以及电气设备关键位置处的加速度响应规律。每个位置均布置两个加速度传感器以保证数据的安全冗余。其中设备顶部加速度传感器布置如图 10 所示。

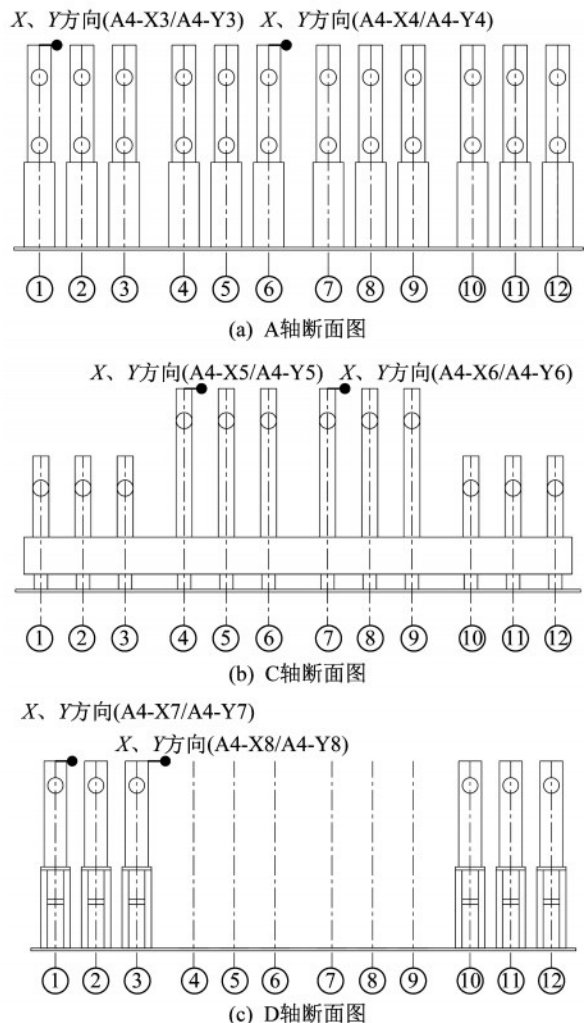


图10 设备顶部加速度传感器布置示意图

Fig.10 Schematic diagram of the acceleration sensor arrangement on the top of the equipment

布置位移传感器 26 个,集中在设备顶部重要位置以及楼面屋面板处。由于隔震结构的主要结构位移来自隔震层支座的相对位移,因此在隔震支座处布置支座相对位移计测量隔震支座的相对位移。设备顶部位移传感器布置如图 11 所示。

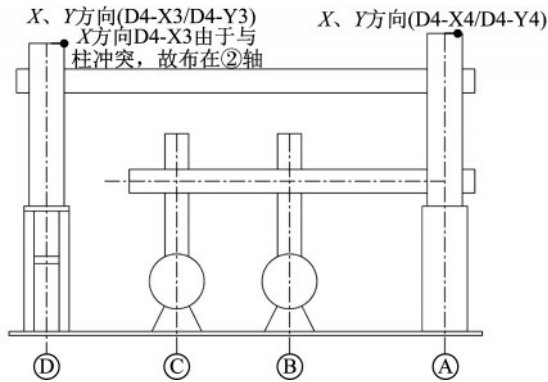


图 11 设备顶部位移计传感器布置示意图

Fig.11 Schematic diagram of the displacement meter sensor arrangement on the top of the equipment

## 4 加载方案

本研究项目所在地区地震烈度为 7 度,其设计基本加速度值设定为  $0.10g$ 。依据《建筑抗震设计标准》(GB/T 50011—2010)<sup>[10]</sup>的规定,该项目被划分为第 I 组地震分组,且其场地条件被归类为 III 类。为确保试验的全面性,本研究选取了 4 条不同特性的水平地震动记录,用于振动台动力试验。这些记录包括三条天然地震波:Darfield 波、Christchurch 波以及 Imperial Valley 波;此外,还纳入一条人工合成的 AGM 波。这四种波形的选取旨在全面覆盖从近场至远场地震影响的不同特性,具体包括一条无脉冲特征的近场地震波、一条具有显著脉冲效应的近场地震波以及一条远场地震波。所有选定的输入信号均严格遵循现行国家标准的技术指标。

依据峰值地面加速度 (Peak Ground Acceleration, PGA) 将试验过程划分为三个阶段,即小震 ( $70 \text{ cm/s}^2$ )、中震 ( $200 \text{ cm/s}^2$ ) 和大震 ( $440 \text{ cm/s}^2$ )。在各阶段的开始与结束时,均采用白噪声进行扫频处理,以评估系统在经历不同强度地震作用后可能出现的整体损伤程度变化。此方法有助于更全面、准确地掌握建筑物对不同强度级别自然灾害的响应能力。具体的加载方案详见表 5。

表 5 试验工况表  
Table 5 Test conditions table

工况编号	地震激励	长轴方向地震动峰值/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ )
1	白噪声	50
2	Darfield	70
3	Christchurch	70
4	Imperial Valley	70
5	AGM	70
6	白噪声	50
7	Darfield	200
8	Christchurch	200
9	Imperial Valley	200
10	AGM	200
11	白噪声	50
12	Darfield	440
13	Christchurch	440
14	Imperial Valley	440
15	AGM	440
16	白噪声	50

## 5 结构响应

随着 PGA 的增大,支座位移逐渐增大,上部结构表现基本为整体的平动,观察到的楼层相对位移不明显。对于同一 PGA 而言,Imperial Valley 波的支座相对位移最大,地震响应最显著。发生较大的位移后,支座能够快速停止振动,地震响应以较快的速度减小,说明铅芯橡胶支座的阻尼作用明显,起到了较好的减震作用。

### 5.1 结构自振频率

白噪声扫描是一种有效的结构自振频率识别方法,本试验通过读取白噪声扫描工况下支座相对位移值并进行傅里叶变换得到整体结构的自振频率。

各次扫描后自振频率见表 6。由表可见 7 度大震试验后 LRB 的自振频率也没有发生明显变化。试验过程中未见 LRB 出现明显的塑性变形和残余变形,说明该支座在 7 度大震下仍然处于正常工作范围内。

表 6 白噪声扫频结果  
Table 6 White noise sweep results

工况编号	1	6	11	16
频率/Hz	3.3	3.3	3.3	3.3

## 5.2 模型加速度响应

加速度响应是框架结构地震响应的重要参数之一,对全户内变电站而言,楼面电气设备的加速度响应更是研究重点。为了精确量化地震作用下隔震钢框架各层楼面及设备加速度的放大效应,

本研究采用峰值加速度放大系数的概念,记为 $k$ 。该系数定义为钢框架结构中特定位置(如楼面或设备)的最大加速度与输入地震波的PGA之间的比值。在小震、中震以及大震工况下分别输入四条前文选取的地震波(共12种工况),得到12组结果,并将其展示在图12中。

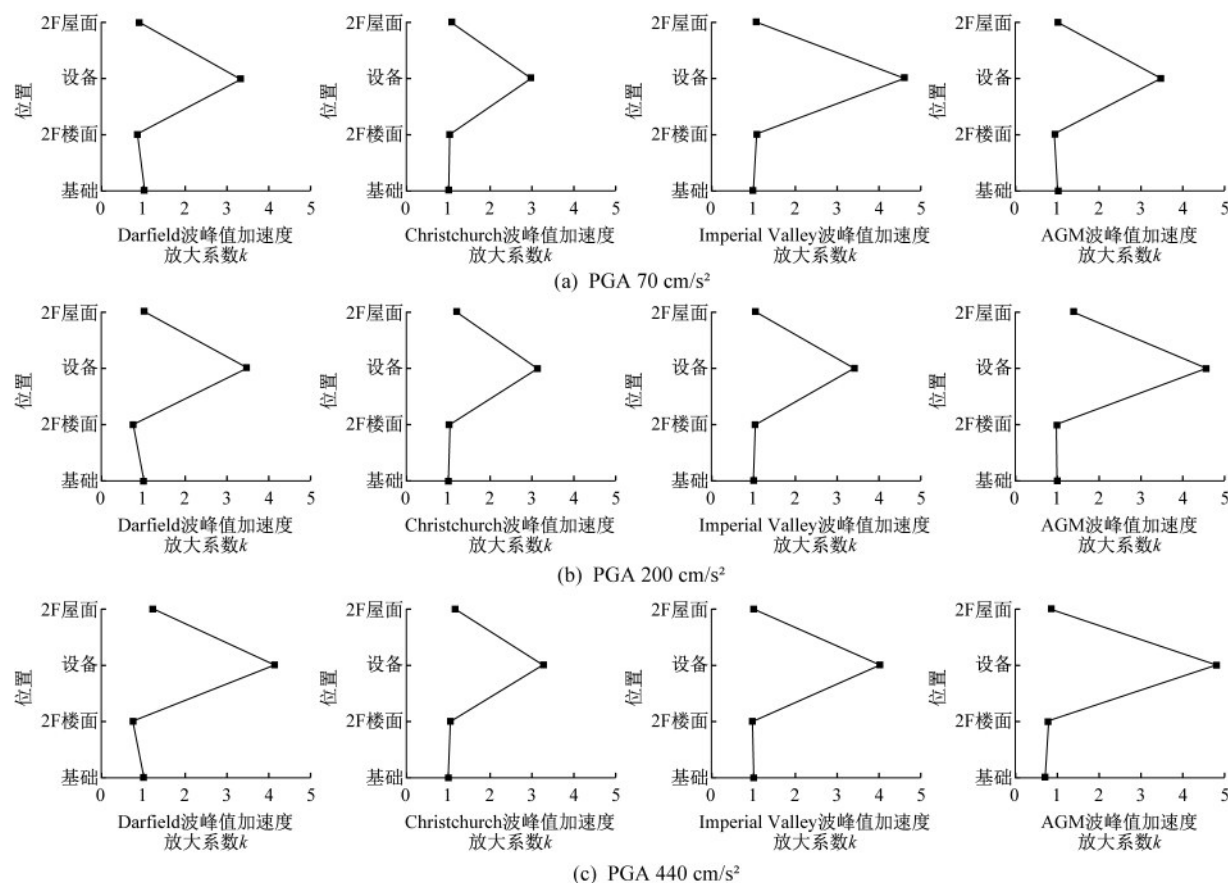


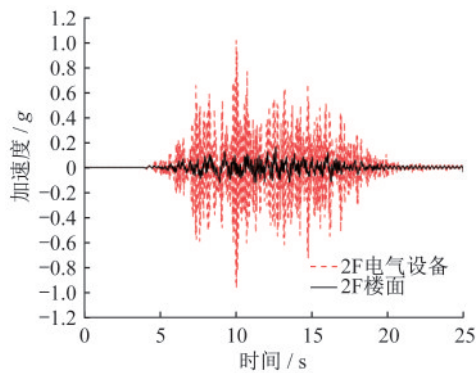
图12 各层峰值加速度放大系数

Fig.12 Peak acceleration amplification factor for each story

分析表明,LRB隔震的钢框架变电站在遭遇地震荷载时,楼面上的电气设备处的加速度放大现象尤为显著,而主体结构的楼面、屋面加速度响应较小。具体而言,12个工况中楼面加速度放大系数最大值为1.09,屋面的加速度放大系数最大值为1.39,而电气设备的放大系数最大值达到了6.76,最小值也为2.97。在12种工况下,楼面、设备和屋面的加速度放大系数 $k$ 分布趋势几乎相同,电气设备对于有脉冲的近场地震波Imperial Valley和AGM波的响应较大。

7度大震AGM波工况电气设备加速度和楼面加速度时程曲线如图13所示。通过对比电气设备与楼面加速度时程曲线,可以进一步观察到,即

使隔震支座已经隔绝了绝大部分地震,上部结构的地震响应已经较小,但是电气设备局部的地震加速度响应仍然相对电气设备所在楼面有不小的放大。特别是在某些地震波条件下,电气设备的最大加速度甚至能够达到其所在楼层的5倍甚至6倍以上。在各地震波下电气设备上最大加速度出现位置均为图11中C轴断面图与1轴相交处,通过现场录像观察此处地震响应也最为剧烈,具体表现为电气设备顶端的局部震颤。这可能是由于隔震支座降低了结构基频,使设备的高阶振型的影响得以凸显,当地震波中含丰富高频成分时,非结构构件可能直接响应振动中的高频部分,产生加速度峰值。

图 13 AGM 波设备-楼面加速度时程曲线(PGA 440 cm/s<sup>2</sup>)Fig.13 AGM wave equipment-floor acceleration time-history curves (PGA 440 cm/s<sup>2</sup>)

### 5.3 支座相对位移响应

除了关注加速度之外,隔震结构的隔震支座相对位移也是评价结构受损程度的重要参数之一。

各工况下各层隔震支座最大相对位移见表 7。在所有工况中测得的隔震支座最大相对位移均未超过设计值 55 mm,其中 7 度大震下的 Imperial Valley 波工况相对位移最大,为 37.7 mm。在相同等级的 PGA 下,Christchurch 波和 Imperial Valley 波的相对位移值为 AGM 波和 Darfield 波的 2~3 倍。Imperial Valley 波在各 PGA 下的支座最大相对位移响应均大于另外三条波,这可能是由 Imperial Valley 波的脉冲效应导致的。

表 7 支座相对位移值(mm)

Table 7 Relative displacement values of bearings (mm)

地震波	PGA 70 cm/s <sup>2</sup>	PGA 200 cm/s <sup>2</sup>	PGA 440 cm/s <sup>2</sup>
Darfield	1.0	3.9	13.3
Christchurch	2.7	11.1	25.2
Imperial Valley	4.2	17.1	37.7
AGM	1.5	4.4	10.0

## 6 结 论

本文通过振动台试验分析了全户内 LRB 隔震半刚性钢结构变电站的抗震性能,得到了以下主要结论:

(1) 铅芯橡胶支座(LRB)隔震效果显著。通过振动台试验,发现 LRB 能有效增加结构的自然振动周期,避开地震波中的卓越周期,减少结构响应。LRB 的阻尼作用明显,起到了较好的减震效

果。此外,所有工况中测得的隔震支座最大相对位移均未超过设计值 55 mm,表明隔震支座的设计和性能满足工程要求。

(2) 电气设备的地震加速度响应放大效应显著。尽管隔震支座显著降低了上部结构的地震响应,但电气设备处的加速度放大现象较为显著。电气设备的加速度放大系数最大值达到了 6.76,这表明在地震作用下,电气设备的安全和稳定性需要特别关注。特别是带有脉冲效应的近场地震波(如 Imperial Valley 波)对电气设备的影响更为显著。

## 参 考 文 献

- [1] SPRINGFIELD J. Semi-rigid connections structural steel framing: A practising engineer's view[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1987, 8: 1-13.
- [2] 叶康,李国强,张彬. 钢框架半刚性连接研究综述[J]. 结构工程师, 2005(4): 68-71, 76.  
YE Kang, LI Guoqiang, ZHANG Bin. Summarizing in research for semi-rigid connections for steel frame structures[J]. Structural Engineer, 2005(4): 68-71, 76. (in Chinese)
- [3] 韩冬,胡长姣,王新武. 半刚性连接空间钢框架的拟动力试验分析[J]. 世界地震工程, 2014, 30(2): 24-28.  
HAN Dong, HU Changjiao, WANG Xinwu. Research on seismic performance of plane steel frame with semi-rigid connection [J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(2): 24-28. (in Chinese)
- [4] 文波,张路,牛荻涛,等. 考虑主子结构动力相互作用的变电站抗震性能分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(16): 166-173.  
WEN Bo, ZHANG Lu, NIU Ditao, et al. Seismic behavior of substation considering dynamic interaction on the main structure [J]. Vibration and Shock, 2019, 38(16): 166-173. (in Chinese)
- [5] PANTOLI E, CHEN M C, WANG X, et al. Full-scale structural and nonstructural building system performance during earthquakes: Part II-NCS damage states [J]. Earthquake Spectra, 2016, 32(2): 771-794.
- [6] 滕睿,徐国贤,张锡朋,等. 非结构构件振动台试验楼面响应谱再现技术研究[J]. 结构工程师, 2018, 34(S1): 115-121.  
TENG Rui, XU Guoxian, ZHANG Xipeng, et al. Studies of the floor response spectra reappearance technology of nonstructural component shaking table testing [J].

- Structural Engineers, 2018, 34 (S1) : 115-121. (in Chinese)
- [ 7 ] 党育, 王宝平, 李国宝. 隔震结构-设备组合体系的优化设计研究[J]. 世界地震工程, 2022, 38(1) : 110-118.
- DANG Yu, WANG Baoping, LI Guobao. Study on optimization design of isolated structure-equipment composition systems [J]. World Earthquake Engineering, 2022, 38(1) : 110-118. (in Chinese)
- [ 8 ] 金建源. 隔震结构-设备组合体系设备滑动楼面反应谱研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- JIN Jianyuan. Research on response spectrum of equipment sliding floor in isolated structure equipment combination system [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [ 9 ] 文波, 张俊发, 韩永兴, 等. 变电站配电楼的隔震设计[J]. 建筑结构, 2005(11) : 25-28.
- WEN Bo, ZHANG Junfa, HAN Yongxing, et al. Research and design of base isolated structure of switch building in substation [J]. Building Structure, 2005(11) : 25-28. (in Chinese)
- [ 10 ] 建筑抗震设计标准: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [ 11 ] 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Steel and steel products—Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing: GB/T 2975—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [ 12 ] 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)