



国家电网
STATE GRID

中国电力科学研究院
CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

报告编号: HGC2014-060

分类号: TU352.11

126kV 和 252kV 玻璃钢电容式变压器套管
地震模拟振动台试验研究报告
Report on Earthquake Simulation Shaking Table Test of
126kV and 252kV Glass Steel Capacitive Transformer
Bushing

中国电力科学研究院

2014年7月





工作单位：中国电力科学研究院

工作时间：2014.6-2014.7

项目负责人：卢智成

工作人员：鲁先龙 卢智成 朱祝兵 孟宪政 高坡 孙宇晗 刘振林

吉晔 张谦 钟珉 李圣

报告编写：卢智成 孟宪政

报告审核

学术技术分委会：鲁先龙

部 门：董玉明

科技部/咨询业务部：汪卡佳

学术技术委员会：程永锋

报告批准

总工/院长：李 正

内容摘要

四川巴塘 500kV 变电站地处高烈度地震区域，对电气设备的抗震能力提出较高的要求。由于复合材料本身具有强度高、延性好等特点，将在巴塘变电站采用主要由复合材料组成的电气设备，但缺乏对该工程中复合材料电气设备抗震性能的了解。本研究依托巴塘 500kV 变电站工程，针对山东七星高压电气有限公司生产的各 1 支 126kV 和 252kV 玻璃钢电容式变压器套管试件，开展了地震模拟振动台试验，获得了该类型设备试件的地震反应。结果表明：这两支 126kV 和 252kV 变压器套管试件均满足抗震设防烈度 9 度（0.4g）的抗震要求。

关键词：复合材料电气设备；地震模拟振动台；地震反应

ABSTRACT

It puts forward higher requirements for the seismic capability of electrical equipment for Batang 500kV substation located in high seismic intensity area of Sichuan. Nowadays, the seismic characteristics of the electrical equipments made of composite material applied in Batang substation are not known in spite of better feature for the composite material. Based on the project of the Batang 500kV substation, 126kV and 252kV glass steel capacitance transformer bushing produced by the Shandong Qixing High-voltage Electric Limited Company were tested by seismic simulation shaking table, and the seismic responses of the specimens were obtained. The test results show that the test specimens of the 126kV and 252kV transformer bushing meet the seismic requirements of the seismic fortification intensity of nine degree (maximal acceleration value is 0.4g).

KEYWORDS: electrical equipment made of composite material、Shaking table、Seismic response

目 录

1 概述.....	1
2 测点布置	2
3 试验方法及评判依据	3
3.1 试验输入地震动波形	3
3.1.1 共振拍波.....	3
3.1.2 白噪声随机波.....	4
3.2 试验要求	4
3.3 评判依据	5
4 试验工况	5
5 抗震试验结果	5
6 抗震性能分析	7
6.1 应力和位移评价	7
6.2 风荷载作用下设备位移和应力	8
6.3 试验数据处理	8
6.4 设备应力结果分析	9
6.5 设备位移结果分析	9
7 结论	10
附录 A 各工况加速度时程曲线.....	12
附录 B 各工况应变时程曲线.....	15

1 概述

巴塘 500kV 变电站新建工程是国家电网公司重点工程—西藏昌都与四川联网输变电工程的重要枢纽变电站，位于四川省巴塘地区松潘—甘孜造山带内，地震安评报告结论表明，“巴塘 500kV 变电站站址的地震烈度为 8 度（0.2g）”。按照《电力设施抗震设计规范》GB 50260—2013 中总则 1.0.9 条“……重要电力设施中的电气设施可按抗震设防烈度提高 1 度设防，但抗震设防烈度为 9 度及以上时不再提高。”因此本站设备需提高一度进行设防，即按 9 度（0.4g）抗震要求进行设防。

中国电力科学研究院受山东七星高压电气有限公司委托，对其生产的 252/126kV 玻璃钢电容式变压器套管开展振动台试验。根据设备厂家提供的设备参数如表 1-1 所示，试验工作在北京中水科工程总公司的地震模拟振动台上完成，该振动台技术参数如表 1-2 所示。

本次试验针对给定的试验要求（包括动力放大系数、激励波的输入、台面输出时程与期望时程之间的容差控制、性能评价标准等方面），通过地震动模拟振动台试验，测定变压器套管的动力特性（自振频率、阻尼比）和地震反应，并进行抗震能力判定。

表 1-1 设备的基本参数

名称	型号	重量 (kg)	高度 (mm)	套管外径 (mm)	套管弹模 (MPa)
126kV 玻璃钢电容式变压器套管	FBRGW-126/630-4	120	2875	165	1.7×10 ⁴
252kV 玻璃钢电容式变压器套管	FBRGW-252/630-4	650	4620	300	

表 1-2 振动台技术参数

类型名称	相关参数		
台面尺寸	5m×5m		
振动方向	X、Y、Z 三方向六自由度		
振动位移	X: ±40mm	Y: ±40mm	Z: ±30mm
振动加速度	X: ±1.0g	Y: ±1.0g	Z: ±0.7g
最大试件重量	200kN		
最大倾覆力矩	600kN·m		
工作频率范围	0.1 Hz ~120Hz		

2 测点布置

在套管根部的 X 向和 Y 向对应位置粘贴应变片，在振动台台面、支座及套管顶端放置加速度计，测点位置示意图如图 2-1 所示，设备在地震模拟振动台现场布置如图 2-2 所示。

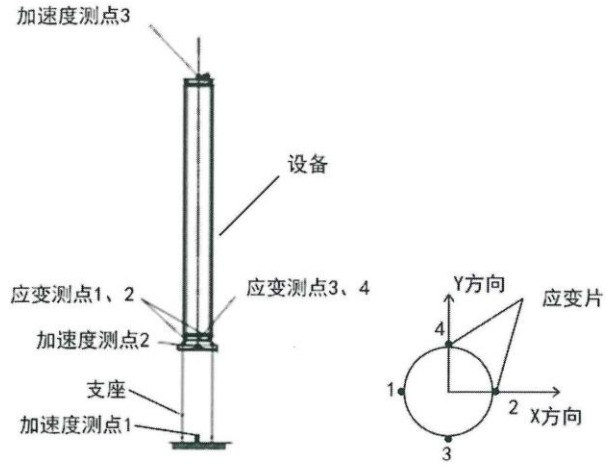
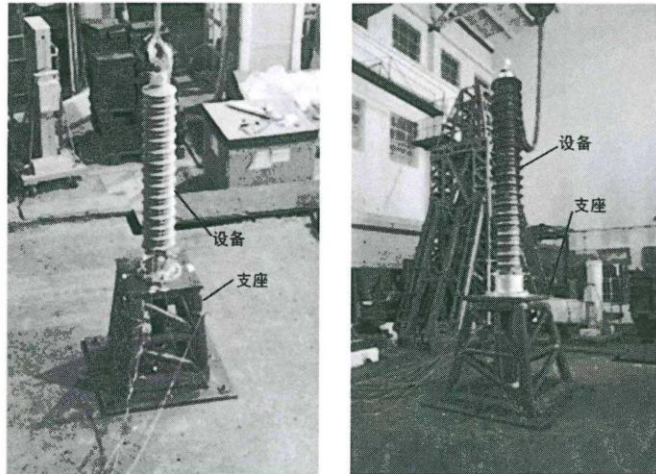


图 2-1 测点布置示意图



(a) 126kV 玻璃钢电容式变压器套管 (b) 252kV 玻璃钢电容式变压器套管

图 2-2 设备现场布置图

3 试验方法及评判依据

3.1 试验输入地震动波形

3.1.1 共振拍波

参照《电力设施抗震设计规范》(GB 50260—2013), 针对抗震振动台试验输入地震波, 结合实际设备抗震试验分析结果可知, 仅针对设备套管进行抗震试验激励波中, 正弦共振 5 拍波的试验考核最为严格, 因此可选用正弦共振 5 拍波作为唯一激励输入波, 如图 3-1 所示。

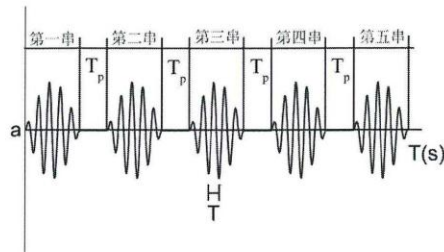


图 3-1 试验用共振 5 拍波示意图

各拍的加速度时程可按下列规定确定:

当 $t \geq 5T$ 时, $a=0$

当 $0 \leq t \leq 5T$ 时, a 值可按公式 (3-1) 和 (3-2) 确定:

$$a = a_s \sin \omega t \times \sin \frac{\omega t}{10} \quad (3-1)$$

$$a_s = 0.75a_0 \quad (3-2)$$

式中:

a —各时程的水平加速度 (g);

t —时间 (s);

T —体系在测试方向的基本自振周期 (s);

a_s —时程分析地面运动最大水平加速度 (g);

a_0 —设计基本地震加速度值 (g);

ω —体系在测试方向的基本自振圆频率 (Hz)。

《电力设施抗震设计规范》(GB 50260—2013) 规定各拍间隔为:

$$T_p > \frac{1}{f} \cdot \frac{100}{d} \quad (3-3)$$

式中:

T_p —拍间间隔 (s);

f —体系在测试方向的基本频率 ($=\frac{1}{T}$) (Hz);

d —体系的阻尼比 (%)。

3.1.2 白噪声随机波

试验采用的白噪声随机波频率范围为 0.1Hz~50Hz, 加速度峰值为 0.05g, 持续时间不少于 60s。对试件进行单向激振, 通过关键部位的加速度反应得到设备的自振频率。白噪声随机波波形如图 3-2 所示。

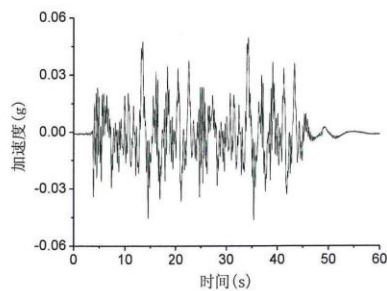


图 3-2 试验用白噪声随机波波形图

3.2 试验要求

(1) 根据《电力设施抗震设计规范》(GB 50260—2013), 对安装在变压器上的设备本体进行抗震振动台试验, 考虑动力放大系数 2.0;

(2) 本次试验试件为轴对称结构, 仅对设备进行单 X 向水平向地震试验;

(3) 振动台台面产生的地震动时程波应包络要求的输入地震动时程, 两者加速度峰值之差应在 0~10%之间;

(4) 考虑到地震台试验能力情况, 台面实际输出加速度值往往会低于加速度目标值, 因此其试验加速度应考虑 1.05 倍包络放大系数。即综合考虑动力放大系数、包络放大系数, 实际加速度峰值输入按照公式 (3-4) 确定:

$$a_{\text{实际}} = 2.0 \times 1.05 \times a_{\text{设计}} = 2.1a_{\text{设计}} \quad (3-4)$$

3.3 评判依据

通过地震模拟振动台试验检验复合材料电气设备抗震性能，根据试验结果并结合风荷载下计算结果，综合评估复合材料电气设备的抗震能力，主要以设备应力强度和位移变形来做评判依据。

(1) 荷载组合中，除去地震作用和设备自重外，还需考虑风荷载；

(2) 强度控制要求：参照美国 IEEE693—2005 Recommended practice for seismic design of substations，确定规定复合材料电气设备的安全系数应大于 2.0；

(3) 位移控制要求：满足结构设计允许位移，且振动台试验后设备电气功能无损伤，认为位移满足抗震要求，否则亦然。

4 试验工况

电气设备抗震试验过程：(I) 第一步进行加速度峰值为 0.05g~0.08g 白噪声输入，持续时间不少于 60s；(II) 第二步根据给定的共振拍波，以加速度峰值多次迭代以满足容差要求。试件试验后要进行白噪声试验以确定设备基频变化在容许的范围以内，保证设备没有损坏。试验工况如表 4-1 所示。

表 4-1 试验工况表

设备名称	试验编号	试验工况		
		地震激励波	输入峰值加速度(g)	备注
126kV 玻璃钢电容式变压器套管	1	白噪声	0.05	白噪声波测定设备的自振频率和阻尼比；共振拍波测定设备的地震响应。
	2	共振拍波	0.1575	
	3	白噪声	0.05	
	4	共振拍波	0.63	
	5	白噪声	0.05	
252kV 玻璃钢电容式变压器套管	6	白噪声	0.05	
	7	共振拍波	0.1575	
	8	白噪声	0.05	
	9	共振拍波	0.63	
	10	白噪声	0.05	

5 抗震试验结果

通过抗震试验获得设备的频率、阻尼比如表 5-1。

表 5-1 设备频率和阻尼比

设备名称	试验编号	模态阶次	频率(Hz)	阻尼比(%)
126kV 玻璃钢电容式 变压器套管	1	试验前 1 阶	22.34	1.00
	5	试验后 1 阶	22.21	1.10
252kV 玻璃钢电容式 变压器套管	6	试验前 1 阶	15.62	1.70
	10	试验后 1 阶	15.58	1.71

各工况所测应变如表 5-2 所示, 加速度峰值和设备顶端位移如表 5-3 所示。各工况加速度时程曲线、应变时程曲线分别见附录 A、附录 B。

表 5-2 设备试验应变测试结果

设备名称	试验编号	台面目标峰值 加速度(g)	测点的应变峰值 ($\mu\epsilon$)			
			1	2	3	4
126kV 玻璃钢电容式变压器套管	2	0.15	58.1	51.4	12.5	12.6
	4	0.60	221.3	195.4	31.3	24.9
252kV 玻璃钢电容式变压器套管	7	0.15	71.1	74.9	12.8	11.9
	9	0.60	290.0	309.6	34.2	30.0

注: 上表数据中应变数据是应变片正负峰值取绝对值的平均值。

表 5-3 设备试验加速度、顶端位移测试结果

设备名称	试验 编号	台面目标峰值 加速度(g)	测点的加速度峰值 (g)			顶端位移 (mm)
			台面	支座顶	设备顶	
126kV 玻璃钢电容式变压器 套管	2	0.15	0.158	0.35	1.40	—
	4	0.60	0.602	0.73	6.58	15.04
252kV 玻璃钢电容式变压器 套管	7	0.15	0.223	0.17	2.12	—
	9	0.60	0.701	0.73	9.05	9.26

注: 位移数据是由加速度积分所得, 位移是设备相对于台面的相对位移。

根据公式 (5-1) 可以得到设备的应力。

$$\sigma_{\text{实测}} = E\varepsilon \quad (5-1)$$

式中:

$\sigma_{\text{实测}}$ —试验实测应力;

E —设备弹性模量;

ε —所测的应变。

各工况设备的应力如表 5-4 所示。

表 5-4 设备套管试验应力结果

设备名称	试验编号	台面目标峰值 加速度(g)	测点的应力峰值 (MPa)			
			1	2	3	4
126kV 玻璃钢电容式变压器套管	2	0.15	0.99	0.87	0.21	0.21
	4	0.60	3.76	3.32	0.53	0.42
252kV 玻璃钢电容式变压器套管	7	0.15	1.21	1.27	0.22	0.20
	9	0.60	4.93	5.26	0.58	0.51

6 抗震性能分析

6.1 应力和位移评价

设备应力评价按照公式 (6-1) 和 (6-2) 计算。

$$F_s = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\text{计算}}} > 2.0 \quad (6-1)$$

$$\sigma_{\text{计算}} = 0.25 \times \sigma_{\text{风}} + \sigma_{\text{实测}} \quad (6-2)$$

式中:

F_s —安全系数;

$[\sigma]$ —许用应力;

$\sigma_{\text{计算}}$ —计算组合应力;

$\sigma_{\text{风}}$ —风荷载应力;

$\sigma_{\text{实测}}$ —试验实测应力;

位移按照公式 (6-3) 计算, 其中 $D_{\text{计算}}$ 需满足设备结构和电气功能设计要求。

$$D_{\text{计算}} = 0.25 \times D_{\text{风}} + D_{\text{实测}} \quad (6-3)$$

式中:

$D_{\text{计算}}$ —计算组合位移;

$D_{\text{风}}$ —风荷载位移;

$D_{\text{实测}}$ —试验实测位移;

6.2 风荷载作用下设备位移和应力

按照《电力设施抗震设计规范》(GB 50260-2013)规定,设备抗震能力需要按照自重、地震作用和 0.25 倍风荷载以及其它荷载下的应力组合进行判定,本设备除去自重、地震作用和风荷载外其它荷载较小予以忽略,按照《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)计算风荷载大小。垂直于建筑物表面上的风荷载标准值,应按公式(6-4)计算:

$$\omega_k = \beta_z \mu_s \mu_z \omega_0 \quad (6-4)$$

式中:

ω_k —风荷载标准值, kN/m^2 ;

β_z —z 高度处的风振系数;

μ_s —风荷载体型系数;

μ_z —风压高度变化系数;

ω_0 —基本风压值, kN/m^2 。

风速取 28m/s, 基本风压为 0.5kN/m²。

根据《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)确定相应的风荷载体型系数和风压高度变化系数,根据《变电所建筑设计技术规定》(NDGJ96-92)确定相应的风振系数。

126kV 玻璃钢电容式变压器套管和 252kV 玻璃钢电容式变压器套管风荷载按照上述公式计算得到等效于设备顶端的集中荷载为 0.13kN、0.43kN,设备在风荷载作用下的最大应力为 0.46MPa、0.45MPa,最大位移分别为 1.3mm、2.3mm。

6.3 试验数据处理

由于变压器套管试验输入时已经考虑变压器本体动力放大系数 2.0,故应消除试验支座对输入加速度的动力放大作用。但是,设备套管为了和振动台相连,设备套管需要坐落在支座上,支座再与振动台相连,而支座并不能成为完全刚性支座。因此,支座对设备套管仍有一个动力放大作用,典型工况支座顶部实测加速度峰值与输入目标加速度峰值对比如表 6-1 所示,若支座顶部实测加速度峰值与台面目标加速度峰值不相等,最终的试验结果需要按照实测和目标加速度峰值相等原则进行调整处理。

表 6-1 设备支座顶部实测时程加速度峰值与目标峰值加速度对比

设备名称	试验编号	台面目标峰值加速度(g)	支座顶部实测加速度峰值(g)	支座顶部实测加速度峰值与目标峰值之比
126kV 玻璃钢电容式变压器套管	4	0.60	0.73	1.22
252kV 玻璃钢电容式变压器套管	9	0.60	0.73	1.22

6.4 设备应力结果分析

调整后的设备应力及与风荷载的组合应力如表 6-2 所示。从表 6-2 中可以看出：126kV 套管和 252kV 套管最大应力的安全系数分别为 24.96、18.03，均满足 IEEE 693—2005 Recommended practice for seismic design of substations 规范关于安全系数大于 2.0 的要求。

表 6-2 试验结果调整后设备最大应力试验结果

设备名称	试验编号	台面目标峰值加速度(g)	$\sigma_{\text{实测}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{风}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{计算}}$ (MPa)	$[\sigma]$ (MPa)	安全系数
126kV 玻璃钢电容式变压器套管	4	0.60	3.09	0.46	3.21	80	24.96
252kV 玻璃钢电容式变压器套管	9	0.60	4.32	0.45	4.44	80	18.03

注： $\sigma_{\text{实测}}$ 为试验实测应力值经过调整后得到的数值

6.5 设备位移结果分析

调整后的设备顶端位移及与风荷载的组合位移如表 6-3 所示。从表 6-3 中可以看出：126kV 玻璃钢电容式变压器套管和 252kV 玻璃钢电容式变压器套管顶端最大位移分别为 12.65mm 和 8.16mm，位移角分别为 1/122 和 1/345。套管顶端最大位移满足结构位移要求，并根据厂家的电气功能检测报告显示：试验后设备电气功能均正常。

表 6-3 试验结果调整后设备顶端位移试验结果

设备名称	试验编号	台面目标峰值加速度(g)	$D_{\text{实测}}$ (mm)	$D_{\text{风}}$ (mm)	$D_{\text{计算}}$ (mm)	位移角
126kV 玻璃钢电容式变压器套管	4	0.60	12.33	1.3	12.65	1/122
252kV 玻璃钢电容式变压器套管	9	0.60	7.59	2.3	8.16	1/345

注：表中位移角是 $D_{\text{计算}}$ 与设备高度的比值， $D_{\text{实测}}$ 为试验实测位移值经过调整后得到数值。

7 结论

中国电力科学研究院根据给定的试验要求及相应的试验方案,对山东七星 126kV 和 252kV 玻璃钢电容式变压器套管进行了 0.4g (9 度) 共振拍波激励下的抗震振动台试验,获得了设备的动力响应(应力和位移),并组合风荷载计算下的设备荷载响应后,给出最终的应力和位移,据此给出如下结论:

(1) 126kV 和 252kV 变压器套管的试验最大应力值分别为 3.09MPa、4.32 MPa,按照荷载组合下应力值分别为 3.21MPa、4.44MPa,安全系数分别为 24.96、18.03,满足 IEEE 693—2005 Recommended practice for seismic design of substations 规范关于安全系数大于 2.0 的要求。

(2) 126kV 和 252kV 变压器套管的试验最大位移分别为 12.33mm、7.59mm,按照荷载组合下位移值分别为 12.65mm、8.16mm,设备位移角分别为 1/122、1/345。既可以满足结构位移要求,并结合厂家提供的设备抗震试验后电气功能无损伤的复检报告,设备的位移响应满足抗震要求。

综上所述,山东七星 126kV 和 252kV 玻璃钢电容式变压器套管试验试件均满足 9 度基本加速度 (0.4g) 抗震要求。

参考文献

- [1]GB 50260-2013 电力设施抗震设计规范.北京: 中国计划出版社, 2013.
- [2]IEEE 693-2015 Recommended practice for seismic design of substations. New York: IEEE Power Engineering Society,2006.
- [3]GB 50009-2012 建筑结构荷载规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [4]NDGJ 96-92 变电所建筑结构设计技术规定.1992

附录 A 各工况加速度时程曲线

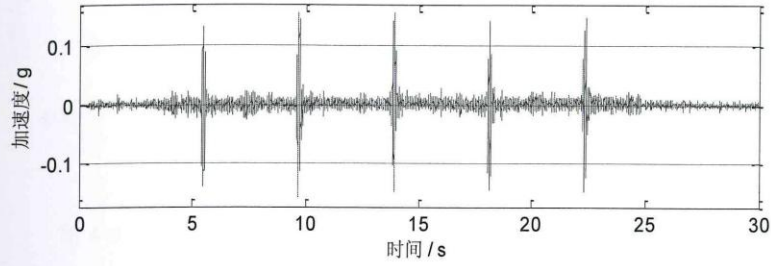


图 A-1 126kV 套管 0.15g 共振拍波地震波作用下振动台台面加速度时程曲线

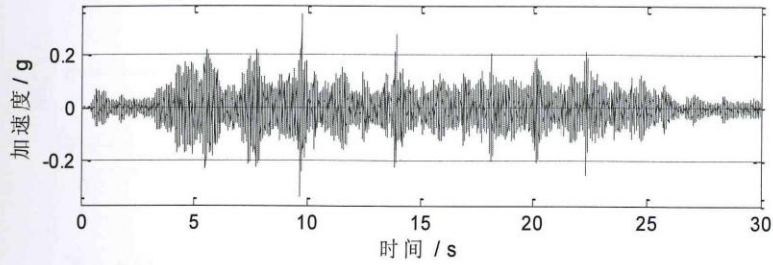


图 A-2 126kV 套管 0.15g 共振拍波地震波作用下支座顶部加速度时程曲线

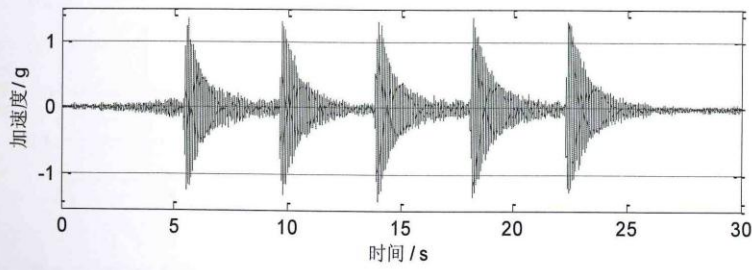


图 A-3 126kV 套管 0.15g 共振拍波地震波作用下设备顶部加速度时程曲线

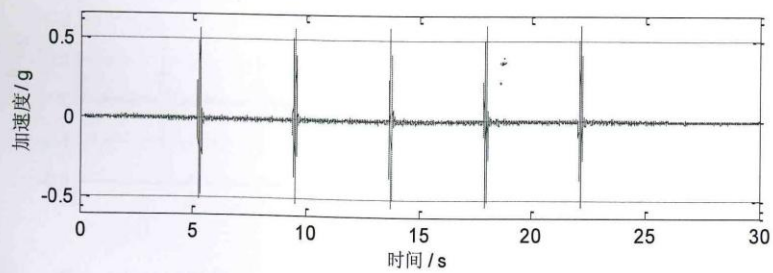


图 A-4 126kV 套管 0.6g 共振拍波地震波作用下振动台台面加速度时程曲线

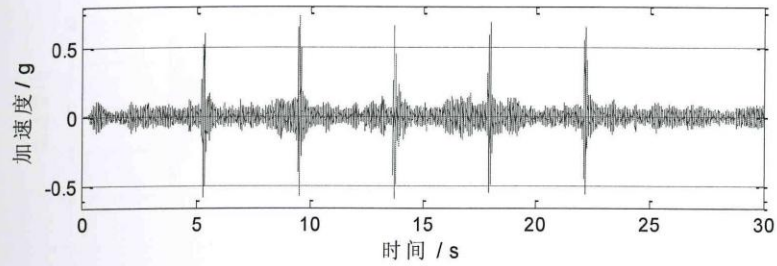


图 A-5 126kV 套管 0.6g 共振拍波地震波作用下支座顶部加速度时程曲线

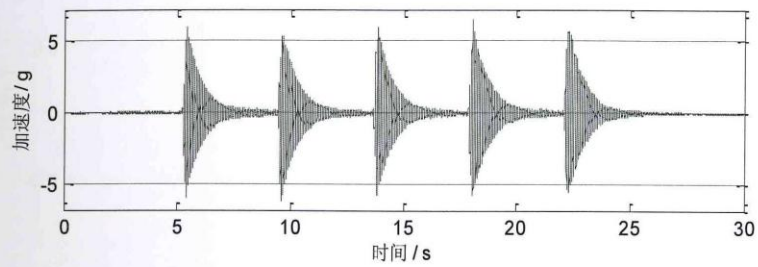


图 A-6 126kV 套管 0.6g 共振拍波地震波作用下设备顶部加速度时程曲线

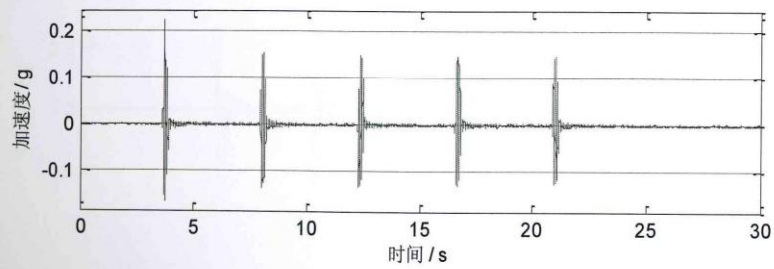


图 A-7 252kV 套管 0.15g 共振拍波地震波作用下振动台台面加速度时程曲线

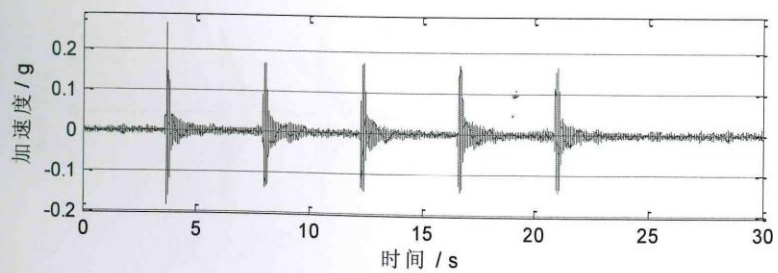


图 A-8 252kV 套管 0.15g 共振拍波地震波作用下支座顶部加速度时程曲线

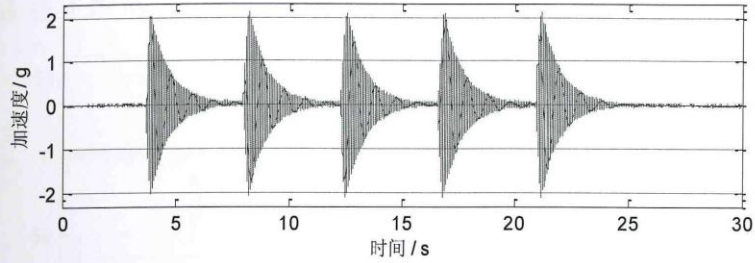


图 A-9 252kV 套管 0.15g 共振拍波地震波作用下设备顶部加速度时程曲线

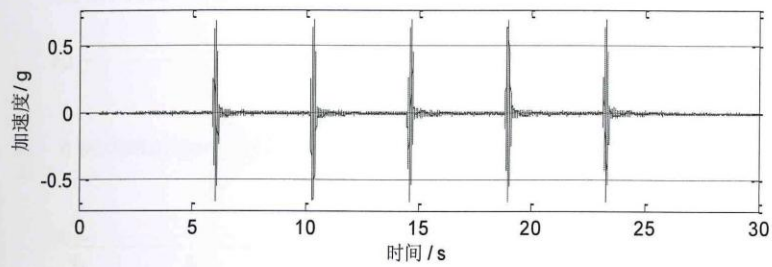


图 A-10 252kV 套管 0.6g 共振拍波地震波作用下振动台台面加速度时程曲线

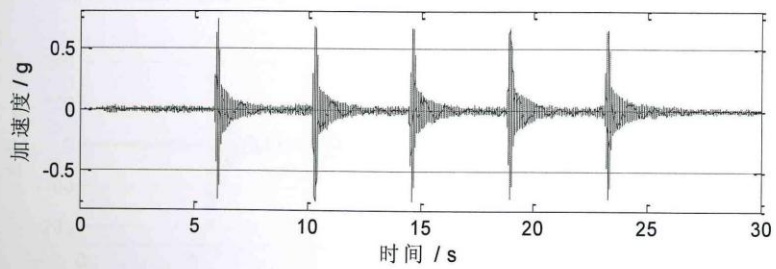


图 A-11 252kV 套管 0.6g 共振拍波地震波作用下支座顶部加速度时程曲线

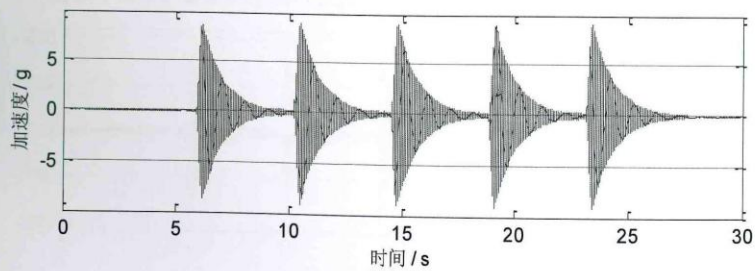


图 A-12 252kV 套管 0.6g 共振拍波地震波作用下设备顶部加速度时程曲线

附录 B 各工况应变时程曲线

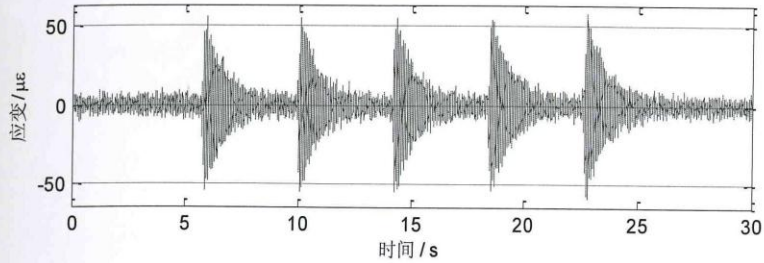


图 B-1 126kV 套管 0.15g 共振拍波地震波作用下 X-1 应变片应变时程曲线

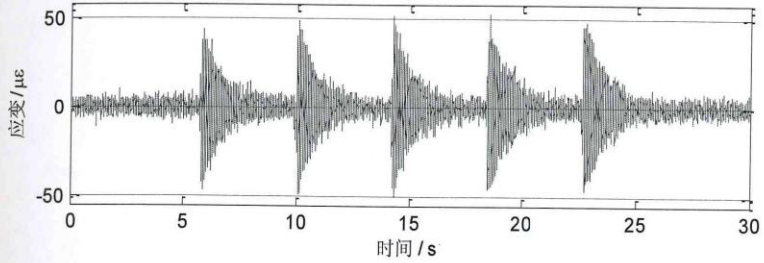


图 B-2 126kV 套管 0.15g 共振拍波地震波作用下 X-2 应变片应变时程曲线

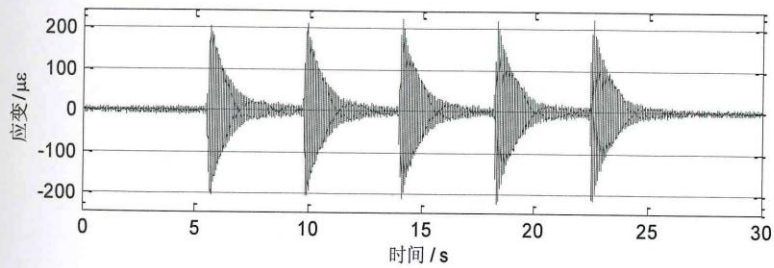


图 B-3 126kV 套管 0.6g 共振拍波地震波作用下 X-1 应变片应变时程曲线

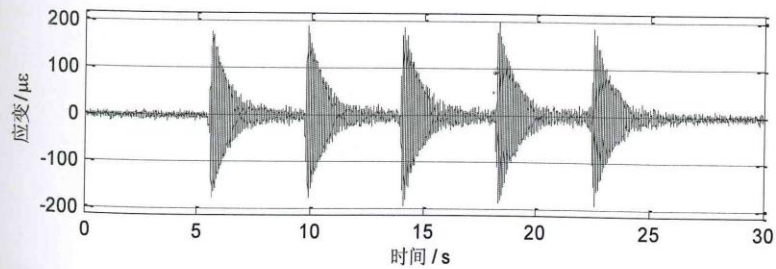


图 B-4 126kV 套管 0.6g 共振拍波地震波作用下 X-2 应变片应变时程曲线

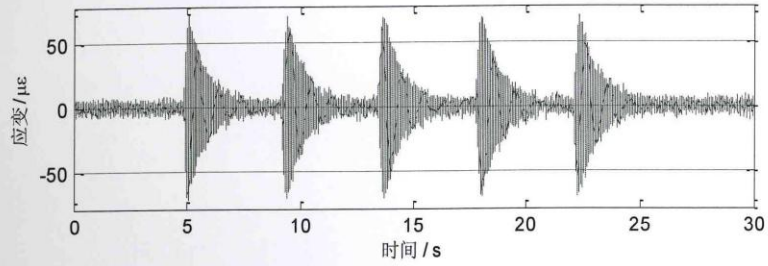


图 B-5 252kV 套管 0.15g 共振拍波地震波作用下 X-1 应变片应变时程曲线

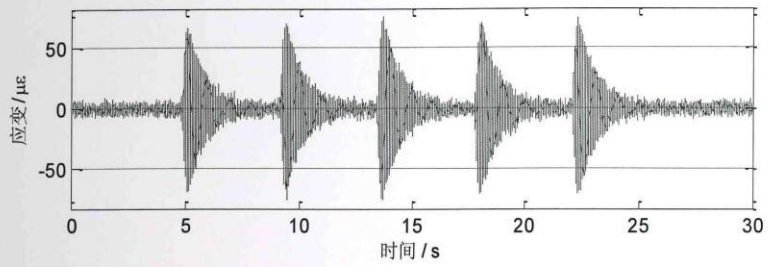


图 B-6 252kV 套管 0.15g 共振拍波地震波作用下 X-2 应变片应变时程曲线

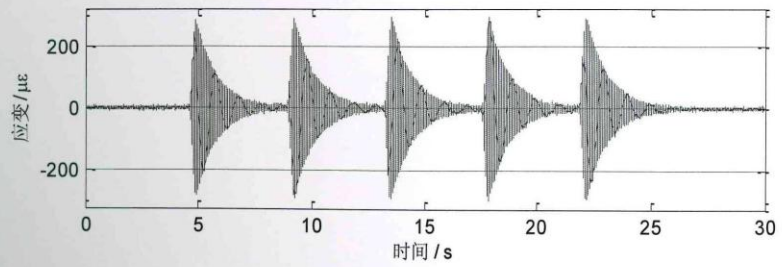


图 B-7 252kV 套管 0.6g 共振拍波地震波作用下 X-1 应变片应变时程曲线

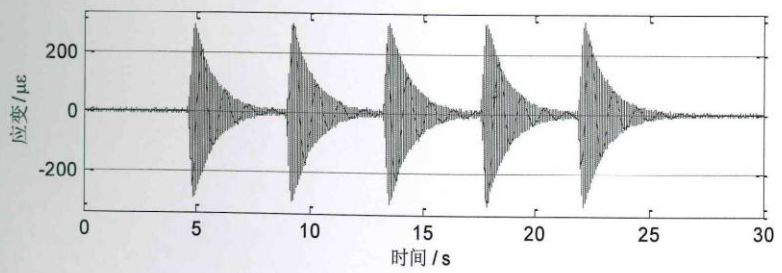


图 B-8 252kV 套管 0.6g 共振拍波地震波作用下 X-2 应变片应变时程曲线