



国家电网公司
电力科技著作出版项目

变电站电气设备抗震 试验技术

程永锋 卢智成 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

变电站电气设备抗震 试验技术

程永锋 卢智成 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

电气设备的抗震能力是决定电网地震安全的关键因素。为了更精确检验电气设备的抗震能力,进一步指导变电站电气设备的抗震设计,特邀权威专家编写了本专著。

本专著系统地介绍了变电站电气设备的抗震试验,涵盖变电站电气设备抗震试验的主要难点、关键技术、试验流程和注意事项等内容。全书共分为八章,主要包括变电站电气设备的动力特性试验及其抗震试验方法,变电站电气设备本体及其支架动力耦合效应试验及分析,复合材料绝缘子与套管、互连变电站电气设备的抗震试验,变电站电气设备抗震构造措施等内容。

本专著可供从事电气设备设计、生产、鉴定,变电站设计、施工等工作的工程技术人员以及电力抗震要关领域的科研工作者作用,也可供相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

变电站电气设备抗震试验技术/程永锋,卢智成著. —北京:中国电力出版社,2017.11
ISBN 978-7-5198-1007-8

I. ①变… II. ①程…②卢… III. ①变电所—电气设备—抗震试验 IV. ①TM63

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第178595号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:翟巧珍 高 芬(fen-gao@sgcc.com.cn)

责任校对:王小鹏

装帧设计:张俊霞 左 铭

责任印制:邹树群

印 刷:三河市万龙印装有限公司

版 次:2017年11月第一版

印 次:2017年11月北京第一次印刷

开 本:710毫米×980毫米 16开本

印 张:16

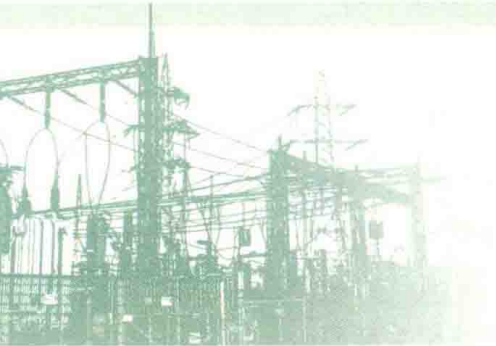
字 数:273千字

印 数:0001—1000册

定 价:128.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换



前言

地震灾害是全球主要灾害之一，历次地震灾害都给社会生产、人民生活带来极大的破坏。而在每一次的大地震中，电网系统的破坏都无可避免。2008年发生的汶川地震，电网损失惨重，累计停运变电站上百座、输电线路上千条。2013年发生的雅安芦山地震，由于变电站的破坏，灾区局部电网一度全部中断。因此，变电站的抗震安全至关重要，而抗震试验作为直观检验变电站电气设备抗震能力的有效手段，其要求也不断提高。

随着我国电网规模的急速发展，500kV及以上电压等级电网已经成为骨干电网，输变电电压等级的逐步提高，使得电气设备的材料、工艺、布置方式、支架设计、连接方式，甚至设备自身的动力学性能等都有显著改变，但目前针对这些电压等级的地震灾害经验较少，因此更依赖于地震试验检验设备的抗震能力，提出相应的抗震设计要求，保证电网地震安全。基于此需求，国家电网公司于2012年设立了《高压电气设备抗震试验关键技术研究》课题，由中国电力科学研究院牵头，针对高压电气设备抗震试验方法的主要技术难题开展了系列研究，制定了Q/GDW 11391—2015《高压支柱类电气设备抗震试验技术规程》、Q/GDW 11267—2014《互连高压电气设备抗震设计技术规程》等技术标准，研究成果为高压电气设备的抗震试验和评估提供了重要的技术支撑。

本专著立足于项目科研成果，重点介绍高压电气设备抗震试验的关键技术要点，包括高压电气设备动力特性试验方法及应用条件、高压电气抗震试验方法及适用性分析、单体支架—设备振动台试验及设计方法、互连电气设备的振动台试验及设计方法、高压电气设备的构造措施以及复合材料绝缘子与套管的抗震试验方法等，涵盖高压电气设备抗震试验的主要难点、关键技术、试验流程、注意事项等内容，对从事电气设备设计、生产、鉴定，变电站设计、施工等工作的工程技术人员以及电力抗震相关领域的科研工作者可提供一定的借鉴和参考。

项目研究中得到了作者所在的中国电力科学研究院输变电工程所变电站振

动控制研究室全体同事的大力支持，特别是朱祝兵、李圣、钟珉、高坡、刘振林、孙宇晗、林森、张谦、孟宪政、韩嵘、朱照清、王建勋在试验、计算分析中付出的辛勤劳动，在此表示感谢。

此外，在本书编写过程中，收集和引用了国内外相关科研院所、高校和工程单位的研究成果，在此，作者也对他们一并表示感谢。

由于作者水平所限，书中难免存有错误和不当之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2017 年 6 月

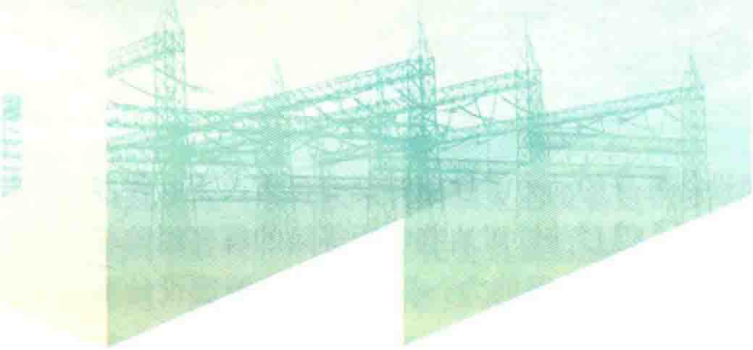


目 录

前言

第一章	概述	1
第一节	变电站电气设备抗震试验的意义	1
第二节	变电站电气设备抗震试验的发展	2
第三节	变电站电气设备抗震试验方法分类	4
第四节	时程抗震试验简介	7
第二章	变电站电气设备动力特性试验	21
第一节	变电站电气设备动力特性试验方法	21
第二节	变电站电气设备不同动力特性试验方法的适用条件	30
第三节	变电站电气设备动力特性试验技术的规范化方法	35
第三章	变电站电气设备抗震试验方法	36
第一节	抗震试验标准反应谱	36
第二节	抗震试验方法的适用性研究	60
第三节	伪动力试验实例	65
第四节	振动台试验实例	71
第五节	变电站电气设备抗震试验技术的规范化方法	75
第四章	变电站电气设备本体与其支架动力耦合效应试验及分析	83
第一节	支架—设备耦合体系振动台试验	84
第二节	支架地震动力放大系数	92
第三节	变电站电气设备支架的动力特性	95
第四节	支架—设备耦合效应的解耦分析	109
第五节	变电站电气设备支架的设计	115

第五章	复合材料绝缘子与套管的抗震试验	124
第一节	电气设备用复合材料的力学性能与抗震试验方法	126
第二节	用于绝缘子的复合材料力学性能试验	136
第三节	复合材料绝缘子机械力学性能试验研究	140
第四节	复合材料绝缘子抗震极限承载能力试验	150
第五节	复合材料电气设备抗震性能评估方法	161
第六章	互连变电站电气设备抗震试验	169
第一节	互连电气设备抗震研究现状	170
第二节	互连电气设备地震损坏情况及破坏机理	172
第三节	互连电气设备抗震性能	174
第四节	互连电气设备抗震性能的有限元仿真	191
第五节	互连电气设备振动台试验实例	204
第六节	互连电气设备地震响应的影响因素	215
第七节	互连电气设备设计方法	218
第七章	变电站电气设备抗震构造措施	222
第一节	构造措施研究现状	222
第二节	变电站电气设备的布置要求	226
第三节	变电站电气设备的安装固定方法	226
第四节	增强抗震性能或减小地震反应的构造措施研究	238
第五节	构造措施振动台试验	239
第八章	变电站电气设备抗震试验研究展望	244
参考文献		245
索引		247



第一章

概 述

电力系统是生命线工程的重要组成部分，是维持国民经济命脉的关键环节。随着社会经济的发展，各领域对于电力的依赖程度越来越大。我国 2008 年发生的汶川地震及其余震先后造成电力损失负荷达 685 万 kW，四川、甘肃、陕西、重庆等地电网均受到不同程度的影响。1999 年台湾集集地区发生的 7.2 级地震，导致台湾中北部电力几乎瘫痪，给抗震救灾、重建家园和恢复生产带来了极大的困难。世界上其他地区地震导致的电力损失的例子也较多，如 1989 年奥克兰地震，因为电力系统无法恢复，城市供水无法正常运行，导致火灾蔓延，损失惨重。2011 年 3 月日本大地震，由于电力供应中断，不仅导致停水、停气、火灾、救援困难等一系列问题，更是福岛核事故的直接推手。地震作用下变电站电气设备发生破坏的原因有很多，但其中一个重要原因是抗震能力不足。抗震试验作为直观检验设备抗震能力的有效手段，意义重大，随着我国经济不断发展、技术不断创新、电压等级不断提升，电气设备的重要性更是日益显著，对抗震设计和抗震试验技术的要求也需不断提高。

第一节 变电站电气设备抗震试验的意义

地震工程学是一门经验性与试验性极强的学科，国内外的有关抗震设计规范均是建立在大量地震灾害（简称震害）观测与振动台试验的基础之上。但由于变电站电气设备直到最近几十年才大量出现，其震害经验的积累也是较晚才进行。近年来我国电网规模发展极为迅速，500kV 及以上电压等级已经成为骨干电网，并且随着输变电电压等级的提高，电气设备的材料、工艺、布置方

式、支架设计、连接方式，甚至设备自身的动力学性能等都有显著改变，很多已经大大超出了现有规范的规定范围，但目前针对这些电压等级的震害经验较少，因此更应依赖于地震试验检验设备的抗震能力，提出相应的抗震设计要求，保证电网地震安全。

我国针对变电站电气设备的抗震能力评估目前存在两种现状：一是依赖未经试验验证的计算仿真分析，但是仿真分析很难精确的模拟设备结构及机构的复杂性，对于材料非线性的设定也是采用的简化式模型，此外现场安装方式的差异性、阻尼比的不确定性也影响着仿真分析结果的准确性；二是部分进行过振动台试验的变电站电气设备，沿用了低电压等级设备的抗震试验方法或普通建筑结构的抗震试验方法，未考虑变电站电气设备的特殊性，试验过程中频率及阻尼比等重要参数的改变也愈加明显，以及常用的共振拍波试验方法的适用性值得商榷等因素，导致试验结果的有效性大打折扣，降低了试验结果的说服力。因此，研究变电站电气设备的抗震试验非常关键。

第二节 变电站电气设备抗震试验的发展

变电站电气设备抗震技术的发展与历次震害及其相关试验是分不开的。最早于 1952 年发生的美国 Tehachapi - Arvin 地震中，变电站电气设备发生了破坏，之后通过对变电站设计进行相关研究，建立了一个变电站设备的抗震设计标准——将设备重量的 20% 沿水平方向加在设备的重心处来进行变电站设备的抗震设计或试验，并按照此标准的要求对变电站的电气设备如变压器、断路器进行了加固。但在 1971 年的 San Fernando 地震中，变电站的电气设备发生了更加严重的破坏，表明上述设计标准不能满足设备抗震的需要，Edison 公司通过对震害进行全面的调查，又通过一系列试验研究了变电站设备的抗震性能，给出了提高抗震性能的改进措施，并对设计标准进行了修改，该标准后来成为其他诸多设计标准的基础。

一、国外抗震试验发展

1971 年美国加州 San Fernando 地震中，变电站电气设备损坏严重。这次地震成为美国电力设施抗震研究的转折点。随后美国对电气设备的抗震问题进行了深入研究，为了改进电气设备的抗震性能，一些瓷件开始用复合材料代替，如带有瓷套管的电流互感器、电压互感器和避雷器。早期电气设备的

抗震研究一般仅限于针对独立的设备进行试验和分析，但在 1978 年的 Miyagi 地震中发现，尽管独立设备抗震性能的论证表明设备可以抵抗该强度的地震作用，但是很多设备仍遭到了严重的破坏，研究者逐渐意识到，将不同设备连接在一起的母线对设备抗震性能的影响也是十分明显的。20 世纪 90 年代，J. B. Dastous 和 A. Filiatrault 通过导线或母线将设备连接在一起的抗震研究发现：导线或母线对设备地震响应有放大效应。20 世纪 90 年代末～2000 年初期，美国太平洋地震工程研究中心（Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER）针对导线或母线相连设备的结构体系，进行了理论和数值分析。

在研究过程中，美国主要参照了大量灾害调研和试验研究，首先，1984 年电气与电子工程师协会（IEEE）制订的 IEEE Std 693—1984《变电站抗震设计推荐规程》（《IEEE Recommended practice for seismic Design of Substations》）是美国变电站电气设备抗震设计与性能测试的主要参考文件，此标准的实施，提高了美国电气设备的抗震能力。此后，美国分别于 1997 年和 2005 年对 IEEE Std 693 进行了修订，吸收了新的科研成果和经验教训。目前，美国学者进行相关抗震性能研究均以 IEEE Std 693 为依据，研究中发现 IEEE Std 693 的不足，将成为其未来修改版的参考。

日本是一个地震多发国家，在多次大地震中均发现电气设备破坏严重，因此十分重视电气设备的抗震研究。20 世纪 70 年代末期，日本将电气设备抗震设计方法由以往的静力设计与试验方法改为以输入地震波进行响应分析的动力设计与试验方法。针对每次震害所出现的问题，都进行了具体措施的整改，使得电力系统的震害越来越少，为地震后快速恢复工作节约了宝贵的时间。此外日本对电气设备的模拟地震动试验研究工作也很重视，大多采用大型振动台上的实体试验，用以测试电气设备的抗震能力并验证抗震设计的合理性和可靠性。在相应的研究成果基础上，日本电气协会成立了“电气技术标准调查委员会”，并编写了 JEAG 5003—1980《电气设备抗震设计指南》。对电气设备抗震设计的条件、标准和方法等做了详细的规定，1995 年阪神地震后，日本吸收抗震设计与试验的新知识、新技术，对 JEAG 5003—1980 进行了修订，颁布了 JEAG 5003—2010《电气设备抗震设计指南》。

二、国内抗震试验发展

20 世纪 70 年代的唐山大地震和辽宁海城大地震之后，我国开始重视电

力设施的抗震研究和抗震设计等关键问题。20 世纪 80 年代中期和末期, 国家地震局工程力学研究所、中国水利电力部西北电力设计院, 分别进行了一系列 220kV 及以下电压等级的振动台试验, 探讨了电气设备的动力特性, 得到了支架、导线等附件对设备动力反应影响等的初步结论。1991 年国家地震局批准的“电力系统地震灾害的预测及其防灾对策”于 1994 年 9 月完成。之后一些专家、学者、科研机构和生产单位对电气设备进行了一系列振动试验研究和理论研究, 内容涉及电气设备、支架、导线以及一些提高抗震能力的措施等。在这些研究成果基础上, 于 1996 年正式颁布 GB 50260—1996《电力设施抗震设计规范》。

2008 年汶川地震之后, 中国电力科学研究院针对变电站电气设备研发出了减震装置, 并加以了工程应用, 同时进行了多台高压设备的抗震试验, 针对设备的地震破坏机理进行了较深入研究; 国网北京经济技术研究院对支架的地震动力放大系数进行了理论与试验研究, 提出支架应与设备一起进行抗震设计; 2011 年中国电力科学研究院承担了特高压变电站电气设备抗震研究课题, 主要针对设计方法与减震技术开展研究。目前我国针对 500kV 及以上电压等级电气设备动力特性测试与抗震试验方法并未进行过系统的研究, 但几乎所有的研究项目都提出了规范这些试验方法和设计方法的必要性和迫切性。

第三节 变电站电气设备抗震试验方法分类

变电站电气设备的抗震试验方法是与抗震分析方法相对应的, 主要有静力试验、伪动力试验、时程抗震试验三种。

一、静力试验

静力试验建立在静力理论基础上, 结构的静力理论创立于 20 世纪 20~40 年代, 是由日本的大森房吉教授首先提出的。静力理论假定结构为绝对的刚体, 当受到地震作用时处于水平振动状态, 因此, 在任何瞬间结构上各点的加速度都相等, 惯性力在结构上的分布与质量分布成正比, 结构所受到的地震力等于地震荷载乘以一个地震系数。

静力试验是将按静力理论计算得到的设备在地震作用下的弯矩以顶部集中力的方式施加到结构上, 从而研究设备力学行为的一种试验方法。当采用静力试验进行抗震设计时, 地震作用产生的弯矩和剪力可分别按式 (1-1) 和

式 (1-2) 计算:

$$M = \frac{a_0 G_{\text{eq}} (H_0 - h)}{g} \quad (1-1)$$

$$V = \frac{a_0 G_{\text{eq}}}{g} \quad (1-2)$$

以上式中 M ——地震作用产生的弯矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;

a_0 ——设计地震加速度, m/s^2 ;

G_{eq} ——结构等效总重力荷载代表值, N ;

H_0 ——电气设施体系重心高度, m ;

h ——设计断面处距底部高度, m ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

V ——地震作用产生的剪力, N 。

由于静力试验无法考虑结构的动力特性和地震动输入频谱特性对设备力学性能的影响, 目前该方法已很少使用, GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》规定, 对于基频高于 33Hz 的刚性电气设备才可采用静力试验法。

二、伪动力试验

伪动力试验是一种将物理加载与数值计算相结合的混合试验方法, 该试验方法始于 20 世纪 70 年代, 是美国与日本地震合作研究的众多成果之一。此后, 随着相关硬件设备以及数值算法的不断改进, 伪动力试验的效率和精度大幅提高。

伪动力试验是在拟静力试验和结构地震反应分析的逐步积分方法基础上发展起来的。首先, 试验结构被简化为有限自由度、离散的结构, 每个自由度都对应一个作动器; 结构离散模型建立以后, 其运动微分方程将在伪动力试验过程中用逐步积分法求解, 结构的质量和黏性阻尼预先确定; 根据试验的每一个时间步长, 每个自由度的位移通过逐步积分求得, 并通过该位移作动器施加于结构, 由力传感器将结构变形产生的恢复力测得并用来计算下一个时间步长的反应, 如此反复直至地震反应结束。伪动力试验的过程与结构动力数值计算十分相似, 差别仅在于伪动力试验中的结构刚度特性是直接在试验中量测的。由于惯性效应是通过数值方法模拟 (而不是实时自然发生) 得出的, 所以伪动力试验可以利用传统的拟静力加载装置。

伪动力试验的特有优点是加载装置的限制比振动台小得多, 可以进行大尺度原型试验; 又由于多个作动器可灵活布置, 使得伪动力试验可以完成多点输

入。一般可将伪动力试验分为物理试验域和计算机域两部分，如图 1-1 所示。物理试验域负责硬件的物理加载，计算机域则负责数值积分。因此伪动力试验实际是将结构的真实响应考虑进了运动方程的地震响应分析。试验中，与惯性力和阻尼力相关的加速度和速度项由于是数值计算的结果，而非从实测中来，因此一般不对其进行解释。

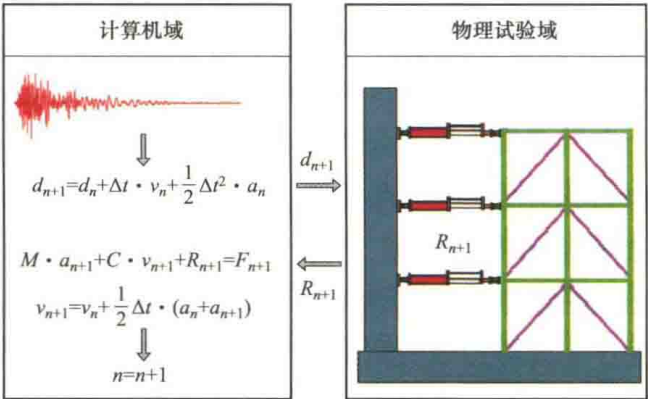


图 1-1 伪动力试验基本原理

三、时程抗震试验

设备的时程抗震试验是基于地震模拟振动台的抗震试验，振动台的选取首先要考虑振动台的试验能力。

振动台的基本构成如图 1-2 所示，基本上由七大系统组成，即台面及支承导向系统、激振系统、控制系统、液压源系统、供电系统、测量系统和基础。各部分视地震模拟振动台建造成几个自由度而决定其所包含的组成内容。

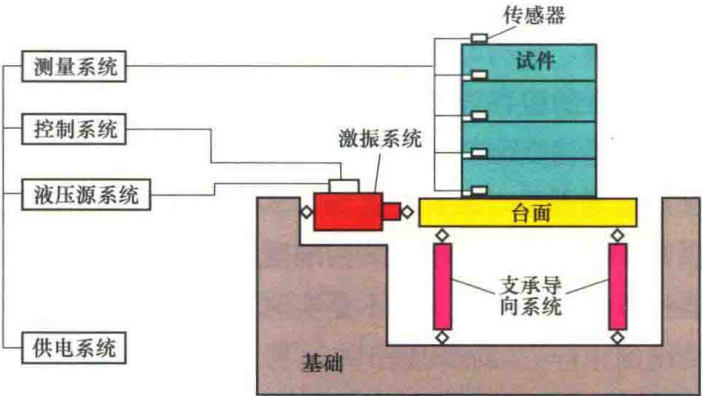


图 1-2 地震模拟振动台基本构成

时程分析法也称为直接动力法,它是在时间域的离散,根据输入的地震波和假定的结构恢复力曲线,对动力方程进行直接积分,采用步步积分方法计算地震过程中每一时刻的地震反应,从而了解结构在地震中的地震反应规律。它是目前研究结构地震反应及特别重要结构抗震设计时采用的最主要方法。在时程抗震试验中,对地震模拟振动台输入已编好的加速度时程曲线以模拟实际地震情况,从而观察设备的抗震能力。

地震模拟振动台可以真实地再现地震过程,是目前研究结构抗震性能最准确的试验方法。只要试件的重量、尺寸和反应特征处于振动台的最大功能范围之内,都可以进行振动台试验。台面再现的波形也不仅仅限于地震波,也可以是其他类型的振动问题。

第四节 时程抗震试验简介

一、地震输入的强震动特性

(一) 振幅

地震动的振幅是指地震动的加速度、速度及位移三者中的最大值、峰值或某种意义的有效值。由于在地震波数值化处理时,采用等时间距 0.01s 或 0.02s 会使地震动最大值有一定误差,从而丢掉最大值;另外强震仪高频失真也会带来一些误差。为避免上述影响,提出了有效峰值的概念。常用的表示方法有以下四种。

1. 美国应用技术委员会 ATC-3 有效峰值加速度 EPA 和有效峰值速度 EPV 将阻尼比为 5% 的加速度反应谱在周期 0.1~0.5s 之间平均为一常数 S_a , 将阻尼比为 5% 的速度反应谱在 1s 周期附近平均为一常数 S_v , 则有效峰值加速度与有效峰值速度的定义分别为:

$$\left. \begin{aligned} EPA &= S_a/2.5 \\ EPV &= S_v/2.5 \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

其中, 2.5 为经验系数, 是由多次重复峰值决定的反应谱放大系数。

由式 (1-3) 定义的有效峰值与真实峰值相关, 但不相等, 甚至不成比例。若地震中包含很多频率, 则 EPA 小于真实峰值加速度 a , 但 EPV 常大于大震级远距离处的真实峰值速度 v 。

2. 等反应谱有效加速度

将地震动加速度过程 $a(t)$ 的最大加速度处的峰尖削去, 使最大加速度从 $a_{\max}$ 降到 a_e , 而反应谱几乎不变, 则定义 a_e 为等反应谱有效加速度。具体计算方法是: 用一平行于时间轴的直线削去最高一个或少数几个峰值, 使最大加速度降为 a' , 修改后的反应谱的总面积 (按谱强度 SI 计算) 为未修改前的 90%。则定义:

$$a_e = a' / 0.9 \quad (1-4)$$

3. 持续加速度 a_s 和持续速度 v_s

持续加速度可用最大加速度峰值来定义。地震引起的结构破坏需要一个时间积累过程, 多次到达最大值可以包含这个含义。一般认为 $a_s/a_{\max}$ 平均约为 2/3, 而 $v_s/v_{\max}$ 的平均值略小一些。

4. 平均振幅

在采用等效线性化法分析结构非线性反应时, 为了考虑加速度强度包线的可能变化, 将复杂的地震动按经验判断为等效简谐振动。一般取 10 个大振幅 a_i 值的平均值为等效简谐振动的最大加速度。设 $a_{\max}$ 为地震动的最大加速度, 则等效最大平均加速度为 $C_{a_{\max}}$ 。即:

$$C_{a_{\max}} = \frac{1}{10a_{\max}} \sum_{i=1}^{10} a_i \quad (1-5)$$

若地震动 $a(t)$ 的平稳段较长, 则 $C_{a_{\max}} = 1.0$; 若平稳段较短, 则 $C_{a_{\max}}$ 较小。

5. 谱烈度

豪斯纳定义谱烈度为:

$$SI_{\xi} = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \xi) dT \quad (1-6)$$

式中 S_v ——阻尼比为 ξ 时单质点体系的相对速度反应谱;

T ——周期, ξ 常取为 0.2, 相应的谱烈度为 $SI_{0.2}$, 它不涉及任何宏观现象, 与地震烈度完全不同。

地震动记录是按两个正交方向分别记录地面运动, 地震动的最大幅值应是两个方向幅值矢量和的最大值。但在实际应用时常用的方法有三种: ①取两个方向的较大分量作为最大加速度值; ②取两个方向最大值的矢量和作为最大值; ③将两个方向的分量作为两个取样, 即用两个最大值。

地震动是水平、竖向、甚至扭转共同作用的复杂振动形式。一般情况下, 竖向地震动加速度是按水平加速度的一定比例取值的, 因此很多人研究竖向加

速度 a_v 和水平加速度 a_h 比例的规律性, 一般认为 a_v/a_h 的平均值在 $1/2 \sim 2/3$ 之间。近震中或发震断层时, a_v/a_h 的离散性较大, 这对于一般加速度最大值小于 $0.5g$ 时是符合实际的; 但在 $0.5g \sim 1.0g$ 范围内有时会出现超出此范围, 甚至出现 a_v/a_h 大于 1.0 的现象。

(二) 频谱

地震动是振幅和频率都在复杂变化的随机振动, 但对于给定场地的地震动, 可以根据其频谱特性将其分解成若干个不同频率简谐振动的叠加来处理。凡表示一次地震动中振幅与频率之间的关系曲线统称为频谱。在地震工程中常用的频谱表示方法有以下三种。

1. 傅里叶谱

傅里叶谱是数学中常用来表示复杂函数的一种经典方法。它把复杂的地震动过程 $a(t)$ 展开成 N 个不同频率的简谐振动的组合。即:

$$a(t) = \sum_{j=1}^N A_j \sin(\omega_j t + \theta_j) \quad (1-7)$$

式中 A_j 、 θ_j ——频率振动分量 ω_j 的振幅和相位角, 是 ω_j 的函数。

从随机过程的观点来看, 一次地震只是一次试验, 所以它是随机的, 因此从一次试验求得的傅里叶谱也是随机的。若可以对同一情况下的地震动得到多次记录, 那就可以求傅里叶谱的期望值, 它就可以作为统计特征来描述这种地震动的特性。但这种做法是十分困难的。因此, 一般假定地震动的强震动段 $a(t)$ 的持时较长, 则可以将其分成若干段, 分别求出每一段的傅里叶谱, 再在几段上求平均值, 这种做法在周期小于分段长度时是可靠的。

2. 反应谱

反应谱是通过理想简化的单质点体系的反应来描述地震动的特性。设有一自振频率为 ω 、阻尼比为 ξ 的单质点体系, 在支承处受到地震动加速度过程 $a(t)$ 作用下发生振动, 运动从静止开始, 初始条件为 $u(t=0)=v(t=0)=0$ 。由结构动力学原理可知, 质点的相对位移 $x(t)$ 、相对速度 $\dot{x}(t)$ 和绝对加速度 $\ddot{y}(t)=\dot{x}(t)+a(t)$ 分别为:

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= -\frac{1}{\omega_d} \int_0^t a(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin[\omega_d(t-\tau)] d\tau \\ \dot{x}(t) &= -\frac{\omega}{\omega_d} \int_0^t a(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cos[\omega_d(t-\tau) + \alpha] d\tau \\ \ddot{y}(t) &= \frac{\omega^2}{\omega_d} \int_0^t a(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin[\omega_d(t-\tau) + 2\alpha] d\tau \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

其中, $\omega_d = \omega \sqrt{1 - \xi^2}$, $\tan \alpha = \xi / \sqrt{1 - \xi^2}$ 。当 $\xi^2 \ll 1$ 时, 阻尼很小, 则式 (1-8) 变为:

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= -\frac{1}{\omega} \int_0^t a(\tau) e^{-\xi \omega(t-\tau)} \sin[\omega(t-\tau)] d\tau \\ \dot{x}(t) &= -\int_0^t a(\tau) e^{-\xi \omega(t-\tau)} \cos[\omega(t-\tau) + \alpha] d\tau \\ \ddot{y}(t) &= \omega \int_0^t a(\tau) e^{-\xi \omega(t-\tau)} \sin[\omega(t-\tau)] d\tau = -\omega^2 x(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

反应谱每一个坐标对应一个单质点体系的自振周期都在改变, 所以整个反应谱曲线并不是一个结构或一个单质点体系的反应, 而是对应于不同频率的很多个结构物或单自由度体系的最大反应。

和傅里叶谱相比, 由于采用了阻尼, 从而包含了附近频率分量的影响, 而是以单质点体系传递函数为权的地震动傅里叶谱的加权平均, 即:

$$Y(i\omega) = H(i\omega)X(i\omega) \quad (1-10)$$

式中 $X(i\omega)$ ——具有传递函数 $H(i\omega)$ 的结构体系输入 $X(t)$ 的傅里叶谱;

$Y(i\omega)$ ——该体系的输出, 即结构的反应谱。

这里 $a(t) = X(t)$, $y(t)$ 为单质点体系的结构反应。其时域表达式为:

$$y(t) = \int_0^t a(\tau) h(t-\tau) d\tau \quad (1-11)$$

由于反应谱的此种加权平均, 所以随着阻尼比 ξ 的加大, 它比傅里叶谱具有更大的平滑作用。

反应谱具有非线性, 即反应谱在任一频率 ω 处的值并不与该频率处的傅里叶幅值成比例, 因为在反应谱中掺进了附近其他频率分量的影响。所以当某一频率处的傅里叶谱值加大一倍时, 该频率处的反应谱一般不按比例加大。

3. 功率谱

功率谱又称功率谱密度函数, 是随机过程在频域内描述过程特性的物理量。它可以定义为地震动过程 $a(t)$ 的傅里叶谱平方的平均值, 即:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi T_d} E[A^2(\omega)] \quad (1-12)$$

式中 T_d ——地震动持续时间。

与傅里叶谱和反应谱相比, 功率谱具有明确的统计意义。由于其具有平均概念, 它在图形上比较平滑; 但由于失去了相位信息, 它与反应谱一样不能返回到原地震动过程 $a(t)$ 。