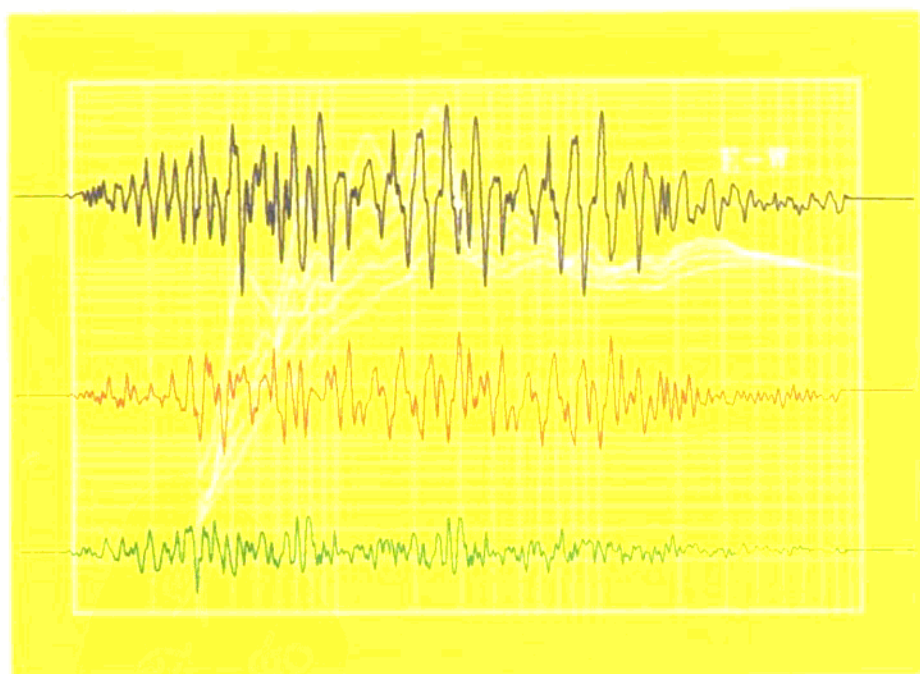


中国西南地区 近震源强地面运动特征

王培德 陈运泰 王 鸣



地震出版社

前 言

在接近地震震源的地点记录的强地面运动数据,无论对于地震学基础研究、地震工程学的发展和建筑结构的抗震设计都具有十分重要的意义。国家地震局地球物理研究所“近场强地面运动研究”课题组自 1981 年起在我国华北、西南等地进行了多次地震近场观测,获得了大批珍贵的记录,并以近代地震学理论为指导,利用所获得的资料对地震震源过程和地壳介质特性等问题做了许多研究,取得了丰硕的成果。考虑到我国强震记录相对短缺,而“近场强地面运动研究”课题组所得到记录对于改善这一情况,并对地震工程学的实际应用具有明显意义,我们从云南省剑川、禄劝、澜沧地震的近场观测资料中选择了一些对于工程地震研究有意义的记录予以发表。同时还给出了根据这些记录得到的研究成果,主要是水平向峰值加速度衰减关系和地面运动特性等。

“近场强地面运动研究”项目是 1981 年美国宾厄姆顿纽约州立大学地球科学系吴大铭教授与当时的国家地震局地球物理研究所所长顾功叙教授商定进行的,吴大铭教授为此项目的建立和其后的发展作了很多贡献。

项目执行过程中得到国家地震局国际合作司、地震科学联合基金会和美国国家科学基金会的支持。本书的出版得到国家自然科学基金会和地震科学联合基金会的支持。

国家地震局地球物理研究所胡聿贤教授对本书的编纂提出过许多有益的建议。

参加剑川、禄劝、澜沧地震野外观测的还有曾在国家地震局地球物理研究所工作和学习过的宋良玉、柯兆明、周家玉、瞿江、倪晓希,云南省地震局陈振荪等。在野外工作期间还得到云南省地震局姜葵、陈金海、刘祖荫、石绍先、周尚标的支持和帮助。在此书出版之际,作者谨对上述单位的领导、专家和工作人员表示衷心的感谢。

目 录

第一章 概述	1
§ 1 研究近震源强地面运动的意义、目的和方法	1
§ 2 研究我国西南地区近震源强地面运动的重要性	2
§ 3 中美合作“近场强地面运动研究”项目的开始与发展	3
§ 4 DCS-302 数字磁带记录地震仪性能简介	4
§ 5 数据处理方法	6
第二章 地震和近震源记录的情况	8
§ 1 剑川地震及其近场观测	8
§ 2 禄劝地震及其近场观测	10
§ 3 澜沧-耿马地震及其近场观测	13
第三章 云南地区水平向峰值加速度衰减曲线	17
§ 1 资料的选取	17
§ 2 计算方法	22
§ 3 加速度衰减曲线	23
第四章 地震动参数与震级和距离的关系	26
§ 1 反应谱及其计算方法	26
§ 2 地震动参数与震级和距离的关系	29
第五章 地震近场记录的加速度、速度、位移和反应谱	33
§ 1 近场记录的加速度、速度、位移图	33
1. 剑川地震的记录	
1981 年 7 月 3 日 14 时 58 分 M_s 4.6 级地震的记录	
(a) 洱源台; (b) 乔后台; (c) 农场台; (d) 罗平山台	
1981 年 7 月 3 日 16 时 13 分 M_s 5.4 级地震的记录	
(a) 洱源台; (b) 乔后台; (c) 农场台; (d) 罗平山台	
1981 年 7 月 20 日 15 时 12 分 M_s 4.8 级地震的记录	
(a) 天马村台; (b) 县城台; (c) 甸心台; (d) 新仁礼台	
1981 年 8 月 6 日 10 时 36 分 M_s 3.6 级地震的记录	
(a) 县城台; (b) 天马村台; (c) 甸心台; (d) 新仁礼台	
2. 禄劝地震三个余震的记录	
1985 年 5 月 1 日 16 时 59 分 M_s 4.8 级地震的记录	
(a) 桂泉台; (b) 转龙台; (c) 马街台; (d) 沙鱼郎台	

1985年5月1日17时23分 M_S 4.1级地震的记录

(a) 桂泉台; (b) 转龙台; (c) 马街台; (d) 沙鱼郎台

1985年5月3日17时49分 M_S 3.6级地震的记录

(a) 桂泉台; (b) 转龙台; (c) 马街台; (d) 沙鱼郎台

3. 澜沧—耿马地震七个余震的记录

1989年11月19日9时37分 M_S 5.1级地震的记录

(a) 哈果马台; (b) 富邦台

1989年11月27日12时17分 M_S 6.3级地震的记录

(a) 哈果马台; (b) 富邦台; (c) 木戛台

1989年11月28日11时38分 M_S 4.8级地震的记录

(a) 富邦台

1989年11月30日16时13分 M_S 6.7级地震的记录

(a) 富邦台; (b) 木戛台

1989年12月8日23时33分 M_S 5.3级地震的记录

(a) 竹塘台

1989年12月19日19时07分 M_S 5.5级地震的记录

(a) 竹塘台

1989年12月3日11时09分 M_S 3.0级地震的记录

(a) 哈果马台; (b) 富邦台

§2 近场记录的地震动反应谱 98

1. 剑川地震的反应谱

1981年7月3日14时58分 M_S 4.6级地震的反应谱

(a) 洱源台; (b) 乔后台; (c) 农场台; (d) 罗平山台

1981年7月3日16时13分 M_S 5.4级地震的反应谱

(a) 洱源台; (b) 乔后台; (c) 农场台; (d) 罗平山台

1981年7月20日15时12分 M_S 4.8级地震的反应谱

(a) 天马村台; (b) 县城台; (c) 甸心台; (d) 新仁礼台

1981年8月6日10时36分 M_S 3.6级地震的反应谱

(a) 县城台; (b) 天马村台; (c) 甸心台; (d) 新仁礼台

2. 禄劝地震三个余震的反应谱

1985年5月1日16时59分 M_S 4.8级地震的反应谱

(a) 桂泉台; (b) 转龙台; (c) 马街台; (d) 沙鱼郎台

1985年5月1日17时23分 M_S 4.1级地震的反应谱

(a) 桂泉台; (b) 转龙台; (c) 马街台; (d) 沙鱼郎台

1985年5月3日17时49分 M_S 3.6级地震的反应谱

(a) 桂泉台; (b) 转龙台; (c) 马街台; (d) 沙鱼郎台

3. 澜沧—耿马地震七个余震的反应谱

1989年11月19日9时37分 M_S 5.1级地震的反应谱

(a) 哈果马台; (b) 富邦台

1989 年 11 月 27 日 12 时 17 分 M_s 6.3 级地震的反应谱
(a) 哈果马台; (b) 富邦台; (c) 木戛台
1989 年 11 月 28 日 11 时 38 分 M_s 4.8 级地震的反应谱
(a) 富邦台
1989 年 11 月 30 日 16 时 13 分 M_s 6.7 级地震的反应谱
(a) 富邦台; (b) 木戛台
1989 年 12 月 8 日 23 时 33 分 M_s 5.3 级地震的反应谱
(a) 竹塘台
1989 年 12 月 19 日 19 时 07 分 M_s 5.5 级地震的反应谱
(a) 竹塘台
1989 年 12 月 3 日 11 时 09 分 M_s 3.0 级地震的反应谱
(a) 哈果马台; (b) 富邦台

结 语 119
参考文献 120

第一章 概 述

§ 1 研究近震源强地面运动的意义、目的和方法

地震是一种能给人类的生命和财产带来巨大损失的自然现象。震源深度在几十公里以内的大地震所产生的强烈地面运动可直接破坏建筑结构,造成严重损失,对于人口稠密的城市、大工矿企业以及水库、电站、桥梁、石油和天然气管道等“生命线工程”损失更为严重。1970年1月5日云南通海 M_S 7.7级地震造成了1700余平方公里的重灾区,毁坏房屋33万8千多间,1.6万余人死亡。1976年7月28日唐山 M_S 7.8级地震死亡人数达24.2万余人,重伤16.4万余人,直接经济损失54亿元。认识地震的发生和它所形成的地面运动的规律,研究防止和减轻地震危害的措施,是地震学和地震工程学的基本任务。地震学对地震的研究着重于地震发生的规律和地震的震源发展过程,解释地面运动与震源、地壳介质组成的关系。研究地震所形成的地面运动特性,探索合理的建筑物结构以抵御地震的危害,则是地震工程学的主要工作。

研究地震发生和发展过程最基本的资料是世界各地用各种地震仪记录的地震图。由于技术条件的限制,传统地震学主要依据的是在距震中较远处,用位移计记录的比较微弱的地面运动图,其震中距超过所研究频率范围的地震波波长的几倍、几十倍甚至更多。近距离主要记录较小地震的高频成分,远距离则记录较大地震地面运动的低频成分。地震学工作者从所记录的地震图上可以测定地震震源的物理量,如震源的尺度、地震的强度(震级、地震矩)、应力降和错距等。这些显示震源总体的、平均特性的物理量,对于研究地震能量的释放与传播、探测地球内部的结构和介质特性都是很重要的。在此类研究工作中一般把震源当做点源来对待。远距离记录中由于缺少了传播过程中失去的一些重要信息,故很难用于震源过程细节的探讨。为了更细致地了解地震的发生过程,有必要在距震源更近一些的地方来观察地震、记录地震波。另一方面,一次地震造成破坏最剧烈的地区也是在震中周围不太大的一块区域,以7级地震为例,它所造成的对建筑物有较强破坏作用的7度烈度区一般只有方圆几十公里的范围。因此,无论从对震源本身的认识还是从工程抗震的角度考虑,对震源附近的地震记录的研究就显得十分重要。在震源附近记录地震并对地震记录加以研究就是近场地震学的主要内容。

地震时,震中附近的地面运动幅度很大,常规地震仪已无法正常工作,一般用强震仪来记录。这类工作在国外开始于本世纪40年代,我国60年代也已开展了地震的近场观测。当时所用的强震仪用机械或机电式触发,以感光胶片、感光纸或其他媒介做地面运动的模拟记录。由于这类记录不带绝对时标,也记不到完整的P波,因而地震学家采用不多,主要为地震工程服务。

本世纪70年代以来,以大规模和超大规模集成电路为代表的微电子技术为基础,产生了新一代的地震仪——数字地震仪,它以其具有大动态范围、宽记录频带、很高的采样率和精确的时间服务、带有记忆延时装置能够做到触发启动而又可以得到完整的P波记录、易于与计算机连网等优良性能而被地震学家和地震工程学家广泛采用。有代表性的是

美国 Terra Technology 公司生产的 DCS-302 型和 Kinemetric 公司生产的 PDR-1、PDR-2 型数字磁带记录地震仪。数字地震仪的出现大大推动了近场地震学的发展,无论是国内还是国外都获得了相当数量的高质量的地震近场数字记录。这些记录对于地震学和地震工程学都有重要的意义,例如,根据对前震和余震发生规律的研究而提出的震源障碍物和凹凸体模式,用计算理论地震图的方法和反演实际的地震近场记录而得到了证实。对于工程部门,大型计算机可以模拟建筑物对于地面运动的响应,以实际的地震动记录作为输入,可检验建筑物的抗震性能。因而获得地震的近场资料变得尤为重要。

近场地震学研究的内容决定了这项工作首要的任务是在尽可能靠近地震震源的地点来记录地震地面运动。近场工作开展以来,主要做法就是在地震危险性较高的地区大量布设强震仪,等待地震发生时获得记录。开展这项工作比较早的地震工程学界,主要注意力放在各类场地和建筑物的地震响应上,布设观测台站时考虑在不同的地基,甚至在建筑物的不同部位安置观测仪器。在 1966 年 6 月 27 日美国加州的帕克菲尔德地震和 1971 年 2 月 9 日美国加州的圣费尔南多地震中,曾取得了两套很有价值的强震记录,前者的记录台站距断层破裂的地面迹线仅 80 m,后者获得了迄今为止最强烈的地面运动记录,最大加速度达 1.25 g。我国国家地震局工程力学研究所和中国建筑科学研究院等单位也取得了许多有价值的强震记录。

随着数字地震仪的发展和地震学与地震工程学两门学科的相互渗透,地震学家进入了近场地震学的研究领域,地震工程学家则关注和参与地震震源和地壳结构的研究,两者在近场地震学领域正逐步地紧密结合。由于地震学家更关心地震的震源特性、震源过程和地壳结构等方面的问题,故观测工作与地震工程考虑的有所不同。一般要求观测台网有较高的时间服务系统,台网布局要求能够围绕震中,为精确确定震中位置,记录台之间的距离不宜过大。既要考虑主震、大震的记录,也要考虑前震、余震和中、小地震的记录等。除了使用存放台阵等待大震的发生外,也广泛应用流动台网作余震观测。本书所使用资料就来源于小孔径数字化流动台网的近场观测结果。

近场地震的观测与研究对于抗震减灾和经济建设具有重要的意义。可以预料,这项工作定将得到进一步的发展。

§ 2 研究我国西南地区近震源强地面运动的重要性

本书总结的研究工作所依据的强地面运动记录都是在我国云南省境内取得的,由此得到的有关地面运动特性的一般规律对于云南和与云南地区地质构造相近的邻近区域比较适用。本文中的“中国西南地区”即指云南及其邻区。

云南按地形可分为东、西两部分。东部属于云贵高原的一部分,称为滇东高原。西部为横断山脉的南段,山脉主要呈南北走向,山势陡峭险峻,称为滇西高山峡谷区,金沙江、南盘江、元江、澜沧江和怒江等流经该区。东部的山脉相对要平缓一些。在东部与西部的整个山区都分布着大小不等的山间盆地,当地称为“坝子”。较大的“坝子”有昆明、大理、玉溪、保山、曲靖等,这里是本地区工农业发达、人口稠密的地区。

该地区处于印度板块和欧亚板块接合部的东侧,按地质构造划分,其东部属于扬子准地台,西部为三江褶皱系和冈底斯念青唐古拉褶皱系(黄汲清等, 1983)。昆明以东是上扬

子地台褶皱带,昆明西部是盐源—丽江地台褶皱带和康滇地轴。扬子地台的西边为三江褶皱系。三江褶皱系在云南省境内又分为如下几个构造单元:澜沧江褶皱带、金沙江优地槽褶皱带、保山褶皱带、兰坪—思茅拗陷和哀牢山褶皱带。冈底斯念青唐古拉褶皱系在云南省内的构造单元是腾冲褶皱带。在东西部地区存在着一些深大断裂,康滇地轴上有小江与安宁河断裂,三江褶皱系与冈底斯念青唐古拉褶皱系上有楚雄—蒙自、贡觉—藤条河、金沙江—红河、昌宁、澜沧江等断裂。这些断裂大都呈南北走向,其形成与发展受印度板块和欧亚板块碰撞与挤压的影响,因此,本区的区域应力场以南北向的压应力为主。云南地区的莫霍面也比我国东部地区的要深一些,且深度由东南向西北逐渐加深,从 42 km 到 56 km 左右,西北部与青藏高原底部的莫霍面衔接。

西南地区是新构造运动剧烈的地区,地震活动频繁。历史上曾发生过 1833 年嵩明和 1515 年永胜两次 8 级大地震。特别值得注意的是,自 1970 年以来陆续发生了一系列强烈地震,如通海 1970 年 1 月 15 日 $M_S = 7.7$ 、普洱 1971 年 4 月 28 日 $M_S = 6.7$ 、大关 1974 年 5 月 11 日 $M_S = 7.1$ 、龙陵 1976 年 5 月 29 日 $M_S = 7.3$ 、7.4 和澜沧—耿马 1988 年 11 月 6 日 $M_S = 7.6$ 、7.2 等地震,以及其它一些强震和中强地震。这些地震给当地人民的生命财产带来巨大的损失。

由于本地区的地形地貌、地质构造、区域应力场和地震震源机制具有本身的特点,与其它地区有较大的差别,简单引用从其他地区地面运动特性研究所得到的结果可能会出现较大的偏差,因而有必要利用当地实际记录的资料对云南及其邻近地区的地面运动特性加以研究。

§ 3 中美合作“近场强地面运动研究”项目的开始与发展

1981 年美国宾厄姆顿纽约州立大学地球科学系吴大铭教授与中国国家地震局地球物理研究所所长顾功叙教授议定,中美双方合作进行“近场强地面运动研究”项目,并确定美国方面的项目负责人为吴大铭教授,中国方面的项目负责人为陈运泰教授。这一项目得到中国国家地震局国际合作司、地震科学联合基金会和美国国家科学基金会的支持。

“近场强地面运动研究”的主导思想是:在可能发生地震的地区架设大动态范围的数字地震仪,以期获得主震的近场记录;在较为强烈的地震发生以后将地震仪迅速移到震中周围地区记录余震。利用所取得的资料对地震的机制、震源的时间过程以及地震所产生的地面运动特性进行研究。野外观测被确定为本项研究的最基本工作。自 1981 年以来国家地震局地球物理研究所“近场强地面运动研究”课题组先后对 1981 年 9 月河北滦县震群(最大地震为 $M_L = 4.8$)、1982 年 7 月云南剑川 $M_S = 5.4$ 地震及其余震、1982 年 10 月河北卢龙 $M_L = 6.1$ 地震的余震、1982 年 12 月北京怀柔 $M_L = 4.9$ 地震及其余震、1985 年 4 月云南禄劝 $M_S = 6.1$ 地震的余震、1988 年 11 月云南澜沧—耿马 $M_S = 7.6$ 和 $M_S = 7.2$ 地震的余震、1989 年 10 月山西大同—阳高 $M_L = 6.1$ 地震的余震进行了观测和记录,在此期间还进行过两次地下爆炸的观测记录。

在上述野外工作取得大批资料的基础上进行了广泛的研究,包括求解地震的震源机制和确定发震构造、利用正则化方法求解震源时间函数、地震矩张量的反演、频谱补偿法求得区域块体品质因数 (Q 值)、近场记录地震波的运动特性、强地面运动的半经验合成和

地面运动特性等。“近场强地面运动研究”课题组的研究工作仍然在继续进展之中, 研究工作的重点是地震的震源过程、传播途径的影响和地震波的运动形态等有关地震学的基本问题。研究工作致力于理论与实际的统一。运用高质量的地震近场记录, 通过计算合成地震图反演地震震源过程是当前“近场强地面运动研究”课题组正在进行的主要工作。

在“近场强地面运动研究”课题组的工作中, 有关地面运动特性的研究只是其中的一部分。由于在野外观测记录时获得了一批较强地震的近震源记录, 特别是一些地震的多台同时记录, 有利于研究地震波辐射图型和场地条件对地面运动特性的影响。在我国强震近场记录比较缺乏, 成套强震记录尤为缺少的情况下, 这些资料对于我国的地震学和地震工程学具有较高的实用价值。因此我们从三次在我国云南省工作期间所记录的部分强震资料中选择一些对于地震工程研究或地震基础理论研究有较高价值的记录加以发表, 供国内有关部门使用。这些资料包括经基线矫正的加速度时程曲线、由积分方法算出的速度、位移曲线以及地震反应谱。还有一些地震记录则给出记录的最大加速度和震中距等基本数据。在云南得到的资料颇为丰富, 用统计方法处理这些数据, 我们得到了适合我国西南地区使用的水平向峰值加速度衰减和地面运动衰减的经验关系。

从抗御地震灾害的角度出发, 地震学必须和地震工程学结合起来。为了更有效地利用所得到的记录, 书中大量提供了用地震学方法所得到的结果, 如地震的精确位置和震源机制解等参数, 有关地质构造和记录场地的情况也尽可能地加以介绍。作者希望本书能对我国的地震学研究和抗震工作有所裨益。

§ 4 DCS-302 数字磁带记录地震仪性能简介

DCS-302 三分向数字磁带记录地震仪记录系统由 DCS-302 数字地震仪、SSA-302 伺服加速计和 SMR-104 回放仪组成。

1. DCS-302 数字记录器

DCS-302 数字记录器是一个数字化的地震数据记录仪, 其中央处理器是字长为 12 位的 MC6100 芯片。记录器可外接多种不同型号的拾震器, 可以是位移计、速度计或加速计, 要求输入电压信号最大为 $\pm 5V$ 。反映地面运动的电信号由输入端进入仪器, 经截止频率 30Hz 的 5 阶 Butterworth 低通滤波器滤波后, 由模数转换电路转换为数字量。代表地面运动的数据进入数字延迟电路并同时由程序电路判读, 如果满足预先给定的触发条件, 则启动盒式磁带机, 将数字延迟电路中的信号记录到磁带上。使用延迟电路可以做到触发记录不丢头, 有利于获得完整的地震事件记录。为满足大动态范围记录的需要, 记录器第一级滤波放大电路中带有自动增益控制, 其放大倍率由程序根据输入信号的强度决定。由于信号数字化以后的处理不再形成任何畸变, 因而可以认为 5 阶 Butterworth 低通滤波器的频率特性就是整个记录系统的频率特性。

记录字长为 12 位二进制数, 加上 $\times 1$ 、 $\times 5$ 、 $\times 25$ 和 $\times 100$ 共 4 个放大倍率的自动增益转换, 总的动态范围为 112 dB。采样速率为每信道 100sps。DCS-302 内带有石英钟, 其频率稳定度为 5.0×10^{-6} , 仪器具有外部时间信号接口, 用此接口可将外部时间信号, 例如收音机收到的标准授时台播发的秒脉冲信号送入仪器, 以校正内部时钟, 准确度为

1/300 s。为适应在不同地震活动水平、不同噪声背景地区工作的需要,仪器使用下述两种触发方式:①能量触发方式,考虑地震动幅度的绝对值;②长期平均与短期平均之比触发方式,考虑地震动的瞬时幅度与长时间地震动幅度平均值的比值。两种触发方式的触发阈值都可以调节。仪器的记录媒介是盒式磁带,记录带速 4 英寸/s,用 3000 英寸的盒式磁带,记录时间为 14 min。

在“近场强地面运动研究”的野外观测工作中,DCS-302 记录器与下面介绍的 SSA-302 伺服加速计配合使用,记录地面运动加速度。随着观测点和震源之间距离的增加,加速度衰减的速率大大超过位移的衰减速率,该记录系统没有能力记录微震和远震。据实际工作经验得知,如将伺服加速计安置在噪声背景很低的稳固的基岩面上,且触发阈值选择得当,可在距震中 10 km 左右的地方得到 $M_L \geq 1.8$ 地震的完整记录;在距震中 50 km 的地方可得 $M_L \geq 4.5$ 级地震的完整记录;在距震中 200 km 的地方可获得 6 级以上地震的完整记录。对于一些震动幅度不大的地震,可能发生 S 波触发而 P 波记录丢失的情况,这种情况下,仍可记录下 S 波中的最大振幅,这种记录在研究峰值加速度的衰减规律时仍可利用。对这种情况而言,记录的范围大大扩展了,100 km 左右的震中距范围内可以获得 3.5 级地震具有最大幅值的 S 波记录。

2. SSA-302 伺服加速计

伺服加速计又称力平衡式加速计,它的特点是,外界力作用在传感器上产生输出的电信号,输出信号经电子电路放大再反馈到传感器上,藉以改变原力学系统的参数。这种拾震器频率响应宽、相位特性好、有较大的测量量程、较高的测量灵敏度和测量精度。SSA-302 三分向加速计由 3 个 SA-102 加速器与相应的稳压电路组成,封装在密封的铁箱内,3 个 SA-102 加速器按直角坐标的三个方向设置,测量三分向的加速度。SA-102 是由动圈式传感器和运算放大器组成的伺服加速度计,其最大量程可有多种选择,用于云南地震观测的仪器的最大量程为一个重力加速度(1 g)。频率响应在 0—50 Hz 范围内的不均匀度小于 2 dB,非线性失真小于满度值的 0.05%,分辨率小于满度值的 0.0005%,使用温度范围为-40—80℃。通过接插件很容易与 DCS-302 地震仪相联接,构成一完整的地震记录系统。

3. SMR-104 回放仪

SMR-104 回放仪是与 DCS-302 地震仪配套的回放系统,它的主要作用是读出记录在盒式磁带上的信息并将其转换为可以辨认的物理量。在 DCS-302 上获得记录的盒式磁带装入 SMR-104 回放仪进行回放,可以有两种输出方式,热敏纸笔绘地震图和计算机数据接口。第一种方式适合野外地震现场使用,SMR-104 用数/模转换电路直接输出模拟地震图,用于判断地震事件,确定 P 波和 S 波的到时,有助于在野外工作中判断震源位置。SMR-104 带有一个计算机接口,为数据传输提供了条件。接口是标准 RS-232 接口,与计算机的串行异步通讯接口衔接。磁带上记录的数据经过 SMR-104 内部数字电路的整理、加工,以计算机可以接受的格式送入计算机,便于保存和进行研究之用。数据的传送率为 9600 比特/s,数据位 8 位,终止位 1 位,无奇偶校验,连续传送。

SMR-104 也为 DCS-302 提供了一个系统特性的检测手段,它可以输出脉冲宽度为

0.5 s 的方波, DCS-302 记录该方波以后再回放所记数据, 检查波形有无畸变即可确定记录系统的低频与高频特性。

§ 5 数据处理方法

DCS-302 每秒记录 100 个地面运动的瞬时值作为一个数据样本, 一个样本中包含 3 个分量, 每个分量 12 个二进制数, 4 位的增益状态码, 4 位的辅助信息码。由每一秒中的 100 个辅助信息码构成完整的辅助信息, 包括记录器的序列号、日期、时、分、秒的数值。SMR-104 将上述数据重新组合, 加上各类数据的标识码, 把每个数据样本中的数据组合成 8 个 8 位字节作为一帧输出。接收数据的计算机需运行必要的软件, 执行下列功能: 接收输入数据, 按标识码把数据分类组成便于使用的格式放入内存区; 在显示器上重现记录波形, 以便人工判断是否是地震, 删除误触发的干扰记录, 将需要保留的记录作为数据文件存入磁盘。

由于微机对数据加工能力的不断提高和内存的扩大, 新一代微机的高级语言, 例如 PASCAL 等不仅可以对字节进行处理, 而且可以访问到字位, 使用动态变量使得数据存放的范围扩展到系统可以访问的整个内存区。为了通用与方便, 我们的数据传输使用了 IBM-PC 及其兼容机, 软件用美国宾厄姆顿纽约州立大学地球科学系 Norden 先生在吴大铭教授指导下编写的程序, 源程序用 PASCAL 语言写成。它可以完成上面所提到的几项数据传输要求, 并用 PASCAL 中的数据块格式写成磁盘数据文件。块数据文件占用空间少, 可用另一转换程序将其转换为 ASCII 码记录的文件, 以利于其他语言写成的软件利用。

本书中所用到的数字处理和计算还有去除原始数据的直流分量、进行积分计算以得到速度和位移、求得水平向峰值加速度衰减规律的多元回归计算和地震动反应谱的计算等。多元回归和反应谱的计算在后面有关章节中介绍, 这里只说明去除原始数据直流分量和积分计算的方法。

1. 去除直流分量

上文提到记录仪器中使用了伺服加速摆, 频率范围为 0—50Hz, 因此, 在摆体安装时没有调整到完全的平衡位置, 或安装后由于外力作用使得摆体偏离平衡位置时, 都会有一个表示偏离的电信号送入记录器。这个信号不表示地面运动的真实状态, 必须消除。我们把整个记录长度求和再除以记录的总点数、即取记录的平均值作为这个记录的直流偏移量, 然后逐点减掉直流偏移量作为第一步的校正过程, 用数学表达式写为

$$f_i' = f_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f_j \quad (1.1)$$

式中, f_i 表示每个采样点的值; N 为记录长度的总采样个数。

2. 数值积分

DCS-302 数字地震仪记录到的是地面运动加速度, 为了得到速度和位移的时程曲

线，必须进行积分计算。由于地震的地面运动不可能用解析函数表达，也就不可能用求原函数的方法得到积分值，而只能进行数值积分。积分的求和表达式为

$$\int_a^b f(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n f(x_k) \Delta x_k \quad (1.2)$$

其几何意义为求曲边梯形面积，当取样点之间的间隔逐步缩小时，求和的极限逼近积分的理论值。对采样率为 100sps 的数字地震仪记录，样本之间的间隔已经足够小，无须再行函数插值，可直接进行求积运算。如认为两采样点之间是直线，求积按矩形法计算；如假设采样点之间为二次曲线，即为 Simpson 方法。其数学表达式如

$$\int_a^b f(x) dx \approx (b-a) \left[\frac{1}{6}f(a) + \frac{4}{6}f(c) + \frac{1}{6}f(b) \right] \quad (1.3)$$

式中， $f(c)$ 为积分区间 $[a, b]$ 中插值点的函数值。

实际运算证明，采用 Simpson 方法已经可以得到很好的效果，没有必要采用更高阶的多项式逼近。加速度经过一次积分得到速度，经过二次积分得到位移。

由于积分运算在频率域相当于除以频率的平方，原始记录的低频成分受到很大的扩充，以致淹没必要的有用信号，因此在数据处理中进行一定的滤波处理是必要的。目前，数字信号处理技术已经发展得相当成熟，采用时间域中的数字滤波器对记录进行处理可以收到很好的效果，本书在积分运算前使用了 4 阶 Butterworth 高通滤波器对数据进行处理 (Oppenheim and Schaffer, 1975)，滤波器的低频截止频率为 1.5Hz。

第二章 地震和近震源记录的情况

§ 1 剑川地震及其近场观测

1. 地震概况

1982年6月,国家地震局地球物理研究所为研究滇西地区可能发生的地震,在大理洱源县围绕罗平山布设了由4台DCS-302组成的小孔径流动台网,仪器架设在洱源县地震台(以下简称洱源)、罗平山林场场部(以下简称罗平山)、乔后农场(以下简称农场)、乔后盐矿地震办公室(以下简称乔后)。7月3日在洱源以北约50 km的剑川发生 $M_S = 5.4$ 地震,据昆明地震传输台网测定的震中位置为北纬 $26^{\circ}30'$,东经 $99^{\circ}46'$ 。用设立在洱源地区流动台网记录的到时确定的震中位置是北纬 $26^{\circ}26.3'$,东经 $99^{\circ}50.15'$ 。位于洱源地区的4台DCS-302全部获得该次地震的良好记录,并且记录了同日14时58分发生的 $M_L = 4.5$ 前震和一些余震。图1是这次地震的震中位置与观测台站的分布。该次地震的宏观震中在剑川县天马村一带,震中烈度为VII度。洱源地区强烈有感,烈度为V度。自7月6日起台网陆续移至剑川县境内,仪器布设在天马村(以下简称天马)、剑川县城地震台(以下简称县城)、新仁礼公社粮库(以下简称新仁礼)和甸心村(以下简称甸心)。图2是7月20日15时12分 $M_S = 4.8$,8月6日10时36分 $M_L = 3.6$ 地震和观测台站的分布。观测工作至8月底结束,共获得650条地震的数字记录(每条记录均为三分向记录,下同),其中震级大于 $M_L = 3.5$ 的记录有48条。

剑川地震的震源位于金沙江—红河断裂系的中甸—剑川断裂上。地震最严重的破坏在剑川坝子内。剑川坝子是一个断陷盆地,南北长约20 km,东西宽约10 km。剑湖位于盆地中间偏东南位置,盆地中部有相当厚的沉积层。坝子的西侧是第三系火山角砾岩和喜山期粗面岩,东侧是石炭、泥盆系灰岩和二迭系玄武岩。可在东侧见到明显的新构造运动的痕迹,玉皇阁附近的山坡上有大量出露的断层角砾岩和断层泥,断层面向西倾斜,倾角甚陡,约 60° 左右。坝子西侧从地表上没有见到明显的断裂现象,自剑川县城和龙门邑向西沿河谷可看到第四纪沉积物的倾斜。

根据余震记录到时可确定一个位于盆地底部,走向北北东,倾向西部的长7 km、宽3 km的断层面,深度约5—7 km。由余震记录的P波初动符号所作的综合断层面解和由SH/P波振幅比确定,这次地震的断层面解为:方位角 199° ,倾角 40° ,滑动角 -110° 。地表地质现象和上述参数表明,剑川地震是剑川盆地底部的铲状断层在南北挤压、东西拉伸的应力作用下产生的正断层活动(Wu and Wang, 1988)。

2. 各记录台站的场地条件

洱源台的地理位置是北纬 $26^{\circ}6.51'$,东经 $99^{\circ}56.71'$,海拔高度2160 m。记录仪的摆体安置在山坡上的岩洞内,该岩洞原是人工开凿的作为人防工程使用的山洞,后经洱源地

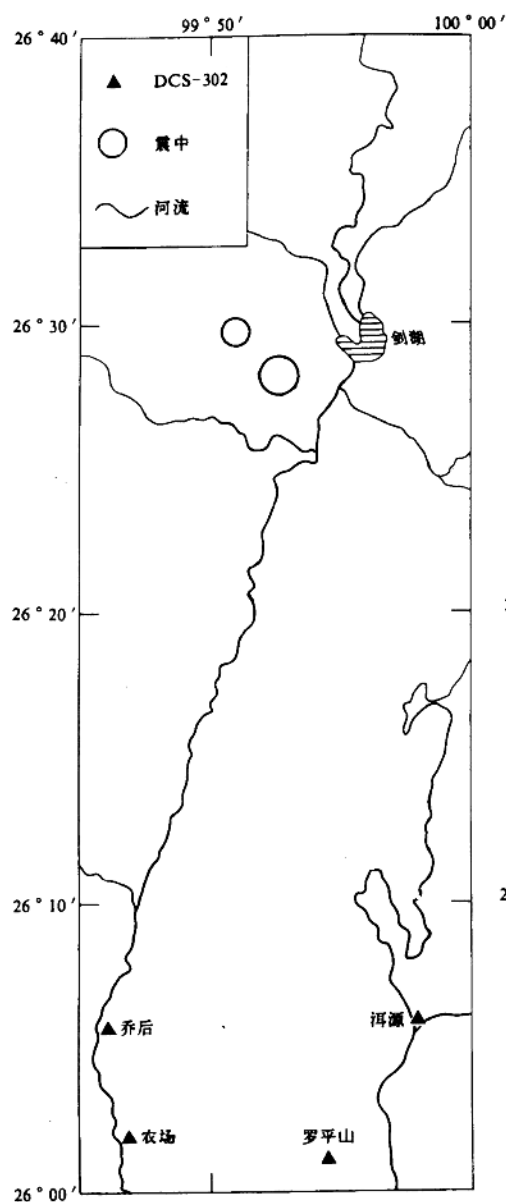


图 1 剑川地震震中位置与观测台站分布

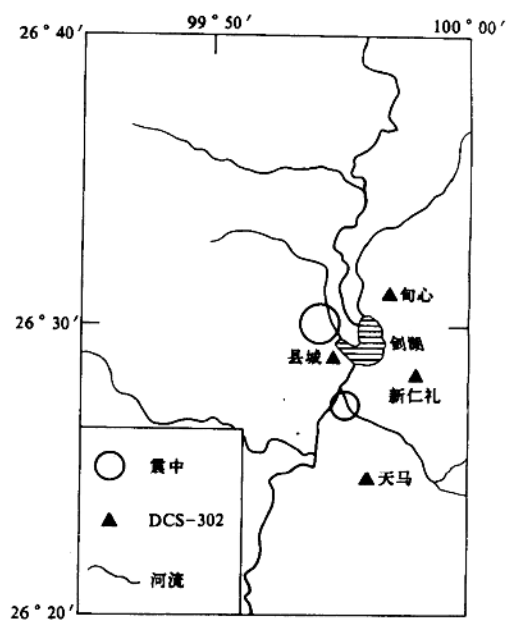


图 2 剑川地震部分余震的震中位置与观测台站分布

震台改造作摆房使用。山洞所在的山体由花岗片麻岩构成。记录摆的地方距洞口十数米远。

罗平山台的地理位置是北纬 $26^{\circ}1.27'$ ，东经 $99^{\circ}53.53'$ ，海拔高度 2640 m。记录仪器放在砖木结构的平房内，水泥地面。台站在罗平山的半山腰处，记录摆地面以下有数米厚的土层。

农场台地理位置是北纬 $26^{\circ}2.00'$ ，东经 $99^{\circ}46.61'$ ，海拔高度 1840 m。DCS-302 安放在土木结构的平房内，摆体固定在风化的岩石面上。房屋的下部是冲积扇，有一定的坡度，由泥土和岩石混合组成。

乔后台地理位置是北纬 $26^{\circ}6.22'$ ，东经 $99^{\circ}45.91'$ ，海拔高度 1920 m。与洱源台的情况相类似，记录器的摆体放在由人防工程改建而成的山洞内，山体由灰岩组成。该站记录的运动状态也可认为是地面以下的运动。

天马台位于北纬 $26^{\circ}27.62'$ ，东经 $99^{\circ}55.00'$ ，海拔高度 2200m。天马村是本次地震的极震区，村内大部是云南地区典型的穿斗木屋架结构房屋，以砖或土坯垒成围墙，遭受地震袭击时，屋架大都保持完好，但墙壁，特别是土坯墙多有倒塌。村子在隆起的高地上，地下是沉积土。DCS-302 的记录器安放在一砖木结构的平房内，土质地面。

县城台位于北纬 $26^{\circ}32.22'$ ，东经 $99^{\circ}53.76'$ ，其海拔高度以及新仁里、甸心台的海拔高度都与天马台接近。与洱源台、乔后台情况类似，剑川县地震台利用人防工程作为摆房，DCS-302 的传感器也放在此山洞之内。台站位于山脚部位，周围大都是出露的基岩，因而地震发生时地面振动的剧烈程度比坝子内部要轻，房屋损坏不严重，有一些房屋发生掉瓦现象。

新仁里台位于北纬 $26^{\circ}31.59'$ ，东经 $99^{\circ}56.82'$ 。该台位于坝子东部，周围都是水稻田，土质相当松软，估计地下有很厚的沉积层。主震袭击为新仁礼村带来的损失没有天马村的大，倒塌的房屋不多，主要破坏是房屋掉瓦。记录仪器放置在粮库的库房内，该库房为大跨度砖木结构建筑，水泥地面。7月20日 $M_L = 4.8$ 地震时，粮库围墙上个别覆瓦震落。

甸心台位于北纬 $26^{\circ}34.76'$ ，东经 $99^{\circ}55.68'$ ，由于这个台站已接近坝子的北部边缘，地下沉积层厚度相对要小一些，剑川地震发生时甸心村的损失不大。DCS-302 地震仪设置在一个穿斗木结构的平房内，土质地面。7月20日 $M_L = 4.8$ 级地震发生时观测人员正在室内作业，感觉到中等程度的振动，房屋的樑接处发出吱吱的响声，围观的群众全部惊逃户外，但没有器皿翻倒或跌落，也没有建筑物的损坏。

剑川地震近场观测获得的 $M_L \geq 3.5$ 级地震的基本参数如表 1 所示。

§ 2 禄劝地震及其近场观测

1. 地震概况

1985 年 4 月 18 日 13 时 52 分在云南省禄劝县转龙地区发生一次中等强度的地震，据昆明地震传输台网测定，震中位置在北纬 $25^{\circ}51'$ ，东经 $102^{\circ}49'$ ，深度 9 km。由全国 21 个基准台记录数据算得的平均面波震级 $M_S = 6.1$ 。极震区的宏观烈度为 VIII 度，位于则

表 1 剑川地震近场观测中 16 个大于 3.5 级地震的基本参数

序号	日 月	期 日	时 间 时-分	震 级 (M_L)	震 中 位 置		深度	
					北纬 ($^{\circ}$)	东经 ($^{\circ}$)		
1	6	25	4-50	4.0	26.38	99.46	—	
2	7	03	14-58	4.6	26.31	99.50	—	
3	7	03	16-13	5.3	26.2630	99.5015	—	*
4	7	03	17-02	4.1	26.3200	99.4800	—	
5	7	03	17-09	3.7	—	—	—	
6	7	05	3-06	4.1	26.28	99.47	—	
7	7	06	3-50	3.6	26.34	99.52	—	
8	7	06	17-45	4.0	26.33	99.53	—	
9	7	07	2-54	3.7	—	—	—	
10	7	07	3-11	3.5	26.26	99.52	—	
11	7	07	10-05	4.3	26.28	99.50	—	
12	7	09	22-44	3.6	26.3049	99.5418	6.0	*
13	7	20	11-21	4.3	26.3378	99.5130	6.7	*
14	7	20	15-12	4.6	26.3366	99.5325	6.0	*
15	8	06	10-36	3.6	26.2958	99.4980	4.0	*
16	8	06	11-03	4.3	26.28	99.49	—	

注：凡标有 * 号的地震的震源位置为小口径台网记录数据所确定，其他地震的震源位置由昆明地震传输台网确定。

邑、红岭坡一带。转龙、桂泉、沙鱼郎等地是 VII 度区。马街、九龙等地为 VI 度区。由于这次地震主要的破坏地区位于禄劝县境内，故称为禄劝地震。

与剑川地震相似，禄劝地震震源也处于一个断陷盆地即则邑坝子附近。则邑坝子是一个规模不大的长圆形断陷盆地，北北西方向长约 6km，东西向宽约 1.5km，洗马河从坝子中部穿过。坝子东部主要是二迭系的玄武岩以及部分灰岩，西部则为早二迭系灰岩。

禄劝地震发生的地点靠近小江断裂带，但这次地震不是该断裂带主断裂的构造运动，而是它的分支断裂的活动形成的断裂活动。周家玉等（1993）利用王兴辉提供的国内 51 个地震台的 P 波初动符号求得主震的二组断层面解为：节面 I 走向 236.3° ，倾角 51.6° ，滑动角 55.8° ；节面 II 走向 103.9° ，倾角 49.6° ，滑动角 125.3° 。并认为节面 I 为主震断层面。

从地震发生以后六天，即 4 月 24 日起“近场强地面运动研究”课题组围绕震中区布设了一个由 4 台 DCS-302 构成的小孔径流动台网进行余震观测，台站设置在马街、沙鱼郎、转龙和桂泉，观测工作至 5 月 4 日结束，共获得大小地震记录 631 条，其中 $M_L \geq 3.5$ 级的地震记录 28 条。观测台站以及下面所提到三个地震的震中位置如图 3 所示。记录中最大的地震是 5 月 1 日 16 时 59 分 $M_L = 4.8$ 地震。

倪江川等（1991）利用矩张量反演的方法求出了所记录的部分余震的震源机制。5 月 1 日 16 时 59 分 $M_S = 4.8$ 地震的震源机制解为：节面 I 走向 215.4° ，倾角 54.3° ，滑动角 45.9° ；节面 II 走向 94.3° ，倾角 54.3° ，滑动角 134.1° ，第一组断层面与主震的

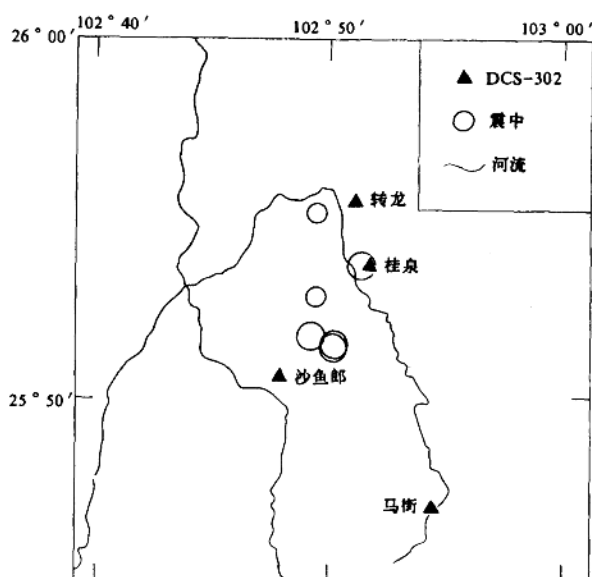


图3 禄劝地震部分余震的震中位置与观测台站分布

断层面相当接近。5月1日16时16分 $M_L = 4.2$ 地震的两组断层面解是：节面 I 走向 325.7° ，倾角 58.9° ，滑动角 37.1° ；节面 II 走向 214.3° ，倾角 58.9° ，滑动角 142.9° 。李肇仁（1991）进一步指出，禄劝地震的发震构造是由走向北北东和北西向两条断裂组成的，5月1日16时59分 $M_L = 4.8$ 地震和5月1日16时16分 $M_L = 4.2$ 地震都位于北西向的断裂上，与第二组节面相吻合。

2. 各记录台站的场地条件

马街台的地理位置在北纬 $25^\circ 46.25'$ ，东经 $102^\circ 54.66'$ ，海拔高度 2000 m。DCS-302 地震仪设置在马街公社养老院宿舍，建筑物是混凝土框架砖墙结构的两层楼房，水泥地面。养老院处在一个山坡之上，地下有土层。该建筑物在禄劝地震主震中基本上没有损害。

沙鱼郎台的地理位置在北纬 $25^\circ 49.85'$ ，东经 $102^\circ 47.98'$ ，海拔高度 1980 m。台站位于九龙河河谷一侧，仪器安置在土木结构的平房内，土质地面，地面以下是沉积物层。主震袭击沙鱼郎地区时，结构简单的房屋遭到一定程度的破坏，主要是墙体开裂和屋顶掉瓦。

转龙台的地理位置在北纬 $25^\circ 54.68'$ ，东经 $102^\circ 51.24'$ ，海拔高度 2000 m。台站位于则邑坝子的北部边缘，观测仪器设置在一个库房内。该房屋是砖木结构，水泥地面，地下是沉积层，遭受地震袭击后损害严重，主要是墙体严重开裂。周围建筑物也有类似现象，