

2378 156.352

澜沧-耿马地震校正加速度 记录和反应谱

Corrected Accelerograms and Response Spectra of
Lancang-Gengma Earthquake

地震出版社

Seismological Press



澜沧—耿马地震校正加速度 记录和反应谱

Corrected Accelerograms and Response Spectra of
Lancang—Gengma Earthquake

中国建筑科学研究院工程抗震研究所
云 南 省 地 震 局 合编

Institute of Earthquake Engineering, China Academy
of Building Research

Seismological Bureau of Yunnan Province

出 版

Seismological Press

1989

本书工作人员

EDITORIAL BOARD

主 编

Editors in chief

王亚勇

Wang Yayong

黎家佑

Li Jiayou

数据处理和观测人员

Members

刘小弟

Liu Xiaodi

高 东

Gao Dong

安 东

An Dong

王 理

Wang Li

向建光

Xiang Jianguang

王崇明

Wang Chongming

澜沧—耿马地震校正加速度记录和反应谱

Corrected Accelerograms and Response Spectra of
Lancang—Gengma Earthquake

中国建筑科学研究院工程抗震研究所 合编
云 南 省 地 震 局

责任编辑：蒋乃芳

责任校对：王花芝

*

地 震 出 版 社 出 版

北京复兴路63号

中国科学技术情报研究所印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 16.25印张 409千字

1989年10月第一版 1989年10月第一次印刷

印数：001—600

ISBN 7-5028-0325-4 / P.206

(714) 定价：15.00元

本项目研究和出版工作得到

国家自然科学基金会和建设部的资助

A Report on Research Conducted Under a Grant from
The National Natural Science Foundation of China
and The Ministry of Construction of China

目 录

概况	(1)
地震地质背景和震区构造	(2)
烈度分布和地面破坏	(5)
强震观测	(6)
数据处理技术	(7)
数据目录	(11)
校正的加速度、速度和位移曲线	(55)
反应谱和富里叶谱	(201)

CONTENTS

Introduction	(12)
Seismogeological Background and Tectonic in the Seismic Region	(13)
Intensity Distribution and Ground Failure	(17)
Strong Motion Observation	(19)
Data Processing of Strong Motion Accelerograms	(20)
List of Earthquakes and Recordings	(26)
Plots of Corrected Acceleration, Velocity and Displacement Curves	(55)
Plots of Response Spectra and Fourier Spectra	(201)

概 况

1988年11月6日21时03分在云南省澜沧县境内发生了7.6级强烈地震(震中位置: $\varphi_N 22^\circ 50'$, $\lambda_E 99^\circ 43'$; 震源深度13km), 之后13分钟, 在耿马县与沧源县交界处, 又发生了7.2级强震(震中位置: $\varphi_N 23^\circ 23'$, $\lambda_E 99^\circ 36'$; 震源深度8km)。这是一次双主震余震型的浅源地震。据我国地震遥测台网记录, 截至1988年12月31日止, 共记录到 $M_S > 1.5$ 级余震4497次, 其中6.0—6.9级地震6次, 5.0—5.9级地震13次, 4.0—4.9级地震85次, 3.0—3.9级地震597次, 3.0级以下地震3796次。最大余震为1988年11月30日发生在澜沧县竹塘乡的6.7级地震, 震中位置: $\varphi_N 22^\circ 43'$, $\lambda_E 99^\circ 50'$; 震源深度11km)。

本次地震是自1976年唐山地震以来, 发生在我国的一次最强烈地震。其影响波及云南省思茅、临沧、保山、德洪和西双版纳五个地区的20个县市, 受灾人口超过500万, 直接经济损失达20亿元。

地震中, 由中国建筑科学研究院工程抗震所(以下简称抗震所)和云南省地震局联合建立的滇南台网获得了主震($M=7.6$ 级)的地面运动加速度记录。地震后, 两单位派出的流动观测队伍在震中区设立了临时观测站, 获得了大量的近场余震记录。这些记录丰富了中国的强震加速度记录数据库, 将为震源机制、近场地震动衰减、场地效应、结构地震反应及城市抗震防灾规划和建筑抗震设计提供重要基础资料。

本次地震中所获取的强震加速度记录由抗震所的强震数据处理中心分析和整理。本书的文字部分由抗震所和云南省地震局的有关人员共同完成, 其中概况由王亚勇、黎家佑编写, 地震地质背景和震区构造由姜葵、张俊昌编写, 烈度分布和地面破坏由周炳荣、皇甫岗、陈敬编写, 强震观测由黎家佑、刘小弟、高东编写, 数据处理技术由王亚勇、刘小弟编写, 数据目录由王理、王亚勇编写。加速度记录曲线和反应谱的绘图工作由安东、刘小弟完成。

地震地质背景和震区构造

(一) 区域地震地质环境

耿马-澜沧地区位于澜沧江以西的西南边陲地带。地貌上属横断山脉南延的一部分,为云贵高原西南缘的中、高山区。大地构造位置处于滇西褶皱带中南部的风庆-澜沧隆起区内,主要以澜沧群、西盟群深变质岩系和规模巨大的临沧-勐海花岗岩体的长期隆起为特征。区域构造线以南北向宽缓褶皱和断裂为主,后期迭加了 NE 向和 NW 向断裂网络,形成了较为复杂的菱形断块构造格局,是现代断裂活动强烈、地壳结构较为破碎的地区之一(图 1)。

区域断裂构造以 NW 向和 NE 向为主,南北向断裂常以深部背景显示,地表连续性较差。主要断裂有 NW 向的澜沧-勐遮断裂、木戛断裂,NE 向的南汀河断裂带、孟连断裂,近 SN 向的昌宁-双江深断裂带。

1. 澜沧-勐遮断裂

出露在临沧-勐海花岗岩体西侧,北起竹塘乡哈卜妈,向南经竹塘、澜沧、惠民、勐满,穿过勐遮盆地中央的乌龟山至满混南,消失在勐海花岗岩体之中。总体走向 $N30^{\circ}W$, 向东陡倾,全长 150km。

从地层出露情况看,澜沧-勐遮断裂是一条明显的构造界线,其东部是由多期活动的花岗岩、变质岩组成的变质混合岩带,西部则以古生代石灰岩地层为主,断裂水平活动明显的时期至少始于燕山晚期到喜山早期,表现为中生代地层(J-K),其褶皱右行断错 1.5—2km。新生代以来,除沿断裂形成竹塘、澜沧、勐海、勐遮和勐混等 5 个狭长小型断陷盆地和串珠状分布的高热温泉外,断层陡崖、槽谷、水系扭动等构造地貌屡见不鲜。尤其在澜沧以北地段,断裂带由 2—3 条近于平行的次级断裂组成,它们和在哈卜妈、竹塘、东主和澜沧南等处交切的 NE 向断层一起,把断裂带展布区内宽约 2—4km 的 C—P 石灰岩地层切割得支离破碎,形成特有的峰状地貌,断层破碎带宽达数百米,是地壳构造变动的脆弱地带。

根据 1935 年以来的历史地震记载,澜沧-勐遮断裂带共发生过 5 级地震 9 次,其中 2 次大于等于 7 级的地震中均沿断裂带出现了长约 20—30km 的地震断层,极震区沿断裂成串分布。这些事实共同说明,澜沧-勐遮断裂带是耿马-澜沧地震带内一条主要发震断裂。

2. 南汀河断裂带

该断裂带是震区北部的边界断裂,平面展布是楔形。主干断裂在云县分为东西两支,分别构成云县盆地东西两侧的边界。东支断裂呈 $N30—40^{\circ}E$ 方向延展,过云县盆地向南,通过幸福、勐勇、勐撒、耿马盆地东缘后稍偏南经沧源出国境入缅甸,长达 180km;西支断裂作 $N40—60^{\circ}E$ 方向延伸,自云县盆地的西侧沿南桥河向南经勐底、勐冒,然后顺南汀河过热水塘、勐简的西北侧渐转为 $N60^{\circ}E$,经孟定清水河出境延入缅甸,全长 200 余 km。在卫星图像上,西支断裂的线性影像明显,延展平直、清晰、连续

性好,呈舒缓波状,而东支断裂连续性稍差。

南汀河断裂带形成于古生代末期的加里东运动,后经华力西期、印支期、燕山期的多次活动,乃形成如今的规模。特别是进入喜山期以来,由于印度板块对欧亚板块的碰撞,活动更趋强烈。沿断层带形成了非常清楚的峡谷地貌和成串分布于其中的断陷盆地,并有成带分布的温泉出现。

根据新生界沉积特点、古地震事件和断错地貌现象,可判明南汀河断裂带是一条新活动明显的断裂带,呈左旋错动为主的压扭性质;现代活动强度,在横向上西支比东支强烈;在纵向上,东支呈北强南弱,西支在断陷活动上呈南强北弱,而在水平位错方向,则北段更为明显。

3. 木戛断裂

呈 NW—SE 向斜穿震区中部,把这两次大震分隔在南北两侧。西北起于沧源附近,向东南经雪林、木戛后大致沿黑河河谷南岸延伸,又在南岭西分成两支近于平行的断层,切过澜沧江,经勐养,勐醒继续延向东南。澜沧江断裂以西长约 200km。走向 N50—60°W,倾向 NE 为主,但角度大于 60°。断裂活动性质在喜山早期有一明显转变,喜山期以前为左旋压扭,水平错距达 42km;喜山期以来为右旋压扭,由水系牵引反映出的最大水平错距达 10km。卫星照片上反映为平直、清晰和连续性好的线性影像。地貌上以山水相依的谷岭地形为特点,没有形成断陷盆地。

木戛断裂带内至今还没有破坏性地震的记载。在该断裂带与澜沧—勐遮断裂交汇处,是 1988 年 8 月 15 日澜沧竹塘 5 级地震和 1988 年 11 月 6 日澜沧 7.6 级地震的发震部位。7.6 级地震时,沿该断裂的南岭—雪林一段,曾产生过少量地裂缝,并有少数余震 ($M < 4$) 沿断裂分布。

4. 孟连—澜沧断裂

该断裂是震区南部的边界断裂。东边始于澜沧盆地南缘,向西过勐宾南、孟连、勐马,在勐啊西伸出国境入缅甸,全长约 140km。走向 N60—70°E,倾向 NW。由地层断错和水系牵引表明断裂具有左旋压扭性质。沿断裂发育有成串的小型新生代断陷盆地和高热温泉,表明该断裂新构造活动明显。在断裂东端与澜沧—勐遮断裂交接处,1952 年曾发生过 6.5 级地震,1989 年 3 月 1 日在断裂西端延伸方向的缅甸境内发生过 6.2 级地震;1965 年以来 $M = 3.5—4.9$ 级的小震活动沿断裂带密集,说明孟连—澜沧断裂的地震活动也很明显。

(二) 震区构造

区域地质资料和澜沧—耿马地震序列震中分布图表明(图 2),震区的南、北边界是 NE 向的孟连—澜沧大断裂和南汀河深大断裂带,东、西两侧为古老变质岩系澜沧群和西盟群,中间是由晚古生代地层组成的近 SN 向狭长褶皱带,并被 NW 向木戛断裂斜切为南、北两区。澜沧 7.6 级地震发生在南区,耿马 7.2 级地震发生在北区。

南区构造线以 NNW—近 SN 向断层为主,其次为 NE 向断层。主要断裂是通过震区中部的澜沧—勐遮断裂。NE 向断裂一般规模短小,卫星影像上以断续的线性按等间距 (10—15km) 排列,并往往切错 NNW—近 SN 向断层。在 NNW 向与 NW 向、或 NE 向断裂交切地带,常常是强震发生的构造部位。澜沧 7.6 级地震即发生在 NW 向木戛断裂和 NNW 向澜沧—勐遮断裂交汇并被木戛、竹塘一带的 NE 向断裂切错的地带。

耿马 7.2 级地震发生在北区的晚古生代小型宽缓向斜内，由于 NW 向、NE 向和近 EW 向多组断裂的破坏，向斜被切割成菱块状，石灰岩地层支离破碎。地表出露较明显的 NW 向断层有早母坝-小麻勐断层、勐省-岩帅断层、勐勇-大芝光断层；NE 向断层有糯良-金列断层、岩丙-双江断层；近 EW 向断层有小黑江断层；SN 向断层有勐省断层等。7.2 级强震即发生在构造活动明显的早母坝-小麻勐断层和糯良-金列断层的交汇部位。

烈度分布与地面破坏

(一) 烈度分布特点

澜沧 7.6 级和耿马 7.2 级两次主震，发震时间间隔仅 13 分钟，震中相距约 60km，显然存在震害的累积效应。但根据调查访问，在两次主震的震中及邻近的高烈度地区，无论在房屋的震害程度和人的感觉上，对两次地震均可区分。而在烈度较低的地区，特别是在两次主震震中之间烈度为Ⅶ度以下的地区，则很难区分。因此在绘制等震线图时，只分别勾画了两次主震的级震区和Ⅶ度区等震线，余下则勾画成综合等震线（图 3，图中虚线为推测等震线）。各烈度区的长轴方向、长轴和短轴的长度及面积列于表 1。

这次地震的有感范围很大。据初步调查，东北逾昆明，北达丽江，南、西南越出国境至缅甸。在我国境内有感半径约 400km。

受局部场地条件影响，在同一烈度区内，出现了与周围地区或相邻地点震害程度明显不同的烈度异常区。高烈度异常区有耿马、双江等地（参见图 3）。

(二) 地面破坏现象

这次地震造成的地面破坏现象种类很多，也很典型，比较突出的有地裂缝、崩塌和滑坡、喷水冒砂等，集中发育在极震区内，详见图 4。

1. 地裂缝

震区所见的地裂缝可分为构造地裂缝（地震断层）和非构造地裂缝两类。构造地裂缝主要出现在极震区内，它是构造活动在地表反映出的最新形迹，其分布和走向不受地形、地物的影响，并与老的活动断裂基本一致，是老断层再次错动的直接表露。

非构造地裂缝在震区广泛发育，一般出现在山坡、滑坡体后缘、河道岸边或公路旁，其规模和方向随地形、地貌和土质条件而改变。

2. 滑坡和崩塌

滑坡主要发生在谷深坡陡的山地斜坡地带和公路陡坡一侧的突出部位。在地震力和重力的联合作用下，基岩表面松散的岩上层顺坡（层）滑落。如 7.6 级地震极震区东北、木戛公路 25km 处的巨大滑坡，使南卡河道堵塞而形成了地震湖。

崩塌主要出现在石灰岩分布地区。规模较大的崩塌集中在陡峭的山崖地段。最典型的崩塌发生在 7.2 级地震极震区中部的小黑江边，从金列到石佛洞长约 9km 的地段，由于大规模岩石崩落，造成公路毁坏，交通中断。

3. 喷水冒砂

主要出现在河道岸边的低阶地及谷地、槽地的低凹地带。如木戛至战马坡的黑河岸边、勐省贺勐河及双江勐勐河的河漫滩及低阶地上均有喷水冒砂现象，喷水冒砂孔一般直径为几厘米至几十厘米，多呈带状分布。其中规模较大的是勐省东南贺勐河—盲谷低阶地上的喷水冒砂带，全长达 2.5km，宽约 100m，总体走向 N30°W。

强震观测

1984年由抗震所和云南省地震局联合建立的滇南台网包括景洪、思茅、普文和普洱等地共5个固定地面台站，共配备5台美国制造的强震加速度仪SMA-1。在本次地震中，景洪台（编号A4）和思茅台（编号A5）获得11月6日 $M=7.6$ 级主震记录，震中距分别为142.5km和128.1km。由于第2个主震（ $M=7.2$ 级）震中往西偏移，距本台网更远，仪器未能再次触发起动。

主震后，由云南省地震局和抗震所派出的流动观测组携带仪器分别于11月9日和11月11日到达极震区，迅速建立了11个流动观测站。这11个台站配备美国制造SMA-1，DSA-1和国产GQ-3强震加速度仪共11台，沿主断裂带布置在澜沧县城、战马坡、大塘子、竹塘、黑河、耿马县城、勐省等地（图3）。多数台站设置在基岩或很薄覆盖层的自由地面上，少数放在二一三层的砖石结构上，以观测结构物的地震反应。所有的仪器均按正南—北和东—西向安置，即与主要发震断层（澜沧—勐遮断层和旱母坝—小麻劫断层）方向成 30° 夹角。表2给出这些观测台站的地点、经纬度、高程和场地条件描述。

在主震时及主震后将近一个月内，2个固定台和11个流动台获得了大量的强震加速度记录。经数据处理和分析并进一步整理后确认，共获得1次主震和91次余震的148个有价值的加速度记录，计433条曲线。其中未校正峰值加速度值超过 $0.1g$ 的有19条曲线。1988年11月30日安置在竹塘乡的2台SMA-1强震仪获得了 $M=6.7$ 级的强余震记录，震中距大约为3.8km，最大加速度峰值超过 $0.5g$ ，记录时间长达30s左右，波形完整，是迄今为止我国用仪器在离震中最近情况下记到的最大强震地面运动加速度记录，具有重要的工程实用价值。

表3给出峰值加速度(未校正)超过 $0.1g$ 的余震记录和2个主震记录。

数据处理技术

强震记录的处理和分析主要包括以下内容:

(1) 将模拟记录数字化, 以期在不作任何校准的基础上获得能最真实反映实际强震记录的数字化结果;

(2) 全面分析和估计由于仪器设计和制造不良、胶卷记录冲洗放大过程中的波形畸变, 数字化过程的杂音等在加速度记录中形成的各种误差, 以及这些误差对数字化结果、各种谱值和二次积分计算位移的影响。根据这些误差的频谱特性确定能保证数字化记录有足够精度的频率范围;

(3) 利用数字滤波技术, 对加速度记录进行统一校正, 包括仪器高频响应的校正和因随机读数误差造成记录零线中长周期失真的校正;

(4) 给出校正后的加速度数据及由此计算出的速度、位移数据、富里叶谱和具有不同阻尼的各类反应谱。

(一) 原始记录的数字化与零线调整

强震记录的数字化过程是在工程抗震所强震数据处理中心所用的美国 TALOS-66 型大型数字化台上进行的。台面有效尺寸为 $152\text{cm} \times 112\text{cm}$, 读数精度为 $\pm 0.002\text{cm}$, 分辨率为 0.02cm , 采样方式为驻点式。为了能准确地读出曲线的控制点, 用手动十字丝跟踪记录曲线, 采用不等间隔采样, 通过模数转换器, 将模拟信号转变为数字信号, 送到计算机内存贮器, 然后再转记到磁盘或磁带上。

对数字化后的记录进行调整, 恢复原始的记录形状。包括以下步骤:

(1) 对加速度数据(包括时标和固定迹线)进行等间隔插值得到采样率为 50 点/s 的数据;

(2) 使用 $1/4-1/2-1/4$ 跟随平均方法, 对固定迹线和时算进行平滑化处理;

(3) 对所要处理的加速度迹线进行零线调整, 所依据的理论是: 找到加速度记录的平均值 $\bar{a}$, 使得方差:

$$E = \int_0^T [a(t) - \bar{a}]^2 dt \quad (1)$$

为最小。为此, 令

$$\frac{\partial E}{\partial \bar{a}} = 0 \quad (2)$$

得

$$\bar{a} = \frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt \quad (3)$$

用离散化形式表示, 则为

$$\bar{a} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N a_i \Delta T \quad (4)$$

式中, a_i 为加速度采样值; ΔT 为采样间隔, 这里为 0.02s; T 为记录的时间长度(s)。

最后得到经零线调整后的加速度数据为

$$a'_i = (a_i - \bar{a}) / \text{SEN} \quad (5)$$

其中 SEN 是记录在数字化时的灵敏度(数字化单位 / G)。

对于带有固定迹线和时间标记的记录, 问题比较清楚。只要将记录减去固定迹线, 就得到加速度记录本身的坐标值。对于没有固定迹线的记录, 则应用最小二乘拟合方法来配置零线 $x + \beta t_i$, 使

$$E = \sum_{i=1}^N (a_i - \alpha - \beta t_i)^2 \quad (6)$$

为最小。为此, 分别取 E 对 α 和 β 的导数, 并令

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial \alpha} = -2 \sum_{i=1}^N (a_i - \alpha - \beta t_i) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial \beta} = -2 \sum_{i=1}^N t_i (a_i - \alpha - \beta t_i) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

解以上联立方程可求得 α 和 β 从而得到零线。

在这一阶段对原始记录的数据只作了形式上的调整, 并没有起质的变化, 所得结果称为未修正的加速度记录。

(二) 强震记录的误差修正

经过数字化和零线调整后的加速度数据中混杂着一些误差成分, 这些误差大体可分为三类:

(1) 来源于强震仪设计与制造中的不完备性, 如动力响应影响, 三分量位置的安装误差, 记录纸的横向抖动和传动机构中的杂音造成的误差以及记录迹线的宽度对读数带来的影响等;

(2) 胶卷记录冲洗、复制或放大过程中的变形, 如感光介质在酸、碱性溶液中浸泡以及晾干后的伸长或收缩, 放大镜头质量不好对记录可能产生的畸变等;

(3) 数字化过程中读数设备的系统误差以及读数时人为的随机误差。前者取决于设备制作的精度, 后者则是由人的视差、读数的经验及熟练程度所造成。

对强震记录中误差的修正主要通过以下两大步聚进行:

1. 仪器失真误差的修正(高频误差修正)

(1) 根据记录仪器(SMA-1、GQ-3 强震仪)的频率响应参数对数据进行低通滤波, 一般用终止频率为 25Hz 的 ORMSBY 滤波器。滤波前, 将未修正的加速度记录插值为 100 点/s 的数据。滤波在时域里以卷积运算形式进行, 可以表示成如下方程:

$$Y_N = \sum_{k=-N}^N h_k x_{n-k} \quad (8)$$

式中, x_n 为采样值; h_k 为滤波器冲击响应函数, 即

$$h_k = \frac{\cos(k\omega_c T) - \cos(k\omega_\pi T)}{\pi(\omega_\pi - \omega_c)k^2 T^2} \quad (9)$$

其中 ω_c 为滤波器截断频率; ω_π 为滤波器终止频率。

(2) 根据强震仪摆体的运动方程对记录数据进行仪器误差修正。摆体的运动方程可表示为:

$$\ddot{x}_n + 2\omega_0\zeta\dot{x}_n + \omega_0^2 x_n = -\dot{a}_n \quad (10)$$

其中 ω_0 为摆体的自振圆频率; ζ 为摆体的临界阻尼比; a_n 为地面运动加速度。

对于加速度摆, 其记录所表示的是 x_n , 要得到真实的地面运动加速度 a_n , 必须对第一阶段所得的未修正的加速度记录数据分别微分一次和二次, 得到 $\dot{x}_n$ 和 $\ddot{x}_n$, 然后把它们代入运动方程式(10), 得到真实地面加速度 a_n 。

在进行上述微分运算时, 没有使用常用的中心差分法。因为使用中心差分法对采样率为 100 点/s 的数据进行微分, 当信号频率达 25Hz 时, 计算结果将低于理想微分计算的 40% 左右。在这里使用的是—种改进了的微分算法:

$$\dot{x}_n = \sum_{k=1}^N C_k (x_{n+k} - x_{n-k}) \quad (11)$$

式中,

$$C_k = -h_k W_k = \frac{-(-1)^k}{2kT} \left(1 + \cos \frac{k\pi}{N} \right) \quad (12)$$

$$(k = 1, 2, 3 \cdots N)$$

当 $N=10$, 在信号频率高达 45Hz 时, 仍可以得到理想的结果。

对于二阶微分运算, 其公式为

$$\ddot{x}_n = C_0 x_n \sum_{k=1}^N C_k (x_{n-k} + x_{n+k}) \quad (13)$$

式中,

$$C_0 = -\frac{1}{3} \left(\frac{\pi}{T} \right)^2$$

$$C_k = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{k\pi}{N} \right) \left[\frac{-2(-1)^k}{(kT)^2} \right] = \frac{(-1)^{k+1}}{(kT)^2} \left(1 + \cos \frac{k\pi}{N} \right) \quad (14)$$

2. 基线误差修正(低频误差修正)

基线修正主要是消除仪器和数字化过程带来的低频噪音, 主要步骤如图 5 所示的流程图。通过流程图我们可以看到:

(1) 对记录数据的高通滤波实际上是通过低通滤波实现的。滤波分为两步进行, 第一步使用截断频率 $f_c = 5$ (或 2.5) Hz 的低通滤波器, 对所得结果抽选采样, 得到采样率为 10 点/s (或 5 点/s) 的数据。第二步使用截断频率 $f_c = 0.07$ Hz 的低通滤波器, 所得结果实际上反映了基线的波动, 也就是长周期误差。再用原来的加速度数据减去基线, 得到消除长周期误差的加速度数据。这样做是为了节省计算时间。

(2) 通过以上步骤得到的加速度数据所包含的信号频带是 0.07—25Hz。这个频带仅仅是根据仪器的频响和工程研究感兴趣的频带决定的。实际上, 这些数据中仍然带有一些高频和低频噪声, 需要进一步消除。然而, 选择进一步滤波所需要的带宽是十分麻烦的, 对不同的记录需要选择不同的带宽。所用带宽可以由处理人员根据经验, 或由计算机软件根据数字化台的背景噪音频谱和加速度记录频谱的关系自动选定。

根据所选定的新带宽, 再次对加速度数据进行基线修正, 修正效果好坏视积分后所得速度和位移量值的大小和反应谱来判断。经验表明, 仅用绝对数值相比, 如果速度的数值小于加速度绝对数值的 10%, 而对所选定的新带宽稍加改变, 再次对加速度数据进行滤波, 对加速度、速度、位移值均无太明显影响, 即认为处理是成功的。

最后, 对经基线修正后的加速度记录数据积分, 得到相应的速度和位移数据。但是, 由于初始位移和初始速度的不确定性和数据离散化在速度和位移数据中带进了误差, 需要用上面选定的新带宽对速度和位移数据进行滤波。

(三) 反应谱的计算方法

在计算反应谱和富氏谱时, 采用了 Z 变换计算方法, 其优点是比经典的 Duhamel 积分法节省计算时间 3—4 倍, 且计算精度也能令人满意。

根据反应谱理论, 对于给定的 ω_0 和 ζ_0 值, 各类谱值为:

$$\begin{aligned} \text{位 移 谱: } SD &= \{x_n\}_{\max} \\ \text{速 度 谱: } SV &= \{\dot{x}_n\}_{\max} \\ \text{加 速 度 谱: } SA &= \{\ddot{x}_n\}_{\max} \\ &= \{2\omega_0\zeta\dot{x}_n + \omega_0^2 x_n\}_{\max} \\ \text{富氏振幅谱: } FS &= [\dot{x}_N^2 + (\omega_0 x_N)^2]^{1/2} \end{aligned}$$

式中, $\dot{x}_N$ 和 x_N 分别表示 $\zeta_0=0$ 的单质点系统在地震地面运动结束时刻的速度反应和位移反应值。

利用 Z 变换法计算反应的公式为:

$$\begin{cases} x_n = \varepsilon_0 T u_n \\ \dot{x}_n = \varepsilon_0 \dot{u}_n \end{cases} \quad (15)$$

其中 u_n , $\dot{u}_n$ 与 u_{n-1} , u_{n+1} , $\dot{u}_{n+1}$ 和 a_n 有如下递推关系:

$$\begin{cases} u_{n+1} = b_0 u_n - c_0 u_{n-1} - a_n \\ \dot{u}_{n+1} = u_{n+1} - u_n \end{cases} \quad (16)$$

其中,

$$\varepsilon_0 = e^{-\alpha T} \frac{\sin \beta T}{\beta}$$

$$b_0 = 2e^{-\alpha T} \cos \beta T$$

$$c_0 = e^{-2\alpha T}$$

$$\alpha = \omega_0 \zeta$$

$$\beta = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$$

(四) 数据处理总框图

对原始的强震加速度记录的全部处理过程可以表示为图 6 所示的总框图。

数 据 目 录

在澜沧-耿马地震中,滇南台网和流动观测台站共获取了 100 多次地震的 200 多组加速度记录。经处理和整理,本书收入 92 次地震的比较有价值的记录 148 组。本节将顺序给出这 92 次地震的目录和加速度记录的目录表。为了便于按一次地震或一个台站查找有关的加速度记录,还给出地震与记录号、台站,台站与记录号、地震编号的对照表。其中表 4 为 1988 年滇南强震台网所记录澜沧-耿马地震目录;表 5 为澜沧-耿马地震校正加速度记录目录;表 6 为地震与台站编号、记录号对照表;表 7 为台站与记录号、地震编号对照表。