

编号: (76)018

出国参观考察报告

美国地震工程研究概况

中国科学技术情报研究所

毛主席语录

列宁为什么说对资产阶级专政，这个问题要搞清楚。这个问题不搞清楚，就会变修正主义。要使全国知道。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业、干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

目 录

一、强震观测.....	(4)
(一) 强震台网.....	(4)
(二) 强震观测仪器设备.....	(5)
(三) 强震加速度记录的常规处理和分析.....	(14)
二、地震危险的估计.....	(24)
(一) 地面运动.....	(24)
(二) 地震区划.....	(37)
(三) 地震动的概率理论.....	(40)
三、抗震结构的研究.....	(47)
(一) 抗震设计规范.....	(47)
(二) 结构试验.....	(63)
(三) 结构非线性计算和设计.....	(76)
(四) 房屋震害的分析研究.....	(83)
(五) 混凝土重力坝.....	(89)
四、地震工程中的土力学问题.....	(102)
(一) 砂土液化问题.....	(102)
(二) 土坝抗震分析.....	(115)
(三) 加筋土.....	(119)
五、振动试验设备和测振仪器.....	(121)
(一) 地震模拟振动台.....	(121)
(二) 伪静力试验设备.....	(131)
(三) 原型结构振动试验设备.....	(134)

美国地震工程研究概况

赴美地震工程考察组

中国地震工程考察组一行十一人，根据中美双方科技人员交流项目，于1976年4月22日至5月15日在美国进行了专业考察。在此期间，访问了华盛顿、波士顿、厄巴纳、洛杉矶、旧金山等城市及其附近地区，参观了美国地质调查局、麻省理工学院、伊利诺斯大学、加州理工学院、加州大学洛杉矶分校和伯克利分校、美国地质调查局地震研究所、斯坦福大学和斯坦福研究所等单位，对美国地震工程和岩石力学的研究有一个概括的了解，对某些有较大实际意义的问题作了重点考察，带回了一些有参考价值的资料。现就地震工程考察所及，扼要汇报如后。

美国有35%的人口居住在地震区，其中有10%居住在加州；在39个州内有级别为2至3（大约相当于我国烈度七至八度）的地震区。近年阿拉斯加（1964）和圣弗尔南多（1971）两次地震的损失均在5亿美元左右。据估计，如果1906年旧金山地震再度发生，将有200亿美元的损失和10000人死亡。由于这些情况，地震工程的研究在美国还是受到重视的。地震工程的研究经费主要由美国科学基金会支付，每年约7—8百万美元。其它经费来源是交通住宅部、陆军工程部队和私人企业。

地震工程的主要研究机构是伯克利加州大学地震工程研究中心，有工学院六个系的教授45人、研究生100人参加工作；研究范围较广，涉及地面运动、地基土壤问题、抗震结构、海啸等方面，此外担负全国地震工程情报服务工作。其次是洛杉矶加州理工学院地震工程研究室，其主要工作是南加州的强震观测台网的管理和全国强震观测资料的整理、出版，也进行抗震结构和海啸的研究。其它知名的单位尚有：伊利诺斯大学有着长久的研究抗震结构的历史；麻省理工学院侧重于概率理论在地震工程上的应用的研究；加州大学洛杉矶分校侧重于场地烈度和土工抗震问题的研究；美国地质调查局在加州门罗公园的地震研究所曾长期担负大部分强震观测台网的管理工作，现在有扩大研究范围到抗震建筑的倾向；密西根大学进行抗震结构的研究；斯坦福大学新近建立了一个地震工程中心，得到较大捐款，将有新的设备；洛杉矶南加州大学有一个年轻的抗震研究小组正在形成。总的来看，除强震观测工作外，绝大部分研究工作是在大学校进行，由教师 and 研究生担任。美国是世界地震工程学术会议的发起者，首次会议（1956）在旧金山召开，但在其国内，去年才举行第一次全国性的地震工程会议。在学术刊物方面有一分专刊，《地震工程与结构动力学》，1972年创刊；此外，《美国土木工程师学会会刊》和《美国地震学会学报》也是反映地震工程研究成果的主要刊物。总之，地震工程在美国还是一个发展中的科学领域，但投入的人力和物力并不是很大的。

当前美国地震工程的研究，据我们考察，主要集中在下列几个问题。

1. 强震观测

美国强震观测工作开始于1932年。初期台网规模甚小，到六十年代，由于新型仪器的出

现和大量生产,台网才猛然发展。现在全国有强震仪1400台,其中1000台在加州,布设于建筑物和地面上。强震观测工作包括强震仪器的研制,强震台网的布设与管理,强震记录的搜集、处理和常规分析几个环节。仪器研制和生产主要由两家地学仪器公司进行,得到加州理工学院的协作,发展了多种型号的加速度仪。引用的新技术是力平衡的扩频装置、数字磁带记录、太阳能充电、无线电时间信号等。强震仪由多方面(包括私人和机关)购置,但大部分由美国地质调查局统一管理。强震记录的搜集、处理、分析、出版,过去由加州理工学院负责建立了一套数据处理程序和常规分析方法,已经把1933—1971年期间的记录(包括57次地震的381个记录)整理出版,包括原始记录、校正记录、积分的速度与位移、反应谱、富氏谱等内容。今后这项工作将移交给美国地质调查局。

2. 地震危险的估计

地震工程的起点是对工程结构在今后可能遭遇的地震强度作出估计。对于解决这个问题,美国有两条思路:一条是进行烈度区划,勾画出强弱不同的地震危险区;一条是直接作假想可能发生的地震推测工程地点的地面运动的强度和特性。前一条应用于一般工程和建筑设计规范;后一条应用于特殊工程(例如核电站)的设计。但不论走那条路,都归结为地面运动的预测,都涉及地面运动的衰减和分布的规律。因此关于地面运动的研究,在美国一向是一个重点课题,近年主要利用强震观测资料进行下列问题的研究:(1)建立宏观烈度和地面运动之间的统计关系,以便从前者换算后者;(2)寻找地面运动(包括强度和频谱特性)与震级、震中距和场地条件(包括地质、地形因素)的统计关系,以便从后者推测前者;(3)从震源机制和地震波理论计算地面运动;(4)根据地面运动的统计特征合成“人造地震”。在上列研究中,第(2)项是最主要的,其成果在西部的实际工程中获得应用,并有纳入设计规范的趋势。

美国现行的地震区划图分0, 1, 2, 3(大约相当于我国烈度5, 6, 7, 8以上)四级区域,新近有增加“4”区的趋势。当前的动向是从地震发生概率的观点进行改编,并以加速度等值线表示烈度。值得注意的是在旧金山海湾地区进行的小区域烈度划分工作,他们假定地震发生在某些活动断层上,除了作综合的烈度区划以外,并作几种工具图,表示活动断层、基岩运动的衰减、地质背景、液化可能性、滑坡可能性、海啸淹没可能性等。这和日本那须信治的场地勘察的思路是相近的。

3. 抗震结构的研究

近年的研究侧重于非线性结构反应,主要有两个方向:一是在伊利诺斯大学发展的弹塑性反应谱,这个工作已进入定型状态,没有什么新的进展;另一是在加州大学伯克利分校发展的所谓“吸能计划”,旨在通过大尺寸结构模型试验了解结构和构件的非线性性质(主要是力与变形的滞回曲线),建立结构的非线性模型,从而利用计算机计算结构的非线性地震反应。后一方向是当前的主要方向,为此加大伯克利分校建立了20'×20'的双向大型振动台和施加低频循环荷载的伪静力试验设备。研究的结构形式主要是高层抗弯构架、剪力墙结构、筒式结构以及较低的混凝土砌块结构。

对弹性结构的研究仍然进行,但主要集中于一些复杂的、重要的结构,如混凝土高坝、核电站等。此外,对原型结构的环境脉动和机械强迫振动的量测工作也还在进行。

理论工作主要借助于有限单元法和数字计算机,编制了许多种通用程序,适用于三维构架、坝、壳体等复杂结构以及地基——结构共同作用的线性或非线形分析。

1971年圣弗尔南多地震时,洛杉矶地区有不少建筑受到破坏。之后,为了吸取教训,对

某些严重破坏作了较细的分析，并对加州地区的中、小学校 and 医院采取了一些检查加固措施。根据这次地震的经验，美国工程界认为抗震设计规范有许多可以修改之处。美国建筑设计规范有多种多样，对抗震的要求颇不一致，现在有一种要求统一抗震设计规范的呼声。为此，在美国科学基金组织和国家标准局主持之下，组织了一个修订房屋抗震设计规范的委员会 (Applied Technical Council, 简称 ATC)，有90多名专家参加，分成许多小组进行了一年多工作，已经有个初稿。这个初稿除了对过去的地震区划和抗震强度验算方法有所修改以外，其特点是内容广泛，涉及到非结构部件、机电设备、建筑材料、施工质量以及对现有建筑的评价和加固等方面。但由于美国社会制度的限制，事实上不可能有全国统一的规范，ATC 的规范至多只能作为一种向地震区推荐的文件，是否采用这种所谓全国统一的规范仍需由当地政府决定。

4. 地震工程中的土力学问题

主要的课题是地震作用下的砂土液化问题，从六十年代中开始研究，已经有十年历史，阐明了产生液化的内在原因，掌握了控制液化发生的主要因素，发展了一套预测液化危险性的方法。在现场，根据标准贯入试验的锤击数来判断液化的可能性；在实验室，用循环荷载三轴试验或单剪试验定出液化的应力条件，与现场实际条件对比来预测液化是否可能。近两年来，在已有的基础上进行了比较细致深入的工作，研究了各种循环荷载试验方法与现场实际情况以及它们本身之间的差异，发展了大尺寸试样振动台试验，研究了试样成型方法和应变历史对液化性能的影响、孔隙水压力的扩散消失过程以及不规则的地震应力过程折算为均匀循环应力的方法等问题。

(和砂土液化紧密相联的一个问题是土坝和边坡的抗震稳定性问题。十年以来，美国逐步抛弃了以极限平衡观念为基础的“伪静力法”，过渡到目前的动力分析法。动力分析法的基本概念是用有限单元法分析坝体在静荷和地震作用下的应力状态，通过三轴或单剪试验确定各单元在循环应力下的动力强度，然后对比各单元的应力状态和应力强度来判断坝体的稳定性。近年的工作主要是把这个方法加以完善，至此基础上进一步提出了计算坝体永久变形和指定破裂面上的安全系数作为综合评价坝体稳定性的方法。此外，对圣弗尔南多地震中受破坏的两个冲填土坝作了较详细的调查研究，并检查了加州所有冲填土坝的抗震性能。

地震作用下的土压力问题没有专门的研究但在加筋土挡土墙的研究中涉及到这个问题，通过振动台试验和有限单元分析提出了近似的计算方法。

纵观美国的地震工程科研工作，可资借鉴之处是：(1)从开始就抓了一项基础工作——强震观测，获得了大量记录；可以说，美国地震工程的研究主要是建立在这些记录的基础之上。(2)建立了大型振动台、伪静力试验设备以及其它现代化振动试验设备和自动的记录、分析仪器，使抗震试验工作能够大量进行。(3)发展了有限单元法，结合电子计算技术编制了许多通用计算程序，使理论工作大为便利。(4)在破坏性地震发生之后，对一些严重破坏现象，作了比较深入细致的调查分析工作。但是他们为其社会制度所限，地震工程研究没有统一规划，自由发展，自由竞争，在理论和实践上，近年来都没有重大突破，有点原地踏步的样子。他们的工作也是不平衡的，追踪资本家的投资方向，主要为高、大、精、尖服务；有位教授说，美国抗震工作，对高大建筑做得较好，对一般建筑做得不够，对公用设施做得很差。对地震危险性的估计有单纯概率观点，在结构抗震措施上有盲目浪费材料的情况；抗震设计规范多种，但不能贯彻；至于理论脱离实际的现象就无需待言了。

以上是考察组考察所见的轮廓，下面分几个专题对美国地震工程方面的情况进行介绍。

一、强震观测

(一) 强震台网

美国强震观测工作始于1932年。在以后的30年内,获得了一些强震记录,但在此期间,发展是缓慢的。直到1962年,全国仅设置强震加速度仪70台,地震计100多个,而且仪器无改进,记录的分析方法也比较简单。

随着地震工程研究的不断发展,强震记录的需要愈来愈迫切,研究工作对强震记录的依赖性愈来愈强。可是1964年阿拉斯加地震时,竟没有得到强震记录,受了很深的教训。从此美国就大力加强强震观测工作。近十余年以来,无论是在观测仪器的研制和生产上,台网的规模上,或是记录的处理和分析上,都有了较大的发展。同时,组织机构也有了相应的变动。

过去美国海洋与大气管理局有一个工程地震计划,由该局地震野外调查队(SFS)执行。经美国地质调查局(USGS)、国家科学基金会(NSF)和国家海洋与大气管理局(NOAA)共同协商决定,自1973年5月27日开始,工程地震计划移交给国家科学基金会,并由地质调查局成立执行机构,地震工程研究部(SEB);国家科学基金会负责审定和管理工程地震计划,并提供资金。该计划的主要任务是发展、管理全国强震台网和收集、处理、出版强震资料。地震工程研究部的工作主要是台网的维护和管理、原始强震记录的保存和归档、记录的复制和常规分析以及强震资料的出版等等。

强震加速度仪在数量上的发展是:1964年70台,1970年375台,1972年703台,1974年1200台,1975年1400台。其中85%的台站分布在加利福尼亚州。强震台站的分布见图1.1.1和表1.1.1。使用的仪器,目前绝大部分仍然是光记录三分量加速度仪,包括早期的USCGS型和进入六十年代以后投入使用的AR-240型、RFT-250型、SMA-1型、M0-2型等型号。今后的发展计划是在全国范围内布设强震加速度仪4000台;在地震发生频繁而且比较强烈的地区,拟逐步采用磁带记录仪器以代替旧式仪器。

从地震工程研究的需要出发,在活动断层的两侧布设了较多的仪器。例如,沿圣安德烈斯断层和圣马列克断层,由加州理工学院布设了近90台强震仪。在测点分布上,兼顾自由场地面测点和各类结构上的测点。对于七层以上的楼房,一般在上、中、下部位分别安放一台仪器。考虑到振型对记录的影响,要求仪器避免安放在相应于振型节点的位置,通常仪器布设在结构物高度的25%,40%,70%处。对于那些基础相当长的结构或房屋,除在中部安放仪器外,还在其边缘部分也安放仪器,以期得到相应于扭转的地震反应;对于有剪力墙的结构,在其两侧分别布设了仪器。此外,近年来有的学校还开展了井下强震观测,并着手实验强震观测的遥测技术。

强震观测的经费除了主要由国家科学基金会提供之外,一些联邦机构(例如陆军工程部队和退伍军人组织)和州立机构(例如加州矿产地质部和水利资源部)以及一些私人企业也提供一定的经费。近年来,在某些地震区(如加州)还以法律的形式规定,对于新建的房



图1.1.1 美国强震观测台网分布图

表1.1.1

美国强震加速度仪分布情况 (1975.9.30)

地 区	南加州	北加州	内华达	太平洋西北岸	北部岩石区	西南区
仪器数量	778	419	10	71	29	16
中断使用数量	35	22	1	1	2	3

地 区	密西西比区	东南区	东北区	阿拉斯加区	夏威夷	合 计
仪器数量	41	27	20	37	26	1474
中断使用数量	—	—	—	6	3	73

屋，凡高于十层的，必须设置三台加速度仪，其经费从房屋总投资中按十万分之七抽税支付。

从1933年至1973年，共获得有使用价值的强震加速度记录约500个。每个记录一般都包括三个分量（两个水平，一个竖向），记录到的最大加速度达1.25g（1971.2.9圣弗尔南多地震，Pacoima坝台，南16°西分量）。这500个记录中，有近一半是在1971年2月9日圣弗尔南多地震时得到的。

全部原始记录作为重要的科技资料保存在美国海洋和大气管理局华盛顿分局。

（二）强震观测仪器设备

美国在三十年代已有了USCGS型光记录强震仪，并取得了著名的El Centro地震记录。到了六十年代初期，由于阿拉斯加大地震的发生，促进了强震仪研制工作的迅速发展。

首先是研制了新型的光记录强震加速度仪，如 SMA-1 型加速度仪，是目前美国使用最多的一种型式。为了使获得的记录能够迅速处理，在六十年代末期研制了调频模拟磁带记录强震加速度仪；近来在完善其数据处理设备之后，正在试制数字磁带记录强震加速度仪，以便能将记录直接送到数字计算机中进行处理。

除了研制了三分向的强震加速度仪外，为了观测结构在地震作用下的反应，电流计记录和磁带记录的中心强震加速度仪也相应发展了起来。

在这些强震仪中应用的先进技术有确定地震到达时间的时间编码接收机；为提高测量精度和扩展频带的力平衡式加速度计；为了不使记录由于触发延迟而丢头的延时装置；交流浮充电器和太阳能电池浮充电器；无线遥测中心记录等等。在数据处理设备中，对于胶片记录已有自动化程度较高的激光读数器；对于磁带记录则有专用的处理设备。

分析目前美国在强震观测仪器方面的发展趋势，可以归纳为如下几点：

1. 减少重量和体积，便于野外设台；
2. 降低成本，以便大量设置；
3. 采用先进技术，增加附件，以提高仪器的可靠性、准确性，并减少管理工作；
4. 采用数字技术，加快数据处理速度。

下面就几种典型类别的强震仪器设备作一简要介绍。

1. 光记录强震加速度仪

光记录强震加速度仪在美国是使用得最多的一种。在三十年代已有 USCGS 型强震仪，到了六十年代才有改进的仪器出现。Teledyne-Geotech 公司首先研制成 AR-240型强震加速度仪，以后又进一步改进为 RFT-250型，使仪器的体积重量较老型号为轻小而性能指标较高。Kinemetrics 公司于1969年制成了 SMA-1型强震加速度仪，性能和 RFT-250 型相类似，而体积和重量更小，便于携带。这些加速度仪的性能列于表1.2.1。下面就应用最多的 SMA-1 型的特点作一介绍。

SMA-1 型强震加速度仪如图 1.2.1 所示，它是一种三分向的强震加速度仪。整个仪器装在一个密封的防水铸铝箱中。拾振器部分是三个回转摆型的加速度计，自振频率为 25 周/秒，采用电磁阻尼。在每个加速度计的摆锤上有一小镜片，由白炽灯泡射出的光束射到小镜上再反射到记录纸上进行记录。记录介质有70毫米宽的胶卷和白炽光直接显影纸二种。在小镜片上镀有一层石英膜，起到保护



图1.2.1 SMA-1型强震加速度仪

表1.2.1

美国光记录强震加速度仪

特 性	USCGS	AR-240	RFT-250	SMA-1
加速度计分量	3(x,y,z)	3	3	3
自振周期(秒)	0.043~0.085	0.055~0.065	0.05 (1g) 0.06 (1/2g) 0.08 (1/4g)	0.04 (1g) 0.06 (1/2g) 0.08 (1/4g)
灵敏度(毫米/0.1g)	5.5~19.7	5.0~7.5	1.9, 3.8, 7.6	1.9, 3.8, 7.6
阻 尼	0.60 电磁	0.60 电磁	0.60 电磁 0.01~1.0g	0.60 电磁 0.01~1.0g
动态范围	0.01~1.0g	0.01~1.0g	0.005~0.5g 0.025~0.25g	0.005~0.5g 0.025~0.25g
频率范围(周/秒)			0~20	0~25
记录介质	照 相 纸	照 相 纸	70毫米胶卷	70毫米胶卷
速度(厘米/秒)	1	2	1	1
持续时间	重复5次1 ¹ / ₄ 分	150呎卷纸用完, 最后一次强震后延 长7秒	30分 6~60秒(可调)触发 之后	25分 6~20秒(可调)触发 之后
时 标	2/秒	2/秒±1%	2/秒	2/秒
轨 迹			全部6 3—可变 1—基标 2—时标	全部6—7 3—可变 1—2—基标 2—时标
轨迹宽度(毫米)			0.1	0.1
驱 动	DC 电机	DC 电机	DC 电机(12VDC)	AC 同步电机带固体 多谐振荡器
校正系统			阶跃函数, 所有通道 同时进行, (时标和 阻尼)	阶跃函数, 所有通道 同时进行, (时标和 阻尼)
触发器类型	水平摆(1秒)	水平摆(1秒)	全向、水平或垂直可 选择	垂直电磁 可选水平或全向
灵敏度			可调 正常的0.01g	可调 正常的0.01g
阻 尼	0.80	1.0	0.6	1.5
启动时间	约0.2秒	0.1~0.15秒	≤0.1秒	≤0.1秒
电源供应	12伏 DC 外蓄电 池、交流115伏 小电流充电器	12伏 DC 外蓄电 池、交流115伏 小电流充电器	12伏 DC, 2个6伏 蓄电池	12伏DC, 2个6伏蓄 电池太阳能电池充电 或交流浮充电器
尺寸(H×W×L)	13×20×45吋	14×16×16吋	27×22×50厘米	18×18×38厘米
重 量	135磅	60磅	16公斤带盖	约11公斤带盖
运行温度			-20°~+60°C	0°~+55°C
制造厂		Telcdyne	Teledyne/Geotech	Kinematics

作用, 记录线条细, 使用耐久。

SMA-1型的地震触发器采用垂直向电磁加速度型, 具有1~10周/秒的加速度平坦特性, 用固体电路进行控制, 利用竖向地震波P波进行触发。由于光源使用了电路控制, 使整个启动延迟时间可小到0.05秒。当地震的强度大于触发灵敏度时, 仪器可以连续运转, 当小于触发灵敏度时, 尚可由控制电路延时6~20秒。

仪器内有校正装置,同时可对三向加速度计进行自振频率和阻尼的测量。

在记录纸的一边为每秒二次的相对时标,它由石英振荡器提供,精度达 $\pm 0.1\%$;另一边为绝对时标,装在仪器内部的CS-60B的WWVB接收机,接收美国国家标准局的编码呼号,以给出每次地震的日、时、分和秒的时间。

电源为蓄电池供电,等待状态仅消耗0.15毫安的电流,运行时约为1安培。在有交流市电的地方,附有外部电池浮充电器;当在无市电的地方,则采用太阳能电池浮充电器,可提

表1.2.2

美国磁带记录强震加速度仪

特 性	RMT-280	MTS-200	MTS-100B	SMA-2	SMA-3
加速度计分量	3	3	3	3	3
自振周期(秒)	0.05	0.007	0.007	0.04(1g) 0.06($1/2g$)	0.04(1g)
灵敏度(g)	200C/S频偏 $\pm 1g$	$1/4g, 1/2g, 1g$	$1/4g, 1/2g, 1g$	$1/2g-1g$	$1/2g-1g$
阻 尼	0.60电磁	0.60电磁	0.60电磁	0.65电磁	0.65电磁
动态范围	0.01—1.0g	35db	35db	35db	35db
频率范围(周/秒)		0—40	0—150	0.1—25	0.1—25
记录介质	$1/4$ 吋磁带	FM盒磁带	FM盒磁带	FM盒磁带	FM盒磁带
速度(吋/秒)	$3^{1/4}$	$3^{3/4}$	$3^{3/4}$	$1^{7/8}$	$1^{7/8}$
持续时间	1100呎磁带用完,最后一次强震后延长7秒	30分 6~60秒(可调) 触发之后	30分 6~60秒(可调) 触发之后	30分 6~60秒(可调) 触发之后	30分 6~60秒(可调) 触发之后
时 标	2/秒 $\pm 2\%$	2/秒	2/秒	2/秒	2/秒
轨 迹		4 3—数据 1—时标	4 3—数据 1—时标	4 3—可变 1—时标	4 3—可变 1—时标
记录驱动	DC电机	DC电机	DC电机	6伏DC电机 (带速补偿)	6伏DC电机 (带速补偿)
校正系统		无	无	阶跃函数 所有通道同时 (时标和阻尼)	阶跃函数 所有通道同时 (时标和阻尼)
地震触发器类型	水平倒摆(1秒)	垂直电磁或水 平摆触点	垂直电磁或可 选水平摆触点	垂直电磁或可 选水平、全向	垂直和水平防 水
灵敏度		可调 正常0.01g	可调 正常0.01g	可调 正常0.01g	可调 正常0.01g
阻 尼	可调	0.60	0.60	1.5	1.5
起动时间(秒)	0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	0.05	0.05
电源供应	12伏DC内装 铅蓄电池			24伏DC 4个6伏蓄电 池太阳能充电 或浮充电器	24伏DC 4个6伏蓄电 池浮充电器
尺寸(H×W×L)	9×15×19吋	23×38×48厘米		18×18×38厘米	
重量	42磅	20.4公斤		约11公斤	
回放系统		PMT-100/200 PMT-101/201	PMT-100/200 PMT-101/201	SMP-1	SMP-1
数据获得系统				DDS-1	DDS-1
运行温度		-20°—+60°C	-40°—+80°C	0°—+55°C	0°—+55°C
制造厂	Teledyne	Teledyne/ Geotech	Teledyne/ Geotech	Kinemetrics	Kinemetrics

供12伏电压, 10毫安的充电电流。

2. 磁带记录强震加速度仪

在1967年, Teledyne/Gentech 公司首先制成了 RMT-280 型磁带加速度仪, 随后又进行了改进, 制成了 MTS-200 型盒式磁带调频记录加速度仪, 拾振器改电磁式为力平衡式, 性能指标均比 RMT-280 为好。为了能进行多道记录, 在 MTS-200 型基础上制成了 MTS-100B 型中心磁带记录加速度仪系统, 可记录 18 道信号, 在 1/4 吋磁带上三轨调频记录, 并采用了滤波技术。第四轨为记时标信号。Kinemetrics 公司在 SMA-1 型光记录加速度仪的基础上, 改成了 SMA-2 型磁带记录加速度仪。为了多道记录, 又在 SMA-2 型基础上制成了 SMA-3 型中心磁带记录加速度仪系统。这些磁带记录加速度仪的技术性能列于表 1.2.2。下面就 SMA-2 和 SMA-3 型作一简单介绍。

SMA-2 型示于图 1.2.2,



图 1.2.2 SMA-2 型强震加速度仪



图 1.2.3 SMA-3 型中心磁带记录强震加速度仪

它是将 SMA-1 的光记录部分去掉, 由电磁式加速度计的线圈中取得电信号, 经放大、积分和调频调制后记录于盒式磁带上。磁头为四轨, 其中三轨记录三个加速度计的讯号, 调制中心频率取 1 千周/秒, 调制深度为 $\pm 50\%$; 第四轨记录 1024 周/秒 $\pm 1\%$ 的讯号, 提供精确的时标和将来回放时作带速校正用。系统中只有记录磁头, 不具有抹音和回放电路及磁头。由于替代了光记录, 加速度计可以单独组装, 用电缆线连接作远距离观测。也可以用力平衡式来替代电磁式加速度计, 此时的频率范围可为 0—50 周/秒。电源在等待状态时耗电 1 毫安, 在运行时为 0.5 安培。其余特性均与 SMA-1 型相同。

SMA-3 型中心磁带记录加速度仪系统示

图 1.2.3。由多个 SMA-2 的基本单元组合成, 同时可以记录 9 个三分向的加速度讯号, 表 1.2.2 中列出了使用 EMA 型电磁式加速度计组合的性能, 目前已逐步用 FBA 型力平衡式加速度计组合来替代, 频带扩展为 0—50 周/秒。通常与 SMP-1 型磁带回放系统组装在一起使用。

3. CRA-1型中心记录加速度系统

CRA-1型中心记录加速度系统是一种多效能、多通道的、电流计记录的测量系统, 主要用于典型建筑物远距离的多点测量, 如图 1.2.4 所示, 同时容纳十二个输入通道, 能精确地比较相位、幅值和频率等数据。

每个加速度计和触发器组用长达 1000 呎的屏蔽电缆连到中心记录器 CR-1 上。电流计自振频率为 150 周/秒, 阻尼 0.6, 从加速度计输出来的 ± 2.5 伏满刻度讯号在记录上产生 1.8 厘米的偏转, 电流计内阻为 78.7 千欧, 每二个电流计之间的轨距为 1.1 厘米, 以 1 厘米/秒的速度记录于 7 吋宽的照相胶片上。标准的有一个垂直触发器, 起动时间为 0.1 秒, 在地震波峰值低于触发器的阈值后, 尚延时一可调时间, 标准的为 10 秒。胶片全长为 50 呎, 可记 25 分钟。记录线每边有 2 次/秒的时标讯号, 编码的绝对时间从外部接收机接收 WWVB 编码也记录于胶片上。

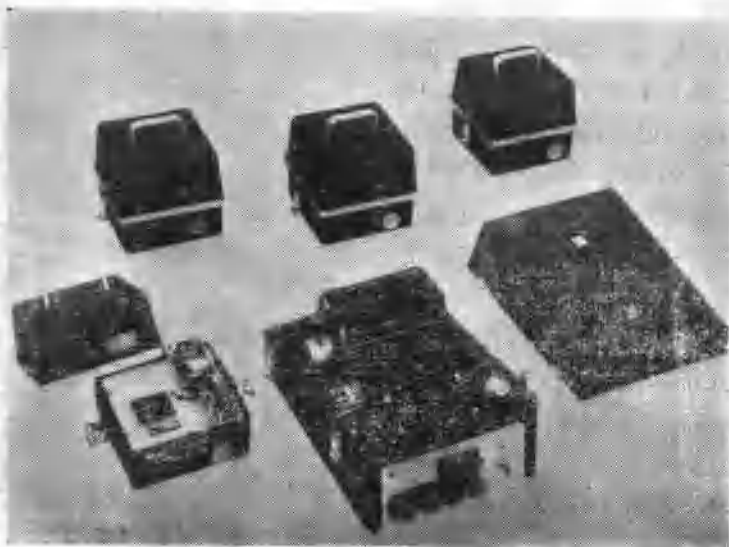


图 1.2.4 CRA-1型中心记录加速度仪系统

为了消除触发延迟带来的地震记录丢头问题, 采用数字时间延迟把讯号延时储存到 5 秒, 储存的讯号为记录器开动前的讯号, 但是目前所使用的 CRA-1 型系统尚未装置这种线路。

加速度计可选用 EMA 型电磁式或 FBA 型力平衡式的。

电源为四组 6 伏蓄电池供应 ± 12 伏, 带有浮充电器。尺寸为宽 13 $\frac{1}{2}$ 吋, 长 17 吋, 高 9 吋, 重量约为 18 公斤。

4. 数字磁带记录强震加速度系统

数字磁带记录加速度系统是将模拟磁带记录中需要的数字化过程直接在记录地震过程中完成, 这样就更加快了数据处理的速度。在美国, 此类仪器正在试制过程中, 下面介绍二种仪器的试制性能和特点, 详细性能见表 1.2.3。

DSA-1 型是 Kinemetrics 公司正在试制的数字磁带记录加速度系统。加速度计采用力平衡式, 记录型式为数字相位编码, 共三个通道, 触发起动时间为 0.1 秒, 在等待状态中耗电为 0.15 毫安, 起动后当地震强度低于触发阈值后 8~20 秒自动复位。可选用数字讯号延时装置, 加上 0.64、1.28、1.92 和 2.56 秒中任一种延时线路, 以解决记录丢头问题, 此时的等待状态耗电为 32 毫安。绝对时间用 CS-60B 接收机来承担。它带有附件 DSP-1 型数字回放单

表1.2.3

数字磁带记录强震加速度系统

性 能	DSA-1	DCA-300
加速度计分量	3	3
自振频率(周/秒)	50	
阻尼	0.7电磁	油
量程范围	1g	1g
频带宽度(周/秒)	0—50	0—50 $\pm 2\text{db}$
记录型式	相位编码	
通道	3	3
输入电压	± 2.5 伏单端	
位数	12 bit	12 bit
动态范围	66 db (0 到峰)	72 db
采样率	250样/秒/通道	100样/秒/通道
带速	3吋/秒	
记录时间	20分	22.5分
记录密度	1066位/吋	位率4000位/秒
误码率	$1/10^6$	精度1/4096
触发器	垂直 电磁	选择一个或多个加速度通道
起动时间	<0.1秒	<0.1秒
运行时间	低于触发值后 8—20秒	低于触发值后 8 或16秒
电源	± 18 伏 DC	直流和交流两用
尺寸(W×L×H) (吋)	10×17×8	$7\frac{1}{2} \times 12\frac{1}{2} \times 8\frac{1}{2}$
重量(磅)	25	25
工作温度	30°—140° F	0°—150° F
制造厂	Kinemetrics	Terra Technology

元, 可提供 DSA-66的直视记录, 以及模拟和数字的电讯号。输出编排成适合于 IBM 计算机要求的数字讯号。

DCA-300型是 Terra Technology 公司研制的数字磁带加速度系统。采用液体阻尼、小惯性质量元件的弯曲弹性悬挂的三向伺服式加速度计, 使用全积分电路的12位逻辑程序记录, 适合于数字计算机信息安排的永久记录记在标准的盒式磁带上。触发起动由加速度计中的任何一个输出担负。为防止丢头, 设有延时线路, 可以予记到触发电平以前的0.7、1.1或1.5秒的地震记录。带有绝对时间讯号输出。可以采用主动和从动连接多台仪器同时工作。

5. 遥测强震观测台网

加州大学洛杉矶分校正在建立无线传输的强震观测台网。观测距离为2公里, 研究不同地点的不同建筑在地震或风振作用下的反应。拾振器采用 FBA-1 型力平衡式加速度计, 设置在不同楼层, 讯号用电缆集中到建筑的最顶层, 用调频法进行调制, 以158mc/s的短波发射出去。

接收机设在校部, 将各建筑上发射来的连续短波讯号接收下来, 解调后送到 DDS-1105型数字数据获得系统, 将模拟讯号转换为数字讯号, 记录在数字磁带上, 供计算机分析用。DDS-1105最大容量能容纳128通道的记录。

记录有二种方式, 一种是研究风振, 即记录部分 DDS-1105系统始终在工作, 增益可以

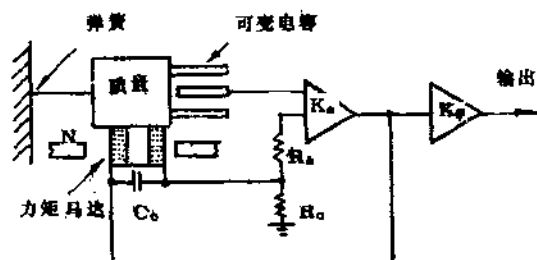
电话操纵变化10倍、100倍,最大可达400倍;另一种在平时 DDS-1105 处在等待状态,当某一通道的加速度讯号超过预设的阈值时,随即打开整机进行记录,记录过程中增益可以自动调节。

预计在一年之后整个系统可以投入使用。

6. 力平衡式加速度计

Kinemetrics 公司产的 FBA 型力平衡式加速度计是随着核电站的强震观测而发展起来的,灵敏度高、稳定度高、坚固且低电流消耗,按单向、双向和三向装配为 FBA-1、FBA-2 和 FBA-3 三种型式;在作井下强震观测时,组装成 FBA-3(DH)型。可装于 SMA-2、SMA-3 或 CRA-1 等系统中,例如,加州大学伯克利分校的井下强震仪——海湾地震仪就是在中心记录加速度系统 CRA-1 型中使用 FBA-3(DH)型的,最深可放到1000呎的井下。

FBA-1型的原理图如图1.2.5所示。可变电容为传感元件,仍是一个弹簧质量系统,输出反馈到作为质量一部分的力矩马达线圈和电容 C_0 的并联部分,反馈环通过电阻 R_0 、 R_1 完成。这种反馈影响到系统的刚度,使原先为13周/秒的自振频率增加到50周/秒。电阻 R_0 控制自振频率, R_1 和 C_0 控制阻尼,一般为0.7。灵敏度由末级放大器的增益 K_2 来控制,使用频带为0~50周/秒(-3db),常规的满刻度量程为 $\pm 1g$ 。



7. PAR-400型峰值加速度记录器

PAR-400型是一种廉价的、不需要电源供应的、记录三个方向的峰值加速度记录器,灵敏度达0.01g,满刻度为2g,频带为0—20周/秒。

PAR-400型包括二个水平向和一个竖向加速度拾振器,每个拾振器有一个放大五倍的机械放大装置,用金刚石笔尖刻痕记录在金属板上,借助光学仪器来读取记录幅值。

拾振器阻尼包括液体和电磁二种,液体阻尼是主要的,电磁阻尼作调节,阻尼线圈还用于测量拾振器的自振频率和阻尼值。

8. 磁带记录的数据处理

SMA-2, SMA-3 型磁带记录加速度系统可以通过 SMP-1 磁带回放系统;也可通过 DDS-1103 或 DDS-1105 型数字数据获得系统直接进行数字化,以输送到电子计算机进行分析。

SMP-1型回放系统反演记录在盒式磁带上三个讯号和一个时标的信息。在自配的纸带记录器上立即可见一个讯号图形和一个时标;另外可同时输出模拟的或调频的电讯号,送到适当的数据处理设备中去。包括有磁带传送装置,一个四规磁头、四个前置放大器和四个脉冲平均解调器(FM鉴频器)。为了使在记录中磁带速度变化的影响还原,具有带速补偿装置。中心频率为1千周/秒,调制百分数为 $\pm 50\%$,精度为 $\pm 2\%$,带有 SMA-2 或 SMA-3时的整机精度为 $\pm 5\%$,动态范围是35db,电源为交直流两用,如图1、2、6所示。

DDS-1103 型数字数据获得系统可以将多通道的模拟数据以数字的形式记录在适合于计算机用的磁带上,示于图1、2、7。有二种使用方法一种是在测试过程中由数字转换系统直接取得数字记录的磁带,另一种是把已经记录的FM模拟讯号磁带变换为数字编码记录在



图1.2.6 SMP-1型磁带回放系统

适用于计算机的磁带上。然后即作为计算机的输入装置。常规的系统是接收 8 个讯号输入，但可以扩展到 128 个通道。使用 12 位二进制模数转换器，有 ± 5 伏的输入范围，分辨率为 2.5 毫伏。最大采样率为 20,000 样/秒，也可低达每 20 秒采一次样，正常的为 1800 样/秒。采样率虽然变化，但扫描率固定为 40,000 周/秒，保证了各通道之间的相位关系。工作时，数据按需要的采样率收集在贮存器中，然后以最快的传送率送到磁带上。当记录时，产生一个字区间隙，此时，另一个同样容量的贮存器工作，防止了信息的丢失。磁带为 9 轨，12.5 吋/秒速度，800 位/吋、7 吋带盘。

DDS-1105 型系统除了和 DDS-113 型性能一样外，还可以等待捕获所需数据，将输入电讯号予先调到一定的阈值上，当讯号超过此值时，系统自动打开，把数据记录在磁带上，经过预设的扫描数目后又自动停止而继续监视。每次地震发生的日、时、分、秒和毫秒可在记录前面加上。另外，为了保留阈值激励前的数据，使用了一个追忆贮存器。

DDS-1103、DDS-1105 可以处理 SMP-1 回放系统输出的讯号；也可直接与强震加速度仪连接进行等待处理。

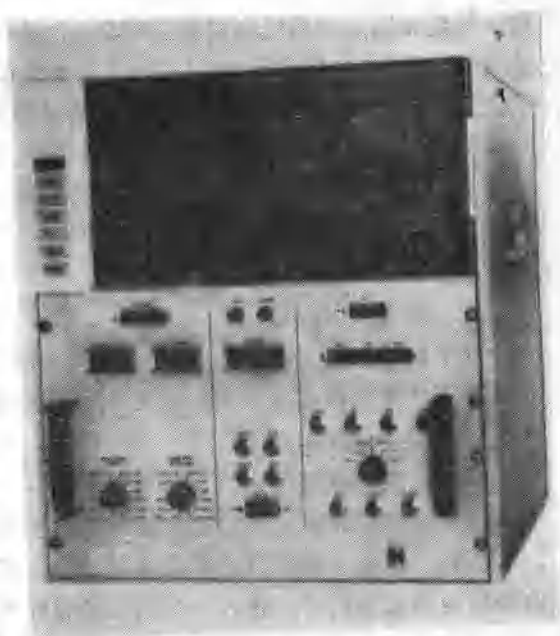


图1.2.7 DDS-1103 数字数据获得系统

(三) 强震加速度记录的常规处理和分析

六十年代以来,美国强震台网逐步扩大,获得的强震加速度记录随之增多,强震记录的应用范围亦日趋广泛。台网中使用的加速度仪有多种型号,其基本物理参数虽然相近,但在机械、电、光以及记录介质、记录范围等方面却有很大的差别。同时,光记录的数字化和常规分析也缺乏标准方法,给使用带来不便。这就需要对已获得的强震记录,用统一的数据处理方法,在同样的精度水平上,进行常规处理和分析。近年来,数字计算机的广泛应用和数字化设备的发展也为此提供了条件。

强震加速记录的标准数据处理计划,从1969年开始,由加州理工学院地震工程实验室 D.E. Hudson, M. D. Trifunac 等人负责进行,现已基本完成。

该计划分为三步进行:(1)模拟记录的数字化,以一定的精度给出数字化数据;(2)引进统一的修正方法。包括采用低通数字滤波以减少数字化杂音,和采用高通数字滤波来修正零线等;(3)编制标准计算程序,并把计算结果用标准形式出版。

加州理工学院地震工程实验室分析了数据处理过程中每一步骤的误差的来源及其对结果的影响,给出了克服或减少这些误差的方法,建立了一整套标准数据处理程序,以及用 Fortran IV 语言编制了每一步的计算程序,这样使分析结果的精度与加速度仪和数字化设备的整体精度相适应。从已获得的大约500个记录中,挑选了57次地震(1933—1971)的381个记录(其中有241个记录是1971.2.9.圣弗尔南多地震的记录),按照标准的处理程序进行了常规分析,成果分为四卷出版,每卷又分若干册。

卷 I、未修正的加速度记录。包括数字化数据和模拟图线;

卷 II、修正后的加速度记录以及计算的地面速度和位移,包括修正后的数据和图线;

卷 III、反应谱。包括五种阻尼(0.2%、5%、10%、20%)位移谱、速度谱、加速度谱、质速度谱、和质加速度谱;

卷 IV、富里叶振幅谱。

计划中拟增加第 V 卷,内容为反应包线谱(Response Envelope Spectra)。

这项工作今后将移交给美国地质调查局地震研究所地震工程研究部负责。

下面介绍几个技术问题。

1. 模拟记录的数字化

加州理工学院地震工程实验室使用的数字化设备是 Benson-Lehner 099D 读数器(见图 1.3.1)。这是一种半自动的数字化设备,用手动的十字丝跟踪记录线条,通过磁头将模拟信号转变为数字信号,存入一个六位的存储器,其数字化结果可以打印输出或直接穿孔输出。其最高分辨率为每英寸计数800(即每厘米计数315)。当记录纸速为1厘米/秒时,相应的时间步长为0.003秒。

美国地质调查局地震工程研究部则把记录数字化工作交给 I/O METRICS 数据处理公司进行。该公司的数字化设备是激光扫描计算机输出系统(Laser Scanning Computer Output),简称为“LASCO”系统,分辨率高达1微米。其工作原理见图1.3.2。激光由10毫瓦的氦氖激光器产生,激光束经过一套光学成形装置和主聚焦透镜,使之形成为很细的并聚焦在透镜光轴上的激光“探头”。偏转扫描镜包括 X 和 Y 两个,其作用是使激光“探头”从一个简单的光点变成一个高速旋转的光点(最高速率可达150转/秒)。用光干涉的办法来确