

强震动记录编目——以汶川余震流动 观测记录为例¹

任叶飞 温瑞智 周宝峰

(中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080)

摘要 相比技术较成熟的测震编目工作, 我国强震动记录编目工作技术亟待完善, 缺乏规范化的编目流程及方便实用的编目软件, 处理数据经验不足。本文以汶川余震流动观测中获取的强震动记录编目为例, 阐述了合理的强震动记录编目方法, 通过对万余条强震动数据处理的结果表明, 该方法提高了强震动记录编目的效率及可靠性。同时本文对强震动记录编目的标准化工作提出了若干建议, 可为今后强震动记录编目工作提供技术参考。

关键词: 汶川余震 流动观测 强震动记录 编目 标准化

引言

地震目录是地球物理观测成果的重要体现, 是进行活动构造、地震预报和工程地震研究的基础资料。自60年代地震监测技术系统建立以来, 我国的地震编目工作在国家大力支持和投入下, 取得了丰硕成果。不仅出版了全国性的历史地震目录、世界地震目录(1900—1980年), 还培养了一大批技术人才, 形成了非常完善的编目技术和丰富的编目经验, 在国际间地震目录数据交换中一直保持着规定的要求和较高的精度(赵荣国, 1988)。另外, 随着数字地震观测技术逐步成熟及台网密度逐步提高, 每年将有数万次地震需要进行编目。同时地震编目软件的开发为这项工作提供了便捷, 在提高了工作效率和准确率的同时, 增强了数据管理、传递和查询能力(丁晗等, 2007; 杨晶琼等, 2006; 黄金刚等, 2001)。在我国测震记录编目技术已非常成熟、工作流程也已很完善。

强震动观测是地震学和地震工程学以及防震减灾工作的重要基础之一。强震动观测数据是评估大震震害, 研究地震动衰减规律, 地震危险性分析, 验证和改进结构抗震分析及设计方法, 确定结构抗震设计标准和抗震措施的数据基础。近20年来, 强震动加速度记录又进一步被广泛应用于地震波的传播规律研究, 探索震源模式和发震机理, 确定震源参数和余震迁移特性, 计算近源地层的速度结构等方面。强震动观测已经成为当今地震学和地震工程学最

1 基金项目 地震行业专项基金(201108003); 国家科技支撑计划课题(2009BAK55B05)

[收稿日期] 2011-08-13

[作者简介] 任叶飞, 男, 生于1983年。博士研究生。主要从事强震动观测技术与数据处理研究。E-mail: renyefei@iem.net.cn

活跃的研究领域之一。相比较而言, 强震动记录编目至今尚未形成一套规范化的编目流程, 也未开发相关系统或软件, 究其原因主要有以下 2 点: ①测震记录编目需要进行震相分析、震级测定、震源定位、资料汇编等工作, 技术要求高、工作繁琐、复杂; 而强震动记录编目工作仅仅是对原始触发文件进行汇总并甄别出地震记录、逐条搜索与各自相对应的地震目录、重新命名记录并将其转换成 ASCII 码格式数据, 最后录入数据库, 技术单一且操作简便, 在数据量小的情况下手工操作即可快速完成。②我国强震动记录要远远少于测震记录, 虽然强震动观测已历经 40 多年的发展, 但至本世纪初也仅仅积累了 2900 余条加速度记录(高光伊等, 2001), 其原因是强震仪超过一定阈值才触发, “十五”中国数字地震观测网络建设之前, 台站数量仅有 405 个(李山有等, 2003)、台网密度非常稀疏, 每次大震获取的强震动记录多则上百条、少则仅几条, 而且大都由震后流动台站获取, 因而编目工作量非常小。

目前我国数字强震动观测台网建设已初具规模, 建成了 1100 余个固定台, 并配备了 200 台备用数字强震动仪, 建立了流动观测基地(李山有等, 2003; 周雍年, 2006)。可以预见, 未来我国强震动记录数量将大幅增加, 在一次特大地震及余震中, 获取万条以上的强震动记录不无可能, 势必需要总结一套规范化的编目流程及开发相关的编目软件。

2008 年 5 月 12 日汶川地震发生后, 余震强震动流动观测顺利开展, 观测任务结束后, 国家强震动台网中心汇总了共计 10000 多个 3 分量的强震动仪触发事件。面对如此大量的数据, 依靠原始手工操作的工作模式显然是不切实际的, 如何运用计算机技术重新制定编目模式以及开发相关程序, 快速而又正确地完成这些记录的编目工作将是本文叙述的重点, 并且以此为例, 根据强震动记录编目特点, 本文提出了对我国强震动记录编目工作进行标准化的若干建议。

1 台站统一编码

汶川 $M_s 8.0$ 级地震发生后, 中国地震局先后投入了 59 套不同型号的地震仪器(温瑞智等, 2009a), 连续观测长达 5 个月之久, 并且根据地震预报和余震发展趋势不断调整流动台的位置, 前后对 92 个场点进行了观测(温瑞智等, 2009b; 李小军, 2009)。图 1 详细地给出了这些流动台站的具体地理位置。为了便于强震动记录的管理, 台站统一按照“LXYYY”的原则编码, 其中“L”为“流动”的汉语拼音首字母; “X”表示台站归属(0 表示国家强震动台网中心; 1、2、3 分别表示西南、西北、东南强震动区域分中心); “YYY”表示台站序号, 由 3 位数字组成。例如: 林家坝加油站流动台, 由国家强震动台网中心设立, 台站序号是 001, 其台站代码编号为 L0001。

2 强震动记录编目

2.1 强震动地震事件删选

由于流动台站属于临时搭建, 场址选择除最大程度满足规范要求外, 还兼顾了交通、电力、安全等因素, 为保证此次汶川强震动流动观测仪器持续运行及数据回收便利, 大部分流动台被安置在加油站、收费站、变电所及政府办公区, 但这不可避免地受车辆、人为活动等因素干扰, 形成了大量的误触发事件。排除这些干扰事件, 甄选出真实地震动事件是一项首要工作。

由于干扰因素众多、仪器记录的波形形态各异、规律多样复杂, 为保证最后结果无差错,

不致对后续工作产生不利影响,技术人员采用逐条记录浏览波形的人为操作模式,最终辨别

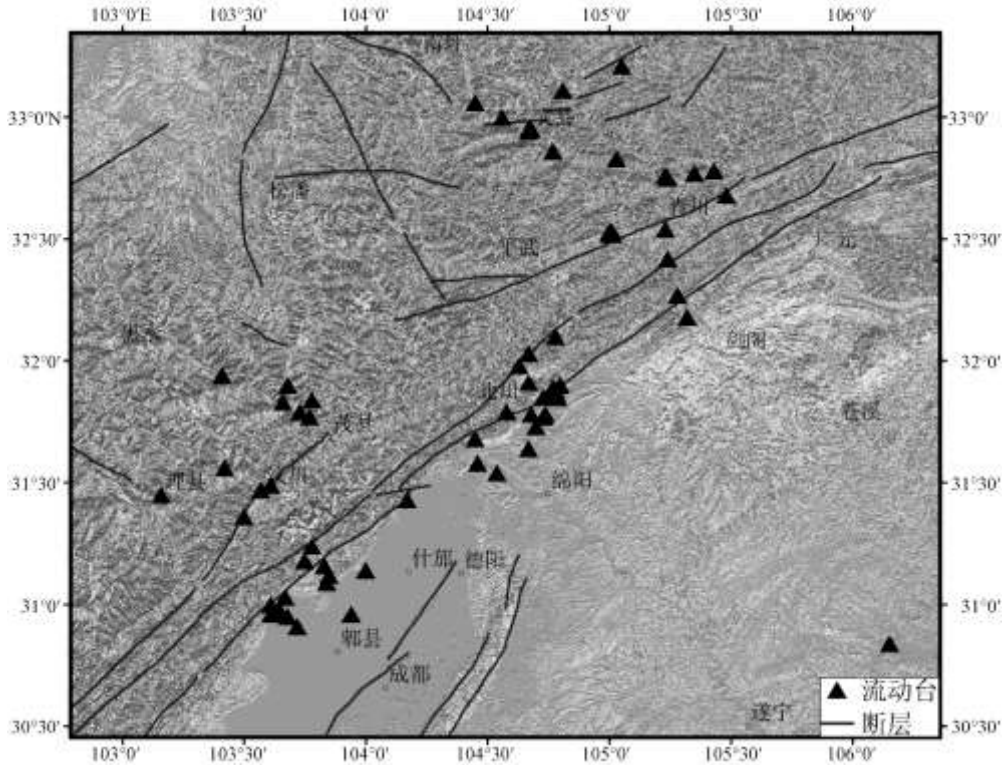


图 1 汶川余震强震动流动观测台站分布

Fig. 1 The distribution of mobile strong-motion stations for Wenchuan aftershocks

出了 3250 个汶川余震强震动地震事件。根据地震动特点,确定删选原则为:①强震动记录波形呈纵波、横波依次排列现象,纵波周期、振幅均小于横波,纵波垂直分量较强而横波水平分量也较强;②强震动记录波形连续、规整且幅值变化均匀,干扰振动波形杂乱无章、幅值变化突然。图 2 给出了典型的强震动记录和干扰振动记录的加速度时程及傅里叶幅值谱。从图中可以看出, L0008 流动台记录的地震振动 P 波、S 波震相清晰且特点明显,波形流畅而变化均匀,较容易识别为地震触发事件,这类强震动记录也最为典型;另一类典型记录如图 2 中 L0013 流动台的地震振动所示, P 波震相无法识别,原因是震中距较远致使 P-S 时差大于强震仪预设的事前记录时间而形成“丢头”现象,这类记录可通过 S 波特点结合以上两点原则进行识别;最为典型的干扰振动如图 2 中 L0008 流动台记录所示,波形杂乱、多处间断不连续且幅值变化突然,较容易识别;当然也有少数干扰振动波形与强震动记录较为近似,不易区别,如图 2 中 L0013 流动台记录所示,波形连续且变化均匀,在无法确切地将其确定为干扰记录时,可根据其傅里叶幅值谱进行判断(如图 2 所示),2 条典型强震动记录的傅氏谱卓越频率段都为 1—10Hz,而干扰振动卓越频率基本上达到 50Hz,两者差别明显,原因是地震振动从震源传至地表受覆盖土层场地效应影响,其傅氏谱体现为场地土层的特性,卓越频率基本上为 0.5—20Hz;干扰振动一般通过地表传播,不受场地效应影响,其傅氏谱体现为干扰本身的特性,并且由于衰减较快而被强震仪记录到的都是高频成份,卓越频率大都大

于 20Hz，因此通过傅里叶幅值谱也可对强震动记录与干扰振动记录进行区别。上述 L0013 流动台记录的干扰振动由此便可确定，实际上其可能为台站附近汽车发动引起的振动（张诚，1986；孙其政，1995）。

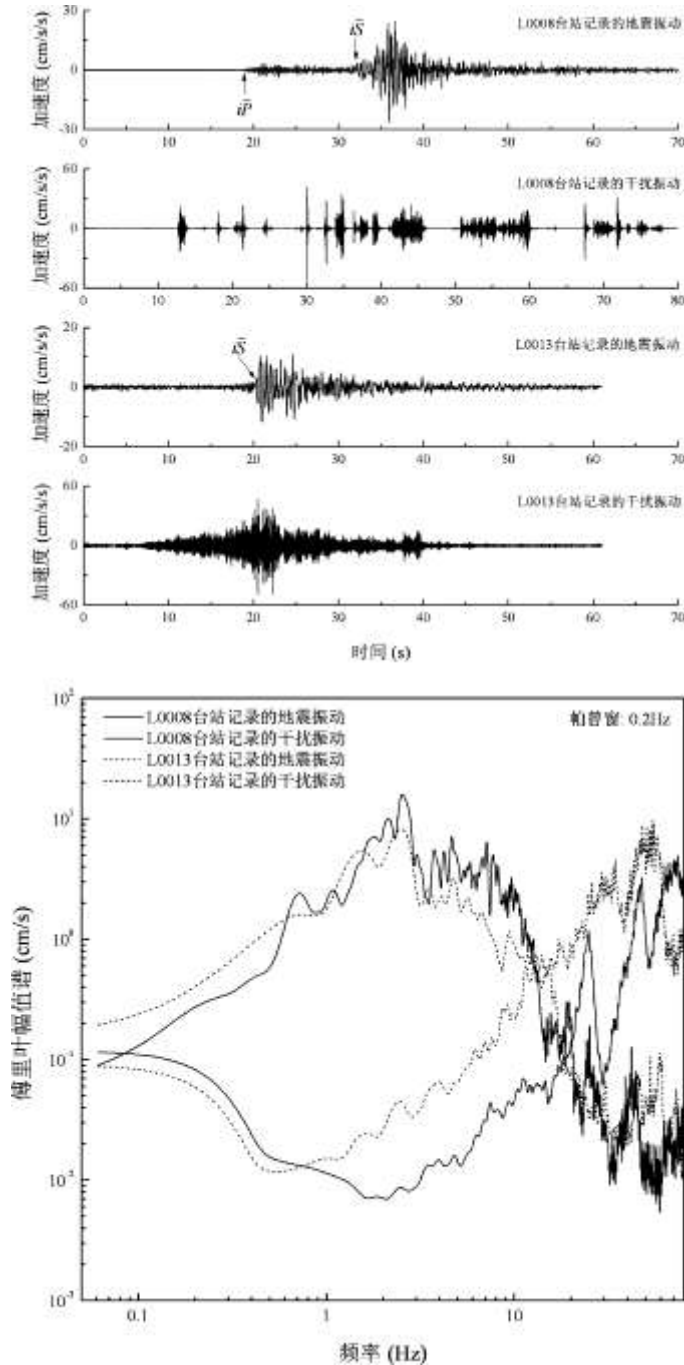


图 2 汶川流动观测中获取的典型强震动记录 and 干扰振动记录以及傅里叶幅值谱
 Fig. 2 Time-histories and FAS of typical disturbance and strong-motion recordings from

Wenchuan mobile observation

2.2 与测震地震目录匹配

在删选强震动地震事件的同时，针对每个已确认的强震动记录，在地震目录中搜索与其相对应的测震地震事件、关联发震时刻、震级大小、震中位置、震源深度等信息，图 3 给出了具体的工作流程。将强震动记录的开始时间输入本文基于 FORTRAN 语言开发的 SEI (Search Earthquake Information) 程序，输出与之时间最近的 8 个测震地震事件以及相应的震中距，通过 P 波到时或 S 波到时判断合理震中距，确定出其中与强震动记录相对应的地震事件，并保存关联信息。

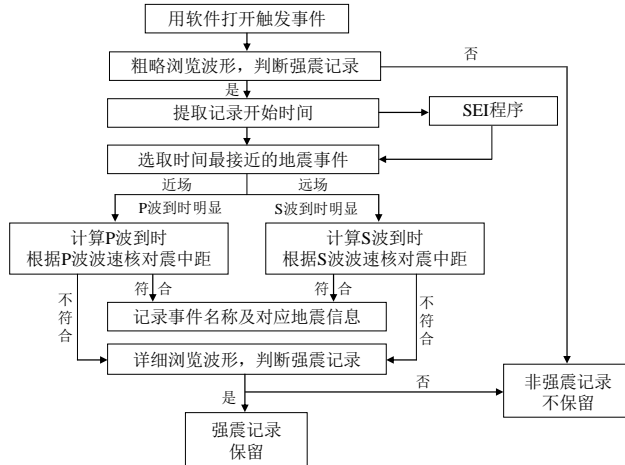


图 3 强震动记录匹配测震地震目录工作流程

Fig. 3 The flow chart of the strong-motion recording catalogues

按照以上流程，采用中国地震台网中心 (CENC) 公布的地震目录，最终确认了 2214 组强震动记录对应此目录中的 600 个地震事件，其中 6.0—6.9 级 3 个；5.0—5.9 级 8 个；4.0—4.9 级 95 个。这些地震的时间分布情况见图 4。需要说明的是震级都统一采用 M_S 值，对未有 M_S 值的采用 M_L 值。

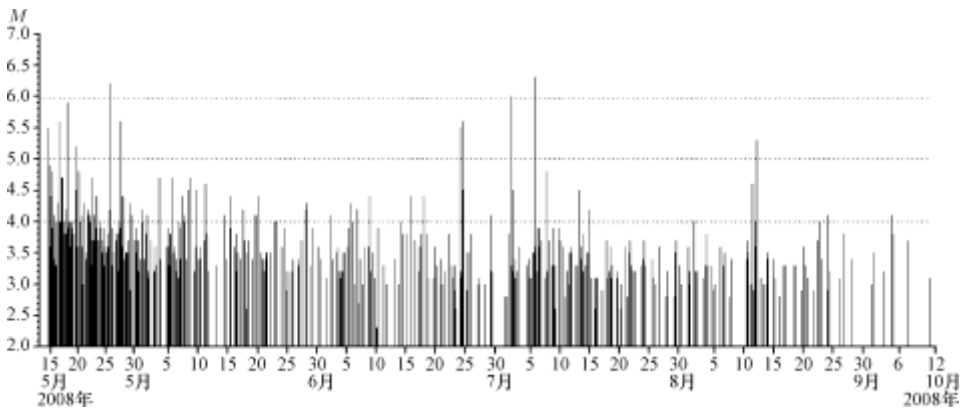


图 4 获取强震动记录的中国地震台网中心公布的汶川余震序列 M-t 图

Fig. 4 Published Wenchuan aftershock sequence with strong-motion recordings

另外, 由于震源深度未知或震级太小等原因, 部分地震目录尚未正式公布。因此, 对其余未能与中国地震台网中心公布的余震目录相对应的强震动记录, 参照未正式公布的地震目录再次搜索对应事件, 最终确认在另外 349 次余震中也获取了 525 组强震动记录, 在这些地震中仅有 1 次震级在 4.0 级以上, 其时间分布情况见图 5。需要说明的是震级 4.0 以上采用 M_S 值, 震级 4.0 以下采用 M_L 值。

因此, 总计共有 2739 组强震动记录有相应的地震事件与之对应。对于上述两个目录都无对应的强震动记录共有 437 组, 剩余的 74 组为由于仪器断电重启后时间自动设为 1980 年, 且无法还原为正确仪器触发时间的强震动记录。

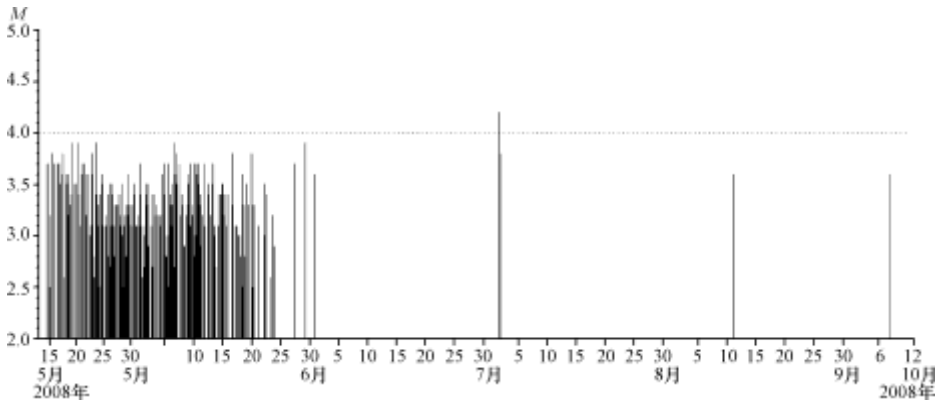
图 5 获取强震动记录的未正式公布的汶川余震序列 $M-t$ 图

Fig. 5 Unpublished Wenchuan aftershock sequence with strong-motion recordings

2.3 记录编号

为便于强震动记录输入数据库之后的管理与查询, 必须对这些记录按照一定的原则统一编号。编号原则为: 地震事件编号+台站代码+仪器通道编号, 共由 19 个字母和数字组成。地震事件编号由 12 个数字组成, 也就是地震发生的年月日时分秒; 台站代码包含 1 个字母和 4 个数字, 前文已有叙述; 仪器通道编号由 2 个数字组成, 即 01 或 02 或 03, 分别表示仪器的 1、2、3 通道。举例说明, 如编号 080525162147L000101 表示台站代码为 L0001 的林家坝加油站流动台仪器第一通道的一条汶川余震强震动记录, 地震发生在 2008 年 5 月 25 日 16 点 21 分 47 秒, 加速度时程如图 6 所示。

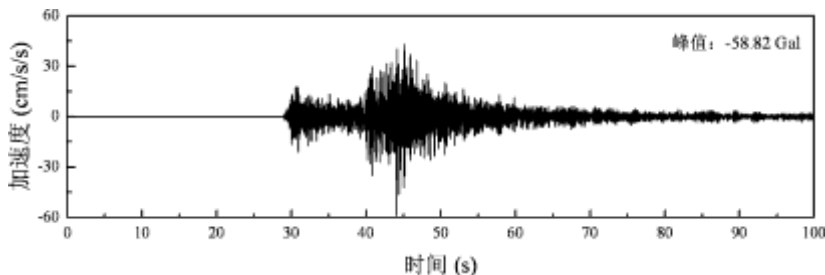


图 6 编号为 080525162147L000101 的强震动记录加速度时程

Fig. 6 Time-history of strong-motion recording No. 080525162147L000101

2.4 数据格式转换

原始强震动记录采用二进制的数据存储格式，只能通过各仪器厂家发布的软件才能进行波形浏览、数据输出、频谱分析等简要操作。为保证如此巨量的强震动记录能够得到广泛运用，必须将其数据转换成 ASCII 码格式。在转换之前，通过减去事前记录平均值的方式进行零线调整。随后将所有记录转换成《中国数字强震动台网技术规程 (JSGC-03)》规定的格式及美国联邦地质调查局 (USGS) 的 smc 格式。后者的特点是记录头段所包含的信息量较丰富，且对于目前世界上比较常用的强震动数据处理软件可直接读取，如 BAP、ViewWave、TSPP 等。本文基于 FORTRAN 语言开发的 Bin2Asc 程序，可以批量转换多种型号仪器获取的强震动记录，包括 ETNA、K2、Geosig、Syscom 以及 GDQJ。同时，计算每条记录的峰值加速度、峰值时刻及震中距，自动生成强震动记录目录，如表 1 所示。

表 1 汶川流动观测强震动记录目录 (节选)

Table 1 Catalogue of strong-motion recordings for Wenchuan mobile observation (partially)

地震编号	台站名称	台站代码	观测条件	震中距 (km)	观测方向	记录编号	加速度峰值 (s)	峰值时刻 (s)	记录长度 (s)
080514095641	理县朴头乡高家庄	L2017	土层地表	67.3	EW	080514095641L201701	20.0	24.9	55.0
					NS	080514095641L201702	24.9	24.8	55.0
					UD	080514095641L201703	17.6	24.7	55.0
080514100754	理县朴头乡高家庄	L2017	土层地表	48.2	EW	080514100754L201701	-13.8	20.1	42.0
					NS	080514100754L201702	15.1	20.0	42.0
					UD	080514100754L201703	-10.7	19.9	42.0
080514105437	理县朴头乡高家庄	L2017	土层地表	47.2	EW	080514105437L201701	-79.9	24.5	58.0
					NS	080514105437L201702	80.4	25.0	58.0
					UD	080514105437L201703	82.0	24.2	58.0
.....

3 强震动记录编目标标准化

针对未来我国可能再次出现类似汶川地震的大量强震动记录情况，并为保障记录的快速处理及后续使用，本文建议对强震动记录编目实行标准化。为此，本文给出了强震动记录编目软件的设计框架 (见图 7)，由输入、处理、输出 3 个模块组成，并且编写了部分模块的核心程序，已运用于上述编目工作中。软件应具备强震动记录与地震事件自动配对、记录重新编号、零线调整、数据格式转换、加速度时程图形输出、强震动记录目录生成等功能。软件运行时首先需要输入地震目录、输入台站信息，读取原始强震动记录；然后计算震中距，根据 P 波或 S 波到时配对地震事件；复制原始记录文件并按一定原则对其进行编号；对记录进行零线调整并转换成《中国数字强震动台网技术规程 (JSGC-03)》规定的格式；最后输出标准格式的强震动记录及其加速度时程，形成强震动记录目录。

另外，软件在设计时应注意以下技术要点：

(1) 输入的地震目录需以中国地震台网中心公布的目录为主，可配合其他目录使用。

(2) 软件设计时, 可编制强震台站信息数据库, 信息包括: 台站的代码、名称、经纬度、场地条件、仪器类型等。软件使用时直接输入台站代码便可自动提取台站信息, 并且该数据库可即时更新。

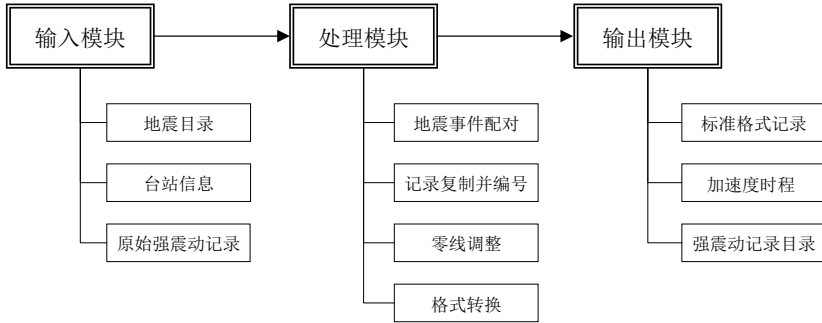


图 7 强震动记录编目软件设计框架

Fig. 7 Software Design-Frame for cataloging strong-motion recordings

(3) 软件需提供批量编目记录或单个编目记录双向选择的功能, 在进行批量编目记录时, 读取的原始强震动记录须由同一台站获取。

(4) 对于与地震事件无法配对的强震动记录, 软件需提供标识功能, 因为这些记录虽无法被编目, 但仍有研究价值, 需保留待用。

(5) 软件除将原始电压或 Count 值转换成我国规范规定的格式外, 还应具备转换成国际上较常用的几种强震动数据格式, 如: USGS 的 *.smc、CGS 的 *.raw、PEER 的 *.at2、K-NET 的 *.ns、*.ew、*.ud 等, 以增加记录的通用性及后续校正、滤波、积分等处理时各种软件的可读性。

(6) 强震动记录目录包括记录编号、地震编号、台站名称、台站代码、震中距、观测条件、观测方向、加速度峰值及峰值时刻, 以便增加强震动记录输入数据库之后的检索形式多样化。

(7) 软件除具备强震动记录的编目功能外, 还应有对指定时间段内或指定数量台站的所有记录进行简要统计的功能, 实现震级、震中距及峰值加速度不同范围内的记录数量计算, 以便了解记录的全局分布情况。

4 结语

在完成了上述强震动记录编目工作的同时, 本文亦收获了几点强震动记录编目经验:

(1) 当震中相近的 2 次地震时间间隔很短, 在几十秒以内时, 在一个强震动触发事件中同时记录到了这 2 次地震引起的地面运动, 编目时需要将其分离。当各自震相 $i\bar{P}$ 及 $i\bar{S}$ 较清晰时, 分离较容易, 而当后震 $i\bar{P}$ 在 2 次地震时间间隔极短情况下很难辨别时, 分离较困难。对于此次编目工作中出现的上述较难分离的记录, 借鉴测震编目经验, 可采用前震信息。

(2) 在强震动记录与测震地震目录配对时, 本文运用了两套地震目录。并且另有 437 组记录未有地震事件与之对应, 本文将这部分记录集中保留, 未来是否可以用来配合测震台网中的速度记录对地震进行定位, 确定与其相对应的地震三要素信息, 还有待下一步深入研究。

(3) 本文在对记录进行编号时未参照《中国数字强震动台网技术规程 (JSGC-03)》的规

定,汶川余震发生密集,甚至1分钟内发生3次地震,按照规程中仅取地震发生的年月日作为代码的一部分,显然会引起记录重复命名。为避免类似现象再次发生,本文建议对上述规程进行修订。

(4)《中国数字强震动台网技术规程(JSGC-03)》规定的数据格式头段未描述记录的开始时间,导致记录无法运用于震源机制和断层破裂过程等地震反演研究,降低了强震动记录的使用价值;而且其未对结构台阵进行说明,尤其是仪器在结构上所处的位置。“十五”期间针对桥梁、大坝、超高层建筑,我国建设了11个结构专用台阵,而且未来越来越多的结构台阵将被布设,这些台阵的强震动记录如若未对仪器位于桥台还是桥墩、坝顶还是坝基、建筑物基础还是楼层间进行说明,势必引起结构分析人员对记录使用的不便,建议对上述缺点进行修订。

汶川地震余震的强震动流动观测获取了大量的加速度记录,为地震工程的相关研究提供了充足的基础数据。为使各领域的研究人员方便使用这些记录,必须对其进行编目,实现记录的可视化、标准化。本文突破常规的强震动记录手工编目模式,运用计算机语言快速、准确地对记录进行删选、与地震事件配对、重新编号及数据格式转换,完成了2739组强震动记录的编目工作,为强震动记录编目技术的发展积累了宝贵经验,也为未来强震动记录编目软件的开发提供了技术参考。

致谢:在前期数据汇总过程中,感谢国家强震动台网中心、甘肃省地震局、云南省地震局、四川省地震局、湖北省地震局的强震动观测人员提供的大力支持和配合,正是他们在地震现场辛勤、艰苦、冒险的工作才获得这批宝贵的数据。中国地震局工程力学研究所的周正华研究员,王玉石、喻焜、史大成博士研究生和陈广涛硕士研究生参与了数据删选、校核工作。在此一并表示衷心的感谢!

参考文献

- 丁晗,张伟,马士振,白永福,2007.北京市地震局数字遥测地震台网的地震编目系统及其产出.地震地磁观测与研究, **28**(6): 42—45.
- 高光伊,于海英,李山有,2001.中国大陆强震观测.世界地震工程, **17**(4): 13—18.
- 黄金刚,贾巍,2001.山西数字遥测地震台网地震编目及数据管理系统.山西地震, **107**(4): 5—10.
- 李山有,刘启方,金星,孔戈,2003.中国强震动观测展望.地震工程与工程振动, **23**(2): 1—7.
- 李小军主编,2009.汶川8.0级地震余震流动台站观测未校正加速度记录.北京:地震出版社.
- 孙其政主编,1995.地震观测技术.北京:地震出版社.
- 温瑞智,周正华,李小军等,2009a.汶川 M_s 8.0地震的强余震流动观测.地震学报, **31**(2): 219—225.
- 温瑞智,周正华,任叶飞,李小军,2009b.汶川强余震流动观测与典型余震记录分析.地震工程与工程振动, **29**(5): 13—19.
- 杨晶琼,颜其中,王兰兰,2006.云南数字化地震编目.地震地磁观测与研究, **27**(1): 99—101.
- 张诚,1986.地震分析基础.北京:地震出版社.
- 赵荣国,1988.世界地震编目工作现状.内陆地震, **2**(1): 85—101.
- 周雍年,2006.中国大陆的强震动观测.国际地震动态, **335**(11): 1—6.

Cataloging Strong-Motion Recordings——An Example of Wenchuan Mobile Strong-Motion Observation

Ren Yefei, Wen Ruizhi and Zhou Baofeng

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract Compared with well-developed seismological catalogue technology, cataloging strong-motion recordings is insufficient in experience, and lack of practical workflow and standardized software. In this paper, taking strong-motion recordings obtained from Wenchuan mobile observation as an example, we propose a cataloging method in order to improved the efficiency and the reliability in data processing. Some suggestions and technical guidelines on developing the standardization of cataloging strong-motion recordings are also given in the paper. This will be helpful for cataloging more strong-motion recordings and providing the technical supports in future.

Key words: Wenchuan aftershocks; Mobile observation; Strong-motion recordings; Cataloging; standardization