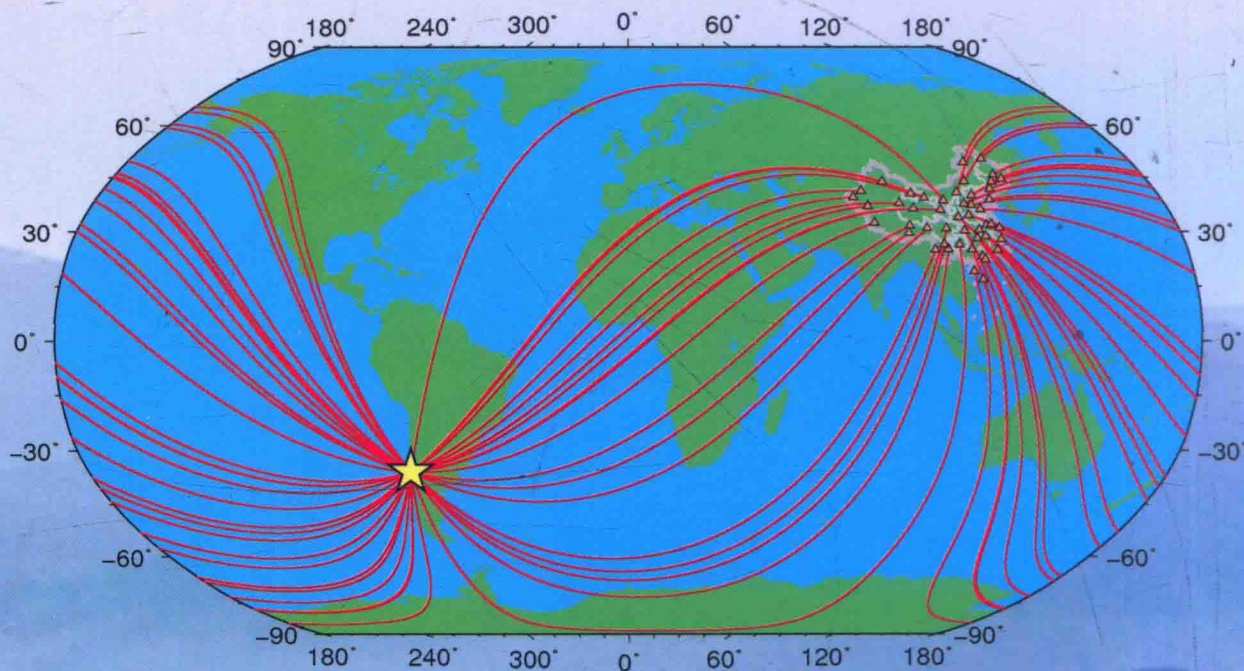


震级的测定

刘瑞丰 陈运泰 任 泉 徐志国 王晓欣 邹立晔 张立文 著



地震出版社

震级的测定

刘瑞丰 陈运泰 任 泉 徐志国 著
王晓欣 邹立晔 张立文



地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

震级的测定 / 刘瑞丰等著. —北京: 地震出版社,
2015. 1

ISBN 978-7-5028-4496-7

I. ①震… II. ①刘… III. ①震级—测定
IV. ①P315.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 271927 号

地震版 XM3343

震级的测定

刘瑞丰 陈运泰 任 泉
徐志国 王晓欣 邹立晔 张立文 著
责任编辑: 刘晶海
责任校对: 庞亚萍

出版发行: 地震出版社

北京市海淀区民族大学南路9号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68455221

专业图书事业部: 68467982 68721991

<http://www.dzpress.com.cn>

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

版 (印) 次: 2015 年 1 月第一版 2015 年 1 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 190 千字

印张: 10

印数: 0001 ~ 3000

书号: ISBN 978 - 7 - 5028 - 4496 - 7/P (5187)

定价: 55.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

为了能够使用地震仪器定量地测定地震本身的大小,1935年里克特(C. F. Richter)在研究美国南加州的地震时提出了第一个震级标度—地方性震级标度,1945年古登堡(B. Gutenberg)提出了面波震级标度和体波震级标度,1977年金森博雄(H. Kanamori)提出了矩震级标度。经过几十年的发展,震级得到了世界各国的普遍使用。2000年以后,世界各国地震台站逐步完成了数字化改造,人类的地震观测进入了数字时代。然而地方性震级、面波震级与体波震级的测定方法和计算公式与地震仪器的特性密切相关,数字地震仪器具有频带宽、动态范围大的特点,其仪器特性已完全不同于传统的模拟地震仪器,因此震级的测定遇到了新的问题。这些问题引起了国际地震学与地球内部物理学协会(International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, IASPEI)的高度重视,IASPEI于2001年成立了震级测定工作组(Working Group on Magnitude Measurements),研究基于宽频带数字地震资料测定震级的方法。

本书的主要作者紧密结合IASPEI震级工作组的工作,根据宽频带数字地震资料的特点,开展了震级测定方法研究,使中国的震级测定工作能够在IASPEI震级测定工作中发挥作用。我们对地方性震级、面波震级、体波震级与矩震级的定义、测定方法和发展演变过程进行了详细的研究,开展了中国地震台网不同震级之间的关系、中国地震台网与美国地震台网震级之间的关系研究,将IASPEI提出的新震级首次在中国地震台网中心应用,在此基础上提出了构建我国震级标度体系的基本框架。

在震级测定方法的研究工作中和本书的编写工作中,始终得到了鲍曼

(P. Bormann)教授的大力支持和帮助,作者首先向鲍曼教授表示衷心的感谢!

利用宽频带数字地震资料开展震级测定的研究工作得到了中国地震局监测预报司和测震学科技术协调组的大力支持;在震级测定方法方面许绍燮院士给了很多的指导和帮助;吴忠良、陈章立、王飞、黄媛、杨建思、张东宁、赵仲和、郑斯华、薛峰、庄灿涛、吴建平、刘杰、郑秀芬、赵翠萍、高景春、杨大克、薛兵、黄志斌、何少林、李丽、王宝善、蒋长胜、李山有、朱元清、陈九辉等专家对震级测定方法和发布规则提出了许多宝贵的意见;赵仲和、薛峰和郑秀芬等专家对本书的文字进行了修改;杨辉、任克新、黄瑾、邱海江、孙丽、李海清、王九洋、侯建民、郭祥云、梁建宏、韩雪君、陈宏峰、王丽艳、王科英、丁秋琴、刘敬光、王兴梅等科技人员参与了部分数据的分析处理工作。在此作者一并表示衷心的感谢!

作者

2014年10月

目录

MULU

第一章 地震的震级	1
第一节 震级的测定	1
第二节 地震能量	10
第三节 地震烈度	12
第二章 近震震级	14
第一节 里克特震级	14
第二节 我国近震震级的测定	18
第三节 小 结	21
第三章 面波震级	24
第一节 古登堡震级	24
第二节 IASPEI 推荐的面波震级	25
第三节 我国的面波震级测定	29
第四节 单台面波震级测定	34
第五节 小 结	39
第四章 体波震级	41
第一节 测定方法	42
第二节 小 结	48
第五章 矩震级和其他震级标度	50
第一节 震级的主要特点	50
第二节 震级饱和	51

第三节 矩震级	54
第四节 其他震级标度	58
第五节 小 结	62
第六章 不同震级标度之间的关系	64
第一节 中国地震台网不同震级标度之间的对比	65
第二节 中国地震台网与美国地震台网测定震级对比	71
第三节 小 结	75
第七章 地震参数的测定与修订	77
第一节 地震参数测定	78
第二节 地震参数修订	111
第三节 小 结	113
第八章 IASPEI 新震级标度及其应用	115
第一节 IASPEI 新震级标度的建立	115
第二节 IASPEI 新震级标度	117
第三节 IASPEI 新震级标度的应用	120
第四节 小 结	137
第九章 我国震级标度体系的构建	138
第一节 测定方法	140
第二节 震级发布	142
后 记	144
附录 彼得·鲍曼对中国同事的祝愿 (英文、中文)	145
参考文献	151



第一章

地震的震级



地震发生后，人们首先关注的问题之一是这次地震有多大？

震级是表示地震本身大小的一个量，是地震的基本参数之一。根据震级可以近似地得到其它震源参数，如地震能量、地震矩、震源破裂时间、断层长度、断层面积等；对于浅源地震，震级越大，地震所造成的灾害越严重，所以震级是地震应急、地震救援与灾害损失评估的重要参数。因此，无论是从科学研究的角度，还是从社会需求的角度，准确测定出地震的大小都是一件意义重大的基础性工作。

震级是由日本的和达清夫（Kiyoo Wadati, 1902 ~ 1995）与美国的里克特（Charles F. Richter, 1900 ~ 1985）在 20 世纪 30 年代提出和发展起来的（Stein and Wysession, 2003），其测定方法比较简单，通过测量地震波中某个震相的振幅与周期就可以计算出地震的震级，并且通俗易懂，贴近公众。在以后的几十年里震级在世界各国得到了普遍的应用，从测定震级（Richter, 1935）到 1966 年第一次测定地震矩（Aki, 1966），其间经过了 30 余年（陈运泰，2004）。

第一节 震级的测定

自古以来，人类就对地震这种自然现象进行观察和测量，试图对地震的大小进行描述和测定。震级测定是地震学的研究课题之一，地震学的定量研究就是从地震定位和震级测定开始的。

一、全球震级测定概述

19 世纪以前，世界各国对地震的研究主要以宏观观测和定性研究为主。从事历史

地震研究的人员一般都是根据历史文献、地方志等资料,或经过现场考察的方法来确定历史地震的大小。地球在整个地质时期都经受过地震,有关地震的文字记载可追溯到过去的几千年。在古代,地震被认为是上帝或其他某种超自然的力量对人类某种不端行为而施加的一种惩戒。米尔恩(John Milne, 1850 ~ 1913)曾总结过各种神话般的地震成因说,如地震是由于大鲛鱼翻身(日本);青蛙(蒙古)、公猪(印尼)、乌龟(美洲印第安人)的扭动所造成的地面运动,从而给人类造成了灾害(Benjamin, 1990)。

地中海及其周边国家的地震活动性很高,对地震作出自然解释的首次尝试发生在该地区。早在公元前580年,古希腊的萨勒斯对磁性的研究很有名,他的故乡在米勒特岛,在那里,海洋的破坏力给他留下了深刻的印象,他相信地球是漂在海洋上的,是水的运动产生了地震。相反,大约在公元前526年逝世的安乃克西门内斯(Anaximenes, 公元前约585 ~ 约526年)认为地球的岩石是造成震动的原因,当岩石在地球内部落下时,它们将碰撞其他岩石产生震动。公元前428年安那克隆拉斯(Anaxagoras, 公元前500 ~ 428年)认为火至少是一些地震产生的部分原因。然而,在这些大胆的解释中却没有一个是地震发生的真正成因。

公元前340年,亚里士多德(Aristotle, 公元前384 ~ 322年)对地震的成因发起了讨论,其论著的重要性在于他不是从宗教或占星术中寻找解释,而是从地震造成的自然现象中寻找地震的成因。他认为地下洞穴将像暴风雨云造成闪电一样产生火焰,这股火焰将快速上升,如遇到阻碍将强烈爆发穿过岩石,引起震动和响声。后来他认识到地震与某些火山喷发有关,因为火山喷发常有大量的气体猛烈喷出。另一种看法则认为,火山喷发后由于洞穴的顶部坍塌产生了地震,笛卡尔(R. Descartes, 1596 ~ 1650)认为是地下气体的爆炸引起了地震。到了17世纪初,已经发表了有关地震效应的描述和记录,当时已能认识到地面位移是地震的一种效应,但还没能与震源的震动联系在一起。1737年富兰克林(B. Franklin)对地面的长裂缝和峡谷形成曾作过描述,认为这些地质现象可能与地震有关。1755年,人们还一直认为地下风和地下爆炸是产生地震的原因,温斯罗普(J. Winthrop, 1706 ~ 1790)在讨论当年英格兰地震时曾这样描述,因水射到热岩上或由地下火焰产生的蒸汽膨胀而产生了地震(Benjamin, 1990)。

18世纪中期,在牛顿力学影响下研究人员开始发表研究报告,这些研究报告很重视地震的地质效应及地震破坏情况,包括山崩、地面运动、海平面变化和建筑物破坏。1750年英国伦敦明显感觉到几次地震,因而被文人们称为“地震之年”。当年2月8日,伦敦人明显感觉到窗户作响,有些人家里的家具被抛到了大街上;3月6日,又有一次强烈的地震发生,使烟囱掉下,建筑物倒塌,教堂钟摇晃。哈尔斯(Hales)以自述的方式描述了这次地震:“我在伦敦的楼房一层被惊醒,很敏感地觉得床在起伏,地面必然也在起伏。在房子里有含糊的突发噪声,最终空气里传来像小炮一样的大爆

炸声，从地震开始到结束有三四秒的时间”。

1755年11月1日里斯本大地震袭击了伊比利亚半岛，葡萄牙和西班牙震感强烈，该地震引发海啸，造成6万多人死亡。幸存者对这次大地震有以下描述：“首先城市强烈震颤，高高的房顶像麦浪在微风中波动。接着是较强的晃动，许多大建筑物的门面像瀑布一样落到街道上”。然后，海水几次冲向塔古斯河并涌向城里，淹死毫无准备的百姓，淹没了城市的低洼部分。随后教堂和私人住宅起火，许多起分散的火灾逐渐汇成一场特大火灾，肆虐3天，摧毁了里斯本的城市。这次地震对地震科学研究起到了关键性的作用，英国工程师米歇尔（John Michell, 1724 ~ 1793）根据该地震的观测资料，于1760年试图用牛顿力学原理讨论地面震动，他相信“地震是地表以下几英里深处岩石移动引起的波动”，他的一个重要结论是：“地震波的速度能用地震波到达两点之间的时间来实际测量，他用实际资料计算出里斯本地震的波速约为 5.0km/s ”，现在看来米歇尔得到的结果未必准确，但他首次作出这类计算对人类定量分析研究地震的贡献不可磨灭。后来，地震学家根据当时的历史记载，确定该地震的震级为8.5级。

直到19世纪人们才注意到岩石断裂的重要意义，并积累了地表断层的观测资料，1819年6月16日印度库齐丛林沼泽地的一次地震形成了一个高3~6m的山崖，即安拉朋德构造，后来地震学家根据历史记载，确定该地震的震级为8.3级。1857年1月9日美国加利福尼亚州蒂洪堡地震产生了一条长达110km的断层，该地震的震级后来被定为8.3级；1891年10月27日的日本美浓-尾张地震的断层长度为110km，垂直位移为6m，该地震的震级后来被定为8.4级。在此期间，希腊人已经注意到软地基上的建筑物比硬地基上的破坏厉害，并开始定期保存公布的地震事件，1840年冯霍夫（Von Hoff）通过收集全球地震文献记载和相关资料，首次发表了全球地震目录（Bolt, 2000）。

1840年以后，一些国家开始建立专门的地震机构，通过文献资料记载，整理地震目录，并通过地质构造填图、化石分类和矿物分析去研究地球，在这方面作出重要贡献的主要有印度地质调查所（Geological Survey of India, GSI）和美国地质调查局（United States Geological Survey, USGS）。印度地质调查所成立于1857年，1899年该所所长奥尔德姆（T. Oldham）发表的一份描述1897年6月12日印度东北部阿萨姆地震的报告，这是人类有史以来记载最详细的一份地震报告。阿萨姆地震在450万平方千米的地区都有感，在2.3万平方千米区域内几乎是毁灭性的破坏，由于该地区人口密度较小，死亡人数不到1000人。地震的震动时间持续不到1分钟，沙质土壤表现的像流体一样，在地表几乎没有断层破裂出现，地震使地面变得像耕犁过似的，草皮被撕破，泥块被抛向不同的方向。建于地面上的房屋下沉，只剩下房顶还依稀可见。地震把32km以内的树木一扫而光，松散沉积物形成的地面突然倾斜产生了许多大裂缝，

最大的垂直位错达 10m, 其东侧相对西侧上升, 该地震的震级被确定为 8.7 级。GSI 是印度最大的地质调查研究机构, 其主要工作涉及到三个方面, 即资源调查、环境和地球系统研究及地学信息的传播。

美国地质调查局 (USGS) 成立于 1879 年, USGS 成立之初只有 38 人, 当时所开展的一项重要工作就是整理 1811 ~ 1812 年发生的沿密西西比河的 1870 次地震目录, 并整理了 3 次地震的调查报告。1811 年 12 月 16 日一系列地震发生在南密苏里州南部的新马德里地区, 持续 1 年多的时间, 第一次大地震发生在 1811 年 12 月 16 日, 第二次在 1812 年 1 月 23 日, 而最强烈的地震发生在 1812 年 2 月 7 日。地震波的幅度高达许多英尺, 冲破地表, 留下平行的裂缝, 砂从地缝中喷出, 地面形成裂缝和喷砂口。水蒸汽和尘埃充满空气, 使得天昏地暗。地震的一个显著特征是形成“沉陷地”, 一个长约 240km、宽 60km 的地区下沉 1 ~ 3m, 密西西比河水冲进沉陷地区, 形成新的湖泊、沼泽和支流。田纳西的里尔富特湖就是这时形成的, 该湖长 12km, 宽 3km, 至今仍然存在 (Bolt, 2000)。100 多年来 USGS 的工作领域逐步拓宽, 其中两次较大变化是: 1900 年开始从事国际地质工作, 工作领域从国内拓展到国外; 1960 年开始月球地质工作, 工作领域从地球拓展到月球。

从 1875 年意大利科学家切基 (F. Cecchi) 发明第一台近代地震仪器以后, 才逐步为震级的定量测定创造了条件。当时切基发明的地震仪器放大倍数只有 3 倍, 只能记录强震。1900 年以后随着近代地震仪器的发展, 才陆续有一些地震仪器记录, 地震学家才开始研究实际的地面运动。1898 年德国地球物理学家维歇尔 (E. Wiechert) 将阻尼引入地震仪器, 从而可以记录宽频地震信号。维歇尔地震仪摆的质量很大, 我国南京地震台至今还保留 1 台维歇尔地震仪, 摆的质量为 17t, 该仪器是在 1930 年底从德国哥廷根订购, 1932 年 7 月 2 日正式记录至今, 已有 80 余载。该仪器是目前世界上仅存的三台该型号仪器之一。1906 年俄国地球物理学家伽利津 (B. Galitzin) 成功地研制了第一台电磁式光记录地震仪, 得到了很高的灵敏度, 使仪器的检测能力得到了很大的提高。

1922 年美国地震学家伍德 (H. O. Wood) 和安德森 (J. M. Anderson) 设计了伍德-安德森 (Wood-Anderson) 短周期地震仪器, 美国在南加州建立了由 12 个地震台组成的区域地震台网, 配置伍德-安德森短周期地震仪器, 到 1935 年已经记录了几百个地震, 地震的大小变化范围很大, 从几乎是无感地震直至大地震。1935 年, 里克特在研究这几百个地震时引入了地方性震级标度 M_L , 尽管测定方法比较简单, 更重要的是为以后的发展提供了一个基础。虽然地方性震级 M_L 很有用, 但受到所采用的地震仪器类型及所适用的震中距范围的限制, 无法用它来测定全球范围远震的震级。

1945 年, 古登堡 (B. Gutenberg, 1889 ~ 1960) 将测定地方性震级 M_L 的方法推广

到远震。在浅源远震的记录图上,面波的振幅最大;对于震中距 $\Delta > 2000\text{km}$ 的地震,面波水平振幅最大值的周期一般为 20s 左右;周期在 20s 左右的面波相应于面波波列的频散曲线上的艾里 (Airy) 震相,古登堡提出了面波震级标度 (Gutenberg, 1945a)。而对于深源地震,面波不发育,但在远震距离上, P 波具有清晰的震相,所以古登堡和里克特 (Gutenberg, 1945b, c; Gutenberg and Richter, 1942, 1944, 1956a, b) 采用体波 P 、 PP 、 S 来确定震级,称为体波震级。

震级标度基于两个基本假设 (Richter, 1958; 傅承义等, 1985)。第一个假设是,已知震源与观测点,两个大小不同的地震,平均而言,较大的地震引起的地面震动的振幅也较大。第二个假设是,从统计结果看,从震源至观测点的地震波的几何扩散和衰减是已知的,因此可以据此预知在观测点的地面震动的振幅。根据这两个基本假设,可以定义所有震级标度的一般形式为:

$$M = \lg \left(\frac{A}{T} \right) + \sigma(\Delta, h) + C_s + C_r \quad (1.1)$$

式中, M 是震级,可以是地方性震级,也可以是面波震级或体波震级; A 是用于测定震级震相的地动振幅; T 是其周期; $\sigma(\Delta, h)$ 称为量规函数,是用于对振幅随震中距 Δ 和震源深度 h 的变化作校正的因子; C_s 是台基校正因子,与地壳结构、近地表的岩石的性质、土壤的疏松程度、地形等因素引起的放大效应有关,与方位无关; C_r 是震源校正因子,亦称为区域性震源校正因子,是对震源区所在处的岩性不同所引起的差异作校正的因子。在地震台网的日常工作中,一般都没有测定台基校正因子 C_s 和震源校正因子 C_r 。对振幅取对数是考虑到地震所产生的地震波的振幅变化范围很大,取对数之后便得到一个数量级为 1 的无量纲的数表示震级,相当方便。此外,为了克服因为震源辐射地震波的辐射图型、破裂扩展的方向性以及异常的传播路径效应造成的偏差,在地震台网的实际工作中通常使用覆盖面尽量大的多台测定结果作平均。

在式 (1.1) 中,量规函数 $\sigma(\Delta, h)$ 的物理意义是补偿振幅随距离和深度变化的衰减,并没有考虑到它与频率的关系,这实际上是一个严重的疏忽。杜达 (S. J. Duda) 和雅诺夫斯卡亚 (T. B. Janovskaya) 在理论上已经证明:当 $T < 1\text{s}$ 时, P 波的量规函数 $\sigma(\Delta, T)$ 的差异会使震级偏高 0.6 级;然而,当 $T > 4\text{s}$ 时,震级会偏小 0.3 级,使得在中长周期范围内确定的震级会产生偏差 (Duda and Janovskaya, 1993)。

20 世纪 60 年代后期,地震学家在研究全球地震年频度与面波震级 M_s 的关系时发现,缺失了一些 M_s 超过 8.6 级的地震。1977 年美国加州理工学院的地震学家金森博雄 (H. Kanamori) 提出了矩震级标度 M_w (Kanamori, 1977),矩震级实质上就是用地震矩来描述地震的大小。矩震级是一个描述地震绝对大小的力学量,它是目前量度地震大小最理想的物理量。与传统上使用的震级标度相比,矩震级具有明显的优点:它

是一个绝对的力学标度,不存在饱和问题。无论是对大震还是小震、微震甚至极微震,无论是对浅震还是深震,均可测量地震矩,从而计算矩震级;并能与已熟悉的震级标度如面波震级 M_s 衔接起来;它是一个均匀的震级标度,适于震级范围很宽的统计。由于矩震级具有以上优点,所以国际地震学界推荐它为优先使用的震级标度(陈运泰, 2004)。

1964 年以后,美国开始在全球逐步建立世界标准地震台网(World Wide Standard Seismic Network, WWSSN),每个台站都配置相同的三分向短周期仪器(Short Period, SP)和长周期仪器(Long Period, LP)。由于它覆盖的地域广阔,地震仪的一致性,美国地质调查局国家地震信息中心(National Earthquake Information Center, NEIC)利用 WWSSN 的观测资料所测定震级的准确性和权威性很高。另外,在联合国教科文组织(United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO)的主持下,1964 年在英国成立了国际地震中心(International Seismological Centre, ISC)。ISC 是第一个收集全世界范围地震观测资料的组织,在所使用的地震资料中,WWSSN 的资料占有很大的比重。从此以后,NEIC 和 ISC 测定的震级得到了各国地震学家的普遍采用。

由于各国所使用的地震仪器各不相同,多年来地方性震级、面波震级和体波震级的测定方法在不断改进,在演变过程中,各国震级测定情况差别很大。对于 6.0 级以上的地震,几乎全球所有的地震台站都可以记录到并能测定其震级,所以震级标度统一的问题已经引起了各国地震学家的高度重视。1967 年,在苏黎世举行的国际地震学和地球内部物理学协会(International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, IASPEI)大会上,IASPEI 组委会向全世界推荐了体波震级和面波震级的测定公式,后来许多国家和国际上的地震机构都采用了 IASPEI 所推荐的公式,结果使各国测定的震级比较一致。1979 年 9 月,苏格兰爱丁堡地质科学研究所威尔莫(P. L. Willmore)编写了《地震观测实践手册》(Manual of Seismological Observatory Practice),详细介绍了台站建设、资料分析处理和震级计算的方法(Willmore, 1979)。由于多方面的原因,我国一直按传统的方法测定面波震级 M_s ,我国测定的面波 M_s 震级比国际地震机构测定的面波震级系统地偏高 0.2 级(刘瑞丰等, 2007)。

随着电子技术和地震观测技术的发展,20 世纪 70 年代数字地震仪器研制成功,1975 年德国开始建设格拉芬堡(Gräfenberg)数字地震台阵,这是全球第一个宽频带数字地震台阵,开启了地震台网建设和发展的新飞跃。1981 年法国开始实施地球透镜(GeoScope)计划;1984 年美国 57 所大学联合成立了美国地震学研究联合会(Incorporated Research Institutions for Seismology, IRIS)。IRIS 的目标是:建立一个用 120 个台站实现全球均匀覆盖的全球地震台网(Global Seismographic Network, GSN);随后日

本、加拿大、意大利、澳大利亚等国家相继投入了大量资金建设不同尺度的数字地震台网,为便于不同国家之间的资料交换,1986年8月国际性的数字(宽频带)地震台网联合会(Federation of Digital broadband Seismographic Networks, FDSN)成立。从1996年起,在中央政府和地方政府的大力支持下,中国的数字地震台网建设得到了迅速的发展,已建成了由国家地震台网、区域地震台网和流动地震台网组成的新一代数字地震观测系统。进入21世纪,宽频带数字地震资料的分析、震级计算等问题引起了IASPEI的高度重视,从1999年开始,IASPEI邀请著名德国地震学家鲍曼(Peter Bormann)担任主编,组织全球的地震专家编写《新地震观测实践手册》(New Manual of Seismological Observatory Practice)(Bormann, 2002),并成立了“震级测定工作组(Working Group on Magnitude Measurements)”,组长由美国杜威(J. Dewey)和德国鲍曼担任,工作组由美国、德国、英国、中国、韩国等国家的13名专家组成,我国刘瑞丰是该工作组成员,并承担了工作组的主要工作。

经过几年的工作,震级测定工作组对中国、美国、德国、英国的震级测定工作进行了大量的研究与对比分析工作,并根据宽频带数字地震记录的特点,于2005年完成了新震级标度的初稿,并由IASPEI征求各国地震学家的意见。2007年在鲍曼和刘瑞丰的组织下,中国地震台网中心率先采用IASPEI新震级标度,测定了531个地震的短周期体波震级 m_b 、宽频带体波震级 $m_{B(BB)}$ 、20s面波震级 $M_{S(20)}$ 和宽频带面波震级 $M_{S(BB)}$,并与中国传统震级进行了对比研究,得到了很有意义的结果(Bormann and Liu, 2009),为全球其他地震台网使用IASPEI新震级标度起到了有益的参考作用。

二、我国震级测定概述

我国的历史文献、地方志和文学作品等资料很早就有对于历史地震的记载,最早可以追溯到公元前1831年的山东地震,史料记载为“泰山震”;从公元前780年起中国北方的地震记载就已经比较完整了(Bolt, 2000)。在《国语》卷1《周语》中记载了公元前780年(周幽王二年)陕西岐山地震:“幽王二年,西周三川皆震。……是岁也,三川竭,岐山崩。”在《诗经·小雅·七月之交》中记载了“烨烨震电,不宁不令。百川沸腾,山冢峯崩。高岸为谷,深谷为陵”;在《汉书·五行志》中记载了公元前70年6月1日(汉宣帝本始四年四月壬寅)山东诸城、昌乐一带地震:“本始四年四月壬寅地震,河南以东四十九郡皆震,北海琅琅环祖宗庙城廓,山崩水出,杀六千余人。被地震坏败者,勿收租赋”(国家地震局震害防御司,1995)。

有些历史记载如此之详细,现代研究人员根据这些记载可以了解当时地震的破坏分布情况,从而判断出地震的大小。如1679年9月2日(清康熙十八年七月二十八日)三河平谷地震是当时北京附近的大地震,在121个州府县志中都有记载,在《三

冈识略》卷8中就有这样的记载：“七月二十八日巳时初刻，京师地震……是夜连震三次，平地坼开数丈，德胜门下裂一大沟，水如泉涌。官民震伤不可胜计，至有全家覆没者。二十九日午刻又大震，八月初一日子时复震如前，自后时时簸荡，十三日震二次。……二十五日晚又大震二次。……积尸如山，莫可辨认。通州城房坍塌更甚。空中有火光，四面焚烧，哭声震天。有李总兵者携眷八十七口进都，宿馆驿，俱陷没，止存三口。涿州、良乡等处街道震裂，黑水涌出，高三四尺。山海关，三河地方平沉为河。环绕帝都连震一月，举朝震惊。”现代地震工作人员根据这些记载，确定地震位置在 40.0°N 、 117.0°E ，震中烈度为XI度，震级为8.0级（国家地震局震害防御司，1995）。

从1953年起以中国科学院历史研究所第三所为主，开展了中国历史地震资料的整理工作，在两年多的时间里收集了5600多种地方志、2300多种诗文集等大量历史资料，从中整理出有记载的地震记录15000多条，于1956年编辑出版了《中国地震资料年表》。在此基础上，中国科学院地球物理研究所地震研究室李善邦先生又收集了1900年国内外地震仪器实际地震记录，用近代地震学的方法对资料进行分析处理、测定出震级，编辑完成了《中国地震目录》，这是我国第一部地震目录。该书于1960年4月出版，全书共分二集，第一集是大震目录，收集了从公元前1189年至公元1955年在我国发生的1180次破坏性地震目录，第二集是分省、分县地震目录。我国在1900年以前没有地震仪器记录，震级不是实测值，而是根据历史文献、地方志和文学作品等历史资料对地震灾害的记录，如倒塌房屋间数、死亡人数、地震灾害的分布等灾害信息确定震中烈度，再由震中烈度转换成震级，这样确定的震级只能准确至 $\frac{1}{4}$ ，实际上只准确至 $\frac{1}{2}$ ，所以在历史地震目录中经常会出现 $4\frac{1}{4}$ 、 $7\frac{1}{2}$ 、 $6\frac{3}{4}$ 这样写法的震级，如果震级不可靠，或精度较差还要加括号，如 $(6\frac{1}{2})$ 。如果资料记载过于笼统，就不能确定震中烈度，但为工作方便起见，只能通过资料记载并与其他地震相互比较，*估计出大概震级，用两个数字表示其震级范围，如6~7级。如果有仪器记录，则全部使用我国自己制定的震级公式和量规函数测定出震级，精确到0.1级。

新中国成立初期，我国经济建设发展迅速，特别是铁路、桥梁、水库、电站、油田、煤矿、冶金以及城市建设都需要考虑当地地震活动频度和地震烈度。这些历史地震目录不但在地球科学研究中发挥了作用，而且在经济建设中也发挥了不可替代的作用。例如，包兰铁路的兰州至包头段为连接华北与西北的交通干线，从兰州至银川一段原定走黄河南岸，但因水泉至大营一带地震烈度较高，不能保证行车安全，不得不改道北线经腾格里沙漠边缘，因权衡轻重，防沙终比防震容易。又如在考察北京近300年的地震活动性时发现，北京曾遭受2次大地震，一次是康熙十八年（公元1679年9月2日）的三河—平谷8.0级地震；另一次是雍正八年（1730年9月30日）地

震,共倒塌房屋 14655 间,死亡人口 457 人,后来评定为 6½ 级地震。因此,在建国初期北京的一些重点建设工程和高大建筑的设计中均考虑了抗震设防,虽然在项目建设上增加了一些投入,但对于确保建筑物的安全却至关重要(李善邦,1960)。

从 20 世纪 80 年代起,顾功叙组织相关专家对中国历史地震目录进行了重新整理,1983 年由顾功叙主编的《中国地震目录》(公元前 1831 年至公元 1969 年)和《中国地震目录》(1970 ~ 1979 年)正式出版,基本上实现了我国地震目录与现代地震目录相衔接。

1956 年以前,我国的地震报告都不测定震级。自从 1935 年里克特提出震级的概念以来,在以后的几十年中,震级在世界各国得到了普遍的应用,各个国家和国际地震机构,根据自己的研究成果和观测数据,建立了适合不同区域的经验公式。1959 年李善邦根据我国使用的 62 型、64 型短周期仪器和基式(SK)中长周期仪器的特性,将里克特在美国南加州建立的地方性震级标度 M_L 引进中国,并建立了与中国短周期仪器特性和中长周期仪器特性相对应的量规函数 $R_1(\Delta)$ 和 $R_2(\Delta)$,建立了我国地方性震级标度。由于测定 M_L 的震中距到 1000 km,在我国将 M_L 称为近震震级。

1957 ~ 1965 年底的地震报告采用苏联索罗维耶夫(S. L. Soloviev)和谢巴林(N. V. Shebalin)提出的震级计算公式。

郭履灿、庞明虎(1981)根据古登堡提出了面波震级标度,利用北京地震台和法国的斯特拉斯堡(Strasbourg)、瑞典的乌普萨拉(Uppsala)等 6 个国外地震台 1956 ~ 1962 年记录的 143 个地震资料,得到了北京地震台的面波震级 M_s 计算公式。1966 年 1 月以后,中国的地震报告采用了郭履灿和庞明虎(1981)提出的以北京地震台为基准的面波震级公式,沿用至今。1999 年由许绍燮等完成的国家标准《地震震级的规定》GB 17740—1999 正式发布,将面波震级 M_s 作为对外发布的震级。

1985 年以后,我国 763 长周期地震台网建成并投入使用。该仪器的仪器参数与美国的 WWSSN 长周期一样,震级的测定方法也和 NEIC 使用的方法以及计算公式一致。1988 年陈培善提出了选用垂直向瑞利面波的最大振幅和周期测定 M_{S7} 的方法,使得我国地震台网测定的 M_{S7} 与 NEIC 测定的 M_{SZ} 一致,没有系统差。为便于比较,在地震观测报告中除了给出 M_s 以外,也给出 M_{S7} 。

1996 年刘瑞丰根据 IASPEI 推荐的面波震级公式,提出了用速度平坦型数字地震资料测定面波震级的方法,并使用全球地震台网(GSN)的资料,测定了 6.1 ~ 6.7 级地震面波震级,得到了很好的效果。

到 2001 年底我国已经建成了 48 个国家数字地震台站,353 个区域数字地震台站(阴朝民,2001),根据数字地震台站建设、资料分析处理和震级测定工作的实际需求,中国地震局于 2001 年 8 月制定了《地震及前兆数字观测技术规范(地震观测)》

(中国地震局, 2001)。目前, 我国地震台网在日常工作中要测定近震震级 M_L 、面波震级 M_s 与 M_{s7} 、中长周期体波震级 m_B 、短周期体波震级 m_b , 并逐步将测定矩震级 M_w 纳入地震台网的日常工作。

震级是通过仪器测定地震大小的一种标度, 也就是说震级是与地震仪器紧密联系在一起。由于数字地震仪器的特性与传统模拟地震仪器的特性不同, 震级计算公式中的量规函数就不同。为了不改变近震震级、面波震级和体波震级的量规函数, 在《地震及前兆数字观测技术规范(地震观测)》中规定, 近震震级 M_L 要使用仿真 DD-1 短周期记录的 S 波或 L_g 波的最大振幅来测定, 面波震级 M_s 要使用仿真基式 (SK) 中长周期记录面波质点运动的最大速度来测定, 短周期体波震级 m_b 要在仿真 DD-1 短周期记录上测定, 中长周期体波震级 m_B 要在仿真基式 (SK) 中长周期记录上测定。

目前, 我国在震级测定和震级发布方面与一些国际地震机构存在差别。在震级测定方法上, 我国一直按传统的方法测定面波震级, 与 NEIC、ISC 等地震机构测定的面波震级存在系统偏差; 在震级发布方面, 国际上主要地震机构已将矩震级作为对外发布的首选震级, 我国仍在使用面波震级作为发布震级。以 2013 年 4 月 20 日四川芦山地震为例, 中国测定的面波震级 M_s 是 7.0 级, 矩震级 M_w 是 6.6 级, 按照相关规定我国对外发布的震级是 $M_s 7.0$; 美国测定的面波震级 M_s 是 6.9 级, 矩震级 M_w 是 6.6 级, 美国发布的矩震级 M_w 是 6.6 级。对于行政领导、新闻媒体和社会公众普遍认为中国和美国发布的震级相差 0.4 级。

近年来, 我们结合 IASPEI 震级工作组的工作, 对中国地震台网测定的近震震级 M_L 、面波震级 M_s 与 M_{s7} 、中长周期体波震级 m_B 、短周期体波震级 m_b 进行对比研究; 对中国地震台网与美国地震台网测定的震级进行了对比研究; 并根据宽频带数字地震资料的特点, 开展了宽频带数字地震资料震级测定方法研究。本书将系统地介绍这方面的研究成果, 并在此基础上提出构建我国新的震级标度体系技术框架的建议, 供相关人员参考。

第二节 地震能量

对于构造地震来讲, 岩层在大地构造应力的作用下产生应变, 并不断积累应变能, 应力一旦超过了极限, 岩石就会突然破裂, 或沿原破裂面滑动, 释放出大量能量, 这就是地震成因的断层假说。