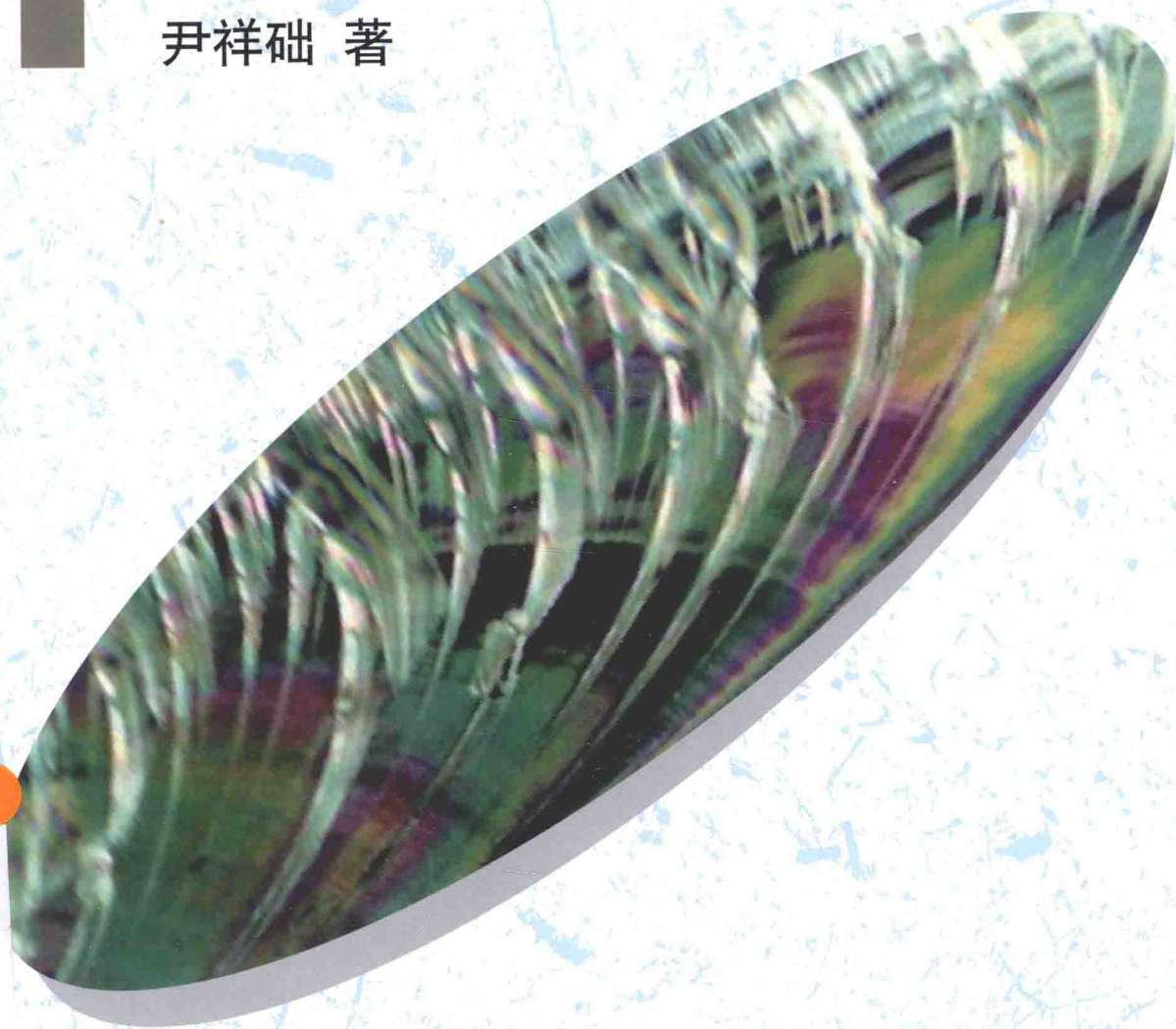


加卸载响应比理论 及其应用

尹祥础 著



科学出版社

加卸载响应比理论及其应用

尹祥础 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

加卸载响应比理论是本书作者提出的新的地震预测方法。目前已用于中、美、日、澳、伊朗和意大利等国预测天然地震、水库地震、矿震、滑坡等自然灾害的预测和大型工程结构的安全评估。地震发生在地下深处,难以直接观测,所以人们感到很神秘。从物理上看,地震的力学机制就是震源区介质的快速剪切断裂。而地震孕育过程则是震源区介质逐步损伤。在固体力学中,介质对加、卸载时响应的差别是表征介质损伤的方法。将这一原理用于地震预测。创立了一种新的地震预测理论——加卸载响应比。

本书作者及其团队经过30多年的不懈努力,对LURR的各个方面进行了系统的研究和地震预测实践。包括几百篇科学论文,几十篇博士、硕士学位论文的研究成果总结,将在本书中集中地奉现给读者。

本书适合地学、力学、非线性科学和有关工科(土木、水利、矿业等)的本科生、研究生、教师、科研人员和工程人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

加卸载响应比理论及其应用/尹祥础著. —北京:科学出版社,2015.11

ISBN 978-7-03-046305-0

I. ①加… II. ①尹… III. ①地震预报—研究 IV. ①P315.75

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第267637号

责任编辑:韦 沁/责任校对:赵桂芬

责任印制:肖 兴/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年11月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年11月第一次印刷 印张:13 1/4

字数:250 000

定价:138.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

大地震是一种惨烈的灾害，常常导致重大的人员伤亡和经济损失，甚至使整座城市瞬间化为废墟。1556年(明代嘉靖三十四年)陕西省华县附近(北纬34.5度，东经109.7度)发生的大地震($M \geq 8$ ， M 指里氏震级，下同)，就使83万人命丧黄泉；1976年的唐山大地震死亡人数超过24万；2004年12月26日的印尼9.2级大地震死亡人数超过30万。大地震还常常引起海啸、火灾、瘟疫等可怕的次生灾害：2011年3月11日的东日本大地震($M 9$)引起的巨大海啸，席卷日本东海岸，其危害可能超过地震的直接影响，而由此引发的核事故，甚至会累及子孙后代和周边邻国；1906年的旧金山大地震引发大火，整座城市陷入一片火海，使灾情雪上加霜。正因为如此，《大不列颠百科全书》称地震为自然灾害中的群灾之首。

我国地震活动具有频度高、强度大、震源浅、分布广的特点，是一个震灾严重的国家。1900年以来，中国死于地震的人数达55万之多，占同期全球地震死亡人数的53%；1949年以来，100多次破坏性地震袭击了22个省(自治区、直辖市)，造成27万多人丧生，占同期全球各类灾害死亡人数的54%。严重的震灾对人民的生命、财产和国家建设，形成巨大的威胁。地震预报是减轻地震灾害的重要措施，因此，预测地震，减轻地震灾害，是人类梦寐以求的期盼。

地震是一种复杂的自然现象。由于地震发生在地下深处，加上它的突发性(一旦发生，突如其来，使人猝不及防)和剧烈性(一个大地震的能量相当于千百个原子弹的能量)，人们对地震产生神秘感、恐惧感。长期以来，不少国际组织、政府部门，精心组织、周密规划；众多科学家殚精竭虑、呕心沥血，但时至今日，仍扑朔迷离，许多基本问题悬而未决，成为世界性的科学难题。

要对任何现象进行预测，都必须对其机理和过程有规律性的认识，地震预测也是如此。钱学森先生在给笔者的信中指出：“正确地解决地震学的理论是个力学应用问题”。笔者在多年的实践中越来越深切地体会到这一点(钱学森，2007，2008；尹祥础，2012a)。地震现象虽然复杂，其物理实质却是明确的，它就是地壳块体的快速剪切断裂，并释放能量的过程。相应地，地震孕育过程的物理实质就是震源区内介质的变形、损伤并导致失稳的过程。这一过程主要是力学过程。抓住这一点就抓住了问题的物理本质，从而可能找到解决这个世界难题的钥匙。

但是，我们在研究地震预测时遇到的力学问题，和通常的(工程)力学问题有所不同。解决通常的(工程)力学问题时需要知道：本构关系及损伤演化律、边界条件、初始条件以及某些力学量的变化历史(对流变介质)……但是在地震孕育过程中它们却是未知的或者不完全知道的。我们知道的只是地壳中某些物理量的变化。

众所周知，应力-应变曲线从宏观上刻画了材料受力全过程中的基本力学特性。如

果使材料受力单调增加，材料将分别经历弹性变形、损伤、失稳(破坏)等过程。弹性变形的最本质特征是可逆性，即加载过程和卸载过程是可逆的，因而其加载响应率(模量)和卸载响应率(模量)相同。损伤过程的本质特征与弹性过程相反，具有不可逆性。反映在应力-应变曲线上，其加载时的变形模量小于卸载时的变形模量，这种差异反映了材料的损伤或力学性质劣化的程度(图 0.1)。

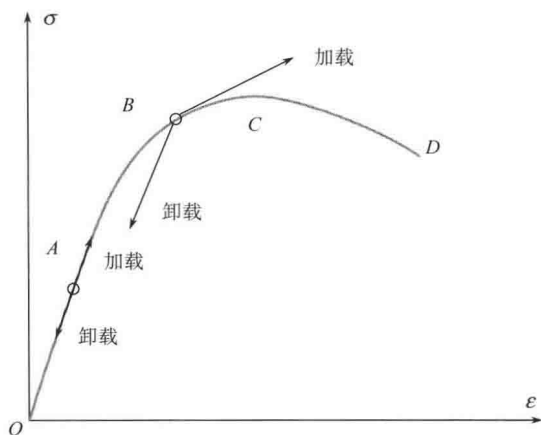


图 0.1 岩石的应力应变曲线

到目前为止，人类还很难测得地壳块体的完整的应力-应变曲线。我们能测量到的只是地壳中某些物理量当前的变化。如何从这些物理量当前的变化来判定某一地块的损伤演化，从而表征该地块的地震孕育过程，就成为解决地震预测的重要课题。根据这一思路我们提出了一个定量地表征地震的孕育进程的参数——加卸载响应比(Load-Unload Response Ratio, **LURR**)(尹祥础, 1987, 2004; Atkin, 1987; Иин, 1993; Yin et al., 1994a, 1994b, 1995, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2009, 2013; 宋治平, 1996; 王海涛, 1999; Wang et al., 2000; Mora et al., 2002; Куксенко et al., 2003; 余怀忠, 2004; Yin, 2005; Peng et al., 2006; 张晖辉, 2006; Zhang Y. X. et al., 2006; 张浪平, 2009; 袁帅, 2011; 刘月, 2014)。

在本书以下的章节里，将围绕加卸载响应比这个主题，展开多方面的论述，包括：加卸载响应比理论的基本科学问题(加卸载方法，加卸载准则，响应量的选取和加卸载响应比定义)；加卸载响应比理论的震例检验；加卸载响应比理论的基础研究(实验研究，数值模拟与理论分析)；加卸载响应比的时空扫描；加卸载响应比理论的地震预测实践；加卸载响应比理论和量纲分析的结合；加卸载响应比理论的应用(LURR用于短期地震预测，以前兆资料为响应的加卸载响应比，LURR用于各种地质灾害，LURR用于工程健康监测)；和加卸载响应比有关的某些专题(标度律，和加卸载响应比有关的概率问题，加卸载响应比变化率(dy/dr)的研究，和加卸载响应比有关的点滴回忆)等。

在研究过程中得到中国地震局“八五”以来多次科研计划的资助；得到中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室(LNM)的资助；得到中国科学院计算机网络信息中心超级计算中心的支持(INF105-SCE-2-02, INFO-115-B01)；得到国家自然科学基金基

金委员会(10232050, 1900102201, 10721202, 11021262)的资助和支持;得到国家“十五”重点项目(2001BA601B01-01-01-04)的资助;得到国家重点基础研究发展规划项目(973, 2004CB418406)的资助。

地震预测是一个世界科学难题。本书作者及其团队在几十年的时间里殚思极虑、竭尽全力致力于探索地震预测的新路,也取得一些新认识、新成果,但距离地震预测的宏伟目标,还有很长的路要走。本书是我们团队近半个世纪成果的总结。囿于科学水平、专业局限,疏漏之处,在所难免,敬请广大读者指正。

本书的出版得到中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室(LNM)的资助。在本书的写作和出版过程中得到刘月博士和科学出版社编辑们的帮助,表示由衷的谢意。

目 录

序

第 1 章 加卸载响应比理论的基本科学问题	1
1.1 如何加载与卸载?	1
1.2 如何选择适当的地球物理参数作为响应量?	4
1.3 如何定义 LURR?	5
第 2 章 加卸载响应比理论的回顾性震例检验	9
第 3 章 加卸载响应比的时空扫描	13
第 4 章 加卸载响应比理论的基础研究	24
4.1 实验研究	24
4.2 数值模拟	29
4.2.1 固体点阵模型	29
4.2.2 链网模型	31
4.3 损伤力学分析	40
4.3.1 加卸载响应比与损伤变量	40
4.3.2 Lyakhovsky 的损伤力学模型	41
第 5 章 加卸载响应比理论的地震预测实践	44
5.1 地震三要素的预测	44
5.1.1 地点(未来震中)的预测	44
5.1.2 震级的预测	46
5.1.3 发震时间的预测	46
5.2 若干典型震例的回顾	46
5.2.1 国内震例	46
5.2.2 国外震例	57
第 6 章 加卸载响应比理论和量纲分析的结合	66
6.1 量纲分析方法简介	66
6.2 参数选择	68
6.2.1 加卸载响应比空间扫描面积分——孕震积分	68
6.2.2 地震活动性的定量化——地震波能量率	72
6.2.3 剪切应变率 $\dot{\gamma}$	74
6.3 无量纲量 π_1 , π_2 和 π_3	75
6.4 未来地震的强度和发生时间的预测	78
6.5 震例检验	79

6.5.1	震例 1——新疆巴楚-伽师 M_s 6.8 级地震	79
6.5.2	震例 2——新疆阿图什 M_s 6.9 级地震	81
6.5.3	震例 3——河南周口 M_s 4.7 级地震	83
6.6	地震预测实践	84
6.6.1	新疆哈密 5.3 级地震	85
6.6.2	吉林松原地震	85
6.6.3	内蒙古自治区阿拉善盟阿拉善左旗 M_s 5.8 地震	89
6.7	尼泊尔大地震的预测	89
6.7.1	预测概况	91
6.7.2	新形势新问题	94
第 7 章	加卸载响应比理论的其他应用	96
7.1	LURR 用于短期地震预测	96
7.1.1	短时间窗的应用	96
7.1.2	加卸载波	100
7.2	前兆资料用作“响应”的加卸载响应比	114
7.3	LURR 用于其他地质灾害的预测	116
7.4	LURR 用于工程健康监测	116
第 8 章	和加卸载响应比有关的某些专题	121
8.1	和加卸载响应比有关的标度律	121
8.2	和加卸载响应比有关的概率问题	130
8.3	加卸载响应比变化率或微分增量的研究	136
8.4	和加卸载响应比有关的点滴回忆	140
参考文献		143
附录		151
A.1	钱学森先生等对加卸载响应比理论的鼓励与教导	151
A.1.1	钱学森先生的信	151
A.1.2	顾功叙先生的信	158
A.2	有关加卸载响应比理论的学位论文目录	165
A.3	由加卸载响应比理论引领的研究论文目录	166
A.4	不便纳入正文的一些 Excel, PPT 文件	173
A.4.1	第 6 章中进行量纲分析的震例数据表	173
A.4.2	岳卫平博士在中国地震局报告的 PPT	173
A.4.3	在 SCA2014 报告的 PPT 的 RTF 格式	179
A.5	媒体有关加卸载响应比理论的报道选辑	180
A.5.1	《科技日报》记者阎新华的报道“地震, 难逃中国人的慧眼”	181
A.5.2	《中国日报》1994 年 9 月 21 日“Predicting earthquakes is a science”的复印件	188
A.5.3	“地震预报的新曙光”, 载于《瞭望》的“百科前沿”专栏	188

A. 5. 4 各种报刊登载的有关加卸载响应比的文章目录	191
A. 6 补遗	192
A. 6. 1 LURR 和其他地震预测方法的结合	193
A. 6. 2 临界幂律奇异性	193
A. 6. 3 呼图壁项目的新进展	195
后记	198

Contents

Preface

Chapter 1 Basic Scientific Issues for LURR	1
1.1 How to load and unload?	1
1.2 How to choose geophysical parameters as “response”?	4
1.3 How to define LURR?	5
Chapter 2 A Retrospective Investigation on Earthquake Cases Using LURR	9
Chapter 3 LURR’s Tempo-spatial Scanning	13
Chapter 4 Basic Studies on LURR	24
4.1 Experimental study	24
4.2 Numerical simulation	29
4.2.1 LSM (lattice solid model)	29
4.2.2 Chain network model	31
4.3 Damage mechanics analysis	40
4.3.1 LURR and damage variable	40
4.3.2 Lyakhovsky’s damage mechanics model	41
Chapter 5 Earthquake Prediction Practice with LURR	44
5.1 Prediction for the earthquake three elements	44
5.1.1 Location	44
5.1.2 Magnitude	46
5.1.3 Occurrence-time	46
5.2 Review of some typical earthquake cases	46
5.2.1 Earthquake cases in China	46
5.2.2 Earthquake cases outside China	57
Chapter 6 The Combination of LURR Theory and Dimensional Analysis	66
6.1 Briefing of dimensional analysis	66
6.2 Parameter’s choice	68
6.2.1 Seismogenic integral-surface integral of LURR	68
6.2.2 A quantitative measurement of seismicity-seismic wave energy rate	72
6.2.3 Shear strain rate $\dot{\gamma}$	74
6.3 Dimensionless quantity: π_1 , π_2 and π_3	75
6.4 How to predict the magnitude and occurrence time of a coming earthquake	

.....	78
6.5 Retrospection of earthquake cases	79
6.5.1 Case 1—Bachu-Jiashi M_s 6.8 earthquake in Xinjiang	79
6.5.2 Case 2—Atushi M_s 6.9 earthquake in Xinjiang	81
6.5.3 Case 3—Zhoukou M_s 4.7 earthquake in Henan Province	83
6.6 Earthquake prediction practice	84
6.6.1 Hami M 5.3 earthquake in Xinjiang	85
6.6.2 Songyuan earthquake swarm in Jilin province	85
6.6.3 The M 5.8 earthquake in Alxa Left Banner in Inner Mengolia ...	89
6.7 Nepal earthquake (M_s 8.1) prediction	89
6.7.1 Overview	91
6.7.2 New problems after Nepal earthquake	94
Chapter 7 Other applications of LURR	96
7.1 Application in short-term earthquake prediction	96
7.1.1 Short time window	96
7.1.2 LURR wave	100
7.2 Adopting precursor parameters as “response”	114
7.3 Application of LURR to prediction for geologic disasters	116
7.4 The health monitoring of engineering structure using	116
Chapter 8 Some special Topics Concerning LURR	121
8.1 Scaling law concerning LURR	121
8.2 Probability problems	130
8.3 The LURR rate or differential increment	136
8.4 Some memory concerning LURR	140
References	143
Appendix	151
A.1 Encourage and enlightenment from master Xueshen Qian and others	151
A.2 Contents of dissertations on LURR	165
A.3 Academic papers using LURR	166
A.4 Some PPT, excel files	173
A.5 Selected news or articles on LURR	180
A.6 Addendum	192
Postscript	198

第1章 加卸载响应比理论的基本科学问题

要应用加卸载响应比理论于地震预测，首先要解决下列问题：

如何加载和卸载？

如何选择适当的地球物理参数加卸载响应比的“响应”？

如何定义 LURR？

这些是加卸载响应比理论的基本科学问题。本章将就这些问题予以阐述和讨论。

1.1 如何加载与卸载？

我们研究的对象是包含整个孕震区的某一地壳块体，其线尺度可达几百千米甚至上千千米。对这样巨大的“庞然大物”进行加载、卸载，显然不是目前的人力所能及的。好在大自然为我们提供了这样的条件，这就是日、月运行产生的引潮力。月球和太阳对地球的引力不但可以引起地球表面流体的潮汐(如海潮、大气潮)，还能引起地球固体部分的周期性变形，这就是固体潮。固体潮由峰到谷的最大应变变化幅度大约是 0.5×10^{-7} 量级。引潮力使地球内部各处的应力不断周期性地变化，也就是永不停息地对地球进行加载与卸载。采用国际上广泛认可的 PREM 地球模型(Dziewonski and Anderson, 1981)。该模型将地球模拟为几十层壳体的组合，每层的弹性模量、密度等各不相同。日、月、地球按天体力学规律运行，日、月以万有引力作用于地球的每一点，使地球内产生一个潮汐应力场。我们根据天体力学和弹性力学编写了计算程序，能准确计算地壳内部任一点(经度、纬度、深度)，在任一时刻由日、月引潮力引起的潮汐应力张量 σ'_{ij} (尹灿, 1990; Yin, 2005)。

地壳中任何一点的应力，由潮汐应力 σ'_{ij} 和构造应力 σ_{ij}^T 组成。如上所述，潮汐应力可以用我们自编的程序计算得到。困难的问题是构造应力 σ_{ij}^T 。到目前为止，人类还难以测量到震源深处(如地下 15km 处)的应力，即使对于地表浅层(地面以下几米到几千米)，至今也主要是其主应力的方位的测量结果，有关应力的大小的数据，尤其是三维应力状态的数据，极为缺乏。而这又是判定加卸载所必需的。

为此，先对潮汐应力 σ'_{ij} 和构造应力 σ_{ij}^T 作一些分析：

首先比较二者的大小。一个张量的大小，通常用它的某些特征分量来标志。因为地震的机制是剪切断裂，所以，剪应力至关重要。剪应力大小的标志是最大剪应力，或者地球科学中常用的差应力(差应力是最大主应力和最小主应力之差，最大剪应力是差应力的一半)。根据我们大量计算的结果，潮汐应力张量 σ'_{ij} 的差应力是 10^3 Pa 量级(尹灿, 1990; Yin, 2005)。而构造应力张量的差应力，则是地球科学中一个长期争论的课题(尹祥础, 2012)。连其数量级都存在分歧，并分为低应力和高应力两种观点，低应力派

和高应力派各有依据, 长期论战。近年来低应力派渐占上风 (Zobake et al., 1987, 1992; 谢富仁等, 2004; 吕古贤等, 2008; 许忠淮, 2010)。按照低应力派的观点, 地下 10km 处的差应力大致是 $10^5 \sim 10^6$ Pa 的数量级。所以构造应力张量远大于潮汐应力张量 (大 2~3 个数量级) 因而得到

$$\sigma_{ij}^T \gg \sigma_{ij}^t \quad (1.1)$$

令 σ_{ij}^R 表示地壳中的应力张量, 它是构造应力张量 σ_{ij}^T 与潮汐应力张量 σ_{ij}^t 之和,

$$\sigma_{ij}^R = \sigma_{ij}^T + \sigma_{ij}^t \quad (1.2)$$

由于构造应力张量远大于潮汐应力张量 (差好几个数量级), 所以二者相比, 后者可以忽略不计, 式 (1.2) 可以改写为

$$\sigma_{ij}^R \approx \sigma_{ij}^T \quad (1.3)$$

其次, 比较构造应力张量变化率 $\frac{\Delta\sigma_{ij}^T}{\Delta t^T}$ 和潮汐应力张量的变化率 $\frac{\Delta\sigma_{ij}^t}{\Delta t^t}$, 前面分析过

$$\sigma_{ij}^T \gg \sigma_{ij}^t$$

但是

$$\frac{\Delta\sigma_{ij}^T}{\Delta t^T} \ll \frac{\Delta\sigma_{ij}^t}{\Delta t^t} \quad (1.4)$$

这是因为 Δt^t 的典型时间尺度为 1 天, 而 Δt^T 的时间尺度是地质年代, 如 1 百年, 而 1 百年 = 3.65×10^4 天。因此 Δt^T 比 Δt^t 大 4 个数量级以上 (马瑾, 1987)。从而得到式 (1.4)。

简而言之, 构造应力张量远大于潮汐应力张量, 但构造应力张量是一个变化很缓慢的量, 潮汐应力张量的变化率却比构造应力张量大。困难的根源在于构造应力张量, 有关地下深处 (震源处) 的构造应力张量的信息, 我们知之甚少。

现在让我们转向地震的震源机制解。地震学中有一套方法 (Aki and Richards, 1980), 可以得到发震断层的走向 (ϕ_s)、倾角 (δ) 以及发震断层上盘对下盘的滑动方向 λ (图 1.1)。

前已论述, 地震的物理实质是地壳块体的快速剪切脆断。我们假定: 图 1.1 中, 发震断层上盘相对下盘的滑动矢量 \vec{u} 和发震断层面上的剪应力矢量 $\vec{\tau}$ 方向相同。因为, 断层的相对滑动就是剪应力矢量驱动的, 所以, 这个假定应该是很自然的, 也是合理的。根据式 (1.1)~式 (1.4), 如果 $\vec{\tau}^t$ 和 $\vec{\tau}^T$ 之间成锐角, 二者之和 (矢量和) 的模将大于 $\vec{\tau}^T$, 即二者互相加强。反之, 如果二者之间成钝角, 则二者互相削弱。我们引入 $\vec{\tau}^t$ 和 $\vec{\tau}^T$ 的点积 (标量积), 为了绕开 $\vec{\tau}^T$ 的大小 (模), 用 $\vec{\tau}^T$ 的单位矢量 $\frac{\vec{\tau}^T}{|\vec{\tau}^T|}$ 和 $\vec{\tau}^t$ 作点积, 根据滑动矢量 \vec{u} 和发震断层面上的剪应力矢量 $\vec{\tau}$ 方向相同的假设, 我们的问题转化为 $\vec{\tau}^t$ 和 \vec{u} 作点积。所以最后以

$$\frac{d}{dt} (\vec{\tau}^t \cdot \vec{u}) = f \quad (1.5)$$

作为判断加卸载的准则:

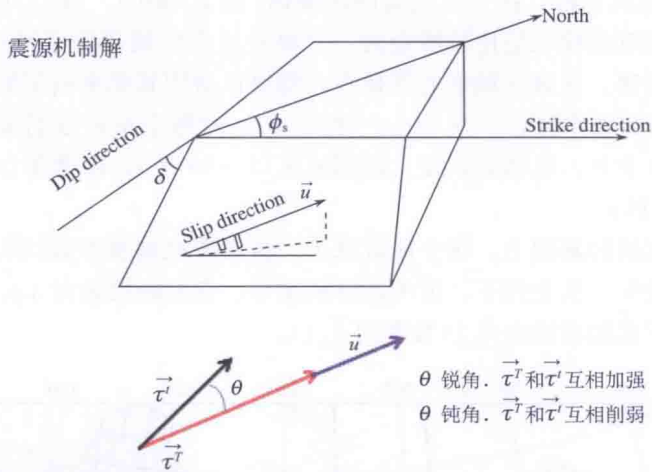


图 1.1 震源机制解和发震断层面上构造剪应力和潮汐剪应力的叠加

$f > 0$ 加载

$f < 0$ 卸载

但是，只有对较大的地震（例如， $M \geq 5$ ，至少 $M \geq 4$ ），才能求得其震源机制解。对于大量小地震（这正是计算 LURR 时所用到的），难以求得其震源机制解。好在我们讨论震源机制解的目的是得到该地震震源处的构造应力场的信息。构造应力场是比较平

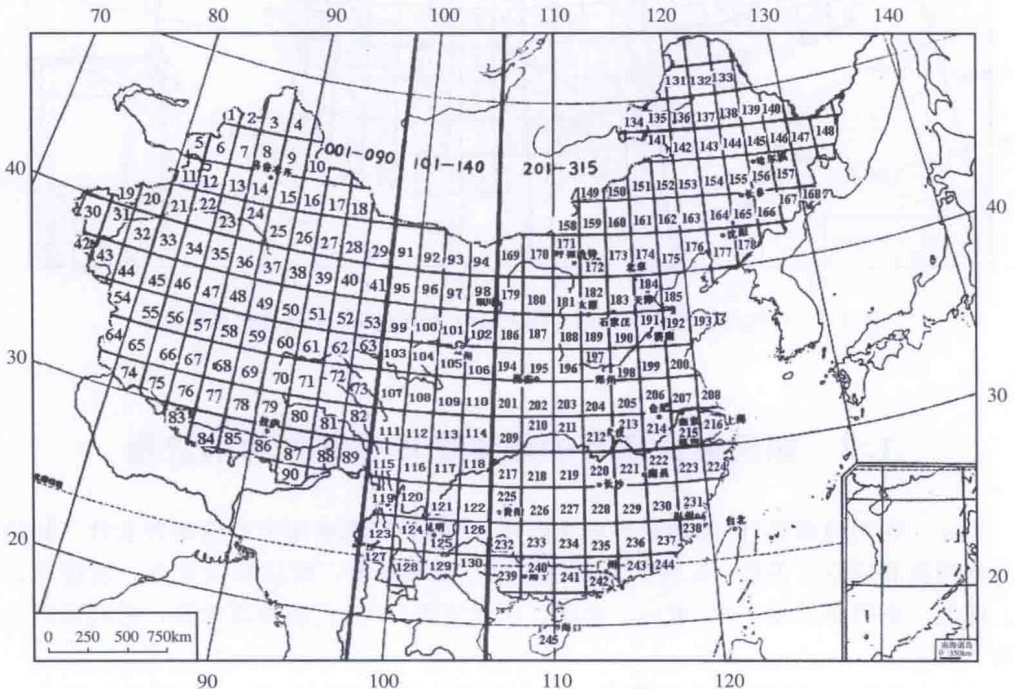


图 1.2 计算加卸载响应比用的中国大陆分区图

滑的(smooth),也就是说,在一定尺度的区域内(如 100km),我们可以认为构造应力场是均匀的。即使有变化也是比较缓慢的。只要在这个区域里发生过一个较大的地震,已求得其震源机制解。在该区域里的其他点,都可以借用其震源机制解。为此,我们将中国大陆分成 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的小区,一共 244 个(图 1.2)。对每个小区分别编号。为以后分片计算方便,分为 3 个片,从西到东是:西部地区(1~90 区),南北带(91~130 区)和东部地区(131~244 区)。

在查阅大量文献的基础上,每个区被赋予一组震源机制解参数(图 1.3)。图中每个区内,标有 4 个数字,从上到下,依次是分区编号、发震断层走向(ϕ_s)和倾角(δ)以及发震断层上盘对下盘的滑动方向 λ (参考图 1.1)。

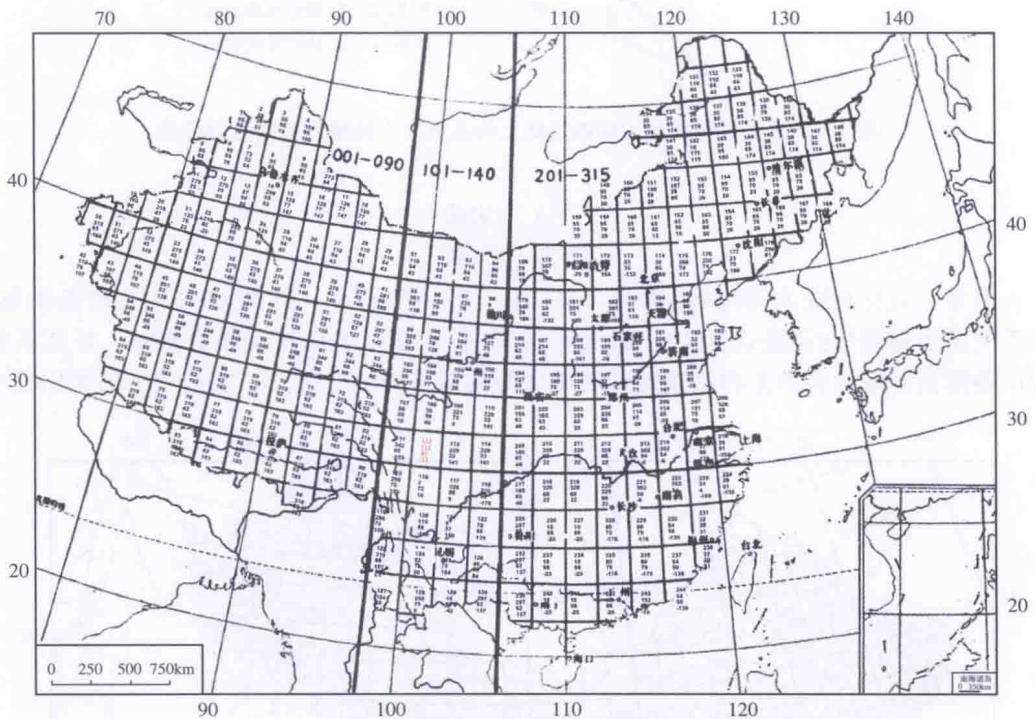


图 1.3 计算加卸载响应比的中国大陆分区图及各区的震源机制解参数

1.2 如何选择适当的地球物理参数作为响应量

当今,我国地震界(国际地震界也大致相同)已能够测量很多地球物理参数,如地形变、地倾斜和应变、前震、 b 值、微震活动性、震源机制、断层蠕动异常、波速比、地磁、地电、电阻率、地下水(水位、水温、水化学成分等)、油井流量等,它们可以大致分为三类:

(1) 由地震台网测得的地震资料。包括已发生地震的时、空、强(时间、地点、震级)和各种波形数据。

(2) 由地面前兆台网测得的各种前兆资料。种类繁多,如地形变(包括大地测量、跨断层和深井测量等)、地应力、地下水(水位、水温、水化学成分等)、地磁、地电、重力等。

(3) 由空间技术测得的各种前兆资料。如全球定位系统(GPS)、合成孔径雷达干涉成像(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)等。这些技术大都是测量地表的变形和其他参数,其主要特点是能够测量较大范围内的场上的参数。

上述各种参量都可能在某一侧面,反映地震孕育的进程,因而都可作为“响应”,用于研究 LURR。效果如何,可以通过实践来检验。事实上,国内外众多同行,为此进行了广泛的探索与研究,发表的论文已近二百篇(不包括本人所在的课题组发表的论文,请参看网页 <http://www.doc88.com/p-36717273437.html> 及附录 A.3。此网页及附录 A.3 中列出了国内外科学家利用加卸载响应比研究各种科学问题发表的部分论文目录。以下是其中的一小部分:施行觉,1994;陈建民等,1994;许强、黄润秋,1995;常克贵等,1999;张昭栋、刘庆国,1999;许昭永等,2002;姜彤,2004;姜彤等,2004;贺可强等,2004;任隽等,2005;张文杰等,2005;Yin and Mora,2004,2006;Trotta and Tullis,2006;Yu et al.,2006;Zhang Y. X. et al.,2006;Chen et al.,2012;邵宜莲,2012;Zhang J. et al.,2012)。从这些结果看,用不同的前兆资料研究 LURR,各有千秋。因为,不同的前兆资料反映的是不同时、空范围的地震孕育进程。例如,地下水水位的 LURR 峰值,可能出现在地震发生前几个月,具有短期前兆的特征(陈建民等,1994;张昭栋、刘庆国,1999)。

本课题组则着重采用地震资料研究 LURR,这主要是考虑到:

(1) 地震是造成地壳损伤的主要因素。根据细观损伤力学,材料的损伤演化主要由损伤场和应力场的交互作用所控制。所以,它是决定地震孕育的直接因素之一。

(2) 地震资料也是最容易获得的资料,而且资料覆盖的时、空域都比较大。

1.3 如何定义 LURR?

回到图 0.1,图 0.1 为岩石材料典型的应力-应变曲线(Jaeger and Cook,1979),只是为了以后便于推广到更普遍的情况(用应变以外的物理量作为响应),将纵坐标改为载荷 P ,替代应力 σ ,横坐标改为 R ,替代应变 ϵ 。

设 ΔP 和 ΔR 表示载荷 P 和响应 R 的增量,定义响应率 X 为

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta P} \quad (1.6a)$$

如果回到应力-应变曲线,响应率 X 就是变形模量的倒数。令 X_+ 和 X_- 分别代表加载与卸载阶段的响应率,正号对应于加载阶段,负号对应于卸载阶段。加卸载响应比 Y 定义为

$$Y = \frac{X_+}{X_-} \quad (1.6b)$$

在加载初期(OA段),岩石试件处于弹性阶段(AB段)。弹性阶段的变形是可逆

的, 加载过程和卸载过程的响应率是相同的, AB 段的斜率即为岩石的弹性模量。随着载荷的进一步增加, 岩石试件内部出现损伤(裂纹), 应力-应变关系偏离直线(BC 段)。这个过程是不可逆的, 所以, 加载过程和卸载过程的响应率是不同的。 C 点表示岩石在一定条件下所能承受的最大载荷, CD 段对应岩石的破坏过程。

很明显, 在弹性阶段, $X_+ = X_-$, $Y = 1$; 出现损伤之后, $X_+ > X_-$, $Y > 1$ 。可以看出, 随着载荷的增大, 材料损伤程度加剧, Y 值将会增大至显著地大于 1。

从上述定义不难看出, 加卸载响应比 Y 值可以定量地刻画岩体的损伤程度。地震及许多其他地质灾害, 如滑坡、岩爆以及火山喷发等都是不同尺度岩体的失稳现象, 因此加卸载响应比理论可能为地震和其他地质灾害的预测开辟出一条新的途径。

在 LURR 提出的初期 (20 世纪 80 年代), 根据物理上的考虑, 将地震能量作为响应, 定义加卸载响应比 Y 为

$$Y = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_+} E_i^m \right)_+}{\left(\sum_{i=1}^{N_-} E_i^m \right)_-} \quad (1.7)$$

式中, E 为地震时辐射的地震波能量 (Kanamori and Anderson, 1975), “ E_+ ”表示加载时段内发生的地震所辐射的地震波能量, “ E_- ”表示卸载时段内发生的地震所辐射的地震波能量。 m 可以取为 $0 \sim 1$ 的任意值。当 $m = 1$ 时, E^m 表示地震能量; 当 $m = 1/2$ 时, E^m 表示 Benioff 应变 (Frank and Benioff, 1973); 当 $m = 0$ 时, Y 值相当于 N_+ / N_- , N_+ 和 N_- 分别代表加载和卸载过程中发生的地震的个数。

式 (1.7) 所定义的 LURR 称为 Y_E [式 (1.8)], 下标 E 表示用地震能量定义的 LURR。定义 Y_E 在以后的研究和预测实践中, 效果不错 (尹祥础, 1987, 2004; Иин 1993; Yin et al., 1994a, 1994b, 1995, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2009, 2013; 王海涛, 1999; Wang et al., 2000; Mora et al., 2002; Куксенко and Иин, 2003; 余怀忠, 2004; Yin, 2005; Peng et al., 2006; Zhang H. H. et al., 2006; 张晖辉, 2006; 张浪平, 2009), 因而一直沿用至今。

$$Y_E = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_+} E_i^m \right)_+}{\left(\sum_{i=1}^{N_-} E_i^m \right)_-} \quad (1.8)$$

近来, 我们对 LURR 的定义进行了再研究。截取一块边长为 100km 数量级的矩形地块为研究对象。众所周知, 地壳是一个壳体, 其曲率半径约为 6000km 量级, 远大于该地块的边长, 因此可以将此地块简化为平板。如果在该地块中发生多个地震, 形成多条断层, 地块必将受到损伤。在损伤力学 (Kachanov, 1980, 1986; Krajcinovic, 1996; 余寿文、冯西桥, 1997) 中, 用损伤变量 D 作为损伤的度量。不同的作者, D 可以有不同的定义。但是, 从损伤力学的创始人 Kachanov 起, 大多数损伤力学大师们都认为: 通过受损材料的刚度折减来定义 D 是比较合理的办法。这样就转化成平板中裂纹系引起的刚度变化的力学模型。近年来, 陆续发展了自洽方法、广义自洽方法、组构张量、