

基于最小耗能原理的 地震预测、预报理论

周筑宝 唐松花 著



科学出版社

基于最小耗能原理的 地震预测、预报理论

周筑宝 唐松花 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

地震的孕育和发生从本质上说是一个力学问题,应基于力学中的能量原理对其进行研究。从“地震是一个需要消耗能量的过程而任何耗能过程都应受到最小耗能原理规范”的观点出发,则最小耗能原理是一个与地震现象密切相关的自然界的普适性原理。本书在引入广义力概念的基础上,根据最小耗能原理导出了“整体破坏准则”和“复合型断层扩展准则”。将上述两“准则”分别用于两种基本类型的引发地震的地壳破裂问题研究,并给出根据“准则”如何确定地震预报“三要素”的思路、步骤、方法及应用举例,从而建立一种基于最小耗能原理的地震预测、预报理论。最后讨论根据上述理论预测、预报地震需要克服的困难及对克服这些困难的思考。

本书可作为从事地震、地球物理、岩石力学、地下工程研究的专业人士及相关专业的大学教师和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

基于最小耗能原理的地震预测、预报理论/周筑宝,唐松花著. —北京:科学出版社, 2015. 6

ISBN 978-7-03-044803-3

I. ①基… II. ①周… ②唐… III. ①地震预测—地震研究 ②地震预报—地震研究 IV. ①P315.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 124395 号

责任编辑:刘凤娟 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:耕 者

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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2015 年 6 月第一次印刷 印张:7 3/4

字数:145 000

定价:56.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

地震的预测、预报问题是地球科学研究中公认的世界性难题。基于“地震总会导致巨大能量的释放,而在释放如此巨大能量之前不会出现一些‘前兆’是难以令人置信的”的认识,使地震预报长期在以捕捉地震前兆为基础的经验性预测、预报的情况下徘徊。由于任何地震都不能脱离具体的地质构造环境,所以基于地震前兆的经验性认识必然带有很强的地域性,从而导致在试图确定地震发生的时间、地点和强度与各种地震前兆现象之间的关系时,可能会面临比地震本身更为复杂的问题。这是目前根据地震前兆进行地震预测的最大障碍。

越来越多的学者已经认识到,为了推进地震预测、预报研究,需要打破长期徘徊在以地震前兆监测为基础的经验性预报的局面,应把注意力尽快转向以动力学为基础的数值预报的研究。所谓数值预报,实质上就是根据物理问题的数学模型对系统的演变过程作出定量化的预测。地震的孕育和发生从本质上说是一个力学问题,已是众多地震研究者的共识,因此地壳应力的研究日益受到重视,以有限元法为工具的地壳应力数值模拟成果日益增多。但在如何根据这些地壳应力数值模拟结果确定地震发生的时间、地点和强度方面,目前尚束手无策。因为地壳岩石不仅是非均质的,而且甚至是不连续的,所以用基于连续介质力学中的应力概念,根本无法判定地壳岩石在何时、何地会发生大尺度破裂而引发何等强度的地震。

笔者长期从事最小耗能原理及其应用研究。很长时间以来,一直认为最小耗能原理或许是与地震现象最密切相关的自然界的普适性原理,因此尝试着遵循此思路进行研究,本书就是这些研究工作的初步成果,

书中建立的新理论也许能为解决目前地震数值预报所面临的困难提供一些新的办法和途径。应该承认,本书建立的新理论还不够完善,因此敬盼地学界的专家、学者们能不吝指教。

本书是在唐松花博士的协助下完成的,她除了提供算例外,还对书中的一些论点提出了很好的建议,并为本书的顺利完成和出版作出了贡献。

周筑宝

2014年6月21日于中南大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 地震是任何其他形式灾害无法比拟的自然灾害	1
1.2 地震的预测、预报问题是当今地球科学研究中公认的 世界性难题	1
1.3 实现地震预测、预报是地球科学的一个宏伟的科学研究 目标	2
1.4 本书的主要论点及内容	3
参考文献	8
第 2 章 最小耗能原理	9
2.1 大自然的节约法则	9
2.2 最小能耗原理和最小能耗率原理	9
2.3 最小能耗率原理及其局限性	10
2.4 为什么许多学者会热衷于从事拓展最小熵产生原理 适用范围的研究	11
2.5 新最小熵产生原理(即最小耗能原理)	11
2.6 对最小耗能原理正确性的验证	20
2.7 用最小耗能原理解决问题的三种途径	24
2.8 关于约束条件	29
2.9 主要结论	31
参考文献	32
第 3 章 最小耗能原理是与地震现象密切相关的自然界的普适性 原理	33
3.1 地震应受到最小耗能原理的规范	33
3.2 根据最小耗能原理,所谓“地震带”实际上就是地壳	

最薄弱的地带	34
3.3 用最小耗能原理来探讨关于“特征地震”和“地震空区” 中的一些问题	35
3.4 关于为什么“海岭的转换断层总是倾向于垂直于海岭” 的讨论	38
3.5 最小耗能原理与地震预报准则	39
参考文献	40
第4章 基于最小耗能原理的整体破坏准则	42
4.1 作用于某有限体 V 中的广义力	42
4.2 整体破坏准则	43
4.3 按最小耗能原理建立整体破坏准则的思路	44
4.4 广义变形张量 $\underline{U}(t)$ 与广义力张量 $\underline{T}(t)$ 之间关系的 确定	45
4.5 各向同性、线弹性且单轴拉、压强度不等材料的整体 破坏准则	48
4.6 正交各向异性、线弹性且沿弹性主方向拉、压强度不等 材料的整体破坏准则	52
4.7 各向同性、线弹性且单轴拉、压强度不等材料的整体破坏 准则与正交各向异性、线弹性且沿弹性主方向拉、压强度 不等材料的整体破坏准则之间的关系	57
4.8 关于整体破坏准则的若干问题	59
参考文献	66
第5章 基于最小耗能原理的复合型断层扩展准则	67
5.1 最小耗能原理与复合型断裂准则	67
5.2 基于最小耗能原理的复合型断层扩展准则	69
5.3 为什么在断层发生延伸性新破裂时会引发地震	75
5.4 $V(R, \theta_{\min})$ 的控制尺寸 R 的确定	76
5.5 关于活断层扩展长度 l 的确定	77
参考文献	78

第 6 章 基于最小耗能原理的整体破坏准则和复合型断层扩展 准则在地震预测、预报中的应用	79
6.1 引发地震的地球岩石壳大破裂产生机制的两种基本 类型	79
6.2 整体破坏准则在地震预测、预报中的应用	80
6.3 复合型断层扩展准则在地震预测、预报中的应用	89
参考文献	100
第 7 章 地震预测、预报目前面临的困难及对克服困难的思考	101
7.1 根据地震前兆预测、预报地震的可能与困难	101
7.2 对改进目前地震预测、预报现状的一些思考	102
7.3 按本书提出的方法预测、预报地震需要解决的问题	104
7.4 关于曾对本书学术观点的形成产生过影响的两篇论文 的思考与讨论	107
参考文献	113
索引	115

第 1 章 绪 论

1.1 地震是任何其他形式灾害无法比拟的自然灾害

地震与风雨、雷电一样,是一种极为普遍的自然现象。强烈地震会直接或间接造成破坏,成为灾害。地震的能量之大、破坏力之强是任何其他形式的灾害所无法比拟的。1906 年厄瓜多尔西海中的 8.9 级地震,其释放的能量相当于约 10 万颗普通原子弹或者 100 颗大氢弹的威力。1976 年发生的 7.8 级中国唐山大地震导致 24.28 万人在地震中丧生、16.4 万人重伤^[1]。

全世界每年都会发生 10~20 次 7 级以上的大地震。巨大的地震夺走了无数人的生命,顷刻之间大量的财富随之毁灭。在众多的自然灾害中,特别是在人员伤亡方面,地震造成的死亡人数占各类自然灾害造成的死亡总人数的一半以上,地震灾害堪称群灾之首,因此自 19 世纪 70 年代后期现代地震学创立以来的 100 多年里,地震预测一直是地震学研究的主要问题之一,许多地震学家莫不苦思预测、预防地震与减轻地震灾害的方法。特别是自 20 世纪 50 年代中期以来,作为一个具有现实意义的科学问题,地震预测一直是世界各国政府和地震学家深切关注的焦点^[2]。

1.2 地震的预测、预报问题是当今地球科学研究中公认的世界性难题

地震的预测、预报问题究竟难在哪里?为什么那么难?归纳起来,

其困难有如下三点:①地球内部的“不可入性”导致人们不可能以高精度测量断层及其邻区的状态;②大地震的“非频发性”导致人们无法精确推断和掌握大地震的发生规律;③地球物理过程的复杂性导致人们至今对其中的物理定律仍然几乎一无所知^[2]。

正因为如此,1997年3月19日的《科技日报》甚至根据 *Science* 第275卷 Geller 等的文章,刊出了题为“几位科学家联合撰文断言地震根本不可能预报”的报道。Geller 等的观点是“处于自组织临界状态的大地,任何一次小地震都有可能灾变为一次大地震,而小地震发展成为大地震不仅决定于其断层附近,而且决定于其整个(震源体)空间的物理状态的无数细结构”。因为人们根本无法掌握深部无数细结构的临界状态,所以地震根本不可能预报^[3]。与 Geller 等持类似观点的一些专家也认为:“地震系统与其他许多系统一样,都属于具有自组织临界性(self-organized criticality, SOC)的系统,即在无临界长度标度的临界状态边缘涨落的系统。在具有自组织临界性的系统中,任何一个小事件都有可能以一定的概率级联式地演化成大事件。级联是否发生与整个系统内的所有细节有关,而不仅仅取决于大事件及其邻近区域的细节;整个系统内的所有细节,虽然从理论上说是可以测量的,但是因为需要测量的细节的数量是如此之多,以至于实际上是不可能一一准确测量的,并且人们迄今仍然不了解其中的物理定律。因此,从本质上说,具有自组织临界性的现象是不可预测的。”^[2]

1.3 实现地震预测、预报是地球科学的一个宏伟的科学研究目标

显然,如果能准确地预测未来大地震发生的地点、时间和强度(即所谓地震预报三要素),就可以拯救数以万计生活在地震危险区人们的生命;如果能预先采取适当的防范措施,就有可能最大限度地减轻地震对建筑物等设施的破坏,从而减轻经济损失,保障社会的稳定,促进社会的

和谐发展。遗憾的是,迄今为止虽然世界各国的地震学家通过长期不懈地努力,在地震预测、特别是中长期预测方面取得了某些有意义的进展(如“板块大地构造学说”的确立、“地震带”及“特征地震”概念的提出、“地震空区”的确认等,对地震物理学与地震预测有着重要意义。在环太平洋地震带,几乎所有的地震都发生在利用“地震空区”方法预先确定的空区内,就是很好的证明),但是地震预测是极具挑战性且尚待解决的世界性科学难题,目前总体水平仍然不高,特别是在短期与临震预测的水平方面,与社会需求还相距甚远。例如,著名的日本东海大地震和美国的帕克菲尔德地震的预报实践表明,即使对于这种看起来很有规律的历史地震序列,准确地预报也是很困难的^[2]。面对这样严峻的现实,产生“地震系统属于自组织临界性系统,而具有自组织临界性的现象是不可预测的”不可知论,也就不足为怪了。

综上所述,要实现地震预测、预报的目标,目前还有许多困难需要克服,所以现在还只能说它是我们希望达到的、地球科学研究的一个宏伟目标。

1.4 本书的主要论点及内容

1.4.1 本书不认同“地震系统属于具有自组织临界性的系统,因而地震是不可预测的”观点

本书认为:根据非平衡态热力学的理论,所谓自组织现象是指一个开放系统,当其某参数达到或超过临界值时系统发生的从无序到有序的现象,并且任何一种有序状态的出现都可看成某种无序的参考态失去稳定性的结果^[4]。由此可见,所谓自组织实际上是对源自于热力学第二定律的“有序状态将自发地转变为无序状态,而无序状态不会自发地转变为有序状态”的传统认识的一种再认识。即自组织表明:在一定条件下,开放系统能由无序状态自发地转变为有序状态。然而,地震是对震源区

系统原来的有序的一种破坏,是使震源区由有序到无序的一种失稳性的突变(这里所说的失稳是由有序到无序的失稳,而非由无序到有序的失稳)。综上所述可以看出,说地震系统属于具有自组织临界性的系统,似乎有悖自组织的原意。

其次,“任何一个小事件都有可能以一定的概率级联式地演化成大事件(即引发地震),而级联是否会发生则与整个系统内的所有细节有关”的观点,其实是源自与非线性理论有关的一些论述。例如,对于确定的初始值,从数学上说,动力学系统给出一个确定性的解或过程。但在某些系统中,这种过程可能由于对初始值的极微小扰动而有很大的变化,即系统对初值的依赖性十分敏感,因而从物理上看,得到的解似乎是随机过程,它是非线性动力学系统具有内在随机性的一种表现^[5]。显然,由此就可以很自然地引申出:由于地球构造运动的环境和过程都十分复杂,描述这一过程的动力学方程只能是非线性的,其对初始值的依赖性也会十分敏感,以致初始值的极微小扰动就有可能引发很大的变化,从而导致失稳,引发地震。然而,初始值的极微小扰动实际上是无法预测和不可避免的,因此就得出了地震是无法预测的悲观结论。

然而,已有的观测资料及历史记录都表明,地震(尤其是大地震)具有一定的活动周期,例如,我国青藏高原南部、天山地区的地震活动周期分别是几十年和 100 年左右,而东部区是 300~400 年^[1]。可见地震并不是随机事件。地震实际上是因地球构造运动促使孕震体内岩石发生大尺度破裂的能量逐渐累积,当其累积到临界值时才会发生的一种自然现象。因此,只有当累积的、促使孕震体内岩石发生大尺度破裂的能量接近临界值时,地震才有可能因某些小事件(小扰动)而引发。在累积的能量未接近临界值之前,任何小事件(小扰动)是不能引发地震的。因为促使孕震体内岩石发生大尺度破裂的能量累积过程,其实是一个与地震活动周期同步的缓慢过程,它不可能因任何小事件(小扰动)而导致能量累积速度突变,所以认为任何小事件(小扰动)都能引发地震的观点不成立。另外,从数学的角度看,体系的某种特定状态相当于描述体系的动

力学行为的动力学方程(常微分方程或偏微分方程)的某个特解,因此失稳现象应相当于微分方程的特解失稳。但是,一个不稳定的特解是不能描述在宏观时间间隔内可以观测到的时空有序状态的,体系的这种状态必须相当于动力学方程的某个稳定的特解,因此能正确描述体系的力学行为的动力学方程必须既有不稳定的特解又允许稳定的特解。按照微分方程的理论,具有这种特性的微分方程必须是非线性的^[4]。由此可见,能正确描述地球构造运动过程的动力学方程一定是既具有不稳定的特解,又允许稳定的特解的非线性方程。但需要指出的是:一个真正能完备地描述地球构造运动的动力学方程组,除既具有不稳定的特解又允许有稳定的特解之外,还需要能够解决在什么样的特定情况下才会导致不稳定的特解(即地震)的出现。这意味着在这样的动力学方程组中,除应包括通常被认为是能够决定地球构造运动状态的非线性的运动方程、物理方程和几何方程之外,还应该包含一个能够判定在什么样的情况下会导致上述非线性动力学方程组出现不稳定特解(即发生地震)的准则。就像在对弹、塑性结构进行分析时,除需要建立与之相应的平衡方程、物理方程和几何方程之外,还需要建立一个与之相应的屈服准则,否则仅根据缺少屈服准则的方程组无法判定所研究的弹、塑性结构是处于正常工作状态还是处于塑性流动状态。鉴于地震是因地球构造运动而引发,因此只有在建立了包括“准则”在内的、能够完备地描述地球构造运动的动力学方程组的基础上,才能判定在什么情况下会发生地震(即导致不稳定特解)。本书将重点讨论建立上述准则的思路、方法和技术路线。

1.4.2 本书认为地震的孕育和发生从本质上说是一个力学问题

地震的孕育和发生,是地球构造运动导致地壳介质受力、变形,从而累积和释放能量的过程,当累积的能量达到或超过临界值时,因释放能量而导致的地震也就发生了。因此,本书将基于力学中的能量原理研究地震的孕育和发生过程。

1.4.3 本书各章的主要内容

本书第1章为绪论。

第2章介绍由作者根据非平衡态热力学理论,提出和证明的一个最小耗能原理(或称新最小熵产生原理)。该原理可表述为:在非线性非平衡态热力学系统中发生的任何耗能过程,都将在与其相应的约束条件下,以最小耗能的方式进行^[6~8]。鉴于地震是因地球岩石壳发生大尺度破裂而引发,众所周知任何材料或结构的破坏(包括地球岩石壳发生的大尺度破裂)都是一个需要消耗能量的过程(即耗能过程),因此地震应受到最小耗能原理的规范。

虽然地震学家们已经就地震应该是一个与自然界的普适性定律密切相关的理论问题达成了共识,但地震究竟与什么样的自然界的普适性定律密切相关,至今还没有定论,以致目前的“地震学”基本上还是一门“观测科学”^[1,2]。地震应受到最小耗能原理的规范表明,最小耗能原理应该就是与地震密切相关的自然界的普适性原理。

第3章重点论述最小耗能原理是一个与地震现象密切相关的、自然界的普适性原理,并根据该原理对为什么会出现地震带、地震空区,为什么海岭的转换断层总是倾向垂直于海岭以及发生特征地震需要满足什么条件等问题进行探讨。

如1.4.1节所述:一个真正能完备地描述地球构造运动的非线性动力学方程组,必须包含一个能够判定在什么情况下会导致该非线性动力学方程组出现不稳定特解(即引发地震)的准则。

本书第4、5章根据“引发地震的地球岩石壳的大破裂产生机制有两种基本类型:一种是沿着老断裂锁住段的重新滑动,另一种是形成一定规模的新断裂”^[9]的观点,分别建立了能对上述两种基本类型破裂所引发的地震进行研究的基于最小耗能原理的整体破坏准则和基于最小耗能原理的复合型断层扩展准则。上述两准则与相应情况下的、能够描述地球构造运动的非线性的运动方程、物理方程及几何方程一起,构成了相应情况下的真正能完备地描述地球构造运动的动力

学方程组。

第6章分别讨论第4、5章建立的两个准则在地震预测、预报中的应用,并且指出,基于最小耗能原理的整体破坏准则比较适用于研究因老断层锁住段再破裂引发的地震;基于最小耗能原理的复合型断层扩展准则比较适用于研究从断层终点开始的、沿某方向产生的延伸性新断裂引发的地震。同时,介绍应用上述两准则预测、预报地震三要素的基本思路、步骤和方法及应用举例。

第7章讨论目前根据地震前兆预测、预报地震的可能与困难,提出按第6章所述方法预测、预报地震需要解决的四个问题及如何解决这四个问题的思路,最后介绍作者对两篇有关论文的思考 and 讨论。

作者于2011年撰写了“地震与最小耗能原理”一文,并将该文投寄给有关学术刊物,根据审稿意见,作者对该文进行了多次修改与补充,后因篇幅过大而将其分为三篇文章,即地震与最小耗能原理(Ⅰ)——最小耗能原理是与地震密切相关的自然界的普适性原理,地震与最小耗能原理(Ⅱ)——整体破坏准则及其在地震预测、预报中的应用,地震与最小耗能原理(Ⅲ)——复合型断层扩展准则及其在地震预测、预报中的应用。在投寄《地震》之后又遵照该刊编辑部的意见,将以上四篇文章(包括初稿)删减合并写成文献[10]。本书是在综合前述四篇论文内容的基础上进一步充实和完善写成。

文献[11]~[13]是在北京大学王仁院士主导下,按认为“地震的孕育和发生从本质上说是一个力学问题”的观点写出的三篇论文。其中文献[13]提到的:“本文所采取的模型没包括时间因素”“本文只考虑地震发生在原有断层内,而没有考虑断层带向两端延伸产生新断裂的情况,也即没有应用断裂力学来描述震源机制”两个问题,本书已通过建立起时间相依的整体破坏准则和根据断裂力学理论建立的复合型断层扩展准则(包括引入“蠕变断裂广义力强度因子”而将其推广应用于黏弹体,因而可以考虑因黏弹性而导致的时间因素)予以解决。因此可以认为,本书是前人工作的继续。显然,像地震预测、预报这样的世界性科学难题,只有通过这种接力式的不断努力,才有可能攻克。

参 考 文 献

- [1] 谢礼立,张景发. 颤抖的地球——地震科学. 北京:清华大学出版社,2005
- [2] 陈运泰. 地震预测——进展、困难与前景. 地震地磁观测与研究,2007,28(2): 1~24
- [3] 许绍燮. 地震预报发展战略在于创新. 国际地震动态,2005,5:30~33
- [4] 李如生. 非平衡态热力学和耗散结构. 北京:清华大学出版社,1986
- [5] 钱伟长. 非线性力学的新发展——稳定性、分叉、突变、混沌. 武汉:华中理工大学出版社,1988
- [6] 周筑宝. 最小耗能原理及其应用. 北京:科学出版社,2001
- [7] 周筑宝,唐松花. 功耗率最小与工程力学中的各类变分原理. 北京:科学出版社,2007
- [8] 周筑宝,唐松花. 最小耗能原理及其应用(增订版). 长沙:湖南科学技术出版社,2012
- [9] 梅世蓉. 地震前兆的地区性//梅世蓉地震科学研究论文选集. 北京:地震出版社,1993
- [10] 周筑宝,唐松花. 最小耗能原理与地震预测问题. 地震,2014,34(4):50~60
- [11] 王仁,何国琦,殷有泉,等. 华北地区地震迁移规律的数学模拟. 地震学报,1980,2(1):32~42
- [12] 王仁,黄杰藩,孙荀英,等. 华北地震构造应力场的模拟. 中国科学 B 辑,1982,(4):337~344
- [13] 王仁,孙荀英,蔡永恩. 华北地区近 700 年地震序列的数学模拟. 中国科学 B 辑,1982,(8):745~753

第 2 章 最小耗能原理

2.1 大自然的节约法则

稻秆和麦秆等植物都是空心的,其奥妙在于用最少的材料可取得最稳固的结构。许多果实及单细胞藻类植物都是圆球形,这是因为建造球形容器耗费的材料最少而容积最大。另外,据测定在 35°C 时水的比热最小,这意味着人的体温为 35°C 时保持体温恒定所吸收和放出的热量最小,即人体总是在耗能最小的情况下保持着自身体温的恒定。所有这些在有生命体中发生的奇妙现象,都曾被认为是在生物进化过程中经过“适者生存”这一自然法则长期选择的结果,并被称为大自然的节约法则。有趣的是,类似的节约法则在无生命的耗能过程中也普遍存在。例如,风、雨、水流侵蚀山崖、土体形成新的地貌时,总是遵循“欺软怕硬”的省力方式进行。又如,驱动物体破坏的能量,总是在物体的薄弱部位(如裂纹尖端、孔洞、缺陷等)聚集,从而导致著名的应力集中以及一些金属总是在薄弱部位特别容易被锈蚀等奇妙现象的出现。再如,液滴总试图保持最小表面以维持最小表面能……显然,对这些无生命耗能过程中依然存在的奇妙现象,是不能用“适者生存”的自然法则来解释的。本章将对此问题进行深入的探讨。

2.2 最小能耗原理和最小能耗率原理

100 多年前,亥姆霍兹(Helmholtz)提出了在恒力作用下黏性液体稳定运动能量耗散的一般性理论。他认为:在运动方程中惯性项可以忽略并满足连续性方程和运动方程的条件下,对于单值势的恒力作用下的不可压缩蠕流(creeping flow)运动,其任何区域内的能量耗散,将比具