



Earthquake Ground Motions &
Artificial Generation

地震地面运动及其 人工合成

杨庆山 田玉基 © 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

地震地面运动及其人工合成

Earthquake Ground Motions & Artificial Generation

杨庆山 田玉基 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书总结地震动及其时域-频域特性;介绍根据地震动功率谱和反应谱生成地震波的经典方法;重点阐述根据相位差谱生成非平稳地震波的过程。在生成单点地震波的基础上,提出考虑地震动空间变异性生成空间变异地震动场的理论与方法,并给出数值算例;总结近场地震动的脉冲特性,提出近场地震动的生成方法;介绍作者编制的地震波及地震动场生成软件SEAS及其操作方法。

本书可作为高等院校土木专业本科生、工程抗震方向硕士研究生学习地震动知识的入门教程,也为相关技术人员提供了快速生成人工地震波、地震动场的便利工具。

图书在版编目(CIP)数据

地震地面运动及其人工合成/杨庆山,田玉基著. —北京:科学出版社, 2014. 1

ISBN 978-7-03-039015-8

I. ①地… II. ①杨…②田… III. ①建筑结构-抗震结构-研究
IV. ①TU352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 262976 号

责任编辑:刘宝莉 孙 芳 / 责任校对:彭 涛
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014 年 1 月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:268 000

定价:86.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

自 1933 年美国获得第一条强震记录以来,有关地震动的研究开始迈向科学发展的轨道。随后,世界各地震多发国家布设了大量强震动观测仪器,从不同层次上构成台网、台阵、局部密集台阵,甚至三维台阵,这些台阵积累了近两万条强震记录,为研究强地震动特征和确定建(构)筑物结构地震动输入提供了宝贵的数据。在此基础上,根据大量实测地震动输入统计得到的地震反应谱成为结构地震最大反应分析的一条主要途径,并广泛应用于建(构)筑物抗震设计。

结构地震反应时程分析能够更丰富地反映地震动特征对结构反应和破坏的影响,是目前正在深入研究和积极应用的建(构)筑物结构抗震分析和设计的更合理途径。结构地震反应时程分析首先要选用合理的地震动输入时程,虽然目前积累了丰富的强震记录,但从中选取适合各种场地和结构的地震动输入时程仍然十分困难,甚至无法做到。地震地面运动是典型的随机过程,实际记录的地震地面运动是这一随机过程的具体实现,自 1947 年美国 Housner 首次提出用随机过程模拟地震地面运动以来,随机地震地面运动模型与工程应用研究得到了很大的发展。地震地面运动随机过程模型使特定震源和场地条件发生的个别地震动样本时程推广到了可能概括不同震源机制和场地条件的地震动时程样本总体,使我们有可能通过地震动时程的样本总体——随机过程模型,应用合理方法得到适合各种场地和结构的地震动输入时程,从而合理地进行结构地震反应分析和抗震设计。这是实现从地震地面运动随机过程模拟到工程应用的一种途径,也是本书系统介绍的主要内容。

建(构)筑物结构和生命线工程网络系统的地震反应时程分析和抗震设计需要一本系统总结地震地面运动及其人工生成研究成果、指导工程应用实践的著作。《地震地面运动及其人工合成》一书作者在多年相关研究的基础上,系统总结和归纳了地震动的时域和频域统计特征、相位差谱及其统计特性,较好反映了这些特性的单点平稳和非平稳随机过程模型、空间相关的平稳和非平稳随机场模型,以及基于这些随机地震动模型得到的适合不同场地条件、满足不同抗震标准要求的地震动时程人工生成方法等方面的研究成果,对于指导工程结构与系统的地震反应时程分析和抗震设计具有重要意义。近十年来,国内外连续发生的近断层强地震(包括城市直下型地震)呈现出更复杂、更具破坏性的地震地面运动特征,该书最后章节介绍了近断层地震地面运动的主要特征、参数统计和地震动时程模拟方法,对于

前 言

强烈地震会使结构坍塌,危害人类生命安全,造成极大的经济损失。为了保证结构物在使用期间具有足够的抵御地震灾害的能力,必须掌握以下两个方面的知识:一是结构物附近若发生地震,其场址处地震动的性质;二是结构物在地震动荷载作用下的动力反应。本书将要讨论的是前一方面的内容,即场址地震动。

对场址地震动的研究,即设计地震动参数估计和设计地震动时程预测,是地震地质学、地震学和结构动力学之间的交叉学科,其目的是为结构物的抗震分析提供可靠的地震输入,对保证结构物的抗震能力和经济设计具有十分重要的意义。

自 20 世纪初以来,人们开始在设计各类结构时考虑地震动的影响;到 20 世纪中叶,各国规范大都要求采用地震反应谱法设计抗震设防结构。随着核电设施、超高层建筑、海洋平台、大跨桥梁等重大工程结构的大量建设,人们逐渐认识到对这些重大结构若仅按地震反应谱法进行线性设计是不够的,因此建议对它们进行地震反应的时程分析,以便校核。

在地震反应的时程分析中,首先需要确定的就是地震动加速度时间历程。虽然人们在过去几十年中记录到的实际地震动的数量已大大增加,但由于地震动记录处的场地条件与拟建工程的场地条件可能有很大差异,使得已有实际地震波仍不能满足实际需要,因此,模拟具有某些特征参数的地面运动一直是地震工程中的一个重要且活跃的研究领域。

若考察的对象为大跨桥梁、输油管线等延长型结构或者大跨空间结构,结构各支点处的地震地面运动互不相同但又具有一定相关性,对这类多点支承结构进行动力分析时,需要一组具有空间相关性的地震动时程,即地震动场。由于局部密集台阵布置的较少且晚,又因场地条件的原因,得到一组满足场地条件的实测地震波更加困难。然而随着上述大型工程的大量建设,对模拟符合特定场地条件和空间相关性要求的地震动场的需求十分迫切。

随着经济建设的逐步发展,在地震断裂带附近修建大跨桥梁、输油管线、大坝等生命线工程及民用建筑的可能性越来越大。已有地震动记录表明,近断层地区的地震地面运动与远场地区的地震地面运动之间存在着显著差别,了解、认识这些差别对于该类地区的结构抗震设计具有十分重大的意义。目前,近断层地震动的记录相对较少,对近断层地区地震动的人工模拟,特别是脉冲型地震动的人工模拟,已成为近断层地区结构抗震分析的基础需求。

十多年来,作者及其团队完成了国家自然科学基金面上项目“空间变异地震场

作用下桥梁结构延性性能研究”(59708007)和“近断层地震作用下中高层耗能减震结构的地震响应和设计方法”(50478063)、留学归国人员启动基金项目“地震动相位差谱统计特性及其在人工地震动合成中的应用”及北京重点实验室项目和教育部博士点基金项目。这些项目从不同侧面对地震动(场)及其人工合成进行了研究,本书是作者在该方面取得的研究成果的总结。此外,为了便于理解,书中也包含了一些必要的基础知识。

为了较准确把握未来地震动的特性,必须深入了解和充分认识已获得的地震动记录,因此,本书第1章简单介绍地震发生的过程及地震波的组成、震级、烈度等地震动的相关知识。由于地震的发生具有不可精确预测性,在空间和时间上表现出强烈的随机性,同时地震地面运动的加速度、速度、位移时程函数具有明显的非周期性和随机性,因此,应将地震动看成随机事件并数学化为一个随机过程,每条地震记录为随机过程的一个样本函数,为了便于后面的分析,第2章介绍用于描述地震动的数学预备知识——随机过程。第3、4章分别介绍地震动加速度时程的时域和频域统计特征,包括峰值、持续时间和包络函数等时域参数和傅里叶谱、功率谱和反应谱等频域参数。基于地震动的上述时域、频域特征,第5章给出了单点地震动加速度时程合成的经典方法及设计反应谱拟合方法;鉴于第3、4章介绍的时域和频域统计特征尚不能从本质上描述地震动的时域非平稳特性,第6章介绍影响地震动非平稳特性的本质参数——相位差谱及其统计特性;第7章给出基于相位差谱的地震动合成方法及设计反应谱拟合方法;第8章介绍描述地震动空间变异性的参数——相干函数,并给出统计模型的研究成果;第9章以第6~8章为基础给出空间相关非平稳地震动场的模拟和反应谱拟合方法;第10章介绍了近断层地震地面运动的主要特征,并提出近断层脉冲型地震动的模拟方法。我们一直认为,受国家基金资助的研究除应以论文和书籍的形式向大家呈献可资借鉴的成果外,还应尽可能地提供可供他人直接使用的研究成果,以减少和避免不必要的低层次重复,或便于他人在这类成果的基础上更快地取得更好的成果,或便于对这些成果进行具有可操作性的复核和校核。因此,在我们的研究过程中特别注意将取得的理论成果软件化,以方便读者直接使用。第11章就介绍作者编制的地震地面运动(场)模拟软件 SEAS 的基本功能和使用方法,读者可通过 qshyang@bjtu.edu.cn 或 yujitian@bjtu.edu.cn 免费索取。

本书由杨庆山与田玉基合作完成。杨庆山于1996~1997年在北方交通大学(现北京交通大学)博士后科研流动站工作期间完成了本书的基本构架,随后指导研究生完成了部分程序的编制工作,并取得了相应成果;可惜该工作一度停滞,直至2002年田玉基到北方交通大学(现北京交通大学)博士后科研流动站工作后才得以继续进行,田玉基对本书的基本构架进行了充实和完善,增加了近场地震动方面的内容,编制了全部计算程序。研究生张瑾为计算程序配备了实用的操作界面,

完成了计算程序的软件化,刘文华生成了国家体育场地震反应分析所需地震波。书稿具体分工为:第1、2、4章由杨庆山撰写;第3、5~8章由田玉基、杨庆山合作完成;第9~11章由田玉基撰写。全书由杨庆山统稿。

在本书即将出版之际,谨向近二十年来不断给予指导和帮助并欣然为本书作序的欧进萍院士致以由衷谢忱。欧老师在序言中对我们提出了很高的要求,为了达到这一要求,我们对原稿又进行了长时间、大幅度的修改。还要感谢国家自然科学基金委员会、教育部、北京市对相关项目的资助和支持。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

杨庆山

2013年8月15日于北京交通大学

目 录

序

前言

第 1 章 地震及地震动的基础知识	1
1.1 地球构造与地震成因	1
1.2 地震波	4
1.3 地震仪	7
1.4 震源位置	10
1.5 震级	11
1.6 地震烈度	14
第 2 章 随机过程的基础知识	18
2.1 随机过程的时域特征	19
2.1.1 样本的时间平均与总体平均	19
2.1.2 平稳随机过程和非平稳随机过程	20
2.2 随机过程的频域特征	20
2.2.1 时间平均自相关函数的傅里叶变换	21
2.2.2 总体平均自相关函数的傅里叶变换	22
第 3 章 地震动加速度时程的时域特征参数	29
3.1 地震动加速度峰值	29
3.2 地震动持续时间	31
3.3 地震动包络函数	31
第 4 章 地震动加速度时程的频域特征参数	36
4.1 地震动加速度的傅里叶谱	36
4.1.1 傅里叶幅值谱	37
4.1.2 傅里叶相位谱	44
4.2 地震动加速度的功率谱	44
4.2.1 平稳随机过程模型	45
4.2.2 非平稳随机过程模型	49
4.3 地震动加速度的反应谱	51
4.4 地震动频谱特性间的相互关系	53

第 5 章 地震动合成和反应谱拟合的传统方法	56
5.1 地震动的合成	57
5.2 地震动的设计反应谱拟合	65
第 6 章 相位差谱、相位导数与地震动的非平稳特性	75
6.1 相位谱与非平稳性	75
6.2 相位差谱及其离散概率密度	78
6.3 相位导数及其概率密度函数	80
6.3.1 相位导数的概念	80
6.3.2 相位导数的概率密度函数	83
第 7 章 基于相位差谱、相位导数的地震动合成及反应谱拟合	87
7.1 相位差谱的统计模型	87
7.2 基于相位差谱的地震动合成	93
7.3 基于相位导数的地震动合成与反应谱拟合	98
第 8 章 地震动场的空间变异性	102
8.1 相干函数的理论模型	104
8.1.1 影响相干函数的因素	104
8.1.2 不相干效应	105
8.1.3 行波效应	108
8.1.4 衰减效应	109
8.1.5 局部场地效应	110
8.1.6 相干函数的理论模型	112
8.2 相干函数的经验模型	113
8.2.1 Harichandran 模型	113
8.2.2 Hao 和 Oliverra 模型	114
8.2.3 Abrahamson 模型	117
8.2.4 Yang 模型	118
8.2.5 竖向地震动的相干函数模型	120
第 9 章 空间相关地震动场的合成及反应谱拟合	122
9.1 空间相关地震动场的合成	122
9.2 空间相关非平稳地震动场的反应谱拟合	136
9.3 与已知地震记录相关的地震动场合成	140
第 10 章 近断层脉冲型地震动的合成	145
10.1 近断层地震动的特点	145
10.1.1 上、下盘效应	145
10.1.2 方向性效应	146

10.1.3 永久地面位移效应	147
10.2 脉冲型地震动的参数统计与速度脉冲模型	149
10.2.1 速度脉冲的参数统计	149
10.2.2 速度脉冲简化模型	150
10.3 近断层脉冲型地震动的合成	155
第 11 章 地震动模拟软件 SEAS 的开发与应用	160
11.1 软件安装	160
11.2 软件操作说明	162
11.3 国家体育场设计地震动场的模拟	174
参考文献	181
附录 A 傅里叶变换	187
A.1 傅里叶级数	187
A.1.1 实数形式	187
A.1.2 复数形式	187
A.2 傅里叶积分	188
A.2.1 实数形式	188
A.2.2 复数形式	189
A.2.3 实变换与复变换的关系	190
A.3 离散傅里叶变换	190
A.3.1 实数形式	190
A.3.2 复数形式	192
附录 B 频率响应函数	193
附录 C 近断层脉冲型地震记录及其简化脉冲	194
索引	213

4.4	Relationship of Different Kinds of Spectra	53
Chapter 5	Traditional Methods of Generating Ground Motion	56
5.1	Generation of Earthquake Ground Motion	57
5.2	Generation of Earthquake Ground Motion Compatible to Designed Response Spectrum	65
Chapter 6	Phase Difference Spectrum or Phase Derivatives and Non-stationary Characteristics of Ground Motions	75
6.1	Phase Spectrum and Nonstationary Characteristics of Ground Motion	75
6.2	Phase Difference Spectrum and Its Probability Density Function	78
6.3	Phase Derivatives and Its Probability Density Function	80
6.3.1	Introduction of Phase Derivatives	80
6.3.2	Probability Density Function of Phase Derivatives	83
Chapter 7	Generation of Earthquake Ground Motion based on Phase Difference Spectrum or Phase Derivatives	87
7.1	Statistic Models of Phase Difference Spectrum	87
7.2	Phase Difference-based Generation of Earthquake Ground Motion	93
7.3	Phase Derivatives-based Generation of Earthquake Ground Motion	98
Chapter 8	Spatial Variety of Earthquake Ground Motion Field	102
8.1	Theoretical Model of Coherency Function	104
8.1.1	Influencing Factors to Coherency Function	104
8.1.2	Incoherency Effect	105
8.1.3	Wave Passage Effect	108
8.1.4	Attenuation Effect	109
8.1.5	Local Site Condition Effect	110
8.1.6	Theoretical Model of Coherency Function	112
8.2	Empirical Coherency Models	113
8.2.1	Harichandran Model	113
8.2.2	Hao and Oliverra Model	114
8.2.3	Abrahamson Model	117
8.2.4	Yang Model	118
8.2.5	Vertical Coherency Function Model	120

Contents

Foreword

Preface

Chapter 1	Introduction to Earthquake and Earthquake Ground Motions	1
1.1	Structure of Earth and Earthquake	1
1.2	Seismic Earthquake Wave	4
1.3	Measuring Instruments	7
1.4	Earthquake Focus	10
1.5	Magnitude	11
1.6	Intensity	14
Chapter 2	Introduction to Random Processes	18
2.1	Statistic Characteristics in Time Domain	19
2.1.1	Time-average of a Sample and Ensemble-average of Samples	19
2.1.2	Stationary and Non-stationary Random Processes	20
2.2	Statistic Characteristics in Frequency Domain	20
2.2.1	Fourier Transform of Time-averaged Auto-correlation Function	21
2.2.2	Fourier Transform of Ensemble-averaged Auto-correlation Function	22
Chapter 3	Statistical Characteristics of Ground Acceleration in Time Domain	29
3.1	Amplitude	29
3.2	Duration	31
3.3	Envelope Function	31
Chapter 4	Statistical Characteristics of Ground Acceleration in Frequency Domain	36
4.1	Fourier Spectrum	36
4.1.1	Amplitude Spectrum	37
4.1.2	Phase Spectrum	44
4.2	Power Spectral Density Function	44
4.2.1	Models for Stationary Random Processes	45
4.2.2	Models for Non-stationary Random Processes	49
4.3	Response Spectrum	51

A. 3. 2 Complex Expression	192
Appendix B Frequency Response Function	193
Appendix C Near Fault Pulse-type Records and Equivalent Velocity Pulses	194
Index	213

Chapter 9	Generation of Spatial Correlated Earthquake Ground Motion Field	
		122
9.1	Generation of Ground Motion Field	122
9.2	Generation of Ground Motion Field Compatible to Designed Response Spectrum	136
9.3	Generation of Ground Motion Field Correlated to a Record	140
Chapter 10	Generation of Near Fault Pulse-type Earthquake Ground Motion	
		145
10.1	Characteristics of Near Fault Earthquake Ground Motion	145
		
10.1.1	Effects of the Hanging Wall and Foot Wall	145
10.1.2	Directionality Effect	146
10.1.3	Permanent Displacement Effect	147
10.2	Statistical Parameters of Pulse-typed Ground Motion and Equivalent Model	149
		
10.2.1	Statistical Parameters of Pulse-typed Velocity History	149
10.2.2	Equivalent Velocity Pulse Model	150
10.3	Generation of Near Fault Pulse-type Ground Motion	155
Chapter 11	SEAS:Software for Generating Earthquake Ground Motion and Filed	
		160
11.1	Installation of SEAS	160
11.2	Specification and Operation of SEAS	162
11.3	Generating Earthquake Ground Motion Field for National Stadium	174
References		181
Appendix A	Fourier Transform	187
A.1	Fourier Series	187
		
A.1.1	Real Expression	187
A.1.2	Complex Expression	187
A.2	Fourier Integration	188
		
A.2.1	Real Expression	188
A.2.2	Complex Expression	189
A.2.3	Relationship between Real and Complex Expressions	190
A.3	Discrete Fourier Transform	190
		
A.3.1	Real Expression	190

第 1 章 地震及地震动的基础知识

人们对地震的了解可能来源于强烈地震造成的各种建(构)筑物的破坏及生命财产损失报道,也可能来源于不幸亲历者的回忆,但总的感觉,地震是偶然发生的自然灾害。实际上,地震在全球范围内经常发生,图 1.1 即为 2008 年 12 月 19 日 02:00:04(UTC)全球地震活动分布图。万幸的是,频繁发生的只是危害不大或没有危害的小震或微震,而非造成重大危害的强烈地震。地震的发生是由地球内部构造决定的。

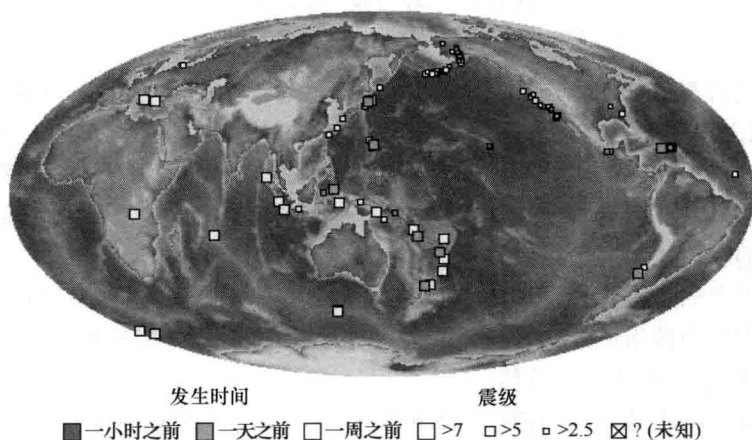


图 1.1 2008 年 12 月 19 日 02:00:04(UTC)全球地震活动分布图
(来自 <http://neic.usgs.gov/neis/current/world.html>)

1.1 地球构造与地震成因

地球是半径约为 6400km 的椭球体。虽然表面上看起来由坚硬的岩石构成,但实际上地球可分成界限分明的三层(图 1.2),即地壳(crust)、地幔(mantle)和地核(core),每层均有其各自的化学组分和性质。地壳是地球最外面薄而坚固的一层,海底处厚度最小,平均仅有 5km;陆地地壳的厚度大,平均可达 30~35km,但变化幅度较大,大山脉(如喜马拉雅山脉、美国内华达山脉)地区的地壳厚度最大可达 100km。陆地地壳的主要成分是花岗岩,海洋地壳的主要成分为玄武岩。

地壳以下是地幔,两者的分界面称为莫霍界面。在厚度达 2900km 的地幔中,铁和镁的含量比地壳中更多,使得其密度更大些。地幔的外层是脆性固体,其和地

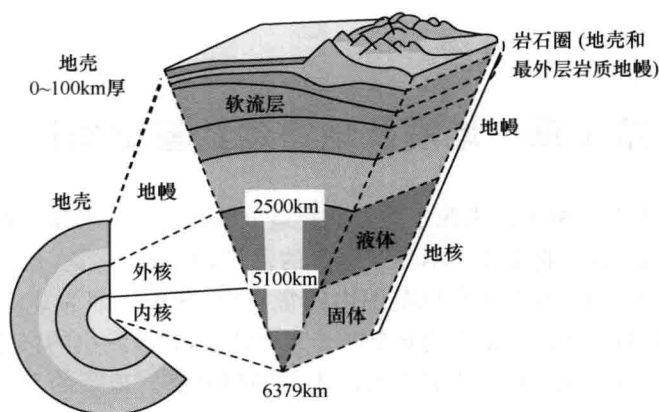


图 1.2 地球内部构造示意图

(来自 <http://earthquake.usgs.gov/bytopic/inside.html>)

壳一起构成岩石圈(lithosphere,实际上,地壳可看成岩石圈的表层);随着深度的增加,地球内部的温度也在不断升高,当到达地幔岩石圈以下时,部分岩石融化,称为软流层(asthenosphere),该层呈现出一定的韧性和塑性,使得其能够折叠、延展、压缩和缓慢流动。因此,相对较轻的脆性岩石圈实际上是漂浮在密度较大、缓慢流动着的软流层上。

地幔下面的地核是直径约为 3500km 且密度更高的球体,其由界限分明的流体外层和固体内核组成。与岩石构成的固体地壳不同,固体内核的主要成分是铁-镍合金,密度达岩石地壳的 5 倍。

地震发生的直接原因与刚性岩石圈的构造有关。已有研究表明,包括地壳在内、厚达 100~200km 的刚性岩石圈并非是一个整体,而是由几个大而稳定的板块(即相对刚性的固体岩石块体)组成,覆盖于地球表面(图 1.3),大板块有 7 个,如太平洋板块、欧亚板块、北美板块等,另外还有许多小的板块,如加勒比板块等。每一板块都坐落在其下的软流层上,相对于相邻的板块不停运动,速度最大可达 15cm/年,最小也为 2.5cm/年。板块运动将在相邻板块的边缘产生很大的拖曳力或挤压力,这些力作用于岩石圈的岩石上,引起其物理或化学变化。岩石圈的刚性和强度较大,可以传递较大的力而不发生大的变形,但当板块间积累的应力达到一定程度时,会使岩石突然脆断、滑移和弹性回跳(图 1.4),并在瞬间释放大量的能量,这些能量大部分会转化为地热,另有一小部分(一般不超过 10%)能量以波的形式向外传播,并引发地球的震动,即地震,岩石破裂处称为震源。

在构造板块的长期运动中,地壳岩层发生变形,当应变超过容许值时,岩层突然破裂,应变能瞬时转换为动能释放出来而形成地震,这样形成的地壳岩层中的断裂面称为断层[图 1.4(a)]。当断层两侧岩层的相对运动以沿地表断裂的走向为

主时,称为走向滑动断层[简称走滑断层,图 1.4(a)];其中,以沿断层面面向地下倾斜方向滑动为主时,称为倾向滑动(倾滑)断层。在倾滑断层中,位于倾斜断层面上部的断盘称为上盘,位于倾斜断层面下部的断盘称为下盘;若上盘块体相对下盘作向下运动,则称为正向断层,反之称为逆向断层[图 1.4(a)]。

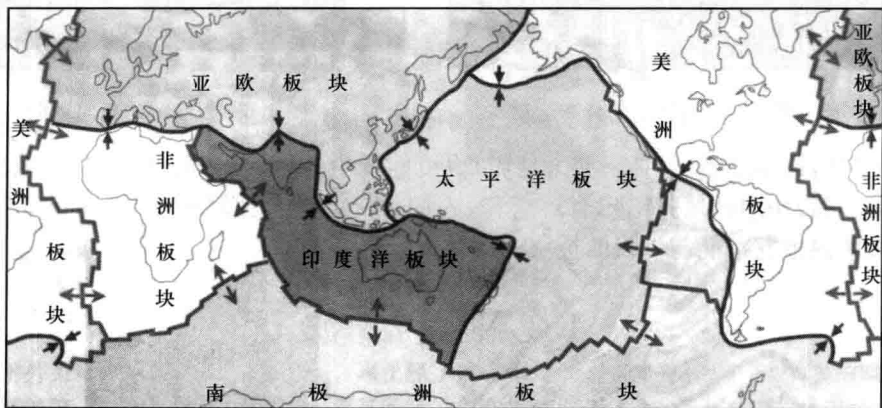


图 1.3 地球板块示意图

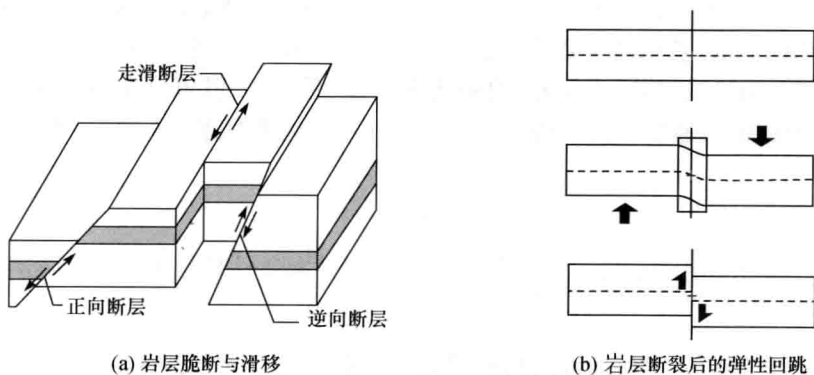


图 1.4 岩石的脆断、滑移和弹性回跳

由于岩石性质的不同,地壳岩层也会发生另外一种破坏形式,即板块两侧不发生突然滑移,而是缓慢研磨,沿着一个倾斜面缓慢运动但仍黏结在一起,这种破坏形式释放能量的时间较长,不会引起大的地震动。当然,板块之间的相对运动除图 1.4所示的错动外,还有分离运动或发生压挤的相向运动。当地球内应力较大而局部地壳又比较薄弱时,地幔中的岩浆会从板块内的缝隙挤喷而出成为地壳的一部分,此时,地壳的原有板块将发生图 1.5 所示的背离运动。当地球板块相向运动时,将发生板块间的相互挤压和碰撞,其中一种可能的形式就是一侧岩石圈板块切入到另一板块下面的软流层内(图 1.6),当下切岩石圈的变形达到一定程度时,