

水工程地震动输入参数分析

钟菊芳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水工程地震动输入参数分析

钟菊芳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书分析了重大工程场地震动输入参数确定中涉及的地震加速度峰值特性、时频谱的衰减特性、地震动空间变化性和相干特性,提出了考虑地震动三要素影响的设定地震方法和工程场地非平稳加速度时程合成方法等。

图书在版编目(CIP)数据

水工程地震动输入参数分析 / 钟菊芳著. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-5170-4006-4

I. ①水… II. ①钟… III. ①水利工程—工程地震—
参数分析—研究 IV. ①TV

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第321750号

书 名	水工程地震动输入参数分析
作 者	钟菊芳 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中献拓方科技发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13印张 305千字 2插页
版 次	2015年12月第1版 2015年12月第1次印刷
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

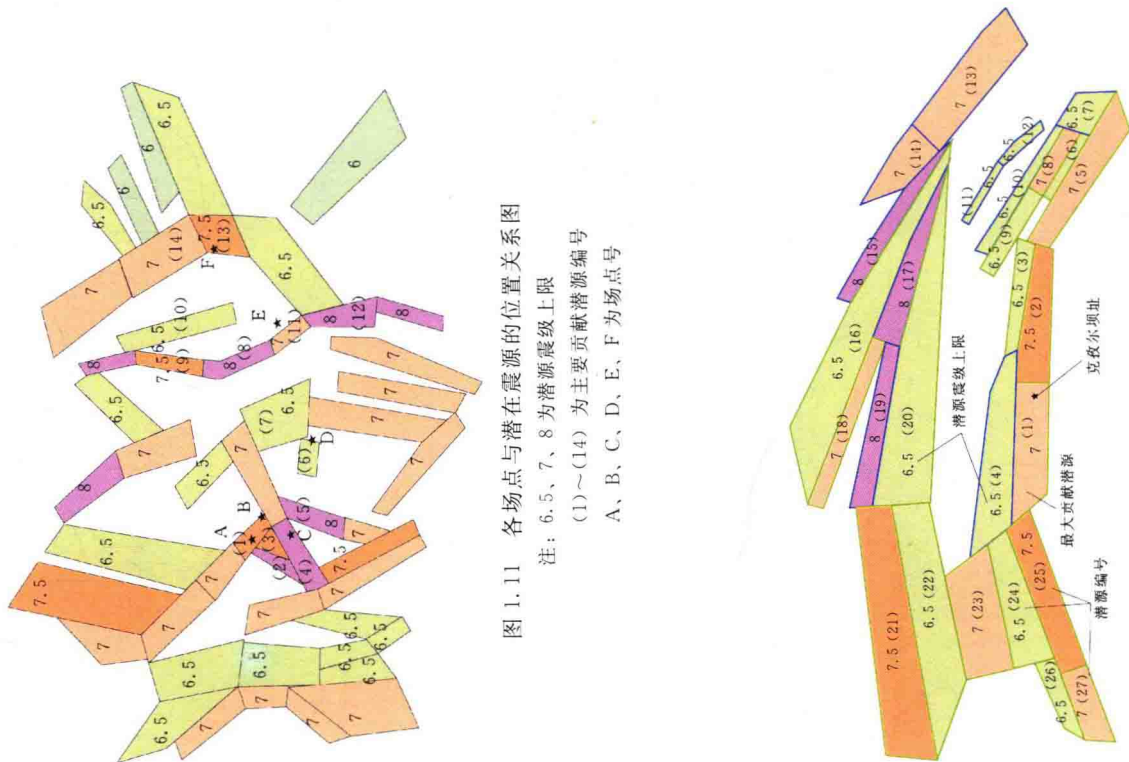


图 5.1 新疆克孜尔坝址与潜在震源的位置关系图

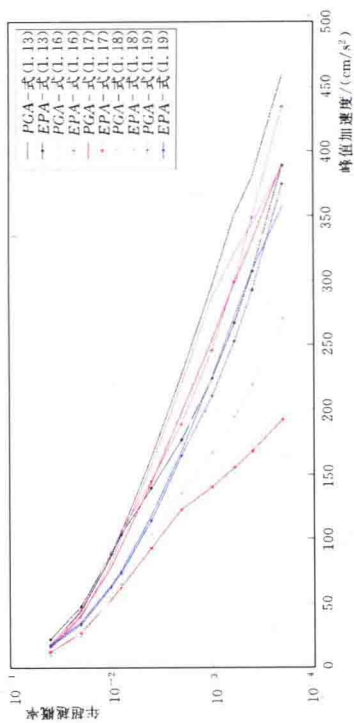


图 1.12 A 场点峰值加速度的年超越概率曲线

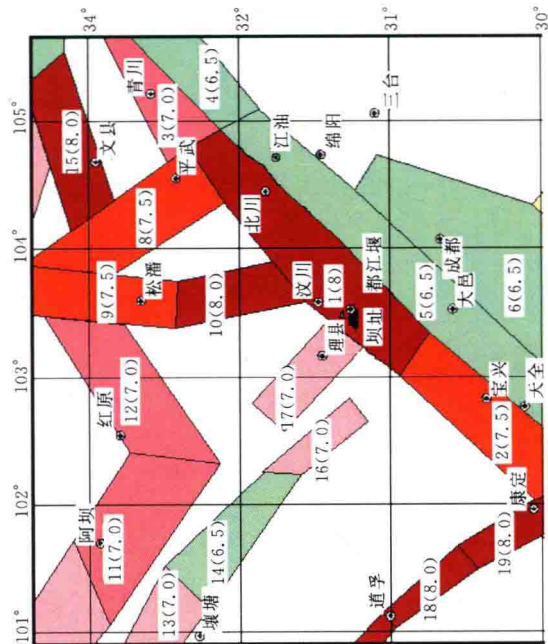


图 6.1 沙牌坝址周围潜在震源区位置分布图

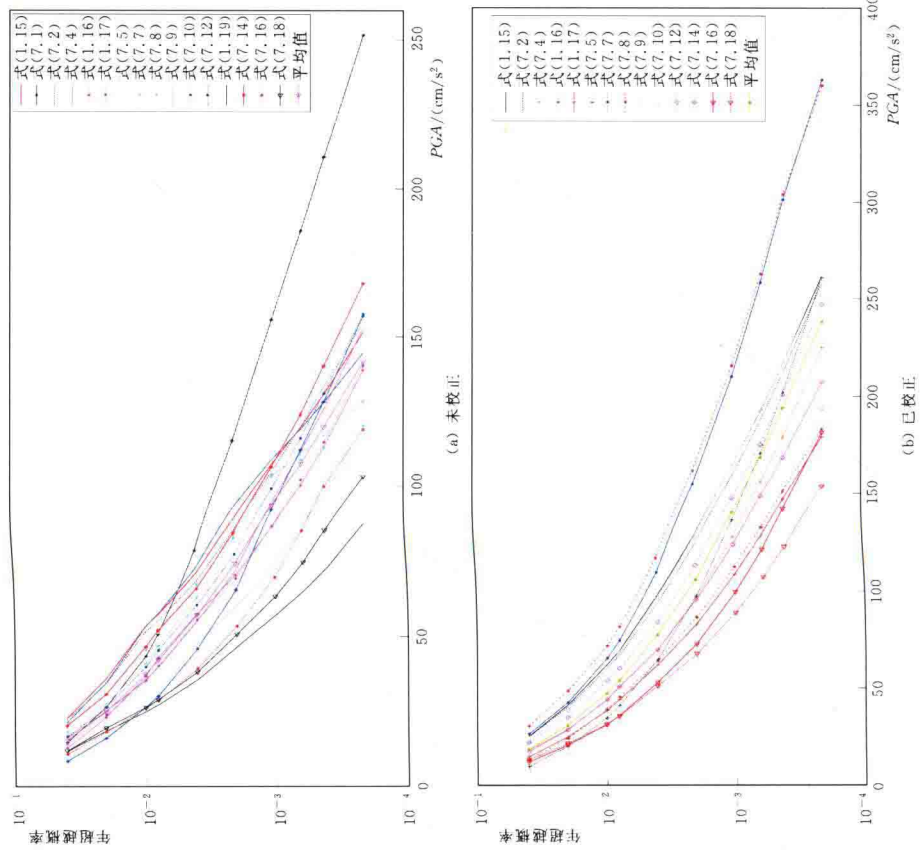


图 7.1 不同衰减关系式对应的坝址 PGA 年超越概率曲线

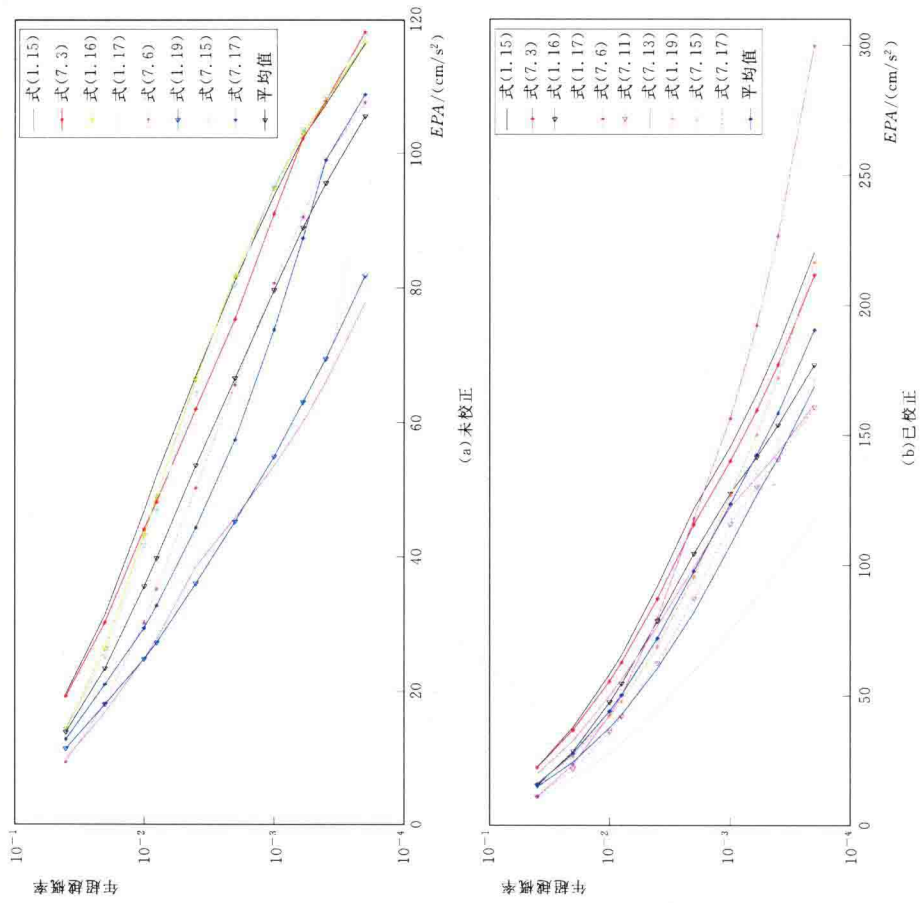


图 7.2 不同衰减关系式对应的坝址 EPA 年超越概率曲线

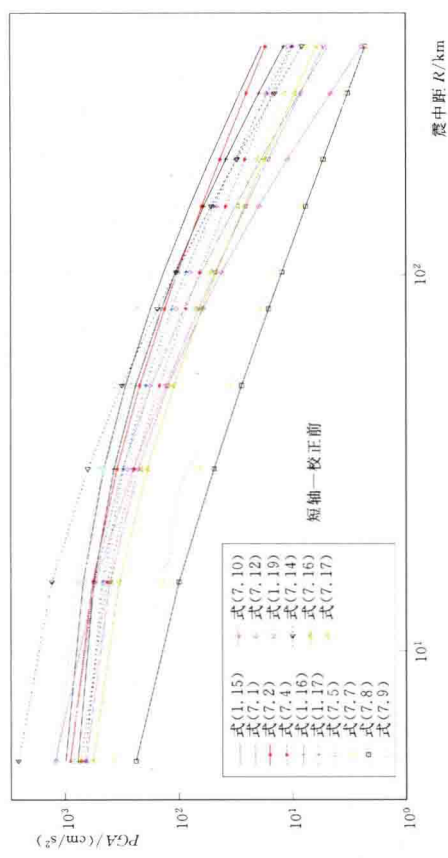
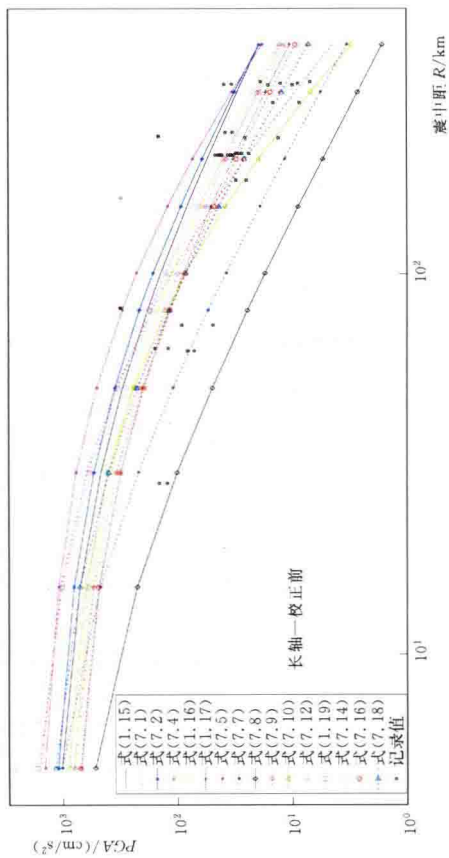


图 7.5 $M=8.0$ 时不同衰减关系对应的 PGA 随 R 变化规律与实测记录 PGA 的对比图 (校正前)

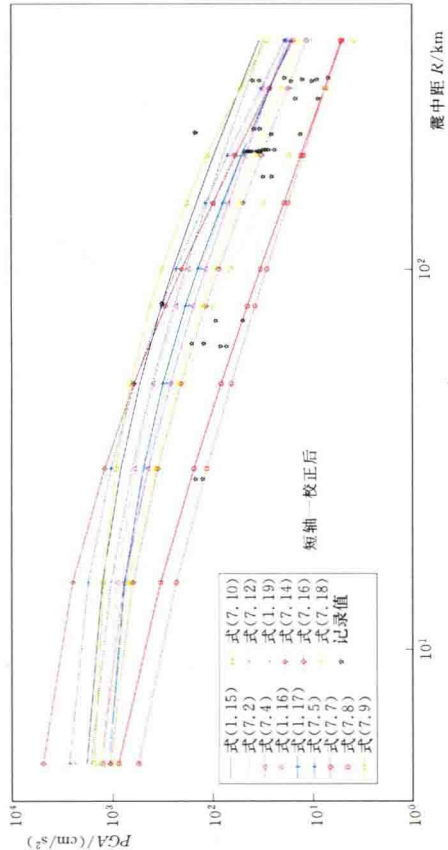
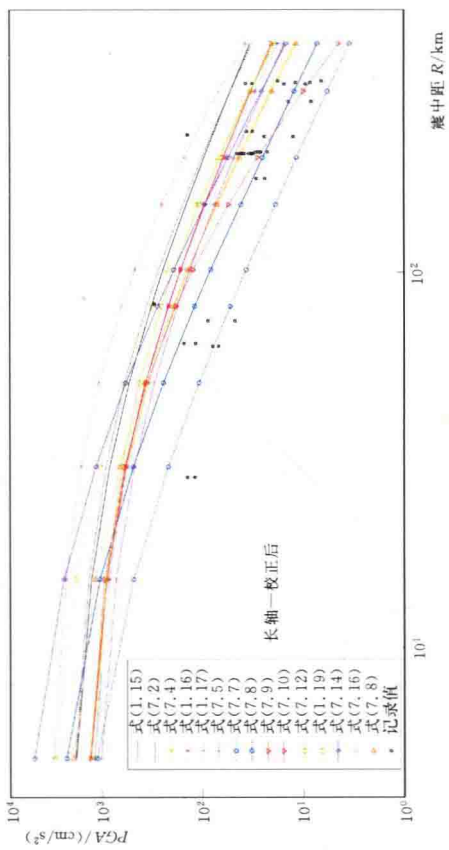


图 7.6 $M=8.0$ 时不同衰减关系对应的 PGA 随 R 变化规律与实测记录 PGA 的对比图 (已校正)

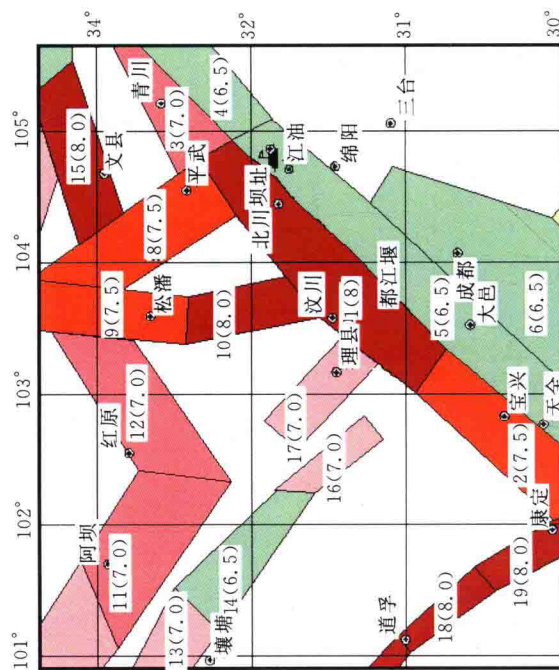


图 7.7 潜在震源区位置分布图

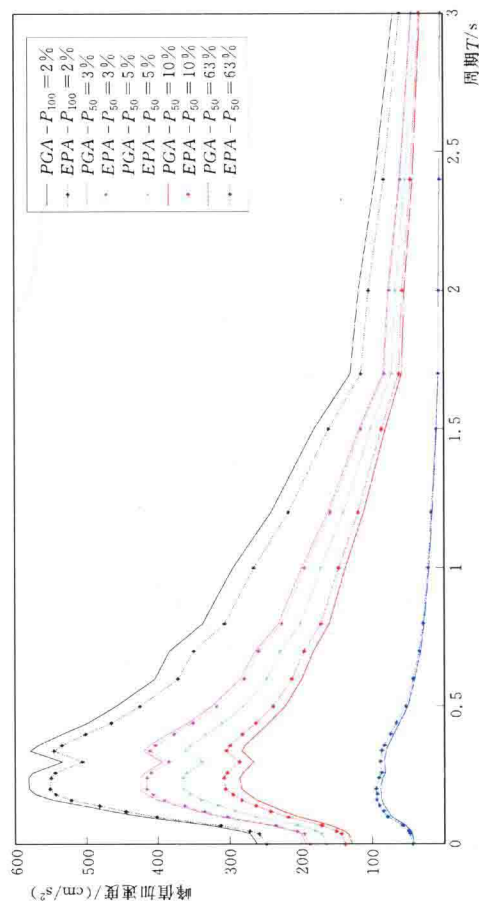


图 7.11 与设定地震对应的坝址设计反应谱

前言

PREFACE

地震是危害人类生命财产安全最严重的突发性自然灾害之一。我国是一个多地震国家,地震分布广、频度大、强度高,很多重大工程如核电站、大坝、海底隧道、大跨度桥梁等将不可避免地建于高地震烈度区。这种“难以避让”的抗震安全问题凸显了防止地震灾变、确保工程抗震安全的战略重要性^[1]。随着人类社会的发展和人们生活的高度城市化,地震必将对人们生命和生活设施及工业生产体系带来愈来愈严重的威胁。近 10 年来的几次大地震,造成的城市基础设施破坏、人员伤亡和财产损失令人触目惊心。如何确保重大工程的抗震安全,防止严重地震灾变的发生,是 2008 年我国“5·12”汶川大地震和 2011 年日本“3·11”大地震带给我们的新思考,也是我国重大工程建设中必须面对的严峻挑战。

为防止严重地震灾变的发生,重大工程抗震性能的研究引起了社会和工程界的重视。深入分析地震造成工程结构严重破坏的原因,改进和完善现有的抗震设计理念和方法,提高工程结构的抗震能力,减少未来地震引起的震害损失,是目前各国学者和工程师共同努力的方向^[2]。减轻地震灾害的有效途径是进行抗震设防。结构抗震设防的首要任务是确定输入地震动参数,合理的地震动输入是保证设计结果可靠和经济的必要条件^[3]。当前重大工程结构的抗震分析主要采用反应谱法和时程输入法。在以反应谱为参数的抗震设计理论中,仅考虑了地震动幅值和频谱对结构地震反应的影响,对结构尤其是非线性结构地震响应有明显影响的地震动持时没有得到应有的体现;事实上,目前大多数国家和地区的抗震规范均未将对结构非线性响应有显著影响的持时作为一项设计参数,在结构反应分析中没有得到应有的重视。反应谱法是基于各输入点具有相同地震动的假定基础之上的,没有考虑地震动空间变化性的影响。地震波传播过程中受行波效应、相干效应、衰减效应及局部场地效应等的影响,使得实际的地震动存在明显的空间变化性,且这种空间变化性的存在早已被强震记录资料所证实^[4],早在 20 世纪 50 年代地震动的时、空变化性就引起了人们的注意^[5],其对大跨度结构地震响应的显著影响也已被结构计算结果所证实^[6]。但在以往的抗震设计研究中,地震动空间变化性考虑较少。在现行的抗震规范中,除欧洲规范考虑了地震动的空间变化性外,其余规范都还是采用均匀输入

方式。尽管有研究者^[7]设法在反应谱法中考虑各点地震动的差异性,但由于在反应谱组合问题中存在不少问题,现仍难于在工程中得到应用。

仅将峰值加速度和反应谱作为输入参数不能全面反映地震动的特性,重大工程还要求采用时程输入法来了解结构在地震作用下的动力反应的全过程,目前用于输入的加速度时程主要采用拟合目标反应谱的人工合成方法得到,常用的拟合目标反应谱的人造地震动方法只通过强度包线函数部分考虑了地震动时程的强度非平稳性,地震动时程的频率非平稳性还没有得到很好的解决。而实际工程场地上所遭遇到的地震动是从震源经由不同途径到达场点的,地震波在传播途径中的消散,以及纵波、横波及面波到达的时差,使得地震动不仅强度表现出明显的非平稳性,其频率成分也是非平稳的;而且大量研究结果表明,地震动频率非平稳对线性和非线性结构响应均有显著影响^[8]。

我国国家质量技术监督局 2001 年颁布的 GB 18306—2001《中国地震动参数区划图》^[9]中采用了有效峰值加速度(EPA),而我国重大工程场地地震危险性分析所依据的国家标准 GB 17741—1999《工程场地地震安全性评价技术规范》^[10]采用的仍是基岩表面的最大峰值加速度(PGA),而且许多现行的行业抗震设计规范中规定的加速度峰值也为 PGA,显然,在地震加速度峰值参数的选取方面目前国内规范存在不相衔接的问题。

重大工程场地的地震动输入参数须经专门的地震危险性分析来确定,目前由综合概率法推求的一致概率反应谱综合了研究区内所有潜源的综合贡献,具有“包络”特征,不是地震环境下的真实样本实现,与实际地震反应谱相比,它过高地估计了设计地震动的中长周期成分,难于被工程界接受^[11]。为了得到与场地相关、具体地震的设计反应谱,地震工程界提出了设定地震方法,但现有的设定地震方法是以加速度峰值或某一周期点的反应谱为参数,没有考虑地震动持时对设定地震的影响,不能保证设定地震与地震构造环境的危险一致性。

本书在国家自然科学基金课题“大型泄水建筑物地震动输入机制研究”(编号 51069010)和“考虑断层各分段间相互作用的近场强地震动模拟方法研究”(编号 51468045)、水利部重大公益专项“中国重要大坝强震监测与地震动输入机制研究”(编号 2002DIA10002)和“水工程强震监测与健康动力诊断技术研究”(编号 201401009)以及南昌航空大学博士启动金项目“重大工程设定地震研究”(编号 EA200711090)等的资助下,主要探讨了重大工程场地地震动输入参数确定中涉及的地震加速度峰值特性、时频谱的衰减特性、地震动空间变化性以及综合考虑地震动三要素影响的设定地震方法和工程场地非平

稳加速度时程合成方法等内容。本书共7章,第1章以美国西部基岩和我国台湾 SMART-1 台阵土层强震记录资料为基础,通过对加速度反应放大系数谱的研究来确定基岩和土层的水平和竖向分量有效峰值加速度(EPA)的计算式;对最大峰值加速度(PGA)与有效峰值加速度(EPA)的相关性、比例关系及主要影响因素进行了分析,探求了PGA与EPA间的内在联系以及统计规律;给出了PGA、EPA随震级、震中距变化的衰减模型。第2章从工程实用出发,以美国西部基岩强震记录资料为基础,通过分析震级和震中距对时变功率谱模型参数及能量等效速度谱的影响规律,建立时变功率谱模型参数及能量等效速度谱随震级和震中距变化的衰减模型。第3~4章以 SMART-1 密集台阵的强震记录为基础,采用随机振动理论和多元统计回归方法,通过分析局部场地空间位置变化对地震动参数的影响,来建立峰值加速度(PGA和EPA)、强度包线模型参数、平稳功率谱模型参数及时变功率谱模型参数等随空间位置坐标变化的随机预测模型;通过相干性分析来探讨地震动的空间相干特性。第5~7章以概率地震危险性分析为基础,进行基于有效峰值加速度(EPA)和能量等效速度谱的设定地震方法及多点输入非平稳加速度时程合成方法的探讨。分别以克孜尔坝址、沙牌坝址和武都坝址为例,进行地震危险性分析和设定地震研究,给出坝址地震动输入参数值,并通过与现有方法的对比分析论证所提方法的合理性,以及采用设定地震方法来确定工程场地输入地震动参数的必要性。

在本书即将出版之际,谨向10多年来不断给予指导和帮助的胡晓教授级高工、吴胜兴教授、邢义川教授级高工、屈铁军教授和易立新教授等致以由衷的谢忱。向不断给予我关心、支持和帮助的南昌航空大学土木建筑学院的领导、同事们表示感谢。感谢国家自然科学基金委员会、水利部及南昌航空大学对相关项目的资助和支持,感谢国家强震台网中心提供的5·12汶川地震记录资料、中国水利水电科学研究院工程抗震研究中心提供的美国西部基岩强震记录和中国台湾 SMART-1 密集台阵记录资料。

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。

钟菊芳

2015年10月

目 录

前言

第 1 章 地震加速度峰值特性分析	1
1.1 概述	1
1.2 强震记录资料的选取	2
1.3 强震记录 EPA 的计算方法	5
1.4 PGA、EPA 相关性分析	8
1.5 PGA 与 EPA 比例关系分析	15
1.6 PGA 与 EPA 随震级、震中距的衰减分析	18
1.7 PGA 与 EPA 的影响因素分析	24
第 2 章 地震动时频谱的衰减规律分析	33
2.1 概述	33
2.2 时变功率谱的衰减分析	34
2.3 能量等效速度谱的衰减分析	48
第 3 章 地震动参数空间变化性分析	56
3.1 概述	56
3.2 空间变化性的分析方法	57
3.3 加速度峰值的空间变化性	59
3.4 强度包线函数的空间变化性	62
3.5 平稳自功率谱的空间变化性	69
3.6 非平稳功率谱的空间变化性	71
第 4 章 地震动相干特性分析	78
4.1 概述	78
4.2 相干函数的定义	82
4.3 相干函数值的计算	83
4.4 相干函数模型的提出	87
4.5 相干函数模型参数的拟合分析	87
4.6 相干函数模型的合理性分析	107
第 5 章 设定地震方法探讨	115
5.1 概述	115
5.2 设定地震方法介绍	117
5.3 设定地震方法在克孜尔坝址的应用	119

第 6 章 非平稳加速度时程合成方法研究	132
6.1 概述	132
6.2 基于随机相位的非平稳加速度时程的合成	133
6.3 时变功率谱超随机特性的影响分析	141
6.4 基于最小相位谱的加速度时程合成分析	159
6.5 考虑随机特性的基于最小相位谱的非平稳加速度合成方法	165
第 7 章 武都大坝坝址地震动输入参数确定	168
7.1 工程概况	168
7.2 地震活动性及地震构造环境分析	168
7.3 地震动参数衰减关系式的选取	171
7.4 坝址地震危险性分析	185
7.5 坝址设定地震及设计反应谱的确定	188
7.6 坝址基岩非平稳加速度时程的合成	190
7.7 坝址地震动输入参数	191
参考文献	192

第 1 章 地震加速度峰值特性分析

1.1 概 述

地震动（也称地面运动）是地震时由震源释放的地震波引起的地表附近土层的振动^[12]。工程师们通过对工程场地的地震动特性的了解来达到有针对性的工程抗震设防。在静力设计理论阶段，考虑的地震动参数仅为地震动幅值。幅值是对地震动过程最大强度的直接定义，可以为加速度、速度或位移等物理量中任何一种的峰值、最大值或某种意义下的等代值^[13]，提出最早、研究最多且使用最广的是峰值加速度、速度和位移，除此之外的其他幅值均具有有效或者等效的意义。

最大峰值加速度（PGA）通常指加速度时程的最大值，常由地震动的高频成分所决定。当考查地震动时程与结构响应之间的关系时不难发现，极高频地震动对结构物反应并无重要影响^[11-12, 14-16]，因为：①地震时震源释放出来的极高频的地震波只存在于震源附近，传播过程中会迅速衰减。②当地震动频率远离结构物自振频率时，由该地震动引起的反应与接近结构自振频率时的共振效应相比，影响甚小。③结构物大片刚性基础会滤掉极高频的振动。从结构抗震的观点来看，只有对结构反应有明显影响的量才是重要的量，因此认为由脉冲高频尖峰所决定的最大峰值加速度（PGA）并不是反映地震作用的理想抗震设计参数，工程界在乐于接受简单直观的最大峰值加速度（PGA）的同时也接受了各种具有等效意义的加速度幅值定义，如等反应谱有效加速度（ a_0 ）^[17]、概率有效峰值^[18, 19]、持续加速度（ a_c ）^[20, 21]、等效简谐振幅^[22]、均方根加速度^[23]、有效峰值加速度（EPA）等。

采用有效（或等效）峰值加速度代替最大峰值加速度的关键是如何合理地定义或计算有效（或等效）峰值加速度。1978 年美国应用技术委员会 ATC-3 结构抗震设计样本规范中采用了有效峰值加速度（EPA），将基岩水平向的 EPA 定义为 $EPA = \bar{S}_a(0.1-0.5)/2.5$ ，式中 $\bar{S}_a(0.1-0.5)$ 为 0.05 阻尼比的加速度反应谱在 0.1~0.5s 周期范围内的平均谱值，2.5 为这个周期范围内的平均动力放大系数。20 世纪 90 年代末，美国地质调查局（U. S. Geological Survey, Menlo Park, 简写 USGS）颁布的全国地震危害区划图^[24]中，又将基岩场地水平向的 EPA 定义为 $EPA = \bar{S}_a(0.2)/2.5$ ，其中 $\bar{S}_a(0.2)$ 为 0.05 阻尼比的加速度反应谱对应 0.2s 周期点的谱值。我国 2001 年国家质量技术监督局颁布的国家标准 GB 18306—2001《中国地震动参数区划图》^[9]中也采用了有效峰值加速度这一物理量，它将水平有效峰值加速度（EPA）定义为：与 0.05 阻尼比加速度反应谱最大值对应的水平加速度。陈厚群院士等通过对不同震级和震中距的基岩水平强震记录统计分析认为：基岩场地水平向的 EPA 按 $EPA = \bar{S}_a(0.2)/2.5$ 定义较为合理^[11]。

地震加速度峰值是抗震设计中的一项重要参数，其取值的高低直接影响抗震设防的标

准和基本建设投资。本章针对目前国际上建议用有效峰值加速度 EPA 代替最大峰值加速度 PGA 但 EPA 无统一定义式以及国内规范在 PGA 与 EPA 的采用方面存在不相协调的现状,以美国西部基岩和中国台湾 SMART-1 台阵土层强震记录资料为基础,主要就记录 EPA 的计算方法、PGA 与 EPA 两者间的统计特性和衰减特性以及 PGA 与 EPA 比例关系的影响因素等问题进行探讨,以得到水平和竖向记录 EPA 的合理计算方法以及 PGA 和 EPA 衰减关系式,并论证用 EPA 取代 PGA 的可行性和两者间的相互转换关系,便于工程设计人员合理选用 PGA、EPA 及与现行规范的配套使用。

1.2 强震记录资料的选取

1.2.1 记录资料的来源

自 1933 年长滩地震美国强震台站获得第一批加速度记录至今,地震工作者已获得大量有价值的强震记录资料,为地震工程研究及其工程应用积累了丰富的基础数据资料。中国水利水电科学研究院工程抗震研究中心长期关注并致力于强震观测台站的建设和强震记录数据的收集,现已收集到一定数量的国内外强震记录数据,并建立了强震数据库,便于数据资料查询和利用。本章中所采用的强震记录数据均来自于此强震数据库。

1.2.2 地震动影响参数的选用

震源的影响这里只考虑震级这一参数,虽然目前国际上多采用矩震级 M_w ,考虑到以前的许多地震都没有测定矩震级,而且国内的地震安全性评价工作中也没有使用矩震级,因此这里也不采用矩震级,而采用以下双重震级标定方法^[25]:

$$M = \begin{cases} M_L \text{ 或 } M_b, & M \leq 6 \\ M_s, & M > 6 \end{cases} \quad (1.1)$$

传播途径参数则采用震中距 R ,其值可根据震中和台站经纬度计算得到。计算时可先将地震的震中和记录台站经纬度转换成大地坐标:

$$\begin{aligned} X &= r \sin \theta \cos \varphi \\ Y &= r \sin \theta \sin \varphi \\ Z &= r \cos \theta \end{aligned} \quad (1.2)$$

式中: r 为地球半径,一般取 $r=6370\text{km}$; θ 为纬度; φ 为经度。

当震中和台站间的距离小于 200km 时,可采用以下近似计算式计算得到震中距 R :

$$R = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2} \quad (1.3)$$

由于重大工程结构的地震反应分析常以基岩地震动作为基底输入,其他土层场地条件下的地震动参数可直接通过土层反应分析得到,因此这里主要分析基岩强震加速度记录的峰值特性。其中基岩以含下列地质术语描述的场地为准:花岗岩 (granite)、闪长岩 (diomite)、片麻岩 (gneiss)、硅岩 (chert)、石灰岩 (limestone)、砂岩 (sandstone)、粉砂岩 (siltstone)、硬砂岩 (greywacke) 等^[25]。

由于覆盖土层对地震动具有削减隔震和低频放大双重效应;导致土层上的地震动明显有别于基岩地震动,基于加速度反应谱定义的土层 EPA 计算式也可能有别于基岩记录的 EPA 计算式。由于土层场地千变万化,而且局部土层条件对地震动特性具有显著影响,

这给土层地震记录峰值特性的统计分析带来了一定的困难；如果统计数据资料选取不当，统计结果的普适性和代表性很难保证。为了便于基岩和土层场地上地震动峰值特性的比较分析，这里选用 SMART-1 密集台阵的 37 个测点记录资料进行分析，因这 37 个测点均位于 2km 范围内的同一冲积土层上，且在这么小的局部场地范围内不存在明显的场地条件差异，因而认为所有测点均代表同一类场地条件。

1.2.3 美国西部记录

这里选取震级 $M \geq 4.5$ 、震中距 $R \leq 150\text{km}$ 、 $PGA \geq 10\text{cm/s}^2$ 范围内的基岩加速度记录进行分析。数据的选取是基于以下几点考虑：①震级过小的地震对结果影响不大，通常将 $M=4.5$ 定义为破坏性地震的下限。② PGA 值过小对结构的破坏作用不大，而 PGA 值过小的记录在数据处理中引起的相对误差较大。③基于地震动的衰减效应影响的考虑，通常小震和中强震经过大于 150km 传播距离衰减后强度已变得很小了，不足以对建筑物造成大的影响。共收集到满足条件的水平地震记录 96 条、竖向记录 48 条，这些记录分属 20 次地震 41 个台站，这些记录均为美国地质调查局校正后的记录资料。在水平记录的选取中，同一台站的两个水平分量看成是相互独立的两条记录，因通常这两个相互垂直的水平分量的地震动参数是不相同的，这样处理可更好地体现地震动随机变化的特性^[25]。记录在震级、距离平面内的分布情况见图 1.1，各次地震的相关资料见表 1.1。

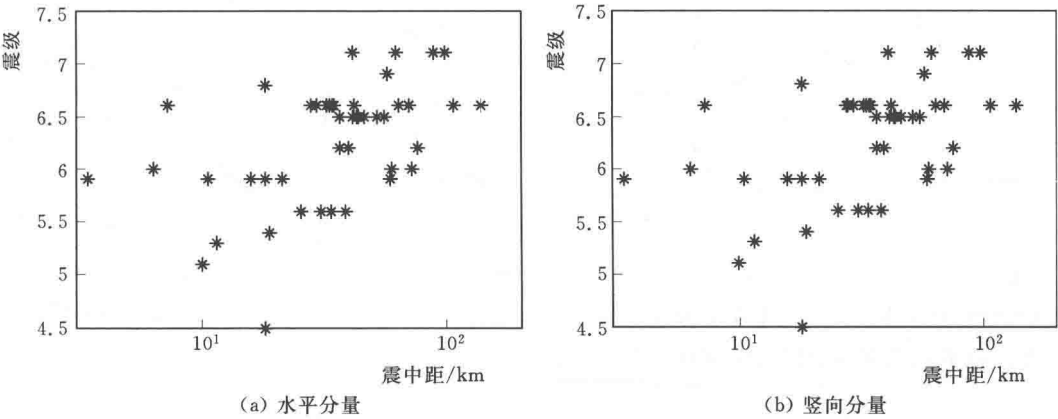


图 1.1 记录资料在震级 M 和震中距 R 平面的分布图

表 1.1 美国西部地震资料

序号	地震名称	发震日期 (年-月-日)	震中坐标/(°)		震级		记录数/条	
			纬度	经度	M_L	M_S	水平	竖向
1	Long beach eq.	1933-03-10	33.583N	117.983W	6.3	6.5	2	1
2	Helena mantana eq.	1935-10-31	46.617N	111.967W	6.0		2	1
3	Southern California eq.	1952-11-21	35.833N	121.167W	5.5	6.2	2	1
4	San Francisco eq.	1957-03-22	37.667N	122.483W	5.3		2	1
5	Southern California eq.	1965-07-15	34.400N	118.600W	4.5		2	1
6	Parkfield California eq.	1966-06-27	35.900N	120.900W	5.6	6.0	4	1
7	Borrego mountain cal. eq.	1968-04-08	40.500N	124.510W	6.4	6.7	2	1

续表

序号	地震名称	发震日期 (年-月-日)	震中坐标/(°)		震级		记录数/条	
			纬度	经度	M _L	M _S	水平	竖向
8	Lytle creek eq.	1970-09-12	34.270N	117.540W	5.4		2	1
9	San Ferando eq.	1971-02-09	34.400N	118.395W	6.4	6.6	26	13
10	Hollister eq.	1974-11-28	36.900N	121.500W	5.1		2	1
11	Coyote lake eq.	1979-08-06	37.112N	121.533W	5.6	5.9	4	2
12	Imperial valley eq.	1979-10-15	32.633N	115.333W	6.6	6.9	2	1
13	Livermore valley eq.	1980-01-24	37.840N	121.800W	5.6		2	1
14	Livermore valley eq.	1980-01-26	37.760N	121.700W	5.6		2	1
15	West Moreland eq.	1981-04-26	33.130N	115.650W	5.6		2	1
16	Coalinga eq.	1983-05-02	36.250N	120.280W	6.2	6.5	16	8
17	Morgan Hill eq.	1984-04-24	37.317N	121.680W	6.1	6.2	6	3
18	Whittier Ca. eq.	1987-10-01	34.062N	118.078W	5.9		8	4
19	Loma Prieta Ca. eq.	1989-10-18	37.040N	121.880W	7.0	7.1	8	4
20	Northridge eq.	1994-01-17	34.213N	118.537W	6.4	6.8	2	1

1.2.4 我国台湾 SMART-1 台阵记录

SMART-1(Strong Motin Array in Taiwan, Pnase 1) 是由我国台湾地球科学院、台湾大学与美国加州大学伯克利分校合作设置的强震观测台阵,是世界上第一个专门为研究局部范围内地面运动空间变化规律的强震台阵。SMART-1 台阵位于台湾岛的东北部,靠近罗东市,坐落在一个长 15km、宽 8km 的平坦冲积谷上。该台阵共布设了 39 个测点,本书中使用包括中心 C-00 测点在内的 37 个土层测点的记录资料,其中 36 个测点分别布设在以 C-00 为中心的三个半径分别为 200m、1000m、2000m 的同心圆周上,每周各布设 12 个测点,编号由内往外分别为 I-01~I-12、M-01~M-12、O-01~O-12。37 个测点的平面布置见图 1.2,相对位置坐标见表 1.2。

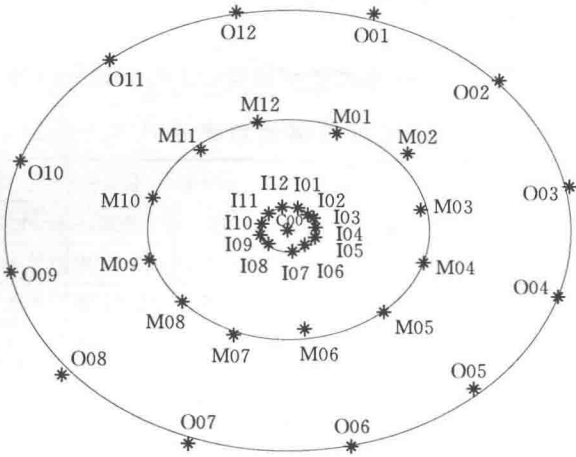


图 1.2 SMART-1 台阵 37 个测点的平面布置图

表 1.2 SMART-1 台阵 37 个测点的相对位置坐标表

测点 编号	半径 /m	方位 角/(°)	高程 /m	测点 编号	半径 /m	方位 角/(°)	高程 /m	测点 编号	半径 /m	方位 角/(°)	高程 /m
C00	0.0		6.1	M01	956.9	11.24	5.0	O01	2026.4	11.09	5.3
I01	193.3	9.07	5.9	M02	1099.9	39.32	4.4	O02	2008.2	42.19	4.9
I02	193.9	43.10	5.5	M03	946.1	68.39	4.0	O03	2040.7	72.67	3.4
I03	204.2	71.41	6.1	M04	1012.5	102.55	4.5	O04	1984.3	100.77	2.4
I04	206.8	102.05	6.1	M05	960.1	129.30	3.9	O05	1999.0	129.68	3.8
I05	201.8	131.60	6.3	M06	1002.7	162.15	4.3	O06	2010.2	161.81	4.8
I06	193.6	166.42	6.6	M07	1022.9	195.01	5.2	O07	2000.8	190.98	7.2
I07	200.6	194.98	6.3	M08	983.7	220.52	7.4	O08	2056.4	219.17	18.1
I08	187.7	220.65	6.2	M09	1033.9	248.49	10.8	O09	2045.2	249.92	9.6
I09	206.9	2551.93	7.0	M10	923.0	278.46	7.6	O10	2002.9	282.76	13.4
I10	199.7	280.53	7.0	M11	1002.0	312.36	7.1	O11	1948.8	312.33	9.1
I11	181.6	311.46	6.8	M12	1003.5	342.93	5.8	O12	1996.4	342.53	6.5
I12	201.4	342.90	6.4								

这里选用两组数据进行统计分析，一组为 $M\geq 4.5$ 、 $R\leq 100\text{km}$ 范围内的 41 次地震共 2863 条记录，其中竖向 952 条、水平 1911 条；另一组为第一组中的 6 次地震共 191 条记录，所选 6 次地震的主要特征见表 1.3。每个测点强震仪都记录了所在位置的三个相互垂直方向上的地震动分量，即两个水平分量和一个竖向分量，仍将同一测点的两个水平分量看成是相互独立的两条记录。

表 1.3 SMART-1 台阵 6 次地震的主要特征表

地震 编号	发震日期 (年-月-日)	震级	震源深度/km	震中距 /km	方位角 /(°)	震中经纬度/(°)	
						经度	纬度
E-45	1986-11-14	7.0	7	79	175	121.84E	23.96N
E-43	1986-07-30	6.2	2	6	150	121.79E	24.63N
E-39	1986-01-16	6.5	10	22	64	121.96E	24.76N
E-35	1985-08-12	5.7	8	5	26	121.79E	24.71N
E-18	1982-02-28	5.1	15	22	46	121.92E	24.81N
E-05	1981-01-29	6.3	25	30	154	121.92E	24.44N

1.3 强震记录 EPA 的计算方法

1.3.1 EPA 计算式的确定原则

参照我国 2001 年国家质量技术监督局颁布的 GB 18306—2001《中国地震动参数区划图》^[9]中有关有效峰值加速度 EPA 的确定方法，取加速度反应谱最大值对应的加速度为