

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

重大工程的动力灾变学术著作丛书



桥梁结构 抗震分析与地震保护

杜修力 韩强 著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
重大工程的动力灾变学术著作丛书

桥梁结构抗震分析与地震保护

杜修力 韩强 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍了作者十五年来在桥梁结构抗震减震领域的相关研究工作。全书共 14 章, 主要内容包括: 地震动特性及输入问题, 桥梁结构弹性地震反应分析方法, 桥梁主要构件非线性分析模型, RC 桥墩非线性分析模型, 土-基础-桥梁结构相互作用, 桥梁地震反应非线性分析方法, 直接基于位移的桥梁抗震设计方法, 空间地震动作用下桥梁随机反应, 基于多尺度有限元建模的桥梁地震倒塌分析, 桥梁地震保护装置, 减隔震桥梁地震反应分析方法, 摇摆桥梁结构分析与抗震设计, 桥墩地震动水压力分析方法, 以及桥梁结构模型动力试验等。

本书可供从事工程结构抗震领域相关工作的工程技术人员和科技人员等参考, 也可供土木工程专业高年级本科生和研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁结构抗震分析与地震保护/杜修力, 韩强著. —北京: 科学出版社, 2019. 3
(重大工程的动力灾变学术著作丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-052370-9

I. ①桥… II. ①杜… ②韩… III. ①桥梁结构-防震设计-研究
IV. ①U442.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 054151 号

责任编辑: 刘宝莉 陈 婕 乔丽维 / 责任校对: 郭瑞芝
责任印制: 师艳茹 / 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

*

2019 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019 年 3 月第一次印刷 印张: 29 3/4

字数: 600 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

我国是地震多发国家,也是世界上地震灾害最严重的国家之一。桥梁是交通生命线的枢纽工程。在地震中,桥梁的破坏将导致交通中断,影响地震灾区救援和救灾工作,而且遭受地震破坏的大型桥梁修复困难,严重影响交通运输的尽早恢复,会造成严重经济损失和不良社会影响。因此,对桥梁采取合理、有效的抗震对策,保证桥梁在地震中的安全与震后正常使用,对城市和地区的抗震防灾减灾工作及地震灾区的恢复重建工作都具有重要意义。

作者长期从事地震工程与结构动力学研究,特别是基础设施工程抗震问题研究。2001年,作者调入北京工业大学工作后,组建了北京工业大学桥梁抗震课题组。本书系统介绍作者十五年来在桥梁结构抗震减震领域的相关研究工作。全书主要包括:地震动特性及输入问题,桥梁结构及主要构件的力学性能与分析模型,桥梁结构地震反应分析与倒塌分析,桩-土相互作用及在桥梁抗震分析中的应用,直接基于位移的桥梁抗震设计方法及其应用,空间地震动作用下桥梁随机地震反应分析,桥梁地震保护装置及其在桥梁减隔震设计中的应用,摇摆桥梁结构分析理论与设计方法,桥墩地震动水压力计算分析方法以及桥梁结构动力试验。

在开展桥梁抗震减震相关研究期间,作者获得多项国家自然科学基金项目(包括国家自然科学基金创新研究群体项目、重大研究计划重点项目和集成项目、重大国际合作项目、重点项目、面上项目和青年基金项目),国家重点基础研究发展计划(973计划)项目和国家科技支撑计划,北京市教育委员会科学研究、创新平台和“人才强教”计划项目,北京市自然科学基金项目(包括重点项目和面上项目)的资助。在此,作者要特别感谢国家自然科学基金委员会、中华人民共和国科学技术部、北京市教育委员会和北京市自然科学基金委员会等单位的资助!

与本书内容相关的研究成果是作者与国内外合作者及研究生共同完成的,主要包括:北京工业大学闫维明教授、陈彦江教授、贾俊峰副教授、白玉磊副教授,天津大学李忠献教授,清华大学刘晶波教授,上海大学刘文光教授,防灾科技学院孙治国副教授,北京市市政工程设计研究总院何维利教授级高级工程师,以及课题组的研究生赵建锋、董振华、燕斌、王丕光、唐贞云、李勇、李晰、周大兴、闫晓宇、董慧慧、周雨龙、陈敬一、温佳年、张轩、刘卫刚、王利辉、丁兆旺、张强、王晓强、杨怀茂、贾振雷、胡梦涵、赵玉坤、赵建瑜、袁婉莹、丁怡宣等。感谢北京工业大学李洪泉教授、纪金豹副教授,同济大学李建中教授、王君杰教授,清华大学樊健生教授,河北工业大学王东升教授,招商局重庆交通科研设计院有限公司唐光武研究员,台湾大

学欧昱辰教授等给予的支持。同时,感谢澳大利亚科廷大学郝洪教授、毕凯明博士,美国纽约州立大学布法罗分校 George C. Lee 教授,美国联邦公路局公路研究中心黄超博士,挪威 Aker Solutions 公司贾军波博士等在相关研究中提出宝贵建议。此外,特别感谢广州大学周福霖院士长期以来对北京工业大学桥梁抗震课题组的学术指导和大力支持!

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。

目 录

前言	
第 1 章 地震动特性及输入问题	1
1.1 地震动随机过程	1
1.1.1 地震动随机过程描述	1
1.1.2 地震动随机过程模型	3
1.2 地震动的工程特性	5
1.2.1 地震动幅值	5
1.2.2 地震动频谱	7
1.2.3 地震动持时	9
1.3 地震动的空间变化性	9
1.3.1 不相干效应	9
1.3.2 行波效应	10
1.3.3 衰减效应	11
1.3.4 局部场地效应	11
1.4 地震动的近断层效应	11
1.4.1 上盘效应	12
1.4.2 速度大脉冲	12
1.4.3 竖向效应	13
1.5 地震动的合成	14
1.5.1 人工合成地震动的一般方法	14
1.5.2 空间变化地震动的合成方法	17
1.5.3 近断层脉冲型地震动合成	22
1.6 地震动输入问题	28
1.6.1 天然地震动记录的选择	28
1.6.2 地震动的输入方式	31
1.6.3 最不利输入角度	31
参考文献	32
第 2 章 桥梁结构弹性地震反应分析方法	36
2.1 单自由度弹性体系地震反应分析	36
2.1.1 运动方程	36

2.1.2	自由振动	37
2.1.3	强迫振动	37
2.2	单自由度弹性体系反应谱分析	39
2.2.1	地震作用基本表达式	39
2.2.2	地震反应谱	39
2.2.3	标准反应谱	40
2.2.4	设计反应谱	40
2.3	多自由度体系运动方程	42
2.3.1	一致激励运动方程	42
2.3.2	多点激励运动方程	43
2.4	多自由度体系反应谱法	44
2.4.1	自振频率和振型	44
2.4.2	振型分解法	45
2.4.3	振型分解反应谱法	46
2.5	多点激励下斜拉桥弹性地震反应算例	48
	参考文献	53
第3章	桥梁主要构件非线性分析模型	54
3.1	上部结构	54
3.1.1	桥面系类型、截面布置和属性	56
3.1.2	斜交及曲线桥	56
3.1.3	预应力的影响	58
3.2	桥梁支座	58
3.2.1	板式橡胶支座	58
3.2.2	盆式橡胶支座	60
3.2.3	钢支座	61
3.2.4	支座模型的重要性及对桥梁抗震评价的作用	62
3.3	桥梁挡块	62
3.3.1	试验研究	64
3.3.2	桥梁内挡块性能和分析模型	67
3.3.3	桥梁外挡块性能和分析模型	75
3.3.4	挡块模型的重要性及对桥梁抗震评价的作用	85
3.4	桥梁碰撞模型	86
3.4.1	刚体力学法	86
3.4.2	接触单元法	87
3.5	桥台-回填土体系	91

3.5.1 失效机理	91
3.5.2 非线性力-位移能力	92
3.5.3 简化公式在抗震分析中的应用	95
参考文献	99
第4章 RC桥墩非线性分析模型	101
4.1 常见桥墩非线性分析模型	101
4.1.1 构件恢复力模型	101
4.1.2 等效塑性铰模型	106
4.1.3 纤维梁柱单元模型	111
4.1.4 精细有限元模型	112
4.2 复杂受力下桥墩分析模型	114
4.2.1 弯剪耦合分析模型	114
4.2.2 桥墩压弯扭模型	122
4.2.3 双轴压弯下 RC 空心墩分析模型	132
4.2.4 FRP 约束 RC 桥墩	139
4.2.5 节段拼装桥墩	149
4.2.6 RC 桥墩统一滞回模型	156
参考文献	162
第5章 土-基础-桥梁结构相互作用	168
5.1 自由场地反应分析	168
5.1.1 一维波动和地面反应分析	169
5.1.2 时域二维或三维动力反应分析	171
5.2 土-结构动力相互作用	172
5.2.1 边界问题和实际问题简化方法	173
5.2.2 直接方法	175
5.2.3 子结构分析方法	176
5.2.4 等效弹簧-阻尼分析方法	179
5.3 Winkler 地基梁法	181
5.3.1 Matlock 模型	181
5.3.2 Penzien 模型	183
5.3.3 动力 p - y (q - z 和 t - z) 曲线法	184
5.4 规范方法	189
5.4.1 m 法	189
5.4.2 p - y 曲线法	189
5.5 地基阻抗力的时域计算方法	190

5.5.1	稳定条件	190
5.5.2	虚拟力问题	193
5.5.3	实例分析	194
5.6	考虑 SSI 的桥梁非线性地震反应分析算例	196
5.6.1	采用静力 p - y 法的斜交桥地震反应	196
5.6.2	采用动力 p - y 法的斜拉桥地震反应	199
	参考文献	204
第 6 章	桥梁地震反应非线性分析方法	206
6.1	弹塑性静力分析方法	206
6.1.1	基本原理	206
6.1.2	建立能力曲线	207
6.1.3	能力谱方法	210
6.1.4	N2 方法	214
6.1.5	多跨曲线桥推覆分析算例	215
6.2	非线性时程分析法	217
6.2.1	基本原理	217
6.2.2	双柱式桥墩连续梁桥时程分析算例	219
6.2.3	增量动力分析法	223
6.2.4	增量动力分析算例	224
	参考文献	228
第 7 章	直接基于位移的桥梁抗震设计方法	230
7.1	基于力的抗震设计方法存在的问题	230
7.2	直接基于位移的设计基本理论和方法	231
7.2.1	直接基于位移设计方法的基本理论	231
7.2.2	设计性能目标	232
7.2.3	目标位移及位移模式	234
7.2.4	P - Δ 效应	236
7.2.5	直接基于位移方法的基本流程	237
7.3	直接基于位移方法的桥梁设计算例	238
7.3.1	四跨连续梁桥	238
7.3.2	RC 拱桥	242
7.3.3	基础隔震斜拉桥	248
	参考文献	251
第 8 章	空间地震动作用下桥梁随机反应	253
8.1	三维平稳激励下结构地震反应的虚拟激励法	253

8.2	虚拟激励法在通用有限元程序中的实现	254
8.2.1	大质量法求解结构动力方程	254
8.2.2	响应峰值的计算	255
8.2.3	虚拟激励的构造	256
8.3	算例分析	258
8.3.1	单自由度体系	258
8.3.2	多自由度体系	260
	参考文献	263
第9章	基于多尺度有限元建模的桥梁地震倒塌分析	265
9.1	多尺度单元界面耦合方法与实现	265
9.2	界面连接方法单柱式桥墩验证	267
9.2.1	拟静力分析	267
9.2.2	泊松比分析	269
9.2.3	模态分析	270
9.2.4	正弦时程分析	270
9.3	两跨简支梁桥地震反应数值试验验证	271
9.3.1	沙漏能	272
9.3.2	模态分析	272
9.3.3	支座反力对比	273
9.3.4	碰撞力对比	274
9.3.5	墩底反力对比	276
9.4	简支梁桥倒塌分析	277
9.4.1	桥梁与震害概况	277
9.4.2	地震动选取	278
9.4.3	计算结果分析	279
9.5	高墩大跨连续刚构梁桥倒塌分析	284
9.5.1	桥梁概况及有限元模型	284
9.5.2	桥梁地震倒塌分析	285
	参考文献	287
第10章	桥梁地震保护装置	288
10.1	铅芯橡胶隔震支座	288
10.1.1	铅芯橡胶隔震支座的力学性能	289
10.1.2	铅芯橡胶隔震支座恢复力模型	294
10.2	高阻尼橡胶隔震支座	297
10.2.1	高阻尼橡胶隔震支座的性能	298

10.2.2	高阻尼橡胶隔震支座的力学模型	300
10.3	滑动摩擦隔震支座	301
10.3.1	聚四氟乙烯-不锈钢界面摩擦特性	301
10.3.2	平面摩擦型隔震支座	304
10.3.3	摩擦摆支座	305
10.3.4	双凹面摩擦摆支座	306
10.3.5	多重摩擦摆支座	307
10.3.6	抗拉拔桥梁摩擦隔震支座	309
10.3.7	界面热效应预测	310
10.4	三维隔震支座	314
10.4.1	三维隔震支座工作机理	314
10.4.2	三维隔震支座力学性能	315
10.5	隔震支座新进展	316
10.5.1	变曲率摩擦摆支座	316
10.5.2	Roll-N-Cage 支座	317
10.6	金属阻尼器	319
10.6.1	菱形钢板阻尼器	320
10.6.2	宫格式阻尼器	321
10.6.3	铅芯钢管阻尼器	322
10.6.4	大行程板式铅阻尼器	323
10.7	防屈曲支撑	325
10.7.1	防屈曲支撑构造及工作机理	325
10.7.2	自复位防屈曲支撑	326
10.8	锁死销及防落梁装置	328
10.8.1	锁死销构造及力学性能	328
10.8.2	防落梁装置及工作机理	330
	参考文献	331
第 11 章	减隔震桥梁地震反应分析方法	334
11.1	单自由度和多自由度分析方法	334
11.1.1	阻尼在减隔震桥梁结构中的作用	334
11.1.2	单自由度分析方法	336
11.1.3	多自由度分析方法	337
11.2	非线性时程分析方法	337
11.3	减隔震桥梁地震反应分析实例	338
11.3.1	铅芯橡胶支座连续梁桥	338

11.3.2 滑动摩擦支座隔震桥梁	341
11.4 附加阻尼装置的高架桥梁地震碰撞分析	349
11.4.1 高架桥梁的碰撞	349
11.4.2 附加阻尼器的减撞控制	351
参考文献	354
第 12 章 摇摆桥梁结构分析与抗震设计	356
12.1 摇摆桥梁体系概述	356
12.1.1 摇摆桥梁体系构造	356
12.1.2 摇摆桥墩力学机理	357
12.1.3 摇摆桥墩一般损伤过程和极限状态	358
12.2 摇摆桥墩分析方法	359
12.2.1 摇摆结构力学行为分析	359
12.2.2 摇摆桥墩分析计算方法	363
12.2.3 摇摆桥墩数值分析	367
12.3 摇摆桥墩抗震设计方法	373
12.4 摇摆桥墩抗震性能试验研究	374
12.4.1 单墩拟静力试验研究	374
12.4.2 双柱桥墩拟静力试验研究	376
12.4.3 单跨摇摆桥梁振动台试验研究	380
12.4.4 四跨摇摆桥梁振动台试验研究	386
12.5 摇摆桥梁工程应用	390
12.5.1 工程概况	390
12.5.2 设计标准和设计目标	391
12.5.3 设计与分析	392
12.5.4 施工与监测	394
参考文献	395
第 13 章 桥墩地震动水压力分析方法	397
13.1 桥墩动水压力的计算方法	397
13.1.1 圆形截面桥墩动水压力的解析解	398
13.1.2 椭圆形截面桥墩动水压力的解析解	400
13.1.3 任意截面桥墩动水压力的数值计算方法	404
13.2 桥墩-水相互作用的时域子结构模型	407
13.2.1 圆形截面桥墩可压缩水体动水压力的高精度时域模型	407
13.2.2 方形截面桥墩可压缩水体动水压力的高精度时域模型	414
13.2.3 桥墩不可压缩水体动水压力的附加质量模型	415

13.3	桥墩动水压力的附加质量简化公式	416
13.3.1	圆形截面桥墩	417
13.3.2	矩形截面桥墩	418
13.3.3	椭圆形截面桥墩	420
	参考文献	422
第14章	桥梁结构模型动力试验	424
14.1	结构模型设计与相似理论	425
14.1.1	结构模型设计的相似条件	425
14.1.2	模型设计	429
14.2	结构拟动力试验	432
14.2.1	拟动力试验的流程	433
14.2.2	拟动力试验理论问题	434
14.2.3	拟动力方法应用	434
14.3	结构振动台试验	437
14.3.1	地震模拟振动台的分类	437
14.3.2	地震模拟振动台试验的作用	439
14.3.3	地震模拟振动台试验的加载过程和试验方法	440
14.3.4	地震模拟振动台试验结构反应的测量	441
14.4	典型桥梁结构振动台试验实例	441
14.4.1	典型梁桥结构地震模拟振动台试验介绍	441
14.4.2	典型梁桥结构地震模拟振动台试验结果	444
14.4.3	考虑 SSI 桥梁结构动力子结构试验技术	455
	参考文献	463

第 1 章 地震动特性及输入问题

对工程结构进行抗震分析,首先面临的的就是地震动选择和输入问题,因此有必要清楚地地震动特性及其是如何对工程结构产生作用的。地震动是指由震源释放出来的地震波引起的地面运动^[1]。地震动的主要工程特征可以由地震动的幅值、频谱和持续时间三个基本要素来表示。强震观测记录和震害经验表明,大量工程结构的破坏现象是这三个基本要素综合影响的结果。随着强震观测技术,特别是地震动观测密集台阵的发展,很多学者逐渐意识到地震动的空间变化性(如行波效应、不相干效应、局部场地效应)和近断层效应(如上盘效应、方向性效应等)也会对结构动力反应产生不可忽视的影响。其次,需要根据工程结构的类型和场地情况选择合适的地震动输入方式和最不利输入角度。对于一般结构,其建筑用地范围较小,地基处的土层变化不大,在对其进行抗震分析时,可以采用一致激励的方式,但是对于桥梁这种延长型大跨度空间结构,桥墩分布范围较大,桥墩各支点处的地形、地貌以及土层分布可能存在较大差别,会导致在同一次地震中各支点处的地震动互不相同但又具有一定的相关性,这就需要采用非一致激励的方式才能真实反映结构在地震下的反应,否则可能会引起较大的分析误差。另外,地震动可能来自任意方向,由于结构具有不规则性及非对称性,当地震波沿某一特定的方向输入时,结构动力反应将达到最大值,称此特定方向角度为地震动最不利输入角度或地震动输入主方向。在结构抗震分析中,为了确保结构设计具有足够的合理性及可靠性且能更全面地评判结构的安全性,一般需要确定地震动的最不利入射角及其对应的结构动力反应。

本章对地震动的特性及输入问题进行概述,介绍地震动的随机过程描述、地震动的工程特性、地震动的人工合成方法、地震动非一致输入、最不利输入角度和地震动选择等问题。

1.1 地震动随机过程

1.1.1 地震动随机过程描述

地震动在空间和时间上具有随机性,同时其加速度、速度、位移时程具有明显的不规则性,因此可以将其看成一个随机过程。由于数学表达困难和强震记录数量有限,建立充分反映地震动特征的地震动随机过程模型尚有困难,通常先根据经

验设定能反映地震动主要特征的模型,然后利用强震记录资料拟合模型参数和检验模型的适用性^[1]。

随机过程是指定义于一个参数集上的一簇随机变量系,在此参数集的每一点处都对应一个随机变量。一维随机过程可视为多维随机变量的一个自然推广,如果把多维随机变量的维数视为参变量,那么一维随机过程的时间参数可视为此变量连续变化的结果。从这一概念出发,多维随机变量的基本概念可以类推于一维随机过程。地震动随机过程的抽样特征见图 1.1.1。

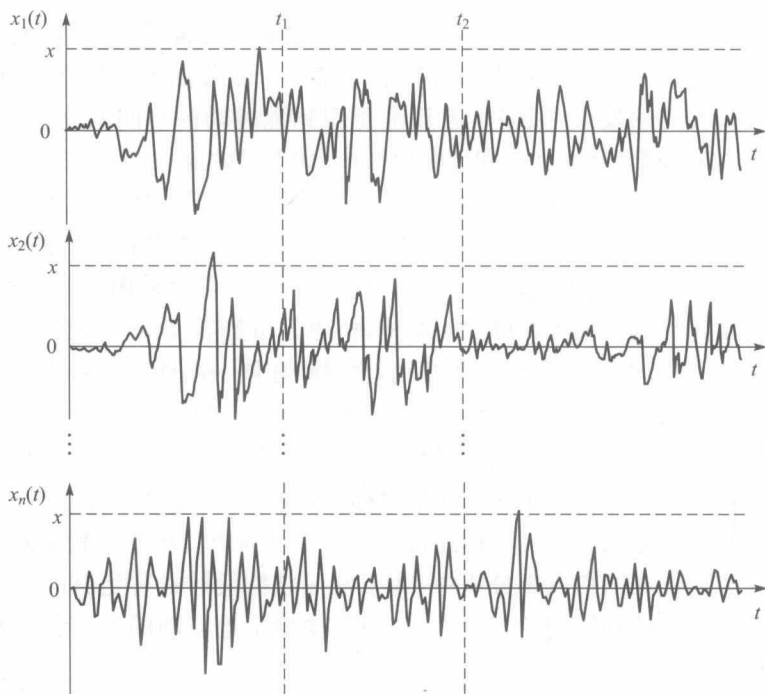


图 1.1.1 地震动随机过程的抽样特征

随机过程的概率结构可以用概率密度和特征函数来表示。随机过程 $x(t)$ 的概率结构采用概率密度的形式可以表示为

$$\begin{cases} P_{(x)}(x_1, t_1) \\ P_{(x)}(x_1, t_1; x_2, t_2) \\ \vdots \\ P_{(x)}(x_1, t_1; x_2, t_2; \dots; x_n, t_n) \end{cases} \quad (1.1.1)$$

式中,各行分别称为 $x(t)$ 的一维分布密度、二维分布密度…… n 维分布密度。

随机过程 $x(t)$ 的概率结构采用特征函数的形式可以表示为

$$\left\{ \begin{aligned}
 M_{(x)}(\theta_1, t_1) &= E\{e^{\theta_1 x(t_1)}\} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{\theta_1 x_1} p(x_1, t_1) dx \\
 M_{(x)}(\theta_1, t_1; \theta_2, t_2) &= E\{e^{[\theta_1 x(t_1) + \theta_2 x(t_2)]}\} \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{(\theta_1 x_1 + \theta_2 x_2)} p(x_1, t_1; x_2, t_2) dx_1 dx_2 \\
 &\quad \vdots \\
 M_{(x)}(\theta_1, t_1; \theta_2, t_2; \cdots; \theta_n, t_n) &= E\{e^{[\theta_1 x(t_1) + \cdots + \theta_n x(t_n)]}\} \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} e^{(\theta_1 x_1 + \cdots + \theta_n x_n)} p(x_1, t_1; \cdots; x_n, t_n) dx_1 \cdots dx_n
 \end{aligned} \right. \quad (1.1.2)$$

式中,各行分别称为 $x(t)$ 的一维特征函数、二维特征函数…… n 维特征函数。

对比式(1.1.1)和式(1.1.2)可以看出,特征函数实质上是概率密度的傅里叶变换。因此,随机过程的两种概率结构形式是等价的。

特征函数展开的实部为随机过程的一、二阶数字特征,因此可以用一、二阶数字特征来表示随机过程的主要概率特性,随机过程最重要的是自相关函数和功率谱密度函数。

随机过程 $x(t)$ 的自相关函数定义为任意两个不同状态 $x(t_1)$ 和 $x(t_2)$ 的原点距,即

$$R_s(t_1, t_2) = E[x(t_1)x(t_2)] \quad (1.1.3)$$

自相关函数描述了随机过程两个状态之间在时域上的相关程度。

在频域中,随机过程最重要的二阶统计数字特征为功率谱密度函数,定义为自相关函数的傅里叶变换,即

$$R_x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (1.1.4)$$

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1.1.5)$$

当 $t \rightarrow 0$ 时,随机过程的方差为

$$D[x(t)] = R_x(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) d\omega \quad (1.1.6)$$

式中, $S_x(\omega)$ 为随机过程的方差在频域内的分布密度函数。

1.1.2 地震动随机过程模型

Housner^[2]、Rosenblueth 和 Herrera^[3] 用随机振动模型表示地震动,将地震动当成随时间随机分布的速度脉冲,该模型等价于白噪声,其谱密度函数是强度为 S_0 的水平线。Kana^[4] 和 Tajimi^[5] 提出过滤白噪声模型,该模型将场地视为单自由度线性过滤器,并考虑场地特性对地震谱值的影响,其数学模型为

$$S_a(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2 (\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\xi_g^2 (\omega/\omega_g)^2} S_0 \quad (1.1.7)$$

式中, S_0 为基岩白噪声的扰动强度; ω 为地震动的频率; ω_g 和 ξ_g 分别为场地的特征频率和特征阻尼比。

Kanai-Tajimi 模型夸大了地震中低频分量的影响^[5]。胡聿贤和周锡元^[6]为 Kanai-Tajimi 模型添加了控制低频分量的低频滤波器, 则修改后的数学模型为

$$S_a(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2 (\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\xi_g^2 (\omega/\omega_g)^2} \frac{\omega^6}{\omega^6 + \omega_c^6} S_0 \quad (1.1.8)$$

式中, ω_c 为控制低频分量的参数。该模型较好地解决了低频分量所占影响过大的问题。由此式推得的地震动位移功率谱积分为有限值, 但是其位移功率谱与复频响应函数的乘积不可积分。该模型常应用于以长周期为主的大跨度桥梁结构地震反应分析。

Clough 等^[7]将基岩和土体均假设为二阶线性高通滤波器, 其数学模型为

$$S_a(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2 (\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\xi_g^2 (\omega/\omega_g)^2} \frac{1}{[1 - (\omega/\omega_f)^2]^2 + 4\xi_f^2 (\omega/\omega_f)^2} S_0 \quad (1.1.9)$$

式中, ω_f 和 ξ_f 分别为基岩的特征频率和特征阻尼比。该模型可以满足速度和位移功率谱在频率为零处有限的条件。

欧进萍等^[8]提出了修正高频段的 Kanai-Tajimi 模型。杜修力等^[9,10]基于工程统计模型与地震学模型相结合的方式提出了一种随机地震动自谱模型(式(1.1.10)), 并依据美国西部八十余条基岩强震记录统计获得的不同震级、震中距的地面运动加速度傅里叶幅值谱, 用最小二乘法进行曲线拟合确定了 D 值(表 1.1.1), 并给定了 ω_0 (取 1.83)和 ω_g 、 ξ_g 、 S_0 (表 1.1.2)。

$$S_a(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2 (\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\xi_g^2 (\omega/\omega_g)^2} \frac{1}{1 + (D\omega)^2} \frac{\omega^4}{(\omega^2 + \omega_0^2)^2} S_0 \quad (1.1.10)$$

式中, $1/[1 + (D\omega)^2]$ 为低通滤波器; $\omega^4/(\omega^2 + \omega_0^2)^2$ 为高通滤波器; ω_0 为低频拐角频率; D 为常量。

该模型较好地解决了 Kanai-Tajimi 模型导致地面速度和位移无界的缺点, 且能方便地利用目前抗震设计所依据的基本参数来确定模型中的参数, 特别是借鉴了地震学方法在模拟长周期地面运动方面的成功经验, 对地震动长周期特性进行了较好的模拟, 目前已应用于大跨空间结构、高坝、桥梁等结构的抗震分析。

表 1.1.1 参数 D 与震级 M 的关系

震级 M	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
参数 D	0.022	0.017	0.013	0.011	0.010	0.009