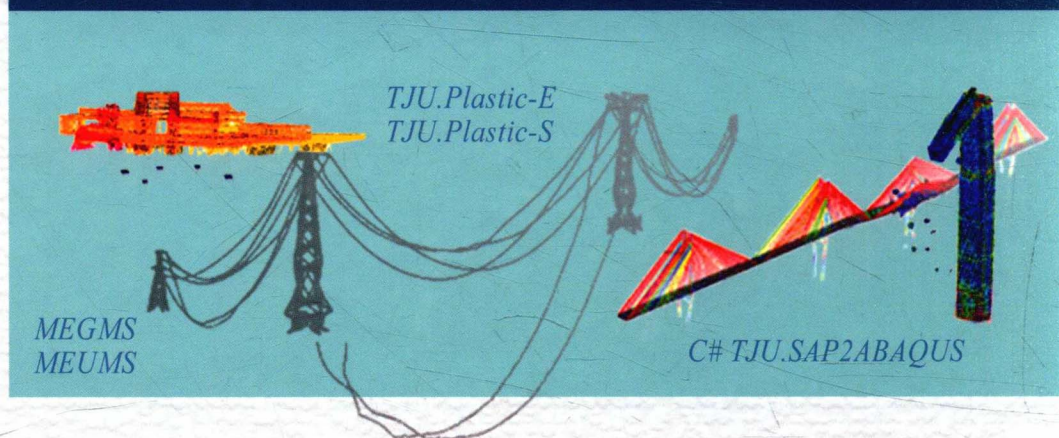


Method, Program Development and Practice for Spatially
Variable Earthquake Motions and Structural Nonlinear Analysis

地震差动与结构非线性输出

——方法、程序开发及实践



柳国环 赵大海 著



科学出版社

地震差动与结构非线性输出

——方法、程序开发及实践

柳国环 赵大海 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书第1章重点提出并推导了地下相干函数,为地下的多点地震动模拟提供了关键性理论依据,还总结了一致和地表多点地震动的基本理论,最后开发了一致、地表和地下多点地震动可视化程序 MEGMS 和 MEUMS;第2章针对 ABAQUS 做了相关子程序 TJU. Plastic-E 和 TJU. Plastic-S 开发等一系列工作,并进行了验证;第3章和第4章开发了基于 C# 语言的可视化导航式 TJU. SAP2ABAQUS 接口程序,给出了详细的操作流程及使用步骤,提出并实现了 INP 格式的人工边界地震力快速输入方法,编制了可视化程序;第5章扼要介绍小波变换的理论,开发了可直接用于分析结构弹塑性响应的可视化程序;第6~9章分别以超高层建筑、复杂大跨空间展览馆、跨海/江桥梁和大跨越输电塔典型工程为背景,对之前相应章节提出的方法和编制的程序进行实践性检验,并对非线性计算输出结果给出详尽分析。

本书可供土木工程结构抗震计算、动力弹塑性分析以及地震和结构工程等专业的高年级本科生、研究生及相关科研人员等参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

地震差动与结构非线性输出:方法、程序开发及实践 / 柳国环,赵大海著. —北京:科学出版社,2015.12

ISBN 978-7-03-046867-3

I. ①地… II. ①柳… ②赵… III. ①抗震结构—结构分析
IV. ①TU352.101

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 302991 号

责任编辑:刘凤娟 赵敬伟 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:肖 兴 / 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

*

2016年1月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年1月第一次印刷 印张:16 1/4 插页:2

字数:327 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着经济的快速发展和城市规模的不断扩大,超高层建筑、大跨空间结构、跨海/江桥梁、大跨越输电塔等大型复杂工程不断涌现。对于此类结构的抗震分析,通常需要进行复杂的非线性计算,会用到计算能力足够强大的有限元程序。ABAQUS 具有强大的非线性计算能力,但它的前处理功能与其自身分析计算能力相比并不突出,特别是建立复杂工程模型时,会占用大量时间。相比而言,SAP2000 更具有直观的用户界面和便捷的操作功能,较为方便快速建立模型,但在结构大震弹塑性与倒塌等强非线性分析方面并不十分吸引人,该方面发展空间较大。容易想到,首先通过 SAP2000 中建模,然后在 ABAQUS 中分析,不失为一条捷径。基于此,开发了基于 C# 语言的 SAP2000 模型转化到 ABAQUS 的接口程序 TJU. SAP2ABAQUS,极大地提高了在 ABAQUS 中建立复杂模型的效率,编制了直接与 ABAQUS 进行数据相互调用的显式算法 VUMAT 子程序 TJU. Plastic-E 和隐式算法 UMAT 子程序 TJU. Plastic-S。同时,结合一系列工程,系统介绍了开发的系列程序并进行了结构复杂非线性地震反应分析,旨在方便广大工程和科研人员参考。

地震反应计算结果不仅取决于结构模型与计算方法等因素,还直接依赖于地震动输入本身。对于大跨展览馆、跨海/江桥梁、大跨越输电塔等大跨复杂空间结构而言,场地效应以及地震动的空间变化会显著影响此类结构的弹塑性甚至可能的倒塌发展过程。为此,作者开发了地表/地下多点地震动模拟可视化程序 TJU. MEGMS 和 TJU. MEUMS,以及方便进行土-结构相互作用的接口程序 TJU. SAP2ABAQUS 的实体转换模块,通过对多个实际工程的分析,详细阐述了地震动多点输入和超大震作用下大跨复杂空间结构体系的抗震薄弱环节和弹塑性反应。希望本书的出版,可为大跨等复杂结构的抗震分析提供有益参考。

本书第 1 章重点提出并推导了地下相干函数,为地下的多点地震动模拟提供了关键性理论依据,还总结了一致和地表多点地震动的基本理论,最后开发了一致、地表和地下多点地震动可视化程序 MEGMS 和 MEUMS;;第 2 章针对 ABAQUS 做了相关子程序开发等一系列工作,并进行了验证;第 3 章和第 4 章开发了基于 C# 语言的可视化导航式 TJU. SAP2ABAQUS 接口程序,给出了详细的操作流程及使用步骤,提出并实现了 INP 格式的人工边界地震力快速输入方法,编制了可视化程序;第 5 章扼要介绍小波变换的理论,开发了可直接用于分析结构弹塑性响应的可视化程

序;第6~9章分别以超高层建筑、复杂大跨空间展览馆、跨海/江桥梁和大跨越输电塔典型工程为背景,对之前相应章节提出的方法和编制的程序进行实践性检验,并对非线性计算输出结果给出详尽分析。

感谢国家自然科学基金(51408409)与河北省高等学校科学技术研究项目(YQ2013015)的支持;感谢天津大学练继建教授的鼓励与支持,感谢所在科研团队学术氛围的熏陶以及团队各方面给予的无形帮助;感谢大连理工大学伊廷华教授在小波及程序编制方面的讲解与帮助;感谢天津城建大学的杨德健教授和王清龙硕士;感谢燕山大学刘伟和沈鹏娟硕士。

由于作者时间和水平有限,书中难免存在不足之处,恳请专家、学者和同行批评指正,以便日后进一步完善。

作 者

2015年11月13日

目 录

前言

第 1 章 地震(差)动合成理论、方法和程序开发与验证	1
1.1 引言	1
1.2 一致地震动生成理论、方法与程序开发	2
1.2.1 一致地震动合成理论和方法简述	2
1.2.2 一致地震动可视化程序编制流程	4
1.2.3 一致地震动程序有效性验证	4
1.3 地表非一致地震动生成理论、方法与程序 MEGMS 开发	6
1.3.1 地表非一致地震动生成理论和方法简述	6
1.3.2 地表非一致地震动可视化程序编制流程	10
1.3.3 地表非一致地震动程序有效性验证	11
1.4 地下非一致地震动生成理论、方法与程序 MEUMS 开发	13
1.4.1 地下非一致地震动生成理论推导	13
1.4.2 地下非一致地震动可视化程序编制流程	20
1.4.3 地下非一致地震动可靠性验证及结果分析	22
1.5 本章小结	28
参考文献	29
第 2 章 钢与混凝土本构关系、子程序 TJU. Plastic-S/E 开发及验证	30
2.1 引言	30
2.2 常用钢材与混凝土本构关系	31
2.2.1 钢材骨架曲线与滞回规则的 3 种情形	31
2.2.2 混凝土单轴骨架曲线、加卸载规则及其改进	33
2.3 ABAQUS 子程序 TJU. Plastic-S/E 开发与验证	35
2.3.1 主程序与显/隐式子程序链接流程图与程序开发	35
2.3.2 显/隐式子程序的使用	38
2.3.3 钢筋与素混凝土循环加载的数值与试验结果对比	42

2.3.4 构件低周反复加载的数值与试验结果对比	43
2.4 本章小结	48
参考文献	49
第3章 基于C#读取.SDB格式的TJU.SAP2ABAQUS接口开发及验证	50
3.1 引言	50
3.2 可视化 TJU.SAP2ABAQUS 程序开发	51
3.2.1 开发读取.SDB格式的TJU.SAP2ABAQUS缘由和流程	51
3.2.2 梁、壳、实体、边界与组转换技术与对应格式	52
3.2.3 可视化程序 TJU.SAP2ABAQUS 导航式功能与说明	55
3.2.4 显/隐式算法对应的不同纤维 inp 文件数据处理方法	67
3.2.5 TJU.SAP2ABAQUS 定义计算方法的说明	68
3.2.6 TJU.SAP2ABAQUS 中钢筋层的定义与说明	69
3.2.7 悬链线索建模及转化说明	71
3.2.8 SAP2000 OAPI 介绍	74
3.3 可视化 TJU.SAP2ABAQUS 程序转换前后对比与验证	76
3.3.1 钢筋/圆(方)钢管/(十)工字型钢-混凝土构件	76
3.3.2 角/工字钢、箱型钢及圆钢管	77
3.3.3 剪力墙和楼板	78
3.3.4 柔性索	79
3.3.5 框架结构	79
3.3.6 输电塔	80
3.3.7 边界	82
3.3.8 命名与分组	83
3.4 可视化 TJU.SAP2ABAQUS 使用与说明	85
3.4.1 TJU.SAP2ABAQUS 地震动格式与说明	85
3.4.2 TJU.SAP2ABAQUS 输出 inp 文件与说明	86
3.4.3 钢管混凝土和型钢混凝土数据转换方法说明	88
3.5 本章小结	90
参考文献	91
第4章 边界-地基系统在 TJU.SAP2ABAQUS 中的转化功能开发与验证	92
4.1 引言	92

4.2 人工边界	92
4.2.1 人工边界原理简述	92
4.2.2 INP 格式的弹簧和阻尼的确定方法	94
4.3 TJU.SAP2ABAQUS 中边界条件-地基功能开发与验证	98
4.3.1 TJU.SAP2ABAQUS 中边界条件-地基功能开发	98
4.3.2 TJU.SAP2ABAQUS 中边界条件-地基功能验证	108
4.4 INP 格式人工边界的快速输入方法与地震力计算程序	114
4.4.1 INP 格式人工边界的地震力快速输入方法	114
4.4.2 节点反力程序开发	117
4.5 本章小结	120
参考文献	121
第 5 章 小波、程序及其弹塑性应用分析	122
5.1 引言	122
5.2 小波理论	122
5.2.1 小波变换的相关定义及性质	122
5.2.2 小波变换与傅里叶变换的比较	125
5.2.3 正交小波基与取样定理	126
5.3 Morlet 小波	130
5.3.1 Morlet 小波定义及其时频窗	130
5.3.2 Morlet 小波变换系数的实用算法	131
5.4 小波程序与算例	133
5.4.1 小波可视化程序	133
5.4.2 弹性计算与说明	134
5.4.3 弹塑性计算与说明	138
5.5 本章小结	141
参考文献	141
第 6 章 超高层建筑(多)罕遇和超大震动力弹塑性分析	142
6.1 引言	142
6.2 工程背景与有限元模型	142
6.2.1 工程概述	142

6.2.2	材料与几何属性	142
6.2.3	天然与人工波模拟及频谱特性	144
6.2.4	模型转换与几何属性转换前后对比	146
6.2.5	模态与频谱分析对比及模型动力特性验证	149
6.3	多/罕遇地震下结构动力反应计算与分析	150
6.3.1	多/罕遇地震作用下的时程及其频谱分析	150
6.3.2	楼层位移、位移角包络线与讨论	155
6.3.3	结构基底剪力时程及其分析	157
6.3.4	剪力墙应力、应变反应分析	158
6.3.5	外框架梁、柱塑性铰出现与发展	159
6.4	超大震下结构动力反应与薄弱环节	160
6.4.1	超大震下结构的连续动力反应状态	160
6.4.2	超大震下结构的薄弱环节现象和理论分析	161
6.5	本章小结	162
	参考文献	162
第7章	大跨空间展览馆地震动力弹塑性及倒塌模式分析	164
7.1	引言	164
7.2	工程概况与有限元模型	165
7.2.1	工程概述	165
7.2.2	材料与几何属性	165
7.2.3	多点地震动输入、模拟及验证	167
7.2.4	模型转换与几何属性转换前后对比	171
7.2.5	自振与频谱对比及与模型动力特性验证	172
7.3	一致与多点激励(单向)的结构动力反应	173
7.3.1	结构体系多/罕遇地震作用下的时程及其频谱分析	173
7.3.2	最大柱底剪力和弯矩统计与原因分析	175
7.3.3	剪力墙最大应力与结构顶点位移统计	177
7.3.4	结构框架部分的动力反应分析	178
7.4	一致与多点激励(三向)的结构动力反应	179
7.4.1	结构体系多/罕遇地震作用下的时程及其频谱分析	179

7.4.2	最大柱底剪力和弯矩统计与原因分析	181
7.4.3	剪力墙最大应力、损伤分析与结构顶点位移统计	182
7.4.4	结构框架部分的动力反应分析	184
7.5	竖向多点激励反应的数值计算、建议及其理论依据	186
7.5.1	竖向模态与频谱分析	186
7.5.2	竖向地震动输入波形特征与加速度反应对比	187
7.5.3	竖向多点输入下结构反应分析	187
7.6	超大震下结构体系动力反应与薄弱环节	190
7.6.1	超大震下结构杆系构件的塑性铰发展及连续动力反应状态	191
7.6.2	超大震下结构楼板、剪力墙连续动力反应状态	192
7.6.3	超大震下结构的薄弱环节现象及其讨论	193
7.7	本章小结	194
	参考文献	195
第8章	人工边界-地基-大跨斜拉桥地震弹塑性和破坏机制	197
8.1	引言	197
8.2	工程简介与有限元模型	198
8.2.1	工程概述	198
8.2.2	材料与几何属性	198
8.2.3	人工边界刚度和阻尼的确定	199
8.2.4	地表/地下多点地震动模拟、验证及输入	199
8.2.5	人工边界-地基-斜拉桥转换与几何属性对比	201
8.3	地基及人工边界对斜拉桥体系自振特性的影响与分析	203
8.3.1	固定边界-地基对斜拉桥动力特性的影响与分析	203
8.3.2	人工边界-地基对斜拉桥结构动力特性的影响与分析	204
8.4	大震和超大震作用下斜拉桥地震弹塑性分析	206
8.4.1	一致输入与多点输入下斜拉桥地震反应对比	206
8.4.2	单独斜拉桥与地基-桩-桥耦合结构地震反应对比	212
8.4.3	粘弹性人工边界地震输入的高效加载途径	216
8.4.4	固定边界与人工边界对斜拉桥体系地震弹塑性反应的影响	217
8.4.5	固定边界与人工边界斜拉桥体系破坏模式与薄弱环节	220

8.5 地震诱发波浪力及其对斜拉桥地震反应的影响	222
8.5.1 地震诱发波浪力的基本介绍与程序	222
8.5.2 小震与波浪力激励下斜拉桥反应与理论分析	225
8.5.3 大震与波浪力激励下斜拉桥反应与理论分析	227
8.6 本章小结	229
参考文献	230
第9章 大跨越输电塔-线体系地震动力弹塑性与薄弱环节	231
9.1 引言	231
9.2 ABAQUS 显式计算条件下重力加载方式与理论依据	232
9.2.1 加载方式与依据	232
9.2.2 加载步长与结果验证	233
9.3 工程简介与有限元模型	235
9.3.1 工程概述	235
9.3.2 钢管混凝土主材与 3000m 级悬链线索	235
9.3.3 多点地震动模拟、验证以及输入	237
9.4 输电塔-线体系模态分析、现象分析与理论解释	240
9.4.1 重力加载施加初始刚度与模态计算	240
9.4.2 模态的规律性分析与特征	241
9.4.3 模态计算结果的理论解释	243
9.5 一致与多点超大震作用下输电塔-线体系地震反应与薄弱环节	243
9.5.1 一致地震作用下动力反应分析	244
9.5.2 多点地震作用下动力反应分析与薄弱环节	245
9.5.3 超大震作用下结构体系倒塌模式	246
9.6 本章小结	247
参考文献	248

第 1 章 地震(差)动合成理论、方法和程序开发与验证

1.1 引言

抗震分析包含三个要素,分别为:输入、结构体系和输出。其中,输入(即地震动时程)作为三要素之一,对结构的地震动力响应具有重要影响。目前,结构抗震分析中地震动的输入主要分为两种:一致地震动输入和非一致地震动输入。二者的差别在于一致输入在各个支座间不会产生相对位移,结构的内力只与上部结构与支座之间的相对位移有关;而非一致输入将在支座处产生差动效应,结构内力受到差动输入的影响。而且,在考虑局部场地效应的非一致地震动输入中,地震动可能由于场地土的不同而具有不同的频谱特性,这可能对结构的动力响应产生更大的影响。由于地震动的时空变异性早已被实际观测所验证,所以一般认为地表非一致地震动输入总是比一致地震动输入更加符合实际。对于平面尺寸较小的工业及民用建筑,不同支座间地震动的相干性很高,使用一致地震动输入就可以满足实际要求。但是,对于大跨结构(如:大跨桥梁、隧道、边坡和输水管道等)则需要输入非一致地震动来分析其动力响应。相比一致地震动输入,非一致输入并不一定使结构的内力分布或稳定性处于更加不利的状态。

人们对地震动时空变异性的认识是一个不断发展的过程,地震动时程在时域上的非平稳性很早就被人们所认识,而对于空间变异性的认识则相对较晚。目前,非一致地震动分析主要针对地表地震动,其空间变异性主要体现在“横向”。但是,对于一些涉及地下的建筑结构,严格地说,将地表地震动时程输入到地下支座是不合理的。由于输入的不合理性,自然难以得到合理、可靠的结果。因此,对地震动的空间变异性分析应该延伸到“竖向”,考虑地下不同深度处地震动的差异性。

本章首先简要回顾了一致地震动、地表多点地震动生成的理论和方法;然后详细研究了地下多点地震动生成的理论途径,并给出严格的推导;针对一致地震动、地表多点地震动和地下多点地震动,更新开发了地震动生成程序;最后,通过数值算例验证了所开发程序的准确性和有效性。

1.2 一致地震动生成理论、方法与程序开发

1.2.1 一致地震动合成理论和方法简述

一致地震动是地震动输入中较为简单的情况,它可以由规范反应谱直接生成,具体步骤为:首先,由规范反应谱转化为输入地震动的功率谱;然后,由功率谱计算地震动不同频率成分谐波的幅值与相位角;最后,经谐波叠加生成地震动时程。传统的反应谱-功率谱转化方法有直接转化法和逐步积分法两种,下面分别简单介绍。

直接转化法:首先假设地面运动为平稳高斯过程,对于任一频率 ω ,地震动输入的加速度功率谱密度函数 $S_{in}(\omega)$ 与输出的加速度功率谱密度函数 $S_{out}(\omega, \omega_0)$ 之间的关系为

$$S_{out}(\omega, \omega_0) = H(\omega, \omega_0) S_{in}(\omega) = \frac{\omega_0^4 + 4\omega_0^2 \xi^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\omega_0^2 \xi^2 \omega^2} S_{in}(\omega) \quad (1.1)$$

上式中, ω_0 和 ξ 分别为单自由度系统的自振频率和阻尼比; $H(\omega, \omega_0)$ 表示系统的传递函数。

在有限的持续时间 T 内,结构绝对加速度的最大值为有限值,以 $\ddot{u}_{max}(t)$ 来表示。由于它是一个随机变量,反应谱 $R(\omega)$ 就可以近似定义为 $\ddot{u}_{max}(t)$ 的平均值。因此,存在一定的概率,使得 $\ddot{u}_{max}(t)$ 高于 $R(\omega)$,设此概率为 r 并称之为超越概率。在结构阻尼比较小的情况下,应用随机理论来推导输入功率谱的公式如下:

$$S_{in}(\omega) = \frac{\xi}{\pi\omega} R^2(\omega) / \left\{ -\ln \left[\frac{\pi}{\omega T} \ln(1-r) \right] \right\} \quad (1.2)$$

该公式将输入地震动的加速度功率谱密度函数 $S_{in}(\omega)$ 与反应谱 $R(\omega)$ 直接联系起来。根据规范得到 $R(\omega)$ 之后,再确定参数 r, T, ξ 的值,即可直接计算得到地震动输入的加速度功率谱函数。

逐步积分法:逐步积分法应用随机振动理论,间接地建立了功率谱密度函数与反应谱之间的关系。与直接转化法相比,逐步积分法更为严谨,结果更为精确,计算过程也更为复杂。本章程序开发所使用的方法即为逐步积分法。

方程(1.1)已经给出了地震动输入与输出的加速度功率谱密度的关系。那么,在平稳激励作用下,对于阻尼比为 ξ 、自振频率为 ω_0 的单自由度体系而言,其输出加速度功率谱密度函数的均方值可以表示为

$$\sigma_{out}^2(\xi, \omega_0) = \int_0^\infty S_{out}(\omega, \omega_0) d\omega = \int_0^\infty \frac{\omega_0^4 + 4\omega_0^2 \xi^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\omega_0^2 \xi^2 \omega^2} S_{in}(\omega) d\omega \quad (1.3)$$

则由随机振动理论可知,该体系的最大绝对加速度为

$$A_{max}(\omega, \xi) = F\sigma_{out} \quad (1.4)$$

其中, F 为绝对加速度过程的峰值因子。

以上便是求解平稳地震功率谱密度函数的相关公式。而对于非平稳地震动的情形, 为应用上述理论, 应定义包络函数 $E_n(t)$, 本书对包络函数的定义如下:

$$E_n(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2, & t < t_1 \\ 1, & t_1 < t < t_2 \\ e^{-c(t-t_2)/(\Delta f)}, & t_2 < t \end{cases} \quad (1.5)$$

式中, t_1, t_2 分别为主震平稳段的起始、终止时间, c 为衰减系数。

对于地表非平稳地震动, 应用以上模型, 输入的加速度功率谱密度函数 $S'_{in}(\omega)$ 、输出的加速度功率谱密度函数 $S'_{out}(\omega, \omega_0)$ 及其均方值 $\sigma'^2_{out}(\xi, \omega_0)$ 分别为

$$S'_{in}(\omega) = E_n^2(t) S_{in}(\omega) \quad (1.6)$$

$$S'_{out}(\omega, \omega_0) = E_n^2(t) S_{out}(\omega, \omega_0) \quad (1.7)$$

$$\sigma'^2_{out}(\xi, \omega_0) = E_n^2(t) \sigma_{out}^2(\xi, \omega_0) \quad (1.8)$$

显然, 上述方程建立了平稳与非平稳两种情形下, 功率谱密度函数之间的关系, 这样就可以应用平稳理论的相关成果来进行非平稳地震动的分析。为此, 取非平稳地震动在持时 T_d 内的平均值作为等效地面平稳地震动的加速度均方值, 从而近似得到结构在非平稳地震动输入下的峰值反应, 即

$$\overline{\sigma'^2_{out}} = \left[\int_{t_1/\sqrt{2}}^{T_d+t_1/\sqrt{2}} E_n^2(t) \sigma_{out}^2 dt \right] / T_d = \left\{ \left[\int_{t_1/\sqrt{2}}^{T_d+t_1/\sqrt{2}} E_n^2(t) dt \right] / T_d \right\} \sigma_{out}^2 = M \sigma_{out}^2 \quad (1.9)$$

上式中, M 是考虑非平稳输入的因子, 与时间包络函数的参数及地震持时有关。强度超过 50% 的峰值反应称为地震动持时。因此, 按照上面叙述的方法可以得到不同频率成分的非平稳输入下体系的最大绝对加速度峰值:

$$A' = F \overline{\sigma'^2_{out}} = F \sqrt{M} \sigma_{out} \quad (1.10)$$

根据上述关于非平稳地震动体系最大绝对加速度幅值的分析, 可以对比其与规范反应谱的异同, 从而确定功率谱模型参数, 具体内容参见文献[1]。

以上分析完成了规范反应谱到输入地震功率谱的转化, 为一致地震动的生成奠定了基础。不同频率成分的结构响应幅值 A 可以由式(1.4)或(1.10)求出, 则对圆频率为 ω 的谐波成分可以由下式求出

$$\ddot{u}(\omega) = A \cos[\omega t + P'(\omega)] \quad (1.11)$$

上式中引入了随机相位角 $P'(\omega)$, 其范围为 $0 \sim 2\pi$, 体现了地震动的随机特性。

然后, 将不同的频率成分进行叠加, 获得地震动时程

$$\ddot{u}'(t) = \sum_{\omega=\omega_1}^{\omega_n} \ddot{u}(\omega) \quad (1.12)$$

上式中, ω_1 和 ω_n 分别代表离散频率域的最小值和最大值。

注意到式(1.12)生成的是时间域内平稳的地震动时程, 还需要乘以包络函数以生成非平稳地震动时程, 即

$$\ddot{u}(t) = E_n(t) \ddot{u}'(t) \tag{1.13}$$

以上简单介绍了一致地震动生成的理论方法, 下面将对一致地震动生成程序编制流程进行介绍。

1.2.2 一致地震动可视化程序编制流程

本程序预先给定了三种规范反应谱^[2-4], 分别来自公路桥梁、建筑和电力设施抗震设计规范。程序的编制流程如图 1.1:

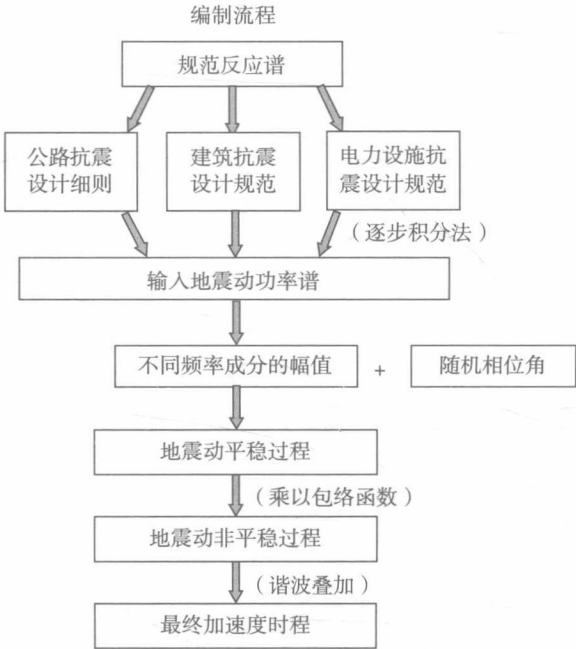


图 1.1 地表一致地震动生成程序编制流程图

1.2.3 一致地震动程序有效性验证

根据上面的理论方法和编制流程, 开发了一致地震动生成可视化程序 TJU-AEM(Artificial Earthquake Motion), 界面如下图所示。本算例选择公路桥梁抗震设计细则中给出的规范反应谱, 其中参数(包括桥梁分类、设防烈度、场地类型、区划图特征周期和阻尼比)均在图 1.2 中给出, 生成的一致地震动加速度时程如图 1.3 所示。



图 1.2 一致地震动可视化程序界面

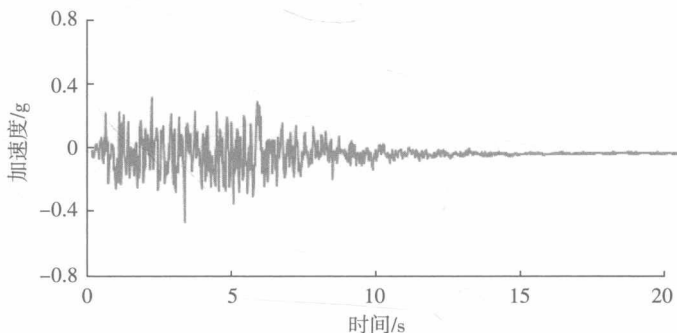


图 1.3 一致地震动加速度时程

为了验证加速度时程的准确性,下面给出了它的实际反应谱和规范反应谱的拟合情况。如图 1.4 所示,二者拟合良好,表明加速度时程具有较好的准确性和可靠性。

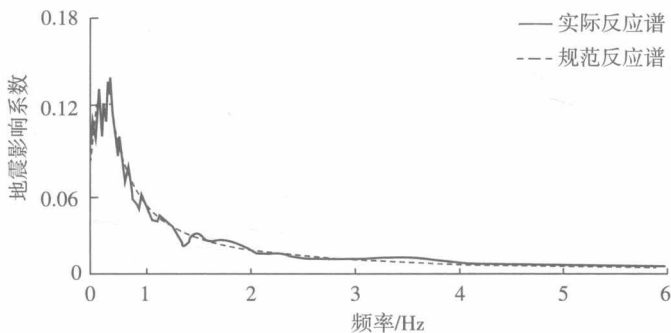


图 1.4 一致地震动加速度时程

1.3 地表非一致地震动生成理论、方法与程序 MEGMS 开发

1.3.1 地表非一致地震动生成理论和方法简述

地表非一致地震动生成是指在模拟结构输入地震动时考虑地面运动的空间变化效应(即行波效应、相干效应和局部场地效应)的影响^[5]。传统的一致地震动的模拟方法只考虑地面运动随时间变化的特性,而没有考虑地面运动的空间变异性。事实上,地震作用过程中,从震源释放出来的能量以波的形式传至地表。波在传播过程中,由于路径距离不同必然产生相位差,经过地层分界面以及到达地表之后必然产生反射、干涉等现象,而且由于不同区域场地土自振特性的不同,也必然会引起输入地震动的差异。地震观测结果同样证明了地震动空间变异性的客观存在^[6]。因此,非一致输入是更加合理的地震动输入模式。一致地震动输入假定结构各支点的地震作用时程完全相同,对于平面尺寸较小的结构是可以接受的,但对于平面尺寸较大的结构,例如桥梁、管线、核电站、坝体、大尺度边坡等,地面运动的空间变化将对结构反应产生重要影响^[7,8]。显然,关于非一致地震动输入的研究主要是针对这些平面尺寸较大的结构提出来的。

地表非一致地震动一般通过目标功率谱和相干函数生成,并由目标反应谱拟合,使所生成的地震动适用于不同类别的场地。金井清、胡聿贤-周锡元和 Clough-Penzien 功率谱模型以及 Harichandran-Vanmarcke、Hao Hong 和 QWW 相干函数模型在本章所介绍的地表非一致地震动生成程序中均有所涉及。对于可视化程序中反应谱的选取,参见建筑、桥梁和电力抗震设计规范^[2-4]。下面对几种涉及的功率谱和相干函数模型进行简要地介绍:

白噪声功率谱模型

1947 年, Houser 将加速度功率谱密度函数假定为白噪声模型

$$S(\omega) = S_0 - \infty \leq \omega \leq \infty \quad (1.14)$$

式中, S_0 是白噪声过程谱强度因子, 为常数。

实际上, 地震动的频率是在一定范围内分布的, 为避免地震动时程方差 $\int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega$ 趋于无穷, 提出了有限带宽白噪声修正式的定义域: $-\omega_0 \leq \omega \leq \omega_0$, ω_0 为截止频率。该功率谱模型分析过程简单, 计算方便, 物理意义明确。但是, 地震动作为一个非平稳的随机过程, 与白噪声存在本质区别, 实测地震动时程也表明实际功率谱与有限带宽白噪声谱有很大的差异。

金井清功率谱模型

Kanai-Tajimi(金井清)功率谱模型于 1960 年由日本的金井清和田治见宏提出, 此模型假设地震动过程中基岩的振动过程为白噪声, 将基础与基岩之间的土层模