

SIMPLIFIED SERIES OF
CIVIL ENGINEERING

清华大学土木工程系组编

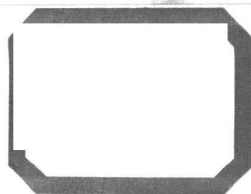
丛书主编 崔京浩

裴星洙 张立 任正权 编著

简明土木工程系列专辑

高层建筑结构地震响应 的时程分析法

中国水利水电出版社 
www.waterpub.com.cn
知识产权出版社 
www.cnipr.com



Simplified Series of Civil Engineering

清华大学土木工程系组编

丛书主编 崔京浩

裴星洙 张立 任正权 编著

简明土木工程系列专辑

高层建筑结构地震响应的时程分析法

中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

知识产权出版社

www.cnipr.com



内容提要

本书是由清华大学土木工程系组编的“土木工程系列专辑”中的一本,为满足土木工程专业人员“一看即懂、一懂能用”的实际需要编写而成的。全书由基本章节10章和两篇附录组成,内容主要包括振动基础知识、多质点体系自振特性分析,多质点体系弹性地震响应分析、时程分析法在抗震设计中的应用实例以及相关电子计算机程序等。全书较系统地介绍了高层建筑结构地震响应的时程分析方法。本书在编著过程中,严格遵循“新颖性”、“实用性”、“科学性”的三大原则。

本书内容密切结合我国工程实际,同时也尽可能地反映国际上在这一领域中的最新研究和应用成果,以及编著者的一些科研成果。

本书可供从事建筑结构抗震设计、科研、施工的技术人员使用,也可作为大专院校土木工程等相关专业高年级本科生、研究生的教材或教学参考书。

选题策划: 阳 森 张宝林 E-mail: yangsanshui@vip.sina.com; z_baolin@263.net

责任编辑: 阳 森 张宝林

文字编辑: 董拯民 兰国钰

图书在版编目(CIP)数据

高层建筑结构地震响应的时程分析法/裴星洙, 张立,
任正权编著. —北京: 中国水利水电出版社: 知识产权
出版社, 2006

(简明土木工程系列专辑/崔京浩主编)

ISBN 7-5084-3544-3

I. 高... II. ①裴...②张...③任... III. 高层建
筑—建筑结构—地震反应分析 IV. TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 001438 号

简明土木工程系列专辑

高层建筑结构地震响应的时程分析法

裴星洙 张立 任正权 编著

中国水利水电出版社 出版发行 (北京市西城区三里河路6号; 电话: 010-68331835 68357319)
知识产权出版社 (北京市海淀区马甸南村1号; 电话、传真: 010-82000893)

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经销

北京市兴怀印刷厂印刷

850mm×1168mm 32开 7印张 188千字

2006年2月第1版 2006年2月第1次印刷

印数: 0001—4000册

定价: 16.00元

ISBN 7-5084-3544-3

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题, 可寄中国水利水电出版社营销中心调换

(邮政编码 100044, 电子邮件: sales@waterpub.com.cn)

土木工程是一个历史悠久、生命力强、投入巨大、对国民经济具有拉动作用、专业覆盖面和行业涉及面极广的一级学科和大型综合性产业，为它编一套集新颖性、实用性和科学性为一体的“简明系列专辑”，既是社会的召唤和需求，也是我们的责任和义务。

新颖性——反映新标准、新规程、新规范、新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法

实用性——深入浅出，让人一看就懂，一懂能用，不是手册，胜似手册

科学性——编写内容均有出处

——摘自《简明土木工程系列专辑》总序

清华大学土木工程系组编

简明土木工程系列专辑

编 委 会

名誉主编 陈肇元 袁 驷

主 编 崔京浩

副主编 石永久 宋二祥

编 委 (按汉语拼音排序)

陈永灿 胡和平 金 峰 李庆斌

刘洪玉 钱稼茹 王志浩 王忠静

武晓峰 辛克贵 阳 森 杨 强

余锡平 张建民 张建平

编 辑 办 公 室

主 任 阳 森

成 员 张宝林 董拯民 彭天赦 谈智慧

周 媛 莫 莉 张 冰 邹艳芳

总 序

国务院学位委员会在学科简介中为土木工程所下的定义是：“土木工程（Civil Engineering）是建造各类工程设施的科学技术的统称。它既指工程建设的对象，即建造在地上、地下、水中的各种工程设施，也指所应用的材料、设备和所进行的勘测、设计、施工、保养、维修等专业技术”。土木工程是一个专业覆盖面极广的一级学科。

英语中“Civil”一词的意义是民间的和民用的。“Civil Engineering”一词最初是对应于军事工程（Military Engineering）而诞生的，它是指除了服务于战争设施以外的一切为了生活和生产所需要的民用工程设施的总称，后来这个界定就不那么明确了。按照学科划分，地下防护工程、航天发射塔架等设施也都属于土木工程的范畴。

土木工程是国家的基础产业和支柱产业，是开发和吸纳我国劳动力资源的一个重要平台，由于它投入大、带动的行业多，对国民经济的消长具有举足轻重的作用。改革开放后，我国国民经济持续高涨，土建行业的贡献率达到 1/3；近年来，我国固定资产的投入接近甚至超过 GDP 总量的 50%，其中绝大多数都与土建行业有关。随着城市化的发展，这一趋势还将继续呈现增长的势头。

相对于机械工程等传统学科而言，土木工程诞生得更早，其发展及演变历史更为古老。同时，它又是一个生命力极强的学科，它强大的生命力源于人类生活乃至生存对它的依赖，甚至可以毫不夸张地说，只要有人类存在，土木工程就有着强大的社会需求和广阔的发展空间。

随着技术的进步和时代的发展，土木工程不断注入新鲜血液，呈现出勃勃生机。其中工程材料的变革和力学理论的发展起

着最为重要的推动作用。现代土木工程早已不是传统意义上的砖瓦灰砂石，而是由新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法武装起来的为众多领域和行业不可或缺的大型综合性学科，一个古老而又年轻的学科。

综上所述，土木工程是一个历史悠久、生命力强、投入巨大、对国民经济具有拉动作用、专业覆盖面和行业涉及面极广的一级学科和大型综合性产业，为它编写一套集新颖性、实用性和科学性为一体的“简明系列专辑”，既是社会的召唤和需求，也是我们的责任和义务。

清华大学土木工程系是清华大学建校后成立最早的科系之一，历史悠久，实力也比较雄厚，有较强的社会影响和较广泛的社会联系，组编一套“简明土木工程系列专辑”，既是应尽的责任也是一份贡献，但面对土木工程这样一个覆盖面极广的一级学科，我们组编实际起两个作用：其一是组织工作，组织广大兄弟院校及设计施工部门的专家和学者们编写；其二是保证质量的作用，我们有一个较为完善的专家库，必要时请专家审阅、定稿。

简明土木工程系列专辑包括以下几层含义：简明，就是避免不必要的理论证明和繁琐的公式推导，采用简洁明快的表述方法，图文并茂，深入浅出，浅显易懂；系列，指不是一本书而是一套书，这套书力争囊括土木工程涵盖的各个次级学科和专业；专辑，就是以某个特定内容编辑成册的图书，每本书的内容可以是某种结构的分析与计算，某个设计施工方法，一种安装工艺流程，某种监测判定手段，一个特定的行业标准等等，均可独立成册。

这套丛书不称其为“手册”而命名为“系列专辑”，原因之一是一些特定专题不易用手册的方法编写；原因之二是传统的手册往往“大而全”，书厚且涉及的技术领域多，而任何一个工程技术人员在某一个阶段所从事的具体工作又是针对性很强的，将几个专业甚至一个项目的某个阶段集中在一本“大而全”的手册势必造成携带、查阅上的不方便，加之图书的成本过高，编写人员臃肿，组织协调困难，出书及再版周期过长，以致很难反映现

代技术飞速发展、标准规范规程更新速度太快的现实。考虑到这些弊端，这套系列专辑采用小开本，在选题上尽量划分得细一些，视专业、行业、工种甚至流程的不同，能独立成册的绝不合二为一，每本书原则上只讨论一个专题，根据专题的性质和特点有的书名仍冠以“手册”两字。

这套系列专辑的编写严格贯彻“新颖性、实用性、科学性”三大原则。

新颖性，就是充分反映有关新标准、新规程、新规范、新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法，老的、过时的、已退出市场的一律不要。体现强劲的时代风貌。

实用性，就是避免不必要的说理和冗长的论述，尽可能从实用的角度用简洁的语言以及数据、表格、曲线图形式来表述；深入浅出，让人一看就懂，一懂能用；不是手册，胜似手册。

科学性，就是编写内容均有出处，参考文献除国家标准、行业标准、地方标准必须列出以外，尚包括引用的论文、专著、手册及教科书。

这套系列专辑的读者对象是比较宽泛的，它包括大专院校师生，土木工程领域的管理、设计、施工人员，以及具有一定阅读能力的建筑工人。它既可作为土建技术人员随身携带及时查阅的手册，又可选作大专院校、高职高专的教材及专题性教辅材料。

崔京浩

2005年10月于清华园

崔京浩，男，山东淄博人。1960年清华大学土建系毕业，1964年清华大学结构力学研究生毕业，1986~1988年赴挪威皇家科学技术委员会做博士后，从事围岩应力分析的研究。先后发表论文150多篇，编著专业书4本，参加并组织编写巨著《中国土木工程指南》，任编辑办公室主任，并为该书撰写绪论；主持编写由清华大学土木工程系组编的“土木工程新技术丛书”和“简明土木工程系列专辑”，并任主编。曾任清华大学土木系副系主任，现为中国力学学会理事，《工程力学》学报主编，享受国务院特殊津贴。

前 言

地震是威胁人类安全的主要自然灾害之一。根据中国地震局的预测,目前我国大陆已进入了第五次地震活跃期。1995年日本的阪神大地震,特别是2004年12月26日发生的印度洋大地震和海啸给人类社会带来的震害,使我们进一步认识到了地震的巨大破坏力,同时也将促进各国有关抗震设计理论和设计技术的快速发展。

我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)规定:在抗震设计中,对于特别不规则的建筑,甲类建筑,8度区Ⅰ、Ⅱ类场地和7度区高度大于100m的建筑,8度区Ⅲ、Ⅳ类场地高度大于80m的建筑和9度区高度大于60m的建筑应采用弹性时程分析法对其在常遇地震下的抗震承载力与变形进行补充计算。同时建议对甲类建筑和某些高大的以及特别不规则并有明显薄弱部位的建筑,应采用时程分析法计算罕遇地震下结构薄弱层的弹塑性变形。日本2000年度开始实施的《修正建筑基准法》中,提出了四种验证抗震设计的方法,其中之一就是时程分析法,并规定对超高层建筑(60m以上)必须利用时程分析法验证其抗震能力。

在每一个很短的时间间隔 Δt 内,利用数值积分的手段求解运动微分方程

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = -\ddot{y}[m]\{1\}$$

的解析方法称为时程分析法,在数学上亦称为逐步积分法。这种方法是由初始状态开始逐步积分直至地震终止,求出结构在地震作用下从静止到振动,直至振动终止整个过程的地震响应(位移、速度和加速度)。

随着现代社会和经济的迅猛发展,对建筑物提出了比以往

更严格的抗震安全性及使用性要求，在抗震设计中，仅考虑无人员伤亡和无结构损伤是不够的，还需要考虑设备功能的连续性这一概念。本书正是在这样一种前提下，为了满足这种社会需求而出版的。本书对基础理论进行了比较详尽的介绍，同时结合计算机程序以及抗震设计实例，介绍了时程分析法的具体应用，特别适合初学者以及工程实际应用。限于篇幅，本书并不注重严密的理论探讨。

本书由西安交通大学张立副教授（第1~3章）、延边大学任正权副教授（第4~6章）以及西安交通大学裴星沬副教授（第7~10章和附录）执笔，全书最后由张立副教授负责统稿完成。

向对本书的出版给予支持的中国水利水电出版社编审阳森主任表示衷心感谢！

本书在编著过程中得到延边大学理工学院金在权教授，西安交通大学土木系研究生廖述清、周晓松，以及本科生赵光伟、岳焱超、王健的大力支持和帮助，特此致谢。

本书可作为相关工程技术人员的工具书，也可作为大专院校土木工程专业的参考教材。我们殷切期望这本书的出版能对我国从事抗震结构研究的科研工作者以及与抗震结构设计有关的工程技术人员有所启发和帮助。

由于编者水平所限，错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

裴星沬

2005年4月于西安交通大学

目 录

总序

前言

第 1 章 动力学基础 1

第 1 节 概述 / 1

第 2 节 运动和坐标 / 1

第 3 节 牛顿的运动定律和运动方程 / 4

第 4 节 达朗伯原理和惯性力 / 5

第 2 章 单质点体系的振动 6

第 1 节 概述 / 6

第 2 节 振动模型 / 6

第 3 节 自由振动 / 7

第 4 节 有阻尼自由振动 / 11

第 5 节 强迫振动 / 17

第 6 节 地动作用下的强迫振动 / 22

第 3 章 单质点体系地震响应和响应谱分析 28

第 1 节 概述 / 28

第 2 节 基于冲击力的振动分析 / 28

第 3 节 杜哈梅积分 / 30

第 4 节 基于地震动的响应分析 / 31

第 5 节 地震响应谱 / 48

第 4 章 多质点体系自振特性分析 60

第 1 节 概述 / 60

第 2 节 质量矩阵 / 60

第 3 节	刚度矩阵 / 61
第 4 节	阻尼矩阵 / 62
第 5 节	多质点体系运动微分方程式 / 64
第 6 节	特征值和特征向量 / 64
第 7 节	计算机程序设计 / 68
第 5 章	阻尼矩阵计算 79
第 1 节	概述 / 79
第 2 节	运动微分方程中速度无耦合假设 / 79
第 3 节	阻尼矩阵的形成 / 81
第 4 节	几种无耦合阻尼模型 / 83
第 5 节	计算机程序设计 / 87
第 6 章	多元一次联立方程的解法 98
第 1 节	概述 / 98
第 2 节	LU 三角分解法的基本思想 / 98
第 3 节	LU 三角分解 / 100
第 4 节	一次联立方程的解 / 102
第 5 节	计算机程序设计 / 103
第 7 章	多质点体系地震响应弹性分析 111
第 1 节	概述 / 111
第 2 节	Nigam 法 / 111
第 3 节	Wilson- θ 法 / 123
第 4 节	振型叠加法 / 131
第 8 章	多质点体系构件非线性恢复力模型 140
第 1 节	概述 / 140
第 2 节	Masing 规则 / 142
第 3 节	计算机程序设计 / 148
第 9 章	多质点体系弹塑性地震响应分析 157
第 1 节	概述 / 157

第 2 节	增量运动方程 / 157	
第 3 节	计算机程序设计 / 165	
第 10 章	时程分析法在抗震设计中的应用实例	177
第 1 节	概述 / 177	
第 2 节	算例模型 / 179	
第 3 节	输入地震动 / 182	
第 4 节	结构振动模型和层间恢复力模型 / 186	
第 5 节	计算结果 / 189	
附录 1	建筑结构振动模型	192
第 1 节	概论 / 192	
第 2 节	剪切型层模型 / 193	
第 3 节	剪弯型层模型 / 194	
第 4 节	D 值法 / 195	
第 5 节	等价剪切刚度法 / 198	
附录 2	构件的恢复力模型	201
参考文献		205
作者简介		206

第 1 章 动力学基础

第 1 节 概 述

时程分析法是一种复杂的动态分析方法。为了便于对时程分析法的基本思路和计算方法以及与其相关的一些内容（例如计算力学模型、阻尼和输入地震动等）展开讨论，我们在本章中简要地回顾一下与动力学相关的基础知识。

第 2 节 运动和坐标

某一个质点随着时间的推移，它的位置发生了变化，这种现象称为运动（motion），为了表示位置的移动，有必要定义作为基准的坐标系（coordinates system）。

运动中的点的移动量称为位移（displacement），位移对时间的变化量称为速度（velocity），速度对时间的变化量称为加速度（acceleration）。质点沿着直线做运动时，时间设为 t ，位移设为 x ，则速度和加速度表示为

$$\text{速度} \quad v = dx/dt = \dot{x} \quad (1.1)$$

$$\text{加速度} \quad a = dv/dt = d^2x/dt^2 = \ddot{x} \quad (1.2)$$

研究运动和与其伴随的力之间关系的力学部分称为动力学（dynamics）。如果位移 x 的单位为 cm（时间 t 的单位依然采用国际单位），则从式（1.1）和式（1.2）可以知道速度和加速度的单位分别为 cm/s 和 cm/s²。在多数情况下，还可以把它们称为 kine 和 gal。

作为表示质点的空间位置的坐标系，一般采用如图 1.1 (a)

所示的右手直角坐标系。往往 x - y 面表示水平的地基表面, z 的正方向垂直向上。只讨论平面内结构的地震响应时, 就采用如图 1.1 (b) 所示的平面坐标系, 可以不考虑 y 轴。坐标 (coordinates) 的概念不仅仅在于利用坐标轴的长度量纲 (x, y, z) 或 (x, y) 表示某一质点的空间位置, 还有更广泛的意义。通常, 极坐标中所使用的表示质点位置的角度和表示一个物体绕自身重心轴转动的转角, 也可以认为是一种坐标。在 x - z 平面中, 如图 1.1 (b) 所示那样, 根据右手规则, 角度的右手螺旋指向 y 轴正向时的角度规定为正。角度的单位为 rad , 角速度和角加速度的单位分别为 rad/s 和 rad/s^2 。

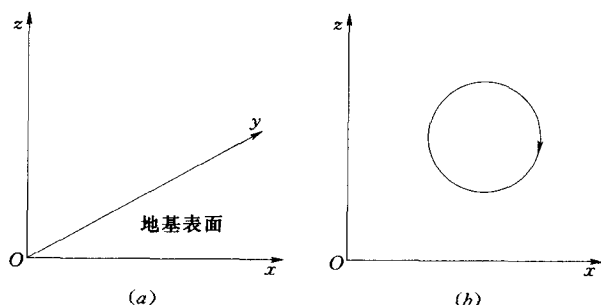


图 1.1 坐标系

能够由构件或复数构件组成的结构体, 并且可以充当力学分析对象的模型, 称为结构体系或简称为体系 (system)。在动力学中作为分析对象的质点体系, 也是将结构物进行极端理想化和单纯化的体系。当体系具有 n 个移动可能性的时候, 叫做体系具有 n 个自由度 (degree of freedom)。

具有 n 个自由度的体系在运动中的各个点的位置, 也就构成体系的形态 (configuration), 可以由 n 个互相独立的变量表示。在这里, 将这些独立变量, 作为一种坐标, 称为一般化坐标 (generalized coordinates)。具有长度量纲和角度量纲的变量, 均为一般化坐标。举例来说, 杆件的轴线与 x 轴重合, 长度为 L 在杆件的两端完全约束挠度的直杆, 它的挠度利用 Fourier 级

数表示为

$$z = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sin(k\pi x/l) \quad (1.3)$$

只要知道系数 a_k ，就可以完全确定整个杆件挠度 z 。因此，在这种情况下，可以将系数 a_k ($k=1,2,3,\dots$) 认为是一般化坐标。从式 (1.3) 可以看出，系数 a_k 有无穷多个，所以像这种杆件的连续体 (continuous system) 具有无穷多个自由度。然而，把杆件看成离散系 (discrete system)，利用 n 个点的位移近似表示挠度，则自由度数就变成 n 个。式 (1.3) 中，是利用 $\sin$ 函数表示挠度。在一般的情况下，利用杆件两端满足边界条件的任意的已知函数 $w_k(x)$ 都可以表示挠度。

$$z = \sum_{k=1}^n b_k w_k(x) \quad (1.4)$$

在这种情况下， b_k 为一般化坐标，将函数 $w_k(x)$ 称为形态函数 (shape function)。

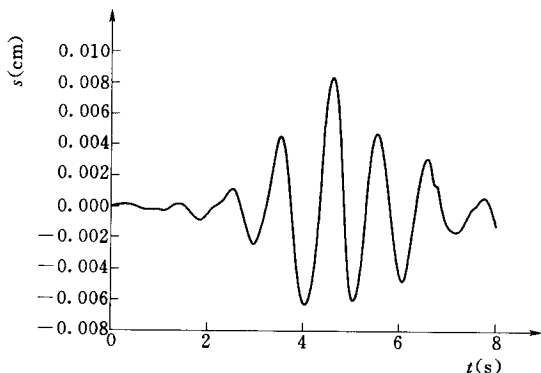


图 1.2 位移-时程曲线

图 1.2 表示随时间发生变化的位移。很明显，在这种情况下时间也是一种坐标。一般地，将某一个量作为时间的函数表示出来的时候，其函数称为时程 (time history)。时程曲线有两种形式，一种为时间的连续函数，另一种为用某时间间隔来表

示的离散值的组合。

具有 n 个自由度的体系发生振动时, 利用坐标 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 可以表示实际位移。此时, 可以利用互相独立的只有时间函数的 $q^{(1)}(t), q^{(2)}(t), \dots, q^{(n)}(t)$ 的一次结合来表示位移, 即

$$\begin{aligned} x_1 &= u_1^{(1)} q^{(1)} + u_1^{(2)} q^{(2)} + \dots + u_1^{(n)} q^{(n)} \\ x_2 &= u_2^{(1)} q^{(1)} + u_2^{(2)} q^{(2)} + \dots + u_2^{(n)} q^{(n)} \end{aligned} \quad (1.5)$$

...

$$x_n = u_n^{(1)} q^{(1)} + u_n^{(2)} q^{(2)} + \dots + u_n^{(n)} q^{(n)}$$

假如已知系数 $u_i^{(j)} (i, j = 1, 2, \dots, n)$, 则可根据函数 $q^{(j)} (j = 1, 2, \dots, n)$ 来确定坐标 $x_i (i, j = 1, 2, \dots, n)$, 它可以完全表示体系的振动形态。所以说, 函数 $q^{(j)} (j = 1, 2, \dots, n)$ 也是一般化坐标。式 (1.5) 表示从 n 元坐标 x_i 到 n 元坐标 $q(j)$ 的坐标变换。

当系数 $u_i^{(j)}$ 满足某些条件时候, 一般化坐标 $q^{(j)} (j = 1, 2, \dots, n)$ 能够表示单弦振动 (simple harmonic motion)。像这种能够表示单弦振动的一般化坐标, 称为基准坐标 (normal coordinates)。此时, 式 (1.5) 表示将体系的复杂运动分解成单纯的单弦振动来表示的表达形式。

总之, 在动力学中, 坐标的广义很深。特别是式 (1.5) 表示的坐标变换和基准坐标的概念, 在结构体系振动分析中, 起重要作用。

第 3 节 牛顿的运动定律和运动方程

众所周知, 运动和作用力的一般关系是由牛顿确立的, 有以下 3 条定律组成:

第一定律 (惯性定律): 不受力作用的质点, 将保持静止或匀速直线运动。

第二定律 (力与加速度之间的关系定律): 质点的质量与加速度的乘积, 等于作用于质点的力的大小, 加速度的方向与力