

土木工程研究生系列教材

结构动力学

刘晶波 杜修力 主 编
欧进萍 主 审

土木工程研究生系列教材

结 构 动 力 学

刘晶波 杜修力 主编

刘晶波 杜修力 李宏男 夏 禾 李鸿晶 编著

欧进萍 主审

机械工业出版社

本书是土木工程研究生系列教材之一。本书在介绍基本概念和基本理论的同时,注重介绍本研究领域的前沿动态和存在的关键性问题,注重读者解决问题能力的培养和研究发展方向的指点。

本书通过对单自由度体系、多自由度体系和分布参数体系的系列介绍,使读者系统掌握结构动力学的基本理论和分析方法;通过结构动力问题分析中的数值分析方法、离散化分析和随机振动分析的系列介绍,使读者初步具有分析和解决结构动力学的理论研究和实际工程问题的能力。

本书可作为大土木专业研究生的教材和从事土木工程研究的技术人员学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

结构动力学/刘晶波,杜修力主编. —北京:机械工业出版社,2005.1
土木工程研究生系列教材
ISBN 7-111-15804-0

I. 结… II. ①刘…②杜… III. 结构动力学-研究生-教材 IV. 0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 130701 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:季顺利 版式设计:张世琴 责任校对:吴美英
封面设计:张 静 责任印制:洪汉军
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2005 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷
1000mm×1400mm B5·10.375 印张·399 千字
定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68326294
封面无防伪标均为盗版

土木工程研究生系列教材编审委员会

顾问: (以姓氏笔画为序)

刘宝琛	刘祖德	刘怀恒	王正宏
林 皋	任爱珠	朱博鸿	沈世钊
沈祖炎	欧进萍	陈英俊	周 氏
周锡元	钟善桐	赵国藩	殷宗泽
顾晓鲁	蔡美峰		

主任委员: 江见鲸

副主任委员: (以姓氏笔画为序)

朱合华	李宏男	李 奇	李爱群
陈云敏	张永兴	杜修力	张素梅
尚守平	姜忻良	夏 禾	徐志胜
廖红建			

委员: (以姓氏笔画为序)

卫 军	王 钊	王清湘	卢廷浩
朱召泉	李正良	李英民	李洪泉
李鸿晶	刘晶波	吴知丰	陈国兴
杨果林	张家生	张毅刚	张耀春
郑 刚	易伟建	单 建	周朝阳
赵树德	徐礼华	袁迎曙	康清良
盛宏玉			

秘书长: 季顺利

土木工程研究生系列教材序

随着我国高等教育的发展,普通本科教育已由精英式教育发展成为大众式教育。我国科学技术的高速发展,对具有高级专业知识、高级专业技能的专门人才的需求,日益迫切,这为硕士研究生教育的发展提供了广阔空间。一些高等院校,硕士研究生的招生规模,近年来正以 15%~30% 的速度发展。对一些研究型的重点高校,在“十五”期间,本科生与研究生的招生比例要大致相当。许多高校已获得工程硕士的培养授权,这为研究生培养又开辟了新途径。

硕士研究生招生规模的扩大,对传统的研究生教育模式提出了挑战。过去硕士生的培养基本套用博士生的培养模式,主要靠传帮带式的教育模式,而对数量增大的研究生教育,必须建立整建制的培养模式,即要求硕士研究生的教育培养模式向公共化、规范化方向发展。对此,硕士研究生的教材,特别是研究生教育的平台课、学位课的教材建设就显得特别重要了。

机械工业出版社根据当前土木工程研究生教育发展现状,本着“大土木工程”的教育思想,组织国内部分高校土木工程专业的教授,对土木工程研究生用教材建设进行了研讨,并组织编写了土木工程研究生系列教材。为保证教材的编写质量,组织成立了教材编审委员会,聘请了一批学术造诣深、德高望重的专家作顾问和教材主审。本套系列教材编写、出版的思路是:先基础课、平台课教材,后专业课教材。教材组织由长期给研究生授课的老师合作编写,达到“学校优势互补,质量上乘”的目标。教材体系设计,本着“重基本理论、重学科发展,结合学生现状和人才培养要求”的原则。教材编写质量,本着“出精品、主编负责、主审把关”的原则,符合国务院学位委员会设定的专业要求。

本套系列教材将于 2005 年陆续出版。我们相信,本套系列教材的出版将对我国土木工程研究生教育的发展和教学质量的提高及人才培养,产生积极作用,为我国经济建设和社会发展做出贡献。

王见第

前 言

本书为土木工程研究生结构动力学教材。本书作者多年来从事结构动力学或相关课程的教学工作，编写了多部《结构动力学》校内教材，在此基础上编写了本教材。本书在选材上注重基础理论和基本概念，同时注重培训解决理论研究和工程问题的能力，在介绍结构动力学基础知识的同时，也介绍该研究领域的前沿动态和存在的关键性问题。在本书的编写中，作者力求避免教材内容、论述和思路跳跃过大，使初学者难以理解的弊病；内容的安排上力求循序渐进、由浅入深、系统性和层次感突出，易于理解和自学；避免内容过于偏重某一专业，对基本原理和方法予以全面介绍，使教材内容有较宽的涵盖面，适用于大土木专业研究生的学习和教学的需要，使学习的知识具有较强的通用性，并能在一定程度上反映结构动力学研究的新成果。为配合教学，本书安排了适当的例题和习题，以利于对课程内容的理解和掌握。

本书系统介绍了结构动力学基础理论知识和分析方法。通过单自由度体系、多自由度体系和分布参数体系的系列介绍，使学生系统掌握结构动力学的基本理论和分析方法；通过结构动力问题分析中的数值分析方法、离散化分析和随机振动分析的系列介绍，使学生初步具备分析和解决理论研究和实际工程问题的能力；通过介绍若干重要的前沿研究成果，使学生能较迅速接触到结构动力学研究领域的前沿。本书主要内容包括：①结构动力学概述：结构动力分析的目的，动力荷载类型，结构动力计算的特点，结构离散化方法；②运动方程的建立方法：基本动力体系，D'Alembert 原理，虚位移原理，Hamilton 原理，运动的 Lagrange 方程，重力的影响，地基运动的影响；③单自由度体系：自由振动、对简谐荷载、周期荷载和任意荷载的反应，自振频率、自振周期，阻尼比，对数衰减率，振动中的能量，共振，动力放大系数，结构粘性阻尼比的确定，复阻尼理论，振动的测量，隔振（震）原理，Duhamel 积分，Fourier 变换，反应谱；④多自由度体系：运动的特征方程和频率方程，振型的正交性，振型叠加法，结构中的阻尼和阻尼矩阵的构造，振型加速度方法和静力修正法；⑤分布参数体系：梁的偏微分运动方程，自振频率和振型，剪切变形和转动惯性的影响，振型的正交性，梁的动力反应，均直梁轴向振动分析，分布参数结构动力分析；⑥数值分析方法：结构动

力反应数值分析的显式方法和隐式方法, 结构非线性反应, 数值算法中的基本问题; ⑦实用振动分析: Rayleigh 法, Rayleigh - Ritz 法, 矩阵迭代方法, Jacobi 迭代法, 子空间迭代法; ⑧离散化分析: 建筑物的模型化, 变分直接法, 加权残值法, 动力有限元方法, 动力有限元法的模拟精度和误差; ⑨随机振动分析: 不确定性理论概述, 随机过程及其时域和频域特征, 功率谱密度函数, 窄带与宽带随机过程, 几种常见的地面运动随机过程, 线性单自由度和多自由度体系随机反应, 虚拟激励法, 结构随机反应分析的状态空间法; ⑩专题介绍: 结构地震反应分析中的多点、多维输入问题, 复模态分析方法, 动态子结构法, 结构动力分析中的物理非线性和几何非线性问题, 结构动力参数识别和动力检测。

本书共分 10 章, 其中第 1 章、第 3 章和第 5 章由刘晶波执笔, 第 2 章、第 4 章和第 8 章由杜修力执笔, 第 6 章由夏禾执笔, 第 7 章和第 10 章由李宏男执笔, 第 9 章由李鸿晶执笔。全书由刘晶波、杜修力定稿。研究生王艳、刘阳冰、谷音、刘琳、赵密在书稿的校对、习题和插图等方面做了大量工作。

本书主审欧进萍院士仔细阅读了全部书稿, 并提出了十分有益的建议和修改意见。

由于作者水平所限和时间关系, 本书在内容安排和各章节的衔接上还有考虑不周之处, 疏漏和错误也在所难免, 欢迎读者批评指正。

作 者
2004 年秋

主要符号表

$[C]$	阻尼矩阵
C	阻尼系数
C_n	振型阻尼
c_{cr}	临界阻尼系数
c_{ij}	阻尼矩阵中的元素
E	弹性模量
EI	梁截面抗弯刚度
E_D	一个振动循环内阻尼引起的能量耗散, 即阻尼力做的功
E_I	一个振动循环内外力做的功
E_S	一个振动循环内弹性力做的功
E_K	一个振动循环内惯性力做的功
f	频率 (Hz)
f_n	自振频率 (Hz)
f_I	惯性力
f_D	阻尼力
f_S	弹性或非弹性的(弹簧)恢复力
$H(i\omega)$	复频反应函数
$h(t)$	单位脉冲反应函数
$[K]$	刚度矩阵
K_n	振型刚度
k	刚度
k_{ij}	刚度矩阵中的元素
$[M]$	质量矩阵
M_n	振型质量
M	集中质量、质量线密度, 弯矩
m_{ij}	质量矩阵中的元素
N	轴力, 自由度数
P_0	简谐荷载的幅值
$P, \{P\}$	外荷载, 外荷载向量
Q	广义力, 剪力
q	广义坐标
$R_d(\omega)$	动力放大系数

TR	传递系数
T	周期, 动能
T_n	自振周期
T_D	阻尼体系自振周期
t	时间
t_d	脉冲作用时间
$\{u\}$	位移向量
$u(0)$	初始位移
$\dot{u}(0)$	初始速度
u	位移
u_{st}	等效静位移
u_0	简谐位移的幅值
$\dot{u}$	速度
$\ddot{u}$	加速度
u_g	地面运动位移
$\ddot{u}_g$	地面运动加速度
V	应变能, 势能, 剪力
x	坐标, 输入荷载
y	坐标, 位移反应
ζ	阻尼比
ζ_{cr}	临界阻尼比
ζ_n	n 阶振型阻尼比
η	滞变阻尼参数
ω	圆频率, 外荷载频率
ω_n	自振圆频率
ω_D	阻尼体系自振圆频率
ω/ω_n	频率比
ϕ	相位角
$\{\phi\}_n$	n 阶振型
$[\Phi]$	振型矩阵
ρ	质量密度
θ	转角, 相位角
$\delta(t)$	单位脉冲
Δt	时间步长

目 录

土木工程研究生系列教材序

前言

主要符号表

第1章 概述	1
1.1 结构动力分析的目的	1
1.2 动力荷载的类型	1
1.3 结构动力计算的特点	3
1.4 结构离散化方法	5
习题	9
第2章 分析动力学基础及运动方程的建立	10
2.1 基本概念	10
2.1.1 广义坐标与动力自由度	10
2.1.2 功和能	13
2.1.3 实位移、可能位移和虚位移	15
2.1.4 广义力	15
2.1.5 惯性力	17
2.1.6 弹簧的恢复力	18
2.1.7 阻尼力	19
2.1.8 线弹性体系和阻尼弹性体系	20
2.1.9 非弹性体系	20
2.2 基本力学原理及运动方程的建立	21
2.2.1 D'Alembert 原理	21
2.2.2 虚功原理	24
2.2.3 Hamilton 原理	27
2.2.4 Lagrange 方程	29

2.3 重力的影响	32
2.4 地基运动的影响	34
习题	35
第3章 单自由度体系	38
3.1 无阻尼自由振动	38
3.2 有阻尼自由振动	41
3.2.1 临界阻尼和阻尼比	42
3.2.2 低阻尼体系	44
3.2.3 运动的衰减和阻尼比的测量	46
3.2.4 自由振动试验	47
3.2.5 库仑 (Coulomb) 阻尼自由振动	49
3.3 单自由度体系对简谐荷载的反应	51
3.3.1 无阻尼体系的简谐荷载反应	51
3.3.2 有阻尼体系的简谐荷载反应	53
3.3.3 共振反应	55
3.3.4 动力放大系数	55
3.3.5 阻尼体系动力反应与荷载的相位关系	57
3.3.6 用简谐振动 (强迫振动) 试验确定体系的粘性阻尼比	59
3.4 体系的阻尼和振动过程中的能量	62
3.4.1 自由振动过程中的能量	62
3.4.2 粘性阻尼体系的能量耗散	63
3.4.3 等效粘性阻尼	64
3.4.4 滞变阻尼 (复阻尼) 理论	66
3.5 振动的测量	69
3.5.1 加速度计 (强震仪)	69
3.5.2 位移计 (地震仪)	71
3.6 隔振 (震) 原理	71
3.6.1 力的传递和隔振	72
3.6.2 基底振动的隔离	73
3.7 单自由度体系对周期荷载的反应	76
3.8 单自由度体系对任意荷载的反应	78
3.8.1 时域分析方法——Duhamel 积分	78
3.8.2 频域分析方法——Fourier 变换法	81
3.9 结构地震反应分析的反应谱法	84

习题	88
----------	----

第4章 多自由度体系 91

4.1 两自由度体系的振动分析	91
4.1.1 无阻尼自由振动	91
4.1.2 坐标的耦联	96
4.2 多自由度体系的无阻尼自由振动	97
4.2.1 频率方程	97
4.2.2 振型分析	103
4.3 多自由度体系动力反应的振型叠加法	108
4.3.1 正则坐标变换	108
4.3.2 无阻尼体系动力反应的振型叠加法	110
4.3.3 有阻尼体系动力反应的振型叠加法	112
4.4 结构中的阻尼和阻尼矩阵的构造	117
4.4.1 阻尼实测的例子	118
4.4.2 Rayleigh 阻尼	119
4.4.3 扩展的 Rayleigh 阻尼 (Caughey 阻尼)	122
4.4.4 利用振型阻尼矩阵直接叠加	123
4.4.5 非经典阻尼矩阵的构造	124
4.5 静力修正方法	125
4.6 振型加速度法	127
习题	129

第5章 动力反应数值分析方法 132

5.1 数值算法中的基本问题	132
5.2 分段解析法	133
5.3 中心差分法	135
5.4 Newmark - β 法	139
5.5 Wilson - θ 法	143
5.6 结构非线性反应计算	147
习题	151

第6章 分布参数体系 152

6.1 梁的偏微分运动方程	152
6.1.1 弯曲梁 (欧拉梁) 的横向振动方程	152

6.1.2	考虑轴向力影响的梁的弯曲振动方程	154
6.1.3	考虑转动惯量的梁的横向振动方程	155
6.1.4	考虑剪切变形和转动惯量的梁的横向振动方程	157
6.1.5	考虑阻尼影响的梁的振动方程	159
6.2	梁的自振频率和振型	160
6.2.1	弯曲梁的自振频率和振型	160
6.2.2	轴向力对梁的自振特性的影响	166
6.2.3	剪切变形和转动惯性对自振频率的影响	168
6.3	振型的正交性	170
6.4	梁的动力反应	172
6.4.1	广义坐标	173
6.4.2	振型叠加法	174
6.4.3	梁的强迫振动	176
6.5	简支梁在移动荷载作用下的振动	180
6.5.1	简支梁在移动力作用下的振动	180
6.5.2	简支梁在移动质量作用下的振动	183
6.5.3	简支梁在移动车轮加簧上质量作用下的振动	185
6.6	均直梁轴向振动分析	190
6.7	分布参数结构振动分析(动力直接刚度法)	194
6.7.1	分布参数结构的自振特性分析	194
6.7.2	动力直接刚度法	195
习题		203
第7章	实用振动分析	206
7.1	Rayleigh 法	206
7.2	Rayleigh - Ritz 法	209
7.3	矩阵迭代法	212
7.3.1	用矩阵迭代法求基频和振型	212
7.3.2	用矩阵迭代法求高阶频率和振型	215
7.4	Jacobi (雅可比) 迭代法	220
7.5	子空间迭代法	223
习题		224
第8章	连续体动力模型的离散化	226
8.1	集中质量法及建筑物的模型化	226

8.1.1 质量的集中化	227
8.1.2 力学分析模型	227
8.2 变分直接法	229
8.2.1 基本思想	229
8.2.2 试函数的选择及其分类	231
8.3 加权残值法	231
8.3.1 第一种形式的加权残值法	232
8.3.2 第二种形式的加权残值法	233
8.4 动力有限元法	234
8.4.1 有限元离散化	234
8.4.2 基本分析过程	235
8.5 有限元法单元位移模式及插值函数的构造	236
8.6 有限元分析中的基本要素	238
8.6.1 单元刚度矩阵	238
8.6.2 单元质量矩阵	240
8.6.3 等效节点荷载	243
8.7 动力有限元法的精度	247
习题	248

第9章 结构随机振动

9.1 概述	249
9.2 随机过程及其时域特征	251
9.2.1 随机过程的概念	251
9.2.2 随机过程的概率描述	253
9.2.3 随机过程的数字特征	254
9.2.4 平稳随机过程	256
9.2.5 导数过程的相关函数	257
9.3 随机过程的频域特征	258
9.3.1 平稳过程的功率谱密度	258
9.3.2 谱密度的性质	259
9.3.3 导数过程的谱密度	260
9.3.4 窄带与宽带随机过程	261
9.3.5 互谱密度及其性质	261
9.4 随机地震地面运动模型	262
9.4.1 理想白噪声模型	262

9.4.2	金井清 (Kanai - Tajimi) 模型	263
9.4.3	改进的金井清模型	264
9.5	线性单自由度体系随机反应	264
9.5.1	脉冲反应函数和复频反应函数	265
9.5.2	反应过程的均值	267
9.5.3	反应过程的自相关	267
9.5.4	反应过程的自谱密度	268
9.5.5	激励和反应的互相关和互谱密度	269
9.6	线性多自由度体系随机反应	269
9.6.1	直接方法	270
9.6.2	振型叠加分析方法	274
9.7	结构随机反应分析的虚拟激励法	276
9.7.1	单输入情形	276
9.7.2	多输入情形	278
9.8	结构随机反应分析的状态空间法	279
9.8.1	状态空间的基本概念	280
9.8.2	单自由度体系	280
9.8.3	多自由度体系	282
第 10 章	结构动力学专题	284
10.1	结构地震反应分析中的多点输入问题	284
10.1.1	动力方程	284
10.1.2	振型叠加法	285
10.2	结构地震反应分析中的多维输入问题	286
10.2.1	非对称结构在多维地震输入时的振型叠加法	286
10.2.2	多维地震作用下的反应谱方法	287
10.3	复模态分析方法	288
10.3.1	状态变量与状态空间	288
10.3.2	复特征值问题	289
10.3.3	复特征值向量的正交性	290
10.3.4	复模态叠加法	290
10.4	动态子结构法	292
10.4.1	模态综合法	292
10.4.2	界面位移综合法	296
10.5	结构动力分析中的物理非线性问题	298

10.5.1 几个重要的恢复力曲线模型	298
10.5.2 双向恢复力模型	300
10.6 结构动力分析中的几何非线性问题	304
10.6.1 $P-\Delta$ 效应	304
10.6.2 多自由度体系的 $P-\Delta$ 效应问题	305
10.7 结构动力参数识别和动力检测	307
10.7.1 动力参数频域识别方法	307
10.7.2 动力检测的激励和测量方面的考虑	310
参考文献	313

第1章 概述

1.1 结构动力分析的目的

自然界中,除静力问题外,还存在大量的动力问题。例如地震作用下建筑结构的振动问题;机器转动产生的不平衡力引起的大型机器基础的振动问题;风荷载作用下大型桥梁、高层结构的振动问题;车辆运行中由于路面不平顺引起的车辆振动及车辆引起的路面振动;爆炸荷载作用下防护工事的冲击动力反应问题等等,量大而面广。

虽然在一般情况下,对结构设计和结构分析而言,静力问题是首先要面对的,而且是问题的主要方面,但有时动力荷载引起的破坏却是致命的,是引起结构毁灭性破坏的主要原因。例如,地震引起的结构倒塌破坏;风振引起的大桥破坏;飞机撞击核电站、大楼等,其造成破坏和损失的程度远胜于静荷载。因此,在工程结构的研究、设计和安全性评价时,进行结构的动力反应分析是重要的。虽然在某些结构设计规范或结构动力反应分析中,为简化起见,采用了一些拟静力计算方法,例如,结构抗震规范中的反应谱法,抗风分析中用等效静力形式的风压代替实际的风压。但在这些方法中仍必须进行结构动力分析,例如需要确定结构的自振周期,而在多自由度体系的反应谱法分析时还需要确定结构振型等。

结构动力分析的目的是确定动力荷载作用下结构的内力和变形,并通过动力分析确定结构的动力特性。结构动力学是研究结构体系的动力特性及其在动力荷载作用下的动力反应分析原理和方法的一门理论和技术学科,该学科的目的是为了改善工程结构体系在动力环境中的安全性和可靠性提供坚实的理论基础。

1.2 动力荷载的类型

引起结构静力反应和动力反应不同的原因是荷载的不同。根据荷载是否随时间变化,或随时间变化速率的不同,可以把荷载分为静荷载和动荷载两大类。静荷载是大小、方向和作用点不随时间变化或缓慢变化的荷载,如结构的自重、雪荷载等;动荷载是随时间快速变化或在短时间内突然作用或消失的荷载。荷载随时间变化是指其大小、方向或作用点随时间改变,其中作用点随时间变化的荷载称为移动荷载,例如车辆荷载。

根据荷载是否已预先确定,动荷载可以分为两类:确定性(非随机)荷载和非确定性(随机)荷载。预先的含义是指在进行结构动力分析之前。