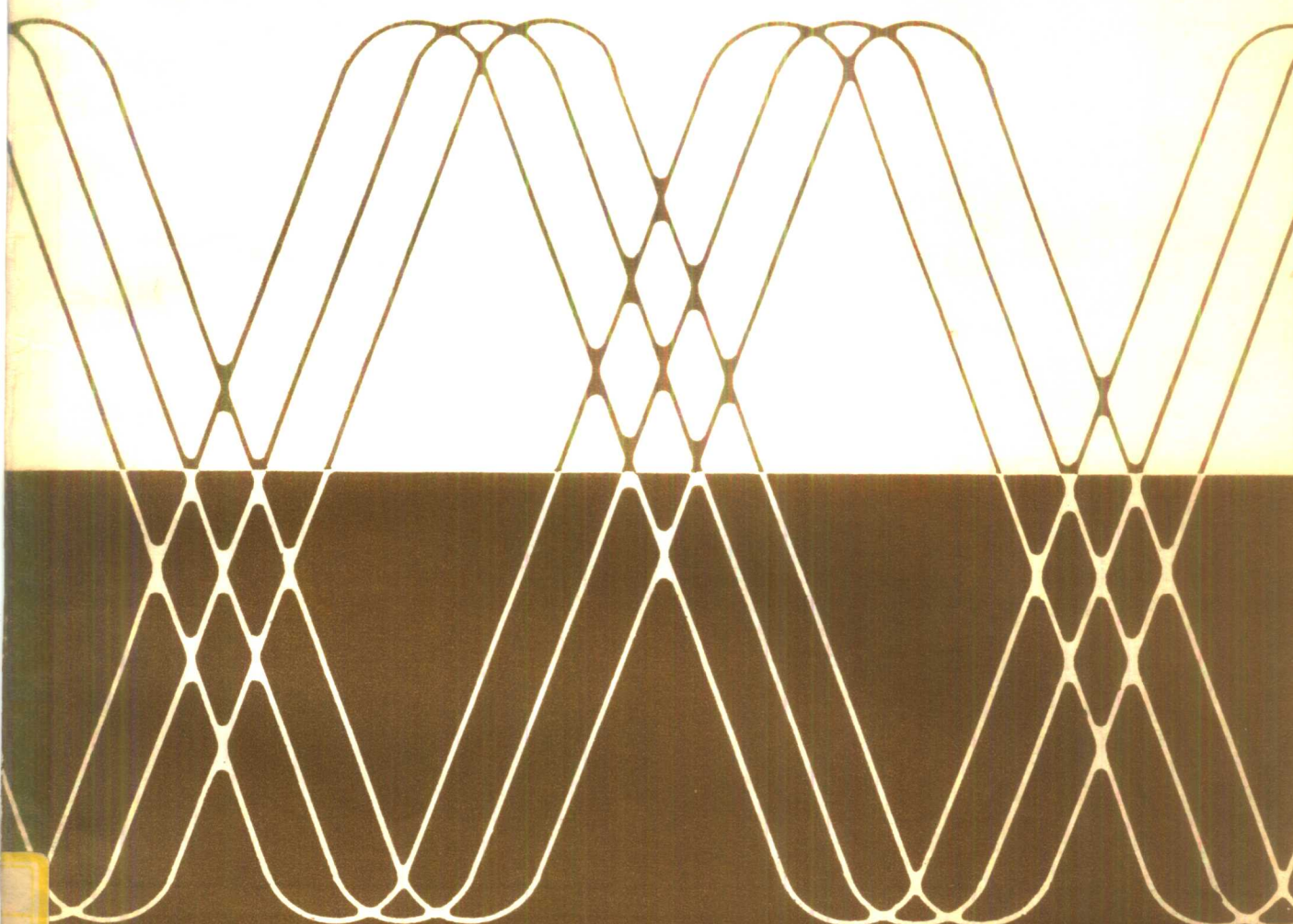


结构动力学

[美] R. W. 克拉夫 J. 彭津 著



科学出版社

结 构 动 力 学

[美] R. W. 克拉夫 J. 彭津 著

王光远 等 译

科 学 出 版 社

1 9 8 1

内 容 简 介

本书是美国加利福尼亚大学(伯克利)结构动力学方面研究生的基本教材之一,主要介绍结构动力学基本理论和抗震结构计算理论。其主要特点是内容新颖,例如,快速傅里叶分解的频域分析的概念,适用于电子计算机的各种新的分析方法,粘滞阻尼理论的最新的计算技巧,非线性结构动力分析的方法、随机振动理论以及它们在抗震结构中的应用等等,都是近十几年来的最新成果。

本书可供从事结构振动工作的研究生、大学教师、工程技术人员和科学研究工作者参考。

R. W. Clough J. Penzien
DYNAMICS OF STRUCTURES
McGraw-Hill Inc. 1975

结 构 动 力 学

[美] R. W. 克拉夫 J. 彭津 著

王光远 等 译

责任编辑 杨家福

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1981 年 11 月第一次印刷 印张: 27

印数: 精 1—3,250 插页: 精 2

平 1—3,600 字数: 619,000

统一书号: 15031·366

本社书号: 2337·15—1

定价: 布脊精装 5.10 元
平 装 4.15 元

中文版前言

彭津教授和我高兴地获悉我们的《结构动力学》一书将出中文版，供中华人民共和国的学生和工程师参考。近年来我曾两次随同地震方面的代表团访问中华人民共和国，我深知结构动力学和地震工程学在你们国家未来发展中所具有的价值。我们希望，本书在你们为减轻地震危害的努力中和在培训你们的科学家和工程师（他们有可能参与国际合作来共同解决这个世界性问题）方面能作出积极贡献。

R. W. 克拉夫

1979 年 3 月 6 日

序 言

本书是过去二十五年里我们在加利福尼亚大学(伯克利)讲授结构动力学课程的过程中经过边教边改而获得的成果。因而,其内容在这段期间作了许多重大的修订。在这二十五年当中,我们先后编写了三种不同的讲义,这些讲义的地方版本已分别在诸如圣地亚哥(智利)、特隆赫姆(挪威)和东京(日本)等地作为教材使用。

R. W. 克拉夫教授在最初安排本书内容时,曾经受到 R. L. Bisplinghoff 教授在麻省理工学院讲课的巨大影响,并从他那份编写得非常精湛的飞机结构动力学教程中得到了很大教益,特此对他表示感谢。本书后来朝着结构动力学中的土木工程问题方向发展,则是受到 Hohenemser 和 Prager 的先驱著作《结构动力学》¹⁾的影响。同样, S. H. Crandall 教授在麻省理工学院关于随机振动方面的讲课也使 J. 彭津教授受到很大教益,为此,也表示感谢。但是,这一课题的进一步发展则主要是克拉夫和彭津两人的工作成果。许多学者对本学科所作的贡献已分别放入本书的相应章节。因为在结构动力学领域中成熟的文献浩瀚如海,很难把它们全部列出;另外有些方面,在本书中提到的参考文献较少,所以,对于那些自己感到被忽视了作者,我们特此向他们表示歉意。

本书的内容在其发展过程中虽然几经修订,但总体布局并未改变。在介绍动力荷载所带来的特殊问题时,采用了从单自由度结构过渡到广义单自由度体系,然后再过渡到多自由度离散坐标结构的振型叠加分析的方式,这种合乎逻辑的安排使受过静力训练的结构工程师更容易接受。此外,我们始终认为,强调瞬态动力反应分析比仅仅关注振动分析更为重要。事实证明,要学好结构动力学,必须具备结构静力学理论(其中包括矩阵方法)的坚实基础。我们假设本书的读者都已掌握了这些知识。

在本教材内容的变革过程中所出现的一个最明显和最深刻的变化是高速电子计算机作为结构分析的标准工具。在电子计算机广泛用于结构设计之前,结构动力学的主要侧面是放在能用计算尺和台式计算机进行分析的有效方法上。由于作者确信这些方法在这门学科中仍然是重要的,所以它们在本书中仍占突出位置。如能把手算的细节彻底搞清,那么编写或运用计算机代码就不会感到困难;反之,如果不了解这些细节,就不可能有效地运用未知框计算机程序。但是也应认识到,任何有效、实用的动力反应分析都包含了极大的数值计算工作量,而这只有用电子计算机才可能比较经济地完成。因此,总的说来,本书既重视了手算解法,也重视了有效地用高速电子计算机进行求解的技术。我们着重于说明这些方法的基础,而不详细讨论代码技术和如何有效地使用计算机。

加利福尼亚大学为研究生开设了一系列课程;本书是这一系列课程中的基本教材,一年(一年分四个学期,其中三个学期开课)讲完。其中大部分内容也能被高年级(四年级)大学生接受。第一篇和第二篇的第十四章的前几节是结构动力学的基本内容,希望所有想获得结构工程硕士学位的学生都应学习这部分动力学内容。第二篇余下的章节和第

1) K. Hohenemser and W. Prager, "Dynamic der Stabwerke", Julius Springer, Berlin, Germany, 1933.

三篇是“高等”结构动力学的内容。此外,第二十六章和第二十七章中有关地震工程方面的许多内容是上述两部分理论的实际应用。第四篇的基本内容是随机振动,第二十八章是随机振动理论在地震工程中的一些应用,这两章合在一起单独作为一个学期的课程内容。最后应指出,全书也可作为动荷载结构设计课程的基础和参考资料。虽然本书的大部分内容是依据土木工程应用编写的,但其中关于结构动力学的基本方法同样适用于航空工程、船舶工程、汽车工程和一切承受动荷载的结构体系领域。

作者发现,许多内容通过举例说明能够收到很大效果,所以安排了大量例题。此外,由于学生亲自演算习题对全面掌握分析技术十分重要,所以在大部分章节里都给出了许多家庭作业。但因动力反应分析特别耗费时间,习题的数量也不宜太多。作者认为,根据主要内容和解法的类型,每周完成一到四个题目较为合适。因此,本书选入的习题量要比为期一年的结构动力学课程应完成的作业量大得多。

R. W. Clough

J. Penzien

$\mathbf{I}$	单位矩阵
j	整数
k, k_i	弹簧常数
$k^*, \bar{k}^*$	广义弹簧常数
$\tilde{k}(t)$	有效刚度
k_G	几何刚度
k_{ij}	刚度影响系数
$\tilde{k}_{ij}$	联合刚度影响系数
k_{Gij}	几何刚度影响系数
K_n	第 n 振型的广义刚度
L	长度
$\mathcal{L}$	地震干扰因子
m	质量, 整数
m_i	质量
m_{ij}	质量影响系数
$\bar{m}$	单位长度均布质量
$\bar{m}_I$	单位长度转动惯量
M_n	第 n 振型的广义质量
m^*	广义质量
$\mathfrak{M}, \mathfrak{M}_i$	截面内力矩
n	整数, 常数
N	轴向荷载, 时间增量数, 自由度数
N_c	临界轴向荷载
$\mathcal{N}$	随时间改变的轴力
p, p_0	荷载
$\bar{p}$	单位长度的均布荷载
p^*	广义荷载
p_{eff}	有效荷载
$p(x)$	概率密度函数
$p(x, y)$	联合概率密度函数
$p(x y)$	条件概率密度函数
$p(x_1, x_2, \dots, x_m)$	多变量概率密度函数
$P_n(t)$	第 n 振型的力函数
$P(X), P(X, Y)$	概率分布函数
Pr	概率
q_i	第 i 个广义坐标
Q_i	第 i 个广义力函数
r	回转半径
$R(t)$	反应比

符 号 表

a	距离
a_0, a_n	傅里叶系数, 常数
A	面积, 常数
A_1, A_2	常数
b	距离, 整数
b_0, b_n	傅里叶系数, 常数
B	常数
c	阻尼系数
c^*	广义阻尼系数
c_c	临界阻尼系数
c_n	傅里叶系数
c_{ij}	阻尼影响系数
c_n	振型广义阻尼系数
D	动力放大系数, 板的刚度
$\mathbf{D}$	动力矩阵 $= \mathbf{k}^{-1}\mathbf{m}$
D_1, D_2	常数
e	轴向位移
E	弹性模量
$\mathbf{E}$	动力矩阵 $= \mathbf{D}^{-1}$
$E[\quad]$	期望值, 总体平均
El	抗弯刚度
f	自振频率(周/秒)
$\tilde{f}_{ij}$	柔度影响系数
f_t, f_D, f_s	分别为惯性力, 阻尼力和弹性力
g	重力加速度
g_i	广义位移坐标, 应力波函数
G	剪切模量
G, G_1, G_2	常数
h	板的厚度, 楼层高度
$h(t)$	单位脉冲反应函数
$H(\omega), H(i\omega)$	复频率反应函数
Hz	赫兹(频率度量, 每秒周数)
i	整数
I	冲量, 惯性矩

δ	对数衰减率, 变分, 残差
Δ	增量
Δ_{st}	静位移
ε	应变
ζ	时间函数, 滞变阻尼系数
λ_G	轴向荷载系数
λ_i	Lagrange 乘子
λ_n	第 n 个本征值
θ	相位角, 倾角, 转角
μ	延性系数
μ_{xy}	协方差
ν	Poisson 比
ξ, ξ_n	阻尼比
ρ	向量幅值, 单位体积的质量
ρ_{xy}	互相关系数
σ	应力
σ_x	标准差
σ_z^2	方差
τ	时间
ϕ_{ij}	振型位移
ϕ_n	第 n 个振型形式
Φ	振型形式矩阵
ψ, ψ_n	广义位移函数
Φ_n	广义位移向量
ω, ω_n	无阻尼自振圆频率
ω_D, ω_{Dn}	阻尼自振圆频率
$\bar{\omega}$	简谐力函数的圆频率

$R_x(\tau)$	自相关函数
$R_{xy}(\tau)$	互相关函数
s	常数
$S_x(\bar{\omega})$	功率谱密度函数
$S_{xy}(\bar{\omega})$	交叉谱密度函数
S_a	谱加速度反应
S_d	谱位移反应
S_v	谱拟速度反应
SI	反应谱烈度
t, t_i	时间
t_l	脉冲持续时间
t_{ij}	转换影响系数
T	振动周期, 动能
T_n	第 n 振型的周期
T_p	荷载周期
TR	传导比
u	在 x 方向的位移
U	应变能
v	在 y 方向的位移
v^t	总位移
v_g, v_{g0}	地面位移
v_{st}	静位移
V, V_f, V_n	位能
$\mathcal{V}$	截面内剪力
w	在 z 方向的位移
W	功, 重量
W_{nc}	非保守力所作功
W_N	轴力 N 所作功
x	空间坐标
$\bar{x}$	x 的平均值
$\bar{x}^2$	x 的均方值
$x(t)$	随机过程
y	空间坐标
$y(t)$	随机过程
Y_n	第 n 振型的广义位移
z	空间坐标
Z, Z_n, Z_0	广义坐标
β	频率比
γ	单位面积的重量

目 录

中文版前言	vi
序言	vii
符号表	ix
第一章 结构动力学概述	1
§ 1-1 结构动力学分析的主要目的	1
§ 1-2 非随机荷载的类型	1
§ 1-3 动力问题的基本特性	2
§ 1-4 离散化方法	3
§ 1-5 运动方程的建立	6
§ 1-6 本书内容的编排	8

第一篇 单自由度体系

第二章 运动方程的建立	9
§ 2-1 基本动力体系的元件	9
§ 2-2 建立方程的方法	9
§ 2-3 重力的影响	11
§ 2-4 支座扰动的影响	12
§ 2-5 广义单自由度体系: 刚体集合	13
§ 2-6 广义单自由度体系: 分布柔性	17
§ 2-7 广义体系特性的表达式	21
第三章 自由振动反应	26
§ 3-1 运动方程的解	26
§ 3-2 无阻尼自由振动	26
§ 3-3 阻尼自由振动	28
第四章 谐振荷载反应	34
§ 4-1 无阻尼体系	34
§ 4-2 阻尼体系	36
§ 4-3 共振反应	39
§ 4-4 加速度计与位移计	41
§ 4-5 隔振	42
§ 4-6 单自由度体系阻尼值的求法	46
第五章 对周期性荷载的反应	54
§ 5-1 荷载的傅里叶级数表达式	54
§ 5-2 对傅里叶级数荷载的反应	54
§ 5-3 傅里叶级数解的指数形式	56
第六章 对冲击荷载的反应	59
§ 6-1 冲击荷载的一般性质	59

§6-2 正弦波脉冲	59
§6-3 矩形脉冲	62
§6-4 三角形脉冲	63
§6-5 震动谱或反应谱	64
§6-6 冲击荷载反应的近似分析	66
第七章 对一般动力荷载的反应	69
§7-1 无阻尼体系的 Duhamel 积分	69
§7-2 无阻尼体系 Duhamel 积分的数值计算	70
§7-3 有阻尼体系的反应	74
§7-4 利用频域进行的反应分析	76
§7-5 利用频域进行的数值分析	78
第八章 非线性结构反应的分析	82
§8-1 分析过程	82
§8-2 平衡的增量方程	82
§8-3 逐步积分法	83
§8-4 程序总结	85
第九章 用 Rayleigh 法进行振动分析	90
§9-1 方法的基础	90
§9-2 一般体系的近似分析	91
§9-3 振动形状的选取	92
§9-4 改进的 Rayleigh 法	95

第二篇 多自由度体系

第十章 多自由度体系的运动方程	99
§10-1 自由度的选择	99
§10-2 动力平衡条件	100
§10-3 轴向力的效应	101
第十一章 结构特性矩阵的计算	103
§11-1 弹性特性	103
§11-2 质量特性	108
§11-3 阻尼特性	111
§11-4 外荷载	111
§11-5 几何刚度	113
§11-6 特性公式的选择	115
第十二章 无阻尼自由振动	118
§12-1 振动频率分析	118
§12-2 振型分析	119
§12-3 振动分析的柔度法	122
§12-4 轴向力的影响	122
§12-5 正交条件	124
第十三章 动力反应的分析	129
§13-1 正规坐标	129

§ 13-2	非耦合的运动方程: 无阻尼	130
§ 13-3	非耦合的运动方程: 有阻尼	131
§ 13-4	振型叠加法概要	134
第十四章	实用振动分析	141
§ 14-1	概述	141
§ 14-2	Stodola 法	141
§ 14-3	用矩阵迭代法分析屈曲	150
§ 14-4	Holzer 法	153
§ 14-5	自由度的缩减	159
§ 14-6	矩阵迭代中的一些基本概念	164
§ 14-7	动力矩阵的对称形式	171
§ 14-8	无约束结构的分析	172
第十五章	非线性体系的分析	176
§ 15-1	引言	176
§ 15-2	增量的平衡方程	177
§ 15-3	逐步积分: 线性加速度法	178
§ 15-4	无条件稳定的线性加速度法	179
§ 15-5	Wilson θ 法的性能	181
第十六章	运动方程的变分形式	183
§ 16-1	广义坐标	183
§ 16-2	Lagrange 运动方程	183
§ 16-3	普遍运动方程的推导	188
§ 16-4	约束和 Lagrange 乘子	191

第三篇 具有分布参数的体系

第十七章	运动的偏微分方程	195
§ 17-1	引言	195
§ 17-2	梁的弯曲: 基本情况	195
§ 17-3	梁的弯曲: 考虑轴向力的影响	197
§ 17-4	梁的弯曲: 考虑剪切变形和转动惯量	198
§ 17-5	梁的弯曲: 考虑粘滞阻尼	200
§ 17-6	梁的弯曲: 广义的支座扰动	200
§ 17-7	轴向振动	202
第十八章	无阻尼自由振动分析	204
§ 18-1	梁的弯曲: 基本情况	204
§ 18-2	梁的弯曲: 考虑轴向力的影响	209
§ 18-3	梁的弯曲: 考虑剪切变形和转动惯量	210
§ 18-4	梁的弯曲: 振型的正交性	211
§ 18-5	轴向变形的自由振动	213
§ 18-6	轴向振型的正交性	214
第十九章	动力反应分析	217
§ 19-1	正规坐标	217

§ 19-2	非耦合弯曲运动方程: 不计阻尼	218
§ 19-3	非耦合弯曲运动方程: 考虑阻尼	222
§ 19-4	非耦合轴向运动方程: 不计阻尼	223
第二十章	动力直接刚度法	228
§ 20-1	引言	228
§ 20-2	动力抗弯刚度矩阵	228
§ 20-3	弯曲和刚性轴向位移的动力刚度	233
§ 20-4	动力轴向变形刚度矩阵	235
§ 20-5	弯曲和轴向变形的综合刚度	236
§ 20-6	轴向力对横向弯曲刚度的影响	237
第二十一章	波传播的分析	240
§ 21-1	基本的轴向波传播方程	240
§ 21-2	边界条件的处理	243
§ 21-3	杆性质的突变	245
§ 21-4	打桩过程中的应力波	248
§ 21-5	建筑物中剪切波的传播	251

第四篇 随 机 振 动

第二十二章	概率论	255
§ 22-1	单随机变量	255
§ 22-2	单随机变量的一些重要的平均值	258
§ 22-3	一维随机走动	259
§ 22-4	两个随机变量	264
§ 22-5	两个随机变量的一些重要的平均值	271
§ 22-6	两个随机变量的散布图和相关性	274
§ 22-7	二维随机走动	276
§ 22-8	m 个随机变量	283
§ 22-9	正态多元随机变量的线性变换	285
第二十三章	随机过程	288
§ 23-1	定义	288
§ 23-2	平稳过程和遍历性过程	289
§ 23-3	平稳过程的自相关函数	293
§ 23-4	平稳过程的功率谱密度函数	297
§ 23-5	功率谱密度函数与自相关函数间的关系	298
§ 23-6	过程的导数的功率谱密度函数和自相关函数	300
§ 23-7	平稳过程的叠加	302
§ 23-8	平稳正态过程: 一个自变量	303
§ 23-9	平稳正态白噪声	308
§ 23-10	极大的概率分布	311
§ 23-11	极值的概率分布	314
§ 23-12	非平稳正态过程	317
§ 23-13	平稳正态过程: 两个或多个自变量	317

第二十四章 线性单自由度体系的随机反应	321
§ 24-1 转换函数	321
§ 24-2 单位脉冲和复频率反应函数间的关系	322
§ 24-3 输入和输出的自相关函数间的关系	325
§ 24-4 输入和输出的功率谱密度函数间的关系	328
§ 24-5 窄频带体系的反应特征	330
§ 24-6 由零初始条件引起的非平稳均方反应	332
§ 24-7 窄频带体系的疲劳预估	335
第二十五章 线性多自由度体系的随机反应	339
§ 25-1 线性体系的时域反应	339
§ 25-2 线性体系的频域反应	340
§ 25-3 离散荷载的反应	341
§ 25-4 分布荷载的反应	344
第五篇 结构地震反应分析	
第二十六章 地震学基础	346
§ 26-1 引言	346
§ 26-2 地震活动性	346
§ 26-3 地震的弹性回跳理论	349
§ 26-4 地震波	350
§ 26-5 地面运动特性的度量	353
§ 26-6 设计地震的选择	357
第二十七章 地震反应的数定分析	361
§ 27-1 地震输入机制	361
§ 27-2 刚性地基平动干扰	362
§ 27-3 刚性地基转动干扰	379
§ 27-4 多支座干扰	380
§ 27-5 地基介质对地震反应的影响	381
§ 27-6 地震的非线性反应	391
第二十八章 地震反应的非数定分析	402
§ 28-1 强地面运动的随机模型	402
§ 28-2 线性体系的分析	405
§ 28-3 非线性体系的分析	406
§ 28-4 单自由度体系的极值反应	407
§ 28-5 多自由度体系的极值反应	412
英汉名词对照表	414

第一章 结构动力学概述

§ 1-1 结构动力分析的主要目的

本书的主要目的是：介绍任何给定类型的结构在承受任意动荷载时所产生的应力和挠度的分析方法。从某种意义上讲这个目的可以认为是，把通常只适用于静荷载的结构分析标准方法加以推广，使之也可以在动荷载的分析中加以应用。对此，静荷载可被看作仅仅是动荷载的一种特殊形式。然而，在线性结构分析中，更为方便的是区分施加荷载中的静力和动力分量，然后分别计算对每种荷载的反应，最后将两个反应分量叠加得出总反应。当进行这样处理时，静力的和动力的分析方法在性质上是根本不同的。

为了上述目的，“动力的”或“动的”这个词可简单地被定义为随时间而改变的；这样，动荷载就是大小、方向、作用点随时间而改变的任何荷载。同样，动荷载下的结构反应，亦即所产生的挠度及应力，也是随时间而改变的或“动的”。

计算动荷载下的结构反应有两种基本上不同的方法：数定的和非数定的。在任何给定的情况下，究竟选取哪种方法，将取决于荷载是如何规定的。如果荷载随时间的变化是完全已知的，虽然它可以是高度变化不定的或者其性质是不规则变化的，我们将把它称为非随机动荷载；而任何特定的结构体系在非随机荷载下的反应分析通常定义为数定分析。另一种情况，如果荷载随时间的变化不是完全已知的，但可从统计方面来进行定义，这种荷载则称为随机动荷载，而非数定分析对应于随机动荷载下的反应分析。本书的重点放在数定动力分析方法的叙述上，但第四篇则用来介绍非数定分析方法。此外，在讨论地震工程方面结构动力学方法应用的第五篇里，还有一章叙述非数定的地震反应分析。

一般来说，动力荷载下的结构反应主要是用结构的位移来表示的。因此，数定分析能导出相应于非随机荷载时程的位移-时间过程。结构的其它数定反应，如应力、应变、内力等等，通常作为分析的次要方面，从前面所建立的位移反应求得。另一种情况是，非数定分析提供有关位移的统计资料，而这种位移是由统计定义的荷载所产生的。由于这时位移随时间的变化是不确定的，因而其它的反应，如应力、内力等等，必须用特定的非数定分析方法直接计算，而不是由所得位移来计算。

§ 1-2 非随机荷载的类型

几乎任何类型的结构，在其使用期限内都可能承受这样或那样形式的动荷载。从分析的观点来说，把非随机荷载或数定荷载分成两种基本类型，周期的与非周期的荷载，这样做是有利的。非随机荷载的一些典型形式及产生这些荷载的各种情况的例子示于图 1-1。

图 1-1(a) 和 (b) 所示的周期荷载是重复的荷载，在多次循环中这些荷载都相继地出现相同的时间过程。最简单的周期荷载是图 1-1(a) 所示的被称作简谐荷载的正弦变化

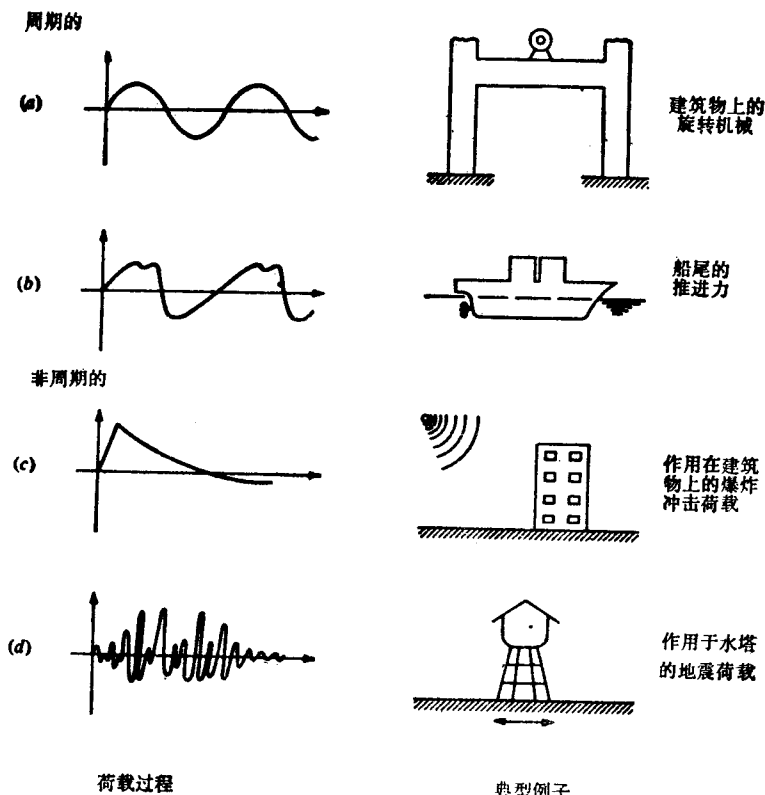


图 1-1 典型动力荷载的特性及来源: (a) 简谐荷载: (b) 复杂荷载:
(c) 冲击荷载: (d) 长持续时间的荷载

荷载。此类荷载是由回转机械装置中质量的不平衡所引起的。周期荷载的另一些形式，例如由船尾推进器产生的流体动压力或往复式机械装置中所引起的惯性效应，常常是更复杂的。但是，借助于傅里叶分析，任何周期荷载可用一系列简谐分量的和来表示。因此，原则上，任何周期荷载下的反应分析可按同样的标准分析程序进行。

非周期荷载可以是短持续时间的冲击荷载或者是长持续时间的一般形式的荷载。冲击波或爆炸是冲击荷载的典型发生源。对于这种短持续时间荷载来说，可以使用特殊的简化分析形式。另一方面，一般形式的长持续时间荷载，例如由地震引起的荷载，就只能完全用一般性的动力分析程序来处理。

§ 1-3 动力问题的基本特性

结构动力学问题在两个重要的方面不同于它的静荷载问题。第一个不同点，根据定义就是动力问题具有随时间而变化的性质。由于荷载和反应随时间而变化，显然动力问题不象静力问题那样具有单一的解，而必须建立相应于反应时程中感兴趣的全部时间的一系列解答。因此，动力分析显然要比静力分析更复杂且更消耗时间。

但是，静力问题和动力问题还有更重要的区别，如在图 1-2 中所示那样。如果一简支梁承受一静荷载 p ，如图 1-2(a) 所示，则它的弯矩、剪力及挠曲线形状直接依赖于给定