

# 结构塑性动力学引论

余同希 华云龙 著

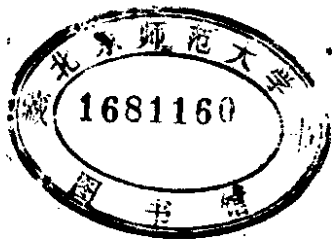


中国科学技术大学出版社

# 结构塑性动力学引论

余同希 华云龙 著

JG1/192/15



中国科学技术大学出版社

1994·合肥

(皖)新登字08号

## 内 容 简 介

本书对目前正处于不断发展的、以冲击工程为背景的结构塑性动力学作了系统的介绍。全书共分5章。第1章论述了结构塑性动力学问题的特点。第2章介绍了理想刚塑性结构小变形动力响应的典型解。在第2章的基础上,第3章研究了以变率效应、大变形效应、弹性效应等结构塑性动力响应中的二级效应。第4章谈及摄动原理、模态解和量阶定理。第5章介绍了动力响应中的反常现象、结构动力后屈、动力失效及尺度律等。

本书为研究生教材,也可供力学、机械、土建、航空航天、船舶和海洋工程、国防工程等专业的教师、学生、研究人员和工程技术人员参考。只要具备高等数学、理论力学、材料力学和弹塑性力学的基础,本书的大部分内容可以自学掌握。

### 结构塑性动力学引论

余同希·华云龙 著

中国科学技术大学出版社出版

(安徽省合肥市金寨路96号,230026)

安徽新华印刷厂印刷

安徽省新华书店发行

开本: 850×1168/32 印张: 8.5 字数: 275千

1991年10月第1次印刷 1991年10月第1次印刷

印数: 1—2000册

ISBN7-312-00594-2/O·147 定价: 5.70元

## 序

材料和结构动态响应，作为近代力学的重要研究领域，正越来越受到人们的青睐，这不仅由于在动态载荷作用下材料和结构有着许多异乎寻常的现象和过程发生，因而在力学工作者面前提出了一系列重要而急待解决的研究课题，急需建立一些新概念，新理论和新方法；更由于大量的工程实践，诸如爆炸与防护、交通安全、鸟撞、陨石撞击、核电工程、强激光辐照、海洋工程、地震工程以及武器研制等的迫切需要和有力推动，促使力学工作者必须面对这些问题而加以解决。正是在这一背景下冲击动力学近20年来获得迅速发展，国际国内有关的学术会议和学术团体应运而生，异常活跃，特别是1983年国际冲击工程杂志的面世标志这一研究已发展到一个崭新阶段。我国自1984年成立全国冲击动力学专业组织以来，有关的研究工作亦取得了长足的进步，而其中结构动态响应和失效分析更受到力学工作者的偏爱。本书正是这一时期研究成果的科学总结。作者们长期致力于结构动力学领域研究工作，在结构动态响应和失效分析，屈曲和塑性铰理论，吸能装置及其力学分析等方面取得了举世瞩目的研究成果，这些成果在本书中也获得了充分的反映，从这种意义上讲该书应属于专著范畴。但是作者们又长期从事教学工作，深谙教授之道，全书不乏基本理论的概述，因而该书又是一本真真正正的研究生教学用书。我有幸在本书付梓之前拜读全稿，一气读完，回味无穷。首先本书以很高的观点展示结构塑性动力学的最新成就高层建筑，内容编排上层次分明，脉络清楚。全书始终突出应用性和理论性，把本来乏味的具体结构响应问题巧妙地编织成兴味盎然，演绎和思辨性极强的阐释。阅读此书使人不知不觉地跟

随作者进入一个丰富多彩的研究领域，深为作者娴熟的处理复杂问题的高超技巧所感染和吸引。其次在本书展示给广大读者的分析问题解决问题的方法中，值得特别指出的是，作者始终注意运用简化手段，恰当地进行假设，突出主要矛盾，建立反映物理本质的数学模型，然后给出解析解或近似解，这充分显示了作者深邃的力学洞察力，避免了冗长的罗列和冗长的计算方法的介绍。最后我认为本书中有关二级效应的分析和讨论，有关结构动力学某些问题的阐释，写法很有特色，不但概括了当前研究的成果，更给读者指出了研究的方向，为读者留下进一步发挥的空间。

冲击动力学的发展方兴未艾，相信本书的及时出版将有力地推动这一领域的研究工作更加深入地开展。科技人员得有此书，可以避免许多盲目性，研究生们学习此书，可以获得诸多教益，拓宽视野。衷心地希望作者有更多的新作问世，

周光泉

一九九四年九月

# 前 言

当代固体力学的重点已更多地从线性转到非线性，从静力问题转到动力问题。结构塑性动力学这个以冲击工程提出的大量实际问题为背景，以结构的非线性动力行为为研究对象的学科，近半个世纪来取得了长足的发展。从50年代初起，在理想刚塑性和小变形两个基本假定下，对梁、板等结构元件的动力响应的分析取得了一批经典的解析解，奠定了这一学科的基本概念和基本解法。在60—70年代，突破上述两个基本假定的分析陆续面世，弥合或缩小了理论预报同实验观测和工程经验间的差距。同时，从60年代中期起，对极值原理、界限定理和模态方法的系统研究使人们对结构动力行为的共性的认识提升到一个新的高度，并演绎出了一些实用的近似方法。进入80年代以后，大型结构分析通用程序和动态测量新技术一起成为研究者手中的有力工具，对结构的弹塑性响应、动力响应中的反常行为、结构的动力失效等等问题的认识迅速深化。现在，结构塑性动力学仍然是一个蓬勃发展的学科，在世界范围内有专门的期刊和定期的学术会议。许多工程部门对这一学科的发展都极为关注。

本书是研究生教材。要在二十万字的篇幅内对这样一个内容广泛且在不断发展的学科作出系统的介绍，显然不是一件容易的事。为了避免把本书变成各种结构动力问题的解的罗列，在内容结构上安排了按章渐次深入的几个层次。第1章绪论论述了结构塑性动力学问题的特点，以及应力波问题与结构动力响应问题的联系与区别。第2章介绍理想刚塑性结构小变形动力响应的典型解。通过这些解不仅可以学会如何将动力响应问题提成一个微分方程组的初边值问题并加以求解，而且可以认识结构塑性动力行为的某些重要特性。第3章对刚塑性小变形分析中略去的若干重要因素逐个进行分析讨论，因而是对第2章的理论分析的必要的补

充和修正。考虑了应变率效应、弹性效应等二级效应后，对结构动力响应的理论预报将更加接近实际结构的行为。第4章着眼于结构塑性动力响应的共性，而不是一个一个特殊构件的具体响应过程。极值原理、界限定理和模态方法不仅提供了一些普遍适用的原理，也提供了一些很有实用价值的近似方法。最后在第5章中介绍了几个超越一般动力响应范围的特殊问题，如动力响应中的反常现象、结构的动力屈曲，结构的动力失效以及尺度律等。这些问题不仅各自有其特殊性，也是当今结构塑性动力学研究的前沿和热点。

本书除作研究生教材外，也可供力学、机械、土建、航空航天、船舶和海洋工程、国防工程等专业的教师、学生、研究人员和工程技术人员参考。只要具备高等数学、理论力学、材料力学和弹塑性力学的基础，本书的大部分内容可以自学掌握。

本书的初稿曾在北京大学力学系研究生课程讲授过4遍，其中部分内容曾在华中理工大学、浙江大学、华东工学院、中国科学技术大学等校的短期讲学中采用。本书的第一作者还曾用本书部分内容在英国曼彻斯特理工大学(UMIST)给研究生授过课。本书的许多章节吸收了两位作者近十年来的研究成果。作为作者本人教学经验和科研成果的结晶，本书在内容取舍上、在体制编排上、在概念的阐述和示例的选择上都是具有自己的特点。与已有的国内外教材和专著均有很大的不同。

本书的出版得到国家自然科学基金委员会“材料和结构的动力响应和失效”重点课题(1992—1995)的支持。中国科学技术大学研究生院副院长周光泉教授对本书的出版给予了热情的支持，并校阅了本书的书稿。对此，作者表示衷心的感谢。

余同希 (北京大学)

华云龙 (北京农业工程大学)

1993年8月

## 主要符号表

$A$	截面积
$b$	宽度
$c^2$	圆柱壳参数, $2L^2/Rh$
$D$	结构能量耗散率; 粘塑性本构方程参数
$\mathcal{D}$	单位体积能量耗散率
$d$	无量纲能量耗散率
$E$	杨氏模量; 能量
$E_h$	线性强化模量
$e_0$	无量纲初始动能
$F$	集中载荷
$f$	无量纲集中载荷
$G$	撞击质量; 梁中质量
$g$	梁上单位长度所受载荷
$h$	梁的高度; 板、壳的厚度
$I$	截面惯性矩; 单位面积受到的冲量; 转动惯量
$\hat{i}$	板的无量纲单位面积受到的冲量
$J$	泛函
$K$	动能
$K_0$	初始动能
$k$	无量纲曲率, $\kappa L$
$L$	梁的长度
$M$	弯矩
$M_e$	梁的弹性极限弯矩
$M_p$	梁的塑性极限弯矩



$M_s$	板壳的塑性极限弯矩
$m$	无量纲弯矩
$N$	轴力, 膜力
$N_p$	梁的塑性极限轴力
$N_s$	板、壳的塑性极限膜力
$n$	无量纲轴力, $N/N_p$ ; 无量纲膜力, $N/N_s$
$P$	作用于板、壳的分布载荷; 粘塑性材料本构方程参数之一; 作用于梁上的冲量
$p$	板的无量纲分布载荷; 梁的无量纲冲量
$Q$	剪力
$q$	无量纲剪力
$Q_j$	广义应力
$q_j$	广义应变
$Q_p$	塑性极限剪力
$R$	半径; 能量比
$S$	弧长
$T_0$	特征时间
$t$	时间
$t_d$	脉冲持续时间
$u_i$	位移
$V$	速度
$v$	无量纲速度
$W$	挠度
$w$	无量纲挠度(在 5.2 为挠度)
$X$	直角坐标, $X_i (i=1, 2, 3)$
$X, Z$	平面直角坐标
$x$	无量纲坐标, $X/L$
$Y$	屈服应力
$Y_D$	动态屈服应力

$\alpha$	强化(软化)因子; 尺度因子
$\gamma$	质量比, $G\rho/L$ ; 剪应变(剪切角)
$\Delta$	最大挠度; 差值
$\delta$	无量纲最大挠度
$\varepsilon$	正应变
$\eta$	比值
$\theta$	转角
$\kappa$	曲率
$A$	塑性铰坐标
$\lambda$	无量纲塑性铰坐标
$\mu$	单位中面积板壳质量
$\rho$	单位梁长质量; 材料体积密度
$\sigma$	正应力
$\tau$	剪应力; 无量纲时间
$\Phi$	屈服函数
$\phi$	模态的形状函数
$\omega$	角加速度

### 上标

$c$	运动许可
$d$	动力许可
*	模态解

### 下标

$0$	初始状态
$c$	静极限状态

$D$	动态
$e$	弹性状态
$f$	最终状态
$i_n$	输入
$P$	塑性状态; 主模态
$r$	径向
$s$	(板、壳)极限状态
$\theta$	周向

### 记号

$(\dot{\quad})$ : ( $\quad$ )关于时间的导数

$(\quad)'$ : ( $\quad$ )关于坐标的导数

# 目 次

序 .....	i
前 言 .....	ii
主要符号表 .....	vi
1 绪论 .....	1
参考文献 .....	5
2 结构的刚塑性小变形动力响应 .....	6
2.1 直梁的刚塑性动力响应 .....	6
2.1.1 端部承受脉冲载荷的悬臂梁 .....	8
2.1.2 移行铰的一般特性 .....	28
2.1.3 端部承受撞击的悬臂梁(Parkes 问题) .....	30
2.2 非等直构件的刚塑性动力响应 .....	39
2.2.1 端部承受阶跃载荷作用的阶梯截面悬臂梁 .....	39
2.2.2 端部承受矩形脉冲载荷的阶梯截面悬臂梁 .....	47
2.2.3 冲击载荷作用下含裂纹悬臂梁的响应 .....	52
2.3 板的刚塑性动力响应 .....	54
2.3.1 轴对称圆板的基本方程 .....	55
2.3.2 承受均布矩形脉冲载荷的简支圆板 .....	57
2.3.3 承受均布冲击载荷的简支圆板 .....	66
2.3.4 承受均布矩形脉冲载荷的简支方板 .....	67
2.4 壳体的刚塑性动力响应 .....	70
2.4.1 轴对称圆壳的基本方程 .....	71
2.4.2 短圆柱壳受矩形脉冲内压: 中载情况 .....	74
2.4.3 短圆柱壳受矩形脉冲内压: 高载情况 .....	77
2.4.4 轴对称扁壳的刚塑性动力响应 .....	81
参考文献 .....	85
3 结构塑性动力响应中的二级效应 .....	87

3.1	应变率效应 .....	87
3.1.1	Cow Per-Symonds 本构方程 .....	87
3.1.2	端部承受撞击的粘塑性悬臂梁 .....	90
3.1.3	应变率效应对最终变形影响的估计 .....	98
3.2	应变强化(或软化)效应 .....	100
3.2.1	概述 .....	100
3.2.2	应变强化对最终变形的影响 .....	101
3.2.3	应变强化(软化)悬臂梁的动力响应 .....	103
3.3	剪力和转动惯量效应 .....	110
3.3.1	概述 .....	110
3.3.2	悬臂梁端部的剪切变形 .....	113
3.4	几何大变形效应 .....	119
3.4.1	概述 .....	119
3.4.2	悬臂梁大变形分析 .....	121
3.4.3	两端受轴向约束的简支梁 .....	126
3.5	弹性效应 .....	135
3.5.1	概述 .....	135
3.5.2	单自由度系统的弹性效应 .....	136
3.5.3	弹性效应的数值研究 .....	143
3.5.4	悬臂梁根部弹性变形效应 .....	154
3.5.5	小结 .....	158
	参考文献 .....	159
4	极值原理、模态解和界限定理 .....	162
4.1	极值原理和唯一性定理 .....	163
4.1.1	预备知识 .....	163
4.1.2	动力学加速度极值原理(Martin原理) .....	165
4.1.3	运动学加速度极值原理(TaMyx原理) .....	167
4.1.4	解的唯一性定理 .....	168
4.2	模态解——基本原理 .....	170
4.2.1	模态解的思想 .....	170
4.2.2	收敛性定理和 $\min J_0$ 技术 .....	172
4.2.3	模态近似方法的步骤和例子 .....	174

4.3 模态解——进一步发展 .....	177
4.3.1 高阶模态 .....	177
4.3.2 考虑应变率效应的模态解方法 .....	178
4.3.3 模态解的极值原理 .....	179
4.3.4 瞬态模态解 .....	182
4.4 界限定理 .....	184
4.4.1 界限定理的叙述和证明 .....	184
4.4.2 界限定理的应用 .....	189
参考文献 .....	192
<b>5 结构塑性动力学的一些其他问题 .....</b>	<b>194</b>
<b>5.1 结构塑性动力响应中的反常行为 .....</b>	<b>194</b>
5.1.1 简支梁在矩形脉冲作用下动力响应的几种模式 .....	199
5.1.2 解释反常行为的理论模型 .....	196
5.1.3 对反常行为的进一步研究 .....	200
<b>5.2 结构的塑性动力屈曲和渐近屈曲 .....</b>	<b>202</b>
5.2.1 直杆的塑性动力屈曲 .....	203
5.2.2 圆柱壳的塑性动力屈曲 .....	208
5.2.3 动力渐进屈曲 .....	211
<b>5.3 结构的塑性动力失效 .....</b>	<b>213</b>
5.3.1 梁在均布冲击下的动力失效 .....	214
5.3.2 圆板在均布冲击下的动力失效 .....	216
5.3.3 对梁、板动力失效的理论分析 .....	218
5.3.4 含有初始裂纹的梁的动力失效 .....	220
<b>5.4 尺度律 .....</b>	<b>222</b>
5.4.1 静力问题的初等相似律 .....	222
5.4.2 动力问题的初等相似律 .....	224
5.4.3 应变率效应 .....	226
5.4.4 断裂能 .....	228
5.4.5 影响尺度律的其他因素 .....	230
参考文献 .....	231
索引 .....	234

# 1 绪 论

在通常的弹性力学和塑性力学中，讨论的都是准静态的问题。在这些问题中，假定外载是缓慢地施加到固体和结构上去的，相应地固体和结构内的变形进行得也很缓慢。由于不必考虑物质在变形过程中的加速度；惯性力与外载相比可以忽略不计，因而可以按平衡问题来分析处理。

但是，在工程实际中也经常会遇到动态问题，特别是如果外载很强，随时间变化又很快（下面我们将称这样的载荷为强动载荷），那么固体和结构的变形也将有很快的变化，这时就需要处理弹塑性体的动力学问题。下面是一些典型的例子：

(1) 汽车、火车、船舶、飞机等交通工具在交通事故中可能互相碰撞引起结构的变形破坏和人员的伤亡；飞鸟对飞机的撞击，如果发生在驾驶舱上或发动机内就更为危险；航天器在太空中受到陨石的撞击，核电站的安全壳受到坠落的飞行器的撞击，等等；这些都是运动物体引起的对结构的碰撞问题。

(2) 在战争中或是由于事故，房屋、桥梁、地下结构以及舰艇、飞机等都可能遭受爆炸载荷的作用，这种载荷通常以空气中的冲击波等形式突然作用到结构上。

(3) 高能束（如强激光）的照射，除引起局部的破坏外，也产生对被照射结构（如飞行器）的强动载荷。

(4) 地震、洪水、台风、海啸等灾害对结构物（如水坝、高层建筑、高耸结构等）产生的强动载荷。

(5) 各种贮能结构由于局部的破裂诱发能量释放而产生强动载荷，例如核电站或化工厂中输送高压流体的管道在局部破裂后产生的管道甩动，压力容器、水坝等在局部损坏后引起灾难性溃

裂、等等。

(6) 在爆炸成形、电磁成形等各种动力金属成形过程中，工件受到强劲载荷而发生迅速的塑性变形；锻造和高速冲压等过程中也有类似的问题。

工程实际中遇到的这些多种多样的问题要求我们对强劲载荷作用下固体材料和结构的行为、性态作出系统的研究，这在力学上主要归结为以下三大类问题：

- (i) 材料的动态行为；
- (ii) 固体和结构中的应力波的传播；
- (iii) 结构的动力响应。

我们首先来看看第一大类问题。在强劲载荷作用下，固体和结构物的材料将发生高速变形。由材料变形的微观机制所决定，材料对高速变形的抵御能力通常不同于对缓慢变形的抵御能力。这一点已为许多材料的实验所证实。例如，金属塑性变形的机理主要是位错的运动(参见[1.1]第一章附录或[1.2]的§1.3)，而位错在金属晶格中高速通过时遇到的阻力比缓慢通过时的阻力要大，这就造成了大多数金属在高速变形时呈现较高的屈服应力和流动应力。典型材料的实验资料可以在有关书籍([1.3, 1.4, 1.5])中找到。对材料动态性能研究的一项主要任务就是在实验资料的基础上概括出应变率对材料应力—应变关系的影响，建立与应变率相关的材料动态本构关系[1.4, 1.5]。当把这些动态本构关系应用于结构动力学问题时，由于结构内不同微元在不同时刻所经历的应变历史和瞬时应变率各不相同，所以往往需要对本构方程作很大简化，这将在本书 3.1 节中作进一步的讨论。

第二大类问题涉及固体和结构中的应力波。固体或结构的局部表面受到动载作用时，外载产生的应力和变形将以波的形式传播开去。当这种扰动较弱时，产生的是弹性波，扰动较强时，产生的应力将达到或超过材料的初始屈服应力，于是产生塑性波。一般地，设材料中的应力波波速为  $c$ ，物体的特征尺度为  $L$ ，外载



的特征时间(例如外载上升到最大幅值所经历的时间,或载荷脉冲的持续时间)为 $t_0$ 。如果在某一问题中

$$t_0 \ll L/c$$

那么物体在这一尺度上的应力和变形的不均匀性是不可忽略的,亦即必须考虑波的效应。例如,由于地壳的特征尺度大,地震和地下爆炸的效应主要通过波的传播表现出来。又如在打桩和分离式 Hopkinson 杆(这是一种研究材料动态性质的重要实验装置)等问题中,扰动是沿着杆长(杆的大特征尺度)方向传播的,因而波的反射、透射、弥散等对问题的分析至关重要。

当梁、板、壳等结构元件受到横向载荷作用时,由于厚度方向上特征尺度小,情况便有所不同。金属材料中的弹性波通常为每秒数公里(例如钢的弹性波速为 $5.1\text{km/s}$ ),因此一般在微秒( $1\mu\text{s} = 10^{-6}\text{sec}$ )量级的时间内就使结构厚度方向的所有质点受到波及,并产生整体的加速运动。结构的这种整体性运动就叫做结构的塑性动力响应,它通常要经历毫秒( $1\text{ms} = 10^{-3}\text{sec}$ )量级或更长的时间才会达到结构的最大变形状态。正是由于结构中波的效应和结构动力响应二者在时间区间上相差好几个量级,所以通常可以区分两类问题,分别予以考虑:考察波效应时认为结构尚未发生整体性运动和变形;而考察结构动力响应时则不再考虑波传播的影响。这后一类问题,就是本书的主要内容。

在结构的动力响应过程中,通常总是既有弹性变形,又有塑性变形,这两种变形以及它们之间的分界面都随时间而变化;因此,求解结构动力响应时不仅需要针对不同区域采用不同的本构关系,而且要处理复杂的动边界问题。正由于弹塑性动力响应问题在数学上的这种复杂性,至今还没有人能给出任何有限结构的弹塑性动力响应的解析解,为了避开数学上的复杂性,在结构动力响应的理论分析中常常对材料的本构关系作出大幅度的简化。一个最常用也最成功的理想化是把结构假定为由理想刚塑性材料制成的。这样做不仅忽略了材料的弹性,而且也忽略了材料的应变强