

A large, stylized, dark grey letter 'R' is positioned on the left side of the cover, extending from the top left towards the bottom right. It has a thick, bold appearance with a slight shadow effect.

余同希 W.J.斯壮 著

Dynamic Models
for structural Plasticity

塑性结构的动力学模型

北京大学出版社

塑性结构的动力学模型

余同希 W.J. 斯壮 著

北京大学出版社

• 北 京 •

图书在版编目(CIP)数据

塑性结构的动力学模型/余同希,(英)斯壮著. —北京:北京大学出版社, 2002. 12

ISBN 7-301-05909-4

I. 塑… I. ①余… ②斯… III. 塑性力学: 动力学-模型-研究 IV. 0347

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 080557 号

书 名: 塑性结构的动力学模型

著作责任者: 余同希 W. J. 斯壮 著

责任编辑: 邱淑清

标准书号: ISBN 7-301-05909-4/O · 0554

出版者: 北京大学出版社

地址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网址: <http://cbs.pku.edu.cn>

电话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

排印者: 北京大学印刷厂

发行者: 北京大学出版社

经销者: 新华书店

850×1168 32 开本 12.25 印张 300 千字

2002 年 12 月第 1 版 2002 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 24.00 元

前言

本书论述的对象是由韧性材料制成的结构元件在强动载荷作用下的塑性动力行为。工程中常用的低碳钢、铝合金等金属材料具有良好的韧性,因此在压力加工过程中可以经历塑性大变形而不发生断裂。工程中常见的另一类情形是,当由这些材料制成的结构元件(如梁、环、板、壳等)受到撞击、爆炸等短时强动载荷的作用时,结构将发生快速的塑性大变形,其最终的变形形状将大大不同于构件的初始构形。不难理解,构件的变形历史和最终形状不但同构件的几何构形、尺寸和支承条件有关,还同材料的弹塑性性质及其对应变率的依赖性有关;此外当然还依赖于动载的时间和空间分布。如何在这众多的物理因素和几何因素中抓住最本质的参数,建立比较简单、便于解析的理论模型,正是结构塑性动力学的核心和精髓。

本书旨在由浅入深、由简至繁地介绍建立结构的塑性动力学模型的假定和方法,并展示模型的差异如何导致结构动力行为预测上的差异。

作为论述结构塑性动力学的理论铺垫,本章的第三章扼要地介绍了塑性力学和结构弹塑性大变形的基本理论、基本模型和基本方法,包括本构模型、虚速度原理、界限定理、模态解方法、弹性线(Elastica)理论和塑性线(Plastica)理论等。

在结构冲击动力学 50 多年的发展历史中,理想刚塑性的结构模型影响最大、应用最广泛。由于完全忽略了弹性、应变强化和应变率效应,理想刚塑性这一理想化使得结构中的塑性变形仅集中

发生于个别截面(即塑性段)处,而其余部分均保持为刚性。结果,结构的动力响应通常将归结为单自由度或二自由度系统的动力学问题,因而控制方程及其求解都得到极大的简化。在第4章中以端部受载的悬臂直梁为例,介绍了理想刚塑性的经典模型及其典型解的性态。

但是,这类经典模型往往使问题过分简化,无法反映材料和结构的其他重要因素的影响。近二三十年来,陆续有许多研究工作致力于探讨结构动力响应中的应变率效应、应变强化(或软化)效应、剪力和转动惯量效应、大变形效应、弹性效应等。由于计入这些效应将导致对理想刚塑性结构模型的补充和修正,我们将它们统称为“二级效应”,并在第5章中予以阐述。

近十多年来,结构冲击动力学的研究对象也从简单的等直梁扩展到非等直构件,如变截面梁、曲梁、折梁等。在这些情形下,复杂性不仅来自几何关系,而且来自交互作用的屈服条件,即构件截面的屈服与否将取决于两个或更多的广义应力的联合作用。相应地,塑性变形也受到与屈服准则相关连的流动法则的控制。第6章集中地概括了这一方面的新近成果。

从这几章的叙述中我们将看到,对于同一结构的动力响应问题,往往可以因考虑因素的差异而建立各个不同的模型。当然,考虑的因素越多,模型及其求解通常也就越复杂。分析者的任务,在于根据具体问题的特定需要,选择和建立最合适的模型。在工程问题中,合理的理论模型还应当尽可能与实验的观测相符合。在第7章中扼要地介绍了对构件施加强动载荷的实验方法,并将典型的实验结果同不同模型的理论预测作了一些比较和讨论。相信这些信息将有助于读者根据课题设计实验和选择模型。

本书的初稿写于1991年,是在英国皇家学会资助下在剑桥大学完成的。以W. J. Stronge和T. X. Yu(余同希)为作者的本书英文版,1993年由Springer-Verlag出版社在伦敦出版。英文版书名为《Dynamic Models for Structural Plasticity》。该书1995年重

印并发行软封面版。现在的中文版是在英文版的基础上由作者(余同希)重写和订正的。根据近年的新近研究成果,对有些章节(如 § 5.2、§ 6.6 等)作了大幅度的改写,对其他章节也作了一些改动和订正。

本书在准备中文书稿的过程中,张燕女士和华云龙教授给予了许多帮助,作者对他们表示衷心的感谢。作者余同希也很感谢妻子李世莺女士的理解和支持。书中疏漏之处,敬请读者指正。

余同希

2002 年 8 月于香港科技大学

主要符号表

A	截面积
a	圆形截面的半径;正方块边长的一半(§ 5.3)
b	矩形截面的宽度
C	弹簧弹性系数
c	薄壁截面的壁厚
$\bar{c}$	特征缺陷的尺寸(§ 6.8)
D	塑性变形所造成的总的能量耗散;管梁的外径(§ 5.2)
D_m	弯曲变形造成的能量耗散
D_q	剪切变形造成的能量耗散(§ 5.3)
$\dot{D}$	塑性变形所造成的能量耗散率
d	$=D/M_p$, 无量纲能量耗散
d_m	$=D_m/M_p$, 弯曲变形造成的无量纲能量耗散
d_q	$=D_q/M_p$, 剪切变形造成的无量纲能量耗散(5.3 节)
E	杨氏模量
E_{in}	输入能量
E_t	塑性流动的切线模量
e_{in}	$=E_{in}/M_p$, 无量纲输入能量
e_0	$=K_0/M_p$, 撞击能量比
e_r	无量纲破断能量(§ 5.3)
e_i	固定在未变形的几何构形上的单位矢量
F	横向力
F_c	静塑性极限载荷

F_i	外力分量
f	$=F/F_c=FL/M_p$, 无量纲力
G	撞击质点的质量; 弹性剪切模量
g	单位长度上所受的分布载荷
H	管梁的壁厚 (§ 5.2)
h	变形平面内双对称截面的高度
I	横截面关于通过梁形心的横轴的二次矩
I_{0x}, I_{0y}, I_{0z}	分别为横截面关于 X 轴、 Y 轴和 Z 轴的二次矩
I_ξ, I_η, I_H	质量关于塑性铰的一次矩和二次矩 (§ 5.4)
J	Lee 函数 (§ 2.5, § 5.6); 回转惯量 (§ 5.2); 与 Tamuzh 原理有关的泛函 (§ 6.3); J 积分 (§ 6.7)
J_0	$=I_{0x}$, 单位长度的极惯性矩
K	动能
K_0	$=GV_0^2/2$, 初始动能
k	$=\kappa L$, 无量纲曲率; Boltzmann 常数
k_Y	$=\kappa_Y L$, 屈服时的无量纲曲率
$\bar{k}$	$=\kappa/\kappa_Y$, 曲率比
$\bar{k}_f$	$=\kappa_f/\kappa_Y$, 卸载后的曲率比
$\bar{k}^*$	$=\kappa^*/\kappa_Y$, 卸载前的最大曲率比
L	梁或细长杆件的长度
L_h	塑性铰的等效长度 (§ 5.1, § 5.2)
M	弯矩
M_p	塑性极限弯矩
M_Y	弹性极限弯矩
m	$=M/M_p$, 塑性极限弯矩比 (第 4, 5 章)
$\widetilde{m}$	$=M/M_p$, 塑性极限弯矩比 (第 1~第 3, 6 章)
$\overline{m}$	$=M/M_Y$, 弹性弯矩比
$\overline{m}^*$	$=M^*/M_Y$, 卸载前的最大弯矩比
N	轴力

N_p	塑性极限轴力
N_Y	弹性极限轴力
n	$=NL/M_p$, 无量纲轴力; 区段数目 (§ 5.5); 应变强化指数
$\tilde{n}$	$=N/N_p$, 除以塑性极限轴力得到的无量纲轴力
$\bar{n}$	$=N/N_Y=\tilde{n}$, 除以弹性极限轴力得到的无量纲轴力
$\bar{n}^*$	$=N^*/N_Y$, 卸载前的最大轴力比
P	加载脉冲的冲量; 耗散功率 (§ 6.6)
P_{eff}	总有效冲量
P_f	总冲量
p	$=PL/M_pT_0$, 加载脉冲的无量纲冲量; 无量纲耗散功率 (§ 6.6)
p_f	$=P_fL/M_pT_0$, 无量纲总冲量
p_0	$=\gamma v_0$, 无量纲初始冲量
Q	剪力
Q_j	广义应力; 节点剪力 (§ 5.5)
Q_p	塑性极限剪力
Q_Y	弹性极限剪力
q	$=QL/M_p$, 无量纲剪力
q_p	$=Q_pL/M_p$, 无量纲塑性极限剪力
$\dot{q}_i$	广义应变率矢量
$\tilde{q}$	$=Q/Q_p$, 塑性极限剪力比
$\bar{q}$	$=Q/Q_Y$, 弹性剪力比
R	能量比 $E_{\text{in}}/U_c^{\text{max}}$ (§ 5.4, § 5.5, § 5.6); 断裂韧性 (§ 5.3); 曲梁的初始半径 (§ 6.3, § 6.5)
r	应变率指数; 径向坐标
r_g	撞击块的回转半径 (§ 5.3)
S	沿梁轴的弧长
s	$=S/L$, 沿梁轴的无量纲弧长
T	扭矩

T_p	塑性极限扭矩
T_Y	弹性极限扭矩
T_0	特征时间, $L\sqrt{\rho L/M_p}$
T_1	弹性振动的基本周期
$\bar{T}$	撕裂模量 (§ 6.8)
t	时间
t_d	脉冲持续时间
$\tilde{t}$	$=T/T_p$, 塑性极限扭矩比
$\bar{t}$	$=T/T_Y$, 弹性扭矩比
U	轴向位移
U_e	弹性变形能
$U_e^{\max}$	结构的最大弹性挠曲变形能
V	撞击质量的横向速度; 体积(第 2 章)
V_0	撞击质量的初始横向速度
V_x	斜向撞击中撞击质量的轴向速度 (§ 6.3)
V_z	斜向撞击中撞击质量的横向速度 (§ 6.3)
v	$=VT_0/L$, 无量纲横向速度
v_0	$=V_0T_0/L$, 撞击质量的无量纲初始横向速度
v_x	$=V_xT_0/L$, 撞击质量的无量纲轴向速度
v_z	$=V_zT_0/L$, 撞击质量的无量纲横向速度
W	形心的横向位移、挠度
w	$=W/L$, 无量纲横向位移、挠度
X	未变形几何构形中的轴向坐标
x	$=X/L$, 无量纲坐标
Y	屈服应力; 在未变形的几何构形中垂直于加载平面(对称面)的横坐标
Z	加载平面(对称面)内的横坐标, 从未经变形的几何构形的形心量起
$\bar{Z}$	距中性面的横向距离

$\bar{Z}$	形心和中性面之间的距离
α	$=E_t/E$, 应变强化因子; $=Y/\tau_Y$ (§ 6. 6)
α_m	对于弯矩的应变强化因子 (§ 5. 2)
$\bar{\alpha}$	$\alpha_m L/M_p$ (§ 5. 2)
β	材料或截面常数(第 1 章); 梁宽度变化的因子 (§ 6. 2); 圆弧形悬臂曲梁内铰的位置所对应的角度 (§ 6. 4, § 6. 5); 悬臂折梁的弯折角度 (§ 6. 6)
Γ	承受表面力的面积
γ	$=G/\rho L$, 质量比; 剪切应变
γ_q	横向剪应变(剪切角)
Δ	梁端的横向挠度
Δ_q	剪切变形造成的横向相对位移 (§ 5. 3)
δ	$=\Delta/L$, 梁端的无量纲横向挠度
δ_q	$=\Delta_q/L$, 剪切造成的无量纲横向相对位移
ε	轴向应变
ε_0	材料常数
$\bar{\varepsilon}_0$	率相关材料常数
ε_{fr}	断裂时的实际拉伸应变
ε_{ij}	应变
ε_Y	轴向屈服应变
ζ	形心和中性面之间的无量纲距离(第 1 章); 速度比 (§ 5. 6); 比率 $4L/h$ (§ 6. 3); 截面的非完善系数 (§ 6. 8)
η	由(5. 3)式定义的常数 (§ 5. 1); 以铰 H 为原点的坐标 (§ 5. 4); 比率 T_p/M_p (§ 6. 5)
η_L	$=L_2/L_1$, 阶梯悬臂梁的长度比 (§ 6. 6)
η_M	$=M_{p2}/M_{p1}$, 阶梯悬臂梁的塑性极限弯矩比
η_ρ	$=\rho_2/\rho_1$, 阶梯悬臂梁每单位长度的密度比 (§ 6. 6)
ϑ	$=d\theta/dX$, 轴向转角率
ϑ_Y	屈服时的 ϑ 值

θ	转角, 倾斜度, 与弯曲有关的转角
θ_i	截面关于形心轴的转动
κ	曲率
κ_{cr}	由强化向软化转变的临界曲率 (§ 5.2)
κ_f	卸载后的残余曲率
κ_Y	弹性极限曲率
Λ	铰 H 的位置坐标
λ	$=\Lambda/L$, 铰的无量纲坐标
μ	柔度系数 (§ 3.1); 峰值载荷与屈服载荷的比 (§ 5.6); 可微性指标 (§ 6.1); 比率 $\tilde{t}_H/\tilde{m}_H$ (§ 6.5)
ξ	弹性核的厚度与梁的半高之比 (第 1 章); 以铰 H 的位置为原点的坐标 (§ 5.4)
ρ	$=\rho_0 A$, 悬臂梁单位长度的质量
ρ_c	变形后形心曲线的曲率半径
ρ_v	材料密度
σ	截面上的法向应力
σ_f	最终的残余应力
σ_{ij}	应力
σ_n	单轴极限应力
τ	$=t/T_0$, 无量纲时间; 截面上的剪切应力
τ_Y	剪切屈服应力
ϕ	无量纲组 $\tilde{\alpha}e_0$ (§ 5.2); 角 (§ 6.4, § 6.5)
ϕ_j	形状因子矢量
ϕ_m	弯曲形状因子
ϕ_n	轴力形状因子
ϕ_q	剪切形状因子
ϕ_t	扭转形状因子
ϕ_i^*	模态形状的分量
Ψ	屈服函数

Ψ_e	弹性极限函数
Ψ_p	完全塑性极限函数
ψ	相对转角 (§ 5.5); 圆弧形悬臂梁的角坐标 (§ 6.3, § 6.5)
ψ_Y	屈服时的相对转角 (§ 5.5)
Ω	角速度
ω	无量纲角速度, ΩT_0

上标

c	运动许可
d	动力许可
e	弹性状态
ep	弹塑性解
p	塑性状态
rp	刚塑性解
*	模态解
'	关于坐标 x 的导数
•	关于时间变量的导数
+	正侧
-	负侧

下标

A	悬臂梁的端部
B	悬臂梁根部
C	横截面改变或弯曲的截面
f	最终状态
H	塑性铰
in	输入
m	弯曲
q	剪切

t	扭转
Y	屈服
0	初始状态
I	第 I 相
II	第 II 相

内 容 简 介

该书英文版 1993 年由 SpringerVerlag 出版社出版,是一本关于结构冲击动力学的专著。全书以弹塑性梁在强动载荷下的动力响应为例,着重阐述如何考虑各种材料与几何的因素,建立由简单到复杂的结构动力模型,从而研究弹塑性结构的非线性动力行为。

全书共分 7 章:第 1 章介绍弹塑性和粘塑性材料的本构关系;第 2 章概述结构动力学的基本原理;第 3 章讨论梁的准静态小变形和大变形;第 4 章分析刚塑性梁的动力响应,给出若干重要的解析结果;第 5 章详细论述了考虑梁的动力响应中各种二级效应(如应变率效应、大变形效应、弹性效应等)的动力模型及分析方法;第 6 章讨论复杂结构几何构型,如斜撞击、圆弧梁、带裂纹的梁等;最后,第 7 章转而研究冲击实验的方法和实验与理论结果的比较。

本书最大的特点是由浅入深,由简至繁地系统阐述建立结构动力学模型的方法,反复加深有关的基本概念,并通过典型结果揭示在冲击载荷作用下弹塑性结构的动力行为的基本特征。

本书可作为结构冲击动力学的研究生教材,也可供力学、机械、航空航天、土建结构,以及国防工程等专业的教师、学生、研究人员和工程技术人员学习参考。只要具有高等数学、理论力学、材料力学和弹塑性力学的基础,本书的大部分内容都可以自学掌握。

目录

主要符号表	(11)
-------------	------

第 1 章 弹塑性和粘塑性本构关系	(1)
-------------------------	-----

1.1 应力合力和广义应力;变形和广义应变	(1)
1.2 率无关梁的纯弯曲	(3)
1.2.1 变形的运动学	(3)
1.2.2 弹性本构方程	(5)
1.2.3 应力合力(轴力和弯矩)	(5)
1.2.4 弹塑性本构方程	(6)
1.2.5 弹-幂次强化本构方程	(10)
1.3 率相关梁的纯弯曲	(12)
1.3.1 应变率相关的本构方程	(12)
1.4 交互作用屈服函数及相关联的塑性流动	(15)
1.4.1 弯曲和拉伸下的弹性极限	(15)
1.4.2 理想弹塑性杆在弯曲和拉伸下的塑性极限曲面	(16)
1.4.3 屈服和完全塑性应力条件	(20)
1.4.4 塑性变形的相关联的流动法则	(21)
1.4.5 独立作用的屈服函数及分离的塑性流动	(23)
1.5 包含剪力的交互作用屈服面	(24)
1.5.1 承受轴力、剪力和弯矩的矩形截面	(25)
1.5.2 承受轴力、扭矩和弯矩的圆形截面	(26)
1.6 回弹	(29)
1.6.1 纯弯曲	(30)
1.6.2 弯矩和轴力	(32)

参考文献	(35)
第2章 力学原理	(38)
2.1 运动学	(38)
2.1.1 横截面的惯性特征	(40)
2.2 力的平衡	(41)
2.2.1 应力合力和广义应力	(41)
2.2.2 运动方程	(42)
2.3 虚速度原理	(44)
2.3.1 系统动能的变化率	(45)
2.3.2 运动许可速度场 $\dot{W}_i^s$ 的动能变化率	(46)
2.3.3 完全解的极值原理	(48)
2.4 理想刚塑性固体和结构的界限定理	(49)
2.4.1 静破坏载荷的上限和下限	(49)
2.4.2 动力响应持续时间的下限	(51)
2.4.3 动力响应持续时间的上限	(51)
2.4.4 最终位移的下限	(52)
2.4.5 最终位移的上限	(54)
2.5 变形的动力模态	(58)
2.5.1 模态解	(58)
2.5.2 模态的性质	(59)
2.5.3 冲击载荷作用下结构响应的模态近似	(62)
参考文献	(64)
第3章 静力挠曲	(67)
3.1 弹塑性小挠度	(67)
3.1.1 弹性挠曲	(69)
3.1.2 理想弹塑性悬臂梁的挠曲	(70)
3.1.3 弹-线性应变强化悬臂梁的挠曲	(73)
3.1.4 弹性卸载后的残余挠度	(77)
3.1.5 弹塑性梁柱	(80)
3.2 弹塑性大挠度	(82)