



“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学精品教材

李永池 / 编著

波动力学

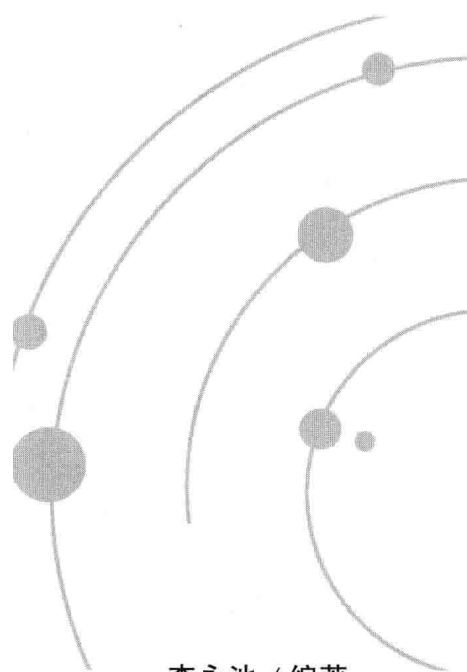
Wave Mechanics

中国科学技术大学出版社



“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学精品教材



李永池 / 编著

Wave Mechanics

波动力学

中国科学技术大学出版社



内 容 简 介

本书是作者四十多年来在中国科学技术大学为本科生和研究生主讲“爆炸固体力学”“应力波理论”和“波动力学”等课程教学内容的结晶. 全书力图以流体和固体相统一的思想, 以波传播的广义特征理论为主线, 对各类介质中有关波传播的研究方法、基本理论和主要结果进行较全面和系统的介绍, 以便为读者进行爆炸与冲击领域的研究工作提供一些基本知识和分析方法.

全书内容主要包括: 一维单纯应力波的阵面分析方法, 一维单纯应力波的特征线方法, 一维复合应力波的广义特征理论和典型问题, 三维介质中应力波的基本理论, 线性波的基本理论和某些结果, 爆轰波的基本理论和某些工程问题等. 在系统介绍波动力学基本知识的基础上, 书中也包含了作者及课题组近年来的某些最新研究成果, 例如有关复合应力波和三维波广义特征理论的表述体系以及某些新的结果、三维固体中冲击波突跃条件的推导和阐述等等.

本书可作为力学、工程热物理、工程科学、材料科学、地球和空间科学以及应用数学等专业的研究生教材, 也可作为与力学有关的相关专业师生和科技工作者的参考书.

图书在版编目(CIP)数据

波动力学/李永池编著. —合肥: 中国科学技术大学出版社, 2015. 5

(中国科学技术大学精品教材)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-312-03669-9

I. 波… II. 李… III. 波动力学 IV. O413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 051750 号

中国科学技术大学出版社出版发行

安徽省合肥市金寨路 96 号, 230026

网址: <http://press.ustc.edu.cn>

安徽省瑞隆印务有限公司印刷

全国新华书店经销

开本: 787 mm×1092 mm 1/16 印张: 24.75 插页: 2 字数: 618 千

2015 年 5 月第 1 版 2015 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1—3000 册

定价: 49.00 元



编审委员会

主 任 侯建国

副主任 窦贤康 陈初升

张淑林 朱长飞

委 员 (按姓氏笔画排序)

方兆本 史济怀 古继宝 伍小平

刘 斌 刘万东 朱长飞 孙立广

汤书昆 向守平 李曙光 苏 淳

陆夕云 杨金龙 张淑林 陈发来

陈华平 陈初升 陈国良 陈晓非

周学海 胡化凯 胡友秋 俞书勤

侯建国 施蕴渝 郭光灿 郭庆祥

奚宏生 钱逸泰 徐善驾 盛六四

龚兴龙 程福臻 蒋 一 窦贤康

褚家如 滕脉坤 霍剑青

总 序

2008年,为庆祝中国科学技术大学建校五十周年,反映建校以来的办学理念和特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列.在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮、严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列.

五十周年校庆精品教材系列于2008年9月纪念建校五十周年之际陆续出版,共出书50种,在学生、教师、校友以及高校同行中引起了很好的反响,并整体进入国家新闻出版总署的“十一五”国家重点图书出版规划.为继续鼓励教师积极开展教学研究与教学建设,结合自己的教学与科研积累编写高水平的教材,学校决定,将精品教材出版作为常规工作,以《中国科学技术大学精品教材》系列的形式长期出版,并设立专项基金给予支持.国家新闻出版总署也将该精品教材系列继续列入“十二五”国家重点图书出版规划.

1958年学校成立之时,教员大部分来自中国科学院的各个研究所.作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统.同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中.虽然现在外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变.正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才.

学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一.当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献.建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课.他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生.入选精品教材系列的绝大部分是基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神.

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、

序

本书是李永池教授几十年来为中国科学技术大学近代力学系研究生所开设“应力波理论”“波动力学”和“爆炸固体力学”等必修课程教学内容的结晶,这些课程一直受到本校师生和中国科学院力学所、岩土所、中国工程物理研究院、西北核技术研究所、总参工程兵科研三所、中船重工 702 所等研究单位代培研究生的高度评价.李永池教授始终注意吸取国内外同类著作的长处,并与自己的科研工作相结合,不断充实和提高相关教学内容和学术水平.目前,本书已入选“中国科学技术大学精品教材”系列及“‘十二五’国家重点图书出版规划项目”.

通读本书书稿之后,颇感新意,我觉得本书具有以下特色:

(1) 对连续介质中应力(压力)波传播的基本概念、原理、方法和规律的阐述,概念准确,语言清晰,逻辑严谨,条理分明,尤其注意把严谨的数学推导与其物理内涵的解释紧密结合.在相关章节中以开口观点、闭口观点、拉氏描述、欧氏描述为基础,以统一方式导出波阵面前后的守恒条件,特别体现在对固体中三维冲击波突跃条件的推导及陈述.

(2) 以左右特征矢量和广义特征理论为基础讲述应力波传播的特征线方法,并提出了矩阵降维法和速度空间法的思想;结合作者的研究成果,增加了有关复合应力波和三维波广义特征理论的新内容.这些不同于已有的应力波传播著作之处,既可以使读者加深对波传播物理图像和概念的理解、掌握处理波传播问题更严谨的数学方法、提高科研能力,又可以增强读者的应用数学功底.

(3) 在充分阐述基本理论和基本方法的基础上,结合作者丰富的科研实践,介绍了求解爆炸与冲击动力学典型问题的若干实例,这可以帮助读者更好掌握本书的理论方法,有利于启发他们对类似或更复杂问题的思考,提高综合利用理论方法解决实际问题的能力,更好地把基础理论和科研实践结合起来.

(4) 一般著作中,固体中的应力波使用拉氏描述,流体中的压力波使用欧

前 言

所谓波,就是指某种扰动信号的传播,而扰动信号则是指介质中某种状态量的改变(而不是其状态本身)向邻近介质所发出的一种信号,这种状态量的改变作为一种扰动信号由此及彼由近及远而传播开来就是所谓的波;而波在传播过程中也会因为受到各种内外因素的影响而改变其特性和强度,这就是所谓的波的演化.波的存在及其传播演化是自然界中最普遍和最重要的现象之一.电磁扰动信号的传播形成电磁波,光信号的传播形成光波,物质间引力的改变形成所谓的引力波,潮汐、海浪的推进和水库溃坝的洪水推进形成所谓的洪水波,声压扰动的传播形成所谓的声波,核爆炸、炸药化学爆炸和物理爆炸在炸药中形成爆轰波并在周围介质中引起爆炸应力波,变形体间的相互撞击会在相撞物体中分别激发出撞击应力波,城市车辆交通流中通过信号灯所控制的车辆疏密信号在车流中的传播是一种运动学的波.控制各类波传播规律的物理定律可能是完全不同的,但是由这些物理定律所得到的控制方程,则通常都可以由所谓的波动方程来描述,只要我们解决了求解波动方程的方法问题和由此所引出的一些规律性问题,则这些方法和规律常常是可以推广到具有不同物理背景的问题中去的,从这个意义上讲,我们只讲解某些最典型的波动问题是合适的.本书要讲的是波的一种——应力波,应力波即是指介质中应力扰动信号的传播,前面所讲的声波、爆轰波、爆炸应力波、撞击应力波等都是最常见的应力波.应力波可以在气体和液体等流体介质中传播,这些知识通常在气体动力学和流体力学教科书中有所介绍,在那里人们通常是用所谓的欧拉(Euler)描述方法;应力波也可以在固体介质中传播,这些知识通常在应力波基础和固体动力学教科书中有所介绍,在那里人们通常是用所谓的拉格朗日(Lagrange)描述方法.为了扩充读者的知识范围,深化读者对波传播问题的研究方法和重要结论的认识,也为了更好地揭示在连续介质力学中广泛采用的两类描述方法(拉格朗日描述和欧拉描述)的实质和相

互联系,提高读者综合运用流体力学和固体力学知识的能力,本书将以流体和固体相统一的观点来介绍应力波的研究方法、基本理论和重要结论.波的传播和演化规律除了可通过实验测量而得出之外,还可通过理论分析和数值计算来得出.本书不是对波传播的实验方法进行介绍,而主要是对波传播的广义特征理论和对波传播问题的具体应用进行介绍,在数值计算方面,则主要介绍以特征理论为基础的计算方法,对有限差分等方法则并未进行系统讲解,而只是在介绍波传播的某些具体应用实例时作了简要说明.

波动力学在力学以及相关学科的教学和科研工作中占有极其重要的地位,它是连续介质动力学的基本理论支柱之一,在爆炸和冲击力学中更是具有非常重要和不可或缺的作用,可以说,没有波动力学的知识,要解决任何爆炸和冲击力学的问题都是根本不可能的.对该课的重要性我们可以从以下几个方面来简单加以说明:

(1) 波动力学是固体动力学的理论基础. 从本质上讲, 力学中的任何问题实际上都是动力学的问题, 与时间完全无关的所谓静力学问题在严格意义上其实是不存在的, 这是因为任何外界的载荷要加到一个具体材料或结构上都是有一个时间过程的, 只是其快慢和时间持续长短不同而已. 只有当问题中的材料或者结构的惯性效应相对不太重要因而可以忽略时, 我们才可以将问题作为静力学问题来处理并得到近似符合实际的结果. 而在与时间有关的动力学问题中, 我们又可以将之大致地分为两类: 第一类是材料的局部惯性效应起重要作用的所谓前期响应或局部响应的所谓波动力学问题, 第二类是结构的总体惯性效应起重要作用的所谓后期响应或总体响应的所谓结构动力学问题, 这两类动力学的问题又互为因果, 即材料和结构中的波动是引起结构后期和总体响应的原因, 而结构后期和总体响应则是材料结构中整个波动过程的结果, 因此波动力学的研究结果不但常常可以作为研究后期结构响应问题的依据和基础, 而且有时可以成为改进或检验后期结构响应结果的出发点. 所以, 我们说波动力学是固体动力学的理论基础是一点也不为过的.

(2) 波动力学在国防科研和高新技术领域有重要科学意义和广泛应用价值。核爆炸、化学爆炸、物理爆炸和高速撞击所引起的应力波在各类介质中的传播规律和破坏效应的问题是最重要的波动力学问题:核爆炸由于其爆炸压力极高,所以即使是在坚硬的岩石中所发生的地下核爆炸,我们也将会遇到在爆炸近区的

流体动力学波、爆炸中区的塑性或黏塑性波以及在爆炸远区的纯弹性波的传播规律的问题;为了对地铁、人防工事及各类防护工程在爆炸载荷下的安全防护给出科学的结论,我们必须对爆炸所引起的应力波在相应介质中的传播演化规律进行合理的理论分析和数值计算;穿甲弹、破甲弹和碎甲弹等现代武器的攻防设计都是以波动力学的理论为基础而开展工作的,其目标就是如何根据波动力学的预测结果来改进进攻武器的设计以提高其杀伤效应,或者改进防护结构(坦克、舰船或掩体)以降低其破坏效应;陨石对天体撞击形成陨石坑的过程、弹片或太空垃圾对航天器的撞击破坏过程、飞鸟或弹片对飞行器的撞击破坏过程等,都涉及大量的应力波传播规律及其破坏效应问题;高速列车启动和制动中的部件撞击及缓冲、汽车撞击中的缓冲防护、矿山机械的破岩等,都涉及波动力学的问题;地震波也是典型的应力波,因此,波动力学在探测地震波的传播规律和减少地震破坏效应方面也大有用武之地……我们可以说,波动力学在武器效应、防护工程、航空航天、交通运输乃至矿山机械等众多高新技术领域的问题中都有着重要的应用.而且,应力波探伤、应力波探矿、应力波铆接在一定程度上都已经发展了相应的技术和产业,这些产业的继续发展壮大也是离不开波动力学的科学指导的.

(3) 波动力学是材料动态本构关系研究的理论基础.波的传播规律问题和材料的本构关系问题是紧密相关而且不可分割的两个问题:应力波传播规律的精确预测是以科学的材料本构关系描述为基础的,这是所谓的正问题;而为了要得到各种材料的科学本构关系描述,人们又必须以波动力学理论为指导来设计科学的实验方法、开展实验和分析实验数据,这是所谓的反问题.冲击动力学的各种新的实验方法和实验技术,如分离式霍普金森杆技术、膨胀环技术、落锤技术、轻气炮技术等都是以波动力学的理论为基础而建立和发展起来的,这些新方法和新技术的进一步改进也都有赖于波动力学理论的指导.

(4) 波动力学的研究方法本身是力学中应用数学方法的重要组成部分.力学和数学有着非常紧密的联系,力学中的应用数学方法在力学研究中也占有重要的地位.除了人们所熟知的摄动法、渐进展开法、积分变换法、傅里叶分析法等以外,在本书中我们将要系统讲解的奇异面理论和广义特征理论也是力学中应用数学方法的重要组成部分.在一些关于线弹性波的著作中,如《弹性波的衍射与动应力集中》((美)鲍亦兴、(美)毛昭宙著,刘殿魁、苏先樾译),《弹性固体中波的

个空间变量;单纯应力波是指波阵面上只有一个独立的非零应力分量,其他应力分量或者为零,或者可以通过本构关系而由那个独立的非零应力分量表达出来;阵面分析方法是指直接通过波阵面上的力学守恒定律而对应力波传播特性进行分析的方法,其目的是加深读者对应力波物理概念和物理图像的理解,为了读者容易理解,该章主要以线性硬化的弹塑性材料中的应力波为例,对波传播的一些主要单元过程进行系统介绍.第2章讲解一维单纯应力波的特征线方法,初步介绍导出特征线和特征关系的几种数学方法及其物理含义.前两章的内容在某种程度上可以说是读者在本科生“应力波基础”这门课程中曾经学过的,只不过在其数学推导和其物理概念的解释上,我们作了一些努力,希望读者能够在原有知识的基础上更上一个新的台阶.第3章系统介绍一维复合应力波传播的广义特征理论和典型问题,所涉及的问题虽然在几何上仍然是一维的,但是一般而言在波阵面上独立的非零应力分量大于1,因此存在多个应力分量之间的相互耦合作用,从而进一步显现非线性波的物理特征.本章更加系统地介绍广义特征理论和引入特征线及特征关系的各种数学方法,并对其物理含义进行阐述,同时作为典型实例还重点对非线性超弹性材料中的一维复合应力波问题以及弹塑性材料和黏塑性材料中的一维复合应力波问题进行较系统的介绍,其中包含了一些作者本人所率先完成的研究工作以及作者对前人工作的重新审视.第4章主要讲解三维介质中应力波的基本理论,内容主要包括三维波的运动学、固体中三维冲击波的突跃条件、对一阶偏微分方程几何理论和解析理论的介绍及对波阵面求解的应用、三维波特征关系的导出及其沿双特征的化简,等等,这里也有些工作是作者的新研究成果.第5章中简要介绍各向同性线弹性波的经典理论以及线性黏弹性波和各向异性线弹性波传播的某些结果.第6章介绍爆轰波的基本理论和与爆炸效应有关的某些工程问题.

作为本书前身的《波动力学》讲义曾多次进行修改,而且本书在定稿过程中又进行了多次修改和完善,其间,我的不少学生如高光发、邓世春、段士伟、李照阳、王光勇、孙晓旺、叶中豹等同志,都为书稿的打印、作图和修改付出了辛勤的劳动,他们也对书的内容提出了不少有益的建议,在此一并表示感谢.

符号说明

本书所用主要符号如下:

一般用非黑体希腊或英文字母表示标量,例如 φ, Φ, u, U 等.

一般用黑体小写英文字母表示矢量,例如 $\mathbf{v}, \mathbf{a}, \mathbf{b}$ 等.

一般用黑体大写英文字母表示二阶及高阶张量,例如 $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ 等.

$\mathbf{A}^T$: 二阶张量 $\mathbf{A}$ 的转置(transpose).

$[\mathbf{a}] = \mathbf{a}$: 矢量 $\mathbf{a}$ 的列阵;本书将矢量 $\mathbf{a}$ 与列阵相对应,故也以 $\mathbf{a}$ 本身表示其列阵.

$\{\mathbf{a}\}$: 矢量 $\mathbf{a}$ 的行阵, $\{\mathbf{a}\}^T = [\mathbf{a}] = \mathbf{a}$.

$\mathbf{A} \cdot \mathbf{a}$: 矢量 $\mathbf{a}$ 对二阶张量 $\mathbf{A}$ 的右点积,其矩阵记法为: $\mathbf{A} \circ \mathbf{a}$ 或 $[\mathbf{A}][\mathbf{a}]$.

$\mathbf{a} \cdot \mathbf{A}$: 矢量 $\mathbf{a}$ 对二阶张量 $\mathbf{A}$ 的左点积,其矩阵记法为: $(\mathbf{a}^T \circ \mathbf{A})^T = \mathbf{A}^T \circ \mathbf{a}$ 或 $(\{\mathbf{a}\}[\mathbf{A}])^T = [\mathbf{A}]^T[\mathbf{a}]$.

$\mathbf{A} : \mathbf{B}$: 二阶张量 $\mathbf{A}$ 和二阶张量 $\mathbf{B}$ 的第一种二次点积.

$\mathbf{A} \cdot \cdot \mathbf{B}$: 二阶张量 $\mathbf{A}$ 和二阶张量 $\mathbf{B}$ 的第二种二次点积.

$\frac{\partial \Phi}{\partial t}$: 量 Φ 的局部导数(local time derivative).

$\frac{d\Phi}{dt} = \dot{\Phi}$: 量 Φ 的随体导数(material time derivative).

$\frac{D\Phi}{Dt}$: 量 Φ 对时间的全导数(time derivative).

∇ : E 氏梯度算子(Euler gradient operator).

∇_i : E 氏微分算子(Euler covariant operator).

∇ : L 氏梯度算子(Lagrange gradient operator).

∇_l : L 氏微分算子(Lagrange covariant operator).

$\mathbf{F}$: 变形梯度张量(deformation gradient tensor).

ρ : 瞬时质量密度(current mass density).

ρ_0 : 初始质量密度(original mass density).

$\mathbf{b}$: 比体积力(special body force).

$\boldsymbol{\sigma}$ 或 $\mathbf{T}(\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{T}^T)$: 柯西应力张量(Cauchy stress tensor).

$\mathbf{S}$: 第一类 Piola-Kirchhoff 应力张量,简称第一类 P-K 应力张量.

T : 绝对温度.

h : 温度的空间梯度或 E 氏梯度.

目 次

总序	(1)
序	(3)
前言	(5)
符号说明	(11)
第 1 章 一维单纯应力波的阵面分析方法	(1)
1.1 波阵面描述及阵面守恒条件	(1)
1.1.1 应力波的概念及分类	(1)
1.1.2 波的运动学	(2)
1.1.3 波阵面上的位移连续条件和动量守恒条件	(4)
1.1.4 波阵面上动量守恒条件的物理意义	(7)
1.1.5 冲击波阵面上的能量守恒条件	(8)
1.2 弹性波的传播和相互作用例 I——弹性杆的对撞	(11)
1.2.1 题例及解法	(11)
1.2.2 结果分析	(14)
1.3 弹性波的传播和相互作用例 II——弹性波在两种材料交界面上的透反射 ...	(16)
1.3.1 求解方法和结果	(16)
1.3.2 结果分析和结论	(18)
1.3.3 两个特例	(19)
1.3.4 层裂问题	(20)
1.4 一维单纯应力波的弹塑性本构关系	(25)
1.4.1 材料本构关系对波传播特性的影响	(25)
1.4.2 一维杆中的弹塑性应力-应变关系	(27)
1.4.3 一维应变条件下理想塑性材料的轴向弹塑性应力-应变关系	(29)
1.4.4 一维应变条件下塑性硬化材料的轴向弹塑性应力-应变关系	(34)
1.5 材料的弹塑性动态响应与弹塑性双波结构	(36)
1.5.1 材料的弹塑性动态响应曲线	(36)

