



工程波动 理论与方法

Theories and Methods of
Wave Motion for Engineering

杜修力 著



科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

工程波动理论与方法

Theories and Methods of Wave Motion for Engineering

杜修力 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书论述了有关工程波动理论与研究方法的问题。全书共分8章,主要内容包括:弹性波动理论的一些基本概念;弹性波动定解问题,特别是近场波动问题的求解方法;波动数值模拟的边界元和时域显式有限元方法;多种介质的动力相互作用问题;固体界面的动态接触过程模拟;无限域能量辐射的时域数值模拟方法;求解近场非线性波动问题的时域显式整体分析方法及其在混凝土高坝结构抗震分析中的应用。

本书可作为研究工程波动问题,特别是近场波动问题的工程科研人员和研究生的参考书,也可作为土木、水利、矿山和工程力学等专业的高年级本科生和研究生教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程波动理论与方法 = Theories and Methods of Wave Motion for Engineering / 杜修力著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-024589-2

I. 工… II. 杜… III. 工程力学:波动力学 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 074301 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年5月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009年5月第一次印刷 印张:28 3/4

印数:1—2 500 字数:559 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

工程科学中的大量问题需要从波动概念的角度去理解和分析,如地球介质中断层破裂引起的地震波工程破坏效应、机械基础振动效应、高速列车运行引起的环境振动效应,以及爆炸引起的工程结构响应等。作者在这一领域从事了二十余年的科研和教学工作,特别是在近场波动问题的数值模拟方法及其工程应用方面开展了系统的研究工作,发表了数十篇相关的学术论文,因此有了将研究成果进行系统整理并编写成书的想法。本书的写作始于2001年,当时的内容仅涉及时域显式数值波动模拟方法及其工程应用,内容太过狭窄、不系统。自从作者调入北京工业大学任教并给研究生讲授工程波动课程之后,又系统地整理了波动理论的一些基本知识,但仍感觉准备出书的内容不足,加上自己的研究工作在无限域能量辐射的时域模拟方面还不够深入,因此,成书之事一拖再拖。其后,经多次调整写作大纲,数次修改稿件,直到2008年底才最终成书。

全书共分8章,第1章论述了弹性波动理论的基本问题。此部分是作者为研究生授课的内容,同时也反映了作者的一些学习和研究体会,涉及波动的一些基本概念,如波动的时空周期性、相速度和频散现象、波群与群速度、平面波、体波、面波、波的反射和透射等,介绍了研究波动方程的基本方法。对于土木、水利、矿山等工程专业甚至工程力学专业的研究生来说,这些内容作为初学波动理论是适当的。第2章论述了波动的定解问题及其求解方法。定解问题中关于近场波动问题的论述较为详细、系统,也融入了作者自己的一些认识和研究成果,这也是下面各章要解决问题的落脚点。此外,还介绍了作者应用积分方程法求解各向异性介质中SH波传播的两类格林函数解。第3章论述了波动问题的边界元方法。这也是作者从事工程波动问题研究中最早涉及的内容,重点介绍了作者及其合作者在奇异边界元方法、级数解边界元方法、半解析边界元方法及其在近场波动问题应用方面的研究成果。第4章论述了连续固体介质离散网格模型中的波动特性和时域显式有限元求解方法。这些都是作者及其合作者多年的研究成果和心得,主要介绍了几种时域显式算法,并进行了比较讨论。本章内容是第5、6、8章内容的基础,也是近场波动问题数值模拟涉及的两个重要方面(内域计算和无限域能量辐射模拟)之一。第5章论述了流体与流-固饱和两相多孔介质动力计算的时域显式有限元方法和固体、流体、流-固饱和两相多孔介质间的动力耦合问题的时域显式求解方法,这些是作者及其合作者的研究成果。第6章论述了基于时域显式有限元方法的固体界面动态接触问题的动接触力方法。本章工作主要是作者的师兄及其合作者刘

晶波教授多年来的研究成果。第7章论述了无限域能量辐射的时域数值模拟方法。重点介绍了作者及其学生近些年在应力型人工边界研究方面的成果,包括利用积分核压缩技术对应力(力)-位移关系的时域卷积模型进行局部解耦处理的两种方法,即微分方程化方法(弹簧-阻尼-质量模型)和差分方程化方法(时域递归算法),以及提出的广义黏弹性人工边界。第8章论述了近场非线性波动的时域显式整体方法及用于高坝结构抗震分析取得的研究成果。这是前面第4~7章内容的集成及工程应用。

本书各章内容相互联系、相互贯通、有机结合,既构成了工程波动理论与研究方法较为完整的框架体系,又有鲜明的特色(时域波动数值模拟技术为主)和突出的研究目标(近场波动问题)。

本书作者及其合作者在二十余年研究工作期间,获得了多项国家自然科学基金(包括国家杰出青年科学基金和重点项目)、国家科技攻关和重点基础研究发展计划(973)项目,以及北京市教育委员会科学研究、创新平台和“人才强教”计划项目的资助。作者的学生李亮、王进廷、赵密、赵建锋、李立云、路德春、涂劲等为本书的完成做出了贡献,这里面不仅有他们的研究成果,而且不少初稿也是他们帮助完成的。作者的合作者和挚友刘晶波教授、赵成刚教授、李小军研究员、周正华研究员、丁海平研究员、关慧敏博士、傅铁铭博士、田志敏研究员,以及在中国水利水电科学研究院工作时的同事张艳红、张伯艳教授级高级工程师也对本书的完成做出了贡献,这里面不仅直接反映了他们的部分研究成果,而且作者及其学生的研究成果也有很多得益于与他们的交流和讨论。可以说,本书的成果是集体智慧和心血的结晶。在此,作者向他们表示衷心的感谢!还要感谢将作者带入这一研究领域的两位中国地震局工程力学研究所的老师——熊建国研究员和廖振鹏院士,是他们的无私教诲和帮助才有作者今天在这一领域的收获。

作者研究工作与实际工程对象的结合始于在中国水利水电科学研究院工作期间。“八五”期间作者在陈厚群院士领导下开始从事高拱坝抗震研究,初步尝试了将显式有限元-透射人工边界方法用于求解拱坝-地基系统的非线性地震反应,“九五”期间更深入地研究了这一问题。这一经历促进了作者在这一领域理论与方法方面的系统研究。在此作者对陈厚群院士的引领和帮助表示真诚的谢意!

在这里,作者特别要感谢国家自然科学基金委员会、中华人民共和国科学技术部、北京市教育委员会和国家科学技术学术著作出版基金的资助!

最后,作者还要感谢妻子张学琴和女儿杜依濛的理解和支持!

由于作者水平所限,书中难免存在疏漏和不足之处,衷心希望读者不吝赐教。

杜修力

2008年12月于北京工业大学

常用符号列表

(以英文字母排序)

- A ——面积;振幅
 a ——加速度
 $a_g(t)$ ——输入的地震动加速度时程
 A ——传递矩阵
 A_l ——边界节点 l 的人工边界影响面积
 B ——接触约束矩阵
 B_n ——法向接触约束矩阵
 B_t ——切向接触约束矩阵
 c ——波速;阻尼元件的阻尼系数;黏聚力
 c_B ——群速度
 c_φ ——相速度
 c_P ——P波波速
 c_S ——S波波速
 c_R ——Rayleigh波波速
 c_L ——Love波波速
 c_{ijn} ——单元阻尼系数
 c_r, c_θ, c_x ——径向、环向和轴向的无量纲阻尼系数
 C_I, C_{IB}, C_{BI}, C_B ——近场波动问题有限元离散方程总体阻尼矩阵的分块矩阵
 c_{P_1}, c_{P_2} ——两相多孔介质中的 P_I 波和 P_{II} 波的波速
 C_{ii}^{sa}, C_{ii}^{sf} ——两相介质人工边界处的固相节点 l 在 i 方向的阻尼参数
 C_{ii}^{fs}, C_{ii}^{ff} ——两相介质人工边界处的液相节点 l 在 i 方向的阻尼参数
 d ——滞回阻尼比
 \bar{d}_n ——等效滞回阻尼比
 d ——单位常向量
 d_0 ——点对的初始法向间隙
 D_n ——接触点对法向间距向量
 D_t ——相对切向位移向量
 $d\boldsymbol{\varepsilon}$ ——总应变增量向量
 $d\boldsymbol{\varepsilon}^e$ ——弹性应变增量向量

- $d\mathbf{e}^p$ ——塑性应变增量向量
 $d\boldsymbol{\sigma}$ ——应力增量向量
 \mathbf{D}_{et} ——弹性切线刚度矩阵
 \mathbf{D}_{ep} ——弹塑性切线刚度矩阵
 E ——杨氏模量
 e ——能通量;两相介质中固相的体积应变;土体孔隙比
 E_n ——第 n 层土介质内上行波的波幅系数
 $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_z$ ——圆柱坐标系中的单位矢量
 $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_\phi$ ——球坐标系中的单位矢量
 $\hat{E}_n(R, \omega), \hat{E}_n(X, \omega)$ ——频域人工边界核
 $E_n(R, t), E_n(X, t)$ ——时域人工边界核
 E_k ——两相介质固相骨架的体积压缩模量
 E_s ——两相介质固相颗粒的体积压缩模量;材料的割线弹性模量
 f ——振动频率;摩擦系数
 \bar{f} ——高频截止频率或奈奎斯特频率
 f_c ——两相介质的特征频率;混凝土材料的抗压强度
 f_n —— n 阶固有频率
 f_1 ——基本频率
 f_{hi}^e ——单元 e 中局部节点 h 在方向 i 的作用外力
 f_{li} ——总体节点 l 在方向 i 上的作用外力
 $f(\mathbf{x}, t)$ ——源函数
 f_{\max} ——输入波动能量最高截止频率
 F_n ——第 n 层土介质内下行波的波幅系数
 \mathbf{F} ——外力向量
 $\hat{f}_r(R, \omega)$ ——一维问题中频域内近场有限域对远场无限域的径向相互作用应力
 $\hat{f}_\theta(R, \omega)$ ——一维问题中频域内近场有限域对远场无限域的环向相互作用应力
 $\hat{f}_z(R, \omega)$ ——一维问题中频域内近场有限域对远场无限域的轴向相互作用应力
 $f_r(R, t), f_\theta(R, t), f_z(R, t)$ ——一维问题中时域内径向、环向和轴向相互作用应力
 $f(R, \theta, t)$ ——出平面问题中近场有限域对远场无限域的相互作用应力
 $F(\bar{\omega})$ ——动力柔度系数
 F_0 ——静力柔度
 $\mathbf{F}_I(t), \mathbf{F}_B(t)$ ——近场波动问题有限元离散方程内源荷载列向量的分块子向量
 $\mathbf{F}_E(t)$ ——人工边界节点处截去的远场无限域对近场有限域的相互作用力列向量
 \mathbf{F}_i ——近场波动问题中作用于有限域的内源荷载
 \mathbf{F}_b ——近场波动问题中无限域对有限域的相互作用力

- F_{be} ——外源近场波动问题中输入位移场引起的等效荷载
 f_t ——混凝土材料的抗拉强度
 g_r, g_θ, g_z ——圆柱坐标系中的度量因子
 $G(r|r_0)$ ——格林函数
 $g(s)$ ——平面应变条件下的格林函数矩阵
 $G(r, t|r_0, t_0)$ ——三维条件下的格林函数
 \hat{G} ——频域中的格林函数
 $H(t)$ ——单位阶跃函数
 $H_n^{(1)}(kr)$ —— n 阶第一类柱 Hankel 函数
 $H_n^{(2)}(kr)$ —— n 阶第二类柱 Hankel 函数
 h_r, h_θ, h_ϕ ——球坐标系中的度量因子
 I ——单位矩阵
 I_1, I_2, I_3 ——主应力的第一、第二和第三不变量
 $J(t)$ ——时域中的蠕变柔量
 $\hat{J}(\omega)$ ——频域中的蠕变柔量
 $J_n(kr)$ —— n 阶第一类 Bessel 函数
 J ——Jacobi 矩阵
 $|J|$ ——Jacobi 行列式
 J_2, J_3 ——偏应力的第二和第三不变量
 k ——波数; 渗透系数; 弹簧刚度系数
 K_l ——两相介质中孔隙液体的体积模量
 K ——流体介质的体积模量; 安全系数
 k_{ij}^e ——单元 e 中局部节点 q 方向 j 对于局部节点 h 方向 i 的刚度系数
 k_{lnj} ——总体节点 n 在方向 j 施加单位位移而在总体节点 l 的方向 i 产生的力
 k_r, k_θ, k_z ——径向、环向和轴向的无量纲弹簧系数
 K_1, K_{1B}, K_{B1}, K_B ——近场波动问题有限元离散方程总体刚度矩阵的分块矩阵
 $K_{\bar{u}}^{ss}, K_{\bar{u}}^{st}$ ——两相介质人工边界处的固相节点 l 在 i 方向的弹簧参数
 $K_{\bar{u}}^{fs}, K_{\bar{u}}^{ff}$ ——两相介质人工边界处的液相节点 l 在 i 方向的弹簧参数
 L_c ——两相介质的特征距离
 L, L^* ——微分算子
 L ——荷载算子矢量
 M_n ——第 n 振型的等效质量
 M_{ijkl} ——柔度张量分量
 m_{hq}^e ——单元 e 中局部节点 q 对于局部节点 h 的质量系数
 m_{ln} ——总体节点 n 对于总体节点 l 的质量系数

- m_i ——集中质量
 M_A, M_B ——近场波动问题有限元离散方程总体质量矩阵的分块矩阵
 n ——两相介质的孔隙率
 N ——形函数
 n_e ——单元节点总数
 n ——单位矢量
 p ——两相介质的孔隙液体压强;波源函数;流体动压力;平均应力
 P ——外力谱矢量
 P_0 ——流体静压力
 P ——流体压力
 P_b ——边界节点的外力谱矢量
 P_i ——内节点的外力谱矢量
 p^* ——面力分量
 $P(x, \omega)$ ——频域中的荷载
 $\bar{p}(t), \bar{P}(\omega)$ ——荷载的边界值
 Q ——品质因子
 $q_n(t)$ ——广义坐标
 q_a ——三轴压缩条件下的破坏剪应力
 q ——等效剪应力
 $R_b(\omega)$ ——子结构交界面上的相互作用力向量
 $r_b(t)$ ——地基阻抗力
 $R_i(m, t)$ —— t 时刻 i 物体上 m 点的法向接触力
 S ——动力刚度矩阵
 S_{bb}^∞ ——无限域的动力刚度矩阵(阻抗矩阵)
 $S^\infty(\omega)$ ——频域中的基础阻抗函数
 $s^\infty(t)$ ——位移单位脉冲响应函数
 $S_s(\omega)$ ——基础阻抗函数的奇异部分
 $S_r(\omega)$ ——基础阻抗函数的正则部分
 S_t ——接触面间的切向接触力
 S_n ——接触面间的法向接触力
 $\hat{S}_r(R, \omega)$ ——无限域径向动力刚度系数
 S_r^0 ——径向静力刚度
 $S_r(R, t)$ ——径向单位位移脉冲响应函数
 $\hat{S}_\theta(R, \omega)$ ——无限域环向动力刚度系数
 S_θ^0 ——环向静力刚度

- $S_\theta(R, t)$ ——环向单位位移脉冲响应函数
 $\hat{S}_z(R, \omega)$ ——无限域轴向动力刚度系数
 S_z^0 ——轴向高频极限刚度
 $S_z(R, t)$ ——轴向单位位移脉冲响应函数
 $S(\bar{\omega})$ ——无限域动力刚度系数
 S_0 ——无限域静力刚度
 $S_s(\bar{\omega})$ ——无限域动力刚度系数的奇异部分
 $S_r(\bar{\omega})$ ——无限域动力刚度系数的规则部分
 S_M ——高阶弹簧 - 阻尼 - 质量模型的频域动力刚度
 T ——振动周期; 动能
 T_n —— n 阶固有周期
 T_1 ——基本周期
 $T^\sigma(t)$ ——时域中应力对应变的响应函数
 $\hat{T}^\sigma(\omega)$ ——频域中应力对应变的响应函数
 $T^\varepsilon(t)$ ——时域中应变对应力的响应函数
 $\hat{T}^\varepsilon(\omega)$ ——频域中应变对应力的响应函数
 \bar{T}_{si} ——两相介质 i 方向的固相边界力
 \bar{T}_{li} ——两相介质 i 方向的液相边界力
 \bar{T}_n ——传递矩阵
 T ——面力
 u, v, w ——时域中 x, y, z 方向的位移
 $U(\omega)$ ——频域中的位移
 u_i ——两相介质中 i 方向的固相位移
 U_i ——两相介质中 i 方向的液相平均位移
 \bar{u}_i ——两相介质 i 方向的固相边界位移
 \bar{U}_i ——两相介质 i 方向的液相边界位移
 U ——位移谱矢量; 位移向量; 两相介质人工边界处外行波的固相位移
 U_b ——边界节点的位移谱矢量
 U_i ——入射波在无结构的无限域中产生的位移场
 U_{ib} —— U_i 在无限域与结构交界面位置的取值
 U_i ——内节点的位移谱矢量
 U_{gb} ——入射波作用下无限域在边界节点处产生的位移谱矢量
 U_{sb} ——结构与无限域交界面上的作用力 P_b 所产生的边界节点的位移谱矢量
 $\ddot{u}_g(t)$ ——系统基底的输入加速度
 $\bar{U}_i(\omega)$ ——频域中的位移边界值

$u_i^P, \dot{u}_i^P, \ddot{u}_i^P$ ——单相固体介质及两相介质的固相 P 时刻 l 节点 i 方向的位移、速度和加速度

$u_i^{P+1}, \dot{u}_i^{P+1}, \ddot{u}_i^{P+1}$ ——单相固体介质及两相介质的固相 $P+1$ 时刻 l 节点 i 方向的位移、速度和加速度

U_i^P, \dot{U}_i^P ——两相介质 P 时刻 l 节点 i 方向的液相位移和速度

$U_i^{P+1}, \dot{U}_i^{P+1}$ ——两相介质 $P+1$ 时刻 l 节点 i 方向的液相位移和速度

$U_b^f(\omega)$ ——对应于自由波场时交界面的位移向量

$U_b^s(\omega)$ ——对应于散射波场时交界面的位移向量

$u_{ij}^{t+\Delta t}$ —— $t + \Delta t$ 时刻接触面上的 i 点在 j 方向的位移

$\Delta u_{ij}^{t+\Delta t}$ —— $t + \Delta t$ 时刻由法向接触力产生的接触面上的 i 点在 j 方向的位移增量

$u_r(r, t), u_\theta(r, t), u_z(r, t)$ ——时域内圆柱坐标系中的径向位移、环向位移和轴向位移

$\hat{u}_r(r, \omega), \hat{u}_\theta(r, \omega), \hat{u}_z(r, \omega)$ ——频域内圆柱坐标系中的径向位移、环向位移和轴向位移

$u_r(r, t), u_\theta(r, t), u_\phi(r, t)$ ——时域内球坐标系中的径向位移、环向位移和经向位移

$\hat{u}_r(r, \omega), \hat{u}_\theta(r, \omega), \hat{u}_\phi(r, \omega)$ ——频域内球坐标系中的径向位移、环向位移和经向位移

U_b ——外源近场波动问题的边界总位移场

U_I ——外源近场波动问题的输入位移

U_R ——外源近场波动问题的辐射位移

$u_P(t)$ ——入射 P 波的位移时程

$u_S(t)$ ——入射 S 波的位移时程

V ——应变能；两相介质人工边界处外行波的液相位移

$\Delta v_{ij}^{t+\Delta t}$ —— $t + \Delta t$ 时刻由切向接触力产生的接触面上的 i 点在 j 方向的位移增量

W ——波动的能量密度

$w(x, t)$ ——波函数

W, \bar{W} ——权函数

$W(x, \omega)$ ——频域中的位移

$\bar{w}(t), \bar{W}(\omega)$ ——位移边界值

$w^*(x, y)$ ——无限各向异性介质中 SH 波传播问题的基本解

W^f ——水平地表半无限体的自由场位移

W^s ——不规则地形产生的散射场位移

X_i ——单位体积的 i 方向体积力

$Y(t)$ ——时域中的松弛模量

$\hat{Y}(\omega)$ ——频域中的松弛模量

$Y_n(kr)$ —— n 阶第二类柱 Bessel 函数

- z ——波阻抗
 α ——罚因子;两相介质的孔隙流体压力对固相应力的影响系数
 β ——Ottoosen模型的非线性指数
 γ ——容重;剪应变
 $\dot{\gamma}$ ——剪应变速率
 λ ——波长;拉梅常量
 ρ ——质量密度;矩阵的谱半径
 ρ_s ——两相介质中固相的质量密度
 ρ_l ——两相介质中液相的质量密度
 ω ——圆频率
 ω_n —— n 阶固有圆频率
 ω_u ——截止频率
 ω_N ——奈奎斯特圆频率
 $\bar{\omega}$ ——无量纲频率
 ω_d ——刚性地基假定条件下的坝体基频
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ ——三维波动问题的应力分量
 σ_{ij} ——两相介质中固体骨架的应力张量
 σ^f ——两相介质的真实孔隙水压力
 $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ ——圆柱坐标系中的径向正应力、环向正应力和轴向正应力
 $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_\phi$ ——球坐标系中的径向正应力、环向正应力和经向正应力
 σ_n ——正应力
 σ_1, σ_3 ——主应力
 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ ——三维波动问题的应变分量
 ϵ ——两相介质中液相的体积应变
 $\dot{\epsilon}_c, \dot{\epsilon}_t$ ——应变速率
 ϵ_d^p ——塑性剪应变
 ϵ_v^e ——弹性体积应变
 ϵ_v^p ——塑性体积应变
 $\dot{\epsilon}$ ——正应变速率
 μ ——剪切模量
 $\bar{\mu}_n$ ——等效剪切模量
 μ_d ——滑动摩擦系数
 μ_s ——静摩擦系数
 ν ——泊松比
 ν_s ——割线泊松比

ξ —— 阻尼比

ζ —— 流体介质的体积黏性系数(或第二黏性系数)

$\tau_i(m, t)$ —— t 时刻 i 物体上 m 点的摩擦力

$\tau_{r\theta}$ —— $r-\theta$ 平面内的剪应力

$\tau_{rz}(r, t)$ —— $r-z$ 平面内的剪应力

τ_f —— 极限剪应力

Φ, φ 和 ψ —— 亥姆霍兹势函数

$\varphi(P_0)$ —— 分布源函数

φ —— 内摩擦角

ϕ_+, ϕ_- —— 行波初始相位

θ_{rp} —— 波传播方向与界面法线之间的夹角

θ —— 极角; 应力 Lode 角

η —— 阻尼型黏性元件的黏性系数; 流体介质的动力黏性系数(或第一黏性系数)

η_1 —— 阻尼型黏性元件的剪切黏性系数

$\Psi_n(z)$ —— n 阶振型函数

$|\Gamma_n|$ —— 应变振幅

$\bar{\Gamma}_n$ —— 等效应变振幅

Γ —— 平面区域的边界

Γ_1 —— 位移边界

Γ_2 —— 力边界

δ_{ij} —— Kronecker- δ 符号

$\delta u, \delta U$ —— 虚位移

$\delta(x_1)$ —— 一维 Dirac delta 函数

$\delta(\mathbf{x})$ —— 三维 Dirac delta 函数

$\delta w_e, \delta w_p, \delta w_i$ —— 弹性内力、外荷载和惯性力所做的虚功

$[\bar{I}]$ —— 自由振动系统的最大势能

Λ —— Lagrange 乘子向量

∇^2 —— Laplace 算子

\mathcal{R} —— 局部截断误差

π_i —— 第 i 个物体的总势能

目 录

前言

常用符号列表

第 1 章 弹性波动方程及解与波动的一些基本概念	1
1.1 一维波动方程及解	1
1.2 无限各向同性弹性介质中的波	8
1.3 非均匀介质中波的透射与反射.....	15
1.4 成层介质中的面波.....	21
1.5 波动能量和波阻抗.....	29
1.6 介质的阻尼效应.....	31
1.7 传递矩阵法及成层介质的一维地震反应分析.....	53
1.8 液固两相介质中的波动.....	63
参考文献	71
第 2 章 定解问题及其求解方法	72
2.1 定解问题的描述及其主要类型.....	72
2.2 定解问题的求解方法.....	82
2.3 近场波动问题分析方法	134
参考文献.....	141
第 3 章 弹性波动问题的边界元方法	143
3.1 奇异边界元方法	143
3.2 间接边界元方法	150
3.3 级数解边界元方法	152
3.4 级数解边界积分法	158
3.5 半解析边界元方法	161
3.6 边界元方法在地震波散射问题中的应用	166
3.7 边界积分方程充要性的讨论及其权函数的选择	171
参考文献.....	177
第 4 章 连续固体介质中波动求解的显式有限元方法	179
4.1 连续介质空间离散化及其有限元模型	179
4.2 节点运动方程及其节点刚度、质量、阻尼系数	181

4.3	节点运动方程的求解及时域数值积分方法	187
4.4	时域数值积分方法的几个问题	191
4.5	无阻尼体系节点运动方程的时域显式数值积分方法	193
4.6	一般阻尼体系节点运动方程的时域显式数值积分方法	194
4.7	显式积分方法的数值稳定性	199
4.8	显式积分方法的精度问题	204
4.9	时空离散网格模型中的波动及离散化准则	207
	参考文献	216
第5章	多种介质相互耦合的显式有限元方法	218
5.1	流体介质动力问题的显式有限元方法	218
5.2	流体饱和两相多孔介质动力问题的显式有限元方法	223
5.3	基于显式有限元的多种介质相互耦合的边界条件	231
	参考文献	250
第6章	基于显式有限元法的固体介质界面动接触力模拟方法	252
6.1	接触问题及其求解	252
6.2	二维无阻尼介质中缝界面动接触的显式有限元方法	261
6.3	二维有阻尼介质中缝界面动接触的显式有限元方法	264
6.4	三维介质中界面动接触的显式有限元方法	268
6.5	有阻尼介质动接触问题的阻尼简化处理方法	274
6.6	界面静接触的显式有限元方法	277
	参考文献	278
第7章	无限域能量辐射的时域数值模拟方法	280
7.1	无限域能量辐射模拟的解析人工边界	282
7.2	动力刚度系数的有理近似	304
7.3	高阶弹簧-阻尼-质量模型	307
7.4	基于一维单向波动的高阶弹簧-阻尼-质量边界	316
7.5	基于边界傅里叶模态展开的高阶弹簧-阻尼-质量边界	319
7.6	时域递归算法	327
7.7	广义黏弹性边界	329
7.8	流固两相耦合多孔介质的人工边界	337
	参考文献	343
第8章	近场非线性波动的时域显式整体模拟方法及应用	346
8.1	近域介质材料的非线性模型	347
8.2	基于动力松弛法的无约束域问题的静动作用组合分析方法	362

8.3 地震动输入问题	367
8.4 工程应用成果	378
参考文献	432
附录 A 特殊函数	435
A.1 贝塞尔(Bessel)函数	435
A.2 勒让德(Legendré)函数	437
附录 B 度量因子	439
名词索引	440

第 1 章 弹性波动方程及解与波动的一些基本概念

工程问题有许多需要用波动概念和方法来求解,如地震波散射问题、基础振动问题、土-结构动力相互作用和无损检测问题等,本章简单介绍波动的一些基本概念和基本方程。

1.1 一维波动方程及解

1.1.1 一维标准波动方程

波动是运动在介质中的传播,这一运动在介质中的传播过程可以用根据经典力学原理建立的运动微分方程来描述。介质中任何一点在任意时刻应满足动力平衡条件和应力与应变需要符合的物理关系,也就是波动方程的建立是在运动状态和受力状态之间通过牛顿第二运动定律和本构关系来实现的。下面通过一维杆的波动方程的推导来说明波动方程的建立过程。

如图 1.1.1 所示,一根截面面积为 A 的均匀无限长直杆,杆身材料的杨氏模量为 E ,容重为 γ 。假设杆在做纵向振动时每个截面仍保持平面,截面上的应力均匀分布,这样杆的运动仅是杆轴线坐标 x 和时间 t 的函数,其位移可以用数学表达式描述如下:

$$u = u(x, t) \quad (1.1.1)$$

对于弹性波动问题,有如下的应力-应变关系:

$$\sigma_x = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1.1.2)$$

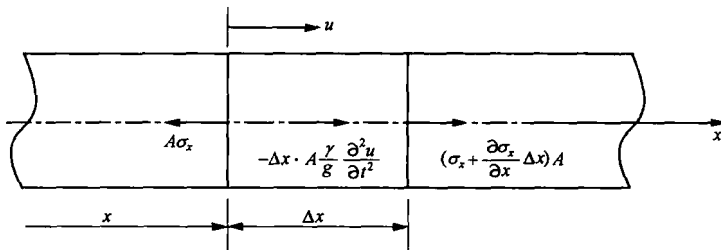


图 1.1.1 一维杆的纵向振动示意图