

结构中波的传播

(第二版)

〔美〕 James F. Doyle 著

吴 斌 何存富 焦敬品 刘增华 译



科学出版社

结构中波的传播

(第二版)

〔美〕James F. Doyle 著

吴 斌 何存富 焦敬品 刘增华 译



科学出版社

北 京

图字: 01-2012-1838

内 容 简 介

本书系统介绍了可用于结构中波传播分析的谱分析方法, 首先用于杆、梁、板中, 然后用于三维桁架、柱型箱体等复杂结构. 谱分析方法将波的传播和振动分析紧密联系起来, 既可用于模态分析, 也可针对具体的波动特性进行重构.

本书在波动方程推导、求解和后处理等环节始终如一地采用谱形式表达, 为结构中应力波的分析提供了一个统一的框架; 将复杂结构作为连接波导处理, 引入阻尼、耦合效应和高阶理论, 考虑应力波与不连续体如边界、接头等的相互作用, 利用谱分析方法实现了波传播的分析与实验结果的一致性. 书中采用大量实验数据与谱分析方法结果进行对比, 直观易读.

本书对超声无损检测、实验固体力学等领域学习和研究的大学生、研究生、工程技术人员来说是很有价值的参考资料.

Translation from the English language edition:
Wave Propagation in Structures by James F. Doyle
Copyright © 1997 Springer-Verlag New York, Inc.
Springer is part of Springer Science+Business Media
All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

结构中波的传播/(美)多伊尔(Doyle, J. F.)著; 吴斌等译. —2版. —北京: 科学出版社, 2013

书名原文: Wave propagation in structures

ISBN 978-7-03-036482-1

I. ①结… II. ①多… ②吴… III. ①超声波—结构—传播—研究
IV. ①O426

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 013462 号

责任编辑: 刘凤娟 尹彦芳 / 责任校对: 张怡君

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2013 年 1 月第一次印刷 印张: 19

字数: 363 000

定价: 85.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

译者序

作为长期从事工程波动力学、实验固体力学和结构健康检测与评估研究的工作者,我们一方面致力于对结构中应力波传播基本理论的研究,另一方面基于应力波传播理论,通过发展实验力学新方法和新技术,解决一部分工程结构健康检测问题,如将超声导波技术应用于锚杆、钢索、管道和储罐底板等的无损检测,并取得了较为丰硕的成果。但是,目前对一些组合或特殊几何结构,如锥形梁、角接头、搭接板和复杂桁架等连接波导结构中的应力波传播分析方法非常有限。即便通过实验研究方法可对上述结构中波的传播规律进行分析,但如何利用有限的实验数据进行应力波在结构中传播规律的完整描述,实现理论分析、有限元计算和实验方法的统一,尚缺乏有效的工具。

J. F. Doyle 是美国普渡大学航空航天学院教授,美国实验力学学会的 Fellow。他领导的课题组,长期致力于实验力学新方法的研究工作,注重结合实验手段和有限元计算方法对波传播分析问题的求解,经过长期的研究工作及大量的实验,取得了令人瞩目的成果。他的专著《结构中波的传播》正是其对该问题研究的成果总结。本书系统介绍了可用于研究杆、梁、板中波传播问题的谱分析方法,它很好地将波的传播和振动分析紧密联系起来,既可用于模态分析,也可针对具体的波动特性进行重构。本书在波动方程推导、求解和后处理等环节始终如一地采用谱形式表达,为结构中应力波的分析提供了一个统一的框架;将复杂结构,如三维桁架结构、柱型箱体等作为连接波导处理,引入阻尼、耦合效应和高阶理论,考虑应力波与不连续体,如边界、接头等的相互作用,利用谱分析方法实现了波传播的分析与实验结果的一致性;将谱分析方法应用于实验分析,如将结构响应反演引起响应的加载历程等。本书主线分明,各章又自成体系,内容丰富,理论有深度;采用大量图表进行详细描述,同时注重实验数据与谱分析方法结果的对比,使得该书直观易读。本书内容专业、实用,推荐给国内同行以及有志于从事应力波理论与应用研究的学生和工程师们,以期有所帮助。

本书的整个翻译工作由我们课题组的全体成员及研究生共同完成。吴斌教授、何存富教授主持了整个翻译工作,并对初稿进行了多次整理、校正,包括错误公式的修正和文字的顺达工作;焦敬品教授翻译了第 1、2、3 章,以及序言、绪论和附录部分;刘增华副教授翻译了第 4、5、6 章;禹建功博士、邱兆国博士翻译了第 7、8 章以及后记部分;刘秀成博士研究生做了全书的排版、校对及打印工作;此外,课题组 2003 级全体研究生参与了本书的初稿翻译工作。本书的出版得到了国家自然科

学基金 (项目编号: 11132002、10972014) 的资助, 以及北京市教委科技发展计划、北京市人才强教计划 (编号: PHR 200906105) 的基金支持, 同时也得到了北京工业大学机电学院领导及同仁的大力支持, 在此, 向他们表示衷心的感谢.

由于时间及水平有限, 译稿中的错误在所难免, 衷心希望广大读者对书中的缺点和不足之处提出批评和指正.

译 者

2011 年 12 月

《机械工程丛书》序

机械工程是一门因工业革命需求而诞生的工程学科,在现今的新型工业化进程中,又一次需要机械工程学科发挥其重要的作用和贡献.如面临生产力和竞争力难题时,迫切需要提供工程解决方案等.为满足当代机械工程领域信息发展的需要,本套机械工程丛书包含了大学讲义和研究专题等内容.

本套丛书内容广泛,包含了大量对机械工程大学教育和研究十分重要的热点知识.幸运的是,在顾问委员会中,我们有许多杰出的编辑顾问,他们中的每一位都是其所在领域的专家.本书的内容主要涉及以下领域:应用力学、生物力学、计算力学、动力系统与控制、动力学、材料力学、工艺设计、热力学、摩擦学.

Frederick F. Ling

Austin, Texas

序 言

对于许多工程师,甚至那些从事结构动力学研究的工程师而言,波传播的研究似乎离他们很远.其中的一个原因就是,学校里讲授的例子通常或者过于简单而无法应用于现实问题,或者在数学上太深奥而难于处理.本书中介绍的谱分析或频域合成的方法用于应力波分析极为有效.这种方法最吸引我们的是如何利用相同的分析框架预测实验结果以及对实验数据本身进行处理.作为一个实验主义者,当我发现分析工具与实验结果相矛盾时,曾感到非常沮丧.例如,实际上不可能激励出阶跃波,但这种波通常是一种有效的解析解.

谱分析内容丰富,涉及理论分析、数值方法和实验方法.本书寄希望于能证明它的通用性,因此对很多的问题进行了介绍.由此导致的结果可能使得某些方面显得单薄,但我希望本书能在整体和统一性上有所呈现.此外,谱分析与其说是一种求解方法,倒不如说是对波动机理的另外一种认识方法.因此,在大多数情况下,总是将频域和时域联系起来分析.

在第二版的撰写中,尽量保留了第一版中好的地方,即将实验结果和理论分析结果结合起来,同时加入了最新的进展和扩充内容.在第一版中有一个没有充分阐述的问题:本书与结构中的应力波类书籍有什么不同之处?这个问题使我在保留书中已有内容外,又选择了一些新的话题.现在我清楚地认识到,结构本质上是一种耦合系统,对耦合系统的分析应当是结构中应力波类书籍的主题.有两种很容易识别的耦合形式:端部的机械耦合,例如,两根杆以一定角度连接在一起;微分耦合,如沿整个杆长均匀地通过弹簧连接的两个杆.这两种耦合方式的联系很紧密,且可以从弯曲梁的例子中看出,弯曲梁可以看成由很多小的直段端部相连而成,或直接表示为耦合微分方程的形式.两种方法得到的结果基本相同,但利用不同的形式对系统特性进行了描述.前者得到了大量基本形式为谱元的系统响应的函数;后者则得到大量有趣的谱关系的微分方程.我们选择了大量实例来说明耦合的双重特性.

本书的章节结构和第一版相似,但加入了两个新章节.第7章处理结构的声问题,虽然这个问题本身很重要,但这里要介绍这个问题的原因是,与其他耦合的例子不同,它称为积分微分耦合;也就是局部耦合取决于整个耦合介质上的集合或积分效果.第8章处理沿边缘连接的扩展板中的问题.这两章都对谱分析在波传播中的应用上提出了挑战.

近年来,台式计算机功能日益强大,且价格便宜.因此,过去不能解决的问题现

在可以很快完成。例如,在第一版中,对双重求和介绍很少,但现在它却在板结构的动态分析中起着关键作用。与此相类似,在计算机上可以方便地利用谱元进行复杂连接结构的分析,因此,本书所有的实例都用到了计算机。本书未包含原代码,但为鼓励读者尝试谱分析方法,我将文中所涉及结果的计算机原代码都列在我的主页上。URL 为:

<http://aae.www.ecn.purdue.edu/~doyle>

在源代码部分中可以看到。同样的情形,在每一章中提供了若干相关问题以及用于进一步学习的相关文献。

像这样一本书,若没有许多人的帮助是无法完成的,但这里不可能对他们一一致谢。这里要特别提及的是: Brian Bilodeau, Albert Danial, Sudhir Kamle, Lance Kannal, Matt Ledington, Mike Martin, Steve Rizzi, Gopal Srinivasan 和 Hong Zhang。感谢他们的资助和多年以来的帮助。书中未发现的错误和不准确之处完全由我个人负责。

James F. Doyle

1997 年 5 月

符号示例

a	半径
A	截面积
A, B, C, D	与频率相关系数
b	厚度, 深度
B	体积弹性模量
c_g	群速度
c_o	纵波波速, $\sqrt{EA/\rho A}$
c_P, c_S, c_R	P 波, S 波, 瑞利波速
C_E	比热
D	板刚度, $Eh^3/12(1-\nu^2)$
$E, \hat{E}$	杨氏模量, 粘弹性模量
EI	梁的抗弯刚度
F	轴力
$\hat{g}_i(x)$	单元形函数
$G(t), \hat{G}$	结构单元响应, 频响函数
h	梁或杆的高度, 板的厚度
H_n	Hankel函数, $H_n = J_n \pm iY_n$
i	复数 $\sqrt{-1}$
I	截面二阶矩, 矩形的 $I = bh^3/12$
I_n	第一类修正贝塞尔函数
J_n	第一类贝塞尔函数
k_1, k_2, k_3	波导谱关系
k_x, k_y, k_z	二维波数
K	刚度, 导热系数
$[k], [K]$	刚度矩阵
K_n	第二类修正贝塞尔函数
L	单元长度, 与边界距离
M, M_x	力(弯)矩
n	频率计数
N	变换项数
$p(t), \hat{p}$	声压
$P(t), \hat{P}$	载荷历程

q	分布载荷, 热通量
r	径向坐标
R	半径
t	时间
T	时间窗, 温度
$u(t)$	响应; 速度; 应变等
u, v, w	位移
V	剪力
W	空间变换窗口
x, y, z	直线坐标
Y_n	第二类贝塞尔函数

希腊字母

α	热膨胀系数
β	代表 $[\omega^2 \rho A / EI]^{1/4}$, $[\omega^2 \rho h / D]^{1/4}$
ε_{ijk}	置换符号
δ_{ij}	Kronecker符号
Δ	行列式
η	黏度、阻尼
κ	板曲率
θ	角坐标
ν	泊松比
μ	剪切模量
λ	拉梅常数
ρ	密度
σ, ε	应力, 应变
ξ	空间变换变量
ϕ, ϕ_x, ϕ_y	旋转
Φ, H_z	Helmholtz函数
ψ	横向收缩
ω_n	角频率
ω_c	截止, 重合, 临界频率

特殊符号

$\Re_n$	随机噪声
---------	------

∇^2 微分算子, $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$

$\forall$ 体积

$\left[\begin{array}{c} \\ \end{array} \right]$ 方阵

$\{\}$ 向量

下标

a 声介质

m 空间波数计数

n 频率计数

1, 2 传感器、模态标号

P, S, R P -、 S -、瑞利波

上标

$*$ 复共轭

$-$ 局部坐标

$\cdot$ 时间导数

$\wedge$ 频域(转换后)的量

$\sim$ 波数域(转换后)的量

$'$ 对参数求导

目 录

译者序

《机械工程丛书》序

序言

符号示例

绪论	1
第 1 章 波动的频谱分析	6
1.1 连续傅里叶变换	6
1.2 离散傅里叶变换	10
1.3 FFT 算法应用实例	18
1.4 试验中的波信号	21
1.5 波动的频谱分析	25
1.6 波的传播和重构	32
习题	37
第 2 章 杆中的纵波	39
2.1 杆的基本理论	39
2.2 杆中波的基本解	42
2.3 杆中的耗散	45
2.4 耦合热弹性波	48
2.5 反射与透射	53
2.6 分布载荷	60
习题	63
第 3 章 梁中的弯曲波	66
3.1 伯努利-欧拉梁理论	66
3.2 梁中波的基本解	69
3.3 考虑约束条件的伯努利-欧拉梁	72
3.4 弯曲波的反射	74
3.5 弯曲梁和环	81
3.6 耦合梁结构	88
习题	92
第 4 章 高阶波导	93

4.1 无限大介质中的波	93
4.2 半无限大介质	98
4.3 双边有界的介质	104
4.4 双边有界的介质: 兰姆波	107
4.5 Hamilton 原理	111
4.6 修正梁理论	116
4.7 修正的杆理论	122
习题	130
第 5 章 谱单元法	132
5.1 连接波导结构	132
5.2 杆的谱单元	133
5.3 梁的谱单元法	139
5.4 一般框架结构	145
5.5 结构中的应用	148
5.6 变截面波导	152
5.7 谱的超单元	159
5.8 冲击载荷的识别	167
习题	173
第 6 章 薄板中的波	174
6.1 板理论	174
6.2 板的点冲击	181
6.3 波数变换解	186
6.4 波在直边界处的反射	192
6.5 弯曲波的散射	198
6.6 侧向边界条件	202
6.7 弯曲板与壳	205
习题	214
第 7 章 结构与流体的相互作用	215
7.1 声波的运动	215
7.2 薄板-流体的相互作用	219
7.3 双层板系统	224
7.4 波导建模	228
7.5 源于有限大薄板的能量传播	232
7.6 圆柱空腔	238
习题	242

第 8 章 薄壁结构	244
8.1 薄膜谱单元	244
8.2 弯曲谱单元	251
8.3 折板结构	255
8.4 结构上的应用	258
8.5 分段圆柱壳	262
8.6 谱单元的未来	269
习题	271
附录	273
参考文献	276
索引	284
后记	287

绪 论

我们必须对现象进行收集和整理,直到从科学假象中发现真理,从各种现象中找到规律,用这些规律推演出各种现象,并用这些规律揭示未来.

W. R. Hamilton^[59]

本书介绍了求解结构中应力波传播问题的谱分析方法,重点放在计算和应用两个方面,并尽可能介绍一些试验结果.

虽然通过对运动偏微分方程的积分可以对结构动力学问题进行求解,但即使对于功能最强大的计算机来说,这个求解任务也是大得可怕. 对一个问题的求解也应当考虑结果的协调性和连贯性 (这一点常常被忽略), 所以采用上述方法无论如何也不是一个好方法. 对于一个结构, 仅仅描述一些点甚至上千点的应变历程是不够的; 这些结果应当置于更高阶背景中, 并把这些结果看成更大体系中的一部分. 注意即使在无法将试验结果与分析联系起来的情况下, 这方面的问题也是存在的. 本书的一个目的就是为结构中应力波分析提供一个统一的框架. 通过始终一贯地采用谱分析方法对所有问题进行处理, 形成一种统一性. 这种统一不仅体现在公式中, 而且 (当配合快速傅里叶变换时) 体现在公式之间、求解过程、解本身以及结果的后处理中.

谱分析

近年来, 发展了很多种用于波传播问题处理的分析技术. 其中最重要的是傅里叶合成方法 (或谱分析方法), 它把信号看成无限多个不同周期 (或频率) 的波序列的叠加, 而实际的响应由这些波序列的适当组合而成. 因此, 信号的特征识别问题转化为确定信号中各组成成分的系数问题, 这些系数称为信号的傅里叶变换. 当信号用傅里叶变换的形式表示时, 虽然处理的问题总能得以简化 (例如, Sneddon 的著作^[118] 给出了傅里叶变换在静态和动态问题分析中的应用), 但在分析的最后一步要进行傅里叶反变换 (信号的重构), 而它通常难以用精确的解析方法实现. 因此, 通常求助于一些近似和渐近的方法. 这些方法能够用于远场特性的确定 (正如地震学所要求的), 但应用于结构冲击问题时, 则会丢失很多信息. 同时应该指出, 只有当变换的函数具有简单的数学形式时, 才可以进行解析变换. 不幸的是, 任何实际情况中的信号, 当然包括试验信号, 都不满足这一条件. 对实际信号的反傅里叶变换问题是实现傅里叶变换法广泛应用的障碍.

谱分析是这本书的基础,但所用的方法与经典谱分析方法不同,不同之处在于,本书中从一开始就利用离散傅里叶方法对变换进行估计.与连续变换不同,离散傅里叶方法采用有限的波序列表示信号,使得这种变换具有很大的优势.可通过在计算机上实现快速傅里叶变换的算法,以更快速经济地实现变换.能够快速地进行变换和反变换,给这种处理手段增加了启发式的价值,如能够观察、重现应力波,可以处理真实信号(即或是试验检测信号).应当指出,尽管这种方法利用了计算机,但通常意义而言,这种方法并不是一种数值方法,因为它仍旧保留着应力波的解析描述.因此,可以用这种方法处理很重要的一类反问题.

本书介绍的方法充分利用了时间序列分析以及高效数字处理技术的优点(如 Chatfield 文献 [13] 对信号处理方法进行了简单易读的介绍).实际上,谱分析方法的这些特点只是通用数字信号处理领域的一部分,在这里指出这种方法的一个统一优点——程序结构直接适用于数据的后处理,这一点对处理试验数据来说尤其重要.

结构和波导

结构可以很简单,如一块悬臂板,也可以很复杂,像由三维桁架结构和附属物连接而成的空间平台,或者由许多薄板和框架所组成的飞机机身和机翼.我们把所有这些结构看作是在接合处具有适当连接的波导集合.波导制导着沿长度方向传播的波的能量,以单元形式来看,它可与水网或电网类比.不幸的是,波导所传输的物理量要比水流或电流复杂得多.

将结构元理解成波导通常不是一件容易的事.例如,在一个长度方向受冲击的细杆中,将理所应当产生出纵向波,直觉上也会认为,如果细杆受横向冲击时将产生弯曲波.但是,进一步分析表明,实际情况并非如此简单.当杆刚受到横向冲击时,产生的波在一个半无限体内传播,就像仅有一个自由表面的情形.只有经过一段时间后,波才会遇到其他的横向表面,并反射回到结构中.从一个与波多次传播相当的时间数量级上来看,在波导深部的某些位置处的质点运动是初始波与所有反射波的复杂叠加.显然,这不是弯曲运动.问题是:在什么阶段(包括时间和位置)响应类似于弯曲波?

答案包括两部分.首先,波的传播取决于这些因素:脉冲的持续时间、边界表面间的距离以及传播时间.也就是,脉冲持续时间越长,距离越短,响应就越快(包括时间和位置),从而形成弯曲波.但是,它根本不仅仅是弯曲波.由此得出答案的另一部分:波导分析的目的和成功之处在于放弃应力波的详细分析,用一个简单模型代替三维模型.该简单模型包含应力波传播的本质特性以及横向边界条件的合理近似.该模型通常包含横截面上的合矢量,且对于所有的时间和位置都是有效的,而不仅仅是较长时间和较远位置处.

建立波导模型有许多不同的方法,如采用单纯的“材料强度”法,或利用简化形式的三维方程以及精确求解方法等;Redwood^[103]对固体和液体波导分析进行了详细研究.本书所采用的方法是首先对一个单元体进行分析,然后增加其复杂度——对其处理过程综合使用了Hamilton变分原理和Ritz法.由于该方法基于变形为前提,因此它具有相当直观的优点;另外,它为处理不能用公式表示的问题提供了方法.

本书中也对波导的一些精确解进行了研究.通常,这些解太烦琐而不能直接应用于结构动力学分析,但它们对于深入理解类似波导理论中所采用的近似方法的本质有很大帮助.

波传播与振动

由于实际结构中有许多边界,所以本书的主要内容就是不断研究边界和不连续体对波传播的影响.由于波导分析中利用的物理量也用于连接条件的建立,因此可以有效地实现边界条件的分析.这样就可以成功拼合得到复杂结构的解,它们要比简单杆和梁的解更有意思.而且,可以得到用于处理由许多结构单元和边界组成结构问题的方法.

在进行结构动态分析时,波动与振动之间的关系常不被关注.对许多工程技术人员而言,它们是用截然不同方法进行分析的两个独立领域.但是,动态谱分析法的另一个优点是凸显出波动与振动之间的紧密联系.甚至能够用相同的语言进行描述,如术语功率谱密度、滤波、谱估计、卷积和采样波形等,在波动与振动中都具有相同的含义.因此,过去三十年中发展起来的许多振动和模态分析技术可以直接应用于应力波的频谱分析.

令人振奋的一点(也是撰写本书的目的之一)是本书中将许多波动分析的思想应用于振动分析,促进了与上述分析技术向反过程的发展.这将有助于对冲击试验和瞬态振动等问题的深入理解.本书一些例子中,利用波动分析中的多次反射阐述谐振的演变规律.

主题和主线

本书重点研究杆、梁和板等基本结构单元中应力波的传播.这形成了一个丰富的问题集合,本书的目的就是要证明,采用谱分析方法,可以在同一框架下对所有这些问题进行求解.考虑实际应用中的结构(所有结构尺寸都是有限的),本书的主题是研究应力波与不连续体,如边界、连接和附件的相互作用.补充的主题包括力学模型的构造、时域和频域分析的二重性.

虽然每章的内容都各自成体系,但Graff的著作^[56]可以作为对弹性波传播分析问题的很好的补充.Elmore和Heald的著作^[48]对应力波进行了更广泛和更简