

海洋工程装备理论与技术研究丛书



裂纹损伤结构的 振动能量流特性与损伤识别

朱 翔 李天匀 赵 耀◎著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

海洋工程装备理论与技术研究丛书

裂纹损伤结构的振动能量流 特性与损伤识别

朱 翔 李天匀 赵 耀 著

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书较系统地对裂纹损伤结构的振动能量流特性进行了理论研究和实验研究,形成了基于结构振动能量流的裂纹损伤识别方法。主要内容包括:推导一维、二维、三维裂纹损伤结构在耦合载荷作用下裂纹区域的局部柔度矩阵公式;研究裂纹损伤梁、板结构的振动能量流特性,构造损伤条件下的归一化输入能量流等值线图,首次提出了利用不同激励频率下裂纹损伤结构的输入能量流等值线图识别结构损伤的方法;研究损伤圆柱薄壳的波传播与振动能量流特性,给出了利用归一化输入能量流对壳体裂纹进行识别的方法;实现了对结构表面能量分布、传播以及在裂纹位置周围的分布规律的可视化,为结构损伤的识别提供了新的手段;基于传感器技术提出了对裂纹圆柱壳输入能量流进行测量并给出裂纹识别的方法和程序。

本书适合从事船舶海洋工程、航空航天工程、土木工程等领域的科研和设计人员参考阅读,也可作为相应专业的研究生、高年级本科生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

裂纹损伤结构的振动能量流特性与损伤识别/朱翔,李天匀,赵耀著. —武汉:华中科技大学出版社,2017.9

ISBN 978-7-5680-2906-3

I. ①裂… II. ①朱… ②李… ③赵… III. ①工程结构-损伤(力学)-结构振动-裂纹分析
IV. ①TU312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 124665 号

裂纹损伤结构的振动能量流特性与损伤识别

朱 翔 李天匀 赵 耀 著

Liewen Sunshang Jiegou de Zhendong Nengliangliu Texing yu Sunshang Shibie

策划编辑:万亚军

责任编辑:刘 飞

封面设计:原色设计

责任校对:祝 菲

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉三月禾文化传播有限公司

印 刷:武汉市金港彩印有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:11

字 数:228千字

版 次:2017年9月第1版第1次印刷

定 价:48.00元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

工程结构在服役环境中面临结构损伤或损伤累积的问题,从而使结构在其生命周期内的安全受到威胁。没有被识别到的结构损伤将改变结构的强度和刚度,从而引发更大的损伤累积,最终导致结构的突发性失效,引发灾难性事故。特别是在航空、航天、海洋、抢险、救援和军事装备等领域出现大型、复杂结构的今天,为了保证结构和人员的安全、减少经济损失、避免灾难性的悲剧,更加迫切地希望加强对损伤识别技术的研究。如何有效识别结构的损伤,已成为国内外研究的热点和难题,也是一个具有广阔工程应用前景的研究课题。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》将与故障监测和诊断相关的重大产品和重大设施运行可靠性、安全性、可维护性的关键技术列为重要的研究方向。国家“十三五”科学和技术发展规划中也将重大工程健康状态的检测、监测列为重大科学问题研究领域,将面向全生命周期的复杂装备监测列为前沿技术研究。

传统的无损探伤方法,如超声探伤、X射线探伤、云纹干涉探伤等只能对局部结构进行损伤诊断,如果结构规模较大,则对时间、经费的要求比较高。另外,由于空间、安全或者其他因素的限制,某些结构区域对于人体而言不易接近,例如空间站结构、海洋平台、潜艇的一些特殊结构部位,这些结构不宜采用传统的无损探伤方法来进行探伤。这就在客观上要求在结构损伤识别领域开展新的理论基础研究并发展新的结构损伤识别方法。

对于大型柔性结构,当结构中存在裂纹时,振动波在传播过程中反馈了介质变化的各种信息。因此可将结构能量流作为裂纹识别的指标,对裂纹损伤结构的振动能量流特性进行研究进而识别损伤。本书从结构噪声的观点出发,首次对裂纹损伤结构的振动能量流特性进行了理论研究和试验研究,并在此基础上提出了基于结构能量流的裂纹识别方法。在理论上将振动能量流的研究发展到结构损伤识别领域,在应用上提出新的识别结构损伤的测量和分析方法,可以有效地将其应用于重大工程装备,如航空、航天、海洋、军事装备等的结构健康检查与监测方面。

本书的主要内容包括:① 基于振动波的结构动态行为研究方法介绍,引出结构波动过程的振动能量流概念,推导结构的输入、传播振动能量流公式,进行相应的测量方法、测量误差分析。② 根据断裂力学相关理论推导裂纹损伤结构在耦合外载荷作用下在裂纹区域的局部柔度矩阵,利用线弹簧模型来模拟板壳结构中的表面裂纹和内部裂纹,将三维裂纹模型简化为裂纹线上作用有分布线弹簧的二维穿透裂纹模型。③ 研究含有裂纹的梁结构和薄板结构的振动能量流特性,对裂纹结构能量流的

输入和传播特性进行了计算,构造不同裂纹位置和裂纹深度下的归一化输入能量流等值线图。首次提出了利用不同激励频率下裂纹损伤结构的输入能量流等值线图识别结构的裂纹位置和裂纹深度的方法。④ 分析了含环向裂纹损伤的圆柱薄壳的振动能量流特性。对裂纹的张开、滑移和剪切三种状态建立了裂纹区域的局部柔度矩阵,考虑壳体中各种不同类型的波,利用波传播法得到了外激励力作用下输入到壳体中的输入能量以及能量的传播,给出了利用归一化输入能量流对壳体裂纹进行识别的方法。⑤ 利用有限单元法对裂纹损伤结构的能量流进行了可视化研究。推导一维、二维和三维单元中结构声强的表达式。然后给出了流线可视化的概念,并应用到结构声强流线的可视化中;实现了对结构表面能量分布、传播,以及在裂纹位置周围的分布规律的可视化,为掌握振动能量在损伤结构的传播、损伤的识别提供了新的手段。⑥ 对含有环向表面裂纹损伤的圆柱壳结构的振动能量流进行了试验研究,基于传感器技术提出了对裂纹圆柱壳输入能量流进行测量并进行裂纹识别的方法和程序。

本书适合从事船舶海洋工程、航空航天工程、土木工程等领域的科研和设计人员参考阅读,也可作为相应专业的研究生、高年级本科生的教学参考用书。

本书的完成得益于国内外许多同行的多方支持,也参考了许多相关的研究成果。由于参考文献很多,未能在书中尽列,望见谅。对于他们的贡献,作者表示深深的感谢。

作者还要感谢国家自然科学基金项目的资助,正是由于获得两个课题的资助(50375059,50809029)才使得对损伤结构的振动能量流理论与识别技术的研究不断深入、发展和完善。本书的出版,得到了华中科技大学出版基金及华中科技大学船舶与海洋工程学院出版基金的资助,作者表示衷心的感谢。

作 者

于喻家山

2016 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 结构裂纹损伤模拟研究	(2)
1.2.1 短梁模型	(2)
1.2.2 缩减的弹性模量模型	(3)
1.2.3 有限元模型	(3)
1.2.4 离散-连续模型	(4)
1.3 结构振动能量流研究	(6)
1.4 结构损伤识别方法研究	(10)
1.4.1 基于固有频率变化的损伤识别	(11)
1.4.2 基于振型变化的损伤识别	(12)
1.4.3 基于柔度变化的损伤识别	(12)
1.4.4 基于刚度变化的损伤识别	(12)
1.4.5 基于频响函数的损伤识别	(13)
1.4.6 基于受控结构动力特性的损伤识别	(13)
1.5 振动能量流测量和试验研究	(15)
1.5.1 接触方法	(15)
1.5.2 非接触方法	(17)
1.6 本书的主要内容	(18)
参考文献	(19)
第 2 章 结构振动波传播与振动能量流	(35)
2.1 引言	(35)
2.2 结构振动波传播	(35)
2.2.1 固体弹性介质中的弹性波	(35)
2.2.2 结构中的纵波	(37)
2.2.3 结构中的弯曲波	(39)
2.3 振动能量流方法	(40)
2.3.1 无限长直梁的振动能量流特性	(41)
2.3.2 周期简支直梁中的振动能量流传播	(43)

2.4 本章小结	(46)
参考文献	(46)
第3章 裂纹损伤结构的局部柔度与线弹簧模型	(47)
3.1 引言	(47)
3.2 一维损伤结构的裂纹局部柔度	(48)
3.2.1 耦合外力作用下的裂纹梁单元局部柔度矩阵	(48)
3.2.2 弯曲载荷作用下裂纹梁单元的局部柔度	(52)
3.3 板壳结构中损伤裂纹的线弹簧模型	(55)
3.3.1 表面裂纹的线弹簧模型	(55)
3.3.2 拉伸、弯曲载荷作用下的单边裂纹板	(58)
3.3.3 内埋裂纹的线弹簧模型	(59)
3.4 本章小结	(61)
参考文献	(62)
第4章 裂纹损伤梁结构的振动能量流特性与损伤识别	(63)
4.1 引言	(63)
4.2 梁结构的弯曲振动	(63)
4.2.1 完善 Timoshenko 梁的弯曲振动	(63)
4.2.2 含裂纹的无限长 Timoshenko 梁的弯曲振动	(65)
4.3 梁结构振动能量流分析	(67)
4.4 数值计算与结果讨论	(68)
4.4.1 裂纹梁的输入能量流	(69)
4.4.2 裂纹梁的传播能量流	(70)
4.4.3 裂纹 Timoshenko 梁理论的输入能量流及对比	(71)
4.4.4 基于能量流的梁损伤识别	(72)
4.5 本章小结	(76)
参考文献	(77)
第5章 裂纹损伤板的振动能量流与损伤识别	(79)
5.1 引言	(79)
5.2 板条数学模型	(79)
5.2.1 完善板的弯曲振动解	(79)
5.2.2 含表面裂纹板的弯曲振动	(80)
5.3 振动能量流分析	(82)
5.4 数值计算与讨论	(84)
5.4.1 数值算例	(84)
5.4.2 裂纹识别	(90)

5.5 本章小结	(92)
参考文献	(92)
第6章 裂纹损伤圆板的振动能量流特性	(94)
6.1 引言	(94)
6.2 弯曲振动的理论模型	(94)
6.2.1 圆板的弯曲振动	(94)
6.2.2 周向表面裂纹模型	(96)
6.2.3 振动波传播中的传递矩阵	(97)
6.2.4 振动能量流分析	(99)
6.3 结果和讨论	(99)
6.4 本章小结	(102)
参考文献	(102)
第7章 裂纹损伤圆柱壳的振动能量流特性与损伤识别	(104)
7.1 引言	(104)
7.2 完善圆柱壳的振动特性	(104)
7.2.1 圆柱壳振动方程	(104)
7.2.2 载荷及边界条件	(106)
7.2.3 完善圆柱壳的振动波传播特性	(108)
7.3 含环向表面裂纹圆柱壳的振动波	(109)
7.3.1 裂纹圆柱壳模型	(109)
7.3.2 裂纹圆柱壳中的波运动	(111)
7.4 圆柱壳中的振动能量流	(113)
7.4.1 输入能量流	(113)
7.4.2 能量流沿壳体的传播	(113)
7.5 数值分析及讨论	(114)
7.5.1 完善壳与裂纹壳的输入能量流	(114)
7.5.2 能量流沿壳体的传播特性	(118)
7.5.3 利用输入能量流等值线识别裂纹	(119)
7.6 本章小结	(122)
参考文献	(122)
第8章 基于有限元的损伤结构能量流可视化研究	(124)
8.1 引言	(124)
8.2 结构声强的概念	(124)
8.2.1 梁单元中的结构声强	(125)
8.2.2 板壳单元中的结构声强	(125)

8.2.3 实体单元的结构声强	(126)
8.3 基于结构声强的能量流可视化	(127)
8.3.1 流线可视化技术	(127)
8.3.2 结构声强矢量图	(128)
8.3.3 结构声强流线可视化	(128)
8.4 裂纹结构中的结构声强与J积分	(129)
8.5 裂纹板结构声强的有限元计算与讨论	(130)
8.5.1 实体单元计算板壳结构表面声强的有效性验证	(130)
8.5.2 表面损伤板的结构声强	(133)
8.6 本章小结	(140)
参考文献	(141)
第9章 振动能量流测量与裂纹圆柱壳振动能量流的试验分析	(143)
9.1 引言	(143)
9.2 振动能量流测量方法	(143)
9.2.1 振动能量流测量研究	(144)
9.2.2 测量误差分析	(145)
9.2.3 试验研究	(146)
9.2.4 试验结果分析	(147)
9.3 裂纹圆柱壳振动能量流测量研究	(148)
9.3.1 试验模型及装置	(148)
9.3.2 材料参数测量	(150)
9.3.3 试验测试系统及测试系统分析	(151)
9.4 壳体输入能量流测量	(155)
9.4.1 输入能量流的测量方法	(155)
9.4.2 完善圆柱壳的输入能量流测量值	(156)
9.5 裂纹损伤圆柱壳的输入能量流测量	(157)
9.5.1 裂纹圆柱壳输入能量流理论值	(157)
9.5.2 裂纹圆柱壳输入能量流测量值	(159)
9.5.3 误差分析	(160)
9.6 本章小结	(161)
参考文献	(162)

第1章 绪 论

1.1 引 言

工程结构在服役环境中受到设计载荷的作用以及各种突发性外在因素的影响而面临结构损伤或损伤累积的问题,从而使结构在其生命周期内的安全受到威胁。没有被识别到的结构损伤将改变结构的强度和刚度,从而引发更大的损伤累积,最终导致结构的突发性失效,甚至威胁到人身安全,其后果不堪设想。另一方面,每年因结构的老化、疲劳和腐蚀而需要的维修费越来越高,这也要求人们及时发现损伤,以便及时维修以节省费用。因此,各种工程结构的安全性引起人们对损伤识别技术的重视。特别是在航空、航天、海洋、桥梁和军事装备等领域出现大型、复杂结构的今天,为了保证结构和人员的安全、减少经济损失、避免灾难性的悲剧,更加迫切地希望加强对损伤识别技术的研究。如果能对结构的损伤进行深入分析进而作出在线实时识别,不仅可以提高工程结构产品的质量,而且可以在使用过程中及时了解结构的损伤,进而采取妥善合适的维护措施,降低结构损伤累积的程度,避免不必要的损失和灾难。如何有效识别结构的损伤,已成为国内外研究的热点和难题,也是一个具有广阔工程应用前景的研究课题。

传统的无损探伤方法,如超声探伤、X射线探伤、云纹干涉探伤等只能对单独的结构单元进行损伤诊断,如果结构规模较大,则对时间、经费的要求比较高。另外,由于空间、安全,或者其他因素的限制,某些结构区域对于人体而言不易接近^[1],例如空间站结构、潜艇的一些特殊结构部位,这些结构不宜采用传统的无损探伤方法来进行探伤。这就在客观上要求在结构损伤识别领域开展新的理论基础研究并发展新的结构损伤识别方法。

本书对裂纹损伤结构的振动能量流特性进行了理论研究和实验研究,并在此基础上提出了基于结构能量流的裂纹识别方法。在理论上将振动能量流的研究发展到结构损伤识别领域,在应用上提出新的识别结构损伤的测量和分析方法。

本章将对本书所涉及的诸多方面内容作综合性阐述和回顾,主要包括四个方面的内容:结构裂纹损伤的模拟研究概况、结构振动能量流研究概况、结构损伤识别方法研究概况和结构振动能量流的测量与试验研究概况。最后,对本书的主要内容作了简单介绍。

1.2 结构裂纹损伤模拟研究

工程结构在服役期间,除了受到设计载荷作用,还会受到外界环境影响,另外还可能各种突发性外在因素,这些都导致了结构中损伤类型的多样性,比如疲劳、断裂、腐蚀等,对于复合材料还存在脱层等现象。对裂纹损伤来讲,裂纹的形式也各不相同,比如单一裂纹、分布裂纹、直裂纹、曲裂纹、内部裂纹、表面裂纹等各种形式。本书的研究工作主要针对结构中的裂纹这一损伤形式,因此仅考察不同裂纹模型的特点和形式。

现阶段的大多数有关结构损伤识别的研究均为基于结构静动态特性的损伤识别,其基本出发点是测量结构在生命期内的静动态特性,并将其作为裂纹识别的基础。因此,对裂纹损伤建模的准确性和合理性,将对损伤识别的有效性产生很大的影响。通常来讲,任何结构都可以看作是由质量、刚度、阻尼等组成的动力学系统,结构一旦出现裂纹等损伤,结构参数也随之发生改变,一般认为,裂纹的存在会缩减结构的刚度,增大结构的阻尼,从而降低其固有频率并且改变其振动模态^[1]。这些变化不可避免地依赖于裂纹的类型、大小和位置。因此对裂纹参数的合理建模是研究裂纹损伤结构动态特性变化的基础。

从已有的大量文献来看,大部分关于裂纹模型的研究都集中反映在裂纹引起结构在损伤前后的刚度变化,而忽略结构质量的变化^[1,2]。这种裂纹模型通常可以分为两类:张开裂纹模型(open crack)和呼吸裂纹模型(breathing crack)。在张开裂纹模型中,假定裂纹在结构振动过程中总是张开的。由于这种模型假设裂纹在结构振动时总是处于张开状态,因此结构中的刚度下降在损伤结构振动过程中是个常数。已有的大多数研究都使用了张开裂纹模型来对裂纹损伤结构进行静动态分析^[3]。国内外学者采用了各种分析模型来模拟由于裂纹而引起的结构的刚度变化,这些方法主要包括短梁模型、缩减的弹性模量模型、有限元模型、离散-连续模型等。

1.2.1 短梁模型

由于梁结构中的裂纹在一定程度上会降低所在位置的横截面积或者弯曲刚度,因此在这种模型中,裂纹所在区域被从主体结构中隔离出来,裂纹区域则被一个缩减了惯性矩的短梁单元来代替,短梁的长度通过裂纹的等效宽度来得到。这种模型是在20世纪中期以前使用最广泛的模型,它的优势是可以很容易地得到结构的解析解,并易于在有限元法中使用。Thomson和Madison^[4]使用短梁模型研究了细长杆中的裂纹对弯曲、纵向和扭转振动的影响。Springer^[5]推导出了均匀截面梁中裂纹深度与所替代短梁长度之间的解析表达式,并进行了实验验证。

尽管这种模型比较简单,但由于结构中的裂纹会导致其周围的应力分布和局部

变形的不连续性,因此这种模型中裂纹区域的应力场和实际情况相比有比较大的差异。

1.2.2 缩减的弹性模量模型

由于结构中的裂纹通常会缩减结构的局部横截面面积,因此随着裂纹的扩展,裂纹截面的惯性矩会不断下降。另一方面,由于结构刚度矩阵和材料及几何属性有关,而弹性模量的改变也会影响结构刚度,因此这种方法用弹性模量的变化来模拟裂纹引起的局部刚度的降低。由于这种模型只需要对弹性模量进行修改,而不改变裂纹区域结构的外形尺寸,也不需要创建新的单元类型,因此在有限元分析中应用较多。Yuen^[6]使用了这种模型研究了损伤悬臂梁,他的工作主要集中在对不同模态参数的敏感性研究上。Pandey^[7]、Salawu^[8]等也用这种模型对裂纹结构进行了研究,他们的研究表明用这种模型计算的固有频率变化量不准确,计算的固有频率偏高。事实上结构弹性模量一般并不随裂纹变化,作为一种降低刚度的等效处理方法,这种模型相当简单和近似,同样也不能较好地模拟裂纹尖端的应力和应变分布。

1.2.3 有限元模型

使用有限元法中的相关单元来模拟裂纹是研究损伤结构的一个重要方法,国内外有大量关于这方面的研究。对于裂纹形状复杂和受复杂载荷作用的结构件,很多情况下应力强度因子的解难以从现有手册中查到。有限元方法不受裂纹体几何及载荷形式的限制,因而在断裂力学中得到广泛的应用,已有各种不同的有限单元用来模拟结构中不同类型的裂纹,比较常用的有以下几种:

- (1) 三维实体单元(3D solid);
- (2) 1/4点单元(quarter point crack tip element);
- (3) 线性弹簧单元(line spring element)。

三维实体单元模型主要是通过对裂纹区域进行局部细化来模拟裂纹尖端的奇异性,使用三维有限元模型能够对较复杂的结构和不规则裂纹进行模拟,得到精度较高的计算结果。用来模拟裂纹的三维实体单元主要是四面体和六面体单元。四面体单元包含4节点、10节点的单元,六面体单元包含8节点、20节点等单元。比较常用的是10节点的四面体等参单元和20节点的六面体等参单元。Bowness和Lee^[9,10]使用三维实体单元对导管接头附近的椭圆裂纹进行了研究,他们采用20节点的六面体单元结合15节点的楔形单元来模拟裂纹,Keiner和Gadala^[11]也对含有裂纹的鼓轮的振动特性进行了研究,采用了三维有限元模型来模拟结构,并进行了相应的试验研究来识别裂纹的位置和大小。

三维实体有限单元通常能在裂纹区域附近给出较为准确的应力和位移分布结果。但是,使用这些单元的代价却是很昂贵的,它使得有限元模型规模变得很大,因此需要更多的计算时间和计算空间来处理。

1/4 点单元是由 Henshell 和 Shaw^[12] 在 1975 年首先引入的。考虑到裂纹尖端各点的应力具有 $1/\sqrt{r}$ 的奇异性, 他们指出, 在有限元分析中对此不必采用特殊的裂尖奇异性单元, 只要把裂纹尖端周围的等参元各条边的中间节点移至靠裂纹尖端的 1/4 处, 就可以使裂尖角点的应力具有这种奇异性。这种单元由 8 节点四边形等参单元演化而来, 对于三维问题可用 1/4 点的 20 节点等参退化奇异单元来模拟。通过将裂纹面的中间节点移动到靠近裂尖的 1/4 点处来模拟裂尖应力场的奇异性, 现在已经作为标准单元在有限元和边界元程序中得到了普遍应用, 其主要用来处理结构中的穿透裂纹。这种单元针对张开模式的裂纹能得到较为准确的应力强度因子, 但是用来预测滑移模式和撕开模式的应力强度因子则精度相对较差。

线弹簧模型法是由 Rice 和 Levy^[13] 于 1972 年基于 Kirchhoff-Love 板壳理论提出的解决板壳结构表面裂纹问题的简化计算方法, 其主要优点是将表面裂纹这种三维问题降为二维问题进行处理, 从而降低了分析和计算过程的复杂性, Delale 和 Erdogan^[14] 基于 Reissner 板理论对线弹簧模型加以完善, 随后, 他们将线弹簧模型用于含有环向或者轴向半椭圆表面裂纹的圆柱壳的断裂分析中^[15]。1982 年, Parks 和 White^[16] 首先提出了弹塑性线弹簧的有限单元法, 将有限元方法和线弹簧模型相结合, 可解决复杂荷载和几何边界的表面裂纹问题^[17], 目前这套方法被广泛用于计算裂纹尖端变形参量如应力强度因子、J 积分等^[18-21]。该模型已成为评估含表面裂纹板壳的强有力的工具。从工程应用角度看, 该方法给出的结果具有足够的精度, 把线弹簧模型与奇异积分方程相结合, 与边界元法、有限元法相结合, 可将问题简单化。

1.2.4 离散-连续模型

这种模型是目前基于振动方法识别一维结构损伤中使用最为广泛的模型^[2]。这种模型的基本出发点是: 将结构中的裂纹用一个虚拟的节点或弹簧来代替, 则损伤结构可以认为是由两段完善结构通过一个虚拟节点(弹簧)来连接的。由于结构中的裂纹会在局部区域产生局部柔度, 因此只需要建立裂纹所在位置的局部柔度矩阵, 则可得裂纹两侧位移之间的关系, 从而可以在裂纹所在位置处引入附加边界条件, 通过附加边界条件来联系裂纹两侧的未损伤结构。局部柔度矩阵可以通过断裂力学中的应力强度因子和应变能释放率之间的关系并结合卡氏定律用能量法得到。因此, 使用这个模型首先要建立裂纹区域的局部柔度矩阵。

自 1957 年 Irwin 等人首先通过局部柔度与应力强度因子间的关系给出了结构裂纹区域的局部柔度以来, 此后的不少研究者研究了大量不同形式结构单元中不同裂纹的局部柔度和应力强度因子。

Dimarogonas 和 Massouros^[22] 考虑含有环向表面裂纹轴的扭转振动, 利用撕开状态下的应力强度因子得到了在扭转载荷下的裂纹引起的局部柔度。Dimarogonas 等^[23] 研究了裂纹轴的弯曲振动, 仅考虑了弯曲载荷对局部柔度的影响, 认为裂纹的存在引起了两端转角的不连续, 继而讨论了裂纹的闭合效应对振动模态的影响。

在单一载荷作用下裂纹局部柔度的基础上,耦合外力作用下结构裂纹区域的局部柔度也得到了广泛的研究。文献[24]研究了含有表面裂纹的转动轴在纵向和弯曲振动耦合下的局部柔度矩阵,对圆轴的自由和强迫振动特性进行了讨论。Papadopoulos 和 Dimarogonas^[25]对轴向和弯曲耦合作用下的裂纹梁进行了研究,他们推导出了带有耦合项的 2×2 局部柔度矩阵,并进行了试验研究。

在 Papadopoulos^[26]等人的工作中他们得出了矩形或圆形截面梁中的裂纹在受到拉伸、弯曲和扭转力作用下的完整的 6×6 的局部柔度矩阵,其中对角线上的量表示它对结构弯曲振动、纵向振动、扭转振动的影响,非对角线上的量表示各种振动类型之间的耦合作用,这其中考虑到了 3 种裂纹模式下的应力强度因子。

Gounaris^[27]等人推导了在轴力、弯矩、剪力作用下损伤棱柱的损伤单元的柔度矩阵,并运用该方法计算研究了一损伤悬臂梁的振动,得出对于细长梁而言,在损伤柔度矩阵中,弯矩项占有主导地位,其他项均可以忽略的结论。这一结论被众多研究者^[28-31]加以利用,通过各种不同方法对裂纹结构进行损伤识别。

利用这种模型所进行的研究工作大多数集中在梁结构中,对于板壳结构研究相对较少。Rice 与 Levy^[13]早在 1972 年提出的解决含表面裂纹板的线弹簧模型,就是使用的局部柔度概念。他们考虑拉伸、弯曲以及它们的耦合,给出了裂纹的局部柔度矩阵。实际上,利用线性弹簧模型的思路,利用虚拟的拉伸弹簧、扭转弹簧、弯曲弹簧以及它们之间的耦合来连接裂纹两侧的未损伤板壳结构,构造出离散-连续模型,再利用断裂力学的相关知识,得到裂纹两侧的位移连续条件,从而可以建立出板壳结构的裂纹模型。

利用局部柔度的概念,Anifantis^[32]分析了含有周向表面裂纹的圆板的自由振动特性,类似于梁结构中利用应变能和应力强度因子获得局部刚度的方法,他们将周向裂纹模拟为局部附加的转动柔度,通过对整个裂纹板的特征值问题的求解,考察了裂纹对圆板固有频率的影响,并将其用于圆板裂纹的识别。

Khadem 和 Rezaee^[33]考察了含有表面裂纹的矩形薄板的振动特性。该裂纹贯穿整个宽度方向,他们将裂纹板考虑成了两个完善板,通过局部柔度系数来构造边界条件。为避免非线性,假定裂纹在振动中始终张开,讨论了裂纹位置、深度、边界条件以及外载荷等参数对板的固有频率的影响。

随后,Khadem 和 Rezaee^[34]又进一步研究了含有任意长度、深度和位置,平行于板宽的表面裂纹矩形薄板的振动。用沿着裂纹线变刚度的线弹簧来模拟裂纹,采用了新的修正函数更准确地模拟了裂纹位置的边界条件,计算了线弹簧的局部刚度。

在 Khadem 和 Rezaee 的裂纹模型基础上,Krawczuk 等^[18]采用谱有限元方法对含有任意长度、位置表面裂纹矩形板进行了分析,得到了受激励裂纹板中的弹性波随时间的变化规律,并利用其来识别裂纹。

Nikpour^[35]在研究含有周向裂纹的各向异性层合圆柱壳中的振动时使用了局部

柔度矩阵来模拟裂纹对结构的影响,求解了系统固有频率。Abohadima 等^[36]利用线弹簧模型,对非线性弹性介质中的裂纹圆柱壳的振动特性进行了研究。

离散-连续模型中,裂纹两侧的完善结构仍然可以用精确的力学方程进行描述,而裂纹的作用可以通过连接裂纹两侧完善结构的局部柔度矩阵来体现,这样就能很方便地对这种裂纹结构进行理论分析,找出裂纹特性参数和结构振动特性之间的内在联系,为裂纹识别提供理论基础。与传统的有限元方法相比,这种模型求解可以大大减少计算量。另外,局部柔度矩阵是建立在断裂力学的基础上,因此结合断裂力学的试验结果会有较好的精度。

对裂纹损伤结构中的裂纹模拟除了以上的方法,还有一些其他方法,比如边界元法、无网格方法等。总的来看,短梁模型,缩减惯性矩、弹性模量模型在模拟裂纹上过于简化,因此误差较大,现在在文献中少有使用。近些年来,随着计算机软硬件的迅速发展以及各种大型商用有限元软件的普及,使用有限元法来处理裂纹问题得到了广泛的运用,它不受裂纹体几何形状及载荷形式的限制,因而具有广阔的应用前景。而离散-连续模型主要是利用局部柔度矩阵来构造结构裂纹区域的虚拟弹簧的本构关系,其基础是断裂力学的相关理论,由于其物理意义明确,模型简单,求解方便且有相对较好的精度,因此便于进行解析分析,该模型在结构单元的裂纹识别研究中得到了广泛的使用。

由于结构裂纹损伤形式的多样性,现有的裂纹损伤识别仅仅都是针对某些简单的裂纹进行,在损伤模拟方面还有大量的工作需要开展。

1.3 结构振动能量流研究

对于工程结构的减振降噪问题,如何识别主要的结构噪声源及确定结构噪声的主要传播途径一直是该领域重要的研究内容,通过对它的研究可以有针对性地采取减振降噪措施。

传统的研究方法采用力、位移等单一物理量的传递概念衡量振动在结构中的传递,而忽略了物理量间的内在联系。自 20 世纪下半叶发展起来的振动能量流方法,从能量角度来研究,它既包含有力和速度的幅度,又考虑了它们之间的相位关系。相对于传统方法,振动能量流有以下优点:① 结构能量流是在各点上求得的能量,它的值对相位不敏感,对频散现象也不敏感;② 结构上的某点能量流是一个矢量,它具有大小和方向,是一个简单而易于解释的物理概念;③ 可以测量每一传播途径的能量流并加以比较,这样就可以排列出各个传播途径的能量通过的重要次序;④ 可以研究由不同类型波(弯曲波、纵向波、扭转波)传播的能量流,从而分析其能量的传播机理,采取合理的控制手段。

大量的研究表明,结构中能量流的空间图像可以作为一种重要的诊断机械

故障或识别振动噪声源的工具,确定其振源强度和判断主要的振动噪声的传播途径特性及故障或声源的位置。因此能量流方法在结构声学领域中得到了广泛应用,这一理论也成为目前结构声学领域的研究热点。

能量流的研究方法从目前所参考的文献看主要有以下几种:统计能量分析法、波动法、导纳法、有限元法、混合方法及振动传导法等方法。按分析频率可划分为:低频分析方法,中频分析方法及高频分析方法。低频、中频和高频都是相对而言的,其划分原则可参考文献[37]。

一般而言,在低频范围内,模态相对稀疏,波动法、有限元法和导纳分析法主要适用于中低频频率范围,对于梁、板、圆柱壳等规则结构,其动力响应比较容易用解析方法求取,因而通常采用这些方法。

对于高频而言,目前统计能量分析法已公认为是高频结构声振分析的重要工具[37,38]。统计能量分析法(statistical energy analysis)是用一系列由统计集合数表征的参数来描述系统,获得各子系统中能量分布的一种统计分析方法。这种方法尤其适用于大型复杂空间结构情形,由于限制条件比较多,还有待进一步发展。

在中频范围内目前有能量流有限元法(power flow finite element method)以及杂交法等。能量流有限元法是一种可以用有限元方法进行数值计算的结构分析工具,它适用于中频和中高频,可以弥补传统的有限元法只适用于低频的缺陷,用此方法可以得到结构上所有感兴趣点的能量信息,与高频段的统计能量法只能得到子结构内的粗略信息相比具有一定的优越性。另外能量流有限元法中的场变量为能量密度,它可直接从能量的角度来分析问题。Nefske等[39]于1989年提出了能量流有限元法,并将它用于梁结构中,在此后该方法得到了不断发展,并逐渐用于耦合结构中[40-42]。

Goyder和White[43-45]研究了由机器到基座结构中的能量流传递。在文献[43]中,他们明确提出能量流的概念,研究了无限梁中的纵波、扭转波和弯曲波运动及其携带的能量流,以及板中弯曲波携带的能量流。在文献[44]中,他们研究了加肋板中的波传播和能量流。在文献[45]中,他们研究了在力源或速度源激励下通过单级或双级隔振系统各自的共振频率,发现越过公正区域后的双级隔振效果优于单级隔振效果。

Boisson和Guyader[46,47]研究两耦合板的能量流。Boisson等[47]研究了L形板的能量流,发现它不仅与材料、几何形状和边界条件有关,也与激励类型有关。

Miller和Flotow[48]从传递波的角度研究了由一维结构构成的结构网络间的动力特性并重点讨论了网络间弹性波的传播及能量流分布。

Cuschieri[49]用点导纳方法研究了L形板的能量流。这种方法可以精确确定耦合系统的共振模态响应。Cuschieri[50]又用点导纳方法研究了周期结构的振动能量流传播特性,利用各单元间的导纳函数来描述周期结构中各子单元之间的耦合。

Langley[51]用动力刚度方法分析了梁以及框架结构的振动特性,通过将框架中

的每个结构单元模拟为单个梁单元,来研究框架结构在简谐力或随机激励下的能量流。

Pavic^[52]研究了圆柱壳中的能量流,给出了用壳体轴向、周向和径向运动表示的轴向和周向单位能量流。他的表达式中包含对应于平板运动的两项和对应于曲率的一项,研究发现三个方向上的壳体运动对能量贡献的差别较大。

Pavic^[53]分析了充液圆柱壳在低频振动时的四种传播波,计算并讨论了它们携带的能量流。计算表明每支传播波都会通过壳壁传播能量,而其中三支波也会通过流体传播能量。

Langley^[54]考察了薄壁圆柱壳中与螺旋波相联系的振动能量流。首先给出了精确的微分方程,然后采用频散近似得到近似表达式。由后者可以得到群速度,作为螺旋波方向函数的能量流两者之间联系的简单的封闭形式。

Beale^[55]用波动理论假定框架结构中同时存在三种波而研究了三维框架结构中的能量流。

Bercin^[56]用动力刚度法讨论了通常被忽略的面内波(纵波和剪切波)。Cuschieri 和 McCollum^[57]计及板的面内振动又重新研究了这一问题,发现低频时面内振动对板的能量流贡献不大,随频率增高其贡献逐渐增大。1997年,Bercin^[58]又用动力刚度法研究了加筋板中的振动能量流。

Grice 和 Pinnington^[59,60]提出了一种研究加肋板振动的分析方法。文献[59]以解析的形式进行了计算,文献[60]进一步用有限元法和阻抗综合法进行了计算。

Li 等^[61]研究了刚体机器传到弹性圆柱壳的振动能量流,考虑了圆柱壳切向、轴向力和位移的贡献。

Seo 和 Hong^[62]利用振动能量流分析预测梁-板耦合系统在高频的响应。Park 等^[63]对有限正交异性板的弯曲波能量流进行了分析,利用时间和局部空间平均的远场波能量密度推导了能量方程。

Xing 等^[64]用一种一般意义的子结构方法研究了流固耦合作用的能量流,作者用能量流密度向量表示子结构间能量流的传递,用图的形式给出了能量流传递的直观表示。

Sorokin^[65]研究了在重流体载荷条件下含有集中质量和弹簧结构的层合板的振动和能量流特性。随后 Sorokin^[66]用格林矩阵和边界积分方程法研究了内部充液和无液圆柱壳的能量流。

Ji、Mace 和 Pinnington^[67-69]引入能量流模态的思想,他们利用能量流模态概念将 N 个离散激励力产生的功率能量流转化为 N 个独立能量流模态,简化了能量流的计算。随后他们^[70]使用这种方法对耦合有长波发射源和短波接收器结构在中频下的振动特性和能量流进行了分析。

Kessissoglou^[71]研究了包含弯曲和面内振动的 L 形板在低频和高频的传播能量流。发现面内波在结构连接处可以有效传播弯曲能量。对于直角连接的薄板组合结