



西安交通大学

研究生创新教育系列教材

振动与噪声前沿理论及应用

吴九汇 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



西安交通大学

研究生创新

振动与噪声前沿理论及应用

吴九汇 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容简介

这本专著主要是为工科研究生和专业人员提供振动与噪声控制领域的前沿理论及应用的相关研究成果,为读者提供该领域全新的理论研究方法及其对工程应用的指导作用。本书的创新独到之处是将振动与噪声物理层次上的基础理论和工程应用充分结合在一起,从而能够从这些深入的基础理论中找寻分析和解决实际工程问题的技巧和方法。书中内容都是作者及作者研究团队近几年来研究成果,其中第1章介绍了应用湍流统计理论分析非阻塞振动颗粒流的运动状态及耗能特性,第2章介绍了应用湍流类比理论定量分析多孔金属材料吸声特性,第3章介绍了声子晶体局域共振带隙理论及其在低频减振降噪中的应用,第4章介绍了电晕噪声产生机理及理论模型。

本书是高等院校师生和从事工程振动与噪声控制工作的专业技术人员不可多得的教材和有价值的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

振动与噪声前沿理论及应用/吴九汇著. —西安:
西安交通大学出版社, 2014. 12
ISBN 978-7-5605-6897-3

I. ①振… II. ①吴… III. ①振动控制—研究②噪声
控制—研究 IV. ①TB53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 286815 号

书 名 振动与噪声前沿理论及应用
著 者 吴九汇
责任编辑 田 华

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtpress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 西安新华印务有限公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 16.75 字数 306 千字
版次印次 2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-6897-3/TB·86
定 价 58.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。
订购热线:(029)82665248 (029)82665249
投稿热线:(029)82664954
读者信箱:jdgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

总序

创新是一个民族的灵魂，也是高层次人才水平的集中体现。因此，创新能力的培养应贯穿于研究生培养的各个环节，包括课程学习、文献阅读、课题研究等。文献阅读与课题研究无疑是培养研究生创新能力的重要手段，同样，课程学习也是培养研究生创新能力的重要环节。通过课程学习，使研究生在教师指导下，获取知识的同时理解知识创新过程与创新方法，对培养研究生创新能力具有极其重要的意义。

西安交通大学研究生院围绕研究生创新意识与创新能力改革研究生课程体系的同时，开设了一批研究型课程，支持编写了一批研究型课程的教材，目的是为了推动在课程教学环节加强研究生创新意识与创新能力的培养，进一步提高研究生培养质量。

研究型课程是指以激发研究生批判性思维、创新意识为主要目标，由具有高学术水平的教授作为任课教师参与指导，以本学科领域最新研究和前沿知识为内容，以探索式的教学方式为主导，适合于师生互动，使学生有更大的思维空间的课程。研究型教材应使学生在学习过程中可以掌握最新的科学知识，了解最新的前沿动态，激发研究生科学研究的兴趣，掌握基本的科学方法，把教师为中心的教学模式转变为以学生为中心教师为主导的教学模式，把学生被动接受知识转变为在探索研究与自主学习中掌握知识和培养能力。

出版研究型课程系列教材，是一项探索性的工作，有许多艰苦的工作。虽然已出版的教材凝聚了作者的大量心血，但毕竟是一项在实践中不断完善的工作。我们深信，通过研究型系列教材的出版与完善，必定能够促进研究生创新能力的培养。

西安交通大学研究生院

前 言

目前,噪声和振动这门学科正在迅速成为世界范围许多大学和理工学院的必修课程。本书是根据西安交通大学机械工程学科研究生课程的教学要求,以培养研究生具有较高理论分析水平和解决复杂振动与噪声工程问题的能力出发而撰写的。本书是拙著《噪声分析与控制》的延续和深化,为工科研究生和专业人员提供振动与噪声控制领域的前沿理论及应用成果,有利于开拓思路,力求提高相关专业人员分析问题和解决问题的能力。

本书共分四章。第1章介绍了应用湍流统计理论分析非阻塞振动颗粒流的运动状态及耗能特性;第2章介绍了应用湍流类比理论定量分析多孔金属材料吸声特性;第3章介绍了声子晶体局域共振带隙理论及其在低频减振降噪中的应用;第4章介绍了电晕噪声产生机理及理论模型。

西安交通大学机械工程学院黄协清教授在作者撰写本书过程中给予了莫大的帮助。黄教授逐字逐句阅读了本书手稿,提出了许多宝贵意见和建议,给本书增色很多。黄教授的渊博知识和丰富的教学科研经验大大提高了本书的学术水平,使作者受益终身,在此特别感谢。非常感谢在撰写本书过程中给予帮助的所有同事,尤其感谢作者的恩师陈花玲教授对作者的大力帮助和支持;非常感谢作者已毕业的研究生们和研究生团队。

在撰写本书过程中,除依据作者自己的科研成果外,还参考国内外同行有关文献,在此特一起致谢。

最后,作者衷心感谢西安交通大学研究生创新教育系列教材建设和西安交通大学青岛研究院的宝贵资助;衷心感谢西安交通大学出版社田华编辑的辛勤工作。

由于作者水平所限,难免有错误和不妥之处,望读者批评指正,以便日后完善和修改。

吴九汇

2014年9月1日

目 录

前言

第 1 章 应用湍流统计理论分析非阻塞振动颗粒流的运动状态及耗能特性	1
1.1 NOPD 减振技术发展历程	1
1.1.1 传统的冲击减振技术	2
1.1.2 NOPD 减振技术	4
1.2 NOPD 颗粒流的湍流统计模型与耗能分析	8
1.2.1 振动颗粒流的湍流特性	8
1.2.2 湍流随机场的统计描述法	11
1.2.3 局部均匀各向同性湍流理论	14
1.2.4 NOPD 振动颗粒流运动的湍流统计模型	16
1.2.5 本节小结	24
1.3 考虑侧边界时 NOPD 颗粒流的振荡湍流模型	26
1.3.1 考虑侧边界振荡时颗粒流的运动特性分析	26
1.3.2 考虑侧边界振荡时颗粒流的运动特性数值计算及分析	29
1.3.3 本节小结	42
1.4 振荡湍流模型在 NOPD 边界耗能分析中的应用	43
1.4.1 NOPD 实际工作情况分析	44
1.4.2 NOPD 振动颗粒流中的能量耗散	47
1.4.3 本节小结	51
参考文献	53
附录 1: 第 1 章主要符号表	58
第 2 章 基于湍流类比理论的多孔金属材料吸声特性定量分析	59
2.1 多孔金属材料的研究意义及国内外研究现状	59
2.1.1 多孔金属材料的研究背景及意义	59
2.1.2 多孔金属材料的国内外研究现状	64
2.2 基于湍流类比的多孔金属材料吸声特性分析	67
2.2.1 声波在多孔金属材料内部的传播特性分析	68

2.2.2	湍流类比理论的推导	69
2.2.3	湍流类比理论的数值结果	76
2.2.4	湍流类比理论的实验验证	80
2.3	高温高声压条件下多孔金属材料吸声特性研究	85
2.3.1	高温高声压对多孔金属材料声学参数的影响分析	86
2.3.2	高声压条件下多孔金属材料声学特性数值结果分析	88
2.3.3	高温高声压条件下有限厚度多孔金属材料声学特性分析	92
2.4	本章小结	109
	参考文献	112
第3章	声子晶体局域共振带隙理论及其在低频减振降噪中的应用	118
3.1	声子晶体概述	118
3.1.1	声子晶体概念的提出及其分类	118
3.1.2	声子晶体的两种带隙(禁带)机理	120
3.2	声子晶体的带隙特性分析	121
3.2.1	声子晶体的基础理论	121
3.2.2	Bragg 散射型声子晶体带隙机理及特性	128
3.2.3	局域共振型声子结构的带隙机理及特性	137
3.3	新型局域共振单元声子结构及其低频带隙特性	151
3.3.1	质量块-折叠梁局域共振声子结构	151
3.3.2	质量块-回旋梁局域共振声子结构	156
3.3.3	局域共振复合单元声子结构	160
3.4	螺旋局域共振单元声子结构在板结构低频减振中的应用	164
3.4.1	螺旋局域共振单元声子结构的带隙特性分析	164
3.4.2	带隙特性仿真分析	171
3.4.3	实验测试及分析	173
3.5	局域共振声子结构在低频振动能量回收中的应用	176
3.5.1	局域共振声子结构回收低频振动能量的探讨	176
3.5.2	振动能量回收能力仿真分析	178
3.5.3	质量块-螺旋梁能量回收结构实验测试分析	182
3.6	声子晶体工程应用的一般性设计方法	188
3.7	本章小结	189
	参考文献	191
	附录 2:第3章主要符号表	194

附录 3:第 3 章常用材料声学参数表	197
第 4 章 高压交流输电导线电晕噪声理论及应用	198
4.1 高压输电线电晕可听噪声综述	198
4.1.1 电晕可听噪声现象	199
4.1.2 电晕可听噪声的研究现状	201
4.2 电晕可听噪声机理分析	205
4.2.1 空气电离过程分析	205
4.2.2 电晕可听噪声来源	207
4.2.3 电离气体中带电粒子的运动描述	210
4.3 电晕可听噪声理论预估模型	212
4.3.1 离子运动规律	212
4.3.2 基于 Kirchhoff 公式的噪声计算模型	217
4.4 电晕可听噪声理论预估模型的应用	220
4.4.1 三相不分裂平直导线情况	220
4.4.2 三相分裂平直导线情况	224
4.4.3 悬垂导线情况	230
4.4.4 导线表面附着水滴情况	233
4.5 电晕可听噪声不同影响因素分析及降噪措施研究	237
4.5.1 导线参数对电晕可听噪声的影响	237
4.5.2 环境因素对电晕可听噪声的影响	246
4.5.3 基于电晕可听噪声理论模型的降噪措施	251
4.6 本章小结	251
参考文献	253

第1章 应用湍流统计理论分析非阻塞 振动颗粒流的运动状态及耗能特性

非阻塞颗粒阻尼(Non-Obstructive Particle Damping,缩写为NOPD)技术是在传统颗粒阻尼和冲击阻尼技术基础上发展起来的新型阻尼减振技术。它通过在结构体的振动传递路径上加工空腔,并将微小颗粒体填入其中,利用颗粒体之间的相互碰撞摩擦达到结构减振目的。该阻尼技术具有对原系统改动很小、几乎不产生附加质量、显著提高结构的阻尼比、能适用于恶劣环境、减振性能不会随时间降低等优点,具有很好的应用前景。但由于NOPD减振过程中运动状态的复杂性,此前尚无成熟的理论模型能定量描述其耗能特性。

本章认为NOPD的减振过程实际上是振动颗粒流的耗能过程。当振动强度大于某临界值时,振动颗粒流内会出现不规则的涡结构,这些涡结构与局部均匀各向同性湍流中的涡结构极为相似,因而借鉴局部均匀各向同性湍流理论建立了振动颗粒流的湍流统计模型,在此基础上定量分析了振动颗粒流的耗能特性并数值计算了考虑边界条件的NOPD技术中颗粒流的运动特性。本章提出的湍流统计理论为NOPD技术的工程应用提供了一种有效的定量分析方法。

1.1 NOPD 减振技术发展历程

从振源、传递路径和要求降低振动强度的物体(即减振体)的角度来说,一般的减振技术可以归纳为三类:①抑制振源强度,即抑制那些能产生激振力物体的振动强度,如对高速转子进行动平衡以减少其不平衡质量产生的激振力;②隔振,即在振源和减振体之间放置隔振器(如弹簧或衬垫等)来减轻振源对减振体的激励,如汽车隔振板簧、车轮外缘的充气轮胎等;③消振,即在减振体上附加其它特殊装置(即减振器),利用减振器和减振体相互作用来吸收振动系统动能,从而达到降低减振体振动强度的目的,如传统的冲击减振技术中安装在高挠性建筑物顶部的活动质量。

NOPD减振技术是在传统的冲击减振技术基础上发展起来的新型冲击阻尼减振技术。

1.1.1 传统的冲击减振技术

1. 单冲体冲击减振器

以刚性质量块为冲击体的单冲体冲击减振器是传统冲击减振理论的典型代表^[1,1]。图 1.1 给出单自由度振动系统冲击消振的示意图,其主振动系统承受简谐激振力 $p_0(t)\sin\omega t$, 冲击体 m_1 在每次循环中分别与左右挡块碰撞一次。在系统参数满足某些条件,即若两次碰撞的时间间隔均为半周期时,整个系统将处于稳态对称周期运动状态。但若在一个循环中两次碰撞的时间间隔不相等,二者都不等于半周期,对于这种非对称周期运动,主振动系统的振幅在某个激励频率发生突然跳跃现象,类似于硬弹簧构成的非线性振动系统强迫振动的跳跃现象。

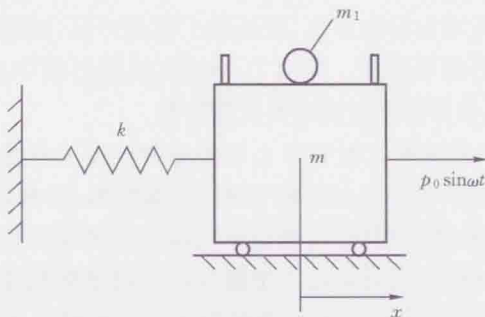


图 1.1 单冲体冲击减振器示意图

传统冲击减振系统的运动规律相当复杂,与此种系统的非线性有关。它不像动力吸振器那样能够找到计算最优参数的公式,但在定性分析方面有如下对设计冲击减振器有参考价值的共识结论。

①对于受恒定频率激励的冲击减振系统,在保持减振器活动质量不变的前提下,增大碰撞恢复系数,使其接近弹性碰撞,这样能够提高周期运动的稳定性,达到改善减振效果的目的。

②为使冲击减振器在激振频率变化时能够保持稳定的周期运动,对弱阻尼主振动系统,碰撞恢复系数应该取较低的值,即碰撞是非弹性的;对强阻尼主振动系统,碰撞恢复系数应取较大的值。这是因为主振动系统阻尼和冲击减振器非弹性碰撞都有耗散系统机械能的作用,都能提高激振频率变化时周期运动的稳定性,二者作用能够相互补偿。这里应指出,对强阻尼主振动系统,冲击减振器的减振效果不明显。

③满足稳定、对称、周期碰撞条件下,当主振动系统处于共振状态时,冲击减振

效果最好。增大冲击体和主系统的质量比,能够提高冲击减振效果。

④冲击减振系统的运动稳定性与冲击体的活动间隙有关,而间隙的选取又和主系统参数及质量比有关。正确选择间隙是保证系统稳定且具有最佳减振效果的重要因素。

如上所述,增加冲击体质量能提高冲击减振器的减振效果,但也导致冲击噪声增大,对设备正常工作有害。为了增加冲击减振器的活动质量,又不增大噪声,有些研究者又提出了下面介绍的多活动质量冲击减振器。

2. 多活动质量的冲击减振器

图 1.2 是用多活动质量冲击减振器抑制简谐振动的力学模型^[1,1]。对比单活动质量冲击减振器和多活动质量冲击减振器,可以得到以下结论。

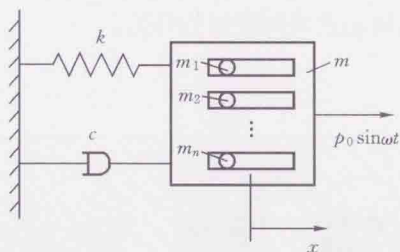


图 1.2 多活动质量冲击减振器抑制简谐振动的力学模型

①多活动质量冲击减振器能减小主振动系统的速度跃变,并能减小冲击噪声。

②在活动质量总和相等的前提下,单活动质量冲击减振系统与多活动质量冲击减振系统的位移振幅相等。

③在活动质量总和相等的前提下,单活动质量冲击减振系统与多活动质量冲击减振系统周期运动稳定的参数域基本相同。

到目前为止,在传统冲击减振器的减振效果的定量化计算方面,尚未取得像计算动力吸振器那样的理论成果,至今仍然难以达到适用于实际设计的程度。其主要原因是由于冲击减振器工作时,冲击体(减振器)与主振动系统碰撞引起速度突变,其动力学行为表现出很强的非线性,而以前研究中所采取的分析方法均未能完全计及碰撞过程中的非线性因素,导致理论和实际结果误差较大。传统冲击减振器参数设计尚无明确的指导方法,在实际应用中仍要通过经验加试验的方法来确定有关参数。

在上述冲击减振器中,若用大量的颗粒质量来代替多活动质量块,就产生了我们下面要介绍的非阻塞颗粒阻尼(NOPD)减振技术。

1.1.2 NOPD 减振技术

NOPD 减振技术是一种新型的抗恶劣环境阻尼技术,结合了颗粒阻尼技术与冲击阻尼技术的优点,具有较好的环境适应性。NOPD 技术的减振机理是十分复杂的,其基本结构原理如图 1.3 所示(F 为外界激励, M 为结构质量, m 为填充颗粒质量, k 为结构刚度),即在振动结构的能量传播路径上加工一定数量的小孔洞,在其中填充适当数量的直径为 $0.1\sim 1\text{ mm}$ 的微小金属或非金属颗粒,使之在孔中处于非阻塞状态以增加结构阻尼而不增加结构重量。当振动结构受到外部激励而振动时,填充到结构孔中的 NOPD 颗粒在非阻塞状态下不但对系统产生垂直冲击作用,彼此之间也会发生碰撞,但微颗粒之间的碰撞或者互相抵消或者通过多次碰撞传递到孔壁上,这样颗粒之间不但有动量交换,而且由此产生的摩擦阻尼能够耗散结构体的振动能量,从而达到减振降噪的目的。

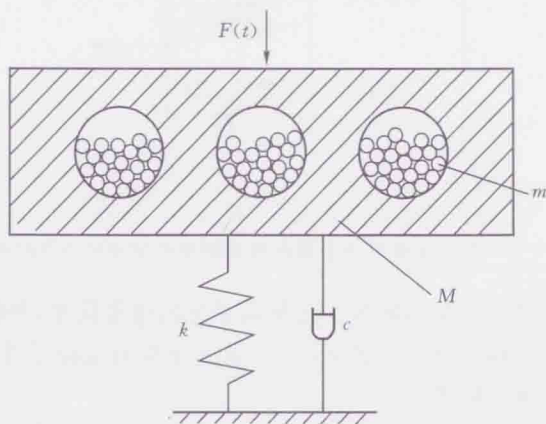


图 1.3 NOPD 技术原理示意图

NOPD 减振技术具有多种复杂的耗能机理:主要为微颗粒之间的摩擦;微颗粒与振动壁面的摩擦及动量交换作用;此外还有微颗粒材料的粘滞性、内聚性、剪切变形等等。为了取得满意的减振效果,NOPD 一般采用比重较大的金属颗粒材料,如钨粒、铅粒、铁砂等。一般情况下选用级配均一、无粘聚力、属于理想散粒体的金属颗粒。由于在减振过程中 NOPD 颗粒材料受到往复力的作用,其抗剪强度将对减振效果有一定影响。

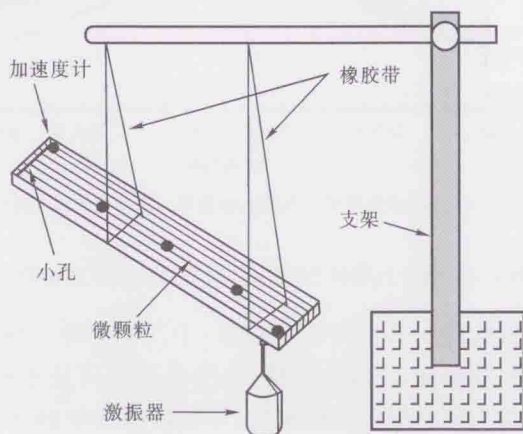
NOPD 减振技术最早是由 Rockwell 公司的 Panossian 博士在 1991 年的阻尼国际会议上首先提出来的^[1,2]。Panossian 于 1989 年^[1,3]将 NOPD 减振技术应用于经常处于大振幅高频(4000 Hz 以上)振动的空间宇航飞机主发动机流体氧进入

口分流叶片上,对于各阶模态都有很好的减振效果。例如,对于 5021 Hz 的扭转模态,比较未进行及进行 NOPD 处理两种情况,可以发现其阻尼比从 0.0006 提高到 0.0035,而加速度传递函数幅值从 1.138 m/s^2 降低到 0.205 m/s^2 。

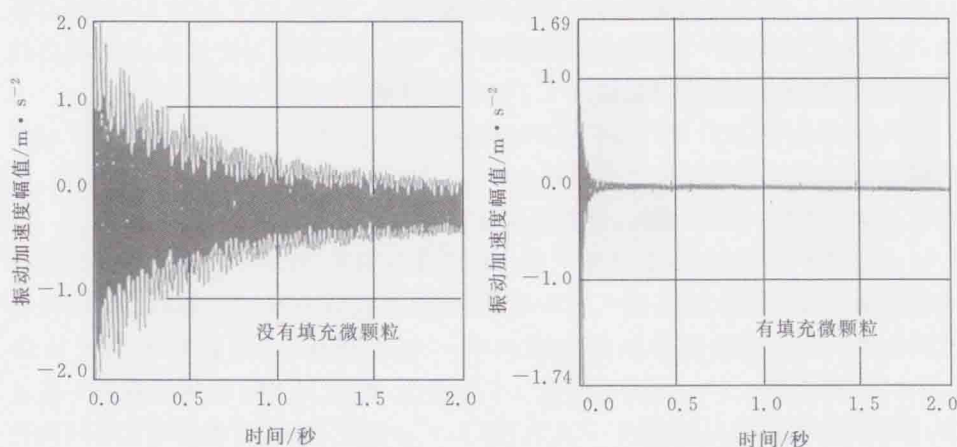
Panossian 于 1991 年^[1,2]将 NOPD 减振技术应用于 $609.6 \times 76.2 \times 19.05 \text{ mm}^3$ 的铝梁,在铝梁上均布开有 7 条直径为 2 mm 的通孔,孔内填充钨粉、氧化锆粉、钢粉等不同种类的 NOPD 颗粒,对其减振效果进行了试验研究,如图 1.4 所示。图 1.4(a)为在两端自由铝梁上开有 7 条均布通孔并填充 NOPD 颗粒后进行激振响应测试的实验装置示意图;图 1.4(b)表明,在铝梁孔洞中以 90% 的填充百分比填充钨粉时,其振动加速度幅值的时间响应很快衰减,此时铝梁的阻尼比由 0.000148 提高到 0.109,提高了接近三个数量级,施加 NOPD 的减振效果非常显著,而填充的钨粉只占梁重的 5% 左右;图 1.4(c)比较了两端自由铝梁在不同填充颗粒下的一阶弯曲模态振幅,结果表明:以 90% 填充百分比填充钨粉时可使铝梁的第一阶固有频率处振幅降低达 60 倍以上,而不同种类的 NOPD 颗粒减振效果不同,颗粒密度越大,效果越好。

目前 NOPD 减振技术在一些厚重结构中的应用比较成熟。但对于薄壁结构施加 NOPD 时,由于打孔工艺较复杂,而且引起的应力集中对结构影响较大,通常采用一种夹层复合结构,即中间 NOPD 结构层和上下面板结构。图 1.5^[1,2]显示了这种夹层复合结构在不同形式的中间 NOPD 结构层中填充无粘性颗粒材料后的减振效果。结果表明,在振动峰值处 NOPD 的减振效果非常明显,其减振机理是由于 NOPD 颗粒冲击耗能与相互摩擦耗能而引起的阻尼特性。

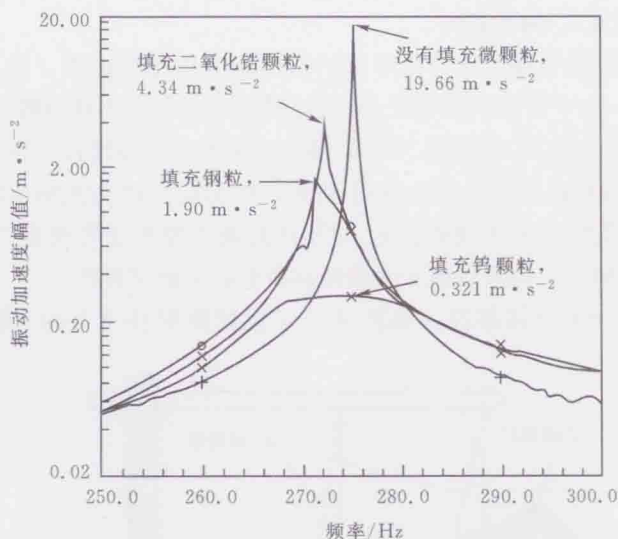
综合上述,NOPD 减振技术虽然结合了颗粒阻尼技术与冲击阻尼技术的优



(a) 在铝梁上施加 NOPD 后的减振效果测试实验装置示意图



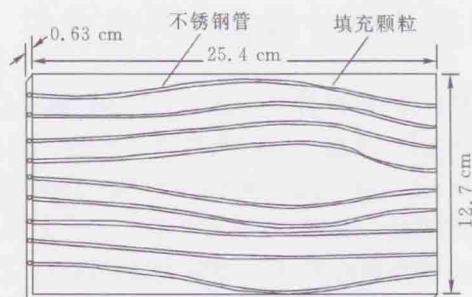
(b) 未填充和填充钨粉两种情况的时间响应比较



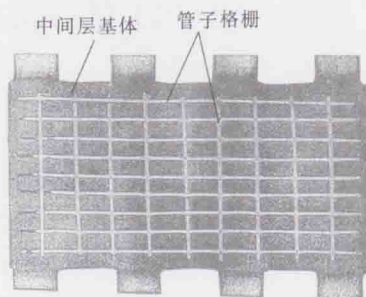
(c) 不同填充颗粒下两端自由铝梁一阶弯曲模态的比较

图 1.4 铝梁上施加 NOPD 后的减振效果试验研究

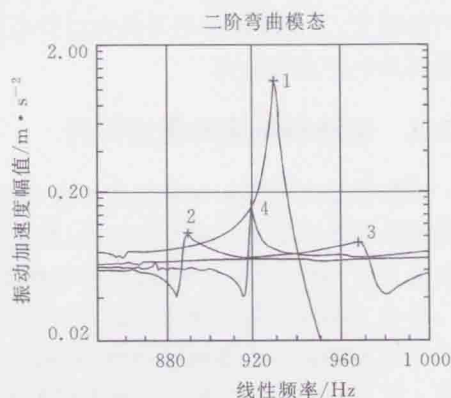
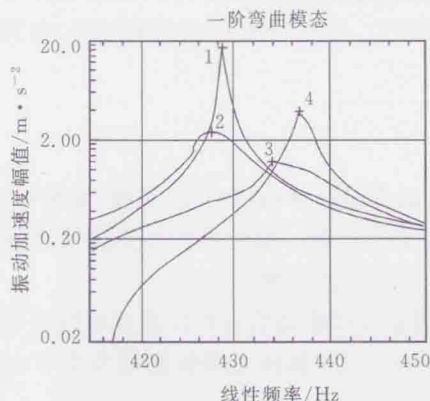
点,但比两者有更佳的性能。其主要优点在于:①与传统冲击减振器相比,NOPD 技术具有减振频带宽,效果好,无噪声等优点;②具有空间尺寸小,附加重量轻,对结构改动小的优点;③与粘弹阻尼结构相比,不但适合常规的减振降噪,而且适合于恶劣环境下工作。因此,NOPD 技术具有其它阻尼技术无可比拟的优点,正是



(a) 中间结构层中嵌入的不锈钢管填充颗粒



(b) 中间结构层中嵌入的管子格栅填充颗粒



(c) 不同中间结构层中嵌入颗粒后的夹层复合结构 NOPD 处理后的振动幅值对比

注:左图为一阶弯曲模态,右图为二阶弯曲模态;图中曲线1为固体板,

2为铸孔中间层,3为嵌入不锈钢管的中间层结构,4为嵌入管子格栅的中间层结构

图 1.5 夹层复合结构在不同中间结构层中填充无粘性颗粒材料后的减振效果

这些特点使得 NOPD 技术的研究及应用得以不断地开展下去。

NOPD 技术具有如下特点:①不必更改结构,可在原结构进行 NOPD 处理;②对空间尺寸及重量等限制严格的结构不增加结构重量,这样对如航空航天、军工产品等的振动控制更具有其独特之处;③具有多种耗能机理使结构临界阻尼率提高一个数量级,极容易实现,减振降噪频带宽,对结构薄弱模态减振效果好;④实施方便,节省费用;⑤结构件开孔易产生应力集中,需对开孔的尺寸、位置进行良好设计。

1.2 NOPD 颗粒流的湍流统计模型与耗能分析

NOPD 技术利用振动颗粒流的耗能特性(阻尼特性),通过在振动结构上打孔并填充颗粒物质的做法,吸收振动及声能量,从而达到减振降噪的目的。NOPD 的减振效果虽受不同填充体积比的影响,但实际应用中为保证有足够的颗粒参与到耗散振动能量的相互运动中,填充颗粒浓度一般较大,其填充率不会低于 50%,故 NOPD 内所填充的大量颗粒实际构成密集颗粒流,此时颗粒流即表现出类似流体的性质。因此 NOPD 的减振过程可通过分析振动颗粒流的运动特性来描述。本节将利用已有的振动颗粒流研究成果及相关理论,建立描述 NOPD 运动特性的连续体模型,并借鉴局部均匀各向同性湍流理论,分析 NOPD 的耗能过程,得到其能量耗散的定量表达式。

1.2.1 振动颗粒流的湍流特性

颗粒流是大量散粒材料的剪切流动,可看作是一种特殊的气(或液)固两相流。颗粒物质在外力驱动下会发生流动,称之为流化过程。颗粒流在外界振动激励下发生流化时,会同时发生对流、波动等现象,并表现出耗散特性。

早在 1831 年,英国物理学家 Faraday 观察连续振动装有颗粒物质的圆柱容器时^[1,4],发现颗粒会沿着圆柱边壁下降,在中间上升,整体上颗粒物质发生了对流现象。这是颗粒对流现象首次被人们发现。

Bagnold 在 1954 年^[1,5]进行了同心圆筒间中性悬浮粗颗粒的剪切实验,其中颗粒为石蜡制成的小圆球,悬浮于用甘油、水和酒精配成的与颗粒密度相同的液体中。实验研究了颗粒间粘性流体影响可以忽略及占优势的不同流动条件,通过定义一个反映颗粒惯性力与粘性力之比的无量纲参数(后人称作 Bagnold 数)来确定这种影响,即

$$Ba = \frac{l^{1/2} \rho_s d^2 du/dy}{\eta} \quad (1.1)$$

式中: $l = 1/[(\alpha_0/\alpha)^{1/3} - 1]$ 为颗粒线性浓度; α_0 表示颗粒极限浓度; α 为颗粒浓度; η 为流体粘性系数; ρ_s 为颗粒密度; d 为颗粒粒径; du/dy 为剪切速率。根据 Bagnold 数的大小可以划分:当 $Ba < 40$ 时,颗粒间流体起主要作用,颗粒碰撞影响不予考虑;当 $Ba > 450$ 时,颗粒碰撞作用占优势,相当于快速颗粒流动;当 $40 \leq Ba \leq 450$ 时,两者影响都不能忽略。实验还进一步揭示了在高浓度和高切变速率条件下颗粒的应力与粒径和切变速率的平方关系,即

$$\sigma_{ij} = \rho_s f_{ij}(\alpha, e, \beta) d^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (1.2)$$

式中: f_{ij} 是与颗粒浓度、物性及流动状态有关的张量函数; e 是颗粒碰撞恢复系数; β 是颗粒表面粗糙系数。随后三十多年在空气和液体介质中进行的许多类似实验都支持 Bagnold 的结论, 所有这些实验共同揭示了在充分高的浓度和高剪切速率的流动条件下, 颗粒间的动量和能量传递是由于碰撞作用而不是持续的接触摩擦或其间流体的作用。

1989 年 Evesque^[1.6] 通过实验对颗粒流施加幅值为 A 、频率为 $f = \omega/2\pi$ 的低频振动激励 ($f \leq 1000$ Hz) 时, 若低频振动的幅值足够大, 颗粒流内部有对流现象出现; 此时颗粒流的水平自由表面将会出现波动, 并最终达到一个稳定状态。他引入描述振动强度的参数 $\Gamma = A\omega^2/g$ (振动加速度幅值与重力加速度的比值) 并将它作为判断振动颗粒流是否会发生对流的标准。当 $\Gamma > 1$ 时, 振动颗粒流开始流化, 并出现对流现象。1993 年 Pak^[1.7] 在此基础上将颗粒直径与振动幅值的对比引入该参数, 定义振动强度为 $\Gamma = (A\omega)^2/dg$, 完善了该判断准则。

1992 年 Taguchi^[1.8~1.9] 用数值模拟的方法研究颗粒对流现象, 结论认为振动颗粒流发生对流的原因是离散颗粒间的弹性碰撞。在此基础上, Taguchi^[1.10~1.11] 研究了大高宽比以及水平方向为无穷大情况下振动颗粒流的运动特性, 并首次在振动颗粒流中发现湍流结构, 认为振动颗粒流的运动特性与容器的高宽比 (容器的纵向尺寸与横向尺寸的比值) 有直接关系。当振动强度 $\Gamma \gg 1$ 时, 颗粒流完全流化, 在小高宽比情况下, 此时振动颗粒流中出现如其它文献中所观察到的颗粒对流现象; 在大高宽比情况下, 颗粒流中靠近边界处出现对流现象, 而远离边界处则是不规则的涡结构, 这些涡结构与流体中完全发展的湍流中的涡极为相似; 在水平方向无穷大情况下, 颗粒流中并无对流现象产生, 而是出现与湍流涡类似的涡结构, 更加令人惊奇的是, 此时振动颗粒流中的能谱密度具有与局部各向同性湍流相同的规律, 即局部各向同性湍流中能谱密度的 $-5/3$ 定律。该现象的发现为研究振动颗粒流提供了新的物理模型。

1996 年 Knight^[1.12] 首次将颗粒追踪及磁共振成像技术相结合研究振动颗粒流运动规律。研究以装有干燥颗粒物质的圆柱形容器为对象, 实验装置如图 1.6 所示, 位于轴线上的三个黑色原点为染色颗粒, 用于颗粒追踪使用。实验中为保证对流现象的产生, 振动强度满足 $1 \leq \Gamma \leq 15$ 的条件。通过取不同的 Γ 值与振动频率 f 进行多次实验, 发现圆柱形容器中的颗粒对流呈现滚

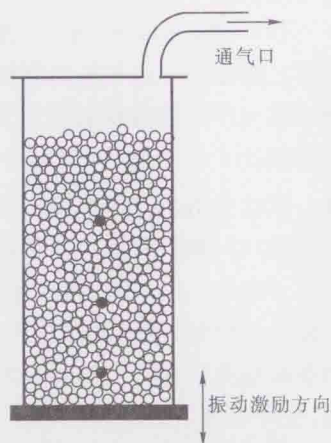


图 1.6 圆柱容器振动颗粒流
实验装置图