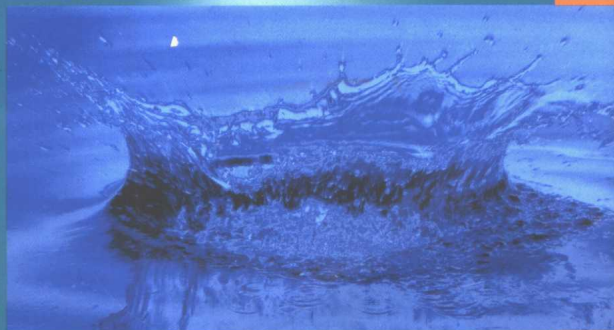


非线性抗振动冲击

防护动力学
与动态设计

杨 平 著
FEIXIANXING

KANGZHENDONG CHONGJI
FANGHU DONGLIXUE
YU DONGTAI SHEJI



国防工业出版社

非线性抗振动冲击防护 动力学与动态设计

杨平 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

非线性抗振动冲击防护动力学与动态设计/杨平著.
北京:国防工业出版社,2003.8

ISBN 7-118-03160-7

I.非... II.杨... III.自动控制设备—非线性振
动—振动控制 IV.TP27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 035227 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 5 $\frac{1}{4}$ 148 千字

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:12.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

当代科学技术的飞速发展,尤其是计算机信息科学技术、非线性科学技术的发展,更加快了相关学科的研究向纵深进行。机械科学与计算机科学、非线性科学、材料科学等日益紧密结合,科学技术化和技术科学化已经成为一种发展趋势。非线性抗振动冲击加固理论与技术研究和应用开发,是我国 21 世纪需着重发展的工程科学技术之一。

机械产品大多在复杂的动力环境中工作,因此对其工作性能的要求越来越高。为使这些设备和产品安全可靠地工作,其系统必须具有良好的静态和动态特性。机械动态设计是包括现代动态分析、计算机技术及产品动力学等多学科理论,是正在发展中的一项新技术。

抗振动冲击系统的研究内容其理论性和应用性非常强,基于各种新功能材料、非线性特性及其可控制调节性能的设计理论和方法研究是当前新的发展趋势,而且是一门交叉性极强的科学,它集振动冲击理论和技术、非线性科学、数力理论、材料科学和技术、计算机理论和技术、控制理论和技术、智能工程等学科为一体,具有广泛的发展空间和应用前景。本书旨在研究非线性抗振动冲击加固防护动力学与动态设计,研究基于非线性特性的抗振动冲击设计理论和方法;这一研究成果将为工程中研制高性能抗振动冲击防护器件特别是适合恶劣环境下的抗振动冲击防护器件和系统研制奠定理论基础,并将推动减振抗冲理论和技术的进一步发展。

本书的出版将使大专院校机械工程及自动化类、机械电子工程、力学类、自动控制类(动态特性控制)和电子信息设备类等专业的研究生和本科生获得一本导向性极好的理论专著或教学参考

书;同时使相关科研院所、厂矿企业的科技工作者获得一本抗振动冲击器件或系统在设计制造方面的参考书。

全书共分8章进行论述,第1章介绍国内外抗振动冲击防护理论和技术的研究进展和动态及本书研究的问题和目的;第2章从一个新的角度总结前人的成果,论述了设备动力环境与抗振动冲击技术基本设计理论;并论述了各种介质阻尼特别是流体阻尼的产生及耗能机理;第3章至第8章总结了作者近年来的研究成果,包括部分尚未发表的成果。其中第3章论述了非线性(多介质)耦合型抗振动冲击(器件)系统的数学模型及求解;第4章论述了非线性(多介质)耦合型抗振动冲击(器件)系统的缓冲特性及非线性性态;第5章论述了几种非线性(多介质)耦合型抗振动冲击器件原理样机的设计,并进行了理论建模及仿真CAD/CAE研究;第6章论述了抗振动冲击器件的振冲测试系统的设计及测试原理、方法和需要注意的问题,并重点论述了几种原理样机的物理特性;第7章论述了非线性耦合型抗振动冲击器件物理参数优化设计;第8章简介了几种典型样机及性能。

本书是作者出版的第一部专著,在这里首先要感谢父母的养育之恩;同时感谢硕士导师袁盛治教授、肖铁英教授和博士导师钟毅芳教授、周济院士等,导师们严谨、务实、勇于创新的工作作风,将永远激励作者在科学的道路上奋发向上、探索创新,在此我向导师们致以最诚挚的感谢!

本书所涉及的相关研究课题是1996年开始的,在7年多的课题研究特别是在近5年的科研工作中,桂林电子工业学院先进设计与制造技术研究所跨行业国防科技基金课题组、“九五”国防科技课题组、广西自然科学基金课题组及广西教育厅基金课题组的同志们与本人形成了一个团结奋进的科研团队,他们为本书及项目的完成给予了全力的协助,在此表示诚挚的谢意。

作 者

2003年3月

内 容 简 介

本书针对电子信息设备抗振动冲击加固技术的要求,以实现抗大冲击并兼顾衰减振动的器件技术要求为突破点,对复杂多非线性因素耦合型减振抗冲系统理论和技术进行了较全面深入的研究;作者将机械科学与计算机科学、非线性科学和材料科学等紧密地结合起来,着重研究了非线性耦合型抗振动冲击(器件)系统的数学模型及求解;非线性耦合型抗振动冲击(器件)系统的缓冲特性及非线性性态;非线性耦合型抗振动冲击器件的设计、理论建模及仿真 CAD/CAE;抗振动冲击器件的振动和冲击测试原理及方法,样机的物理特性试验、物理参数优化设计等专题;最后还简介了几种典型样机及其性能。本书适合于大专院校机械工程及自动化类、机械电子工程、力学类、自动控制类(动态特性控制)和电子信息设备类等专业的研究生、本科生及相关研究院所的科技工作者学习和参考。

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 抗振冲防护技术的研究任务、内容和对象	1
1.2 国内外抗振冲防护技术的研究动态	1
1.2.1 非线性抗振冲动力学机理及求解方法	2
1.2.2 建模理论与计算机辅助工程设计(CAD/ CAE)技术	5
1.2.3 参数优化研究	6
1.2.4 器件研究	8
1.2.5 面临的问题	8
1.3 主要研究内容	9
1.4 研究方向展望	11
第2章 设备动力环境与抗振冲防护技术基本理论	12
2.1 设备动力环境与抗振冲设计基本原理和方法	12
2.1.1 设备动力环境描述	12
2.1.2 抗振冲基本原理和方法	14
2.2 阻尼产生及耗能机理	18
2.2.1 流体阻尼产生及耗能机理	18
2.2.2 其他阻尼简介	23
2.3 阻尼耗能的数学分析	26
2.4 本章小结	27
第3章 振动激励时非线性耦合系统响应	28
3.1 非线性耦合型抗振冲系统的模型	29
3.2 确定激励时非线性耦合型抗振冲系统响应	30
3.3 随机激励时非线性耦合型抗振冲系统响应	42

3.3.1 非平稳随机过程(激励)平稳化处理的原理	43
3.3.2 非线性耦合型振动系统的 FPK 法求解	45
3.4 本章小结	54
第 4 章 非线性耦合系统缓冲特性及非线性性态	56
4.1 非线性耦合型抗振冲系统缓冲特性	56
4.1.1 防冲过程中的弹性效应	57
4.1.2 防冲过程中的耦合效应	59
4.2 非线性耦合型抗振冲系统性态	66
4.2.1 传递率多值性态	66
4.2.2 非线性耦合型减振系统混沌性态	71
4.3 本章小结	77
第 5 章 非线性耦合抗振冲器件设计、建模及特性仿真	79
5.1 典型非线性耦合抗振冲器件的物理设计	79
5.1.1 非线性耦合抗振冲防护器件的物理设计	80
5.1.2 非线性耦合抗振冲防护器件的力学模型	84
5.2 典型非线性耦合抗振冲防护器件原理样机的模型	85
5.2.1 油阻尼耦合减振器原理样机的物理、数学 模型	85
5.2.2 油液—空气耦合减振器原理样机的物理、 数学建模	88
5.2.3 金属丝网—流体阻尼减振器原理样机的物 理、数学建模	91
5.3 非线性耦合抗振冲器件特性仿真 CAD/CAE	95
5.3.1 MATLAB 环境简介	95
5.3.2 非线性耦合抗振冲器件仿真 CAD/CAE	95
5.4 典型非线性耦合抗振冲器件原理样机的特性仿真	96
5.4.1 油阻尼耦合减振器原理样机的特性仿真	96
5.4.2 油液—空气介质耦合减振器原理样机的 特性仿真	98
5.4.3 金属丝网—流体阻尼减振器原理样机的	

特性仿真	104
5.5 本章小结	109
第6章 非线性耦合型抗振冲器件的特性试验	110
6.1 试验系统设计及测试	110
6.1.1 振动试验系统设计及测试	110
6.1.2 冲击试验系统设计及测试	112
6.1.3 数据信号的预处理	118
6.2 油阻尼减振器原理样机的试验	119
6.2.1 试验方案及目的	119
6.2.2 试验数据分析	121
6.2.3 小结	127
6.3 油液—空气耦合减振器原理样机的试验	127
6.3.1 试验方案及目的	128
6.3.2 试验数据分析	128
6.3.3 小结	137
6.4 金属丝网—流体阻尼减振器原理样机试验	138
6.4.1 试验方案及目的	138
6.4.2 试验数据分析	139
6.4.3 小结	145
6.5 本章小结	145
第7章 非线性耦合型抗振冲器件参数优化	147
7.1 非线性耦合型抗振冲器件参数优化模型	147
7.1.1 确定性激励时的非线性耦合抗振冲器件 优化设计模型	147
7.1.2 随机激励时的非线性耦合抗振冲器件优 化设计模型	154
7.2 非线性耦合抗振冲器件参数优化算法及设计举例	155
7.2.1 优化算法及选用	155
7.2.2 非线性抗振冲器件的参数优化设计举例	156
第8章 非线性耦合型减振器件工程应用简介	157

8.1 非线性耦合型抗振冲器件样机简介	157
8.2 国内外技术性能对比	161
附录 A 积分计算 I	163
附录 B 几种数学期望计算	165
附录 C 积分计算 II	167
参考文献	168

第 1 章 绪 论

复杂的动力学环境会对设备的安全可靠产生巨大的威胁,例如现代工程环境中使用的电子信息设备,其失效率的 50% ~ 60% 是由于机械振动冲击引起的,因此具有高加固性能的设备是必不可少的;又如衡量汽车质量性能的一个非常重要的指标是其动力平顺性,因此具有动态性能好的悬架系统是保证汽车产品具有强竞争力的必要条件。

1.1 抗振冲防护技术的研究 任务、内容和对象

抗振冲防护技术的研究任务是为各种设备提供高效、安全可靠的辅助系统使其达到在某种恶劣的振冲环境下正常工作;其研究对象是设备、减振器件和动力学环境。它的研究内容包括 4 个方面:

- (1) 研究设备和动力学环境特性。
- (2) 在分析减振抗冲系统动力学模型的基础上阐明各种抗振冲方案的物理机制,研究各种抗振冲方案的特性。
- (3) 建立各种抗振冲方案的结构参数与抗振冲性能指标之间的定量关系。
- (4) 实现计算机辅助抗振冲系统设计和工程分析,即 CAD/CAE 系统。

1.2 国内外抗振冲防护技术的研究动态

近几十年来,随着科学技术的高速发展,新的振动理论、测试

技术、新型的抗振冲介质材料和器件不断涌现。无论是航空、航天工业及军用设备的防护,还是汽车制造业及其他工程领域,人们都将减振抗冲技术的研究作为改善设备性能和安全的的重要研究内容。传统的隔振防冲设计理论对于兼顾隔振防冲的双重要求,特别是对于大冲击、强非线性系统的动力分析与设计表现出缺陷与不足^[1-3,7-9]。对于越来越恶劣的环境条件以及为适应这些条件对工作设备提出的苛刻要求,迫使材料理论和技术、设计理论和技术及器件制造技术也要随之发展,从而需要研究新的理论和技术,研制新的器件,不断充实、发展、完善动力学防冲理论和技术。

低刚度和柔性化、抗大冲击并有效衰减随机振动的减振系统或器件是目前设备抗振冲防护理论和技术发展的一个重要趋势,为了满足苛刻的振冲防护要求,必须设计非线性性能明显的时变系统、变结构系统和多介质耦合系统,这几种抗振冲系统或器件的抗振冲机理研究是目前振动界急需解决的难题^[5,7-78],虽然其数理理论分析研究工作自 20 世纪五六十年代就已开始,但由于其表现为强烈的非线性特征,在非线性数理科学远未成熟的情况下始终未能取得突破性的进展,更无法形成完整的设计理论。虽然到目前为止已取得了一些对设计理论形成具有一定参考价值的成果,但多集中在数学家和力学家手中,而且其中绝大部分成果是基于数理理论建立的模型而较少有对实际器件系统进行机理研究和试验,由于对模型过分的简化,已不能真实的描述实际工程设计问题^[5,9-78]。

1.2.1 非线性抗振冲动力学机理及求解方法

由于阻尼减振的优越性,各种阻尼减振机理一直是各国学者开展的关键课题之一^[1-78]。早期的研究大多将阻尼和刚度等效为线性特性,或仅考虑刚度非线性^[1-3],随着研究的深入,越来越多的学者对更能真实描述实际系统特性的非线性系统进行了广泛的研究,例如 B.Ravindra^[10]等提出了一种同时考虑弹性元件和阻尼非线性耦合的隔振模型,该模型将非线性阻尼模型化为

cx'/x'^{p-1} , 非线性刚度模型化为 $kx|x|^{q-1}$, 对该耦合系统在谐波激励作用下的响应、稳定性及混沌特性进行了研究, 比较非线性刚度软特性时和硬特性时的性能, 且研究了特性参数 p 值变化与 q 值变化耦合时的系统特性, 两者适当的耦合匹配可以获得较好的减振特性, 例如: 获得较窄的共振段和不稳定性区域。

柯克(C. L. Kirk)^[11]等研究了线性阻尼与非线性刚度耦合在随机激励下系统的特性, 依靠求解 FOKKER-PLANCK 方程, 考虑了 3 种刚度特性: 立方硬特性; 立方软特性; 正切刚度特性。研究表明, 当其刚度特性为立方硬特性时, 可以降低位移, 但其质量块的加速度增加(提高了加速度放大率), 其优点是无瞬时曲折临界点危险, 并使减振器能承受较大的静载荷。B. Ravindra^[12]等又提出了一种线性阻尼、库仑阻尼及非线性硬特性立方弹簧的耦合隔振模型, 应用谐波平衡方法对其求解, 研究表明, 在共振区出现了不规则的突跳(放大), 通过稳定性分析发现在开锁频率附近有一个螺旋式的模式转变, 同时分析提出了合适选用耦合参数对降低运动传递的作用。

N. Chandra, H. Sherhar^[13]等提出了一种具有立方阻尼、线性阻尼和线性刚度、立方非线性刚度耦合隔振模型, 并对其采用拉普拉斯变换近似求解, 并将 3 种激励形式下的求解结果与龙格—库塔法求解结果比较, 详细讨论了非线性阻尼对模型特性的影响, 提榧非线性阻尼对共振区的特性变化是至关重要的。桑卡(S. Sankar)、A. K. W. Ahmed^[14]等提出了一种具有双线性组合特性阻尼与线性弹簧耦合隔振模型, 探讨了其等效线性化的参数处理, 并设计了原理样机对其进行试验研究, 说明虽然由于双线性组合阻尼的改变使共振衰减性能变好, 而使高频性能变差一些, 但总的说来性能比线性阻尼元件性能优越。S. Natsiavas 提出了考虑刚度非线性的动力吸振系统模型, 并研究了其弹簧非线性参数变化时对系统的稳定性影响, 从而可在设计时避开不稳定性性能区域^[15]。S. F. Masri 和 T. K. Caugheg 等提出一种非参数模型的建模和识别方法, 该方法基于将各种特性(弹性及阻尼特性)表示为多项式形式, 从而绘

制出各种非线性类型特性的曲面图,此方法与试验结合可对实际系统进行模型参数识别,从而达到建模分析的目的^[16]。

另外,有许多学者基于能量的观点,采用键合图理论对隔振系统进行了建模及求解研究,例如 W.T.Hsueh 提出了两路径能量法表示隔振系统中的元件之力和速度的传递,建立了隔振系统的图模,并对其进行了求解^[17]。

我国学者董智法、张强星等针对单自由度双线性滞迟隔振系统响应进行了求解,同时研究了其参数优化设计^[24]。胡海岩^[25]开展了钢丝绳减振器的实验建模研究,结果表明:钢丝绳减振器特性不仅具有双折线泛函本构关系,而且无记忆恢复力中还含有很强的三次非线性的粘性阻尼成分;白鸿柏、黄协清等对具有三次非线性的粘性阻尼双线性滞迟隔振系统进行了研究,分析了三次非线性对隔振性能的影响^[26]。彭献、唐驾时^[27]等研究了具有线性阻尼和立方非线性刚度构成的非线性隔振系统,导出了其运动响应和传递率公式,并讨论了非线性的影响。陈振藩^[32]讨论了非线性缓冲系统中各种阻尼与弹簧匹配的问题。

有关求解方法的研究,是随机模型研究发展而发展的,到目前为止,较成熟的非线性振动系统分析求解法有以下几种^[1-3,7-9]:①摄动法;②平均法;③KBM法;④多尺度法;⑤等效线性法;⑥谐波平衡法;⑦里茨伽辽金法。前5种主要适应弱非线性振动系统分析求解,但针对强非线性振动系统分析求解,上述方法均存在能力不足问题,相对而言谐波平衡法及其由此发展的增量谐波平衡法在解非线性振动系统时具有较好的性能^[37]。

值得一提的是,有关非线性系统在随机激励下的响应求解方法一直是理论界致力研究的重要课题之一,并已发展了若干种求解方法^[7-8],例如当激励为高斯白噪声时线性或非线性系统的响应是扩散的马尔可夫过程,响应的精确概率密度可用福克—柯尔模哥洛夫方程(FPK方程)方法得到。然而目前仍只能对线性系统和少量的特殊非线性系统求 FPK 方程的精确解^[7,40]。Caughey Ma^[40,41]研究获得了在高斯白噪声时一类二阶和一类高阶非线性

系统的响应的精确平稳解。Dimentberg^[42]研究了在同时受高斯白噪声外激和参激时的二阶非线性系统的响应的精确平稳解,我国学者朱位秋^[7]引入广义能量的概念,研究几种特殊形式的非线性系统的响应精确平稳解。但到目前该方法仍对具有非线性阻尼的非线性系统无能为力^[7,33-56]。另外刘强、丁文镜^[38]等人应用非高斯矩阵法构造了 FPK 方程在矩方程意义下的近似解。

非线性是机械动态系统的普遍因素,目前很多学者对非线性性态及在工程中应用可能性也进行了大量的研究^[33-56],特别是混沌及分叉等非线性性态的研究,并进一步探索其工程中的实际应用,如 W.H.Steeb、W.Erig 和 A.Kunick^[43]对单频激励下的 Duffing 系统的混沌性态进行了研究;Q.S.Lu 和 C.W.S.To^[44]对在两频率参激和自激联合作用时的 Duffing 系统的混沌性态进行了研究;K.Yagasaki^[45]对在参激和外激联合作用时的 Duffing 系统的混沌性态进行了研究;T.Kapitaniak^[46]对在多频外激联合作用时的 Duffing 系统的分叉特性进行了研究;毕勤胜、陈予恕^[51]等在 T.Kapitaniak 基础上对多频外激联合作用时的 Duffing 系统的分叉和特性混沌性态进行了研究;又如 M.Amabili、Epellicano 和 M.P.Paydoussis^[47-50]基于工程中广泛存在的管或壳内流体在内外激作用下的动态特性特别是其稳定性和混沌性态进行了研究。

1.2.2 建模理论与计算机辅助工程设计(CAD/CAE)技术

建模理论特别是基于实际器件建模研究一直是理论界和工程界联手研究的关键课题之一,有关基于实际器件建模及仿真研究主要集中在汽车悬架减振器的研究^[57-97],因为 20 世纪是汽车业得到广泛发展的世纪,由于动力平顺性是衡量汽车质量的一项重要指标,因此这方面工作比较多,早期开展较详细的汽车悬架减振器研究的学者是 Lang^[57],1977 年他详细研究了汽车悬架的油阻尼减振器的特性,考虑了阻尼器流体的流动特性,汽穴影响等非线性因素,建立了一个含有 83 个结构参数的强非线性机理模型,并将仿真与实验比较获得了较好的吻合。但是该模型过分复杂导致设

计运算时间十分的漫长(在当时的大型机上需运算 7h 以上); Hagedorn 和 Wallaschek^[59]提出了引入等效线性原理研究 Lang 模型,但实验结果与其存在较大误差,因而对其做了一些简化的处理后又提出了一种简单实用的非线性模型来仿真实验结果。F.H. Besinger、D. Cebon^[60]等基于实验,提出了一种按速度分段的线性阻合阻尼特性模型,针对重型汽车减振器作了研究,并对系统进行了动力特性仿真研究。

Stefa、Andvym、Randy^[61]等 1997 年对 Lang 提出的复杂模型和 Reybrouck 于 1994 年提出的模型进行了评价和探讨,由于 Reybrouck 忽略粘滞特性过分简化,而 Lang 模型制作过分复杂需要大量的计算仿真时间,从而提出了一种非参数模型,这种模型将阻尼力模型化为速度和位移的多项式函数,虽然该模型中不含有物理结构参数,对设计器件无太多实用价值,但对解释非线性特性还是有参考价值的。

C. Surace、K. Worden^[63, 66]等 Roberto 和 Basso^[67]基于减振器件的实验,应用了三维阻力与速度和位移曲面法对其进行识别,该方法比传统的阻尼力—速度或位移法更加直观,同时从物理特性出发建立了较复杂的模型,获得了较为吻合的结果。龚宪生、唐一科^[80]结合理论和试验的方法对一种迟滞非线性振动系统进行了动力建模,将恢复力表示为基本性能参数的待定多项式形式,进而依据试验数据对其进行识别而达到建模分析目的。梁艳春^[81]等结合模糊理论,将结构化神经网络方法应用于包装件缓冲垫的非线性刚度特性识别问题,获得了较好的吻合。

另外自 20 世纪 70 年代以来特别是 20 世纪 90 年代各国学者对电流变液和磁流变液构成的减振器件技术进行了广泛深入的研究,并取得了很大的成功^[86, 87]。

1.2.3 参数优化研究

最早对考虑动态响应的机械优化研究评述的是 Seireg 和 E.J. 豪格^[93],他们主要归纳了 1985 年前有关动态响应的机械优化研

究有代表性的成果,实际上此时尚主要集中在线性模型基础上的动态响应的机械优化;自此以后很多学者进一步开展了大量的有关非线性特性时动态响应的机械优化研究,如 Balandin^[94]研究了具有线性阻尼、库仑阻尼及非线性刚度的隔振荡系统的参数优化。Toshihiko Asami 和 Osamu Nishihara^[97]等基于空气阻尼研究了其用于动力吸振的参数优化,提出了用 Mxael 模型替代 Voigt 模型的新思路,形成一种新的动力吸振器优化方法。A. M. Veprik V. Ibabitsky^[87]基于线性模型讨论了考虑精密设备的安装机柜动力特性时的隔振优化设计,获得了比传统效率高 67% 的隔振效果。Frolov Furman^[95]对基于控制角度考虑了隔振器的动力学特性,并具体讨论了一种油阻尼减振器的优化;俞徽、沈荣赢^[107]等对多层隔振系统的参数优化进行了研究。

近年来,有关动力吸振器方面的优化设计的文献较多^[97,98],最早研究动力吸振器参数方面的优化设计的是 Den Hratog,他提出了欠阻尼动力吸振器来衰减谐波振动,并绘制了设计曲线。Wae-burton 在 Den Hratog 的基础上考虑了谐波与白噪声激励的组合,并进一步讨论阻尼参数的影响。目前的研究大多致力于改变其适应的频宽,具体有两个方面的策略,一是设计具有一定自适应特性的阻尼吸振器,二是设法寻找到一组优化参数来满足较宽的频带;但基本上是局限于在确定激励下并线性化的或仅考虑刚度非线性问题。

另外,针对越来越复杂的优化模型,一些学者开展了有关优化方法研究,Sevin Pilkey^[93]研究了离散化和非线性规划以及控制方法;Afimiwala 和 Mayne^[93]提出了对具有非线性刚度和阻尼的减振器的优化问题,采用外罚点函数序列无约束极小化法(SUMT)解出了这个问题。Willmert 和 Fox^[93]采用内罚点函数序列无约束极小化法(SUMT)解出了多自由度的线性隔振问题。Snowdon^[106]引用一个三元件减振器和复式减振器来改进惯用的减振器。李强、周济等^[108]开展了基于复合遗传算法的汽车悬架系统动态优化。可以预言,由于基于非线性特征的动态优化设计的需要,今后将广泛