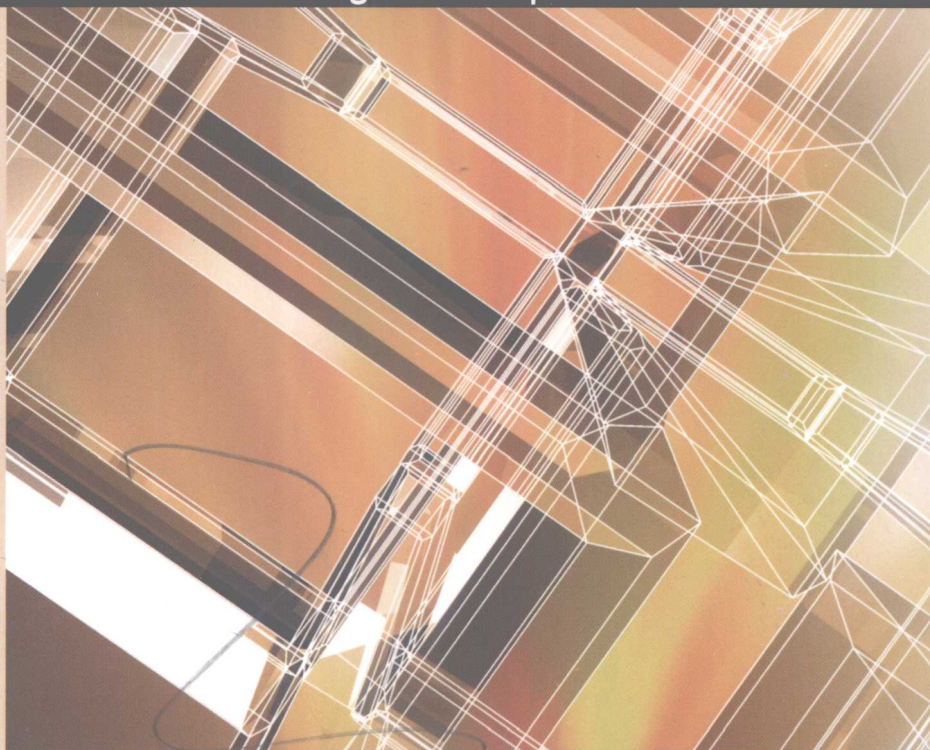




刘德顺 李夕兵 朱萍玉 著

# 冲击机械动力学与反演设计

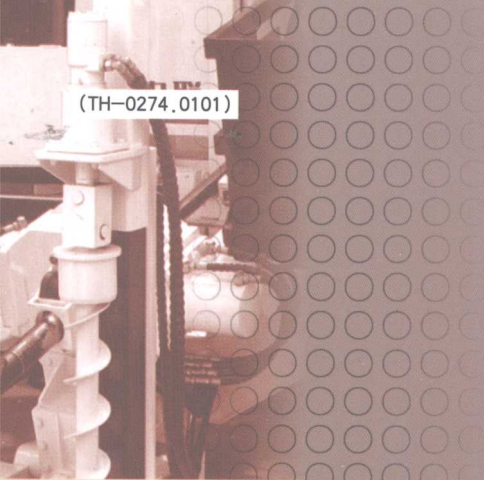
Dynamics and Inverse Design of Impact Machines



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

(TH-0274.0101)



科学出版社

联系电话: 010-64017506

E-mail: wufanjie@mail.sciencep.com

销售分类建议: 机械、矿业、土木

ISBN 978-7-03-020075-4



9 787030 200754 >

定价: 35.00 元

2007

TH113/27

2007

# 冲击机械动力学与反演设计

Dynamics and Inverse Design of Impact Machines

刘德顺 李夕兵 朱萍玉 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书论述了冲击机械系统波动力学理论和反演设计方法。主要内容有：冲击机械系统波动力学建模方法、理论基础和试验技术，冲锤与杆撞击应力波及其传播，冲击机械系统动力学分析与数值模拟，反演设计研究，冲锤反演设计，应力波传播部件反演设计，冲击激励反演设计，冲击部件的强度设计，环境友好型全水压凿岩机。

本书可供机械工程、矿业工程、土木工程等领域从事冲击机械、机械动力学和设计方法学研究的科研人员、工程技术人员和大专院校的教师、学生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

冲击机械动力学与反演设计 = Dynamics and Inverse Design of Impact Machines/刘德顺, 李夕兵, 朱萍玉著. —北京: 科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-020075-4

I. 冲… II. ①刘…②李…③朱… III. 冲击 (力学) —机械学: 动力学 IV. TH113

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 154785 号

责任编辑: 吴凡洁 吴伶俐/责任校对: 包志虹

责任印制: 刘士平/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>

陈海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007 年 12 月 第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007 年 12 月第一次印刷 印张: 13 3/4

印数: 1—2 500 字数: 252 000

定价: 35.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<明辉>)

## 前 言

撞击是人类最早利用的自然现象之一。根据撞击原理设计的冲击机械,能产生峰值极大的力脉冲,具有输出能量密度大、结构紧凑等优点,特别适宜于要求实现工作对象的位移、变形和破坏等作业,因而在矿业工程、土木工程和制造工程领域得到广泛应用。

冲击机械是一类特殊的机械,它是以应力波的形式进行能量传递的。这就决定了它不能像处理一般机械一样应用静力学、运动学和刚体动力学去阐述其工作原理。冲击机械原理属于弹性体动力学问题,而且这一弹性动力学问题不宜用振动的方法去解决,而必须用波动的方法才能精确地描述冲击机械系统的能量传递过程。也就是说,冲击机械系统动力学有别于一般的机械系统动力学。关于冲击机械系统动力学的研究至今虽已有 100 余年的历史,但在过去很长一段时间里,冲击机械系统动力学问题仅仅作为波动力学理论中的一个工程实例而受到力学界的关注,当时的工程界仍采用牛顿碰撞定理解释撞击作业的原理。直到 20 世纪 50 年代末期,冲击机械系统动力学研究才引起工程界的足够兴趣,并在矿业工程、土木工程和制造工程领域开始从机械设计与运行的角度研究冲击机械系统力学问题。

应用波动力学理论分析和模拟冲击机械中应力波产生与传播规律及整机效能属于冲击机械波动力学正问题,而已知产生与传播的应力波来辨识、设计冲击机械则是冲击机械动力学反问题。伴随工程反问题研究和数值计算技术的发展而出现的反演设计始于航空领域的机翼设计和叶栅设计,历经了半个世纪的发展。反演设计以理想的时空分布为目标,直接从时空分布求解机械结构形状尺寸和材料参数,如根据机翼空间上的速度分布设计机翼的形状尺寸。根据应力波产生与传播来设计冲击机械的相关部件既是冲击机械动力学从正问题到反问题研究领域的开拓,又是反演设计方法从空间分布目标到时间分布目标的扩展。虽然有关冲击机械动力学和反演设计研究在近半个世纪得到快速发展,其研究成果也散见于各相关行业的书籍和刊物之中,但这些研究成果大都囿于相关行业工作条件和具体的机械结构,而并未从方法论角度进行总结、梳理和归纳。

本书的研究工作分别得到国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金、中国博士后科学基金、国家高新技术研究发展计划(863 计划)的资助。

本书的出版得到了中南大学钟掘院士、古德生院士、刘宝琛院士、杨襄璧教授和赖海辉教授的悉心指导和亲切关怀;同时感谢东北大学闻邦椿院士和哈尔滨工业大学黄文虎院士的热情鼓励与推荐;感谢湖南科技大学彭佑多教授、伍先明

副教授和岳文辉副教授等同事们的合作与支持。

本书出版承蒙湖南科技大学学术著作出版基金资助，特致谢忱。

为应用于不同行业的各类冲击机械动力学和反演设计构建统一的理论框架是一件探索性和综合性很强的工作。虽然本书竭力从方法论的角度来介绍作者和国内外学者的研究成果，以期促进相关学科的发展，并使读者能从中得到某些启示，但限于作者的水平和能力，书中的某些内容还不很成熟，甚至可能存在谬误，祈望读者赐教。

作者

2007年9月

## 主要符号说明

- $A$ ——截面面积,  $\text{m}^2$   
 $c$ ——纵波传播速度,  $\text{m/s}$   
 $E$ ——弹性模量,  $\text{Pa}$   
 $E_0$ ——冲击能量,  $\text{J}$   
 $F$ ——作用力,  $\text{N}$   
 $F_p$ ——介质塑性极限阻力,  $\text{N}$   
 $J_p$ ——杆底的阻尼系数,  $\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$   
 $k$ ——弹簧刚度,  $\text{N/m}$   
 $K, K_l$ ——介质加载刚度,  $\text{N/m}$   
 $K_u$ ——介质卸载刚度,  $\text{N/m}$   
 $L$ ——杆的长度,  $\text{m}$   
 $m$ ——质量,  $\text{kg}$   
 $P$ ——顺波力,  $\text{N}$   
 $Q$ ——逆波力,  $\text{N}$   
 $r$ ——杆的半径,  $\text{m}$   
 $R$ ——撞击面曲率半径,  $\text{m}$   
 $S$ ——状态向量,  $S=[v, F]^T$   
 $t$ ——时间,  $\text{s}$   
 $T$ ——应力波持续时间 (周期),  $\text{s}$   
 $u$ ——位移,  $\text{m}$   
 $u_0$ ——击入量,  $\text{m}$   
 $v$ ——速度,  $\text{m/s}$   
 $v_0$ ——冲锤冲击速度,  $\text{m/s}$   
 $W$ ——功,  $\text{J}$   
 $x$ ——位置坐标,  $\text{m}$   
 $Z$ ——波阻,  $\text{N} \cdot \text{s/m}$   
 $\alpha$ ——无量纲撞击系数,  $\alpha=Z^2/(\bar{m}k)$   
 $\beta$ ——冲击系统与塑性介质匹配系数,  $\beta=F_p/(Zv_0)$   
 $\gamma$ ——冲击系统与弹性介质匹配系数,  $\gamma=Z^2/(mK)$   
 $\epsilon$ ——应变 (以压应变为正)

- $\xi$ ——无量纲阻尼系数,  $\xi=J/Z$   
 $\eta$ ——效率  
 $\mu$ ——单位长度杆的周边阻尼系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$   
 $\nu$ ——泊松比  
 $\sigma$ ——应力 (以压应力为正),  $\text{Pa}$   
 $\rho$ ——材料密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

在本书中, 一般采用上标 “\*” 来表示相应变量的无量纲形式; 采用下标 “h” 和 “r” 来区别冲锤 (hammer) 和杆 (rod) 的相应变量。

以上只是列出了书中涉及的主要符号, 其他变量的符号及其量纲在相应的章节都有说明。由于书中采用的变量较多, 为了尽量保持与国家标准和工程习惯相一致, 不得不牺牲全书符号的一致性, 因而出现个别符号多次定义的情况。虽然每个符号在赋予新的含义时都作了详尽的说明以免出现混淆, 但这却减少不了作者的遗憾。

在力学理论中, 一般以拉应力为正。由于冲击机械的受力是以压应力为主, 故本书以压应力为正, 以便于作图和计算。

# 目 录

## 前言

## 主要符号说明

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                            | 1  |
| 1.1 冲击机械概述 .....                          | 1  |
| 1.2 古典碰撞理论的局限性 .....                      | 3  |
| 1.3 波动力学分析的力学模型 .....                     | 4  |
| 1.3.1 基本元件 .....                          | 4  |
| 1.3.2 冲击系统 .....                          | 6  |
| 1.3.3 工作介质的动力学特性 .....                    | 8  |
| 1.3.4 冲击机械系统的性能指标 .....                   | 9  |
| 1.4 冲击机械系统动力学研究的简单回顾 .....                | 9  |
| 参考文献 .....                                | 12 |
| 第 2 章 波动力学理论与试验技术 .....                   | 13 |
| 2.1 一维弹性杆的波动力学 .....                      | 13 |
| 2.1.1 杆中纵波的控制方程 .....                     | 13 |
| 2.1.2 波动方程的解析解 .....                      | 15 |
| 2.2 波动力学数值分析方法 .....                      | 18 |
| 2.2.1 特征线法 .....                          | 19 |
| 2.2.2 透反射关系法 .....                        | 21 |
| 2.3 冲击机械系统波动力学试验技术 .....                  | 24 |
| 2.3.1 冲击试验装置 .....                        | 24 |
| 2.3.2 冲击波动力学试验原理 .....                    | 25 |
| 2.3.3 动态测试及数据处理系统 .....                   | 28 |
| 2.3.4 作用力-位移曲线的测试 .....                   | 30 |
| 2.3.5 Nicolet Odyssey 动态信号采集和数据处理系统 ..... | 33 |
| 参考文献 .....                                | 38 |
| 第 3 章 冲锤与杆撞击应力波及其传播研究 .....               | 40 |
| 3.1 等截面冲锤与杆撞击应力波 .....                    | 40 |
| 3.1.1 撞击应力波波形函数 .....                     | 40 |
| 3.1.2 应力波波形特征分析 .....                     | 42 |
| 3.2 冲锤与杆撞击局部变形力学模型 .....                  | 44 |
| 3.2.1 线性模型的物理意义 .....                     | 44 |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 3.2.2 撞击弹簧刚度 .....              | 46 |
| 3.3 冲锤与杆间接撞击应力波 .....           | 48 |
| 3.3.1 等截面冲锤 .....               | 48 |
| 3.3.2 刚性冲锤 .....                | 50 |
| 3.4 截面连续变化冲锤与杆撞击的特征线数值计算法 ..... | 52 |
| 3.4.1 数学模型 .....                | 52 |
| 3.4.2 特征线计算方法 .....             | 53 |
| 3.4.3 数值计算程序 .....              | 55 |
| 3.4.4 数值计算结果分析 .....            | 56 |
| 3.5 应力波通过非弹性杆元件的传播 .....        | 57 |
| 参考文献 .....                      | 63 |
| <b>第4章 冲击系统波动力学分析</b> .....     | 65 |
| 4.1 一元冲击系统的波动力学分析 .....         | 65 |
| 4.1.1 系统的动力学方程 .....            | 65 |
| 4.1.2 塑性介质下的系统动力学分析 .....       | 67 |
| 4.1.3 弹性介质下的系统动力学分析 .....       | 69 |
| 4.1.4 工程应用 .....                | 70 |
| 4.2 二元冲击系统的波动力学分析 .....         | 71 |
| 4.2.1 系统的动力学方程 .....            | 71 |
| 4.2.2 黏塑性介质下的系统动力学分析 .....      | 72 |
| 4.2.3 黏弹性介质下的系统动力学分析 .....      | 74 |
| 4.2.4 工程应用 .....                | 75 |
| 4.3 带弹簧的二元冲击系统波动力学分析 .....      | 77 |
| 4.3.1 塑性介质下的系统动力学分析 .....       | 77 |
| 4.3.2 弹性介质下的系统动力学分析 .....       | 78 |
| 4.3.3 工程应用 .....                | 79 |
| 4.4 冲击系统冲锤回弹的波动力学分析 .....       | 80 |
| 4.4.1 冲锤与杆撞击回弹定性分析 .....        | 80 |
| 4.4.2 冲锤回弹速度计算 .....            | 81 |
| 4.4.3 讨论 .....                  | 84 |
| 参考文献 .....                      | 85 |
| <b>第5章 冲击机械系统动态数值模拟</b> .....   | 86 |
| 5.1 冲击机械系统数值模拟方法 .....          | 86 |
| 5.1.1 数值模拟原理 .....              | 86 |
| 5.1.2 数值模拟程序 .....              | 91 |
| 5.1.3 试验验证与分析 .....             | 91 |
| 5.2 YYG90 液压凿岩机数值模拟 .....       | 94 |
| 5.2.1 冲击系统模型及其参数 .....          | 94 |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 5.2.2 模拟结果及分析 .....                  | 95         |
| 5.2.3 YYG90A 液压凿岩机冲击活塞的改进 .....      | 97         |
| 5.3 D12 筒式柴油打桩锤数值模拟研究 .....          | 99         |
| 5.3.1 冲击系统模型及其参数 .....               | 99         |
| 5.3.2 模拟结果及讨论 .....                  | 100        |
| 参考文献 .....                           | 102        |
| <b>第 6 章 反演设计研究进展 .....</b>          | <b>103</b> |
| 6.1 引言 .....                         | 103        |
| 6.2 反问题的数学描述 .....                   | 104        |
| 6.3 反设计问题 .....                      | 105        |
| 6.3.1 反设计的提法 .....                   | 105        |
| 6.3.2 反设计基本特征 .....                  | 108        |
| 6.3.3 反设计方法 .....                    | 111        |
| 6.4 反设计发展概况 .....                    | 112        |
| 参考文献 .....                           | 114        |
| <b>第 7 章 冲锤应力波反设计方法及应用 .....</b>     | <b>116</b> |
| 7.1 冲锤应力波反设计方法 .....                 | 116        |
| 7.1.1 冲锤与等截面杆撞击数学模型 .....            | 116        |
| 7.1.2 反演计算方法 .....                   | 118        |
| 7.1.3 冲锤与变截面杆撞击反设计 .....             | 119        |
| 7.1.4 反设计程序 .....                    | 122        |
| 7.2 理想应力波和冲锤最优形状研究 .....             | 122        |
| 7.2.1 理想应力波波形 .....                  | 122        |
| 7.2.2 冲锤的合理形状 .....                  | 125        |
| 7.3 岩石动态性能测试中的合理加载应力波波形及冲锤形状研究 ..... | 126        |
| 7.3.1 理论分析 .....                     | 127        |
| 7.3.2 冲锤反设计 .....                    | 128        |
| 7.3.3 小直径 SHPB 试验机及其试验结果 .....       | 128        |
| 7.3.4 大直径 SHPB 试验机及其实验结果 .....       | 130        |
| 参考文献 .....                           | 131        |
| <b>第 8 章 应力波传播部件反设计 .....</b>        | <b>133</b> |
| 8.1 部件波传播矩阵方程 .....                  | 133        |
| 8.1.1 波动状态向量 .....                   | 133        |
| 8.1.2 单元的波传播方程 .....                 | 134        |
| 8.1.3 部件的波传递矩阵 .....                 | 135        |
| 8.2 等透射率部件的动态反设计原理 .....             | 137        |
| 8.2.1 透射率和反射率定义 .....                | 137        |
| 8.2.2 部件设计反演策略 .....                 | 137        |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 8.3 等透射率部件动态反演设计程序与应用     | 139 |
| 8.3.1 反演设计程序              | 139 |
| 8.3.2 反演设计示例              | 140 |
| 8.4 反演解的分布和误差分析           | 143 |
| 参考文献                      | 145 |
| <b>第9章 系统冲击激励宜人化反演设计</b>  | 146 |
| 9.1 引言                    | 146 |
| 9.2 提升机绳系激励反演设计           | 146 |
| 9.2.1 关于宜人化冲击激励的确定        | 146 |
| 9.2.2 由绳系响应计算激励的反演设计方法    | 147 |
| 9.2.3 宜人化激励加速度的反演设计与分析    | 149 |
| 9.3 车辆道路线形反演设计            | 152 |
| 9.3.1 缓和竖曲线               | 152 |
| 9.3.2 车辆动力学模型             | 154 |
| 9.3.3 宜人化动力学评价指标          | 154 |
| 9.3.4 反演设计结果              | 155 |
| 参考文献                      | 156 |
| <b>第10章 冲击部件的强度设计</b>     | 157 |
| 10.1 冲击部件的受力与失效分析         | 157 |
| 10.1.1 受力分析               | 157 |
| 10.1.2 失效形式分析             | 161 |
| 10.2 冲击部件的应力谱             | 164 |
| 10.2.1 理论应力谱              | 164 |
| 10.2.2 实测应力谱              | 164 |
| 10.2.3 讨论                 | 165 |
| 10.3 冲击部件强度设计方法           | 167 |
| 10.3.1 疲劳强度校核             | 167 |
| 10.3.2 可靠性设计              | 169 |
| 10.4 冲击部件疲劳寿命估算           | 171 |
| 10.4.1 高应力低循环次数下的疲劳寿命估算   | 171 |
| 10.4.2 低应力高循环次数下的疲劳寿命估算   | 172 |
| 10.4.3 疲劳裂纹扩展寿命估算         | 173 |
| 10.5 延长冲击部件使用寿命的途径        | 175 |
| 参考文献                      | 176 |
| <b>第11章 环境友好型全水压冲击凿岩机</b> | 178 |
| 11.1 环境友好型全水压凿岩机          | 178 |
| 11.1.1 全水压凿岩机冲击器工作原理和结构   | 179 |
| 11.1.2 全水压凿岩机机头转钎原理和结构    | 180 |

---

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 11.1.3 全水压凿岩机支撑推进原理和支腿结构 ..... | 181 |
| 11.2 环境友好型全水压支腿式凿岩机设计 .....    | 182 |
| 11.2.1 冲击凿岩机动力学融合概念设计 .....    | 182 |
| 11.2.2 冲击凿岩机动力学融合设计公式 .....    | 184 |
| 11.2.3 冲击凿岩机参数设计计算 .....       | 186 |
| 11.2.4 全水压凿岩机动力学数值模拟 .....     | 192 |
| 11.3 环境友好型全水压凿岩机特殊设计与工艺 .....  | 194 |
| 11.3.1 水介质的特点和存在的问题 .....      | 194 |
| 11.3.2 全水压凿岩机密封设计 .....        | 195 |
| 11.3.3 全水压凿岩机防腐耐磨设计与处理工艺 ..... | 197 |
| 参考文献 .....                     | 198 |

# CONTENTS

## PREFACE

## NOTATION

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>CHAPTER 1 INTRODUCTION</b>                                                               | 1  |
| 1.1 Brief Description of Impact Machines                                                    | 1  |
| 1.2 Limitation of Newton's Law of Collision                                                 | 3  |
| 1.3 Wave Mechanics Models of Impact Machines                                                | 4  |
| 1.3.1 Mechanics Elements                                                                    | 4  |
| 1.3.2 Impact Systems                                                                        | 6  |
| 1.3.3 Dynamic Characteristics of Mediums                                                    | 8  |
| 1.3.4 Performance Indexes of Impact Machines                                                | 9  |
| 1.4 Brief Historical Development of Mechanical Impact Dynamics                              | 9  |
| References                                                                                  | 12 |
| <b>CHAPTER 2 WAVE MECHANICS AND EXPERIMENTAL TECHNIQUES</b>                                 | 13 |
| 2.1 One-dimensional Wave Mechanics in Elastic Rods                                          | 13 |
| 2.1.1 Wave Equation in Elastic Rods                                                         | 13 |
| 2.1.2 Analytical Solution to Wave Equation                                                  | 15 |
| 2.2 Numerically Analytical Methods of Wave Equation                                         | 18 |
| 2.2.1 Method of Characteristics                                                             | 19 |
| 2.2.2 Methods of Transmissivity and Reflectivity                                            | 21 |
| 2.3 Dynamic Experimental Techniques for Impact Machines                                     | 24 |
| 2.3.1 Experimental Devices of Impact Machines                                               | 24 |
| 2.3.2 Experimental Methods of Impact Machines                                               | 25 |
| 2.3.3 Dynamic Measurement and Data Processing Systems                                       | 28 |
| 2.3.4 Measurement of Force-Displacement Curves                                              | 30 |
| 2.3.5 Measurement System based Nicolet Odyssey Data Acquisition System                      | 33 |
| References                                                                                  | 38 |
| <b>CHAPTER 3 STRESS WAVE PRODUCED BY THE IMPACT OF HAMMERS ON RODS AND WAVE PROPAGATION</b> | 40 |
| 3.1 Stress Wave Produced by the Impact of a Hammer on a Rod with the Same Cross-section     | 40 |
| 3.1.1 Functions of Stress Waveforms                                                         | 40 |
| 3.1.2 Analysis of Stress Waveforms                                                          | 42 |

|                                                                    |                                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2                                                                | Contact Phenomena Produced by the Impact of a Hammer on a Rod .....                                  | 44        |
| 3.2.1                                                              | Physical Meaning of Linear Contact Deformation Model .....                                           | 44        |
| 3.2.2                                                              | Calculation of the Constant of Impact Contact Spring .....                                           | 46        |
| 3.3                                                                | Stress Wave Produced by Indirect Impact of a Hammer on a Rod .....                                   | 48        |
| 3.3.1                                                              | Same Cross-section Hammer .....                                                                      | 48        |
| 3.3.2                                                              | Rigid Hammer .....                                                                                   | 50        |
| 3.4                                                                | Numerical Method for the Impact of a Hammer with Progressively Changing Cross-section on a Rod ..... | 52        |
| 3.4.1                                                              | Mathematical Model .....                                                                             | 52        |
| 3.4.2                                                              | Characteristic Line Nets .....                                                                       | 53        |
| 3.4.3                                                              | Calculation Procedure .....                                                                          | 55        |
| 3.4.4                                                              | Analysis of Calculation Results .....                                                                | 56        |
| 3.5                                                                | Wave Propagation through Other Mechanics Elements .....                                              | 57        |
|                                                                    | References .....                                                                                     | 63        |
| <b>CHAPTER 4 WAVE MECHANICS OF MECHANICAL IMPACT SYSTEMS .....</b> |                                                                                                      | <b>65</b> |
| 4.1                                                                | Wave Mechanics of Impact Systems Involving a Single Rod .....                                        | 65        |
| 4.1.1                                                              | Dynamics Equation .....                                                                              | 65        |
| 4.1.2                                                              | Analysis of the Impact on Plastic Mediums .....                                                      | 67        |
| 4.1.3                                                              | Analysis of the Impact on Elastic Mediums .....                                                      | 69        |
| 4.1.4                                                              | Applications .....                                                                                   | 70        |
| 4.2                                                                | Wave Mechanics of Impact Systems Involving Two Rods .....                                            | 71        |
| 4.2.1                                                              | Dynamics Equation .....                                                                              | 71        |
| 4.2.2                                                              | Analysis of the Impact on Visco-plastic Mediums .....                                                | 72        |
| 4.2.3                                                              | Analysis of the Impact on Visco-elastic Mediums .....                                                | 74        |
| 4.2.4                                                              | Applications .....                                                                                   | 75        |
| 4.3                                                                | Wave Mechanics of Impact Systems Involving a Hammer, a Rod and a Spring .....                        | 77        |
| 4.3.1                                                              | Analysis of the Impact on Plastic Mediums .....                                                      | 77        |
| 4.3.2                                                              | Analysis of the Impact on Elastic Mediums .....                                                      | 78        |
| 4.3.3                                                              | Applications .....                                                                                   | 79        |
| 4.4                                                                | Theoretical Studies on the Rebound of the Hammers in Impact Systems .....                            | 80        |
| 4.4.1                                                              | Analysis of the Rebound of the Hammers .....                                                         | 80        |
| 4.4.2                                                              | Calculation of Rebound Velocity of the Hammer .....                                                  | 81        |
| 4.4.3                                                              | Discussion .....                                                                                     | 84        |
|                                                                    | References .....                                                                                     | 85        |

|                                                                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>CHAPTER 5 NUMERICAL SIMULATION OF DYNAMIC PROCESS OF IMPACT MACHINES .....</b>                                     | <b>86</b>  |
| 5.1 Numerical Simulation Method of Impact Systems .....                                                               | 86         |
| 5.1.1 Numerical Simulation .....                                                                                      | 86         |
| 5.1.2 Microcomputer Simulation Program .....                                                                          | 91         |
| 5.1.3 Experimental Verification .....                                                                                 | 91         |
| 5.2 Numerical Simulation Studies on YYG90 Hydraulic Rock Drill .....                                                  | 94         |
| 5.2.1 Mechanics Model and Its Parameters .....                                                                        | 94         |
| 5.2.2 Analysis of Numerical Simulation Results .....                                                                  | 95         |
| 5.2.3 Improvement of the Piston Geometry of YYG90 Hydraulic Rock Drill .....                                          | 97         |
| 5.3 Numerical Simulation Studies on D12 Diesel Pile Hammer .....                                                      | 99         |
| 5.3.1 Mechanics Model and Its Parameters .....                                                                        | 99         |
| 5.3.2 Discussion on Numerical Simulation Results .....                                                                | 100        |
| References .....                                                                                                      | 102        |
| <b>CHAPTER 6 RESEARCH PROGRESS IN INVERSE DESIGN .....</b>                                                            | <b>103</b> |
| 6.1 Introduction .....                                                                                                | 103        |
| 6.2 Mathematical Description .....                                                                                    | 104        |
| 6.3 Inverse Design Methodology .....                                                                                  | 105        |
| 6.3.1 Definition of Inverse Design .....                                                                              | 105        |
| 6.3.2 Characteristics of Inverse Design .....                                                                         | 108        |
| 6.3.3 Approaches of Inverse Design .....                                                                              | 111        |
| 6.4 Review on Inverse Design .....                                                                                    | 112        |
| References .....                                                                                                      | 114        |
| <b>CHAPTER 7 INVERSE DESIGN OF THE HAMMER GEOMETRY BASED ON THE IMPACT STRESS WAVEFORM AND ITS APPLICATIONS .....</b> | <b>116</b> |
| 7.1 Inverse Design of the Hammer Geometry from the Impact Stress Waveform .....                                       | 116        |
| 7.1.1 Mathematical Model of the Impact of the Hammer on the Same Cross-section Rod .....                              | 116        |
| 7.1.2 Inverse Design Method .....                                                                                     | 118        |
| 7.1.3 Inverse Design of the Hammer for the Changing Cross-section Rod .....                                           | 119        |
| 7.1.4 Inverse Design Procedure .....                                                                                  | 122        |
| 7.2 Studies on Optimal Stress Waveform and Optimal Profile of the Hammer .....                                        | 122        |
| 7.2.1 Optimization of Stress Waveform .....                                                                           | 122        |
| 7.2.2 Study on Optimal Profile of the Hammer .....                                                                    | 125        |
| 7.3 Studies on Reasonable Loading Waveform and Profile of the Impa-                                                   |            |

|                                                                                             |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ctor in Rock Dynamic Measurement .....                                                      | 126        |
| 7.3.1 Theoretical Analysis .....                                                            | 127        |
| 7.3.2 Inverse Design of the Hammer .....                                                    | 128        |
| 7.3.3 Inverse Design of the Small Diameter SHPB Impactor and Its Experimental Results ..... | 128        |
| 7.3.4 Inverse Design of the Large Diameter SHPB Impactor and Its Experimental Results ..... | 130        |
| References .....                                                                            | 131        |
| <b>CHAPTER 8 INVERSE DESIGN OF STRESS WAVE PROPAGATION IN THE ELASTIC PARTS .....</b>       | <b>133</b> |
| 8.1 Stress Wave Propagation Equations in the Elastic Parts .....                            | 133        |
| 8.1.1 Wave Vectors .....                                                                    | 133        |
| 8.1.2 Wave Equations .....                                                                  | 134        |
| 8.1.3 Wave Matrix of the Parts .....                                                        | 135        |
| 8.2 Inverse Design of the Parts with the Same Transmissibility .....                        | 137        |
| 8.2.1 Definition of Transmissibility and Reflectivity .....                                 | 137        |
| 8.2.2 Approaches of Inverse Design .....                                                    | 137        |
| 8.3 Sketch and Examples of Inverse Design .....                                             | 139        |
| 8.3.1 Sketch of Inverse Design .....                                                        | 139        |
| 8.3.2 Examples of Inverse Design .....                                                      | 140        |
| 8.4 Distribution and Error Analysis of Inverse Design .....                                 | 143        |
| References .....                                                                            | 145        |
| <b>CHAPTER 9 INVERSE DESIGN OF PLEASANT IMPACT EXCITATION SYSTEMS .....</b>                 | <b>146</b> |
| 9.1 Introduction .....                                                                      | 146        |
| 9.2 Inverse Design of the Acceleration Curve of Mine Winder Rope System .....               | 146        |
| 9.2.1 Determination of Pleasant Impact Excitation .....                                     | 146        |
| 9.2.2 Inversion Method from the Response of the Rope System .....                           | 147        |
| 9.2.3 Inverse Design of Pleasant Acceleration Curves .....                                  | 149        |
| 9.3 Inverse Design of Transition Vertical Curve for Vehicles .....                          | 152        |
| 9.3.1 Transition Vertical Curves .....                                                      | 152        |
| 9.3.2 Dynamics Model of Vehicle-road .....                                                  | 154        |
| 9.3.3 Valuation Index of Safety and Comfort .....                                           | 154        |
| 9.3.4 Results of Inverse Design .....                                                       | 155        |
| References .....                                                                            | 156        |