

中国杰出青年科学基金和中国博士后科学基金资助

冲击机械系统 动力学

刘德顺 李夕兵 著

科学出版社

中国杰出青年科学基金和中国博士后科学基金资助

冲击机械系统动力学

刘德顺 李夕兵 著

科学出版社

1999

National Science Fund for Distinguished Young Scholars of
China and China Postdoctoral Science Foundation

Mechanical Impact Dynamics

By Liu Deshun Li Xibing

Science Press
Beijing, China
1 9 9 9

内 容 简 介

本书论述冲击机械系统波动力学理论和设计方法.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;冲锤反演设计和冲击部件的强度设计.

本书可供机械工程、矿业工程、土木工程等领域内从事机械动力学、冲击机械和波动力学研究的科研人员、工程技术人员和大专学校上述专业的教师、学生参考.

图书在版编目(CIP)数据

冲击机械系统动力学/刘德顺、李夕兵著. - 北京:科学出版社, 1999.5

ISBN 7-03-007275-8

I. 冲… II. ①刘…②李… III. 冲击, 机械系统, 动力学 IV. TH113

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 02914 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999 年 7 月 第 一 版 开本:850×1168 1/32

1999 年 7 月 第 一 次 印 刷 印张:6

印数:1—1 500 字数:146 000

定 价:15.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

引 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等领域得到了广泛应用。

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。直到本世纪 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等领域开始从机械设计与运行的角度研究冲击机械系统动力学问题,其研究成果散见于各相关行业的书籍和刊物之中。这些研究成果虽局限于各行业工作条件和具体的机械结构,但却大大丰富了冲击机械系统动力学研究的内容,为学科的发展奠定了基础。

本书从冲击机械的一般性理论出发,较系统地论述了冲击机械系统动力学的理论基础、计算方法和试验技术。全书共分七章,主要包括以下四部分内容:第一部分为基本概念和研究方法,主要介绍冲击机械系统动力学的建模方法、理论分析方法、数值计算方

法和试验技术;第二部分论述各冲击部件的几何特性和力学特性,以及应力波波形和能量传递之间的规律,这部分内容既是第一部分内容的应用研究,又是后一部分的理论基础;第三部分为冲击机械系统波动力学分析,主要应用理论分析和数值模拟方法,研究冲击系统中应力波传播规律、系统和工作介质的动力学特性与冲击机械系统的性能指标的关系;第四部分为冲击机械系统波动力学设计,阐述了由撞击应力波直接设计冲锤结构的反演设计方法及相关的研究成果,以及基于应力波的冲击部件的强度设计方法.本书主要介绍作者近年来的研究工作,为保持全书的系统性而吸收了国内外学者的观点和研究成果;全书在突出各类冲击机械的一般性理论的同时,介绍了有关成果在具体的冲击机械中的应用.

为不同行业的各类冲击机械系统构建统一的动力学理论框架是一件探索性很强的工作.在本书中,某些内容还不很成熟,甚至可能存在谬误,祈望读者赐教.

主要符号与说明

- A ——截面面积, m^2
 c ——纵波传播速度, m/s
 E ——杨氏弹性模量, Pa
 E_0 ——冲击能量, J
 F ——作用力, N
 F_p ——介质塑性极限阻力, N
 J_p ——杆底的阻尼系数, Ns/m^2
 k ——弹簧刚度, N/m
 K, K_l ——介质加载刚度, N/m
 K_u ——介质卸载刚度, N/m
 L ——杆之长度, m
 m ——质量, kg
 P ——顺波力, N
 Q ——逆波力, N
 r ——杆之半径, m
 R ——撞击面曲率半径, m
 S ——状态向量, $S = [v, F]^T$
 t ——时间, s
 T ——应力波持续时间(周期), s
 u ——位移, m
 u_0 ——击入量, m
 v ——速度, m/s
 v_0 ——冲锤冲击速度, m/s
 W ——功, J

- x ——位置坐标, m
 Z ——波阻, N·s/m
 α ——无量纲撞击系数, $\alpha = Z^2/(mk)$
 β ——冲击系统与塑性介质匹配系数, $\beta = F_p/(Zv_0)$
 γ ——冲击系统与弹性介质匹配系数, $\gamma = Z^2/(mK)$
 ϵ ——应变(以压应变为正)
 ζ ——无量纲阻尼系数, $\zeta = J/Z$
 η ——效率
 μ ——单位长度杆的周边阻尼系数, Pa·s
 ν ——泊松比
 σ ——应力(以压应力为正), Pa
 ρ ——材料密度, kg/m³

在本书中,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

引言	i
主要符号与说明	xii
第一章 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	5
1.3.1 基本元件	5
1.3.2 冲击系统	7
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	12
1.4 冲击机械系统动力学研究的简单回顾	12
参考文献	16
第二章 波动力学理论与试验技术	17
2.1 一维弹性杆的波动力学	17
2.1.1 杆中纵波的控制方程	17
2.1.2 波动方程的解析解	20
2.2 波动力学数值分析方法	24
2.2.1 特征线法	24
2.2.2 透反射关系法	28
2.3 冲击机械系统波动力学试验技术	31
2.3.1 冲击试验装置	32
2.3.2 冲击波动力学试验原理	35
2.3.3 测试及数据处理系统	38
2.3.4 力-位移曲线的测试	42
参考文献	45

第三章 冲锤与杆撞击的应力波及其传播研究	46
3.1 等截面冲锤与杆撞击应力波	46
3.1.1 撞击应力波波形函数	46
3.1.2 应力波波形特征分析	48
3.2 冲锤与杆撞击局部变形力学模型	51
3.2.1 线性模型的物理意义	52
3.2.2 撞击弹簧刚度	54
3.3 冲锤与杆间接撞击应力波	56
3.3.1 等截面冲锤	57
3.3.2 刚性冲锤	59
3.4 截面连续变化冲锤与杆撞击的特征线数值计 算法	62
3.4.1 数学模型	62
3.4.2 特征线计算方法	63
3.4.3 数值计算程序	66
3.4.4 数值计算结果分析	67
3.5 应力波通过非弹性杆元件的传播	69
参考文献	76
第四章 冲击系统的波动力学分析	77
4.1 一元冲击系统的波动力学分析	77
4.1.1 系统的动力学方程	77
4.1.2 塑性介质下的系统动力学分析	80
4.1.3 弹性介质下的系统动力学分析	81
4.1.4 工程应用	83
4.2 二元冲击系统的波动力学分析	84
4.2.1 系统的动力学方程	85
4.2.2 粘塑性介质下的系统动力学分析	86
4.2.3 粘弹性介质下的系统动力学分析	88
4.2.4 工程应用	89
4.3 带弹簧的二元冲击系统波动力学分析	91

4.3.1	塑性介质下的系统动力学分析	92
4.3.2	弹性介质下的系统动力学分析	93
4.3.3	工程应用	94
4.4	冲击系统冲锤回弹的波动力学分析	95
4.4.1	冲锤与杆撞击回弹定性分析	96
4.4.2	冲锤回弹速度计算	97
4.4.3	讨论	102
	参考文献	103
第五章	冲击机械系统的动态数值模拟	104
5.1	冲击机械系统的数值模拟方法	104
5.1.1	数值模拟原理	104
5.1.2	数值模拟程序	110
5.1.3	试验验证与分析	112
5.2	YYG90 液压凿岩机数值模拟研究	114
5.2.1	冲击系统模型及其参数	114
5.2.2	模拟结果及分析	115
5.2.3	YYG90A 液压凿岩机冲击活塞的改进	119
5.3	D12 筒式柴油打桩锤数值模拟研究	120
5.3.1	冲击系统模型及其参数	120
5.3.2	模拟结果及讨论	122
	参考文献	125
第六章	冲锤应力波反演设计方法及应用	126
6.1	冲锤应力波反演设计方法	126
6.1.1	冲锤与杆撞击的数学模型	126
6.1.2	反演计算方法	128
6.1.3	反演设计程序	131
6.1.4	关于反演设计的讨论	131
6.2	理想应力波和冲锤最优形状研究	134
6.2.1	理想应力波波形	135
6.2.2	冲锤的合理形状	138

6.3	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	140
6.3.1	理论分析	141
6.3.2	冲锤反演设计	142
6.3.3	试验结果	144
	参考文献	145
第七章	冲击部件的强度设计	147
7.1	冲击部件的受力与失效分析	147
7.1.1	受力分析	147
7.1.2	失效形式分析	152
7.2	冲击部件的应力谱	156
7.2.1	理论应力谱	156
7.2.2	实测应力谱	157
7.2.3	讨论	157
7.3	冲击部件强度设计方法	160
7.3.1	疲劳强度校核	160
7.3.2	可靠性设计	162
7.4	冲击部件疲劳寿命估算	165
7.4.1	高应力低循环次数下的疲劳寿命估算	165
7.4.2	低应力高循环次数下的疲劳寿命估算	167
7.4.3	疲劳裂纹扩展寿命估算	168
7.5	延长冲击部件使用寿命的途径	170
	参考文献	172
	致谢	174

CONTENTS

PREFACE	i
NOTATION	xii
CHAPTER 1 INTRODUCTION	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	5
1.3.1 Mechanics Elements	5
1.3.2 Impact Systems	7
1.3.3 Dynamic Characteristics of Mediums	8
1.3.4 Performance Indexes of Impact Machines	12
1.4 Brief Historical Development of Mechanical Impact Dynamics	12
References	16
CHAPTER 2 WAVE MECHANICS AND EXPERIMENTAL TECHNIQUES	17
2.1 One-dimensional Wave Mechanics in Elastic Rods	17
2.1.1 Wave Equation in Elastic Rods	17
2.1.2 Analytical Solution to Wave Equation	20
2.2 Numerically Analytical Methods of Wave Equation	24
2.2.1 Method of Characteristics	24
2.2.2 Methods of Transmissivity and Reflectivity	28
2.3 Dynamic Experimental Techniques for Impact Machines	31

2.3.1	Experimental Devices	32
2.3.2	Experimental Methods of Impact Machines	35
2.3.3	Dynamic Measurement and Data Processing Systems	38
2.3.4	Measurement of Force-Displacement Curves	42
	References	45
CHAPTER 3 STRESS WAVE PRODUCED BY THE IMPACT OF HAMMERS ON RODS AND WAVE PROPAGATION		
		46
3.1	Stress Wave Produced by the Impact of a Hammer on a Rod with the Same Cross-section	46
3.1.1	Functions of Stress Waveforms	46
3.1.2	Analysis of Stress Waveforms	48
3.2	Contact Phenomena Produced by the Impact of a Hammer on a Rod	51
3.2.1	Physical Meaning of Linear Contact Deformation Model	52
3.2.2	Calculation of the Constant of Impact Contact Spring	54
3.3	Stress Wave Produced by Indirect Impact of a Hammer on a Rod	56
3.3.1	Same Cross-section Hammer	57
3.3.2	Rigid Hammer	59
3.4	Numerical Method for the Impact of a Hammer with Progressively Changing Cross-section on a Rod	62
3.4.1	Mathematical Model	62
3.4.2	Characteristic Line Nets	63
3.4.3	Calculation Procedure	66
3.4.4	Analysis of Calculation Results	67
3.5	Wave Propagation through other Mechanics	

Elements	69
References	76
CHAPTER 4 WAVE MECHANICS OF MECHANICAL	
IMPACT SYSTEMS	77
4.1 Wave Mechanics of Impact Systems Involving a	
Single Rod	77
4.1.1 Dynamics Equation	77
4.1.2 Analysis of the Impact on Plastic Mediums	80
4.1.3 Analysis of the Impact on Elastic Mediums	81
4.1.4 Applications	83
4.2 Wave Mechanics of Impact Systems Involving Two	
Rods	84
4.2.1 Dynamics Equation	85
4.2.2 Analysis of the Impact on Visco-plastic Mediums	86
4.2.3 Analysis of the Impact on Visco-elastic Mediums	88
4.2.4 Applications	89
4.3 Wave Mechanics of Impact Systems Involving a	
Hammer, a Rod and a Spring	91
4.3.1 Analysis of the Impact on Plastic Mediums	92
4.3.2 Analysis of the Impact on Elastic Mediums	93
4.3.3 Applications	94
4.4 Theoretical Studies on the Rebound of the Hammers	
in Impact Systems	95
4.4.1 Analysis of the Rebound of the Hammers	96
4.4.2 Calculation of Rebound Velocity of the Hammer	97
4.4.3 Discussion	102
References	103
CHAPTER 5 NUMERICAL SIMULATION OF DYNAMIC	
PROCESS OF IMPACT MACHINES	104

5.1	Numerical Simulation Method of Impact Systems	104
5.1.1	Numerical Simulation	104
5.1.2	Microcomputer Simulation Programe	110
5.1.3	Experimental Verification	112
5.2	Numerical Simulation Studies on YYG90 Hydraulic Rock Drill	114
5.2.1	Mechanics Model and Its Parameters	114
5.2.2	Analysis of Numerical Simulation Results	115
5.2.3	Improvement of the Piston Geometry of YYG90 Hydraulic Rock Drill	119
5.3	Numerical Simulation Studies on D12 Diesel Pile Hammer	120
5.3.1	Mechanics Model and Its Parameters	120
5.3.2	Discussion on Numerical Simulation Results	122
	References	125

CHAPTER 6 INVERSE DESIGN OF THE HAMMER

GEOMETRY BASED ON THE IMPACT STRESS

WAVEFORM AND ITS APPLICATIONS ... 126

6.1	Inverse Design of the Hammer Geometry from the Impact Stress Waveform	126
6.1.1	Mathematical Model	126
6.1.2	Inverse Design Theory	128
6.1.3	Inverse Design Procedure	131
6.1.4	Discussion on Inverse Design	131
6.2	Studies on Optimal Stress Waveform and Optimal Profile of the Hammer	134
6.2.1	Optimization of Stress Waveform	135
6.2.2	Study on Optimal Profile of the Hammer	138
6.3	Studies on Reasonable Loading Waveform and Profile	

of the Impactor in Rock Dynamic Measurement	··· 140
6.3.1 Theoretical Analysis	····· 141
6.3.2 Inverse Design of the Impactor	····· 142
6.3.3 Experimental Results	····· 144
References	····· 145
CHAPTER 7 STRENGTH DESIGN OF IMPACT PARTS	····· 147
7.1 Analysis of Forces and Failures of Impact Parts	··· 147
7.1.1 Analysis of the Force Histories of Impact Parts	····· 147
7.1.2 Analysis of the Failures of Impact Parts	····· 152
7.2 Stress Spectral Analysis of Impact Parts	····· 156
7.2.1 Calculated Stress Spectrum	····· 156
7.2.2 Measured Stress Spectrum	····· 157
7.2.3 Discussion on the Stress Spectra	····· 157
7.3 Fatigue Strength Design of Impact Parts	····· 160
7.3.1 Calculation of Fatigue Strength	····· 160
7.3.2 Reliability Design	····· 162
7.4 Prediction of the Fatigue Life of Impact Parts	····· 165
7.4.1 Prediction of High-stress Low-cycle Fatigue Life	····· 165
7.4.2 Prediction of Low-stress High-cycle Fatigue Life	····· 167
7.4.3 Prediction of Fatigue Crack Propagation Life	····· 168
7.5 Prolonging Fatigue Life of Impact Parts	····· 170
References	····· 172
ACKNOWLEDGEMENTS	····· 174