

# 爆炸与冲击电测技术

Explosion and Shock Measuring Technique

黄正平 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 爆炸与冲击电测技术

Explosion and Shock  
Measuring Technique

黄正平 著

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

爆炸与冲击电测技术/黄正平著. —北京:国防工业出版社,2006.7

ISBN 7-118-04527-6

I. 爆... II. 黄... III. ①爆炸—电测法②冲击波—电测法 IV. TB971

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 043771 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 9 $\frac{3}{4}$  字数 243 千字

2006 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 34.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金**  
评审委员会

## 国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员	刘成海				
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋		
秘书长	张又栋				
副秘书长	彭华良	蔡镛			
委员	于景元	王小谟	甘茂治	刘世参	
	杨星豪	李德毅	吴有生	何新贵	
	佟玉民	宋家树	张立同	张鸿元	
	陈冀胜	周一宇	赵凤起	侯正明	
	常显奇	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	
	舒长胜				

(按姓名笔画排序)

## 前 言

爆炸与冲击电测技术是以爆炸力学、爆轰学和电磁学为基础的一门综合技术学科,其主要内容包括多种高速动态测量技术,适用于监测炸药起爆过程、爆轰过程、爆炸作用过程和高速撞击过程等,测量这些过程中的热力学状态参量(如压强、密度和温度等)和运动参量(位移、速度和加速度)随时间和空间高速变化的关系。在凝聚炸药的爆炸实验中或在高速碰撞实验中,压强高达几十个GPa( $10^6$ 帕斯卡)、速度高达几千米/秒,而有效测量时间只有几个微秒( $10^{-6}$ 秒)。因此要求爆炸与冲击过程的测试系统具有足够快的捕获单次瞬态信号的能力和响应(或反应)速率。

在一种爆炸与冲击过程实验中可能配置了多种参数测量系统,这些测量系统必须由参试人员去配置、调试和使用,参试人员掌握爆炸与冲击电测技术的水平将直接影响获取测量结果的数量和质量。所以这种人机系统中,掌握爆炸与冲击电测技术的人是决定性因素。爆炸与冲击电测技术不仅为爆炸与冲击过程实验研究服务,也为爆炸力学工程计算、爆轰数值模拟以及材料动态力学响应研究服务,提供足够多的可靠的测量信息,如材料的经验状态方程,某过程的初始条件、边界条件和运动图像等。

本书中适用于动态高压测量的有电探极法、电磁法、压阻法和压电法等(1GPa~100GPa);适用于动态中低压测量的有压电法和压阻法等(0.1MPa~1GPa)。

本书共7章。第一章详细介绍了被测对象的性质,利用爆炸力学基本理论分析了爆轰波和冲击波信号特征,峰值强度及其衰减速率。本书第二章简要介绍爆炸测量系统配置、系统频宽与量程的选择。第三章着重介绍了多种常用电探极的结构和工作机

理、脉冲形成电路和多路时间间隔测量系统的配置等。电探极法是一种测量冲击波、爆轰波、飞片和自由表面运动速度的方法,它的初始测量结果是时空平面上的运动迹线,除了计算运动速度外还可以推算粒子速度、密度和压力等参量。第四章着重介绍电磁速度传感器和电磁冲量传感器的工作原理与结构、电磁速度敏感元件与电磁冲量敏感元件、电磁铁与亥姆霍兹线圈和测量系统配置等内容。电磁法的最大优点是可以十分方便地确定两种传感器的灵敏度,而不必用已知的被测参量来标定传感器的灵敏度。第五章着重介绍锰铜压阻传感器的品种、结构、工作原理与标定,恒流测量电路与电桥测量电路,脉冲恒流源与应力仪,测压系统配置,以及测量雷管端部输出压力应用实例等内容。多数锰铜压阻传感器是由锰铜箔制成的,可以埋入被测材料中的某个拉格朗日剖面上,直接测量该剖面上的压力历史。第六章介绍多种结构的压电压力传感器及其工作原理、电荷放大器与电压放大器、测压系统配置、压电压力传感器的标定和应用实例等内容。着重介绍最常见的自由场压电压力传感器和壁面压电压力传感器。第七章着重介绍电容法位移测量系统和异常热电效应压力测量系统。

必须指出,本书只能作为爆炸与冲击测量技术的入门基础,爆炸与冲击过程测量中经常会遇到许多难以预见的困难,测量失败时有发生,希望从事爆炸测量的技术人员积累经验,增强爆炸测量技术水平。

要深入理解和掌握本书的基本内容,希望读者具有足够的爆轰学、爆炸力学、冲击动力学和无线电技术基础知识。

本书编写过程中得到了北京理工大学机电工程学院力学工程系的同事们的支持,恽寿榕教授为本书命名,段卓平教授为本书进行了精细与严密的审阅,为此一并表示衷心感谢。

此外,还要特别感谢我夫人张汉萍副教授对本书编写所作的贡献,完成了本书的绝大部分录入工作,并做了大量文字修订。

黄正平

2006年2月



# 目 录

<b>第 1 章 爆轰波和冲击波信号的特征</b> .....	1
1.1 爆轰波信号的特征 .....	1
1.1.1 定常爆轰波波形特征 .....	1
1.1.2 不定常爆轰波波形特征 .....	6
1.1.3 爆轰波信号峰值衰减速率 .....	7
1.1.4 平面对称一维条件下泰勒波峰值附近的拟线性衰 减区间 .....	14
1.1.5 泰勒波波峰到达测点的时间 .....	17
1.2 冲击波信号的基本特征 .....	21
1.2.1 空中爆炸自由场冲击波超压信号的基本特征 .....	23
1.2.2 水中爆炸自由场冲击波超压信号的基本特征 .....	30
1.2.3 平台形冲击波压力的基本特征 .....	32
1.2.4 复杂压力流场的基本特征 .....	35
参考文献 .....	36
<b>第 2 章 爆炸与冲击过程测试系统</b> .....	37
2.1 爆炸与冲击测试系统的配置 .....	37
2.1.1 已知时序的时间间隔测试系统 .....	38
2.1.2 未知时序的时间间隔测试系统 .....	39
2.1.3 单路爆炸与冲击过程模拟信号测试系统 .....	41
2.1.4 多路爆炸模拟信号测试系统 .....	41
2.2 传感器 .....	44
2.2.1 传感器的输入输出关系 .....	44
2.2.2 传感器的分类与主要性能 .....	50
2.3 放大器和适配器 .....	51

2.4	记录仪器	52
2.5	传输线与信号的不失真传输	55
2.5.1	均匀传输线简单理论	58
2.5.2	常用传输线的特性阻抗	63
2.5.3	传输线的几种匹配方法	63
2.6	爆炸与冲击测试系统的选择和评价	65
2.6.1	系统的适用性	65
2.6.2	系统的精确性	65
2.6.3	系统的稳定性	66
2.6.4	系统的可靠性	66
2.6.5	峰值量测精度 $\Delta\phi$ 与上限频率 $f_c$	67
	参考文献	70
<b>第3章</b>	<b>电探极法</b>	<b>71</b>
3.1	概述	71
3.2	爆炸与冲击过程测试系统中常用的电探极	73
3.2.1	电探针	73
3.2.2	丝式电探极和箔式电探极	77
3.3	脉冲形成网络	80
3.3.1	RLC 脉冲形成网络	80
3.3.2	传输线作为电路元件的脉冲形成网络	83
3.4	电探极法测量爆速	84
3.4.1	爆轰波阵面邻域的爆轰产物电导率	86
3.4.2	探极的结构和装配法	87
3.4.3	爆速测量中常用的脉冲形成网络	89
3.4.4	多段定常爆速测量中的数据处理问题	90
3.4.5	爆速的单次测量精度分析	92
3.5	用探针法测量材料动高压性能	94
3.5.1	阻抗匹配方法	94
3.5.2	制动法	97
3.5.3	应用探针法测量材料动高压特性的局限性	98

3.6	探针法测量炸药爆轰压 .....	99
3.6.1	探针法测量炸药爆轰压的试验装置 .....	99
3.6.2	探针法测量炸药爆轰压的原理 .....	100
3.7	光电探头测速 .....	102
3.7.1	光电探头飞片测速系统 .....	103
3.7.2	光纤—光电探头测速系统 .....	105
	参考文献 .....	106
<b>第4章</b>	<b>电磁法</b> .....	<b>107</b>
4.1	概述 .....	107
4.2	电磁速度传感器 .....	108
4.2.1	电磁速度传感器的结构 .....	109
4.2.2	电磁速度传感器的原理 .....	112
4.2.3	有限厚度传感器的力学响应 .....	114
4.3	电磁冲量传感器 .....	117
4.3.1	电磁冲量传感器的结构 .....	117
4.3.2	电磁冲量传感器的原理 .....	119
4.3.3	有限厚度冲量传感器敏感元件的力学响应 .....	123
4.4	电磁法测试系统 .....	126
4.5	电磁法应用实例 .....	127
4.5.1	用电磁速度传感器测量爆轰参数 .....	127
4.5.2	粒子速度计记录的爆炸产物导电性影响的 修正方法 .....	130
4.5.3	应用串联速度传感器测量非良导体材料的 冲击绝热参数 .....	137
4.5.4	多电磁速度传感器或多电磁冲量传感器的 拉格朗日分析 .....	138
	参考文献 .....	139
<b>第5章</b>	<b>压阻法</b> .....	<b>141</b>
5.1	概述 .....	141
5.2	压阻传感器的结构与分类 .....	141

5.3	锰铜压阻传感器的工作原理 .....	143
5.4	电桥测量电路和应力仪 .....	150
5.4.1	电桥测量电路 .....	151
5.4.2	脉冲恒压源 .....	152
5.4.3	应力仪 .....	154
5.5	恒流测量电路和脉冲恒流电源 .....	156
5.5.1	恒流测量电路 .....	157
5.5.2	脉冲恒流源 .....	159
5.6	锰铜压阻法测试系统 .....	166
5.6.1	低压力量程锰铜压阻法测试系统的配置与调试 .....	166
5.6.2	高压力量程锰铜压阻法测试系统的配置与调试 .....	168
5.7	压阻传感器的动态标定 .....	170
5.8	应用实例 .....	171
5.8.1	飞片撞击试验中应用锰铜计测压 .....	171
5.8.2	雷管和导爆索的端部输出压力测量 .....	173
5.8.3	小型后坐冲击模拟试验中的监测系统 .....	182
5.8.4	锰铜计直接测量炮弹内炸药装药的发射应力 .....	187
5.8.5	柱塞式锰铜压阻传感器用于测量油井中的 爆炸冲击压力 .....	190
5.8.6	爆炸产物电导率测量 .....	194
5.8.7	横向应力测量技术 .....	197
	参考文献 .....	206
<b>第6章</b>	<b>压电法</b> .....	<b>209</b>
6.1	压电电流法 .....	209
6.1.1	Sandia 石英传感器 .....	209
6.1.2	固体冲击极化效应传感器 .....	218
6.2	压杆式压电压力传感器 .....	220
6.2.1	压杆式压电压力传感器的几种基本结构 .....	220
6.2.2	压杆式压电压力传感器的工作原理 .....	223
6.2.3	改善压杆传感器性能的一些方法 .....	231

6.2.4	压杆传感器的标定 .....	234
6.3	自由场压力传感器 .....	234
6.3.1	自由场压力传感器的一般结构 .....	234
6.3.2	自由场压力传感器的工作原理 .....	237
6.3.3	自由场压力传感器的动、静标定 .....	240
6.3.4	自由场传感器的安装方式和典型的爆炸波形记录 .....	241
6.3.5	自由场压力传感器测压精度分析 .....	242
6.4	电压法测试系统 .....	249
6.4.1	两种测压系统对比 .....	249
6.4.2	电荷放大器基本原理 .....	249
6.4.3	电压放大器工作原理 .....	252
6.5	压电法应用实例 .....	254
6.5.1	战斗部爆炸压力场超压测量 .....	254
6.5.2	数字压力记录仪 .....	260
6.5.3	加速度的测量问题 .....	266
	参考文献 .....	270
<b>第7章</b>	<b>其他电测法</b> .....	<b>271</b>
7.1	电容法 .....	271
7.1.1	电容传感器结构 .....	271
7.1.2	电容传感器工作原理 .....	272
7.1.3	电容传感器的一种测量电路(适用于低输出阻抗) .....	275
7.2	异常热电效应冲击压力传感器 .....	276
7.2.1	异常热电压力传感器的基本原理简介 .....	277
7.2.2	试验研究异常热电效应的一些结果 .....	278
7.2.3	ATEPT传感器的结构 .....	279
7.2.4	ATEPT传感器的标定 .....	281
7.2.5	异常热电效应传感器应用实例——双波测量 .....	283
<b>附录</b>	<b>材料的某些声学特性</b> .....	<b>286</b>

# CONTENTS

<b>Chapter 1 The Signal Features of Detonation Wave and Shock Wave</b> .....	1
1.1 The Signal Features of Detonation Wave .....	1
1.1.1 The Signal Features of Steady Detonation .....	1
1.1.2 The Signal Features of Unsteady Detonation .....	6
1.1.3 The Attenuation Rate of the Peak Signal of Detonation Pressure .....	7
1.1.4 The Pseudolinear Attenuation Region Nearby Taylor Peak .....	14
1.1.5 The Arrival Time of Taylor Peak .....	17
1.2 The Signal Features of Shock Wave .....	21
1.2.1 The Signal Features of the Overpressure in Air Blast Freefield .....	23
1.2.2 The Signal Features of the Freefield Overpressure of Underwater Explosion .....	30
1.2.3 The Signal Features of Rectangular Shock Wave .....	32
1.2.4 The Signal Features of the Shock Wave in Complex Field .....	35
References .....	36
<b>Chapter 2 Explosion and Impact Measurement System (EIMS)</b> .....	37
2.1 The Configurations of Typical EIMS .....	37
2.1.1 Time Interval Measurement System for Known Time Sequence .....	38

2.1.2	Time Interval Measuring System for Unknown Time Sequence .....	39
2.1.3	One-channel Analog Signal Measurement System .....	41
2.1.4	Multi-channel Analog Signal Measurement System .....	41
2.2	Transducer and Gauge .....	44
2.2.1	The I/O Relation of Transducer .....	44
2.2.2	The Classification and Capability of Transducer .....	50
2.3	Amplifier and Adapter .....	51
2.4	Recorder .....	52
2.5	Transmission Line and Signal Distortionless Transmission .....	55
2.5.1	The Simple Theory of Uniform Transmission Line .....	58
2.5.2	The Characteristic Impedance of Transmission Line .....	63
2.5.3	Some Matching Techniques of Transmission Line .....	63
2.6	The Evaluation and Selection of EIMS .....	65
2.6.1	The Applicability .....	65
2.6.2	The Accuracy .....	65
2.6.3	The Stability .....	66
2.6.4	The Credibility .....	66
2.6.5	The Peak Signal Precision $\Delta\phi$ and the Upper Limit Frequency $f_c$ .....	67
	References .....	70
<b>Chapter 3</b>	<b>Electric Probe Technique</b> .....	<b>71</b>
3.1	Introduction .....	71
3.2	The Electric Probes in Common Use .....	73
3.2.1	Electric Pin .....	73
3.2.2	Thread and Film Electric Probes .....	77
3.3	Pulse-generating Circuit .....	80
3.3.1	RLC Pulse-generating Circuit .....	80

3.3.2	The Pulse-generating Circuit with the Cable as a Component .....	83
3.4	Measuring Detonation Velocity with Electric Probe Technique .....	84
3.4.1	The Conductivity of Explosion Product nearby Detonation Front .....	86
3.4.2	The Configuration and Assembly of Electric Probe .....	87
3.4.3	The Pulse-generating Circuit for Measuring Detonation Velocity .....	89
3.4.4	Data Processing for Detonation Velocity Measurement .....	90
3.4.5	The Precision Analysis of Single Measurement .....	92
3.5	Measuring the Dynamical High-pressure Characteristics of Material with Electric Probe Technique .....	94
3.5.1	Impedance Matching Method .....	94
3.5.2	Flyer Brake Method .....	97
3.5.3	The Limitation of Electric Probe Technique .....	98
3.6	Measuring the Detonation Pressure with Electric Probe Technique .....	99
3.6.1	The Structure of the Measurement of Explosive Detonation Pressure with Electric Probe Technique .....	99
3.6.2	The Principle of the Measurement of Explosive Detonation Pressure with Electric Probe Technique ...	100
3.7	Measuring Velocity with Photoelectrical Probe .....	102
3.7.1	Flyer Velocity Measurement System with Laser Diode and Photodiode .....	103
3.7.2	Velocity Measurement System with Optical Fibre and Photodiode .....	105



References .....	106
<b>Chapter 4 Electromagnetic Measurement Technique</b>	
<b>(EMMT)</b> .....	107
4.1 Introduction .....	107
4.2 Electromagnetic Velocity Transducer	
<b>(EMVT)</b> .....	108
4.2.1 The Structure of EMVT .....	109
4.2.2 The Operating Principle of EMVT .....	112
4.2.3 The Dynamical Response Characteristics of	
EMVT .....	114
4.3 Electromagnetic Impulse Transducer (EMIT) ...	117
4.3.1 The Configurations of EMIT .....	117
4.3.2 The Operating Principle of Ideal EMIT .....	119
4.3.3 The Dynamical Response Characteristics of	
Practical SE .....	123
4.4 EMMT Measurement System .....	126
4.5 Example .....	127
4.5.1 Measuring Detonation Parameters with EMVT .....	127
4.5.2 The Method to Correct the Conductivity Effect of	
the Explosion Product .....	130
4.5.3 Measuring the Shock Adiabatic Parameter of Bad	
Conductor with EMVT in series .....	137
4.5.4 Lagrangian Analysis for Multi-EMVT or	
Multi-EMST .....	138
References .....	139
<b>Chapter 5 Piezoresistive Measurement Technique</b>	
<b>(PRMT)</b> .....	141
5.1 Introduction .....	141
5.2 The Structure and Classification of Piezoresistive	
Transducer .....	141