

台阶爆破振动危害评判及 精确毫秒延时降振技术

TAIJIE BAOPU ZHENDONG WEIHAI PINGPAN JI
JINGQUE HAOMIAO YANSHI JIANGZHEN JISHU

陶铁军 赵明生 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

台阶爆破振动危害评判及 精确毫秒延时降振技术

陶铁军 赵明生 著



北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2016

内 容 提 要

本书通过大量试验研究、理论分析和工程应用,系统阐述了爆破振动“三要素”的相互关系,提出了利用最大瞬时输入能量和滞回耗能作为爆破地震危害评价的双因素准则;建立了爆破地震波总能量的衰减公式,指出了先爆炸孔爆破对后爆炸孔起到屏蔽降振作用;构建了爆破地震波特定频段谱值抑制模型,提出了特定频段爆破地震波精确延时压制降振方法,形成了较为完善的台阶爆破振害防控体系。

本书可供从事工程爆破设计、施工、管理的技术人员和高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

台阶爆破振动危害评判及精确毫秒延时降振技术/陶铁军, 赵明生著. —北京:冶金工业出版社, 2016. 4

ISBN 978-7-5024-7194-1

I. ①台… II. ①陶… ②赵… III. ①台阶爆破—爆破
振动—延时—研究 IV. ①TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 044457 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 李培禄 美术编辑 吕欣童 版式设计 葛新霞

责任校对 孙跃红 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7194-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2016 年 4 月第 1 版, 2016 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 9.5 印张; 182 千字; 141 页

39.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

台阶爆破振动危害评判及精确毫秒延时降振技术是爆破工程领域中的热点问题。随着国家经济建设的发展需要,台阶爆破越来越多地应用到矿山开采、铁路与公路路堑成型、场地平整、水利水电设施建设等领域。台阶爆破的应用极大地加快了工程建设速度、提高了生产效率、降低了劳动强度,但台阶爆破在实现预期工程目的的同时,也产生了一系列的负面效应,特别是爆破地震波的负面效应越来越受到人们的关注和重视。因此加强对爆破振动危害效应的研究,采取准确合理的标准对爆破振动的危害效应进行评判,根据评判结果采取相应的技术措施降低爆破振动的危害,已成为当前爆破工作者重点研究的问题。

全书共分为7章,包括以下6个部分:第一部分对台阶爆破振动的特征进行了探讨,研究了爆破振动的危害效应及其评判标准,建立了SDOF模型,讨论了弹性体系爆破地震波三要素以及结构参数对输入能量谱的影响;第二部分根据SDOF模型探讨了爆破地震波三要素、结构参数以及恢复力模型参数对滞回耗能谱的影响规律;第三部分提出了基于最大瞬时输入能量与滞回耗能双因素准则作为爆破振动安全判据;第四部分对爆破地震波能量的计算方法进行了探讨,建立了爆破地震波能量的衰减公式,并结合实际工程对爆破地震波能量的衰减规律进行了研究;第五部分对台阶爆破毫秒延时降振技术的原理进行了探讨,研究了基于波形叠加的干扰降振原理和基于频谱叠加的压制降振原理,并结合岩体变形破坏的能量理论对基于能量的降振原理进行了探讨,研究并实验验证了先爆炮孔对后爆炮孔的屏蔽降振作用;第六部分利用数码电子雷管的精确延时功能,进行了不同毫秒延时爆破的现场实验,并根据监测的爆破振动数据对各组毫秒延时爆破的质

点峰值振动速度、主振频率和地震波能量进行了对比分析。

本书所涵盖的内容是作者近几年部分科研成果的总结，希望它的出版能对这方面的研究有所推动，起到抛砖引玉的作用。由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和不足，恳请读者批评指正。

作 者

2016 年 2 月

目 录

1 绪论	1
2 爆破振动的危害效应研究	3
2.1 引言	3
2.2 爆破地震波的破坏形式和影响因素	3
2.3 爆破振动强度的表征参量及其在振动危害中的作用	4
2.3.1 爆破振动幅值强度及其在振动危害中的作用	4
2.3.2 爆破振动频率及其在振动危害中的作用	6
2.3.3 爆破振动持续时间及其在振动危害中的作用	10
2.4 爆破振动特性对反应谱的影响	11
2.4.1 爆破振动持续时间对反应谱的影响	11
2.4.2 质点振动峰值速度对反应谱的影响	15
2.4.3 爆破振动主频对反应谱的影响	16
2.5 爆破振动特性对输入能量谱的影响	17
2.5.1 爆破振动峰值速度对输入能量谱的影响	21
2.5.2 爆破振动主频对输入能量谱的影响	22
2.5.3 爆破振动持续时间对输入能量谱的影响	22
2.6 结构参数对输入能量谱的影响	23
2.6.1 结构阻尼比对输入能量谱的影响	23
2.6.2 结构固有周期对输入能量谱的影响	24
2.7 小结	25
3 爆破振动作用下弹塑性滞回耗能谱研究	26
3.1 引言	26
3.2 滞回耗能谱的计算	26
3.2.1 滞回耗能谱的概念	26
3.2.2 结构的恢复力模型	27
3.2.3 拐点的处理	28
3.3 爆破振动特性对滞回耗能谱的影响	29

3.3.1 爆破振动峰值速度对滞回耗能谱的影响	32
3.3.2 爆破振动主频对滞回耗能谱的影响	32
3.3.3 爆破振动持续时间对滞回耗能谱的影响	33
3.4 结构参数及恢复力模型参数对滞回耗能谱的影响	34
3.4.1 结构的阻尼比对滞回耗能谱的影响	34
3.4.2 结构的自振周期对滞回耗能谱的影响	34
3.4.3 恢复力模型参数对滞回耗能谱的影响	35
3.5 不同条件下爆破地震波对滞回耗能谱的影响	36
3.5.1 段药量对滞回耗能谱的影响	36
3.5.2 爆心距对滞回耗能谱的影响	37
3.5.3 微差间隔时间对滞回耗能谱的影响	39
3.5.4 段数对滞回耗能谱的影响	40
3.6 小结	42
4 爆破振动危害效应的评判标准及其应用	44
4.1 引言	44
4.2 基于双因素准则的爆破振动危害评判	44
4.2.1 瞬时输入能量	44
4.2.2 爆破振动危害评判的双重准则	46
4.3 爆破振动灾害评价指标的应用	47
4.3.1 工程实例分析(一)	47
4.3.2 工程实例分析(二)	55
4.4 小结	58
5 地震波能量传播规律研究	60
5.1 引言	60
5.2 爆破地震波能量的计算	60
5.2.1 基于信号分析的质点能量计算方法	61
5.2.2 基于能通量的地震波总能量计算方法	62
5.3 爆破地震波能量的衰减规律	66
5.3.1 地震波能量转换百分比	66
5.3.2 爆破地震波能量的衰减公式	67
5.4 现场实验	68
5.4.1 实验设备与方法	68
5.4.2 爆破振动数据的监测与计算	69

5.5 能量衰减公式与萨道夫斯基公式的对比分析	76
5.5.1 质点峰值速度的回归分析	76
5.5.2 爆破地震波能量的回归分析	77
5.5.3 回归结果的对比分析	78
5.6 小结	79
6 台阶爆破毫秒延时降振原理研究	80
6.1 引言	80
6.2 基于波形叠加的地震波干扰降振原理	80
6.2.1 频率幅值相同的地震波的干扰降振原理	80
6.2.2 频率对波形叠加相干性的影响分析	82
6.2.3 干扰降振原理的实用性探讨	84
6.3 基于频谱叠加的毫秒延时压制降振原理	84
6.3.1 爆破地震波谱值叠加的原理	84
6.3.2 特定频率地震波叠加的谱值分析	86
6.3.3 波形叠加的频率效应分析	88
6.4 基于能量理论的毫秒延时降振原理	91
6.4.1 岩体变形破坏过程中的能量耗散与释放	92
6.4.2 排间毫秒延期间隔时间的计算	93
6.4.3 先爆炸孔累积损伤对后爆炸孔的影响	94
6.4.4 先爆炸孔形成的损失区对后爆炸孔振动屏蔽的现场实验	96
6.5 小结	98
7 精确毫秒延时对爆破振动影响的现场实验	100
7.1 引言	100
7.2 不同毫秒精确延时爆破的现场实验	101
7.2.1 实验场地与器材	101
7.2.2 实验方案设计	103
7.2.3 现场数据监测	104
7.3 实验结果分析	108
7.3.1 质点峰值振动速度的对比分析	108
7.3.2 爆破振动信号频谱特性的对比分析	114
7.3.3 爆破地震波能量的对比分析	127
7.4 小结	129
参考文献	130

1 绪 论

随着国家经济建设的发展需要,台阶爆破越来越多地应用到矿山开采、铁路与公路路基成型、场地平整、水利水电设施建设等领域。台阶爆破的应用极大地加快了工程建设速度、提高了生产效率、降低了劳动强度,但台阶爆破在实现预期工程目的的同时,也产生了一系列的负面效应,特别是爆破地震波的负面效应越来越受到人们的重视。因此加强对爆破振动危害效应的研究,采取准确合理的标准对爆破振动的危害效应进行评判,根据评判结果采取相应的技术措施降低爆破振动的危害,已成为当前国内外爆破工作者重点研究的问题。

目前我国对爆破振动危害评判的依据是《爆破安全规程》(GB 6722—2014)(以下简称《规程》),《规程》对结构体受振破坏采用振动速度与主振频率相结合的方法进行评判,具有重要的参考价值。但也有研究调查表明,按照《规程》进行爆破施工仍然会引起结构的破坏,引发民事纠纷,轻则影响正常施工,重则付诸法律。如广州市郊区的石方爆破工程,施工爆破设计的安全允许振速为 2cm/s ,实际最大单响药量不超过 10kg ,然而距施工点 $50\sim 150\text{m}$ 范围内几幢砖混结构的居民楼,出现大量裂缝。居民向当地法院提出诉讼,法院最终判定在施工期间无证据证明有其他原因致使房屋受损,施工队负赔偿责任。重庆市某大桥工程爆破施工出现了质点振动速度峰值未超过《规程》所规定的安全振动速度,而房屋出现墙体开裂、抹灰脱落等破坏异常现象,同时也出现了质点振动速度超过了《规程》所规定的安全振动速度,房屋却没有出现任何破坏的现象。分析原因主要是因为《规程》只考虑了爆破振动的质点振动峰值速度和主频,却没有考虑爆破振动持续时间对结构体造成的塑性累积损伤破坏,还存在着局限和不足,有必要对爆破振动的评判标准进行重新探讨。

对于爆破振动危害效应的控制方法目前主要分为两大类。一类是控制爆源强度,如控制最大起爆药量,采用延时爆破降振技术等;一类是改变地震波在介质中的传播途径,如用预裂爆破形成隔离缝、开挖减振沟槽或钻凿防振孔等。前者往往制约工程爆破施工进度,但是随着毫秒延时起爆技术的发展,及其在工程实践中表现出的良好降振效果,使其成为当前降低爆破振动危害效应的最主要手段之一。在毫秒延时爆破技术中,毫秒延期间隔时间的选取是取得良好降振效果的最重要的参数,但是由于普通毫秒延期雷管毫秒延时精度不高,在实际爆破工程中,常常会出现跳段、重炮现象,而且传统延期雷管不能根据现场施工条件和爆破方案的需要合理设置毫秒延期间隔时间,无法满足理论与现场实验的需

要,使得毫秒延时爆破降振技术的理论研究和现场应用都受到了很大的制约。近年来,随着高精度雷管和数码电子雷管等精确延时起爆器材的不断发展和应用,很好地解决了普通雷管的延时精度问题,为深入研究毫秒延时爆破降振技术提供了必备的实验器材。但是对于合理毫秒延期间隔时间的选取还存在较大争议,目前尚缺乏一套完整的理论与方法来选取合理的延期间隔时间。

因此本书开展以台阶爆破振动危害评判及精确毫秒延时降振技术为主题的一系列研究,同时开展对爆破振动危害效应及评判方法的研究,开展对精确毫秒延时爆破降振技术原理的研究,并利用数码电子雷管的精确延时功能进行现场实验验证,为降振最优的毫秒延期间隔时间的选取提供依据。研究成果将有利于台阶爆破振动危害的控制,有利于数码电子雷管在台阶爆破工程中的推广应用,有利于促进绿色爆破、环保爆破的实现,为经济发展、社会和谐做出贡献。

2 爆破振动的危害效应研究

2.1 引言

由于炸药在岩土中的爆炸本身就是一个复杂的过程，所引起的爆破地震波在产生与传播过程中又受到多种因素的影响，因此很难给出准确的计算公式对爆破地震波的强度进行预测。人们对爆破地震波危害效应的研究也还不成熟完善，尚缺乏系统的理论对其进行解释。关于爆破振动对建构筑物破坏程度的研究，主要是借鉴天然地震波的研究成果，但是爆破振动与天然地震又有着本质的区别，如天然地震波持续时间长、频率低，而爆破地震波的持续时间短、频率高。此外在台阶爆破工程中，往往采用毫秒延期起爆，爆破地震波是一个由不同时间、不同空间的多个爆源，同时或者顺序起爆引起的爆破地震波叠加组合后形成的复杂波，其波形特征要比天然地震波更为复杂。因此不能简单套用天然地震波的相关理论，而需要对爆破振动的特征及其危害效应进行深入研究。

2.2 爆破地震波的破坏形式和影响因素

台阶爆破地震波的危害效应是指当爆破地震波的强度达到或超过一定量值时，会使周围建构筑物等结构体产生变形、受损及破坏等现象，或者对爆区周围环境产生不利影响。爆破所产生的地震波不仅会造成建构筑物的结构性破坏，而且会降低爆区周围岩体的节理强度，造成岩石破裂或者块体失稳等现象。此外，爆破地震波对周围环境和建构筑物的破坏还存在累积损伤效应。周围岩体、边坡和建构筑物等在爆破地震波长期而反复的作用下，其损伤疲劳裂纹会逐步累积扩展，当疲劳裂纹扩展到一定程度时，也会导致结构物和岩体的毁损变形，甚至会引发大规模的坍塌、滑坡，造成重大的人员伤亡和经济损失。

在实际工程爆破中，人们往往关注最多的是爆破地震波对周围建构筑物的影响，其次是对边坡稳定性的影响。爆破地震波对建构筑物的破坏主要有三种表现形式：

(1) 直接造成建构筑物的损伤破坏。当爆破地震波的强度超越建构筑物的抗振能力时，会引起结构完好且无异常缺陷的建构筑物的损伤破坏。

(2) 加速建构筑物的损伤破坏。对于结构存在疲劳损伤缺陷的建构筑物，爆破振动会加速其内部疲劳损伤和裂纹的发展，当这种损伤发展到一定程度时也会引起建构筑物的毁损。

(3) 间接引起建构筑物的损伤破坏。爆破振动虽然没有直接导致建构筑物的破坏,但是由于爆破振动的作用而导致建构筑物地基的位移或结构体失稳,以及对建构筑物周围环境的破坏,而对建构筑物产生间接破坏效应,甚至造成建构筑物的倒塌破坏。

爆破振动对建构筑物的危害不仅与爆破振动本身的特性有关,也与建构筑物自身的抗振强度和对爆破振动的响应特征有关。在早期的爆破振动危害效应的研究中,各国学者大多从静力学角度出发,只注意到爆破振动对建构筑物的破坏是由于爆破振动的幅值超越建构筑物的承受极限而造成的。因此建立危害效应的判据也都仅从爆破振动的幅值强度出发,如不同时期出现的质点加速度判据、质点振动速度判据、质点位移判据、比例距离判据等。随着人们对爆破振动危害原理的深入研究,特别是对爆破振动频谱特性的认识,振动频率也逐渐被引入到爆破振动危害效应的评判之中。目前,采用质点峰值振动速度和主振频率相结合的评判标准逐渐被广大学者认可并采用。近年来,更有学者指出爆破振动对建构筑物及周围环境的危害效应既与爆破振动速度有关,也与爆破振动的频率和持续时间有关,是三者共同作用的结果。爆破振动对保护目标的破坏,不仅仅存在振动强度首次超越目标体的抗振强度而引起的损伤破坏,也存在多次爆破振动的累积损伤破坏。特别是在爆破作业频繁的区域,即使单次爆破振动的强度不足以直接造成岩体的破坏,但是由于爆破振动长期反复的扰动作用,也会造成岩体或结构体的累积损伤破坏。

2.3 爆破振动强度的表征参量及其在振动危害中的作用

爆破振动的幅值强度、振动频率和持续时间是表征爆破振动特征的“三要素”,一般认为建构筑物等结构体的破坏程度是爆破振动“三要素”与结构体的动力响应特性共同作用的结果。

2.3.1 爆破振动幅值强度及其在振动危害中的作用

在早期的爆破振动特征及其危害效应的研究中,广大学者大多从静力学的角度出发,只注意到了振动幅值在爆破振动危害效应中的作用,认为建构筑物的破坏只与爆破振动的幅值强度有关,并借助爆破振动幅值与应力的关系来研究爆破振动对保护目标的危害效应。把爆破引起的质点振动的幅值强度看成是爆破地震波的强度,并将其作为评判爆破振动是否造成破坏的单一指标,有学者将其称为独立阈值评判法。这类指标主要有质点振动位移幅值、速度幅值和加速度幅值等。

在实际工程中,常采用质点振动速度或加速度的幅值作为爆破振动幅值的表征参量,而较少采用质点振动的位移幅值,这主要是因为质点振动速度和加速度

与结构体受振后内部的应力变化具有良好的对应关系。对于采用质点振动速度和质点振动加速度究竟哪个更好,不同的学者有不同的看法。一般认为质点振动加速度与爆破地震波所产生的惯性力具有很好的对应关系,便于换算爆破地震波载荷以及对建构物的应力分析,主要在结构抗震工程中采用此指标。

目前我国工程爆破领域,主要采用质点峰值振动速度作为爆破振动幅值的表征参量。这是因为质点振动速度与地震波能量有很好的对应关系,采用质点振动速度能够很好地表征爆破地震波所携带的能量,以及由振动产生的应力、引起的结构的动能和内应力。采用质点峰值振动速度能够很好地反映结构体在爆破振动作用下的内应力变化情况。当传播介质或者保护目标受到扰动开始振动时,由弹性力学理论有:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2-1)$$

式中, σ 为由爆破振动引起的传播介质或保护目标的内应力; E 为传播介质或保护目标的弹性模量; ε 为传播介质或保护目标在爆破振动作用下产生的应变。

根据波动理论有:

$$\varepsilon = \frac{v}{c} \quad (2-2)$$

式中, v 为爆破振动引起的质点振动速度; c 为爆破地震波在传播介质或保护目标中的传播速度。

将式 (2-2) 代入式 (2-1), 可得到应力与振动速度的关系为:

$$\sigma = \frac{Ev}{c} \quad (2-3)$$

由式 (2-3) 可得爆破振动所引起的极限应力为:

$$\sigma_m = \frac{Ev_m}{c} \quad (2-4)$$

式中, σ_m 为由爆破振动引起的传播介质或保护目标的最大内应力; v_m 为质点峰值振动速度。

由式 (2-4) 可以看出爆破地震波对结构体的作用是一个动态的过程。结构体在爆破地震波的激励作用下, 内部所产生的应力是一种动态应力, 与质点振动速度成正比。最大内应力由质点峰值振动速度、结构体属性和爆破地震波的传播速度等因素共同决定。结构体在爆破振动作用下所产生的最大内应力是造成结构体破坏的主要原因, 破坏程度取决于最大内应力 σ_m 。而最大内应力 σ_m 又与爆破振动的质点峰值振动速度 v_m 有直接的联系。当爆破地震波在某一特定结构体中传播时, 结构体的弹性模量不变, 此时爆破振动所引起的结构体最大内应力 σ_m 完全取决于质点峰值振动速度 v_m 。

同时, 质点峰值振动速度也能很好地表征爆破地震波所携带的瞬时能量, 所

以在工程爆破中将其作为评判振动危害效应的重要指标。

2.3.2 爆破振动频率及其在振动危害中的作用

虽然爆破振动速度和振动加速度的幅值强度与结构体在爆破振动作用下产生的应力有良好的对应关系，能够在一定程度上反映爆破振动对结构物的破坏程度，但是大量的工程实践表明，被保护目标的破坏程度不仅与爆破振动的幅值强度有关，还与爆破振动的频率、持续时间和结构体对爆破振动的动态响应特性有关，仅采用爆破振动幅值强度作为衡量爆破振动强度的唯一指标，显然无法对爆破振动的危害效应做出准确的评判。例如，在天然地震中，当烈度为 7~9 度时，天然地震波加速度的平均值为 0.075~0.3g，在此强度下大部分房屋建构筑物遭受破坏，当在同样幅值强度的爆破振动作用下，一般房屋受到的影响却很小。分析原因主要是因为天然地震波的频率大都在 1~10Hz，与爆破地震波的频率（一般在 10~40Hz，甚至大于 50Hz）相比，天然地震波的频率与普通建构筑物的自振频率（一般为 1~5Hz）更接近，更容易引起建构筑物产生共振现象，从而加大对建构筑物的破坏效应。由此可以看出，爆破振动的破坏程度除了与振动的幅值强度有关之外，还和振动的频率与结构体自振频率的接近程度有很大关系。

爆破地震波的频率对结构体破坏程度的影响主要表现在当爆破地震波的频率与结构体的自振频率接近时，会引起结构体的共振，产生幅值增大的现象。爆破振动频率的影响可以通过振动力学模型表述，假设将爆破地震波对结构体的作用简化为简谐激励作用下带有黏性阻尼器的单自由度系统的稳态强迫振动，即将爆破地震波简化为简谐波，把结构体简化为带有黏性阻尼器的单自由度系统，则在由爆破地震波产生的简谐力的作用下，有黏性阻尼器的单自由度系统的运动微分方程可表示为：

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = P\sin\varphi t \quad (2-5)$$

式中， y 、 $\dot{y}$ 、 $\ddot{y}$ 分别为系统的位移、速度和加速度； c 、 k 分别为系统的黏性阻尼系数和弹性系数； $P\sin\varphi t$ 为由爆破地震波引起的简谐激励力。

将式 (2-5) 两边同除以 m 得：

$$\ddot{y} + \frac{c}{m}\dot{y} + \frac{k}{m}y = \frac{P}{m}\sin\varphi t \quad (2-6)$$

定义无量纲 $\xi = \frac{c}{2m\omega}$ 为系统的阻力比，则 $\frac{c}{m} = 2\xi\omega$ ，又 $\frac{k}{m} = \omega^2$ ，将其代入式 (2-6) 得：

$$\ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \omega^2y = \frac{P}{m}\sin\varphi t \quad (2-7)$$

式 (2-7) 为一个二阶常系数非齐次微分方程，其通解由齐次方程的通解和

非齐次方程的任意一个特解组成。将其中一个特解设为：

$$y = c_1 \sin \varphi t + c_2 \cos \varphi t \quad (2-8)$$

式中, c_1 、 c_2 为待定常数。将式 (2-8) 代入式 (2-7) 得：

$$\begin{aligned} & -\varphi^2 c_1 \sin \varphi t - \varphi^2 c_2 \cos \varphi t + 2\xi\omega(\varphi c_1 \cos \varphi t - \varphi c_2 \sin \varphi t) + \\ & \omega^2(c_1 \sin \varphi t + c_2 \cos \varphi t) = \frac{P}{m} \sin \varphi t \end{aligned} \quad (2-9)$$

上式对任意时刻都成立, 因此:

$$\begin{cases} (\omega^2 - \varphi^2)c_1 - 2\xi\omega\varphi c_2 = \frac{P}{m} \\ 2\xi\omega\varphi c_1 + (\omega^2 - \varphi^2)c_2 = 0 \end{cases} \quad (2-10)$$

令 $\gamma = \frac{\varphi}{\omega}$, $y_{st} = \frac{P}{m\omega^2}$, y_{st} 表示激励力最大时刻引起的静位移, 将式 (2-10)

两边同除以 ω^2 得:

$$\begin{cases} (1 - \gamma^2)c_1 - 2\xi\gamma c_2 = \frac{P}{m\omega^2} = y_{st} \\ 2\xi\gamma c_1 + (1 - \gamma^2)c_2 = 0 \end{cases} \quad (2-11)$$

由克莱姆法则得:

$$\begin{cases} c_1 = \begin{vmatrix} y_{st} & -2\xi\gamma \\ 0 & 1 - \gamma^2 \end{vmatrix} \div \begin{vmatrix} 1 - \gamma^2 & -2\xi\gamma \\ 2\xi\gamma & 1 - \gamma^2 \end{vmatrix} = \frac{(1 - \gamma^2)y_{st}}{(1 - \gamma^2)^2 + (2\xi\gamma)^2} \\ c_2 = \begin{vmatrix} 1 - \gamma^2 & y_{st} \\ 2\xi\gamma & 0 \end{vmatrix} \div \begin{vmatrix} 1 - \gamma^2 & -2\xi\gamma \\ 2\xi\gamma & 1 - \gamma^2 \end{vmatrix} = \frac{-2\xi\gamma y_{st}}{(1 - \gamma^2)^2 + (2\xi\gamma)^2} \end{cases} \quad (2-12)$$

将式 (2-12) 代入式 (2-7) 得到运动微分方程的一个特解为:

$$y = c_1 \sin \varphi t + c_2 \cos \varphi t = \sqrt{c_1^2 + c_2^2} \sin(\varphi t - \alpha) = A \sin(\varphi t - \alpha) \quad (2-13)$$

式中:

$$\begin{cases} A = \beta y_{st} \\ \beta = \frac{1}{\sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + (2\xi\gamma)^2}} \\ \alpha = \arctan \frac{2\xi\gamma}{1 - \gamma^2} \end{cases} \quad (2-14)$$

于是运动微分方程 (2-7) 的通解可表示为:

$$y = e^{-\xi\omega t}(c_3 \sin \omega_r t + c_4 \cos \omega_r t) + A \sin(\varphi t - \alpha) \quad (2-15)$$

对式 (2-15) 两边求导得:

$$\begin{aligned} \dot{y} = & -\xi\omega e^{-\xi\omega t}(c_3 \sin \omega_r t + c_4 \cos \omega_r t) + \\ & e^{-\xi\omega t} \omega_r (c_3 \cos \omega_r t - c_4 \sin \omega_r t) + A\varphi \cos(\varphi t - \alpha) \end{aligned} \quad (2-16)$$

代入初始条件求得待定常数 c_3 、 c_4 为：

$$\begin{cases} c_3 = \frac{\dot{y}_0 + \xi\omega y_0 + \xi\omega A \sin\alpha - A\varphi \cos\alpha}{\omega_r} \\ c_4 = y_0 + A \sin\alpha \end{cases} \quad (2-17)$$

将式 (2-17) 代入式 (2-15) 得到运动微分方程式的通解为：

$$y = e^{-\xi\omega t} \left(\frac{\dot{y}_0 + \xi\omega y_0}{\omega_r} \sin\omega_r t + y_0 \cos\omega_r t \right) + A e^{-\xi\omega t} \left(\frac{\xi\omega \sin\alpha - \varphi \cos\alpha}{\omega_r} \sin\omega_r t + \sin\alpha \cos\omega_r t \right) + A \sin(\varphi t - \alpha) \quad (2-18)$$

式 (2-18) 中等号右边第一部分表示系统初始条件引起的有阻尼自由振动，频率为 ω_r ；第二部分表示由简谐激励力引起的有阻尼自由振动，频率也为 ω_r ；第三部分表示系统在简谐激励力作用下的稳态强迫振动，频率与激励力的频率相同，振幅与初始条件无关。由于阻尼作用的存在，第一部分和第二部分的自由振动会随着时间的推移而衰减消失，最后只剩下简谐激励力作用下的稳态强迫振动，也就是特解部分：

$$y = A \sin(\varphi t - \alpha) = \beta y_{st} \sin(\varphi t - \alpha) \quad (2-19)$$

在振动力学中，将 β 称为动力系数，为稳态强迫振动的振幅与激励力引起的静位移之比。其表达式为：

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + 2\xi\gamma}} \quad (2-20)$$

从式 (2-20) 可以看出动力系数 β 与频率比 γ 和阻尼比 ξ 有关。以频率比为横坐标，动力系数为纵坐标，画出不同阻尼比情况下动力系数随频率比的变化曲线，如图 2-1 所示。

从图 2-1 可以看出：当频率比 $\gamma = \frac{\varphi}{\omega} \rightarrow 0$ 时，动力系数 $\beta \rightarrow 1$ ，激励力的频率

变化很小，可以将激励力近似地看作为静载荷；当频率比 $\gamma = \frac{\varphi}{\omega} \rightarrow \infty$ 时，动力系

数 $\beta \rightarrow 0$ ，激励力变化太快，系统来不及响应，几乎不动；当频率比 $\gamma = \frac{\varphi}{\omega} \rightarrow 1$

时，即激励力的频率等于系统的固有频率时，出现共振现象，此时系统在简谐力作用下的幅值为 y_{st} 的 β 倍。仔细观察幅频特性曲线还可以发现：共振时动力系数并非最大，动力系数的最大值出现在共振点之前频率比为 $\gamma = \sqrt{1 - 2\xi^2}$ 处，此时动力系数的最大值为：

$$\beta_m = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2-21)$$

从式 (2-21) 可以看出：当阻尼比较小时，最大动力系数为一个很大的值，随着阻尼比的增大，动力系数急剧下降。当系统的阻尼比大于 0.5 时，动力系数几乎变成一条平滑的曲线，随频率比的增加而缓慢衰减。

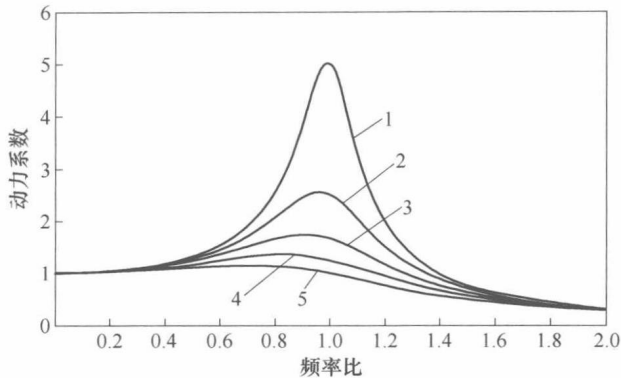


图 2-1 幅频特性曲线

阻尼比：1—0.1；2—0.2；3—0.3；4—0.4；5—0.5

有黏性阻尼器的单自由度系统在简谐激励力作用下的运动微分方程在实际爆破工程中的物理意义为：当结构体的阻尼比小于 0.5 时，爆破地震波的频率与结构体的自振频率越接近，由共振作用引起结构体振动响应的幅值越大，爆破振动的危害效应也就越大，这时必须考虑爆破地震波的频率对结构体受振破坏程度的影响；当结构体的阻尼比大于 0.5 时，爆破地震波的频率对结构体振动响应的幅值影响不大，可不考虑爆破地震波的频率对结构体受振破坏程度的影响。实际工程中，台阶爆破工程爆破地震波的频率往往都比结构体的自振频率大，其本身又是由多个不同频率的谐波组合而成的，因此提高爆破地震波的主振频率，将能大大降低由共振作用引起的结构体振动响应幅值增大的现象，从而减小爆破地震波的危害效应。

此外由于台阶爆破是多爆源同时或顺序起爆，所产生的爆破地震波在一开始就是一个由多个波形相互干涉、叠加的复合波，在进行频谱分析时，其频率范围更加宽泛，常常出现主频能量不突出，或者出现多个能量相差不大的主振频率，如图 2-2 所示。同时由于岩土等传播介质的高频滤波效应，在爆源近区，爆破地震波的高频成分较为丰富，随着爆心距的增加，爆破振动信号低频所占的能量比例增大。