

缓冲减振系统设计导论

[美] R. E. 克劳福德 等编



•63

宇航出版社

内 容 简 介

本书阐述了核爆炸引起的冲击波环境,尤其是地冲击环境。介绍了结构动力学及缓冲减振系统的基本原理与设计方法。内容涉及爆炸冲击振动环境,系统的动态性能,缓冲减振系统输入的预测方法与基本分析技术,人员和设备的冲击敏感性准则,各类缓冲减振装置的确定方法以及悬挂系统常用的结构形式。最后还举例说明了各种应用场合和选择缓冲减振系统或装置的典型方法。

本书可供从事缓冲减振系统初步设计人员及设计分析人员参考,也可供从事缓冲减振技术专业的高等院校教师和高年级学生阅读。

A Guide for the Design of Shock Isolation Systems for Ballistic
Missile Defense Facilities

Robert E. Crawford, Cornelius J. Higgins, Edward H. Bultmann, Jr.

缓冲减振系统设计导论

〔美〕R. E. 克劳福德 等编

李清源 柳念芦 译

谢佐慰 校

特约编辑: 姚美滋

*

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

北京科技印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 10.625 字数: 238 千字

1987年3月第1版 1987年3月第1次印刷

印数: 1—1,500 册 统一书号: 15244·0047 定价: 2.20 元

前 言

本书是由新墨西哥州阿尔伯克基市的力学研究公司民用/核系统分公司根据 DACA23-72-C-0001 号合同为美国陆军建筑工程研究所(CERL)编写的。编写工作是根据4A062118 A880“核武器效应研究与试验”课题中 02 号任务“永久防护结构的工程设计准则”的 006 工程部分“核环境条件下结构内部运动的响应分析”进行的。

本书是在 1971 年 7 月到 1972 年 10 月间由 R. E. 克劳福德 (Crawford) 博士、C. J. 希金斯 (Higgins) 先生和 E. H. 小布尔特曼 (Bultmann) 博士为建筑工程研究所的建筑系统室编写的。

R. W. 赖萨切尔 (Reisacher) 上校是建筑工程研究所所长, L. R. 谢弗 (Shaffer) 博士是副所长。

目 录

第一章 引言	1
第一节 目的	1
第二节 基本情况	1
第三节 编排方式	4
第二章 冲击环境	5
第一节 引言	5
第二节 空气爆震环境	5
第三节 超压	8
第四节 爆高效应	16
第五节 地冲击环境	32
第六节 空气爆震引起的地冲击波	36
第七节 超前地冲击波	51
第八节 弹抗引起的地冲击波	54
第九节 合成地冲击波	58
第十节 结构的运动	67
第十一节 地面结构	67
第十二节 浅埋结构	74
第三章 系统的动态特性	85
第一节 引言	85
第二节 单自由度系统	85
第三节 自由振动	87
第四节 阻尼	90
第五节 强迫振动	96
第六节 弹-塑性响应	108
第七节 支座运动	116

第八节	阶跃位移脉冲	117
第九节	阶跃加速度脉冲	117
第十节	阶跃速度脉冲	118
第十一节	传递系数	120
第十二节	冲击谱	123
第十三节	多自由度系统	130
第十四节	模态分析	136
第十五节	多自由度系统的强迫振动	145
第十六节	承受支座运动的多自由度系统	146
第十七节	有阻尼的多自由度系统	153
第四章	缓冲减振装置	155
第一节	引言	155
第二节	机械弹簧	155
第三节	螺旋弹簧	156
第四节	扭簧	170
第五节	扭杆簧	171
第六节	螺旋扭簧	175
第七节	平面涡卷弹簧	184
第八节	碟形弹簧	187
第九节	板簧	193
第十节	空气弹簧	196
第十一节	气缸型空气弹簧	197
第十二节	气压波纹管型空气弹簧	204
第十三节	液体弹簧	210
第十四节	固体合成橡胶弹簧	217
第十五节	阻尼	230
第十六节	小结	234
第五章	缓冲减振系统的选择	247
第一节	引言	247
第二节	性能及要求	248

第三节	人员耐冲击的容限	257
第四节	设备耐冲击的容限	260
第五节	一般要求	262
第六节	单质量动态系统	263
第七节	单独减振与组装减振	266
第八节	平台特性	267
第九节	系统结构型式的选择	268
第十节	减振装置的选择	275
第十一节	初步设计实例	279
1	螺旋弹簧	279
2	扭杆簧	281
3	空气弹簧	284
4	液体弹簧	287
5	橡胶减振支座	289
第十二节	小结	291
附录 A	设计要求的实例	293
1	概述	293
2	性能	293
3	设计细则	296
4	分析要求	298
5	分析程序	300
附录 B	系统设计的实例	304
1	概述	304
2	底座支撑式系统	304
3	摆式系统	309
附录 C	动态分析采用的各种计算机程序	319
1	GENSAP 程序	319
2	ISOL 程序	321
3	ISIP 程序	322
4	ISOLIN 程序	323

5	SPCTRM 程序.....	324
6	FVOUS 程序	325
7	ISIP2 程序.....	327
8	STARDYNE程序.....	328
参考文献		330

第一章 引言

第一节 目的

本书是为从事结构动力学或缓冲减振的一般设计或分析人员编写的。主要目的是提供足够的资料和简化的分析方法,使设计和分析人员能够完成初步设计和研究,以便确定所考虑的系统 and 方案的可行性。因此,本书试图包括有关该课题的足够的基本资料,使之尽可能自成系统但又不致变成教科书,出色的教科书在参考文献中已经罗列了。

既然本书不是供缓冲减振领域的专家使用的,所以读者应该把用本书提供的方法所得到的结果看作是极初步的,只作为同这个领域内有经验的人进行讨论时的出发点。就此目的而言,本书提供的方法是相当充分的(对某些最终设计甚至也是足够的),但是在实际的缓冲减振系统设计和分析工作中,存在着许多错综复杂的情况,因此用一本书来概括所有情况显然是完全不可能的。

第二节 基本情况

象所有的设计项目那样,成功地设计出一个缓冲减振系统的前提是全面而明确地陈述设计目的。为此,需要透彻地理解组成缓冲减振系统的各个元件以及它们之间的相互作用。一旦全面和明确地论述了缓冲减振系统的设计目的,那么,为满足所有性能要求而带来的设计中的问题就可以大大简化,

因为目的本身可以成为估价设计适当与否的准则。对目的叙述得太模糊或太简单，就不能给设计者提供什么指导，从而可能会在设计缓冲减振系统时发生失误，造成代价高昂的重新设计与返工。

几乎每个缓冲减振系统都有一些独特的性能要求，而且可以把许多元件初步组装成多种组合形式，为分析提供某些可供选择的缓冲减振系统。因此，要想制定出一套严格的、适用于各种情况的规则并使设计者能得到最佳缓冲减振系统显然是徒劳的。然而却可以确定缓冲减振系统设计中的主要问题，以正确的工程判断，根据性能要求，做出一个可以接受的折衷方案。主要问题如美国陆军工程兵最近的一篇报告^[1]所指出的那样，它应包括：

- 外部条件

- 环境

- 输入冲击运动

- 位移空间

- 振动

- 其他外载荷

- 温度

- 污染

- 辐射

- 减振后的载荷数据

- 冲击允限

- 动态特性

- 静态特性

- 连接设备

- 与硬结构的连接

振动

- 性能
 - 动态
 - 静态
 - 可靠性
- 成本
- 使用年限

缓冲减振系统通常有两种基本形式：吊挂摆式和底座支撑式。这两种形式一般都可以分成三大组成部分：(1)平台，用于支撑需要缓冲减振的设备，在许多情况下，需要缓冲减振的设备的底座也可以起平台的作用；(2)隔振器，集中代表缓冲减振系统的能量贮存部件和能量耗散部件；(3)隔振器的连接装置。吊挂摆式缓冲减振系统，顾名思义，有一个装在平台和结构天花板之间的隔振器；而底座支撑式的隔振器则装在平台或设备底座与结构地板之间。

象其他大多数设计过程一样，获得一个成功的缓冲减振系统所需要的设计过程必然也是个反复循环的过程。然而，一般来说，这个设计过程可以包括下述任务：

- 确定需要缓冲减振的设备的位置、物理性能和脆弱性水准；
- 选择设备并加以分组，以确定平台尺寸；
- 确定缓冲减振系统所在位置的冲击环境；
- 确定缓冲减振系统的性能要求；
- 选择缓冲减振系统隔振器的构造与形式；
- 用分析或实验方法或者同时用这两种方法来证明所选系统能够满足性能要求。

第三节 编排方式

下面各章将给出确定初步设计和完成设计过程所需要的基本知识。第二章综述了核武器效应的估算方法，特别是空气爆震波和地冲击波的估算方法以及结构的响应。这些知识可用来估算缓冲减振系统的冲击输入。第三章提供了有阻尼和无阻尼的结构和弹性系统响应的基本分析方法。主要分析了单自由度系统，对多自由度系统只做了初步分析。在缓冲减振系统设计过程中和在验证所选系统满足性能要求时，分析方法是主要工具。第四章叙述了缓冲减振常用的设备，同时也介绍了在各种应用场合确定这些设备性能的方法。第五章详细叙述了缓冲减振系统的设计目的和选择过程，对外部条件、性能、成本和使用年限问题也作了概述，还举例说明了在不同应用场合选择缓冲减振装置和系统的典型方法。文末的附录提供了“设计要求实例”、“系统设计实例”以及供复杂结构系统和缓冲减振系统分析用的几个计算机程序简介。

第二章 冲击环境

第一节 引言

弹道导弹防御设备的缓冲减振系统必须设计得能减缓核武器爆炸产生的空气爆震波效应和地冲击波效应。地面结构将受到空气爆震波以及结构下方和结构四周地动的直接作用。地下结构将只受到地冲击波的作用。本章介绍确定空气爆震波和地冲击波环境的方法，这些方法可用于缓冲减振系统的初步设计和分析。但使用者在这里应注意，高置信度的环境估算工作是相当复杂的。关键系统的最后估算仍应由环境方面的专家进行。

第二节 空气爆震环境

核爆炸时能量的突然释放将引起压力和温度的极大增高，使邻近材料(或物质)变成炽热的压缩气体。这些气体迅速膨胀并在周围介质中形成“冲击波”。在空气中，这种冲击波称为“爆震波”，其特征是压力的突然增加，随后立即开始衰减，如图 1 所示。随着高温压缩气体继续膨胀，爆震波阵面象一个运动着的高压空气墙迅速离开爆心。在爆震波席卷的区域增加的同时，爆震波阵面的速度及峰值压力降低，如图 2 所示。超过周围环境压力的瞬态压力定义为“超压”。峰值超压是在给定位置处超压的最大值。爆震波到达给定位置时，超压迅速由零增加到超压峰值。在没有干扰时，到达峰值超压

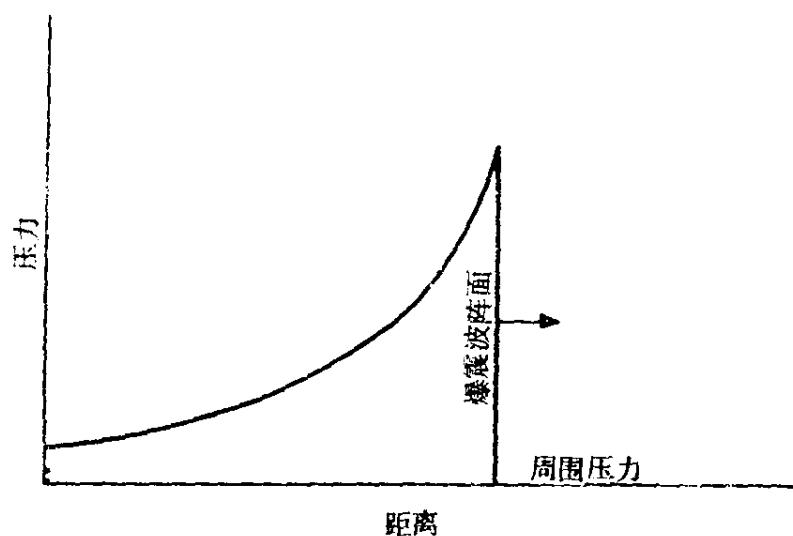


图 1 爆震波的压力变化

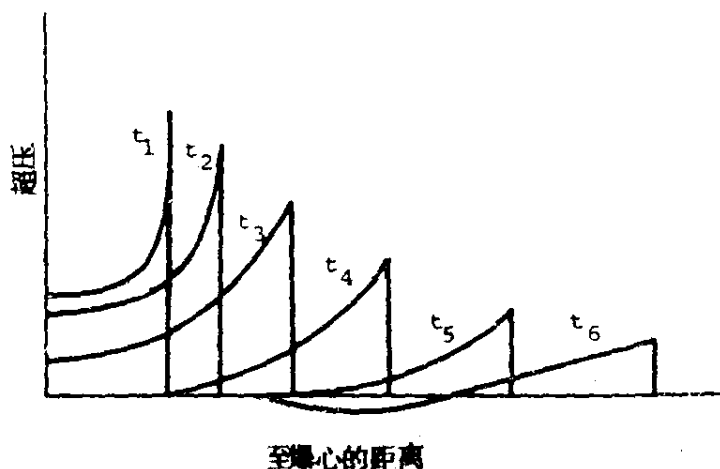


图 2 超压随至爆心距离的变化

的上升时间将小于一毫秒。峰值超压的数值和超压随时间的变化量主要是武器当量、爆高以及至爆心距离的函数。爆震波从爆心向外运动时，在爆震波阵面后有一个能引起阵风的空气质量流。阵风形成的压力称为“动压”，动压是爆震波通过

的空气密度和爆震波阵面之后的风速的函数。

在爆炸瞬间和爆震波到达某个给定位置之间，要经过一个有限的时间。这个“到达时间”主要取决于武器当量和至爆心的距离。爆震波的“周期”由两个不同的相表示。在正相周期，爆震波压力极快地(基本上是瞬时地)由周围环境压力上升到峰值，然后相当缓慢地衰减到周围环境压力。由于爆震波阵面之后空气运动的动量影响，动压的正相周期比超压的要稍长些。在负相周期，压力下降到低于周围环境压力，最后又回升到周围环境压力。负相周期通常要比正相周期稍长些。

图 3 表示出爆震波到达后，在较低超压区内，超压和动压

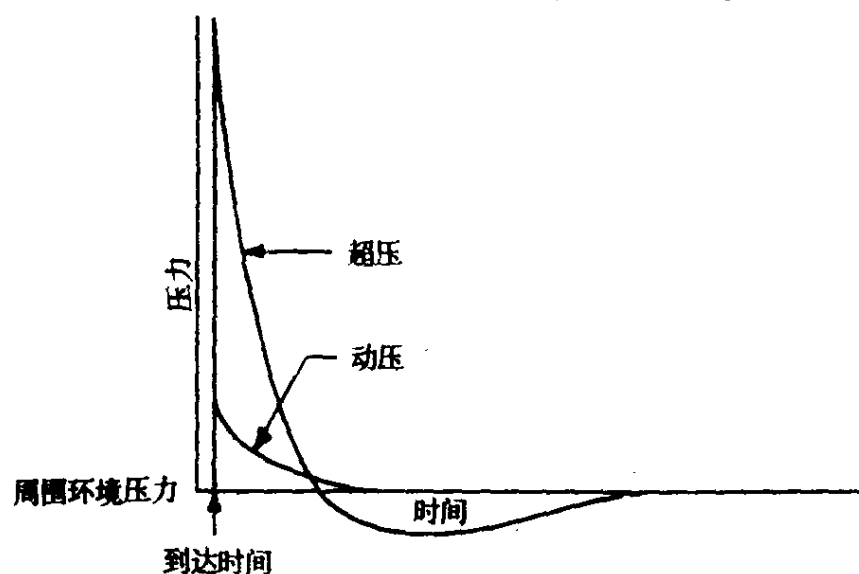


图 3 在某一固定位置超压和动压随时间变化的曲线

的一般变化情况。负相周期的超压和动压都要比正相周期的小，通常可以忽略不计。

相应的空气爆震波参数在本书中用武器参考当量（通常是一千吨或一百万吨）来表示。其他所求当量的爆震参数可以根据参考当量的数值用“缩比法”来确定。高能炸药试验和核试验业已表明：当量为 W 的武器爆炸时产生特定超压和动压的距离（至爆心的距离） R 可按下式求得：

$$R/R_1 = (W/W_1)^{1/3} \quad (1)$$

式中 R_1 是参考当量 W_1 对应于所求压力的距离。

立方根缩比关系式也适用于空气爆震波的到达时间、正相周期和冲量,即:

$$t/t_1 = (W/W_1)^{1/3} \text{ 和 } I/I_1 = (W/W_1)^{1/3} \quad (2)$$

式中 t 表示到达时间或正相周期,而 I 是需要求出的冲量;有下标的项是参考当量的数值。

用地面爆炸数据作为缩比空爆效应的基础时,通常假定:在当量相同的情况下,地面爆炸产生的爆震效应相当于空爆的两倍。因此,用地面爆炸数据来缩比空爆参数以前,应将所求空爆当量减半。对于埋深仅几英尺的地下爆炸,空爆缩比方法类似于地面爆炸的情况。但随着埋深增加,总能量中只有较小部分成为空爆能量,因此产生给定超压的距离将减小,而地面爆炸缩比关系式也就不再有效。

在使用缩比关系式时必须注意:距离和时间两者都要缩比。例如,若一百万吨地面爆炸时距爆心9500英尺处产生10磅/英寸²峰值超压,则八百万吨地面爆炸时,10磅/英寸²峰值超压将发生在离爆心 $9500 \times 8^{1/3} = 19,000$ 英尺处。同理,若一百万吨地面爆炸时,10磅/英寸²峰值超压(距离9500英尺)的空气爆震波到达时间为3.9秒,则八百万吨地面爆炸时10磅/英寸²峰值超压(距离19,000英尺)的空气爆震波到达时间应该是 $3.9 \times 8^{1/3} = 7.8$ 秒。

第三节 超 压

直接跟在爆震波阵面之后的最大超压值称为“峰值侧向超压”,或者一般地称为“峰值超压”。“侧向超压”指的是在地

表面齐平安装的传感器所记录的通过该点的空气爆震波压力 (即图 3)。地表面爆炸的峰值超压 p_{s0} 、武器当量和水平距离之间的关系可见图 4。

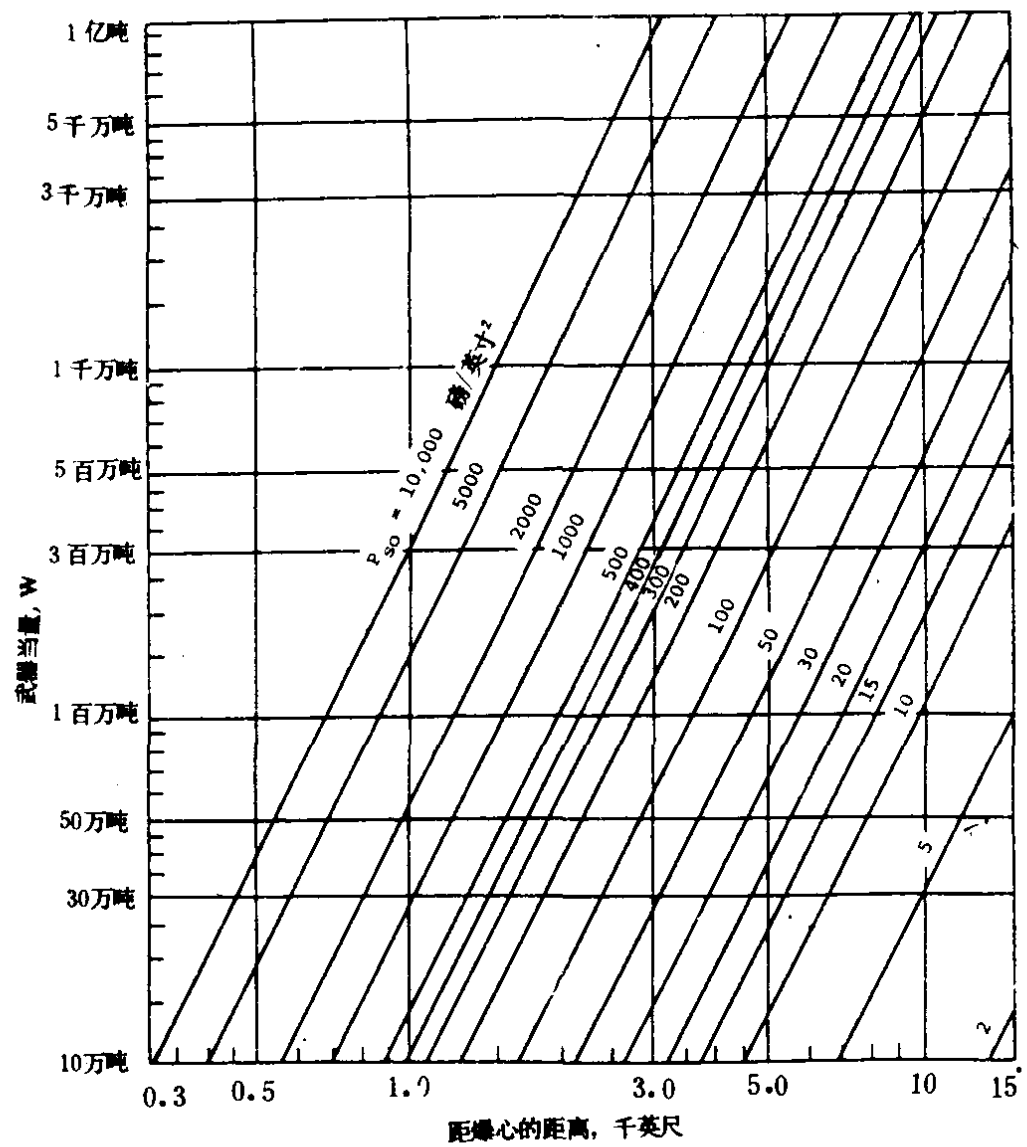


图 4 峰值超压与武器当量和距离的关系^[34]

图 5 表示一百万吨当量的武器地面爆炸时峰值超压到达时间 t_a 、正相周期 t_b 、冲量 I 和峰值超压之间的关系。对于其他当量的地面爆炸，用该当量与一百万吨当量之比值的立方根乘以图 5 所给出的 t_a 、 t_b 和 I 值，就可得到该当量相应

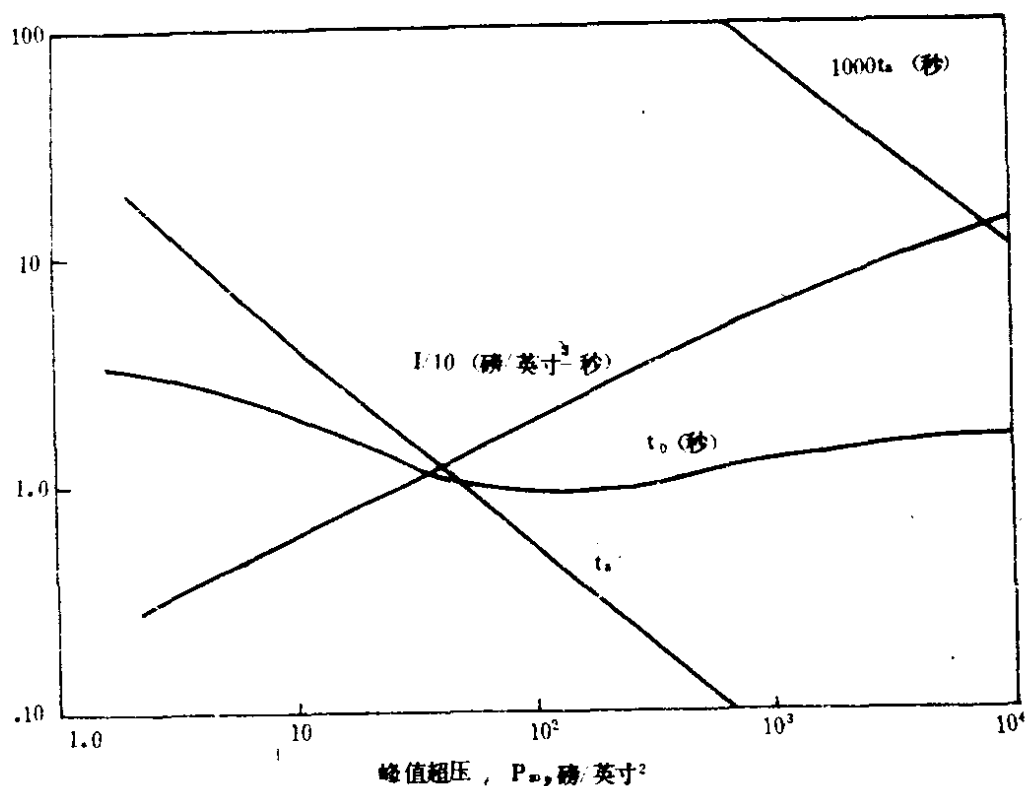


图 5 一百万吨当量武器地面爆炸时,峰值超压到达时间、周期、冲量与峰值超压之间的函数关系^[8]

的 t_a 、 t_0 和 I 值。对于空爆,应该取空爆当量的一半代入当量比值的立方根公式。

爆震波阵面之后的超压衰减率是峰值超压的函数。从初始峰值超压开始,超压随时间的变化关系可以用几个指数衰减项之和来表示,如方程(3)^[8]所给出的那样:

$$p(t) = p_{00}(1 - \tau)(ae^{-\alpha t} + be^{-\beta t} + ce^{-\gamma t}) \quad (3)$$

式中

$$\tau = \frac{t - t_a}{t_0}$$

系数 a 、 b 、 c 、 α 、 β 和 γ 由图 6 给出。图 7 示出规一化的