

仪器车减震台的设计优化

林俊德

(西北核技术研究所, 西安69信箱11分箱 710024)

摘要 本文介绍一种以塑性变形减震概念设计的用于地下爆炸地表层裂区内的仪器车减震台。文中叙述了设计的原理和计算方法。通过同普通的由弹簧和阻尼器构成的减震台的计算对比,说明这种以塑性变形减震概念设计的减震台具有许多优点。对减震台做了吊高达1.5m的落地冲击实验,其结果同计算一致。

关键词 减震装置 冲击 爆炸 缓冲器

1 前言

在大型地下爆炸试验中,测量爆炸物理现象的仪器车的停放距离受到爆后强地震冲击的限制。缩小仪器车停放距离,不但可以改善物理测量质量和工作条件,而且还可以减少大量优质电缆,降低试验经费。为此,近十年来有关单位分别做了不少研究工作,在仪器车减震技术上取得了长足进展。目前采用的仪器车减震方案都还限于改善车轮的着地条件,如采用砂坑缓冲或特种橡胶垫缓冲,采用这类方法,仪器车安全(加速度小于 50m/s^2)停放爆心水平距约 $120\text{m}/\text{kt}^{1/3}$,即相当于地下封闭爆炸的最小安全埋深。要把仪器车停放距离进一步缩小,就得把仪器车安放在一个特制的减震台上。本文以把仪器车停放距离缩小一倍(即达到 $60\text{m}/\text{kt}^{1/3}$ 爆心水平距)为目标对减震台物理方案优化设计问题进行讨论。

2 减震台工作环境及主要技术要求

在地下爆炸中,地表运动的强烈程度对爆深和地质条件相当敏感,假设爆深为 $120\text{m}/\text{kt}^{1/3}$,对于地下水面浅的硬岩场地,在水平爆心距小于爆深的区域里,地表垂向上跳运动的加速度峰值可表示为

$$A = 4700 \left(\frac{1}{100} \cdot \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-2.8} / \sqrt[3]{Q}, \quad (\text{m/s}) \quad (1)$$

式中: R ——爆心斜距,m; Q ——爆炸当量,kt TNT。

在此区域内,大部分地区都存在由于岩体应力波在地面反射,形成拉力波造成的地层层裂运动,剥裂下来的地表层厚度通常为数米到数十米,被剥裂开的地表层(也叫痴片)进行上抛运动,其初速度和抛高可表示为

$$v_0 = 9.7 \left(\frac{1}{100} \cdot \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-2.4}, \quad (\text{m/s}) \quad (2)$$

$$H = 4.8 \left(\frac{1}{100} \cdot \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-4.8}, \quad (\text{m}) \quad (3)$$

假设测量仪器车停放的爆心水平距为 $60\text{m}/\text{kt}^{1/3}$ 。由(2)式计算的对应地表剥裂层的上抛初速度 $v_0 \approx 5\text{m/s}$ ，上抛高度 $H \approx 1.25\text{m}$ 。此处地表的加速度峰值可从(1)式得出，通常为 $300 \sim 1000\text{m/s}^2$ ，即数十个“ g ”。分析表明，在发生剥裂地表层上抛运动的地方，仪器车接受的加速度峰值主要取决于剥裂地表层上抛运动的初速度 v_0 和仪器车本身的振动固有特征。

经验证明，车内仪器的工作故障和损坏程度主要取决于车体接受的加速度峰值的大小和仪器在车内的支承情况。对于 $20 \sim 30\text{Hz}$ 以上的高频震动，采用海绵垫之类的简单措施即可使其加速度控制在要求的范围内。仪器减震的真正困难之处是低频强冲击的衰减，所以减震台的主要技术指标是把 20Hz 以下的低频震动控制在 50m/s^2 以内。

正常情况下爆炸后仪器车需迅速驶离停放地点，且不希望因使用减震台而提出许多仪器车改装要求和现场工程保障要求，同时要求结构简单紧凑，使用管理方便，造价便宜。

3 无阻尼振动系统减震台

图1表示了这种系统的减震原理，它通过隔震弹簧 k 的缓冲作用来实现减震。剥裂地表层上抛和回落过程的垂向运动速度和位移可表示为

$$v_s = v_0 + gt \quad (4)$$

$$x_s = \int v_s dt \quad (5)$$

式中： v_0 为剥裂地表层上抛初速； g 为重力加速度。

假设仪器车的车体同减震台的台面是刚连的（仪器车本身原有的弹簧失效），它们的总质量为 M ，支承台面弹簧的总刚度为 k ，这种情况下仪器车接受的加速度，速度和位移分别为

$$A = \frac{1}{M}k(x - x_s) \quad (6)$$

$$v = \int A dt \quad (7)$$

$$x = \int v dt \quad (8)$$

表1是由(4)~(8)式通过数值计算得到的车体对地表剥裂层上抛运动的响应。计算条件是： $t=0$ 时， $x=0, v=0, M=10^4\text{kg}, v_0=5\text{m/s}$ ；减震台同地表

剥裂层的连接方式分为两种情况，一是底座同地表层刚连，一是底座浮搁在地面上。

表1的结果表明，车体的最大加速度出现在它回落撞击的过程中，为了使车体最大加速度小于 50m/s^2 ，对于减震台底座同地表层刚连的情况，系统自振频率需低于 1.2Hz ，弹簧的行程需大于 1.8m ，车体上抛位移超过 2m 。对于浮搁于地面的减震台，系统自振频率需降至 1Hz 以下，弹簧行程超过 1.6m （包括静态预压缩量 Δx_0 ），车体抛高超过 3m 。可以想象，承载能力达 60t （在 50m/s^2 加速度下）、弹簧行程近 2m 、抛高 $2 \sim 3\text{m}$ 的减震台必然是一个庞然大物，则结构紧凑、使用方便和造价便宜的要求都难以达到。

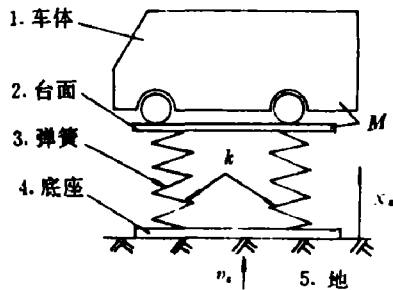


图1 无阻尼振动系统减震

Fig. 1 Isolation of dampless

vibration system

1. Vehicle body; 2. Mesa;
3. Spring; 4. Base; 5. Ground

表 1 无阻尼单自由度线性振动系统对地表剥离层上抛运动的响应

Table 1 The response of dampless vibration system

to surface spalling shock

同地表连接方式	k /(10^4N/m)	f_s /Hz	A_1 /(m/s^2)	A_2 /(m/s^2)	A_3 /(m/s^2)	Δx_1 /m	Δx_2 /m	Δx_3 /m	Δx_{\max} /m	Δx_0 /m	h /m
刚连	0.40	1.01	23.0	-42.7	45.1	0.56	-1.06	1.10	2.16	0.250	2.16
	0.50	1.13	26.6	-45.8	48.4	0.52	-0.91	0.96	1.87	0.200	2.08
	1.00	1.59	40.8	-60.8	60.8	0.39	-0.61	0.61	1.22	0.100	1.82
	1.40	1.88	49.6	-67.6	67.6	0.34	-0.49	0.49	0.98	0.071	1.67
浮搁	0.40	1.01	23.0	-9.80	55.0	0.56	0.250	1.34	1.34	0.250	3.00
	0.50	1.13	26.6	-9.80	67.5	0.52	0.200	1.32	1.32	0.200	3.15
	1.00	1.59	40.8	-9.80	117	0.39	0.100	1.12	1.12	0.100	3.59
	1.40	1.88	49.6	-9.80	146	0.34	0.071	1.00	1.00	0.071	3.65

f_s —— 系统自振频率 $\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{M}}$,

A_2 —— 拉动车体回落的加速度峰值,

Δx_1 —— 车体上抛中弹簧最大压缩量,

Δx_3 —— 车体回落撞击的弹簧最大压缩量,

Δx_{\max} —— 弹簧长度的最大变化量,

A_1 —— 推动车体上抛的加速度峰值,

A_3 —— 车体回落撞击的加速度峰值,

Δx_2 —— 拉动车体回落中弹簧最大伸长量,

Δx_0 —— 车体与台面重力的弹簧压缩量,

h —— 车体上抛位移的最大值.

4 粘性阻尼振动系统减震台

表 2 粘性阻尼单自由度振动系统对地表剥离层上抛运动的响应

Table 2 Response of dampless vibration system

to surface spalling shock

ζ	k /(10^4N/m)	c /($10^4\text{N}\cdot\text{s/m}$)	J_d /Hz	A_1 /(m/s^2)	A_3 /(m/s^2)	Δx_1 /m	Δx_3 /m	Δx_0 /m	Δx_m /m	H /m	ΔH /m
0.1	0.60	1.55	1.23	27.1	48.0	0.438	0.785	0.163	0.948	2.63	2.50
0.2	0.80	3.58	1.39	30.8	48.1	0.344	0.554	0.123	0.667	2.52	2.10
0.3	0.96	5.88	1.49	35.4	48.4	0.284	0.415	0.102	0.517	2.22	1.73
0.4	1.05	8.20	1.49	42.0	48.9	0.247	0.322	0.093	0.415	1.98	1.42
0.5	0.95	8.50	1.42	48.7	50.5	0.234	0.286	0.105	0.391	1.87	1.15
0.6	0.69	9.70	1.06	50.0	46.6	0.244	0.258	0.142	0.400	1.74	0.95
0.8	0.39	10.00	0.60	50.0	41.2	0.267	0.204	0.251	0.518	1.55	0.62
1.0	0.25	10.00	—	50.0	35.8	0.272	0.142	0.400	0.672	1.45	0.40

$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{kM}}$ —— 阻尼比,

c —— 阻尼系数,

A_1 —— 车体被上抛时的加速度峰值,

A_3 —— 减震台落地时的车体加速度峰值,

$\Delta x_0 = Mg/k$ 弹簧静态初始压缩量,

H —— 车体抛高,

k —— 弹簧刚度,

$f_s = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{M}(1-\zeta^2)}$ —— 系统自振频率,

Δx_1 —— 减震台被上抛时的弹簧压缩量,

Δx_3 —— 减震台落地时的弹簧压缩量,

Δx_m —— 弹簧静、动载总压缩量,

ΔH —— 减震台底座跳离地面的最大高度.

图 2 表示了这种系统的工作原理。此时同台面刚连的总质量为 M 的车体加速度为

$$A = \frac{1}{M} [k(x - x_s) - c(v - v_s)] \quad (9)$$

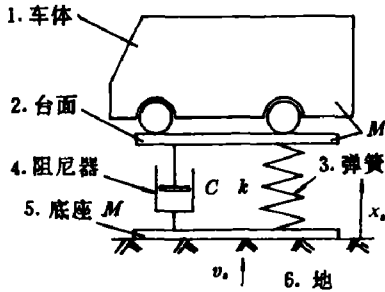


图2 粘性阻尼振动系统减震

Fig. 2 Isolator of viscous damping vibration system

1. Vehicle; 2. Mesa; 3. Spring;
4. Damper; 5. Base; 6. Ground

这里 k 是弹簧刚度, c 是粘性阻尼系数, x 和 x_s 分别是车体和地面的位移, v 和 v_s 分别是车体和地面的速度。

考虑到减震台底座同剥裂地表层刚连的工程实际困难和不可靠性以及刚连一旦失效带来的严重后果, 这里只对浮搁于地面的减震台进行分析。除以 (9) 式代替 (6) 式外, 车体响应数值计算所用方程和无阻尼系统一样。计算条件同样是 $t=0$ 时 $x=v=0$, $M=10^4 \text{kg}$, $v_0=5 \text{m/s}$ 。表 2 是具体计算结果。计算中对弹簧刚度作了适当选择, 使系统对 $v_0=5 \text{m/s}$ 的地表层剥裂冲击的响应加速度峰值都接近于 50m/s^2 , 这样可以比较直观地从表上看出不同阻尼比的减震系统响应特性上的差别。表 2 的数据表明, 当系统的

阻尼比 $\zeta=0.5 \sim 0.6$ 时, 同一减震效果的弹簧压缩量最小, 约为无阻尼系统的 $1/4$, 减震台底座跳离地面的高度也降到约为无阻尼系统的 $1/3$, 这说明设计这类减震台时必需使用阻尼器。

5 以“仿塑性变形减震”概念设计的减震台

不少材料当应力达到屈服极限时, 在基本不变的荷载下产生持续的大变形, 这种变形是永久性的即塑性变形。变形过程中外力所做的功全部转化为热能, 不能再以机械能的形式表现出来。利用塑性变形来实现减震的一大优点是其变形抗力基本不变, 这就能在同一加速度峰值限制下以最小的位移吸收最大的冲击能, 对于以峰值加速度作为限制指标的减震台, 采用塑性变形吸震原理所需的缓冲行程最短, 有利于实现结构紧凑。利用塑性变形的另一优点是震动冲击一过响应即告结束, 没有余振干扰, 安全更有保障。

塑性变形减震系统的缺点也出自于“塑性”, 即已发生的变形不能自动恢复, 由此产生了许多应用的局限性, 比如受震后要求恢复到原来位置的系统或在同一方向要承受多次冲击的系统。仪器车减震台正属于上述塑性变形减震原理的应用受到局限的情况, 不过我们可以利用弹簧和粘性阻尼器的特定组合来构成一个具有复位能力的但又具有塑性变形主要特征的“仿塑性变形”系统。

仿塑性变形减震系统的工作原理仍可用图 2 来表达, 但阻尼器具有 c_1 和 c_2 两个阻尼系数, c_1 对应于弹簧压缩运动, c_2 对应于弹簧回弹运动, 且 $c_2 \gg c_1$ 。从塑性永久变形概念出发, 弹簧回弹的阻尼系数 c_2 越大则系统越接近于塑性变形过程, 而当 $c_2 > 1$ 时, 弹簧回弹到原来位置时已不拥有机械能, 故可把 $c_2 = 1$ 作为仿塑性变形系统的取值下限, 其上限则由要求的系统复位时间确定。

当 $\zeta \geq 1$ 时, 系统的复位时间常数和残留的变形比率为

$$\tau \approx \frac{c_2}{k} \quad (10)$$

$$\eta \approx e^{-t/\tau} \quad (11)$$

式中 t 是复位时间, 当 $t/\tau > 2.3$ 时, $\eta < 10\%$, 可认为系统已经恢复到原来位置了。

在剥裂地表层上抛初速度 $v_0 = 5\text{m/s}$ 时, 浮搁在地面的减震台被上抛后经过约 1 秒落地, 即允许的弹簧复位时间 $t \approx 1$ 秒, 这就要求 $\tau < t/2.3 = 0.43$ 秒, 假定系统的 $k = 10^6\text{N/m}$, $M = 10^4\text{kg}$, 则可算得为保证在 $t < 1$ 秒内弹簧回弹 90% 以上, 需要 $\zeta_2 = c_2 / (2\sqrt{kM}) < 2.1$ 。

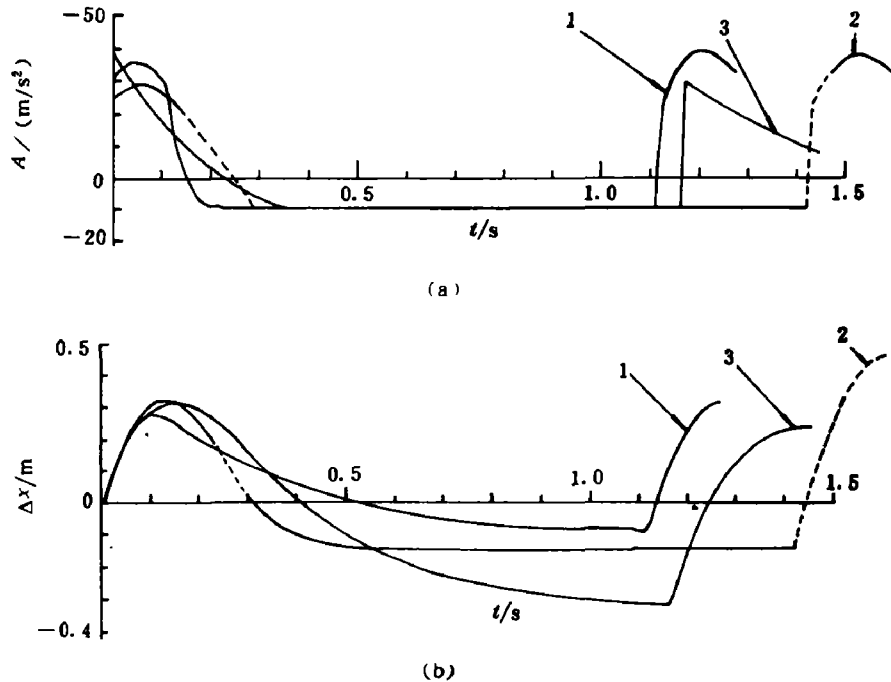


图 3 减震台对地表层剥裂冲击的响应过程

Fig. 3 The response of isolator to spalling shock

1 — $\zeta_1 = 0.03, \zeta_2 = 1.5$; 2 — $\zeta = 0.3$; 3 — $\zeta = 0.70$; ($v_0 = 5\text{m/s}, M = 10^4\text{kg}, M' = 5000\text{kg}$)

图 3 是一组根据仿塑性变形减震原理设计的减震台同普通粘性阻尼振动系统减震台响应过程的对比。计算中取地表剥裂层上抛速度 $v_0 = 5\text{m/s}$, 车和台面的总质量 $M = 10^4\text{kg}$, 减震台底座质量 $M' = 5000\text{kg}$ (参看图 2)。图 3(a) 是车体加速度的变化过程, 图 3(b) 是弹簧压缩量的变化过程, 曲线在左侧部份对应于减震台被上抛时的冲击, 右侧部份对应于减震台的落地撞击。曲线 1 是仿塑性变形减震台的响应过程, 弹簧被压缩时的正向阻尼比 $\zeta_1 = 0.3$, 弹簧伸张时的反向阻尼比 $\zeta_1 = 1.5, \zeta_2 = 5$ 。曲线 2 和 3 分别对应于 $\zeta = 0.3$ 和 0.7 的普通单一阻尼系数的减震台。为了便于对比, 计算中调整弹簧刚度 k 值使三者的响应加速度峰值相等, 图 3(b) 清楚地表明仿塑性变形减震台的弹簧压缩量在相同减震效果 (加速度峰值) 下比普通阻尼系统减震台小得多。

图 4 是仿塑性变形减震台和普通阻尼振动系统减震台对爆炸地表层剥裂冲击响应综合性能的对比。图中的横坐标是压缩弹簧时的正向阻尼系数, 左右纵坐标分别是弹簧的动静载总压缩量 Δx (实线) 和减震台底座跳离地面的最大高度 ΔH (虚线)。计算中采用的参量已表示在图中, 其响应加速度峰值皆为 50m/s^2 。 Δx 的大小直接影响弹簧的长度, 从而决定了减震台的高度。 ΔH 的大小直接影响减震台的倾倒稳定性, 从而决定了减震台的宽

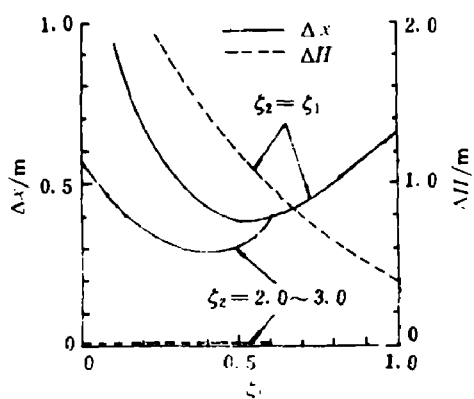


图 4 减震台对地表层剥裂冲击的响应特征参数

Fig. 4 The parameters of response of the isolator to spalling shock

($v_0 = 5\text{m/s}$, $M = 10^4\text{kg}$, $M' = 5000\text{kg}$
 $A_{\text{max}} = 50\text{m/s}^2$)

度。从图 4 中可以看到,当选择反向阻尼比 $\zeta = 2 \sim 3$ 时可使底座不离开地面 ($\Delta H = 0$), 达到最理想的抗倾倒稳定性。而普通的阻尼振动系统即便使 $\zeta = 1$ 也做不到这点, 而图 4 表明在 $\zeta = 1$ 时其弹簧压缩量已达 1.3m , 这已难以接受。当综合 ΔH 和 Δx 两个特征参量来评价两类系统的优劣时, 就会看出仿塑性变形减震台用于爆炸地表层剥裂冲击区域内的优越性是十分明显的。

图 5 是依照仿塑性变形减震原理建造的仪器车减震台的外观, 其台面距地面的高度为 0.8m ; 承重 7t , 在地表层剥裂上抛速度 $v_0 = 5\text{m/s}$ (在通常的安全地下爆炸埋深下对应的爆点水平距约为 $1/2$ 爆点深度) 下可使车体上 20Hz 以下的震动冲击减少到 50m/s 以下, 车上 20Hz 以上的高频冲击一般振幅

为毫米级, 可在安装仪器内用海绵垫之类的减震层来消除。



图 5 仿塑性变形减震台

Fig. 5 The isolator made of quasi-plastic deformation isolating

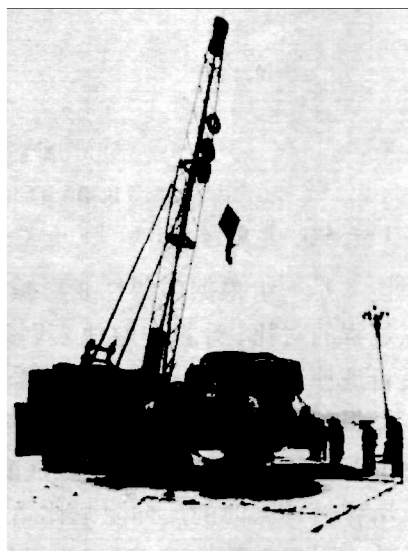


图 6 减震台的落地撞击实验

Fig. 6 The dropping impact test of the isolator

图 6 是为检验减震台垂向减震性能所做的落地撞击试验的现场。载 4t 重卡车的减震台被吊车提升到 $0.4 \sim 1.5\text{m}$ 的高度后自由下落, 以 $2.8 \sim 5.4\text{m/s}$ 的速度撞击地面, 以此来模拟剥裂地表层对减震台的上抛冲击。图 7(a) 是落高为 0.8m 和 1.2m 两次试验记录下来的车地板的加速度示波器记录照片。图 7(b) 是对应的计算的加速波形。可以认为不管

在形态上还是在幅值上,实测的加速度同计算结果都相当一致。这次试验中减震台的底座未曾跳离地面,试验中曾有过底座四脚不同时到达地面的情况,但未发现车体侧向摆动和倾倒的迹象,同预先估计的一样,这种类型的减震台抗倾倒的稳定性很好。

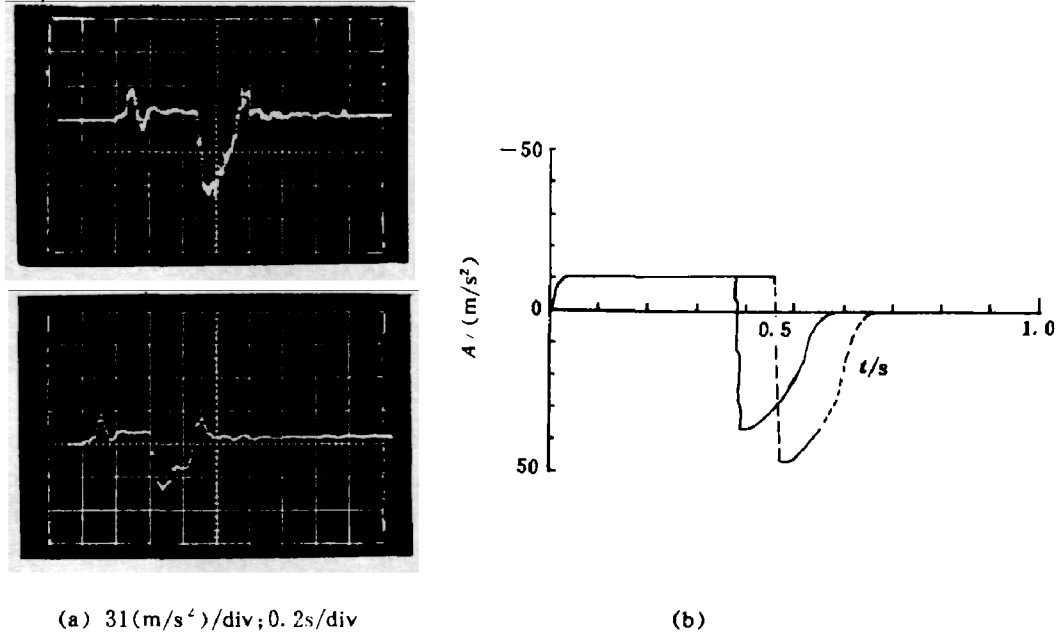


图7 减震台落地撞击实验的车上加速度
Fig. 7 The acceleration of the truck in the dropping impact test of the isolator

6 结论

上面对无阻尼振动系统、粘性阻尼振动系统和仿塑性变形系统的地表层裂性强地震响应做了计算分析,此工作是针对特定位置上使用的仪器车减震台而做的,假设了地面垂向运动的规律是 $v_s = v_0 - gt$,且 $v_0 = 5\text{m/s}$ 。不过,对于发生地表层裂运动的区域,以地面速度 $v_s = v_0 - gt$ 作为系统响应的输入函数是普遍适用的,不同 v_0 值的代入都不会改变对三种系统响应对比的一般性结论。爆炸后不发生层裂现象的地表位移明显比发生层裂的小,所以根据发生层裂运动设计的仪器车减震台是偏安全的。

从上面对三种减震系统的分析可以得出下述结论:

1. 对于爆炸地表层裂运动这类长持续时间大位移的地震冲击,采用单纯的弹簧缓冲难以达到良好的减震效果。在剥裂地表层上抛初速 $v_0 = 5\text{m/s}$ 和车体承受加速度小于 50m/s^2 的条件下,采用纯弹簧缓冲原理设计的减震台的弹簧行程需近 2m ,按此设计的减震台必然规模很大,很笨重,而且弹簧只起缓冲储能作用,不能消耗冲击能,故受到一次冲击后仪器车需承受一系列重复冲击,这对于仪器安全是不利的。因而可以说在发生严重地表层裂的地区采用纯弹簧缓冲的减震台是不合理的,在工程实践上甚至可能是行不通的。

2. 在弹簧缓冲的基础上加上吸收冲击能的阻尼器可以显著地改善减震台对地表层运动的响应。当阻尼比 $\zeta = 0.7 \sim 0.8$ 时,在 $v_0 = 5\text{m/s}$ 和车体加速度不超过 50m/s^2 下,其弹簧压缩量可不超过 0.5m ,其底座跳离地面高度可小于 0.8m ,以这样的指标来建立减震台一

般是可以被接受的。

3. 采用仿塑性变形吸震原理设计的减震台可在粘性阻尼振动系统的基础上进一步改善减震功能,对于 $\zeta_1=0.3\sim 0.4$, $\zeta_2\approx 2.0$ 的仿塑性变形减震系统,在 $v_0=5\text{m/s}$ 和车体允许加速度小于 50m/s^2 的条件下,减震台弹簧行程可进一步降到约 0.3m ,则比粘性阻尼系统又小了近一倍,而且减震台的上抛高度也进一步减小,底座可完全不离开地面,防颠复的安全性得以进一步提高。因而有理由相信,采用仿塑性变形吸震原理,来设计地下爆炸强地表层裂区内使用的仪器车减震台,有利于达到其最紧凑结构和最高的抗倾倒稳定性。

THE OPTIMIZATION ON THE DESIGN OF A SHOCK-ISOLATING PLATFORM USED FOR INSTRUMENT VEHICLE.

Lin Junde

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, 710024)

ABSTRACT A shock-isolating platform designed by using the idea of plastic deformation isolation is presented in this paper. This platform was used for an instrument vehicle which was used in the region of surface spalling caused by underground explosion. The principle and calculation method of design are described. A comparison of calculated results with that of an ordinary isolator made of springs and dampers indicated that it has many advantages in isolating the shock of large displacement. A set of tests by lifting the platform up to 1.5m and dropping it to impact the ground surface were done and the results were in accord with that of the calculated.

KEY WORDS shock isolator, shock, explosion, buffer