

文章编号:1006-1355(2018)01-0074-05

## 动平台光电设备冲击隔离的工程设计

姜伟伟<sup>1,2</sup>, 扈宏毅<sup>1,2</sup>, 刘儒贞<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209; 2. 中国科学院光束控制重点实验室, 成都 610209)

**摘要:**以减小冲击对光电设备的影响,增加设备的可靠性和使用寿命为目标,详细论述机动平台光电设备冲击隔离的工程设计方法。首先推导冲击隔离公式,基于该公式讨论缓冲器两个主要指标阻尼比、刚度与设备位移、速度、加速度响应的关系;然后给出冲击隔离系统冲击能量消耗的基本公式,讨论冲击能量消耗速度与缓冲器的刚度、阻尼比的关系;最后论述如何确定冲击隔离缓冲器的技术参数,一体考虑冲击、振动隔离时的工程设计方法。

**关键词:**振动与波;机动平台;冲击;隔离;缓冲器

中图分类号:O347.1

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2018.01.014

## Engineering Design of Shock Isolations for Mobile-platform Opto-electronic Equipment

JIANG Wei-wei<sup>1,2</sup>, HU Hong-yi<sup>1,2</sup>, LIU Ru-zhen<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

**Abstract:** In order to reduce the impact of shock on the opto-electronic equipment and increase the reliability and the natural-life of the equipment, the engineering design method of the shock isolation of the mobile-platform is discussed in detail. Firstly, the shock isolation formula is put forward. Based on the formula the relations of the stiffness and damping ratio of the buffer with the displacement, velocity and acceleration of the equipment are discussed. Secondly, the formula of the shock energy consumption rate is provided. Based on the formula, the relation of the impact energy consumption rate with the stiffness and damping ratio of the buffer is analyzed. Finally, determination method of the technical parameters of the buffer is elaborated. The engineering design method of the buffer considering shock and vibration isolation is proposed.

**Key words:** vibration and wave; mobile-platform; shock; isolation; buffer

随着科学技术的发展和社会需求的逐渐提高,光电设备由早期的固定地基式发展到目前车载、舰载、机载、星载等多种承载形式,各种机动平台都存在振动和冲击<sup>[1]</sup>。振动和冲击不但会影响设备的正常工作<sup>[2-3]</sup>,而且会加速设备的结构磨损,甚至导致急剧断裂而破坏,缩减设备使用寿命。随着对设备运转速度、承载能力、控制精度的要求越来越高,对其承载平台振动和冲击的控制也越来越严格。

机动平台总是同时存在振动和冲击,二者既有区别又有联系。隔离振动使用隔振系统,隔离冲击

使用缓冲系统,二者在设计思想上有较大区别。不同的是:隔振处理的是稳态振动,振幅较小;缓冲则主要处理瞬态冲击,振幅较大。隔振系统的设计主要是激振频率和系统固有频率间的匹配,使振动传递率控制在允许范围内;缓冲的主要问题是要求所设计的缓冲器能够储存冲击作用的能量,并且在本次冲击结束后至下次冲击到来之前将储能以系统作自由衰减振动的形式完全消耗,因此缓冲器实际上是一个储能耗能装置,使冲击以较缓和的形式作用于设备。

关于振动的被动隔离方法,理论分析和工程设计文章都较多<sup>[4-7]</sup>,不再赘述。目前对冲击隔离研究论文多集中在缓冲器非线性参数的理论研究<sup>[8-9]</sup>,有些介绍冲击的工程经验而又缺乏理论指导<sup>[10]</sup>。文章以冲击隔离设备响应公式和能量衰减公式为基础,论述了确定缓冲器的两大主要参数刚度、阻尼比的

收稿日期:2017-07-19

**作者简介:**姜伟伟(1984-),男,山东省济宁市人,工学博士,副研究员,主要研究方向为机动平台光电设备结构设计。

E-mail: jdw094698@163.com

方法,并且给出冲击、振动隔离一体考虑时的工程设计方法,可推广应用到其它设备的振动和冲击隔离设计中去。

### 1 冲击隔离公式

根据冲击载荷的特点,针对冲击隔离系统的力学模型,列出冲击载荷基本公式。

#### 1.1 冲击载荷

典型的冲击载荷的时间历程如图1所示。

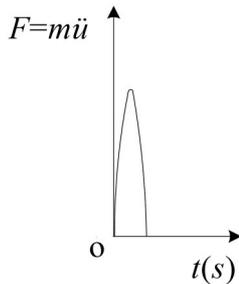


图1 冲击力时间历程

图1所示为冲击力—时间的关系,冲击力从零开始,随着时间的增长冲击力迅速增大,达到最大值后迅速衰减为零。冲击过程时间极短、幅值较大。典型的冲击有:物体跌落碰撞瞬间、炸弹爆炸、发射炮弹、飞机起飞或者降落的瞬间、汽车行进中遇到障碍物和凹坑时等。车载、机载、舰载、星载等平台均存在冲击载荷,在对应的国军标中都规定了相应的试验方法和量值。

#### 1.2 冲击隔离公式

建立缓冲系统的力学模型如图2所示。

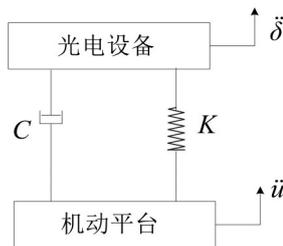


图2 缓冲系统的力学模型

如图2所示的缓冲系统力学模型,对该力学模型根据牛顿第二定律建立公式如下所示

$$\begin{cases} m\ddot{\delta} + c\dot{\delta} + k\delta = -m\ddot{u}(t) \\ \ddot{u}(t) = \begin{cases} \dot{U} & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & t > \tau \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $m$  为光电设备质量;  $c$  为缓冲器的阻尼;  $k$  为缓冲器的刚度;  $\delta$  为光电设备的响应加速度;  $\tau$  冲击作用的时间;  $\ddot{u}$  为机动平台输入到缓冲系统的加速度。

实际缓冲器的刚度和阻尼均具有一定的非线性,

文中将刚度和阻尼设为线性常数,会使计算结果有一定误差,但并不妨碍得到定性结论,且简化了设计过程,其计算结果是完全可以应用于工程实践的。

根据冲量定理,该冲击力的冲击与此力的冲量产生速度阶跃相同,因此当加速度脉冲的持续时间  $\tau$  远小于缓冲系统固有周期  $T$  时,也可将加速度脉冲近似作为速度阶跃冲击。其物理意义为:在冲击力作用的极短时间内(时间的长短是相对缓冲系统的固有谐振频率而言,远小于固有频率周期就可以认为是极短时间),当光电设备几乎没有产生位移的时候就产生了一个较大的速度,随着冲击力消失,缓冲问题转化为初始位移为零、初始速度最大的自由衰减问题,则公式(1)变为

$$\begin{cases} m\ddot{\delta} + c\dot{\delta} + k\delta = 0 \\ \delta(0) = 0, \dot{\delta}(0) = \dot{\delta}_m \end{cases} \quad (2)$$

为更能体现缓冲系统的物理意义,将公式(2)转化为

$$\begin{cases} \ddot{\delta} + 2\xi\omega\dot{\delta} + \omega^2\delta = 0 \\ \delta(0) = 0, \dot{\delta}(0) = \dot{\delta}_m \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\omega$  ——隔振系统固有圆频率,  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  ;

$\xi$  ——为阻尼比,  $\xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$  。

公式(3)的边界条件为:  $t=0$  时刻位移为0、速度为最大值。用数学语言描述该公式:带边界条件的二阶常系数齐次线性微分方程。利用高等数学的知识容易对该方程求解,过程不再论述,给出该方程的解如下

$$\delta = e^{(-\xi\omega t)} \cdot \frac{\dot{\delta}_m}{\omega\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \sin(\omega\sqrt{1-\xi^2}t) \quad (4)$$

公式(4)为设备位移响应表达式,是确定缓冲系统技术参数的基本公式。

## 2 缓冲系统的位移、速度、加速度的时域响应

以公式(4)为基础,研究缓冲器的技术指标参数与设备位移、速度、加速度响应的关系。

### 2.1 缓冲系统的位移时域响应

公式(4)就是设备在具有初始最大速度下的自由衰减表达式。初始条件设置为:  $m=1$  (kg)、 $\omega=10$  (Hz/2pi)、 $0 \leq \xi \leq 1$ 、 $\dot{\delta}_m=1$  m/s、 $0 \leq t \leq 5$  (s)。设备质量和初始速度设置为常量,不影响设备响应趋势,则设备在缓冲系统下随阻尼比和时间变化的位移响应如图3所示。

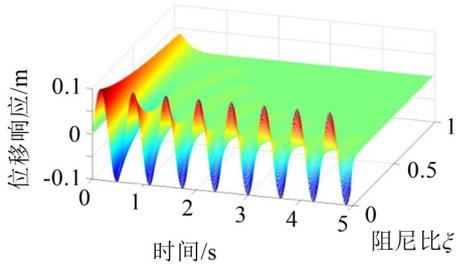


图3 设备随阻尼比和时间变化的位移响应

由图3所示,阻尼比为0时,设备做无衰减的简谐振动;阻尼比不变时,随着时间的增长,设备位移响应幅值越来越小;在同一时刻阻尼比越大设备位移响应越小。

图3为缓冲系统圆频率为定值时的设备位移响应,当设置阻尼比为定值0.05,圆频率在 $10 \leq \omega \leq 60$ 区间时,位移响应如图4所示。

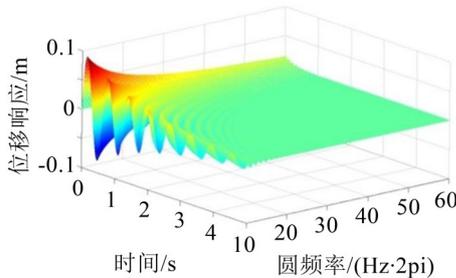


图4 设备随圆频率和时间变化的位移响应

由图4所示,系统圆频率越高,设备初始位移响应幅值越小(与圆频率变化成反比);同一时刻,随着隔振系统圆频率的增大设备位移响应幅值越小。

## 2.2 缓冲系统的速度时域响应

对公式(4)求时域导数,得到设备的速度响应公式为

$$\dot{\delta} = -\frac{\delta_m}{\omega \sqrt{1-\xi^2}} \omega e^{(-\xi\omega)t} \cdot [-\xi \sin(\omega \sqrt{1-\xi^2}t) + \sqrt{1-\xi^2} \cdot \cos(\omega \sqrt{1-\xi^2}t)] \quad (5)$$

加载与2.1节中相同的初始条件,则设备随阻尼比和时间变化的速度响应如图5所示。

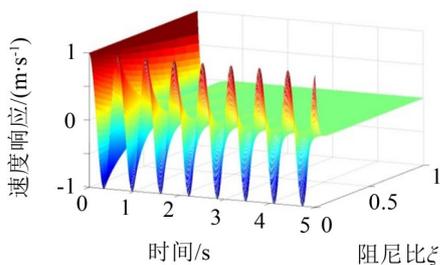


图5 设备随阻尼比和时间变化的速度响应

由图5所示,初始加载速度相同;阻尼比为0时,设备做无衰减的简谐振动;同一时刻,阻尼越大设备速度响应越小;阻尼比不变,随着时间的增长,设备速度响应幅值越来越小。

图5是缓冲系统圆频率为定值时设备速度响应,设置圆频率在 $10 \leq \omega \leq 60$ 区间,阻尼比为定值0.05时,速度响应如图6所示。

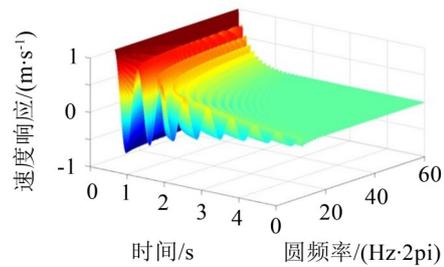


图6 设备随圆频率和时间变化的速度响应

由图6所示,不同频率下的初始速度相同;同一时刻,隔振系统圆频率越大则设备速度响应幅值越小。

## 2.3 缓冲系统的加速度时域响应

对公式(5)求时域导数,得到设备的加速度响应公式为

$$\ddot{\delta} = -\frac{U_m}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot e^{(-\xi\omega)t} \omega [\sin(\omega \sqrt{1-\xi^2}t) + 2\xi \sqrt{1-\xi^2} \cdot \cos(\omega \sqrt{1-\xi^2}t)] \quad (6)$$

加载与2.1节中相同的初始条件,则设备随阻尼比和时间变化的速度响应如图7所示。

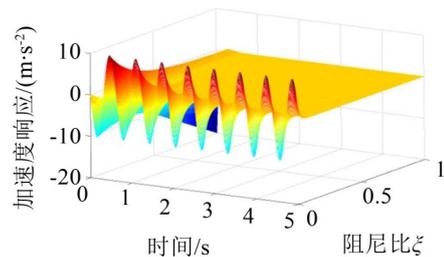


图7 设备随阻尼比和时间变化的加速度响应

由图7所示,初始加速度随着阻尼比的增大而增大;纵观整个响应过程,当阻尼比约为0.265时候加速度的响应值最小;阻尼一定时,随着时间的增长,加速度响应幅值越来越小。

图7是缓冲系统圆频率为定值时的设备加速度响应,当设置圆频率在 $10 \leq \omega \leq 60$ 区间,阻尼比为定值0.05时,加速度响应如图8所示。

由图8所示,随着缓冲系统圆频率的增大,设备初始加速度响应越来越大;圆频率越大,加速度响应

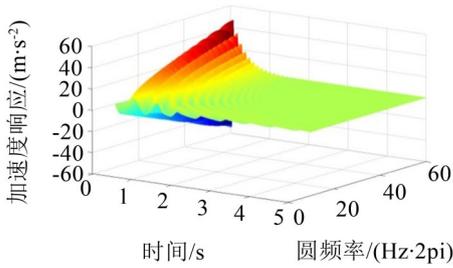


图8 设备随圆频率和时间变化的加速度响应

在整个时域衰减速度越快。

### 3 冲击能量的存储与消耗

从能量的角度分析缓冲的过程,缓冲系统的本质为冲击能量的储存、消耗、释放的过程,本节研究冲击能的变化过程和缓冲系统的技术参数的关系。

#### 3.1 冲击能量的转化过程

设备受到冲击后在极短的时间内就产生较大的速度,缓冲系统的弹性储能装置缓冲器还没储存冲击能时冲击就结束了,此时冲击输入缓冲系统的能量完全转化为设备的动能,设备动能的计算公式如下

$$J_1 = \frac{1}{2}m\delta^2 \quad (7)$$

此时的设备具有最大动能,随着设备在缓冲系统下做有阻尼的自由振动,设备的动能一部分转化为缓冲器的弹性势能,一部分被缓冲器的阻尼消耗掉,设缓冲器最大压缩量为 $X$ ,缓冲器刚度为常数 $K$ ,则缓冲器能够存储的最大能量为

$$J_{2m} = \frac{1}{2}KX^2 \quad (8)$$

因此冲击能量的变化过程为:冲击能→设备动能→缓冲器的弹性势能,其中还伴随着阻尼消耗能。

#### 3.2 冲击能量的消耗

如2.1节中所述,缓冲系统做自由衰减运动的过程中冲击能转化为设备动能 $J_1$ 、缓冲器势能 $J_2$ 及缓冲器阻尼消耗能 $J_3$ 。阻尼消耗占总能量 $J_0$ 的比值 $P$ 为

$$P = \frac{J_3}{J_0} = \frac{J_0 - J_1 - J_2}{J_0} = \frac{\delta_m^2 - \delta^2 - \omega^2 \delta^2}{\delta_m^2} \quad (9)$$

将式(4)、式(5)代入式(9),即可得等到冲击能消耗比的计算公式。

加载与2.1节中相同的初始条件,则缓冲系统耗能比随阻尼比和时间的变化如图9所示:如图9所示:阻尼不变,随着时间的增长,能量消耗比越来越大;同一时刻,阻尼比越大能量消耗比越大。

图9为缓冲系统圆频率为定值时的缓冲系统消

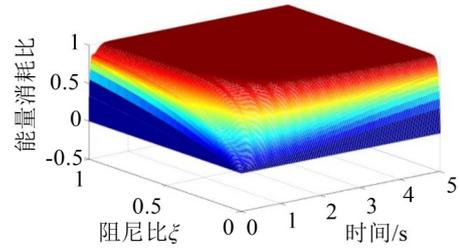


图9 缓冲系统耗能比随阻尼比和时间变化的响应

耗能量比,当设置圆频率在 $10 \leq \omega \leq 60$ 区间,阻尼比为定值0.05时,的能量消耗比如图10所示。

由图10所示,固定圆频率值,随着时间的增长,能量消耗比越来越大;同一时刻,圆频率越大能量消耗比越大,简言之就是缓冲系统谐振频率越高能量耗散越快。

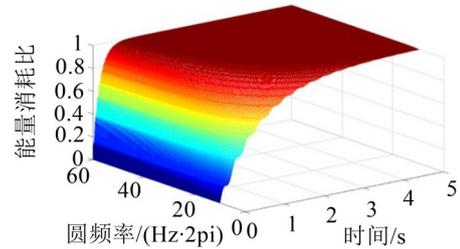


图10 缓冲系统耗能比随圆频率和时间变化的响应

## 4 缓冲系统的参数确定及耦合振动隔离的工程设计

在设计实际的冲击隔离系统时,首先应确定缓冲系统的技术参数,然后在现有缓冲器产品系列中选择合适的型号。因为在各种机动平台上不但存在冲击而且同时存在振动,所以缓冲和隔振二者要一体设计。

#### 4.1 缓冲系统参数的确定

设计缓冲系统最重要的就是确定缓冲系统的两个主要参数:刚度 $K$ 、阻尼比 $\zeta$ ,确定这两个参数主要依据有三条:

- 1) 为使设备不产生硬碰撞,缓冲器的最大储能值大于冲击能量;
- 2) 冲击引起设备的位移、速度、加速度越小则对设备的冲击破坏就越小,因此设备响应越小越好;
- 3) 缓冲系统消耗能量速度越快好,且在下次冲击前能量要消耗完。

基于条件1),参考公式(7)、式(8)列如下方程

$$J_{2m} = \frac{1}{2}KX^2 > J_{1m} = \frac{1}{2}m\delta_m^2 \quad (10)$$

输入冲击能量 $J_{1m}$ 为缓冲系统设计的输入条件,由该公式即可确定缓冲器刚度 $K$ 的取值范围。

基于条件2)、3),根据第2节的基本论述,列

下表:

如表1所示,阻尼比确定方法:为使设备在缓冲过程中的响应加速度最小,减少冲击对设备的破坏效应,根据表中所述阻尼比取0.265;刚度对设备各种响应的影响趋势是不同的,因此要权衡设备的各种响应才能确定。

基于条件3),有些场合冲击是有周期性的,设冲击频率为 $f_i$ ,缓冲器的阻尼比取值为0.265左右,基

于耗能比公式(9)可以简单计算出当缓冲系统做衰减振动1.6个周期时,可将冲击能消耗完,根据经验一般工程设计中要求缓冲系统的谐振频率 $f_0 > 3f_i$ 。

综上所述,缓冲器技术参数的确定方法为:缓冲系统阻尼比一般取0.265左右,从现有产品中较容易选到;缓冲器的储能值要大于冲击输入能量;缓冲器的刚度取值尽量取大,以设备能承受的加速度值为上线。

表1 设备响应与缓冲器刚度、阻尼比的关系表

设备响应	刚度 $k$		阻尼比 $\zeta$		参数趋向
	增大	减小	增大	减小	
位移	初始响应减小, 响应衰减加快	初始响应增大, 响应衰减减慢	衰减速度加快, 响应幅值减小	衰减速度减慢, 响应幅值增大	$k$ 趋大 $\zeta$ 趋大
速度	初始响应不变, 响应衰减加快	初始响应不变, 响应衰减减慢	衰减速度加快, 响应幅值减小	衰减速度减慢, 响应幅值增大	$k$ 趋大 $\zeta$ 趋大
加速度	初始响应增大, 响应衰减加快	初始响应减小, 响应衰减减慢	当阻尼比为0.265时加速度响应最小		$k$ 趋小 $\zeta=0.265$
耗能比	能量衰减加快	能量衰减减慢	能量衰减加快	能量衰减减慢	$k$ 趋大 $\zeta$ 趋大

## 4.2 缓冲耦合振动隔离的一体设计

在实际的机动平台上振动和冲击一般都是同时存在的,因此需要一体设计。关于振动隔离的论文较多,基本方法不再论述,给出二者一体设计时候的工程经验,基本的设计方法如图10所示。

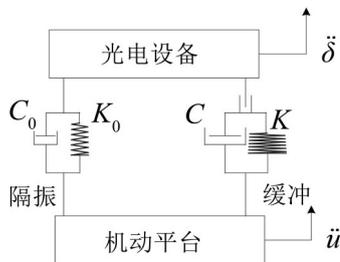


图10 隔振和缓冲一体设计模型

如图10所示,机动平台在振动条件下,隔振系统起作用。当有冲击由机动平台输入系统时,随着能量的输入,设备的位移响应加大,缓冲系统开始起到储能、耗能的作用。随着冲击能耗散到较小值的时候,缓冲系统停止工作,仅隔振部分起作用。一般情况下,缓冲系统的阻尼比和刚度值均比隔振系统大,准确的取值需要由具体的系统而定。

## 5 结语

以冲击隔离公式为基础,推导了设备位移、速度、加速度响应及能量消耗情况和缓冲系统的刚度、阻尼比等参数的数学表达公式,针对缓冲系统的实

际要求再参照上述公式来确定缓冲系统刚度、阻尼比,并且给出考虑冲击、振动隔离一体设计的基本方法。本文不但为缓冲系统设计提供了理论依据,而且列出了工程设计方法,在实际的工程应用中取得了较好的效果,该设计方法也可推广应用在其他电子设备上。

### 参考文献:

- [1] GJB150-1986,军用设备环境试验方法[s]. 1986: 93-100.
- [2] 刘彦丽,曹京晶. 高分辨率敏捷卫星颤振对成像的影响分析方法[J]. **航天返回与遥感**, 2014, 35(2): 46-53.
- [3] 舒陶,任宏光,陈祖金. 机载光电设备减振机构的振动分析及实现[J]. **航空兵器**, 2007, 20(4): 45-48.
- [4] 甘至宏. 光电吊舱内框架减振系统设计[J]. **光学精密工程**, 2010, 18(9): 2036-2043.
- [5] 姜伟伟,徐志洲,任戈. 机载光电成像设备减振系统仿真及试验[J]. **噪声与振动控制**, 2014, 34(3): 186-189.
- [6] 振动计算与减振设计组. 振动计算与减振设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1976: 210-211.
- [7] 杜宁,胡明勇,毕勇,等. 一种车载设备的低频水平减振方法[J]. **振动与冲击**, 2017, 36(7): 184-190.
- [8] 丁旭杰,汪玉,沈荣瀛,等. 线性冲击隔离系统的抗冲击性能即参数优化研究[J]. **振动与冲击**, 2007, 26(9): 83-85.
- [9] 张萌,张振山,张文群. 快速复位型冲击隔离器设计理论研究[J]. **振动与冲击**, 2009, 28(10): 8-14.
- [10] 周文亮,王强. 冲击隔离发展浅谈[J]. **噪声与振动控制**, 2002, 22(5): 22-25.