文章编号: 1001-1455(2014)01-0120-05

抛投式机器人高过载弹射泡沫塑料的共振吸能特性*

姜 涛,王建中,施家栋
(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要: 针对抛投式机器人弹射过程中存在的高过载问题,使用缓冲材料对机器人进行减过载处理。讨论了缓冲材料在高过载情况下的吸能特性,根据抛投式机器人缓冲保护壳的结构和缓冲材料的性质,建立了单自由度支座激励系统数学模型,并对其系统固有频率和放大系数进行了分析。利用弹射器内弹道加速度测量系统测量了弹射器的激励曲线和机器人在缓冲材料作用下的响应。实验结果表明,当缓冲系统的固有频率与弹射器的激励频率接近时,系统产生共振,机器人所受过载增加。通过调整缓冲系统的参数,改变其固有频率,使系统放大系数小于 1,避免产生共振。

关键词: 爆炸力学;吸能特性;单自由度支座激励系统;泡沫塑料;机器人;弹射器;缓冲;高过载
中图分类号: O381;TJ99 **国标学科代码**: 1303599 **文献标志码**: A

反恐侦察需要在最短时间内了解敌方的现场情况,抛投式侦察机器人可以直接投放到敌方控制区域,在最短时间内为指战员提供作战现场的实时图像信息。目前抛投式侦察机器人是由士兵抛投到房屋内,投掷距离在几米至十几米之间,投放人员易遭受隐蔽在室内的敌人攻击。采用枪榴弹或榴弹发射器等弹射方式,其发射过载很大(几千至数万个重力加速度),机器人内部机械结构和传感器精密部件极易损坏,导致整个侦察机器人失效,所以需要对抛投式机器人做缓冲减振处理。

目前使用最多的缓冲材料是泡沫塑料,其密度小,弹性形变大,缓冲性能好并且容易加工。但是对泡沫塑料的研究主要集中在其自身动态力学性能和应力应变特性[1-4],忽略了系统的整体性。被缓冲物的物理性质、接触面积与缓冲材料的相关性质进行耦合形成了独立的系统,该系统的动力学特性与单独的缓冲材料的动力学特性可能不同[5-7]。

本文中,针对抛投式侦察机器人远距离部署过程中存在的高发射过载情况下结构易损坏等问题,对机器人所使用的缓冲材料在高过载情况下的共振吸能特性进行讨论。设计抛投式机器人保护机构,分析其结构和缓冲材料的安装方式,建立单自由度支座激励系统数学模型。利用弹射器内弹道加速度测量系统测量抛投式机器人的缓冲动态响应,并结合所建立的数学模型对实验数据进行理论分析。

1 理论分析

抛投式侦察机器人、缓冲材料(EVA,乙烯-醋酸乙烯酯共聚物)和机器人保护壳组成抛投式侦察机器人缓冲机构,如图 1 所示。抛投式机器人放置在保护壳内,其轴向垂直填充 EVA 缓冲材料。该机构采用活塞式弹射器将侦察机器人发射出膛,在保护壳底部有推杆连接,通过推杆传递弹射器的弹射力。

根据所设计的抛投式侦察机器人的缓冲机构建立了单自由度支座激励系统模型,如图 2 所示,M 为保护壳(支座)质量,m 为机器人质量,k 为缓冲材料的倔强系数,C 为缓冲材料的阻力系数。该系统将机器人与缓冲材料组成的弹簧系统固定在机器人保护壳上,机器人保护壳受轴向力作用进行简谐运

* **收稿日期**: 2012-08-20; **修回日期**: 2012-12-26
基金项目: 国防科工局基础科研项目(B2220110013);
北京理工大学研究生科技创新活动专项计划项目(2012CX10006)
作者简介: 姜 涛(1984—),男,博士研究生。

动，该弹射力为：

$$y(t)=\begin{cases}y_M\sin(ft) & 0\leqslant t\leqslant\tau\\ 0 & t>\tau\end{cases} \tag{1}$$

式中：y_M 为支座振幅，f 为激励频率，τ 为冲击持续时间，$\tau=\pi/f$。机器人和缓冲材料在外壳所传递的力的作用下进行受迫振动[8-9]。

根据牛顿第二定律，机器人阻尼运动微分方程为：

$$m\ddot{x}+C\dot{x}+kx=0 \tag{2}$$

又有：

$$\begin{cases}f_{\mathrm{n}}^2=k/m\\ 2n=C/m\end{cases} \tag{3}$$

式中：f_{n} 为单自由度支座系统固有频率，$f_{\mathrm{n}}=\dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{k}{m}}$，$n$ 为阻尼系数。解方程得缓冲机构振动周期为：

$$T_1=\frac{2\pi}{\sqrt{f_{\mathrm{n}}^2-n^2}} \tag{4}$$

当 $n\geqslant f_{\mathrm{n}}$ 时，在该大阻尼条件下机器人缓冲机构受弹射力冲击后缓慢回复到平衡位置，不产生振动。当 $n<f_{\mathrm{n}}$ 时，根据 $\zeta=n/f_{\mathrm{n}}$，则有：

$$T_1=\frac{T}{\sqrt{1-\zeta^2}} \tag{5}$$

式中：T 为缓冲机构无阻尼振动周期，ζ 为阻尼比，$\zeta=\dfrac{C}{2\sqrt{km}}$。小阻尼条件下，衰减振动的周期增大。

针对机器人的受迫振动，对式(2)求对应的通解和特解，具体求解过程见文献[6]，最终求得该缓冲系统的放大系数方程为：

$$\beta=\frac{x_m}{y_M}=\sqrt{\frac{1+4\zeta^2\lambda^2}{(1-\lambda^2)^2+4\zeta^2\lambda^2}} \tag{6}$$

式中：x_m 为机器人振幅，λ 为频率比，$\lambda=f/f_{\mathrm{n}}$。

则抛投式侦察机器人在缓冲保护机构中所受最大过载为：

$$\ddot{x}_m=\ddot{y}_M\beta \tag{7}$$

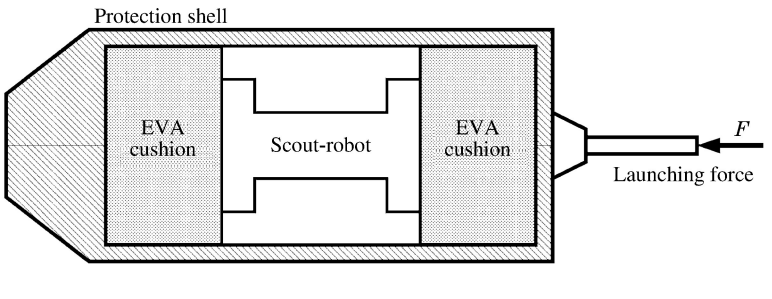


图 1　缓冲保护结构示意图

Fig. 1　Schematic of a shock-absorbing cushion structure

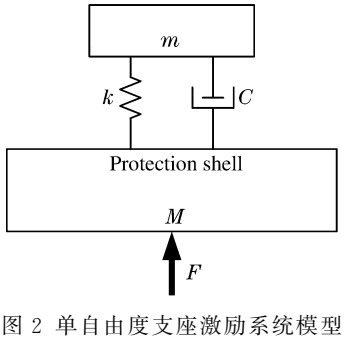


图 2　单自由度支座激励系统模型

Fig. 2　A model for base-excited system with single degree of freedom

2　实　验

2.1　实验系统

根据实验需求和弹射器内弹道特点，研发出一套弹射器内弹道加速度测量系统，系统中将传感器分别安装在抛投机器人和机器人保护壳上，可以直接测量机器人和外壳所承受的发射过载。利用该系统在某靶场进行了实弹发射，具体实验系统如图 3 所示，图 4 为机器人保护壳和缓冲材料的安装方式。



图 3 内弹道测量系统

Fig. 3 Interior ballistics measurement system

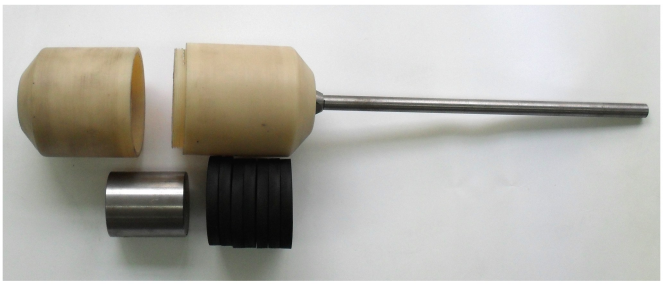


图 4 机器人保护壳和缓冲材料

Fig. 4 Robot protection shell and cushion

2.2 实验材料

根据抛投式侦察机器人结构的强度要求，设定机器人脆值 $G=100$，质量 $m=615$ g，底面直径 $\varphi_2=60$ mm；保护壳内空间的高 $h=170$ mm，直径 $\varphi=80$ mm；采用全面缓冲方式包覆。通过对以上参数的解算，得到在发射距离为 50 m 时机器人缓冲材料所受的最大应力，并与多种材料的缓冲系数进行匹配[6]。选取乙烯-醋酸乙烯酯共聚物为缓冲材料，密度 $\rho=0.089\ 5$ g/cm^3，在相同的弹射力作用下，增大被缓冲物与缓冲材料之间的接触面，使材料所受的应力降低，有助于减小缓冲材料的厚度。因此，在保护壳结构强度和外形尺寸允许的条件下，使被缓冲物与缓冲材料之间的接触面积最大，缓冲材料的直径均为 $\varphi_1=80$ mm，对 3 种缓冲厚度 h 进行实验，分别为 50、70 和 90 mm。每次实验所使用的机器人及保护壳质量、弹射器所使用的发射药药量和高低压室结构均相同。

2.3 实验结果及分析

为了便于对缓冲材料的缓冲效果进行量化对比，对未填充缓冲材料时抛投式机器人所受的过载进行了测试，如图 5 所示，整个内弹道作用时间约 18 ms，加速度峰值约 380g，加速度峰值出现在约 2 ms 时。在机器人出膛口时(约 18 ms 时)，由于机械振动和空气阻力等原因，加速度传感器检测的信号呈现衰减振荡，最终变为减速运动。表 1 所示，未加缓冲材料时的固有频率项为弹射器的激励频率，在其他厚度情况下，所组成缓冲系统的固有频率是根据缓冲系统的倔强系数，并利用单自由度支座系统的固有频率公式得到的。

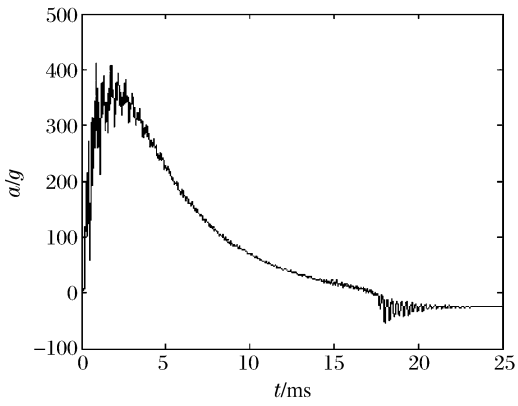


图 5 无缓冲时机器人承受过载曲线

Fig. 5 Acceleration curve of launching without cushion

图 6 中给出了缓冲材料厚度不同的情况下机器人的加速度响应。由图 6(a)可以看出，缓冲材料厚度为 50 mm 时，机器人所受加速度峰值出现在约 5.2 ms 时，与图 5 中实验所测量的加速度峰值相比，延迟了约 3 ms，这是由缓冲材料的阻尼效应导致的。侦察机器人和缓冲材料所组成的单自由度支座激励系统的固有频率与弹射器的激励频率接近，产生了共振，使加速度峰值达到了 1 200g；在这种情况下，抛投式机器人极易损坏。而在该加速度峰值后又出现一个小的加速度峰值，是由于缓冲材料产生了振荡。

由图 6(b)可看出，缓冲材料厚度为 70 mm 时，机器人所受的加速度峰值出现在约 6.5 ms 时。由于缓冲材料的厚度增加，其倔强系数发生变化，缓冲系统作用时间延长，所以机器人所受的加速度峰值出现得比图 6(a)实验中的晚。抛投式机器人与缓冲材料组成系统的结构发生变化，缓冲材料变厚，该系统的固有频率降低，根据式(6)得到其放大系数为 1.26，抛投式机器人所受的加速度峰值为 480g。

由图 6(c)可知，缓冲材料厚度为 90 mm 时，机器人所受加速度峰值出现在约 7.6 ms 时，由于缓冲系统固有频率变低，其放大系数为 1.07，机器人所受加速度峰值为 410g。

根据实验数据和数学模型预测，如在继续增加缓冲材料厚度、降低缓冲材料刚度的情况下，单自由度支座激励系统的固有频率为 30.33 Hz，可使抛投式机器人得到更好的缓冲效果，如表 1 所示，缓冲材料厚度增加到 110 mm 时，机器人所受的最大过载为 314g，放大系数为 0.826。

表 1 抛投机器人缓冲系统实验数据

Table 1 Experimental data of robot cushioning system

h/mm	f_n/Hz	a/g	β
0	55.50	380	
50	58.12	1 200	3.150
70	49.07	480	1.260
90	43.31	410	1.070
110	30.33	314	0.826

从以上分析可以看出，系统固有频率接近弹射器激励频率时，机器人所受加速度明显增加。根据式(6)进一步计算可知，侦察机器人和缓冲材料组成系统的固有频率与弹射器的激励频率相差较大时，缓冲材料起缓冲作用；缓冲系统的固有频率与弹射器的激励频率接近时，系统产生共振，如图 6(a)所示。分析式(6)可知，通过调整缓冲系统的倔强系数和阻尼系数，并与被缓冲机构的质量对应，使整个系统的阻尼比和频率比发生变化，最终使放大系数小于 1，从而缓冲材料对机构进行缓冲，避免发生共振。

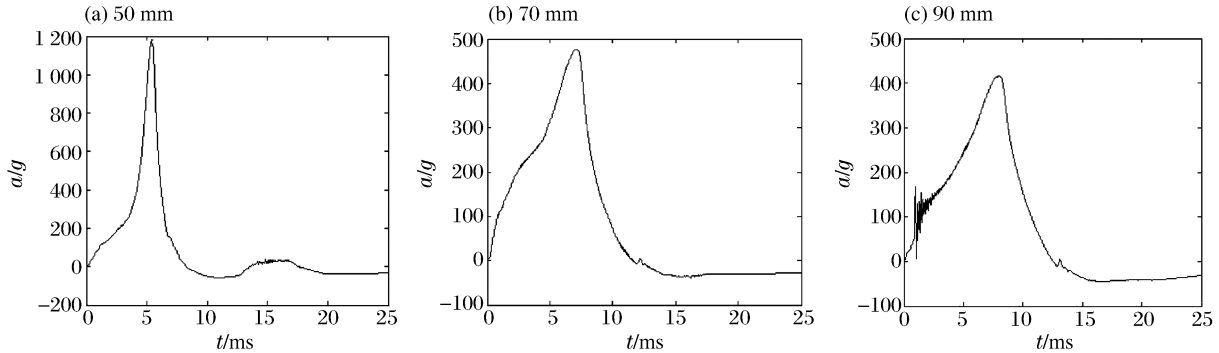


图 6 不同厚度缓冲材料下机器人的加速度响应

Fig. 6 Acceleration response of scout-robot in the cushion materials with different thicknesses

3 结　论

反恐作战中常需要将抛投式机器人弹射到敌方控制区域，但由于受机器人机械结构强度的限制，机器人不能承受大的发射过载，因此需要对抛投式机器人进行缓冲减振。本文中讨论了缓冲材料在高过载情况下的共振吸能特性，根据所设计的缓冲投放系统，建立了单自由度支座激励系统模型，并利用内弹道加速度测量系统测量了弹射器的激励曲线和机器人的缓冲动态响应曲线。实验数据和理论分析结果表明：缓冲材料和机器人组成系统的固有频率与弹射器的激励频率接近时，发生共振，机器人所受过载增加，最高过载达 1 200g，放大系数为 3.42；当两者频率相差较大时，缓冲材料才能起缓冲作用。可通过调整缓冲系统的物理性质和结构参数，改变系统固有频率，使放大系数小于 1，避免产生共振。

参考文献：

[1] 袁应龙，卢子兴. 复合泡沫塑料的缓冲特性研究[J]. 北京航空航天大学学报，2004，30(2)：135-138.
Yuan Ying-long, Lu Zi-xing. Cushioning properties of polyurethane syntactic foam[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(2): 135-138.

[2] 姜锡权，陶杰，王玉志. 改进的霍普金森杆技术在聚氨脂泡沫塑料动态力学性能研究中的应用[J]. 爆炸与冲击，2007，27(4)：358-363.
Jiang Xi-quan, Tao Jie, Wang Yu-zhi. Application of modified split Hopkinson pressure bar technique in the study

of dynamic behavior of a polyurethane foam[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(4):358-363.

[3] 张海波,孙金坤,谭立伟,等.聚氨酯泡沫塑料吸能特性研究[J].材料科学与工程学报,2004,22(1):117-120.
Zhang Hai-bo, Sun Jin-kun, Tan Li-wei, et al. Study of energy-absorbing properties of polyurethane plastic foam [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2004,22(1):117-120.

[4] 胡时胜,刘剑飞,王悟.硬质聚氨酯泡沫塑料的缓冲吸能特性评估[J].爆炸与冲击,1998,18(1):42-47.
Hu Shi-sheng, Liu Jian-fei, Wang Wu. Evaluation of cushioning properties and energy-absorption capability of rigid polyurethane foam[J]. Explosion and Shock Waves, 1998,18(1):42-47.

[5] 文丰,任勇峰,王强.高冲击随弹测试固态记录器的设计与应用[J].爆炸与冲击,2009,29(2):221-224.
Wen Feng, Ren Yong-feng, Wang Qiang. Design of bomb-borne solid-state recorder for high-shock test and its application[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(2):221-224.

[6] 苏远,汤伯森.缓冲包装理论基础与应用[M].北京:化学工业出版社,2006:11-15.

[7] Li Zhi-bin, Yu Ji-lin, Guo Liu-wei. Deformation and energy absorption of aluminum foam-filled tubes subjected to oblique loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012,54(1):48-56.

[8] Mohammad R S, Russel E, Glynn R. Effects of temperature on the material characteristics of midsole and insole footwear foams subject to quasi-static compressive and shear force loading[J]. Materials and Design, 2012,37:543-559.

[9] Li Bin-chao, Zhao Gui-ping, Lu Tian-jian. Low strain rate compressive behavior of high porosity closed-cell aluminum foams[J]. Science China Technological Sciences, 2012,55(2):451-463.

Resonance and energy-absorption capability of polyurethane foam in high-shock launching for scout-robot*

Jiang Tao, Wang Jian-zhong, Shi Jia-dong
(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: For solving the high-overload problem existing during launching the scout-robot, the polyurethane foam was used as cushion material to reduce the overloads endured by the scout-robot. The energy-absorption capability of the polyurethane foam in the high-shock launching was discussed. Based on the structure of the robot protection shell and the properties of the cushion material, a mathematical model was established for the base-excited system with single degree of freedom. And the natural frequency of this system was analyzed as well as its amplification coefficient. An interior ballistics measurement system was developed to measure the acceleration curves of the scout-robot with and without cushion. The experimental results show that the system can produce resonance to make its acceleration increase when the natural frequency of the system is close to the excitation frequency of the launching device. And the natural frequency of the cushion system can be changed by adjusting the system parameters to reduce the amplification coefficient to less than 1 and thus the cushion system can avoid resonance.

Key words: mechanics of explosion; energy-absorption capability; base-excited system with single degree of freedom; polyurethane foam; robot; launching device; cushion; high overload

* Received 20 August 2012; Revised 26 December 2012
Corresponding author: Jiang Tao, eli_jiang@126.com

(责任编辑 张凌云)