

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.03.018

柱状橡胶减振器非线性建模技术研究

闫红松, 殷增振, 舒 钊, 姚建军

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要:针对柱状橡胶减振器在大量级冲击条件下,基于线弹性理论假设带来仿真误差较大的问题,提出了一种利用非线性弹簧阻尼单元的建模方法,给出了该方法的推导过程及冲击刚度曲线的获取方法。通过冲击试验验证了该方法具有很高的计算精度,为减振器的非线性建模技术深入研究奠定了重要基础。

关键词:柱状橡胶减振器;非线性弹簧阻尼单元;冲击刚度曲线

中图分类号:V414

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2017)03-0107-04

Study on the Nonlinear Modeling of Cylindrical Rubber Absorber

YAN Hong-song, YIN Zeng-zhen, SHU Zhao, YAO Jian-jun

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: According to linear elastic theory, a large error about cylindrical rubber absorber in the condition of high shock is caused during the simulation analysis. In this paper, a new modeling method based on nonlinear spring-damping element is proposed, The derivation process of the method is described and the way to get the shock stiffness curve of the rubber absorber is introduced at the same time. The high precision of the method is verified by many shock experiments. This paper has laid the foundation for deeply study on rubber absorber based on nonlinear modeling theory.

Key words: Cylindrical rubber absorber; Nonlinear spring-damping element; Shock stiffness curve

0 引言

近年来,随着惯性导航系统在新型号武器系统上,特别是在超声速、高超声速导弹武器系统上的广泛应用,惯性系统往往要承受大量级的冲击或者宽频段、大量级的随机振动,导致系统精度下降、可靠性降低。橡胶减振器作为一种廉价、高效、占用体积小、技术成熟的减振缓冲元件,能隔离载体和惯性系统之间的振动和冲击,在惯性系统上得到了大量应用^[1]。

橡胶材料是一种超弹性高阻尼材料,在小量级

冲击条件下,其力学表现可近似为线弹性特性。在大量级冲击条件下,橡胶减振器响应特性呈现出明显的强非线性^[2],而这主要是由于橡胶减振器冲击刚度是高度非线性的^[3-4]。基于线弹性理论假设进行仿真计算的结果,与试验过程实际监测到的数据相差甚大^[5],仿真精度难以满足结构设计需要,系统防冲设计一次成功率不高。因此,为提高惯导系统在大冲击条件下力学仿真分析精度,进行橡胶减振器的非线性建模分析技术研究是急需解决的问题。

硅橡胶由于具有高阻尼比、高低温条件下力学

收稿日期:2017-02-13;修订日期:2017-03-02

基金项目:国防基础科研课题(A0420131501)

作者简介:闫红松(1985-),男,硕士,工程师,主要从事惯导系统结构力学仿真分析方面的研究。E-mail:583338851@qq.com

性能稳定的优势^[6],近年来已经成为惯导系统优先选择的减振器材料。本文基于结构动力学冲击理论,通过对惯导系统用硅橡胶柱状减振器冲击试验数据进行仿真反推,获取了减振器的冲击刚度曲线,并利用结构分析软件 ANSYS 中的非线性弹簧单元 Combin39 对柱状橡胶减振器进行非线性建模和仿真;冲击试验结果表明,仿真结果具有很高的精度,满足了超声速型号惯导系统的研制需求。

1 橡胶减振器非线性建模方法

橡胶是一种各向同性、体积不可压缩或近似不可压缩的超弹性材料,其本构方程常用 Mooney-Rivlin 模型来描述^[7],模型材料参数需要通过橡胶材料的拉伸、压缩以及剪切试验获取,整个过程复杂,成本较高^[4,8],而且这种实体建模方法对于尺寸体积小、冲击压缩率大的惯导系统用柱状减振器适用性较差。经过查阅相关文献,针对惯导系统用柱状橡胶减振器冲击特性的研究,主要是采取线弹性假设^[9],这对于处理大冲击条件下的仿真分析问题,指导意义不大。并且通过对某型柱状减振器超弹性模型的静力压缩仿真分析,当橡胶材料变形量较大时,会导致模型网格形状畸变,计算终止,且计算时间较长,很难获取刚度曲线。

本文基于传统线性简化的有限元建模方法的思路,对减振器进行简化处理,简化为非线性弹簧阻尼单元,结合试验结果数据找到橡胶减振器的受力与变形量之间的变化规律作为仿真输入,迭代修正仿真模型,直至分析结果符合试验情况。

2 半正弦冲击响应基本原理

半正弦冲击加速度(见图 1)峰值是 \ddot{u}_0 、持续时间是 τ ,根据输入条件可求出系统冲击加速度响应 $\ddot{x}(t)$,具体计算方法如下^[10]。

根据牛顿定律可得系统的运动微分方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x}_r + kx_r = 0 \quad (1)$$

式中, m 为惯导系统质量, k 为惯导系统刚度, x 为绝对位移, x_r 为相对位移, $u(t)$ 为基础位移, x_r 和 $u(t)$ 的关系为: $x_r = x - u(t)$ 。激励函数可描述为:

$$\begin{cases} \ddot{u}(t) = \ddot{u}_0 \sin \frac{\pi}{\tau} t & 0 \leq t \leq \tau \\ \ddot{u}(t) = 0 & t > \tau \end{cases} \quad (2)$$

初始条件:

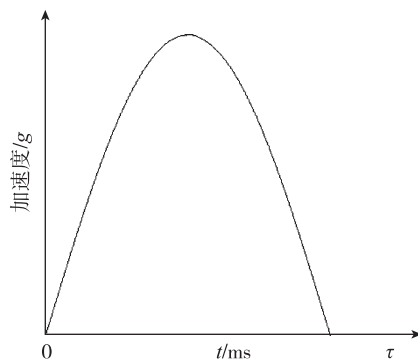


图 1 半正弦加速度激励输入

Fig. 1 The excitation input of half-sine acceleration

$$\begin{cases} x_r(0) = 0 \\ \dot{x}_r(0) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

把式(2)和式(3)代入式(1),可求得系统加速度响应为:

$$\ddot{x}(t) = \begin{cases} \frac{\ddot{u}_0}{1-\beta^2} (\sin \omega t - \beta \sin \omega_n t) & (0 \leq t \leq \tau) \\ \frac{\ddot{u}_0 \beta}{\beta^2 - 1} \left[(1 + \cos \frac{\pi}{\beta}) \sin \omega_n t - (\sin \frac{\pi}{\beta}) \cdot \cos \omega_n t \right] & (t > \tau) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\omega = \frac{\pi}{\tau}$ 为半正弦激励频率; $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$; $\beta =$

$\frac{\omega}{\omega_n}$ 为频率比。

上述理论计算基于减振器刚度不变的假设,实际工程应用中,也验证了橡胶减振器在线性段内冲击响应仿真计算结果和试验结果基本一致。但对于大量级、宽脉冲的冲击条件仿真结果往往差异很大,主要原因就是减振器的冲击刚度已进入非线性区,采用线性模型计算误差较大,必须对减振器进行非线性建模才能获得较为准确的仿真结果。

3 基于冲击试验结果的有限元模型修正

对某安装柱状橡胶减振器(见图 2)的惯导系统分别做了 60g2ms 到 60g6ms 共 5 组冲击试验,试验结果及基于线弹性假设的仿真分析结果如表 1 所示。从对比结果来看,随着冲击脉宽的增大,仿真误差也逐渐增大,60g6ms 时达到 37.7%,误差过大,减振器理论计算变形量达到了 4.3mm,已超过了橡胶的厚度 3.5mm,所以基于线弹性假设的建模方法失效;但对于 60g2ms 这一工况仿真与试验结

果基本一致,这是由于脉宽窄,减振器变形量为 1.67mm,而该型减振器中间橡胶的厚度为 3.5mm,即减振器变形量小于 50%,此种情况,可用线弹性假设近似求解。

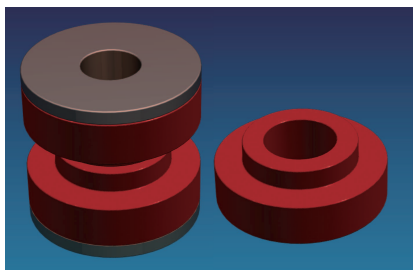


图 2 研究用柱状橡胶减振器

Fig. 2 Cylindrical rubber absorber in the study

表 1 试验结果与线性建模仿真结果对比
Tab. 1 The comparison of results between experiments and linear modeling simulation

工况	负向冲击 最大响应/g	正向冲击 最大响应/g	基于线性 建模仿真 最大响应/g	最大绝对 误差
60g 2ms	32.7	32.2	32.9	2.2%
60g 3ms	62.3	58.5	48.3	22.9%
60g 4ms	94.9	92.4	62.4	34.2%
60g 5ms	114.0	119.5	74.7	37.1%
60g 6ms	130.8	136.5	85.1	37.7%

减振器在冲击过程中被压缩,随着压缩位移的增大,其刚度呈现类似指数函数式增大^[4],如果将实际减振器的这条刚度曲线拟合出来作为仿真输入,理论上应该能得到与实际试验数据相吻合的结果。结构分析软件 ANSYS 中的非线性弹簧单元 Combin39,允许用户自定义输入刚度曲线,即输入变形量(位移)与相应的作用力的一组数据。结合该惯导系统用减振器摸底试验数据进行分析、反推、修正,得到了针对该型减振器的冲击刚度规律,使得仿真结果与试验数据基本吻合,验证了思路的可行性。

根据大量的工程经验以及表 1 中试验与仿真结果,在减振器压缩变形量小于 50%时,理论解和试验结果基本一致,所以认为减振器力学特性处于线性区域,即刚度值基本保持不变,此阶段的刚度我们称为初始刚度。之后随着橡胶材料压缩量的增大,刚度变化越来越剧烈。根据曲线特点,可以选择 6、7 个点,其中,变形量在 50%内选择 2 个点,以后点数逐渐加密。初始点选为变形量很微小的一个值,如 0.1mm,对应的力值即为 0.1 乘以减振器的初始刚度;第 2 个点变形量选为 50%乘以减振器

可压缩的材料厚度,对应的力值即为此时变形量乘以减振器的初始刚度;第 3 个点刚度值可根据试验结果进行试算并修正,然后进行第 4 个点的试算、修正,直至第 7 个点,第 7 个点可略小于材料厚度,如材料厚度 3.5mm,选择变形量 3.4mm 为第 7 个点。这样可以得到该次试验减振器以力和变形量表达的刚度变化曲线。

对该惯导系统用橡胶减振器 5 组冲击试验数据进行整理,拟合得到了力-位移曲线如图 3 所示,具体点对应的力-位移值如表 2 所示。

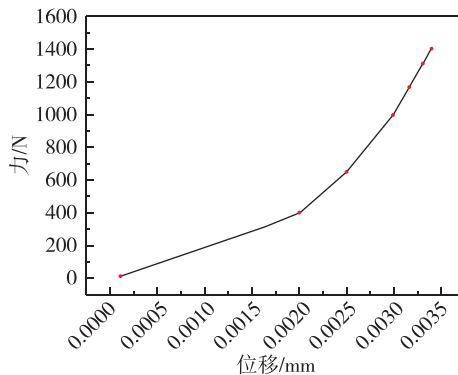


图 3 力-位移曲线

Fig. 3 The curve of force and displacement

表 2 拟合得到的力-位移值

Tab. 2 The fitting value of force and displacement

位移/m	力/N
0.0001	19
0.00167	323
0.002	400
0.0025	650
0.003	950
0.0032	1100
0.0034	1250

该刚度曲线作为输入仿真结果与试验结果对比如表 3 所示,可见,仿真精度基本可以达到 2.1% 以内,仿真精度较高。

表 3 基于非线性建模拟合修正后仿真结果与试验结果对比
Tab. 3 The comparison of results between correction nonlinear modeling simulation and experiments

工况	负向冲击 最大响应/g	正向冲击 最大响应/g	基于线性 建模仿真 最大响应/g	最大绝对 误差
60g 2ms	32.7	32.2	32.82	1.8%
60g 3ms	62.3	58.5	59.78	2.1%
60g 4ms	94.9	92.4	93.76	1.4%
60g 5ms	114.0	119.5	118.39	0.9%
60g 6ms	130.8	136.5	137.76	0.9%

4 试验验证

惯导系统常用的柱状橡胶减振器频率一般为30~120Hz,假设其刚度变化率与材料压缩量的变化率之间的对应关系是基本不变的,如压缩率在50%以内时,认为冲击刚度不变;压缩率在80%时,冲击刚度为初始刚度值的1.5倍等。那么对任意尺寸相近的柱状橡胶减振器,都可以对其冲击刚度曲线进行预估。再通过冲击试验进行二次修正,最终得到减振器的冲击刚度曲线。

通过对表2中数据进行处理,得到了柱状橡胶减振器的压缩率与刚度变化率对应关系如表4所示。

表4 压缩率与刚度变化率对应关系

Tab. 4 The relationship of compression rate and stiffness change rate

压缩率 (位移/厚度)	刚度变化率 (刚度/初始刚度)
2.9%	98.5%
49.1%	100.2%
58.8%	103.6%
73.5%	134.7%
88.2%	164.1%
94.1%	178.1%
98.0%	190.5%

采用表4推导的压缩率-刚度变化率对应关系,在另一型号惯导系统的冲击仿真计算中进行了应用。该系统预制了3套尺寸相同、频率不同的柱状橡胶减振器,通过扫频确定减振器频率后,对该系统分别进行了3次60g/6ms半正弦冲击试验,冲击试验结果与基于非线性建模仿真结果的对比情况如表5所示。

表5 仿真与试验结果对比

Tab. 5 The comparison of results between simulation and experiments

工况/Hz	试验结果 (正负双向)/g		仿真结果/g	最大误差
140	92	-95	105	14.13%
120	100	-108	106	6.00%
70	132	-139	137	3.79%

可见,仿真结果与试验结果误差在可接受范围内,其中对于140Hz的减振器,误差稍大为14.13%。经分析,140Hz的减振器初始刚度值比较大,冲击时材料压缩率不大,对于这种情况下其

变形率(压缩率)与刚度变化率关系与表4中的对应关系稍有不一致,这也是橡胶材料因冲击量级不同、脉宽不同、刚度不同而带来响应不同的强非线性问题,需要进行仿真分析模型的二次修正。

5 结论与展望

1)柱状橡胶减振器冲击压缩率在50%以内,可近似认为刚度不变,基于线弹性理论计的仿真结果与试验结果基本一致。

2)当压缩率大于50%,线弹性理论已经失效,需要进行非线性建模,通过已有试验数据对减振器刚度特性曲线进行了拟合和有限元模型的修正,获得了柱状橡胶减振器的冲击刚度曲线,进而推导出了减振器压缩率与刚度变化率的关系,通过冲击试验验证了该方法的有效性,为橡胶减振器非线性建模技术的深入研究打下了重要基础。

3)文中研究的硅橡胶柱状橡胶减振器非线性建模思路和方法,对于其他橡胶种类的减振器非线性建模技术研究也具有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] 虞洲慧,胡德文,李如华. 捷联惯导系统减振设计[J]. 中国惯性技术学报,2009,17(6):648-650.
- [2] 李海涛,李佳,贺华,等. 橡胶隔振器冲击特性的试验研究[J]. 噪声与振动控制,2015,35(1):29-32.
- [3] 黄映云,何琳,谭波,等. 橡胶隔振器冲击刚度特性试验研究[J]. 振动与冲击,2006,25(1):77-78.
- [4] 管月英,孙伟星,张惠民,等. 非线性隔离器冲击刚度特性设计及试验方法研究[C]//上海国际工业博览会暨第三届上海市“工程与振动”科技论坛. 上海,2005.
- [5] 何晓峰,戴洪浪,陈昭会. 硅橡胶减振器冲击非线性仿真分析[C]第八届中国CAE工程分析技术年会,2012.
- [6] 赵云峰. 高性能黏弹性阻尼材料及其应用[J]. 宇航材料工艺,2009,39(5):1-6.
- [7] 刘萌,王青春,王国权. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型中材料常数的确定[J]. 橡胶工业,2011,58(4):241-245.
- [8] 潘孝勇. 橡胶隔振器动态特性计算与建模方法的研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2009.
- [9] 殷雨田,章博,杜新政,等. 带减振器的光纤陀螺惯导系统有限元仿真建模方法[J]. 航空精密制造技术,2007,43(6):23-26.
- [10] Clough R, Penzien J. 结构动力学[M]. 王光远,译. 北京:高等教育出版社,2006.