

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.05.012

非线性迟滞振动系统仿真

路纯红, 白鸿柏

(军械工程学院 火炮工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要: 在基于 Matlab/Simulink 仿真软件的基础上, 建立了双折线恢复力的仿真模型。从非线性迟滞振动系统力学模型和 simulink 仿真程序对非线性迟滞振动系统进行了分析, 并以非线性迟滞振动系统为例作了仿真。结果表明, Simulink 软件编程简单, 可靠性高, 利用其对非线性振动系统进行仿真, 很容易得到系统的位移、速度及加速度的时域曲线。

关键词: Simulink; 双折线恢复力; 非线性振动系统; 仿真

中图分类号: N945.13; N945.12 **文献标识码:** A

Simulation of Non-Linear Hysteresis Vibration System

LU Chun-hong, BAI Hong-bai

(Dept. of Artillery Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: On the basis of Based on the Matlab/Simulink simulation software, the simulation model of bilinear restoring force is established. By the dynamical model of the non-linear hysteresis vibration system and simulink emulator program, the non-linear hysteresis vibration system is analyzed and simulated. The result shows that the simulink software is easy for programming and has high reliability, by utilizing it to simulate the non-linear vibration system, the time domain curves of displacement, speed and accelerated speed can be gained very easy.

Keywords: Simulink; Bilinear restoring force; Non-linear vibration system; Simulation

0 引言

近年来, 隔振系统的工作环境正日益变得复杂化和恶劣化, 基于干摩擦耗能机理的非线性隔振器以其优异的性能, 越来越受到工程界的重视, 在航空航天、尖端军事工业等高科技领域得到了广泛应用。然而, 大量实验及理论研究表明^[1-3], 非线性干摩擦隔振系统中含有双折线迟滞恢复力成分, 给系统的仿真带来很大的困难。

基于 MATLAB 的 Smiulink 仿真软件, 为系统仿真技术提供了新的解决方案, 它不仅提高编程的效率, 而且可以大大提高编程的质量和可靠性, 成为当前国际上首选的计算机仿真软件^[4-5]。故通过对双折线迟滞恢复力的分析, 推导出双折线迟滞恢复力对时间求导的表达式, 并基于 Simulink 软件建立了该力的仿真模型, 为非线性迟滞振动系统的仿真提供了解决方案。

1 非线性迟滞振动系统仿真

1.1 非线性迟滞振动系统力学模型

非线性迟滞振动系统力学模型如图 1, 它代表了工程中可以简化为集中质量的设备通过钢丝绳、

纲丝网、金属橡胶等干摩擦隔振器与刚性基础相联的一类隔振问题^[6]。

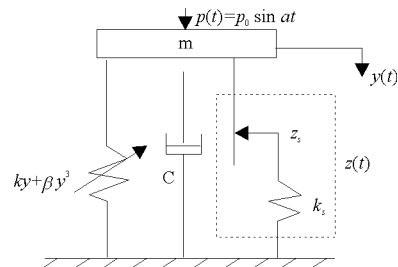


图 1 非线性迟滞振动系统力学模型

通过对振动系统进行受力分析, 建立振动系统运动微分方程为:

$$m\ddot{y} + ky(t) + \beta y^3(t) + c\dot{y}(t) + z(t) = P(t) \quad (1)$$

其中, k 为线性刚度系数, β 为三次非线性刚度系数, c 为一次粘性阻尼系数, $y(t)$ 为位移, $\dot{y}(t)$ 为速度, $z(t)$ 为具有记忆特性的双折线恢复力, 其增量形式的本构方程^[6]为:

$$dz(t) = \frac{k_s}{2} \{1 + \text{sgn}(z_s - |z(t)|)\} dy(t) \quad (2)$$
$$k_s = \frac{z_s}{y_s}$$

收稿日期: 2009-12-27; 修回日期: 2010-02-15

基金项目: 军械工程学院科学研究基金资助项目

作者简介: 路纯红 (1973-), 女, 河北人, 博士研究生, 讲师, 从事振动与冲击防护研究。

式中: z_s 、 k_s 、 y_s 分别为迟滞环节滑移时的记忆恢复力、滑移前的线性刚度、滑移极限。图 2 即为双折线本构关系示意图, y_m 为位移 $y(t)$ 的峰值。

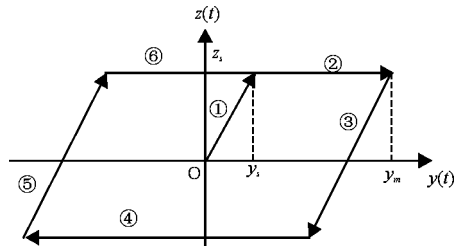


图 2 双折线泛函本构关系

由图 2 可知, 双折线恢复力 $z(t)$ 的斜率可以分段表示为:

$$\frac{dz}{dy} = \begin{cases} k_s & (\text{对应图中1,3,5段}) \\ 0 & (\text{对应图中2,4,6段}) \end{cases} \quad (3)$$

故可将 $\frac{dz}{dy}$ 表示成如下形式:

$$\frac{dz}{dy} = [1 - \varepsilon(\dot{y})\varepsilon(z - z_s) - \varepsilon(-\dot{y})\varepsilon(-z - z_s)] \cdot k_s \quad (4)$$

式中 $\varepsilon(x)$ 为单位阶跃函数, 表示为:

$$\varepsilon(x) = \begin{cases} 0 & (x < 0) \\ 1 & (x \geq 0) \end{cases} \quad (5)$$

由式 (4) 可推出双折线迟滞恢复力的微分方程为:

$$\dot{z} = [1 - \varepsilon(\dot{y})\varepsilon(z - z_s) - \varepsilon(-\dot{y})\varepsilon(-z - z_s)] \cdot k_s \cdot \dot{y} \quad (6)$$

式中, \dot{z} 、 \dot{y} 分别表示迟滞恢复力、位移对时间 t 的导数。

1.2 Simulink 仿真程序

1.2.1 用关系操作模块仿真

由于在 Simulink 模型库中没有专门的阶跃函数模块, 故根据单位阶跃函数的性质, 利用 Simulink 中的数学运算模块组中的关系操作模块 Relational Operator 进行仿真, 仿真模型如图 3。

1.2.2 用 MATLAB 函数模块仿真

单位阶跃函数 $\varepsilon(x)$ 可以表示为:

$$\varepsilon(x) = \frac{1}{2}(1 + \text{sgn}(x)) \quad (7)$$

其中, $\text{sgn}(x)$ 为符号函数, 表示为:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & (x > 0) \\ -1 & (x < 0) \end{cases} \quad (8)$$

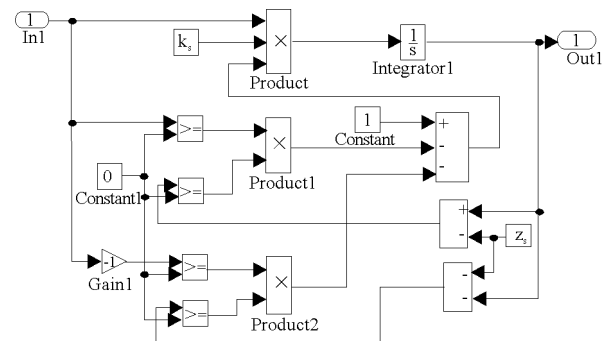


图 3 用关系操作模块仿真双折线滞迟恢复力

故可用 MATLAB 函数模块进行仿真, 在函数模块中用符号函数表示阶跃函数。

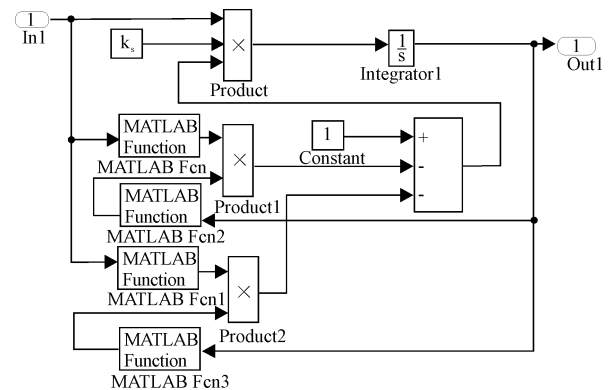


图 4 用函数模块仿真双折线滞迟恢复力

2 仿真实例

以图 1 非线性迟滞隔振系统为例, 系统参数取值为:

$m = 0.5 \text{ kg}$, $k = 649.7 \text{ N/m}$, $\beta = 364.10 \text{ N/m}^3$, $c = 1.5 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, $P_0 = 10.5 \text{ N}$, $z_s = 5.5 \text{ N}$, $k_s = 134.68 \text{ N/m}$, 激振频率 $f = 15 \text{ Hz}$, 对该系统进行仿真, 求出系统的响应。

振动系统的运动微分方程如式 (1), 在 Simulink 模型窗口中, 利用基本模块库建立系统仿真模型, 如图 5。其中, 双折线恢复力 $z(t)$ 仿真模型用自定义功能模块 Subsystem 实现。

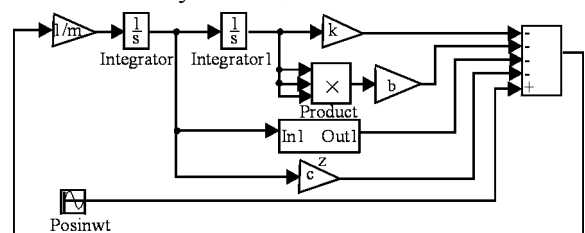


图 5 系统仿真模型

采用 ODE45 变步长算法, 设置适当的仿真参数, 运行系统仿真模型, 得到系统位移、速度、加速度随时间变化的仿真结果如图 6。

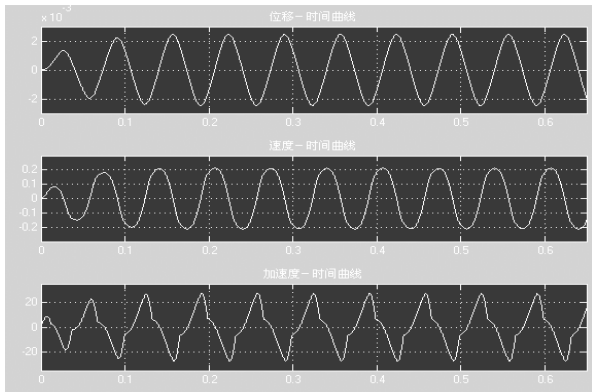


图 6 系统仿真结果

由仿真结果可以看出, 利用所建立的双折线恢复力的仿真模型对非线性迟滞振动系统进行仿真, 在系统设计阶段, 能很容易地得到系统的位移、速度及加速度的时域曲线, 从而实现对系统进行分析、预测、提出改进方案, 以及验证设计理论, 方便、高效。

(上接第 33 页)



图 5 三维战场环境和坦克仿真效果图

4 系统验证

运用计算机仿真技术, 可在实验条件下实现对某个装备或作战系统的评价, 从而逼真地模拟装备性能或作战系统的作战效果, 节省因实装训练带来的人力和物力资源的大量浪费。但所建构的仿真系统为达到该目的, 必须经过验证, 使得仿真系统能够在一定程度上实现实际系统的功能和战技性能。

坦克分队作战仿真系统是仿真坦克等装甲装备进行战术训练的过程。这是一个复杂的系统, 其中涉及到坦克、装甲步兵战车、战场环境、声响系统等主要部分的建模和仿真。下面就坦克分队作战仿真系统验证作初步的探索。

3 结束语

基于 Simulink 的仿真软件建立了 2 种双折线恢复力仿真模型, 并对非线性迟滞振动系统进行了仿真, 可以看出, Simulink 软件编程简单, 可靠性高, 利用其对非线性振动系统进行仿真, 能够很容易地得到系统的位移、速度及加速度的时域曲线。

参考文献:

- [1] 黄协清, 张铁山, 张俊华. 金属橡胶材料隔振特性研究[J]. 机械科学与技术, 2000, 19(6): 977-980.
- [2] 姜洪源, 敖宏瑞, 李瑰贤等. 金属橡胶隔振器动力学模型与分析[J]. 湖南科技大学学报, 2004, 19(3): 23-27.
- [3] 周强. 钢丝绳隔振器的非线性特性及应用[J]. 噪声与振动控制, 1994, 21(4): 8-11.
- [4] 王沐然. Simulink 建模及动态仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [5] 张铮, 杨文平, 等. MATLAB 程序设计与实例应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [6] 白鸿柏, 张培林. 滞迟振动系统及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] 王建平, 张旭, 李强. 浮桥运动与锚索张力耦合影响的非线性分析[J]. 四川兵工学报, 2009(3): 1-3.

仿真系统验证可分为数据有效性验证、概念模型验证、计算机模型校核和操作验证。

5 结论

该系统采用共同的技术框架、模型标准及数据标准, 具有较好的可重构性和互操作性。该作战仿真系统提供了标准的交互和控制接口, 与其他各种武器联网可实现军兵种战术综合仿真训练。目前, 该仿真系统已在蚌埠坦克学院“淮河 2102”等多次演习中得到较好的运用, 可对坦克分队战术训练中指挥员指挥和分队作战行动进行自动成绩评定, 实现了训练科学化、统一化和自动化, 大大减轻了因实车训练带来的场地、训练消耗、人员保障等方面的困难, 产生良好的军事效益和经济效益。

参考文献:

- [1] 龚佑华. 基于HLA/RTI的团级维修器材仓库的设计[J]. 兵工自动化, 2006, 25(6): 26-27.
- [2] 花传杰. 装甲兵军事训练仿真技术[M]. 北京: 解放军出版社, 2004.
- [3] 王元慧, 等. 基于HLA的舰船操纵综合仿真平台的设计[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(2): 386-387.
- [4] 付正军. 计算机仿真中的 HLA 技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.