

文章编号: 1001-0920(2003)01-0120-03

用 Matlab 仿真非线性混沌振动的主动隔振研究

韩保红, 马英忱, 闫石, 焦耀斌, 崔坤林
(解放军军械工程学院 力学教研室, 河北 石家庄 050003)

摘要: 应用主动隔振原理对 Duffing 非线性振子设计了参数自调节的 PD 控制算法, 并用 Matlab 对 Duffing 振子混沌振动进行主动隔振数值仿真实验, 实现了对混沌振动的良好隔振。仿真结果表明, 在混沌振动中应用主动隔振技术是有效的。

关键词: 非线性振子; 混沌振动; 主动隔振; PD 算法
中图分类号: O 545 **文献标识码:** A

Active control isolation research for a class of nonlinear chaotic vibration systems

HAN Bao-hong, MA Ying-chen, YAN Shi, JIAO Yao-bin, CUI Kun-lin

(Department of Teaching and Researching Mechanics, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Using active control isolation principle, an adaptive PD controller is proposed for Duffing nonlinear vibration model. By adjusting PD response variables online, good isolation results are obtained. The simulating results show that active control method can be applied in chaotic vibration isolation.

Key words: Nonlinear vibrator; Chaotic vibration; Active control isolation; PD method

1 引言

传统的振动控制是基于粘弹性材料或动力式的减振、消振和隔振, 称为被动式或无源式振动控制。它具有结构简单、造价低廉、不需外界提供能源等优点。但随着对控制精度要求的提高, 被动式振动控制的局限性越来越明显。因此, 近几十年出现的主动式振动控制技术逐步得到应用。

主动振动控制是通过对结构主动施加作用来改善系统动态特性的一种方法。通常采用传感器检测系统的振动信号, 然后通过控制器对所采集的振动信号进行处理, 并对作动器(执行机构)发出指令产生控制力, 达到减振的目的。

主动控制用于单自由度、多自由度的周期性或非周期性振动的减振, 其效果十分明显。本文将主动

控制技术应用于非线性 Duffing 振子的混沌振动隔振, 采用参数自调节的 PD 控制策略, 对 Duffing 振子的混沌振动进行主动隔振研究。数值仿真结果表明, 隔振效果可达到 20 dB 以上, 证明了混沌振动中应用主动控制技术进行抑振是可行而有效的。

2 Duffing 非线性振子模型

Duffing 振子方程是一个含有立方项的二阶微分方程。该方程在外部激励下发生振荡, 在不同的参数值下表现出包括周期性振荡、分岔、混沌振动等复杂的动力学行为。其方程为

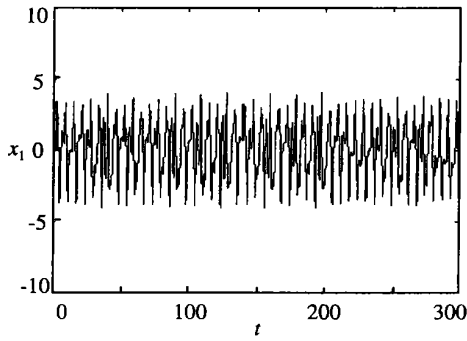
$$\ddot{x} + a\dot{x} + bx + x^3 = q\cos(\omega t) \quad (1)$$

其中 a 和 q 为正数, 且 $a < 1$, $q\cos(\omega t)$ 是外部激励。

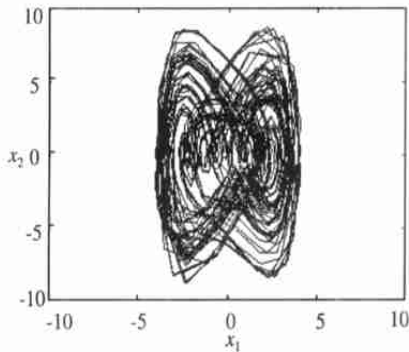
当取参数 $a = 0.4$, $b = -1.1$, $\omega = 1.8$, $q = 1.498$ 时, 系统呈现混沌振动状态^[1], 如图 1 所示。

收稿日期: 2001-08-15; 修回日期: 2001-10-12。

作者简介: 韩保红(1968—), 男, 山西临猗人, 讲师, 硕士, 从事主动减振、混沌减振控制的研究; 马英忱(1961—), 男, 河北阜城人, 副教授, 从事振动力学等研究。



(a) 时间历程曲线



(b) 相平面曲线

图 1 Duffing 系统混沌振动相平面和时间历程曲线

3 自校正 PD 主动控制策略

3.1 主动隔振控制混沌原理

混沌控制的目标^[2,3]主要包括: 1) 抑制和消除混沌运动; 2) 稳定混沌吸引子中所期望的不稳定周期轨道; 3) 控制混沌进入新的动力学行为, 包括实现混沌同步等。

实现上述混沌控制目标的方法虽然很多, 但其共同原理都是利用与时间相关的连续微扰来达到混沌控制的目的。而主动隔振对混沌的控制, 是基于传感器实时检测系统的输出信号, 经 PD 控制器对此信号进行动态性能调节, 然后输出指令控制作动器

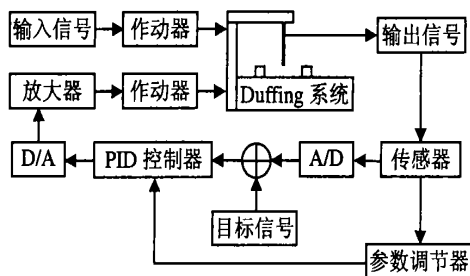


图 2 主动隔振控制 Duffing 系统实验装置

对振动系统施加外力, 目的是使系统的混沌振动大大降低。其本质是从外部给系统施加能源进行控制, 而不是靠小信号的微扰控制。

主动隔振控制 Duffing 系统实验装置^[4]如图 2 所示。

3.2 参数自校正 PD 控制器

PD 控制器是一种比例、积分、微分并联控制器, 它具有较好的控制效果。其数学模型为

$$u(t) = k_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (2)$$

其中: $u(t)$ 为控制器输出, $e(t)$ 为输出与控制目标的偏差, k_p 为控制器的比例系数, T_i 为积分系数, T_d 为微分系数。

实际控制中为了实现简便, 通常采用如下增量形式

$$\Delta u(k) = k_p [e(k) - e(k-1) + \frac{T}{T_i} e(k) + \frac{T_d}{T} e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (3)$$

根据 Ziegler-Nichols 条件, 式(3)最后可化为

$$\Delta u(k) = k_p [2.45e(k) - 3.5e(k-1) + 1.25e(k-2)] \quad (4)$$

由式(4)可见, 实际控制中, 只要对 k_p 进行自校正调节, 便可大大改善 PD 控制器的性能, 从而保证将混沌振动减小到满意的范围内。

k_p 自调节的步骤如下:

- 1) 首先给出一个 k_p 的值, 对混沌系统进行控制;
- 2) 求目标函数 J 的值, 目标函数 J 是关于偏差 e 的泛函;
- 3) 根据 J 值的大小对 k_p 进行调节, 然后在新的 k_p 下对系统进行控制;
- 4) 计算 J 值是否满足要求, 若不满足, 则向下执行; 若已满足, 则校正结束;
- 5) 比较 J 的新旧值, 根据比较值的正负结果调节 k_p , 并重新进行控制, 直到满足要求为止。

可见, 参数自校正 PD 控制器可实现参数自寻优。

4 数值仿真结果与分析

本文采用参数自调节 PD 主动控制对 Duffing 振子混沌振动进行数值仿真实验, 取得了较好的隔振结果。两组隔振结果的时间历程图和相平面图分别如图 3 和图 4 所示。

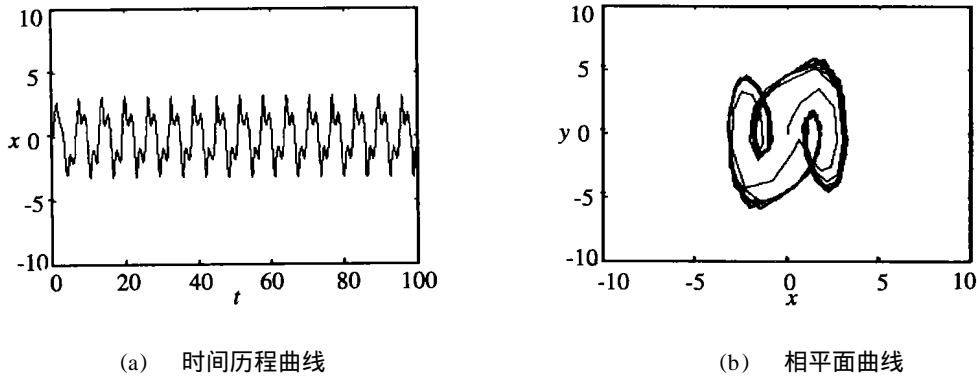


图3 施加比例反馈控制的主动隔振结果

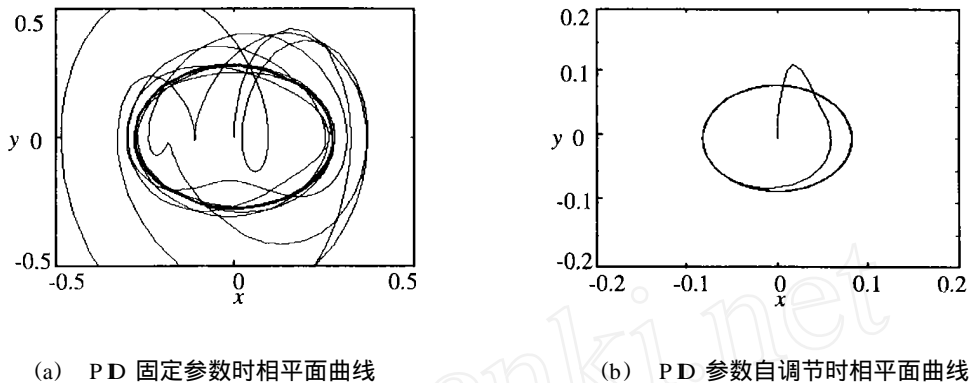


图4 PD参数自调节和PD固定参数的主动隔振结果对比

从以上仿真结果可见,系统在处于混沌振动状态后施加主动隔振控制,能够很快将系统的混沌振动减小 20 dB 以上。随着参数的自调节,减振效果越来越好,最好可减小 30 dB 左右。

本文控制算法在仿真中表现出如下特点:

1) 当 Duffing 振子处于混沌状态时,若施加比例反馈控制,则主动隔振效果较差。但在控制过程中,系统表现出丰富的运动状态变化。随着比例增益的变化,可使系统控制到周期 1 至高周期态,如图 3 所示主动隔振到周期 4。

2) 施加参数固定 PD 控制后,可使主动隔振效果提高很多,一般能达到 20 dB 左右。

3) 采用参数可调节 PD 控制,主动隔振效果显著提高,最好可达 30 dB 左右,而且隔振的动态特性好,过渡过程短。由图 4 可见,参数自调节控制在隔振效果和动态特性方面优于参数固定控制。

5 结 论

本文对于 Duffing 振子混沌振动采用参数自调

节 PD 主动隔振控制策略,将混沌振动抑制 20 dB 以上,取得了良好的减振效果。数值仿真结果表明,将主动控制技术引入混沌振动控制是可行而有效的。

参考文献(References):

- [1] 王东生,曹磊 混沌、分形及其应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1995
- [2] 裴文江,黄俊 自适应延迟反馈控制混沌[J]. 控制理论与应用,1999,16(2): 297-300
(Pei Wenjiang, Huang Jun Control chaos of adaptive delay feedback[J]. *Control Theory Appl*, 1999, 16(2): 297-300)
- [3] Ott E Grebogi, Yorke J C Controlling chaos[J]. *Phys Rev Lett*, 1990, 64(11): 1196-1199
- [4] 刘向东,黄文虎 混沌系统延迟反馈控制的理论与实验研究[J]. 力学进展,2001,31(1): 18-32
(Liu Xiangdong, Huang W enhu Delayed feedback control of chaotic systems and experimental researches[J]. *Adv Mech*, 2001, 31(1): 18-32)