

文章编号: 1000-6893(2001)01-0035-04

多阶复合振动的模糊推理移相控制研究

魏民祥, 闫桂荣, 沈亚鹏

(西安交通大学 强度与振动国家实验室, 陕西 西安 710049)

MULTI-FREQUENCY VIBRATION CONTROL BASED ON FUZZY-REASONING PHASE-SHIFT

WEI Min-xiang, YAN Gui-rong, SHEN Ya-peng

(National Laboratory of Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 针对空间柔性结构阻尼小、非线性以及不确定性等特点, 采用模糊推理智能控制方法, 对柔性结构多阶频率的振动进行控制。结果表明, 模糊推理智能控制对于非线性、不确定性结构的振动控制较为有效, 控制精度较高, 并具有较强的鲁棒性和稳定性。

关键词: 多阶复合振动; 模糊推理; 移相控制

中图分类号: V 214.3⁺3; O 159 **文献标识码:** A

Abstract: The flexible space structures have properties of low damping, nonlinearity and uncertainty. It is difficult to establish the mathematics models. Traditional control methods are no longer adaptable to the vibration control of the flexible structures. For example, position, velocity or acceleration feedback control loses its stability and spills over when feedback gain is large enough. As a result, the vibration suppress ratio is not high. In order to realize precise control of flexible structures multi-frequency vibration, fuzzy reasoning intelligent control of phase-shift is adopted in this paper. That is, extracting the information of eigenvalues from the response of vibration, fuzzy-reasoning according to Mamdani's theory and the laws of vibration control, and giving out the control decision values of amplitude, phase and frequency. Control experiments are conducted on a flexible beam excited by continuous force with multi-frequency. The results of experiment show that fuzzy-reasoning phase-shift control is efficient to flexible structures with nonlinearity and uncertainty, and the control has high precision, good stability and strong robustness.

Key words: multi-frequency vibration; fuzzy-reasoning; phase-shift control

大型空间柔性结构多采用复合材料结构, 重量较轻, 阻尼较小, 结构存在一定的分布不均匀性, 存在严重的非线性和不确定性^[1-3], 难以建立有效的数学模型或数学模型过于复杂, 因此传统的控制方法不再适用空间柔性结构的振动控制。

随着智能控制技术的发展, 以智能信息、智能反馈和智能决策为控制三要素的智能控制论^[4], 对于复杂非线性、不确定性结构系统, 无须建立其数学模型即可进行卓有成效的控制。其中以模糊控制、神经网络控制和基于知识的专家控制等智能控制方法应用较为广泛^[5-7]。

近几年来, 结构振动主动控制的文献较多, 文献中涉及的控制理论和实验方法多采用反馈控制法^[8-10], 包括位移、速度和加速度反馈控制等, 实验方法简单, 控制响应速度快, 对实验设施要求不高, 容易实现; 缺点是控制精度不高, 振动抑制比一般在 70% 左右, 容易产生控制溢出, 稳定性差。

其主要原因是结构的非线性产生的振动频率的差频、倍频成分^[11]以及外界干扰信号, 这些频率成分容易造成结构振动控制的不稳定, 产生控制溢出。另外, 作动器特别是压电类作动器的非线性^[12]以及结构的不确定性也对控制造成不利影响。

为了克服这一缺点, 本文采用模糊推理移相控制, 借助于智能控制理论与方法, 依据残余振动量的大小以及相位信息, 对结构振动的幅值和相位进行模糊推理, 给出幅值和相位控制的决策值, 使振动控制效果近于最优。

1 模糊推理控制(FRC)理论

(1) 模糊假言推理 设 $A = F(U)$, $B = F(V)$, 它们具有下列关系:

IF x is A THEN y is B

若 $A = F(U)$, A 与 A 可以进行模糊匹配, 则推出

y is B , $B = F(V)$

可以用下列模型表示

知识 IF x is A THEN y is B
 证据 x is A
 结论 y is B

(2) Mamdani 模糊推理 1974 年 E. H. Mamdani 提出了用条件命题为最小运算规则来构造模糊关系^[13], 记为 R_c

$$R_c = A \times B = \bigcup_{u \times v} \mu_A(u) \mu_B(v) / (u, v) \quad (1)$$

对于上述模糊假言推理, 已知证据为 x is A, 则结论 y is B, 推理合成规则为 max min 复合运算, 结果

$$B_c = A \circ R_c = A \circ (A \times B) \quad (2)$$

它的隶属函数为

$$\mu_{B_c}(v) = \bigcup_u [\mu_A(u) \mu_B(v)] \quad (3)$$

(3) 模糊推理控制原理 结构模糊推理控制系统的核心部分是模糊控制器, 其输入一般是控制误差 $e(t)$ 和控制误差 $e(t)$ 变化率 $\Delta e(t)$ 。模糊推理控制原理如图 1 所示。

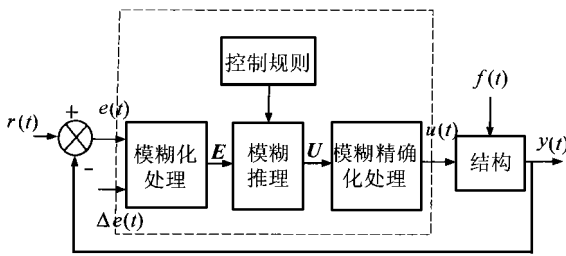


图1 模糊推理控制原理

Fig. 1 The theory of fuzzy-reasoning control

2 结构多阶复合振动的模糊推理控制

实际结构的振动, 往往是由激励载荷作用于结构造成的。激励可以是扰动、冲击、或持续性载荷, 频率成分一般不是单一的, 而是含有多种频率成分的复合信号。因此, 结构的振动响应信号比较复杂, 主要包括激励信号频率成分, 结构的固有频率带宽成分, 结构非线性造成的固有频率的倍频与差频成分, 工频及其它干扰成分。

控制的目的是对谱值较大的前 n 阶频率 $\{\omega\}$ 对应的振动进行抑制。因此, 振动模糊推理移相控制就是对结构振动响应信号进行分析和特征提取, 得到 n 阶对结构振动贡献较大的频率成分 (ω, A_i, φ_i) , 利用这些信息, 经模糊推理重新构造复合控制信号, 即

$$\sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (4)$$

将复合控制信号输入到放大器, 驱动作动器, 抑制结构的振动。由于幅值、相位的控制存在一定的非

线性和不确定性, 因此, 幅值控制信号与相位控制信号由模糊推理控制器给出。

(1) 幅值控制 结构传感器输出的信号能反映残差振动量的大小, 经处理, 作为振动幅值控制的误差信号 e_{Ai} , 单位伏 (V), 取其绝对值, 输出范围设定为 $[0, +5]$ 。误差 e_{Ai} 的语言变量取为 E_{Ai} , 误差变化 Δe_{Ai} 的语言变量取为 ΔE_{Ai} , 模糊集合均取为 {正大 PB, 正中 PM, 正小 PS, 零 ZE}。根据振动控制理论和实验经验, 给出相应的控制规则, 如表 1 所示。控制原理如图 2 所示。

表1 幅值控制 (U_{Ai}) 规则

Table 1 Rules of amplitude control

E_{Ai}	ΔE_{Ai}			
	PB	PM	PS	ZE
PB	PB	PM	PS	ZE
PM	PB	PM	PS	ZE
PS	PM	PS	PS	ZE
ZE	PS	PS	ZE	ZE

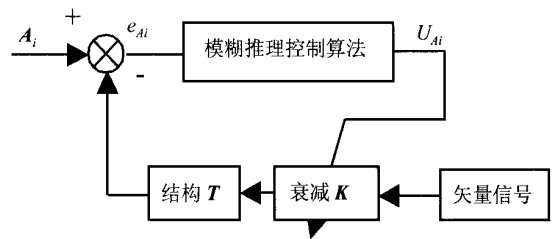


图2 幅值模糊推理控制原理

Fig. 2 The theory of amplitude control using fuzzy-reasoning

根据 Mamdani 模糊推理合成规则得到模糊

关系矩阵 $R_A = \prod_{i=1}^{16} R_i$, 输入量 $e_{Ai}, \Delta e_{Ai}$ 经模糊化处理、模糊推理和模糊精确化处理, 得到幅值控制量 U_{Ai} , 由衰减器对振动幅值进行控制。

(2) 相位控制 由于作动器至传感器有一传递矩阵 T , 以及其它控制环节的时滞, 因此控制信号对应有一定的相位延迟 δ 。根据控制要求, 如果考虑到参考矢量信号的频率与响应信号频率之间误差形成的相位角 δ , 控制信号的相位角应为

$$\varphi_i = \pm n\pi + (\varphi_i - \delta + \delta) \quad n = 1, 3, 5, 7, \dots \quad (5)$$

但实际控制中, 控制信号与响应信号之间并不符合表达式 (5), 而且 δ 和 δ 是不确定的, 因此必须进行相应的移相控制。控制原理如图 3 所示。经辨识和计算得到相位误差 e_{φ_i} 及其变化率 Δe_{φ_i} , 单位度, 对应语言变量取为 E_{φ_i} 和 ΔE_{φ_i} , 取值范围 $[-180, +180]$ 。模糊集合取为 {负大 NB, 负中 NM,

负小 NS, 零 ZE, 正小 PS, 正中 PM, 正大 PB}, 控制规则如表 2 所示。根据 Mamdani 模糊推理合成

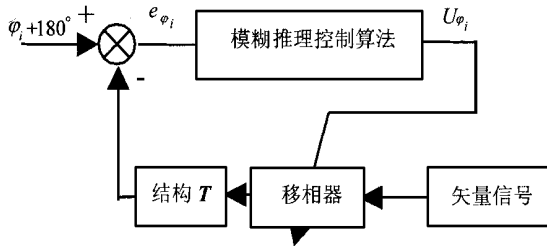


图 3 相位模糊推理控制原理

Fig 3 The theory of phase-shift control using fuzzy-reasoning

表 2 相位控制 (U_{φ}) 规则

Table 2 Rules of phase-shift control

E_{φ_i}	ΔE_{φ_i}						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS
NM	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZE
NS	NM	NM	NS	NS	NS	ZE	ZE
ZE	NS	NS	NS	ZE	PS	PS	PS
PS	ZE	ZE	PS	PS	PS	PM	PM
PM	PS	PS	PM	PM	PM	PB	PB
PB	PM	PM	PM	PB	PB	PB	PB

规则得到模糊矩阵 $R_A = \prod_{i=1}^{49} R_i$, 输入量 e_{φ_i} 和 Δe_{φ_i} 经模糊化处理、模糊推理和模糊精确化处理, 得到相位控制量 U_{φ_i} , 经移相器实施移相控制。

3 多阶复合振动控制实例

(1) 实验原理 实验取一单输入单输出 (SISO) 柔性悬臂梁控制系统, 柔性悬臂梁由一玻璃纤维板构成 (长 \times 宽 \times 厚) (33cm \times 3cm \times 0.25cm)。经测试, 梁结构的前三阶固有频率 (8, 46, 126) Hz, 对振动贡献最大。离悬臂梁固支端 14.5cm 处贴有 2 片 PZT 压电片, 分别作为振动残差信号传感器和控制作动器。激振信号由 AWIG2005 型任意波形发生器产生, 试验原理如图 4 所示。

(2) 实验结果 图 5 所示为结构前三阶频率复合控制的时域图; 图 6 所示为结构前三阶频率复合控制的频率图。控制结果说明, 梁结构的前三阶振动得到了有效的控制, 抑制比均达到 90% 以上, 有较强的鲁棒性和稳定性。

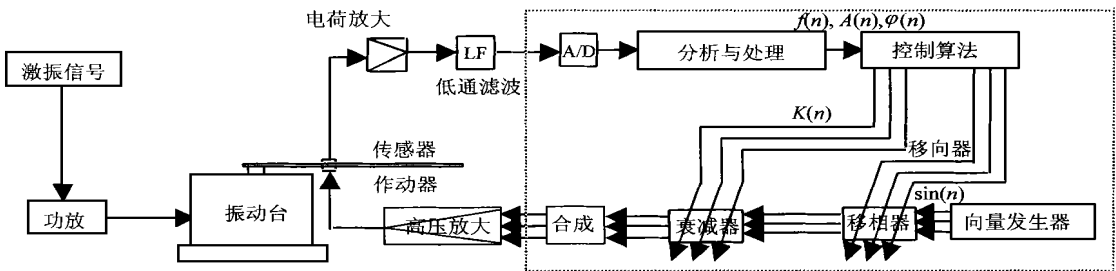


图 4 多阶复合振动模糊推理移相控制试验原理

Fig 4 The experimental theory of multi-frequency vibration based on fuzzy-reasoning phase-shift

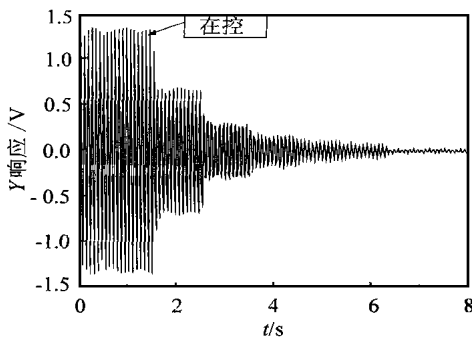


图 5 结构三阶频率复合控制的时域图

Fig 5 The experimental result of multi-frequency vibration control in time domain

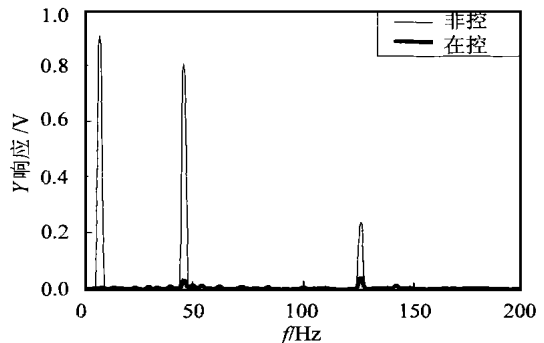


图 6 结构三阶频率复合控制的频率图

Fig 6 The experimental result of multi-frequency vibration in frequency domain

4 结论

(1) 模糊推理控制对于非线性、不确定性结构的振动控制较为有效,控制精度较高,振动抑制比一般在90%以上。

(2) 多阶复合振动模糊推理智能控制有较强的鲁棒性和稳定性,一般不产生溢出现象。

参考文献

- [1] 朱美玲, 赵淳生. 非线性振动系统神经网络自适应控制方法[J]. 振动工程学报, 1996, 9(3): 260
- [2] 王存堂, 等. 大型空间柔性结构主动振动控制实现中的若干问题[J]. 振动与冲击, 1998, 17(1): 80~ 87.
- [3] 黄文虎, 王心清, 张景绘, 等. 航天柔性结构振动控制的若干新进展[J]. 力学进展, 1997, 27(1): 5~ 15.
- [4] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998. 4~ 6
- [5] Cohen K, *etc*. An adaptive Fuzzy control algorithm for model-independent active vibration damping of flexible beam-like structure [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1996, 7(3): 168~ 175.
- [6] Yang S M, Lee G S. Vibration control of smart structures by using Neural networks[J]. Transactions of the ASME, 1997, 119(3): 34~ 39.
- [7] Kandadai R M, Tien J M. A knowledge-base generating

hierarchical Fuzzy-Neural control[J]. IEEE Transactions on Neural networks, 1997, 8(6): 1531~ 1540

- [8] 陶云刚, 路小波, 周洁敏. 利用压电自敏致动器的绕性结构主动振动控制研究[J]. 宇航学报, 1999, 28(1): 71~ 76
- [9] 古渊, 等. 一种基于能量观点的机敏柔性梁振动主动控制方法[J]. 压电与声光, 1998, 20(1): 68~ 70
- [10] 唐永杰, 等. 采用压电机敏元件进行结构振动III: 控制系统设计与实验研究[J]. 应用力学学报, 1997, 4(1): 24~ 28
- [11] Culshaw B. Smart structures and materials[M]. London: Artech House Press, 1996. 151~ 153
- [12] Ge P, Jouaneh M. Tracking control of a piezoceramic actuator [J]. IEEE, Transactions on control system technology, 1996, 4(3): 209~ 216
- [13] 张文修, 梁怡. 不确定性推理原理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996. 228~ 235

作者简介:



魏民祥 1963年生,男,山东青州人,山东工程学院副教授,西安交通大学在读博士生,主要从事结构智能控制研究,电话:029-2660978, Email: weiminxiang@263.net

闫桂荣 1943年生,女,河南开封人,西安交通大学强度与振动国家重点实验室教授,博士生导师,主要从事环境实验控制和结构智能控制研究,电话:029-8038540, Email: ngli@xjtu.edu.cn

学术活动

图像分析和仿真与虚拟现实学术会议在五台山召开

中国体视学学会图像分析和仿真与虚拟现实专业委员会与中国航空学会信号与信息处理专业委员会于2000年8月26日到29日在山西五台山砂河镇召开了全国第一届联合学术会议,并宣布了中国体视学学会仿真与虚拟现实专业委员会(全国二级学会)正式成立。来自全国各地代表共40人,其中包括中国体视学学会张振声秘书长、副理事长赵荣椿教授及部分常委;中国航空学会信号与信息处理专业委员会的部分负责人、声像学会陈来秘书长;中国图形图像学会章毓晋副秘书长;中国电子学会信号处理分会韩毓先副主任委员等专家教授。会议开幕式由三个专业委员会第一届联合学术会议曾义方秘书长主持,并介绍了本届联合学术会议筹备情况,并口头传达了中国科协和中国民政部的有关规定和指示。会议执行主席赵荣椿教授发表了热情洋溢的讲话。

紧接着的学术会议由赵荣椿教授和吴炜煜教授主持,学术交流气氛认真、热烈。会上主要交流了图形、图像处理方法和应用及其新进展;模式识别和人工智能理论方法及应用;建模、仿真与虚拟现实技术的研究和在多种领域中的应用;以及其它相关的新技术的应用等,并评出了优秀论文,由张振声、赵荣椿、郝重阳教授分别为获得三篇优秀论文的作者颁发了荣誉证书和奖金。

会议期间还召开了中国体视学学会部分常委讨论会和仿真与虚拟现实专业委员会第一次工作会议。仿真与虚拟现实专业委员会新的委员及委员代表13人出席了会议,由秘书长曾义方教授汇报了2000年1月12日在北京召开的北京地区仿真与虚拟现实专业委员会的筹备会议情况并讨论了今后开展工作及学术交流的设想,到会的委员们初步确认了专业委员会的组织机构,对今后的工作提出了宝贵的建议,展望了21世纪仿真与虚拟现实技术对我国国民经济的发展将要作出的贡献。

(李铁柏)