

文章编号: 1006-1355(2011)02-0001-03

基于预测函数控制算法的柔性结构振动抑制研究

缙新科^{1,2}, 李大鹏¹

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050;

2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 将系统离散化的状态空间方程作为预测模型, 设计基于预测函数控制算法的柔性悬臂梁振动控制系统。预测函数控制算法减小系统的在线计算量, 提高系统的实时响应能力。使用 Matlab 对振动控制系统进行仿真, 结果表明该算法能够很好地抑制柔性悬臂梁的振动。

关键词: 振动与波; 预测函数控制; 预测模型; 柔性悬臂梁; 振动控制

中图分类号: TP13; O328

文献标识码: A

DOI 编码: 10.3969/j.issn.1006-1355-2011.02.001

Study on Flexible Structure Vibration Suppression Based on Predictive Functional Control Algorithm

GOU Xin-ke^{1,2}, LI Da-peng¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology,

Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Taking the discrete state-space equation as prediction model, a flexible cantilever beam vibration control system is designed based on predictive-function control algorithm. The algorithm reduces the online computation and improves the real-time response ability of the system. The simulation results show that the algorithm is an effective method for vibration suppression.

Key words: vibration and wave; predictive functional control; predictive model; flexible cantilever beam; vibration control

由于柔性结构自身具有扰度高, 阻尼低的特性, 一旦受到外扰时会产生激烈且持续的振动, 影响结构的性能, 因此对柔性结构振动控制是十分有必要的。目前提出的控制方法有很多种。基于现代控制理论的有 LQR, H_2/H_∞ 等方法^[1-2]。LQR 要求建立的系统数学模型准确性很高, 当出现偏差时系统就会出现不稳定现象。 H_2/H_∞ 控制算法是在频域内设计实现的。智能控制方法^[3-5], 如模糊控制、神经网络控制、遗传算法控制等近年来得到了迅速的发展。但是智能控制法在线计算量很大, 不能够很好地满足振动系统的实时性要求。文献[6]采用模型预测控

制法 MPC (Model Predictive Control) 对柔性梁结构振动进行控制取得了满意的结果。为了进一步减小系统的在线计算量, 提高系统的实时响应能力, 本文将离散化的状态空间方程作为预测函数控制的预测模型, 设计基于预测函数控制算法的柔性悬臂梁振动控制系统。

1 预测函数控制的基本原理:

PFC (Predictive Functional Control) 是 20 世纪 80 年代由 Richalet^[7] 提出的, 它在保持模型预测控制优点的同时, 通过引入基函数的概念增强了输入控制量的规律性, 提高了快速性和准确性, 可有效地减少算法的在线计算量。图 1 为 PFC 基本原理的系统框图。

1.1 基函数和控制量

预测函数控制法把控制信号输入看作是若干事

收稿日期: 2010-07-04; 修改日期: 2011-09-03

作者简介: 缙新科 (1966 -), 男, 甘肃天水人, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为智能结构及其动力学系统控制。

E-mail: peng-andqian@163.com

先选定的基函数的线性组合,使控制输入呈现规律性,控制量采用如下结构

$$u(k+i) = \sum_{n=1}^N \mu_n f_n(i) \quad (i=0,1,\dots,P-1) \quad (1)$$

式中 $f_n(i)$ 为基函数在第 i 时刻的采样值,基函数可以是阶跃,斜坡,指数等基本函数。 k 为当前采样时刻, $u(k+i)$ 为从 k 时刻起第 i 时刻的预测控制量, N 为基函数个数, P 为预测的时域长度, μ_n 为加权系数。

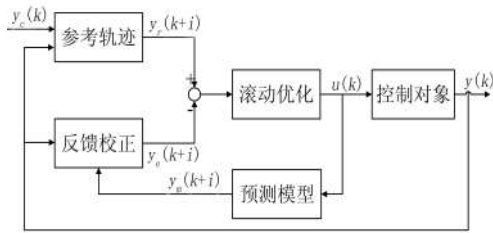


图1 PFC基本原理方框图
Fig.1 PFC Schematic

1.2 预测模型

PFC的预测模型只要求实现预测对象未来输出的功能而不强调其结构形式^[9],可以是状态空间方程,传递函数等传统的数学模型,也可以是阶跃响应,脉冲响应等非参数模型。预测模型的输出 $y_m(k+i)$ 由两部分组成

$$y_m(k+i) = y_1(k+i) + y_2(k+i) \quad (2)$$

式中 $y_1(k+i)$ 为预测模型的自由响应,只与系统的过去状态和过去控制输入量有关; $y_2(k+i)$ 为预测模型的受迫响应,它是当前时刻起加入控制作用 $u(k+i)$ 后新增加的模型响应,其形式可表示为

$$y_2(k+i) = \sum_{i=1}^N \mu_n g_n(i) \quad (3)$$

式中 $g_n(i)$ 为不同基函数所引起的系统响应。

1.3 参考轨迹

PFC控制的目的是使系统当前的实际输出 $y(k)$ 按一条事先给定的输入参考轨迹 $y_r(k)$ 逐渐达到设定值 $y_c(k)$ 。参考轨迹形式为

$$y_r(k+i) = y_c(k+i) - \alpha^i [y_c(k) - y(k)] \quad (4)$$

式中 $y_c(k)$ 为跟踪输出设定值; $\alpha = \exp(-\frac{T_s}{T_r})$, T_s 为采样时间, T_r 为 95% 参考轨迹响应时间。

1.4 反馈校正和滚动优化

由系统的复杂性,建立的预测模型不可能完全与实际相符,因此预测误差是不可避免的。通常取误差为: $e(k+i) = y(k) - y_m(k)$

$y_c(k+i) = y_m(k+i) + e(k+i)$ 为修正后的预测输出。

滚动优化是依据某一性能指标的最优化来求解

控制量的。PFC滚动优化的目标就是求解一组系数 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N$ 使整个优化时域内的预测输出尽可能接近参考轨迹。取极小化的标准式

$$\min J(k) = \min \sum_{i=0}^{P-1} [y_r(k+i) - y_m(k+i) - e(k+i)]^2 \quad (5)$$

2 压电柔性悬臂梁振动系统的预测函数控制

2.1 压电柔性悬臂梁的预测模型

将压电柔性悬臂梁的振动系统状态空间方程离散化后作为预测模型^[1],有

$$\begin{cases} x_m(k) = A_m x_m(k-1) + B_m u(k-1) \\ y_m(k) = C_m x_m(k) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $x_m(k)$, $y_m(k)$ 分别为系统状态矢量和输出矢量; A_m, B_m, C_m 分别为系统矩阵,输入矩阵,输出矩阵。

则 $k+i$ 时刻模型的预测输出为

$$y_m(k+i) = C_m A_m^i x_m(k) + C_m A_m^{i-1} B_m u(k) + \dots + C_m A_m B_m u(k+i-2) + C_m B_m u(k+i-1) \quad (7)$$

将控制量 $u(k+i) = \sum_{n=1}^N \mu_n f_n(i)$ 代入式(3)得

$$y_m(k+i) = C_m A_m^i x_m(k) + \Theta^T G(i) \quad (8)$$

其中: $\Theta = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N]^T$

$$G(i) = [g_1(i), g_2(i), \dots, g_N(i)]^T$$

$$g_n(i) = C_m A_m^{i-1} B_m f_n(0) + C_m A_m^{i-2} B_m f_n(1) + \dots + C_m B_m f_n(i-1) \quad (9)$$

2.2 性能指标与最优解

定义二次型性能指标为

$$\min J(k) = \min \sum_{i=1}^S [y_r(k+h_i) - y_m(k+h_i) - e(k+h_i)]^2 \quad (10)$$

式中 S 为优化时域内拟合点数量, h_i 为第 i 个拟合点上的值。

对 $J(k)$ 进行最优化求解计算出当前控制量 $u(k)$ 为

$$u(k) = k_c [y_c(k) - y(k)] + k_m x_m(k) \quad (11)$$

其中

$$k_c = f_n^T(0) \Pi \begin{bmatrix} 1 - \alpha^{h_1} \\ \vdots \\ 1 - \alpha^{h_s} \end{bmatrix}$$

$$k_m = -f_n^T(0) \Pi C_m \begin{bmatrix} A_m^{h_1} - I \\ \vdots \\ A_m^{h_s} - I \end{bmatrix}$$

$$\Pi = (G G^T)^{-1} G^{-1}$$

$$f_n^T(0) = [f_1(0), f_2(0), \dots, f_N(0)]$$

I 为与矩阵 A_m 同阶的单位矩阵。

2.3 预测函数控制算法的实现步骤

(1) 确定系统的预测模型参数 A_m, B_m, C_m , 给定基函数的选择, 给定相关参数(如 T_s, T_r 等), 离线计

算出 G, Π, α, k_c, k_m ;

- (2) 给定系统初始状态 $x_m(0)$ 和控制量的初始值 $u(0)$;
- (3) 读入系统 k 时刻实际输出值 $y(k)$ 及跟踪设定值 $y_c(k)$;
- (4) 计算 $x_m(k)$;
- (5) 计算 k 时刻的控制量 $u(k)$;
- (6) 令 $k=k+1$, 返回第(3)步。

3 算例仿真分析

压电柔性悬臂梁振动控制系统设计如图2所示, 由材料力学可知悬臂梁振动过程中各阶模态的最大应变处均为梁的根部位置, 因此可以将压电片贴在梁的根部以达到最好的振动控制效果。梁和压电片的具体参数见表1。

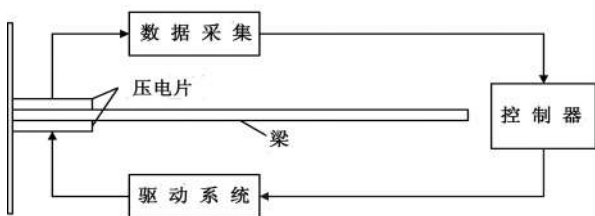


图2 压电柔性悬臂梁振动控制系统
Fig.2 Piezoelectric flexible cantilever beam vibration control system

表1 梁和压电片的物理参数

Tab.1 The physical parameters of beam and piezoelectric film

	梁	压电片
长度/mm	1 800	30
宽度/mm	10	10
厚度/mm	3	1
密度/(kg/m ³)	2.7×10 ³	7.51×10 ³
杨氏模量/Pa	7×10 ¹⁰	6.3×10 ¹⁰

压电常数 $d_{31}/(C/N)$ 210×10^{-12}

电容(F) 1.05×10^{-8}

采用模态截断法取前2阶模态, 不考虑压电片对梁的影响。经计算, 一阶和二阶模态固有频率为 $\omega_1=4.793\ 6\ \text{rad/s}, \omega_2=30.043\ 1\ \text{rad/s}$ 。假设结构阻尼为 $\zeta_1=\zeta_2=0.01$, 初始条件为: $x_m(0)=[0.02, 0.02, 0, 0]^T$, 控制量初值为0。基函数选取为指数函数 e^{-t} , $T_s=0.01\ \text{s}, T_r=0.15\ \text{s}$ 。启动控制器, 在 MATLAB 中进行仿真, 结果如图3所示。

图3是系统一阶模态和二阶模态振动曲线。从图3中可以看出, 未控制之前系统响应在自身的结构阻尼下衰减很慢, 而经过控制之后系统响应大幅衰减, 振动得到了显著的抑制。

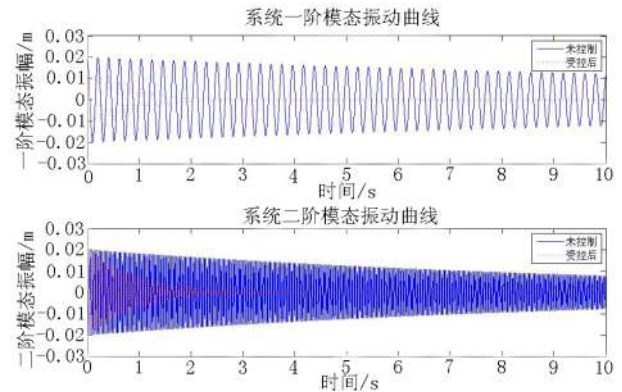


图3 系统一阶模态和二阶模态控制效果

Fig.3 Curve of the first and second modal control

4 结语

介绍和分析了预测函数控制法在振动控制系统中的应用, 采用状态空间方程作为预测模型, 设计的控制器具备预测函数控制的在线计算量小和快速响应的优点。通过仿真结果表明预测函数控制算法能够很好的抑制了柔性梁的振动。

参考文献:

- [1] 孙煜博, 秦建斌. 压电智能悬臂梁最优控制建模与仿真[J]. 机械工程与自动化, 2008, 02: 59-61.
- [2] 杜耀武, 史习智. 结构振动的 H_2/H_∞ 混合最优控制[J]. 振动工程学报, 1999, 12(1): 103-108.
- [3] 陈建军, 王德周, 徐亚兰, 等. 随机激励下柔性智能梁结构振动的模糊自适应控制[J]. 应用力学学报, 2006, 23(2): 313-317.
- [4] 杨济臣, 侯志强, 王校锋. Bernoulli-Euler 梁振动的人工神经网络控制方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2005, 20(4): 450-452.
- [5] 石秀华, 孟祥众, 杜向党, 等. 基于多岛遗传算法的振动控制传感器优化配置[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(1): 62-65.
- [6] Rodney D Nelson, Steven Glover, Vittal S Rao. Vibration suppression of smart structural systems using predictive control[C]. In: Proceeding of SPIE-The International Society for Optical Engineering. 1997, 3039(3-6): 350-361.
- [7] Richalet J, Doss S A A, Arber C, et al. Predictive functional control: applications to fast and accurate robots [A]. In: Isermann R ed. Automatic Control 10th Triennial World Congress of IFAC[C], Oxford: Pergamon Press, 1988, 251-258.
- [8] 吴建国, 费敏锐, 张培建, 等. 基于特征模型的预测函数控制[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2007, 13(2): 155-159.