

基于模糊分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 的柔性结构 振动主动控制

盛贤君, 钟 声, 姜 涛

(大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116033)

摘 要: 为防止翅翼结构因干扰而产生振颤, 以柔性悬臂梁结构为被控对象, 提出一种参数自整定的分数阶比例积分微分控制器, 在利用遗传算法取得优化参数后, 通过模糊规则第 2 次对控制器参数进行在线整定, 以达到实时最优控制的目的. 在 Simulink 软件环境下进行了数值仿真, 结果表明: 设计的分数阶比例积分微分控制器具有记忆性, 动态表征能力强. 与常规比例积分微分控制器相比, 冲击激励下的系统响应稳态时间缩短 0.9 s; 简谐激励下的系统响应衰减幅度从 88% 提升到 96%; 随机激励下系统响应抖动减小, 提高了稳定性.

关 键 词: 翅翼振颤; 主动控制; 分数阶微积分; 模糊控制; 系统仿真

中图分类号: V214.3⁺3; TP273

文献标志码: A

Active control of flexible structure vibration based on fuzzy fractional order $PI^\lambda D^\mu$

SHENG Xian-jun, ZHONG Sheng, JIANG Tao

(School of Electrical Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116033, China)

Abstract: In order to prevent wings vibration due to external interference, for the control object of flexible cantilever beam a scheme of fractional order proportion integration differentiation controller based on parameters self-correction was proposed. After the parameters were optimized by genetic algorithm firstly, they were set online by fuzzy rule for the second time in order to achieve real-time optimum control. Numerical simulation was carried out by Simulink software, and result shows that the proposed fractional order proportion integration differentiation controller has a memory ability and a strong dynamic characterization ability. Compared with the conventional proportion integration differentiation controller, the steady state time of system response decreases by 0.9 s under impulse stimulation; the reduced amplitude of system response increases from 88% to 96% under harmonic stimulation; the system tends to be more stable and the response jitter reduces under random stimulation.

Key words: wings vibration; active control; fractional order calculus; fuzzy control; system simulation

为减小载荷和降低成本, 飞行器的翅翼设计大多采用低刚度、柔性化的轻质材料, 但是随着飞行速度和机动性能的提高, 翅翼所受载荷却在不断增大, 致使翅翼结构的弯曲刚度和扭转刚度越

来越难以保证, 这些均将引起翅翼结构在飞行中变形增加, 高速飞行时, 很小的变形就可能引起严重的振动问题. 基于上述情况, 对飞行器翅翼结构的振动进行主动控制, 可以很好地解决翅翼结构

最小质量要求与强度、刚度要求之间的矛盾,避免出现不能容许的振动问题^[1]。

1985 年, Bailey 和 Hubbard^[2] 以聚偏氟乙烯 (PVDF) 压电薄膜作为制动器, 采用常增益和常振动幅值反馈控制策略对柔性悬臂梁结构的振动进行了主动控制。1991 年, Lee 和 Chiang 等^[3] 采用独立模态空间控制法对柔性悬臂梁结构的横向振动主动控制进行了实验研究, 并指出, 结构模态参数的精准程度是控制器控制效果的关键所在。1993 年, Devasra 等^[4] 以模态阻尼比为优化准则, 综合考虑振动幅值、调节时间、控制增益等因素, 研究了压电层合梁的振动主动控制问题。2005 年, Green 和 Sasiadek^[5] 设计了基于模糊自整定的转置雅克比矩阵控制律, 解决了柔性机械手臂的空间运动问题。2011 年, Barkana 等^[6] 提出一种简化自适应控制策略 (SAC), 并证实这种控制策略非常适合作动器、传感器的对位控制。近年来, 国内的一些学者在柔性结构振动主动控制领域也取得了长足的进展。吴志刚等^[7] 采用线性二次高斯 (LQG)/奇异值控制理论, 对带有 2 个后缘控制面的三角型机翼模型的振动控制进行了仿真实验, 并对该控制律应用于工程实践进行了工程特性评估。SHAN Jinjun 等^[8] 提出了分力合成振动抑制法 (CSVS), 分析了它对于模型估计误差的鲁棒特性, 并实现了柔性结构多模态的振动控制。HU Qinglei 和 MA Guangfu^[9] 用分力合成振动抑制法 (CSVS) 和基于分布压电元件的主动振动控制技术 (PPF) 相结合的一种复合主动控制方法实现了大柔性航天器结构的振动控制。朱灯林等^[10] 以系统存留能量的大小为准则, 对柔性悬臂梁结构振动主动控制的压电片位置、尺寸等控制参数进行了实验研究。

综上所述, 在柔性结构振动主动控制领域, 许多学者从柔性结构的振动特性分析、作动器位置的优化配置、智能算法优势结合以及参数寻优等方面进行了一系列的研究实验, 但在动态系统控制器的设计、表征和控制能力等方面上, 尚有待提高。分数阶微积分算法以加权的形式考虑了控制器在一定范围内的整体信息, 具有记忆性, 可以更准确地表达控制器的动态表征能力。基于此, 本文在建立被控对象数学模型的基础上, 提出一种基于模糊自整定的分数阶比例积分微分 ($PI^{\lambda}D^{\mu}$) 控制器, 在控制策略上采用分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器, 同时采用模糊推理的方法实现分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器的参数整定, 即对分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器进行非线

性的处理, 以实现系统的特性变化与控制量之间的非线性映射关系。这种复合系统把分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制的记忆性、准确性与模糊控制的灵活性以及鲁棒性融为一体, 有利于发挥两种控制方法各自的长处。

1 柔性结构系统描述

本文的研究对象为树脂基玻璃纤维复合材料制成的压电柔性悬臂梁结构, 其各项参数如表 1 所示。假设悬臂梁结构为单自由度 2 阶系统, 通过有限元建模, 系统横向振动的模态运动方程式为

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = K_0U + F \quad (1)$$

式中 q 为结构的模态坐标; M 为模态质量矩阵; C 为模态阻尼矩阵; K 为模态刚度矩阵; K_0 为机电耦合矩阵; U 为作动器输入电压; F 为作用在结构上的外力干扰。

表 1 悬臂梁结构的特征参数

Table 1 Characteristic parameters of cantilever beam

参数	数值
长, 宽, 厚 (l, b, h)/mm	120, 16, 1
密度 ρ /(kg/m ³)	1960
弹性模量 E /GPa	3
泊松比 σ	0.33
1, 2 阶圆频率 (ω_1, ω_2)/(r/s)	48.9, 182.1

2 基于遗传算法的模糊自整定分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器设计

2.1 控制器的结构

基于遗传算法的模糊自整定分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ (GFFPID) 控制系统结构图如图 1 所示, 图中 e 为误差, c_e 为误差变化率, u 为控制器输出, w 为被控系统输出。其工作原理是首先利用遗传算法对分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 的 5 个参数 $K_p, K_i, K_d, \lambda, \mu$ 进行优化处理, 得到控制器初始参数 $K'_p, K'_i, K'_d, \lambda', \mu'$, 然后再根据模糊规则在线对参数 K'_p, K'_i, K'_d 进行实时整定, 属于一种自适应系统。

分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器实际参数为

$$K_p(k) = K'_p + \Delta K_p(k) \quad (2)$$

$$K_i(k) = K'_i + \Delta K_i(k) \quad (3)$$

$$K_d(k) = K'_d + \Delta K_d(k) \quad (4)$$

$$\lambda(k) = \lambda' \quad (5)$$

$$\mu(k) = \mu' \quad (6)$$

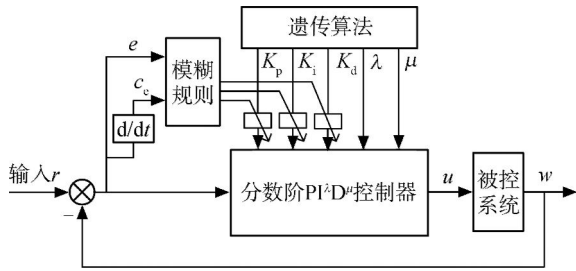


图1 GFFPID控制系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of GFFPID control system

2.2 分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器

分数阶微积分是指微积分的阶次为分数,它与整数阶微积分是统一的,是整数阶微积分的推广.定义连续的分数阶微积分算子如下^[11-12]:

$${}_a D_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & \text{Re}(\alpha) > 0 \\ 1 & \text{Re}(\alpha) = 0 \\ \int_a^t (t-\tau)^{-\alpha} d\tau & \text{Re}(\alpha) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中 t, a 分别为微分或积分的上、下限, α 为任意复数, ${}_a D_t^\alpha$ 算子将分数阶微分运算和积分运算统一起来.关于分数阶微积分的定义,许多数学家各自从不同角度入手,给出不同的定义,其中 Riemann-Liouville 定义为

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \quad (8)$$

式中 $n-1 < \alpha < n$; $\Gamma(\cdot)$ 为 Euler Gamma 函数.

分数阶 PID 控制器是在常规 PID 控制器的基础上,使其微分和积分的阶次不再只是 -1 和 $+1$,而是任意的实数,它的时域表达式为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D^{-\lambda} e(t) + K_d D^\mu e(t) \quad (9)$$

对式(9)求拉普拉斯变换,得到分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器的传递函数为

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (10)$$

由式(10)不难看出,对阶次 λ 和 μ 适当取值,就能演绎出比例积分(PD)、比例微分(PD)和比例积分微分(PID)等常规控制器,因此分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 是能够涵盖整数阶控制器的更具一般形式的控制器.由于引入了微积分阶次 λ 和 μ ,整个控制器比常规 PID 控制器多了 2 个可调参数,参数的整定范围变大,能够更灵活地控制被控对象,以期达到更好的控制效果.

对式(10)进行时间离散化,得到分数阶

$PI^\lambda D^\mu$ 控制器的离散时间传递函数表达式

$$u(k) = K_p e(k) + K_i h^\lambda \sum_{j=0}^k p_j e(k-j) + K_d h^{-\mu} \sum_{j=0}^k d_j e(k-j) \quad (11)$$

式中 h 为时间步长, $p_j = \left(1 - \frac{1+\lambda}{j}\right) p_{j-1}$, $d_j = \left[1 - \frac{1+\mu}{j}\right] d_{j-1}$, $p_0 = d_0 = 1$.

从式(11)可以看出,与常规 PID 控制器相比较,分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器某时刻的值与其之前所有时刻的值相关联,具有记忆性.

2.3 基于遗传算法的分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器参数优化

与传统的优化算法相比,遗传算法的寻优从串集开始搜索,覆盖面大,利于全局择优;同时处理种群中多个个体,减少陷入局部最优解的风险;另外,遗传算法不用搜索空间的知识或其他辅助信息,而仅用适应度函数值来评估个体,适应度函数不仅不受连续可微的约束,而且其定义域可以任意设定,这一特点使得遗传算法的应用范围大大扩展.本系统中的遗传算法流程图如图2所示.

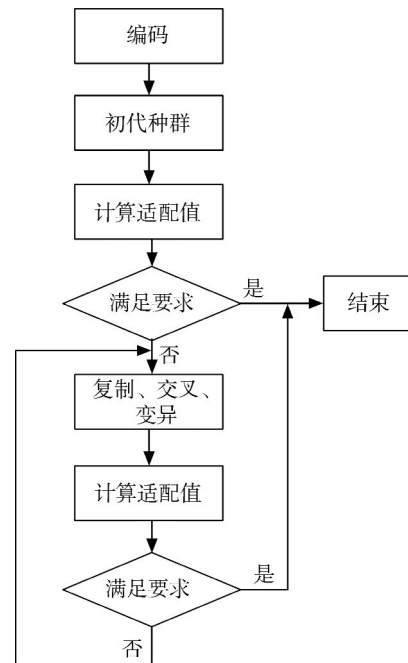


图2 遗传算法流程图

Fig. 2 Flow chart of genetic algorithm

采用实数编码方式,对参数 $K'_p, K'_i, K'_d, \lambda', \mu'$ 进行编码处理,其中 K'_p 的取值范围为 $[0, 50]$, K'_i, K'_d 的取值范围为 $[0, 1]$, λ 的取值范围为 $[-2, 0]$, μ 的取值范围为 $[0, 2]$. 根据悬臂梁系统

振动特点,选用下式作为参数选取最优指标的依据:

$$J = \int_0^T [\omega_1 e^2(t) + \omega_2 c_e^2(t) + \omega_3 u^2(t)] dt \quad (12)$$

式中 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为权重.

遗传算法中使用样本个数为 $M_s=30$,终止进化代数 $G=100$,交叉率 $P_c=0.85$,变异率 $P_m=0.033$,经优化计算,最终获得最佳样本为 $S_b=[0.2143 \ 0.0156 \ 0.0032 \ -0.875 \ 1.324]$,即 $K'_p=0.2143, K'_i=0.0156, K'_d=0.0032, \lambda'=-0.875, \mu'=1.324$.

2.4 模糊算法实现

2.4.1 输入输出变量及隶属度函数的确定

采用模糊控制的目的是使控制器能够根据 e 和 c_e 的情况,实时调整比例系数 ΔK_p 、积分系数 ΔK_i 和微分系数 ΔK_d ,以达到调节作用的实时最优.对输入变量进行模糊化处理,得到 e 和 c_e 的基本论域为 $[-6,6]$, $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的基本论域为 $[-8,8]$,其模糊子集均为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$,分别代表语言变量:负大,负中,负小,零,正小,正中,正大.兼顾系统的稳定特性和控制器的辨识能力,确定输入变量 e, c_e 和输出变量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的隶属度函数曲线分别如图 3 和图 4 所示.

2.4.2 模糊规则的建立

综合考虑系统的稳定性、响应速度、稳态时间和稳态精度等因素,制定参数整定规则如下:调节初期应适当取较大值的 K_p 以提高响应速度;为防止积分饱和,其积分作用应当弱一些,甚至可以取零;应加大 K_i ,这样可得到较小超调,甚至避免超调.而在调节中期, K_p 则取较小值,以使系统具

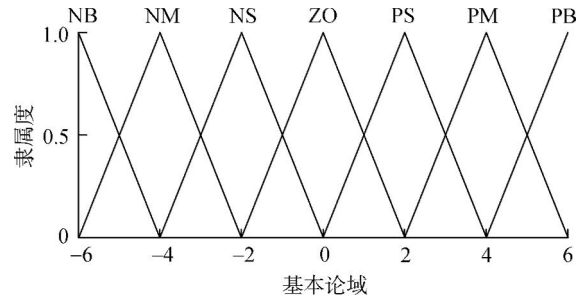


图 3 输入变量 e, c_e 隶属度函数曲线

Fig. 3 Membership function curves of input variables e and c_e

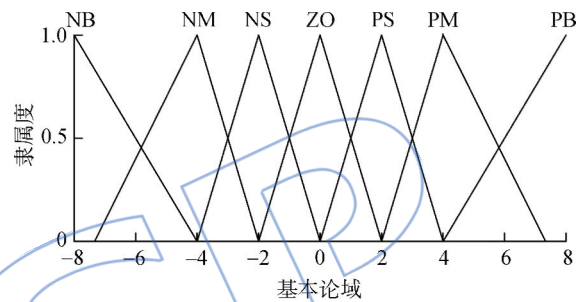


图 4 输出变量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 隶属度函数曲线

Fig. 4 Membership function curves of output variables $\Delta K_p, \Delta K_i$ and ΔK_d

有较小的超调并保证一定的响应速度;为了避免影响稳定性,其积分作用应该比较适中;由于调节特性对 K_d 的变化比较敏感, K_d 应适当小一些并应保持固定不变.而在调节后期再将 K_p 调到较大值来减小静差,提高控制精度;应增大 K_i ,以减小调节静差; K_d 应减小,以减小被控过程的制动作用,进而补偿在调节初期由于 K_d 较大所造成的调节过程的时间延长.

模糊规则是建立在工程技术人员的实际操作经验和专业技能知识基础上的,根据以上参数整定规则和大量的仿真实验,建立 K_p, K_i, K_d 的模糊规则如表 2 所示.

表 2 K_p, K_i, K_d 的模糊规则表
Table 2 Fuzzy rule list of K_p, K_i, K_d

e	c_e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB,NB,PS	PB,NB,NS	PM,NM,NB	PM,NM,NB	PS,NS,NB	ZO,ZO,NM	ZO,ZO,PS
NM	PB,NB,PS	PB,NB,NS	PM,NM,NB	PS,NS,NM	PS,NS,NM	ZO,ZO,NS	NS,ZO,ZO
NS	PM,NB,ZO	PM,NM,NS	PM,NS,NM	PS,NS,NM	ZO,ZO,NS	NS,PS,NS	NS,PS,ZO
ZO	PM,NM,ZO	PM,NM,NS	PS,NS,NS	ZO,ZO,NS	NS,PS,NS	NM,PM,NS	NM,PM,ZO
PS	PS,NM,ZO	PS,NS,ZO	ZO,ZO,ZO	NS,PS,ZO	NS,PS,ZO	NM,PM,ZO	NM,PB,ZO
PM	PS,ZO,PB	ZO,ZO,NS	NS,PS,PS	NM,PS,PS	NM,PM,PS	NM,PB,PS	NB,PB,PB
PB	ZO,ZO,PB	ZO,ZO,PM	NM,PS,PM	NM,PM,PM	NM,PM,PS	NB,PB,PS	NB,PB,PB

由模糊推理得到的模糊输出值是输出论域上的模糊子集,只有其转化为精确控制量,才能施加于被控对象.本文采用重心法对经过模糊规则表求得的 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 进行去模糊化处理,如下式所示:

$$v(h) = \frac{\sum_{i=1}^M \omega^i y^i}{\sum_{i=1}^M \omega^i} \quad (13)$$

式中 v 是模糊控制器输出; y 是使隶属度函数取得最大值的点; M 是总规则数.

3 仿真实验及结果分析

用冲击激励、简谐激励和随机激励分别模拟飞行器起飞过程、发动机周期激振过程和空间中不确定因素导致的激振过程,激振点为靠近梁的夹持端 $l' = l/5$ 节点处.前文中已经给出了被控悬臂梁的各项参数以及梁的横向振动模态运动方程式,在软件 Simulink 环境下建立系统模型^[13],用 S-function 函数对微积分算子进行拟合,封装起来作为分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 的微积分模块^[14-15],Simulink 同时还提供了模糊工具箱以实现参数的模糊在线整定功能.

实验中,为便于比较,也对被控系统进行了常规 PID 控制,其比例、积分、微分系数分别为 0.2020, 0.0091 和 0.0043,参数取得方法同样是基于遗传算法,这里不再赘述.仿真结果如图 5~10 所示,其中图 5、图 7、图 9 为系统响应曲线,图 6、图 8、图 10 为控制电压曲线.

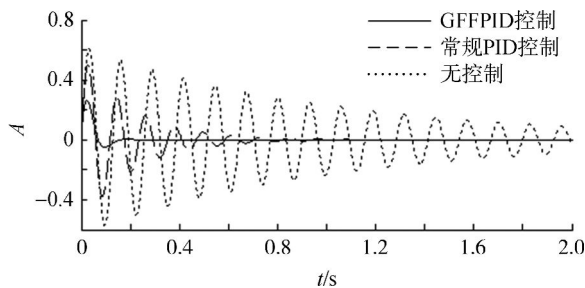


图 5 冲击激励响应曲线

Fig. 5 Response curves of impulse stimulation

由图 5 可知,悬臂梁系统在受冲击激励作用后,做有阻尼衰减振动,振动持续时间很长,振幅 A 衰减很慢.在常规 PID 控制和 GFFPID 控制单独作用下,振动都明显被削弱,但 GFFPID 控制效果更为显著,不但减小了初始振幅,更是极大地缩短了到达稳态的时间.从图 6 的控制电压 U 曲

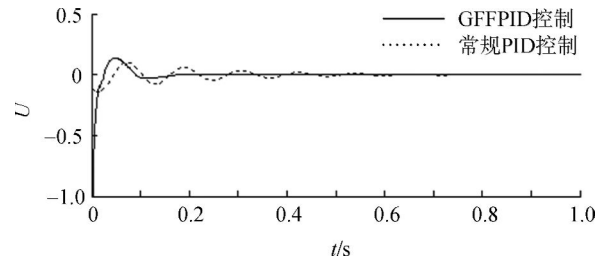


图 6 冲击激励控制电压曲线

Fig. 6 Control voltage curves of impulse stimulation

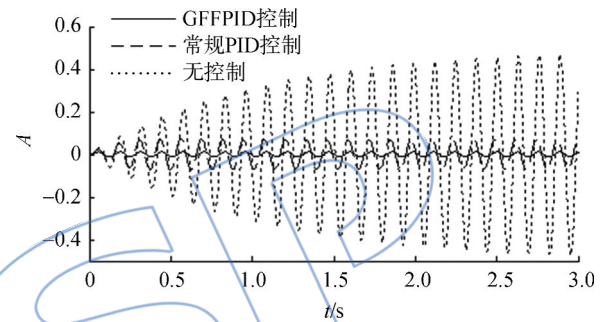


图 7 简谐激励响应曲线

Fig. 7 Response curves of harmonic stimulation

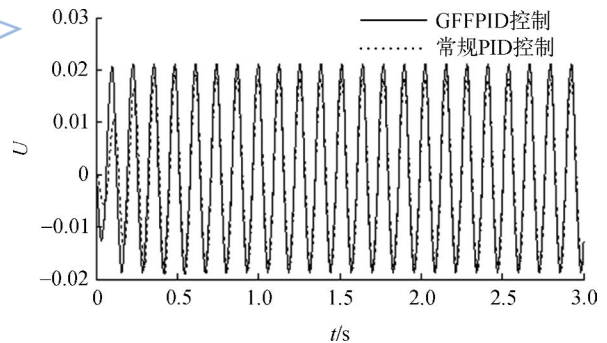


图 8 简谐激励控制电压曲线

Fig. 8 Control voltage curves of harmonic stimulation

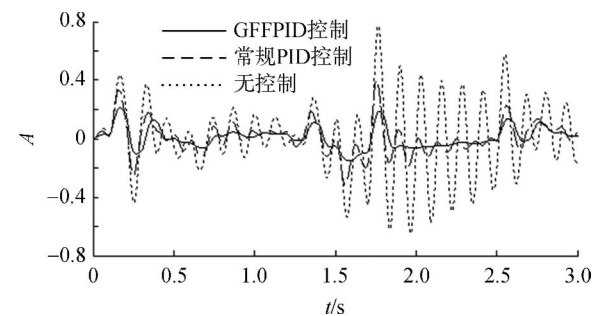


图 9 随机激励响应曲线

Fig. 9 Response curves of random stimulation

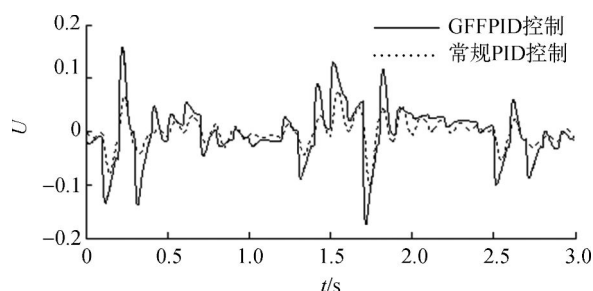


图10 随机激励控制电压曲线

Fig. 10 Control voltage curves of random stimulation

线图也可以看出,GFFPID 控制的响应速度要快于常规 PID 控制。

在图 7 中,悬臂梁系统在简谐激励作用下,振幅逐渐增大,最终以振幅为 0.5 做等幅振荡。经常规 PID 和 GFFPID 分别控制之后,振幅分别衰减至 12% 和 4%。

在图 9 中,悬臂梁系统在随机激励作用下做无规则振动,振幅时大时小,稳定性极差,这在工程上是绝对不允许的。在经过 GFFPID 控制之后,振幅基本维持在 $-0.2 \sim +0.2$ 之间,系统的动态特性得到明显改善。

通过比较以上 3 组仿真实验可以看出,与常规 PID 控制相比较,GFFPID 控制具有响应速度快、鲁棒性强、无稳态静差等优点。

4 结 论

针对大柔性飞行器翼翼结构的特点,以分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 理论为基础,设计在线自整定的,具有一定鲁棒性、稳定性的振动主动控制器,并通过 Simulink 仿真对悬臂梁结构在不同激励下的振动特性进行了分析,实验表明:

1) GFFPID 控制具有记忆性,动态表征能力强,对冲击激励、简谐激励以及随机激励下的柔性结构振动有明显的衰减作用。相对于常规 PID 控制,取得了更好更快的抑振效果。

2) 从控制电压曲线上可以看出,一定程度上提高了控制系统的响应速度而不致失稳。

3) 经遗传算法优化后的微积分阶次并不是每个控制时间点上的最优值,进一步的工作是归纳分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 中阶次的模糊规则,研究时变阶次分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 在振动主动控制中的应用。

参考文献:

[1] 酆正能,程小全,方卫国. 飞行器结构学[M]. 北京:北京航

空航天大学出版社,2010.

- [2] Bailey T, Hubbard J E J. Distributed piezoelectric-polymer active vibration control of a cantilever beam[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1985, 8(5): 605-611.
- [3] Lee C K, Chiang W W, O'Sullivan T C. Piezoelectric modal sensor/actuator pairs for critical active damping vibration control[J]. Journal of the Acoustics Society of America, 1991, 90(1): 374-384.
- [4] Devasra S, Meressi T, Bayo B P E. Piezoelectric actuator design for vibration suppression-placement and sizing[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1993, 16(5): 859-864.
- [5] Green A, Sasiadek J Z. Adaptive control of a flexible robot using fuzzy logic[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(1): 36-42.
- [6] Barkana I, Ben-Asher J Z. Simple adaptive control applications to large flexible structures[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2011, 34(6): 1929-1932.
- [7] 吴志刚,杨超. 主动气动弹性机翼的振颤主动抑制与阵风减缓研究[J]. 机械强度, 2003, 25(1): 32-35.
WU Zhigang, YANG Chao. Investigation on active flutter suppression and gust alleviation for an active aeroelastic wing[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(1): 32-35. (in Chinese)
- [8] SHAN Jinjun, SUN Dong, LIU Dun. Design for robust component synthesis vibration suppression of flexible structures with on-off actuators[J]. Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(3): 512-525.
- [9] HU Qinglei, MA Guangfu. Vibration suppression of flexible spacecraft during attitude maneuvers [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(2): 377-380.
- [10] 朱灯林,吕蕊,俞洁. 压电智能悬臂梁的压电片位置、尺寸及控制融合优化设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 262-267.
ZHU Denglin, LÜ Rui, YU Jie. Integrated optimal design of the PZT position, size and control of smart cantilever beam[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 262-267. (in Chinese)
- [11] Podlubny I. Fractional differential equations [M]. New York: Academic Press, 1999.
- [12] Agrawal O P, Defterli O, Baleanu D. Fractional optimal control problems with several state and control variables [J]. Journal of Vibration and Control, 2010, 16(13): 1967-1976.
- [13] 蒋珉,柴干,王宏华,等. 控制系统计算机仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [14] Lorenzo C F, Hartley T T. Variable order and distributed order fractional operators[J]. Nonlinear Dynamics, 2002, 29(1/2/3/4): 57-98.
- [15] Valério D, Sá da Costa J. Variable-order fractional derivatives and their numerical approximations[J]. Signal Processing, 2011, 91(3): 470-483.