

一种基于时频控制方法的控制器设计与实验

武秀恒¹, 杜岳峰¹, C. Steve. SUH², 毛恩荣¹, 宋正河^{1†}

(1. 中国农业大学 现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083;

2. 德克萨斯A&M大学 机械工程系, 德克萨斯 77843)

摘要: 为提升被控系统在整个工作频域内的动态性能, 本文提出一种时频(time-frequency, TF)控制方法的理论框架, 该框架通过应用小波分析技术以提高传统控制器性能的方式达到上述目标. 在阐述了此框架下TF控制机理的基础上, 结合传统PI控制方法设计了一种时频PI(time-frequency PI, TFPI)控制器, 并对TFPI控制器中时频参数的设计原理进行了分析. 针对TFPI控制器中参数众多所导致的整定工作量增大的问题, 结合最优控制理论中积分型性能指标的概念, 建立了以单纯形优化方法为手段的参数自动寻优策略. 最后以电磁阀控制液压缸系统模型为例进行了控制器硬件在环仿真测试. 阶跃响应结果显示, 在超调量不超过1%的要求下, 相对传统PI控制器0.15 s左右的响应时间, TFPI控制器响应时间可达0.06 s, 在不失稳定性的情况下显著提升系统的动态性能; 此外, 与文献中其他两种TF控制算法亦进行了仿真比较, 结果进一步证明了该控制方法在系统动态性能提升方面的有效性.

关键词: 时频控制; 小波分析; 自动寻优; 电液系统; 硬件在环

中图分类号: TP273 文献标识码: A

On the design and physical validation of a time-frequency controller

WU Xiu-heng¹, DU Yue-feng¹, C. Steve. SUH², MAO En-rong¹, SONG Zheng-he^{1†}

(1. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment,
China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University, Texas 77843, USA)

Abstract: A general framework feasible for time-frequency (TF) controller design is presented in order to improve the dynamic characteristics in all working frequency domain of systems. And the effort is the application of wavelet analysis to enhance the performance of the traditional controller to reach the goal. Based on the principle, a new controller incorporates traditional PI controller into TF control to realize a novel concept properly termed as the time-frequency PI (TFPI) approach. Although optimal control performance can be achieved by tuning PI gains, however, the large number of parameters to tune in TFPI can be overwhelming. To address the particular issue, the ISTE criteria and the simplex optimization method is followed to optimize the gains. The TFPI concept is successfully applied to an electro-hydraulic hybrid system using a hardware-in-the-loop test rig to demonstrate feasibility. The performance of the TFPI controller is favorably evaluated against the conventional PI controller. It is found that TFPI controller can decrease the step response time of the system from 0.15 s that is the best result of the traditional PI controller to 0.06 s on the premise of the overshoot less than 1%. Besides, the comparison between this method and the other two control algorithm in literatures is conducted and the results prove further that the TFPI controller can improve the dynamic performance markedly and maintain the stability of the system at the same time.

Key words: time-frequency approach; wavelet analysis; automatic optimization; electro-hydraulic hybrid system; hardware-in-the-loop

1 引言(Introduction)

工程控制论研究广义系统在一定的外界条件诸如输入或激励(包括外加控制与外在干扰)的作用下, 从系统的某一初始状态出发, 所经历的由其内部的固有特性所决定的整个动态历程, 包括系统及其输入、输

出三者间的动态关系^[1]. 由此, 若将控制器和被控系统视为一个整体, 研究人员可藉以调整控制器的结构、算法, 一定程度上改变整体系统的固有特性以得到所需要的输出. 更进一步可以设计控制器的控制策略达到以尽可能好的方式完成任务的目的^[2]. 在很多

收稿日期: 2016-05-19; 录用日期: 2016-12-29.

[†]通信作者. E-mail: songzhenghe@cau.edu.cn; Tel.: +86 10-62736915.

本文责任编辑: 李少远.

北京市科技创新基地培育与发展基金专项(Z151100001615017)资助.

Supported by Project of Cultivation and Development for Science and Technology Innovation Base of Beijing (Z151100001615017).

情况下,系统的运行要求具有快速、无超调的响应特性,在干扰情况下仍要保证很强的鲁棒性.此时具体到控制器,则可将其作用概括为:配合被控系统准确、快速的运行到目标工况后保持稳定.

传统控制器的设计无论基于系统时域还是频域的性能或指标,控制器一旦设计成型,其参数唯一确定.为了保证系统全局的鲁棒性,控制器在工作过程中往往无法在整个系统工作频宽内均发挥出较高的性能.通常的解决方法是设法寻求被控系统经常工作的较窄频段,以此设计的控制器虽然在该频段内可提升系统性能,但偶尔受到其他频率的干扰或激励时,容易导致系统不稳定.而运用自适应控制方法(adaptive control)可以在某种程度上弥补上述固定参数控制器的缺点,该方法通常根据实时辨识系统动态模型确定当前控制器参数以使控制器对系统变化具有一定的适应能力,意味着同一系统可以工作于更宽的频域范围内.但由于控制器的参数确定需严格依赖实时辨识的系统模型,在遇到工作频域宽的系统或者输入信号频率变化快时,需要保守地设计控制器参数调节算法以防止系统失稳.综上,在综合考虑系统全频域的控制性能与鲁棒性时,传统控制器的设计往往顾此失彼,使系统总体性能无法达到更优水平.

相对而言,频域的信息更能反映一个系统的本质属性^[3].鉴于此,控制器的设计应在时频域分别且同时进行参数的自适应变化,即控制器的参数不仅随着系统时域输入信号的变化而调整,也要随着系统工作频率范围的变动而调整.这就需要更有效的时频分析技术,在有限长度的时域信息中分析出较为准确的频域信息,而小波分析已成为这一思想的有力工具^[4-5].文献[6-10]陆续将离散小波变换应用到传统的PID控制中,结合小波变换具有时频域多分辨率的特性而形成了多尺度PID(multiresolution PID, MRPID)控制.文献对误差信号序列进行离散小波变换后,可将误差分解为由低到高一系列频段中的分量,同时也将系统动态过程、外部干扰等信号清晰地表现出来,然后通过分别操作每一频段内的误差分量来设计分控制器,最终将各分控制器的输出进行合成,至此则形成了时频(time-frequency, TF)控制的雏形.可以发现,上述各分控制器一旦设计成型,参数亦随即固定,但由于不同时刻的误差信号所携带的频率成分不同,导致被分解后进入不同频段的分量也不一样,最后进行计算合成后的输出信号也将随之改变,总体上间接完成了控制器参数随着输入信号频率改变的任务.文献[11-14]阐述了小波变换的综合时频分析特性,并在挖掘了非线性系统本质特性,即系统响应频率范围大、高频成分明显的基础上,提出了一种时频滤波型的最小均方(time-frequency filtered-x least means square, TFFxLMS)控制方法.该方法充分应用了小波变换时频多分辨率的特点,将主动噪声控制领域中的滤波型

最小均方(FxLMS)算法与离散小波变换集成,由此设计的控制器在强非线性系统控制中作用明显.由于FxLMS算法与离散小波变换均以滤波的形式进行运算,使得此控制器形式紧凑、计算效率较高.并且FxLMS算法本身作为时域非线性控制器,具有较强的自适应能力,所以其在结合小波变换后拥有了真正意义上的综合时频域自适应能力,在控制强非线性甚至混沌系统时仍然表现突出.由以上将小波变换理论直接引入实际工程控制领域,面向小波应用层面而探索的案例,可见小波分析方法在控制领域应用时的切实有效性.

为将传统的控制方法与TF控制思想进行更紧密的融合,提升被控系统在整个工作频域内的动态性能,本文主要开展的研究内容包括:1)基于实际工程控制需求,引入小波变换理论,建立一种TF控制方法的基本理论框架,用以结合传统控制方法设计出性能更优的系统控制器;2)依据所提出的TF控制理论框架,将其与传统的PI控制结合,研究了TFPI控制器的设计方法,并进行控制器参数寻优整定;3)基于硬件在环仿真平台,以比例电磁阀控液压缸系统控制为目标,进行TFPI控制器的性能测试,并与传统PI控制进行比较分析;此外,与文献中所提的两种TF控制方法进行仿真比较,以充分验证TFPI控制算法的有效性.

2 时频控制方法原理 (Principle of TF control approach)

TF控制方法原理如图1. r 为系统期望输出或参考输出, y 为被控系统实际输出,是系统被激励后的外在表现,同时包含着系统的内部信息,反映系统的本质特征.传统的控制器设计,无论是反馈控制器还是前馈控制器,控制算法均将期望输出 r 与当前系统实际输出 y 直接经过特定的运算后输给系统. TF控制方法的特点在于控制器得到的信号是经过时频分析并处理后的多组数据,故此时需要有多组分控制器对其分别进行控制,称其为控制器组.

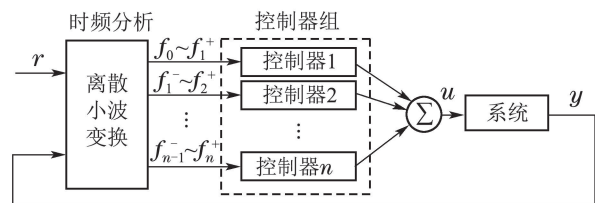


图1 TF控制原理图

Fig. 1 Schematic of the TF control approach

作为时频分析的工具,离散小波变换因其具备优良的局部数据特征提取能力而得到广泛应用.并且常用的二进小波分解与重构有成熟的快速算法,即MALLAT塔式算法^[15-18].据此,对信号 $x(k)$ 的信号分解过程如图2所示,分解级数为两级.图2中, $\hat{g}(k)$ 与

$\hat{h}(k)$ 为高、低通分解滤波器,而 $g(k)$ 与 $h(k)$ 为高、低通重构滤波器.信号 $x(k)$ 分别与 $\hat{g}(k)$ 、 $\hat{h}(k)$ 滤波器进行卷积运算滤波并下采样后,得到细节部分系数 C_{g1} (代表了信号的高频成分)与粗糙部分系数 C_{h1} (代表了信号的低频成分,亦称为信号的趋势部分),对粗糙部分系数 C_{h1} 继续进行第二级滤波、下采样操作,便可得到二级细节部分系数 C_{g2} 与二阶粗糙部分系数 C_{h2} ,如此反复进行滤波,便可得到不同程度信号成分的系数.对得到的各组系数分别进行如图2中重构过程中所示的上采样、滤波操作便可进一步得到各个频段的信号成分 $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ 与 $x_3(k)$.

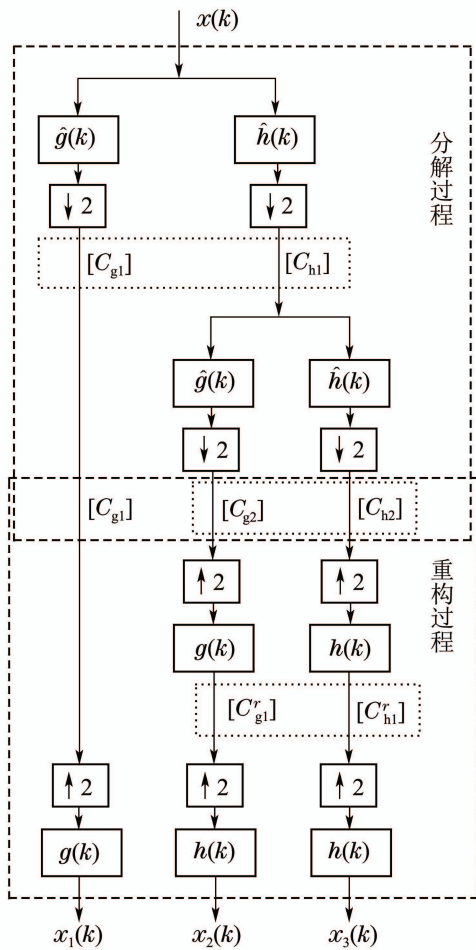


图2 信号分解过程

Fig. 2 Decomposition process

根据Nyquist采样定理,当采样率为 $2f_n$ 时,所得实际数字信号的最高频率为 f_n .假设所采集的数字信号 $x(k)$ 最高频率成分即 f_n ,且包含了系统的有效信息,则信号分解过程可将 $x(k)$ 分解到 $f_0 \sim f_n$ 间的若干个频段内, f_0 为信号中的最低频率,一般为0.图3为信号时频域特性示意图,用以反映原信号通过离散小波变换后经各频段分信号清晰表现出其时频特性的情况.若以图2中的二级分解为例,则图3中 $n=3$,且分解过程中会出现相邻频域小部分混叠的现象,但在实际应用时,针对系统工作频宽进行适当级数分解后,并不

影响整体频段的划分以及后续控制器的设计.

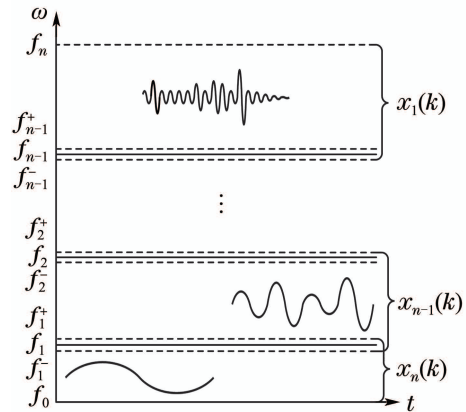


图3 信号时频域特性示意图

Fig. 3 Diagram of time frequency characteristics for a signal

TF控制器的目的是针对分解出的每个频段内的信号分量 $x_i(k)$ ($i=1, 2, \dots, n$)设计专用的分控制器,此时,分控制器的参数设置只保证系统在相对应的单一频段范围内达到性能要求,由上述各分控制器所并联组成的整个控制器组则能确保系统在整个频域内均达到优良的性能,因此TF控制器的设计有着明确的物理目标及意义.

3 TFPI控制器(TFPI controller)

3.1 TFPI控制器设计(Design of TFPI controller)

基于TF控制理论框架,以PI控制为例进行时频PI控制器的设计,其控制器原理如图4.

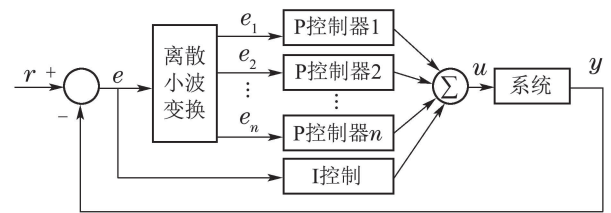


图4 TFPI控制原理图

Fig. 4 Schematic of the TFPI control approach

传统PI控制针对误差信号 e 进行运算,而TFPI控制器则首先对其进行离散小波变换,然后各分控制器均采用P控制,结合I控制,控制器输出信号 u 的计算为

$$u = \sum_i K_{P_i} e_i + K_I \int_0^t e dt, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

K_{P_i} ($i=1, 2, \dots, n$)为对应频段分误差信号的比例项系数, K_I 为积分项系数,对于数字离散信号, k 时刻控制器输出为

$$u = \sum_i K_{P_i} e_i(k) + K_I \sum_0^k e(k)T, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

式中 T 为采样周期.

不难发现, TFPI控制器实则是多个P控制器与一个I控制器并行运行, 其中可调参数较传统PI控制器多出数倍, 故TFPI控制器参数值的设计较为困难, 但参数的增多使各个参数之间存在更多种匹配情况, 侧面突出该控制器灵活多变的特点, 并且能够应对多种复杂系统. 此外, 经过优化设计后, 虽然各分控制器的比例系数 K_{P_i} 固定不变, 但误差信号中各个频段的成分可能随着时间的推移而变化, 从而得到的输出信号 u 也不相同. 因此, TFPI控制器各参数看似固定不变, 实则达到自适应控制的目的.

3.2 控制器参数优化(Optimization for parameters of controller)

针对上述各分控制器参数整定难度大, 参数间最优匹配确定较为困难的问题, 结合最优控制理论中常用的性能指标, 运用自动寻优方法解决^[19].

在传统PID参数自动寻优控制中, 所选择的性能指标应该既要能反映系统的动态性能, 又要包含稳态特性, 因此常选择带有积分类型的时间误差平方积分(integral of squared time multiply error, ISTE)作为性能指标^[20]. 应用该指标优化后的系统, 其阶跃响应具有响应快, 超调小等优点. 为了进一步抑制超调, 结合上述指标建立带有惩罚措施的目标函数, 其具体离散表达式如式(3):

$$J = \sum_{k=0}^N (\delta \cdot e(k) \cdot kT)^2, \quad (3)$$

其中: $e(k)$ 为 k 时刻单位阶跃响应的误差, T 为采样周期, N 为响应终点时刻, δ 为惩罚系数, 且有

$$\delta = \begin{cases} 1, & e(k) \geq 0, \\ 10, & e(k) < 0, \end{cases} \quad (4)$$

上式若表示系统阶跃响应超调过大, 则目标函数值加倍增大, 以排除寻优过程中使系统过分超调的参数组.

参数寻优算法采用单纯形法^[19], 因其具有控制参数收敛速度快, 计算工作量小, 简单实用等特点. 但由于单纯形法属于线性寻优方法, 容易陷入局部极小值点, 因此对初值的选择仍需谨慎. 这里采用传统PID参数调整过程中先P后I的规则, 即首先对各比例系数 K_{P_i} 进行寻优, 在得到一组最优 K_{P_i} 值的基础上加入 K_I 再次进行寻优.

至此, 应用参数自动寻优方法不仅可以设计出合理的TF控制器, 更减少了参数整定的工作量, 之后可自由根据系统的特点进行分频设计, 不受参数确定困难以及工作量大的约束.

4 仿真与实验(Simulation and experiment)

4.1 系统数学模型(Mathematic model)

被控系统为比例电磁阀控制液压缸位置系统, 其数学模型可用式(5)一组微分方程表示^[21-23]. 其中, u 代表控制器电压输出, 亦为系统输入, x_1-x_6 为系统

状态变量, x_1 代表液压缸实际位置, F_L 为液压缸所受外负载力, F_f 为摩擦力, 其余均为由系统结构与其工作环境所决定的参量, 各参量数值^[21-23]如表1所示.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m} [(x_3 - x_4)A - F_f - F_L], \\ \dot{x}_3 = \frac{(c_1 + x_3) [1/c_2 - \ln(1 + x_3/c_1)]}{V_1 + Ax_1} \{k_{q1}x_5q_1 - Ax_2 - c_i(x_3 - x_4) - c_{e1}x_3\}, \\ \dot{x}_4 = \frac{(c_1 + x_4) [1/c_2 - \ln(1 + x_4/c_1)]}{V_1 - Ax_1} \{-k_{q2}x_5q_2 + Ax_2 + c_i(x_3 - x_4) - c_{e2}x_4\}, \\ \dot{x}_5 = x_6, \\ \dot{x}_6 = K_v\omega_v^2u - 2\zeta\omega_vx_6 - \omega_v^2x_5, \\ q_1 = 0.5 \cdot [1 + \operatorname{sgn} x_5] \cdot \sqrt{p_s - x_3} + 0.5 \cdot [1 + \operatorname{sgn}(-x_5)] \cdot \sqrt{x_3 - p_r}, \\ q_2 = 0.5 \cdot [1 + \operatorname{sgn} x_5] \cdot \sqrt{x_4 - p_r} + 0.5 \cdot [1 + \operatorname{sgn}(-x_5)] \cdot \sqrt{p_s - x_4}, \\ F_f = \sigma_0z + \sigma_1\dot{z} + \alpha_2x_1, \\ \dot{z} = x_1 - \frac{\sigma_0|x_1|z}{\alpha_0 + \alpha_1e^{-(x_1/v_{sk})}}. \end{cases} \quad (5)$$

表1 模型参数值

Table 1 Parameters used in the model

参数	数值
m	9.0 kg
A	645 mm ²
c_1	99.993 MPa
c_2	0.0733
V_1	1.29 × 10 ⁵ mm ³
V_2	1.29 × 10 ⁵ mm ³
k_{q1}	2.38 × 10 ⁻⁵ mm ^{5/2} /kg ^{1/2}
k_{q2}	2.38 × 10 ⁻⁵ mm ^{5/2} /kg ^{1/2}
P_s	21 MPa
P_r	0.1 MPa
c_i	1097 mm ³ /(s·MPa)
c_{e1}	120 mm ³ /(s·MPa)
c_{e2}	120 mm ³ /(s·MPa)
K_v	0.5
ω_v	534 rad/s
ζ	0.48
σ_0	5.77 × 10 ⁶ N/m
σ_1	2.28 × 10 ⁴ N/(m·s ⁻¹)
α_0	370 N
α_1	217 N
α_2	2318 N/(m·s ⁻¹)
v_{sk}	0.032 m/s

4.2 TFPI控制器参数优化仿真(Simulation for optimization of parameters)

控制器设计过程中,当对误差信号进行离散小波变换时,分频的结果与小波的选择有较大的关系,根据Daubechies小波双正交、紧支撑等特点以及文献[12,24]中对小波基选择的研究探讨,经过多次仿真试验效果对比,确定选用db3小波系数以组成滤波器矩阵;而对于频域分段来说,理论上分解级数越多,则频域分段越密集,越多的分控制器参与控制,效果越好,但分解级数越多,所需的误差信号长度越长,控制器计算量也越大,考虑到控制器对计算实时性的要求以及前文所提到的相邻频段混叠问题,最终选择对信号分解5级,滤波窗误差信号长度 $N_f=512$.由于电磁阀控液压缸系统的响应频率不高,故控制器对误差信号的采样频率及其计算频率均设置为100 Hz.基于以上条件,以系统阶跃响应为例,其0-0.4 s时间段内的误差信号5层实时分解后的结果如图5所示.图5中由上到下分别表示误差原信号 e 以及由低到高各频段内的误差分量 e_1-e_6 ,由图可知,经过分解后,类似于脉冲形式的误差信号被依次分解到各个频段中,且各频段中信号分量频率由低至高,次序明确,理论上分解正确.由此可见db3小波基本上可以满足对该系统误差信号的分解要求.

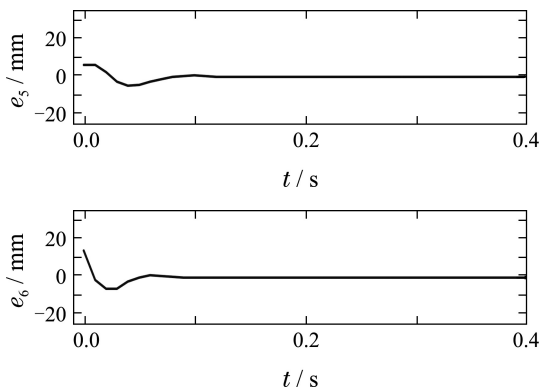
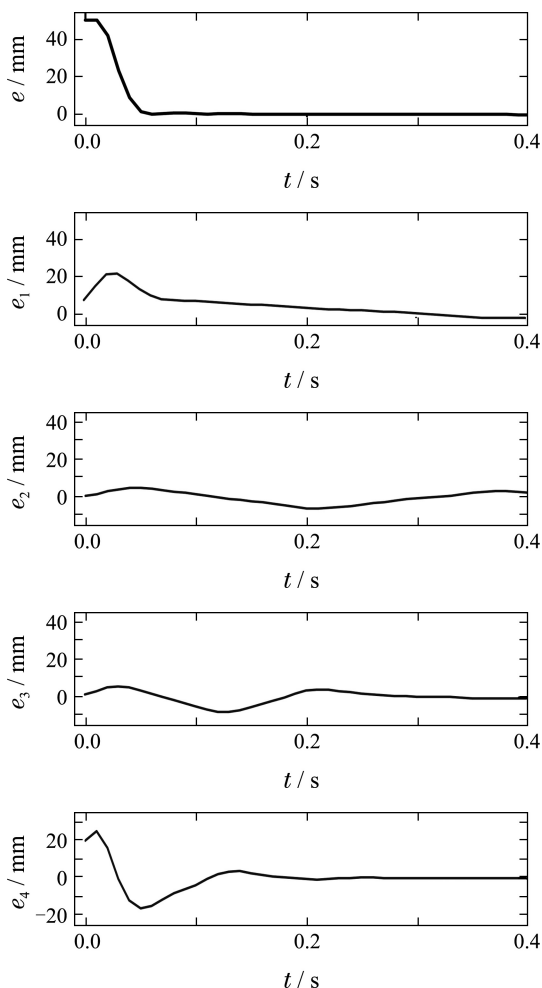


图5 阶跃响应下误差信号分解结果

Fig. 5 Results of error decomposition under step response

根据式(5)所述系统建立Simulink仿真模型,并应用Simulink中S-Function模块编辑控制器算法,运用MATLAB中m语言编制.m优化程序文件并进行优化仿真.首先对传统P控制进行优化,确定比例系数的范围,然后加入I控制,最终所得传统控制器参数如表2所示.

表2 传统控制器参数优化值

Table 2 Optimized parameters of the traditional controller

系数	P控制	PI控制
K_P	311.7	310.2
K_I	—	0.528

在得到P控制的最优比例系数后,以其为基准,根据系统实际情况,左右不等间隔取若干数,排列组合后作为TFP控制器中一系列比例系数的初值,然后进行系数自动寻优,在此基础上加入I控制,重复寻优过程,最终的到的TFP控制、TFPI控制的最优系数组如表3所示.

表3 TF控制器参数优化值

Table 3 Optimized parameters of the TF controller

系数	时频P控制	时频PI控制
K_{P1}	2170.3	3021.4
K_{P2}	1240.4	1030.6
K_{P3}	606.8	770.5
K_{P4}	608.2	722.9
K_{P5}	601.6	734.6
K_{P6}	594.7	694.7
K_I	—	0.615

4.3 硬件在环实验(Hardware-in-the-loop test)

为了验证控制器的实时控制效果,基于NI PXIe-8135系统建立了被控系统的虚拟模型,应用LabVIEW编写控制算法并加载到NI myRIO-1900嵌入式系统设计平台中作为控制器原型进行硬件在环测试,实验

平台如图6所示, TFPI控制器实际工作时的计算流程如图7所示.

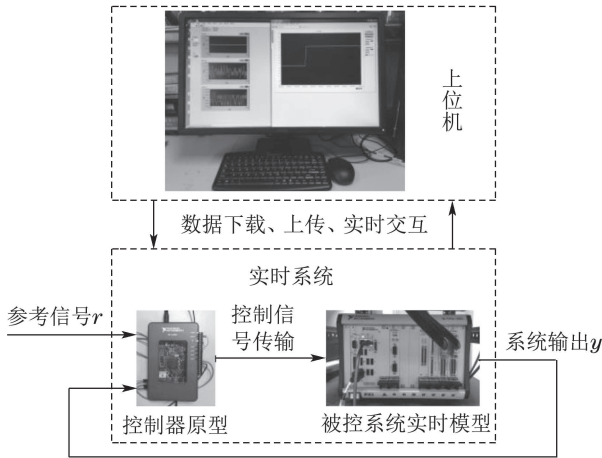


图6 TF控制硬件在环实验台

Fig. 6 Hardware-in-the-loop test bench for the TF control

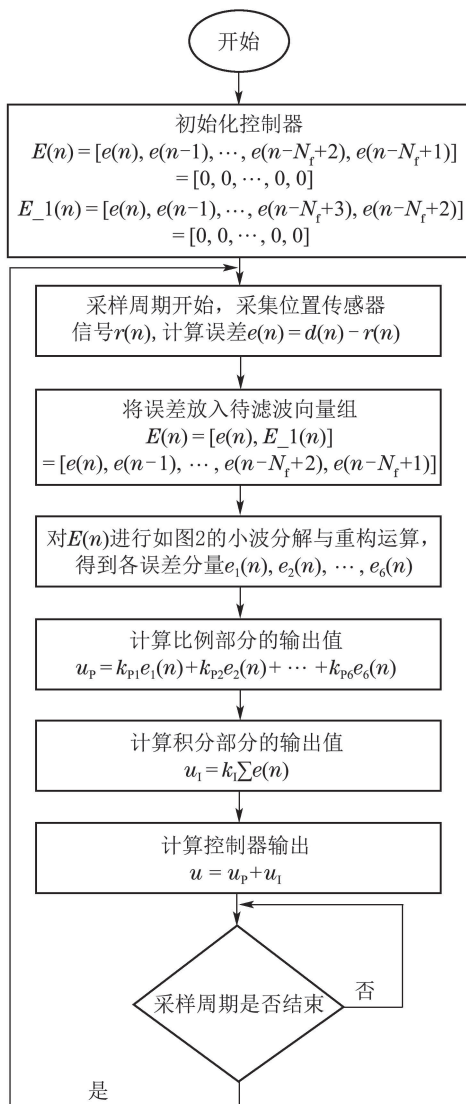
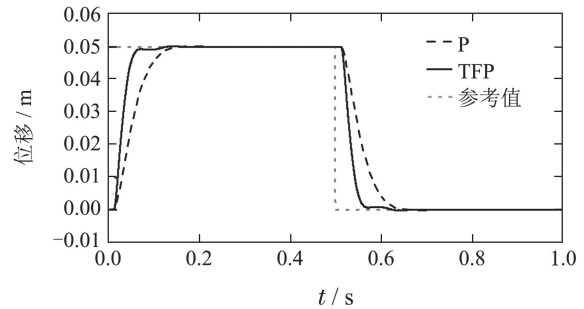


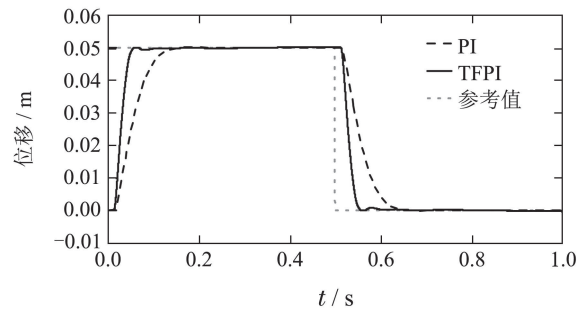
图7 TFPI控制器工作流程图

Fig. 7 Program flow chart of the TFPI controller

约束系统阶跃响应超调量不超过1%, 其控制结果如图8所示, 其中图8(a)为P控制与TFP控制结果对比, 图8(b)为PI控制与TFPI控制结果对比. 由图可知, 同样的超调指标下, 传统P或PI控制的系统响应时间约为0.15 s, TF控制下系统的响应时间约为0.06 s, 充分说明TF控制使系统响应迅速, 而且系统响应加快的同时没有损失稳定性. 而在传统的P或PI控制下, 增大比例系数可以提升系统的响应, 但同时也增加了系统的超调量, 损失了系统的稳定性.



(a) P控制与TFP控制结果



(b) PI控制与TFPI控制结果

图8 系统阶跃响应

Fig. 8 Step responses of system

图9-10分别为系统对正弦曲线与三角波形曲线的跟踪控制结果. 可以说明, 较传统控制, TF控制下系统响应的相位延迟小, 有较快跟踪参考值的能力. 进一步, 由图10中可以看出, 在曲线波峰与波谷的位置, TF控制的响应能很好的复制参考曲线的突变情况, 而传统控制响应则为平滑的过渡, 说明TF控制不但拓宽了系统响应的频宽, 而且使系统在高频段亦有良好的性能.

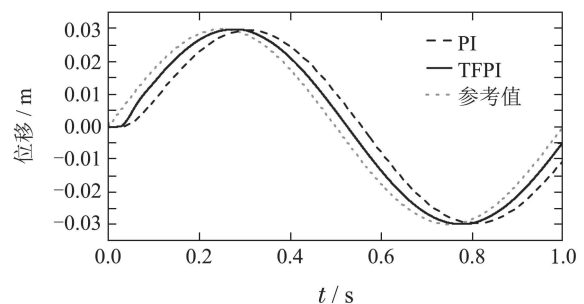


图9 正弦曲线跟踪

Fig. 9 Tracking results of sine curve

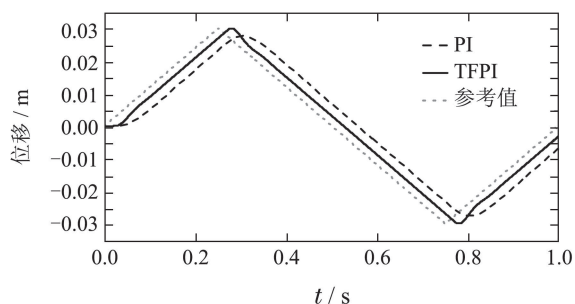


图10 三角波形跟踪

Fig. 10 Tracking results of triangular wave

4.4 TF控制器对比仿真(Comparison of several TF controllers)

为了进一步说明TFPID控制器的良好性能,将其与参考文献中所提到的两种控制方法MRPID和TFFxLMS进行了仿真对比,对比实验均在保证系统阶跃响应超调量不超过1%的条件下进行。

根据文献[6]中对MRPID控制器参数设计的指导与要求,本文MRPID控制器应用db3小波基对误差信号进行三级分解并首先设置高频信号所对应的参数 $K_L = 0$,之后沿用上述的单纯形优化方法对其他3个参数进行自动寻优,最后所得参数为 $K_H = 410$, $K_{M1} = 425$ 以及 $K_{M2} = 960$ 。

本文所针对的被控系统实为非最小相位系统,而文献[25]中指出应用LMS算法进行控制时,对被控制系统的激励频宽不得使系统响应的频率相位滞后超过90度。因此为了保证控制的稳定性,在应用TFFxLMS控制之前,首先运用传统的PID控制器对被控系统进行镇定。综上,所设计的TFFxLMS控制器应用db3小波基组成 512×512 阶小波分解矩阵,其中关键的两参数分别为辨识滤波器以及控制滤波器的迭代步长,在阶跃响应超调量的限制条件下,经过若干次调试,其数值均设置为0.0005,镇定系统所应用的PID控制器参数仍由表2提供。由于TFFxLMS算法具有自适应的功能,因此设置合适的步长后,经过一定的训练,滤波控制器参数可以达到稳定最优。为了有效的进行对比,以上两控制器的计算速率均设置为100 Hz。

三者阶跃响应与正弦跟踪的控制仿真结果分别如图11-12所示。比较可知,阶跃响应时,同样在超调量很小的情况下,TFPID控制器使系统响应所需的时间最短,MRPID次之,TFFxLMS控制算法因需要在控制的过程中实时辨识系统的模型,因此所需时间最长。正弦跟踪的仿真结果显示TFPID控制下系统的相位滞后较小。综上可以说明,根据本文所提的时频控制方案而设计的TFPI控制器具有较优的提升系统动态性能的能力。

5 结论与展望(Conclusions and prospects)

本文建立了一种TF控制方法的理论框架,在此框

架范围内分析了TF控制的原理及其在控制过程中的优越性,并详述了TF控制器的设计方法。基于此,以传统PID控制为例,针对电磁阀控制液压缸系统设计了TFPI控制器,在此过程中应用自动寻优方法,在得到最优控制器参数的同时减少了控制器设计的工作量。以硬件在环设备为基础搭建了被控系统模型和控制器原型,进行了硬件在环测试。实验结果验证了TF控制器的实时性能,并且TF控制器较传统控制器将系统阶跃响应的响应时间从0.15 s缩短至0.06 s,同时超调量不变。此外,将该控制器与两种已有的TF控制器进行了仿真比较,结果再次验证了其良好的动态性能。

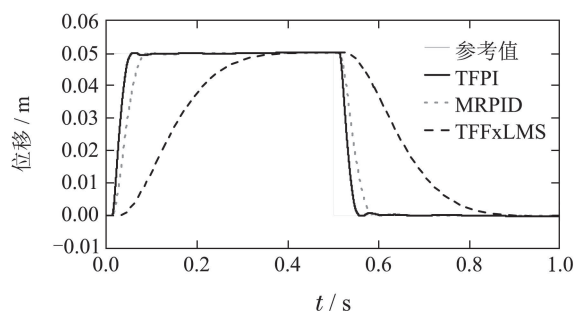


图11 阶跃响应控制结果对比

Fig. 11 Comparison of results of step response

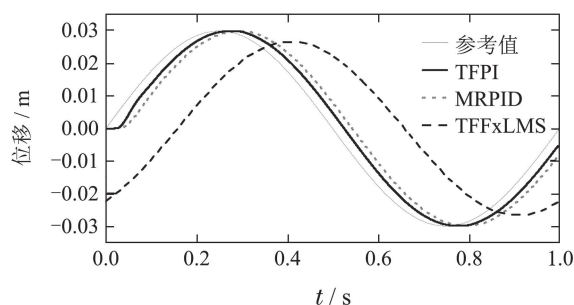


图12 正弦跟踪控制结果对比

Fig. 12 Comparison of results of tracking sine curve

根据文中内容分析,TF控制方法实则具有频域自适应的优势,未来若将丰富的传统自适应控制方法与其结合,一方面可实现时频域同时自适应的目的,为控制器的发展带来新的契机;另一方面,自适应TF控制器中的参数值大多可根据系统运行及自适应规律进行自动整定,大大减少了设计TF控制器时的工作量。值得说明的是,TF控制中的多个分控制器可以基于不同的控制理论,针对被控系统不同频段的特点,可以充分发挥不同控制理论的优势,设计针对性更强、更适合被控系统的控制器。

参考文献(References):

- [1] YANG Shuzi, YANG Kechong, WU Bo, et al. *Control Principle of Mechanical Engineering* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2002.
(杨叔子, 杨克冲, 吴波, 等. 机械工程控制基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.)

- [2] KUO B, GOLNARAGHI F. *Automatic Control Systems (the 8th Edition)* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [3] SUN Mingwei, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. Adaptive PID controller based on band-wise design using wavelet [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankalensis (Natural Science)*, 2000, 33(2): 48 – 52.
(孙明玮, 陈增强, 袁著祉. 基于小波分频设计的自适应PID控制器 [J]. 南开大学学报: 自然科学版, 2000, 33(2): 48 – 52.)
- [4] WANG Qunxian, LI Shaoyuan, LI Junfang. Wavelet analysis and its applications in control [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(4): 385 – 394.
(王群仙, 李少远, 李俊芳. 小波分析及其在控制中的应用 [J]. 控制与决策, 2000, 15(4): 385 – 394.)
- [5] TRUCHETET F, LALIGANT O. Review of industrial applications of wavelet and multiresolution-based signal and image processing [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2008, 17(3): 031102 – 031113.
- [6] PARVEZ S, GAO Z. A wavelet-based multiresolution PID controller [J]. *Industry Applications*, 2005, 41(2): 537 – 543.
- [7] KHAN M, RAHMAN M A. Implementation of a new wavelet controller for interior permanent-magnet motor drives [J]. *Industry Applications*, 2008, 44(6): 1957 – 1965.
- [8] TSOTOLIDIS S, SAFACAS A, MITRONIKAS E. Multiresolution PID control of brushless DC motor in fuel cell electric vehicles [C] // *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. Madrid: IEEE, 2013: 611 – 616.
- [9] TOLENTINO C, SILVA A, VELASCO L, et al. *Wavelet PID and Wavenet PID: Theory and Applications* [M]. Rijeka: INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [10] FEBIN D J L, SUBBIAH V, SANJEEVIKUMAR P. Robust speed control of an induction motor drive using wavelet-fuzzy based self-tuning multiresolution controller [J]. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2013, 6(4): 724 – 738.
- [11] LIU M K, SUH C S. Simultaneous time-frequency control of bifurcation and chaos [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012, 17(6): 2539 – 2550.
- [12] LIU M K, SUH C S. Synchronization of chaos in simultaneous time-frequency domain [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(23): 9524 – 9537.
- [13] WANG X, SUH C S. Nonlinear time-frequency control of PM synchronous motor instability applicable to electric vehicle application [J]. *International Journal of Dynamics and Control*, 2016, 4(4): 400 – 412.
- [14] WANG X, SUH C S. Precision concurrent speed and position tracking of brushed dc motors using nonlinear time-frequency control [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2016. DOI: 10.1177/1077546316628974.
- [15] DAUBECHIES I. *Ten Lectures on Wavelets* [M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.
- [16] JI Ming. *A First Course in Wavelets Analysis* [M]. Shanghai: Shanghai University Press, 2002.
(基明. 小波分析基础 [M]. 上海: 上海大学出版社, 2002.)
- [17] MALLAT S, HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelets [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, 38(2): 617 – 643.
- [18] GOMES J, VELHO L. *From Fourier Analysis to Wavelets* [M]. Heidelberg: Springer, 2015.
- [19] HUANG Ping, MENG Yonggang. *Optical Theories and Methods* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
(黄平, 孟永钢. 最优化理论与方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.)
- [20] VISIOLI A. Optimal tuning of PID controllers for integral and unstable processes [C] // *Proceedings of IEEE Control Theory and Applications*. New York: IEEE, 2001, 148: 180 – 184.
- [21] KALYONCU M, HAYDIM M. Mathematical modelling and fuzzy logic based position control of an electrohydraulic servosystem with internal leakage [J]. *Mechatronics*, 2009, 19(6): 847 – 858.
- [22] KIM W, WON D, SHIN D, et al. Output feedback nonlinear control for electro-hydraulic systems [J]. *Mechatronics*, 2012, 22(6): 766 – 777.
- [23] OWEN W S, CROFT E A. The reduction of stick-slip friction in hydraulic actuators [J]. *Mechatronics*, 2003, 8(3): 362 – 371.
- [24] LIU M K, SUH C S. On controlling milling instability and chatter at high speed [J]. *Journal of Applied Nonlinear Dynamics*, 2012, 1(1): 59 – 72.
- [25] SHEN G, ZHU Z, ZHANG L, et al. Adaptive feed-forward compensation for hybrid control with acceleration time waveform replication on electro-hydraulic shaking table [J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(8): 1128 – 1142.

作者简介:

武秀恒 (1990–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为非线性系统控制、电液系统分析与控制等, E-mail: wxh599@126.com;

杜岳峰 (1984–), 男, 讲师, 目前研究方向为液压传动与控制、农业机械数字化设计等, E-mail: dyf@cau.edu.cn;

C. Steve. SUH (1961–), 男, 副教授, 博士生导师, 目前研究方向为非线性时频控制、先进制造、飞秒激光加热、工程设计等, E-mail: ssuh@tamu.edu;

毛恩荣 (1961–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为液压传动与控制、农业机械数字化设计与智能控制等, E-mail: gxy15@cau.edu.cn;

宋正河 (1973–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为车辆人机工程、智能控制、农业机械数字化设计等, E-mail: songzhenghe@cau.edu.cn.