

Levant微分器参数整定算法及在高空台系统的应用

张和洪¹, 谢晏清², 王 娟¹, 但志宏³, 郭文忠^{1†}

(1. 福州大学 计算机与大数据学院, 福建 福州 350108; 2. 大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116000;

3. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621000)

摘要: Levant基于超螺旋算法提出的滑模微分器具有滤波效果好且对特定噪声干扰不敏感等特点. 针对该微分器参数调整问题, 文章利用时间线性变换和坐标变换得到了一种有效的参数整定算法, 该算法可依据给定信号的频率和幅值确定微分器参数. 通过频域和时域对比分析表明, 本文所设计的参数整定算法可在保证跟踪滤波与微分信号提取精度的同时, 便捷地给出Levant微分器的有效参数. 最后, 本文将基于参数整定算法的Levant微分器应用到某航空发动机高空模拟试车台飞行环境模拟控制系统的环境信号处理中, 验证了所提算法的有效性及其工程应用价值.

关键词: Levant微分器; 滤波; 参数整定; 时间线性变换; 坐标变换; 飞行环境模拟控制系统

引用格式: 张和洪, 谢晏清, 王娟, 等. Levant微分器参数整定算法及在高空台系统的应用. 控制理论与应用, 2023, 40(10): 1831 – 1838

DOI: 10.7641/CTA.2022.10361

Parameter tuning algorithm for levant's differentiator and its application in flight environment simulation control system

ZHANG He-hong¹, XIE Yan-qing², WANG Juan¹, DAN Zhi-hong³, GUO Wen-zhong^{1†}

(1. College of Computer and Data Science, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350108, China;

2. College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116000, China;

3. Sichuan Gas Turbine Establishment, Aero Engine Corporation of China, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: With adoption of the sliding mode, the super twisting algorithm (STA) based sliding-mode differentiator proposed by Levant provides good filtering ability and robustness to specific noises interference. A flexible and effective parameter tuning algorithm for this differentiator is proposed in this work. In particular, the principle of the time linear transformation and the coordination transformation is adopted to execute the normalization processing for any given inputs, and meanwhile the key parameters can be determined directly according to the frequency and amplitude of the signals. The characteristics of the differentiator based on the proposed parameter tuning algorithm are shown from both the frequency and the time domains' analysis. The simulation results show that the proposed algorithm can conveniently and effectively provide a set of parameters for the differentiator to fulfil the accuracy and robustness. Further, the differentiator via the proposed parameter tuning algorithm is applied to the flight environment simulation control system and the experimental results verify the effectiveness of the proposed algorithm and show its potential engineering application value.

Key words: Levant's differentiator; filtering; parameter tuning algorithm; time linear transformation; coordinate transformation; flight environment simulation control system

Citation: ZHANG Hehong, XIE Yanqing, WANG Juan, et al. Parameter tuning algorithm for levant's differentiator and its application in flight environment simulation control system. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(10): 1831 – 1838

1 引言

对给定的信号进行滤波和从含噪声或不连续的信号中提取有效的一阶或高阶微分信号, 是控制理论与工程实践中亟待解决的复杂问题^[1-3], 处理不当就会

产生振荡甚至湮没现象, 影响系统的稳定性. 若系统动态模型已知, 可采用Kalman滤波器^[4]或者状态观测器^[5]估计信号及其相应的微分. 然而, 系统的模型往往难以获取. 为此, 国内外学者对不依赖或弱依赖于

收稿日期: 2021-04-27; 录用日期: 2022-03-10.

[†]通信作者. E-mail: guowenzhong@fzu.edu.cn; Tel.: +86 591-22865528.

本文责任编辑: 陈增强.

国家自然科学基金项目(62003088), 福建省自然科学基金项目(2021J02008)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (62003088) and the National Natural Science Foundation of Fujian Province (2021J02008).

对象模型的微分器算法进行了广泛的研究. 经典微分器和差分算法^[6]形式简单、易于实现, 但当输入信号被随机噪声污染时, 便会产生噪声放大效应, 因此这种算法在实际工程中较难应用. 考虑到实际系统对快速性的要求, 韩京清^[7]利用二阶最速开关系统提出了非线性跟踪微分器并构造了其相应的离散形式. 谢云德等在文献[8]中研究了该离散形式的跟踪微分器的边界层构造以及特性问题, 提出了一种新型的跟踪微分器算法. 该算法具有快速跟踪输入信号、无超调、无颤振的特点, 且能够得到较好的微分信号. 王新华等^[9]通过判断系统状态变量与平衡点的距离来决定微分器中起主导作用的部分, 进而提出了全程快速微分器, 这种微分器在系统状态远离平衡点时具有较快的收敛速度. 在此基础上, 学者提出了基于奇异摄动原理的有限时间收敛微分器^[10], 该类型微分器可实现快速有限时间收敛, 提取微分的效果良好, 但要求输入信号的一阶至 $(n-1)$ 阶导数满足有界的约束条件. 文献[11-13]中对跟踪微分器进行了进一步的推广研究, 构造了一系列新型跟踪微分器算法, 提高了跟踪微分器在信号跟踪滤波与微分信号提取方面的精度.

滑模控制对外界噪声干扰和不确定性扰动具有较强的鲁棒性, Levant^[14]基于超螺旋算法(super twisting algorithm, STA)提出了一种鲁棒精确微分器. 当噪声幅值足够小时, 在一定频带内具有鲁棒特性. 此外, Levant微分器算法理论完备, 在稳定性和精度方面均有严格的证明与分析^[14-15]. 该算法被推广应用于控制器、观测器以及微分器的设计中^[16-18]. 文献[19]从频域、时域以及硬件实现等方面综合对比分析了Levant微分器和韩京清的跟踪微分器的性能特性, 在一组合适的参数下, 该滑模微分器可有效抑制噪声并获得品质良好的滤波和微分信号. 文中还指出Levant微分器的性能很大程度上依赖于参数的选择, 参数选择太大或者太小都会对微分器的性能产生较大的影响. 参数较大时, 微分器的颤振严重, 而参数太小, 则无法较好跟踪输入信号. 有效的参数整定方法对Levant微分器的应用至关重要. Levant在文献[14]中给出了参数和输入信号导数的Lipschitz常数上界的不等式关系, 该不等式仅能获得候选参数的粗糙估计范围. 目前, 关于Levant微分器参数整定方面的研究给出的参数整定方法都是以不等式形式呈现^[20-21]. 这些方法所确定的参数选择范围不确定性大, 参数的大小是否合适缺乏严谨的理论判据. 而Levant微分器带宽较窄, 对参数的变化较敏感, 不适合处理机动性较大的信号. 这就使得即使对于给定的信号, 已经获得了一个较好的参数, 但一旦信号的频率和幅值发生变化, 依据相关的不等式关系难以有效确定新参数. Levant微分器为了得到较高精度的跟踪滤波和微分提取特性, 其参数须重新进行相应的调整以适应信号的变化. 故设计

实用的Levant微分器参数整定算法, 将很大程度上满足系统在不同运行工况下对跟踪滤波与微分信号获取的需求.

本文针对Levant微分器参数整定算法设计问题展开了研究. 首先, 根据时间线性变换和坐标变换提出了一种参数整定算法. 该算法给出了Levant微分器的参数与输入信号的频率以及幅值之间的确定性关系. 当输入信号发生变化时, 通过该算法可确定新参数. 为了验证所提出的参数整定算法的有效性, 分别从频域和时域的角度进行了仿真分析, 结果表明, 该新算法便捷有效. 最后, 将所提出的参数整定算法应用到某高空模拟试车台飞行环境模拟控制系统中的环境信号的处理中. 实验结果表明, Levant微分器结合新提出的参数整定算法可有效获取环境模拟信号的滤波及微分反馈信号. 这对改善发动机实验中的飞行环境模拟控制系统的稳定性、动态响应速度和控制精度有着重要的指导意义.

2 问题描述

微分器既要尽量准确求导, 又要对信号的输入噪声具有鲁棒性. 假设输入信号为时间域 $[0, \infty]$ 上有界可测的函数 $v(t)$, 它的导数具有Lipschitz常数上界 $C > 0$, 为了对未知信号 $v(t)$ 进行求导, Levant使用STA算法, 在一个有限的时间后保持 $\sigma = x_1(t) - v(t) = 0$ 和 $\dot{\sigma} = \dot{x}_1(t) - \dot{v}(t) = 0$, 得到如下微分器算法^[14]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2 - \lambda|x_1 - v|^{\frac{1}{2}}\text{sgn}(x_1 - v), \\ \dot{x}_2(t) = -\alpha\text{sgn}(x_1 - v), \end{cases} \quad (1)$$

其中: v 是参考输入信号; $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 是状态变量; $\lambda > 0$ 和 $\alpha > 0$ 分别是微分器的两个可调参数. Levant指出这两个参数满足下述不等式约束条件:

$$\begin{cases} \alpha > C, \\ \lambda^2 \geq 4C \frac{\alpha + C}{\alpha - C}, \end{cases} \quad (2)$$

其中 C 是输入信号导数 v 的Lipschitz常数的上界.

Levant微分器在已知信号导数的Lipschitz常数上界的情况下, 利用滑模原理通过一个有限时间的暂态过程可实现

$$\lim_{t \rightarrow T} x_1(t) = v(t), \quad \lim_{t \rightarrow T} x_2(t) = \dot{v}(t),$$

其中 T 是有限时间. Levant微分器继承了滑模控制的优点, 但Levant微分器的滤波和微分特性对参数 λ 和 α 的依赖较大. 选择好的微分器参数, 对于某些频率特征的信号, 微分器具有较好的滤波与微分提取效果, 然而, 当信号的频率或幅值发生变化时, 该组固定参数的微分器可能导致信号的颤振、畸变, 甚至发散无法跟踪输入信号, 此时需及时调整该微分器的参数以适应信号的变化.

上述不等式(2)是Levant对其微分器参数的一个粗糙估计,在该范围内可供选择的参数值较多,从众多候选参数中选择合适的参数相当困难.此外,不等式(2)中的参数 C 是所需处理信号导数的Lipschitz常数上界,而上界又是相对宽泛的概念,这使得原本粗糙的范围限定变得更加的宽泛.鉴于该滑模微分器参数不易整定的问题,本文将从信号的频率和幅值变化的角度出发,开展Levant微分器的参数整定算法研究.

3 Levant微分器的参数整定算法

Levant微分器有效的滤波和微分提取特性依赖于对参数 λ 和 α 的准确选择,参数的选择和所需处理的信号特征密切相关.针对给定的一个基础信号,基于Levant不等式限定的范围可通过反复试错选择一组可达到预期精度的参数.一旦信号的频率和幅值发生变化,该组参数将不再适用,可能导致获取的微分产生颤振、畸变甚至湮没现象.若变化后的输入信号可通过该基础信号经过某种变换后进行表示,那变化后的信号所对应的Levant微分器参数可通过对基础信号对应的微分器参数进行相应的变换后得到.基于该思路,本部分内容将基于时间线性变换和坐标变换,提出Levant微分器的参数整定算法.该算法给出了参数与所需处理信号频率和幅值之间的对应关系,具体形式由下述定理呈现.

定理 1 假设给定的基础信号 $v_0(t) = A_0 \times \sin(w_0 t)$ 的幅值 A_0 和频率 w_0 已知,且对应的Levant微分器(1)的最佳参数是 λ_0 和 α_0 ,那么对于给定幅值 A_n 和频率 w_n 的信号 $v_n(t) = A_n \sin(w_n t)$,存在一组理想的微分器参数 λ_n 和 α_n 满足条件

$$\begin{cases} \lambda_n = \sqrt{\frac{A_n}{A_0}} \frac{w_n}{w_0} \lambda_0, \\ \alpha = \frac{A_n}{A_0} \left(\frac{w_n}{w_0}\right)^2 \alpha_0. \end{cases} \quad (3)$$

证 采用时间线性变换和坐标变换的思想给出定理的证明.时间线性变换可用来衡量信号频率的变化,而坐标变换则可用来表示信号幅值的变化.

针对基础信号 v_0 ,由式(1)得到其对应的Levant微分器为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2(t) - \lambda_0 |x_1(t) - v_0|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(x_1(t) - v_0), \\ \dot{x}_2 = -\alpha_0 \text{sgn}(x_1(t) - v_0). \end{cases} \quad (4)$$

证明过程主要分为以下两步.

步骤 1 实施时间线性变换.令 $t = \frac{w_n}{w_0} \tau$,则微分器(4)变换为

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{d\tau} = \frac{dx_1(t)}{dt} \frac{dt}{d\tau} = \frac{w_n}{w_0} (x_2(t) \lambda_0 |x_1(t) - v_0|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(x_1(t) - v_0)), \\ \frac{dx_2(t)}{d\tau} = \frac{dx_2(t)}{dt} \frac{dt}{d\tau} = \frac{w_n}{w_0} (-\alpha_0 \text{sgn}(x_1(t) - v_0)), \end{cases} \quad (5)$$

为了将时间变量 t 变 τ ,作变量变换,令

$$\begin{cases} z_1(\tau) = x_1(t), \\ z_2(\tau) = \frac{w_n}{w_0} x_2(t), \end{cases} \quad (6)$$

即

$$\begin{cases} \frac{dz_1(\tau)}{d\tau} = \frac{dx_1(t)}{d\tau}, \\ \frac{dz_2(\tau)}{d\tau} = \frac{w_n}{w_0} \frac{dx_2(t)}{d\tau}. \end{cases} \quad (7)$$

将式(5)代入到式(7)中,得到时间线性变换后的Levant微分器的形式,即

$$\begin{cases} \frac{dz_1(\tau)}{d\tau} = \frac{w_n}{w_0} (x_2(t) - \lambda_0 |x_1(t) - v_0(\tau)|^{\frac{1}{2}} \times \text{sgn}(x_1(t) - v_0(\tau))), \\ \frac{dz_2(\tau)}{d\tau} = \left(\frac{w_n}{w_0}\right)^2 (-\alpha_0 \text{sgn}(x_1(t) - v_0(\tau))). \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_1(\tau) = z_2(\tau) - \frac{w_n}{w_0} \lambda_0 |z_1(\tau) - v_0(\tau)|^{\frac{1}{2}} \times \text{sgn}(z_1(\tau) - v_0(\tau)), \\ \dot{z}_2(\tau) = -\left(\frac{w_n}{w_0}\right)^2 \alpha_0 \text{sgn}(z_1(\tau) - v_0(\tau)). \end{cases} \quad (9)$$

步骤 2 实施坐标变换.令

$$y_1(\tau) = \frac{A_n}{A_0} z_1(\tau), \quad y_2(\tau) = \frac{A_n}{A_0} z_2(\tau),$$

对微分器(9)的两个方程分别实施相应的坐标变换,则有

$$\begin{aligned} \dot{y}_1(\tau) &= \frac{A_n}{A_0} \dot{z}_1(\tau) = \\ &= \frac{A_n}{A_0} z_2(\tau) - \frac{A_n}{A_0} \frac{w_n}{w_0} \lambda_0 |z_1(\tau) - v_0(\tau)|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(z_1(\tau) - v_0(\tau)) = \\ &= y_2(\tau) - \left(\frac{A_n}{A_0}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{w_n}{w_0} \lambda_0 |y_1(\tau) - v_n(\tau)|^{\frac{1}{2}} \times \text{sgn}(y_1(\tau) - v_n(\tau)). \end{aligned} \quad (10)$$

与此同时,

$$\begin{cases} \dot{y}_2(\tau) = \frac{A_n}{A_0} \dot{p}z_2(\tau) = \\ -\frac{A_n}{A_0} \left(\frac{w_n}{w_0}\right)^2 \alpha_0 \operatorname{sgn}(y_1(\tau) - \frac{A_n}{A_0} v_0(\tau)), \\ \dot{y}_2(\tau) = -\frac{A_n}{A_0} \left(\frac{w_n}{w_0}\right)^2 \alpha_0 \operatorname{sgn}(y_1(\tau) - v_n(\tau)). \end{cases} \quad (11)$$

结合式(10)–(11), 得到新信号 v_n 对应的Levant微分器

$$\begin{cases} \dot{y}_1(\tau) = y_2(\tau) - \sqrt{\frac{A_n}{A_0} \frac{w_n}{w_0}} \lambda_0 |y_1(\tau) - v_n(\tau)|^{\frac{1}{2}} \times \\ \operatorname{sgn}(y_1(\tau) - v_n(\tau)), \\ \dot{y}_2(\tau) = -\frac{A_n}{A_0} \left(\frac{w_n}{w_0}\right)^2 \alpha_0 \operatorname{sgn}(y_1(\tau) - v_n(\tau)). \end{cases} \quad (12)$$

依据上述证明过程, 时间线性变换 $t = \frac{w_n}{w_0}$, 将信号 $A_0 \sin(w_0 t)$ 变化为 $A_0 \sin(w_n \tau)$, 坐标变换进一步将信号变为 $A_0 \sin(w_n \tau)$ 变为 $A_n \sin(w_n \tau)$, 即为任意给定的目标信号. 综上所述, 由式(12)可知信号从 v_0 变化为 v_n , Levant微分器参数之间的对应关系为

$$\begin{cases} \lambda_n = \sqrt{\frac{A_n}{A_0} \frac{w_n}{w_0}} \lambda_0, \\ \alpha_n = \frac{A_n}{A_0} \left(\frac{w_n}{w_0}\right)^2 \alpha_0. \end{cases} \quad (13)$$

证毕.

注1 给定一个基础信号, 对其实施两次变换即时间线性变换和坐标变换便可得到目标信号. 该新目标信号所对应的Levant微分器参数与信号的频率和幅值的变化量即 $\frac{w_1}{w_0}$ 和 $\frac{A_1}{A_0}$ 有关. 在工程应用中, 当信号发生变化时, 依据相应的信号估计算法获得其频率和幅值的变化量, 便可根据式(3)快速地确定出新信号对应的Levant微分器的有效参数.

不失一般性, 现将定理1中的基础信号取成最简单的正弦函数形式, 即 $v_0(t) = \sin t$. 通过不同采样时间 T_s 以及不同参数 λ_0 和 α_0 的微分获取效果的仿真对比, 建议选择参数 $\lambda_0 = 3$ 和 $\alpha_0 = 2$, 由此可得到关于Levant微分器参数整定的相关推论.

推论1 对于任意给定的信号 $v_n(t) = A_n \times \sin(w_n t)$, 假设已知信号的幅值 A_n 和频率 w_n . 根据定理1得到下述新参数整定算法下的Levant微分器(记作: NP(new parameter)-Levant):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 - \lambda_n |x_1 - v_n|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}(x_1 - v_n), \\ \dot{x}_2 = -\alpha_n \operatorname{sgn}(x_1 - v_n), \end{cases} \quad (14)$$

其中: $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 是状态变量, 分别用来近似任意给定信号 v_n 的滤波和微分; 参数 λ_n 和 α_n 是将定理1中的基础信号取为 $v_0(t) = \sin t$ 后得到的参数整定公式, 即为

$$\begin{cases} \lambda_n = 3w_n \sqrt{A_n}, \\ \alpha_n = 2w_n^2 A_n. \end{cases} \quad (15)$$

推论1说明, NP-Levant微分器参数的物理含义明确, 与所需处理信号的频率和幅值有关. 通过分析可知新提出的参数整定公式与Levant提出的不等式(2)的约束条件不存在从属与包含的关系, 且Levant给出的粗糙的参数不等式选择范围是一个充分条件而不是必要条件. 在工程应用中, 所需处理的信号往往是包含多种谐波信号且幅值会发生改变, 或者呈现带通特性. 但大部分的系统在运行过程中, 针对某种特定的工况运行时间段内, 一般存在一个中心频率点. 对于这样形式的信号, 可通过傅立叶变换或频谱分析等方法, 找到信号中心频率点, 即能量谱中能量最大的信号所对应的信号频率, 那么微分器算法的参数可根据该中心频率点对应信号的频率与幅值来整定. 从系统运行的全频段过程而言, 可能存在多个不同的中心频率点, 针对这个问题, 需要进一步提出能够自适应识别不同运行状态下的中心频率点的算法, 比如采用自适应陷波器, 而后再使用该参数整定公式.

4 数值仿真

本部分将通过数值仿真验证所提出的Levant微分器参数整定算法的合理性. 主要从频域和时域两个角度出发, 分析新参数整定算法下的Levant微分器(NP-Levant)的性能特性以及参数整定公式(15)的有效性. 具体地, 将新提出的参数整定公式(15)与Levant的参数整定方法(2)进行对比研究, 验证本文所提出的参数整定公式(15)的有效性.

4.1 频域分析

频域分析的目的是为了测试理想状态下Levant微分器的滤波和微分估计的频域特性. 为了更加清晰地呈现出新设计的参数整定公式(15)的有效性, 这里将其与Levant的参数整定方法(2)进行比较, 即Levant微分器和NP-Levant进行频域特性对比研究. 在仿真中以理想微分器作为基准对比分析Levant微分器在不同参数整定方法下幅值变化以及相位滞后情况.

仿真过程中, 采样周期取1 ms, 即 $h = 0.001$ s. 输入信号为正弦信号 $v_n(t) = \sin(2\pi F t)$, 频率 F 的起始频率为0.1 Hz, 终止频率为10 Hz, 步长为0.5 Hz. 关于参数选择, Levant的参数不等式(2)提供了微分器参数的一个宽泛范围, 在这个范围内选择 $\lambda = 10$ 和 $\alpha = 15$; 对于NP-Levant, 由于 $A_n = 1$, $w_n = 2\pi F$, 根据式(15)可得到NP-Levant微分器的两个理想参数为 $\lambda_n = 3(2\pi F)$ 和 $\alpha_n = 2(2\pi F)^2$. 最后, 采用扫频法绘制微分器的频域特性曲线, 对每个频率点, 运行20000个采样时间并记录采样区间[10000, 15000]的数据, 仿真效果图如图1–2所示.

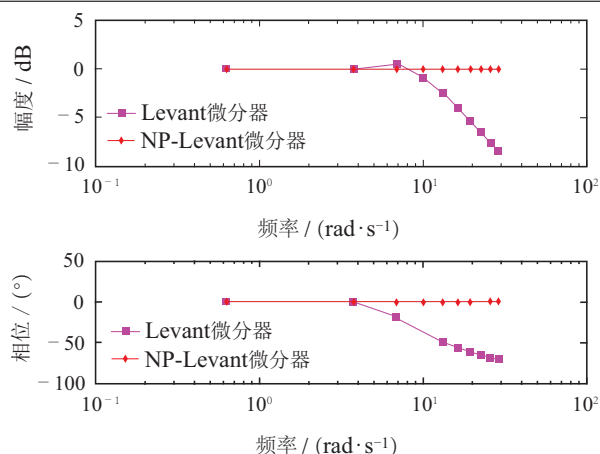


图 1 Levant微分器和NP-Levant微分器关于跟踪滤波的频域特性对比效果

Fig. 1 Comparisons of signal filtering between NP-Levant and Levant's differentiator in frequency-domain

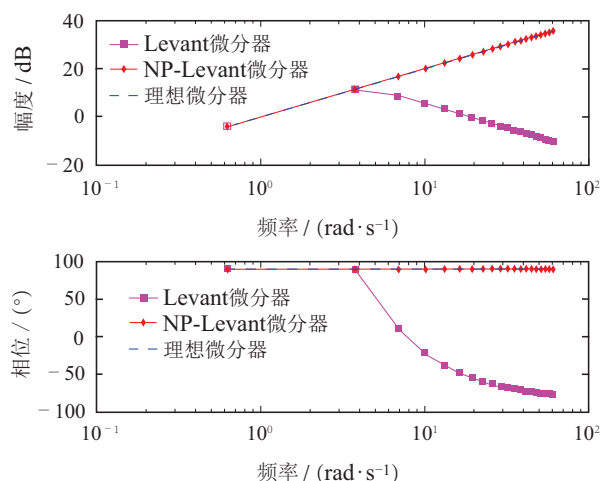


图 2 Levant微分器和NP-Levant微分器关于微分估计的频域特性对比效果

Fig. 2 Comparisons of differentiation acquisition between NP-Levant and Levant's differentiator in frequency-domain

从仿真对比图1中可看出, Levant微分器的滤波特性类似于二阶线性低通滤波器, 其转折频率为4 rad/s. 而新参数整定方法下的Levant微分器即NP-Levant幅频和相频特性都是平行于横轴的直线, 在理想状态下可对任意频率的信号进行较精确的跟踪滤波. 图2中可看出, Levant微分器的频域特性类似于带通滤波器, 它的转折频率约为4 rad/s即带宽相对较窄. 当信号发生变化时, 参数就需要重新进行调整以获得微分器最佳性能. 而NP-Levant微分器的频域特性类似于理想微分器. 当信号频率 F 从0变化到无穷大时, 幅频特性是斜率为20 dB/decade的一条直线, 即幅值表现为不衰减的态势. 相频特性是一条直线, 纵坐标为 90° , 即相角表现为超前 90° .

图1和图2的分析结果表明, 与Levant的参数选择方法相比, 本文提出的参数整定公式具有可操作性.

在理想状态下, 对于任意给定频率和幅值的信号, 利用所提出的参数整定公式(15)可以较为精确地得到Levant微分器的有效参数.

4.2 时域分析

本部分通过给定不同的输入信号, 对比新参数整定公式(15)和Levant的参数整定方法(2)在信号滤波与微分提取方面的效果, 验证所提出的参数整定算法的准确性. 在整个仿真过程中, 取相同的采样步长为 $h=0.001$ s, 输入信号取为含有随机的白噪声的正弦信号 $v_n(t)=16\sin(10t)$ 及 $v(t)=\text{awgn}(10\sin(10t)+3\cos(5t), \text{SNR})$, 其中函数awgn用来添加不同强度的随机噪声, SNR(signal-noise-ratio)值表示噪声强度大小.

首先, 针对含有随机的白噪声的正弦信号 $v_n(t)=16\sin(10t)$, 利用Levant的参数不等式(2)选择信号 $v_n(t)$ 对应的微分器参数. 先计算 $v_n(t)$ 导数的Lipschitz常数的上界, 因为

$$\dot{v}_n = 160\cos(10t), \quad \ddot{v}_n = -160\sin(10t),$$

故不失一般性, 取

$$C_n = \max_{\forall t} |v_n(t)| = 1600,$$

由不等式(2)得到微分器参数的一个范围, 即

$$\alpha_n > 1600, \quad \lambda_n^2 \geq 4 \times 1600 \frac{\alpha_n + 1600}{\alpha_n - 1600}. \quad (16)$$

实际上, 满足条件(16)的参数有很多组, 需要从不等式限定的范围内, 选择一组合适的微分器参数. 这里先将 $\alpha_n = 2000$ 选定, 再将 α_n 的值代入到关于 λ_n 的不等式中, 可以得到 $\lambda_n^2 \geq 57600$, 基于此, 选择 $\lambda_n = 240$. 新提出的参数整定方法可根据所需处理信号的频率和幅值确定出Levant微分器参数, v_n 对应的幅值和频率分别为 $A_n=16$ 和 $w_n=10$, 根据式(15)可确定 v_n 对应的Levant微分器参数为 $\alpha_n=3200$ 和 $\lambda_n=120$. 仿真对比效果图如图3所示. 此外, 参数整定算法的有效性的还可采用平均绝对误差 (average of absolute error, AAE)进行定量刻画, Levant微分器的跟踪滤波和微分估计的平均绝对误差的计算公式分别为

$$\text{AAE1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_1(i) - v(i)|, \quad (17)$$

$$\text{AAE2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_2(i) - v(i)|, \quad (18)$$

两个参数整定方法下的Levant微分器达到稳态后, 利用式(17)–(18)计算出的跟踪滤波和微分估计的平均绝对误差分别如表1所示.

为了进一步验证本文所设计的算法抑制噪声干扰的有效性, 取输入信号为 $v(t) = \text{awgn}(10\sin(10t)+3\cos(5t), \text{SNR})$, 其中信噪比分别取SNR = 80 dB 和 60 dB. 在参数选择方面, 首先利用Levant不等式约束

条件(即式(2))选择参数作为对比组,取Lipschitz常数 $C=1000$,那么可选择参数 $\alpha=2000$, $\lambda=200$.其次,在实际应用时,所需处理的信号都存在中心频率点,即能量谱中能量最大的信号所对应的信号频率,故针对以上的输入信号,可选择 $\omega=10$, $A=10$,利用本文所提出的参数整定算法(即式(15))可获得微分器参数 $\alpha=2000$, $\lambda=30\sqrt{10}$.仿真对比结果图如图4和图5,误差表如表2所示.

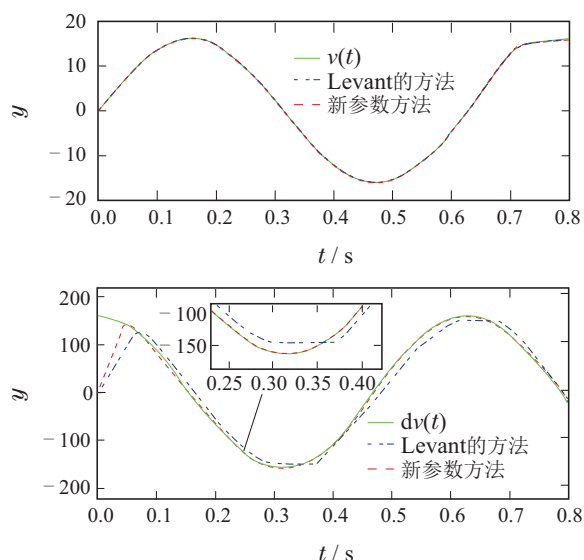


图3 新参数整定方法和Levant方法关于信号滤波和微分估计仿真对比图

Fig. 3 Comparisons of performances of filtering and differentiation acquisition between the new parameter tuning method and Levant's method

表1 新参数整定方法和Levant方法的平均绝对误差

平均绝对误差	参数选择方式	
	新参数整定方法/%	Levant参数方法/%
跟踪滤波	0.047	0.29
微分估计	75	430.15

图3-5表明,在噪声存在的情况下,与Levant的参数整定方法相比,新参数整定方法下的Levant微分器具有较好的滤波和微分特性,相位滞后较小可以获得品质良好的滤波和微分信号.原始的Levant微分器对存在高频测量噪声信号的滤波效果有待进一步提升,这也是Levant微分器的一个可以改进提升的地方.进一步从表1和表2可以得出,新参数整定方法下的Levant微分器达到稳态后的跟踪滤波和微分估计的平均绝对误差较小,并且稳态平均绝对误差的精度提升了1-2个数量级.

5 实验

飞行环境模拟控制系统是现代航空发动机研制过

程中用来模拟各类飞行环境条件的核心设备,它通过调节控制航空发动机进排气口压力,温度以及实验舱环境压力建立起发动机在不同高度,马赫数下的飞行工作条件^[22-23].对于飞行环境模拟控制系统而言,处理、重构与反馈环境模拟信号及其速度信号对控制器的设计至关重要.这些反馈信号的精度与相位滞后情况会成为制约反馈控制器设计成败的核心关键.由于飞行环境模拟实验需求严苛、传感器设计和测量通道的干扰等因素,使得环境模拟量测信号呈现出频率低以及掺杂随机噪声的特点,这给信号的处理带来了困难.在这种情况下,如何从带噪声的环境信号中获取其有效的滤波和速度信号并反馈到控制器的设计中,这对其迅捷、准确地完成控制目标意义重大.工作原理如图6所示.

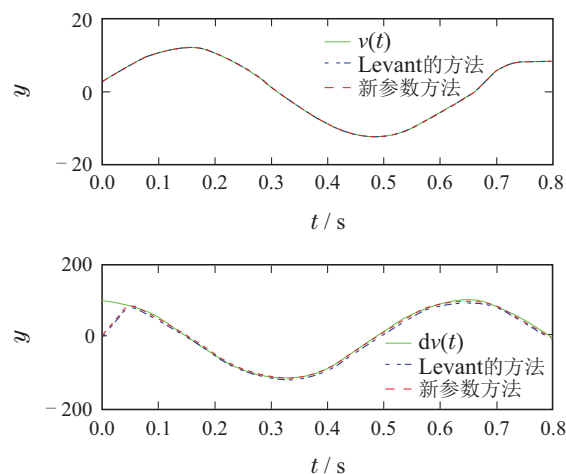


图4 新参数整定方法和Levant方法关于信号在噪声SNR=60 dB时滤波和微分估计仿真对比

Fig. 4 Comparisons of performances of filtering and differentiation acquisition between the new parameter tuning method and Levant's method when SNR=60 dB

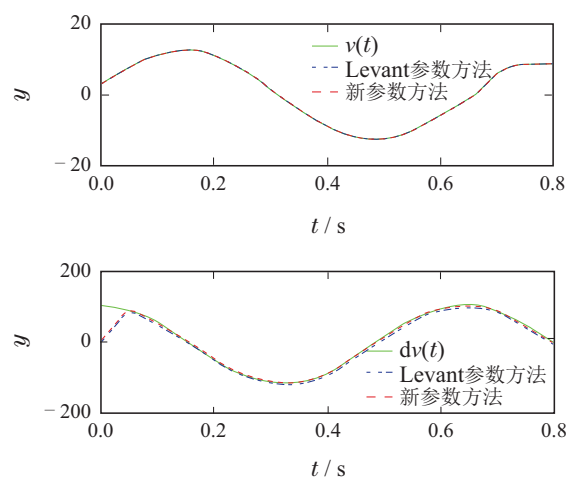


图5 新参数整定方法和Levant方法关于信号在噪声SNR=80 dB时滤波和微分估计仿真对比

Fig. 5 Comparisons of performances of filtering and differentiation acquisition between the new parameter tuning method and Levant's method when SNR=80 dB

表 2 新参数整定方法和Levant方法的平均绝对误差

Table 2 The average of absolute error for the two methods

平均绝对误差		参数选择方式	
		新参数整定方法/%	Levant参数方法/%
噪声	跟踪滤波	0.074	0.23
	微分估计	62.41	243.91
SNR = 60	跟踪滤波	0.0301	0.22
	微分估计	44.70	276.63
SNR = 80	跟踪滤波	0.0301	0.22
	微分估计	44.70	276.63

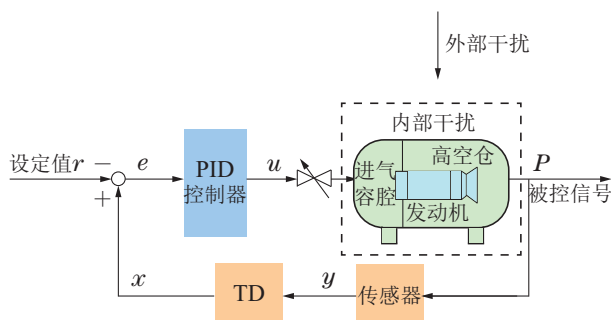


图 6 飞行环境模拟控制系统环境信号控制结构框图

Fig. 6 Block diagram of the flight environment simulation control system

由图6可知,飞行环境模拟控制系统的控制器采用的是传统PID (proportional-integral-derivative) 控制,整个控制过程中引入微分器TD (tracking differentiator)对环境信号进行跟踪滤波和微分提取.有效的微分环节可以抑制超调,改善动态性能,抑制外部扰动.目前,常用的微分器结构如下所示(记作LTD (linear TD)):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{\tau_1 \tau_2}(x_1 - v) - \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2}x_2, \end{cases} \quad (19)$$

其中: v 是给定的输入信号; x_1 和 x_2 是状态变量,分别用来近似信号 v 和 $\dot{v}$; $\tau_1 > 0$ 和 $\tau_2 > 0$ 是LTD微分器两个可调参数.

信号的微分包含系统动态信息,合理利用微分环节是提高飞行环境模拟系统控制的重要前提.然而,随着航空发动机性能要求的不断提高,环境信号变得越来越复杂即低频且掺杂随机噪声,原本使用的LTD算法已经很难有效地提取到环境信号的滤波和微分信号.为了改善飞行环境模拟系统的控制精度和品质,将本文所设计的改进的Levant微分器算法NP-Levant(14)应用到飞行环境模拟控制系统的环境信号处理中.

某高空台环境模拟测试中传感器储存数据的频谱分析结果表明,环境信号掺杂高斯白噪声,频率大约为0.5 Hz,幅值大约为3.为了验证NP-Levant算法对

环境信号的滤波和微分提取效果,在下述实验中将其与LTD算法进行对比研究.在实验过程中,通过试错法获得LTD的两个参数,即 $\tau_1 = 0.01$ 和 $\tau_2 = 0.02$. 另外,根据式(15)得到NP-Levant的两个参数分别为

$$\lambda_n = 3\sqrt{3}\pi, \alpha_n = 6\pi^2.$$

实验对比结果如图7所示,由式(17)–(18)计算出的稳态平均绝对误差见表3.

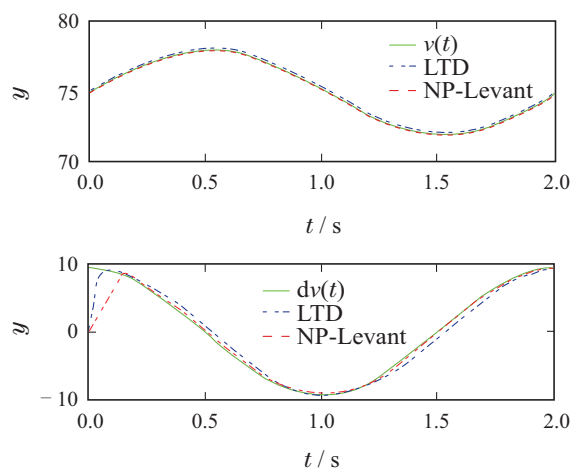


图 7 LTD和NP-Levant处理环境信号的跟踪滤波和微分估计效果对比

Fig. 7 Comparisons of filtering and differentiation acquisition between LTD and NP-Levant in environmental signal processing

表 3 LTD和NP-Levant处理环境信号的滤波与微分估计的平均绝对误差

Table 3 The average of absolute error for the two differentiators

平均绝对误差	微分器类型	
	NP-Levant/%	LTD/%
跟踪滤波	0.007	12.0
微分估计	4.7	37.0

环境信号的跟踪滤波的纵坐标在72–78之间变化,原因是环境信号存在常数值信号75.从实验对比图7中可知,LTD存在很严重的相位滞后现象,而NP-Levant却具有很好的滤波效果,基本能够实时跟踪原始信号并获得较高品质的微分信号.滤波和微分信号获取的稳态平均绝对误差不超过5%(见表3),相位滞后不超过2 ms,满足了飞行环境模拟控制系统对环境信号实时性的实际工程需求.表3中进一步表明,与LTD相比NP-Levant的跟踪滤波和微分获取的精度提升了1–2个数量级.因此,在飞行环境模拟控制系统中,NP-Levant算法可以代替LTD算法来实时获取环境信号较为精确的跟踪滤波和微分估计.这进一步说明利用本文所设计的参数整定式(15)可以有效地避免微分器参

数调节的繁杂过程,为Levant微分器的工程应用提供了新思路与新方法。

6 结论

本文针对Levant微分器参数整定难的问题,提出了一种基于基础信号时间线性变换与坐标变换的微分器参数整定算法(记作NP-Levant),该算法给出了输入信号变化前后微分器参数之间的确定性关系,即微分器参数会随着信号的频率和幅值的变化量进行相应变化。通过时域和频域的分析发现NP-Levant微分器的频域特性曲线类似于理想微分器,且NP-Levant微分器可对给定的信号进行有效的滤波和微分估计。相比于Levant给出的粗糙的参数整定范围,所提出的参数调整算法、滤波和微分提取相位滞后较小,精度上提升了1~2个数量级。在飞行环境模拟控制系统环境信号的处理实验中进一步表明NP-Levant算法具有较高的工程实用价值和应用前景。本文所提的Levant微分器参数整定方法物理意义明确,但是在使用时需要事先知道目标信号的频率和幅值,这给它的实际应用带来了一定的局限性。在后续的研究工作中,笔者将设计相应的信号频率和幅值估计算法提高算法的实时性,同时对NP-Levant算法进行严格的稳定性、鲁棒性和收敛性分析,增强其实用性和理论完整性。

参考文献:

- [1] FEEMSTER M, AQUINO P, DAWSON D M, et al. Sensorless rotor velocity tracking control for induction motors. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001, 9(4): 645 – 653.
- [2] ABDESSAMEUD A, TAYEBI A. Global trajectory tracking control of VTOL-UAVs without linear velocity measurements. *Automatica*, 2010, 46(6): 1053 – 1059.
- [3] ZOU A M, FAN Z. Fixed-time attitude tracking control for rigid spacecraft without angular velocity measurements. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(8): 6795 – 6805.
- [4] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(1): 35 – 45.
- [5] ZHUANG H X, SUN Q L, CHEN Z Q, et al. Back-stepping sliding mode control for pressure regulation of oxygen mask based on an extended state observer. *Automatica*, 2020, 119: 109106.
- [6] HAN Jingqing. *Active Disturbance Rejection Control Technique: The Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties*. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
(韩京清. 自抗扰控制技术: 估计补偿不确定因素的控制技术. 北京: 国防工业出版社, 2008.)
- [7] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900 – 906.
- [8] XIE Yunde, LI Yungang, LONG Zhiqiang, et al. Discrete second-order nonlinear tracking-differentiator based on boundary characteristic curves and variable characteristic points and its application to velocity and position detection system. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(5): 952 – 964.
(谢云德, 李云钢, 龙志强, 等. 一种基于边界特征线且特征点可变的二阶非线性离散跟踪微分器及在测速定位系统中的应用. 自动化学报, 2014, 40(5): 952 – 964.)
- [9] WANG Xinhua, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. Nonlinear tracking-differentiator with high speed in whole course. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(6): 875 – 878.
(王新华, 陈增强, 袁著社. 全程快速非线性跟踪微分器. 控制理论与应用, 2003, 20(6): 875 – 878.)
- [10] WANG X H, CHEN Z Q, YANG G. Finite-time-convergent differentiator based on singularperturbation technique. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(9): 1731 – 1737.
- [11] ZHANG H H, XIE Y D, SHE L H, et al. High-precision tracking differentiator via generalized discrete-time optimal control. *ISA Transactions*, 2019, 95: 144 – 151.
- [12] LEVANT A, LIVNE M. Robust exact filtering differentiators. *European Journal of Control*, 2019, DOI:10.1016/j.ejcon.2019.08.006.
- [13] KOCH S, REICHHARTINGER M, HORN M, et al. Discrete-time implementation of homogeneous differentiators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 65(2): 757 – 762.
- [14] LEVANT A. Robust exact differentiation via sliding mode technique. *Automatica*, 1998, 34(3): 379 – 384.
- [15] SANCHEZ T, MORENO J A. A constructive Lyapunov function design method for a class of homogeneous systems. *The 53rd IEEE Conference on Decision and Control*. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2014: 5500 – 5505.
- [16] YOU M, ZONG Q, TIAN B L, et al. Comprehensive design of uniform robust exact disturbance observer and fixed-time controller for reusable launch vehicles. *IET Control Theory & Applications*, 2017, 12(5): 638 – 648.
- [17] CHALANGA A, KAMAL S, FRIDMAN L M, et al. Implementation of super-twisting control: Super-twisting and higher order sliding-mode observer-based approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(6): 3677 – 3685.
- [18] LI J H, ZHANG Q L. A linear switching function approach to sliding mode control and observation of descriptor systems. *Automatica*, 2018, 95: 112 – 121.
- [19] WANG J, ZHANG H H, XIAO G X, et al. A comparison study of tracking differentiator and robust exact differentiator. *Chinese Automation Congress (CAC)*. Shanghai, China: IEEE, 2020: 1359 – 1364.
- [20] ORLOV Y, Aoustin Y, CHEVALLEREAU C. Finite time stabilization of a perturbed double integrator—Part I: Continuous sliding mode-based output feedback synthesis. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, 56(3): 614 – 618.
- [21] CRUZ-ZAVALA E, MORENO J A. Levant's arbitrary-order exact differentiator: A Lyapunov approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, 64(7): 3034 – 3039.
- [22] WEISSER M, BOLK S, STAUDACHER S. *Hardware-In-The-Loop-Simulation of a Feedforward Multivariable Controller for the Altitude Test Facility at the University of Stuttgart*. Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV, 2013.
- [23] ZHOU J, SHEN L, ZHANG T H. Modeling and HIL simulation of flight conditions simulating control system for the altitude test facility. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 2016, 33(4): 319 – 328.

作者简介:

张和洪 教授, 目前研究方向为微分器算法设计及其在高空模拟试车台中的应用, E-mail: HZHANG030@e.ntu.edu.sg;

谢晏清 本科, 目前研究方向为微分器算法设计与应用, E-mail: xyqfenix678@163.com;

王娟 硕士研究生, 目前研究方向为微分器算法设计及信息信号处理与应用, E-mail: WANGJ9709@163.com;

但志宏 研究员, 目前研究方向为高空模拟试车台系统分析与控制, E-mail: zhihong.dan20@gmail.com;

郭文忠 教授, 目前研究方向为智能信息信号处理与应用, E-mail: guowenzhong@fzu.edu.cn.