

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.12.014

基于卡尔曼控制的滑模振动力输出跟随系统

罗东云, 杨保海*, 蔡苗苗, 张 波

(九江学院 电子工程学院, 江西 九江 332005)

摘要:针对振动力输出跟随系统无误差跟随和消除控制系统中经常伴有随机噪声和过程噪声的问题,提出了一种基于卡尔曼滤波器的滑模控制器。设计了滑模面以保证振动力输出的无静差跟踪;采用了指数趋近律提高趋近速度并削弱抖振。针对具有噪声干扰的场合,在控制系统中加入了卡尔曼滤波器消除了传感器测量带来的随机噪声和过程噪声。在 Matlab/Simulink 平台上,进行了振动正弦出力跟随控制仿真研究,并且比较了有卡尔曼滤波器和无卡尔曼滤波器的跟踪效果。研究表明:基于卡尔曼控制的滑模振动力输出跟随系统具有较强的抗噪性、鲁棒性以及良好的稳态性能。

关键词:滑模控制;卡尔曼滤波;振动跟随控制

中图分类号:TH113.1;TP391.9

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)12-1437-04

Vibration power output tracking control based on Kalman filter of the sliding mode

LUO Dong-yun, YANG Bao-hai, CAI Miao-miao, ZHANG Bo

(College of Electronic Engineering, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of random noise and process noise in the follow-up and elimination control system of vibration-dependent output system the sliding mode controller based on Kalman filter was researched. The sliding surface was designed to ensure the static tracking of the output of the vibration force. The exponential approximation law was used to improve the approach speed and weaken the buffeting. For the case of noise interference, the Kalman filter was added to the control system to eliminate the random noise and process noise caused by the sensor measurement. On the Matlab / Simulink platform, the vibration sine output force following simulation was researched. The results indicate that the sliding mode vibration follower system based on Kalman control has Strong anti-noise, robustness and good steady-state performance compared with Kalman filter and no Kalman filter tracking effect.

Key words: sliding mode control; kalman filter; vibration tracking control

0 引 言

振动平台已经广泛应用在机械制造、军工制造、航天航空、高速铁路等工程领域。模拟振动台可以模拟设备在强烈振动环境下的反应情况,可控振源发出振动信号,其原理为采用合适的控制算法,使实际振动输出力信号以最小误差地复现期望信号,可以实现要求形式的振动。振动输出力跟随控制问题

的算法有很多,如:模糊控制、鲁棒控制和神经网络控制等等^[1]。

鲁棒控制考虑了对象输出误差和该误差的变化,所以稳态的误差本质上无法减少;模糊控制需要设计大量的隶属函数和规则;神经网络控制训练样本大、实时性不好。滑模变结构控制相对于上述的不利方面,滑模控制利用系统的不固定的结构,误差情况发生变化控制器也发生有目的性的变化,系统按照预定的滑

收稿日期:2017-03-11

作者简介:罗东云(1979-),男,江西宜春人,博士研究生,副教授,主要从事主动振动控制方面的研究工作。E-mail:ldongyun200@126.com

通信联系人:杨保海,男,硕士,副教授。E-mail:YangfangXia@126.com

动模态的状态轨迹运动,这使得系统具有对参数变化及扰动不灵敏、无须系统在线辨识,快速响应、物理实现简单等优点^[2]。但是颤振问题是滑模控制在实际系统中需要解决的^[3]。

本研究的系统采用卡尔曼滤波器消除滑模控制器输出信号的噪声和抖动的干扰,并保证系统的稳定性。

1 控制系统整体设计

振动力输出跟随控制系统结构如图 1 所示。

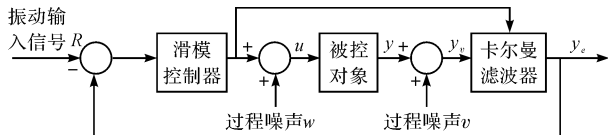


图 1 控制系统结构

被控对象为柔性结构, R 为振动输入正弦波力信号,滑模控制器的状态变量为 $x(k)$,滑模控制器的输出控制量和过程噪声 w 混合信号为 u ,被控对象的输出为 y ,被控对象的输出 y 与测量噪声 v 混合信号为 y_e ,卡尔曼滤波器的输出为 y_c ,可以有效消除传感器带来的测量噪声。被控系统的方程为:

$$x(k) = Ax(k-1) + B(u(k) + w(k)) \quad (1)$$

$$y_v(k) = Cx(k) + v(k) \quad (2)$$

设振动输出力为 $f_d(k)$,其变化率为 $d_{f_d(k)}$,采用线性外推的方法预测 $f_d(k)$ 及 $d_{f_d(k)}$,即:

$$f_d(k) = 2f_d(k-1) - f_d(k-2) \quad (3)$$

$$d_{f_d(k)} = 2d_{f_d(k-1)} - d_{f_d(k-2)} \quad (4)$$

2 滑模控制器设计

滑模控制对系统建模和外加干扰等具有很强的自适应性和鲁棒性,具有容易实现、响应速度快、动态特性好、降阶、解耦等优点。滑模控制重点考虑的问题是设计适当的切换函数和控制律,使系统的按照预定的轨迹在有限的时间内到达设计好的切换面,实现模态滑模运动和保证滑模控制器渐进稳定具有很好的品质,滑模控制的可达性、存在性及运动的稳定性是 3 个基本要素^[4-5]。

趋近律方法作为滑模控制的一种经典控制策略,这种控制策略不但可以对系统在沿切换面或切换面附近的滑模运动段进行分析,可以有效地设计和分析系统趋近段的动态过程,这样可以保证在整个状态方程系统有良好的运动品质。

连续的滑模控制指数趋近律为:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}s - ks \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (5)$$

其中,当 $s \neq 0$ 时, $|\dot{s}| = \varepsilon + k|s|$ 。由上式可见, k 越大,趋近速度越快,同时 $|s|$ 越大, $|\dot{s}|$ 越大,表示离切换面 $s = 0$ 越远的点,趋近速度越快,当 $s \rightarrow 0$ 时, $|\dot{s}| \rightarrow \varepsilon$,即系统状态趋近到切换面 $s = 0$ 时的速度等于 ε 。

所以在设计趋近律时,增大 k ,同时减少 ε ,即可加快趋近过程,提高响应速度,又可以减少系统状态到达切换面时的抖振。 $\dot{s} = -ks$ 是指数趋近项,其解为 $s = s(0)e^{-kt}$ 。

定义李雅普诺夫函数为 $V = \frac{1}{2}s^2$,采用指数趋近律,则可得到:

$$\dot{V} \leq -\varepsilon|s| - ks^2 = -\frac{k}{2}V - \varepsilon|s| \leq -\frac{k}{2}V \quad (6)$$

解为:

$$V(t) \leq e^{-\frac{k}{2}(t-t_0)} V(t_0) \quad (7)$$

从上式可知, $V(t)$ 指数收敛至零,收敛的速度取决于参数 k ,指数趋近律可有效缩短趋近运动的时间,也可使运动点到达切换面时的速度很小,从而保证系统正常运动阶段的动态品质。

当 s 比较大时,指数项 $-ks$ 也比较大,保证系统状态能用较快的速度趋近于滑动模态。将式(5)离散化,得指数趋近律:

$$\frac{s(k+1) - s(k)}{T} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s(k)) - ks(k) \quad (8)$$

$$s(k+1) - s(k) = -kTs(k) - \varepsilon T \operatorname{sgn}(s(k)) \quad (9)$$

所以,离散趋近律可以满足达到条件,从而保证趋近律模态具有良好的品质。

采取基于指数趋近律的滑模控制,即:

$$u(k) = (C_e B)^{-1} (C_e Y_d - C_e Ax(k) - s(k) - ds(k)) \quad (10)$$

其中:切换函数为 $s(k) = C_e(Y_d - x)$, $C_e = [c \ 1]$, $c > 0$ 。

3 卡尔曼滤波器设计

卡尔曼滤波不要求信号和噪声都是平稳过程的假设条件。对于每个时刻的系统扰动和观测误差(即噪声),只要对它们的统计性质作某些适当的假定,通过对含有噪声的观测信号进行处理,就能在平均的意义上,求得误差为最小的真实信号的估计值。

控制系统中经常伴有随机噪声和过程噪声,设计卡尔曼滤波器对随机噪声和过程噪声进行滤波,滤波就是在对可观测信号的测量基础上,根据一定的滤波

设计准则,采用某种最优统计量方法,对系统的状态方程进行理论和方法估计。位置、加速度等的测量值往往在任何时候都有噪声。卡尔曼滤波利用动态信息,设法去除噪声的影响,得到一个关于目标位置的好的估计。卡尔曼滤波属于时域状态空间。

由于卡尔曼滤波算法输出白噪声干扰下的被的随机线性系统,算法的输入输出满足时间域输出方程和状态方程,该卡尔曼滤波器适用于平稳随机过程滤波和非平稳或平稳马尔科夫序列,也适用于高斯马尔科夫序列的情况下滤波^[6]。卡尔曼滤波器采用的是状态空间时间域描述系统,系统的过程噪声和量测噪声是需要去掉的对象,由于被估计量和观测量的一、二阶矩是不用知道的,而所需要的信息噪声的统计特性包含噪声的统计特性估计。

卡尔曼滤波方法的基本方程是在时域内递推,是一个“预测-修正”过程,新的数据产生时,不需要存储大量的数据可以求解,新的滤波值可以立即算出,因此卡尔曼滤波方法适合计算机实时处理和实现。滤波器的增益矩阵与观测方程没有关系,通过可以事先离线计算来减少在线实时计算量^[7-8]。只需要维数通常很小的矩阵的逆就可以求解滤波器增益矩阵,观测方程的维数决定矩阵的逆,这样求取维数比较小逆矩阵是比较方便的,随时滤波器的精度指标可以在求解滤波器增益过程中进行,滤波误差向量各分量的方差就是其对角线上的元素。

递推卡尔曼滤波器如下:

(1) 状态一步预测:

$$\hat{X}(K+1|K) = A \hat{X}(K|K) \quad (12)$$

(2) 状态更新:

$$\hat{X}(K+1|K+1) = \hat{X}(K+1|K) + K(k+1)\varepsilon(k+1) \quad (13)$$

$$\varepsilon(k+1) = Y(k+1) - C \hat{X}(k+1|k) \quad (14)$$

(3) 滤波增益矩阵:

$$K(k+1) = P(k+1|k)C^T[CP(k+1|k)C^T + R]^{-1} \quad (15)$$

(4) 一步预测协方差阵:

$$P(k+1|k+1) = [I_n - K(k+1)C]P(k+1|k) \quad (16)$$

(5) 协方差阵更新:

$$P(k+1|k+1) = [I_n - K(k+1)C]P(k+1|k) \quad (17)$$

$$\hat{X}(0|0) = \mu_0 \quad P(0|0) = P_0$$

上式说明了根据 $K-1$ 时刻的状态估计预测时刻状态的方法,计算中使用了与系统动态特性方程有关

的信息,如噪声输入矩阵、过程噪声方差阵和状态一步转移矩阵。

从时间的推导过程来分析,该两式将时间从 $K-1$ 时刻推进至 K 时刻描述滤波的时间更新过程,计算修正时间更新值由其他各式完成,修正量的好坏由观测信息好坏(R)、观测与状态的关系(C)、协方差($P(k|k-1)$)以及具体观测信息 $Y(k)$ 所决定。

4 仿真结果

对象的传递函数为:

$$G(s) = \frac{120}{s(s+20)}$$

取采样的时间为,被控对象可转换为离散形式:

$$\begin{aligned} X(K) &= AX(K-1) + B(U(k) + w(k)) \\ y_v(K) &= CX(K) + v(k) \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $A = \begin{bmatrix} 1 & 0.01 \\ 0 & 0.865 \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} 0.01 \\ 0.1314 \end{bmatrix}$; $C = [1 \ 0]$; $D = [0]$; $w(k) \sim [-1.0, 1.0]$ 白噪声; $v(k) \sim$ 白噪声信号,卡尔曼滤波算法中取 $Q = \begin{bmatrix} 20 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix}$, $R = 5$ 。

振动输出力为 $f_d(k) = \sin t$,取控制器参数为 $c = 27$, $\varepsilon = 140$, $q = 280$ 。输入的信号为周期为 7 s,振幅为 1 的正弦波的信号。

加滤波器的振动力跟随如图 2 所示。

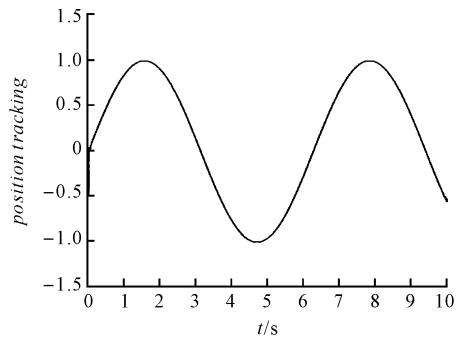


图 2 加滤波器的振动力跟随

未加滤波器的振动力跟随如图 3 所示。

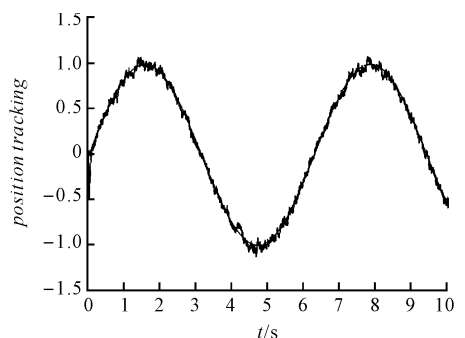


图 3 未加滤波器的振动力跟随

从图 2、图 3 可以看出:采用离散趋近律卡滑模尔曼滤波器可以满足达到条件,从而保证趋近律模态具有良好的品质。

滤波前后信号对比如图 4 所示。

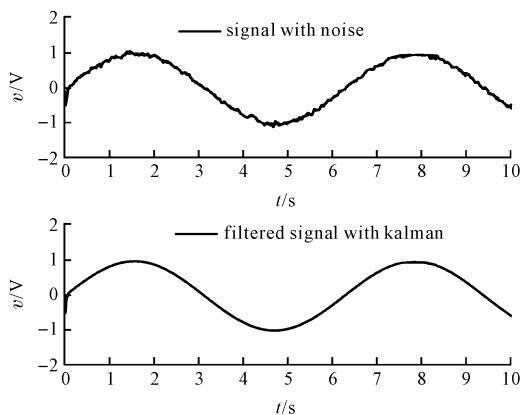


图 4 滤波前后信号对比

本研究设计卡尔曼滤波器对随机噪声和过程噪声进行滤波,滤波就是在对可观测信号的测量基础上,根据一定的滤波设计准则,采用某种最优统计量方法,对系统的状态方程进行理论和方法估计卡尔曼滤波器后,跟随精度大大提高。从图 4 可以看出:经过卡尔曼滤波器后信号的噪声大为减少。

5 结束语

本研究通过滑模控制趋近律方法,实现了滑模控制振动力系统在沿切换面或切换面附近的滑模运动段进行分析,可以有效地设计和分析系统趋近段的动态过程,保证在整个状态方程系统有良好的运动品质;设计卡尔曼滤波器对控制振动力系统中随机噪声和过程噪声进行滤波,通过 Matlab 仿真证明,采用卡尔曼滑

模控制算法开发的系统能够实现振动力输出跟随,并且降低系统噪声。

研究过程中发现本系统还有不足之处,即系统跟随误差还有改善空间,系统随机噪声和过程噪声还比较大。在今后的研究中,将重点研究通过改进算法以达到更好的效果和使用价值。

参考文献 (References):

- [1] 邓永停,李洪文,王建立,等. 基于卡尔曼滤波器的交流伺服系统自适应滑模控制[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8):2088-2095.
- [2] 王礼鹏,张化光,刘秀翀,等. 基于扩张观测器的 SPMSM 调速系统的滑模变结构反步控制[J]. 控制与决策, 2011, 26(4):553-557.
- [3] 姚娟. 滑模变结构中抖振消除方法研究[J]. 机电工程技术, 2016, 45(9):90-91, 150.
- [4] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真基本理论与设计方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2015.
- [5] Corigliano identification in explicit structural dynamics: performance of the extended Kalman filter[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2004, 193(36):3807-3835.
- [6] 魏强,张承进,张栋,等. 压电陶瓷驱动器的滑模神经网络控制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5):1055-1063.
- [7] 赵博宇,丁勇,吴斌. 基于扩展卡尔曼估计算法的地震模拟振动台模型识别[J]. 振动与冲击, 2014, 33(12):145-150.
- [8] 赵灿峰. 直升机结构响应主动控制频域法研究[D]. 南京:南京航空航天大学航空宇航学院, 2010.
- [9] 黄小平,王岩. 卡尔曼滤波原理及应用-MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2015.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

罗东云,杨保海,蔡苗苗,等. 基于卡尔曼控制的滑模振动力输出跟随系统[J]. 机电工程, 2017, 34(12):1437-1440.

LUO Dong-yun, YANG Bao-hai, CAI Miao-miao, et al. Vibration power output tracking control based on Kalman filter of the sliding mode[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(12):1437-1440.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>