

一种民用飞机驾驶杆高频抖动的抑制方法

张克志 张 策

(上海飞机设计研究院综合航电系统设计研究部,上海 200436)

Pylon Break-away Design of Civil Aircraft

Zhang Kezhi Zhang Ce

(Avionic Systems Department, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 200436)

摘要:针对民用飞机自动飞行过程中驾驶杆/盘存在较高频率抖动现象,提出一种基于小波理论和有限脉冲响应(FIR)滤波器的信号综合处理方法,以抑制驾驶杆/盘的高频抖动。首先分析了驾驶杆高频抖动形成机制及其影响,然后采用 Matlab 小波分析工具箱对自动飞行系统内环控制律的输入信号进行分析,通过多级分解确定信号中不同的频率成分;最后设计出一种 FIR 滤波器,滤除自动飞行系统输入信号中的无用成分,从而减少输出指令中的无效控制信号,以减轻驾驶杆/盘的高频抖动。

关键词:自动飞行;驾驶杆;小波分析;FIR 滤波器

[Abstract] For pilot column high-frequency dithering in civil aircraft autopilot system, a signal processing method based on wavelet analysis and finite impulse response (FIR) is proposed to reduce pilot column high-frequency dithering. Firstly the principle and effect of column high-frequency dithering is discussed, and wavelet theory-based toolbox is used to decompose input signals of control law in autopilot system, by which the frequency in signal can be determined. Finally FIR filter is designed to eliminate the unuseful frequency part, and then reduce the output control signal of autopilot system, thus alleviating the column high-frequency dithering.

[Keywords] Autopilot; Column; Wavelet analysis; FIR filter

1 驾驶杆高频抖动机制分析及其影响

自动飞行系统是民用飞机所需的基本机载设备,采用该系统能够提高飞机操纵效率,减轻飞行员的负担。图 1 给出了自动飞行系统俯仰通道的控制原理^[1-2]。从图 1 可以看出,当大气扰动使飞机产生颠簸时,飞机俯仰角将产生变化,机载传感器(如航向姿态参考系统、惯性参考单元)能够感觉到飞机俯仰姿态角或角速率的变化,并通过数据总线将姿态信号传到俯仰控制器,经过控制律计算后将控制信号传输给伺服电机。一方面伺服电机齿轮的转动角度可由旋转可变差分变压器(RVDT)测得,通过飞控计算机进行信号整合后传到电源伺服系统,从而驱动舵面产生相应运动,这样飞机俯仰角就可在气动力作用下朝着期望方向变化;另一方面俯仰伺服电机输出的控制信号同时驱动驾驶杆前后运动,飞行员通过观察驾驶杆运动状态可以了解自动飞行系统的工作情况。然而,由于受到飞机振动运动和机载传感器自身误差的影响,飞机姿态角速率、姿态角通常包含频率较高的误差信号。若不能消除这部分信号,经过控制律解算后控制信号将包含频率较高的扰动信号,这些扰动信号通过伺服电机后不会完全衰减,从而导致驾驶杆产生小幅高频抖动,影响了飞行员的驾驶感受,如有飞行员反映这种抖

杆现象可能分散注意力(经常误以为是失速告警时的抖杆现象)。另外,这部分高频扰动信号还会对飞机俯仰运动产生不利影响,导致飞机在俯仰方向产生颠簸。若颠簸频率与飞机某些部位的自然频率接近,可能诱发飞机颤振,对飞机安全产生重大影响。由此可以看出,飞机俯仰控制通道中高频扰动信号不但影响了飞行员的驾驶感受,而且降低了飞机的安全性。因此,需要在自动飞行系统俯仰控制通道中增加滤波器,消除该部分信号。

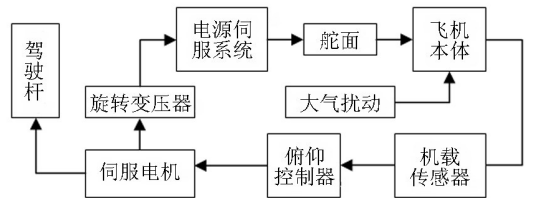


图 1 飞机俯仰通道自动控制原理图

2 基于小波理论的信号分析方法

为了设计出合适的滤波器,需要分析扰动信号的频率特性。目前傅里叶频率分析法和小波分析法^[3-5]都可用于信号频域分析。其中,傅里叶分析法的主要特点是将信号从时间域转换到频率域,即利用傅里叶变换将信号分解为若干个不同频率的正弦信号。然而该方法存在一个缺点,那就是信号转换过程中时间信息容易丢失,因此不能确定原信号

中特定频率发生的位置。尽管改进的傅里叶分析法增加了时间-频率窗,但所有窗的尺寸都相同,从而导致信号分解过程中低频信息分解过细,而高频信息分解能力不足,缺少灵活性。虽然小波分析法也是基于傅里叶变换的思想,但其有所不同。它利用了可变尺度时间窗的概念对信号进行分解,并采用小波函数进行计算获得不同尺度下的分解信号。图2表示采用小波分析法的树形结构分解图。图中S表示原始信号, a_i 、 d_i ($i=1,2,3,4$)分别表示不同尺度下原始信号的近似部分和细节部分。原始信号等于第一级近似部分与所有细节部分的合成。从中可以看出,小波分析法的优势在于不丢失时间信息的前提下,通过设置大尺度窗能够获得信号中的低频信息,小尺度窗能获得高频信息。

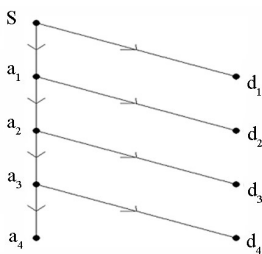


图2 小波四级分解树形图

在自动飞行系统控制律设计过程中,通常采用飞机姿态角和姿态角速率作为输入量。然而在飞机不同构型、飞行状态下,大气扰动对飞机产生的气动力比较复杂,使得飞机姿态信号(包括扰动信息)中的频率成分较为复杂,特别是不同频率扰动信号出现的时间与大气扰动、飞机构型、飞行状态均有关,给信号处理带来一定难度。考虑到小波分析法的优势,采用该方法对飞行姿态信号进行处理。采用小波分析法的关键就是选择合适的小波函数,目前尚未从理论上找到一种最优的小波函数,实际过程中通常采取试探方法寻找一种合适的小波函数。在本工作中通过分析比对选择了 Meyer 小波函数及其尺度函数。为了分析方便,选择了 Mathworks 公司开发的小波工具箱(Wavelet Toolbox)进行信号处理。图3是某型飞机在飞行试验过程中俯仰角速率的部分数据。图4表示采用小波分析法得到的各级分解信号。从中可以看出,随着分解级数升高,分解信号的频率越来越高,即通过小波分析法能够找出原始信号中的多种频率信息。其中图4(a)表示原始信号的近似部分,其频率较低,约为0.4Hz,而自动飞行系统的俯仰控制器和伺服电机的设计带宽通常较高(大于1Hz),该近似部分通过自动飞行系统进行

控制律计算后,能够输出同频未衰减的控制信号。另外,近似部分的频率位于飞机本体俯仰轴的带宽内,飞机能够在控制信号作用下产生同频率且未被衰减的姿态响应,即飞机姿态能够得到较好的修正。图4(b)~图4(d)是原始信号的细节信号,其中图4(b)的频率约为1.2Hz,但平均幅度相比于图4(a)明显减少,这是由于该细节部分的频率已经接近飞机本体带宽上限(民用飞机俯仰通道的带宽一般低于1Hz),通过自动飞行系统后在飞机俯仰轴被衰减,即这类信号对飞机姿态不会产生明显的修正。同样,图4(c)、图4(d)也存在类似情况,只不过这类高频的细节部分通过飞机俯仰轴后衰减的更多。然而,从图4(b)~图4(d)的幅值看,这些未被衰减的细节部分仍不可忽视,其不但会对飞机姿态控制产生影响,而且会导致驾驶杆存在高频抖动现象,影响飞行员驾驶飞机的感受。因此,需要设计滤波器对原始俯仰角速率信号进行滤波处理。

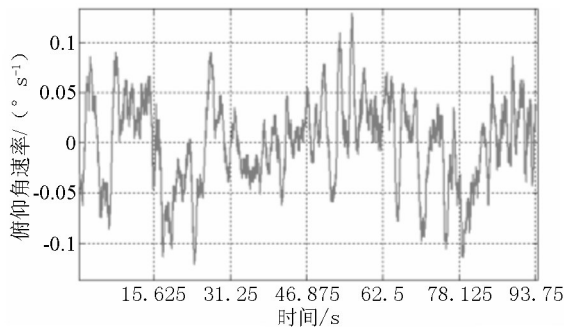


图3 飞机俯仰角速率

3 基于 FIR 滤波器设计

滤波器设计的关键技术在于寻找合适的截止频率,使其既能满足闭环控制系统的带宽要求,又能对扰动信号进行充分滤波。通常系统带宽由系统所需输入信号的频率决定,对于民用飞机自动飞行俯仰控制回路,其系统带宽一般低于1Hz。因此增加滤波环节后不应系统带宽产生很大影响。另外,从小波分析结果看,俯仰角速率中无用信息(这里被看做扰动信号)的频率大约在1.2Hz以上。兼顾系统带宽和扰动频率特性,设定滤波器的截止频率为2Hz。为了提高设计效率,采用了 Mathworks 公司提供的滤波器设计工具箱(Filter Toolbox)进行滤波器设计。在该工具箱中可以选择不同滤波器方法(如 FIR、IIR)、滤波器类型(高通、低通、带通、带阻)、滤波器阶数,而且该工具箱还支持图形化设计方法进行通频带、截止频带的设置。本工作中选取 FIR 方法进行滤波器设置^[6]。低通频率为1.8Hz,截止频

率为 2Hz。图 5 表示采用 FIR 滤波器对某型民用飞机俯仰角速率的处理结果。图 5(a) 表示滤波结果;图 5(b) 为滤波结果与原始信号之间的误差。从中可以看出,在较好地保留低频信息的情况下,该滤波

器能够将原始信号中的高频信息基本消除,减少飞机俯仰控制通道中高频扰动信号的影响,这样伺服电机的输出信号中几乎没有高频信息,从而减缓驾驶杆前后抖动情况,改善飞行员的驾驶感受。

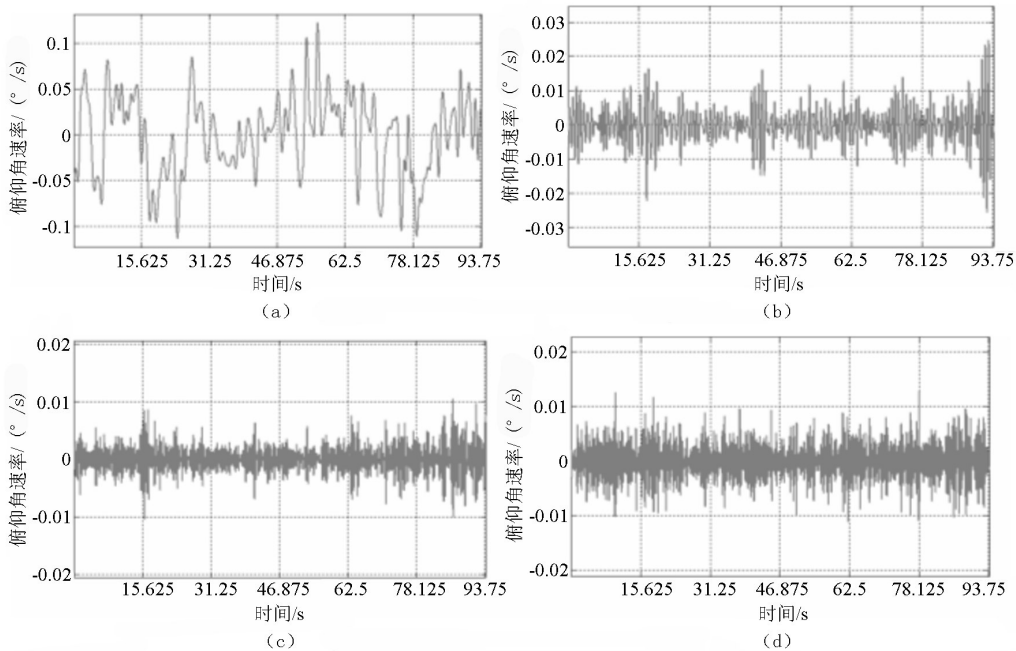
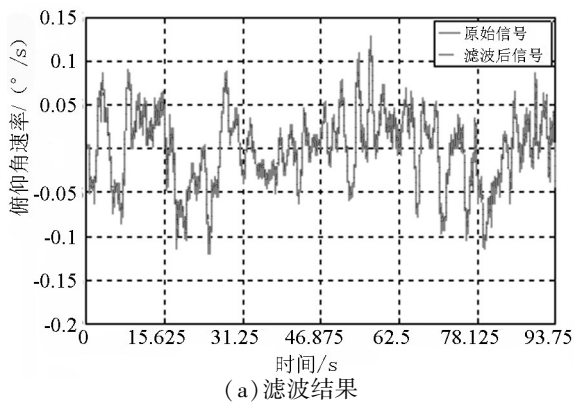
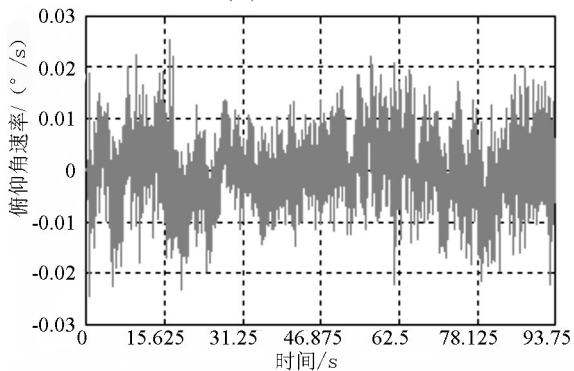


图 4 原始仰角速率信号的 3 级小波分解



(a) 滤波结果



(b) 滤波结果与原始信号之间的误差

图 5 FIR 滤波结果

4 结论

本工作以自动飞行系统俯仰通道为例,讨论了

飞机驾驶杆抖动情况及其影响。实际上飞机横滚通道与俯仰通道的工作原理相同,在扰动发生时也存在此驾驶杆左右抖动情况。因此,文中提到的杆抖动抑制方法对于横滚通道也同样适用。

参考文献:

- [1] 申安玉, 申学仁, 李云保等. 自动飞行控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [2] 吴文海编著. 飞行综合控制系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 2007.
- [3] 冯兴杰, 李胜, 邹秀霞. 基于小波尺度系数的民航 QAR 数据约简及其性能分析[J]. 计算机工程与设计, 2009, 0(5).
- [4] Tetsuhiko Ueda. Flutter Prediction Using Wavelet Transform, 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Con, 2007.
- [5] Kim S, Kim Y, Park C. Failure diagnosis of skew-configured aircraft inertial sensors using wavelet decomposition, IET Control Theory&Applications, 2007, 1(5).
- [6] Kashihara Kenji, Fujii Kensaku, Muneyasu Mitsuji. Active noise control system using cascade connection of finite and infinite impulse response filters as noise control filter, 9th International Symposium on Communications and Information Technology, 2009.