

# 一种减少失速保护虚警率的混合滤波方法

## A Mixed Method for Reducing Stall Warning Nuisance

张克志 张 策 / Zhang Kezhi Zhang Ce

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘 要:

针对飞机失速保护设计过程中易出现虚警的情况,提出一种基于 FIR 和传统滤波器相结合的混合滤波方法。结合飞机本体的运动特征,对参与失速保护逻辑运算的两个重要参数,即侧向加速度和迎角信号进行频率分析,基于信号的特征设计混合滤波器,然后采用 Simulink 滤波工具箱设计滤波器对信号进行滤波处理。仿真结果表明该方法能够减少虚警率的发生,特别是大背景噪声下的虚警率能够得到较好抑制,验证了滤波器设计正确性,从而提高失速保护功能对适航条款符合性。该滤波器设计方法,不但可以有效解决本文提到的问题,对于其他涉及信号处理的系统设计同样具有借鉴意义。

**关键词:** FIR(有限脉冲响应)滤波器;低通滤波;失速告警;失速保护系统

**中图分类号:** V241.4

**文献标识码:** A

[ **Abstract** ] A mixed method based on FIR and traditional low-pass filter is proposed to fix the warning nuisance in aircraft stall protection device. Combined with longitudinal and lateral aircraft maneuvering characteristic, the signal frequency of attack of angle and lateral acceleration of two important parameters used in stall warning logic is analyzed for the mixed filter design, and then Simulink Filter toolbox is used for the filter design. Simulation results show that the stall warning nuisance can be greatly reduced, especially for the strong background noise, and demonstrated the compliance for the stall warning regulation. The proposed method is not only beneficial to reduce the warning nuisance, but also it is beneficial to solve the similar problems.

[ **Key words** ] FIR filter; low pass filter; stall warning; stall protection device.

## 0 引言

失速保护装置是民机设计过程中一个重要系统,在飞机接近失速状态时能够提供失速告警(驾驶杆抖动、音响告警、视觉提示等),甚至自动推杆功能,确保飞机不进入失速状态,保证分析安全<sup>[1-3]</sup>。民用飞机失速保护设计相关条款要求失速告警能够给飞行员提供准确告警,避免虚假信息<sup>[4]</sup>。特别是在飞机起飞、降落这样重要的阶段,虚假告警可能干扰飞行员正常判断,使飞行员放弃起飞,存在安全隐患。因此,设计实时、准确的告警

信息成为失速保护装置的关键技术。

## 1 失速保护告警逻辑

好的失速告警设计能在复杂运行条件下根据当前飞机飞行状态,通过多个输入参量进行逻辑运算,准确识别出飞机是否接近失速状态。在某型飞机失速保护设计过程中,由于风标安装位置对飞机侧向运动比较敏感,大侧向机动会引起两侧迎角不一致,导致一侧出现告警,一侧没有告警的情况,不满足适航要求。为了消除侧滑影响,引入侧向加速度(飞机没有安装侧滑角传感器)对两侧迎角进行

修正。通过侧向加速度修正后的左右两侧迎角趋于一致,使得两侧告警产生时间一致。式(1)是某型飞机引入侧向加速度修正的失速告警逻辑:

$$a_{L}-\Delta a>C; a_{R}+\Delta a>C \quad (1)$$

其中  $a_L$ 、 $a_R$  为当前飞机左右两侧迎角值,  $c$  为失速告警阈值,与当前空速、飞机襟缝翼构型、结冰状态、襟缝翼故障等有关;  $\Delta a$  为修正飞机横侧向运动引起的迎角偏差量,如式(2)所示:

$$\Delta a=k_2 N_y^2+k_1 N_y+k_0 \quad (2)$$

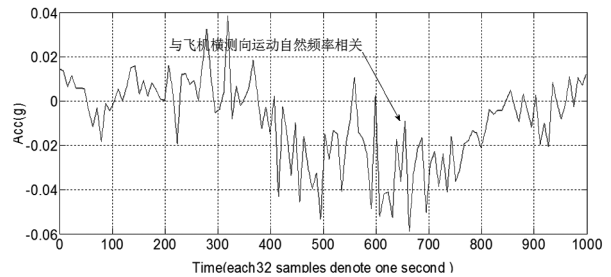
式中,  $N_y$  表示飞机侧向加速度,  $k_0$ 、 $k_1$ 、 $k_2$  为系数,需根据试飞数据辨识得到。

通过式(2)可以看出,迎角和侧向加速度直接用于逻辑计算,两个信号的品质对失速告警触发准确性有很大影响。其中侧向加速度来自航姿或惯性导航系统,虽然在系统输出端进行了滤波处理,然而信号中仍包含部分噪声,如飞机接近失速或遭遇颠簸气流时机体抖动产生的噪声;迎角信号来自于迎角传感器,当飞机在不稳定大气中飞行时,风标容易抖动,虽然传感器内部配有液体阻尼或磁阻尼装置,对因风标抖动而产生的噪声有一定的抑制作用,但迎角信号中仍包含部分噪声。针对这两个信号的特点,本文提出一种混合滤波方案,采用不同的滤波器对这两个信号分别进行处理,滤除信号中的噪声,改善信号品质,提升系统告警的准确率。

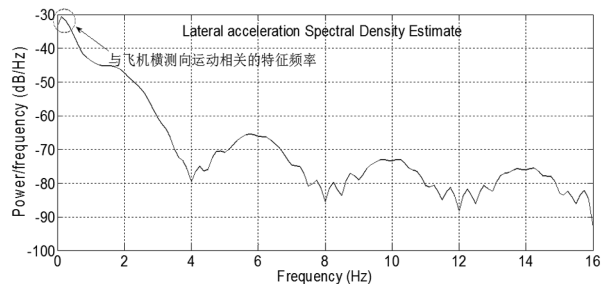
## 2 信号频率特性分析

为设计合适的滤波器,需要根据被测系统特性对传感器信号进行分析,通常信号中包括系统特征主信息、耦合信息、传感器噪声等,其中传感器噪声通常可以忽略不计。对于侧向加速度和迎角信号来讲,分别来自航姿(惯导)和迎角传感器,代表了飞机不同的运动特征。侧向加速度信号主要反应了飞机在横侧向的机动能力,信号特征与飞机横侧向运动的自然频率相关,通常频率较低;另外,信号中还有机体耦合大气扰动后的气动伺服弹性振动信息,这部分信息特征与机体结构和系统布局相关,通常频率较高,如图1(a)和(b)所示。其中图1(a)是原始的侧向加速度信号,图1(b)为该信号的功率谱密度。可以看出侧向加速度信号中不但包括了飞机在横侧向的低频运动信息,而且还包括了机体的高频振动信息。迎角信号反映了飞机在纵向的机动能力,信号特征与飞机纵向运动的自然频率相关,通常频率较低;另外,信号中

还有大气扰动引起的风标自身抖动信息,该信息与风标自然运动频率有关,如图2(a)、(b)所示,图2(a)是原始的迎角信号,图2(b)是该信号的功率谱密度。从图中可以看出,迎角信号不但包括了飞机在纵向的低频运动信息,而且还包括了风标受大气扰动后的抖动信息,如图中虚线椭圆圈内部分。上述两个信号中的噪声如果不进行滤除而直接使用,将会对失速告警逻辑设计产生不利影响,导致过多的骚扰性告警。

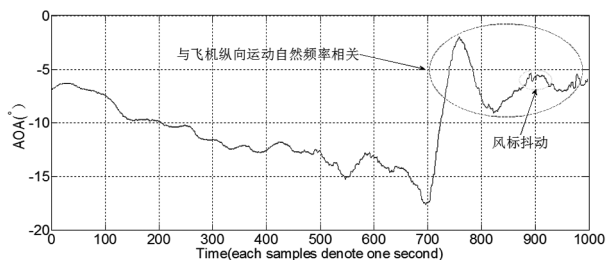


(a) 侧向加速度信号频率信息

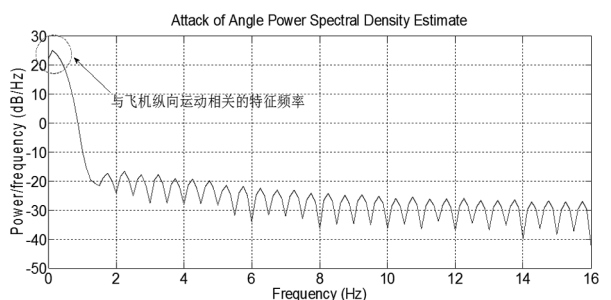


(b) 侧向加速度信号功率谱密度

图1 侧向加速度信号频率信息及功率谱密度



(a) 迎角信号频率信息



(b) 迎角信号功率谱密度

图2 迎角信号频率信息及功率谱密度

### 3 滤波器方案

滤除噪声能力是滤波器的重要设计指标,既要保证信号中有用的主特征频率信息尽可能不被衰减,同时对信号中无用的背景噪声又能充分滤除,滤波器设计过程还要考虑延时特性对系统逻辑的影响。本文提及的失速告警逻辑,侧向加速度用于左右两侧迎角信号不一致量的修正,通过式(1)可以看出,如果出现相位延时,那么修正量将会不满足设计要求,修正后的两侧迎角信号仍然存在差异,导致左右两侧失速告警出现时机不一致。因此,侧向加速度的滤波器设计应该考虑延时特性影响。另外,除了滤波性能、延时等技术指标,还要考虑滤波器的工程实现性。一些滤波器,如 Kalman 滤波、小波分析等,其工程实现性相对比较复杂,特别对于目前一些简单硬件资源,如单片机,其寄存器数量和 CPU 计算能力不足。还有就是这些滤波器对噪声统计特性要求较高,实际上,噪声模型经常也无法准确建立,在一定程度上也影响了滤波效果<sup>[5-6]</sup>。

本文综合信号特征、工程实现难易度、滤波效果因素,提出一种混合滤波方案改进失速告警性能。在该方案中,采用 FIR 滤波器对侧向加速度信号进行处理;考虑到工程实施简易程度和信号自身特性,迎角信号则选择普通的低通滤波器。

事实上,FIR 滤波器的本质也是设计一个数字滤波器去逼近理想的低通滤波器。通常这个理想的低通滤波器在频域上是一个矩形窗。在设计中,FIR 滤波器本身不使用反馈,单位脉冲响应是有限长的,是稳定系统;虽然相比于 IIR 滤波器,FIR 计算需要较多的内部寄存器存储多个采样点、中间乘积和累加环节的数据,但可以采用有限的字节数解决 IIR 设计中易出现的有限精确性问题。综合考虑,在处理器计算频率和内存满足要求的情况,FIR 是一款较好的滤波器,因此在实际中得到广泛应用。

以下是 FIR 滤波器工作原理的简要介绍<sup>[6-8]</sup>。

一个截止频率为  $\omega_c$  (rad/s) 的理想数字低通滤波器,其传递函数的表达式为:

$$H_d(e^{j\omega}) = \begin{cases} e^{-j\omega t}, & |\omega| \leq \omega_c \\ 0, & \omega_c \leq \omega \leq \pi \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,理想低通滤波器在理论上是不可实现的,冲激响应具有无限性和因果性。为了产生有限长度的冲激响应函数,取样响应为

$h(n)$ , 长度为  $N$ , 其系统函数为  $H(z)$ :

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)z^{-n} \quad (4)$$

用  $h(n)$  表示截取  $H_d(n)$  后冲激响应,即  $h(n) = \omega(n)H_d(n)$ , 式中  $\omega(n)$  为窗函数,长度为  $N$ 。当  $r = (N-1)/2$  时,截取的一段  $h(n)$  对  $(N-1)/2$  对称,可保证所设计的滤波器具有线性相位。

一般来说,FIR 数字滤波器输出  $y(n)$  的 Z 变换  $Y(z)$  与输入  $x(n)$  的 Z 变换形式之间关系如下:

$$Y(z) = H(z)X(z) = (h(0) + h(1)z^{-1} + \dots + h(n)z^{-n})X(z) \quad (5)$$

从上面的 Z 变换和结构图可以很容易得出 FIR 滤波器的差分方程表示形式。

以下采用了 Matlab 中 Filter Builder 工具箱来设计 FIR 滤波器<sup>[9-10]</sup>。该工具箱具有友好的界面操作,可以灵活设置各种滤波参数,快速得到滤波结果,从而提高设计效率。本文设计的滤波器参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 FIR 滤波器设计参数

重要参数	数值	说明
采样频率	32Hz	基于飞机数据采集系统的采集频率
滤波阶数	12	综合滤波效果和工程易实现两个因素
带通频率	0.15Hz	基于飞机横测向运动主特征频率信息
带阻频率	3Hz	该频率以上均是振动噪声和总线噪声

表 2 FIR 滤波器系数

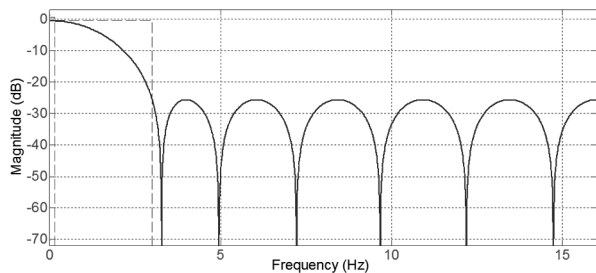
滤波器系数
0.04443424761849965; 0.044924252698496946
0.061956429008753137; 0.078196435680342305
0.09160588805419459; 0.10046464107613956;
0.10356543846490648; 0.10046464107613956
0.09160588805419459; 0.078196435680342305;
0.061956429008753137; 0.044924252698496946
0.04443424761849965

图 3 是采用混合滤波器的结果,其中图 3(a)是采用 FIR 滤波器对侧向加速度滤波的结果。可以看出,飞机接近失速点,由于机翼上的气流分离,导致机体发生振动,这种振动强度和频率相对于飞机本体的主特征运动频率都很大,如果不滤除,将会对修正产生极大影响。经过滤波后的侧向加速度高频振动信息得到极大抑制,而主特征频率信息得以保留,而且

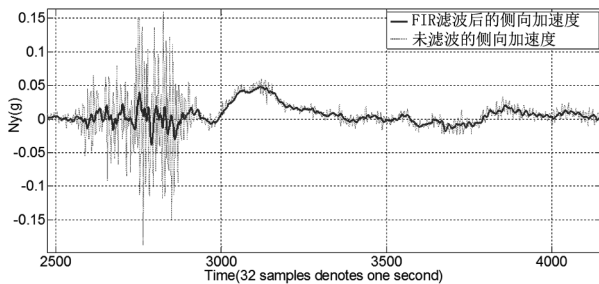


经过 FIR 滤波后的信号存在较少延迟。对于迎角信号,则采用一般的低通滤波器进行滤波。根据某型飞机在纵向上的运动频率约为  $1 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ,低通滤波器选取  $1/4s+1$ ,其幅频特性如图 4 所示。可以看出滤波后的迎角信号噪声较少,而且延迟也较少。

以侧向加速度为例,某型飞机采用侧向加速度的修正公式为  $\Delta a = 100N_y$ ,如果使用未滤波侧向加速度进行修正,则在振动噪声处最大修正量为  $+15^\circ$  和  $-19^\circ$ 。如果这样的信号一旦被系统采集到,则会对两侧迎角信号产生非正常修正,特别是当瞬间修正量与期望值反向时,可能导致迎角修正错误,即本来迎角小的一侧,被进一步修小,而迎角大的一侧被进一步修大,从而产生骚扰性失速告警。而采用滤波后的侧向加速度信号修正量为  $+3^\circ$  和  $-2^\circ$ ,大大减少了振动噪声发生时产生的非正常修正量。同样由于迎角信号中的噪声被滤除,也减少了虚警产生。

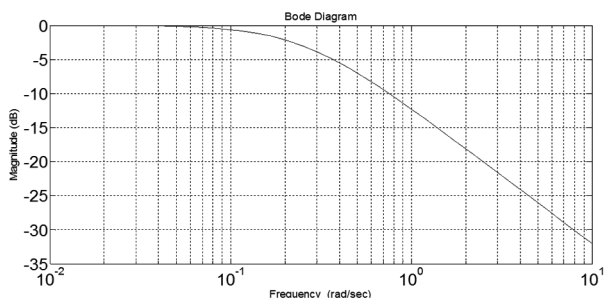


(a) FIR 滤波器的幅频特性

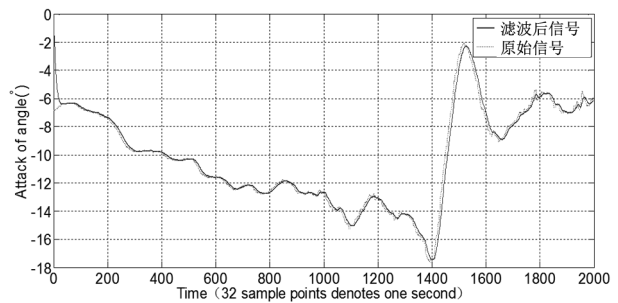


(b) FIR 滤波前后信号比较

图 3 FIR 滤波器的幅频特性及滤波前后信号比较



(a) 低通滤波器的幅频特性



(b) 低通滤波前后结果对比

图 4 低通滤波器的幅频特性及滤波前后结果对比

## 4 结论

本文提出的基于 FIR 和低通滤波器的混合滤波方案能够减少失速保护装置设计中易出现虚警的现象。从滤波器设计过程可以看出,该方法不但适用于失速告警装置设计,对于其他工程设计中可能遇到背景噪声比较大的情况,也可以采用该方法进行设计。本文从信号特征频率分析着手,并考虑工程易实现性,选择组合的滤波方案对信号进行处理,获得理想的滤波效果和工程实现价值。

## 参考文献:

- [1] Ralph H. Upson, Stall warning device [P]. Aug. 25, 1947.
- [2] 马乔兵,任剡. 飞机失速告警系统发展技术综述[J]. 西安航空技术高等专科学校学报, 2012, 30(1): 6-9.
- [3] 易江,刘国江,刘宁. 涡桨类飞机失速告警过早问题分析研究[J]. 科技视界, 2013, (32).
- [4] AC25-7C advisory circular. Flight test guidance for certification category of transport category airplanes[S]. U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2012.
- [5] 蒋志凯. 数字滤波与卡尔曼滤波[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1993.
- [6] 胡广书. 数字信号处理:理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.
- [7] 黄顺吉,等. 数字信号处理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1982.
- [8] 姚天任,江太辉. 数字信号处理[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2013.
- [9] 张森,张正亮. MATLAB 仿真技术与实例应用教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [10] 楼顺天,李博菡. 基于 MATLAB 的系统分析与设计—信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1998.