

基于低冗余度的传感器故障诊断研究

Study of Low Hardware Redundancy Sensor Fault Detection

杜永良 / Du Yongliang

(第一飞机设计研究院, 西安 710089)

(The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

摘要:

对于大型飞机来说,飞行控制系统各部件(包括传感器)多采用高冗余度的硬件配置来提高系统的任务可靠性,但对小型飞机来说,由于受重量、空间及费用等原因的影响,一些传感器不适合安装三冗余度或四冗余度传感器。对于二冗余度或单传感器来说,如何鉴别故障传感器或判断传感器是否发生故障较为困难。同样,传统的故障诊断与隔离方法并不能隔离三冗余度传感器系统中的多个故障。为了解决低冗余度传感器故障诊断问题,提出一种不依赖数学模型的奇偶方程方法与小波分析相结合的传感器故障诊断方法。

关键词: 奇偶方程; 离散小波变换; 故障诊断

[**Abstract**] Flight control system always use high level hardware redundancy configuration to improve mission reliability for big aircraft, but it is not reasonable to install triple or quadruple sensor redundancy on small aircraft due to the limitations on space, weight and cost. It is very difficult to identify the failure with dual or single sensor. Also, conventional fault detection and isolation method cannot isolate multiple faults in a triple redundancy system. To solve this problem, a kind of non-model based fault diagnosis which combines a parity equation approach with the wavelet based technique were introduced in this paper.

[**Key words**] Parity Function; DWT; Fault Detection

0 引言

一般来说,故障诊断与隔离技术被分为两类:硬件冗余管理和解析冗余管理。在硬件冗余管理系统中,冗余度传感器被用作跨通道监测,通常这种方法会带来硬件的复杂化和较高的成本,硬件冗余可以依靠应用解析方法而减少。解析冗余管理使用系统数学模型来监测故障,但往往由于传感器模型难以确定,使得基于解析冗余的故障诊断与隔离技术难以准确诊断传感器的故障。

传感器故障一般表现为信号的突变,可分为传感器开路故障、偏置故障、短路故障以及卡死故障。由于小波函数具有局部时频分析能力,适宜于对突变信号的检测。研究分析和仿真表明,小波分析对低频非平稳信号的故障检测具有很强的诊断能力,非常适合对传感器进行在线故障诊断,且不需要传感器的模型支持,是一种弱模型的故障诊断方法。

弱模型故障诊断方法为故障检测与隔离算法

提供了一种通用方案^[1],在具体飞机上运用时,仅需要作较小的调整,从而降低研究费用。但是,对于传感器正常情况下,信号的急促变化,很可能产生虚警。

本文将硬件冗余与小波分析相结合设计了故障检测与隔离算法,仿真分析表明,这两种方法的优缺点相互补充,能够取得非常满意的检测效果。

1 基于奇偶方程的故障检测

由于某些系统存在一定的内在联系,只要系统中的传感器按照一定的关系安装,无论这些传感器是否种类相同,还是具有硬件冗余备份,测量传感器的输出都可以通过理论关系建立冗余作用,即解析冗余。

在各传感器均正常工作的情况下,各传感器的输出会因系统性能参数的内在统一性而具有内在一致性。如果某个传感器出现故障,则故障传感器与其他传感器之间测量输出的内在一致性会遭到

破坏。这种反映各传感器输出的内在一致性的关系称为奇偶方程,而由奇偶方程所产生的余差矢量称为奇偶矢量,奇偶矢量反映了各测量传感器测量输出的内在一致性,通过奇偶矢量的检测可以实现对传感器故障的检测。

例如,角速率陀螺信号 p, q, r 的奇偶方程可表示为^[2]:

$$p - (\dot{\phi} + \dot{\psi} \sin \theta) \approx 0$$

$$r - (\dot{\psi} \cos \theta \cos \phi + \dot{\theta} \sin \phi) \approx 0$$

$$q - (\dot{\theta} \cos \phi - \dot{\psi} \cos \theta \sin \phi) \approx 0$$

其中, ψ 为航向角信号, θ 为俯仰角信号, ϕ 为滚转角信号。

对于硬件冗余度系统,认为两个传感器测量值之差就是其奇偶方程。

同样,对于陀螺仪及加速度传感器等,可以根据传感器的安装几何位置,构造出各信号的解析关系式。

如图 1 所示,设 4 个单自由度陀螺,3 个沿着机体轴方向安装,另外 1 个与其余 3 个陀螺安装成一定夹角,从而形成空间最低冗余形式,便可通过硬件完成故障诊断。但仅依靠传统故障诊断方法不能实现故障隔离。设第 4 个陀螺与其余陀螺夹角相同,均为 α ,如图 1 所示 ($\alpha = \arccos \frac{\sqrt{3}}{3}$),则检测方程为:

$$s_1 \cos \alpha + s_2 \cos \alpha + s_3 \cos \alpha - s_4 \approx 0$$

空间安装位置不同,检测方程也会不同。文献[3]提出的以 6 个单自由度为对象的最佳配置方案中,只要保证 3 个陀螺正常工作,就能提供正确的三轴全姿态信息。纯硬件门限比较的故障诊断方法可以满足一次、二次故障工作,三次故障安全。

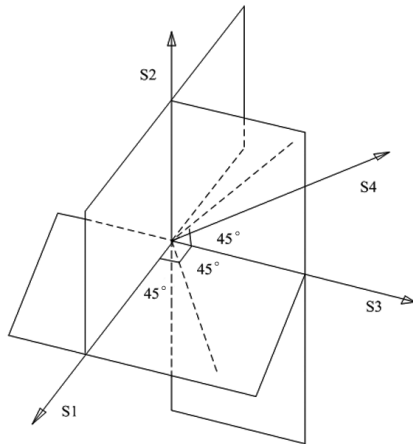


图 1 4 个单自由度陀螺空间安装图

2 小波分析

小波函数定义为:设 $\Psi(t) \in L^2(R)$,若其傅立叶变换 $\Psi(\omega)$ 满足条件:

$$c_\psi = \int_R \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$$

则称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或小波母函数,并称该条件为小波函数的可容许条件。

对信号 $s(t)$ 的连续小波变换定义为:

$$WT_s(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt = \langle s(t), \psi_{a,b}(t) \rangle$$

式中:

* 为复共轭;

$$\psi_{a,b}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (a > 0, b \in R)$$

为窗函数 $\psi(t)$ 的时间平移 b 和尺度伸缩 a 的结果。

在实际应用中,尤其在计算机上实现时,连续小波必须离散化。需要特别指出的是,所谓离散不是对时间变量 t ,而是对尺度和位移参数的离散。

若将尺度因子和位移因子按幂级数离散,即令 $a = a_0^m, b = nb_0 a_0^m$ (a_0, b_0 为常数且 $a_0 > 1, b_0 > 0$),离散小波变化为(discrete wavelet transform):

$$DWT_s(m, n) = \int s(t) \psi^{m,n}(t) dt$$

离散母小波函数为:

$$\psi^{m,n}(t) = a^{-m/2} \psi \left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right)$$

Mallat 算法是小波变换中的快速算法。对于 $L^2(R)$ 空间上的任意信号 $f(t)$,按最大尺度 N 可分解为 2^{-N} 的低频部分和分辨率为 2^{-j} ($j=1, 2, \dots, N$) 的高频部分。

令 $c_0(n)$ 为传感器特定时间长度的离散信号。传感器信号的一维 Mallat 塔式分解算法如图 2 所示。

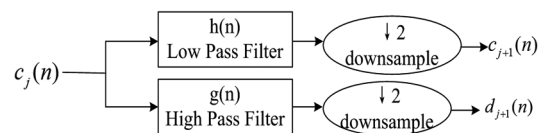


图 2 多尺度分析

Mallat 算法的分解公式为:

$$c_{j+1}(n) = \sum_k h(k-2n) c_0(k)$$

$$d_{j+1}(n) = \sum_k g(k-2n) c_0(k)$$

低通滤波器 H 的作用是实现函数 $f(t)$ 的值逼

近 C_j , 高通滤波器 G 的作用为抽取 $f(t)$ 的细节 D_j 。

从上可知,小波分析技术能够将任何信号(平稳信号或非平稳信号)分解为一个由小波伸缩而成的基函数族上,其信息量完整,在通频范围内得到分布在不同频段内的分解系列,在时域和频域均具有局部化的分析功能。因此,利用小波变换来分析信号的奇异性及奇异性位置和奇异度的大小比较有效。

3 复合故障诊断

建立在硬件基础上的冗余度故障诊断是传统、简单和可靠的,这种方法普遍应用到了当前大型飞机飞行控制系统中。但通常对小型飞机或特殊用途的飞机来说,由于受到空间和费用等许多因素的限制,或从整个系统冗余度匹配角度考虑,不是任何传感器都适合应用硬件三冗余或四冗余进行冗余度故障诊断。在一些情况下,使用基于硬件基础上的空间冗余技术,即使有限数量的传感器系统,故障也可以容易的检测出来。但是,由于缺少奇偶方程,故障很难被一次或二次隔离。另一方面,由于小波函数具有局部时频分析能力,适用于对突变信号的检测,在线监控技术使用 DWT 具有检测到每个传感器故障的能力。然而,使用小波变换的故障诊断与隔离技术具有许多不足。由于飞机是一种高机动性的系统并且可能会执行多种突变操作,如果一个飞机突然机动飞行加速,传感器输出信号便会产生突变,应用 DWT 进行故障检测在这种情况下很可能会产生虚警。尽管 DWT 是一种快速算法,但需要处理一定长度的数据,导致无法实时处理传感器数据。

硬件冗余的故障诊断与隔离技术与小波分析在线监控技术具有各自的缺点,因此可以通过两种方法的结合,设计出一种更为有效的故障诊断算法。当冗余传感器的数量有限时,缺少奇偶方程可以被离散小波变换的在线监控技术弥补。同样的,由于离散小波变换因飞机大机动引起的虚警能够被奇偶方程方法阻止,如图 3 所示。

必须注意的是:第一,大机动时离散小波变换会产生虚警,因此,在故障诊断时,奇偶方程方法应当具有优先权;第二,奇偶方程方法所需要的计算量较小,由于需要一个大于一定长度传感器数据的回旋序列,离散小波变换所需要的计算量较大,并且离散小波变换在正常状态下的计算是无意义的。

因此,奇偶方程方法需要进行实时计算,而离散小波变换仅在需要的时候执行。

奇偶方程方法是根据奇偶方程以及故障门限来判定故障。在一个特定的时间段内,离散小波变换则通过计算储存的传感器数据来判定故障传感器。确定传感器储存数据的堆栈长度非常重要。当堆栈长度较小时,离散小波变换计算较快。计算时间同样取决于处理器。离散小波变换传感器数据长度的选取应综合硬件计算能力及安全操纵间隔时间。从仿真中可知,在无干扰及干扰信号较小的情况下,长度为 10 的数据段能较好判断出故障,而在实际应用中应取较大(如 32)。

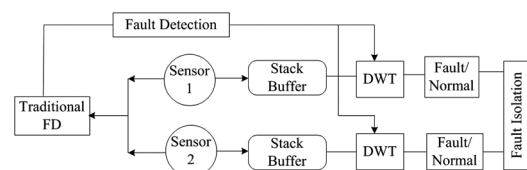


图 3 不需模型的混合法传感器故障诊断

4 仿真与分析

图 1 给出了一种 4 个单自由度陀螺空间配置方案,3 个陀螺沿三个垂直轴安装,另外 1 个传感器与其它 3 个成相同夹角安装,这种配置方式能获得一个奇偶方程。

常见的传感器故障行为有卡死、增益变化以及恒偏差三种,主要表现为信号的突变。本文仅对其中一种情况进行仿真。

首先假设传感器 s1 恒偏差故障突然出现在 100s。图 4 表明,通过奇偶方程在 100s 时检测到故障,但是无法隔离定位。图 5 通过应用小波分析对传感器信号进行 1 级或 2 级分解可判断出传感器 1 在 100s 时信号有突变。这样,便可定位故障传感器,并对其进行隔离。

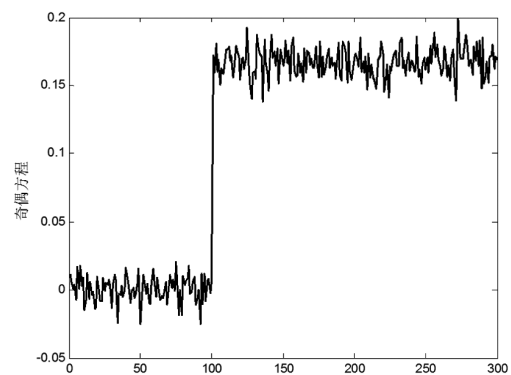
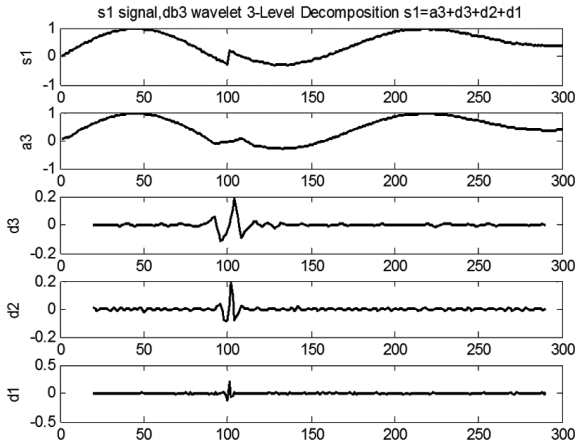
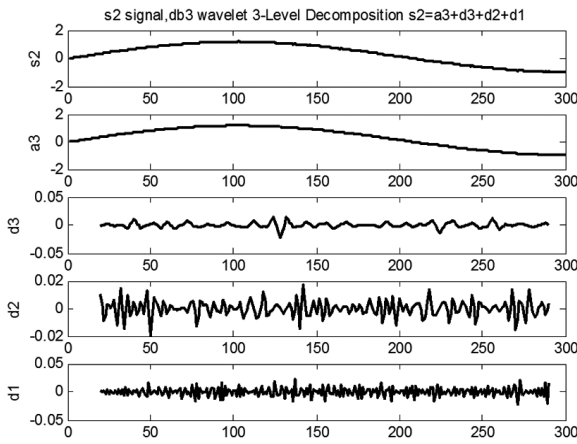


图 4 恒偏差时奇偶方程故障诊断

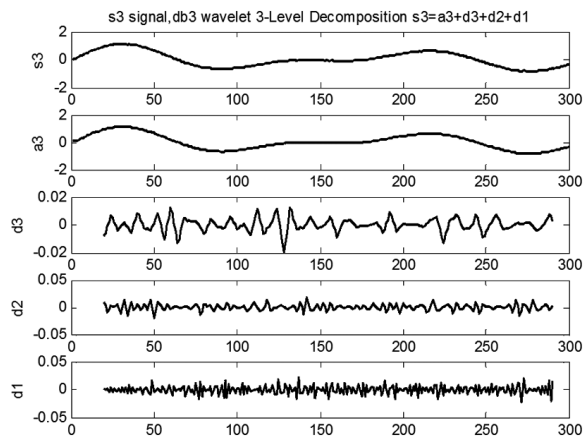
其次,假设飞机突然做大机动并且传感器没有出现任何故障。图6表明,通过奇偶方程方法没有发现故障。尽管所有的传感器都正常,但图7表明离散小波变换检测出传感器1和4在100s附近信号有突变现象。这表明奇偶方程应当比离散小波变换在故障检测中具有优先权。



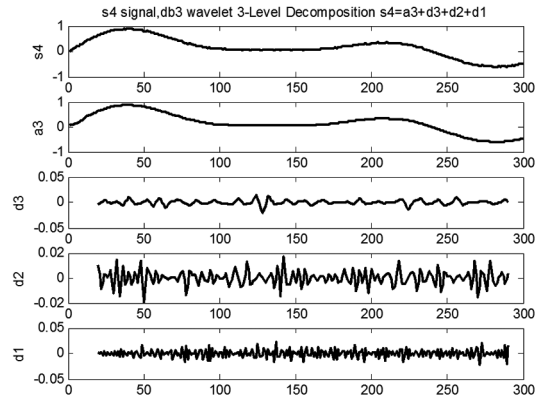
(a) 传感器 1



(b) 传感器 2



(c) 传感器 3



(d) 传感器 4

图5 横偏差时小波变换故障诊断

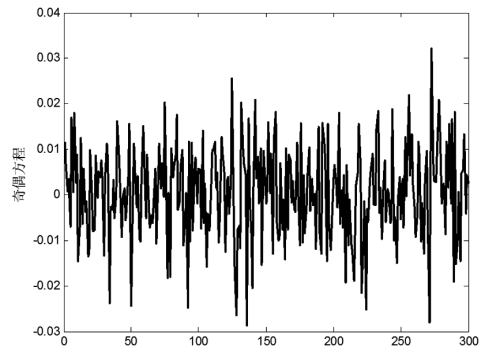
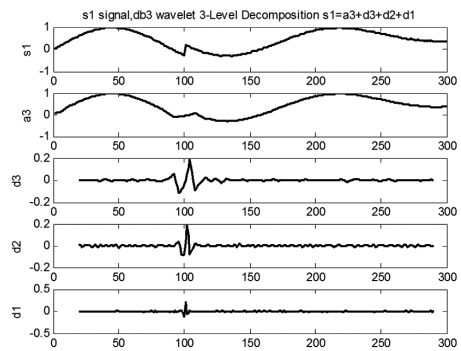
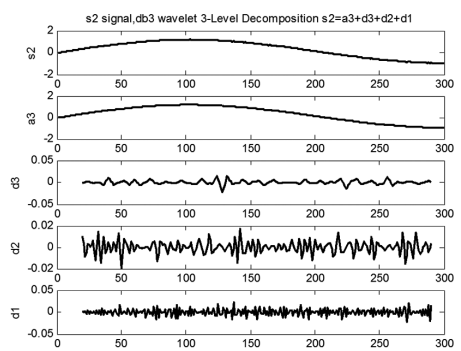


图6 大机动时奇偶方程输出



(a) 传感器 1



(b) 传感器 2

(下转第 56 页)

动停车,保护功能正常。

在运行期间,APU GEN 及 APU GEN 多功能试验装置的各项指标都满足要求,APU GEN 工作正常。

5 结论

上述运行试验证实了本文提出的 APU GEN 多功能试验装置功能齐全,操作方便,安全可靠,能较好地满足 APU GEN 试验需求。

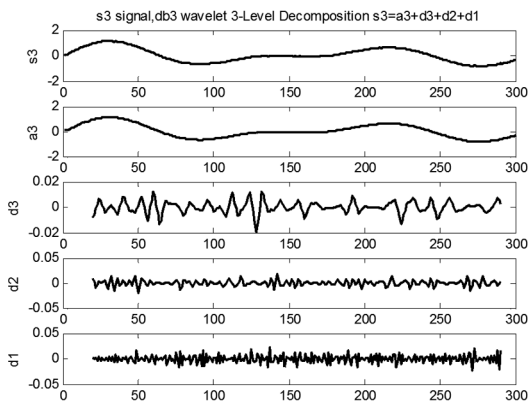
该设备的研制和实现,不仅保障了民用飞机电源系统的设计验证,丰富了民用飞机电源系统试验经验;而且对提升我国民用飞机电源系统试验室试验配套设施的研制能力和试验经验的积累等方面

均具有积极的意义。

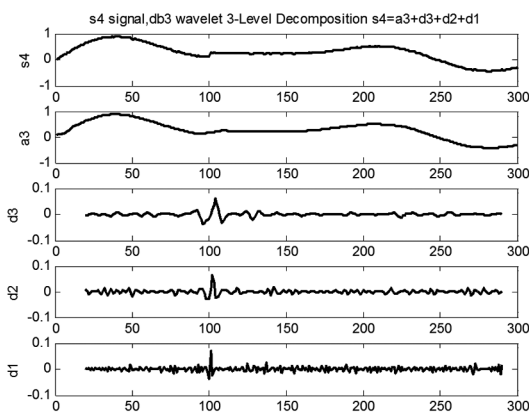
参考文献:

- [1] 吴大榕. 电机学(上册)[M]. 北京:水利电力出版,1979:18-50.
- [2] 沈洪勋,陈维泉,等. 变频调速[M]. 北京:纺织工业出版社,1989:3-8.
- [3] 杜金城. 电气变频调速设计技术[M]. 北京:中国电力出版社,2001:1-12.
- [4] 张燕宾. 变频调速应用实践[M]. 北京:机械工业出版社,2000:3-9.

(上接第 8 页)



(c) 传感器 3



(d) 传感器 4

图 7 大机动时小波变换故障诊断

5 结论

本文分析仿真表明,小波分析对低频非平稳信号的故障检测具有很强的诊断能力。其特点是对信号的多分辨率分析,便于对信号的总体和局部进行刻画,这对故障诊断具有很大的实际意义。小波分析方法为传感器的故障诊断提供了一种有效途径,而且不需要系统的数学模型。同时,小波分析方法不但能够用软件实现,也能够用硬件实现,可以应用在实时性要求很高的场合,因此,它提供的故障检测与诊断算法适合应用在各类飞机上,具有很大的实用价值和广泛的适用性。但是,小波分析又具有自身的缺点,尤其是对于传感器正常的突变,很可能会产生虚警。本文将硬件冗余与小波分析相结合设计了故障检测与隔离算法,这两种方法的优缺点相互补充,为解决低冗余度下故障检测与隔离提供了一条很好的途径。

参考文献:

- [1] Oded M. Golan, Moshe Idan, Ron Meir. Weak Model Based Approach For Fault Detection and Isolation of Sensors in Flight Control Systems[R]. AIAA-2000-4104.
- [2] 文传源. 现代飞行控制[M]. 北京:北京航空航天大学,2004.
- [3] 袁信. 导航系统[M]. 北京:航空工业出版社,1993.