

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2017.02.021

民用飞机飞控系统传感器 信号表决设计

The Sensor Voter Design of Flight Control System for Civil Aircraft

唐志帅 刘兴华 盛伟强 吴志琪 / TANG Zhishuai LIU Xinghua SHENG Weiqiang WU Zhiqi
(上海飞机设计研究院,上海 201210)
(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

电传飞控系统(Fly By Wire,简称FBW)通过传感器余度配置,提高了信号可用性和完整性。介绍了几类常见的传感器余度配置方案及其表决逻辑,设计了三余度传感器表决架构,对其中比较器、计数器进行了详细描述。最后通过一个仿真算例验证了表决器设计的正确性。对于国内民机传感器余度配置和表决管理具有指导意义。

关键词:电传飞控系统;余度管理;表决器;传感器

中图分类号:V249

文献标识码:A

[Abstract] Fly By Wire Flight Control System improved the availability and integrity of signals by the redundancy sensors configuration. This paper introduces several Redundancy Configurations and the corresponding Vote Logic, presents the Compare Module and Counter Module, and designs the Triple Redundancy Sensor Voter, which has been verified by a simulation case. This paper can provide the guidance for Redundancy sensors Management and Voter Design for Civil Aircraft.

[Keywords] fly by wire; redundancy management; voter, sensor

0 引言

电传飞控系统使用冗余硬件(传感器、计算单元等),以满足高可靠性、高安全性要求。目前很多传感器具备内部监控器(电压/电流监控、频率监控等),可提供90%~95%以上的故障检测率。一旦检测到故障,该传感器数据将被标记为“无效”。然而有效性标记并不能覆盖传感器的所有故障,针对传感器不能自己检测到的故障,需要设计外部监控器对多余度传感器进行表决(余度管理),以隔离错误传感器信号,避免对飞机产生不良影响^[1]。

本文对二余度、三余度、四余度、混杂余度的传感器表决逻辑进行了研究^[2],分析了可应用于工程实践的表决器设计方法。对于飞控系统的关键传

感器表决设计(侧杆、脚蹬、大气数据、惯导传感器等),具有指导意义。

1 表决逻辑

信号表决的目的是为了提高信号的可用性或完整性,或二者兼有。表决的源信号并非越多越好,余度增加会带来硬件成本、架构复杂度、维护工作和重量的增加^[3]。源信号的数量及表决逻辑取决于飞机/系统对信号的要求,民用飞机设计过程中常见的传感器余度设计主要有二余度、三余度、四余度、混杂余度这几类,表1总结了不同的表决逻辑所带来的收益。(根据目前工业水平,假设单个传感器信号可用性为1E-4/FH,完整性为1E-5/FH。假设飞行暴露时间为3小时,多传感器之间相互独立。)

表 1 多余度传感器常见的表决逻辑

源信号余度	表决逻辑	输出信号可用性	输出信号完整性	适用场景
二余度	若两路信号有效且匹配,则输出均值; 若两路信号有效但不匹配,则输出无效; 若仅一路信号有效,则直接输出; 若信号均无效,则输出无效。	2E-5/FH	6.3E-9/FH	低可用性,高完整性,适用于对可用性要求不高的场合。
	若仅一路信号有效,则输出无效。其他逻辑与上面相同。	2.2E-4/FH	3E-10/FH	与上面相比,可用性下降,完整性提高,适用于对可用性要求不高,但完整性要求较高的场合。
三余度	若三路信号有效且匹配,则输出均值; 若三路信号有效,但有一路与其他两路不匹配,则输出两路均值; 若仅两路信号有效且匹配,则输出两路均值; 若仅两路信号有效但不匹配,则输出无效; 若仅一路信号有效,则直接输出; 若信号均无效,则输出无效。	1.8E-8/FH	9.03E-10/FH	高可用性高完整性,一般用于大气数据、惯导等传感器余度配置。三余度叠加备份系统,可满足大多数使用场景。
	若仅一路信号有效,则输出无效。其他逻辑与上面相同。	1.08E-7/FH	9E-10/FH	与上面相比,降低了可用性,一般不建议采用。
四余度	若四路信号有效且匹配,则输出均值; 若四路信号有效,但有一路与其他三路不匹配(一三分离),则输出三路均值; 若四路信号有效,但有两路与其他两路不匹配(二二分离),则输出无效; 若四路信号有效,但有两路与其他两路不匹配(一一二分离),则输出匹配两路均值; 若三路及以下信号有效,其表决逻辑与三余度表决类似。	1.84E-9/FH	1.12E-12/FH	高可用性高完整性,一般用于侧杆、减速板手柄等位置传感器余度配置。再高余度配置已经没有意义。
混杂余度	混杂余度泛指其他非相似余度的传感器配置方案,这里仅以起落架轮载信号为例(假设左/右主起落架各配置两个位置传感器)。轮载信号在以下情况下为真: 1) 若四路信号均有效,至少三路信号指示轮载在地面; 2) 若一路或两路信号无效,左右起落架各至少有一个传感器指示轮载在地面且有效。	7.38E-8/FH	7.56E-13/FH	安全性指标与混杂余度配置及表决逻辑关系较大,其适用场景也不一而论,具体问题具体分析。

2 表决器设计

当传感器输出信号超出公差范围的次数大于定义值(持续故障时间),表决器需检测到故障并隔离相应传感器信号。

表决器需根据已确定的表决逻辑进行设计,同时定义相关的表决门限和允许的持续故障时间。表决门限过低会导致传感器输出在误差带边缘时被断开,门限过高则可能导致故障锁存时传感器已出现不可接受的瞬变,因此表决器门限的选择非常重要。同时为了避免信号跳变导致表决器频繁误触发,提高系统鲁棒性,需要允许传感器信号的“错误”持续一段时间,工程上一般采用计数器的方法,一旦错误计数达到定义值,则锁存传感器故障,隔离错误信号。

以飞控系统常见的三余度配置为例,设计表决器如图1所示。

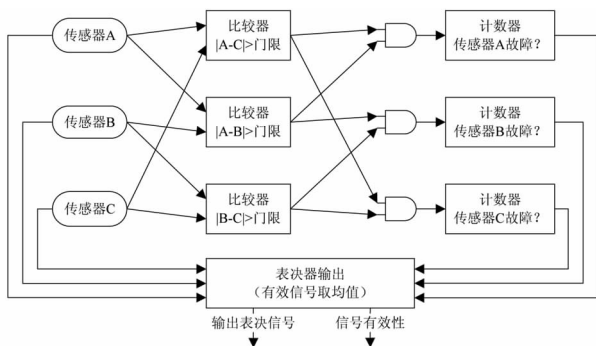


图1 表决器架构设计

比较器对三路传感器信号 A、B、C 进行两两比较,若两个传感器信号之差超出门限,比较器输出 1 至逻辑与门,表示这一组信号不匹配。若 A 与 B 不匹配且 A 与 C 不匹配(与门输出为 1),则可判定传感器 A 出现一次故障,相应的计数器记录故障信息。比较器门限的设计需综合考虑传感器、传输总线、飞控电子设备的误差和延迟,并根据试验结果进行修正。

计数器记录传感器故障信息,对每路传感器的故障次数进行统计,出现一次故障计数器加 X,出现一次正常数据计数器减 Y,当计数值大于 Z,则判定相应传感器出现故障,监控器隔离并锁存故障信号。X、Y、Z 的定义更多依赖于工程经验,同时考虑表决器性能要求。

最后表决器根据传感器信号值和故障锁存信息,对剩余有效信号取均值,输出表决信号,用于控制律计算。

3 仿真算例

本文根据第三章设计的表决器架构,使用 MATLAB/Simulink 建立模型,进行三余度表决器的仿真研究^[4]。

假设某机型惯导系统通过数据总线,发给飞控系统的三路偏航角信号如图2所示(三路信号均叠加了高斯白噪声,以测试表决器的鲁棒性;偏航角信号 A 在第 4s 至 5s 注入故障,偏航角信号 B 和 C 为正常有效信号)。

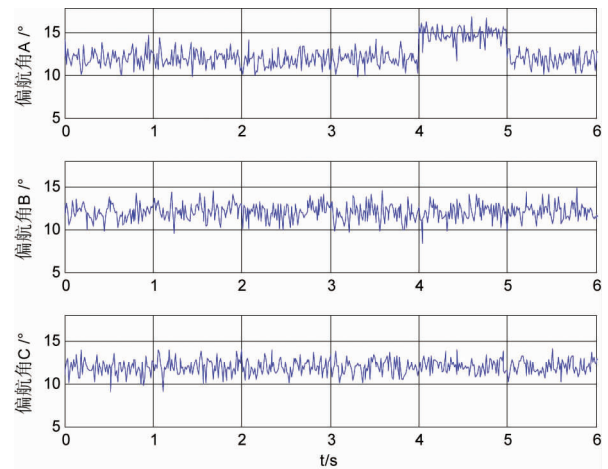


图2 偏航角仿真信号

假设偏航角传感器的误差为 δ_1 (含传感器信号延迟等动态误差),飞控系统内部误差为 δ_2 ,则最坏情况下两路惯导信号最大差异为 $2(\delta_1 + \delta_2)$,因此这里设置比较器门限为 $2(\delta_1 + \delta_2)$ 。根据工程经验,假设计数器的 X、Y、Z 参数分别为 30、1、500,使用本文设计的表决器可得到仿真结果如图3所示。

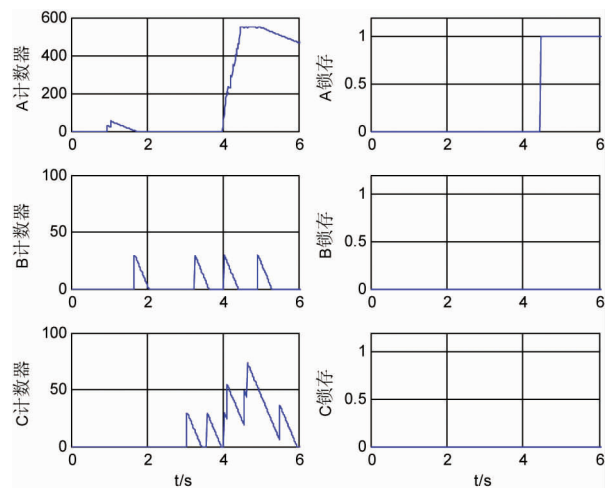


图3 计数器和故障锁存

由图 3 可知,计数器在收到一次故障信号后计数器加 30,收到一次正常信号后计数器减 1,若计数值大于 500,则锁存故障。表决器在偏航角 A 信号发生故障后的 450 ms 内,偏航角 A 对应的计数值超过 500,其锁存信号由 0 变为 1,表决器成功实现了故障信号锁存。而偏航角信号 B 和 C 则正常输出,在噪声干扰下其计数值在 100 以内,具备一定的鲁棒性。

在实际设计中如对表决器性能有更高要求,可通过调整 X 、 Y 、 Z 参数实现。

4 结论

本文分析了电传飞控系统常见的传感器信号表决逻辑,完成了三余度传感器信号的表决器设计,并通过仿真算例证明了表决器设计的正确性。本文对于国内民机传感器余度配置和表决设计具有指导意义。

参考文献:

- [1] Oosterom, M., Babuska, R. . Aircraft sensor management and flight control law reconfiguration—Fuzzy logic approach [C]. Canada: AIAA Paper 2001-4358, 2001.
- [2] 陈丁剑. 多通道余度模型中高可靠表决结构和算法 [J]. 测控技术,2012(31): 31-33.
- [3] Society of Automotive Engineers. ARP4754A Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems [S]. 2010.
- [4] 黄开枝. MATLAB 7 基础教程—面向工程应用[M]. 第一版. 北京:清华大学出版社,2007: 253-255.

作者简介

唐志帅 男,硕士,工程师,主要研究方向:民机飞控系统设计与安全性分析等;E-mail: tangzhishuai@comac.cc

刘兴华 男,博士,高级工程师,主要研究方向:民机飞控系统设计与分析与验证等;E-mail: liuxinghua@comac.cc

盛伟强 男,硕士,工程师,主要研究方向:民机飞控系统设计与验证等;E-mail: shengweiqiang@comac.cc

吴志琪 男,硕士,工程师,主要研究方向:民机飞控系统设计与验证等;E-mail: wuzhiqi@comac.cc