

文章编号: 1674-8190(2023)06-001-13

飞控系统余度信号奇异故障处理策略研究

张永孝

(航空工业西安飞行自动控制研究所, 西安 710061)

摘要: 飞机机翼、操纵面的对称性设计, 决定了飞控系统传感器、计算机和舵机等部件在飞机上分布式对称安装并选择偶数 n 余度的体系架构。余度部件生产关系的平衡分工, 不同厂家设计、制造的差异, 不可避免地出现“两派对立”的偶数分离和“互不认可”的奇异故障。本文提出了中位数表决、变化量记忆、余度重构等基础理论, 给出了极端信号大概率故障判据, 研究论证了这些基础理论和判据的科学原理。为四余度信号“2:2不确定故障、1:1:1:1多故障”、三余度信号1:1:1多故障和二余度信号1:1故障, 提供了有效的表决监控方案。

关键词: 故障监控; 中位数表决; 2:2不确定故障; 1:1:1:1多故障; 变化量记忆; 余度重构

中图分类号: V279

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.06.01

Research on singular fault handling strategies of redundant signals in flight control systems

ZHANG Yongxiao

(AVIC Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710061, China)

Abstract: The symmetrical design of the aircraft's wings and control surfaces determines the system framework in which the sensors, computers, and actuators of the flight control system are symmetrically distributed and installed on the aircraft, and the even number n -redundant architectural design is adopted. In the practical engineering, the balanced division of labor in the productive relations of redundant parts and the differences in design and manufacturing between different manufacturers would inevitably appear the case of two singular faults such as 'two-party opposition' even separation uncertain fault and 'mutual disapproval' uncertain fault. In this paper, the basic theories such as median voting, variable memory and redundancy reconstruction are put forward, and the criterion of extreme signal high probability fault is given. It provides an effective voting monitoring scheme for four redundancy signals "2:2 uncertain faults, 1:1:1:1 multiple faults", three redundancy signals 1:1:1 multiple faults and two redundancy signals 1:1 faults.

Key words: fault monitoring; median voting; 2:2 uncertain fault; 1:1:1:1 multiple fault; variation memory; redundancy reconstruction

收稿日期: 2023-08-15; 修回日期: 2023-10-19

通信作者: 张永孝, yxz_facri@sina.com

引用格式: 张永孝. 飞控系统余度信号奇异故障处理策略研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(6): 1-13.

ZHANG Yongxiao. Research on singular fault handling strategies of redundant signals in flight control systems[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(6): 1-13. (in Chinese)

0 引言

电传飞控系统在完全取消了机械操纵链之后,由于电子器件所组成的单一电气信号传输系统的可靠性,无法同机械操纵链相比,不能满足飞行安全关键系统的飞控系统可靠性要求^[1-2]。只有当电传飞控系统的安全可靠性与机械操纵系统相近甚至更高时,电传飞控系统才能真正被广泛使用。目前,单套电气产品飞控系统的安全可靠性,仅能达到的水平是 $10^{-3}/\text{fh}\sim 2\times 10^{-3}/\text{fh}$,与机械操纵系统相比差上万倍。世界各国对电传操纵系统安全可靠性的最低要求:军用飞机 $1.0\times 10^{-7}/\text{fh}$,民用飞机 $1.0\times 10^{-9}/\text{fh}$ 。为了保证电传操纵系统的可靠性至少不低于机械操纵系统,电传飞控系统都采用了多重余度的体系架构。目前的电传飞控系统多数为数字飞控系统,一般选择四余度或超高可靠三余度配置,飞行员操纵传感器、飞机运动响应参数传感器、飞控计算机和伺服作动控制器等飞控系统功能部件,为满足军用飞机飞控系统安全可靠性要求 $1.0\times 10^{-7}/\text{fh}$,主要电子部件都选择四余度基本配置。

本文在大量项目实践的基础上,分析研究余度信号特征,总结提炼试验、试飞数据规律,创新设计数据结构,建立数学模型,揭示余度系统“两派对立、互不认可”没有多数的奇异故障规律,从基础原理的根本上证“变化量记忆、余度重构和极端信号大概率故障”奇异故障判据的科学可用性;利用MATLAB自带F14飞机线性模型,1s阶跃拉杆,5s设置迎角和俯仰角速率2:2不确定故障(次大、次小同时微小幅值向大的方向变化),进行表决器“次大、次大与次小均值、次小”表决与变化量记忆判据的“次大”表决飞机响应曲线对比。

1 余度管理

飞控系统采用余度体系结构,在多余度信号中控制律只能用一个信号,作为该信号输入参与控制律解算;在多余度信号中哪个信号正常,哪个信号故障,这些信号的工作状态,要及时在座舱多功能显示器上显示,为飞行员报告系统信号健康的状态;当数字飞控计算机失效后,系统重构到应

急备份控制模态,确保飞机的安全可控性,这就是飞控系统的余度管理。因此,余度管理是多余度通道信号的一致性故障监控、系统工作信号的选择表决与系统控制模态的安全转换。余度管理涉及的内容包括:

1) 传感器

俯仰、滚转、偏航角速率,纵向、横向、脚蹬杆位移,法向、侧向、水平过载,大气数据(动、静压),迎角、侧滑角。

2) 计算机

同步与同步监控,平尾、副翼、方向舵等输出指令监控,交叉通道数据链(CCDL)监控,A/D-D/A回绕检测,软件代码和检测。

3) 作动器

阀芯位移监控,舵机模型监控,SOV监控,电流监控。

显然,如果余度管理监控器算法策略不能准确识别定位故障,或者余度管理表决器表决算法没有鲁棒性,导致表决器包含故障信号输出,这种情况会影响飞控系统的功能、性能和安全可靠性。这时无论余度配置的等级高到什么程度,余度管理算法策略没有利用好余度资源,也没有发挥余度系统容错纠错的作用。因此,余度管理是影响飞机飞行品质和飞控系统安全可靠性不可小视地重要因素。

根据可靠性理论计算^[3],系统余度数目 m 与安全可靠性水平(与由飞控系统故障引起飞机的最大损失率 Q ,强相关)之间的关系如图1所示,可以看出:若电传飞控系统FBW(Fly by Wire)具有四余度配置,则故障率可满足飞控系统 $1.0\times 10^{-7}/\text{fh}$ 的安全可靠性要求,即不低于不可逆助力操纵系统可靠性。

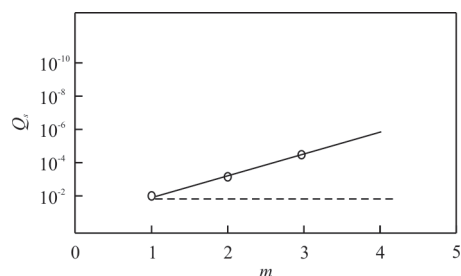


图1 失效率示意图

Fig. 1 Schematic diagram of inefficiency

数字电传飞控系统的安全可靠性在部、组件产品硬件确定的条件下,飞控软件的可靠性占据很大比例^[4],其中余度管理、控制律和机内自检测(BIT)等基本核心软件的数据结构和算法设计^[1],成为影响飞控系统安全可靠性的主要因素。不是所有四余度硬件配置都具有二次故障工作/三次故障安全的系统工作能力,也不是所有四余度系统架构设计都能满足飞控系统“ $1.0 \times 10^{-7}/\text{fh}$ ”安全可靠性指标要求,设计策略算法直接关系到飞控系统的安全可靠性水平。如果没有正确的故障监控和信号表决算法策略,将会错误地切除正常信号,引入故障信号进入控制律解算;也可能选择故障的计算机或舵机控制飞机运动,使飞机的操纵性、稳定性、机动性和敏捷性及飞行品质大打折扣,轻者出现事故征候,重者危及飞行安全^[5]。例如:算术平均值与中位数表决器算法设计,二者系统容错能力完全不同^[6-7]。算术平均值表决当余度信号存在故障时,表决值包含了故障信号,而中位数表决远离极端信号,鲁棒性好。同样,监控器的跨表决器监控与跨通道监控算法设计^[1],二者对余度信号的故障定位准确性也截然不同,跨表决器监控认为表决值是正确的标准,与之差值大者判定为故障,否则判定为正常;而跨通道两两比较监控是“相信多数”的大概率置信度的统计判据,四信号中其他三信号都判定某一信号故障,定义为该信号故障,可见大概率上跨通道监控比跨表决器监控准确率更高,漏检率、误检率更低。一个典型的案例是:当四余度信号发生2:2不确定故障,处理策略是访问该设备的在线自监控(In Line Monitoring,简称ILM),并依据ILM结果判定该设备正常与否,如果ILM结果与四信号两两比较监控的结果“成对性不一致”,结果是“错误的监控与表决”,“次大、次小”有一个是故障信号,其均值表决就是把故障信号引入系统参与控制律计算,这种情况严重影响飞机飞行品质并危及飞行安全,“二次故障工作/三次故障安全”无从谈起。因此,设计好的余度管理算法可以更好地利用系统配置的余度资源,实现四余度系统的二次故障工作/三次故障安全(FO/FO/FS)功能,提高系统的容错能力,进而提高系统的安全可靠性。

四余度信号发生2:2不确定故障,大概率是“一对正常、另一对故障”,但四余度两两比较监控算法,无法识别哪一对正常,哪一对故障。在工程

实际中通常访问该设备在线自监控,即以该设备在线自监控结果为判据判定信号的正常与故障。然而,四余度信号发生2:2不确定故障,一定是“最大、次大”一对,“最小、次小”一对,这是2:2不确定故障的客观事实;如果访问相应信号的自监控,出现了与两两比较监控成对性不一致的情况,比如“最大、次小”好、“最小、次大”好,甚至“最大、最小”好等成对性与客观事实相悖的情况,这时可以断定该信号在线自监控有问题,不能指望访问在线自监控定位故障。

当四余度系统发生2:2或1:1:1:1等奇异故障时,飞控系统总体设计策略上要有容错纠错能力,在基础原理科学理论指导下设计监控与表决算法,从系统设计的根本上提高系统的容错能力,保证正确地监控隔离故障信号,为系统提供稳健鲁棒的表决输入,提高飞控系统安全可靠性。

2 故障

余度管理的根本是对多余度信号故障的监控与表决。在多余度信号中知道哪个通道信号是正常的,哪个通道信号有故障,就可以为系统报告当前系统的健康状态,提示飞行员根据系统故障情况进行相应的控制与操纵。在正常通道信号的样本数据中,选择和计算正常通道样本信号的中位数作为表决值,为系统工作提供输入信号。

故障定义:在四余度信号两两比较监控时,如果一个通道信号与其他三个通道信号比较,都超过规定的幅值门限,且这种情况持续超过系统规定的时间门限,该通道对应信号发生故障。或者说,某通道的某信号正常,是指远程其他三个通道至少有一个通道与其比较监控时,未超过给定的幅值与时间门限。计算机硬件通道故障逻辑遵循同样的原则。可见,从信号故障定义上余度信号的两两比较监控,是从信号的结果特性上对四个通道的信号输出进行一致性比较监控,没有依赖信号自身设备的内部监控信息,不会因为该设备内部监控设计的缺陷和差错影响余度管理的正确性。

2:2不确定故障:四余度信号两两比较监控,出现两两成组成对,事实上只能是“最大、次大”一对,“最小、次小”一对,没有其他任何可能的情况,即四信号2:2不确定故障的成对性具有客观唯一

性。组对内信号比较监控未超门限,但两组对之间信号比较监控超出门限,这是一种“两派对立”的情况;客观上“一对是好的,另一对是不好的”,但两两比较监控无法确定“哪一对是好的,哪一对是不好的”,这种情况定义为四余度信号发生 2:2 不确定故障。

四信号 1:1:1:1 故障:四余度信号两两比较监控,任意通道信号与其他三个通道信号比较监控,结果都超出给定门限,出现了四余度各通道信号之间“互不认可”的情况,这种情况定义为四信号 1:1:1:1 故障。

当四信号发生 2:2 不确定故障或 1:1:1:1 故障时,两两比较监控无法确定哪些信号正常、哪些信号故障,需要借助表决值跟随性或参与表决的信号变化量一致性判据,确定余度信号的故障情况。也可以访问该设备/装置的在线自监控^[2],判定信号的故障情况。信号的自监控结果,只有“最大、次大”或者“最小、次小”成对的好或者成对的不好时,才能帮助系统选择“一对好的”信号参与表决,同时剔除“另一对不好的”信号定位故障。但如果 ILM 结果与两两比较监控 2:2 的成对性不一致,例如自监控结果是:“最大、次小”好、“最小、次大”好,甚至是“最大、最小”好或者“次大、次小”好等。显然,这几种情况两两比较监控已判定超出故障监控门限,与客观存在的事实相悖,此时可以断定在线自监控有问题,如果不相信在线自监控,可以采用余度重构判据判断信号的故障情况。

类似地可以定义三余度信号和二余度信号故障及其三信号 1:1:1 故障、二信号 1:1 故障。值得注意的是二余度信号比较监控,两个信号差值与门限比较,要么是未超门限的无故障;要么是超出门限“两派对立+互不认可”的 1:1 故障。

3 奇异故障

在四余度系统余度管理设计中,四余度信号出现“2:2 不确定故障、1:1:1:1 多故障”,三余度信号出现“1:1:1”多故障,或者二余度信号“1:1”故障等情况时,余度信号间两两比较监控结果“没有多数”,出现了偶数余度“两派对立”的四余度 2:2 不确定故障、二余度 1:1 等情况;或者无论偶数余度还是奇数余度所有通道信号之间“互不认可”的四余度 1:1:1:1、三余度 1:1:1 和二余度 1:1 等情况,把这种两两相互比较超出监控门限,互相认定

其他远程通道信号有问题,但又无法确定哪些信号故障的情况,称为奇异故障。由以上分析可以看出二余度 1:1 故障,既属于二余度的“两派对立”,又属于二余度的“互不认可”,因此最低余度配置等级二余度,奇异故障只有 1:1 一种模式。假设传感器采样信号 $s(t)$ 、故障监控门限 ϵ ,则四余度信号的“2:2 不确定故障、1:1:1:1 多故障”如图 2~图 3 所示。

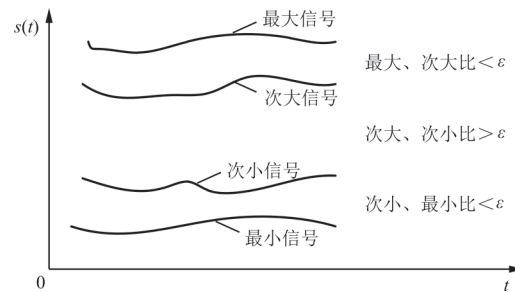


图 2 2:2 不确定故障
Fig. 2 2:2 uncertain fault

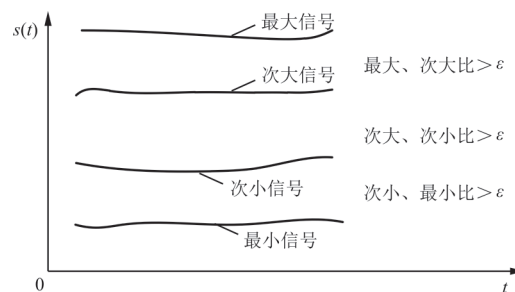


图 3 1:1:1:1 多故障
Fig. 3 1:1:1:1 multiple fault

因此,奇异故障包含了偶数分离的“两派对立”的不确定故障与多余度信号之间“互不认可”的多故障两种情况。奇异故障的出现给余度管理的故障监控和信号表决带来了困难,其余度管理策略直接影响系统余度资源利用。

4 表决

表决就是在多余度信号中,选择一个系统工作信号,为飞控系统控制模态选择提供有效的逻辑输入条件,为控制律指令解算提供鲁棒最优的输入信号^[8-10]。通俗地说,表决是在一组余度样本数据中,按照误差最小的度量原则,舍去极端故障信号,选取大小位于中间的稳健信号,估计计算一个这一组余度样本数据的参数,集中代表这一组余度样本数据,作为系统工作信号,这就是余度管理的表决。

1) 离散信号表决策略

多数一致表决原则,即多数为“0”就选“0”,多数为“1”就选“1”;当四余度离散信号2:2故障时,取系统规定的故障安全值^[11-12]。离散信号的“0/1”两态性决定了其表决监控同时进行。汇编语言可以采用变址操作的“散转分支”代码实现;C语言可以事先把四个通道的离散量对应设置到变量字节位,采用Switch、Case语句实现散转分支,每个分支唯一对应离散量“0/1”的个数,在其中选多数作为表决值,与表决值不一致的判为故障。

2) 连续信号表决策略

基于稳健统计推断理论,对采样样本数据的表决值进行最小化1-范数^[13]回归参数求解,得到的回归参数就是表决值最优估计。根据最小化1-范数定义,余度样本数据与表决值估计参数误差绝对值之和,就是余度样本采样与表决值的距离误差的1-范数,使得距离误差绝对值的和最小的参数,就是表决值的最佳估计。

根据中位数的定义,偶数余度信号的中位数通常是其信号数列排序后中间两个序列数的均值,或者基于信号趋势预测的中位数区间左、右端点的加权平均值;奇数余度信号的中位数是其信号数列排序后中间位置的那个数列项数值。具体就是:四余度信号次大、次小均值,或者次大、次小按信号变化率变化趋势的加权平均值;三余度信号选中值;二余度信号取均值,或者两个信号中的小信号、大信号,按信号变化率趋势加权平均。

特别指出:四余度信号出现“2:2,最大、次大,次小、最小”这三种瞬态故障时,次大或者次小至少有一个是故障信号,次大、次小的均值作为表决值就是把故障引入系统,这时次大、次小的均值不能作为表决值,当瞬态故障到永久故障的时间延迟较大时,严重影响飞机飞行品质及安全性。显然,“最大、次大”故障,次小作为表决值是好的选择;同理“次小、最小”故障,次大作为表决值是好的选择;对于2:2不确定故障,如果在线自监控结果与2:2不确定故障的“最大、次大”和“最小、次小”成对性不一致,参考奇异故障变化量记忆和余度重构判据,确定信号表决/监控结果。对于访问在线自监控的系统,如果在线自监控结果与2:2不确定故障的“最大、次大”和“最小、次小”成对性一致,这时选择在线自监控认为“好的”两个信号的均值作为表决值;更进一步的精确计算,可以在这“好的”两个信号中,根据其小信号和大信号的变

化量,加权平均计算表决值。

两余度信号如果比较监控超过门限发生瞬态故障时,可以访问相应信号在线自监控,在线自监控哪个好用,哪个不好用;也可以按两个信号中的小信号、大信号变化量趋势,对于两个信号变化量同向的情况,加权平均使其表决值更靠近趋势接近度高的信号;对于两个信号变化量方向相反以及其余情况,可以采用余度重构判据,在重构的三余度信号中,确定选择表决值与故障监控结果。

5 中位数表决

中位数定义:在给定的一组从小到大排列的数据 $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 中,按首尾相接配对的原则构建区间 $(S_1, S_n), (S_2, S_{n-1}), \dots, (S_i, S_j)$,当 n 为偶数时,共有 $n/2$ 个区间,其中: $i = n/2, j = n/2 + 1$;当 n 为奇数时,共有“ $\lfloor n/2 \rfloor$ 下取整”个区间,其中: $i = \lfloor n/2 \rfloor, j = \lfloor n/2 \rfloor + 2$ 。在数列 $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 首尾相接配对构建的所有区间中,任意一个大小属于以上所有区间中间位置的数值数据称之为这组数列 $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 的中位数,显然,中位数必须属于以上区间在几何上位居中心的正中间区间,中位数属于几何上的正中间区间自然也就属于以上所有区间。可见,中位数把一组有序数列 $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 分成比它大和比它小完全对等的两部分,即以中位数为分界点,比中位数大的数据个数与比中位数小的数据个数相等。显然,偶数数列中位数 $\mu \in [S_{n/2}, S_{n/2+1}]$ 有无穷多个,奇数数列有唯一的一个中位数,就是大小位于数列 $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 正中间的那个数。

设离散型随机变量的一组采集值从小到大排序的结果是 $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$,假设这一组样本数据的表决值为 μ ,则 μ 必然具有以下特性:

1) 代表性

μ 是这一组数据 $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 的集中代表,具有该组数据的基本属性和客观特征。用数学语言来说,就是 μ 与这组数据中的每一个数据的距离误差和最小^[14],其距离误差代价函数为 $\epsilon = \min_i \sum_{j=1}^n |S_j - \mu_i|$,即 μ 在所有表决值的参数估计中最接近这组数据。

2) 稳健性

μ 是这一组数据 $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 的稳健性代表,不随这组数据的故障信号波动, μ 一定在该组数据

大小位置的中间区域,远离最大和最小信号区域,即 μ 对极端区域的故障信号不敏感, μ 是稳健的。

显然,中位数 μ 把这一组样本序列分成:比 μ 小的一半部分和比 μ 大的一半部分,表决值的参数估计结果就是多余度样本的中位数,样本的中位数 μ 是随机样本最小化 1-范数回归参数最优解。因此,中位数是表决值的最优参数估计,是多余度样本数据的集中代表,远离极端信号、稳健性好。

根据中位数定义,奇数余度数据的中位数就是按数值大小排序位置在正中间的那个数,在奇数余度从小到大排列的数据 $\{S_1, S_2, \dots, S_i, S_{i+1}, S_{i+2}, \dots, S_{n-1}, S_n\}$ 中,其中, $i = \lfloor n/2 \rfloor$; 令: $S'_1 = S_n, S'_2 = S_{n-1}, \dots, S'_{\lfloor n/2 \rfloor} = S_{i+2}$, 显然, $\mu = S_{i+1}$ 为奇数余度唯一中位数,奇数余度中位数与每个余度样本数据距离误差绝对值和 $\epsilon = \sum_1^{\lfloor n/2 \rfloor} |S_i - \mu| + \sum_1^{\lfloor n/2 \rfloor} |S'_i - \mu| = \sum_1^{\lfloor n/2 \rfloor} (S'_i - S_i)$ 。而偶数余度数据没有正中间大小的样本数据,需要以表决值 μ 与每一个余度样本数据的距离误差和最小来求解。假设偶数 n 余度随机变量采样值:小于中位数 μ 的一半部分排序结果为 $\{S_1, S_2, \dots, S_i\}$, 大于中位数 μ 的一半部分排序结果为 $\{S_{i+1}, S_{i+2}, \dots, S_n\}$, 令: $S'_1 = S_n, S'_2 = S_{n-1}, \dots, S'_{n/2} = S_{i+1}$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n/2$, $\epsilon = \sum_1^{n/2} |S_i - \mu| + \sum_1^{n/2} |S'_i - \mu| = \sum_1^{n/2} (S'_i - S_i)$, 偶数余度数据的中位数位于这组余度数据大小位置中间两个数所构成的闭区间,即 $\mu \in [S_{n/2}, S_{n/2+1}]$ 。

偶数余度数据表决值 μ , 其取值不外乎下面三种情况:

1) μ 小于这组余度数据大小位置中间两个数的小值 $S_{n/2}$ (如图 4 所示)。



图 4 中位数小于区间左端点距离误差示意图
Fig. 4 Schematic diagram of median is less than distance error at the left end of the interval

μ 离中位数区间端点的距离误差绝对值和为 $|S_{n/2} - \mu| + |S_{n/2+1} - \mu| =$

$$S_{n/2} + S_{n/2+1} - 2\mu > S_{n/2+1} - S_{n/2} \quad (1)$$

2) μ 大于这组余度数据大小位置中间两个数的大值 $S_{n/2+1}$ (如图 5 所示)。

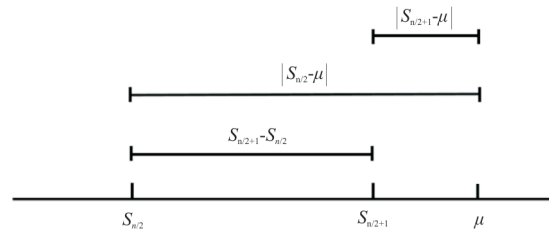


图 5 中位数大于区间右端点距离误差示意图
Fig. 5 Schematic diagram of median is larger than distance error at the right end of the interval

μ 离中位数区间端点的距离误差绝对值和为 $|S_{n/2} - \mu| + |S_{n/2+1} - \mu| =$

$$2\mu - (S_{n/2} + S_{n/2+1}) > S_{n/2+1} - S_{n/2} \quad (2)$$

3) μ 等于中位数, 即 $\mu \in [S_{n/2}, S_{n/2+1}]$ 位于这组余度数据大小位置中间两个数的区间 (如图 6 所示)。

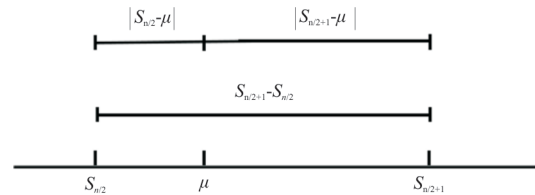


图 6 中位数位于区间内距离误差示意图
Fig. 6 Schematic diagram of median is in interval of distance error

μ 离中位数区间端点的距离误差绝对值和为 $|S_{n/2} - \mu| + |S_{n/2+1} - \mu| =$

$$\mu - S_{n/2} + S_{n/2+1} - \mu = S_{n/2+1} - S_{n/2} \quad (3)$$

同理, 奇数余度只有其大小位于中间位置的中位数离所有余度样本采样值的距离误差绝对值和最小^[3]。综上所述对于表决值 μ 的任何参数估计, 只有余度数据的中位数离所有余度样本采样值的距离误差绝对值和最小, 这个最小绝对值和为: $\epsilon = S_{i+1} - S_i + S_{i+2} - S_{i+1} + \dots + S_n - S_1$, 即大于中位数一半部分的最小减去小于中位数一半部分的最大, 大于中位数一半部分的次小减去小

于中位数一半部分的次大,……,直到整个数列的最大减去最小,这些差值的和就是大于中位数信号采样值之和减去小于中位数信号采样值之和,即所有余度数据与中位数的距离误差。

定理:对于任何一组从小到大排序的数列 $\{S_1, S_2, \dots, S_i, S_{i+1}, \dots, S_n\}$,只有该数列正中区间 (S_i, S_{i+1}) 中任何数值(中位数)离这组数据中的每个数据距离绝对值的和最小,这个最小距离绝对值的和为: $\epsilon = S_{i+1} - S_i + S_{i+2} - S_{i-1} + \dots + S_n - S_1$ 。

当然还有利用极值原理或其他数学理论方法,可以证明余度信号的中位数表决是最佳表决策略。根据数学理论分析,余度样本的中位数就是余度数据1-范数最小的最佳参数估计^[12]。样本的中位数是多余度信号的集中多数的代表,因此常以多余度样本信号的中位数作为表决值。以余度样本信号的中位数作为标准,通道间信号的离散度总和最小,中位数远离最大、最小或野点、跳变信号,中位数反映了余度数据的多数集中特征属性。

推论:多余度 n 通道离散型随机样本的中位数 μ ,使随机变量观测值与中位数距离绝对值之和最小,中位数是余度样本数据的最优参数估计;中位数位于样本观测值的中间位置,远离最大、最小信号区域,中位数的稳健性好。因此,样本中位数是余度系统表决值的最佳选择。

以系统工作周期控制律输出指令转换瞬态小,关注飞行品质规范要求为重点,设计表决器表决策略。基于统计学稳健推断原理分析,中位数位于样本数据的中间位置,远离最大、最小两端极值边界的故障信号区域;中位数位于数据序列大、小顺序上的中间位置,说明它是鲁棒的,对信号的野点、跳变、尖峰、噪声和干扰等不敏感。因此,在余度通道的样本信号中选择中位数作为表决器表决值是系统工作信号的最佳选择。

6 “两派对立”变化量记忆判据

从奇异故障的概念出发,分析与研究奇异故障的本质规律,提取特征设计故障判据的数理逻辑。奇异故障是两两比较监控结果“两派对立、互不认可”没有多数的故障情况。但无论什么情况,故障一定是偏离系统工作信号,数学理论已经证明:余度信号中位数是表决值的最佳参数估计。

因此,偏离系统的工作信号就是偏离信号表决值,即信号与表决值的跟随性差;“两派对立、互不认可”的信号都有信号变化的共性。由中位数定义与计算式可知,参与信号表决的信号或者说对表决值有贡献的信号,是“两派对立、互不认可”各类信号的代表。如果这些信号代表又有变化量“同时变大或者同时变小”的一致性,利用信号代表变化量的一致性推测大信号好、还是小信号好;如果某个信号变化趋势偏离信号代表变化趋势的一致性,即该信号变化趋势与信号代表变化趋势不一致,就可以判定该信号故障。因此,尽管奇异故障“两派对立、互不认可”,但是参与表决的信号各方代表又有变化量“同时变大或者同时变小”的一致性,据此可以设计变化量判据,识别判定奇异故障。

对于四信号而言,当次大、次小离散度在一定范围内,表决值计算也采用了次大、次小变化量一致性原则策略,因此,参与表决的信号变化量也是表决的依据,表决值跟随性与变化量跟随性一致同源。奇数余度信号与表决值的跟随性除按中位数变化量大小衡量外,也可以直接用信号与表决值的差值大小来衡量,二者结果相同。但偶数余度表决值的跟随性不能直接用信号与表决值的差值大小来衡量,因为多数情况下,偶数余度信号表决值为排序位于中间位置两信号的均值,均值离这两信号的距离相等,即这两信号与表决值的跟随性一样,哪个好、哪个不好难以取舍。综上所述,以信号与表决值的跟随性及信号与信号“代表”变化量一致性为判据定位奇异故障,把“两派对立、互不认可”没有多数的不确定变成“伯仲分明、可以定位”的确定。

当余度信号出现以上定义的奇异故障时,基于信号的表决值跟随性原理,依据参与表决信号的变化量趋势,判断信号的故障情况。依据是:四信号“次大、次小”变化量;三信号“中值与非中值”差值;两信号“小信号、大信号”变化量等,即根据偶数余度信号与参与表决值运算信号变化量趋势或奇数余度信号与中位数跟随性的迎合关系,判断信号的故障情况。假设四信号从大到小排序结果依次为: \max 、 \max_- 、 \min_+ 、 \min ,参考信号 ref ,四信号“次大、次小”变化量判据逻辑流程如图7所示。

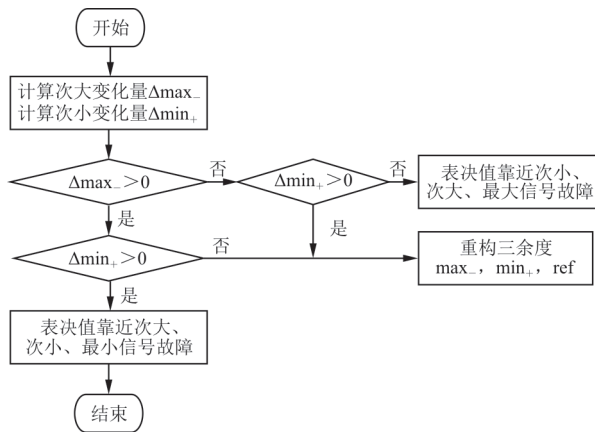


图7 “次大、次小”变化量判据逻辑图

Fig. 7 Logic diagram of the criterion for "second largest and second smallest" changes

对于偶数余度,如果参与表决信号的变化量与信号本身成正对应关系,判定该类信号正常;否则,参与表决信号的变化量与信号本身成反对应关系,判定该类信号故障。对于奇数余度,如果信号离中值距离近,判定该信号正常;否则,信号离中值距离远,判定该信号故障。具体算法逻辑如下:

1) 四信号“最大、次大”和“最小、次小”成对的2:2不确定故障,如果“次大、次小”变化量都大,判定“最大、次大”一对正常,另一对“最小、次小”故障;反之,如果“次大、次小”变化量都小,判定“最小、次小”一对正常,另一对“最大、次大”故障。

2) 两信号1:1故障,在这两信号中比较大小,利用这两个信号的大信号变化量和小信号变化量的变化趋势,判定信号的故障情况。如果两信号变化量都大,判定大信号正常、小信号故障;反之,如果两信号变化量都小,判定小信号正常、大信号故障。类似四信号“次大、次小”变化量判据,逻辑流程如图7所示。

注意:这里的“次大、次小”是指每个周期内的“次大、次小”,不具体对应信号所在的通道,关注的是信号排序后排序信号的变化趋势;但判定定位故障时需要与四信号的“最大、次大,最小、次小”及两信号的“大信号、小信号”所在的通道号对应。对于四信号2:2及两信号1:1中“大、小”信号变化量出现“一个大、另一个小”的变化趋势不一致情况,需要寻求其他方法解决问题,比如引入解析余度信号或其他信息源参考信号,重构余度形

式重新进行余度管理;或者利用计算机通道故障逻辑辅助处理等。

记忆是指在“不用存储上上拍以及更前拍信号,只记录本拍和上拍信号值”的情况下,设计特殊的数据结构,计算机字节位DX的“1/0”表示信号变化量“大/小”,每增加一个新的系统工作周期,变化量字节位左移一位,D0位始终保持当前拍信号变化量大/小,这样随着系统工作周期递增前推,一直循环下去就可以知道连续 n 拍的信号变化量大/小。即如果本拍信号值大于上拍时,D0位置为1,否则,D0位置为0;系统运行进入下一个工作周期时,D0位左移一位变成D1位,当前拍信号值再与上拍值比较,同样的方法设置D0位的“1/0”状态,依次循环直到满足系统规定的变化量变化过程需要的连续拍数,这样表示信号变化量的计算机字节VDB就具有记忆功能。也就是设置信号变化量字节“本拍D0、上拍D1、上上拍D2……”,只记录存储本拍和上拍信号值,就能确定信号连续 n 拍的变化过程趋势,为余度管理奇异故障的表决和监控提供科学有效的依据。

如上所述,只是笼统性地地说信号变化量,没有具体地说是一拍、两拍、三拍还是四拍等几拍变化量。然而,在工程实际中,计算本周期与上周期“一拍”的变化量,通常不能反映信号本身变化趋势;需要往前递推,计算上周期与上上周期“上一拍”的变化量,这样一来,似乎需要存储“上上拍、上拍、本拍”的信号值;如此向前递推,如果要观察信号连续 n 拍的变化过程,该信号就得 $n+1$ 倍的存储,存储空间需求剧增,连续 n 拍变化量的计算量剧增,软件的时间、空间开销剧增。这种严重影响系统运行效率的情况,使工程师们望而却步,工程师们第一反应“太复杂、计算量大”,权宜之计选择了信号自监控,作为信号监控和表决的依据,但当自监控出现“最大、最小正常,次大、次小故障”,“最大、次小正常,最小、次大故障”或者“最大、次小故障,最小、次大正常”等与2:2故障“最大、次大,最小、次小”成对的客观事实相悖情况时,自监控失去参考价值。

数学是为解决实际工程问题而存在和发展的,工程项目应用中只需要知道信号变化量大小的趋势,不需要具体变化量的数值,而变化量大小

具有计算机二进制数字“1/0”的两态性。假设信号变化量大为“1”,变化量小为“0”,变化量缺省为“0”,设计“一拍、二拍、三拍……”信号变化量“1/0”的数字信息对应到计算机字节位,即假设1~8拍变化量字节VDB分别为D7、D6、D5、D4、D3、D2、D1、D0,工程实际应用时,一般取3~5拍来观察信号变化过程趋势,本章节选择3拍变化量研究与其真实信号趋势合拍关系,这时VDB分别为0、0、0、0、D2、D1、D0,其可能的取值情况如表1所示。

表1 信号变化量字节取值情况
Table 1 Signal change byte value situation

序号	D7~D3	D2	D1	D0	十六进制值	物理含义
1		0	0	0	0	3拍变化量都小
2		0	0	1	1	上2拍变化量小 本拍变化量大
3		0	1	0	2	上拍变化量大 本拍和上上拍变化量小
4	缺省 为0	0	1	1	3	本拍和上拍变化量大 上上拍变化量小
5		1	0	0	4	上上拍变化量大 本拍和上拍变化量小
6		1	0	1	5	本拍和上上拍变化量大 上拍变化量小
7		1	1	0	6	上拍和上上拍变化量大 本拍变化量小
8		1	1	1	7	3拍变化量都大

显然,当VDB为0时,连续3拍变化量都小;当VDB为7时,连续3拍变化量都大;当VDB不为0和7的其他情况,3拍内变化量的变化有大有小不连续,对于变化量表决监控来说,属于不可用数据。C语言编程中采用Switch、Case开关语句,很容易实现变化量连续变化过程的识别。

由以上变化量“大/小”的二进制“1/0”位映射函数数学模型,连续观察 n 拍信号变化量,无须存储 $n+1$ 拍信号数据,无须计算 n 次 n 拍信号变化量;在每个系统工作周期内,只需要进行本拍与上拍信号大小的比较,将其“本拍大于上拍的1或者本拍不大于上拍的0”写到对应字节位即可。每增加一次小帧计数器,变化量结果“1/0”依次向前递推,变化量字节VDB向左移一位。当需要 n 拍信号变化量结果时,变化量字节VDB向左移 n 位,即

VDB的有效位永远都是 n 位,其余位全为0,记忆小帧计数器逢 n 刷新清0。

在飞控系统工程应用的实际中,需要几拍的变化量过程,与信号特性及飞行状态有关,原则上本拍与上拍变化量不大时,看一拍变化量即可;但当本拍与上拍变化量较大时,需要看前几拍的变化量趋势,就是说根据本拍与上拍变化量大小,变化过程可变长短。计算机一个字节8位可以表示连续8拍变化量过程,事实上在飞控系统设计中,对于任何信号的连续变化过程选取3~5拍足够了,因为四信号2:2和1:1:1:1故障时延通常为8~12拍,这样选4拍信号连续变化过程的话,2个4拍的连续变化量相当于连续8个系统工作周期,达到了四信号2:2和1:1:1:1故障时延,具体选择几拍信号的连续变化过程,需要结合信号特性、飞行状态和该信号故障时延综合考虑。

7 “两派对立”变化量不一致的余度重构判据

当四信号“次大、次小”及两信号中“大、小”信号变化量出现“一个大、另一个小”的变化趋势不一致情况时,四信号的次大、次小以及两信号的大小信号,其信号大小变化趋势方向截然不同,这时不能简单地取“次大、次小”均值或两信号的均值。需要引入解析余度信号或其他信息源参考信号,重构余度等级形式重新进行余度管理。

例如俯仰角速率2:2并且其“次大、次小”信号数值变化量方向相反时,利用迎角与俯仰角速率传递函数关系 $\frac{\alpha}{\omega_z} = \frac{k}{S + Y^a}$,估计解算出俯仰角速率信号。飞行力学原理表明:俯仰角速率超前于迎角,因此当迎角信号正常时,可以用迎角表决值的超前(高通)滤波代替俯仰角速率,高通滤波器的增益和时间常数需要按重心位置和飞行状态动态调参^[5];也可以引入惯导的俯仰角速率信号,并对其安装位置引起的信号误差和与飞控系统时序匹配性关系等进行相应的协调处理。以此作为俯仰角速率参考信号ref,与次大、次小一起构成新的三余度信号,重构俯仰角速率四余度为“次大、次小、俯仰角速率参考” $\{\max_-, \min_+, \text{ref}\}$ 三余度,按三余度余度管理处理。具体设计思想如图8所示。

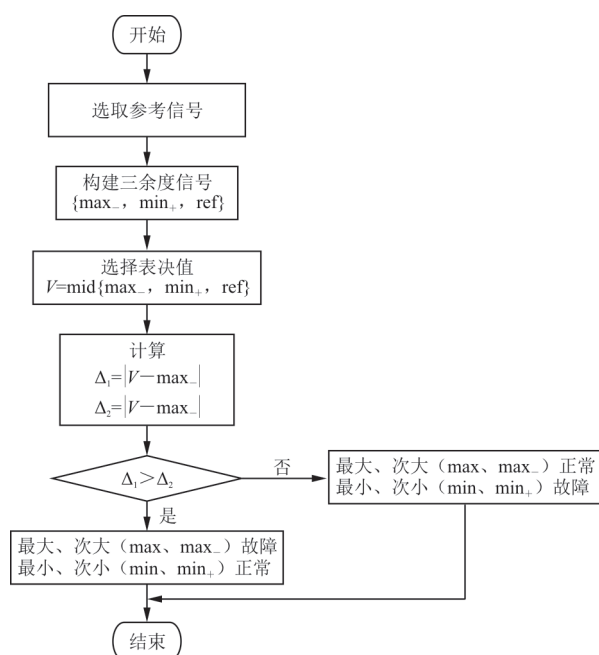


图8 变化量不一致情况下重构冗余判据示意图

Fig. 8 Schematic diagram of reconstruction redundancy criteria under inconsistent changes

在“次大、次小、俯仰角速率参考”三信号中选中值，“次大、次小、俯仰角速率参考”任何一个都可能是这三个信号的中值，因此当次大为中值时，判定“次小、最小”信号故障；当次小为中值时，判定“次大、最大”信号故障。事实上可以证明，这个中值就是“原四信号+俯仰角速率参考”五冗余信号的中值，因此，俯仰角速率参考信号的加入，建立了新的冗余体制架构，从概念定义上解决了原四冗余2:2不确定故障问题。

笼统地说，“次大、次小”与中值比较，哪个离中值近判定哪个所在一对的两个信号正常；“次大、次小”与中值比较，哪个离中值远判定哪个所在一对的两个信号故障；当三信号的中值为俯仰角速率参考信号时，“次大、次小”两对与中值比都超门限，判定四信号全故障。在此需要说明的是俯仰角速率参考信号就只是参考，不参与故障识别与报告，但对其与“次大、次小”比较监控的结果，可以作为俯仰角速率参考信号可用性判据，为参考源的故障记录或者故障重构提供条件。

当俯仰角速率两信号1:1并且两冗余“大、小”信号变化量方向相反时，选择俯仰角速率参考信号，在“大、小、俯仰角速率参考”三信号中选中值，显然，“原两信号+俯仰角速率参考”新的三冗余的中值作为故障判据，从原理上排除了两信号1:1

故障模式，把两信号1:1的不确定变成了“远离中值故障、靠近中值正常”的确定；“大、小”信号哪个与中值比超出监控门限，判定哪个信号故障；“大、小”信号哪个与中值比未超出监控门限，判定哪个信号正常；当俯仰角速率参考为中值，“大、小”两个信号与中值比都超门限，判定两信号全故障；反之，两个信号与中值比都未超出门限，判定两信号全正常。

8 “互不认可”多故障的极端信号大 概率故障判据

1) 四信号1:1:1:1多故障

基于信号与表决信号跟随性原则，根据“最大、最小信号故障概率远高于次大、次小信号故障概率，四信号同时发生两次故障的概率高于四个信号全故障的概率”的事实，四信号1:1:1:1多故障处理判定最大、最小信号故障。

如果确实四信号全故障的事实出现，在切除最大、最小信号后，冗余管理重构为次大、次小两冗余，在次大、次小的两冗余冗余管理比较监控时，自然会判定次大、次小都故障并予以切除。

2) 三信号1:1:1多故障

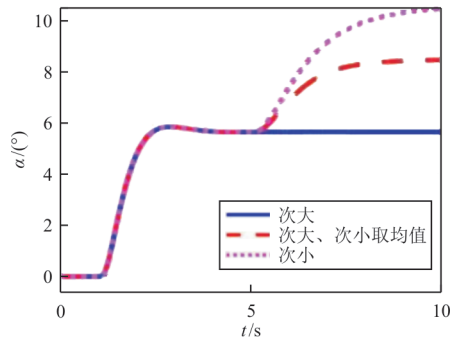
基于信号与表决信号跟随性原则，根据中位数表决定理，中值信号是冗余信号的最佳表决，因此中值信号是正常无故障信号，可以以中值信号作为比较监控的标准，三信号的其他两个信号以“近中值者好，远中值者坏”为判据来故障监控。

根据三信号的“一次故障、二次故障”概率高于三个信号全故障概率的事实，在三信号的两个非中值信号中判定“中值信号和离中值近(在监控门限范围内)的非中值信号正常，离中值远(超出监控门限)的非中值信号故障”，显然，两个非中值信号都离中值远时，判定这两个非中值信号都故障，即三信号1:1:1多故障模式，判定超出监控门限离中值远的非中值信号故障。

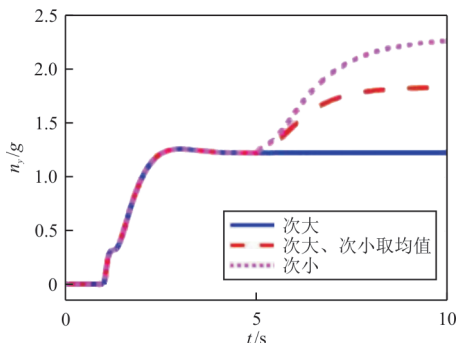
9 MATLAB仿真

利用MATLAB自带F14飞机线性模型，1s阶跃拉杆，5s设置迎角与俯仰角速率2:2不确定故障，次大和次小同时向大的方向微小变化，进行表决器“次大、次小、次大与次小均值”三种表决飞机响应曲线对比，表决策策略MATLAB仿真飞机响应

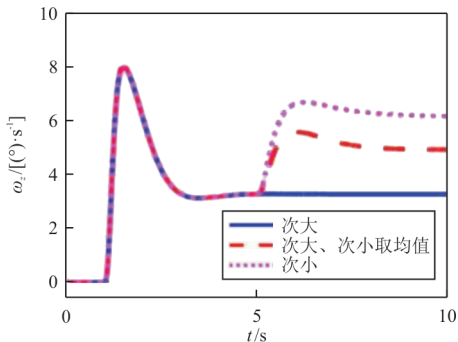
曲线如图 9~图 12 所示,其中 α 为迎角、 n_y 为过载、 ω_z 为俯仰角速率、 δ_z 为平尾偏度。



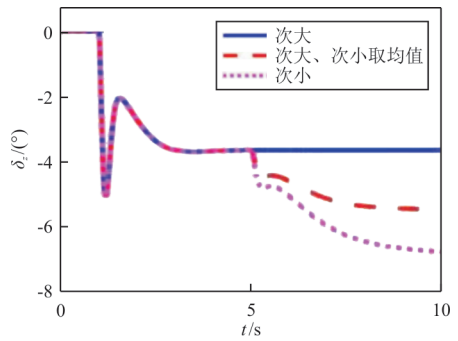
(a) 迎角



(b) 过载



(c) 俯仰角速率



(d) 平尾偏度

图 9 迎角三种表决飞机响应
Fig. 9 Three kinds of voting aircraft response of attack angle

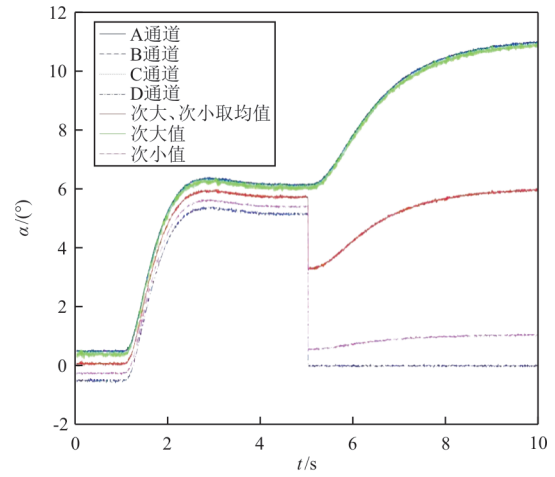
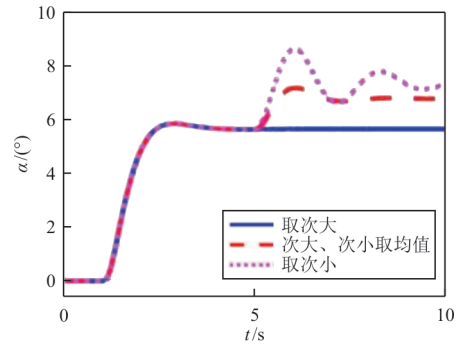
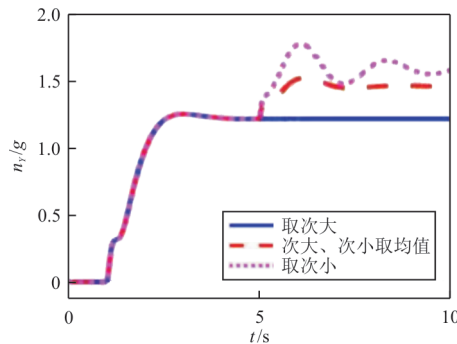


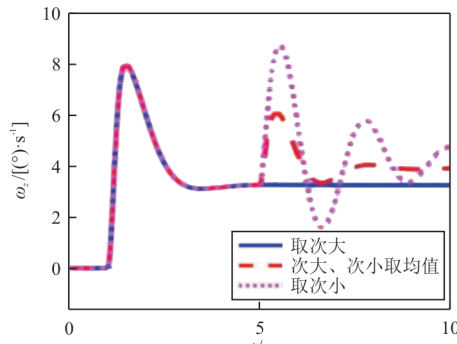
图 10 迎角四冗余信号与三种表决策略曲线
Fig. 10 Four redundancy signal and three voting strategy curves of attack angle



(a) 迎角



(b) 过载



(c) 俯仰角速率

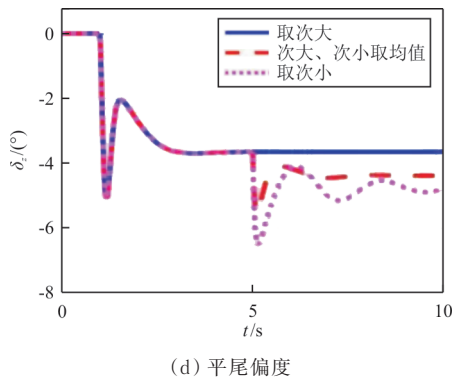


图 11 俯仰角速率三种表决飞机响应
Fig. 11 Three kinds of voting aircraft response of pitch angle rate

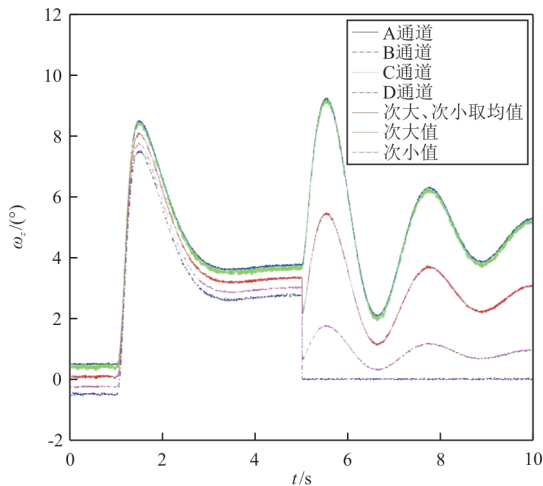


图 12 俯仰角速率四冗余信号与三种表决策略曲线
Fig. 12 Four-redundancy signal and three voting strategy curves of pitch angle rate

从图 9~图 10 可以看出:迎角 2:2 不确定故障,在三种表决(次大、次大与次小均值、次小)策略中,从飞机响应的故障瞬态、振荡超调和稳定性来看,采用变化量记忆判据的“次大”表决,飞机响应无故障瞬态、无超调、稳定性好。从图 11~图 12 可以看出:俯仰角速率 2:2 不确定故障,控制律计算采用“次小”作为输入信号,飞机响应呈发散趋势;控制律计算采用“次大、次小”的均值作为输入信号,飞机响应故障瞬态大、振荡超调大、稳定性差;与迎角信号一样,采用变化量记忆判据的“次大”表决,飞机响应无故障瞬态、无超调、稳定性好。同样,可以采用 MATLAB 数学仿真验证“次大次小向小的方向微小变化选择次小表决”飞机响应情况,以及余度重构判据和多故障的极端信号大概率故障判据的有效性。

10 结束语

数字飞行控制系统在整个飞行包线范围内实现对飞机安全、有效的控制,实现飞行员操纵指令与飞机运动参数(飞机响应)的控制,从而使飞控系统控制由原来机械操纵系统的“杆—舵”对应,转变为现在数字飞控系统的“杆—响应”对应的面向飞机响应的控制。其飞行品质的改善与提高主要取决于飞行控制律的设计,数字电传飞控系统是以控制增稳(CAS)为基础,具有指令前馈和飞机运动响应反馈的闭环控制系统。但无论是飞行员操纵杆位移的前馈,还是俯仰、滚转、偏航角速率,法向、水平、侧向过载,迎角、侧滑角等飞机响应的反馈,这些都是飞机飞行控制律的输入信号,这些信号余度管理的好坏直接影响控制律的功能和性能,余度管理算法设计的不当,不仅不能发挥余度资源的可靠性提高作用,反而会降低系统可靠性,甚至错误的算法策略直接危及飞行安全。

在飞控系统中,迎角、侧滑角、三轴加速度是改善飞机静稳定性的信号,三轴角速率是改善飞机动稳定性的信号,三轴杆位移是改善飞机操纵性的信号,大气数据的动、静压信号是控制律调参及控制律模态转换的重要依据,这些传感器都是影响飞机飞行品质和飞行安全的关键信号。因此,对其出现的奇异故障需要从基础原理的根本问题上解决问题,才能保证飞控系统功能的正确实现,从根本上提高飞控系统的安全可靠性。本文以工程实践和基础原理的科学理论为基础,给出了飞控系统奇异故障的系统解决方案。

参考文献

- [1] 宋翔贵,张新国. 电传飞行控制系统[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
SONG Xianggui, ZHANG Xinguo. Fly-by-wire system [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 刘林,郭恩友. 飞行控制系统的分系统[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
LIU Lin, GUO Enyou. Subsystem of flight control system [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [3] 张永孝. 基于标准件的重构式容错飞控软件技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2000.

- ZHANG Yongxiao. Research on reconfigurable fault tolerant flight control software technology based on standard components for flight control system subsystems [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2000. (in Chinese)
- [4] 张永孝. 电传飞控余度管理的矩阵理论及其工程实现[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(s2): 263-268.
- ZHANG Yongxiao. Matrix theory and engineering in redundancy management of fly-by-wire flight control system [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(s2): 263-268. (in Chinese)
- [5] 李利春. 随控布局[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- LI Lichun. Follow layout [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984. (in Chinese)
- [6] KONSTANZER P, ENENKL B, AUBOURG P A, et al. Recent advances in Eurocopter's passive and active vibration control[C]// The American Helicopter Society 64th Annual Forum. Montreal: American Helicopter Society, 2008: 1-7.
- [7] 马立群, 杨士斌, 石林轩. 民用直升机电传飞控系统适航专用条件分析[J]. 航空工程进展, 2021, 12(3): 20-28.
- MA Liqun, YANG Shibin, SHI Linxuan. Analysis on airworthiness special conditions of civil helicopter fly-by-wire flight control system [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(3): 20-28. (in Chinese)
- [8] PULLUM L L. Templates for software fault tolerant voting on results of floating point arithmetic[C]// Proceeding of the 1993 AIAA Computing in Aerospace Conference. USA: AIAA, 1993: 522-530.
- [9] TONG Z, KAIN R Y. Vote assignments in weighted voting mechanisms [J]. IEEE Transactions on Computers, 1991, 40(5): 664-667.
- [10] GASTON C A. A better way to vote [C]// Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference. Hawaii: IEEE, 2005: 117c.
- [11] CAVALLARO, JOSEPH R, WALKER IAN D. A survey of NASA and military standards on fault tolerance and reliability applied to robotics [C]// Proceedings of the 1994 AIAA/NASA Conference on Intelligent Robots in Field, Factory, Service, and Space. USA: AIAA, 1994: 282-286.
- [12] 李尚志. 线性代数[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- LI Shangzhi. Linear algebra [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [13] 程云鹏. 矩阵论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994.
- CHENG Yunpeng. Matrix theory [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1994. (in Chinese)
- [14] 李岳生, 黄友谦. 数值逼近[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978.
- LI Yuesheng, HUANG Youqian. Numerical approximation [M]. Beijing: People's Education Press, 1978. (in Chinese)

作者简介:

张永孝(1962-),男,硕士,研究员。主要研究方向:飞机电传飞控系统研制。

(编辑:丛艳娟)