

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.02.017

## 电控旋翼传感器系统余度设计及表决算法研究

王恒国 陆洋

(南京航空航天大学直升机旋翼动力学国家级重点实验室,南京,210016)

**摘要:**电控旋翼通过电作动器驱动伺服襟翼偏转,通过气弹作用带动桨叶变距,从而实现旋翼操纵。为提高电控旋翼传感器系统的可靠性,文中以模型电控旋翼系统为对象,提出了一套非相似三余度传感器系统方案;进一步提出了一种改进的表决算法,该算法通过将基于 LMS 算法的预测值引入表决中,使三余度传感器系统在出现两路随机故障时仍能够有效判别正常信号,从而提高了系统的可靠性;通过仿真验证了该改进表决算法的可行性;最后通过对襟翼传感器的试验研究,证明了所提出的余度设计方案及表决算法的有效性。

**关键词:**电控旋翼;余度设计;表决算法;非相似余度

**中图分类号:**V241.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2015)02-0290-06

## Research on Sensor System Redundancy Design and Voting Algorithm of Electrically Controlled Rotor

Wang Hengguo, Lu Yang

(National Key Laboratory of Science and Technology on Rotorcraft Aeromechanics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Electrically controlled rotor changes blade pitch through trailing flap deflection, so as to realize the primary control of the rotor. The reliability of the electricity system is lower than the traditional mechanical systems. Thus, in order to improve the reliability of the sensor system of electrically controlled rotor, a set of non-similar triplex redundant sensor system program is brought forward based on model electrically controlled rotor. Then an improved voting algorithm is performed, which can improve the fault tolerance of the sensor system. Simulation results show the validity of the improved algorithm. Finally, experiments are conducted based on flap sensors, and the results show that the designed scheme and the improved voting algorithm can effectively improve the reliability of the sensor system.

**Key words:** electrically controlled rotor; redundant designed; voting algorithm; non-similar redundancy

电控旋翼是于 21 世纪初提出的一种新型旋翼操纵系统。电控旋翼控制系统工作方式如图 1 所示,襟翼角度传感器信号经弱电滑环进入模拟数字转换器(Analog-to-digital converter, ADC),主操纵系统控制器数字信号处理器(Digital signal processor, DSP)读取操纵指令、光电码盘反馈的方位角信号及 ADC 采集的襟翼角度信号后,经控制算

法计算得出襟翼的期望偏角,经数字模拟转换器(Digital-to-analog converter, DAC)转换后经弱电滑环将信号传至作动器控制器,控制作动器带动襟翼偏转,通过气弹作用改变桨叶的桨距,从而实现对旋翼的总距和周期变距操纵<sup>[1]</sup>。

由此可见,电控旋翼控制系统中包含的电子器件多,系统较为复杂,其各角度传感器、电作动器等

基金项目:国家自然科学基金(51375229)资助项目。

收稿日期:2015-01-15;修订日期:2015-02-15

通信作者:陆洋,男,副教授, E-mail:luyang@nuaa.edu.cn。

本文已收编于2014年全国直升机年会内部交流论文集。

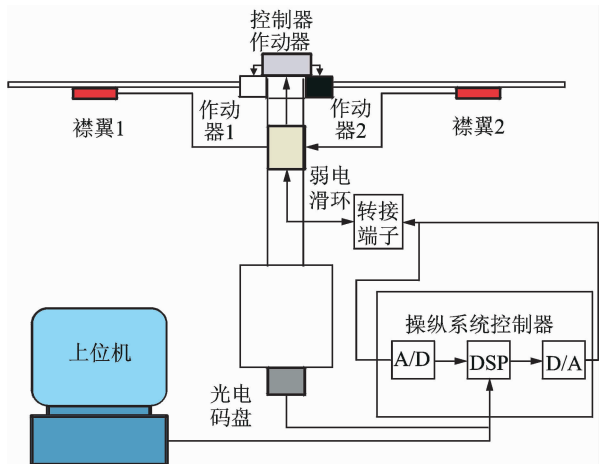


图 1 电控旋翼控制系统工作原理框图

Fig. 1 Electrically controlled rotor control system

重要电气部件均工作在强离心场和恶劣的振动环境中;更重要的是,由于电控旋翼用电气系统取代了传统的以机械操纵线系为主的自动倾斜器操纵系统,用以实现直升机最为重要的总距和周期变距操纵,一旦发生故障,将直接威胁飞行安全,甚至导致机毁人亡。一般而言,电气系统的可靠性不如机械操纵系统,因此电控旋翼的可靠性就成为系统设计中必须认真面对和考虑的问题。为提高电控旋翼操纵系统的可靠性,可采用余度技术。在无人机等领域,余度技术已经广泛地应用于飞行控制系统中<sup>[2-5]</sup>。在进行电控旋翼操纵系统余度设计时,可参考其设计方法。

完整的电控旋翼操纵系统余度设计应包括传感器、控制器和作动器的余度设计,本文仅针对传感器余度设计部分进行介绍进行研究。文中以课题组研制的模型电控旋翼系统(见图 2)为对象,提出适合的传感器余度设计方案,并通过仿真和试验验证其可行性和有效性。



图 2 模型电控旋翼系统

Fig. 2 Model electrically controlled rotor system

# 1 电控旋翼传感器余度系统方案设计

一般而言,要构成余度系统至少需要三路传感

器信号<sup>[6]</sup>。模型电控旋翼有两片桨叶,每片桨叶的后缘襟翼处安装有两个霍尔角度传感器,用于测量襟翼偏角;每片桨叶根部内嵌一个电作动器,通过操纵线系控制襟翼运动。电作动器由作动器控制器控制,同时作动器控制器在特定模式下可将作动器角度传感器输出的角度值以相对式编码器的方式输出。由于作动器运动角度和襟翼偏角具有固定的比例关系,因此可以将作动器的角度按该比例处理后与两个霍尔角度传感器组合在一起形成非相似三余度角度传感器。

本文即基于这两路霍尔传感器信号、一路编码器信号设计一套非相似三余度传感器方案,此方案的优点在于无需重增加硬件设备,又可避免余度传感器出现共性故障而导致系统无法工作,图 3 给出了模型电控旋翼的非相似三余度传感器系统设计方案框图。

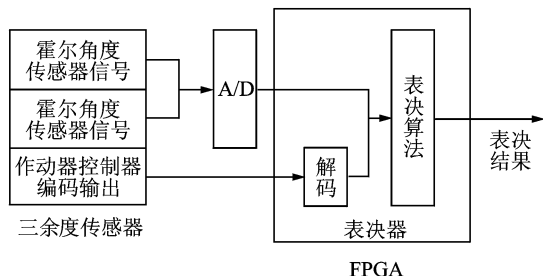


图 3 模型电控旋翼非相似三余度传感器系统方案

Fig. 3 Scheme of non-similar triplex redundancy sensor system for model electrically controlled rotor

从图 3 可以看出,传感器余度系统的输入信号为两路模拟信号和一路编码器信号,经表决器表决得出正确的襟翼角度值,输出到后续的操纵系统控制器 DSP 中作为襟翼角反馈。选择现场可编程门阵列(Field-programmable gate array, FPGA)作为表决器硬件,其优势在于:可靠性高于单片机、DSP 等处理器;作为逻辑器件更适合用于解码、表决等任务;此外,由于 FPGA 是并行器件,在执行 ADC 采集信号等任务时速度更快。

## 2 表决算法设计

表决算法能够区分余度信号中故障与正常信号,并将故障信号加以屏蔽,将正确信号传输至后续模块。

### 2.1 传统三余度表决算法

传统的三余度比较表决策策略首先进行排序,即将 3 个余度的信号按值的大小排序,依次得到最

大值(max)、中间值(mid)和最小值(min);然后对每两路信号求差,分别得到最大值与最小值的差值、最大值与中间值的差值及中间值与最小值的差值;最后将各差值与预设的门限值进行比较,首先考虑概率最大的事件是三余度信号均有效,即先比较最大值与最小值的差值和阈值的关系,若差值小于阈值则三信号均有效;否则,依次比较最大值与中间值的差值、中间值与最小值的差值和阈值的关系,并最终确定各余度信号的状态<sup>[7]</sup>。该算法流程如图4所示。

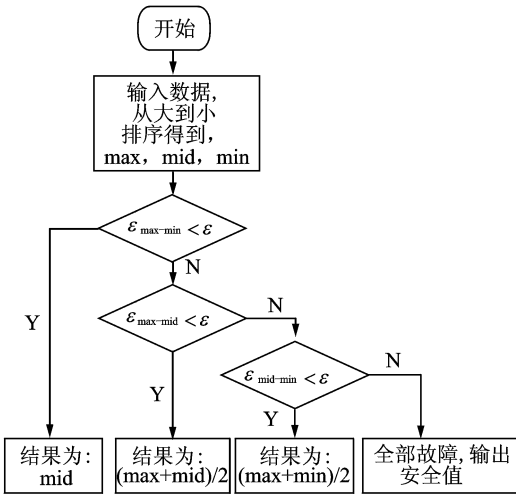


图4 传统三余度表决策略流程图

Fig. 4 Flow chart of traditional three-redundant voting strategy

对相邻信号值进行比较所对应的信号状态如表1所示。该表中,0表示差值没有超出门限阈值,1表示差值超出门限阈值,“—”表示差值与阈值对比为任意状态。

表1 传统三余度表决策略故障定位

Tab. 1 Fault location of traditional three-redundant voting strategy

序号	最大值与最小值差值	最大值与中间值差值	中间值与最小值差值	故障定位
1	0	—	—	3信号均正常
2	1	0	0	3信号均正常
3	1	0	1	最小信号故障
4	1	1	0	最大信号故障
5	1	1	1	3信号均故障

需要特别指出的是,表1中第5种情况包含两种可能,即三路信号均故障和一路正常、两路故障。当三余度信号中只有一路正常时,传统策略无法有效辨别出该正常信号,而将该情况笼统的归为全故障状态,输出安全值。这是传统表决算法的一个明

显缺陷。为解决此问题,本文提出了一种能够有效辨别出正常信号的改进算法,从而提高了传感器余度系统的可靠性。

2.2 改进的余度表决算法

改进算法的基本思想是:引入传感器信号预测值,将各路余度信号与之进行比较,当三余度系统出现两路故障时,判断与预测值最接近且未超过阈值的信号即为正确信号。

2.2.1 预测值引入

故障的一个基本特征是它的随机性,即故障信号会出现突变现象。而电控旋翼的控制周期很短,襟翼的状态变化可近似视为连续变化。在近似处理的基础上,当余度传感器出现两路故障而传统表决策略失效时,可以根据之前若干周期内有效的角度值对当前周期的角度值进行预测,将预测值作为参考信号与各路传感器信号进行比较,从而可以将最接近的、且差值小于预测误差值的传感器信号判定为正常。此处采用最小均方误差(Least mean square, LMS)算法确定传感器信号预测值。

2.2.2 最小均方误差算法

LMS算法可以根据外部环境的变化,基于最小均方误差准则,对权值进行迭代计算,以获取最优权值,使得滤波器的输出达到期望的响应信号<sup>[8]</sup>。LMS算法具有方法简单,计算量小和易于实现优点。LMS算法的原理如图5所示。图5中, $d(n)$ 表示期望信号,对于传感器余度系统而言,将其看作襟翼角度信号的真实值; $x(n)$ 表示参考信号; $x(n)$ 经过数字滤波器之后的输出信号为 $y(n)$ ; $e(n)$ 代表 $d(n)$ 和 $y(n)$ 抵消之后剩余的误差信号。LMS算法的作用就在于根据特定的算法不断调整滤波器的系数,使误差信号 $e(n)$ 的均方值最小。此处的 $y(n)$ 即为襟翼角度的预测值,用于改进的表决策略中以提高传感器系统的可靠性。

利用 Matlab 仿真验证 LMS 的预测效果。图6给出了电控旋翼总距操纵时预测值与实际值对比曲线,仿真中实际信号 $d(n)$ 初始时为频率5 Hz、

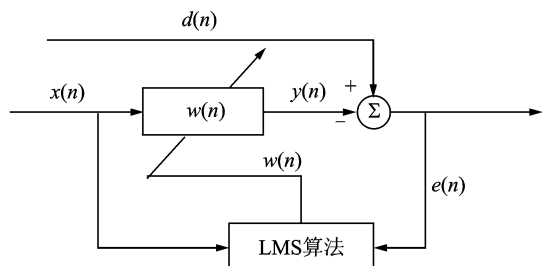


图5 LMS算法原理图

Fig. 5 Principle diagram of LMS algorithm

幅值  $1^\circ$  的周期变距,在 50 s 时施加  $2^\circ$  总距操纵,即图中实线部分;预测得到的信号  $y(n)$  为图中虚线部分。

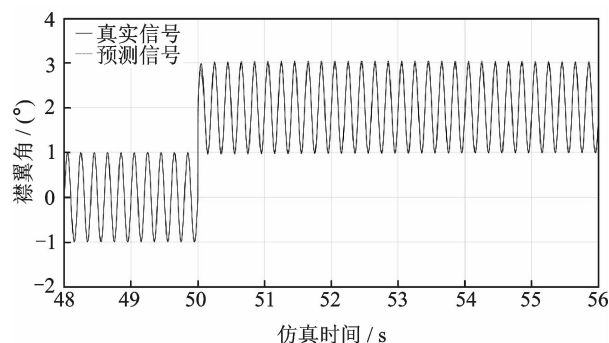


图 6 总距操纵时预测值与实际值对比曲线图

Fig. 6 Predicted value and actual value comparison with collective pitch control

图 7 给出了电控旋翼周期变距操纵时预测值与实际值对比曲线。仿真中实际信号  $d(n)$  初始时为频率 5 Hz,幅值  $1^\circ$  的周期变距,在 50 s 时周期变距变化为  $4^\circ$ ,即图中实线部分;预测得到的信号  $y(n)$  为图中虚线部分。

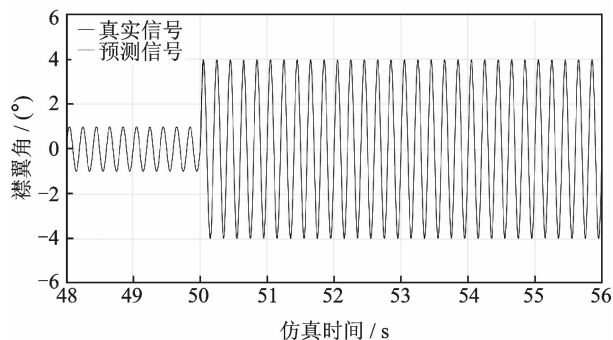


图 7 周期变距操纵时预测值与实际值对比曲线图

Fig. 7 Predicted value and actual value comparison with cyclic pitch control

从图 6,7 可以看出,预测值与实际值几乎完全重合,表明采用 LMS 方法进行传感器信号预测完全能够满足表决策略所需的精度要求。

### 2.2.3 改进的表决策略

先将 3 个冗余的信号按值的大小排序,依次得到传感器信号的最大值  $\max$ 、中间值  $\text{mid}$  和最小值  $\min$ ;然后对每两路信号求差,分别得到最大值与最小值的差值  $\epsilon_{\max-\min}$ 、最大值与中间值的差值  $\epsilon_{\max-\text{mid}}$  及中间值与最小值的差值  $\epsilon_{\text{mid}-\min}$ ;最后将差值与预设的门限值  $\epsilon$  进行比较,首先比较  $\epsilon_{\max-\min}$  与阈值  $\epsilon$  的关系,若差值小于阈值则三信号均有效,否则比较  $\epsilon_{\max-\text{mid}}$ 、 $\epsilon_{\text{mid}-\min}$  与  $\epsilon$  的关系,以确定各冗余信号的状态;当  $\epsilon_{\text{mid}-\min} > \epsilon$ ,即三冗余信号离散

分布时,将预测值分别与三个冗余信号求差,然后比较差值,将与预测值最接近(即差值绝对值最小)且差值小于  $\epsilon$  的信号判定为正常信号,若此最小差值大于  $\epsilon$  则认为三冗余信号均故障,系统输出安全值。改进表决算法流程如图 8 所示。

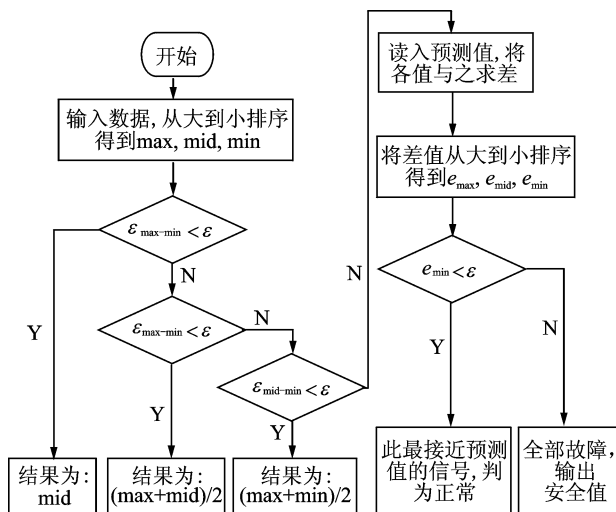


图 8 改进算法的表决流程

Fig. 8 Voting procession of improved algorithm

### 2.2.4 表决算法仿真

由于设计的传感器表决器硬件采用 FPGA,利用 FPGA 软件 Modelsim 进行仿真,以验证改进策略的可行性和有效性。图 9 给出了仿真流程图<sup>[9]</sup>。

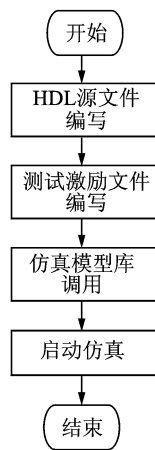


图 9 Modelsim 仿真流程图

Fig. 9 Flow chart of Modelsim simulation

在 Modelsim 中编写测试激励文件,仿真中襟翼偏角为 5 Hz 的三角波形,设置门限阈值为 0.1 V,仿真结果如图 10 所示。

图 10 中,信号从上至下依次为 angle\_a 代表传感器 A 的信号、angle\_b 代表传感器 B 的信号、angle\_c 代表编码器的解码信号以及信号预测值

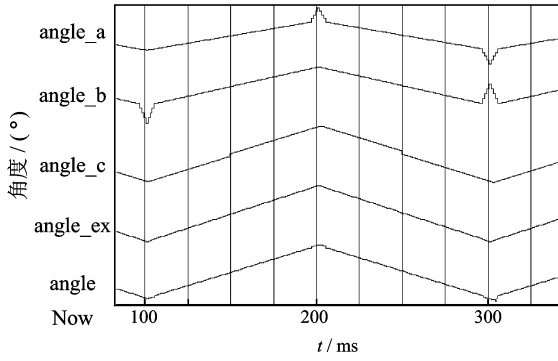


图 10 改进表决算法仿真图

Fig. 10 Simulation diagram of improved voting algorithm

angle\_ex 和表决输出的有效值 angle。从图 10 中可以看出,在 100,200 ms 分别发生一路信号故障,在 300 ms 时发生两路信号故障,算法均能正确的判断出其中的正常信号。利用改进的比较监控算法减少了信号产生跳变或抖动时会带来的故障信号,传感器发生一次故障、二次故障,算法均能有效的判断出正确信号。仿真结果证明了改进算法的可行性和有效性,为提高系统的可靠性奠定了基础。

### 3 传感器余度系统的试验研究

#### 3.1 传统算法下传感器数据的表决试验

试验以襟翼偏角为例,验证三余度传感器数据的表决策略。

模型电控旋翼工作转速 300 r/min,周期变距幅值为 5°时,图 11~13 分别对应传感器 1 故障、传感器 2 故障及传感器 1,2 同时故障时,传统表决算法的实测输出情况。其中,白色为传感器 1 信号、蓝色为传感器 2 信号、红色为传感器 3 信号、绿色为数据表决结果信号。

从图中可以看出,传统策略下,当三余度传感器中发生一路传感器故障时,策略能够判断出故障

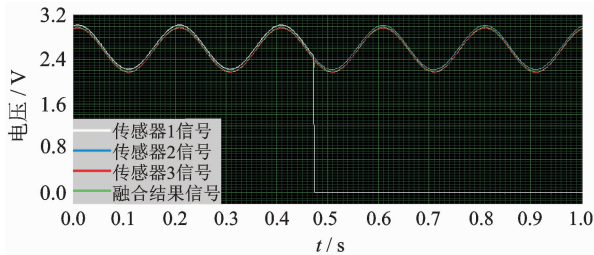


图 11 传感器 1 故障时,传统表决算法输出

Fig. 11 Output of traditional voting algorithm when No. 1 sensor failuring

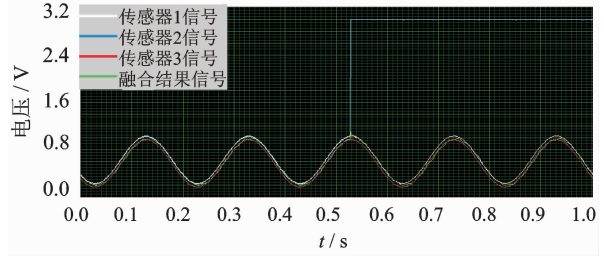


图 12 传感器 2 故障时,传统表决算法输出

Fig. 12 Output of traditional voting algorithm when No. 2 sensor failuring

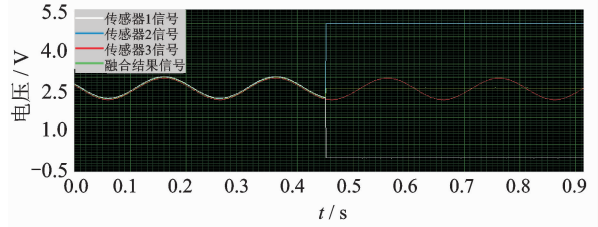


图 13 传感器 1 和传感器 2 同时故障时,传统表决算法输出

Fig. 13 Output of traditional voting algorithm when No. 1 and No. 2 sensors failuring

传感器,将另两路正常传感器数据进行融合;但是当三余度传感器中发生两路随机故障时,策略失效。

#### 3.2 改进算法下传感器数据的表决试验

为便于和传统表决算法进行对比,试验仍以襟翼偏角为例,采用改进的表决算法进行验证。

模型电控旋翼工作转速 300 r/min,周期变距幅值为 5°时,图 14~16 分别对应传感器 1 故障、传感器 2 故障及传感器 1 和 2 同时故障时,改进表决算法的实测输出情况。其中,白色为传感器 1 信号、蓝色为传感器 2 信号、红色为传感器 3 信号、绿色为数据表决结果信号。

从图中可以看出,改进算法下,当三余度传感器中发生一路传感器故障时,与传统算法相同,改

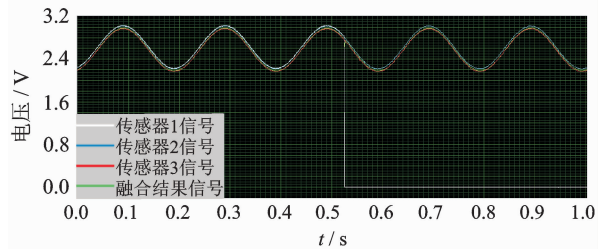


图 14 传感器 1 故障时,改进表决算法输出

Fig. 14 Output of traditional voting algorithm when No. 1 sensor failuring



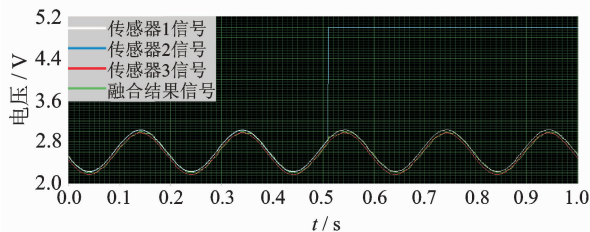


图15 传感器2故障时,改进表决算法输出

Fig. 15 Output of traditional voting algorithm when No. 2 sensor failing

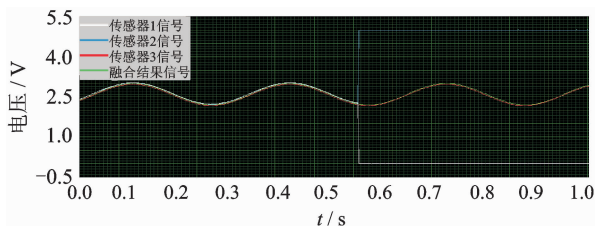


图16 传感器1和传感器2同时故障时,改进表决算法输出

Fig. 16 Output of traditional voting algorithm when No. 1 and No. 2 sensors failing

进算法同样能很好地判断出故障传感器,将另两路正常传感器数据进行融合;当三冗余传感器中发生两路随机故障时,改进算法因为有预测信号的加入,仍然可以将正确的传感器数据判断出,并将其作为反馈信号输入到后续的控制中。

## 4 结 论

本文针对模型电控旋翼系统,提出了一套非相似三冗余传感器系统方案,进一步在传统表决算法的基础上提出了一种改进的表决算法,并进行了仿真验证,最后以襟翼传感器为例进行了试验验证。结果表明:

(1)在三冗余传感器系统出现两路随机故障时,改进的表决算法能够有效判别出正常信号。

(2)仿真和试验结果均验证了本文所提出的设计方案能够有效提高电控旋翼传感器系统的可靠性,为后续控制系统的冗余设计奠定了基础。

### 参考文献:

[1] 陆洋,董维生,洪亮. 基于自适应滤波的电控旋翼桨

距控制试验[J]. 航空动力学,2012,27(12):2706-2713.

Lu Yang, Dong Weisheng, Hong Liang. Based on adaptive filtering electrical rotor pitch control test[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12): 2706-2713.

[2] 高丽娜. 容错飞控系统及在未来无人机系统中作用研究[J]. 飞航导弹, 2013, 3(3):34-38.

Gao Lina. Fault tolerant flight control systems, and unmanned aerial vehicle system role in the study in the future [J]. Cruise Missile, 2013, 3(3):34-38.

[3] 杨林芳. 无人机容错飞行控制系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.

Yang Linfang. Unmanned aerial vehicle fault tolerant flight control system research [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.

[4] Forsberg K, Nadjm-Tehrani S, Torin J. Fault analysis of a distributed flight control system[C]//System Sciences, 2005. Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on. [S. l.]: IEEE, 2005:290b.

[5] 张锦,王伟. 三冗余度飞控计算机系统软件的研究与设计[D]. 西安:西北工业大学, 2006.

Zhang Jin, Wang Wei. The research and design of software of treble redundancy flight control computer system[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.

[6] 陈拓,王伟. 一种改进的四冗余模拟量监控算法[J]. 测控技术, 2011, 30(1):64-70.

Chen Tuo, Wang Wei. An improved analog monitoring algorithm is more than four degrees [J]. Observation and Control Technology, 2011, 30(1):64-70.

[7] Karlsson J. Reliable and fault-tolerant computer systems[R]. Sweden: Chalmers University of Technology, 2002.

[8] Simon Haykin. 自适应滤波器原理[M]. 郑宝玉,等,译. 北京:电子工业出版社, 2010.

Simon Haykin. Adaptive Filter Theory [M]. Trans by Zheng Baoyu, et al. Beijing: Electronic Industry Press, 2010.

[9] Dave B P. Lakshminarayana G, Jha N K. Hardware-software co-synthesis of embedded systems [C]// Proceedings of the 34th Design Automation. Anaheim, CA, USA: [s. n.], 1997:703-708.

