

学校编码：10384
学 号：32020141152865

分类号____密级____
UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

无人机余度飞行控制系统研究

Research on Redundant Flight Control System of
Unmanned Aerial Vehicle

包国宁

指导教师姓名：吴了泥 副教授

专 业 名 称：仪器仪表工程

论文提交日期：2017 年 月

论文答辩时间：2017 年 月

学位授予日期：2017 年 月

答辩委员会主席：_____

评阅人：_____

2017 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

飞行控制系统的高可靠性是无人机安全飞行的重要保证。为提高无人机飞行控制系统的可靠性，本文设计了无人机余度飞控系统架构，在此基础上深入研究了余度飞控系统总线通信设计、余度飞控计算机软件设计和机载传感器冗余设计。

首先，本文借鉴典型航电架构方案，设计余度飞行控制系统的架构，并对其进行简要的静态可靠性分析。根据系统架构设计方案，制定余度飞控计算机软件和机载传感器冗余的总体设计方案。

其次，本文比较多种航空和工业总线，选出FlexRay总线作为余度飞行控制系统的通信总线。研究FlexRay总线的工作机理和通信方式，根据余度飞控系统的架构和数据流，规划FlexRay总线的时隙分配、有效数据帧，设计FlexRay总线通信协议和相应的初始化软件程序。

再次，本文根据余度飞控计算机软件总体设计方案，详细设计余度飞控计算机的余度管理软件和飞行控制应用软件。重点研究余度飞控计算机之间同步、交叉通道数据链路和信号监控与表决的具体实现方法。

然后，为提高机载传感器系统的可靠性，分析了成套惯性传感器硬件冗余配置方案和相应的广义似然比故障检测方法。基于扩展卡尔曼滤波，设计了非相似传感器数据融合和故障检测算法。

最后，为了验证设计方案的可行性和实用性，本文搭建仿真试验环境，对余度飞控计算机进行同步测试，测试结果表明余度飞控计算机能够同步执行各导航控制任务；对传感器数据融合进行跑车试验，试验结果表明传感器数据融合可以解算出合理的无人机姿态信息，有效地提高了机载传感器的抗干扰和容错能力；对整个余度飞控系统进行半物理仿真，仿真结果表明余度飞控系统能够有效识别和检测故障，具备一定的容错能力，提高了飞行控制系统的可靠性。

关键词：余度飞控系统 系统架构 FlexRay 余度飞控计算机 传感器冗余

ABSTRACT

The high reliability of the flight control system is an important guarantee for the safe flight of UAVs. In order to improve the reliability of UAV flight control system, this paper designs the architecture of UAV redundant flight control system, and then further studies the bus communication design, the redundant flight control computer software design and the airborne sensors redundancy design of the redundant flight control system.

Firstly, this paper designs an architecture of the redundant flight control system by drawing on the typical avionics architectures, and carries on a brief static reliability analysis to it. According to the architecture designed, the overall design scheme of redundant flight computer software and sensors redundancy is developed.

Secondly, after comparing a variety of avionics and industrial buses, the FlexRay is selected to be used as the bus of the redundant flight control system. This paper studies the working and communication mechanism of FlexRay, and plans the FlexRay bus slot assignment, valid data frame, design FlexRay bus communication protocol and corresponding initialization software program according to the architecture and data flow of the redundancy flight control system.

Thirdly, according to the overall design scheme of the redundant flight control computer software, the redundancy management software and the flight control application software are designed in detail. This paper focuses on the realization method of synchronization, cross channel data link and signal monitoring and voting among the redundant flight control computers.

Then, in order to improve the reliability of the airborne sensor system, the hardware redundancy configuration scheme of the inertial sensor and the corresponding generalized likelihood ratio fault detection method are analyzed. Based on the extended Kalman filter, the non-similar sensor integrated navigation data fusion and related fault detection algorithms are designed.

Finally, in order to verify the feasibility and practicability of the scheme designed, this paper builds the simulation and experiment environment, carries on the synchronous test to the redundancy flight control computer. The test result shows that the redundancy flight control computer can synchronize the implementation of navigation and control tasks. A running car experiment is done to verify the algorithm of sensor data fusion. The experiment results show that the sensor data fusion solves the reasonable UAV attitude information and effectively improves the anti-jamming and fault-tolerant capability of the airborne sensor. The semi-physical simulation of the whole redundancy flight control system is carried out. The simulation results show that the redundancy Flight control system can effectively identify and detect faults, with a certain degree of fault tolerance, improve the flight control system reliability.

Key words: redundant flight control system; system architecture; FlexRay; redundant flight control computer; sensor redundancy;

目 录

摘 要.....	i
ABSTRACT.....	ii
目 录.....	iv
CONTENTS.....	viii
第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 余度飞控计算机技术.....	2
1.2.2 传感器冗余技术.....	3
1.3 研究需要解决的问题	5
1.4 本文结构安排	5
第二章 余度飞控系统方案设计	7
2.1 典型无人机飞行控制系统	7
2.2 余度飞控系统架构设计	8
2.2.1 典型航电架构方案.....	8
2.2.2 余度飞控系统架构方案.....	16
2.3 余度飞控系统架构可靠性分析	17
2.3.1 可靠性指标.....	17
2.3.2 可靠性分析.....	18
2.4 余度子系统总体方案设计	20
2.4.1 余度飞行控制计算机软件框架设计.....	20
2.4.2 传感器冗余总体方案设计.....	22
2.5 本章小结	23
第三章 总线通信设计	24
3.1 系统总线选型	24

3.1.1 ARINC429 总线	24
3.1.2 1553B 总线	24
3.1.3 CAN 总线	25
3.1.4 FlexRay 总线	25
3.1.5 TTP 总线	25
3.1.6 串行总线比较与选择	26
3.2 FlexRay 总线机理研究	27
3.2.1 FlexRay 节点结构	27
3.2.2 FlexRay 总线通信周期	28
3.2.3 FlexRay 帧格式	29
3.3 Flexray 通信协议设计	30
3.3.1 FlexRay 总线数据流分析	30
3.3.2 时隙分配	31
3.4 FlexRay 协议运行状态和初始化	33
3.4.1 FlexRay 总线协议运行状态	33
3.4.2 FlexRay 总线初始化	35
3.5 本章小结	36
第四章 余度飞控计算机软件设计	37
4.1 余度飞控计算机软件流程	37
4.2 余度管理软件设计	38
4.2.1 同步设计	38
4.2.2 交叉通道数据链路	40
4.2.3 信号监控与表决	41
4.3 飞行控制应用软件设计	44
4.3.1 控制律解算	44
4.3.2 导航管理	45
4.3.3 飞行模态管理	45
4.3.4 遥控遥测	46
4.4 本章小结	46
第五章 传感器冗余设计	48
5.1 飞控系统的关键传感器	48

5.1.1 惯性传感器.....	48
5.1.2 位置传感器.....	49
5.1.3 大气数据传感器.....	51
5.2 相似传感器硬件冗余	51
5.2.1 余度配置方案.....	52
5.2.2 硬件冗余故障检测.....	55
5.3 非相似传感器数据融合	57
5.3.1 无人机姿态运动描述.....	57
5.3.2 传感器之间的解析关系.....	59
5.3.3 卡尔曼滤波基本原理.....	60
5.3.4 基于卡尔曼滤波的传感器数据融合.....	62
5.3.5 基于卡尔曼滤波的故障检测.....	65
5.4 本章小结	66
第六章 试验与仿真	67
6.1 飞控计算机同步测试	67
6.1.1 测试环境.....	67
6.1.2 FlexRay 总线时钟同步测试.....	67
6.1.3 控制命令输出信号同步测试.....	68
6.2 传感器数据融合试验	69
6.2.1 试验系统.....	69
6.2.2 试验过程与结果分析.....	71
6.3 半物理仿真试验与分析	77
6.3.1 仿真试验系统与方案.....	77
6.3.2 仿真过程与结果分析.....	79
6.4 本章小结	82
第七章 总结与展望	83
7.1 本文的工作总结	83
7.2 后续工作展望	84
参考文献	85
致 谢.....	89

攻读学位期间的研究成果及发表的学术论文.....90

厦门大学博硕士学位论文摘要库

CONTENTS

ABSTRACT.....	ii
CONTENTS.....	x
Chapter1 Introduction.....	1
1.1 Research background	1
1.2 Research status.....	2
1.2.1 Technology of redundant flight control computer	2
1.2.2 Technology of sensor redundancy	3
1.3 The problems need to resolve.....	5
1.4 Research content	5
Chapter2 Design of redundant flight control system	7
2.1 Typical UAV flight control system	7
2.2 Architecture design for redundant flight control system.....	8
2.2.1 Scheme of typical avionics architecture	8
2.2.2 Scheme of architecture for redundant flight control system.....	16
2.3 Reliability analysis for the architecture designed	17
2.3.1 Index of reliability.....	17
2.3.2 Reliability analysis.....	18
2.4 General scheme design of redundancy subsystem	20
2.4.1 Design of computer software framework	20
2.4.2 General scheme design of sensor redundancy	22
2.5 Summary.....	23
Chapter3 Bus communication design	24
3.1 Bus selection	24
3.1.1 ARINC429	24
3.1.2 1533B	24
3.1.3 CAN.....	25

3.1.4 FlexRay	25
3.1.5 TTP	25
3.1.6 Serial bus comparison and selection	26
3.2 Study of FlexRay Bus Mechanism.....	27
3.2.1 FlexRay node structure	27
3.2.2 FlexRay communication cycle.....	28
3.2.3 FlexRay frame format	29
3.3 Design of FlexRay communication protocol.....	30
3.3.1 Data flow analysis of FlexRay	30
3.3.2 Slot allocation	31
3.4 FlexRay communication protocol status and initialization process	33
3.4.1 FlexRay protocol status.....	33
3.4.2 FlexRay initialization process	35
3.5 Summary.....	36
Chapter4 Redundant flight control computer software design.....	37
4.1 Redundant flight control computer software process.....	37
4.2.1 Synchronization	38
4.2.2 Cross communication data link.....	40
4.2.3 Signal monitoring and voting.....	41
4.3 Design of flight control application software.....	44
4.3.1 Control law.....	44
4.3.2 Navigation management	45
4.3.3 Flight mode management.....	45
4.3.4 Remote control and monitor	46
4.4 Summary.....	46
Chapter5 Sensor redundancy design	48
5.1 Key sensors of flight control system	48
5.1.1 Inertial sensor.....	48
5.1.2 Position sensor	49
5.1.3 Atmospheric sensor.....	51
5.2 Similar sensor hardware redundancy	51

5.2.1 Redundancy configuration scheme	52
5.2.2 Hardware redundancy fault detection	55
5.3 Non-similar sensor data fusion	57
5.3.1 Attitude expression of UAV	57
5.3.2 The analytical relationship between the sensors	59
5.3.3 The principle of Kalman filter	60
5.3.4 Sensors data fusion based on Kalman filter	62
5.3.5 Fault detection based on Kalman filter	65
5.4 Summary	66
Chapter6 Experiment and simulation	67
6.1 Synchronization test for flight control computers	67
6.1.1 Test environment	67
6.1.2 FlexRay time synchronization test.....	67
6.1.3 Control commands synchronization test.....	68
6.2 Sensors data fusion experiment	69
6.2.1 Experiment system.....	69
6.2.2 Experiment process and results analysis.....	71
6.3 Semi-physical simulation and analysis.....	77
6.3.1 Simulation system and simulation plan	77
6.3.2 Simulation process and results analysis	79
6.4 Summary.....	82
Chapter7 Summary and prospect	83
7.1 Main tasks.....	83
7.2 Follow-up tasks prospect	84
References	85
Acknowledgements	89
Publications	90

第一章 绪论

1.1 研究背景

无人机是无人驾驶飞行器的简称,是一种基于无线电设备遥控操纵或预装载的程序自动控制,可重复利用的不载人飞行器。相较于有人驾驶飞机,无人机具有重量轻、体积小、成本低、适应性强,并且不易造成人员伤亡等优点,近年来发展迅速,在军民两方都得到广泛应用^[1]。在民用领域,无人机可用于电力巡检、地理测绘、气象监测、农业喷撒、抢险救灾、影像拍摄等。在军事范畴,无人机可用作靶机、侦察机、电子对抗机、攻击机,甚至战斗机、舰载机。

在无人机发展史中,长航时始终是无人机不断追求的一个方向。在一代代航空人的不断追求之下,无人机的续航时间也越来越长。其中,国产翼龙无人机最大飞行时间为 20 小时,彩虹 4 无人机巡航时间超过 24 小时。美国全球鹰无人机续航时间长达 42 小时,捕食者无人机可在空中滞留两天。高空长航时太阳能无人机甚至可以在空中飞行数月。在 2015 年中国无人系统发展论坛上,中国空军工程大学无人机专家黄长强教授将续航技术和武器技术排在未来无人机十大发展趋势中的前两位。可以预见,长航时仍然会是未来无人机的一个重要发展方向。

相比一般的无人机,长航时无人机由于长时间在空中巡航,执行任务期间发生故障的可能将大幅增加,要求全机具有较高的可靠性^[2]。飞行控制系统作为无人机的核心系统,需具备更高的可靠性和稳定性。

目前,提高飞行控制系统可靠性的常用方法有两种:一是选用高可靠性的元器件,此法成本较高,且可靠性提高到一定程度后效果不显著;二是余度技术,能够依靠多组相对廉价、可靠性较低的元器件组成高可靠性的系统^[3]。设计飞行控制系统应当结合实际工程应用的可靠性指标、经费预算等因素,综合运用两种方法,寻求最佳组合。为了进一步提高系统的完备性,长航时无人机在控制、传感器和计算方面都会采用一定程度的冗余配置^[4]。

余度技术通过增加硬件、软件、信息和时间等各种冗余资源来达到提高系统可靠性的目的。当系统中的某一部分出现故障时,可以由相应的冗余资源顶替故

障的部分工作，从而保证整个系统能够继续正常工作，在规定的时间内完成相应任务^[5]。余度技术不仅增加了余度资源，同时也增加了系统的复杂程度和出错率，如果设计不当，系统的可靠性反而下降。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 余度飞控计算机技术

二十世纪七十年代，为了增强系统的可靠性，美国战机 F-16A/B 率先装配使用模拟式四余度飞控计算机^[4]。随着计算机技术的发展，升级版的 F-16C/D 战机装配了更为先进的数字式四余度电传飞行控制系统。此后，民用飞机也相继采用了余度飞控计算机。欧洲空客公司的 A320 使用双余度飞控计算机，具备控制和监控的功能；A340 使用的五余度非相似飞控计算机是由五个不同制造商生产的，并且使用了不同的飞行控制软件程序；美国波音公司的 Boeing-777 配备了三乘三自检冗余航空电子架构，系统容错能力得到进一步的提升^{[6][7]}。在新一代战斗机中，如苏-30、幻影-2000、F-22 等，余度飞控计算机几乎已经成为一种标准配置^[8]。近年来迅速发展的航天运载飞行器也使用了余度飞控计算机技术，例如美国洛克希德公司的航天飞行器 X-33 使用了三模冗余容错计算机，X-38 则是装备了四余度飞行控制计算机^{[9][10]}。

近年来，余度飞控计算机技术也逐渐应用于无人机领域上。其中，比较典型的有：美国“全球鹰”高空长航时无人侦察机装配了双主模式双冗余飞行控制系统，与传统双余度主从备份模式不同的是，两个飞行控制计算机同时处于热电工作状态，保证无人机能够长时间安全飞行；美国另一款著名无人机“捕食者”先后采用了双余度和三余度航空电子系统；美国新型隐形舰载无人机 X-47B 配备了全方位的三余度制导、导航和控制系统来解决无人机的安全问题；欧洲的“梭鱼”、英国的“科莱克斯”、以色列的“苍鹭”无人机等都使用了不同程度的余度飞控计算机技术^[11-16]。

国内各航空院校和研究所对余度飞控计算机技术也进行了多项研究，取得了一定的研究成果。西北工业大学基于 VxWorks 操作系统研究了双余度飞控计算机的余度管理算法，又基于 PC104 平台研究了三余度飞控计算机的同步算法^{[17][18]}。

南京航空航天大学对余度飞控计算机技术进行了多年的深入研究,研究内容包括余度飞控计算机的冗余体系结构、余度管理同步算法、跨通道数据通信方案设计以及余度飞控计算机的故障检测与系统重构,完成了余度飞控计算机软硬件的开发^[19-25]。北京航空航天大学研究了余度飞控计算机的电子架构,并基于马尔科夫模型分析其可靠性^[26]。中航工业集团西安航空计算机技术研究所研制了数字式三模冗余飞控计算机,并成功应用于项目上^{[8][27]}。上世纪末,中国航空工业集团为“枭龙”战斗机设计了新一代四余度纵向电传操纵系统,同时配备传统液压传动系统,两者相结合,提升了战机的操稳性能。由成都飞机设计研究所研制的第三代战斗机“歼-10”采用数字式四余度电传飞行控制系统,成为国内电传飞行控制系统成功应用的典范;在此基础上,“歼-11”和“歼-15”也都装配了三轴数字式四余度飞控系统。在无人机方面,国产无人机“翔龙”和“翼龙”都使用了三余度飞控计算机;南京航空航天大学研制出了一款基于 CAN 总线的三余度飞控计算机,并成功应用于无人机上^[28]。

然而,我国大多数无人机仍然使用单通道飞控计算机,如长空、长虹、ASN 和彩虹等系列无人机,相较于国外新型无人机,安全可靠等各方面性能仍存在较大的差距。因此,为推动国内无人机余度飞控计算机技术的发展,缩小与国外先进技术的差距,普及余度飞控计算机的应用,研究无人机余度飞控计算机技术仍然是必要的。

1.2.2 传感器冗余技术

传感器硬件冗余技术是最早应用于飞行控制系统的冗余技术,相对简单、有效、成熟,拥有众多成功应用的案例。上世纪九十年代,双余度或三余度的 Triad 结构惯性单元组件大量应用于 Boeing-737/747/757/767、A310/320、MD-11 等商业运输机上^[29]。美国航天飞机 X-38 装配了四余度飞行控制系统,配备有四组相同的传感器^[10]。“全球鹰”无人机中的惯性传感器、GPS 和大气数据系统等关键传感器设备都配备了两份^[11]。

随着可靠性理论和硬件冗余技术的发展,研究人员发现:在传感器数目相同的条件下,斜置的传感器拥有着比正交配置更高的容错能力上限。1977 年, Potter 等人研究出了广义似然比故障检测法,能够实现对四余度斜置配置传感器的故障

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库