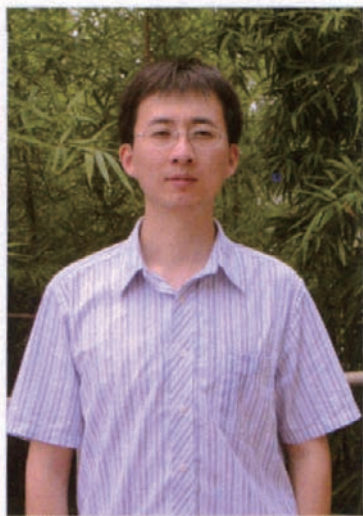




关于提高无人机飞控系统生存力的研究

Research on Enhancing Survivability of UAV Flight Control System

西北工业大学无人机特种技术国防重点实验室 吴佳楠 王 伟 吴成富



吴佳楠

工程师,研究方向为飞行仿真、嵌入式系统开发。

越南战争后,美国开始在军用飞机的概念设计中研究作战生存力问题,并在多种型号的飞机生产中全面贯穿了生存力设计思想。生存力设计的好坏将直接影响整个飞机系统的效能和费用。虽然我国对生存

无人机在完成高度、长航时飞行任务时,随着飞行时间的增加,飞行控制系统出现故障的概率也在不断增加,具体表现如飞行控制计算机故障、舵机故障、舵面损伤以及机载传感器故障等。为了使无人机在受到非致命性损伤和故障情况时,仍能够完成侦察任务或安全返回,需要研制一种高可靠性、高生存力的飞行控制系统。

力问题的研究尚处于初步研究阶段,但飞机的生存力问题已经越来越引起我们的注意,在无人机领域亦是如此。无人机主要执行战略侦察、监视、空中预警、通信中继和电子干扰等任务。目前国际上先进的无人机大多是续航时间长、飞行高度高、作战半径大、装备精良和功能先进的大中型无人机,采用数字计算机控制系统,可实现全过程自主飞行。此类大中型无人机多搭载大型侦察或攻击设备,造成全机造价大幅飙升。以美国RQ-4“全球鹰”为例,其第Block20批次的单价已经达到5800万美元^[1],

此价格已接近F16。对于大中型无人机而言,低成本的形象已经彻底颠覆,此时提高无人机的生存能力便显得格外有意义。因此要求无人机的飞行管理与控制系统具有全程、全自主、全任务的工作能力,同时还必须有很高的生存力。

无人机在完成高度、长航时飞行任务时,随着飞行时间的增加,飞行控制系统出现故障的概率也在不断增加,具体表现如飞行控制计算机故障、舵机故障、舵面损伤以及机载传感器故障等。为了使无人机在受到非致命性损伤和故障情况时仍能够

完成侦察任务或安全返回,需要研制一种高可靠性、高生存力的飞行控制系统。

解决办法

保证无人机高生存力的核心是要构成一个可重构飞行控制系统(Restructurable Flight Control System, RFCS)^[2],以及采用余度技术。一般说来,实现故障安全的方法有:

(1)把故障影响减小到最低限度,即设计一个无人机鲁棒飞行控制系统,当故障产生后使其对整体性能不产生显著影响;

(2)增加余度设备和机构;

(3)改变故障隔离后剩余系统的运行规则,进行补偿。

方法1主要针对系统出现不严重的故障。方法2适用于成本较低、易于维护且余度设备在无人机承载能力范围内的情况。方法3应用情况较全面。

RFCS 方案

RFCS 方案的基本组成:

(1)故障的检测与识别(Fault Detection and Identification, FDI)。确定故障性质、地点和程度。

(2)飞行控制系统的再设计。在所得到的信息基础上,使用剩余的部件和元件,补偿故障元部件功能,改



美国RQ-4全球鹰无人机

变反馈增益,进一步附加新的控制回路进行控制律的修正。

(3)构成能够承受轻微故障和环境改变的鲁棒飞行控制系统。

当舵面损坏或出现故障时,通过重组(Reconfiguration)提供余度舵面。舵面重组是指当飞机的操纵面发生故障时,重新组织飞机构造形式的一种技术措施。采用控制工程的概念,重组是指通过控制器结构和参数的变化来改变控制器与被控对象之间的输入-输出关系。

余度技术

余度技术的基本思想是增加余度资源、提高可靠性。余度资源包括:飞控计算机硬件和软件余度、时间重复、信息余度(传感器余度)以及设置余度逻辑状态等。从相反的一面来看,增加余度资源的同时也增加了系统的复杂程度,增加了系统的出错率。如果设计不当,系统可靠性反而会下降。所以方案设计上就需要在资源和可靠性指标之间进行折中。

通常飞机的生存力还包括战伤抢修性,即遭到损伤后能以应急手段和维修方法使得飞机恢复到完成某种任务所需的功能或自救的能力。

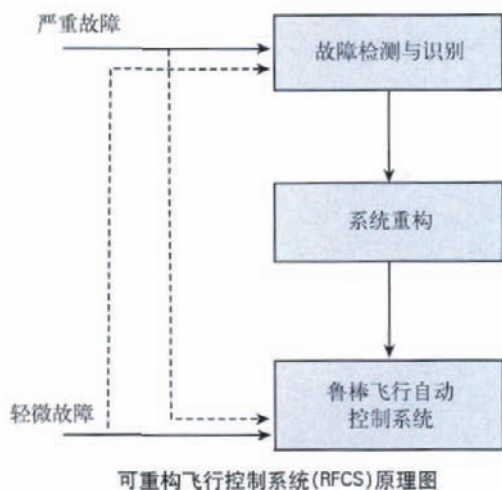
由于无人机系统在执行侦查作战任务期间一旦发生故障,不可能像普通飞机那样实时排除并修复故障。所以在进行无人机可重构飞行控制系统可靠性预计和分配时,必须考虑无人机的特殊性。

以某型飞控系统为例,该飞控系统设计为三余度飞控系统^[3],它具有余度管理功能。在飞机飞控系统发生故障(包括飞机的舵面、机载传感器、飞行控制计算机等故障)时,能够继续完成无人机的侦查作战任务(一次故障工作);在飞机飞控系统发生二次故障时,应至少保持稳定和安全(二次故障安全)。此时,可控制飞机返回机场。

无人机采用了硬件余度和软件余度相结合的方式。硬件余度包括:操纵面的余度配置、三余度飞控计算机和多余度传感器等;软件余度包括相似余度计算机软件和解析余度传感器。

1 电源

对于三余度飞控系统,要求电源也必须采用不低于三余度的结构以保障飞控系统安全。电源系统采用电源1、电源2和备份电池的余度结构。电源1和电源2分别来自独立的2个发电机,3路电源同时供给飞控系统,由飞控系统内的电源部分完成选择。



可重构飞行控制系统(RFCS)原理图

当电源 1 出现故障后,飞控系统内的电源自动选择电源 2 作为系统供电电源;当电源 2 又出现故障时,系统自动启用备份电池。由于备份电池的容量可以满足飞控系统安全模式的需求,因而供电系统的余度等级达到了一次故障工作,二次故障安全。

2 传感器

飞控系统针对所用信号重要性的不同而对传感器采用信号冗余的配置。系统配置了高精度的惯性导航系统、航姿系统、垂直陀螺、磁航向传感器、三轴角速率陀螺传感器、差分 GPS、北斗接收机和无线电高度表等部件,对于飞机的姿态数据,同时有惯导系统、航姿系统和垂直陀螺 3 个部件可以输出。对于飞机的角速率数据,同时有惯导系统、航姿系统和三轴角速率陀螺 3 个部件可以输出。

机体三轴加速度信号并不是很重要,惯导系统、航姿系统可以输出,不再配置加速度传感器。对于位置信息,在起降阶段,差分 GPS 与 2 个无线电高度表构成冗余;在空中飞行阶段,带 GPS 修正的惯性导航系统、差分 GPS 和北斗接收机共同构成余度系统。

大气数据对于飞行安全非常重要,因此采用 2 套独立的空速管,其

中一根接入大气数据计算机,另一根接入 2 套动静压传感器,这样气压高度、空速共有 3 套传感器可以输出。

在起降滑跑阶段,惯导、差分 GPS 输出的地速构成信号冗余。采用如上的配置方案,可实现关键信号三余度、非关键信号二余度。

传感器应具有自诊断能力,这样飞控计算机可根据各传感器的反馈信号判断是否出现故障。同时对于没有故障的传感器,飞控计算机采集到信号后再进行监控和表决,最后还要根据飞机的自身特性确定表决结果是否处于合理的范围,经过上述判断后得到的信号才能交给控制律部分进行计算。传感器还可采用非正交配置来保证传感器的一次故障工作、二次故障安全的故障容限要求。采用非正交配置的传感器可大大提高传感器自身的可靠性,但计算量较大,加工难度较大,成本较高,在飞控系统配置时需慎重使用。

3 舵机舵面

对于高可靠性飞控系统,要求气动结构提供丰富的冗余舵面,以全球鹰为例,至少配有 4 片副翼、4 片等效升降舵、4 片等效方向舵,这样气动舵面的余度等级至少不低于二余度。每个舵面均配置一个独立舵机,同一机翼上的舵面不同段由不同的飞行控制计算机控制,不同机翼但位置对称(同为内侧或外侧)的操纵面由同一飞行控制计算机控制。舵机的余度可以灵活考虑,在一定的可靠性指标下,当存在气动冗余且具备故障舵面回中的能力时可以采用单余度舵机,有利于降低系统复杂性和成本。若气动冗余较低,只实现单余度或部分舵面二余度,则要通过采用余度舵机技术来提高

舵机的可靠性,使得飞控总体的可靠性保持在允许的水平。

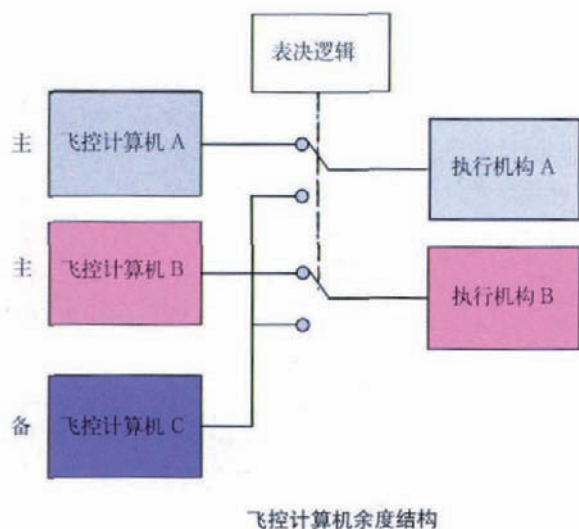
自动油门系统中,由于目前发动机的油门伺服系统多为机械伺服系统,可靠性比电器系统高一个数量级,因而不配置余度;自动油门的执行机构——舵机,配置二余度。

4 飞控计算机

飞控计算机是整个飞控系统核心部件,它的可靠性及功能直接关系到系统的技术指标能否实现。

在某方案中,飞行控制系统采用了主/主/备的配置方案,由 3 台飞控计算机同时工作。飞控计算机 A 和飞控计算机 B 作为主控计算机分别控制一套执行机构,飞控计算机 C 作为备份计算机处于热备份状态,3 台计算机通过表决算法确定 2 台主控计算机是否发生故障,如果一台计算机出现故障,则通过逻辑开关自动切换到备份计算机。计算机采用非相似余度,这样可以防止硬件的共性故障,减少发生故障的概率。此外,由于机载计算机易损性较高,可以采用装甲防护的方法来提高生存力,余度部件要分散布置,以确保无人机在受到单点打击时不会同时损失 2 个计算机。

除了采用硬件余度技术外,还设计了软件余度,如针对可能出现的紧急情况设计应急控制方案,针对舵面和执行机构等可能出现的故障设计了重构的控制律,针对能源不足的问题设计节能控制方案等。无人机与有人机比较,有一些飞行过程中可能遇到的紧急情况,它无法自行解决。所以必须设置相应的应急控制方案。方案设置以保证飞行安全为最基本的目标。无人机飞行中可能遇到的紧急情况包括:通信干扰、发动机停车、舵面损伤、执行机构故障以及遇到强烈气流扰动等。若通信链路不畅,则只能根据飞控软件中的预设方案,自动控制飞机完成相关操作。软件的非相似余度结构,可保证因软件





故障的系统二次故障安全要求。

5 通信

对于大中型无人机,多采用4通道方式,2个视距内链路和2个视距外链路,具有较高的可靠性。另外即使通信系统中断,无人机飞行管理系统也可以控制飞机自动返航,飞机的安全有保障。

6 操作方式

无人机的操作方式按人工介入程度划分,主要有全手动、半自动、全自动3种。

(1) 全手动。全手动类似航模操作,地面站人员通过控制杆生成飞机舵面的控制指令,通过无线电发给飞机,指令绕过飞控机(指令也可经过飞控机,但对飞控系统可靠性有一定要求),直接叠加在舵机的指令输入端,驱动舵机。该方式的优点是简单方便,适合在研制初期验证气动时使用。缺点是对操作手提出很高要求,压力很大,由于无线电链路可能会有延时,引发驾驶员震荡。该方式适合视距内使用。

(2) 半自动。半自动方式操作下飞控计算机处于工作状态,地面站人员通过控制台发出综合性的控制指令,如“爬升”、“平飞”等,飞控计算机收到指令后根据机载传感器提供的数据和预先编好的控制律计算出对应的舵控指令,驱动舵机。该方式的优点是相对于全手动方式对操作人员的要求大大降低,若控制律设计合

适是基本不会出现操作不当导致飞机坠毁的,同时在侦察飞行时大大提高使用的灵活度。缺点是要求地面站操作人员必须在整个飞行过程中全程监控飞机状态,若飞行时间很长会导致操作人员过于疲劳,需要换班休息。

(3) 全自动。全自动方式对飞控计算机及其软件功能的依赖程度大大增加。起飞前地面站操作人员将飞行轨迹、飞行计划通过无线电发送给飞控机,飞控机自动执行相关指令,可以在不收到其他指令的情况下独立自主地控制飞机完成从起飞、飞向目标区、侦察预定地域、返航到着陆的全过程。该方式的优点是自动化程度大大提高,在长时间的飞行过程中地面站人员只需注意是否出现异常状况,大多数时间只需监视飞机状况,可降低操作疲劳。缺点是飞行前的飞行轨迹规划和飞行计划的制定对操作人员的战术水平要求很高,在飞行中对时间敏感性目标处理不太方便。

综上所述,在中大型无人机使用中,起降及前往目标区和返航时采用自动飞行方式,在飞机到达目标区后采用自动与半自动相结合的飞行方式可提高飞机对时间敏感性目标的响应速度。在起飞降落阶段如果气象条件不好,可以采用手工辅助的方式确保飞机平安起降。总的来看采用全自动飞行已成为一种趋势,操作人员应着眼于战术水平而不是飞机操作水平的提高。无人机是一种平台,关键在于它执行的任务,应根据不同的任务选择不同的操作方式。

关键部件的屏蔽和布置

除了使用以上介绍的方法外,还

要注意无人机机体内关键部件的屏蔽和布置^[4]。部件屏蔽指的是将干扰部件封装起来,防止干扰电磁场通过空间向外传播或用屏蔽体将传感器等部件封装起来,使其免受外界空间电磁场的影响。部件屏蔽可以有效地中断近场感应和远场辐射等电磁干扰的传播通道。关键部件的布置对飞控系统生存力的影响也很大,良好的部件布置将有利于提高飞控系统的生存力。所以应选择部件放置方向使其在最容易遭受破坏的方向投影面积最小,将非关键部件或坚固的部件布置在易损性较差的部件前面,用以保护易损部件,降低非冗余部件的投影面积。无人机机身小、飞控系统部件小、关键部件的投影面积小、雷达反射面积小,这样的结构有利于提高其生存力^[5]。

结束语

提高无人机的可靠性是多方面的,为了提高无人机飞控系统的生存力,文中介绍了飞控系统重构和采用冗余度技术2种主要方法。与有人机相比,这2种方法针对无人机遭受损伤或发生故障等情况,对保证其安全或继续完成任务显得尤为重要。同时,还有必要考虑关键部件的屏蔽和布置对提高无人机飞控系统的重要影响。

参考文献

- [1] 杨增辉. 全球鹰的研究史. 兵器, 2009(9): 43.
- [2] Chingiz Hajiyev, Fikret Caliskan. Fault diagnosis and reconfiguration in flight control systems. Automation and Remote Control, 2004, 65(6).
- [3] 裴扬, 宋笔锋, 李占科. 飞机易损性评估的基本方法研究. 弹箭与制导学报, 2004, 24(2): 70-74.
- [4] 马秋瑜. 无人机飞控系统实时冗余度软件设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [5] 张新建, 胡军. 无人机航电系统生存力分析. 航空科学技术, 2000(4): 28-30.

(责编 玉龙 依然)