

直升机电液伺服飞控作动系统设计和实现

仝艳朋

天津航大雄鹰航空工程有限公司 天津 300308

【摘要】：随着飞行控制技术的不断发展，电传操作系统凭借自身具有高效性、简单性等特征，被逐渐普及到直升机的飞行控制系统中，和传统飞行控制系统相比，电传操作系统能有效优化直升机飞行速度，降低飞行员操作难度，并给综合飞行控制技术和主动控制技术打下坚实基础。本文通过分析国内直升机电传飞控作动系统技术现状，设计了一套以射流管、FPGA 为基础的双余度直升机飞控作动系统，并利用工程试验、仿真分析等方法来检验系统具体性能指标。实验分析结果显示，该系统具有较强的可靠性、集成度、频响等特征，给我国直升机电传飞控作动系统实现可持续发展提供了多样化选择。

【关键词】：直升机；电传；飞控作动系统；电液伺服系统

Design and Implementation of Electro-Hydraulic Servo Flight Control Actuation System for Helicopters

Yanpeng Tong

Tianjin Airlines Daxiongying Aviation Engineering Co., LTD., Tianjin 300308

Abstract: With the continuous development of flight control technology, the fly-by-wire operating system has gradually been popularized into the flight control system of the helicopter by virtue of its own high efficiency and simplicity, and compared with the traditional flight control system, the fly-by-wire operating system can effectively optimize the flight speed of the helicopter, reduce the difficulty of pilot operation, and lay a solid foundation for the integrated flight control technology and active control technology. In this paper, by analyzing the technical status of domestic helicopter fly-by-wire flight control actuation system, this paper designs a set of double-margin helicopter flight control actuation system based on jet tube and FPGA, and uses engineering tests, simulation analysis and other methods to test the specific performance indicators of the system. After experimental analysis, the results show that the system has strong reliability, integration, frequency response and other characteristics, providing diversified choices for the sustainable development of China's helicopter fly-by-wire flight control system.

Keywords: Helicopter; Fly-by-wire; Flight control actuation system; Electro-hydraulic servo system.

前言

在正常情况下，飞控作动系统属于飞控系统的重要环节，主要由作动器和控制单元两个环节构成，该系统能根据飞控计算机指令来调整桨距，操作整个舵面，而传统直升机具有作动器故障后无法操作、桨叶间耦合度高、操作空间小等缺点，所以飞控作动系统会给飞行安全带来严重影响，是目前我国直升机飞机上最重要的子系统。近年来，国外逐渐将电传操纵技术应用到直升机日常生产中，其中主要包括电液伺服作动技术、分布式架构、集中式架构技术等，给技术应用带来多种机遇。但从目前国内直升机具体情况来看，由于技术更新速度较慢，直升机飞控作动系统仍然采用液压助力作动技术，只有个别型号的直升机实现电传作动技术，和国外直升机技术相比，我国直升机技术过于单一化。基于此，本文通过对比国外直升机飞控作动系统，来集中体现该系统技术特点，以国内某型号直升机为基础，来研究飞控作动系统的关键技术和架构设计，并借鉴外国系统成功经验，来构建工程试验方法和模型仿真实验，给我国研究人员探索直升机电传飞控作动系统提供丰富的数据资源^[1]。

2 国外典型先进直升机飞控作动系统对比

2.1 NH—90 直升机

NH—90 直升机属于双发中型单旋翼多功能直升机，其将电传操纵技术作为主要机型，被称作欧洲直升机行业的标杆。同时，该系统具有如下特征：首先，系统利用分布式结构，将作动控制器独立在常用操作系统外，通过 FCC 和电缆实现信息传输功能；其次，系统整体是利用液压机械双余度结构、电气四余度，将两台作动器作为主要控制器；再次，尾桨作动器、主桨作动器等环节是将液压双余度作为主体，通过利用旋转式直接驱动阀技术来操控两个 R-DDV，从而实现双系液压作动筒油液分配工作；最后，控制器是利用模拟伺服控制技术，其自身具有较强的抗干扰能力，单台控制器中有两个伺服控制渠道，单通道是采用指令和监控相互的方式，来有效确保飞控作动系统能具备处理工作故障的能力。

2.2 RAH—66 直升机

RAH—66 直升机是由美国西科斯基公司和波音公司共同研发，属于双发单旋翼隐身武装直升机，是美国首例使用电传操纵技术的直升机。自从美国出现该种类型直升机后，就正式

走进电传操纵时代,人们通过对其进行深度,发现三余度电传操纵技术,随后该技术被广泛应用在多种机型中,如CH-53K直升机、S-92直升机等,该种直升机飞控作动系统具有各种优点。第一,系统通过采用集中式结构,将作动器控制单位安装在FCC上;第二,通过FCC独立作动器控制单元来控制尾桨作动器、主桨作动器;第三,利用液压机械双余度并联单耳输出构型,来作为双余度串联的主体,都通过电液伺服阀技术来操作电气三余度EHV,从而达到双系液压作动筒油液分配任务[2]。

2.3S-92 直升机

该直升机是一款双发中型单旋翼多功能直升机,其具有飞行安全性高、速度快等特征。该飞机是利用电传操纵技术为主体,其作动技术、飞控作动系统结构等方面和RAH-66直升机相似。同时,S-92直升机作动器控制环节是以模拟伺服控制技术为载体,其抗干扰能力要远超其他直升机,单台FCC中有一个伺服控制渠道,且FCC具有监控和主控两个环节,所以能有效提升飞控作动系统的容错率[3]。

2.4 对比分析

通过分析上面三种国外电传操纵技术的直升机,准确掌握飞控作动系统技术具有多样化特征通过分析三种直升机基本数据,得出以下结果:

(1)传统单旋翼直升机具有飞控作动器故障后无法重构、操作空间小、桨叶间契合度高等特征。因此,为确保整个飞行任务安全性,飞控作动系统可利用电气四余度或者三余度为主体。

(2)在液压余度方面,飞控作动器液压余度通常是采用两余度;

(3)相比于飞机上其他系统,飞控作动系统具有较强频响能力,能有效加强作动系统抗电磁干扰能力;

(4)在三种不同类型的直升机中,NH-90直升机的飞控作动器是使用DDV作动器,和EHV作动器相比,该种类型的作动器具有较强的抗油液污染能力,但其驱动电流是其他作动器的数倍,且具有较高的发热量和电功耗。而其他两种类型的直升机的飞控作动器则是将EHV作动器作为主体,且从工作人员所收集的基本资料而言,目前很多直升机飞控作动器全部是利用EHV作动器。

3 系统关键技术研究

3.1 高安全系统架构设计技术

工作人员通过分析直升机电传飞控作动系统基本情况,能准确计算出系统架构设计图。发现系统主要包括伺服控制板卡、尾桨作动器、主桨作动器等环节。其中单台伺服控制板卡上安装伺服控制支路,来控制所有电气余度,而主桨和尾桨作

动器全部是由液压机械双余度串联形成。

通过分析系统架构和系统功能危险性,将飞控作动系统丧失基础功能作为灾难性事故。同时,利用故障树分析法来分析已确定的灾难性事故,通过电子设备可靠性手册和非电子零件数据来收集故障树数据,其中电子器件可靠性数据是通过手册中失效率预计模型来计算,但值得注意的是,在确定公式中相关数据时要考虑到当期产品应用环境,并借鉴大量传统产品设计数据,从而确保正确的数据,本文只从设计角度来确定产品可靠性数据,进而准确判断系统架构安全性。

工作人员可将这些数据作为基础,来提高飞控作动系统控制能力,经工作人员计算该失去伺服功能概率为 $6.220 \times 10^{-10}/FH$,而民用直升机对风险分类做出明确分析,并对灾难性事故概率提出更高要求,要求直升机企业将灾难事故概率降低到 $1 \times 10^{-9}/FH$ 范围。因此,所设计的直升机飞控作动系统架构在满足安全性设计目标基础上,来提升直升机飞行安全性。

3.2 高可靠伺服控制技术

伺服控制单元作用是控制飞控作动器的位移,其飞控作动系统安全性对于整个直升机具有至关重要的作用。因此,工作人员要加强对它的重视程度,避免因其出现任何问题,进而影响整个飞控系统的可靠性。同时,伺服控制单元是飞机的基本单元,其自身内在电磁环境过于复杂,对飞控作动系统频响提出更高要求。基于此,为提高伺服控制单元抗电磁能力,满足系统对高频响日常要求,结合对三种不同类型直升机数据分析,可将系统故障监控和伺服控制等环节利用模拟技术来进行管理,如果仍然采用传统技术来进行余度管理,很容易给电路控制带来严重影响。因此,在本次方案中可采用FPGA功能,合理利用其灵活性高、运行快、可编程等特征,实现逻辑信号处理、系统余度管理等功能,从而有效降低伺服控制单元硬件的复杂性,进而满足系统对伺服控制单元提出的可靠性要求。

4 系统仿真建模与分析

4.1 系统架构

利用两层C/S结构体系能有助于工作人员构建应用程序,有利于节约开发系统的时间。另外,统一模块内能准确查询所有代码,不需要去查询其他组件,虽然这些能节约大量系统开发期限,但由于数据库数据容量不断拓展,当客户端数量内容愈发增加时很容易出现很多方面的问题:第一,可扩充性,针对数据库服务端来说,系统资源经常会与大量数据端进行连接,当连接数量超过标准值时,会大幅度降低数据库服务器的处理效率,阻碍系统正常运行;第二,可维护性,由于所有业务操作和基本规则都需应用到客户端程序,如果个别客户的需求出现一定程度的变化,工作人员应根据客户需求来优化客户端程序,并通知所有用户进行升级;第三,可移植性,客户端

应用主要包括业务规则、合法性校验、数据库连接等内容，往往需要将所有性能全部转移到其他工程，就算能利用粘贴辅助的方式来进行修改，但同样具有较高的难度。

4.2 主桨作动系统仿真建模

通过将作动器、控制原理、系统架构、决策系统等环节融合，结合实际情况选择合理的机械模型库模型，并根据大量系统建模经验，来构建液压机械双余度主桨作动子系统的仿真模型，并根据系统设计结构来设置仿真模型参考数据，主要参考数据如表1所示，将系统仿真时间设置在1s，通讯间隔定义在0.01s。决策支撑系统最早出现在《管理决策系统》中，其是以管理信息系统、管理科学等为载体来开展相关工作，再结合相应模型来实现辅助决策的作用，是目前运筹学和管理学融合的结果。而管理信息系统通过使用大量数据来确保信息管理工作正常运行；而决策支撑系统是两者的融合体，将大量数据和模型有效结合，从而形成正确的决策方案，再采用人机交互界面给机械决策提供丰富的数据支撑。近年来，出现基于知识推理的辅助决策系统，其采用定性方式来进行辅助决策，和传统决策支撑系统存在一定差异性，接下来研究人员注重研究智能决策支持系统，将专家系统和决策支持系统相结合，且新决策支撑系统和传统决策支撑系统间关系过于密切，并非取代关系而是互补关系，通过两者相结合所形成的决策支撑系统才是未来直升机选型的主要方向。

表1 主桨作动子系统主要参数

参数	数值	参数	数值
进油压力	20	作动固定质量	10.5
回油压力	0.8	作动活动质量	5.5
阀驱动电流	15	行动行程	±70
阀额定流量	25	作动外载	5300

参考文献:

- [1] 杨龙飞.基于无模型自适应控制的倾转翼无人机飞控系统研究[D].江西:南昌航空大学,2020.
- [2] 巩鹏满,左思佳.国外舰载直升机自动过渡功能飞行试验安全风险[J].科技创新与应用,2020(4):78,81.
- [3] 张爱宾,吴杭伟.基于人工操纵的共轴双旋翼直升机液压流量需求分析[J].中国科技信息,2020(13):24-25.

作者简介: 全艳朋(1989.10), 男, 汉族。学历: 中国民航大学本科(学士学位); 职称: 无; 研究方向: 直升机及民航客机机载计算机类设备维护, 包括自动驾驶系统、飞控系统、飞行管理系统等, 对飞机各系统原理进行分析, 维护飞行器适航状态, 确保飞行安全。

4.3 系统动态特征分析

由于系统是将电气四余度作为主体来进行设计。因此, 工作人员在注重系统动态特征基础上, 来分析后期影响因素, 确保系统在不同情况下的仿真指令相同。当系统在电气三余度工作时, 幅值降低到-3dB 频宽, 能符合基本设计要求, 从而能满足行业要求。通过分析不同工况下的具体数据, 发现系统在不同情况下工作的具体性能, 从而降低直升机飞控作动系统的故障概率, 提升直升机的机动性, 减少飞行员操纵负担。当系统处于电气双余度工作状态时, 能满足电传飞控作动系统电气操作要求。

5 总结

本文通过设计一套以射流管、FPGA 为基础的双余度直升机飞控作动系统, 并利用工程试验、仿真分析等方法来检验系统具体性能指标。经过实验分析结果得出如下结论:

(1) 和数字伺服控制技术相比, 利用模拟伺服控制技术的飞控作动系统能极快响应 FCC 指令, 并具有较强的抗干扰能力。同时, 根据系统基本特征, 工作人员可利用 FPGA 来进行余度管理、逻辑信号处理等功能, 有效降低电路控制复杂性, 提高伺服控制的可靠性;

(2) 在直升机飞控作动方面, 实现电液伺服作动技术的研究工作, 可利用伺服阀模型监控和射流管式伺服阀来提高作动器的安全性。