先进民机飞控系统发展的需求与设计考虑

石鹏飞, 谭智勇, 陈洁*

中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所, 西安 710065

* E-mail: jchen@facri.com

收稿日期: 2017-06-30; 接受日期: 2017-10-20; 网络版发表日期: 2018-02-09

摘要 随着现代民用航空业的发展以及日益激烈的市场竞争环境, 对民用飞机机载设备的要求不断提高, 尤其是安全性、经济性、舒适性和环保性需求. 飞行控制系统如何实现技术能力提升来满足这些需求, 成为先进民用飞机的飞行控制系统设计与研制必须考虑的问题. 本文分析和回顾了国内外典型系列民用飞机的飞行控制系统技术的发展趋势, 提炼了民用飞机的飞行控制系统进一步发展面临的需求, 并针对性地提出了对飞行控制系统的设计考虑.

关键词 电传飞控系统, 民机飞控系统, 高安全架构, 电功率作动, 主动控制技术

1 引言

民用飞机的飞行控制系统(以下简称民机飞控系统)的主要功能是保证飞机的稳定性和操纵性, 改善飞行品质, 确保飞行的安全及减轻驾驶员负担. 飞行控制系统包括主飞行控制系统(人工操纵)和自动飞行控制系统(自动驾驶仪). 其中主飞行控制系统属于民机的安全关键系统, 其功能是飞行员通过驾驶杆(或杆/盘)以及脚蹬控制飞机的升降舵、副翼和方向舵等飞机操纵面, 实施对飞机俯仰、倾斜和航向的控制^[1].

随着现代民用航空业的发展以及日益激烈的市场竞争环境, 对于安全性、经济性、舒适性和环保性的需求不断提升, 民机飞控系统如何实现技术能力提升来满足这些需求, 成为先进民机飞控系统设计与研制必须考虑的问题.

本文首先从信息传输、系统架构、功能扩展、功

率作动4个方面, 分析和回顾了国内外典型系列民机飞控系统技术的发展趋势; 接着, 本文梳理和提炼了民机飞控系统进一步发展面临的新需求以及这些需求对飞控系统技术带来的挑战, 包括安全性需求、经济性需求、舒适性需求以及环保性需求; 最后, 本文针对性地提出了满足需求、应对发展趋势的飞控系统技术和设计考虑. 随着我国民机发展战略的实施, 国产民机飞控系统技术将向国际先进水平看齐, 在功能性、安全性、经济性和舒适性方面得到进一步提升.

2 民机飞控系统技术发展回顾

民用飞机包括支线客机、干线客机、通用航空飞机、民用直升机等. 其中, 干线客机由于载客多, 设备先进, 安全性和技术要求高, 集中体现了一个国家航空先进技术的发展水平. 因此, 了解以干线客机为代表的

引用格式: 石鹏飞, 谭智勇, 陈洁. 先进民机飞控系统发展的需求与设计考虑. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 237–247

Shi P F, Tan Z Y, Chen J. The development requirement and design considerations for advanced civil aircraft flight control system (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 237–247, doi: [10.1360/N092017-00215](https://doi.org/10.1360/N092017-00215)

民机飞控系统的技术发展规律及特点, 对分析民机飞控系统发展趋势, 确定民机飞控系统发展的新需求十分必要。

2.1 国内外民机飞控系统的技术发展

国外干线客机飞控系统的发展趋势主要体现在空客公司和波音公司的技术发展路线上。

表1和表2分别表示了空客飞机和波音飞机飞控系统的技术发展特点^[2,3]。其中, 两个系列飞机发展的共性特征是已经逐步由机械/液压助力操纵系统发展为电传飞行控制系统, 其主要差异是采取的操纵机构形式不同(空客飞机采取侧杆形式、波音飞机仍沿用中央操纵杆形式)。在系统架构方面, 为满足高安全性的需求, 两个系列飞机虽然采取了不同的物理架构形式, 但从功能上, 均体现了功能综合的共性特征, 自动飞机控制已经与电传操纵控制集成在一个电子部件内。为满足高安全性要求, 均采取了非相似冗余度配置, 此外, 多电技术的功率作动器也开始采用。

国内民机发展起步较晚, 20世纪70年代的Y-10飞

机是我国首次自行研制的大型客机, 2002年国产ARJ21飞机立项启动研制, 目前国产C919飞机已完成首飞。我国民机飞控技术特点也呈现了数字化、功能综合化发展趋势。表3所示为我国主要型号民机飞控系统发展的主要技术特点和趋势。

2.2 典型飞控系统技术特点分析

综上所述, 典型飞控系统技术发展趋势体现如下。信息传输方面, 从“机械”到“电传”, 即从机械操纵飞行控制向电传操纵飞行控制发展。

系统架构方面, 从“集中”到“分布”, 即从集中式的正常控制、备份控制和作动器控制方式到正常控制、备份控制和作动器控制采用物理/功能上的分布式网络架构方式。

功能扩展方面, 从“独立”到“耦合”到“一体化”, 即从功能分离的主飞控和自动飞行向功能耦合的主飞控/自动飞行综合, 随后进一步向控制/信息管理一体化平台方向发展。

功率作动方面, 从“机械”到“液压”到“多电/全电”,

表1 空客系列飞控系统技术特点

型号	飞控系统	技术特点
A300	经典飞行控制	机械操控+自动驾驶仪 俯仰轴、横滚轴全权限电传控制, 航向机械控制+增稳; 侧杆;
A320	电传飞行控制+机械备份	2个升降舵副翼计算机、3个扰流片/升降舵计算机、2个增稳计算机、 独立自动驾驶仪计算机; 水平安定面机械备份
A380	电传飞行控制+电功率备份, 无机械备份	3轴全权限电传控制; 3个主飞控/导航计算机、3个辅助飞控计算机; 独立的电备份控制系统, 采用电静液作动器(Electro-hydro-static actuator, EHA)和电 备份液压作动器(Electric Back-up Hydraulic Actuator, EBHA)技术

表2 波音系列飞控系统技术特点

型号	飞控系统	技术特点
B737	经典飞行控制	机械操控+自动驾驶仪 3轴全权限电传控制;
B777	电传飞行控制+机械备份	3个飞控计算机和4个模拟式作动器控制电子(actuator control electronics, ACE), 独立自动飞行控制计算机; 水平安定面机械备份, 部分扰流板机械备份控制
B787	电传飞行控制+电功率备份, 无机械备份	3轴全权限电传控制; 3个飞控计算机、4个ACE和19个远程电子单元(remote electronic unit, REU)组成; 计算机集成自动飞行、大气/惯导数据处理等功能; 水平安定面电力驱动控制

表 3 商飞系列飞控系统技术特点

型号	飞控系统	技术特点
Y-10	经典飞行控制	机械操控+自动驾驶仪
ARJ-21	电传飞行控制	3轴全权限电传控制; 2个计算机, 6个ACE, 独立的自动飞行控制计算机; 全电控水平安定面配平舵机
C919	电传飞行控制+部分电功率, 无机械备份	3轴全权限电传控制; 3个飞控计算机、4个ACE和远程电子单元REU组成; 计算机集成自动飞行、大气/导航数据处理等功能; 水平安定面电力驱动控制

即驱动方式由机械驱动到液压驱动, 进一步向多电/全电驱动方式发展.

概括来说, 民机飞控系统的发展趋势呈现“五化”的特点, 即系统架构网络化、系统硬件电子化、系统功能软件化、作动功率电力化、控制功能智能化.

3 民机飞控系统发展需求

根据上述对民机飞控系统发展趋势与技术特点的分析, 先进民机飞控系统在满足电传飞控系统的主要功能(如主飞行控制功能、配平功能、自动飞行控制功能等)的基础上, 还需满足诸多民机飞控系统的发展新需求^[4].

3.1 安全性需求

安全性需求是民机飞控的第一需求, 要求飞控系统失效导致灾难性结果的概率小于 10^{-9} /飞行小时, 这带来了设计技术、评估和验证技术以及流程方法方面的诸多挑战^[5-7].

在设计技术方面, 面临着技术难度不断提升的挑战. 为了满足安全性设计需求, 需要采用诸如功能分区、物理隔离、非相似余度设计/监控、分时分区保护机制的操作系统等技术.

在评估技术方面, 面临着评估不断细致化、全面化的挑战. 为了能够准确地评估飞控系统是否能够满足安全性需求, 需要开展功能危害度评估(FHA)、系统安全性分析(SSA)、共因分析(CCA)等安全性评估工作.

在流程方法方面, 面临的挑战在于流程方法必须能够保证需求、设计与验证的完整性. 满足安全性需求的系统开发流程如图1所示.

3.2 经济性需求

经济性是商业化的基本要求, 也是对民机机载系统的重要要求. 民机飞控系统的经济性需求对飞控系统的设计、开发、制造和维护提出新的挑战(图2).

在降低设计开发成本方面: (1) 采用一体化设计技术, 实现功能综合, 减少设备数量; (2) 开发针对性的工具, 建立高效的研发流程; (3) 采用模块化的研发方法, 充分继承和沿用已有的研发成果.

在降低生产制造成本方面: (1) 采取有效的供应链管理, 合理进行渠道控制, 实现精益生产, 减少浪费; (2) 提升工艺技术, 在保证安全性的前提下采用低成本材料; (3) 精益生产, 减少生产损耗和浪费.

此外, 还可采用延迟维护、基于派遣可靠性的优化设计等技术实现降低运营成本, 从而满足经济性需求.

3.3 舒适性需求

舒适性要求是飞控系统应尽可能地提升飞行员的操纵品质以及乘客的乘坐品质.

乘客要求体现在: 更小的颠簸、更少的过载感受和更小的失重感. 这需要飞控系统采用阵风减缓、颤振抑制等主动控制技术实现.

飞行员要求体现在: 易于操纵、无忧虑操纵、实现自动飞行. 这需要通过增稳系统、功能强大的自动飞行控制(包括自动驾驶、飞行指引、自动油门和自动着陆等)和边界保护技术实现.

3.4 环保性需求

随着民用航空业的迅猛发展, 航空污染排放的增长速度不断加快, 民机环境污染问题越来越受到重视. 欧洲联盟为配合新环保要求, 提出了清洁天空计划. 计

图 1 (网络版彩图)满足安全性需求的系统开发流程

图 2 (网络版彩图)满足经济性需求的设计开发

划将通过改善飞机的燃油系统等举措,减少航空运输对环境的影响。为了使设计的民用飞机更具有市场竞争力,民机飞控系统设计阶段,必须明确环保特性

的重要性和必要性。

为了满足环保性需求,必须提升设计理念,开发采用新型特殊工艺,实现降低燃油消耗、减少温室气体

及废弃物排放的目标。

4 面向发展需求的民机飞控系统设计考虑

面对以上对民机飞控系统发展的安全性、经济性、舒适性和环保性的需求,对于先进民机电传飞控系统而言,需要在已有成熟技术的基础上,充分考虑以下的系统设计和控制技术,才能对接需求、满足需求并引领技术发展的新方向。

4.1 安全性设计考虑

民机的高安全性需求,要求在飞控系统架构^[8]、操纵输入、飞控计算机等部件设计以及开发流程方面,全面提升安全性能力。

4.1.1 高安全性系统架构技术

飞行控制系统的架构设计受安全性要求、功能要求、成本、重量等多方面的条件约束,对于民机来说,首要考虑的是系统架构的高安全性,以图3所示的系统架构为例,具体体现在以下方面。

(1) 独立性原则: 要求系统的通道之间在电气、物理以及功能上彼此独立,防止故障蔓延。如每个ACE通

道仅控制某个主操纵面的一个作动器。

(2) 非相似性原则: 要求执行同一功能的冗余单元采取两种或多种物理构型或控制方式,防止共模故障导致系统功能整体丧失。如用电力控制的水平安定面和电液伺服阀驱动的升降舵两种方式控制飞机的俯仰运动^[9]。

(3) 完整性监控: 应对故障危害度I类和II类功能的完整性进行监控,当监控器检测到故障后应对故障的通道/单元进行切除。如由CPU和FPGA执行的复杂功能,对其监控采用“指令支路-监控支路”的比较监控方式。

此外,安全性架构的设计还包括: 基于最小可接受控制(MAC)要求的控制分配,电源和油源的优化配置设计,高安全飞控计算机架构等。

4.1.2 主动侧杆技术

采用主动侧杆操纵,能够替代机械杆力反馈功能,通过电动杆原理调整驾驶杆的“力-位移”反馈特性,获得更好的操纵性能(图4),并实现诸多安全性保护功能,包括: 包线保护功能、主/副驾驶双杆“电气”联动及触觉告警功能等。

主动侧杆的研究需要突破众多的关键技术,包括:

图3 (网络版彩图)高安全性飞控系统架构

图4 (网络版彩图)主动侧杆控制与保护功能

多变量多回路伺服控制技术、包线保护主动控制与告警设计技术等。

4.1.3 高完整性飞控计算机技术

飞控计算机是飞控系统的核心部件,对于具有高安全要求的民机飞控系统,其飞控计算机要求能提供高可用性和高完整性。因此,民机飞控计算机在硬件设计上,要求既能抑制硬件完整性共模故障又能提供接近100%的故障检测覆盖率。

抑制共模故障通常采用非相似的计算机设计方法,包括:不同的CPU架构、不同的总线类型、同一功能采用不同的设计实现等方式。

提高自检测覆盖率,除了对不同功能电路设置相应的监控器进行故障检测外,对核心处理器CPU采用锁步自监控技术,从而提高处理器对随机故障的检测和纠错能力。

4.1.4 需求的逐级分解和验证确认方法

为了满足安全性需求对流程和方法的要求,民机系统的需求开发与集成验证,应遵循民机适航规范。

在需求开发阶段,从飞机级、多系统级、子系统级到设备级逐层向下进行需求的分解,在需求的验证阶段,从设备级、子系统级、多系统级到飞机级,自底向上进行集成验证(图5)。

4.2 经济性设计考虑

经济性设计主要考虑通过功能综合一体化设计、产品的轻量化设计等,降低设计/制造成本和运营/维护

成本,提高经济性。

4.2.1 综合一体化平台技术

飞控系统包括ATA的第27章“飞行控制”和第22章“自动飞行”,按照专业分为主飞行控制系统、自动飞行控制系统及高升力控制系统。

将飞控系统的主飞行控制系统、自动飞行控制系统以及高升力控制系统进行功能集成,提供综合一体化平台,如图6所示,将最大程度优化系统设备构型,节约资源,提升飞控系统的经济性。

4.2.2 集成化、轻量化伺服作动技术

为了满足飞控系统经济性要求,伺服作动系统作为飞控系统的关键部件需要开展高度集成化设计和轻量化设计^[10]。

集成化作动系统设计包括:电液伺服阀、功能阀等组件与壳体集成化设计;壳体、筒体一体化设计;电机泵一体化设计等(图7)。

轻量化作动系统设计包括:基于三维油路等强度拓扑结构的最小包络化设计;复合材料技术以及高压作动技术。

4.2.3 维护性设计技术

维护性是民用飞机的一个重要特性,直接决定民用飞机的维护便捷性和经济效益^[11,12]。

功能完备的飞控系统维护功能和BIT检测能力,可以实现故障隔离和快速定位。采用自动维护设计,如舵面的自动调零,换件测试、安全性测试,可以尽可能

图 5 (网络版彩图)V型开发与验证流程

图 6 (网络版彩图)综合飞控系统

避免人为维护带来的操纵失误, 提高安全性的同时, 也可以有效地降低飞机的运营和维护成本。

典型的维护操作流程如图8所示。采用模块化的维护设计能够显著减少维护、实现延迟维护, 并向机组

维护人员提供便捷的快速维护。

4.3 舒适性设计考虑

舒适性设计需求对于飞控系统而言, 主要体现在

图 7 (网络版彩图)伺服动作集成化设计(a)和伺服动作集成化设计(b)

图 8 (网络版彩图)维护操纵流程

乘客的乘坐舒适性和驾驶员的操纵舒适性, 因此需要采用阵风缓和、横航向P-BETA控制、推力不对称补偿等控制律设计技术。

4.3.1 阵风缓和控制

民用客机在巡航、转弯飞行中常受到强烈阵风干扰, 使飞机产生不期望的附加过载和振动、颠簸, 影响飞机的操纵性、稳定性, 降低乘坐舒适性。

为了抑制阵风对飞机的不良影响, 可采用阵风缓和和策略^[13], 实现对阵风的补偿控制, 提升乘坐舒适性。基于信息预测的阵风缓和控制技术可以提前感知风扰动信息, 实现对阵风有效的抑制。

基于信息预测的阵风缓和控制结构如图9所示, 通

过传感器和信息预测技术提前感知阵风信息, 通过阵风超前抑制控制算法提前得到操纵面指令, 给操纵面足够的作动时间, 可显著抑制飞机进入阵风时刻的扰动响应, 实现高品质的平稳飞行。

4.3.2 横航向P-BETA控制

横航向P-BETA控制律具有增加航向稳定性、改善荷兰滚阻尼、改善滚转协调性以及自动推力不对称补偿的功能, 可以减轻驾驶员负担, 提高乘坐舒适性。

横航向P-BETA控制律结构如图10所示。P-BETA控制律通过横向指令滚转角速率 P 、航向指令侧滑角 β , 实现飞机的稳定飞行。采用经典的PID结构实现侧滑角控制, 用于增加荷兰滚阻尼, 改善荷兰滚频率。

图 9 (网络版彩图)基于信息预测的阵风缓和和控制结构图

图 10 横航向P-BETA控制结构图

4.3.3 推力不对称补偿控制

飞行过程中, 发动机推力差将产生非指令的滚转和侧滑, 影响飞机的飞行稳定, 增加了驾驶员的操纵负担。

推力不对称自动补偿控制律是在原有的横航向基本控制律基础上, 根据左/右发动机的推力差和飞行状态, 自动生成舵面补偿指令, 以补偿发动机推力差产生的非指令滚转和侧滑, 实现飞机的稳定飞行^[14]。

推力不对称自动补偿控制律结构如图11所示。左/右发动机推力差乘以增益后, 经过启动逻辑滤波环节

和限幅后, 叠加到基本控制律指令上。

4.3.4 俯仰轴中性速度稳定性控制

空客飞机在采用侧杆后, 俯仰控制采用了具有中性速度稳定性的控制律构型, 一是减轻了采用比例式控制需要驾驶员不断地进行配平带来的驾驶负担; 二是通过状态响应反馈, 可实现不同重心重量和不同型号的飞机, 在飞行包线范围内操纵的一致性, 从而有利于不同机型的驾驶员改装。

图 11 推力不对称自动补偿控制结构图

4.4 环保性设计考虑

采用功率电传和高压作动的飞控系统可以减少污染物排放, 提高民用飞机的环保性^[15,16]。

4.4.1 功率电传作动技术

电功率作动采用电机进行功率传输和驱动, 通过控制电机的运行直接或间接地控制负载的运动, 实现对目标的位置控制(图12)。电功率作动主要关键技术包括: 高转速/高功重比电机及控制技术、热分析技术、排气及含气检测技术等。

图 12 (网络版彩图)电功率作动器

4.4.2 高压作动技术

高压作动技术是指作动器额定工作压力为35 MPa及以上压力级别的作动系统。

高压力体系能够有效提高作动器功率重量比, 减小飞机液压作动系统重量和体积, 从而降低飞机的排放。高压作动技术需突破的关键技术包括: 高压作动器密封技术、高压射流PQ伺服阀及高压高速集成化液压泵(马达)技术。

5 结束语

本文通过对先进民机飞控系统发展需求和技术特点的分析, 指出了该领域的发展方向, 提出了满足需求、应对发展趋势的飞控系统技术和设计考虑。

随着我国民机发展战略的实施, 国产民机飞控系统技术将向国际先进水平看齐, 在功能性、安全性、经济性和舒适性方面得到进一步提升。

参考文献

- 1 吴森堂, 费玉华. 飞行控制系统. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005
- 2 Brière D, Traverse P. AIRBUS A320/A330/A340 electrical flight controls—A family of fault-tolerant systems. In: The Twenty-Third International Symposium on Fault-Tolerant Computing. IEEE, 1993: 616–623
- 3 Yeh Y C. Dependability of the 777 primary flight control system. In: Dependable Computing And Fault Tolerant Systems. Washington DC: IEEE Computer Society Press, 1998, 10: 3–18
- 4 王永. 民机飞控系统的发展思路研究. 系统仿真学报, 2008, 2: 200–204
- 5 FAR-25.1309/AC 25.19 Airworthiness Standard: Transport Category Airplanes. Federal Aviation Regulation
- 6 SAE ARP 4754A. Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems. SAE International Standard
- 7 SAE ARP 4761. Safety Assessment Process Guideline and Methods. SAE International Standard
- 8 王永. 民机电传飞行控制系统体系结构研究. 见: 大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年学术年会论文集. 深圳: 中国航空学会, 2007
- 9 秦旭东, 陈宗基, 李卫琪. 大型民机的非相似余度飞控计算机研究. 航空学报, 2008, 29: 686–694
- 10 夏立群, 朱明君, 胡逸雪. 紧凑型灵巧作动器的伺服控制. 机床与液压, 2016, 44: 122–125

- 11 宋乐, 解庄, 王涛, 等. 中央维护架构下的飞控系统BIT设计. 见: 中央维护架构下的飞控系统BIT设计. 北京: 中国航空学会, 2015
- 12 谭智勇. 大型民机飞控系统维护功能及BIT浅析. 见: 中央维护架构下的飞控系统BIT设计. 北京: 中国航空学会, 2015
- 13 谭智勇. 阵风缓和控制系统设计研究. 硕士学位论文. 西安: 西北工业大学, 1998
- 14 姬猛. 推力不对称时民机飞行控制律重构技术研究. 硕士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2011
- 15 黄子林, 刘宏明, 马勇. 多电飞机飞控系统的技术应用. 航空制造技术, 2014, s1: 199–200
- 16 夏立群, 牛世勇, 张新国. 液压系统的气体污染与控制. 机床与液压, 2008, 36: 80–82

The development requirement and design considerations for advanced civil aircraft flight control system

SHI PengFei, TAN ZhiYong & CHEN Jie

AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China

With the development of modern civil aviation industry and the increasingly fierce market competition environment, the requirements for civil aircraft equipment continue to improve, especially the safety, economy, comfort and environmental friendly demands. How to enhance the technical ability in order to meet the requirements of the flight control system has become a problem which must be considered in the design and development of advanced aircraft flight control system. This paper reviews and analyzes the development trend of domestic and foreign typical series of civil aircraft flight control technology, refining the demands faced by civil aircraft flight control system in order to seek further development, and puts forward the corresponding design considerations.

fly-by-wire flight control system, civil aircraft flight control system, high security architecture, electric actuation, active control technology

doi: [10.1360/N092017-00215](https://doi.org/10.1360/N092017-00215)