

工程中的飞机系统综合设计综述

康文文* 李浩敏

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: 飞机研制单位缺乏对飞机系统综合设计内容的全局了解导致无法提前开展有效的工作规划, 研制后期综合设计主题的产生呈现出涌现性, 经常需要返工并打乱研制计划, 造成成本和进度问题。为解决这个问题, 对工程中的飞机系统综合设计进行了综述, 提出了基于系统工程的飞机系统综合设计流程, 并对飞机系统综合设计内容进行了全面推演, 首先识别利益攸关方期望的运行概念, 然后提炼综合设计目标, 最后识别飞机级综合设计内容主题及其关联技术专业; 根据竞争能力等关键衡量指标, 指出了最为关键的综合设计主题和相关难点。可以为飞机研制单位及其系统综合设计工程师提供有益参考, 帮助其开展整机系统综合设计的全局规划, 并最终实现降本提质的目标。

关键词: 飞行器设计; 飞机系统; 综合设计; 系统工程

中图分类号: V221+.8; V37

文献标识码: A

OSID:



0 引言

飞机设计的本质是“系统综合”, 单科性的知识不能概括综合设计中的全部规律, 飞机系统综合设计是一项典型的多目标决策工作^[1]。基于系统工程的正向设计思路在飞机设计工程领域已经应用了多年, 但飞机系统综合设计依然是一个难点。

飞机系统综合设计对基础学科的应用集成链路很长, 覆盖数学/物理等基础学科、电子设计/机械设计/软件设计等应用学科, 同时覆盖某个具体设备的设计、某个系统的设计以及飞机系统的整机集成设计等多个设计层级。一直以来, 飞机设计工程师都是从基础学科和应用学科入手, 逐渐扩大范围, 其事业大多止步于某个飞机子系统或者系统的设计, 没有途径了解或者参与更大范围的多系统综合设计, 而更加综合和困难的飞机层系统集成设计, 往往只掌握在少数几个总设计师手中。以基础学科为起点, 缺乏对飞机系统综合设计的全局了解, 工程师很难掌握飞机系统综合设计的能力, 这是导致正向的

飞机系统综合设计始终是个难点的根本原因之一。工程师的一个迫切诉求是了解“飞机系统综合设计内容有哪些”。

不同政府机构或组织发布了多种系统工程理论参考材料和标准, 包括 FAA(美国联邦航空管理局)的《NAS 系统工程手册》^[2]、NASA(美国国家航空航天局)的《系统工程手册》^[3]、INCOSE(系统工程国际委员会)的《系统工程手册》^[4]、DoD(美国国防部)的《系统工程基础》^[5]、ISO(国际标准化组织)的《ISO15288 系统和软件工程-系统全生命周期过程》^[6]、EIA(电子工业协会)的《EIA-632 系统工程过程》^[7]等, 均要求在复杂系统的设计过程中进行“系统综合设计”(synthesis), 但都只给出了框架性的步骤指导, 需要结合具体复杂系统比如飞机系统的特点由工程单位自行定义系统综合设计规范; 在明确了系统综合设计的基本内涵和步骤后, 飞机研制工程单位面临的第一个关键问题也是“飞机系统综合设计的内容有哪些”。

Ian Moir 先生在《飞机系统-机械、电气和航电子系统集成》^[8]和《民用航空电子系统》^[9]书中详细

* 通信作者. E-mail: kangwenwen@comac.cc

引用格式: 康文文, 李浩敏. 工程中的飞机系统综合设计综述[J]. 民用飞机设计与研究, 2022(1):180-190. KANG W W, LI H M. Review on aircraft system synthesis design in engineering[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2022(1):180-190 (in Chinese).

介绍了飞控系统、液压系统、电气系统以及各种航空电子系统的组成和原理,并在《飞机系统的设计和开发》^[10]一书中将系统工程思想与飞机系统的设计进行了充分融合,指出了飞机系统设计需要全面考虑机体系统、机械系统、航电系统等的综合设计和集成,并指出了系统集成的多个层级,包括组件层、系统层、过程层、功能层等,而功能层集成需要考虑对利益攸关方诉求的满足,是抽象层面的集成。Ian Moir 先生将系统工程思想贯彻到了飞机系统设计中,但依然没有回答“飞机系统综合设计的内容有哪些”这个问题。

国内飞机设计工程领域的关键参考材料《飞机设计手册》^[11],全方位介绍了飞机总体、系统、可靠性等飞机工程设计内容,但手册仅离散讲述了推进系统、起落架系统等系统设计,缺乏飞机层系统综合相关的内容。

工信部发布的《HB8525-2017 民用飞机研制程序》^[12]标准中,指出了在不同的飞机研制阶段要开展相应的系统设计工作,比如在 G6 初步设计审查前要完成系统架构定义工作,在 G7 详细设计审查前要完成机载系统的详细设计等,但并没有指出“机载系统的详细设计”包含哪些内容。

飞机系统设计除了要解决系统综合设计本身的复杂性问题,还要满足适航要求比如 CCAR25 部^[13];适航要求是飞机的最低安全要求,但其严格程度远超其他复杂系统产品。适航要求中部分条款的目标系统比较具体,比如针对空速测量系统的 25.1303 条款,但部分条款的目标系统是飞机整机,比如 25.1309 条款。对于整机性条款,需要针对“飞机系统综合设计内容”提供清晰完备的“设计过程材料”才能表明符合性。这些“综合设计的过程材料”需要满足 SAE ARP4754A《民用飞机和系统研制指南》给出的研制过程保证要求^[14]。ARP4754A 要求在飞机系统综合设计过程中要依据 SAE ARP4761《民用机载系统和设备安全性评估过程的指南和方法》^[15] 充分开展飞机和系统的安全性评估工作,但除了安全性评估,ARP4754A 并没有指出飞机系统综合设计需要考虑的其他内容。

工程中设计某个具体设备往往是最容易的,因为目标小、边界清晰,且存在大量的国际/国内/行业标准和指导材料可以参考。航电系统综合(包括 IMA 综合模块化航电的综合^[16]、飞行导引模式的综

合等)的工作就比较困难了,涉及到多个系统(飞行管理、导航、通信、机载维护、IMA 等),横跨多个学科,大系统综合层级的设计必须进行抽象才能开展,是各系统供应商的核心技术,相关参考材料急剧减少,开展相关研究的科研机构也不多。飞机总体层面的系统综合就非常困难了,涉及整机 30 多个大系统,近 140 个子系统^[17],横跨航空工业领域的所有学科,在飞机级进行系统综合设计需要很高的抽象程度,否则很难掌控如此多的交叉学科和相应的技术专业。

为了建立飞机系统综合设计的内容分解结构,工程中目前在用的是“自底向上”的梳理总结方法,随着飞机研制过程的推进,综合设计主题的产生呈现出涌现性,经常打乱研制计划,为各系统技术专业的工程师造成了极大困扰。“自底向上”识别飞机系统综合设计内容的方式带来的关键问题是综合设计工作的规划无法开展,导致飞机级综合性设计工作质量不高,进度迟缓。

本文的第一个目的是采用“正向的、自顶向下的”方法对工程领域的飞机系统综合设计内容进行推演生成,为工程单位提供参考,支持开展飞机系统综合设计工作的提前规划。

飞机多系统综合设计要求工程师同时具备多个系统的设计能力,并且具备公共技术专业比如安全性和可靠性分析专业的技术能力,但实际上工程单位中掌握这种飞机系统综合设计能力的工程师并不多。

飞机研制工程单位需要了解“飞机系统综合设计内容有哪些”,才能更加有针对性地开展交叉专业的设置和培训体系的搭建。系统综合设计是系统工程理论的核心组成部分,德克萨斯大学奥斯丁分校的 Armand J. 教授指出了在飞机设计专业开设“系统工程”教学的必要性,帮助工程类研究人员掌握复杂系统综合设计的规范性方法^[18]。

本文的第二个目的是将工程单位面临的系统综合设计内容进行结构化梳理,为飞机研制单位中系统工程类的培训课程设置提供参考。

飞机系统综合设计本质上是一个“多学科优化过程”,需要采用 MDO 多学科优化设计的方法来开展,并且需要根据复杂系统需要分层抽象设计的特点进行多层级参数迭代优化。围绕飞机系统综合设计,许多学者使用 MDO 方法进行了提高燃油经济

性的飞机总体设计^[19-21]研究,或者降低整机消耗的飞机能源系统设计研究^[22-24],这些 MDO 研究的目标都是降低油耗并提高经济性,综合设计的目标过于单一;在 MDO 算法方面,NASA 给出了 BLISS 双层集成系统综合设计方法^[25],指出对于复杂系统的综合优化需要结合系统的抽象层次分解,不同层级迭代进行优化设计;之后有多名学者对复杂系统的多学科设计进行了多层参数迭代优化的研究^[26-27],为本文后续找到飞机系统综合设计问题的具体解决方法提供了指导。

本文首先提出适用于工程的基于系统工程的飞机系统综合设计流程;其次全面推演飞机系统综合设计的内容;然后构建了飞机系统综合设计内容的追溯链路,并指出其重要作用。同时指出部分关键的飞机系统综合设计主题和未来有可能成为飞机系统综合设计工程领域主要设计手段的 SysML 建模方法。

1 飞机系统综合设计的定义

综合设计是系统工程理论的重要组成部分。系统工程理论的三大支柱分别是“需求分析”、“功能分析”和“综合设计”。

FAA 系统工程手册^[2]中关于“系统综合设计”的定义:系统综合设计是一个创新性的过程,将需求转化成备选的系统设计方案,该方案体现为具有“最优指标”的系统物理架构。落实到飞机系统综合设计中,该创新性的过程将利益攸关方的顶层诉求转化为飞机系统的物理方案。

2 正向的飞机系统综合设计流程

飞机系统综合设计的起点是“利益攸关方诉求”,即最高层级的飞机设计需求,终点是“飞机系统综合设计方案”,中间是“飞机系统综合设计流程”。

例如,ICAO(国际民航组织)是全球航空运输系统的规则制定者,而飞机作为航空运输系统的核心组成部分,ICAO 是飞机系统及其综合设计的关键利益攸关方。为了保持航空运输的安全性,并提高航空运输的效率,ICAO 发布了 Doc 9750《全球空中导航计划》^[28],并开发了航空系统块升级框架 AS-BU^[29],指出了提高航空运输效率的四个运行概念,分别是“机场运行”、“全球系统和数据交互”、“空域

容量优化和灵活飞行”、“高效飞行路径”,这些顶层的运行概念都需要转化为飞机的综合设计目标,并通过飞机系统的综合设计进行实现;为了响应 ICAO 的要求,FAA 主持开展了 NextGen 项目^[30],EASA 主持开展了 SESAR 项目^[31],主要目的是通过提升 CNS/ATM 空中交通管理能力,对 ICAO 的运行概念进行细化和落实;为了响应 ICAO 的要求,CAAC(中国民用航空局)发布了《中国民航航空系统组块升级(ASBU)发展与实施策略》^[32]和《CAAC 中国民航基于性能的导航实施路线图》^[33],推动国内航空系统的升级以及飞机系统研制的进步;ARINC(美国航空无线电公司)作为航空电子设备的标准制定者,发布了 ARINC 660B《支持 NextGen 和 SESAR 概念的 CNS-ATM 航空电子架构》标准^[34],要求飞机制造商和航空电子系统供应商在进行系统设计时要考虑对下一代空管系统的支持。ARINC 660B 标准在下一代空管运行概念的基础上,提出了多项飞机系统综合设计目标包括引入 PBN(基于性能的导航)运行能力等,同时针对这些目标对飞机系统的综合设计提出了许多内容主题,包括支持 PBN 运行的飞机导引综合设计、支持低能见度运行的自动飞行设计、支持空中防撞/地面防撞/防撞地的飞机综合监视设计等。

从示例可以看出,正向的飞机系统综合设计流程应该包括利益攸关方运行概念识别、综合设计目标提炼、综合设计内容识别等环节;同时为了在飞机研制工程单位内部进行落实,还需要将飞机系统综合设计内容与工程技术专业进行关联分配,并开展飞机系统综合设计工作的管控。工程中的正向飞机系统综合设计流程如图 1 所示。

飞机系统综合设计流程中,主干流程是“综合设计内容的产生”和“综合设计管控”,主干流程的开展需要通过“功能和需求定义”流程进行规范化。

飞机系统综合设计主干流程的步骤如下:

1) 识别飞机系统的利益攸关方,并识别其诉求,即期望的运行概念,比如飞行和地面运行、支持航空公司高效运营等;

2) 根据运行概念,提炼并定义飞机系统综合设计目标,比如针对支持航空公司高效运营运行概念,可以提出支持低能见度运行和支持高密度运行等综合设计目标;

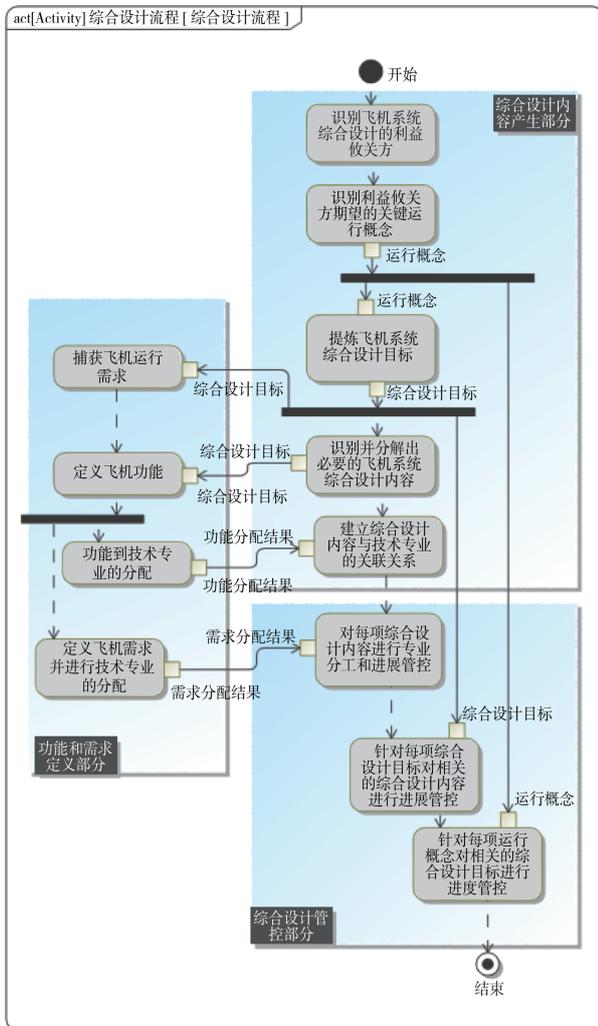


图 1 飞机系统综合设计流程

3) 有机整合综合设计目标,结合先进的飞机设计理念 and ICAO 关于航空系统升级计划的要求等,识别并分解必要的飞机系统综合设计内容,比如针对“支持低能见度运行和高密度运行”的目标,需要开展“飞机导引综合设计”和“多场景综合的自动飞行设计”等综合设计内容;

4) 结合工程技术专业的定位,对飞机系统综合设计内容与工程技术专业建立关联关系,明确每项综合设计内容应由哪些技术专业承担,比如“飞机导引综合设计”由导航系统、飞管系统、自动飞行系统技术专业等共同承担;

5) 针对每项综合设计目标,管控相应综合设计内容的完成情况;

6) 针对每项运行概念,管控相应综合设计目标的完成情况。

3 飞机系统综合设计内容

3.1 综合设计内容的推演生成

飞机系统综合设计流程中,“综合设计内容产生部分”包含 5 个元素,即利益攸关方、运行概念、综合设计目标、综合设计内容和技术专业,它们之间的关系是:

- 1) 利益攸关方期望飞机系统实现一些运行概念;
- 2) 运行概念经过飞机总体设计师的提炼总结形成一些综合设计目标;
- 3) 针对综合设计目标,工程单位计划开展多项综合设计内容;
- 4) 综合设计内容被分配给具体的技术专业进行落实。

飞机系统综合设计的关键利益攸关方如表 1 所示。

表 1 关键利益攸关方

一级利益攸关方	二级利益攸关方
乘客	普通乘客、残疾人、婴儿、宗教人士等
航空公司	机组、乘务、机务、AOC 航空运行控制中心、市场运营等
机场	地勤、航线维修等
系统供应商	航电系统供应商、电气系统供应商、机械系统供应商等
各国民航局	CAAC、EASA、FAA 等,以及相应的空管单位
标准化组织	ICAO、SAE(美国机动车工程师学会)、RTCA(航空无线电技术委员会)、ARINC 等
环保组织	噪声管理、污染物管理等
竞争对手	对标的先进机型等
飞机维修公司	机修人员等

飞机系统综合设计的利益攸关方有很多,每个利益相关方对于飞机的诉求也不同,比如乘客比较关心客舱内的舒适性,航空公司比较关心飞机运行的经济性,各国民航局非常关心飞机运行的安全性,ICAO 比较关心全球空域系统运行的效率等。这些不同利益攸关方的诉求经过具体化均可以转化为一

些“运行概念”。

不同利益攸关方关心的关键运行概念如表 2 所示。

表 2 关键运行概念

一级运行概念	二级运行概念
支持飞行和地面运行	N/A
支持载人和运货	提供有竞争力的舒适性
提供良好的人机交互	提供对人为因素的完备考虑
提供具有竞争力的系统特性	确保人员和设备安全,具备足够的可靠性和可用性,具备良好的维修性
支持航空公司高效运营	提供具有竞争力的经济性
提供系列产品的通用性	N/A
满足环保要求	N/A
支持飞行和地面运行	N/A

注:N/A 代表“不再展开”。

运行概念一般比较宽泛,需要进行工程化分析和表达,形成飞机系统综合设计的目标。

运行概念关联的关键飞机系统综合设计目标如表 3 所示。

表 3 关键综合设计目标

一级综合设计目标	二级综合设计目标
高效可靠的动力	可靠的动力、燃油经济性高、带载能力强等
高效气动	升阻比高、低速气动性能良好、高速气动性能稳定等
灵敏的飞行操纵	放宽静稳定性、适当的主动控制等
灵敏的地面操纵	可靠的刹车、可靠的转向等
完备的飞行保护	高迎角保护、高/低速保护、滚转角保护等
智能的自动飞行	自动起飞、自动爬升、自动巡航、自动着陆、低能见度自动飞行、高密度空域的自动飞行等
高品质的舱内环境	温度适宜、湿度适中、空气品质优良、生活设施丰富、客舱娱乐设施丰富、支持客舱氛围调节等

续表 3

一级综合设计目标	二级综合设计目标
商载能力强	灵活的客舱布局、具有竞争力的货舱设计、预留客改货能力、空间利用率高等
降低人员负担	操作程序简洁清晰、提高人机交互自动化程度、告警机制合理、信息显示合理、反应时间合理、动作机制和序列合理、防误操作等
提供足够的安全性	满足适航要求、防撞地、防撞机、防自然环境危险、防恐怖袭击和黑客等
提供足够的可靠性和可用性	运营寿命长、签派和航线可靠性高、故障率低且故障包容能力强等
提供足够的维修性	自检能力强、故障定位容易且方便检修、具备故障预测能力、专用工具要求低、故障数据记录手段丰富等
提供足够的环保性	污染物排放低、飞行噪声低、有毒材料使用少等
提供对航线高效运营的支持	准点率高、支持 PBN 运行、支持低能见度运行、支持高密度空域运行、过站时间短、航线维修简便、飞机可用度高等
提供全生命周期的高经济性	购置或者租赁成本低、维修成本低、直接运营成本低、飞机拆解残值高等

飞机系统综合设计的最终目的是形成一套方案,能够全面且平衡地满足以上这些有可能相互矛盾的目标,所以飞机系统综合设计是一个典型的“多目标权衡分析过程”,需要采用 MDO 多学科优化的方法开展工作。

针对综合设计目标,需要开展必要的飞机系统综合设计工作进行实现,这些综合设计工作可以聚类为一些综合设计内容的主题。在识别飞机系统综合设计内容的主题时,需要考虑航空工业界的技术发展趋势/水平和国际上先进的系统设计理念,比如“IMA 综合模块化航电设计”等。

关联多项综合设计目标的飞机系统综合设计内容主题如表 4 所示。

表 4 飞机系统综合设计内容的主题

综合设计内容主题	简介
先进气动布局设计 —总体类	细化的设计主题包括:超临界机翼设计等 先进的气动布局可以有效降低燃油消耗并提升经济性,可以减噪减排,提升乘坐舒适性,先进气动布局设计需要考虑结构强度、设备布置、材料选用、动力储备、安全裕度等众多因素
先进总体布局设计 —总体类	细化的设计主题包括:整机分舱和设备综合布置设计、预留客改货能力设计等 整机分舱和设备布置所受到的约束因素很多,包括气动外形、商载能力、客改货能力、设备的安装约束、维修性约束、安全性影响等,需要全面且均衡的分析相关约束因素;整机分舱是飞机系统综合设计的物理限制,与飞机系统综合设计迭代进行
气动/飞控/自动飞行一体化设计 —总体类	细化的设计主题包括:整机操稳特性综合设计 飞机的操纵稳定性从根本上决定了飞机的舒适性,并强烈影响飞机的安全性、经济性和飞机使用寿命,操稳设计一方面取决于气动特性的设计,另一方面取决于飞行控制系统的设计,二者紧密耦合(放宽静稳定性的气动特性需要良好的飞控进行补偿);而高安全性的自动飞行设计基于良好的飞控设计,与气动设计和飞控设计深度耦合,三者需要一体化设计
支持 ETOPS 双发延程飞行的设计 —总体类	ETOPS 飞行能力可以大幅度提高航线设计的灵活性,提高航空公司的国际航班运行能力,但对部分飞机系统提出了更高的可用性和安全性要求,包括动力系统、电源系统、氧气系统等
整机噪声抑制综合设计 —总体类	噪声是影响客舱舒适性的关键因素,整机噪声源包括发动机喷流噪声、翼身整流罩噪声、共振噪声等,需要综合使用多种手段抑制噪声向座舱内的传播,包括减小噪声源、切断噪声路径、改变固有频率抑制共振等
整机排放和经济性综合设计 —总体类	整机排放包括污染物一方面与发动机的技术水平相关,另一方面与气动设计和整机重量控制紧密相关,同时与系统能源消耗紧密相关,排放受到适航条款和国际民航组织的严格要求,需要对气动、动力系统、二次能源系统、负载系统等进行综合设计;整机经济性需要考虑购置成本、运行成本、维修成本等,这些成本指标需要落实到飞机系统综合设计中
整机电磁防护设计 —总体类	飞机在飞行中会产生多种结构载荷,包括机动载荷、阵风载荷、翼根载荷等,并且随着复合材料使用比例的提升,机身/机翼的柔性会带来不期望的振动,这些载荷和振动会显著影响结构寿命,需要进行结构和飞控系统的综合设计以减缓载荷并抑制振动
先进驾驶舱集成设计 —总体类	细化的设计主题包括:驾驶舱告警集成设计、驾驶舱显示集成设计、驾驶舱操纵集成设计 先进驾驶舱集成设计需要为机组提供简洁的信息显示、及时的故障告警以及合理的操纵机制,以充分提升飞机的安全性,驾驶舱集成设计与各系统的方案深度耦合,同时需要考虑人为因素的影响
机场适应性综合设计 —总体类	机场适应性设计需要考虑对机场地理位置、跑道等级、机场场面服务、航线维修范围的适应能力,同时要考虑过站时间等约束,需要对飞机系统进行适应性设计以满足性能要求、接口要求等
整机电磁防护设计 —总体类	现代化飞机的电子设备比例越来越高,容易受到电磁干扰,而复合材料的使用比例也越来越高,导致固有的电磁屏蔽能力越来越弱,需要开展整机电磁防护设计以弥补复材的不足,并加强对电子设备的电磁保护,同时为飞机系统设备的抗电磁干扰能力提出要求
整机重量控制综合设计 —总体类	飞机各系统方案的一个重要属性是“重量”,重量是影响飞机运行经济性的重要因素,需要在整机层面对飞机结构和各系统的重量进行综合管控
整机安全性/可靠性/测试性综合评估 —总体类	针对已经高度网络化、高度集成并且软件密集型的飞机系统进行安全性评估,需要结合全局系统架构进行充分的失效影响传播分析和最终安全性影响评估;安全性分析的输出是对系统架构的设计要求和系统设备的最低可靠性要求;在飞机运行中出现故障时,飞机系统要具备足够的测试性以快速识别到根源故障并告知飞行员,以提高飞机的安全性;整机安全性、可靠性和测试性交联在一起,需要进行综合评估
整机测试性/维修性综合评估 —总体类	当飞机在运行中出现故障时,飞机系统应具备足够的测试性识别并记录故障,支持航线维修或者定期检修;整机测试性的进一步发展是引入飞机健康管理概念并实现“维修预测”能力;整机测试性的基础是为飞机系统架构引入合理的 BIT 机载自检检测设计
地面减速能力综合评估和设计 —机械类	地面减速能力是保证飞机安全着陆的关键因素,地面减速能力由飞机多个系统共同提供,包括飞控系统、起落架/刹车系统、反推力系统等,需要进行综合设计

续表 4

综合设计内容主题	简介
客舱娱乐和环境控制综合设计 —机械类	细化的设计主题包括:客舱娱乐综合设计、客舱环境控制综合设计;客舱舒适性包括丰富的客舱娱乐比如舱内高速互联网服务和通信服务,以及高品质的客舱空气环境比如客舱温度、湿度、异味、颗粒物等控制;需要开展客舱娱乐和环境控制综合设计,充分提高客舱的舒适性,进而提升航空公司的竞争能力
整机舱门综合控制 —机械类	飞机上有多个舱门,舱门是保证飞机安全性的重要物理屏障,为客舱空气环境控制、应急逃生等提供支持,同时是提升航线运营能力的重要因素,为各种地面服务提供通道,需要进行综合的舱门控制以确保安全性,并提升航线运营能力
整机能源管理和热管理综合设计 —机械类	细化的设计主题包括:多电架构综合设计、整机能源负载综合管理设计等;影响整机经济性的一个重要因素是系统能源消耗,取决于一次能源和二次能源的使用效率和热管理的水平,需要通过综合设计在保证飞机安全和舒适性的情况下减少能源浪费以提升经济性
先进动力系统/吊挂一体化设计 —机械类	动力系统的关联系统有多个,包括燃油、电源、液压、气源等,动力系统的传力路径以及与关联系统的管线连接都需要经过吊挂区域,而吊挂自身的外形会显著影响机翼的气动特性,需要对动力系统和吊挂进行一体化设计,以确保传力安全、维修简便、气动损失较小等
飞控/推进一体化综合设计 —机械类	先进的自动飞行设计要求对飞控和推进系统进行一体化综合设计,以协调飞控系统、推进系统、自动飞行系统的运行,在确保安全性的基础上充分降低飞行员的负担
面向复材的综合设计 —结构类	复合材料具备低密度和高强度的特性,现代飞机上的复合材料使用比例越来越高,但复合材料同时存在一些缺陷,比如抗撞能力差、修复困难、且电磁防护能力较差,需要进行综合设计充分发挥复材的优势并避开劣势
标准件和标准材料选用设计 —结构类	SAE、ARINC、RTCA 等组织发布了很多系统、零部件以及材料的标准,现代飞机为了提高安全性、保持通用性并降低成本,普遍采用标准件和标准材料,飞机系统综合设计需要考虑对标准件和标准材料的选用
IMA 综合模块化航电设计 —航电类	为了减重、降低能源消耗并提升机内信息的融合程度,飞机上的航空电子系统正在不断的网络化、模块化和集成化,多个系统的控制盒正在转变成软件应用并驻留在高可靠/高可用的通用计算机中,IMA 设计基本涉及飞机上所有的系统,飞机级 IMA 集成需要考虑资源分配、安全性评估、动态性能分析、高可用度设计等,是目前飞机航电系统设计的难点
飞机健康管理综合设计 —航电类	细化的设计主题包括:发动机健康管理设计、机载系统健康管理设计、机体结构健康管理设计等 为了降低运营成本,减少飞机停机检修时间,需要通过飞机健康管理机制实现飞机系统状态的实时监控,并实现飞机系统的维修预测,在真正的停机检修前做好充分的准备,以充分减少航线备件库存并缩短航线维修时间;通过飞机健康管理机制,长时间保持飞机的良好运行状态,支持飞机可用性和安全性的提高;飞机健康管理综合设计,关联到飞机上大部分的系统,是一个典型的整机系统综合设计主题
整机安保综合设计 —航电类	随着飞机系统的网络化和飞机通信手段的丰富,防黑客攻击愈加重要,由于飞机信息系统关联的其他系统比较多,需要对飞机信息系统进行高等级的安保策略综合设计
面向下一代 CNS/ATM 的航电综合设计 —航电类	细化的设计主题包括:飞机导引综合设计、飞机综合监视设计、多场景综合的自动飞行设计、飞机通信综合设计等 为提升空域容量,并提升空域运行效率,ICAO 发布了航空系统块升级计划 ASBU,FAA 和 EASA 也都提出了下一代空管系统升级计划,主要涉及通信、导航和监视系统的升级,要求各主制造商的飞机系统设计按照计划进行相应能力的提升,主要涉及飞机导引系统、导航系统、通信系统、监视系统、自动飞行系统等

以上飞机系统综合设计内容的主题基本都横跨多个系统和学科,需要在飞机层面对技术专业进行协同才能有效开展。工程技术专业除了负责自己专业内部的系统本体设计外,还需要支持飞机系统综合设计内容的落实,每个技术专业基本都需要参与

部分飞机系统综合设计内容。

工程中飞机系统综合设计相关的技术专业和参与的部分综合设计内容如表 5 所示,该表同时给出了各技术专业的设计手段现状和趋势。

各工程技术专业之间的工作在跨系统综合设计

表 5 飞机设计工程技术专业

工程技术专业	设计手段现状和趋势
ATA01 总体	三维结构设计、MDO 多学科优化设计、多物理场有限元仿真包括电磁场/噪声场等
ATA02 气动	气动 CFD 仿真、MDO 多学科优化设计等
ATA03 载荷/结构/强度	三维结构设计、强度有限元仿真等
ATA08 调平和称重	数据处理编程和算法等
ATA15 安全性与可靠性	基于模型的安全性分析、基于模型的可靠性预测等
ATA21 空调	管道流体仿真,热场仿真、SysML 系统建模、Simulink 仿真等
ATA22 自动飞行	SysML 系统建模、Simulink 仿真、飞行模拟器等
ATA23 通信	SysML 系统建模、Simulink 仿真、天线和电磁仿真等
ATA24 电源	SysML 系统建模、Simulink 仿真、Modelic 电气仿真、半物理试验台等
ATA25 设备/装饰	SysML 系统建模、Simulink 仿真、工程样机等
ATA26 防火	SysML 系统建模、Simulink 仿真、半物理试验台等
ATA27 飞行控制	SysML 系统建模、Simulink 仿真、飞行模拟器、MDO 等
ATA28 燃油	SysML 系统建模、Simulink 仿真、管道流体仿真、工程样机等
ATA29 液压	SysML 系统建模、Simulink 仿真、Modelica 机械仿真等
ATA30 防冰/除雨	SysML 系统建模、Simulink 仿真、工程样机等
ATA31 指示/记录	SysML 系统建模、Simulink 仿真、视景仿真、工程模拟器、飞行仿真平台等
ATA32 起落架	SysML 系统建模、Simulink 仿真、Modelica 机械仿真、MDO 等
ATA33 照明	SysML 系统建模、Simulink 仿真、照明仿真等

续表 5

工程技术专业	设计手段现状和趋势
ATA34 导航	SysML 系统建模、Simulink 仿真、飞行仿真平台等
ATA35 氧气	SysML 系统建模、Simulink 仿真、工程样机等
ATA36 气源	SysML 系统建模、Simulink 仿真、工程样机等
ATA42 IMA	SysML 系统建模、Simulink 仿真、面向对象的图形化软件开发、半物理试验台等
ATA44 客舱系统	SysML 系统建模、Simulink 仿真、三维渲染仿真、工程样机等
ATA45 机载维护	SysML 系统建模、Simulink 仿真、半物理试验台等
ATA46 信息	SysML 系统建模、Simulink 仿真、半物理试验台等
ATA47 惰化	SysML 系统建模、Simulink 仿真、工程样机等
ATA49 APU	SysML 系统建模、Simulink 仿真、半物理试验台等
ATA71 动力装置	SysML 系统建模、Simulink 仿真、半物理试验台等
飞机系统综合	MDO 多学科优化设计、SysML 系统建模、Simulink 仿真、Modelica 机械仿真等

内容的约束下需要充分协同。其中,“飞机系统综合”技术专业对各项飞机系统综合设计内容进行分工和统筹管控,各系统技术专业(从 ATA21 到 ATA71)对各项系统综合设计内容中的负责部分进行具体实现。

从表 5 可以明确各技术专业所需要参与的飞机系统综合设计内容,进而明确各专业的技术内涵;可以看出部分专业需要参与的飞机系统综合设计内容比较多,比如总体、飞控、自动飞行、导航、动力装置等,这些系统技术专业的设计决策往往是影响全局的,需要通过整机影响分析进行支持。

从各技术专业现有的设计手段和发展趋势中可以看出,目前飞机系统综合设计中主要采用的设计手段包括三维结构设计、多物理场仿真(气体、流体、热、电磁、噪声等)、SysML 系统建模、Simulink 仿

真、Modelica 仿真、MDO 多学科优化设计、半物理试验台、工程样机、飞行模拟器等;其中 SysML 系统建模主要支持在较高抽象层级进行系统静态架构和动态行为分析,是飞机研制工程领域正在快速发展和应用的一个手段,可能成为未来飞机系统综合设计的主要手段。

3.2 综合设计内容的追溯链路

各技术专业的工程师在进行系统设计时,往往会由于距离“客户”(即利益攸关方)太远,而导致对负责的系统设计需求理解不清,为了解决这个问题,可以围绕某个具体的飞机系统综合设计主题建立技术专业到利益攸关方的追溯链路,为工程师提供所负责系统设计要求的直观认识。围绕“飞机导引综合设计”,ATA34 导航专业对利益攸关方的追溯链路如图 2 所示。

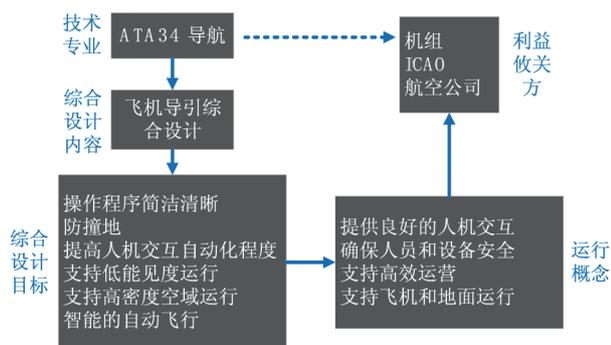


图 2 导航专业对利益攸关方的追溯链路

随着技术的发展,飞机上的导引模式越来越多,飞行员在不同导引模式之间进行切换控制的操纵负担越来越重,已经影响了安全飞行,飞机导引综合设计必须考虑提高人机交互的自动化程度并使得操作程序简洁清晰,根据以上追溯链路,ATA34 导航技术专业的工程师可以直观地了解到飞机系统综合设计的利益攸关方包括机组和 ICAO 等,以及他们所关心的运行概念包括提供良好的人机交互等,可以明确综合设计目标的来源和内涵,包括操作程序简洁清晰等,进而开展更加有效的导航系统设计。

飞机设计工程师往往会存在“技术至上”的潜意识,对客户诉求的忽视带来的问题非常严重(影响设计成本、进度、市场声誉等)。飞机系统综合设计内容的追溯链路可以将设计链路压缩,将各系统技术专业需要对接的“客户”及其诉求直观地呈现出来,支持工程师在设计工作中加强“客户至上”观念,这在工程设计中是非常重要的。

3.3 关键的综合设计内容及其难点

从发展趋势、紧迫性、技术成熟度需求和难度、技术先进性和竞争能力、安全性分析影响等角度对飞机系统综合设计内容进行筛选,可以识别到目前工程领域优先级最高的几项关键综合设计内容,如下所示:

1) 面向复材的综合设计

复合材料由于其低密度高强度特性,是飞机上材料选用的发展趋势,能充分提高飞机的燃油经济性,是体现飞机竞争能力的关键点。

相关技术难点:复材的材料特性研究等。

2) 多电架构综合设计

采用多电能源系统架构或者全电能源系统架构是飞机能源系统的发展趋势,能充分提高整机能源效率,提高经济性。

相关技术难点:多电架构的安全性分析,多电架构的能源供给架构和重构策略,以及多电架构的负载管理设计等。

3) IMA 综合模块化航电设计

采用高度集成的模块化航电设备,同时采用软件密集的系统设计方案,是飞机航电系统的发展趋势,能充分提高信息传输效率,支持实现更加智能的飞行。

相关技术难点:IMA 系统架构的静态和动态安全性分析等。

4) 飞机健康管理综合设计

采用健康管理理念,是降低维修成本并提高飞机可用性的必然途径,引入机载健康管理系统是飞机航电系统的发展趋势。

相关技术难点:基于有限数据的飞机系统健康状况评估等。

5) 面向下一代 CNS/ATM 的航电综合设计

ICAO、FAA、EASA 都发布了空管系统升级的规划,CAAC 也做出了相关跟进举措,面向下一代空管系统的飞机航电系统设计升级是未来民航准入的门槛。

相关技术难点:PBN 能力的适航符合性验证、PBN 能力的仿真分析等。

4 结论

本文首先提出了“正向的,自顶向下的”基于系统工程的飞机系统综合设计流程,并根据流程全面推演了飞机系统综合设计的内容;为工程单位中的

技术专业和工程师提供参考,支持开展飞机系统综合设计工作的提前规划。飞机系统综合设计的内容总结如下:

1) 利益攸关方所期望的运行概念比如 ICAO 和航空公司要求的“支持高效运营”是飞机系统综合设计的起点,本文识别到关键利益攸关方 9 项,关键运行概念 8 项;

2) 针对运行概念,飞机研制工程单位需要进行权衡分析并提炼出可行的综合设计目标,比如“提供全生命周期的经济性”,本文识别到关键的综合设计目标 15 项;

3) 针对综合设计目标,飞机系统综合技术专业需要结合先进的设计理念和竞争能力要求提出需要开展的飞机系统综合设计内容,比如“多电架构综合设计”,并将各项综合设计内容分配给相关的工程技术专业,本文识别到飞机系统综合设计内容 25 项,并将其分配给了 29 个技术专业;

4) 针对各工程技术专业所参与的飞机系统综合设计,本文给出了目前工程领域在用的设计手段和趋势,指出了 SysML 建模可能是未来飞机系统综合设计的主要手段。

其次,本文给出了飞机系统综合设计内容的追溯链路,帮助技术专业的工程师清晰直观的理解系统设计的要求;本文同时给出了最为关键的 5 项飞机系统综合设计内容,并指出了相关研究的难点,为飞机研制工程单位提供参考。

参考文献:

- [1] 程不时. 飞机设计中的系统分析和系统综合[J]. 航空科学技术,1994(3):6-10.
- [2] FAA. NAS system engineering manual [M]. 3rd ed. FAA&ATO, 2006.
- [3] NASA. NASA system engineering handbook[M]. 2nd ed. U. S. ;NASA,2016:73-88.
- [4] INCOSE. Systems engineering handbook:a guide for system life cycle processes and activities[M]. 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. ,2015:64-70.
- [5] DOD. Systems engineering fundamentals[M]. U. S. ; DoD, 2001 :57-65.
- [6] ISO/IEC. Systems and software engineering-System life cycle processes; ISO-15288;2008[S]. ISO/IEC, 2008.
- [7] Processes for Engineering a System;ANSI/EIA-632[S]. U. S. ;EIA, 1999.
- [8] MOIR I, SEABRIDGE A. Aircraft systems; mechanical, electrical, and avionics subsystems integration [M]. 3rd ed. U. K. ; John Wiley & Sons, Inc. ,2008.
- [9] MOIR I, SEABRIDGE A, JUKES M. Civil avionics systems[M]. U. K. ; John Wiley & Sons, Inc. ,2013.
- [10] MOIR I, SEABRIDGE A. Design and development of aircraft systems[M]. U. K. ; John Wiley & Sons, Inc. , 2020.
- [11] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册 第 5 册:总体设计[M]. 北京:航空工业出版社, 2005.
- [12] 中华人民共和国工业和信息化部. 民用飞机研制程序: HB 8525-2017[S]. 北京:中华人民共和国工业和信息化部,2017.
- [13] 中国民用航空局. 中国民用航空规章第 25 部运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京:中国民用航空局,2011.
- [14] SAE. Guidelines for development of civil aircraft and systems; SAE ARP4754A/ED-79A [S]. U. S. ; SAE, 2010.
- [15] SAE. Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment;SAE ARP4761[S]. U. S. ; SAE, 1996.
- [16] RTCA. Integrated Modular Avionics (IMA) development guidance and certification considerations; RTCA DO-297[S]. Washington: RTCA Inc. , 2005.
- [17] ATA. Information standards for aviation maintenance; ATA iSpec 2200[S]. U. S. ;ATA, 2017.
- [18] ARMAND J, HANS M. Teaching aircraft systems engineering as a fundamental principle of design - university of texas approach[C]. 55th AIAA/ASME/ASCE/AHS/SC Structure, Structural Dynamics, and Materials Conference. Maryland;AIAA, Inc. , 2014-0062.
- [19] KYLE B. Subsonic business-class det design; a systems approach to aircraft synthesis and optimization[C]. 14th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operation Conference. Atlanta, GA. AIAA, Inc. ,2014-2854.
- [20] KENNETH W. Morphing wing fighter aircraft synthesis/design optimization[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University,2009.
- [21] LAMMERING T. Integration of aircraft systems into conceptual design synthesis [D]. Aachen: Institutes of Aeronautics and Astronautics of RWTH Aachen University, 2014.
- [22] TFALIY A, KOKKOLARA M. Integrating air systems in aircraft multidisciplinary design optimization [C]. 2018 Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Atlanta, Georgia; American Institute of Aeronautics and

- Astronautics, Inc., 2018-3742.
- [23] OUNIS H, Sareni B, Roboam X, OUNIS H, SARENI B, ROBOAM X, et al. Multi-level integrated optimal design for power systems of more electric aircraft [J]. Mathematics and computers in simulation, 2016; 223-235.
- [24] FLORITI M, BOGGERO L, TOMASELLA F, et al. Propulsion and on-board system integration for advanced regional jet with different level of electrification in the AGILE project [C]. 2018 Joint Propulsion Conference. Cincinnati, Ohio: AIAA, Inc., 2018.
- [25] SOBIESZCZANSKI J, AGTE J S, SANDUSKY J R, et al. Bi-level integrated system synthesis [J]. [S. 1]: AIAA Journal, 1998, 38(1):164-172.
- [26] JUDT D M, LAWSON C. Development of an automated aircraft subsystem architecture generation and analysis tool [J]. Engineering Computations, Vol. 33 (5): 1327-1352.
- [27] HONDA T, CIUCCI F, KANSARA S, et al. An exploration of the role of system level variable choice in multi-disciplinary design [J]. Scopus, 2010.
- [28] ICAO. 2016-2030 Global air navigation plan: Doc 9750-AN/963 [S]. 5th ed. ICAO, 2016.
- [29] ICAO. Aviation system block upgrades the framework for global harmonization [S]. ICAO, 2016.
- [30] FAA. Concept of operations for the next generation air transportation system [R]. U. S. : FAA Joint Planning and Development Office, 2011.
- [31] EASA. European ATM master plan [R]. Belgium: SESAR Joint Undertaking, 2015.
- [32] CAAC. 中国民航航空系统组块升级 (ASBU) 发展与实施策略: IB-TM-2015-002 [R]. CAAC, 2015.
- [33] CAAC. 中国民航基于性能的导航实施路线图 [R]. CAAC, 2009.
- [34] ARINC. CNS/ATM avionics architectures supporting NextGen/SESAR concepts: ARINC 660B [S]. Maryland: Aeronautical Radio, Inc., 2014.

作者简介

康文文 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机系统综合、系统工程、MBSE (基于模型的系统工程)、飞机安全性、MBSA (基于模型的安全性分析)。E-mail: kangwenwen@comac.cc

李浩敏 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 飞机功能设计、飞机系统综合、系统工程、MBSE。E-mail: lihaomin@comac.cc

Review on aircraft system synthesis design in engineering

KANG Wenwen* LI Haomin

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: Due to the lack of overall understanding of the content of aircraft system synthesis design, the aircraft development departments cannot conduct an effective working plan in advance, which always causes rework problems. To solve this problem, a review is conducted on the synthesis design of aircraft systems in engineering, and the synthesis design process of aircraft system based on system engineering is proposed; the comprehensive design content of aircraft system is comprehensively deduced. These synthesis design content can provide beneficial reference for aircraft development departments, such as conducting an overall working plan on the aircraft level system synthesis design, and finally help the design engineers to realize the target of “cost reduced and quality improved”.

Keywords: flight vehicle design; aircraft systems; synthesis design; system engineering

* Corresponding author. E-mail: kangwenwen@comac.cc