

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.04.001

航空发动机控制系统及关键技术现状与展望

高亚辉, 倪焯斌, 姜成平, 王欢, 卢俊杰

(中国航发控制系统研究所, 无锡 214000)

摘要: 航空发动机控制系统是航空发动机的安全关键系统, 对发动机在飞行全包线范围内安全可靠产生推力或功率至关重要。本文阐述了航空发动机控制系统的演进历程, 对架构设计、控制律设计、故障诊断与状态监视设计三大系统级关键核心技术以及仿真使能技术的发展情况进行总结分析, 并对工程可应用性进行探讨, 最后对未来的发展方向和重点研究内容进行展望, 为新一代航空发动机控制系统设计提供一定参考。

关键词: 航空发动机; 控制系统; 架构设计; 控制律; 故障诊断; 状态监视; 仿真

中图分类号: V233.7 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2024)04-0577-20

Research Status and Prospect of Aeroengine Control Systems and Key Technologies

GAO Yahui, NI Yebin, JIANG Chengping, WANG Huan, LU Junjie

(AECC Aero Engine Control System Institute, Wuxi 214000, China)

Abstract: The aeroengine control system is a safety-critical system for aeroengine, crucial for generating reliable thrust or power within the entire flight envelope of the engine. This paper presents the evolution of the aeroengine control system, summarizes and analyzes the development of three key system-level technologies, including architecture design, control law design, and fault diagnosis and condition monitoring design, as well as simulation enabling technologies. The discussion on the applicability of these technologies in engineering is then conducted. The prospects for future development directions and key research areas are finally explored, providing a valuable reference for the design of next generation aeroengine control systems.

Key words: aeroengine; control system; architecture design; control law; fault diagnosis; condition monitoring; simulation

控制系统是航空发动机的大脑和神经系统^[1], 属于安全关键产品, 由电子控制器(含控制软件)、液压机械装置、传感器和电气系统组成, 负责安全、平稳、高效地控制发动机的推力或功率, 以及监视发动机状态, 诊断和处理发动机故障。控制系统约占发动机 50% 的外场可更换单元, 10%~30% 的整机重量和研制成本, 涉及电子、电气、机械、液压、控制和软件等多个学科。

架构设计、控制律设计、故障诊断与状态监视设计是航空发动机控制系统最为核心的系统级技术, 此外, 仿真是控制系统开发重要的使能技术。通过架构设计确定系统的冗余配置和软硬件资源配置, 除了保证实现系统的功能外, 还需综合考虑性能、成本、重量、风险、安全性、可靠性等多维度指标, 进行多方案评估与权衡, 确定出工程综合最佳方案。宏观层面确定架构资源后, 微观层面通过架

收稿日期: 2024-06-28; 修订日期: 2024-07-25

作者简介: 高亚辉, 男, 研究员, 副总师, 主要研究领域为航空发动机控制系统设计和建模仿真, 获省部级和航发集团级科技进步奖 5 项, 申请专利 30 余项, 登记软件著作权 7 项, 发表科技论文 40 余篇。

通信作者: 高亚辉, E-mail: hitgyh@163.com。

引用格式: 高亚辉, 倪焯斌, 姜成平, 等. 航空发动机控制系统及关键技术现状与展望[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(4): 577-596. GAO Yahui, NI Yebin, JIANG Chengping, et al. Research status and prospect of aeroengine control systems and key technologies[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(4): 577-596.

构软硬件综合策略设计,制定架构资源在正常、降级情况下系统用可用资源协同完成控制功能的顶层规则,使得系统运行安全可靠并具备最长的系统故障降级路径。

控制律根据飞行员操纵指令,协同控制发动机主燃油、加力燃油、几何作动位置等,产生预期推力响应,控制律构型的好坏以及控制参数的优劣,直接决定发动机性能是否充分发挥,控制品质是否兼顾灵敏性和鲁棒性;此外,通过控制律设计将系统级指标分解为子系统/部件指标,分解结果需确保系统性能可满足、部件可互换、工程可实现、经济可承受。

故障诊断及状态监视与飞行安全直接相关,通过截面级、回路级、通道级等多层级故障诊断策略,检测与隔离控制系统的信号输入、电子控制器、电液转换装置、执行机构等各环节故障,防止故障蔓延,配合故障对策,使发动机始终运行在安全边界内。此外,对发动机风扇、压气机、涡轮等主要气路部件的气动热力参数、发动机振动参数,以及控制系统、滑油系统、防冰系统等运行状态参数进行持续监视。将控制系统诊断出的故障以及发动机和各系统异常运行状态,按影响程度划分等级,以分级告警的方式发送给飞机设备,由飞行员和飞机设备视情处置,确保飞行安全。

仿真技术是支撑航空发动机数字化变革的核心基础,通过建模,构建控制系统数字原型,基于数字原型对控制系统功能、性能、安全性等进行设计与仿真验证,在桌面发现问题并迭代封闭,大幅减少实物阶段的试验验证和纠错代价;数字原型可随产品交付用户,进行更上一层级联合仿真,亦可用于辅助外场产品排故。仿真将设计与验证活动前移,可显著提升研发效率,提高研发质量,降低研制成本。

随着飞机作战性能的提高,对现代航空发动机的性能要求越来越高。在提高发动机性能的同时,还要求减少排放物、降低噪声,因此航空发动机将设计得愈发复杂,可调的部件愈发增多,从20世纪40年代第一代发动机的1~2个控制变量,发展到现在变循环发动机的将近20个控制变量,未来还有进一步增多的趋势^[2-3]。随着发动机复杂度的提升,以及电子技术和仿真技术的迅猛发展,控制系统架构、控制律、故障诊断与状态监视、开发模式等全方位发生天翻地覆的变化。控制系统架构方面,从早期的液压机械控制系统已经发展到现在复杂综合数字全权限控制系统;控制律方面,从早期基于经典控制理论的单变量控制,已经发展到现在基于现代控制理论的多变量控制;故障诊断与状态监

视方面,从早期液压机械控制无相关功能,已经发展到现在对控制系统多维度全方位故障诊断与状态监视;研发模式方面,从早期强文档弱工具化研发,已经发展到现在基于建模仿真的数字化研发^[4]。

本文分析了航空发动机控制系统代际演进及关键特征指标和技术,总结归纳了控制系统架构设计、控制律设计、故障诊断与状态监视设计、仿真等关键技术的国内外现状,并探讨了这些关键技术的未来发展趋势。

1 军用航空发动机控制系统发展历程

1.1 航空发动机控制系统核心需求演进

自20世纪40年代人类进入喷气时代以来,每一轮航空战斗机的代际变更都同航空动力装置的构型升级与性能跃升存在密切联系^[5-6]。而作为体现航空技术水平、衡量航空动力装置发展阶段的重要组成部分,现代航空发动机控制系统在满足发动机常规控制功能之外,承载着发动机安全限制及超限保护、状态监视、故障诊断及异常处置等核心功能。进入新时期以来,航空发动机控制系统逐步呈现出多电、智能化特征的发展态势^[7-8],日益成为挖掘发动机性能潜力、提升战机作战效能的关键抓手,图1梳理了各代战斗机、航空发动机对航空发动机控制系统核心需求的演进发展过程。

首批喷气式战斗机普遍沿用传统活塞式飞机平直机翼布局,通过替换离心式涡轮喷气式发动机完成动力装置升级,具有显著的过渡特性,这一时期控制系统通过实现简单发动机转速闭环、保障发动机基本安全限制即可满足飞行需要^[9]。相较于第一代战机,第二代战斗机改进为后掠翼构型,通过换装推重比更高的涡喷发动机使得飞行速度接近声速,为了满足速度提升带来的发动机安全操控问题,此时的控制系统具备对部分发动机状态进行监视,能够实现发动机防喘、消喘等功能。随着飞行速度/高度的不断攀升,第三代战机采用了超声速气动布局,配备了带加力式涡喷发动机,为了追求极致的高空高速性能,具备喷口-加力控制、热回油功能,提升发动机控制精度与响应,改善发动机维护与系统扩展性成为这一时期发动机控制领域的关键技术需求。

以能量机动理论为牵引,第四代战机不再单纯追求高空高速性能,转而兼顾低、中、高声速下的高机动性能,动力装置普遍转换为包线内性能更加均衡的涡轮风扇航空发动机,飞机结构减重驱使着航













航空战斗机	代别	第一代 1940—1949	第二代 1950—1964	第三代 1965—1974	第四代 1975—1994	第五代 1995—2014	第六代 2015—
	核心特征						
	典型产品	F80 Mig9	F86 Mig17	F4 Mig21	F15/F16 Su27	F22 Su57	NGAD F/AXX
航空发动机	构型						
	典型产品	I16/J33	J35	J47/J79	F414/F100/F110	F119/F135	XA100/XA101
	核心指标	推重比~3 涡轮前~1 100 K	推重比3~4 涡轮前1 200~1 300 K	推重比5~6 涡轮前1 400~1 500 K	推重比7~8 涡轮前1 600~1 700 K	推重比10 涡轮前1 850~2 000 K	推重比12~15 涡轮前2 100 K~
发动机控制系统	核心需求	<ul style="list-style-type: none"> ■ 转速控制 ■ 基本安全限制 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 防喘、消喘功能 ■ 部分状态监视 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 控制精度/响应↑ ■ 热回油 ■ 喷口-加力控制 ■ 维护与扩展能力 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 系统重量/尺寸↓ ■ 系统复杂度↑ ■ 控制性能↑ ■ 系统热管理 ■ 系统容错能力↑ ■ 燃油附件集成化↑ 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 推力控制品质↑ ■ 推力矢量与IFPC ■ 成附件耐高温↑ ■ 成附件可靠性↑ ■ 健康管理↑ ■ 视情维修能力 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 最大推力↑ ■ 巡航油耗↓ ■ 系统级热管理↑ ■ 系统级能量管理↑ ■ 系统级功率提取↑ ■ 系统智能化程度↑

图 1 战斗机、航空发动机及发动机控制系统核心需求发展历程

Fig.1 Development of core requirements for the fighter, aero-engine and engine control system

空发动机控制系统在尺寸、重量大幅压缩,燃油附件集成化程度及系统复杂度大幅提升,FADEC (Full authority digital engine control)技术的引入也使得发动机控制性能与系统容错能力有了质的飞跃。21世纪以来,第五代战机突出隐身、超声速巡航、超机动及超感知的“4S”能力,战斗机超机动要求发动机控制系统在提升发动机推力的基础上,具备推力矢量及飞/发一体化控制(Integrated flight-propulsion control, IFPC)功能,超声速巡航则要求控制系统具备成附件耐高温及热管理能力^[10],简化维护及高派遣率要求控制系统不断提升成附件可靠性、寿命,并构建健康管理及视情维修能力。

下一代第六代战机呈现出智能化、高效能的发展态势,为了兼顾巡航阶段降低油耗、机动阶段提升推力的技术需求,自适应变循环航空发动机(Adaptive variable cycle engine, AVCE)成为最佳动力形态^[11],新一代控制系统需要实现发动机大推力、低油耗多模态协调控制;此外,六代机高效控制要求发动机控制系统具备更加高效的系统级热管理、功率提取及能量管理能力,综合更强大计算机硬件、传感器及网络化配置实现动力装置层的智能化控制^[12]。

1.2 航空发动机控制系统代际与关键技术项

21世纪初,NASA从控制系统组成、控制设计方法、建模与仿真能力等维度回顾了美国推进控制

技术发展脉络,将航空发动机控制系统发展过程划分成如图2所示的初始阶段、成长阶段、电子化阶段和综合化阶段4个关键时期^[13]。

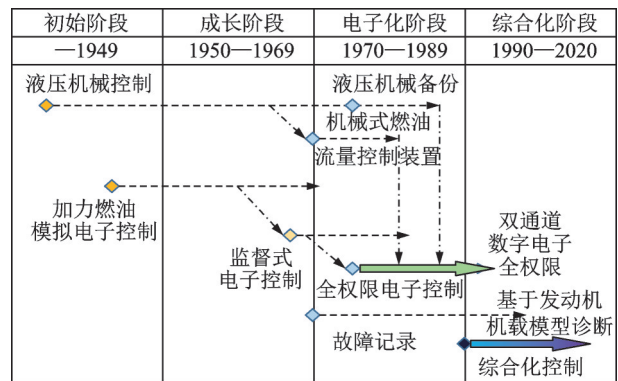


图 2 NASA 对于推进控制技术 4 个发展时期的划分

Fig.2 Division of NASA for the four development periods of propulsion control technology

航空发动机控制系统及相关技术的演变并非一蹴而就,除了来自飞机、发动机上一层级的需求驱使外,也同控制理论、建模仿真、传感器、集成电路、计算机网络及总线、故障检测、BIT (Built-in test)及余度技术、燃油成附件等内生基础技术的发展息息相关,图3归纳了航空发动机控制系统由“液压机械”构型历经“液压机械+综调”“单通道FADEC+液压机械备份”“双通道FADEC”构型发展到现阶段主流的“复杂综合数字全权限”、面向未来的“智能多电”6类构型^[14]及关键技术项。

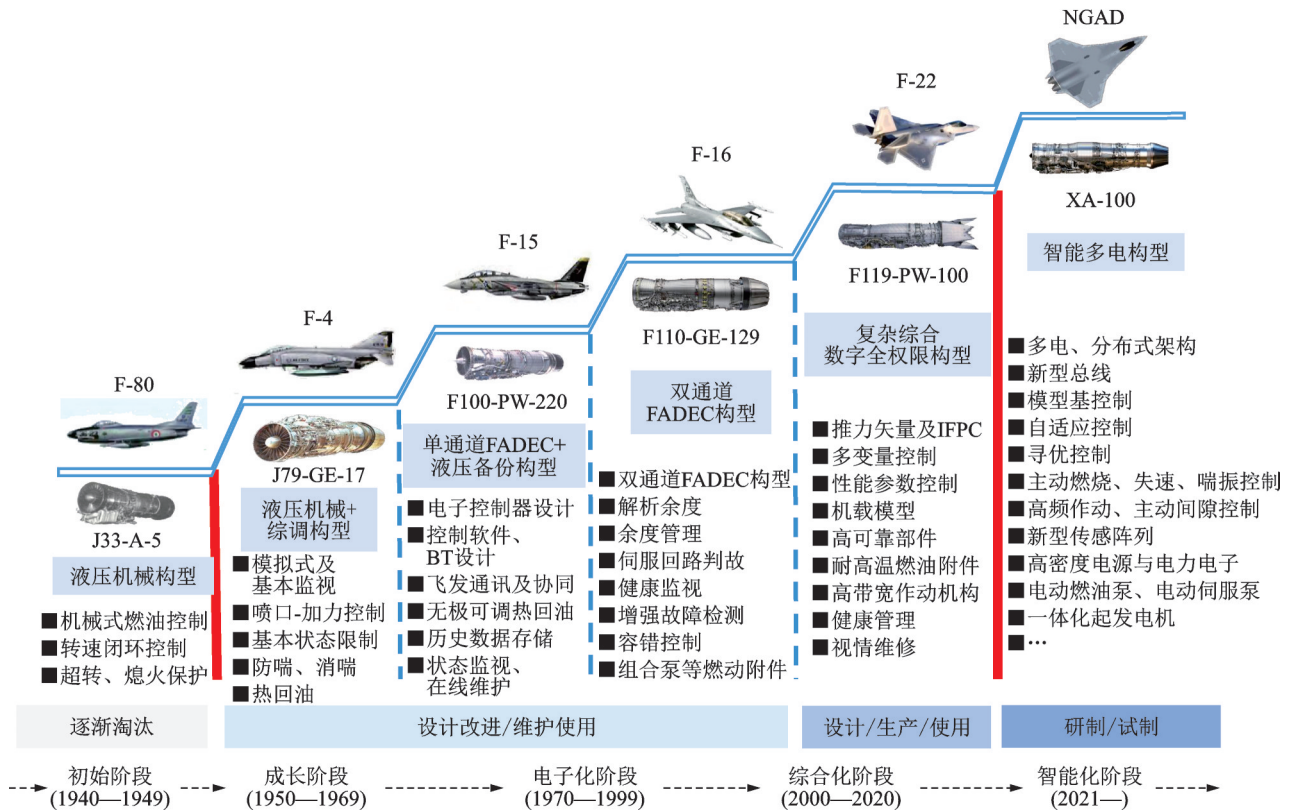


图3 航空发动机控制系统构型及关键技术发展脉络

Fig.3 Configuration and key technology development of aeroengine control system

早期战机包线限定于低速、中低空范围，航空发动机(如 GE I-A)采用单轴-离心式涡喷构型，飞行员可以通过操纵油门杆直接驱动机械计量装置调节燃油流量，开环调整或闭环控制发动机转速，超转保护、熄火与超温限制同样通过机械式限位装置实现，该阶段控制系统采用齿轮系、连杆和凸轮所构成的液压机械控制装置(Hydraulic mechanical control, HMC)，是简单的“液压机械”构型。受到战机速度、高度提升需求的驱动，以 J47 为代表的发动机逐渐转变为附带加力燃烧室的轴流式涡喷构型，为满足加力-喷口控制功能，增强发动机在防、消喘处置以及状态限制方面的能力，部分发动机具备热回油开关控制功能，系统除了持续改进 HMC 之外，额外引入了模拟电子式(真空管)控制及监控组件，构成了典型“液压机械+综调”控制系统构型。

20 世纪 70 年代后期，集成电路技术获得长足进步并逐渐向航空领域渗透，而随着发动机控制功能的不断扩展，传统液压机械系统逐渐到达改进极限。在此背景下，普惠、通用公司等航空巨头率先在 F100、F101 发动机上采用数字电子控制装置(Engine control unit, ECU)，通过在 ECU 上实现起动到停车的基本控制，配置历史数据存储、状态

监视、在线维护、飞/发通讯与协同、BIT、故障检测和处置等核心功能，形成面向航空发动机的数字全权限控制(Full authority digital engine control, FADEC)系统，鉴于电子元件的可靠性不足，该阶段通常保留液压机械备份装置，是典型的“单通道数字全权限+液压备份”构型。考虑到数字电子控制在扩展性、维护性及开发周期上的巨大优势，在突破 ECU 可靠性瓶颈后，航空发动机控制系统迈入“双通道数字全权限”构型时代，如第四代战机 F-15/F-16 配装的 F100/F110 发动机均采用双通道 FADEC 系统，相较于前一代发动机数控产品，其在系统减重、成附件集成度、信息化水平、可靠性与维护性上大幅提升，实现了集成化组合泵等燃油附件，突破了双通道架构、解析余度、余度管理、伺服回路判故、健康监视技术，增强了系统故障检测与容错控制能力。FADEC 的引入对于提升发动机控制性能、降低飞行员操纵负担、提高发动机维修性与容错能力有着不可替代的作用，是 20 世纪航空发动机控制领域最具标志的变革性技术。

21 世纪以来，常规 FADEC 系统及相关技术趋于成熟，伴随推力矢量及飞/发一体化、多变量控制、性能参数控制、机载模型^[15]、健康管理、视情维修、高带宽作动机构^[16]等瓶颈技术的突破，控制系

统逐步演化为“复杂综合数字全权限”构型,是五代战机“隐身、超机动、超巡、超感知”能力达成的关键技术保障,典型的产品为美国F119、F135发动机配装的FADEC控制系统。以NGAD为代表的预研计划^[17-18]表明,下一代战机逐渐朝着宽速域、智能化、高能效的方向发展,航空发动机由传统小涵道比转变为自适应变循环构型,控制系统正围绕多电架构^[19]及新型总线、先进控制及主动控制、电动泵及电力作动装置等多个关键技术方向^[20-21]开展探索与前期实践,彰显出向“智能多电”构型演变的发展态势。

2 关键技术

2.1 架构设计技术

系统架构是指系统功能与结构元素之间的对应情况所作分配的集合,包括系统功能的层级关系和交互、结构元素之间层级关系与结构、功能和结构之间的映射关系^[22]。

国外航空企业,在进行大型复杂系统的开发时,基本都以系统工程方法为指导,全局综合考虑功能、性能、可生产性、可靠性、维护性、易用性等多学科指标的要求,通过QFD等分析手段,进行系统的优化折中设计。目前在达索、波音等大型复杂系统的开发过程中已经形成了一个RFLP(需求-功能架构-逻辑架构-物理架构)的设计流程,如图4所示^[23]。在民用航空领域,还特别强调与安全性设计过程的综合与迭代,形成了以ARP4754B^[24]和ARP4761A^[25]为核心的安全性设计指南。

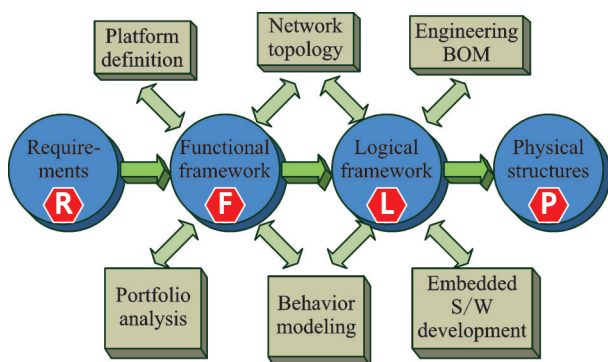


图4 达索RFLP设计流程

Fig.4 Dassault systemes' RFLP design process

2007年,INCOSE提出了MBSE的概念。MBSE通过模型表达系统的功能、架构、行为,以模型为基线来进行系统开发,表达能力强,能保证理解一致性和完整性^[26]。国外尤其是在复杂系统和军事武器系统的研发过程中,利用模型来保证系统架构设计的一致性,同时自动生成过程文档,已经

成为国外的主流趋势。洛克希德马丁以SysML系统架构模型为核心、基于OOSEM方法,综合采用ModelCenter进行多学科设计数据的集成,使系统架构模型成为整个设计整合的数据“hub”,实现了关键架构参数和设计要素的关联分析和追溯,确保了设计一致性^[27]。欧洲导弹集团、轨道科学公司都已经在具体工作中采用了MBSE方法,基于Rhapsody、GENESYS、MagicDraw、Capella^[28]等工具开展了架构建模工作,设计要素的模型化表达和自动关联,显著提高了设计效率和质量。

近年来国内航空产业结合MBSE的推进,一方面补齐系统工程活动要素,另一方面也在探索基于模型的系统工程应用。王豪^[29]分析了电传飞控系统架构设计中的安全性要素,结合系统余度设计和部件可靠性分析,实现了架构设计过程中安全性设计的融合。张天目等^[30]基于Harmony SE方法,基于模块定义图进行系统架构设计。贺文虎等^[31]开展了基于模型的动力装备系统架构建模、功能危害性评估迭代。

发动机控制系统的架构设计是设计发动机控制系统架构的过程,是在满足发动机需求的前提下,对实现系统的控制功能所进行的顶层设计。在设计流程上,首先从功能域开展设计,从发动机级功能需求出发,结合待实现的发动机控制计划和系统设计经验,进行控制系统的功能分解与演绎。逐层向控制系统级-子系统级分解,设计和演绎出实现这些顶层功能的系统级功能。完成系统级功能演绎后,控制系统总体对系统功能进行子系统的功能分配。现代发动机控制系统基本上是以微计算机为控制器的FADEC系统,进行功能分配时,应综合考虑某个功能由硬件或软件实现的合理性、可能性及可靠性等因素,进行折中分配^[2],同时应尽量解耦。

控制系统依据专业属性,通常由电子、燃油与作动、传感、电气等几个子系统组成。在进行功能分配时,在全系统范围内根据功能的依存性和作用相关性进行划分。系统功能分配是一个总体与各子系统反复迭代和权衡、协同参与、共同决策的结果。子系统的功能分解与演绎过程是在各专业接受控制系统总体专业分配的功能之后,结合本专业特点,进行进一步分解和演绎的过程。

子系统功能分解至底层之后,实现向具体实现部件SRU的转化,进入物理域开展设计。得到实现系统的底层功能部件后,需要综合考虑可制造

性、可靠性、维护性、成本、技术成熟度等诸多要素,并协调控制系统成附件制造商/供应商,开展跨厂所之间的技术协调和综合设计,将分离的元器件整合成相对简单的部件。之后再进一步整合得到系统内部的各个成附件设计方案和系统内部物理链路,得到系统的各个配置项和系统的结构树。

为满足发动机控制系统的高安全性需求,提高可靠性,引入冗余方法,通过增加比最小功能系统更多的元件或装置来提高安全性和任务的可靠性,但是增加冗余会增加系统复杂度,重量、体积、经济性指标降低^[1],现代航空发动机FADEC系统一般采用双通道的设计方案。

在完成物理架构方案之后,通过权衡研究评定备选系统架构,在性能、成本、安全性、可靠性、风险、重量和其他效能度量标准维度上进行评估和权衡,综合确定工程综合能效最高的方案。

作为安全关键系统,发动机控制系统架构设计过程中,参照ARP4754B,将安全性设计贯彻始终。一方面在功能架构设计过程中,与系统FHA分析进行迭代,得到顶层功能的FDAL,并沿功能树分解得到下层功能的FDAL;另一方面,在物理架构设计时,通过PSSA和CCA等过程对候选系统架构进行迭代式评估,以确定系统方案对顶层安全性需求的符合性^[32],并作为系统方案权衡分析的重要评估项。

技术决策贯穿于整个控制系统架构设计的始终。技术决策是综合控制系统中不同专业整合的结果,可以是技术讨论、技术评审。需要指出的是,发动机控制系统架构设计是需要反复迭代和优化的,甚至有些项目在整个生命周期内,都一直在循环迭代。

在基于模型的设计方面,将系统架构设计各过程的产出用模型的方式表达,基于SysML从系统需求、功能行为和物理结构以及它们之间的相互关

系等方面进行描述;通过用例图构建系统顶层功能;随着系统功能的分解,采用活动图对功能行为进行建模;利用顺序图结合泳道和矩阵进行功能分配;采用Block、BDD图和IBD图对系统的结构和接口进行建模;并为功能和接口创建性能属性、安全性属性等指标,借助参数图清楚描述它们的约束之间应满足的关系;在此基础上,为功能模型和结构模型与系统需求之间建立追溯,基于模型实现从需求到设计的全域一致性描述和设计覆盖。

在完成宏观系统架构设计后,需要在微观层面对控制系统的架构软硬件综合策略进行详细分析和设计,确保系统在通道资源正常、降级情况下能够用可用资源协同完成控制。国内外均做了相关研究和工程应用,以CFM56发动机为例,根据机内自检测(BIT)信息来计算通道健康状态,并根据健康度确定主控通道;当双通道健康度相同时,每次发动机启动时进行轮转^[33]。国内王旭昊等^[34]提出了一种双通道发动机电子控制器的通道健康监控策略,结合BIT和发动机控制回路特性建立各通道健康位向量,通道间进行交叉表决,确定主控通道。

架构软硬件综合策略的硬件部分负责对控制器CPU、FPGA、电源等核心资源进行独立监控,并提供通道切换和关断控制输出的有效路径,图5给出了一种双通道控制系统通道切换电路示意。软件部分基于控制系统各部件故障诊断结果、发动机控制状态等信息形成通道健康度,并基于通道间的健康度比较进一步形成系统级的协同、主备等主控和伺服控制模式策略,协调系统架构资源进行局部重构、通道切换、关断输出等操作,尽量延长系统的故障降级路径,提高系统的鲁棒性。需要对硬件策略和软件策略的功能、时序等进行匹配与综合,避免软硬件策略集成后涌现出通道间来回抢控制权等不期望的系统行为。

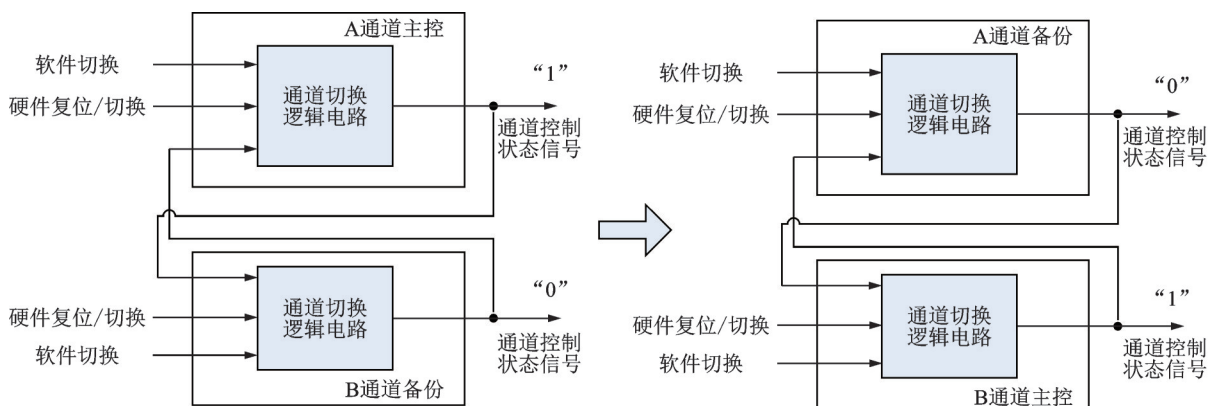


图5 双通道控制系统通道切换示意图

Fig.5 Channel switching schematic diagram of dual-channel control system

2.2 控制律设计技术

随着发动机技术不断进步,其控制律设计的需求也在逐步迭代,从最初的燃油开环到转速闭环和限制保护闭环,再到综合推力管理、能量管理,控制目标、控制回路逐渐复杂,对控制性能的要求不断提高。设计复杂度的提升意味着需要综合考虑各子系统对控制性能的影响,而其中的关键技术控制算法设计以控制理论发展的 3 个阶段(经典控制、现代控制和智能控制)为准,也经历了相应的演进。

2.2.1 控制律指标分解

尽管学术上围绕控制算法展开大量研究,但在实际工程中,控制算法仅仅是数控系统性能设计的一个环节,完整的性能设计需要依托于控制律设计开展,从需求分析、回路设计再到各环节验证形成一个闭环流程。

如图 6 所示,数控系统控制律设计必须综合考虑用户需求以及功能设计要求,结合对被控对象

(包含发动机及其成附件)的建模分析,从控制原理出发,建立合适的控制方案和性能指标,进而开展算法设计及参数整定,最终通过评价验证结果判断是否需要进行迭代完善。

控制律设计过程需要不断考虑当前软硬件设计及研发能力,从技术、成本、资源等多个维度深入分析计算方案可行性,合理分配各部件指标的权重。特别是在航空发动机这类高温高压高负载的苛刻环境,其成附件的使用寿命和维护性是需要重点考虑的设计要素,仅考虑设计条件下的各部件指标不足以支撑数控系统全生命周期的使用,必须有效定义产品指标的退化边界和故障边界,并建立合理的在线监视和线下维护方案,在退化区间考虑视情维护,在故障区间设计完善的故障诊断与容错控制方案。因此,指标分解的结果不仅源于理论计算,更多需要依靠过往的设计经验和习惯,甚至是多方博弈的折中结果。

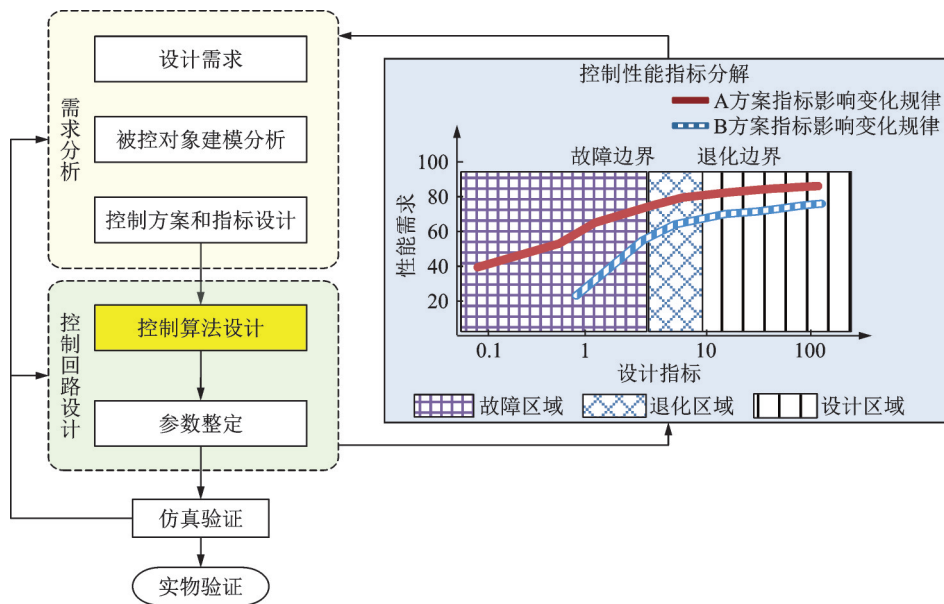


图 6 控制律设计流程

Fig.6 Design process of control law

2.2.2 经典控制技术

无论是稳态还是过渡态控制律,传统的控制算法都是基于经典控制技术开展,经典控制技术基于传递函数与系统校正的设计思想衍生了一系列控制方法,是航空发动机控制系统设计应用广泛的控制技术,国内外技术专家广泛提及了经典控制在发动机上应用。如 Jaw 等^[3]在其著作中大量描述了采用频域和根轨迹方法设计控制参数的案例,频域和根轨迹都是经典控制技术中的图形法,从图形的变化趋势中分析控制所需的校正环节及控制参数,但由于设计结果不够直观,目前这类设计通常都需要借助计算机开展。姚华等^[1-2]则在其著作

中提到了零极点配置法,该方法的思路是设计控制器与被控对象的主导特性对消,使得系统开环特性达到预期的设计目标,一般为了方便参数整定和性能调试,理论的开环设计目标阶数相对较低(一至二阶),由此可知,被控对象主导特性不能太多,否则会导致控制器阶数过高,进而影响控制参数的整定。另外,在航空发动机数控系统设计中通常会考虑将开环系统设计成 I 型系统,保证理论静差为零,因此还需要额外注意抗积分饱和的处理。

总的来说,经典控制并不意味着性能差,相对于复杂的现代控制与智能控制,以控制品质为直接设计目标的经典控制天然具备较强的鲁棒性,简化

的设计思路也意味着不依赖高精度的被控对象模型,特别是随着电子技术的发展,经典控制技术也不再局限于传统的PID,可以根据设计需求灵活调整控制结构。

2.2.3 现代控制技术

现代控制是一种建立在状态空间法基础上的理论,其控制设计是通过描述系统状态变量来实现。对于航空发动机这类自稳定的系统,获取其状态空间模型的方法有很多,但由于发动机在全包线内的强非线性,其模型精度就成为现代控制理论在航空发动机领域应用的根本性问题。目前在航空发动机控制领域开展应用研究的主要包括鲁棒PID控制、多变量控制和自适应控制。

(1) 航空发动机鲁棒PID控制技术

得益于现代控制理论的发展,PID参数的设计也逐渐形成了一些量化的设计手段,如鲁棒PID设计。该方法将现代控制思想与传统PID控制策略相结合,将控制问题约束成PID参数的求解问题,由于PID结构本身的广泛适用性,一定程度上规避了现代控制理论在控制算法结构上设计难题,

且衔接了经典控制技术的工程经验,特别是在2000年前后,针对当时国内的技术条件,形成了大量研究成果^[35-36],并进行了应用验证。

(2) 航空发动机多变量控制技术

随着航空发动机结构日益复杂,基于经典控制理论的单输入-单输出控制难以解决因控制回路的增加导致多参数间的强耦合问题,显著影响控制的稳定性和动态性能,这种复杂的控制需求催生了多变量控制技术的发展。多变量控制通过综合考虑多个控制参数与被控参数,设计解耦策略降低发动机非主导控制回路间的交联耦合,实现多变几何调节机构间的协调控制。

多变量控制技术在航空发动机上研究有很多,但国外呈现在工程应用的资料仅有F35B配装的F135,它采用了基于模型逆的多变量控制技术(图7),通过实时提取衡量发动机多输入-多输出关系的控制效能矩阵、综合发动机限制保护与包含伺服在内的各级受限因素、完成对控制效能矩阵的受限求逆,实现发动机多个控制量的实时求解更新^[37]。国内高亚辉等^[38-40]则采用LMI、LQR等方法,结合实际情况进行了应用验证。

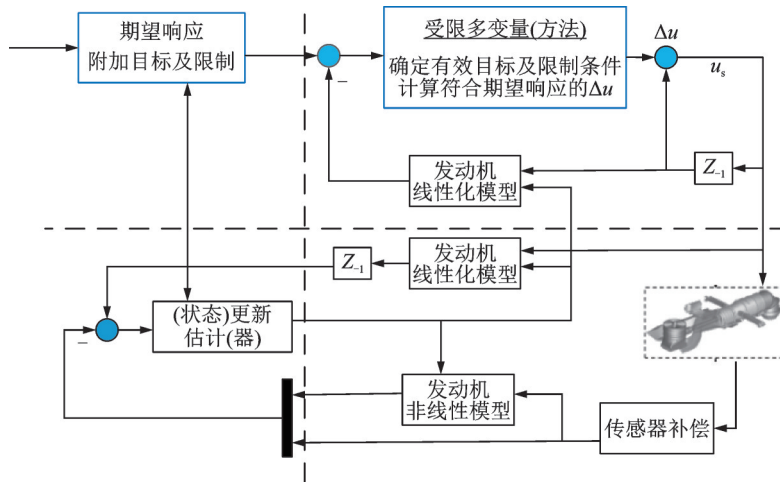


图7 F35B发动机受限动态逆控制结构

Fig.7 Constrained dynamic inversion architecture of F35B

(3) 航空发动机自适应控制技术

航空发动机的复杂性及其飞行任务和工作条件的多变性,使得控制律的设计难度愈加复杂。而自适应控制具有适应被控对象特性变化,自动更新控制器结构、参数和控制作用的特点,能够实现发动机在复杂工况下的动态适应和优化控制,在实际工程上已经得到了专项试验的验证。

20世纪90年代中叶,美国空军及NASA针对F15 ACTIVE先进技术验证机,引入了模型参考自适应控制方法(图8),围绕PW1128发动机开展

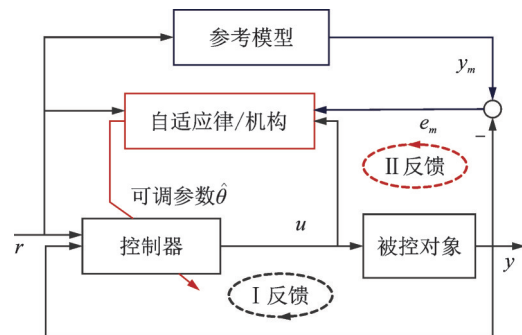


图8 模型参考自适应控制

Fig.8 Model reference adaptive control (MRAC)

了技术实践,使得发动机控制性能与飞机飞/发一体化控制品质有了显著改善^[41]。2010年前后,NASA依托F-18飞机作为全包线先进系统研制平台(Full-scale advanced systems test bed, FAST),开展非线性动态逆技术与自适应控制技术相融合的先进飞行控制系统开发与飞行试验^[42]。国内在航空发动机自适应控制领域开展了较为全面的研究^[2],但工程应用方面同样仅针对特定问题展开,其主要原因是自适应控制在处理未建模动态、未知扰动等问题时,容易出现系统参数严重漂移,导致控制系统丧失稳定性。因此,在已有自适应控制技术的基础上提高系统的鲁棒性,抑制客观存在的各种不确定性,是工程应用需要重点解决的问题。

2.2.4 智能控制技术

智能控制是自动控制发展的最新阶段,在航空发动机领域,最早美国在综合高性能涡轮发动机技术计划中就提出了智能发动机控制(Intelligent engine control, IEC)模式的概念^[43],该模式主要依赖机载自适应模型实现不可测参数的闭环控制,如推力控制、主动喘振控制等,这些算法的内核理论上还是现代控制的范畴。随着技术不断发展,发动机智能的概念逐渐将人工智能技术和现代控制理论进行融合,但相对工程实用更多的还是强调最优决策,如性能寻优^[44-45]、性能退化缓解及健康管理^[46],这部分智能体现在控制系统的高层(决策与规划)。相对来说,低层控制(动作与实现)的研究主要是集中在控制参数的自整定,如模糊PID^[47]、神经网络PID^[48-49]等,这些方法采用智能学习的方式实现特定结构的参数自整定与性能自优化,控制器易于实现,具备一定的适用范围。有学者也开展了智能控制直接参与闭环控制的研究^[50-51],但由于依赖学习样本以及可解释性较差、稳定性较低、可靠性不足等问题,目前还停留在桌面研究阶段。

2.3 故障诊断与状态监视技术

发动机控制系统由于长期暴露在高温、剧烈振动和强电磁干扰等极端条件下,其故障率相对较高。2019年国内民航发动机使用困难报告(Service difficulty report, SDR)中,燃油控制与点火系统SDR约占全部动力装置机械类SDR的32%。SAE制定的ARP1587B^[52]指出,控制系统的故障,例如传感器或执行机构的失效,可能导致空中停车或禁止地面启动,从而严重威胁飞行安全和任务执行的可靠性。控制系统的软硬件之间存在高度的耦合,故障类型繁多,故障传播路径错综复杂且相互交织,对控制器系统故障诊断技术提出了极大挑战。

2.3.1 电子控制器故障诊断

发动机电子控制器(Engine electronic controller, EEC)的接口和电路结构复杂,且随着发动机对控制功能、性能、体积、重量等需求的增加,其复杂性还在不断上升。这导致在极端条件下EEC的故障风险也随之增加,如复杂电磁环境干扰引起的信号采集异常^[53]、高空辐射单粒子效应引发的器件失效^[54]、极端温度和强振动引发的电路虚焊失效^[55]等。

BIT技术是目前最主要的电子控制器故障诊断手段^[56-59]。20世纪80年代,美军方就着力推进BIT技术用于电子设备的故障检测,通过在F-15、F-22、F-35、B-2等军机中大量应用BIT技术,保证了较高的测试性、可靠性、维修性水平^[60]。在民机领域,波音在B737等飞机中广泛采用BIT技术,大大减少了机载设备的故障诊断时间和维修周期^[61]。国内BIT技术大量应用于电子控制器以及执行机构、传感器、电缆的电气特性故障检测,工程应用已较为成熟。BIT根据不同的检测目的和时机,主要分为以下几种模式:上电前自检(PUBIT)、飞行前自检(PBIT)、维修性自检(MBIT)和飞行中自检(IFBIT)。PUBIT、PBIT和MBIT通常由人工操作或特定条件触发,独立于正常的控制运行,通常可以将发动机状态作为关联触发条件。而IFBIT则是在系统启动后持续进行的自动检测,与发动机的正常控制同步运行。

电子控制器的BIT检测内容主要包括以下几个方面:(1)CPU检测。确保CPU的算术和逻辑运算正常;(2)RAM检测。验证堆栈和数据存储单元的读写及存储功能;(3)ROM和Flash Memory检测。检查程序和数据存储的正确性;(4)定时器检测。确保定时器的准确性;(5)通信检测。确认数据在不同通道及与飞机设备间传输无误;(6)电源检测。检查各级电源电压的稳定性;(7)信号采集系统检测。检查模拟和数字输入通道的信号处理和转换,包括信号处理、滤波、AD转换等;(8)信号输出系统检测。确保模拟和数字输出通道的转换和驱动功能正常,包括DA转换、放大驱动电路等。信号采集系统主要包括传感器、连接电缆和采集电路,而信号输出系统则包括驱动电路、连接电缆和电液作动器件。BIT技术通常只能识别出信号采集或输出系统中存在异常,一般还需要进一步使用地面测试设备实现对电气故障的LRU级定位。

对于多通道架构的电子控制器,可采用通道资源表决监控策略构建通道故障逻辑,实现通道级的故障诊断与定位^[62],例如对于三通道的控制器,每个通道均可以接收其他两通道对本通道的表决监控信号,并据此评估本通道资源的故障级别。

2.3.2 传感器故障诊断

传感器是电子控制系统的关键信息来源,一旦传感器出现故障,可能会降低系统性能,甚至引发灾难性后果。2014年7月24日阿尔及利亚5017号班机空难,是由发动机进口的压力传感器失效引发。2018年10月29日印尼狮航610号班机空难和2019年3月10日的埃塞俄比亚航空302号班机空难,均是由迎角传感器故障引发,直接导致波音737 Max被全球禁飞。发动机传感器工作环境恶劣,面临诸如电磁干扰、噪声、元件老化和发动机性能退化等干扰因素,这些都增加了传感器故障诊断的复杂性。

利用BIT技术可以高效检测传感器的部分电气故障,对BIT无法检测出的故障,通过分析发动机特定状态下的测量信号,可以采用极值范围检测、斜率检测、信号特征检测(如LVDT信号的和值检测)、表决监控等方法进行识别诊断。运用表决监控时,双余度配置传感器只能检测出异常,无法隔离故障信号链路,采用三硬件余度传感器,通过两两对比传感器数据,可以有效地检测并隔离故障信号链路。

但较多的硬件余度一般会受到系统重量、尺寸、安装空间及成本的限制,因此基于解析余度模型的传感器故障诊断方法逐渐发展起来。1971年Beard^[63]首先提出用解析冗余代替硬件冗余处理复杂线性系统传感器故障诊断问题。20世纪80年代中后期,NASA Lewis研究中心总结了适用于航空发动机的传感器故障诊断算法,根据假设检验的方法构建多个卡尔曼滤波器,为关键传感器提供解析余度用于故障诊断,并在F100等发动机上得到成功验证^[64-66]。Kobayashi等^[67-69]进一步将发动机气路健康状态与飞行条件考虑在内,基于发动机机载非线性模型与混合卡尔曼滤波器,研究了双余度传感器的在线故障诊断方法。张鹏等^[70]研究了使用双重卡尔曼滤波器处理考虑气路部件退化情况下的传感器故障诊断问题。薛薇等^[71]将假设检验扩展到多重故障假设方法,可处理多个传感器同时发生故障的诊断问题。除了假设检验方法外,解析余度还可以通过其他无故障的传感器信号直接构建,例如,压气机出口总压可以通过压气机进口总压、导叶角度和高压转速来构造^[72]。

随着神经网络等数据驱动算法的日益成熟,基于数据驱动的传感器故障诊断方法得到了进一步发展。这类诊断方法不依赖于精确的发动机模型,有效避免了模型精度不足对故障诊断准确性的影响。Kobayashi等^[73]将神经网络的非线性映射优势与遗传算法对测量精度的强鲁棒性结合,降低了发动机传感器故障诊断的漏报与误报。鲁峰等^[74]提出对支持向量机进行自协调粒子群优化改进,并应用于传感器单重或多重故障的融合诊断。

2.3.3 执行机构故障诊断

执行机构通过电液转换响应控制器的电信号,实现精准的伺服位置控制,例如调节燃油计量装置和可变几何面积结构。电液伺服执行机构故障是控制系统中一类重要的故障类型。1989年美国联合航空公司232航班,受发动机风扇组件破碎影响,飞控系统的3个液压系统失效引发空难。BIT技术能够检测执行机构中部分电气故障,但面对电液转换装置、计量装置、作动装置中元件性能衰减、卡滞、零偏等故障,其检测能力有限。

基于模型的方法被广泛应用于发动机执行机构故障诊断。Kobayashi等^[75]采用了基于假设检验的卡尔曼滤波器组技术,能够同时诊断发动机的传感器故障、执行机构故障和气路部件故障。每个子滤波器都是根据特定故障假设设计的,故障发生时,正确假设的滤波器会产生较小的估计误差,而其他滤波器误差较大,从而实现故障的准确定位。蒋平国等^[76]提出了一种基于残差检验的伺服回路故障诊断方法,具有较强的工程实用价值。该方法通过构建执行机构数学模型,计算模型输出与实际输出之间的残差并与预设阈值比较,检测伺服闭环回路的故障。陶文华等^[77]提出利用相互关系矩阵,通过发动机输出与控制器指令计算执行机构输出的偏差,可以检测、隔离多个执行机构故障。季春生等^[78]提出一种组合参数在线估计方法,采用无迹卡尔曼滤波实现对电液伺服阀平衡电流、作动增益和作动延迟时间的在线估计与监视。

基于数据驱动的方法也被广泛应用于发动机执行机构故障诊断。Naderi等^[79]提出了一种只需利用有限数量频率处收集的燃气涡轮发动机频率响应数据,通过数据驱动方法直接设计故障估计滤波器以实现发动机执行机构和传感器的故障检测、隔离和估计的设计和实施方法。Cheng等^[80]将CNN网络用于诊断涡扇发动机执行机构故障,并将更多的气路可测参数用于诊断输入,以解决控制输出所提供的有限故障信息问题。潘阳等^[81-83]通过应用自校正在线训练神经网络算法,构建了发动

机逆模型,并基于此逆模型与执行机构模型,提出了一种发动机燃油系统执行机构及其传感器故障诊断方法,在T700涡轴发动机的半物理仿真试验平台验证了执行机构及其传感器的漂移和偏置故障的检测与定位。

2.3.4 发动机状态监视

发动机状态监视技术机载实时地监视发动机异常状态并向飞行员分级申报,促进险情及时处置保障飞行安全。发动机状态监视技术自20世纪70年代开始逐步发展,最初阶段的监视功能相对简单,主要侧重于发动机控制系统的参数监视,如高低压转速、涡轮出口温度、压气机出口压力的超限监控,以及防冰系统压力、燃油滤压差的监视等。随着发动机系统日益复杂化,对状态监视的需求不断增长,监视技术也随之升级,在气路系统监视中引入了更多温度和压力信号监视点,并增加了对振动系统、滑油系统等子系统的监视功能。发动机状态监视已经由最初的基于信号采集的简单参数监视,发展为包含大量特征提取、复杂信号处理与状态估计算法的综合状态监视功能。

气路状态监视技术通过实时监视转速、温度和压力等气路关键参数,对发动机整体及其部件的性能和状态进行评估,以监视发动机故障和性能退化情况。目前,国际先进的发动机气路状态监视技术已经进入工程验证阶段。Bai等^[84]通过遗传算法优化,提供了一种具有鲁棒性的状态估计方法,并在EJ200发动机的精确稳态模型上进行了分析验证。F119、F135发动机集成了先进的传感器、诊断算法以及增强型机载实时自调整模型(eS-TORM),以实现发动机性能状态的实时监控^[85-87]。国内在以机载自适应模型为代表的气路状态监视技术上也开展了大量研究^[88-89],并且随着机载设备计算能力的不断提升,也逐步进入工程应用。但仍存在一些挑战与不足,包括:(1)气路故障与性能退化影响机理的研究尚不充分;(2)受限于机理模型的精度,气路性能状态监视的估计精度有限;(3)研究较多停留在数字仿真验证阶段,落实到工程应用的案例相对较少。

机械故障是影响航空发动机安全性的关键因素之一。机械故障通常可以通过振动形式表现出来,振动信号分析已被证实是监视机械故障最可靠的技术之一,并广泛应用于发动机转子、轴承和齿轮系统的状态监视。振动系统状态监视技术的最早典型案例是英国Stewart公司于20世纪90年代初开发的直升机健康和使用的监视系统(HUMS),该系统通过监视直升机发动机及传动

系统的振动状态,显著降低了直升机严重故障事件的发生概率^[90-91]。在涡扇发动机的研制与服役过程中,通常在压气机机匣、涡轮机匣和附件传动机匣中安装加速度传感器,以监视发动机的振动状态。F119、F135、EJ200等发动机都配备了完善的发动机振动监视系统,通过时域和频域信号分析方法来监视机械系统的振动故障。现代民航发动机的振动监视系统能同时提供振幅和相位信号,必要时可在试车台或停机坪对低压转子进行动态平衡,例如罗罗公司的T900发动机具备发动机振动信号监视和风扇平衡监视功能。国内在发动机型号研制和工程应用中已基本实现了机载振动状态监视功能^[92],但仍面临一些挑战,包括:(1)振动传感器安装数量有限,难以有效隔离众多故障模式;(2)安装位置远离故障源,振动信号传递至安装位置时衰减幅度较大;(3)机械系统的早期故障特征微弱,易被环境噪声淹没。

发动机部件的摩擦和磨损是降低发动机性能和预期寿命的主要因素。滑油中的磨损屑末携带着丰富的机械磨损信息,通过监视金属屑末的数量和体积,可以直接反映发动机轴承及传动系统的磨损状态,并预测磨损的变化趋势,从而尽早发现机械故障。此外,通过对滑油性能参数(如压力、温度、消耗量、油滤旁路指示等)进行超限监视,可以及早发现滑油滤堵塞、漏油等故障;通过对滑油的黏度、pH值、颗粒度、元素含量等理化指标进行品质监视,可以监视润滑性能的退化。滑油状态监视作为发动机状态监视技术的一个重要方面,已得到广泛的研究与应用。自20世纪50年代起,磁屑收集器开始在航空发动机上应用,至今仍广泛应用于各军用及民用发动机。60年代早期,美军开始在航空发动机中推广应用更为先进的电子碎屑探测器。F119、F135发动机装配使用了机载感应式全液流碎屑监视器,并且增加了滑油品质监视和基于静电的滑油碎屑在线监视。EJ200发动机采用了机载滑油碎屑监测系统(ODMS),监视滑油消耗率及滑油碎屑。国内在滑油性能参数超限监视方面的研究应用已相对广泛^[93],但还需在使用过程中不断对告警逻辑进行完善。在屑末监视方面,磁屑收集器及其配套的堵塞信号指示器被广泛应用,但在ODMS等先进检测技术方面的技术成熟度还有待提升^[94-95],技术指标相对较低,例如对微小铁磁/非铁磁颗粒的检出率较低。

随着对发动机安全性与经济性要求的不断提升,在发动机状态监视功能的基础上逐步增加了发动机故障诊断、趋势分析、寿命管理等功能,构成了

现代航空发动机健康管理的主要内容。

2.4 仿真技术

作为一项重要的支撑技术,仿真能够在设计前端进行设计验证与迭代,可显著提升设计开发效率,在国防经济中扮演越来越重要的角色。美、英、法、俄等世界各航空工业发达国家对开发和应用航空仿真技术都非常重视。特别是美国,美国国防部一直将建模与仿真列为重要的国防关键技术^[96]。NASA基于UML和MATLAB联合开发了一个分析仿真框架,可用于飞控软件建模和分析测试^[97]。

洛克西德马丁公司在进行F-35时采用自动代码生成技术缩短研制周期,其构建的一体化控制设计验证环境如图9所示。Honeywell公司进行控制系统开发时,构建了标准的基准模型库和严格的建模规范,通过基于模型的设计(MBD)显著缩短开发设计时间^[98]。罗罗公司基于MATLAB/Simulink开展控制系统建模、仿真、原型开发、软件集成和发动机健康监视数据的处理^[99],并整合其他软件共同形成了面向控制和监视部件的架构(CaMCOA)集成开发平台,显著提升了建模仿真工作效率^[100]。

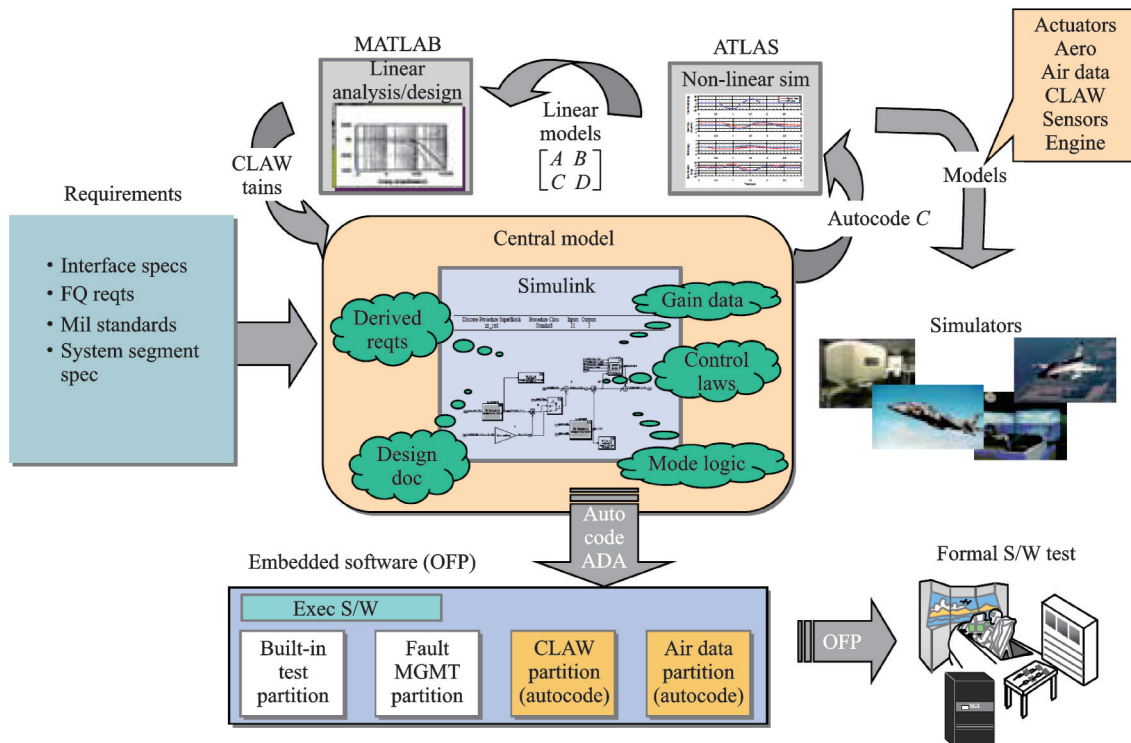


图9 JSF项目一体化控制设计验证环境

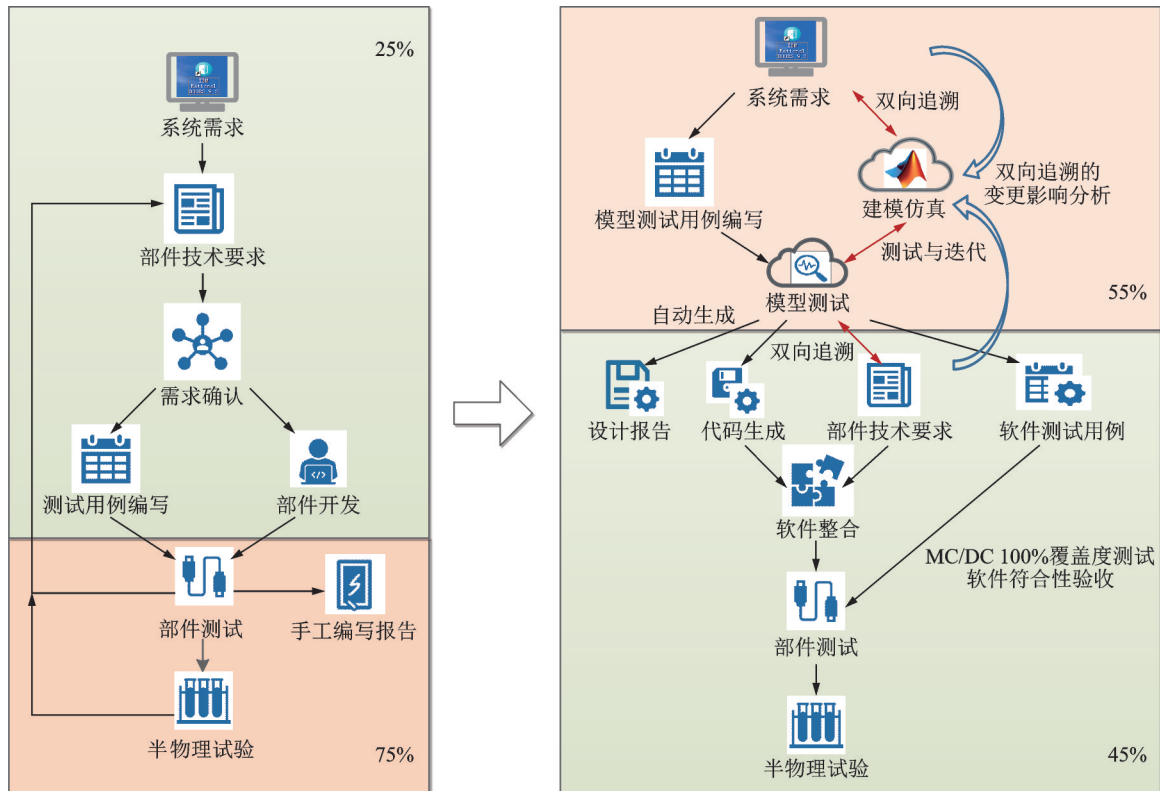
Fig.9 Integrated control design and verification environment for the JSF project

国内相关单位在系统研制过程中,也利用建模仿真助力研发。文献[101]利用基于模型的设计方法研制了某型号的软件系统。武方方^[102]在C919项目的核心维护功能调度开发过程中,采用了基于模型的设计方式,并基于脚本和场景序列完成Simulink模型的测试。具体到发动机控制系统研制方面,崔凯等^[103]基于MATLAB/Simulink开发了航空发动机控制系统仿真平台,使用M文件编写可视化操作界面,实现了同一平台下的仿真设计开发。高亚辉等^[104]在前端设计过程中,在统一的模型架构上,开展控制律、故障检测、余度管理等的详细设计,构建了控制系统的详细设计数字原型,并开展系统全功能、全状态仿真验证。借助建模仿真的手段,将设计与验证活动前移,在软件开发之前,进行设计验证与迭代。相较于传统的实现方

式,可以在前端完成约55%的设计活动,加快了设计活动的迭代效率。基于模型的控制系统的桌面原型构建技术的实施路径如图10所示。

高亚辉等^[105]建立了通用的航空发动机FADEC系统基准模块库、通用模型架构和通用算法CBB模块,提高了建模效率,降低了建模门槛;为规范建模仿真过程,定义了建模规范,并二次开发了模型规则检查工具。周彰毅等^[106]在分析模型库指南和规范的基础上,结合FADEC工程实践需要,基于SCADE开发了FADEC软件通用基准模型库。

针对FADEC系统控制软件多速率组中断的特点,开发多速率组任务调度引擎和消息调度引擎,并基于调度引擎,实现对各控制功能模型和通讯数据的调度仿真,可模拟各任务的资源消耗、进



(a) Traditional workflow of FADEC design and software development (b) Model-based workflow of FADEC design and software development

图 10 基于模型的 FADEC 系统设计与软件开发技术实施路径

Fig.10 Implementation path for model-based FADEC system design and software development technology

行系统时序设计与动态仿真。在数字原型的基础上,综合架构软硬件综合策略、总线消息调度,构建 FADEC 系统多通道数字样机,进行正常控制功能与性能一体化仿真、通道切换电路器件故障对系统功能与性能的影响仿真、通道资源降级与重构能力仿真、通讯异常影响仿真、SEU 数据翻转影响仿真,以及同步与失步控制策略、中断任务超时等对系统功能与性能的影响仿真分析。

在设计后端,由于控制系统的多学科耦合特征,不同专业设计开发时,可能采用不同建模仿真工具,如控制律和传感器的 MATLAB/Simulink 模型、燃油与作动子系统的 AMESim 模型、电子控制

器的 Saber 模型。罗茂春^[107]开展了基于 FMI 的发动机控制系统多学科联合仿真,并在数字仿真平台 FWorks 和 HIL 平台中进行了集成与验证。卢波等^[108]以数字原型为基准,通过求解器集成式,将等结构化机理模型进行多学科集成,开展 FADEC 系统多学科结构化模型的联合仿真,构建了 FADEC 系统的多学科联合仿真平台,在实物集成之前通过虚拟集成,提前验证和迭代。图 11 给出了一种 FADEC 系统多学科联合仿真方案原理图。针对结构化模型联合仿真速度慢的问题,余丹妮等^[109]开展了多计算机集群并行仿真,搭建了多领域并行仿真云平台,显著提高了仿真速度和工作效率。

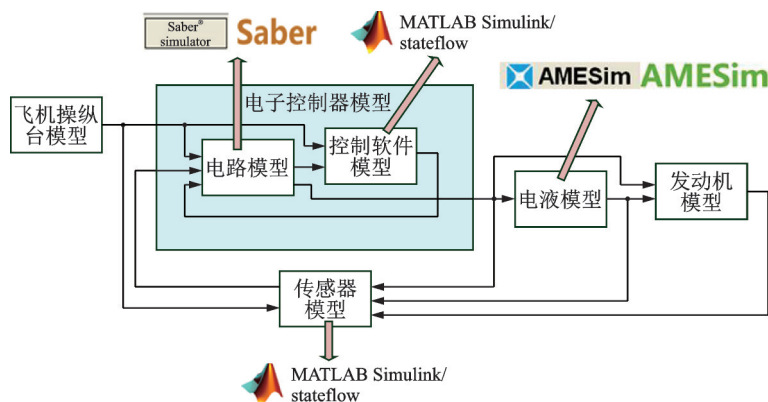


图 11 FADEC 系统多学科联合仿真方案原理图

Fig.11 FADEC system multidisciplinary co-simulation schematic diagram

唐钰婷等^[110]在多学科机理模型的基础上,通过对元器件注入故障,开展了基于模型仿真的失效模式和影响分析,实现了故障模式对系统功能、性能影响的定性、定量和动态化分析,显著提高了复杂系统安全性评估的准确性和效率,降低了数控系统的研发成本,缩短了研制周期。

3 发展趋势

3.1 航空发动机控制系统发展趋势

当前阶段,全球范围内围绕第六代战斗机的研发与竞争进入了快车道;近10年以来,美国开启了自适应发动机转化(AETP)、综合推进-动力与热管理(INPPAT)、下一代热-电力与控制(NGT-PAC)、下一代空中优势(NGAD)在内的多项研究计划,围绕新一代先进控制装置及核心控制功能,下一代航空发动机控制系统呈现的发展趋势包含:

(1)控制架构多电化。依托于新型总线,多电控制系统将中央控制器、一体化起发电机、传感器阵列、电力作动机构、电动燃油泵及伺服泵有机组合^[111],在大幅降低系统结构复杂度的同时,预留充足计算算力,为面向未来的发动机智能化控制奠定基础。

(2)能热管理高效、精益化。新一代控制系统引入电动燃油附件,具有优良的热效率和功率按需提取的技术优势,大幅简化热管理架构^[112];高密度电源、电力电子技术、微电网电能管理技术则为发动机及飞行器一级的综合电能/能量管理提供了技术支撑。

(3)控制算法智能化。在围绕航空发动机性能优化层面,控制系统正加速围绕模型基控制、面向航发发动机全生命周期的自适应控制、发动机性能寻优控制等智能控制领域扩展;依托新型高频电力作动装置的应用与实践,主动燃烧、失速、喘振控制技术,主动间隙控制等技术正逐步迈入工程化阶段,为挖掘发动机安全裕度,发挥发动机控制潜能提供了可行路径。

3.2 架构设计技术发展趋势

航空发动机控制系统将进一步推进基于模型的结构化设计:

(1)夯实特定域模型基础。当前通用的Sys-ML语言学习和使用成本较高,后续还需持续对模型进行定制化抽象,构建更完善的控制系统的特定域模型(Domain-specific modeling, DSM)^[113]基础,为MBSE在发动机架构设计中的实践奠定底层基础。

(2)工具链深度打通。以架构模型为基础,进一步深化架构设计上下游各模型工具之间的数据互联和全域关联,实现全域多约束条件下系统方案的快速设计与迭代。

3.3 控制律设计技术发展趋势

航空发动机控制律设计技术未来发展趋势:

(1)夯实现代控制技术的基础。现代控制技术严重依赖于状态空间模型的精度,特别是对于航空发动机这类气液固多学科耦合的非线性系统。因此,必须要持续提升发动机模型精度,增强设计与实现的一致性,从而提高现代控制技术的工程实用性。

(2)拓展智能控制技术的应用领域。当前智能控制技术的可行性高度依赖于先验知识的准确性和完整性,但在实际自我学习及优化过程中难以完全涵盖所有的工程经验和领域知识,无法满足航空发动机严苛的安全要求和设计规范。因此,需要进一步加强数据管理与质量控制,推进智能控制的技术成熟度,克服系统在不确定性和复杂性方面带来的挑战。

3.4 故障诊断与状态监视技术发展趋势

航空发动机控制系统故障诊断与状态监视技术未来发展趋势:

(1)机载实时化。由于机载计算资源有限,并且基于模型与数据的诊断方法通常计算需求较高,目前许多先进的故障诊断技术仍停留在数字仿真阶段,难以在机载计算单元上部署与工程化应用。控制系统故障诊断的机载实时化应用是一大发展趋势,一是要增强机载硬件的计算能力,二是要对诊断算法进行优化,以实现算法的轻量化和高效化。

(2)诊断与控制一体化。一旦控制系统检测到故障,故障适应策略将能够根据故障信息,智能选择最佳的隔离方案。通过信号重构、通道切换、优化控制参数等手段,最大限度地减少故障对系统性能的影响,延长系统性能降级路径,确保发动机控制的持续安全性和可靠性。而这一切的实现,都建立在高置信度的故障诊断能力之上,这是实现诊断与控制一体化的前提,而强鲁棒性且经过充分验证的故障适应策略则是诊断与控制一体化的坚实基础。

(3)自学习自适应化。未来控制系统故障诊断将具备自我诊断、自我预测、自我优化和自我适应的能力。这不仅意味着系统能够在无人干预的情况下,利用现有的知识库结合实时状态和任务需求,独立完成故障诊断,而且还能够通过自主学习

不断吸收新知识,识别故障特征,并进行自我调整和完善,以实现持续的性能提升。

3.5 仿真技术发展趋势

航空发动机控制系统仿真技术未来发展趋势:

(1)针对不同仿真目的,进行多学科、多场域模型持续集成,并不断提升模型精度和仿真效率。

(2)构建更为完备而综合的FADEC仿真集成开发环境(IDE),提供包括面向仿真业务流的模型基线与管理、数字交付等一体化仿真服务。

4 结 论

本文回顾了航空发动机控制系统随发动机和电子技术发展而演进的历程,介绍了架构设计、控制律设计、故障诊断与状态监视设计、仿真等系统技术的发展情况和主要方法,总结了尚存在的模型精度、算法实时性、工具链打通等主要问题及需要着重解决的关键技术,展望了控制系统未来向智能化、多电化、能热综合等方向发展的趋势。本文研究有助于科研人员认清当前航空发动机控制系统领域技术研究现状和存在的关键问题,同时,对研究航空发动机控制系统设计的新方法、新理论具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 姚华. 航空发动机全权限数字电子控制系统[M]. 北京:航空工业出版社, 2014.
YAO Hua. Aeroengine full authority digital electronic control system[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014.
- [2] 臧军. 现代航空发动机控制技术[M]. 北京:航空工业出版社, 2016.
ZANG Jun. Modern aircraft engine control technology [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2016.
- [3] JAW L C, MATTINGLY J D. Aircraft engine controls: Design, system analysis, and health monitoring [M]. Reston, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2009.
- [4] HAMSTRA J W. The F-35 lightning II: From concept to cockpit[M]. Reston, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2019.
- [5] GARG S. Aircraft turbine engine control research at NASA glenn research center[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 26(2): 422-438.
- [6] HERBST W B. Future fighter technologies[J]. Journal of Aircraft, 1980, 17(8): 561-566.
- [7] 陈黎,袁成. 从历代战斗机核心性能特征看国外六代机发展方向(下)[J]. 国防科技工业, 2023(4): 36-38.

- CHEN Li, YUAN Cheng. The development direction of foreign sixth generation fighter jets from the core performance characteristics based on the past jets[J]. Defence Science & Technology Industry, 2023(4): 36-38.
- [8] 王巍巍,李茜,郑天慧,等. 航空动力学科进展研究[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2016: 105-149.
WANG Weiwei, LI Qian, ZHENG Tianhui, et al. Advances in aero-engine technology[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2016: 105-149.
- [9] 樊思齐. 航空发动机控制[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2008.
FAN Siqi. Control of aeroengine[M]. Xi'an: North-Western Polytechnical University Press, 2008.
- [10] 康思昭. 基于Flowmaster的航空发动机燃油热管理系统温度仿真[D]. 大连:大连理工大学, 2021.
KANG Sizhao. Simulation of temperature of aviation engine fuel system based on Flowmaster software[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [11] 姜晓莲,王斌. 浅析未来航空发动机技术的发展[J]. 航空科学技术, 2010(2): 10-12.
JIANG Xiaolian, WANG Bin. Brief discuss on future aero engine technology[J]. Aeronautical Science and Technology, 2010(2): 10-12.
- [12] 孙健国. 面向21世纪航空动力控制展望[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 97-102.
SUN Jianguo. Prospects of the aeroengine control development in the early time of the 21st century[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 97-102.
- [13] JAW L C, GARG S. Propulsion control technology development in the united states a historical perspective: NASA/TM-2005-213978[R]. [S.l.]: NASA, 2005.
- [14] 孙志岩. 航空发动机控制系统发展概述[J]. 测控技术, 2019, 38(6): 1-4.
SUN Zhiyan. The development overview of aeroengine control system[J]. Measurement & Control Technology, 2019, 38(6): 1-4.
- [15] 李军,杨旭. 航空发动机健康管理系统的功能架构[J]. 航空动力, 2019(1): 71-74.
LI Jun, YANG Xu. Function architecture of engine health management system[J]. Aerospace Power, 2019(1): 71-74.
- [16] 陶增元,李军,程邦勤. 飞机推进系统关键技术——推力矢量技术[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2000, 1(2): 86-90.
TAO Zengyuan, LI Jun, CHENG Bangqin. Thrust vector technique, the vital technology of aircraft propulsion system[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2000, 1(2): 86-90.
- [17] TIRPAK J A. The sixth generation fighter[J]. Air

- Force Magazine, 2009, 92(10): 38-42.
- [18] MIZOKAMI K. "Sixth Generation" fighters jets are already taking shape[R]. [S.l.]: [s.n.], 2017.
- [19] NEWMAN R. The more electric engine concept[M]. Reno, Nevada: SAE Transactions, 2004: 1656-1661.
- [20] 廖忠权. 罗罗的飞行电气化之路[J]. 航空动力, 2020(1): 16-19.
LIAO Zhongquan. The flight electrification path of Rolls-Royce[J]. Aerospace Power, 2020(1): 16-19.
- [21] 廖忠权. 2022世界电动系统进展[J]. 航空动力, 2023(1): 23-26.
LIAO Zhongquan. Electric power system progress in 2022[J]. Aerospace Power, 2023(1): 23-26.
- [22] CRAWLEY E, CAMERON B, SELVA D. System architecture: Strategy and product development for complex systems[M]. [S.l.]: Prentice Hall Press, 2015.
- [23] Dassault System. Dassault systemes and DIAT come together for armament and combat vehicle technology [J]. International Aerospace Review & Analysis, 2015, 17(3): 70.
- [24] SAE International. Guidelines for development of civil aircraft and systems: SAE ARP4754A[S]. [S.l.]: SAE, 2010.
- [25] SAE International. Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment: SAE ARP4761[S]. [S.l.]: SAE, 1996.
- [26] 刘玉生, 蒋玉芹, 高曙明. 模型驱动的复杂产品系统设计建模综述[J]. 中国机械工程, 2010, 21(6): 741-749.
LIU Yusheng, JIANG Yuqin, GAO Shuming. Model-driven modeling for system design of complex products: A survey[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(6): 741-749.
- [27] HART L E. Introduction to model-based system engineering (MBSE) and SysML[R]. New Jersey: Ramblewood Country Club Mount Laurel, 2015.
- [28] FABRICE LESTIDEAU S B. The challenges of deploying MBSE Solutions[R]. Canberra: [s.n.], 2014.
- [29] 王豪. 电传飞控系统架构设计中安全性影响因素分析[C]//第17届中国航空测控技术年会论文集. 西安: [s.n.], 2020: 255-259.
WANG Hao. Analysis on security influence factors in architecture design of fly-by-wire flight control system [C]//Proceedings of the 17th China Aviation Measurement and Control Technology Annual Conference. Xi'an: [s.n.], 2020: 255-259.
- [30] 张天目, 安晓强, 孙志彬, 等. 基于SysML的系统架构设计与建模方法[J]. 飞机设计, 2023, 43(4): 46-51.
ZHANG Tianmu, AN Xiaoliang, SUN Zhibin, et al. System architecture design and modeling based on SysML[J]. Aircraft Design, 2023, 43(4): 46-51.
- [31] 贺文虎, 刘伟, 王西龙, 等. 航空动力装备顶层功能分解分配建模方法研究[J]. 图学学报, 2024, 45(2): 292-299.
HE Wenhui, LIU Wei, WANG Youlong, et al. Research on modeling method of top-level function decomposition and allocation of aerospace power equipment[J]. Journal of Graphics, 2024, 45(2): 292-299.
- [32] 杨宝森, 郑柯君, 来玲. 基于设计结构矩阵的复杂研发项目过程模型[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(9): 2187-2193.
YANG Baosen, ZHENG Kejun, LAI Ling. Process model of complex R & D project based on design structure matrix[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 2187-2193.
- [33] CFMI. Training manual CFM56-5B engine systems [Z]. [S.l.]: CFMI, 2000.
- [34] 王旭昊, 谭琪璘. 一种高可靠性双通道发动机电子控制器[J]. 电子测试, 2019(8): 9-11.
WANG Xuhao, TAN Qilin. A high reliability dual-channel electronic engine control[J]. Electronic Test, 2019(8): 9-11.
- [35] 徐刚, 孙健国, 张绍基. 用 H_{∞} 方法设计航空发动机鲁棒控制系统[J]. 航空动力学报, 1995, 10(1): 91-93.
XU Gang, SUN Jianguo, ZHANG Shaoji. Design of a robust control system for aeroengine by means of H_{∞} methodology[J]. Journal of Aerospace Power, 1995, 10(1): 91-93.
- [36] 王曦, 覃道亮. 一种基于LMI的航空发动机输出反馈PI控制[J]. 推进技术, 2004, 25(6): 530-534.
WANG Xi, QIN Daoliang. PI output feedback control for aero-engine based on LMI[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(6): 530-534.
- [37] WALKER G P, FULLER J W, WURTH S P. F-35B integrated flight-propulsion control development [R]. [S.l.]: [s.n.], 2013: 4243.
- [38] 高亚辉, 臧军, 姚华, 等. 航空发动机解耦PI控制器设计方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(4): 449-454.
GAO Yahui, ZANG Jun, YAO Hua, et al. Design method of decoupling PI controller for aero-engine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(4): 449-454.
- [39] 杨刚, 孙健国, 李秋红. 航空发动机控制系统中的推广LQR方法[J]. 航空动力学报, 2004, 19(1): 153-158.
YANG Gang, SUN Jianguo, LI Qiuhong. Augmented LQR method for aeroengine control systems[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(1): 153-158.
- [40] 杨刚, 孙健国, 姚华, 等. 航空发动机 H_{∞} /LTR控制试

- 验证[J]. 航空学报, 2006, 27(5): 773-777.
- YANG Gang, SUN Jianguo, YAO Hua, et al. Experimental verification of H_{∞} /LTR method for aeroengine control systems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(5): 773-777.
- [41] YONKE W A, TERRELL L A, MEYERS L P. Integrated flight/propulsion control-Adaptive engine control system mode: AIAA-85-1425[R]. [S.l.]: AIAA, 1985.
- [42] BURKEN J J, NGUYEN N T, GRIFFIN B J. Adaptive flight control design with optimal control modification on an F-18 aircraft model[R]. [S.l.]: [s.n.], 2010.
- [43] ADIBHATLA S, BROWN H, GASTINEAU Z. Intelligent engine control (IEC)[R]. [S.l.]: [s.n.], 1992.
- [44] 徐佩佩. 变循环发动机多变量控制及性能寻优[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- XU Peipei. Multivariable control and performance optimization of variable cycle engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [45] 王元, 李秋红, 黄向华. 基于DMOM算法的航空发动机性能寻优控制[J]. 航空动力学报, 2016, 31(4): 948-954.
- WANG Yuan, LI QiuHong, HUANG Xianghua. Performance seeking control of aero-engines based on the DMOM algorithm[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(4): 948-954.
- [46] GARG S. NASA glenn research in controls and diagnostics for intelligent aerospace propulsion systems [M]. [S.l.]: Infotech@ Aerospace, 2005.
- [47] 张如飞, 郭迎清. 复合模糊控制器在航空发动机上的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2006(9): 64-66.
- ZHANG Rufeif, GUO Yingqing. Application study on composite fuzzy controller applied to aero-engine control[J]. Machinery Design & Manufacture, 2006(9): 64-66.
- [48] 蒋衍君, 黄金泉. 航空发动机自适应神经网络PID控制[J]. 航空动力学报, 2000, 35(3): 334-336.
- JIANG Yanjun, HUANG Jinquan. Adaptive neural network PID control for an aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 35(3): 334-336.
- [49] WILLIS M J, MONTAGUE G A. Auto-tuning PI (D) controllers with artificial neural networks[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1993, 26(2): 141-144.
- [50] 姚彦龙, 孙健国. 基于神经网络逆控制的发动机直接推力控制[J]. 推进技术, 2008, 29(2): 249-252.
- YAO Yanlong, SUN Jianguo. Aeroengine direct thrust control based on neural network inverse control [J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(2): 249-252.
- [51] 闫召洪, 仇小杰, 黄金泉, 等. 航空发动机推力衰退缓解的神经网络控制[J]. 航空动力学报, 2020, 35(4): 844-854.
- YAN Zhaohong, QIU Xiaojie, HUANG Jinquan, et al. Neural network control for alleviating thrust degradation of aero-engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(4): 844-854.
- [52] SAE International. Aircraft gas turbine engine health management system guide: AIR1587B-2007 [S]. [S.l.]: SAE, 2007.
- [53] 郭文卿, 丁祎明, 王保国, 等. 航空发动机电子控制器电磁耦合的防护仿真研究[J]. 安全与电磁兼容, 2020(3): 83-86.
- GUO Wenqing, DING Yiming, WANG Baoguo, et al. Research on electromagnetic coupling protection simulation of aeroengine electronic controller[J]. Safety & EMC, 2020(3): 83-86.
- [54] SONG Y, TU X, LI Z. A detection method of atmospheric neutron profile for single event effects analysis of civil aircraft design[J]. Atmosphere, 2022, 13(9): 1441.
- [55] 赵子开. 针对航天器电路板焊点虚焊缺陷的红外智能识别技术研究[D]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2020.
- ZHAO Zikai. Research on infrared intelligent recognition technology for false soldering defects of spacecraft circuit board solder joints[D]. Langfang: North China Institute of Aerospace Engineering, 2020.
- [56] HALE W T, BOLLAS G M. Design of built-in tests for active fault detection and isolation of discrete faults [J]. IEEE Access, 2018, 6: 50959-50973.
- [57] 王松, 高亚辉, 王振华, 等. 航空发动机数控系统飞行前BIT技术研究[C]//2019航空装备服务保障与维修技术论文集. 南昌: [s.n.], 2019: 498-503.
- WANG Song, GAO Yahui, WANG Zhenhua, et al. Research of preflight BIT methods for aeroengine digital electronic control system[C]//Proceedings of 2019 Aviation Equipment Service Support and Maintenance Technology. Nanchang: [s.n.], 2019: 498-503.
- [58] 张天宏. 航空发动机数字电子控制器的BIT技术[J]. 航空制造技术, 2009(18): 42-45.
- ZHANG Tianhong. BIT technology of aeroengine digital electronic controller[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(18): 42-45.
- [59] 曹明, 黄金泉, 周健, 等. 民用航空发动机故障诊断与健康管理系统现状、挑战与机遇 I: 气路、机械和FADEC系统故障诊断与预测[J]. 航空学报, 2022, 43(9): 9-41.
- CAO Ming, HUANG Jinquan, ZHOU Jian, et al. Current status, challenges and opportunities of civil aero-engine diagnostics & health management I: Diagnosis and prognosis of engine gas path, mechanical and

- FADEC[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(9): 9-41.
- [60] ROBBINS D, BOBALIK J, DE STENA D, et al. F-35 subsystems design, development and verification [R]. [S.l.]: [s.n.], 2018.
- [61] HERKERT J, BORENSTEIN J, MILLER K. The Boeing 737 MAX: Lessons for engineering ethics[J]. *Science and Engineering Ethics*, 2020, 26: 2957-2974.
- [62] 程俊强, 杨菊平. 多余度飞控计算机通道故障逻辑技术研究[J]. *现代电子技术*, 2014, 37(1): 43-46.
CHENG Junqiang, YANG Juping. Research of channel fault logic technology for multi-redundancy flight control computer[J]. *Modern Electronics Technique*, 2014, 37(1): 43-46.
- [63] BEARD R V. Failure accomodation in linear systems through self-reorganization[D]. [S.l.]: MIT, 1971.
- [64] SWAN J, VIZZINI R. Analytical redundancy design for improved engine control reliability—Final review [R]. [S.l.]: [s.n.], 1988.
- [65] BROWN H, VIZZINI R W. Analytical redundancy technology for engine reliability improvement[J]. *SAE Transactions*, 1986(2): 973-983.
- [66] DELAAT J C, MERRILL W C. A real time micro-computer implementation of sensor failure detection for turbofan engines[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1990, 10(4): 29-37.
- [67] KOBAYASHI T, SIMON D L. Aircraft engine sensor/actuator/component fault diagnosis using a bank of Kalman filters[R]. [S.l.]: NTRS, 2003.
- [68] KOBAYASHI T, SIMON D L. Application of a bank of Kalman filters for aircraft engine fault diagnostics[R]. [S.l.]: NTRS, 2003.
- [69] KOBAYASHI T, SIMON D L. Evaluation of an enhanced bank of Kalman filters for in-flight aircraft engine sensor fault diagnostics[J]. *Journal Engineering for Gas Turbines Power*, 2005, 127(3): 497-504.
- [70] 张鹏, 黄金泉. 基于双重卡尔曼滤波器的发动机故障诊断[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(5): 952-956.
ZHANG Peng, HUANG Jinquan. Aeroengine fault diagnosis using dual Kalman filtering technique[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(5): 952-956.
- [71] 薛薇, 郭迎清. 航空发动机控制系统多传感器软故障检测研究[J]. *计算机测量与控制*, 2007(5): 585-586.
XUE Wei, GUO Yingqing. Multiple sensors soft failure diagnosis for aircraft engine control system[J]. *Computer Measurement & Control*, 2007(5): 585-586.
- [72] 姚华, 张天宏. 航空发动机控制系统设计技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- YAO Hua, ZHANG Tianhong. Control system design technology for aero-engine[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [73] KOBAYASHI T, SIMON D L. Hybrid neural-network genetic-algorithm technique for aircraft engine performance diagnostics[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2005, 21(4): 751-758.
- [74] 鲁峰, 黄金泉, 陈煜, 等. 基于SPSO-SVR的融合航空发动机传感器故障诊断[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(8): 1856-1865.
LU Feng, HUANG Jinquan, CHEN Yu, et al. Research on sensor fault diagnosis of aero-engine based on data fusion of SPSO-SVR[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(8): 1856-1865.
- [75] KOBAYASHI T, SIMON D L. Aircraft engine sensor/actuator/component fault diagnosis using a bank of Kalman filters[R]. [S.l.]: NTRS, 2003.
- [76] 蒋平国, 姚华, 孙健国. 航空发动机数控系统执行机构回路故障诊断和容错控制方法[J]. *航空动力学报*, 2005, 20(2): 282-286.
JIANG Pingguo, YAO Hua, SUN Jianguo. Method of fault diagnosis and fault-tolerant control for actuator loop in aeroengine digital control system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2005, 20(2): 282-286.
- [77] 陶文华, 叶志锋. 关系矩阵法在发动机执行机构故障检测中的应用[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(8): 1872-1877.
TAO Wenhua, YE Zhifeng. Failure detection of actuators of aero-engine control system by interaction matrix formulation[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(8): 1872-1877.
- [78] 季春生, 王元, 卢俊杰. 航空发动机控制系统执行机构参数在线估计方法[J]. *航空动力学报*, 2022, 39(8): 20220574.
JI Chunsheng, WANG Yuan, LU Junjie. Online estimation method for actuator parameters of aerospace engine control system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 39(8): 20220574.
- [79] NADERI E, KHORASANI K. Data-driven fault detection, isolation and estimation of aircraft gas turbine engine actuator and sensors[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 100: 415-438.
- [80] CHENG D, LIU L, YU Z. CNN-based intelligent fault-tolerant control design for turbofan engines with actuator faults[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 28122-28139.
- [81] 潘阳, 李秋红, 姜洁, 等. 航空发动机燃油系统执行机构故障诊断及验证[J]. *航空发动机*, 2016, 42(4): 30-35.
PAN Yang, LI QiuHong, JIANG Jie, et al. Fault diagnosis and validation for aeroengine fuel system actuator

- [J]. *Aeroengine*, 2016, 42(4): 30-35.
- [82] 姜洁,李秋红,张高钱,等.基于NN-ELM的航空发动机燃油系统执行机构故障诊断[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(2): 484-492.
JIANG Jie, LI QiuHong, ZHANG Gaoqian, et al. Fault diagnosis of actuator based on NN-ELM in aerospace engine fuel system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(2): 484-492.
- [83] 姜洁,李秋红,张高钱,等.航空发动机燃油系统执行机构及其传感器故障诊断[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(6): 1529-1536.
JIANG Jie, LI QiuHong, ZHANG Gaoqian, et al. Fault diagnosis for actuator and its sensor of aero-engine fuel system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(6): 1529-1536.
- [84] BAI J, FAN Z, SUN C. Consistence criterion for engine fault diagnosis decision[R]. [S.l.]: [s.n.], 2000.
- [85] BROTHERTON T, VOLPONI A, LUPPOLD R, et al. eSTORM: Enhanced self tuning on-board real-time engine model[R]. [S.l.]: [s.n.], 2003.
- [86] VOLPONI A, SIMON D L. Enhanced self tuning on-board real-time model (eSTORM) for aircraft engine performance health tracking[R]. [S.l.]: [s.n.], 2008.
- [87] SIMON D L. An integrated architecture for on-board aircraft engine performance trend monitoring and gas path fault diagnostics[R]. [S.l.]: [s.n.], 2010.
- [88] 黄金泉,王启航,鲁峰.航空发动机气路故障诊断研究现状与展望[J]. *南京航空航天大学学报*, 2020, 52(4): 507-522.
HUANG Jinquan, WANG Qihang, LU Feng. Research status and prospect of gas path fault diagnosis for aeroengine[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2020, 52(4): 507-522.
- [89] 李少尘,陈敏,胡金涛,等.航空燃气涡轮发动机气路故障诊断进展[J]. *航空发动机*, 2022, 48(2): 33-49.
LI Shaochen, CHEN Min, HU Jintao, et al. A review of research progress on aircraft gas turbine engines gas path fault diagnosis[J]. *Aeroengine*, 2022, 48(2): 33-49.
- [90] FRASER K F. An overview of health and usage monitoring systems (HUMS) for military helicopters[M]. [S.l.]: Department of Defence, Defence Science and Technology Organisation, 1994.
- [91] MILLER L, MCQUISTON B, FRENSTER J, et al. Rotorcraft health and usage monitoring systems—A literature survey[R]. Virginia, USA: US Department of Transportation, 1991.
- [92] 胡明辉,高金吉,江志农,等.航空发动机振动监测与故障诊断技术研究进展[J]. *航空学报*, 2024, 45(4): 7-35.
HU Minghui, GAO Jinji, JIANG Zhinong, et al. Research progress on vibration monitoring and fault diagnosis technology of aero-engine[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(4): 7-35.
- [93] 刘剑,任和.航空发动机滑油系统故障诊断技术研究进展[J]. *应用技术学报*, 2023, 23(4): 349-357.
LIU Jian, REN He. Research progress on fault diagnosis technology of aero-engine lubricating oil system[J]. *Journal of Technology*, 2023, 23(4): 349-357.
- [94] 王奕首,吴迪恒,朱凌,等.滑油磨粒在线传感技术研究进展[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(3): 73-83.
WANG Yishou, WU Diheng, ZHU Ling, et al. Research progress on online sensor technology of wear particles in aviation lubricating oil[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(3): 73-83.
- [95] 郑山红,武海军,李想有志,等.航空滑油磨粒在线监测技术研究进展[J]. *航空工程进展*, 2024, 15(3): 1-9.
ZHENG Shanhong, WU Haijun, LI Xiangyouzhi, et al. Research progress on online monitoring technology of wear particles in aviation lubricating oil[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2024, 15(3): 1-9.
- [96] 卫旭芳,刘彬.美军数字工程建设发展研究及启示[J]. *航空兵器*, 2023, 30(3): 56-66.
WEI Xufang, LIU Bin. Research on the development of US military digital engineering and its enlightenment[J]. *Aero Weaponry*, 2023, 30(3): 56-66.
- [97] PASAREANU C S, SCHUMANN J, MEHLITZ P, et al. Model based analysis and test generation for flight software[R]. [S.l.]: IEEE, 2009: 83-90.
- [98] KING W. Design times at honeywell cut by 60%[EB/OL]. https://ww2.mathworks.cn/company/user_stories/design-times-at-honeywell-cut-by-60.html?by=productml.
- [99] DAFHEY K. Simulation and modeling advances in the field of aero engines[R]. [S.l.]: [s.n.], 2013.
- [100] COOPER J, DE LA VEGA A, PAIGE R, et al. Model-based development of engine control systems: Experiences and lessons learnt[R]. [S.l.]: IEEE, 2021: 308-319.
- [101] 张杰,宋志刚.基于模型的软件开发技术在型号软件研制中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2008(15): 4152-4157.
ZHANG Jie, SONG Zhigang. Application of software developing technology based on SCADE model for missile-borne system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2008(15): 4152-4157.
- [102] 武方方.基于模型设计在机载安全关键领域中的应用[EB/OL]. (2018-05-22). <https://ww2.mathworks>.

- cn/videos/mbd-and-codegen-1532696293759.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_%25E6%25AD%25A6%25E6%2596%25B9%25E6%2596%25B9.
- WU Fangfang. Application of model-based design in airborne safety-critical fields [EB/OL]. (2018-05-22). https://ww2.mathworks.cn/videos/mbd-and-codegen-1532696293759.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_%25E6%25AD%25A6%25E6%2596%25B9%25E6%2596%25B9.
- [103] 崔凯, 缙林峰. 航空发动机控制系统仿真平台设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(10): 101-103.
- CUI Kai, GOU Linfeng. A performance simulation platform for aero-engine control system [J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(10): 101-103.
- [104] 高亚辉, 王松, 朱静, 等. 航空发动机FADEC系统数字原型构建技术 [J]. 航空动力, 2021(1): 60-62.
- GAO Yahui, WANG Song, ZHU Jing, et al. Digital prototype construction technology for FADEC system [J]. Aerospace Power, 2021(1): 60-62.
- [105] 高亚辉, 王松, 朱静, 等. 航空发动机FADEC系统控制与软件开发桌面原型技术研究 [J]. 航空动力控制, 2019, 25(3): 1-11.
- GAO Yahui, WANG Song, ZHU Jing, et al. Model-based control and software development of aero-engine FADEC system [J]. Journal of Aeroengine Control, 2019, 25(3): 1-11.
- [106] 周彰毅, 张春, 朱理化, 等. 基于SCADE的FADEC软件通用基准模型库开发 [J]. 航空发动机, 2022, 48(2): 96-101.
- ZHOU Zhangyi, ZHANG Chun, ZHU Lihua, et al. Development of standard model library for FADEC software based on SCADE [J]. Aeroengine, 2022, 48(2): 96-101.
- [107] 罗茂春. 基于FMI的航空发动机控制系统多学科联合仿真 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- LUO Maochun. FMI-based multi-domain simulation for aero-engine control systems [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [108] 卢波, 高亚辉, 姜成平, 等. 基于模型的FMEA分析方法研究 [J]. 航空动力, 2019(3): 1-3.
- LU Bo, GAO Yahui, JIANG Chengping, et al. Model-based FMEA analysis method research [J]. Aerospace Power, 2019(3): 1-3.
- [109] 余丹妮, 高亚辉, 朱静. FADEC系统多领域并行仿真关键技术研究 [J]. 航空动力控制, 2021, 27(4): 22-25.
- YU Danni, GAO Yahui, ZHU Jing. Research on key techniques of multi-domain parallel simulation of FADEC system [J]. Journal of Aeroengine Control, 2021, 27(4): 22-25.
- [110] 唐钰婷, 高亚辉, 吴斌. 基于模型的航空发动机控制系统安全性评估与分析 [J]. 航空动力控制, 2018, 24(4): 13-21.
- TANG Yuting, GAO Yahui, WU Bin. Model-based safety assessment and analysis for aero-engine control system [J]. Journal of Aeroengine Control, 2018, 24(4): 13-21.
- [111] 吴志琨, 李军, 时瑞军. 多电航空发动机研究现状及关键技术 [J]. 航空工程进展, 2012, 3(4): 463-467.
- WU Zhikun, LI Jun, SHI Ruijun. Current research status and key technologies of more-electric aeroengine [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3(4): 463-467.
- [112] 钱煜平, 张扬军. 航空混合电推进系统中的热管理问题分析 [J]. 航空动力, 2019(6): 1-5.
- QIAN Yuping, ZHANG Yangjun. Analysis of thermal management in aviation hybrid electric propulsion system [J]. Aerospace Power, 2019(6): 1-5.
- [113] LEI Y, ZHU N, YAO J, et al. Model architecture-oriented combat system effectiveness simulation based on MDE [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 28(5): 900-922.

(编辑: 夏道家)