

航空发动机控制系统发展概述

孙志岩

(中国航发控制系统研究所, 江苏 无锡 214063)

摘要: 介绍了航空发动机控制系统的组成和原理, 回顾了航空发动机控制的发展历程, 最后展望了航空发动机主动控制技术、分布式控制技术、多电/全电控制技术这三大关键技术的发展趋势。

关键词: 航空发动机; 控制系统; FADEC 系统

中图分类号: V233.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8829 (2019) 06-0001-04

doi: 10.19708/j.ckjs.2019.06.001

1 航空发动机控制系统组成和原理

1.1 航空发动机控制系统组成

发动机是飞机的重要系统, 除了发动机本体单元体之外, 还包括控制系统、传动系统及润滑系统等。其中控制系统是航空发动机的重要组成部分, 现代航空发动机基本都采用全权限数字电子控制 (FADEC) 系统。

FADEC 系统由感受航空发动机工作状态和环境信息的传感装置、对信息进行逻辑判断和控制运算的计算装置、把计算结果施加给航空发动机的控制装置, 以及在它们之间传递信息的机械、电缆和管路等组成。FADEC 系统一般可分为控制计算机子系统、燃油与作动子系统、传感器子系统、电气子系统等。图 1 为某

型发动机 FADEC 系统的组成图。

控制计算机子系统分为电子控制器和嵌入式软件两部分。数字电子控制器 (EEC) 是 FADEC 系统的核心部件, 它处理来自各种传感器和开关装置的信号, 经模/数转换为数字量, 由其内部机载的控制软件对输入数字量进行诊断、处理, 实现各种控制算法、控制逻辑的计算, 产生输出数字量, 再经过数/模转换成模拟信号, 经放大处理, 生成控制器输出驱动信号, 经电缆传输给相应的液压机械装置。燃油与作动子系统包括燃油子系统和伺服作动子系统。燃油子系统包括增压泵、主燃油泵、燃油计量装置、燃油滤、燃油管路、喷嘴等。伺服作动子系统包括伺服控制单元、伺服作动器及相应附件。传感器子系统包括控制用传感器和状态监视用传感器等。

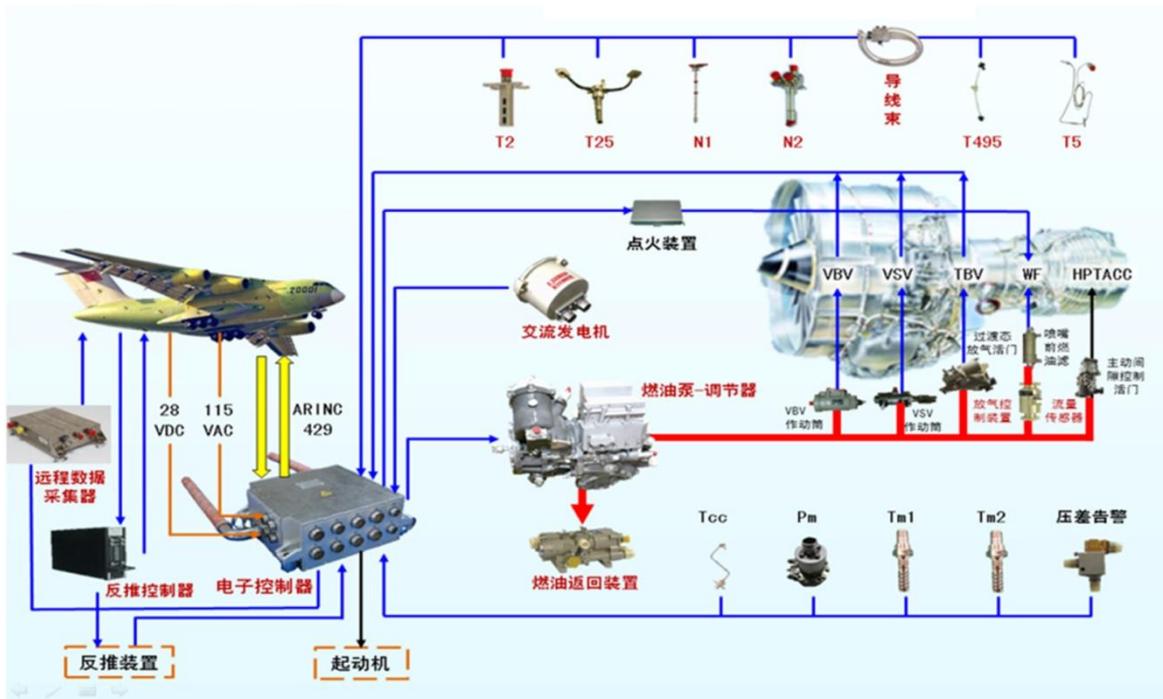


图 1 航空发动机全权限控制系统组成

1.2 航空发动机控制系统原理

FADEC 系统一般包括转速、压力、温度等多个控制回路，每个控制回路根据相应的输入闭环计算出控制输出，进而实现控制发动机状态的目的。

电子控制器根据发动机工作过程的转速、温度、压力等参数及外部条件（如飞行高度、速度，发动机进口温度、压力，驾驶员指令等）和控制系统内部某些参数（如温度、压力、位移等）的变化，通过控制律计算，产生控制信号，经过电子控制器输出处理电路，输出给液压机械装置，将电信号转换为液压信号，驱动相应作动器，以改变燃油流量、导叶角度、放气

开度等，进而达到控制发动机的目的。

飞机油箱来油经过低压泵增压后，进入主燃滑油散热器进行热交换。经主燃滑油散热器再回到燃油泵后通过主燃油滤进入高压泵再次进行增压。高压泵出口油分为两路：一路经自洗油滤和伺服燃油加热器后进入液压机机械装置（HMU）的伺服燃油系统，按照 EEC 指令控制燃油计量系统和作动部件；另一路进入液压机机械装置（HMU）的燃油计量系统，计量后的燃油经过燃油流量传感器和喷嘴油滤后进入喷嘴向燃烧室供油。

燃油系统原理框图如图 2 所示。

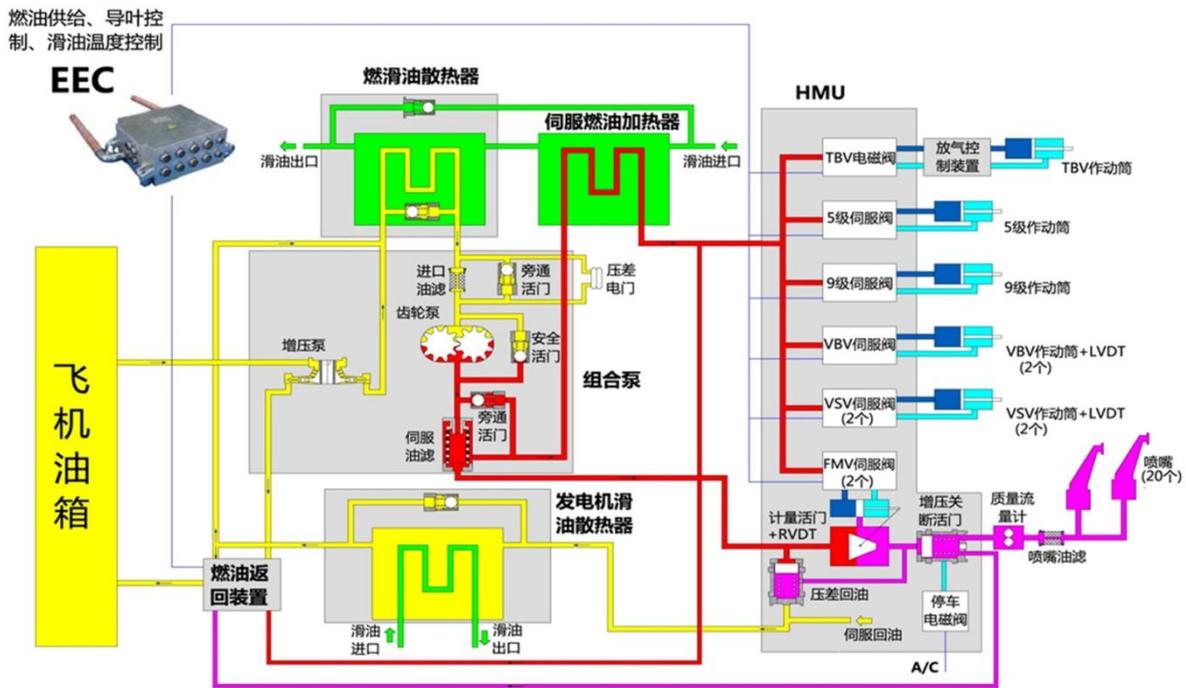


图 2 燃油系统原理框图

2 航空发动机控制的发展历程

航空发动机控制的发展历程大致可分为初始、成长、电子化、综合化等 4 个发展阶段，如图 3 所示。

发动机控制技术从 20 世纪 50 年代简单的液压机械控制，发展到现代的全权限数字电子控制技术，并向智能/分布式控制方向发展。

2.1 液压机械控制

早期的航空发动机仅有一个燃油流量作为控制变量。由于其推力不大，飞机的飞行速度不高，航空发动机采用液压机械式开环控制技术。飞行员根据飞行高度和速度要求，手动操作油门位置，直接驱动燃油计量阀，调节燃油流量，控制发动机的转速在一定范围内保持不变，使发动机产生所需要的推力，以控制飞机的飞行速度和飞行稳定性。液压机械式开环控制的特点是系统结构简单，较容易实现，缺点是控制系统的控制精度不高，适用于中低空使用的航空发动机控制。

2.2 液压机械+电子控制

发动机性能不断提升及其控制系统功能不断扩



图 3 航空发动机控制技术发展历程

展, 液压机械式控制技术逐步发展到了极限, 复杂的液压机械式控制系统在发动机最大工作状态时使用, 给飞行员带来越来越多的约束。迫切需要一个装置来监视发动机的工作, 控制发动机在最大工作状态时安全可靠地工作。20 世纪 70 年代, 人们设计出模拟或数字式电子控制装置, 用于发动机飞行包线内转速和温度的保护, 并具有对发动机状态的监视功能, 如 PW F100 发动机的数字电子式发动机控制装置, GE F101 发动机的模拟电子式推力增强器风扇温度控制装置、A П -31Φ 发动机的综合电子调节器等。

2.3 全权限数字电子控制

20 世纪 70 年代, 美国制定了全权限数字电子控制技术研究计划。在 PW F100 发动机监控用的数字电子式发动机控制装置基础上, 用数字电路和软件实现液压机械装置的全功能控制。经过系统实时仿真分析、发动机地面和高空台试车验证, 于 1981 年安装在 F-15 飞机上进行首次试飞, 1983 年完成了飞行验证计划, 在发动机全部控制范围内验证了全权限数字电子控制技术取代机械液压式控制技术的可行性, 验证了全权限数字电子控制技术相对于液压机械式控制技术的优越性。相对液压机械式控制系统, 全权限数字电子控制系统可以使飞行员无约束的操作, 并提供自我保护装置, 即电子控制器计算出所有控制发动机状态和发动机运行极限、无油门手柄死区、最大功率状态下产生的最大牵引力, 自动调节推力, 并通过一个可调节放气带实现快速无喘振加速。

到了 20 世纪 90 年代, 双通道 FADEC 系统已经成为航空发动机的标准控制系统, FADEC 系统已经成为新研航空发动机的典型特征。

2.4 智能分布式控制

20 世纪 90 年代, 全权限数字电子控制的强大功能促进了智能分布式控制技术的发展, 仿真分析和样件试验表明, 相对于集中式控制系统, 分布式控制系统具有提高系统可靠性、维修性, 减轻系统重量, 降低全寿命期内成本等优点。但智能分布式控制系统要投入工程应用还需要解决各种难题, 如高温电子元器件开发和大功率伺服电机小型化等技术难题。智能控制是将人工智能引入发动机控制, 能实现智能故障诊断和发动机健康管理。发动机智能控制技术已在基于模型的直接力控制、自修复控制和损伤自适应修复控制、延寿控制、自主推进控制等多方面开展研究, 并取得了一定技术成果。

3 航空发动机控制的发展趋势

随着飞机性能的提高, 对现代航空发动机的性

能要求也越来越高。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, 航空发动机将设计的更加复杂, 可调的部件越来越多, 发动机的控制变量在不断增加, 从当前的 10~12 个增加到 20 多个。

图 4 反映了发动机控制系统控制变量逐年增加的情况。控制变量的增加使得控制回路的耦合性更强, 经典控制理论已无法适应发动机高性能的控制要求, 必须采用新的控制理论和控制方法以适应发动机性能发展的要求。

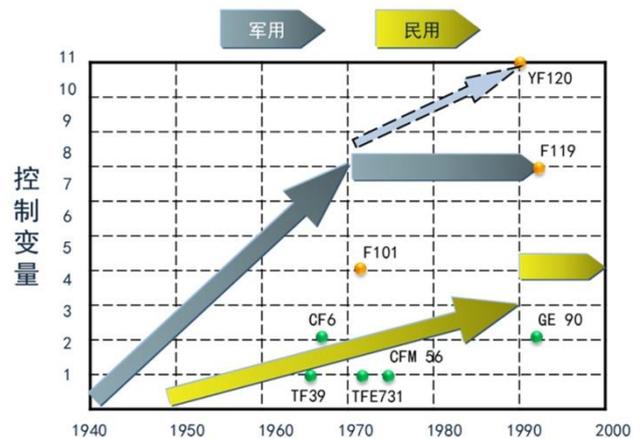


图 4 发动机控制变量的变化

3.1 主动控制技术

航空发动机主动控制技术主要包含压气机主动稳定性控制、燃烧室主动燃烧控制以及涡轮主动间隙控制。主动控制技术可使高载荷的涡轮机械达到更高的推重比, 提高涵道比和部件效率, 减少耗油率, 进而提高发动机的性能、耐久性和生存性。主动控制技术还提供部件状态的诊断/监视信息, 避免了失效, 从而降低维修成本。

压气机的气动稳定裕度直接关联燃气涡轮发动机的稳定工作范围。主动稳定性控制可通过预先探测即将发生的喘振与失速, 在刚出现失速征兆时采取措施 (如在失速先兆发生的初期向流场中主动加入反相扰动或调整放气量、燃油流量和导叶角度等), 抑制失速现象的产生和发展, 从而达到控制失速的目的, 使压气机始终处在最佳的状态, 从而提高级压比和发动机的性能。

涡轮叶尖间隙对压气机效率、涡轮效率、发动机功率和油耗影响极大。叶尖间隙过大会使发动机的性能降低, 而间隙过小, 又很可能会引起叶尖与机匣的碰撞或摩擦, 严重危害发动机的安全, 甚至导致严重的事故。主动叶尖间隙控制技术的执行机构目前主要有: 主动热控制、主动机械和主动气 (气压) 控制。

主动燃烧控制已经成为提高燃烧室性能、降低排气污染的关键技术之一，通过快速改变燃烧的输入实现对燃烧行为的调节。其有更好的灵活性，可改善发动机的性能，提高燃烧的效率、降低耗油率和减少形状因子（出口平面温度剖面），同时可降低污染排放、扩大工作包线并减少燃烧室的体积。

3.2 分布式控制技术

目前的发动机控制系统都采用集中式 FADEC 结构。控制系统复杂性的增加导致 FADEC 的重量、外形尺寸都大大增加。未来控制系统将是高度分布式控制系统，它由 FADEC 和多个智能装置组成，中央处理器和各智能传感器、智能执行机构组成了一个局域网。中央处理器与智能传感器、智能执行机构之间通过数据总线进行通信，而不是集中式 FADEC 系统中的中央处理器与执行机构之间的点对点连接。采用分布式控制系统可以使控制器体积减少 50%，从而减轻重量并提高发动机的推重比，通过采用智能传感器和智能执行机构来提高传感器系统精度并获取更多系统信息，通过适应系统退化影响及故障隔离来增加系统可用性，通过功能模块化和标准化来创建发动机标准组件和通用测试平台，从而减少设计、生产、装配和试验成本，减少定期维修次数，从而达到备件减少、退化减弱和训练减少的效果，缩短发动机寿命周期费用。采用一系列功能组件、通用接口、系统实现与系统功能相分离的方法，减少发动机控制系统设计周期。

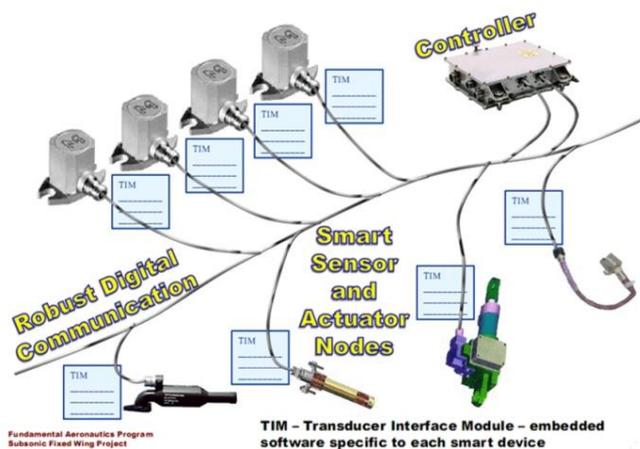


图5 分布式控制系统架构

3.3 多电/全电控制技术

FADEC 系统中的燃油与作动附件仍采用传统的机械液压方式，存在泵转速与发动机转速耦合、燃油与作动机构控制回路耦合、能量利用率低、耐高温能力差、抗污染能力差、全生命周期成本高等瓶颈，不能满足更高性能、更高可靠的发动机控制需求。随着

电力电子技术的飞速发展，多电发动机（MEE）及航空发动机多电控制系统（MEFADEC）技术概念的提出和研究，为上述问题提供了解决途径。

20 世纪 80 年代起，欧美国家相继投入巨大力量开展航空多电技术的研究和应用，涉及能量优化、发配电、电防冰、电刹车、电作动和多电发动机等多个技术领域。2002—2005 年，欧盟实施了电力优化飞机（POA）技术验证计划，以遛达 500 发动机为平台开展了多电航空发动机及其控制系统的研究和验证。近年来，日本 IHI、俄罗斯 CAMCI 等研究机构，希望通过开发新型控制系统改善燃油系统效率，利用高压电气化技术减小部件尺寸重量，重点在燃油与作动系统、电源系统和发动机控制系统方面开展研究，并在小推力发动机上进行了验证。

MEFADEC 是指采用电力驱动方式部分取代传统系统中的液压机械、气动等驱动方式，实现对发动机的综合控制，并对发电、配电、用电系统进行统一管理、集中控制，其主要特征在于以电的形式传递功率，电源功率的增加带来了新的挑战，未来需要重点突破大功率高功率密度电力作动机构，耐高温高效功率驱动控制器，高精度高响应伺服控制算法，高压电能的传输管理和电磁兼容，以及高温振动环境的适应性等关键技术。

4 结束语

航空发动机是航空业发展的重要标志，而控制系统又是航空发动机的关键所在。经过几十年的发展，航空发动机控制系统取得了很大的进步。国外航空强国已全面实现了全权限数字电子控制，国内部分发动机的控制系统也实现了全权限数字电子控制。未来，随着航空技术的发展，航空发动机控制系统也将变得越来越重要。

□



作者简介

孙志岩，研究员，毕业于南京航空航天大学发动机系自动控制专业，现任 614 所副所长兼总设计师。在多型航空发动机控制系统研发中做出突出贡献，获得国家科学技术进步奖特等奖 1 项，国防科学技术进步奖特等奖 1 项，一等奖 2 项、二等奖 2 项、三等奖 1 项，获得省部级一、二、三等奖 8 项，省部级二等功 3 项，航空报国金奖 3 项，航空报国突出贡献奖 1 项，航空报国优秀贡献奖 1 项等，并担任中国航空工业技术装备工程协会理事、中国航空学会发动机自动控制专业委员会委员。