

从自适应循环发动机看未来航空发动机控制技术发展

Prospect for Future Aero Engine Control Technology Development from Adaptive Cycle Engine

■ 王斌 肖翼 刘锋/中国航发研究院

航空发动机控制系统的发展是一个由单变量控制发展到多变量控制、由机械液压式控制发展到数字式电子控制、由独立控制发展到飞发综合控制、由集中式控制发展到分布式控制的过程。随着自适应循环发动机技术的发展与成熟，将有力促进新技术、新方法在航空发动机控制系统研制中的应用，一些先进控制技术将有所突破或取得阶段性成果。

由 GE公司全新研制的XA-100自适应循环发动机(ACE)于2018年6月完成核心机测试,2019年1月开展工程验证机装配工作,预计将于2020年年初进行飞行试验测试。正如美国空军研究实验室(AFRL)自适应通用发动机技术项目主管杰夫·史翠克所言,如果自适应循环发动机机验证机能研制成功,就如同由涡喷发动机到涡扇发动机的进步,具有里程碑意义。美国空军在下一代战斗机技术开发中已初步锁定自适应循环发动机作为动力装置,从而支持飞机在防区外远程起飞、超声速突防、能量优化以及高能武器使用。

航空发动机控制技术发展

从20世纪40年代喷气发动机诞生开始,发动机控制系统历经了70多年的发展历程,从最初的简单机械控制系统发展到目前可以实现综合控制的全权限数字式电子控制(FADEC)系统以及未来的分布式控制系统。

随着对航空发动机性能要求的不断提升,飞行包线的不断扩大以及对动力装置的适应性要求的提高,航空发动机增加了可调部件,直接导致控制变量个数的增长。军用航空发动机控制变量及传感器数量随发动机的换代发展呈现快速增加趋势,

表1 发动机控制变量及传感器数量发展趋势

发动机	测试年份	控制变量/个	传感器/个
I-A	1942	1	3
J47	1948	3	5
J79	1954	4	5
TF39	1966	2	6
CF6	1968	3	6
F100	1970	8	8
TFE731	1972	2	5
F101	1972	5	7
CFM56	1974	2	6
YF120	1989	11	11
F119	1990	8	10
GE90	1993	3	7
F135	2003	17	/

势,如表1所示,其中较为典型的是普惠公司的JSF 119发动机和GE公司的第三代VCE-YF120发动机。

普惠公司在JSF 119发动机(F135的前身)上装备了FADEC系统,其核心技术采用了多变量控制技术,并在短距起飞和垂直降落时实现了飞发一体化综合控制,具备部分变循环功能,并在2000年通过了飞行验证。GE公司的第三代VCE-YF120发动机,是带有对转涡轮的双外涵变循环发动机,其控制系统采用三余度多变量FADEC,是世界上第一型经飞行验证的变循环发动机,用作美国先进战术战斗机(ATF)的候选动力。

自适应循环发动机控制

具有经济可承受性的全天候、远程、多用途的飞机设计需求,给发动机设计提出了新的要求,除了具有更高的推重比外,还要求发动机既要有亚声速巡航所需的低油耗和良好的巡航效率,又要有跨声速加速以

及超声速冲刺所需的大推力。为了解决兼具低油耗、大推力以及隐身性能的难题，自适应循环发动机通过改变发动机一些部件的几何形状、尺寸或位置来改变其热力循环，例如，采用自适应风扇、第三涵道、可调机构等创新结构，通过调节涵道比和风扇压比等循环参数，使发动机性能在所有推力范围和包线内达到最优，显著降低多种任务模式下的综合油耗，通过第三涵道接收进气道非设计状态下的过量空气，提高气流利用率并减小溢流阻力，显著改善发动机热状态，从而使发动机在各种飞行条件和工作状态下具备良好的性能，有效地解决了高推力和低油耗之间的矛盾，能大幅增加作战飞机的续航时间和范围，同时还保持了超声速机动能力。

自适应循环发动机是在类似于YF120发动机的双外涵变循环发动机布局的基础上增加了一个外涵道，具有与第三外涵调节相组合的4种工作模式，具备多工作模式切换功能。由此带来的总体性能的提高和更加精密的总体结构，对发动机控

制系统提出了更高的要求，同时也提供了更多的调节方式的选择与优化空间。与常规循环涡扇发动机相比，自适应循环发动机调节变量越来越多，可调部位分布越来越广，主要可调特征发展到全机范围，对发动机高低压系统都具有较强的主动调节能力。发动机控制系统的复杂性成倍增加，控制系统不仅需要精准、快速、稳定的调节能力，还需具有一定的自主优化能力，以便在使用中发挥更大的性能潜力。带连接在转子叶片上的风扇（FLADE）系统的自适应循环发动机结构示意图如图1所示，主要可用控制量如表2所示。

自适应循环发动机控制技术发展前景

自适应循环发动机为航空发动机控制技术创新提供了发展机遇与验证平台，可以预见发动机多变量控制技术、飞发一体综合控制、基于模型的自适应控制、分布式控制与控制系统智能化技术等将获得突破或取得阶段性进展。

多变量控制技术

航空燃气涡轮发动机属于复杂、强非线性、多变量、时变对象，其特性随工作状态和飞行条件变化的范围较大。自适应循环发动机的多种工作模式是通过多个可调几何机构的综合调节来实现的，发动机性能的提升是以增加控制变量为代价，系统的耦合特性将变得更加明显，控制系统必须具备较好的鲁棒稳定性和较强的抗干扰能力。早在20世纪70年代，美国就首次在发动机控制器设计中采用了线性二次型调节器（LQR）多变量控制技术，在F100、T700、GE16发动机平台上开展了多变量鲁棒控制应用研究，在GE21、XTE46、斯贝等发动机平台上结合KQ方法、定量反馈理论（QFT）和线性矩阵不等式（LMI）方法进行了线性变参数（LPV）控制研究以及解耦控制研究。虽然现代控制理论

表2 带FLADE系统自适应循环发动机主要可用控制量

序号	可用控制量
1	前调节阀
2	中调节阀
3	后调节阀
4	前可调涵道引射器出口面积
5	后可调涵道引射器出口面积
6	FLADE进口导流叶片角度
7	风扇进口导流叶片角度
8	核心机驱动风扇进口导流叶片角度
9	压气机进口导流叶片角度
10	高压涡轮导向器面积
11	主燃油流量
12	加力燃油流量
13	主喷口喉道面积
14	主喷口出口面积

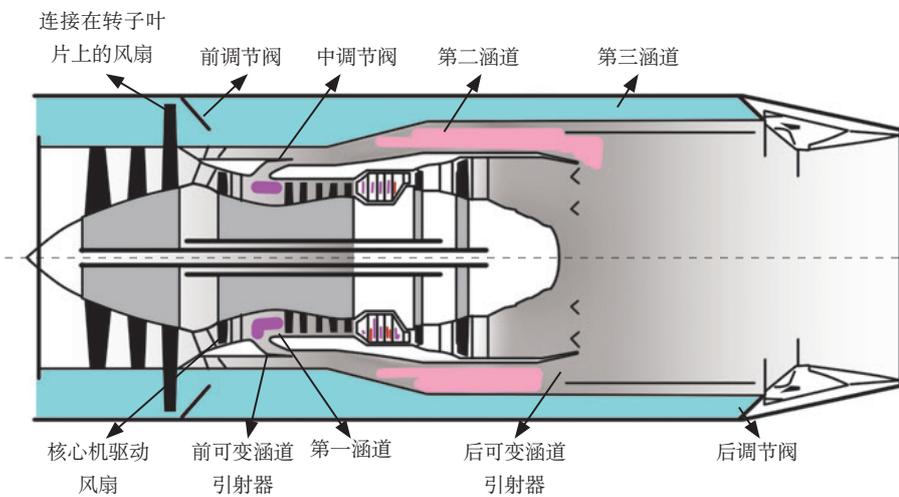


图1 带FLADE系统的自适应循环发动机结构示意图

可以在一定程度上解决回路之间的耦合问题，但其解耦程度往往不是最优，甚至在各回路之间还存在不可接受的耦合，发动机控制系统考虑解耦控制仍然是必需的。复杂系统整体性能是由各个子系统是否能协调配合决定的，对于自适应变循环发动机而言，只有各个部件协同工作才能发挥其性能优势，然而每个部件都存在着一些可调变量，部件的性能随着这些变量改变存在着最优的状态，因此需要对其进行多变量控制，才能发挥出整体的性能优势。针对控制变量增多，自适应变循环发动机在控制系统结构方面，需要确定合适的控制回路组成和先进的控制算法来确保整个控制系统的稳态和动态性能。目前，发动机用的多变量控制系统仍采用变参数比例积分 (PI) 控制，虽然 PI 参数可变适应飞行工况，但其根本还是经典的 PI 控制，还存在回路间的耦合、相互影响等问题。发动机控制上研究的较为成功的多变量控制方法主要有 LQR 控制、 H_{∞} 控制、 μ 综合、QFT 以及自适应控制等。此外，智能控制也被研究用于发动机多变量控制问题。

飞发一体综合控制

随着新一代飞机和发动机各种性能要求的不断提高，各子系统的复合程度和耦合作用大大加强，综合飞发系统控制技术取代传统的将各子系统控制独立分割的方法已成为一种必然趋势。综合飞发系统对飞机/发动机的全部状态量加以考虑，应用优化理论可以提供最佳或接近最佳的任务性能，可以安全操纵飞机接近飞行包线，并能提高系统的可靠性、维修性和灵活性，提高燃油的利用

效率，增加航程。F-22 飞机配装的 F119 发动机采用了 FADEC 系统，真正实现了飞发综合设计，该发动机的控制系统采用可靠性和冗余设计技术，与飞行管理系统实行高度综合控制，其控制参数多达 12 ~ 13 个，能对发动机及矢量喷管实行故障诊断和处理；飞机在不同的任务阶段，根据推进系统整体性能要求确定发动机的最佳工作参数和控制模式，使发动机性能得到最充分的发挥。自适应循环发动机可调部件更多，工作模式也更多，需要协调各部件共同工作，并与飞机一起实现在多种任务需求和多约束条件下发动机多目标（推力、耗油率、喘振裕度、流量匹配等）的多工作模式性能最优，ACE 技术发展必将促进飞发一体综合控制技术的成熟与应用。

基于模型的自适应控制

基于模型的自适应控制是在多变量控制技术和 FADEC 技术的基础上发展起来的。基于模型的自适应控制技术就是要挖掘现有发动机工作边界，识别发动机实际状态，通过发动机机载实时自适应模型预估

飞行中的发动机气动热力参数，在给定范围内实现发动机性能最优，同时能检测失效和实现信号替代。

GE 公司基于模型的自适应控制概念是基于物理特性高保真的实时模型，利用参数估计算法和跟踪滤波器，获取发动机部件健康状态和飞行状态，使控制逻辑能根据获取的信息，自适应调整发动机状态，提高发动机性能，降低发动机耗油率，如图 2 所示。自适应循环发动机通过结构上的改变，来实现发动机性能上的优化，需要通过控制系统的精准控制来实现并把因结构复杂带来的稳定性风险降至最低，通过采用基于模型的自适应控制是实现发动机性能最优的有效途径之一。

分布式控制

美国于 2006 年启动的“通用经济可承受涡轮发动机” (VAATE) 计划中，将分布式主动控制系统作为智能发动机的一个重要组成部分。GE 公司在 2009—2015 年，主要开展了分布式控制技术、主动控制技术及自适应控制技术研究。目前，GE 公司的发动机控制系统普遍采用集



图2 GE公司基于模型的自适应控制概念

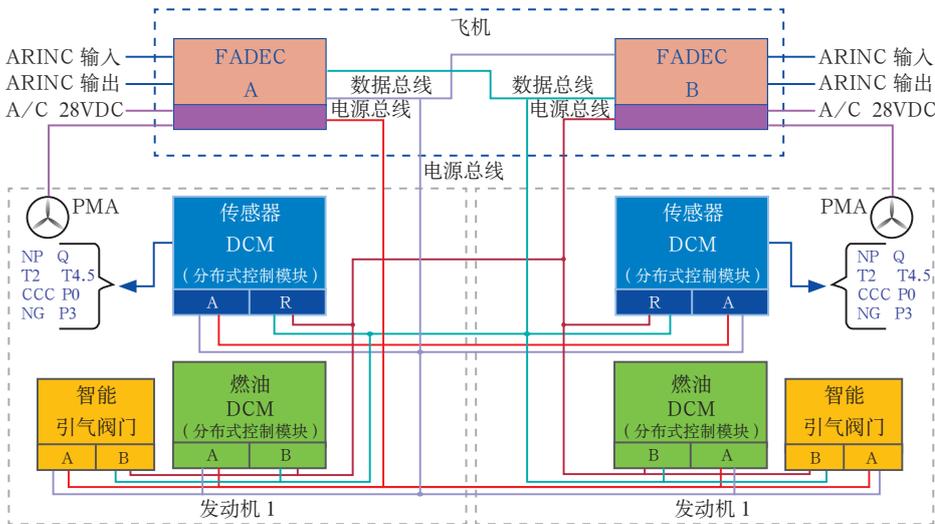


图3 GE公司分布式控制概念

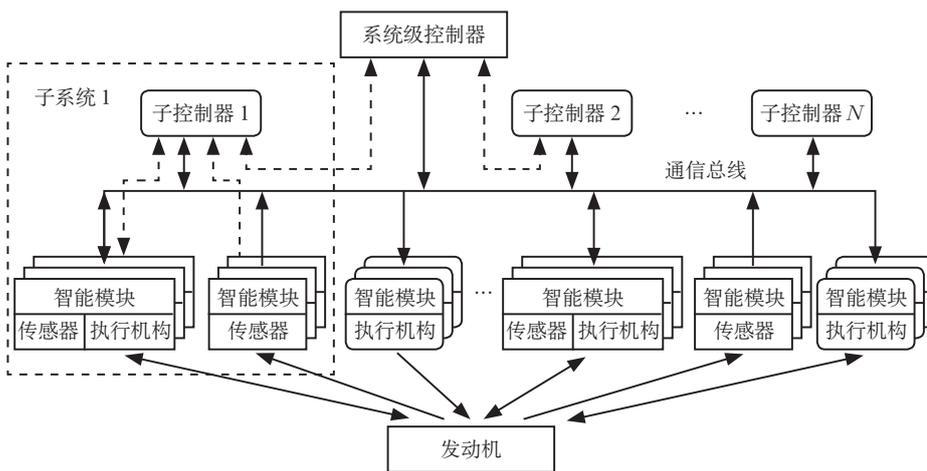


图4 部分分布式控制架构图

中式控制技术，未来将为减轻控制系统质量和提高适应性而研发分布式控制技术，如图3所示。其重点是实现分布式控制，包括弱化FADEC系统的监视功能，建立发动机局域网络（EAN）、分布式控制模块（DCMS），采用即插即用的智能部件、先进的通信策略，实现本地智能诊断等。发动机分布式控制系统在减轻控制系统的质量、提高可靠性和维修性、适应新平台与技术的变化等方面有着巨大的优势，采用分布

式控制技术是未来发动机控制技术发展趋势，也是自适应循环发动机发展的重要技术需求之一。分布式控制技术的目标是超越物理限制，实现耐高温电子器件技术、通用网络接口、硬件级模块化系统技术等，但目前受限于智能化控制模块、耐高温电子器件、新型通信结构等技术的发展，部分分布式控制技术如图4所示。

控制系统智能化技术

随着大数据时代的到来，人工

智能技术与产业发展的融合，人工智能技术获得突破的时代即将来临，先进武器系统研制逐步体现出人工智能的特征。新一代航空发动机多变量控制、分布式控制、主动控制、飞发一体综合控制、健康管理等技术需求，为人工智能技术的发展提供了根植的土壤，反之，智能化技术也将加快推动航空发动机技术进步。自适应循环发动机具有多控制模式与多调节变量的特征，发动机主动控制、协同控制、寻优控制、综合控制、自适应控制等，均需要新的燃油泵系统、先进电子硬件、新型执行机构、新型传感器等硬件系统，以及先进控制系统架构、智能自主控制规律与算法等。伴随着人工智能技术的发展与应用，自适应循环发动机控制系统的研制将有力促进发动机控制系统智能化进展，智能化技术将融入传统控制系统设计技术，真正展现自适应循环发动机的自适应特征与优异性能。

结束语

随着自适应循环发动机技术的发展与成熟，发动机控制系统向小型化、综合化、智能化、高性能、高可靠性方向的发展将会迈出坚实的步伐，采用分布式控制系统、新的燃油泵系统和先进电子硬件，提高FADEC系统硬件的可靠性，采用先进的控制模式、控制算法，并与其他机载系统（进气道控制系统、飞控系统、火控系统）相综合，将获得更好的系统性能，提高系统的使用寿命，降低系统的研制和使用成本。【航空动力】

（王斌，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机总体性能与控制技术研究）