

航空发动机加力燃烧技术发展

The Development of Afterburner Technology

夏姣辉 / 中国航发研究院

加力燃烧具有宽工况适应性,除用于常规军用涡扇发动机外,未来变循环发动机、常规起降高超声速动力系统、单级入轨系统、新一代超声速民航飞机动力等也可用加力燃烧技术作为突破循环切换“推力陷阱”的重要辅助手段。因此,在未来相当长的一段时间内,加力燃烧仍将作为航空发动机关键技术,发挥重要作用。

目前,常规主燃烧室受限于技术原理、材料性能和环保要求,已逐渐逼近设计极限,涡轮级间燃烧、超紧凑燃烧、定容燃烧等非常规燃烧技术尚未成熟,因而加力燃烧技术因其设计灵活性和应用的便捷性,在可预见的未来不但不会消亡,还可能会进一步发展。基于对上述趋势的清醒认识,各国的相关企业和科研机构在对常规加力燃烧技术进行创新优化的同时,也在各种新型加力燃烧技术上加大科研投入,力求在未来的竞争中占得先机。

常规加力燃烧技术的创新优化

在常规加力燃烧技术的创新优化方面,具有提高燃烧效率和降低耗油率作用的稳燃技术是各国重点研究的方向之一。

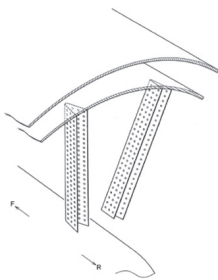
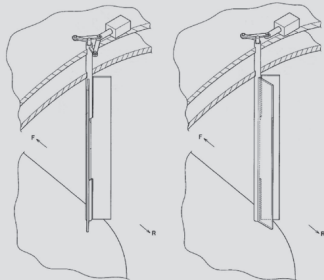
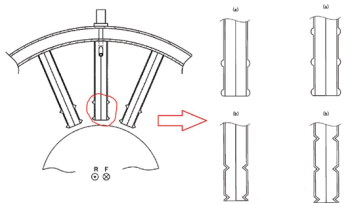
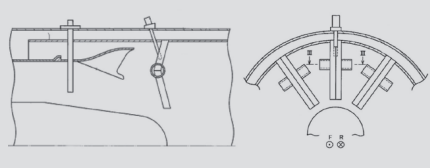
日本稳燃技术进展

在常规加力燃烧室稳燃技术方面,日本石川岛播磨重工(IHI)近年来开展了较多创新性研究,尤其在火焰稳定器新结构方面的研究工作较有参考价值,已公开的稳定器新结构见表1。

俄罗斯稳燃技术进展

在俄罗斯研制的一个V形槽稳

表1 IHI公司设计的不同类型火焰稳定器

结构特征	特点
	<ul style="list-style-type: none"> ● 既可用于环形也可用于径向稳定器 ● 钝体壁面开密布小孔 ● 减轻结构质量 ● 改善钝体下游燃油掺混性能 ● 回流区结构与无孔钝体基本一致 ● 改善冷却性能 ● 孔易堵塞 ● 需要陶瓷基复合材料(CMC)
	<ul style="list-style-type: none"> ● 用于径向稳定器 ● 可通过机械结构调节稳定器槽宽 ● 可在巡航状态将稳定器完全闭合 ● 可在工况恶化状态将稳定器槽宽开至最大 ● 大幅降低加力燃烧室稳定器流阻损失 ● 可根据发动机工况自适应调节稳定器 ● 极大改善点火性能 ● 结构十分复杂
	<ul style="list-style-type: none"> ● 用于径向稳定器 ● 利用稳定器两翼加细小翻边/内凹结构,改善径向稳定器远燃油喷嘴位置的周向联焰性能 ● 改善中心位置火焰温度场 ● 表面凸起或凹进易造成稳定器烧蚀、损坏
	<ul style="list-style-type: none"> ● 折叠V钝体与联焰管 ● 能够形成类似沙丘驻涡稳燃结构 ● 极大增强稳定器抗扰动能力 ● 拓宽稳定器吹熄边界 ● 有较大实用价值

定器与主燃烧室头部旋流器结合的加力燃烧方案中(如图1所示),研究人员在V形槽稳定器内部安装了一种

与常规主燃烧室头部旋流器类似的结构。根据推测,该结构的设计目的另一方面是改善燃油雾化掺混特性,从而

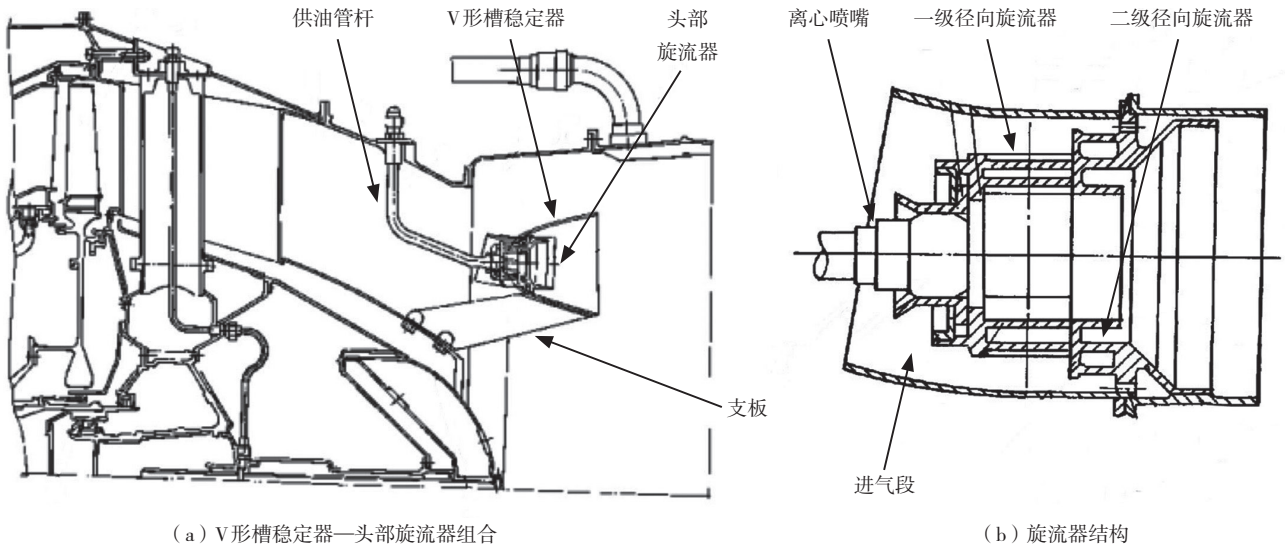


图1 V形槽稳定器—头部旋流器组合稳燃结构

改善加力燃烧室燃烧效率，提高加力燃烧温升；另一方面是为了降低加力燃烧状态下的耗油率，同时利用旋流器回流区与V形槽钝体绕流回流区耦合，强化加力燃烧的火焰稳定性，改善加力燃烧室内的燃烧振荡现象，拓宽火焰吹熄极限。

燃烧室中的横向射流本身是一种有效的燃料掺混与火焰稳定方式，且不需要任何机械结构，质量轻、

结构简单。但在加力燃烧室内实现横向射流点火与稳燃技术难度较大，这主要是因为射流穿深与射流轨迹难以控制，且下游流场十分复杂。针对这种情况，俄罗斯研制了一款内锥双孔射流稳燃加力燃烧方案（如图2所示）。在该方案中，通过优化的对置双孔在发动机内涵道尾锥处射流，两股射流将相互碰撞并混合，随后可在射流孔下游区域形成低速

回流区结构。利用横向射流，只需确保火焰能够可靠点燃、下游火焰能够较好扩散，因此这一方案理论上具有较低的流动损失和较高的加力燃烧效率。但需要注意的是，因为加力燃烧室内涵道压力较大，如射入的是燃油/空气混合气或单纯是空气，则需要对气流进行增压。

常规加力燃烧技术发展趋势

从IHI可控径向稳定器和俄罗斯的这几种可调节加力燃烧室设计方案可见，随着未来航空发动机控制裕度的提高，加力燃烧室有望向多模式、多余度、可调节、可控制方向发展。且从俄罗斯在加力燃烧室控制技术领域已公开的大量专利来看，俄罗斯已在加力燃烧控制技术方面做了较深的技术积累。但同时需注意到，可调节的火焰稳定器也必然伴随热端部件冷却问题，这是一个值得探讨研究的技术细节。现代涡扇发动机加力燃烧过程中，单位容积释热率增大，产生振荡燃烧倾向也趋于明显，尤其引入涡轮后框架一体化设计概念后，结构更

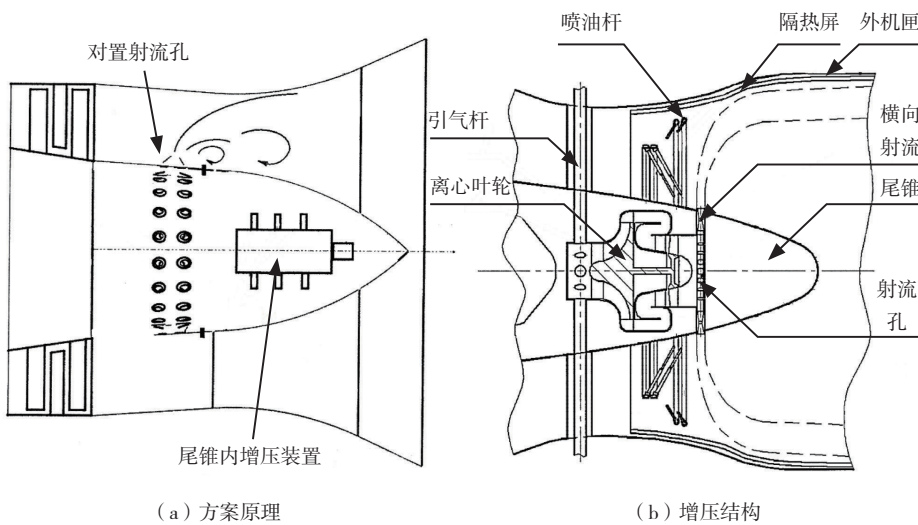


图2 内锥双孔射流稳燃加力燃烧室方案

紧凑、系统刚性更强，而选用的稳燃方式则越发简易，因此更容易出现燃烧振荡等不稳定现象，通过防振隔热屏、人工阻尼、调节脉动源等方式抑制或排除振荡燃烧的难度也随之加大。

在常规加力燃烧技术优化方面，日本较为重视稳燃器结构方面的创新，同时十分重视成熟技术的组合搭配，并因此在一体化加力燃烧室方面取得了成功；而俄罗斯工程师较为重视加力燃烧室多余度控制方面的创新研究，利用由简至繁的多种技术手段，实现了加力燃烧室在喷油与火焰稳定器层面的多重、多余度控制与调节。当然，在加力燃烧室日趋简化的宏观发展背景下，俄罗斯的技术尝试与“少即是多”的现代航空工业发展理念几乎背道而驰，其各项技术方案的应用前景其实并不明朗，但也不失为现阶段先进加力燃烧技术研究的有益参考。

新型加力燃烧技术

近十年来，各国公开了一部分新型加力燃烧原理及技术方案，主要包括：外涵道加力燃烧、爆炸加力燃烧、爆震加力燃烧、核能加力、涡流稳燃加力、电加力和等离子体助燃加力等。其中，外涵道加力技术、爆炸加力技术、爆震加力技术和核能加力技术本质上都属于20世纪50年代左右的技术概念在新技术条件下的“死灰复燃”，而涡流稳燃加力、电加力和等离子体加力技术则有一定的技术先进性。

外涵道加力燃烧技术

外涵道加力燃烧技术一般是指在发动机外涵道布置类似于主燃烧室的燃烧结构，以实现外涵道气流的

高效燃烧。当前，即便在现阶段的涡扇发动机低压压气机压比较高的情况下，外涵道压力对于高效燃烧而言仍然偏低，因此目前这方面技术多以方案为主，较少进入实用阶段。但是，随着变循环发动机技术的逐渐成熟，通过进气道多组激波增压后的外涵道气流已可达到主燃烧室一级的水平，且由于涵道通流随发动机循环状态发生变化，加力燃烧室在高超声速条件下将承担起主燃烧室的作用，因此外涵道加力燃烧技术研究重新具有了应用前景。

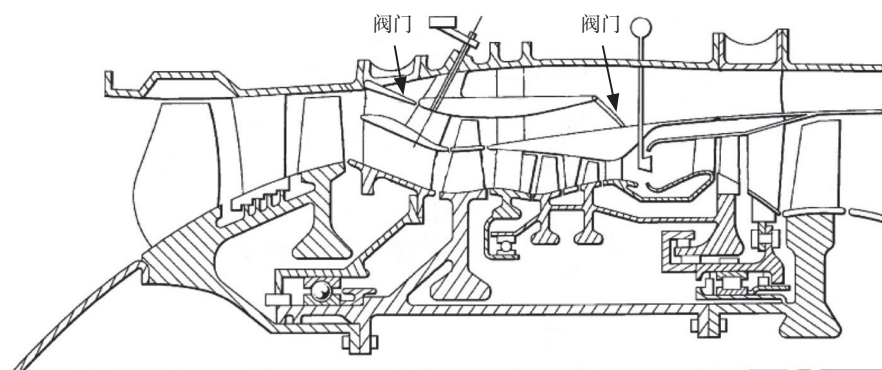
以GE航空集团公开的风扇增压外涵道加力燃烧室为例（如图3所示）。该方案在低压压气机、中压压气机和高压压气机的叶尖延伸布置了叶尖涡轮系统，在发动机常规加力燃烧室接通、飞行器超超声速飞行、

发动机达到常规最大推力状态下，通过进气阀调节内外涵道的流量，使外涵道气流达到一定的流量和压力。此时，在发动机低压压气机出口附近喷射一股燃料，可在中压压气机顶部外涵燃烧室附近点火燃烧，并驱动中压压气机、高压压气机叶顶涡轮输出功率，加速压气机旋转，从而进一步提升发动机高速下极限推力。

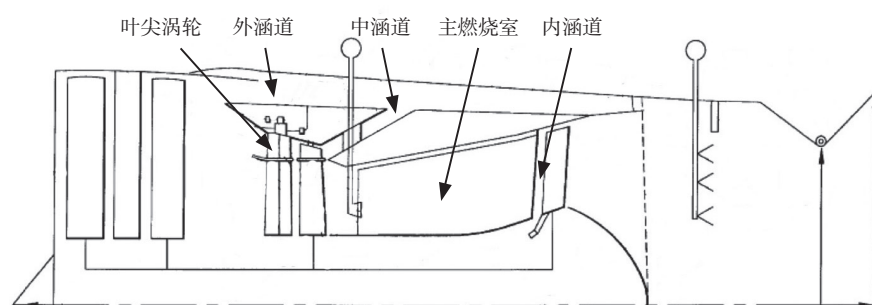
利用这一技术，理论上可让发动机跨越涡喷/涡扇发动机常规加力燃烧无法跨越的“推力陷阱”，使发动机加速到冲压模态，因此，这是一种循环过渡态加力燃烧技术。

爆炸加力燃烧技术和爆震加力技术

爆炸加力燃烧技术是指利用三硝基甲苯（TNT）炸药等爆炸形成的



(a) GE外涵道加力燃烧室结构



(b) GE外涵道加力燃烧室原理

图3 GE航空集团的外涵道加力燃烧室方案

冲击波，瞬间提升发动机推力。这种工作模式不用于载人飞行，但对于高速无人飞行器有十分明显的大加速度优势。这方面研究工作目前还处于起步阶段，可供参考的资料较少，俄罗斯研究的一种概念设计如图4所示。

爆震加力技术是指将定容燃烧、旋转爆震或脉冲爆震等装置应用于加力燃烧室内，从而实现爆震加力燃烧。这方面研究工作开展得较多，各类方案层出不穷，但尚未出现任何有工程价值的技术构型。

核能加力燃烧技术

核能加力燃烧技术看上去是一

种较为激进的概念，但早在20世纪50年代，美国、苏联的工程师就在这一领域开展了大量研究。近年来，由于可控核反应、可控核辐射技术的逐渐发展，核能加力燃烧室又被重新提出，如俄罗斯科学家目前提出的方案（如图5所示）。这一方案综合了布雷顿、郎肯循环和斯特林循环等多种循环方式，可利用核辐射能与核裂变能使飞行器超长时间巡航。目前俄罗斯科学家已对该方案原理与实现形式做了较为系统的研究、论证与分析，具备初步技术可行性。

等离子体助燃加力技术

进入21世纪后，电气技术的发

展速度远快于传统机械技术。可以预见，现代及未来航空发动机将越来越多地引入电力装置，以替代过去需要大量机械结构才能实现的功能。而在航空发动机燃烧技术层面，尤其是加力燃烧技术层面，最有应用前景的新技术就是等离子体助燃技术。

等离子体助燃本身并非新概念，但由于等离子体发生器结构过于复杂、沉重，将其应用于航空发动机可获得的收益不足以补偿其结构质量与复杂度带来的问题。但随着纳秒脉冲表面介质阻挡放电（SDBD）、准直流丝状放电、直流放电、等离子体—中性气体等技术方案的模块化、小型化甚至微型化，将其应用于航空发动机的流动微尺度控制与燃烧的强化已经成为了现实。其中最为典型的应用为GE航空集团正在开发的新型主燃烧室TAPS X，在其头部结构中引入了等离子体发生装置，用于改善燃烧室极贫油工况燃烧性能，并有望解决振荡燃烧不稳定问题。而加力燃烧室由于空间较大、可调整的结构较多，因而更适用等离子体流动控制与助燃技术。

结束语

上述创新加力燃烧方案或技术在原理上都是科学、可行的，但从工程实用角度看，均还需进一步论证或验证，尤其针对较有应用前景的等离子体助燃技术，还需开展大量的基础研究工作，以掌握其工作特性和助燃机理，以促进其尽快得到应用。

航空动力

（夏姣辉，中国航发研究院，工程师，主要从事低污染燃烧技术研究工作）

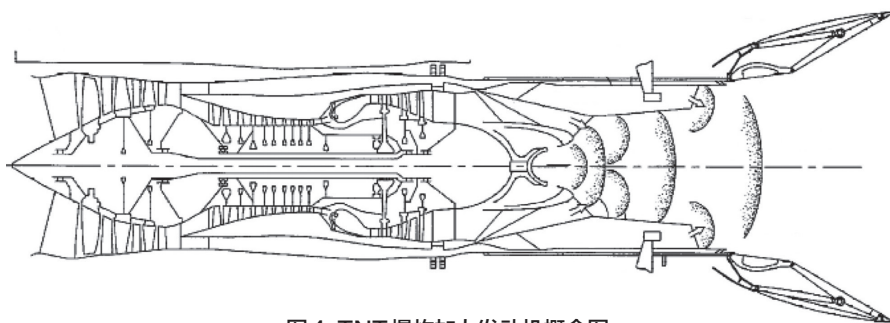


图4 TNT爆炸加力发动机概念图

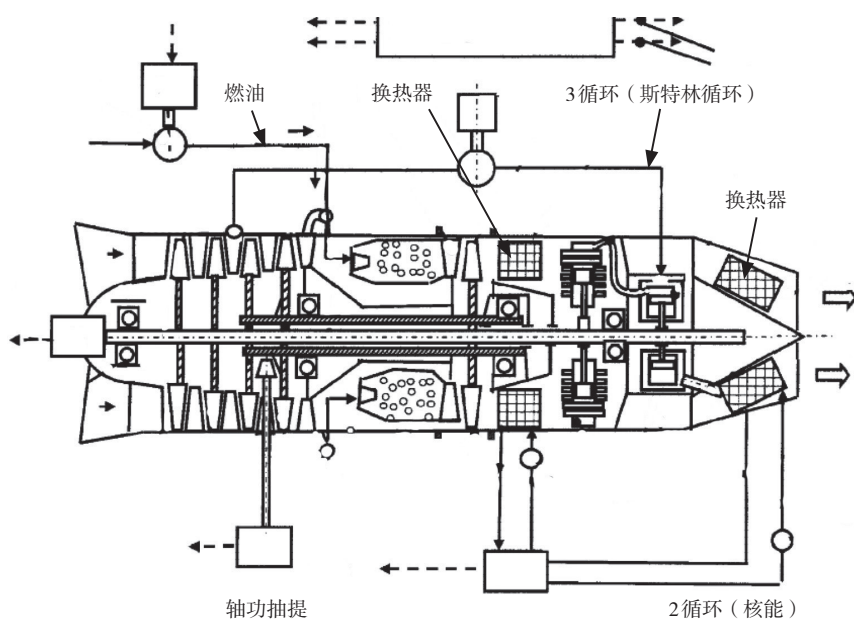


图5 俄罗斯核能燃烧室技术方案