



气动推力矢量控制技术 为未来航空动力发展注入新动能

Fluidic Thrust Vectoring : A Promising Technology for Future Aero Engine Development

■ 温泉 王士奇 / 中国航发研究院

气动推力矢量控制技术是在固定型面喷管上采用流动控制的方法实现主喷流的偏转，以达到推力矢量效果的控制技术。传统的机械推力矢量控制技术，通过转动喷管直接改变射流方向达到推力矢量效果，控制原理相对简单、控制规律线性、易实用化，但存在结构质量大、活动部件多、整体执行机构复杂等不足。气动推力矢量控制技术，则是通过主动流动控制手段，在其主喷管结构固定的条件下，通过二次控制流注入来实现主喷流的偏转，以此提供控制力和力矩，其优势在于结构简单、质量轻、制造成本低、射流偏转响应快、活动部件少，可满足无缝、光滑、连续外模线要求，具有减少雷达截面积（RCS）、增强隐身性能的潜力。

多年来，国内外研究人员相继提出了激波矢量控制、喉道偏移矢量控制、有源/无源双喉道矢量控制、有源/无源/振荡射流激励康达（Coanda）附壁矢量控制等多种不同的气动推力矢量控制技术路线，在验证可行性的基础上进行相应的优化设计。其中，双喉道矢量控制、

激波矢量控制、康达附壁矢量控制等技术路线在特定的应用领域均有不可替代的优势，但这些气动推力矢量控制技术依然存在控制线性度差、二次流消耗大、无法进行大范围喉道面积调节等多种问题。目前，气动推力矢量控制技术的应用研究还非常有限，技术成熟度层级还有很大的提升空间，为了加快气动推力矢量控制技术的工程应用，仍需要在如下几个方面加强攻关。

一是控制效率的提升。当前的气动推力矢量控制技术要走向应用需要在更宽广的喷管主流流速范围内，以低引气量实现高矢量偏转效益，开展矢量喷管与主/次射流流动的一体化优化设计，有望实现控制效率的进一步提升。

二是控制规律的探索和优化。外形优化可以用来解决气动推力矢量控制静态特性中的非线性和不稳定性问题。但飞行控制中推力矢量的实时动态响应规律仍有待进一步探索，如发动机对推力矢量系统瞬态操作的响应、外部流导致推力矢量系统变化的响应速率和流体附壁导致的迟滞效应等。

三是气动推力矢量控制技术的整机集成。如何建立一个气动推力矢量特有且完整的控制系统，并与整个飞行控制系统集成，是一个巨大的挑战，这其中涉及气动推力矢量控制与发动机整机匹配优化、飞行控制相结合迭代优化，而计算机智能优化算法、高精度实时环境感知技术与飞行控制技术的融合发展将有助于加快推进气动推力矢量控制技术的工程应用进程。

四是加快推进试飞验证。当前，由英国BAE系统公司牵头研发的“恶魔”（Demon）和“岩浆”（Magma）验证机已经分别于2010年和2018年进行了飞行测试，探索了整机集成的初步方案，验证了气动推力矢量控制技术对于增强无舵面飞行器控制能力的技术可行性。但是，这两架验证机仍是在低速平飞状态下对气动飞行控制系统的演示，复杂机动如短距起降、低速大迎角飞行、高亚声速飞行等状态下的控制特性仍有待进一步研究和试飞验证。 **航空动力**

（温泉，中国航发研究院党委书记，研究员，主要从事航空发动机研究）