

# 关于推力矢量控制技术的探讨

## Discussion on Thrust Vector Control Technologies

■ 贾东兵/中国航发动力所

战斗机推力矢量技术的提出始于20世纪70年代中期，很快得到业界的高度关注并被定义为第四代战斗机必备的四项关键技术之一。然而，近半个世纪过去了，切实应用了推力矢量技术并装备使用的只有美国的F-22战斗机。为什么这项备受重视的技术没有得到广泛的应用呢？

**推**力矢量控制(TVC)是一种依靠喷管直接变换推力方向以提供更强的控制力矩的技术，可极大地增强战斗机的作战效能和机动性。简言之，推力矢量技术就是用直接改变推力方向的办法获得驱使飞机转向的侧向力。推力矢量技术的出现使喷气式飞机——主要是战斗机，具有了前所未有的机动性，或者说更高的敏捷性，而且还获得了能够以更短的滑跑距离起飞的短距起飞能力，更进一步还可以减小甚至取消飞机气动舵，从而降低飞机气动阻力，减轻飞机质量。因此，推力矢量技术毫无疑问是一种先进的喷气战斗机控制技术。



F-22 装配的矩形二元矢量喷管



X-31 研究机装配的矢量偏流板



F-15 STOL/MTD 验证机装配的轴对称矢量喷管

形形色色的矢量尾喷管

### 推力矢量技术的必要性

对于现代战斗机是否需要应用推力矢量技术，一直是一个有争议的话题。基于前述那些明显可知的优点，极力赞成的自不必赘述，反对推力矢量技术应用的主要理由不外乎以下几个观点。

一是现代战斗机作战的主要手段是用射程至少以千米计的导弹进行远距离攻击，双方攻防甚至在超视距状态就已经完成，进入格斗的可能性极小，机动性、敏捷性对现

代战斗机来讲意义不大。

二是现有实施推力矢量技术的矢量喷管技术难度很高，与已经成熟应用的传统喷管相比，还带来了质量增加、效率降低、可靠性降低和寿命缩短等问题，应用该项技术的综合效益低，得不偿失。

三是过于敏捷的战斗机，使飞行员的操纵难度明显增加。激烈的机动过载很有可能超过人的抗过载能力，最终大大增加飞行中操纵失误的概率，降低作战效能。

这些顾虑都是有一定道理的，但却未免有所偏颇。

现代战斗机的主战武器虽然是导弹，但几乎都同时配置航炮，就是为了在导弹对攻无效时可以进入格斗。对于现代强调隐身能力并配备多种导弹干扰手段的现代战斗机来讲，在技术水平相当、数量相当的第一波导弹对攻中生存下来的概率并不会很低，以现代战斗机的速度，躲过第一波导弹，基本上就进入了格斗距离，那么格斗将不可避免。

二是矢量喷管技术难度很高，与已经成熟应用的传统喷管相比，还带来了可观的增重、明显的效率降低、可靠性降低和寿命缩短等问题，这确实是客观存在的。其中，因功能增加所带来的质量增加和效率降低是科学的必然，可以靠采用先进的轻质材料、更先进的结构设计、流路造型优化等方法使其降低到可以接受的程度；至于技术难度以及可靠性寿命问题反倒是不存在的问题。什么是技术？技术的原始概念就是熟练，技术难度高其实就是不熟练，经过有限的“设计—验证—完善—再验证”的循环，技术成熟度必然步步提升，最终成为成熟技术，然后所谓技术难度高以及相应带来的可靠性低、寿命短的问题自然会得到解决。

操纵难的问题则更好解决。现代的机载控制器的计算能力日益强大，能够实现非常好的主动控制，辅助飞行员进行更好地操纵并保证飞行过载在安全范围内，良好的飞行控制逻辑可以将飞行员的机动意图以更优化的方式分配给舵面和矢量喷管，使飞行员更加自如地飞行。

此外，无人作战飞机已经逐步进入未来主战飞机的序列，配备推力矢量技术的无人作战飞机摆脱了飞行员生理局限，将有更多的战术动作出现，大大增强战斗效率和作战效能。

总之，为现代战斗机配备推力矢量技术的必要性是毋庸置疑的。

## 推力矢量控制的关键技术

矢量喷管是推力矢量控制技术的执行装置，是技术难度最大的关键技术之一。

矢量喷管的技术难度不仅在于

其运动机构需要精细巧妙的设计（以有限的外廓和内部气流通道限制下实现通道尺寸调节和方向变换这样的复杂功能），还在于这样复杂的运动机构要在喷气发动机排出的高温燃气流的冲刷下可靠工作。喷气发动机不仅排气温度高，高工作状态下的振动也是极大的。强大的振动导致高强度的动载荷，对机械产生破坏作用，严重影响机械的寿命和稳定工作的能力，而运动机构的运动副对振动尤其敏感。可想而知，在不可避免的高温和振动环境下工作的矢量喷管的设计是对设计人员的极大挑战。

## 矢量喷管的技术方案

矢量喷管的技术方案有很多种都经过发动机台架上的整机试车验证和科研性质的飞行演示验证试飞，但确实是在装备上应用形成战斗力的，目前仅有美国第四代（美国称五代）战斗机F-22的F119发动机的二维矢量喷管。此外，除了俄罗斯配装轴对称矢量喷管的苏式系列战斗机少量出售给印度（据说寿命很短，性能不可靠），其余的技术方案基本上没有装备服役。此外，至少还有3~5种特点各异的新型矢量喷管在探索研究中。这些不同类型的矢量喷管有截面是圆的（轴对称型）、有截面是方的（二维型）、有扩张段偏转的、有整个喷管偏转的等，到底哪一种是最好的？其实很难给出一

个唯一确定的答案。

### 矢量喷管的主要技术指标

矢量喷管的标志性参数是最大偏转角度，这个角度大体在 $14^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ，最大的为 $23.5^{\circ}$ ，这个设计参数到底应该是多少，也一直存有争议。

假设实施推力矢量时，发动机状态不变（这是基本能够得到保证的），矢量喷管的推进效率也不变（实际上会有 $1\% \sim 2\%$ 的损失），理论上推力方向变化后的分力是：

前向推力=发动机推力  $\times \cos$ （偏转角度）；

侧向力=发动机推力  $\times \sin$ （偏转角度）。

按照这个公式，矢量偏转角度和前向推力损失之间的关系可见表1。

由表1可知，偏转角度为 $20^{\circ}$ 时会产生6%的前向推力损失，已经需要审慎考虑得失了， $25^{\circ}$ 损失接近10%，基本上是不可接受的。除此之外，角度增大，则载荷增大，就意味着需要增加结构承载面积，增重不可避免。所有这些不利因素均须飞机和发动机总体进行综合平衡，无论如何，单纯地提出较大的偏转角度要求是不合适的。

### 矢量喷管技术方案的分析比较

在常见的几种矢量喷管技术方案中，美式的二维矢量喷管的运动机构本质上是平面运动机构，可动构件数量很少，运动机构设计难度相对简单，因而较为可靠，冷却系统、密封系统的构造以及为隐身而进行

表1 矢量偏角与前向推力损失的关系

偏转角度/( $^{\circ}$ )	5	10	15	20	25
侧向力/发动机推力	0.09	0.17	0.26	0.34	0.42
前向推力损失/%	0.38	1.52	3.41	6.03	9.37

的形状修整均比较容易实施。然而，为保持方形截面在压力作用下不发生大的变形而进行的刚度设计难度比较大，加之周长增加使结构质量明显增加，形状由圆转方以及浸润面积的增加使流动损失加大，整体效率是偏低的。

俄式俯仰矢量喷管是将整个喷管安装在一个空心的球形关节上。喷管本体是与其原型喷管一样的圆截面可调收扩喷管，通过球关节的摆动实现推力方向的改变。由于没有由圆转方产生的额外流动损失，故而推进效率比较高，通过球心的气流偏转效率几乎达到100%；且偏转产生的不平衡力直接通过球心，对驱动不产生直接的载荷，总的驱动功率需求较低。但是，空心球关节的尺寸非常大，带来了两个明显的缺点：一是喷管运动部分非常长，破坏了原有飞机后机身的完整性，给飞机后机身的设计带来了额外的难度；二是空心球关节的双层结构增加了很多质量，即使相对二维矢量喷管也没有多少质量上的优势。

轴对称矢量喷管专指截面为圆形、扩张段偏转的矢量喷管。这种矢量喷管的推进效率与标准的收扩喷管相当，效率高，运动部分尺度小，对飞机后机身的影响几乎可以忽略。采用这种方案可以设计出与标准收扩喷管外部轮廓相当的矢量喷管，与原配喷管原位换装，使既有机型拥有推力矢量技术，迅速提升战斗力，因而曾受到业界广泛的关注，各国相关机构纷纷投入相当多的力量对其进行研究。这类矢量喷管大同小异的技术方案最多，各国加起来差不多有五六种。然而，这类矢量喷管同样有明显的缺点，即

表2 几种典型的矢量喷管特点对比

类型	二维矢量喷管	轴对称矢量喷管	俯仰矢量喷管	球面收敛二维矢量喷管	固定几何气动矢量喷管
运动机构	平面运动	空间多自由度复式连杆	球关节	球关节+平面运动	无
运动构件数量	10+	300 ~ 500	300	20+	无
外部轮廓	大	小	较小	较大	小
质量	大	小	较小	较小	小
推力效率	较低	高	较高	较低	低
偏转效率	较低	较低	高	高	低

运动部分是一套空间多自由度复式连杆机构：运动构件少则200 ~ 300个、多则400 ~ 500个；运动副数量在400个左右，运动关系复杂。其设计难度让多数人望而却步，特别是可靠性设计难度极高，实现较长寿命的难度极大。

球面收敛二维矢量喷管气动性能相对较好，偏转效率近乎100%；且偏转力通过球心，驱动系统功率需求较小；由球形过渡到方形，长度较短，增重较少。但其球形动壳体是一种边缘受多个集中载荷的非完整薄壁体，受力情况与结构形状极端不和谐，强度刚度设计难度极大，很容易抵消质量增加较少的优势。

固定几何气动矢量喷管，顾名思义就是在结构固定的喷管上用射流/引气的方式对喷管的气动流通面积和喷流方向实施调控。因为没有运动构件，这种方案被认为可能有减少60% ~ 70%质量的潜力，并具有非常好的可靠性和寿命预期值。但是，很少有人提及如何对这种喷管进行控制，无论是射流还是引气，都需要布置控制流的气流通道，要进行有效的控制则在气流通道里布

置控制所需的控制阀，所有这些装置都要消耗前述质量减轻的潜力和可靠性，更不用说需要进行面积控制时所需的大量的控制流量以及非常低的推进效率。所以固定几何气动矢量喷管是否如想象的那样具有如此之好的优势，是一个值得探讨的问题。

总之，不同的矢量喷管有其不同的特点（见表2），关于哪一种矢量喷管是优选方案的争论会一直存在，永远没有唯一答案。选择什么样的矢量喷管实施方案更主要还是在飞机的任务需求。

### 结束语

总而言之，推力矢量技术对于喷气战斗机来讲是一项具有很多诱人之处的高新技术，但是否采用该项技术应在任务需求和实施代价之间进行平衡。矢量喷管的实施方案和最大偏转角度则应以飞发一体化设计角度进行综合平衡后方可选择和确定。

航空动力

（贾东兵，中国航发动力所，研究员，主要从事排气系统部件研发和相关技术研究。）