

# 直升机旋翼与进排气系统内外流耦合流场特性数值仿真研究

## Numerical Simulation Study on the Characteristics of Internal and External Flow Coupling Field of Helicopter Rotors and Intake / Exhaust Systems

■ 葛严 黄兴 曾强 / 中国航发动研所

在装机运行时，涡轴发动机进排气系统在由直升机诱导的上下游复杂气动环境中工作，对航空发动机开展直升机旋翼下洗流场数值模拟方法研究，分析复杂气动环境对发动机进排气装置所造成的影响，可为发动机的研制和直升机的设计提供参考。

直升机机体、旋翼系统、进气道、排气管、涡轴发动机之间的耦合干扰会直接影响涡轴发动机的装机功率乃至对工作稳定性造成显著影响<sup>[1-2]</sup>。涡轴发动机在装机运行时，不同工况下直升机的飞行来流与旋翼下洗流相叠加，使其进排气系统形成复杂的上下游条件，在部分状态下发动机还存在吸入旋翼脱离涡的风险。直升机进气道所产生的总压损失、出口流场畸变和粒子浓度场分布将直接叠加在粒子分离器的进口，而发生在直升机排气管内的总压损失也将降低发动机排气动能的利用效率，使自由涡轮后的静压增高<sup>[3]</sup>。有研究指出，压气机进口总压每下降1%，发动机的最大连续功率将损失1.5%~2%；而自由涡轮出口总压每下降1%，发动机的最大连续功率将损失0.5%~1%<sup>[4]</sup>。据赛峰直升机发动机公司的分析，如果发动机与直升机平台不能匹配设计，将导致10%的功率损失，其中进气道总压损失、排气管总压损失所占的



图1 侧向排气的直升机平台

比例分别为5.7%和2.5%<sup>[5-7]</sup>。涡轴发动机进气系统的设计作为产品研发体系流程框架的重要组成部分，对其一体化耦合流场的分析可用于指导涡轴发动机进排气系统产品的研制。因此，有必要对直升机旋翼与进排气系统内外流耦合流场特性进行数值仿真研究，分析一体化耦合流场环境下进排气系统的气动性能。

### 物理模型

对于侧向排气的直升机（见图1），发动机容易存在吸入排气尾气的风险。本文构建的直升机旋翼进排气系统的一体化模型如图2所示，其中旋翼系统的相关参数如表1所示。

### 数值方法

为了保证计算精度和计算速度，整个计算域采用非结构网格，在网格

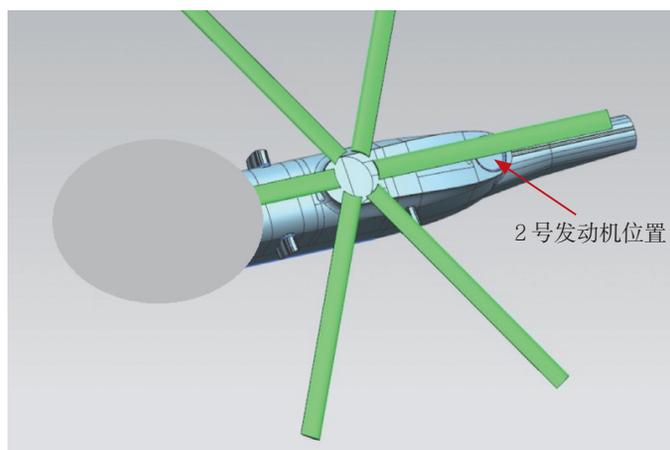
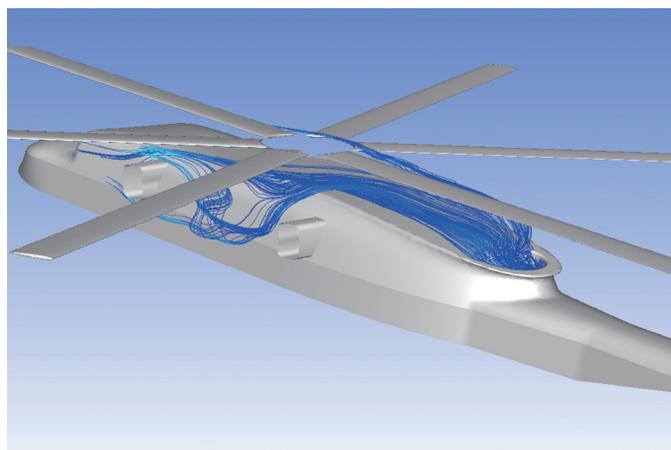


图2 直升机旋翼下洗流的速度分布

图3 2号发动机进口截面周围的流线（侧滑角为 $-20^\circ$ ）

生成时对局部区域进行了网格加密，加密后整体网格数约为3800万个。同时，为了准确模拟流道壁面处边界层的流动，通过给定内壁面处合理的第一层网格高度以保证内壁面处的 $y^+$ 值。数值仿真所采用的计算软件为商业计算流体力学（CFD）软件Fluent，采用多重参考系模型（MRF）。MRF是一种稳态计算模型，能够模拟固定旋翼流场，基于的假设是包含旋翼与直升机机体的相互作用比较微弱，且认为动区域和静区域之间的交界面上流动几乎均匀混合，因此可作为进排气系统与直

升机耦合流场稳态气动性能参数的预估方法。多重参考系模型的流场控制方程在每个子域内进行求解，在子域的交界面上通过将速度换算成绝对速度的形式进行各子域流场信息的交换。如果交界面上的网格是正则的，即交界面两侧区域中在交界面上共用相同的网格节点，网格划分方法与常规方法一样。如果交界面上的网格是非正则的，即交界面两侧区域网格不一样，而且交界面是重合的两个面，分别属于不同的区域，这时交界面上的信息通过插值相互传递。按照参考文献<sup>[8]</sup>

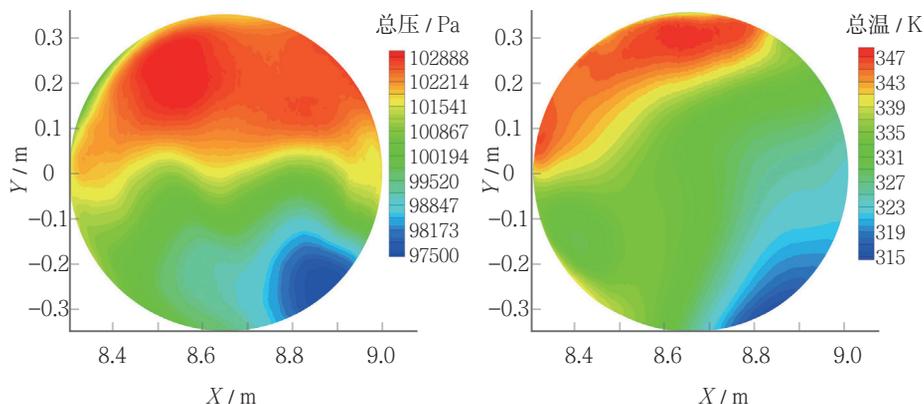
中经过试验数据校对的 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行数值仿真，计算的边界条件有压力入口、压力出口及绝热无滑移壁面等。

## 结果分析

图3给出了在侧滑角为 $-20^\circ$ （整个飞机往1号发动机和2号发动机排气出口方向偏转）的情况下，2号发动机进气道入口处的流线。由于整个飞机的倾转，2号发动机进气道入口处会吸入1号发动机及自身排气装置所排出的气体，进而引发进气道入口截面总温的升高。

表1 旋翼系统的基本气动参数

参数	数值
旋翼半径/m	12.5
桨叶弦长/m	0.45
桨叶片数	6
旋翼翼型	NACA0012
旋翼转速/(r/min)	200
桨叶扭转角/ $(^\circ)$	0

图4 2号发动机进气道入口处的总温、总压的分布云图（侧滑角为 $-20^\circ$ ）

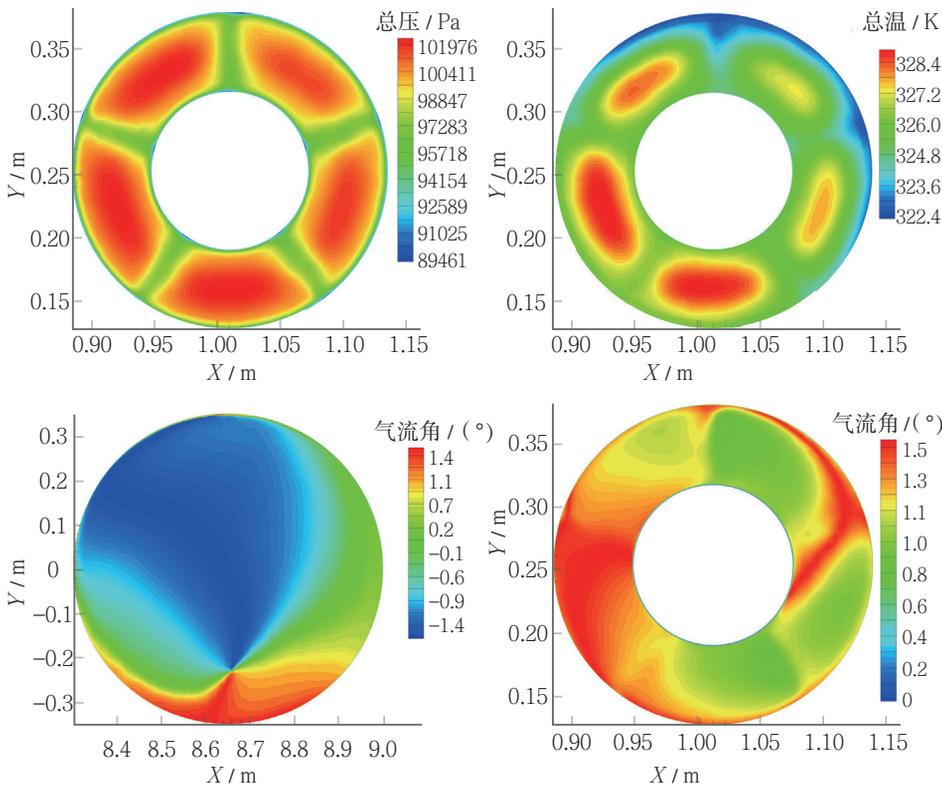


图5 流线、总温、总压及气流角分布云图（侧滑角为-20°）

图4给出了侧滑角为-20°，2号发动机进气道入口处的总温、总压的分布云图。从图中可以看出，受飞行来流与旋翼下洗流相叠加的影响，进气道入口截面的总压分布非常紊乱，同时由于整个飞机处于-20°侧滑状态且往1号发动机和2号发动机排气出口方向偏转，进气道吸入了1号发动机和2号发动机的排出的部分气体，进而引起了进气道进口截面总温上升。

图5给出了侧滑角为-20°，2号发动机压气机进口截面的总温和总压分布云图及进气道入口截面与压气机进口截面的气流角分布云图。从图中可以看出，受进气与附件传动机匣内部支板的整流作用，压气机进口截面的总压分布相比于进气道进口截面明显变得均匀，流场得到一定的改善。此外，由于气流在进气道内部的不断掺混，整个压气机进口截面的最高温度与最低温度之间的温差明显变小。因受飞行来流、机体自身的侧滑及旋翼下洗流相叠加的影响，2号发动机进气道进口处表现出极其复杂的流态，根据压气机进口截面的总温分布可以推测进气道进口截面处的气流并没有全部流入到进气道内，而是有一部分气流存在倒流现象。虽受到复杂流场的影响，进气道入口处并没有出现强旋流，整个气流的偏转角度在±1.4°之间。此外，由于进气与附件传动机匣内部支板的整流作用，气流流至压气机进口截面时已明显往一个方向偏转，不再出现进气道入口处的两个方向偏转的现象。

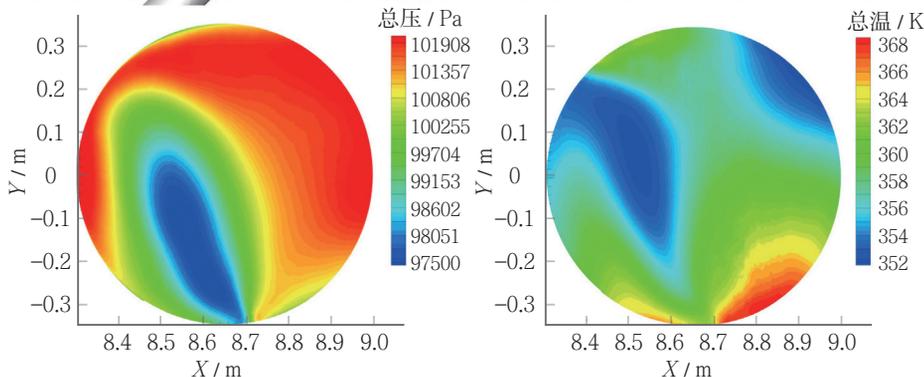
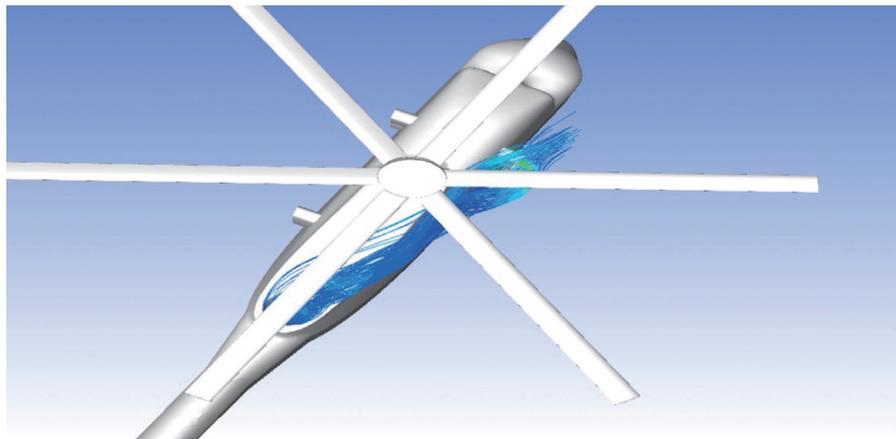


图6 流线、总温云图、总压云图（侧滑角为+20°）

图6给出了在侧滑角为+20°（整个飞机往3号发动机排气出口方向偏转）的情况下，2号发动机进气道入

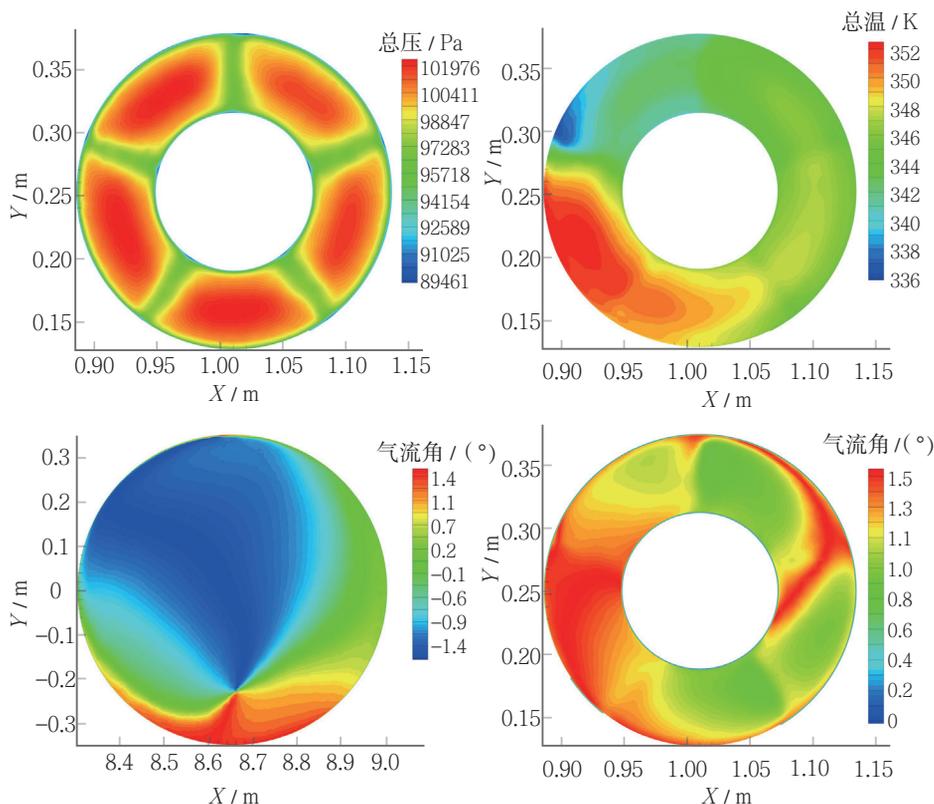


图7 总温云图、总压云图及气流角对比分布云图（侧滑角为 $+20^\circ$ ）

口处的流线、总温云图、总压云图。从图中可以看出，由于整个飞机的倾转，2号发动机进气道入口处会吸入3号发动机排气装置所排出的气体；由于吸入的排气量比较大，进而引发进气道入口截面总温大幅升高；受飞行来流与旋翼下洗流相叠加的影响，进气道入口截面的总压分布非常紊乱。

图7给出了2号发动机压气机进口截面的总温、总压及气流角对比分布云图，从图中可以看出，虽然进气与附件传动机匣内部支板存在一定的整流作用，但受飞机侧滑及整个飞机发动机安装布局的影响，在 $+20^\circ$ 侧滑条件下，压气机进口截面总压分布的均匀性明显要差于 $-20^\circ$ 侧滑条件下压气机进口截面的总压分布。此外，在 $+20^\circ$ 侧滑条件

下，2号发动机进气道进口处明显会吸入更多的排气，进而导致进气道入口截面总温升要大于 $-20^\circ$ 侧滑条件下进气道进口截面的总温升。虽然受飞行来流、机体自身的侧滑及旋翼下洗流相叠加复杂流场的影响，进气道入口处并没有出现强旋流的影响，整个气流的偏转角度在 $\pm 1.4^\circ$ 之间，并没有出现很强的气流偏转；此外，由于进气与附件传动机匣内部支板的整流作用，到压气机进口截面，气流已明显往一个方向偏转，不再出现进气道入口处两个方向偏转的现象。

## 结束语

对航空发动机配装的直升机旋翼下洗流场进行数值模拟的研究发现，在 $+20^\circ$ 侧滑条件下，2号发动机进

气道进口截面明显会吸入较多的排气，进而引起压气机进口截面总温升高；反之，在 $-20^\circ$ 侧滑条件下，2号发动机进气道进口截面吸入的排气量相对较小，压气机进口截面的流场相对较好。

航空动力

（葛严，中国航发研所，工程师，主要从事航空发动机内流气体动力学研究工作）

## 参考文献

- [1] He C J. Development and application of a generalized dynamic wake theory for lifting rotors[D]. Georgia Institute of Technology, 1989.
- [2] Smith M J, Koukol B. Reverse and cross-flow aerodynamics for high-advance-ratio flight[R]. 35th European Rotorcraft Forum 2009.
- [3] 杨志强, 周灵玲, 马阔. 直升机涡轴发动机安装损失特性研究[J]. 中国战略新兴产业, 2018 (24): 182.
- [4] 沈雳, 于琦, 郑甲宏. 直升机发动机装机功率损失试飞研究[J]. 航空科学技术, 2015, 26(03): 39-43.
- [5] 杨永飞. 某型直升机机身及进气道气动特性分析[J]. 直升机技术, 2008(03): 104-106.
- [6] 付焱晶. 直升机发动机进气防护装置研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [7] 徐威阳. 直升机/涡轴发动机一体化安装气动性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [8] Cunningham M H, Birk A M, Bartolomeo W D. Importance of inlet total pressure conditions in evaluating performance of non-symmetric gas turbine exhaust ducts[C]. Asme Turbo Expo: Power for Land, Sea, & Air. 2002.