



ANSYS中国技术大会
中国·上海

航空发动机整机三维数值仿真

- 张剑/ 高工
- 中国燃气涡轮研究院

1

• 引言

2

• 物理模型介绍

3

• 网格划分

4

• 边界条件

5

• 计算结果

6

• 结论

1、引言

- 航空发动机的数值模拟仿真可以分为四种：零维、一维、准三维和全三维。

零维模型由于使用时简单易行，因此在航空发动机整机仿真中得到广泛应用，但零维模型作为纯粹的经验关系式，无法反映部件内部的真实流动。

准三维模型由于能够详细提供部件内部的子午流动情况，已成为涡轮和压气机设计的主要工具，并在整机仿真中得到了初步应用，但其仍无法反映三维流动细节。

目前航空发动机设计已经向全三维发展，各个部件均建立起了三维设计体系，但发动机整机三维数值模拟还未开展，无法反映各个部件在整机环境下的匹配工作状态。



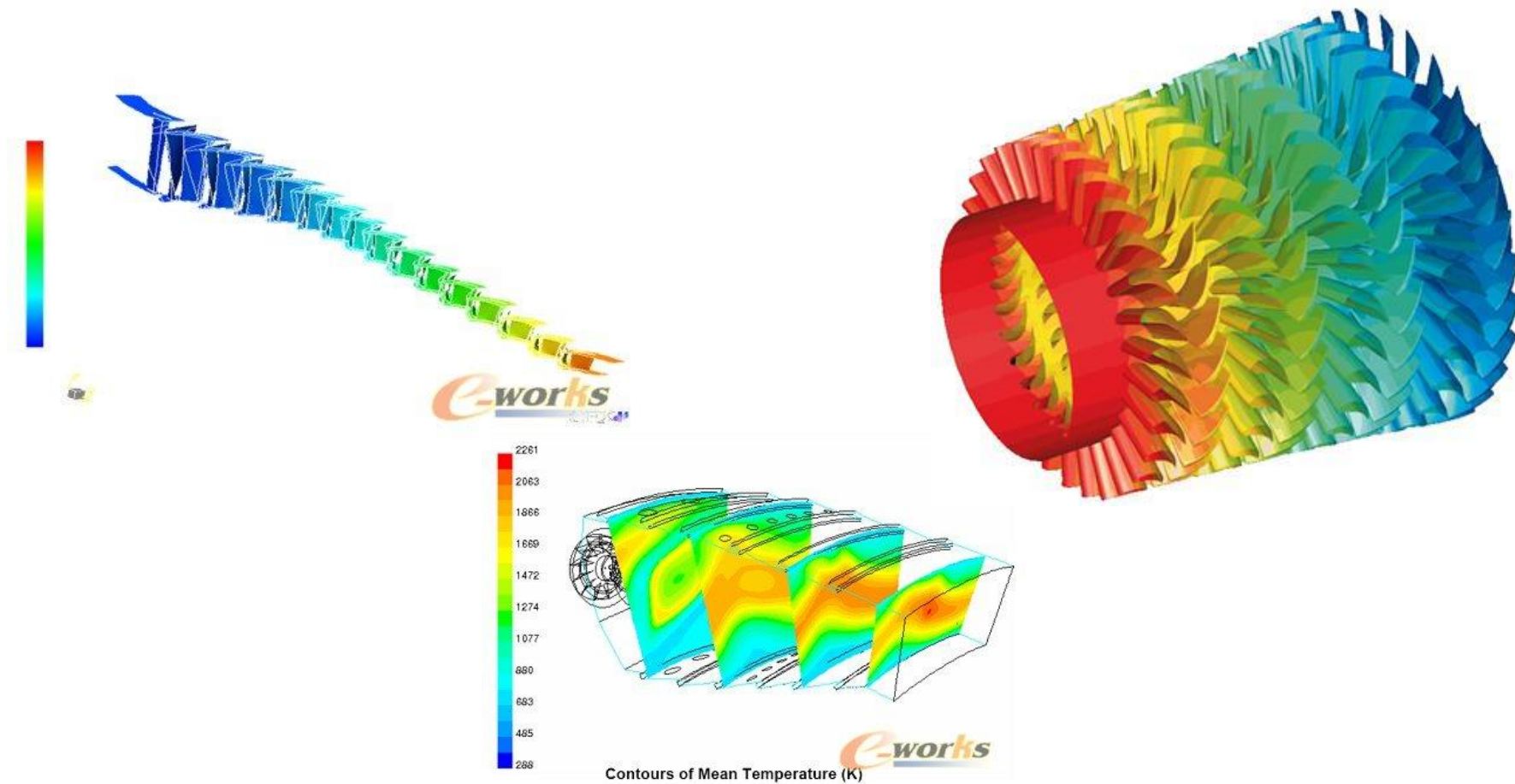
整机子午面流道形状

1、引言

- **设计经验表明，虽然航空发动机各个部件均按照总体指标进行设计，各个部件在理想的边界条件下均达到或超过了设计指标，但往往各个部件在整机环境下不能很好地匹配工作，造成串装的发动机整机性能恶化。**

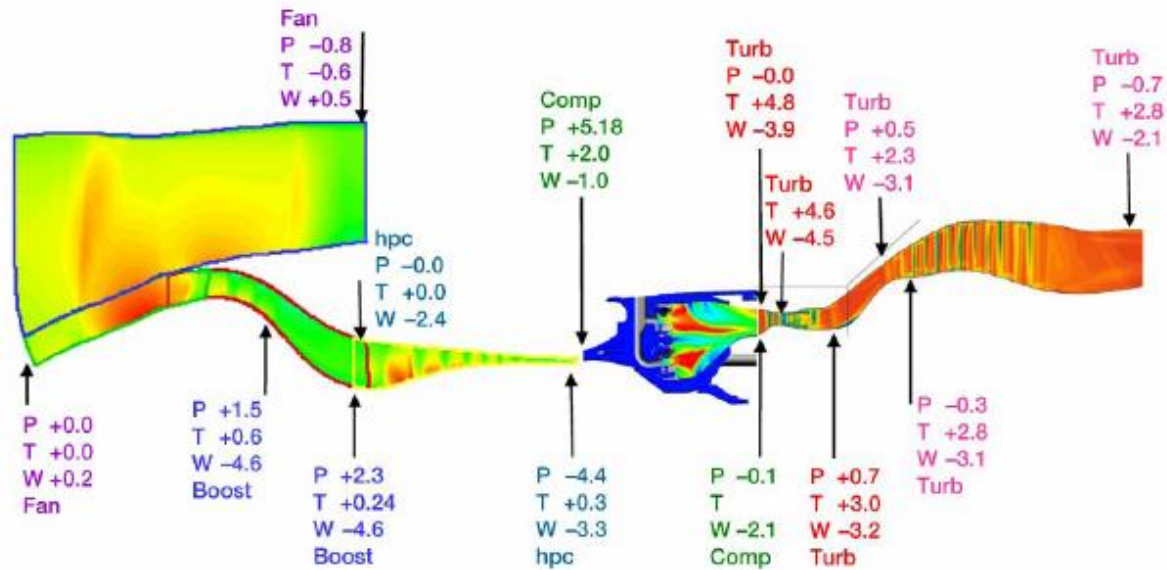
1、引言

- 随着数值模拟技术和计算机的快速发展，发动机整机全三维仿真已经成为可能。



1、引言

- 国外在2003年即发表了GE90航空发动机整机数值模拟的相关论文，分析了三维粘性情况下各个部件在整机环境下的性能及与设计要求的差异。



1、引言

航空发动机整机三维数值仿真具有重要的意义：

- **预测发动机稳态条件下的整机性能，评估发动机的总体性能分析；**
- **检验各个部件设计结果，分析各个部件达到的指标情况，预测部件对发动机整机性能的影响；**
- **部件匹配分析，预先评估部件之间的匹配工作状态，指导部件之间的一体化设计，为发动机部件的设计及改进提供技术依据；**
- **了解部件匹配下发动机的流场细节，尤其是气流的分离、激波、二次流等流动情况；**
- **分析发动机的空气系统，了解发动机空气泄漏及冷却空气流量真实分配情况；**
- **指导发动机整机试验探针布局；**

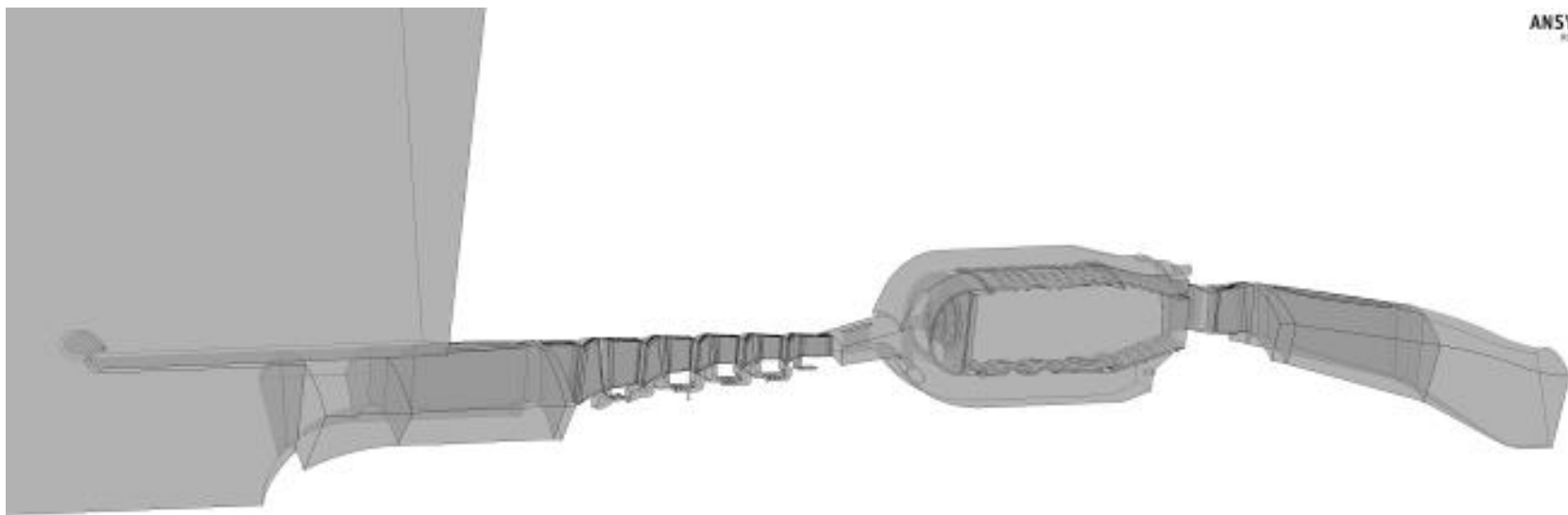
1、引言

航空发动机整机三维数值仿真具有重要的意义：

- **预先评估整机试验，大幅度减少整机试验风险，缩短整机试验周期；**
- **分析整机试验结果，对整机试验环境下的各个部件的性能进行准确评判；**
- **促进航空发动机整机向三维设计发展，提高发动机总体设计精度和水平，进一步完善航空发动机设计体系。**

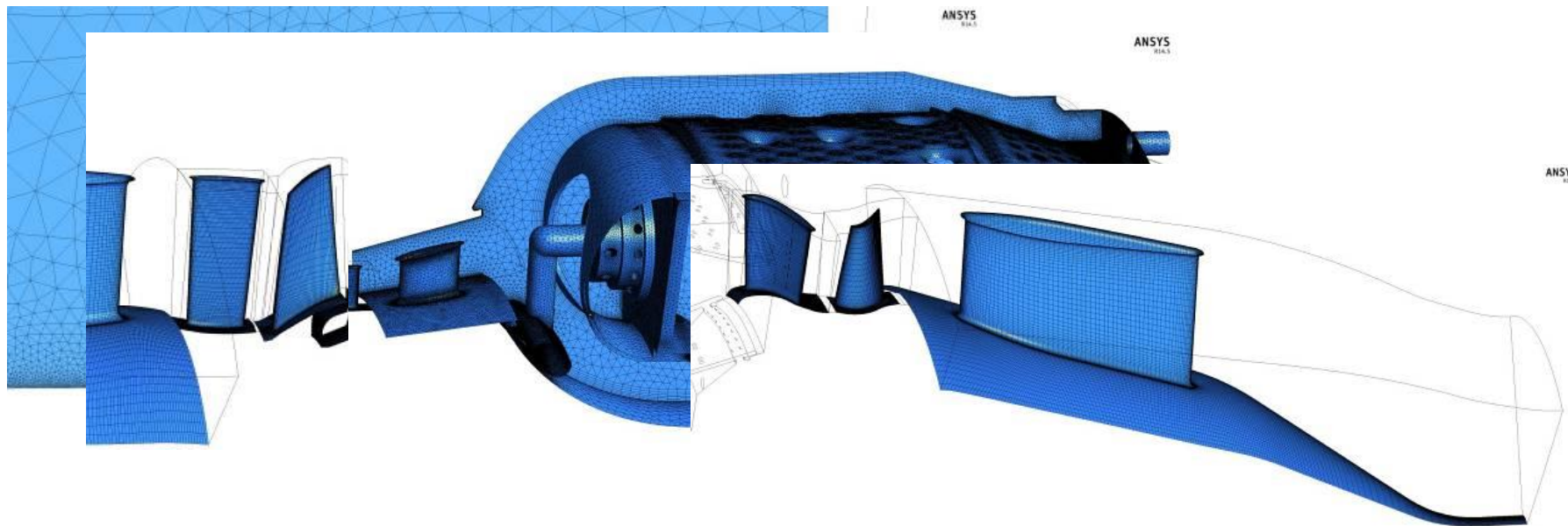
2、物理模型介绍

- 整机全三维仿真采用的物理模型为涡喷发动机。该发动机由进气道、五级压气机、环形燃烧室、单级涡轮和喷管组成。
- 其中，在压气机二级和五级后采取了冷却引气。燃烧室二股气流引气用于涡轮导向器的冷却。
- 叶片数据和流道数据来源于部件的设计结果，并根据加工状态确定转子叶片的叶尖间隙和涡轮导向器的喉道面积。

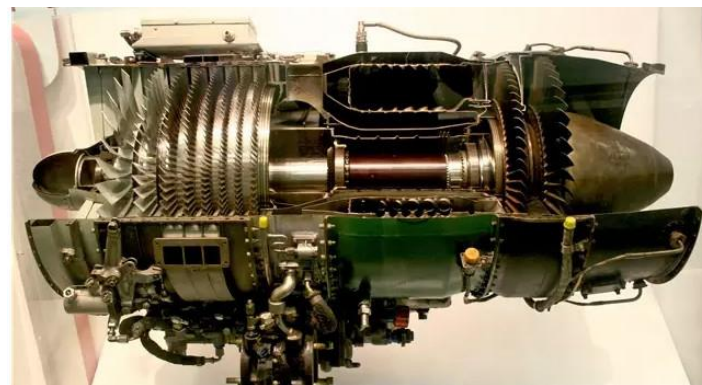


3、网格划分

- 采用多个网格划分工具对该涡喷发动机各部件进行网格划分（ANSYS DesignModeler、ANSYS Meshing、IGG-AutoGrid、ICEM CFD）。
- 为了简化计算工作量，仿真计算的所有部件均采用单通道，总的网格单元数约3500万。
- 由于前期进行过涡轮与排气装置的匹配分析，已经获得了喷管喷口的压力边界，因此未考虑发动机喷管后的大气物理模型。



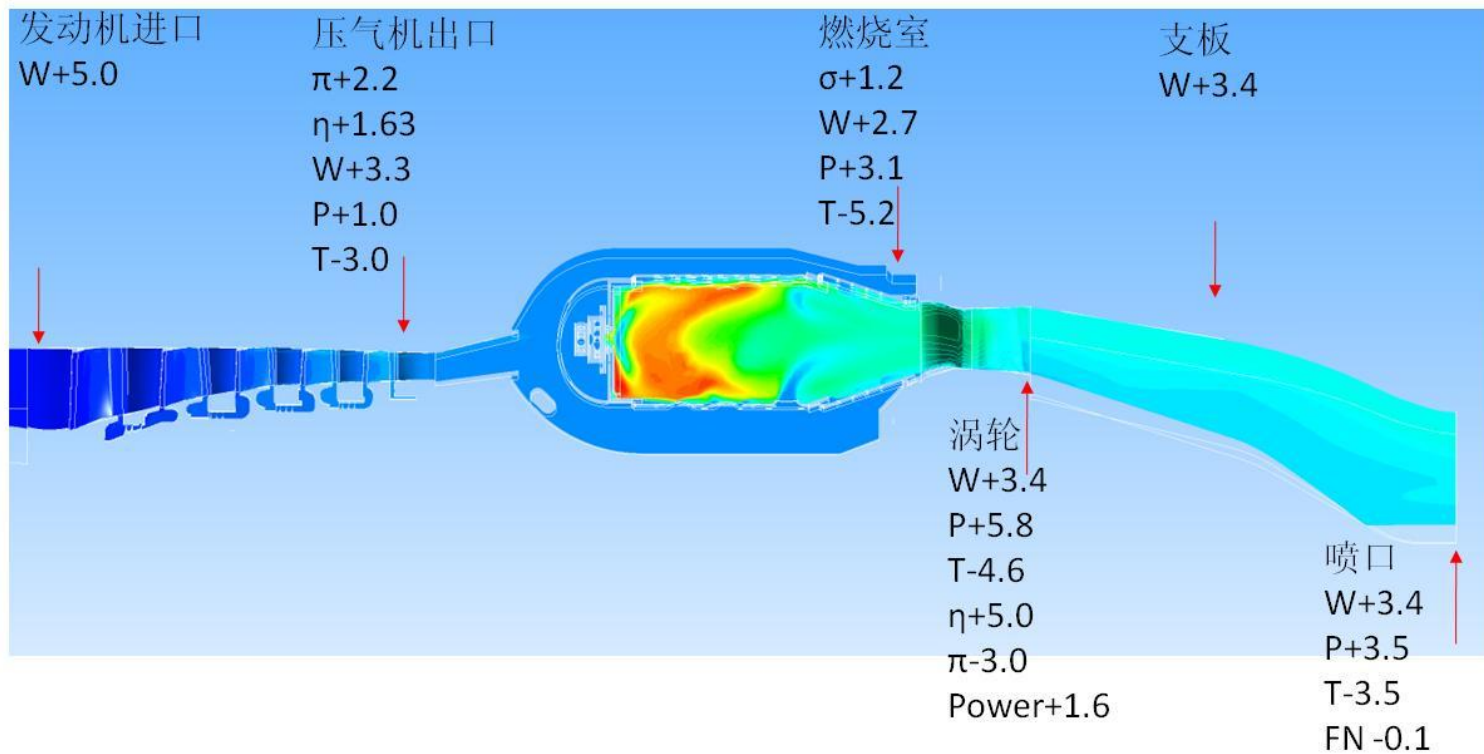
4、边界条件



采用地面设计点对涡喷发动机进行整机仿真：

- 一进气道进口给定大气压总温、总压和气流方向以及空气的各项工质质量百分数；
- 一压气机各个转子和涡轮转子设定物理转速；
- 一燃烧室按照燃油喷雾模型给定燃油的物理流量、喷嘴位置、喷射锥度、颗粒大小等；
- 一考虑燃烧室二股气流的出口流量；
- 一喷管截面按照涡轮与排气装置的匹配结果直接给定出口平均压力；
- 一在压气机二级和五级后给定引气流量；
- 一以源项方式按照涡轮冷却设计结果给定冷却喷射的流量、总温和方向；
- 一部件之间的交界面按照级交界面处理，通道周期性面给定周期性边界。

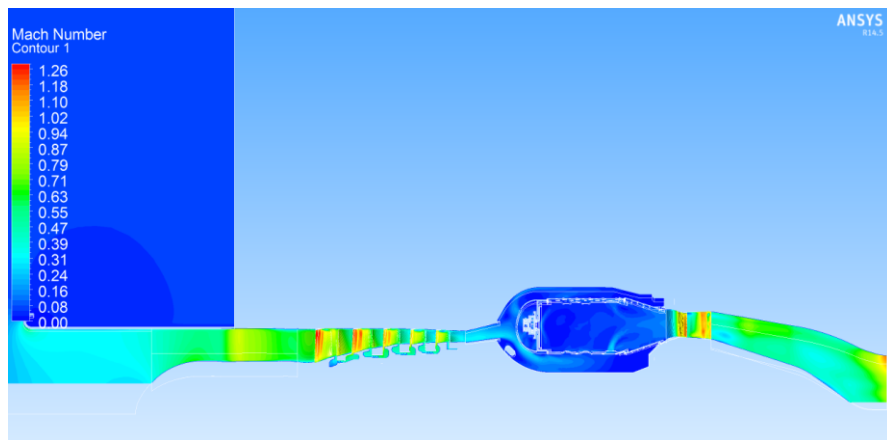
5、仿真结果



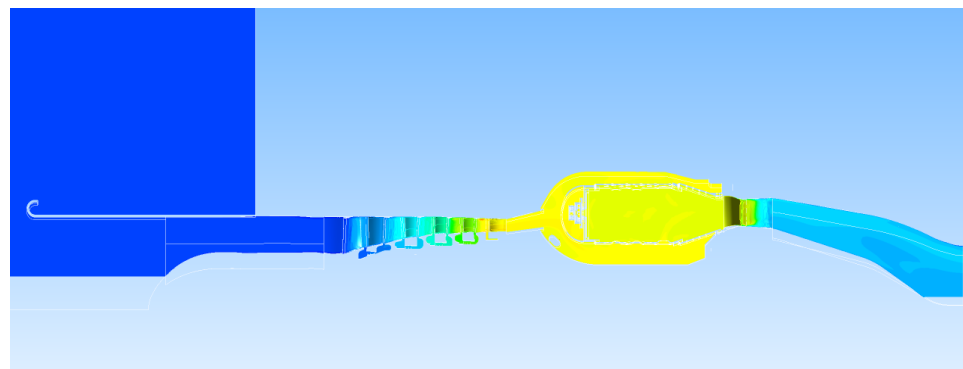
5、仿真结果

- 三维仿真计算的发动机进口流量偏大5%，考虑压气机冷却引气后的燃烧室进口流量偏大2.7%，然而燃油流量按照设计值给定，因此造成了涡轮进口的总温偏小5.2%。
- 三维仿真计算的压气机增压比偏大2.2%，流量偏大3.3%。由于压气机的效率偏高1.63%，压气机出口总压偏高1.0%。
- 三维仿真燃烧室总压恢复系数偏大1.2%，造成燃烧室出口总压偏高3.1%；燃烧室出口流量偏大2.7%。
- 涡轮出口流量偏大3.4%，出口总压偏高5.8%，出口总温偏低4.6%，涡轮功率偏高1.6%。然而涡轮膨胀比偏低3.0%，三维仿真计算的涡轮效率偏高5.0%。
- 三维仿真计算的喷管流量偏大3.4%，总压偏高3.5%，总温偏低3.5%。
- 利用三维仿真结果，对该发动机的推力进行了求解。发动机总的推力与设计值非常接近。

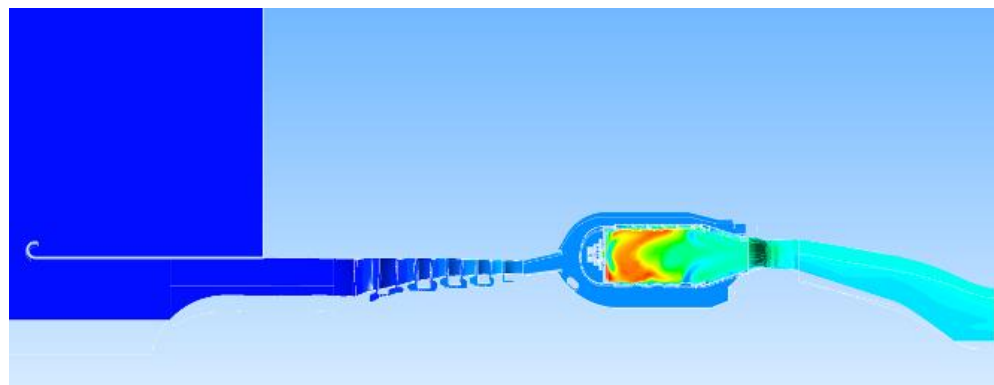
5、仿真结果



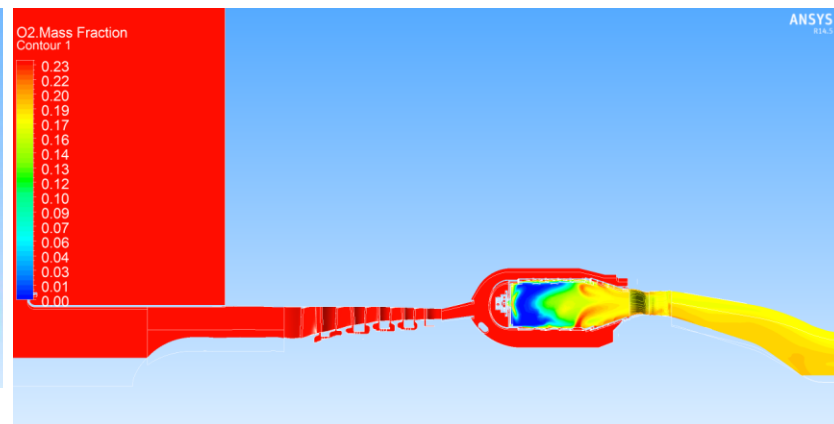
子午面马赫数



子午面绝对总压

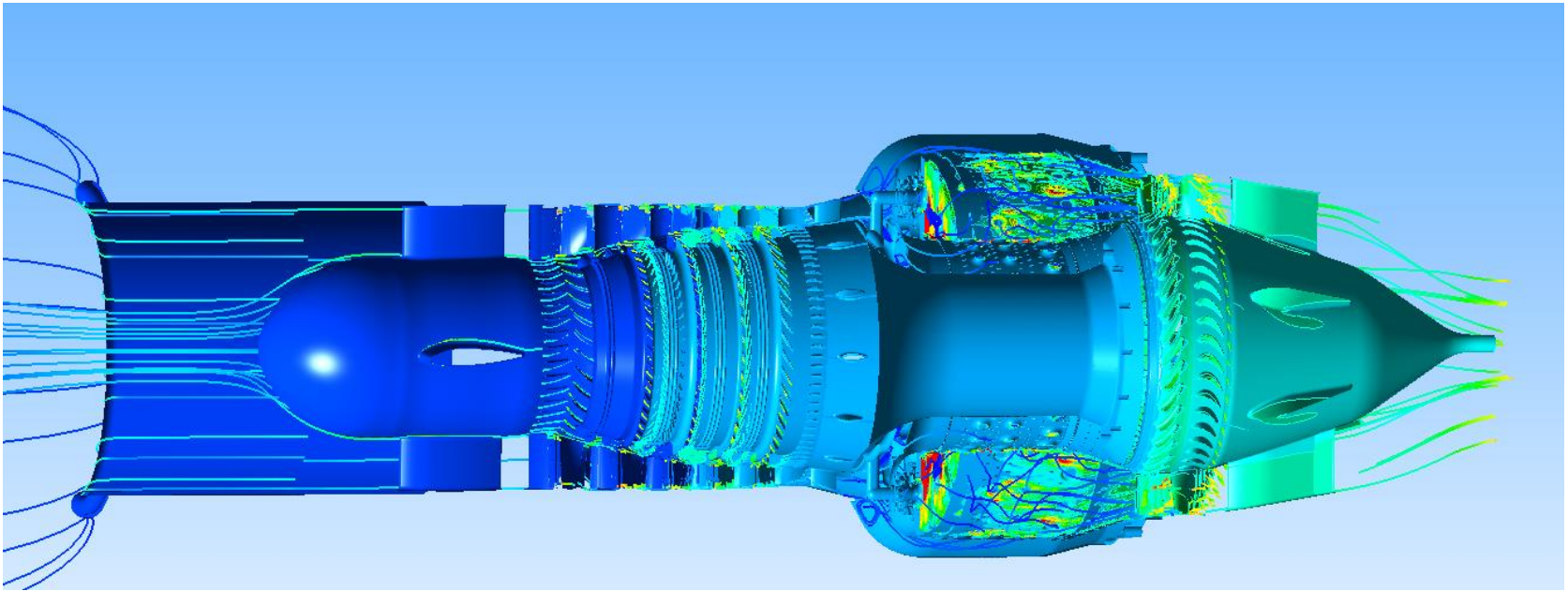


子午面总温



子午面氧浓度

5、仿真结果

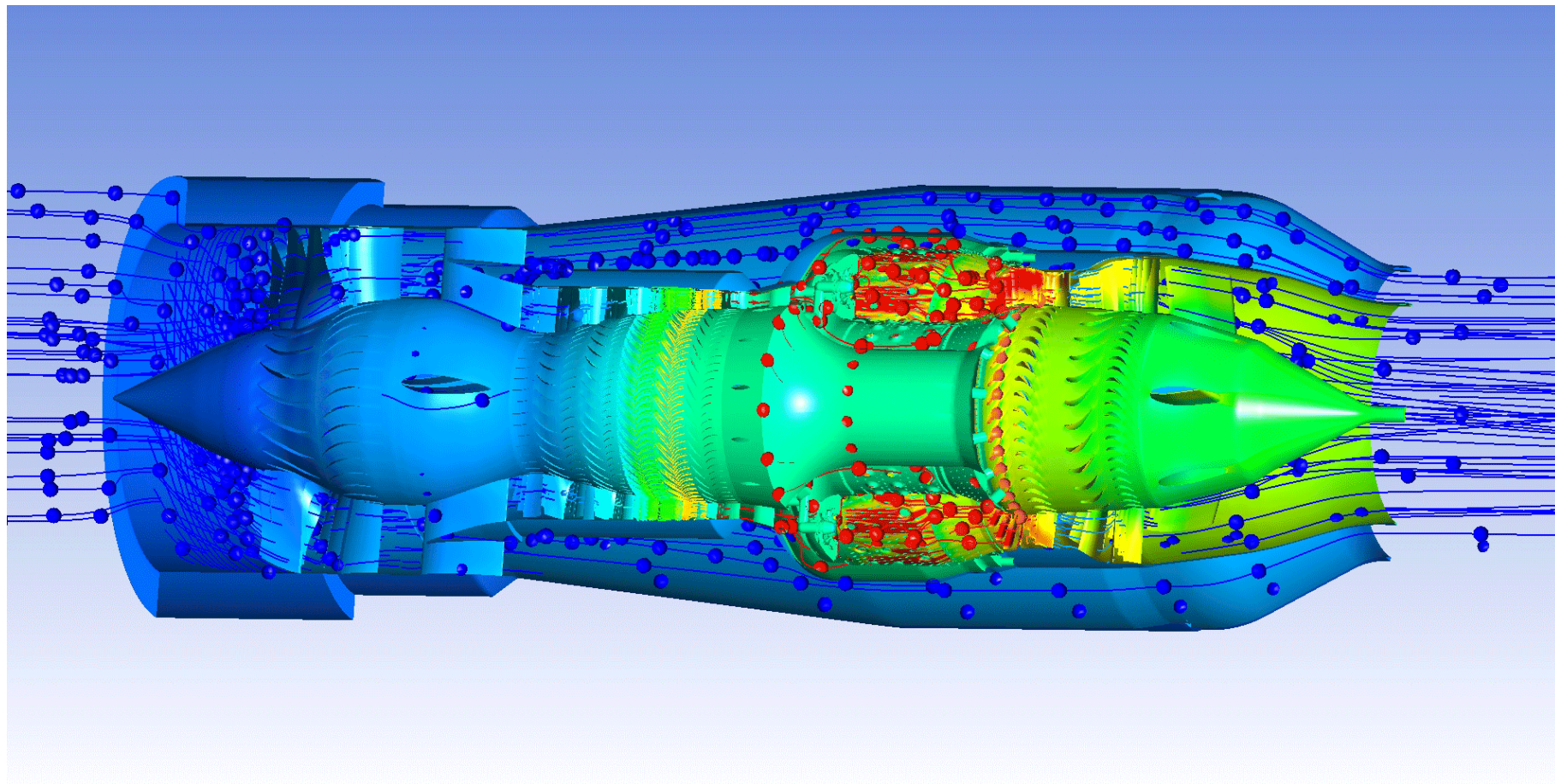


涡喷发动机流线

6、结论

以商业软件ANSYS CFX为仿真平台，以涡喷/涡扇发动机为计算对象，开展了航空发动机整机三维仿真计算，并对比分析了计算结果与设计结果的精度。

- 三维仿真的发动机整机各项性能参数精度在6%范围内。**
- 通过整机三维仿真工作的开展，表明航空发动机整机三维仿真初步具备可行性。**
- 整机仿真中各个部件是相互耦合、匹配工作的。如果某个部件仿真结果与设计结果偏差大，在整机仿真中累计误差增大，将造成所有部件偏离预计的匹配设计点工作。**
- 航空发动机整机全三维数值仿真目前还属于起步阶段，在今后的工作中将利用整机试验数据进行深入的校核，提高计算精度，在发动机的设计工作中更好地提供技术支持，提高发动机设计的成功率。**



涡扇发动机整机三维仿真展示

ANSYS®



ANSYS中国技术大会
中国·上海

感谢聆听