

气动仿真助推涡轴发动机型号研制全面加速

Aerodynamic Simulation Boosting Turboshaft Development

■ 李维 潘尚能 孟博 肖为 / 中国航发动研所

中国航发动研所作为国内航空涡轴发动机产品研发基地，不断根据自身特点，深化仿真手段在涡轴发动机研发阶段的应用，在现有技术条件下，最大限度地发挥气动仿真的作用，提升了涡轴发动机性能与寿命，降低了研发周期与费用。

近年来，随着计算机技术的不断发展，针对航空发动机性能仿真的工具也不断成熟，在缩短发动机研制周期、降低研发成本方面的成效不断显现^[1]。中国航发动研所作为国内主要的涡轴发动机研制单位，先后承担过多种型号的涡轴发动机研制工作，在涡轴发动机性能仿真方面有着扎实的理论研究基础和丰富的工程实践经验。目前，动研所在型号研制中不断强化仿真的工具作用，已建成高性能计算平台，具备亿级网格的气动三维数值仿真能力，针对涡轴发动机气动仿

真特点开展了叶轮机流场/性能仿真、联合/耦合气动及换热仿真、起动过程全尺寸燃烧室三维点火仿真、多相流仿真等研究工作，如图1所示，对产品研发的全面加速起到了关键作用。

涡轴发动机气动仿真的特点

与大型涡扇、涡喷发动机相比，涡轴发动机的主要特点是：装机对象主要为直升机，通过旋翼产生强大气流的反作用力来拉起/拉动起降/飞行，机体周围旋翼下洗流动显著，给发动机进排气带来影响；轴功率一般不超过

5000kW，多数都在2000kW及以下，因此，几何尺寸及空气流量相对较小，结构紧凑、转速高，“小尺寸效应”及“小流量效应”显著；构型多样，包括多级轴流、单级离心、“轴流+离心”和双级离心压气机，直流、斜流、回流、折流燃烧室，轴流、向心涡轮，轴向/径向进气与轴向/偏斜式排气，有的还带有整体式粒子分离器；另外，直升机起降灵活，需要很强的适应复杂恶劣环境的能力，包括山区、沙漠、冰雪地面以及海面，尤其在起降过程吸入沙石、树叶、杂草

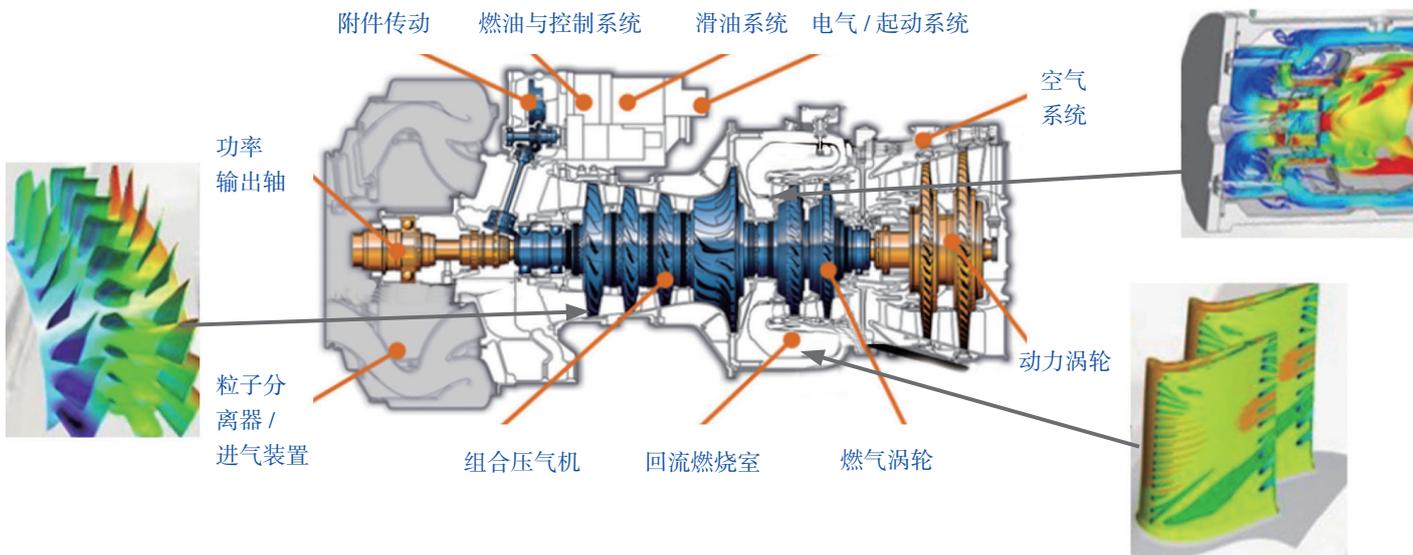


图1 涡轴发动机性能仿真主要内容

等外物，带来叶片磨蚀，气路、油路堵塞，轴承磨损等不利影响。

同时，新材料、新工艺的发展，以及适航性、安全性要求等均对涡轴发动机的性能仿真提出了新挑战，例如，内部流动的尺度效应明显，边界层三维效应强，小尺寸流动湍流边界层厚度甚至接近流动尺度，黏性力影响大，壁面摩擦和热交换现象均更剧烈；气流折转多，内部流场的畸变和损失控制难度大；涡轴发动机最常见的装机位置是在直升机旋翼下方，旋翼的下洗气流会诱发发动机喘振和左右发功率不平衡等问题^[2]。

此外，涡轴发动机仿真还面临着逆压梯度大、流动三维效应和转静子干涉明显、流动耦合互相关效应强、内流气体物理特性变化大、存在气/液/固三项流耦合情况等发动机仿真的共性问题^[3]，这些问题均给涡轴发动机的流动模拟精度的提升带来了挑战，获得高精度性能仿真结果的难度极大。因此，如何准确模拟涡轴发动机典型部件和附属系统内部的流动现象，以提高性能仿真的精度和可靠性，一直以来都是涡轴发动机仿真研究的重中之重。

叶轮机流场/性能仿真

与一般航空发动机类似，涡轴发动机叶轮机气动仿真主要包括压气机和涡轮的气动仿真，是涡轴发动机仿真工作的重点。动研所通过相关研究工作，使得仿真的精度和可信度已满足工程研制需要，为加速涡轴发动机研制提供了强有力的支撑。

采用S2流面计算分析与规范化的雷诺平均方程(RAN-S)方法，对压气机、涡轮开展常规的设计分

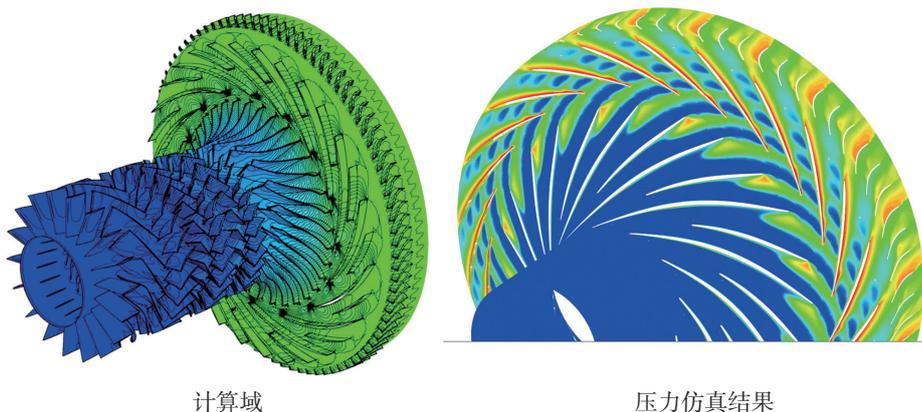


图2 轴流-离心组合压气机气动仿真

析与迭代优化工作，可以在较短时间内以较低成本提供叶轮力学性能数据及对应的详细流场细节，从而能在数天时间内完成方案设计与性能分析工作，加速涡轴发动机设计过程，如图2所示。这对于不断提升涡轴发动机整机性能、减少设计反复具有重大意义。

同时，基于非线性谐波法和全通道非定常RAN-S求解法的非定常仿真方法，是研究进气畸变影响、叶轮机端区流动、转静子干涉时序效应等复杂流动问题的有效工具，可在试验前获得叶轮机内部流场的时域与频域信息，从而指导试验与测试方案，降低了型号研制对于试验的依赖度和试验需求，特别是减少了畸变试验和喘振边界摸底试验等高风险试验的次数，提升了试验的成功率。

另外，基于RAN-S的流热耦合仿真广泛应用于涡轮叶片冷却方案设计，并与叶片冷却效果试验相结合，解决小尺寸冷却试验测试布置困难、测量区域和精度有限的难题，获得小尺寸叶片在真实环境下较为准确的温度分布，确保涡轮设计与试验的一次成功。

近年来，以离散大涡模拟(DES)和大涡模拟(LES)的仿真方法在低雷诺数涡轮叶片、高压比单级压气机流场分析和端区复杂流动分析和损失控制中也得到了应用，解决小尺寸叶轮机流场测量困难的问题，在一定程度上可以替代叶栅试验，优化叶轮机设计，提高叶轮机全包线性能。

在仿真工作的支持下，动研所目前已经具备压比25:1以上的组合压气机设计能力，以及单级膨胀比4.5:1跨声涡轮和进口总温1900K量级、总效率92%的小尺寸冷却涡轮设计能力，未来将继续向负荷更大、效率更高、结构更紧凑的叶轮机高精度性能仿真方向发展。

联合/耦合气动及换热仿真

涡轴发动机由于自身结构紧凑和装机位置特殊等原因，需要对气动及换热问题进行综合考量，才能较为准确地评估出设计方案的有效性及合理性，为发动机的安全运转及性能优化提供定量数据支撑。

空气系统

涡轴发动机空气系统与发动机轴向力、强度寿命以及变形等关系密切，而这些又与发动机的安全运

总温 / K

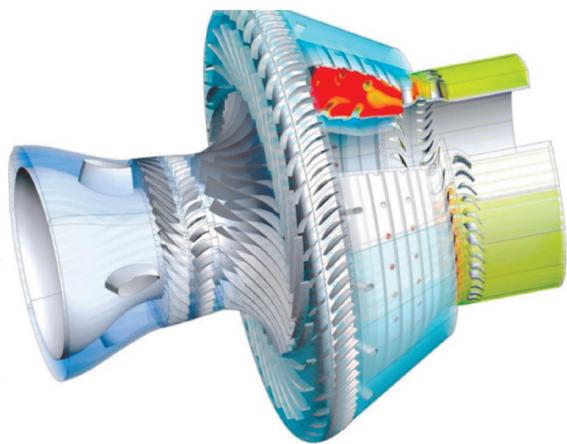
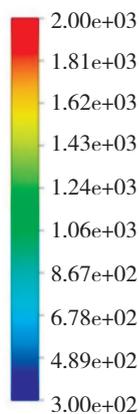


图3 涡轴发动机进气道—压气机—燃烧室—涡轮联合气动仿真结果

行紧密相关。因此，只有准确地仿真出转子周围的流动及换热情况，对转子件强度、寿命、变形进行准确分析，才能为发动机的安全性设计提供保障。

由于涡轴发动机空气流量小、温度梯度大，冷气沿程温升很高，流动与传热热效应非常显著。为满足工程分析精度要求，必须进行空气流动与零件传热耦合仿真分析。以一个涡轴发动机燃气涡轮二级导向叶片及内封严结构的流热耦合结果为例，其中考虑了冷气沿程的冲击换热、肋片强化冷却、空气预旋、盘腔风阻、篦齿射流等一系列复杂流动与换热现象的相互耦合影响。空气系统仿真在准确提供转子盘腔内部气流流动信息的同时，还有助于更精确地进行零部件冷却效果、温度场分析。这对提升涡轴发动机性能、寿命，保障涡轴发动机安全运转提供了有力支撑。

整机联合气动仿真

涡轴发动机性能与进气道性能和外界来流情况直接关联，严重时发

动机的压比、效率和裕度均会大幅下降，甚至危及稳定运行，这就需要通过对各部件联合气动仿真和内外流耦合仿真分别对不同因素进行评估^[4]。为此，动研所开展了发动机进气道—压气机—燃烧室—涡轮联合气动仿真研究工作，如图3所示，可有效评估各部件对整机性能的影响程度，对各部件的耦合匹配意义重大。

直升机/发动机内外流耦合仿真

为进一步探寻机体和直升机旋翼翼流动对发动机性能的影响规律以及发动机布局和进排气相互干扰的影响，尤其是三发布局的直升机，需要进行内外流耦合气动仿真研究

工作。目前，动研所通过采用多参考系模型，已开展了内外流耦合流场仿真研究，如图4所示，用以解决直升机的发动机进气畸变、尾气吸入等问题，避免飞发匹配与布局的重大调整，加速研制进程。

起动过程全尺寸燃烧室三维点火仿真

动研所在基于RAN-S燃烧仿真^[5]研究的基础上，实现了燃烧室内的速度、温度和浓度等物理量的高精度预测，满足了燃烧室多轮次、快速迭代工程设计的需要。同时，动研所采用的“低维模型+RAN-S冷态流场”的点火概率分析方法，可以低成本实现燃烧室点熄火等非稳态工况的高精度仿真，进而实现对点火边界的预测，已为多款发动机燃烧室的顺利研发提供了技术保障，避免设计与试验验证的不断反复，大大提升了燃烧室设计精准度，减少了试验次数。同时，针对下一代高性能燃烧室的研发需求，动研所还开展了LES燃烧仿真研究和基于可实现 $k-\epsilon$ (RKE)湍流模型、火焰面生成流形 (FGM) 模型的低成本数值仿真研究，可分别实现精细化燃烧仿真和高精度点火概率仿真，如图5所示，进一步为燃烧室设计的一

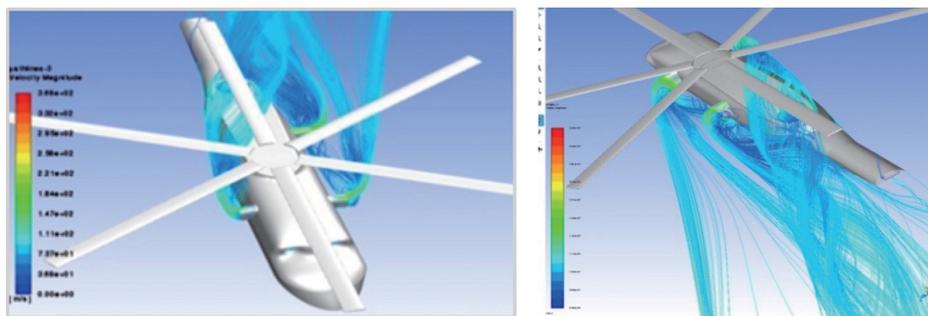


图4 内外流耦合流场仿真结果

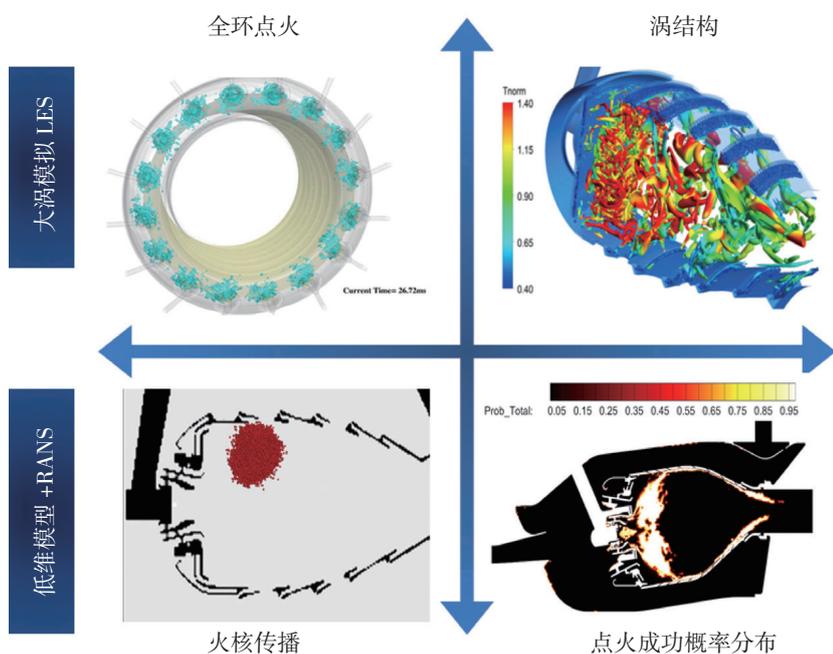


图5 RAN-S与LES仿真结果对比

次成功提供了保障。

多相流仿真

涡轴发动机在复杂环境使用中，其真实流动还包括气/固、气/液、气/液/固等多相流动。典型的包括粒子分离器沙石分离、发动机进气结冰、喷水以及滑油润滑系统内部的空气/滑油等多相流。动研所的研究经验表明：高保真或高精度的多相流仿真工作在加速设计方案迭代、改进

和优化结构、确保试验验证的成功等方面作用巨大。

粒子分离器气/固两相流仿真

粒子分离器的主要功能是避免沙石被涡轴发动机吸入，以减少对发动机叶片的撞击、磨蚀和对涡轮冷却通道的堵塞，避免发动机性能的衰减和故障的发生，在涡轴发动机上被广泛应用。目前针对粒子分离器的稳态三维流动问题，动研所通过采用基于拉格朗日粒子追踪原

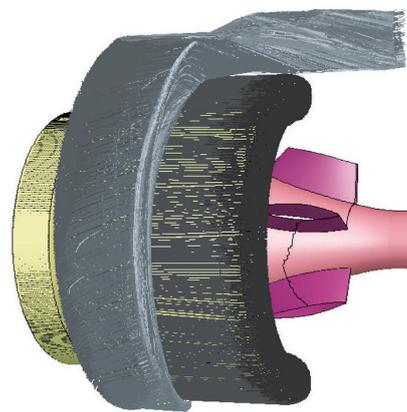


图6 粒子分离器内部沙粒运动轨迹仿真

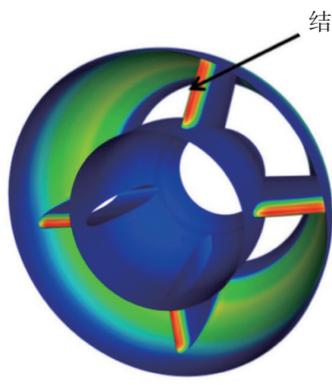
理的仿真方法，开展了大量的气固两相耦合仿真，模拟了粒子分离器内的分叉流动现象（如图6所示），并结合试验进行了沙石模型的修正，提高了仿真精度，其分离效率的仿真预测精度已在5%以内，基本满足了工程需要。在此基础上，动研所已实现了粗沙分离效率不低于90%、细沙分离效率不低于80%、总压损失小于2.5%的粒子分离器的研发与验证，为涡轴发动机的安全运转提供了切实保障。

防/结冰设计的气/液及液固相变仿真

结冰作为航空器上的常见现象，给飞行器的安全带来了极大隐患。



试验



仿真

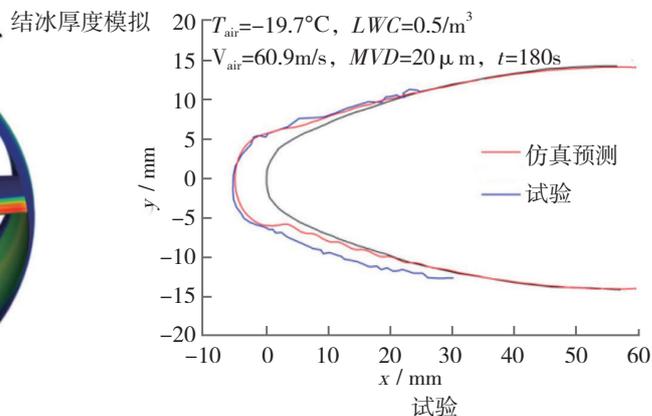


图7 进气支板结冰冰形仿真与试验对比

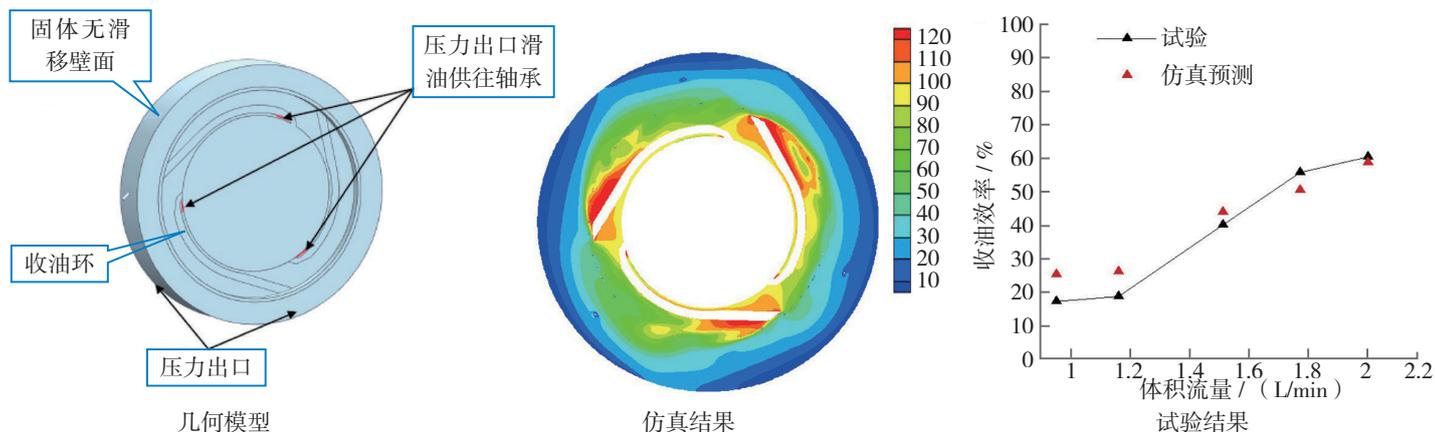


图8 滑油系统空气场几何模型—仿真—试验结果图

目前,防/结冰设计分析涉及两相流、相变、传热传质过程,技术难度大;冰风洞试验成本高、周期长,给防冰系统设计及验证造成了较大困难。动研所基于FLUENT软件二次开发的防冰/结冰仿真分析软件,能够对过冷水滴撞击特性、防冰热平衡以及静止部件的结冰冰形进行较为准确的模拟,如图7所示,极大地提升了航空发动机防冰系统的设计能力。通过防冰/结冰仿真分析,不仅提高了防冰系统设计成功率,还解决了民用涡轴发动机研发中遇到的结冰关键点选取等技术瓶颈,促进了民用涡轴发动机适航取证工作的顺利开展,大大降低了防/结冰试验周期和成本,为涡轴发动机的安全性设计提供了坚实的保障。

滑油系统多相流动仿真

涡轴发动机滑油系统的性能对整机的可靠性、寿命、安全性都意义重大,其内部涉及油气两相、液体撞击固体壁面、旋转湍流等复杂流动状态,是典型的多相流动问题。目前,动研所采用体积函数法(VOF)两相计算模型,开展了滑油润滑系统的流动仿真分析,包括典型旋转

流动下的环下润滑结构内部油/气两相流的流动状态仿真,如图8所示,仿真对收油效率的预测和试验结果偏差基本达到工程需要。并且相较于试验而言,数值仿真周期短,比试验研究更具灵活性,可以对试验难以测量的内部复杂流场做出预测,获取内部的油气两相流流动状态和特性,为滑油系统管路、通道结构优化改进以及滑油消耗量精准预估提供了依据,对提高滑油系统收油效率、保证发动机的安全运转均有重要意义。

结束语

综合分析现有技术的研究现状和发展趋势可以预见:以机器学习为代表的低维度实时仿真技术,可以大大加快发动机气动设计迭代速度;以LES大涡模拟为代表的高保真三维仿真技术,可大幅提高仿真精度并统一发动机气动湍流模型。上述方法均对发动机详细设计意义重大,如应用得当,则有望在计算量适中且精度较高的湍流仿真模型与方法的建立、飞发一体化耦合仿真、高精度流动分离预测及气固热耦合仿真等涡轴发动机性能仿真未来研究

中发挥巨大作用。 **航空动力**

(李维,中国航发研研所副所长、总设计师、总质量师,研究员,长期从事航空发动机设计工作)

参考文献:

- [1] 邹望之,郑新前.航空涡轴发动机发展趋势[J].航空动力学报,2019,34(12):2577-2588.
- [2] 尹泽勇,曾源江,石建成,等.涡轴(涡浆)/涡扇(涡喷)发动机通用核心机技术[J].航空动力学报,2008,23(11):2088-2094.
- [3] 曹建国.航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J].推进技术,2018,39(5).
- [4] Steijl R, Barakos G. CFD analysis of complete helicopter configurations—lessons learnt from the GOAHEAD project[J]. Aerospace science & technology, 2012, 19(1): 58-71.
- [5] Penanhoat O. Low emissions combustor technology developments in the European programmes lopocotep and TLC [C]// 25th congress of the international council of the aeronautical sciences 2006.