

航空发动机气动优化设计技术

Aerodynamic Optimization and Design Technology of Aeroengine

NUMECA 中国 魏慧荣

CFD 技术作为一种特殊形式的试验可以替代相当一部分航空发动机模拟试验,降低试验成本,提高试验数据的质量和试验效率,大大缩短航空发动机研制的试验周期。

现代飞机发动机的推力和尺寸越来越大,要完全满足发展要求,仅靠扩大模拟实验设备的规模和尺寸是非常困难的,在某种程度上也可以说是难以办到的,而 CFD 技术作为一种特殊形式的试验可以替代相当一部分航空发动机模拟试验,降低试验成本,提高试验数据的质量和试验效率,大大缩短航空发动机研制的试验周期。

CFD 在发动机设计中的优势

发动机对飞机的性能有着决定性的影响,鉴于发动机研究和发展工作的难度大、耗资多、周期长等特点,CFD 技术应运而生,并在近些年飞速发展。CFD 技术在发动机中的应用,使得对发动机气动特性的详细研究又向前推进了一步,不仅节省了发动机试车的时间与成本,避免了实际试车的危险,并可以获得全部参数数据,其中包括实际试车时难以测量的参数,还可解决多参数的优化问题。

借助 CFD 软件可实现以下功能。

(1) 发动机涡轮、压气机等部件的设计、性能校核和优化改进。通过 CFD 模拟试验,快速和系统地分析几何形状变化对于设计与非设计点气动性能的影响。此外,还可以针对在发动机整机试车中所获得的数据和现象,进行数值模拟和分析。

(2) 部件整合。以往的发动机全尺寸仿真大都是零维的,无法反映发动机内客观存在的多部件与多学科流动特征,与此相对应的流动关系要经过硬件试验才可得到,而此时往往已进行了相当的研制工作,作过了大量的试验,设计上的改变将会造成时间和经费上的巨大浪费。而运用 CFD 技术,可直接对多个部件的整合模型进行求解,直观地反映出各部件之间流动的干扰及整体的气动特性。

(3) 多物理场耦合。发动机内部的物理过程涉及多种学科,对这些过程的准确仿真必然也包括多种学科。传统的分析方法是按学科的不同分类

而单独有序地进行,该方法的特点是所耗时间较长且常常由于忽略了学科间的强耦合性而出现误差。目前,CFD 分析的对象已由单一的零部件分析拓展到了系统级的装配体的仿真。同时,其分析的领域也已不再仅仅局限于流体力学,现在已经涉及到燃烧学、热力学、多场耦合等更加丰富的物理空间。

综上所述,人们借助计算机对发动机内部的流动进行数值模拟成为可能,CFD 方法将在一定程度上取代试验,以达到降低成本、缩短研制周期的目的,并且数值模拟可提供丰富的流场信息,为设计者设计和改进发动机提供依据。

为了适应航空发动机的发展策略,满足航空发动机的发展需求,NUMECA 公司凭借雄厚的研发实力和十几年丰富的工程经验,不仅针对航空发动机有相其对应的 FINE/Turbo 数值模拟分析软件及针对性的主题模块,使数值模拟分析更贴近真实的流动,为发动机设计者提供更详

实流场数据;此外,NUMECA 公司还拥有个各方面都空前先进的、具有开创性和高效的三维叶片设计及优化的软件工具 FINE/Design3D,该软件采用多目标参数优化方法,用户可以自行定义多个优化目标,同时可以保证几何及机械约束,为设计者对发动机的优化改进提供了一定的依据。

气动优化设计方案

众所周知,航空发动机流场的特点对数值模拟软件的专业性以及计算速度和精度都有非常高的要求。NUMECA 采用了行业内最先进、最专业的数值模拟分析及优化设计技术,保证模拟结果的精确性,满足发动机核心部件的流场数值模拟和优化设计分析需求。从国内航空发动机各研究所到国际航空发动机巨擘(GE、RR、Honeywell 等),从高等学府到各企事业单位均把 NUMECA 软件作为行业内首选 CFD 软件。

针对航空发动机的发展研究,NUMECA 公司提出了完备的解决方案,包括:初始设计、几何建模与几何特征分析、数值模拟(网格制作、数值求解、多物理场问题分析)、优化设计等,如图 1 所示。

气动优化设计理念

当今的航空发动机已经具有较好的性能,但其气动性能仍有进一步改进和提高的空间,采用基于先进数学理论的优化手段进行优化设计是行之有效的方法。FINE/Design3D 已经被认为是针对航空发动机的最先进的三维叶片设计及优化的软件工具。FINE/Design3D 作为三维叶片优化设计的领跑者,通过将叶片参数化造型模块 AutoBlade 与 NUMECA 的数值模拟分析软件包 FINE/Turbo 进行耦合嵌接的软件包为发动机分析和设计的虚拟网络分析提供了非常快速便捷的途径。作为优化平台本身,带有神经网络、遗传算法以及模拟退火算法的全

新的智能优化方法,可以实现多目标、多参数优化功能,用户可以自行定义多个优化目标,同时可以保证几何及机械约束。优化流程如图 2 所示。

AutoBlade 是通用的压气机和涡轮叶片及通道几何造型工具。几何定义参数通用(压力面/吸力面型线或者中弧线/叶片厚度等)并且高度灵活(切向及子午倾斜及掠置等独立控制,多种叶片的三维积叠方式,多分流叶片、圆弧型或多种切割断面形式的进出口边类型等)。嵌接二维及三维的喉部面积及位置计算、转动惯量计算、重心位置、叶片型线曲率以及厚度分布等计算功能。

AutoBlade 作为专业的叶片参数化造型工具,包含以下功能。

- (1) 轴流、离心压气机、涡轮及风扇等机械的参数化几何模板;
- (2) 多种端壁型线类型,如 B 样条曲线、贝塞尔曲线、直线-贝塞尔曲线-直线组合线、直线-样条曲线-直线组合线、自定义线型等;
- (3) 多种流面构造类型,如分别针对轴流或径流的平面、圆柱面、圆锥面、轮毂与轮盖线性插值;

(4) 叶片多种积叠规律,如前缘点、重心、最大厚度点、叶型喉口线的中

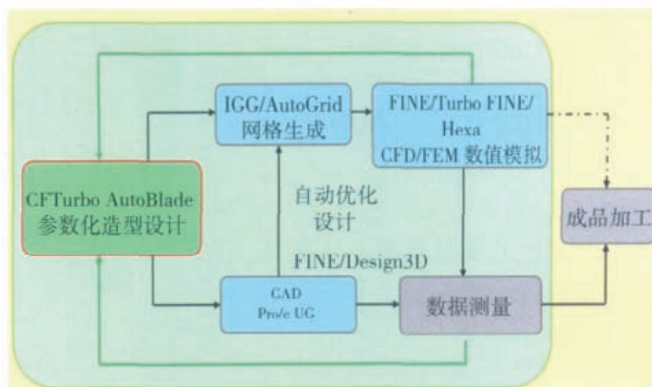


图1 总体框架图

点、尾缘点、中弧线或弦线任意位置的积叠;

(5) 多种叶片子午位置定义的前尾缘曲线类型,如直线,可调整控制点数的贝塞尔曲线,可调整控制点数的 B 样条曲线;

(6) 多种叶轮周向位置定义的积叠线类型,如直线、Bezier 曲线和直线的组合线、简单 Bezier 曲线、可调整控制点数的贝塞尔曲线、可调整控制点数的 B 样条曲线。

AutoBlade 凭借专业的造型功能和流程为发动机研发设计人员提供了便捷的设计思路和设计途径。

设计完成的模型, AutoBlade 还可对其进行几何特征分析,包括端壁型线角度变化、端壁型线曲率变化、厚度分布、中弧线角度变化、中弧线曲率变化、压力面与吸力面角度变化、压力面与吸力面曲率变化以及通

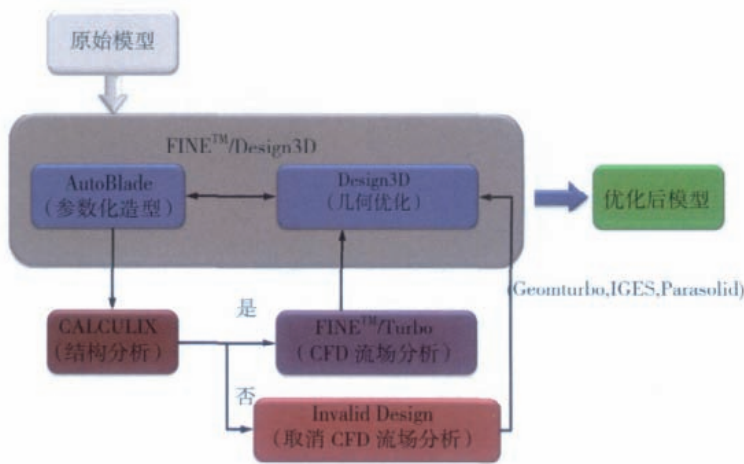


图2 优化设计流程

道宽度变化等,为设计者对模型的分析 and 校核提供了便利条件。

气动优化设计应用

图 3~4 分别给出了 NUMECA 针对航空发动机核心部件的优化设计结果,优化过程集结了参数化造型、数值模拟分析及优化设计软件,得到了满足设计者要求的产品。

图 3 给出了对某压气机进行三维优化设计的对比图。主要针对叶片气动外形进行优化,以提高压气机的气动性能。图中给出了叶片优化前后气动性能和工作范围的变化,可以看出气动性能提高明显,压气机的工作范围也有明显拓宽。

图 4 是对某涡轮进行优化设计后气动外形和性能的对比图。由图中可以看出,在保证满足给定的约束条件下,通过改变涡轮叶片的气动外形,使其气动性能有较大提高。

对于图 5 给出的模型进行优化时分成两步,第一步不考虑强度因素,只进行气动优化。第二步进行气动强度

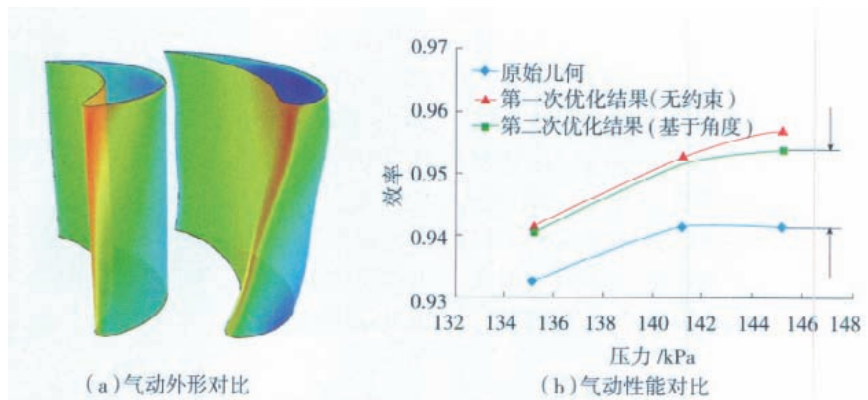


图4 某涡轮优化前后气动外形与气动性能对比

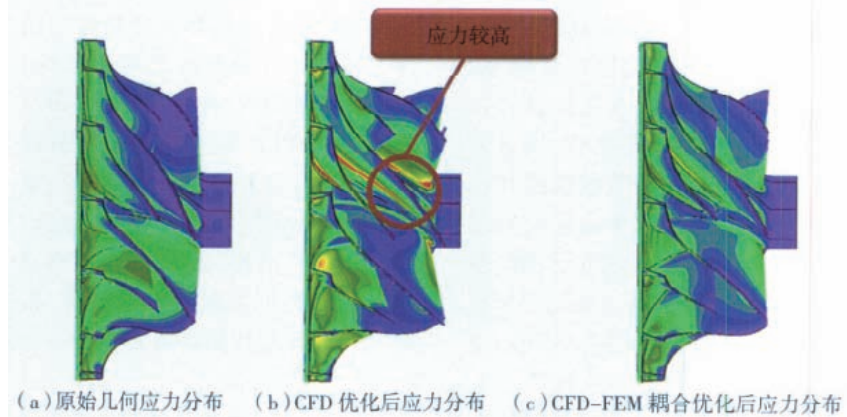


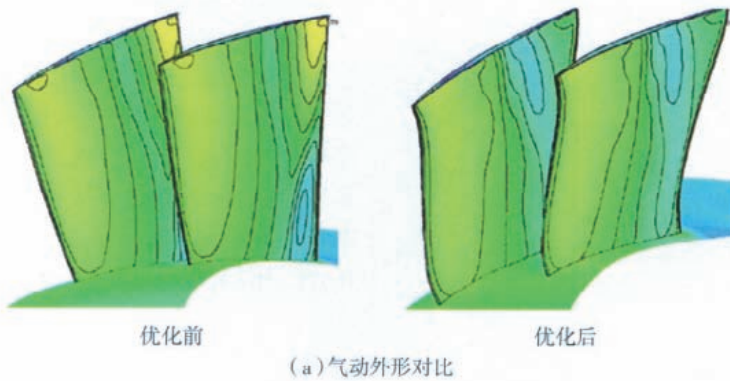
图5 优化前后叶片应力分布图

耦合优化。图 5 显示了优化前后叶片的应力分布对比情况。从图中可以看出,方案一由于不考虑强度因素,堵塞流量、效率以及喘振裕度等气动性能虽都得到提升,但是叶片的上最大应力增大。方案二进行气动强度耦合优化,堵塞流量、效率以及喘振裕度等气动性能也都得到提升,虽然没有方案一的优化气动性能优秀,但是叶片的最大应力没有增大,满足强度要求。

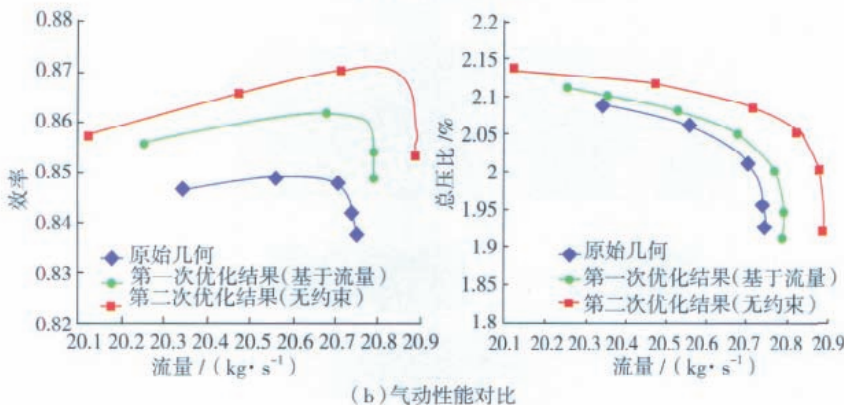
结束语

广泛应用在航空发动机研发过程的 CFD 技术,不仅极大地缩短了发动机的研发设计周期,降低了设计费用,而且可以为研发设计人员提供详实的流场数据信息,使得发动机气动性能有了进一步地改进,效率提高、工作范围变宽、流场分布更为合理。

(责编 晓立)



(a) 气动外形对比



(b) 气动性能对比

图3 某压气机优化前后气动外形与气动性能对比