

基于 Optimus 的涡轮气动优化设计

严俊峰, 吴宝元, 逯婉若

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 针对涡轮在理论设计和实际应用中存在的不足, 提出了利用多学科优化平台对涡轮进行气动优化设计的方法。首先运用 UG/Grip 技术对涡轮进行三维造型, 然后利用试验设计方法建立计算试验样本点分布表, 用商用软件进行各样本点的 CFD 计算及热-应力耦合分析计算, 最后建立响应面模型, 对其进行优化设计。结果表明, 优化后的涡轮效率比优化前提高 5%。该方法为进一步提高涡轮的气动性能, 减少损失提供了一定的依据。

关键词: 涡轮; CFD 计算; 响应面

中图分类号: TH164

文献标识码: A

文章编号: (2008) 02-0013-05

Turbo aerodynamics optimization design based on optimus flat

Yan Junfeng, Wu Baoyuan, Lu Wanruo

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: To solve the problems of turbos, a multidisciplinary design optimization plat is presented. At first, UG/Open Grip technique was adopted to parameterize the turbo. Then, the sample point distribution was obtained by the experimental design method, With the help of software Fluent and Ansys, the efficiency and stress of every sample points can be get. Therefore, the response surface model can be built up on these results and an optimization algorithm was adopted on the response surface model. At last, the optimization turbo was obtained. The results indicate that the efficiency of the optimization turbo was increased by 5%. All results show the method is very important and available for improving the performance, reducing the loss, and others.

Key words: turbo; CFD calculate; response surface model

收稿日期: 2007-10-26; 修回日期: 2007-12-10。

作者简介: 严俊峰 (1980—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机系统设计。

1 引言

涡轮的气动性能对叶轮机械的性能起至关重要的作用,其气动性能的好坏直接决定着叶轮机械性能的优劣,对其进行优化设计意义重大。传统上,多是依据经验公式设计其尺寸,在理论设计和实际应用中存在不足,对设计者的经验要求较高,设计效果不理想。研究表明,利用 Fluent 进行整机定常流动数值模拟,能够很好地预测旋转机械的性能^[1-3]。本文即采用 Fluent 计算涡轮整机流场,并利用 Ansys 进行涡轮转子的热-应力耦合计算,以此作为优化计算的约束条件。由于 Fluent 软件本身并不具有优化功能,为了达到优化涡轮性能的目的,可借助集成多学科优化平台 Optimus5.0。

Optimus5.0 作为优秀的智能化多学科多目标优化软件,具有强大的集成优化能力,可以集成多种 CAE/CAD 软件。用其集成 Ansys7.0、UG NX2.0、Gambit2.1 及 Fluent6.1 等对某发动机涡轮的静子及转子叶型进行优化设计,以达到提高其性能的目的。

2 计算模型

2.1 模型的建立

考虑一般情形,要在 Fluent 的前处理软件 Gambit 中进行涡轮静子及转子的三维造型是比较困难的。目前一些高端三维造型软件如 Solidworks、UG、Pro/E 等的造型功能非常优秀,使用这些高端软件来实现涡轮静子及转子的 CAD/CAE 是一条捷径^[4]。UG/Open Grip 是 UG 提供的二次开发工具,以子程序方式实现系统交互操作^[5]。

利用 UG/Open Grip 编程工具,方便地实现不同结构参数下涡轮静子及转子的实体造型。在完成涡轮静子及转子的参数化设计之后,应利用 Open Grip 对其进行编译并链接,以便生成可执行的程序。然后在 UG 环境下运行该程序(图 1 为转子的部分造型参数输入界面),并以 Gambit 能够识别的文件格式输出涡轮静子及转子的实体

数据,上述操作过程可以利用“宏”命令进行记录,以便实现 UG 操作的参数化。



图 1 转子的造型参数

Fig.1 Modeling parameters of a rotor

2.2 网格生成

涡轮整机流场由进口管、静子、转子及出口管等组成。在 CAD 软件中建立了上述要素的几何模型后,可将其输入到 Gambit 中进行整机流场的网格划分。仅提取出一个静子叶片及一个转子叶片时某涡轮的网格区域如图 2 所示。

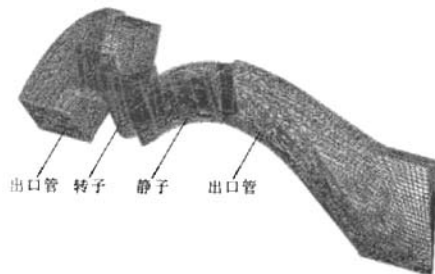


图 2 网格区域

Fig.2 Mesh region

为了提高计算精度,这里采用结构化网格进行网格划分。同时,在保证结合面处具有相同的网格尺度下,为了减小网格总数,加快计算速度,还应对不同的区域采用不同的网格尺度,其中,静子及转子的网格尺度较小,进口管及出口管的网格尺度较大,由于计算域比较复杂,因此整机网格总数已达 87 万多。

2.3 模型定义

针对含有运动固体边界的流动问题, Fluent提供了多重旋转坐标系(MRF)。它的基本思想是将涡轮流场简化为转子固定在某一位置时的瞬时流场, 其计算结果代表了当前转子与静子所处相对位置时的流动状况, 因此达到了用定常计算来研究非定常计算的目的^[2]。

具体计算时将转子网格区域设为多重旋转坐标系, 其余网格区域设为固定坐标系。计算时流场进口定义为压力进口边界; 流场出口定义为压力出口边界, 其具体数值由涡轮设计工况给出。湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型, 涡轮入口及出口边界上的湍流取值按水力直径大小及湍流强度给定(5%)。壁面条件采用无滑移固壁边界条件, 并使用标准壁面函数法确定固壁附近流动。为了使计算比较稳定, 在计算的初始阶段, Courant 数及收敛因子均较小, 在差分格式中, 紊动能项和紊粘系数项均采用一阶迎风差分格式。而为了使计算收敛较快及保证一定的精度, 在计算的中间及结束阶段, Courant 数及收敛因子均较大, 在差分格式中, 紊动能项和紊粘系数项则采用二阶迎风差分格式。

2.4 计算结果及分析

通过整机流场计算可知, 涡轮的出口流量及出口总压与实际数据的误差分别为 0.6% 和 1.3%。由流场模拟结果可得出转子转动壁面相对与旋转轴线的力矩 T ; 在已知涡轮转子旋转角速度 ω 、流量 m 及绝热功 L_{ad} 的条件下, 计算出涡轮的效率

$$\eta = \frac{\omega T}{m L_{ad}}$$

计算分析表明, 该涡轮的效率与实际效率的误差小于 2%。由此可见, 用 CFD 方法模拟涡轮性能是简便可行的, 其计算精度能够满足工程要求。

图 3 为原始的(优化前)静子与转子间相对速度的分布图。从该图中可以看出, 在转子非工作面出现了较大的漩涡区, 导致能量损失。可以预见, 通过改变静子及转子的叶型参数并使其匹配, 可以改变气流在通道内的流动, 减小转子非工作面的漩涡区, 从而提高涡轮效率。



图3 静子与转子间相对速度的分布

Fig.3 Relative velocity distributions
between a stator and a rotor

2.5 热-应力耦合分析

由于涡轮转子需要在高温环境下高速旋转, 其运行环境非常恶劣, 事关整个系统的可靠性。当涡轮的转速很高时, 其叶片自身的质量离心力很大, 如某转子叶片在 30 000r/min 的转速下工作时, 产生的离心力可达到其自重的上万倍。叶片在自身离心力的作用下, 将产生很大的拉伸应力和弯曲应力, 还能引起扭转应力。此外, 涡轮所处的高温环境不仅使材料的许用应力减小, 而且由于温度分布不均而产生热应力。因此, 在涡轮的气动优化设计中, 应对转子进行热-应力耦合分析, 并将转子承受的最大应力及转子的一阶频率作为约束条件。

理论上, 根据达朗贝尔原理, 一个运动的物体可以看作是一个动平衡问题。因此在进行热-应力耦合分析时, 为了节省计算时间, 将叶片等效为离心载荷, 并将其平均施加到轮盘外缘上的节点。实际分析中, 先进行稳态热分析, 然后将热分析的结果以体载荷的形式施加到模型中进行转子的静力分析, 得出结构所受的最大应力等, 最后进行动力学分析, 得出转子的一阶频率^[9]。

计算中, 由于气动力与离心力和热负荷相比, 故可以忽略。

3 集成优化

3.1 优化模型

涡轮气动优化设计模型是建立在叶片的参数

化模型基础之上的。确定涡轮气动优化模型首要的问题是设计的参数化表达（主要是叶片造型的参数化建模和设计状态等物理条件的参数化）。针对涡轮气动优化，选取的优化变量有转子叶栅宽度 b 、中径 D 、安放角 β 、静子叶片数 Z 及叶片旋转角 α 等。在气动优化过程中构造的优化模型表达如下：

$$\begin{aligned} &\text{max: isentropic.efficiency } (X_D) \\ &\text{st: max.stress } (X_D) - C_1 \leq 0 \\ &\text{min.freq. } (X_D) - C_2 \geq 0 \\ &X_D^{\text{Lower}} \leq X_D \leq X_D^{\text{Upper}} \end{aligned}$$

上述优化模型中， X_D 为优化设计变量；涡轮的等熵效率（isentropic.efficiency (X_D ））为优化设计目标函数；转子叶片承受的最大应力（max: stress (X_D ））小于等于 C_1 ；转子一阶频率（min.freq. (X_D ））大于等于 C_2 ；常数 C_1 和 C_2 是与材料及运行条件有关的参数。

3.2 建立命令流

图 4 为基于 Optimus 的涡轮气动优化设计流程图。求解器“Ansys”用于对涡轮转子进行热-应力耦合分析；求解器“UG_Sta”及“UG_Rot”用于对静子及转子进行三维造型，以便生成计算域；求解器“Gambit”用于网格划分；求解器“Fluent”用于流场计算，并得出涡轮出口压力、温度、流量及转子力矩等；求解器“Matlab”用于计算涡轮功率及效率等。

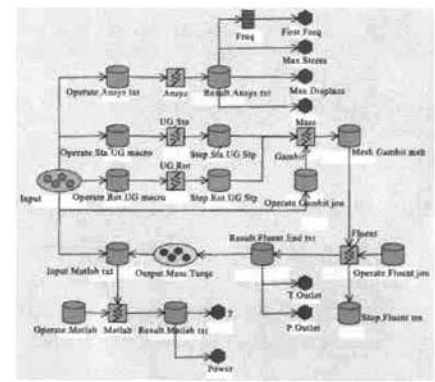


图 4 涡轮气动优化流程图

Fig.4 Flow chart of the aerodynamics optimization for a turbo

在优化计算之前，应对命令流文件进行必要的调试，以保证在设计变量变化时（特别是边界上）不会发生干涉、参数不匹配及命令不执行等情况。此外，还应对网格尺度、计算步长、差分格式及 Courant 数等进行匹配调试，以便在计算时间、精度及稳定性等方面得到平衡。

3.3 优化设计

首先采用试验设计方法（DOE）对优化目标进行计算。试验设计方法是一种设计空间探索技术，用来对设计空间进行初步探索，从而可以通过较少的试验次数，比较准确地反映出设计变量和目标函数的关系。根据取定的优化变量，采用正交试验设计方法构造出 $2^5=32$ 个计算试验样本点。

考虑到优化设计的计算规模，采用响应面模型（RSM）方法进行优化计算。图 5 为在 DOE 基础上设计的 RSM 计算值与试验样本点计算值分布图。其中，响应面模型的回归系数 $R_2^{\text{press}} \approx 0.965$ 。可以看出，该响应面模型的质量是比较高的。

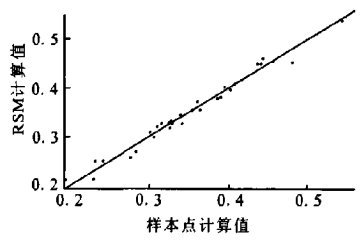


图 5 响应面模型

Fig.5 The response surface model

对该响应面模型，结合热-应力耦合计算的强度约束条件，采用自适应遗传算法进行优化计算，在设定的空间内进行了 6 次迭代（迭代过程如图 6 所示），得到最优叶型。

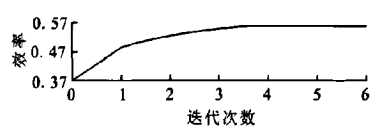


图 6 迭代过程

Fig.6 The iterative process

3.4 结果分析

对优化设计的叶型进行 CFD 及强度计算验证, 结果如表 1 所示。其中, 对优化前涡轮性能进行了归一化处理。

表 1 优化结果

Tab.1 The optimization results

项 目	优化前相对值	优化后相对值
等熵效率	1	1.05
出口压力	1	1.09
流 量	1	1.03
最大 von Mises 等效应力	1	0.87
一阶频率	1	0.96

图 7 为优化后静子与转子间相对速度的分布图。与优化前的相对速度分布图 (见图 3) 进行对比可以看出, 在转子非工作面的漩涡区明显减小, 减少了能量损失, 提高了涡轮的作功能力, 从而提高了涡轮效率。



图 7 静子与转子间相对速度的分布
Fig.7 Relative velocity distributions
between a stator and a rotor

从表 1 和图 7 可以看出, 对涡轮静子及转子

叶型用响应面模型法进行优化设计得到了较好的优化结果。从采用的三维造型技术, 响应面模型技术, 数值优化算法的通用性来看, 可知该方法对其他叶型选用不同的目标函数也同样具有通用性。

4 结束语

应用响应面方法结合多学科优化软件和 CFD 软件, 对涡轮静子和转子叶型进行优化设计, 可以在设计变量与目标函数的真实函数关系不可知的情况下, 以较少的计算量快速高效地获得设计变量和目标函数之间的近似响应关系, 从而迅速得到全局最优结果。通过优化设计, 可显著提高涡轮的性能。应该看到, 在优化设计过程中, 对于各个设计变量变化范围的确定, 以及选择哪些设计变量作为优化变量等, 还需要实际工程经验做参考; 对于流体和固体的耦合还需做进一步的研究。

参考文献:

[1] 杨敏官, 顾海飞, 刘栋, 等. 离心泵叶轮内部湍流流动的数值计算及试验[J]. 机械工程学报, 2006, 42(12): 180-185.

[2] 严俊峰, 陈炜. 高速复合叶轮离心泵多相位流动数值模拟[J]. 火箭推进, 2007, 33(1): 28-31.

[3] 李新宏, 何慧伟, 宫武旗, 等. 离心通风机整机通流流动数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(4): 453-456.

[4] 严俊峰, 陈炜. UG/Grp 技术在诱导轮三维设计中的运用[J]. 流体机械, 2005, 33(11): 40-42.

[5] 王庆林. UG/Open GRIP 实用编程基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[6] 叶先磊, 史亚杰. ANSYS 工程分析软件应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

(编辑: 马 杰)