

整体压气机转子结构优化设计

航空燃气涡轮研究所 雷先华* 江和甫 王旅生

【摘要】 以航空发动机整体压气机转子优化设计分析为工程背景,建立整体压气机转子的优化模型,选择重量最轻为目标函数,进行轴对称热弹塑性有限元分析,采用设计尺寸、局部应力、局部低循环疲劳寿命、轮盘破裂转速等约束函数,同时还在形状描述方式、自动分网、灵敏度分析、后处理接口等方面作了大量研究工作,在此基础上研制了整体压气机转子优化设计程序,并应用到实际压气机转子和涡轮盘优化设计,在满足强度和寿命要求的同时,转子重量有较大幅度下降。

主题词: 转子优化 压气机 结构设计

分类号: V235.113

1 建立整体转子的优化模型

在航空发动机中优化设计目前主要应用在单个轮盘上^[1,2],尚未见到有关整体转子优化设计的报导。现代高性能发动机的压气机大多采用整体焊接转子,对这类整体转子进行优化设计时,将其分成几个单盘分别进行优化是不符合实际情况的。一是从工程实用背景出发,对这种整体转子作优化设计,能较精确地反映盘鼓之间由于变形不协调产生的附加应力的影响。这种影响约为总应力的10%~20%,无疑对盘鼓的强度和低循环疲劳寿命是不可忽视的;二是在结构安排允许的情况下,鼓本身的优化也很重要;三是转子某些要求外形一致的部位得不到保证(如各盘中心孔大小一致等)。因此,有必要对其作整体优化。

整体压气机转子分为燕尾形轴向榫槽和环形榫槽两种结构形式。为简化问题,对环形榫槽转子采取与真实结构一致或基本一致的结构,只对其不甚关键的部位,如轮盘中心孔处的倒角等,作简化处理。对燕尾形轴向榫槽转子,除了对一些不重要的部位简化外,还将榫槽凸块去掉,视为外载荷。

在以上模型简化的基础上,以直线、圆弧、抛物线、三次样条曲线等相交、相切等方式对整体压气机转子进行形状描述,这样不仅能很真实地反映转子外形,而且还能有效地控制设计变量的数目。另一个关键问题是选择设计变量。本文充分考虑了转子的整体性及其外形的可变动性。在形状描述中,所有设计尺寸,如抛物线或样条曲线上某些控制点的坐标、直线的平移距离和转动角度、盘鼓等各种联接圆弧的半径、腹板喉部和根部厚度等,都可作为设计变量。实际上,设计变量的选择将直接影响到优化过程周期和优化结果的优劣。

2 目标函数、约束函数及优化方法

以转子的重量最轻为目标函数。计算转子重量采用 Romberg 数值积分方法。给出了分区

域积分和有限元积分两种形式供用户选择。分区域积分时,假定坐标系轴向为 Z 轴,径向为 R 轴,划分积分区域的原则是:每个区域 R 方向上的两条边线与 Z 轴平行(以利于确定该区域积分上下限 R_b, R_a), Z 方向的两条边线可分别由一个单一的函数式 $Z(R)$ 表示(如直线、圆弧、样条曲线表达式等)。假设在该区域积分限内的半径 R 处, Z 方向两边线的值分别为 $Z_1(R)$ 和 $Z_2(R)$, 则该区域的重量按下式计算:

$$G = \rho \int_a^b 2\pi |Z_1(R) - Z_2(R)| R dR$$

其中, ρ 为材料密度。将各积分区域的重量相加即为转子重量。

用有限元进行重量积分时,根据各个单元的具体形状将其划分为多个子积分域,各子域的积分方法同上,单元的每条边线都由该边线上的三个节点坐标用二次函数表示。重量计算后,目标函数按下式进行计算: $U = W/W_0$ 。其中, U 为目标函数, W 为该次计算的重量, W_0 为设计变量是初值时的转子重量(即第一次计算时的重量)。

根据经验,采用了以下几项约束条件: (1) 必须满足轮盘两种破裂强度指标; (2) 腹板和鼓筒必须在材料弹性范围内工作,以保证发动机正常运转; (3) 在转子型面突变和轮盘中心孔等应力集中严重的区域,允许局部进入材料屈服状态,但必须满足低循环疲劳寿命的要求。

根据(1),采用了轮盘周向破裂转速系数和喉部最大径向应力作为约束;根据(2),对转子进行了分析区域的划分,采用不允许屈服区域的最大等效应力作为约束;根据(3),采用局部区域低循环疲劳寿命(裂纹起始寿命)作为约束。同时,在程序中用户可以根据各自的设计准则,加入其它的约束函数。

采用了一轴对称热弹塑性有限元分析程序进行结构应力分析,它可提供各分析区域的等效应力、各应力分量、等效应变、各应变分量的最大值以及轮盘的周向破裂转速系数。因此可方便地进行(1)、(2)两项约束。根据该程序提供的寿命约束区域的分析数据,可用以下公式进行寿命计算^[3],详细推导见文献[4]。

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon / 2 &= (\sigma' / E) (1 - \sigma_a / \sigma') (2N_f)^b + \epsilon' (2N_f)^c \\ \Delta \epsilon &= (3.5 / E) (\sigma_b - \sigma_m) N_f^{0.2} + D^{0.6} N_f^{0.6} \end{aligned}$$

本文采用 4 种罚函数(外点法、内外点混合法、Powell 法、Schuldt 法)与 5 种无约束优化方法(DFP 变尺度法、Powell 直接搜索法、单纯形法、Hooke and Jeeves 直接搜索法、随机探索法)相匹配产生的 20 种方法组成优化包,供用户进行自由选择。通过几个盘和转子的形状优化算例可知, Powell 罚函数加 H. & J. 直接搜索法是最有效的,它对几个算例都无一例外地收敛到最优解,而其它方法都曾出现诸如振荡、模型严重畸变等问题。

3 程序设计、优化实例

采用标准 FORTRAN77 语言编制了整体压气机转子优化设计程序(GCRODP-1.0)。程序采用模块化设计,共 5 个模块: (1) 优化模块, (2) 建模模块, (3) 自动分网模块, (4) 有限元分析模块, (5) 目标函数和约束函数计算模块。程序在配备了标准 FORTRAN77 编译系统的 VAX8350、SGI340 工作站、DEC 系列工作站、SGI INDIGO 工作站上均运行通过。

此外,还设计了与 I-DEAS、ANSYS 等大型有限元分析程序的专用接口,可以很方便地用 I-DEAS 作前处理以及实时后处理,用 ANSYS 作验算、分析。算例表明,程序能很好地跟踪转子优化的全过程,其应力分析结果与 ANSYS 程序计算结果相差不到 1%。

对某发动机的四级压气机转子作了优化计算,该转子是一个带环形榫槽的整体焊接转子,计算模型侧重于对各级盘的优化。在优化前主要作了以下工作:(1)根据各级盘鼓设计图纸所提供的数据建立工程模型;(2)选择了 22 个设计变量,将转子划分为 18 个分析区域,75 个重量积分区域;(3)对转子进行形状描述,建立起优化模型;(4)对鼓筒、腹板等不允许屈服的大面积区域,实施最大等效应力约束;(5)对轮缘与鼓筒、鼓筒与腹板的连接区以及轮毂等有应力集中的区域,实施低循环疲劳寿命约束;(6)考虑到轮盘的径向破裂模式,在各盘的喉部区域,实施最大径向应力约束;(7)对各盘实施周向破裂转速系数约束。

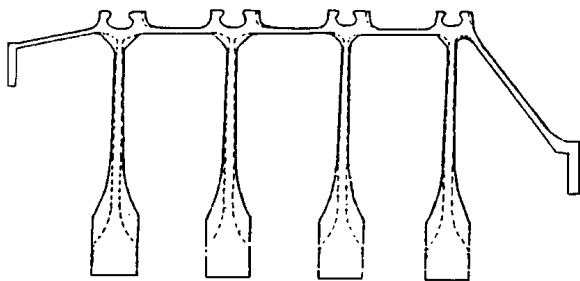


图 1 四级压气机转子优化前后型面对比

在以上几项工作的基础上,我们在 SGI 和 INDIGO 工作站上作了优化计算,取得了最优解。(1)从图 1 中可见优化前后(--- 优化前型面, — 优化后型面)转子型面有较大改变;(2)优化后减重达 12.61 kg,净减重为 26.7%;(3)优化后,转子最大等效应力下降了 5.2%。且整个转子应力分布更为均匀;(4)优化后,转子寿命升高了 46.6%,且各区寿命分布更为均匀;(5)优化后,各盘周向破裂转速系数和喉部最大径向应力都符合要求;(6)优化后,转子变形的最大值降低了 0.8%。

参 考 文 献

- 1 肖陵,林秀荣,马枚. 航空发动机结构优化. 北京航空航天大学出版社, 1991
- 2 Tsu- Chien Cheu. Procedures for Shape Optimization of Gas Turbine Disks. ASME 90- GT- 281
- 3 吕文林. 航空发动机强度计算. 北京: 国防工业出版社, 1988
- 4 雷先华. 整体压气机转子优化设计: [学位论文]. 燃气涡轮研究所, 1995

(责任编辑 王震华)

A COMPARATIVE TEST APPROACH FOR THERMAL FATIGUE LIFE OF HIGH- HEAT BLADE UNDER THERMAL SHOCK

Peng Zhiyong and Lu Wenlin

(7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT

A new comparative test approach is provided for the thermal fatigue life experiments of turbine blade under thermal shock. The tested blades and reference blades were mounted in a common vane cascade. Moreover, the position of these two kind of blade will be swapped each other regularly during the experiment. A group of comparative tests has been completed by this way for turbine nozzle blades made from analogue materials. The test results show that the approach is reliable, and the test cost is cut down greatly.

Key Words Blades Turbines Thermal fatigue Thermal shock tests

MULTISCALE EIGENSYSTEM ASSIGNMENT FOR VIBRATION CONTROL OF FLEXIBLE STRUCTURES

He Erming and Chen Xinhai

(7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT

A method of multiscale eigensystem assignment is presented for vibration suppression of flexible structures. The method can alter the original modes by appropriate feedback forces, so that the sensitive parts of the flexible structure reach their steady states at faster rates than other parts, while vibration in sensitive parts is reduced to allowable level. The new control scheme can quickly remove the vibration energy from the sensitive parts of the flexible structure to meet the requirements of high performance. By selecting a model transformation matrix T in Eq (1), the vibration energy of the controlled system is redistributed over the sensitive and insensitive parts. The resulting active damping control gain is $K_2 = (T^{-1})^T G_2 T^{-1}$, where the elements of G_2 are solved from the ideal characteristic equations (5), in which $(n^2 - 3n + 2) / 2$ elements of G_2 are determined artificially. Finally, a simple example demonstrates the effectiveness of this new control scheme.

Key Words Flexible structure Vibration Control problems

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF AN INTEGRATED COMPRESSOR ROTOR

Lei Xianhua, Jiang Hefu, Wang Lushang

(Aero. Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500)

ABSTRACT

An optimization model in the integrated compressor rotor of gas turbine engine is built up. The minimum weight is selected as objective function. The stress is analysed by Axisymmetric Cyclic Thermal Elastic - Plastic - Creep Finite Element Method. The structural size, local static strength, local low-cycle-fatigue life, and disc burst speed are used as constraints. At the same time, the configuration method, automatic meshing, mesh checking, sensitivity analysis, and post-processing interface are studied. Finally, an Integrated Compressor Rotor Optimal Design Program (ICRODP) is worked out. A rotor has been analysed by this program with success. The weight is decreased significantly to meet the requirements of the strength and the low-cycle-fatigue life for the rotor.

Key Words Compressors Rotors Optimization Structural design