

基于 ANSYS 的二维发动机 风扇盘结构应力分析方法研究

叶惠娟, 黄致建

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要:为了提高发动机风扇盘二维有限元模型应力分布的精确度,选择典型的三辐板结构,利用 ANSYS 12.0 完成三辐板风扇盘三维结构的有限元建模.同时建立三辐板风扇盘的二维轴对称有限元模型,将非轴对称载荷分解成傅里叶级数,并求解了其径向应力、周向应力和等效应力,对比了传统的二维分析、非轴对称加载二维与三维分析的结果.结果表明:施加均布载荷的二维模型应力分布与三维模型的应力分布情况相差较远,施加非轴对称载荷的二维模型的应力分布与三维模型的应力分布情况较为接近.与只施加均布载荷的方法相比,本方法提高了发动机风扇盘二维有限元模型应力分布的准确性.

关键词:风扇盘;有限元建模;应力分布;非轴对称载荷;傅里叶级数

中图分类号:V232.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.016

Stress analytical method research of 2D engine fan disk structure based on ANSYS

YE Hui-juan, HUANG Zhi-jian

(College of Mechanical & Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Typical three-wheel disk structure was chosen in order to improve the accuracy of the stress distribution of 2D finite element model of the engine fan disk. Three-wheel fan disk structure of 3D finite element modeling was completed by using ANSYS 12.0. And the three-wheel fan disk of 2D axisymmetric finite element model was established. The non axisymmetric load was decomposed into Fourier series. Solution of radial stress, circumferential stress and equivalent stress was done subsequently. Compared with typical 2D analysis load, 2D non axisymmetric load and 3D analysis load show that the stress distribution of 2D model applying the uniform load is far away from the stress distribution of 3D model, and the stress distribution of 2D model applying the non axisymmetric load was close to the stress distribution of 3D model. Compared with applying the uniform load, this method can improve the accuracy of the stress distribution of 2D finite element model of the engine fan disk.

Key words: fan disk; finite element model; stress distribution; non-axisymmetric load; Fourier series

收稿日期:2014-02-28

作者简介:叶惠娟(1988—),女,福建省漳州市人,华侨大学硕士研究生,主要研究方向为计算机辅助设计与工程.

通信作者:黄致建(1954—),男,福建省泉州市人,华侨大学研究员,主要研究方向为工程机械设计与控制、计算机辅助设计与工程(CAD/CAE)、现代设计理论与方法.

0 引言

压气机作为航空发动机的三大部件之一,其先进性决定了航空发动机的性能.在大涵道比航空发动机的压气机盘零件中,风扇盘的设计难度最大,结构也日趋复杂,这主要是因为风扇叶片广泛采用宽弦叶片以提高性能,致使风扇盘轮缘很宽、质量增加,从而影响整台发动机的推重比.风扇盘是转子的主要构件,其高速旋转具有如下几个作用:固定叶片,承受来自叶片的离心载荷;连接低压轴,使其驱动风扇旋转;吸收冲击载荷;连接进气锥和其他部件^[1].

目前,已有一些关于风扇盘结构的研究.文献[2]介绍了CFM56-7发动机采用双辐板风扇盘的结构.文献[3]介绍了三辐板和四辐板的结构形式.文献[4]以专利的形式提出了一种三辐板风扇盘的结构.文献[5]对航空发动机多辐板风扇盘进行拓扑优化分析,得到了两种三辐板、四辐板形式的新型风扇盘结构,以及相对于单辐板,多辐板风扇盘质量有所减少的结论.文献[6]对典型风扇盘施加均布载荷和最大工作转速,以盘心最大周向应力、子午面平均周向应力、圆柱面最大平均径向应力和盘心最大等效应力为状态变量,分别进行单辐板风扇盘和多辐板风扇盘结构优化设计.上述研究主要在有限元分析的基础上,施加轮缘均布载荷和最大工作转速加以分析.但是这种加载方式是否能满足实际工作中的风扇盘的要求,至今未见详细报道.

三维分析方法简单直观,但计算精度与网格等分数关系密切,对三维进行优化分析难以实现.二维分析方法建模简单,但其加载分析结果与三维分析存在一定的差别,提高二维分析结果的精确度,可提高二维优化分析的准确性.本文拟采用典型的三辐板风扇盘,基于ANSYS平台,采用APDL编程对三辐板风扇盘进行三维参数化建模.同时建立三辐板风扇盘二维轴对称有限元模型,分析施加均布载荷与三维风扇盘应力分析结果的区别.

1 风扇盘的三维有限元模型

以典型的三辐板风扇盘为例,根据风扇盘的工作原理,建立风扇盘的有限元模型.由于叶片在轮盘上的布局是循环对称的,所以风扇盘的几何形状、载荷条件及边界条件都满足对称条件.任取1个叶片与轮盘进行接触计算,采用周期对称模型进行

强度分析.叶片数为22,即采用1/22模型求解,三维风扇盘模型扇形段如图1所示.

采用20节点6面体三维单元solid186建立三辐板风扇盘的循环对称模型,并以循环对称方法进行计算,对三辐板风扇盘施加轴向约束、离心载荷和叶片工作时所受的气动力,并求解,最终得到三辐板风扇盘的周向应力分布,如图2所示.

通过后处理分析,选取三维三辐板风扇盘盘体作为分析对象,其有限元模型如图3所示.将图3所示的盘体在周向上分成15个大小相同的扇区,盘体上端面可得到16条节点弧线和624个节点,每条节点弧线上都有39个节点,风扇盘周向应力分布如图4所示.从ANSYS 12.0通用后处理模块结果列表输出命令下,提取各节点在周向坐标的受力数值,分别做出周向各线上节点受力特征曲线,如图5所示.

由图5可知,风扇盘周向所受的载荷并非均布载荷,而是类似正弦分布函数曲线.其公式如下:

$$f = A \sin(22\theta)$$

其中, f 为风扇盘各节点的周向载荷; A 为风扇盘周向各线上节点的峰值,采用Origin 8拟合数据,取数值 $A = 220$; θ 为周向角度,用弧度表示.

2 二维风扇盘应力分析

二维轴对称结构可以用1个平面(X, Y)有限元

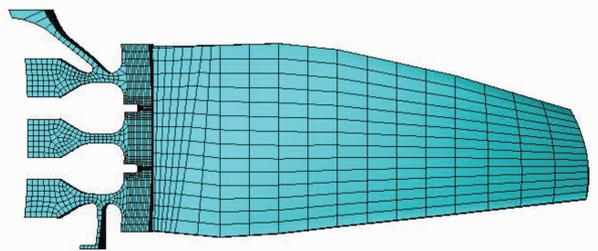


图1 三维三辐板风扇盘扇形段有限元模型

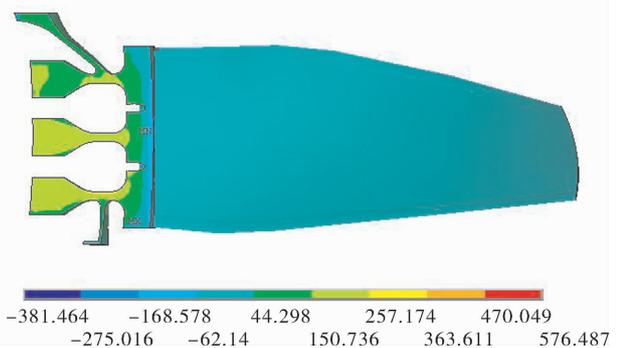


图2 三辐板风扇盘周向应力云图

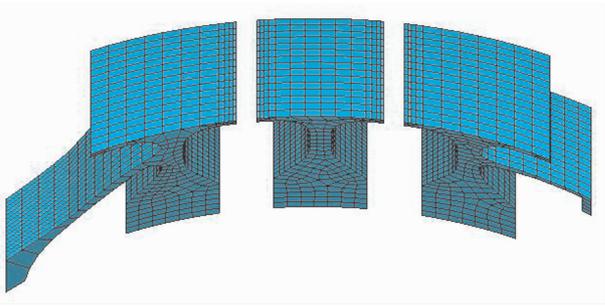


图3 三辐板风扇盘盘体有限元模型

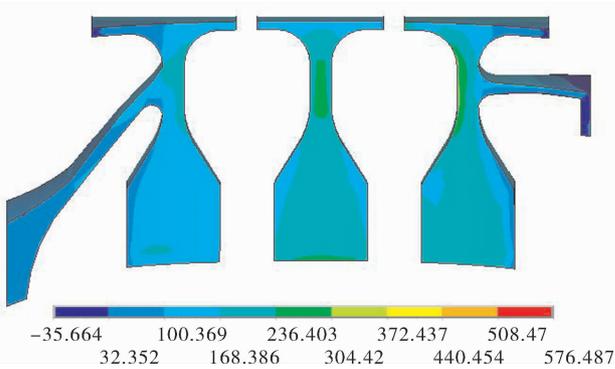


图4 三辐板风扇盘盘体的周向应力云图

模型表示,相比于三维有限元模型,二维模型的使用可大大减少建模和分析的时间. ANSYS 12.0 提供了一种特殊的轴对称结构——谐单元,主要有 PLANE25, PLANE75, PLANE78 和 PLANE83 等单元类型. 这种单元允许施加非轴对称载荷,该种载荷通常被定义为一系列的调和函数(傅里叶级数). 例如函数定义为

$$F(\theta) = A_0 + A_1 \cos\theta + B_1 \sin\theta + A_2 \cos 2\theta + B_2 \sin 2\theta + A_3 \cos 3\theta + B_3 \sin 3\theta + \dots$$

以上级数的每一项必须定义为一个单独的载荷步.

根据风扇盘三维形状,得到了风扇盘二维主要参数:盘外缘半径为 116 mm,盘内径为 45 mm,轮缘宽度为 133 mm,轮盘转速为 8 181 r/min,盘外缘分布载荷依据三维风扇盘提取结果. 模型材料选用 TC4 合金,其弹性模量 $E = 1.09 \times 10^5$ MPa,抗拉强度 $\sigma_b = 890$ MPa,屈服强度 $\sigma_{0.2} = 825$ MPa,线膨胀系数 $EMIS = 9.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,泊松比 $\mu = 0.3$,密度 $\rho = 4.44 \times 10^3$ kg/m³.

用 ANSYS 12.0 单元库中的 PLANE25 单元对二维模型进行网格划分,如图 6 所示. 该单元为二维 4 节点谐单元,可用于非轴对称载荷下轴对称问题的分析. 根据三维风扇盘周向分布情况,风扇盘轮缘载荷沿周向的分布可表示为

$$f(\theta) = 220 \sin(22\theta) \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

因此,可将上式展开为傅里叶级数:

$$f(\theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n>0} \left(a_n \cos\left(\frac{2n\theta}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\theta}{T}\right) \right)$$

其中, $T = \frac{2\pi}{22} = \frac{\pi}{11}$; $a_0 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(\theta) d\theta = \frac{2 \times 220}{\pi}$;

$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(\theta) \cos(n22\theta) d\theta$, 所以

$$\begin{cases} a_{2n} = \frac{-2 \times 220}{\pi((2n)^2 - 1)} \\ a_{2n+1} = 0 \end{cases}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(\theta) \sin(n22\theta) d\theta$$

所以

$$\begin{cases} b_1 = \frac{220}{2} = 110 \\ b_n > 1, b_n = 0 \end{cases}$$

在风扇盘的轮缘上,耦合径向位移自由度. 根据三维风扇盘轮缘应力分布规律,对二维风扇盘施

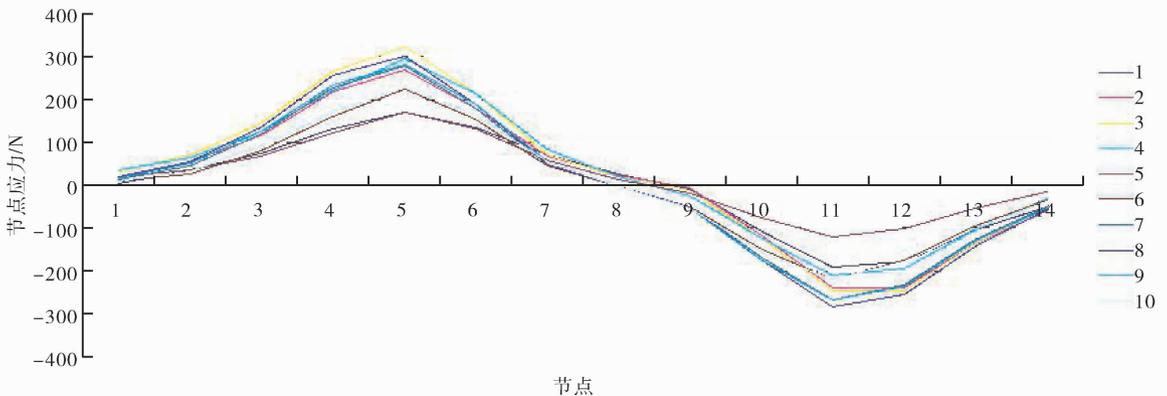


图5 三辐板风扇盘周向节点受力特征曲线

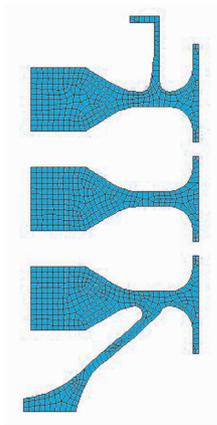


图6 三辐板风扇盘二维有限元模型

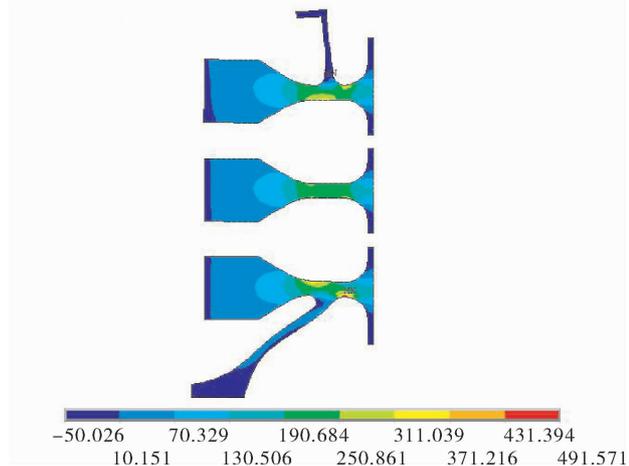


图7 三辐板风扇盘二维径向应力云图

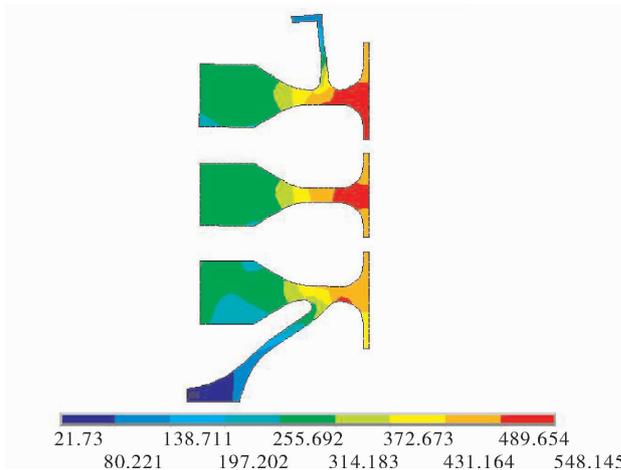


图8 三辐板风扇盘二维周向应力云图

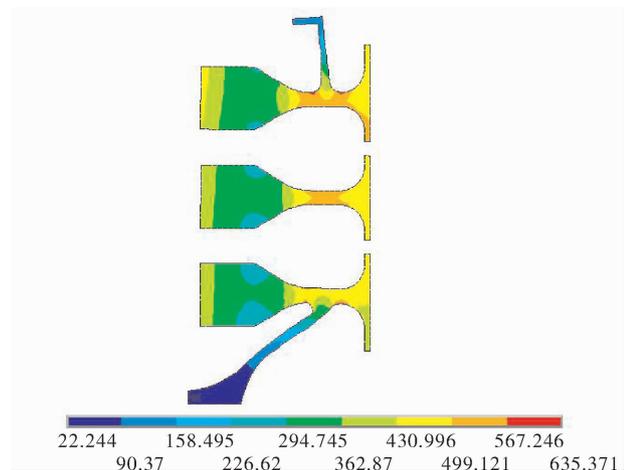


图9 三辐板风扇盘二维等效应力云图

加径向力. 周向应力根据傅里叶级数分解, 使用MODE命令, 取傅里叶级数前两项对二维风扇盘施加周向应力, 每一项定义为一个载荷步, 共生成4个载荷步文件, 求解, 完成二维分析. 应用ANSYS 12.0软件的后处理功能对二维分析的结果进行叠加处理, 可以很方便地得到轴对称体的二维分析结果. 其径向应力分布、周向应力分布和等效应力分布如图7—图9所示.

非对称载荷条件下的二维分析和三维分析结果比较发现, 两者径向应力、周向应力和等效应力的最大应力结果相差不大, 且最大最小值出现的位置相同. 表1列出了传统的二维分析结果(只加均布载荷)和非轴对称加载二维分析结果与三维分析结果的对比.

由表1可知, 当二维风扇盘的径向应力满足三维风扇盘应力要求时, 二维风扇盘的周向应力和等效应力与三维风扇盘存在差别. 对于施加非轴对称载荷的风扇盘, 其径向应力、周向应力和等效应力的

表1 不同的二维加载方式分析与三维分析结果对照表

分析方法	径向最大值	周向最大值	等效应力最大值
传统二维分析	479.5	276.3	408.1
非轴对称加载二维分析	491.6	548.1	635.4
三维分析	479.1	576.5	628.9

最大与三维风扇盘应力最大值相差不大. 而对于风扇盘的优化, 常与盘心最大周向应力和盘心最大等效应力联系, 所以合理的风扇盘周向应力分布和等效应力分布, 可提高风扇盘的优化品质.

3 结论

本文采用典型的三辐板风扇盘, 基于ANSYS平台, 采用APDL编程对三辐板风扇盘进行三维参数化建模, 同时建立三辐板风扇盘二维轴对称有限元模型, 分析施加均布载荷与三维风扇盘应力分析结

(下转第99页)

域的应用提供了有效的技术支持。

参考文献:

- [1] 杨新华,王用玺,刘欣.基于FPGA的以太网高速数据传输系统的设计[J].仪表技术与传感器,2013(12):80.
- [2] 王国法,刘炜,段明玮.基于嵌入式系统的以太网通信开发[J].光通信技术,2012(4):36.
- [3] 徐海军,刘金刚,王益华.基于ARM核的嵌入式TCP/IP协议栈简化实现[J].计算机应用研究,2006,23(10):251.
- [4] 王鹏,姚明眸,鲍民权.基于FPGA的航空全双工以太网交换芯片[J].计算机工程,2008,34(23):261.
- [5] Yang H C, Wang F, Zhang J J, et al. Design of embedded tri-mode ethernet based on FPGA [J]. Computer Engi-

neering, 2007(15):139.

- [6] 李硕.基于FPGA的SOPC嵌入式系统设计技术的研究与应用[D].北京:北京工业大学,2012.
- [7] 赵星星,罗克露,张军,等.嵌入式实时操作系统移植技术的研究与应用[J].计算机工程,2007(17):90.
- [8] Labrose J J. 嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ [M]. 2版. 邵贝贝,译.北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [9] 黄布毅,刘国梅,郑安平,等.嵌入式家庭网络中央控制器的开发[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2004,19(2):41.
- [10] 杨威.基于FPGA的以太网和串口数据传输系统设计与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [11] 张志刚.FPGA与SOPC设计教程/DE2实践[M].西安:西安电子科技大学出版社,2007.

(上接第80页)

果的区别.将施加均布载荷的三辐板与实际模型三辐板进行对比,发现施加均布载荷的二维模型应力分布与三维模型的应力分布情况相差较远,施加非轴对称载荷的二维模型的应力分布与三维模型的应力分布情况较为接近.与只施加均布载荷的方法相比,本方法提高了发动机风扇盘二维有限元模型应力分布的准确性.

参考文献:

- [1] 刘长福,邓明.航空发动机结构分析[M].西安:西北

工业大学出版社,2006:60-78.

- [2] 陈光.CFM56系列发动机结构设计与研究特点[M].北京航空航天大学出版社,2006:38-40.
- [3] 陈光.用于波音787客机的GENx发动机设计特点[J].航空发动机,2010,36(1):1.
- [4] Forrester J M. Circular arc multi-bore fan disk[P]. US Patent:6520742B1,2003-02-18.
- [5] 宋健.多辐板风扇盘拓扑优化方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.
- [6] 李伦未,陆山.基于ANSYS的多辐板风扇盘结构优化设计技术[J].航空动力学报,2011,26(10):2245.