

文章编号:1000-8055(2011)10-2245-06

基于 ANSYS 的多辐板风扇盘结构 优化设计技术

李伦未, 陆 山

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 基于 ANSYS 优化平台,建立了风扇盘子午面优化设计模型,筛选了主要的优化设计变量. 针对典型风扇盘设计问题,分别进行了单辐板及多辐板结构优化设计. 结果表明,在满足轮盘变形、强度要求的条件下,多辐板风扇盘比单辐板风扇盘可明显减轻质量,并且其应力分布更为均匀,说明对于轮缘较宽的风扇盘,多辐板轮盘结构具有明显优越性. 同时,多辐板轮盘结构还有利于增强轮缘弯曲刚度.

关 键 词: 多辐板风扇盘; 结构优化设计; ANSYS 设计优化; 应力安全系数; 有限元分析

中图分类号: V232.3

文献标志码: A

Structure optimum design techniques for multi-web fan disk based on ANSYS

LI Lun-wei, LU Shan

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: An optimum design model was established and main optimum design variables were chosen for fan disks based on ANSYS optimization platform. A typical fan disk structure was designed optimally by use of single-web and multi-web disk respectively. The results show that the weight of multi-web disk is much smaller than that of single-web disk, while both the deformation and strength requirements are satisfied, and the stress distribution of the former is more uniform. Generally, the multi-web has an evident advantage for the fan disk with wide rim. Moreover, multi-web fan disk is beneficial to increasing the rim's bending stiffness.

Key words: multi-web fan disk; structure optimum design;
ANSYS design optimization; stress safety factor;
finite element analysis

由于风扇叶片长而宽,导致轮盘轮缘很宽,所以采用单辐板轮盘很难减轻质量,从而影响航空发动机的推质比. 根据文献[1-6]可知,国外发动机,如 CFM56-7^[1-2],F119^[1,3]等,其第一级风扇采用了双辐板轮盘结构,Trent1000^[1,4],GE90^[1,5-6]等采用了三辐板轮盘结构,而 GE90-115B^[1,5]更

是采用了四辐板轮盘结构. 采用多辐板轮盘结构是减轻风扇盘质量的有效方式之一.

本文基于 ANSYS 优化平台,以风扇盘的减质作为优化目标,以轮盘设计准则^[7-8]所规定的关键应力约束作为状态变量,选出若干确定轮盘子午面形状的关键尺寸参数作为设计变量,利用

收稿日期:2010-10-29; 修订日期:2010-12-14

作者简介:李伦未(1986-),男,重庆巫山人,硕士生,主要从事航空发动机零件结构优化设计方法研究.

ANSYS 参数化设计语言 (APDL)^[9-10] 编制风扇盘优化设计程序,并以典型风扇盘为例,分别进行单辐板和多辐板结构的风扇盘优化设计分析,以说明多辐板风扇盘结构的优势,以及多辐板风扇盘结构优化设计的方法技术。

1 风扇盘设计模型及方法

风扇盘优化设计是建立在 ANSYS 有限元分析的基础上的。在进行轮盘结构方案设计时,由于不涉及结构细节,可将风扇盘简化为一个轴对称模型,即重点考虑其子午面的形状优化。典型单辐板和多辐板结构形式的风扇盘,其子午面轮廓分别如图 1、图 2 所示。轮缘和轮毂采用直线描述,辐板轮廓采用直线和圆弧来描述。根据对称性,单辐板风扇盘可取 1/2 模型进行分析,而双辐板风扇盘可取 1/4,三辐板风扇盘可取 1/6,以此类推。亦即,将多辐板风扇盘看成是由几个形状相同的单辐板风扇盘组合而成,并对单辐板风扇盘进行结构优化设计,最后再将其扩展成一个多辐板风扇盘。

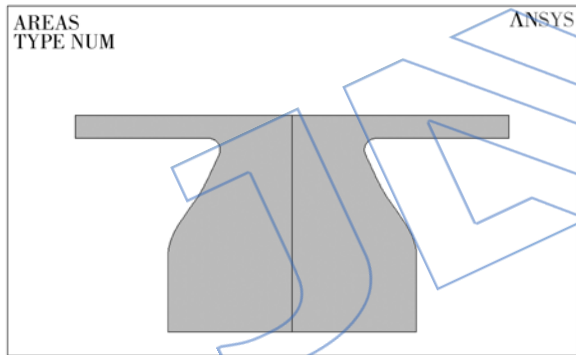


图 1 典型单辐板风扇盘子午面轮廓图

Fig. 1 Profile of single-web fan disk's meridian plane

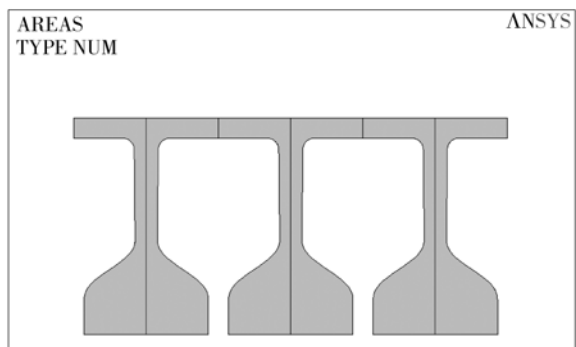


图 2 典型多辐板风扇盘子午面轮廓图

Fig. 2 Profile of multi-web fan disk's meridian plane

典型风扇盘子午面的特征尺寸如图 3 所示。图中各符号所表示的含义见表 1。其中,已知尺寸包括盘内半径、盘外半径、轮缘宽及轮缘厚。由于把风扇盘轮缘刚化处理,如果将轮缘厚作为优化设计变量,则对于以减质作为优化目标的问题,其总是趋向于相应约束区间的下限值,故将其视为已知尺寸(本文暂取 $H_o=8\text{ mm}$)。

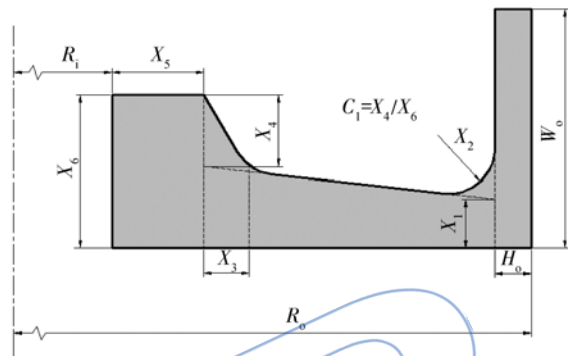


图 3 典型风扇盘子午面特征尺寸图

Fig. 3 Characteristic dimensions of fan disk's meridian plane

表 1 典型风扇盘子午面特征尺寸含义表

Table 1 Characteristic dimensions of fan disk's meridian plane

已知尺寸		待定尺寸及参数	
R_i	盘内半径	X_1	辐板顶部宽
R_o	盘外半径	X_2	轮缘至辐板过渡段的导圆半径
W_o	轮缘宽	X_3	轮毂至辐板过渡段的径向长度
H_o	轮缘厚	X_4	轮毂宽与辐板底部宽之差
		X_5	轮毂厚
		X_6	轮毂宽
		C_1	比例系数: X_4/X_6

根据风扇盘子午面的形状特点,选择辐板顶部宽、辐板底部宽(本文用比例系数 C_1 来表征)、轮缘至辐板过渡段的导圆半径、轮毂至辐板过渡段的径向长度、轮毂宽及轮毂厚作为主要优化设计变量。

除主要几何尺寸约束以外,约束条件主要考虑使风扇盘具有足够的应力储备^[7-8],它综合反映了防止多种失效模式出现的要求,是众多影响因素的综合性能指标,在轮盘结构设计时应予以首先满足。所选的约束应力包括:①盘内径处周向应力;②子午面平均周向应力(与轮盘子午面破裂转

速储备一致);③圆柱面最大平均径向应力(与沿圆柱面破裂转速储备一致).此外,还应考虑轮盘的最大等效应力约束,盘心最大等效应力可按安全系数 1.25 约束.各约束应力对应的安全系数见表 2.

表 2 各约束应力对应的安全系数下限
Table 2 Safety factors of constrained stresses

约束应力	符号	安全系数下限
盘心最大周向应力	N_{in}^s	1.25
子午面平均周向应力	N_{mp}^s	1.25
	N_{mp}^b	1.54
圆柱面最大平均径向应力	N_{cp}^s	1.25
	N_{cp}^b	1.54
盘心最大等效应力	N_{eqrin}^s	1.25

注:上标 s 表示按屈服强度 σ_s 约束,上标 b 表示按极限强度 σ_b 约束.

综上所述,风扇盘子午面形状的优化问题可用如下数学模型^[11]来描述:

$$\begin{aligned} \min V &= f(X_1, \dots, X_n) \\ \text{s. t. } \begin{cases} X_i^l \leq X_i \leq X_i^u, & (i = 1, 2, \dots, p) \\ N_j = \frac{\sigma}{\sigma_j} \geq N_j^{\text{cr}}, & (j = 1, 2, \dots, q) \end{cases} \end{aligned}$$

其中 V 为目标函数; X_i 为设计变量, X_i^l 和 X_i^u 分别表示设计变量的下限和上限; σ_j 为约束应力, σ 表示材料的屈服强度 σ_s 或极限强度 σ_b , N_j 和 N_j^{cr} 分别表示按屈服强度或极限强度约束时的应力安全系数及其下限.对于本文算例, $p = 6$, $q = 6$.

ANSYS 优化设计模块提供了两种优化方法^[9-10]:零阶方法不需计算设计变量的导数,它首先利用最小平方拟合来建立目标函数、状态变量关于设计变量的逼近,然后通过对目标函数的逼近添加罚函数将约束优化问题转化为无约束优化问题,进而采用 SUMT(sequential unconstrained minimization technology)法寻优^[11];一阶方法基于设计灵敏度,需计算相关变量的梯度以确定搜索方向,并通过对目标函数添加罚函数将约束优化问题转化为无约束优化问题,进而采用线性搜索来寻优^[11].本文首先采用零阶方法在全局设计空间进行粗略优化,然后再采用一阶方法在局部设计空间进行细致优化,直到找到最满意的解.

利用 ANSYS 平台进行风扇盘结构优化设计

计,首先必须基于 ANSYS 的 APDL 建立优化循环所用的风扇盘应力分析命令流文件,它包括一个完整的分析过程,即:定义描述风扇盘子午面形状的几何尺寸参数(设计变量)并建立参数化几何模型、进行有限元应力分析、提取约束应力安全系数(状态变量)及体积(目标函数)并赋给相应的参数.在此基础上,运用 ANSYS 的 /OPT 优化设计模块进行优化分析,其流程如图 4 所示.在优化分析过程中,需要不断考察设计序列结果,如果不能满足设计要求,则应返回调整设计变量的约束区间,重新进行优化分析,直到找到满意的解集;如果仍不能满足设计要求,则应返回考查风扇盘的几何设计参数、所选材料及载荷条件等,进行必要修改后再重新进行优化分析.

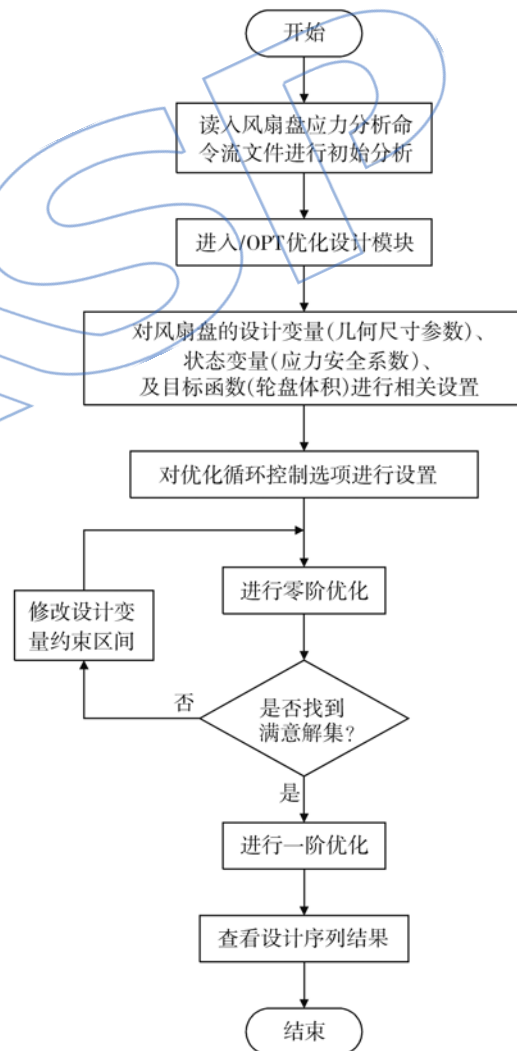


图 4 基于 ANSYS 平台的风扇盘结构
优化设计框图

Fig. 4 Flow-chart of structure optimum design of fan disks based on ANSYS platform

2 算例分析

以典型风扇盘设计为例,给定的设计分析条件包括轮盘内外径、轮缘宽度、轮缘载荷及最大工作转速,见表 3. 风扇盘的温度场按 70℃ 均布温度给定.

轮盘材料选为 TC11^[12-13],采用轴对称模型进行弹性应力分析. 在盘的轮缘上,耦合径向位移自由度. 计算子午面平均周向应力时,在子午面上按单元面积进行应力平均;计算圆柱面最大平均径向应力时,按一定的间距沿轮盘径向选取若干个截面,在每个截面上建立路径并按路径进行应力平均.

表 3 某典型风扇盘的设计分析条件
Table 3 Design conditions of a classic fan disk

参数	给定值
盘内半径/mm	75
盘外半径/mm	150
轮缘宽度/mm	150
轮缘均布载荷/MPa	112.5
最大转速/(r/min)	10 980

根据前述方法,建立了基于 ANSYS 平台的轮盘优化程序. 经过优化分析,得到单辐板及多辐板风扇盘的优化设计结果,见表 4.

表 4 单辐板和多辐板风扇盘的优化设计结果
Table 4 Optimum results of single-web and multi-web fan disks

参数	符号	单辐板盘	双辐板盘	三辐板盘	四辐板盘
辐板顶部宽/mm	X_1	23.051	6.0796	3.9058	2.7700
轮缘至辐板过渡段的导圆半径/mm	X_2	2.6022	6.5229	6.0546	4.2406
轮毂至辐板过渡段的径向长度/mm	X_3	41.119	30.950	10.985	32.515
比例系数	C_1	0.99786	0.18186	0.18327	0.17707
轮毂厚/mm	X_5	18.287	15.300	12.000	9.3087
轮毂宽/mm	X_6	43.815	26.985	21.291	15.897
盘心最大周向应力安全系数	N_{rm}^s	1.3439	1.3479	1.3524	1.2851
子午面平均周向应力安全系数	N_{mp}^s	1.7520	1.5693	1.5080	1.4527
	N_{mp}^b	2.1195	1.8986	1.8243	1.7574
圆柱面最大平均径向应力安全系数	N_{cp}^s	2.6711	1.2719	1.3283	1.2721
	N_{cp}^b	3.2314	1.5388	1.6069	1.5389
盘心最大等效应力安全系数	N_{eqrin}^s	1.2500	1.2517	1.2510	1.2512
总体积/ 10^6 mm^3	V_t	4.3997	3.6729	3.4669	3.3322
总质量/kg	M_t	19.7106	16.4545	15.5319	14.9281

由表 4 可知,各风扇盘的盘心最大等效应力安全系数都在 1.25 左右(为该应力安全系数的下限值),说明盘心最大等效应力是制约风扇盘减质的最主要因素. 在满足给定的几何、变形及强度约束的条件下,双辐板、三辐板和四辐板风扇盘分别比单辐板风扇盘减轻了 16.51%, 21.20% 和 24.26%.

单辐板和三辐板风扇盘的等效应力分布分别如图 5、图 6 所示. 由图可知,为满足盘心的强度要求,单辐板风扇盘的轮毂宽度很大,导致轮盘很

重;而多辐板风扇盘单个辐板的轮毂宽度大大减小,使应力分布更为均匀,正因如此,其质量较单辐板风扇盘有较大改善.

另外,当辐板增加至 4 个时,轮盘质量相对三辐板盘仍有所降低,但降幅仅为 3.89%;同时,轮毂各个辐板之间的间距很小,如果采取将整体锻件机械加工^[14]成多辐板风扇盘,则会造成加工困难;而如果采用将各个独立的单辐板轮盘焊接成一个整体多辐板轮盘^[14],则对整盘焊接工艺有较高的要求,不仅要保证焊接强度,同时要保证各

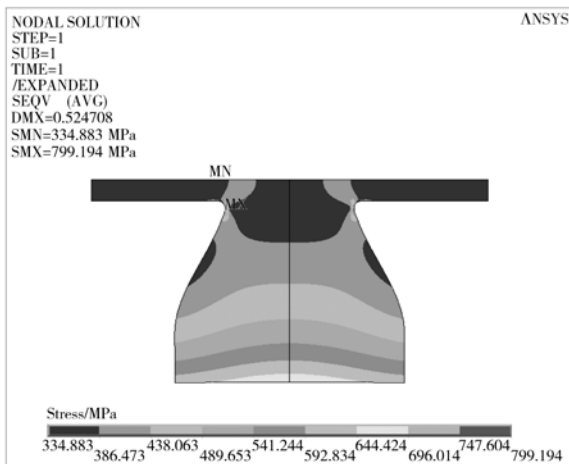


图 5 单辐板风扇盘等效应力分布图

Fig. 5 Hoop stress distribution of single-web fan disk

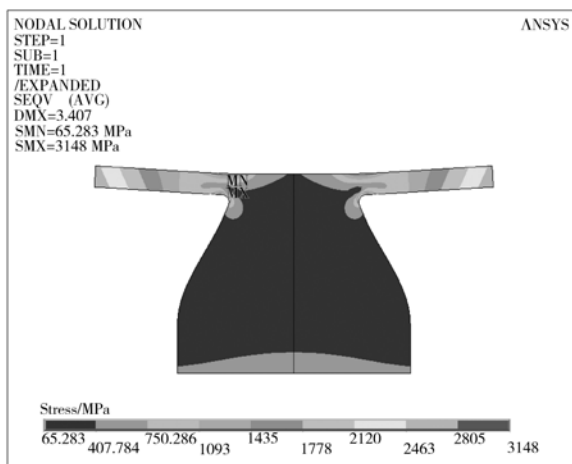


图 7 解耦后的单辐板风扇盘等效应力分布图

Fig. 7 Hoop stress distribution of single-web fan disk after decoupling

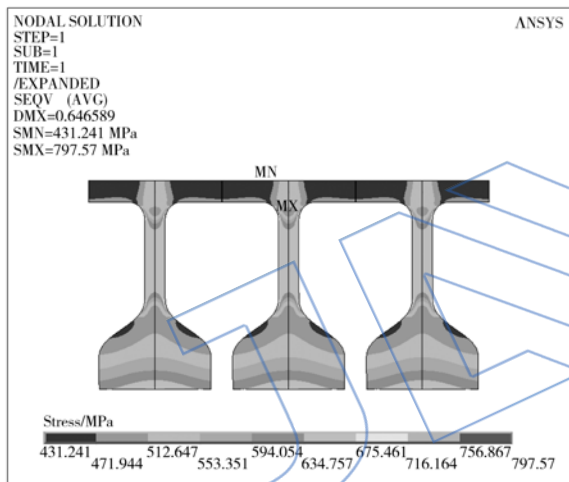


图 6 三辐板风扇盘等效应力分布图

Fig. 6 Hoop stress distribution of three-web fan disk

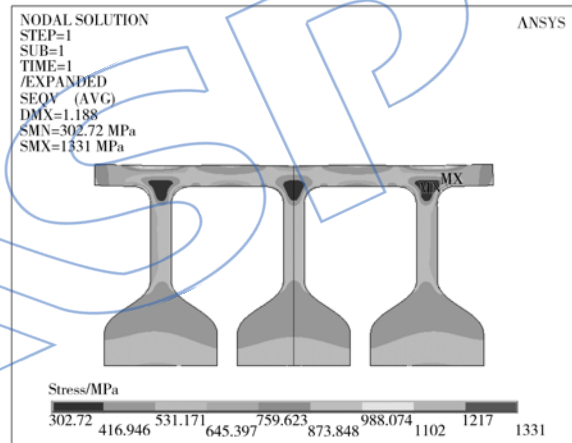


图 8 解耦后的三辐板风扇盘等效应力分布图

Fig. 8 Hoop stress distribution of three-web fan disk after decoupling

盘的同心率,因此辐板数量不宜增加太多。

前述风扇盘有限元模型都耦合了轮缘的径向自由度,以模拟叶片对轮缘径向抗弯刚度的增强。作为讨论,现将单辐板和三辐板风扇盘轮缘的径向自由度解耦,进行有限元应力分析,得其等效应力分布分别如图 7、图 8 所示。从图可知,单辐板风扇盘轮缘的最大径向变形为 3.407 mm,而三辐板风扇盘仅为 1.188 mm,说明相比单辐板风扇盘,多辐板风扇盘轮缘径向变形小,有利于增强轮缘弯曲刚度,降低轮缘的等效应力水平。尽管实际模型的叶片对轮缘起一定的刚化作用,其轮缘弯曲刚度应介于完全耦合模型与完全解耦后的模型之间,但是上述结论仍然是成立的。

3 结 论

本文基于 ANSYS 优化平台,建立了风扇盘优化设计程序。针对典型风扇盘设计问题,分别进行了单辐板及多辐板结构优化设计,得出结论:在满足轮盘变形及强度要求的条件下,多辐板风扇盘比单辐板风扇盘可明显减轻质量,而且其应力分布更为均匀,说明对于轮缘较宽的风扇盘,多辐板轮盘结构具有明显优越性。同时,多辐板轮盘结构有利于增强轮缘弯曲刚度,而辐板的数量应根据风扇盘的轮缘宽度、加工难度、加工成本等条件综合考虑后确定。此外,作为方案设计,本文提出的多辐板风扇盘的结构优化设计方法,具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 方昌德. 世界航空发动机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996.
- [2] 陈光. CFM56 系列发动机结构与研制特点[M]// 航空发动机结构设计分析. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 137-194.
- [3] 陈光. F119 发动机的设计特点[J]. 航空发动机, 2000(1): 21-29.
CHEN Guang. Design characteristics of F119[J]. Aeroengine, 2000(1): 21-29. (in Chinese)
- [4] 陈光. 遑达 1000 发动机的设计特点[J]. 航空发动机, 2009(4): 1-6.
CHEN Guang. Design characteristics of Trent1000[J]. Aeroengine, 2009(4): 1-6. (in Chinese)
- [5] 陈光. GE90 发动机发展与设计特点[M]// 航空发动机结构设计分析. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 253-266.
- [6] 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(1): 1-6.
CHEN Guang. Design characteristics of GENx engine for B787[J]. Aeroengine, 2010(1): 1-6. (in Chinese)
- [7] 吕文林. 航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则(第二册): 轮盘[R]. 北京: 中国航空工业总公司发动机系统工程局, 1997.
- [8] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册第 18 册: 叶片轮盘及主轴强度分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 1999.
- [9] 博弈创作室. APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [10] 博弈创作室. ANSYS 9.0 经典产品高级分析技术与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [11] 《现代应用数学手册》编委会. 运筹学最优化理论卷[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [12] 北京航空材料研究所. 航空发动机设计用材料数据手册[M]. 北京: 中国航空发动机总公司, 1990: 1206-1286.
- [13] 《航空发动机设计用材料数据手册》编委会. 航空发动机设计用材料数据手册(第三册)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2008: 1024-1068.
- [14] 李杰. 发动机整体多级转子盘深内腔加工技术[J]. 航空工程进展, 2010, 1(2): 201-204.
LI Jie. Deep internal chambers machining technology for multiple-stage integral disc of aero-engine[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2010, 1(2): 201-204. (in Chinese)