

# 基于UG NX二次开发的 压气机叶片结构优化设计

邹驰宇, 黄致建, 郝艳华

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:**以某压气机叶片为对象,在保证其形状不发生畸变的基础上,建立了数学模型.以有限元分析为基础,运用UG NX的二次开发功能,结合C++程序设计语言,对该压气机叶片进行结构优化设计,得到了同时满足强度和振动要求的最轻结构.结果表明:叶片模型在迭代过程中稳定生成,其优化后的体积(质量)相比优化前减少了6.680%,且能够满足原结构达不到的工作要求.该方法可行有效,可运用于其他机械产品的设计.

**关键词:**压气机叶片;UG NX二次开发;参数化;结构优化设计

**中图分类号:**V232.4 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.05.020

## Structure optimization design of compressor blade based on UG NX secondary development

ZOU Chi-yu, HUANG Zhi-jian, HAO Yan-hua

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

**Abstract:** Taking a compressor blade as subject, the mathematical model of a compressor blade was established to ensure that it would not distort when it was modeled. With the UG NX secondary development and C++, the compressor blade was optimized to obtain the lightest structure that can satisfy the strength and vibration, based on the finite element analysis. The results showed that the compressor blade was modeled without error in the iterative process. And the optimal volume (mass) of the axial compressor blade was reduced by 6.680% than origin which could satisfied the work requirement that the original structure didn't. The total method of the structural optimization was effective and feasible and could be used in the design process of other mechanical products.

**Key words:** compressor blade; UG NX secondary development; parameterization; structure optimization design

## 0 引言

航空数字化设计技术的成功运用,大幅度缩短了产品的研制周期,降低了研制费用,提高了生产效率和产品质量,保证了重点研制任务按节点完

成,增强了企业的应变能力 and 市场开拓能力,提高了核心竞争力,而且从根本上改变了现行的设计、试验、制造模式,以及管理的模式、方法和手段,是航空工业的一场革命<sup>[1]</sup>.

现今一些通用的CAE软件,如ANSYS, Solid-

收稿日期:2014-03-09

作者简介:邹驰宇(1988—),男,福建省浦城县人,华侨大学硕士研究生,主要研究方向为机械设计与理论.

通信作者:黄致建(1956—),男,福建省莆田市人,华侨大学研究员,主要研究方向为结构优化设计.

Works 等,都具有一定的优化设计功能.但这些软件的优化设计模块不够灵活,尚不能满足不同设计者的需求,如:无法进行多目标优化、优化目标较局限、优化变量通常只能选取模型尺寸或者材料特性等.因此,有时设计者必须完全控制优化迭代过程,才能完成设计目的.

UG NX 具有强大的建模能力、有限元分析能力,且其二次开发功能支持 C++ 语言,能够方便地开发出满足设计者需求的功能<sup>[2]</sup>,基于 UG NX 二次开发的技术已在机械学科的各方面研究中得到了广泛应用.梅小宁等<sup>[3]</sup>提出了一种通过 UG NX 的二次开发功能进行参数化建模,以模型参数为输入、模型属性为输出,通过 Isight 软件来对产品进行优化的设计方法.文献[4-5]则分别将 UG NX 的二次开发技术应用于加工和零件库中.但到目前为止,仍未见通过 UG NX 二次开发技术完成机械产品整个设计周期的方法.本文将使用 UG NX 二次开发功能,给出对压气机叶片的结构优化设计.

### 1 压气机叶片模型的建立

某发动机压气机叶片结构如图 1.



图 1 某发动机压气机叶片模型

为简化模型以提高计算速度,划分网格时采用省略一部分对应力影响较小的圆角的简化模型.

#### 1.1 榫头和缘板

榫头简化模型尺寸如图 2 所示.榫头横截面的构建方法为将其轮廓上的关键点相互连接而成,如图 3 所示.

各个点坐标见公式①,其中  $P_1$  点的  $Y$  坐标由  $P_2$  点的  $Y$  坐标向上加圆角  $R$  得到,从而保证圆角  $R$  能够正常生成,且不会因其过长而导致缘板无法包络伸根.榫头沿  $Y$  轴对称.

$$\begin{cases} X_{p1} = 0.5 \cdot W_1 \\ Y_{p1} = 0.5 \cdot (W_2 - W_1) \cdot \cot(\alpha_1/2) + R \\ X_{p2} = 0.5 \cdot W_1 \\ Y_{p2} = 0.5 \cdot (W_2 - W_1) \cdot \cot(\alpha_1/2) \\ X_{p3} = 0.5 \cdot W_4 \\ Y_{p3} = -[0.5 \cdot (W_4 - W_2) \cdot \cot(\alpha_1/2)] \\ X_{p4} = 0.5 \cdot W_4 \\ Y_{p4} = -[H_1 - 0.5 \cdot (W_4 - W_3) \cdot \tan\alpha_2] \\ X_{p5} = 0.5 \cdot W_3 - (H_2 - H_1) \cdot \cot\alpha_2 \\ Y_{p5} = -H_2 \end{cases} \quad \text{①}$$

完成榫头基础轮廓之后,圆角  $R$  在生成的时候有可能出现如图 3 右侧的情况.为防止该情况的出现,需要对生成的圆角做出判定:以生成的圆弧中点坐标为对象,若得到的圆弧中点在  $C_1$  位置(即正常生成),其  $X$  坐标小于圆心  $C_0$  的  $X$  坐标;反之,则在  $C_2$  位置,其  $X$  坐标大于圆心  $C_0$  的  $X$  坐标.若生成失败的圆弧,则将其删除,再反向生成圆弧即可.

缘板的各尺寸在本次优化中不作为优化变量,由于篇幅有限,在此不列出其各尺寸.

#### 1.2 叶身和凸肩

叶身的模型由空气动力学专家提供的叶盆叶背型线点阵生成.点阵按照一定格式存入 .dat 文件中,然后运行编好的 UG NX 二次开发程序生成整体

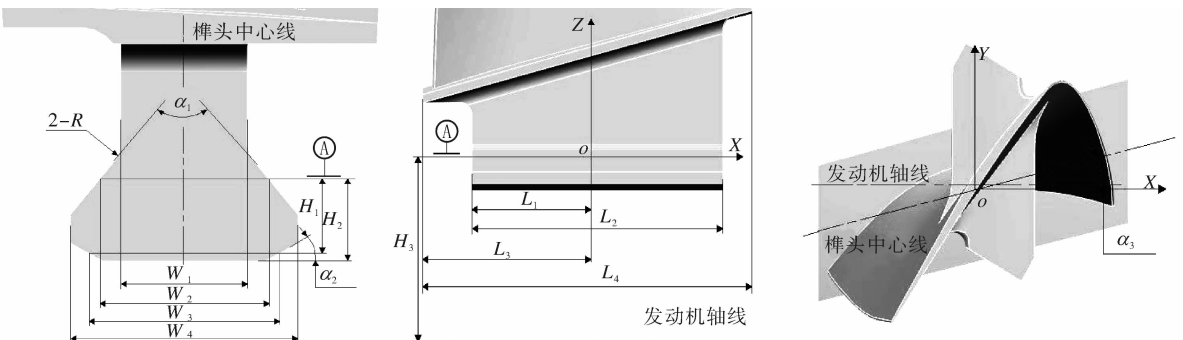


图 2 某榫头简化尺寸图

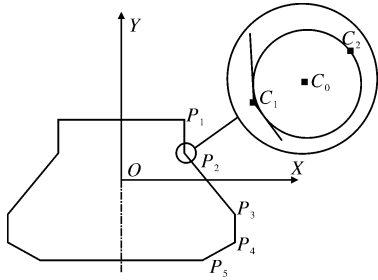


图3 双榫头横截面轮廓

叶身,再按照该发动机机匣尺寸修剪叶尖即可得到该叶片的叶身<sup>[6]</sup>。

凸肩与叶身类似,由存储了凸肩轮廓点阵的.dat文件生成<sup>[7]</sup>。

## 2 叶片优化设计

本文选用经典的复合形法作为优化算法<sup>[8]</sup>。选用的材料为 Titanium\_Ti-6Al-4V,其屈服强度为 805 MPa。优化目标为叶片体积最小(质量最小)。优化的强度约束设置为榫头喉部和凸肩与叶身连接部分这2处危险部位的最大当量应力(见图4)。约束值为材料的许用应力,设安全系数为 1.1,使结构对可能存在的如疲劳、加工等其他因素具有一定的安全裕度,即强度约束值为最大当量应力 $\leq 731.82$  MPa。

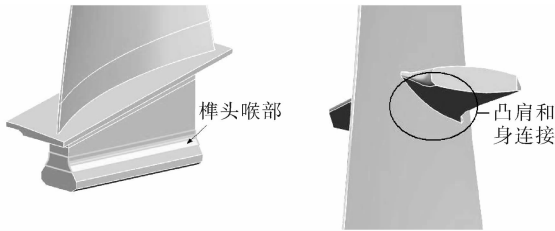


图4 榫头喉部和凸肩与叶身连接处

优化的固有频率约束设置为第一阶固有频率 $\leq 230$  Hz。在此约束下,叶片在工作转速范围内能避开共振转速而不发生较大共振。在强度约束和固有频率约束下,能够保证优化收敛后得到的叶片满足工作状态下的强度性能要求和振动性能要求。

优化变量选取图2中的 $W_1, W_4, L_1, L_2, \alpha_1, \alpha_3$ 这6个结构尺寸。为保证优化变量在迭代过程中不会由于尺寸冲突而导致模型生成失败,优化变量的变化范围需要满足各自条件:

1) 为保证各个尺寸在迭代过程中能够不使榫头横截面发生畸变,结合图3及式①,可得

$$\begin{cases} Y_{p3} \geq Y_{p4} \\ X_{p5} \leq 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} (W_4 - W_2) \cdot \cot(\alpha_1/2) + (W_4 - W_3) \cdot \tan\alpha_2 \leq 2 \cdot H_1 \\ W_3 \geq 2 \cdot (H_2 - H_1) \cdot \cot\alpha_2 \end{cases}$$

2) 缘板应能包络榫头上部,则 $L_1$ 与 $L_2$ 应分别小于缘板尺寸中的 $L_3$ 与 $L_4$ 。

3)  $\alpha_3$ 的变化范围应保证与榫头角度相同角度的缘板能够包络叶根部分。由原尺寸参数中的缘板结构以及叶根结构可得,其变化范围在 $12^\circ \sim 18^\circ$ 为宜。

在上述条件基础上结合原参数,可得优化模型

$$\begin{cases} \min V(X_i) (i=1,2,\dots,6) \\ D: \sigma_{v-\max}(X_i) \leq 731.82 \text{ MPa} (i=1,2,\dots,6) \\ f_1(X_i) \leq 230 \text{ Hz} (i=1,2,\dots,6) \\ X_1 \in (5, 11) \\ X_2 \in (14, 17) \\ X_3 \in (16, 24) \\ X_4 \in (44, 52) \\ X_5 \in (70^\circ, 110^\circ) \\ X_6 \in (12^\circ, 18^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $V$ 表示叶片的体积; $\sigma_{v-\max}$ 表示危险处的最大当量应力; $f_1$ 表示叶片的第一阶固有频率; $X_1, \dots, X_6$ 依次表示 $W_1, W_4, L_1, L_2, \alpha_1, \alpha_3$ 这6个优化变量。

优化的迭代过程:首先通过UG NX的二次开发功能生成叶片的参数化模型和有限元模型,然后对模型进行强度分析和固有频率分析,输出模型的体积、最大当量应力和固有频率数据,再由复合形法程序判断是否收敛,若收敛则迭代终止,否则产生新的参数,再次进行迭代直至收敛。具体流程见图5。

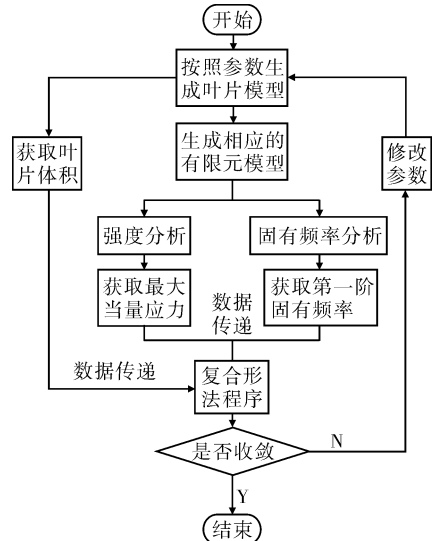


图5 叶片优化流程图

### 3 优化结果与分析

优化前后压气机叶片的各个属性变化见表 1. 由表 1 可知, 优化后的叶片满足各个约束条件, 优化后的体积(质量)相比优化前的体积(质量)减少了 6.680%. 在第一阶固有频率的约束下, 原本不能满足工作要求的结构在优化后, 因第一阶固有频率降至其约束范围中而满足了振动性能要求. 第一阶固有频率减小的原因为: 优化后叶片的体积(质量)减小, 榫头喉部刚性减弱, 使得优化后结构的第一阶固有频率值降低, 与振动理论中描述的结构刚度与固有频率之间关系相符.

表 1 优化前后压气机叶片各个属性变化情况

结构设计	$V/\text{mm}^3$	$\sigma_{v\text{-max}}/\text{MPa}$	$f_1/\text{Hz}$
优化前	47 636.975 1	450.19	244.00
优化后	44 454.725 3	729.49	218.75
变化量/%	-6.680	62.040	-10.348

叶片榫头部分的结构变化如图 6 所示. 由于伸根部分尺寸的减少, 榫头喉部的最大当量应力相较优化前增大 62.040%. 应力增大的原因为: 考虑到不影响流道内的气动性能, 本次优化中取榫头部分的尺寸作为优化变量, 叶身、凸肩、缘板 3 部分结构尺寸未变, 这 3 部分的离心力均由榫头承担. 因此在榫头伸根的宽度以及长度尺寸变小之后, 将导致部分区域的应力值变大. 虽然应力相较原结构有所增加, 但仍小于强度约束(即材料的屈服强度), 能够满足强度性能要求. 优化后叶片的当量应力云图如图 7 所示. 图 8 为优化前后叶片的第一阶振型图. 另外, 由于叶片结构形式未变, 优化后的叶片的第一

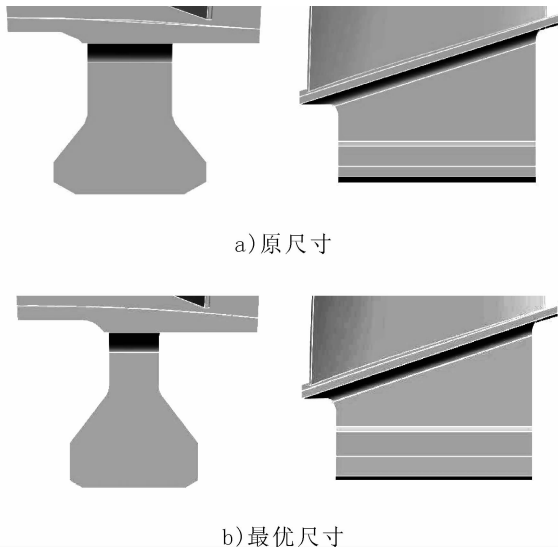


图 6 叶片榫头部分结构变化情况

阶固有频率虽然有所降低, 但对应的振型未改变, 最大应力位置相同. 图 9 为优化前后的第一阶振型最大当量应力云图. 各个优化变量的变化情况见表 2.

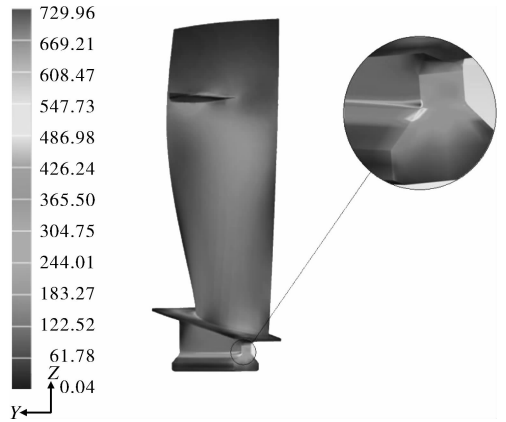


图 7 优化后叶片的当量应力云图



图 8 优化前后叶片的第一阶振型图

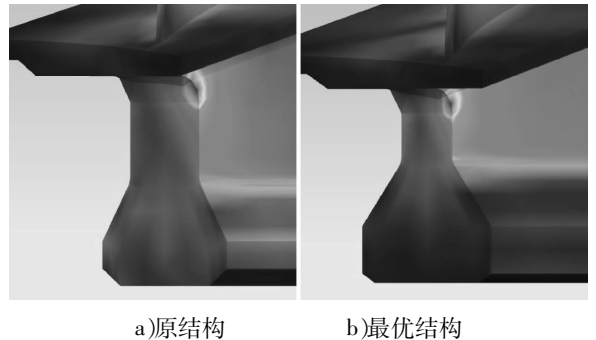


图 9 优化前后叶片的第一阶振型最大当量应力云图

表 2 叶片最优尺寸与原尺寸的对比

结构	$W_1/\text{mm}$	$W_4/\text{mm}$	$L_1/\text{mm}$	$L_2/\text{mm}$	$\alpha_1/(\text{°})$	$\alpha_3/(\text{°})$
原尺寸	9.00	16.22	22.80	51.00	78.00	14.00
最优尺寸	5.60	14.29	23.94	51.45	79.74	14.53
变化量/%	-37.78	-11.90	5.00	0.88	2.23	3.79

叶片的最大当量应力、第一阶固有频率、6个尺寸变量、体积在迭代过程中的变化情况见图10和图11。由图10和图11可见,优化目标即叶片的体积和6个优化变量在迭代开始阶段(即构建初始复合形阶段)的不稳定搜索之后,向着最优解的方向慢慢逼近直至收敛。而优化的约束(最大当量应力和第一阶固有频率)也在经过初期的搜索阶段之后,稳定地在约束范围内迭代至收敛。

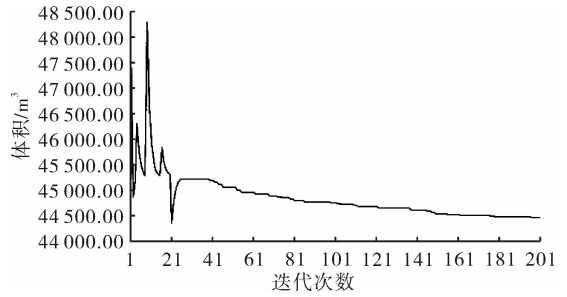


图11 叶片体积的优化迭代过程

由各个属性在进入稳定迭代后都未出现大幅变动可知,模型在迭代的过程中没有出现畸变,每次迭代均正常生成。

### 4 结论

本文针对某压气机叶片,使用UG NX的二次开发功能,从叶片模型的建立、有限元建模至优化的迭代步骤等方面进行了优化设计,并以强度性能及固有频率为约束、叶片的体积(质量)为目标,完成了对该叶片的优化迭代。结果显示:在某工况下,优化后的体积(质量)相比原参数下降6.680%,且该结构下的最大当量应力和第一阶固有频率都在相应的约束范围之内,即结构优化后的叶片在满足工作性能要求的同时达到了最轻。本文采用的优化过程及方法能够有效地完成优化设计工作。

### 参考文献:

- [1] 周正贵. 压气机/风扇叶片自动优化设计的研究现状和关键技术[J]. 航空学报, 2008, 29(2): 257.
- [2] 莫蓉, 常智勇, 刘红军, 等. 图表详解UG NX二次开发[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 2-6.
- [3] 梅小宁, 杨树兴. 基于UG二次开发的参数化建模方法在优化设计中的应用[J]. 科技导报, 2010, 28(3): 29.
- [4] 阳慧慧, 张建月, 阮锋, 等. UG二次开发与加工自动化[J]. 模具技术, 2006(5): 51.
- [5] 王一成, 杨树仁. UG二次开发中的数据库建立方法[J]. 长春大学学报, 2011, 21(12): 1.
- [6] 王乐安. 国外航空发动机风扇叶片及其成形技术[J]. 航空科学技术, 1995(1): 31.
- [7] 黄致建, 郝艳华, 张峻峰, 等. 等强度低损失阻尼凸肩的设计与应用[J]. 航空动力学报, 2007, 22(6): 1002.
- [8] 韩林山. 机械优化设计[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003: 97-103.

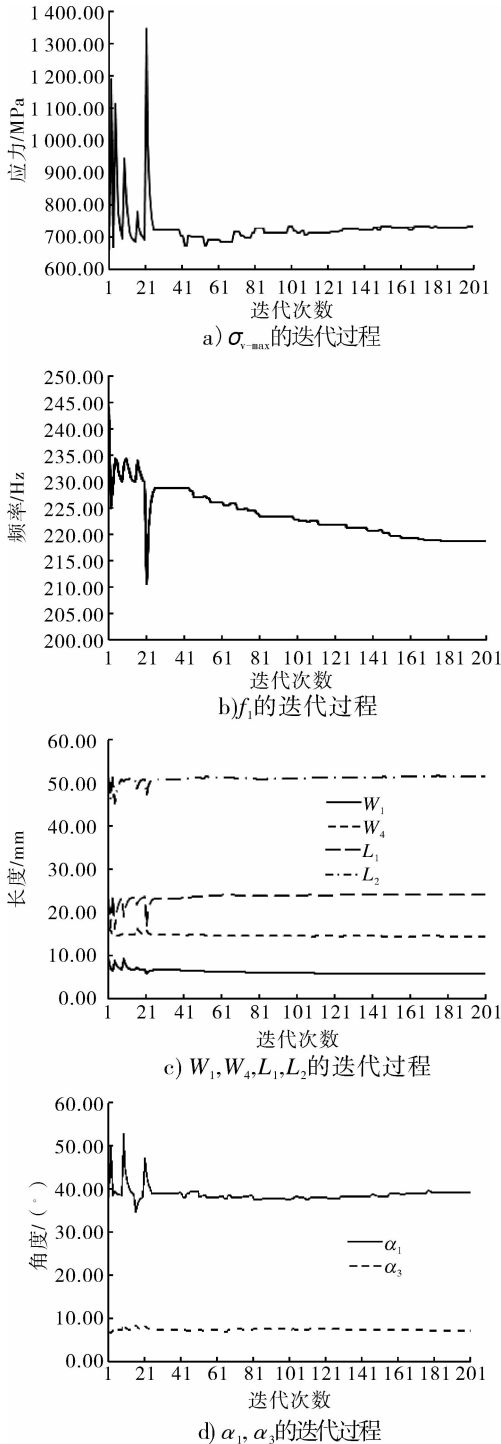


图10 约束和优化变量的迭代过程