

文章编号:1000-8055(2011)11-2450-09

叶片参数化有限元建模与罩量优化设计

王振培, 王 丹, 朱继宏, 张卫红

(西北工业大学 机电学院

现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 基于网格变形技术提出了一种叶片参数化有限元建模方法, 该方法具有快速实现叶片参数化有限元建模的优点, 同时能够在保证叶片有限元网格拓扑形式不变的前提下, 有效解决叶片优化设计过程中的网格自动更新问题. 在此基础上, 结合叶片罩量优化设计的灵敏度分析技术, 建立了叶片罩量自动优化一般设计流程, 开展了叶片实例优化设计应用研究. 优化结果表明, 相对于初始设计, 罩量优化设计可以有效地改善应力分布, 降低叶片应力水平.

关 键 词: 叶片; 网格变形技术; 参数化有限元建模; 罩量; 积叠线; 形状优化; 灵敏度分析
中图分类号: V232.4 **文献标志码:** A

Parametrical FE modeling of blade and design optimization of its gravity center eccentricity

WANG Zhen-pei, WANG Dan, ZHU Ji-hong, ZHANG Wei-hong

(The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology,
School of Mechanical and Electrical Engineering,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A parametric discretization method for blade was proposed based on the FE (finite element) mesh morphing technique. This method has advantage of realizing automatic and rapid updating of the finite elements meshes without any change of the mesh topology. Moreover, a general procedure was established for the design optimization of the gravity center eccentricity of blade in combination with design sensitivity analysis. Numerical examples were solved successfully. Optimization results show that the stress level and distribution can be largely improved by means of the proposed design procedure.

Key words: blade; mesh morphing technique;
parametrical finite element (FE) modeling; gravity center eccentricity;
stacking line; shape optimization; sensitivity analysis

转子叶片是压气机和涡轮中完成功能转换的重要零件, 在工作时同时承受着离心载荷和气动载荷. 为了减小叶片根部的弯曲应力, 一般将叶片各截面重心沿转子的周向或轴向作适当的偏移,

使其产生的离心弯矩与气动弯矩方向相反, 从而达到弯矩补偿的效果, 通常将截面重心的偏移量称为罩量^[1-2]. 而由叶片各个截面的重心所构成的曲线被称为叶片的重心积叠线.

收稿日期: 2010-12-08; 修订日期: 2011-04-08

基金项目: 国家自然科学基金 (10925212); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20106102110018);
高等学校学科创新引智计划 (B07050)

作者简介: 王振培 (1984—), 男, 河南宝丰人, 博士生, 主要从事结构 CAE 仿真分析与优化设计的研究.

通讯作者: 张卫红 (1964—), 男, 山东潍坊人, 教授, 博士, 主要从事结构优化的研究.

叶片罩量设计属于强度设计的范畴,王咏梅、陈葆实^[3]研究了罩量调节对风扇/压气机气动性能和强度的影响,指出利用经验人为设定罩量的缺点,提出了依靠程序实现罩量自动调整的必要性;张正秋、邹正平等人^[4]研究了叶片重心线调节对叶片强度和气动性能的影响,并建议将叶片设计流程中的叶片造型和结构强度分析联系起来,将有限元方法应用到叶片造型阶段,以实现造型及结构强度校核的程序化。然而,叶片由于自身结构的复杂性,其有限元建模是个比较棘手的问题,也是依靠程序实现罩量自动调整与将有限元法应用到叶片造型阶段的主要瓶颈,因而,有必要开发一种快速有效的叶片参数化有限元建模方法。

叶片罩量优化设计的目的是希望在不改变叶型及叶身外形尺寸的前提下,达到离心弯矩对气动弯矩的最佳补偿。在现有设计手册^[2]与文献^[5]中所提到的罩量优化设计,均采用经典简化理论公式计算应力,没有将有限元分析应用到优化过程中,仅运用有限元分析对优化结果进行强度校核。这对于形状复杂的弯扭叶片而言显然会带来较大的计算误差。在文献^[6]中,王荣桥、林丹等人基于 UG(Unigraphics)软件开发了压气机叶片特征设计系统,该系统虽然可以对沿叶高呈直线分布的罩量进行优化设计,但无法进行沿叶高呈曲线规律分布的罩量优化设计。

事实上,采用空间曲线积叠的叶片具有更好的气动与机械性能,目前高负荷的叶片也多采用空间曲线的积叠方式进行设计,但是目前的研究更多地关注了叶片的气动和传热效率等性能。如 Ahn C S 等人^[7]将积叠线拟合为参数曲线,以改善叶片的气动性能为目标,采用响应面法(RSM)对叶片的积叠线进行了优化设计;Jang C M 等人^[8-9]采用同样的方法,以改善叶片的传热效率为目标对叶片的积叠线进行了优化设计;在此基础上,Samad A 等人^[10-11]利用遗传算法(GA)实现了叶片的多目标优化设计;Oyama A 等人^[12]采用进化算法(EA)对叶片进行了优化设计;周正贵^[13]对压气机/风扇叶片自动优化设计的研究现状和关键技术进行了总结和介绍。这些研究的优化手段和技术比较有效,然而面向结构叶片强度设计的罩量优化方面的考虑相对较少,尤其是缺乏适用的自动设计流程与软件工具。

叶片的罩量优化设计属于形状优化的范畴,当采用有限元法计算应力时,关键技术在于网格更新、灵敏度分析和优化算法三个方面以及三者

之间的有效集成。由于叶片自身形状复杂,因而优化过程中的网格更新问题是该研究的难点。

需要指出的是,上述有关叶片形状优化设计的研究中由于所采用的叶片模型结构形式多数比较简单,容易使用自由网格划分技术生成以四面体单元为主的有限元模型,然而对于一些无法直接进行自由网格划分的叶片模型(如叶尖截面很薄、叶根截面又偏厚的弯扭叶片)而言具有相当大的局限性。此外,上述研究中多采用进化算法、遗传算法、响应面法等非确定性搜索算法,这些算法的优点在于优化过程中不需要进行灵敏度分析,降低了求解难度,但同时带来有限元分析计算量大、收敛慢等问题。而采用基于梯度的确定性优化算法,通过计算迭代寻优方向,降低了结构重分析的次数,可以加快收敛速度,从而减少计算量。但基于梯度的优化算法需要考虑设计变量扰动后的网格节点坐标变化,即所谓的灵敏度分析问题,因而需要保证扰动前后叶片有限元网格的拓扑结构不变。

针对这些问题,本文提出了面向一种叶片参数化有限元建模的网格变形技术,通过采用该技术在叶片各截面建立网格拓扑形式相同的有限元网格,并以此建立整个叶片的实体网格。这样,叶片有限元网格的拓扑形式在整个优化迭代过程中始终保持不变。同时,对于任意轴向叶片模型,只要给定叶片的叶型截面,就可以快速地利用该方法生成六面体单元的有限元模型。在此基础上,本文还进行了相关的灵敏度分析,并采用 SQP(sequential quadratic programming)算法实现了叶片罩量实例的优化设计。

1 叶片有限元网格的参数化建模

1.1 传统的有限元建模方法

叶片设计时,设计人员根据气动参数设计出若干叶型截面,并确定出各个截面之间的相对位置及积叠方式,然后进行放样处理,生成相应的叶片实体模型。由此得到的变截面弯扭叶片形状相对比较复杂。针对此类叶片的有限元分析建模,目前主流的 CAE(computer aided engineering)软件,如 ANSYS, MSC/PATRAN 等尚不具备成熟的放样功能;ABAQUS 具备该功能,但是对于复杂的变截面弯扭叶片,实施该功能时却极易发生错误,导致模型生成失败,也不利于有限元网格的划分。因而在常规的叶片有限元建模策略中,设计人员首先将各个叶型导入到 CAD(computer aided design)软件中生成叶片实体模型;然后将

该几何模型再导入到 CAE 软件中划分网格生成有限元模型. 对于结构简单的叶片, 如直叶片, 划分有限元网格比较简单; 但对于变截面弯扭叶片, 划分有限元网格则会变得比较困难, 也很难保证网格质量和结构分析精度.

如图 1(a) 所示, 某叶片的初始设计模型共有 16 个叶型截面, 从叶根到叶尖依次编号为 0, 1, 2, ..., 15. 将该组叶型截面导入到 CAD 软件中, 生成的实体模型如图 1(b) 所示. 生成的实体模型导入到 ANSYS 中, 由于模型的复杂性, 无法直接进行自由网格划分, 需要经过多步人为操作处理 (如模型分割等) 方可得到质量较好的网格, 平均处理时间约为 30 min. 若将其导入 ABAQUS 中采用四面体网格自由划分, 则需要耗时 11.18 min, 同时局部网格畸形、质量难以保证, 如图 2 所示.

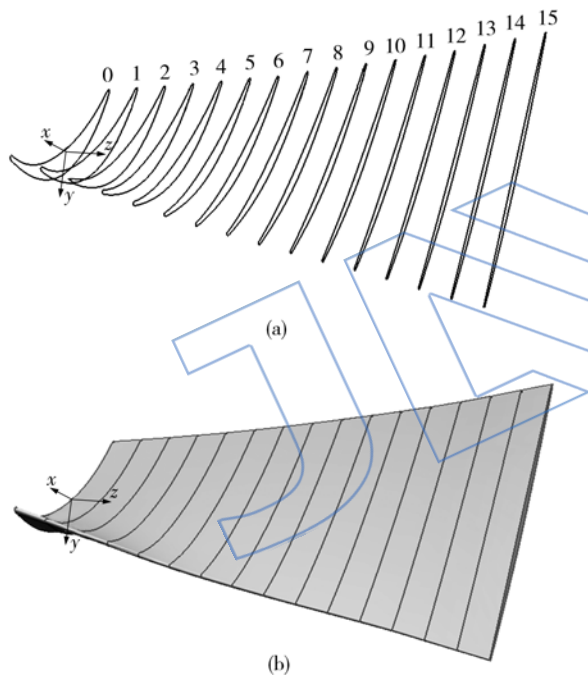


图1 某叶片叶型截面及模型

Fig. 1 Blade and its profiles

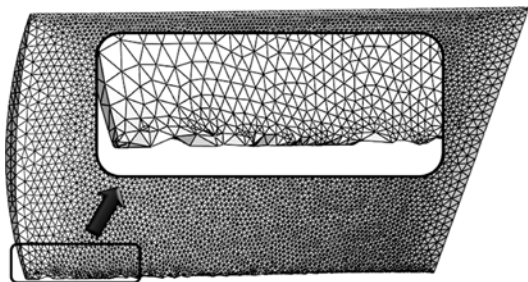


图2 ABAQUS 软件划分的叶片网格

Fig. 2 Finite element mesh of a blade with ABAQUS

此外, 为了实现罩量参数的优化设计, 叶片的几何模型和有限元模型需要不断地进行更新和重构. 考虑到优化设计流程的自动化, 该过程无法进行人工干涉, 因此, 传统的有限元建模方法显然无法满足复杂型面叶片的罩量优化设计要求, 有必要建立一种全新的有限元建模策略与动网格管理方法.

1.2 基于网格变形技术的有限元建模方法

对于图 3 所示的两个平剖面, 如果在两个平面上划分的四边形网格具有相同的拓扑形式, 那么将相应的四边形网格节点按照上下对应关系连接起来, 则可生成一系列的六面体单元.

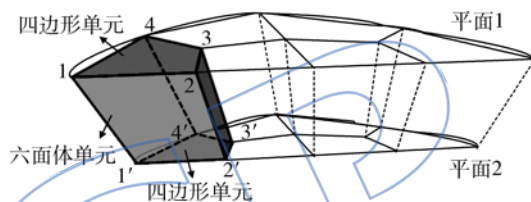


图3 两个四边形网格生成 8 节点实体网格

Fig. 3 8-node solid elements generated by two quadrilateral meshes

以此为思路, 在叶片建模过程中对于如图 4(a) 所示给定的 n 个叶型截面, 选取某一截面为基准面, 在该截面上划分四边形网格. 然后, 把其他叶片截面形状看作是基准叶片截面形状的变形结果, 将基准截面的网格拓扑形式映射到其他各个截面上, 使各个截面具备同样拓扑形式的平面网格, 同时采用拉普拉斯光滑法对映射截面内的网格节点位置进行修改与光滑处理, 保证映射出的网格形状规则, 如图 4(b) 所示, 这就是有限元网格模型的变形生成技术^[14]. 该方法也成功应用于平面网格向薄壳结构曲面的映射^[15].

另一方面, 实体单元网格离散的疏密程度可通过截面插值进行控制. 假设 $\mathbf{R}_j^i$ 表示第 i 个叶型截面上的第 j 个节点的坐标, 选择适当的插值函数 (线性、样条等), 依次对 $\mathbf{R}_1^1, \mathbf{R}_2^1, \dots, \mathbf{R}_m^1, \dots, \mathbf{R}_m^n$ ($j = 1, 2, \dots, m$) 进行插值

$$\mathbf{R}_j(t) = \sum_{i=1}^n B_i(t) \mathbf{R}_j^i \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (1)$$

其中 m 为截面上的节点个数, $B_i(t)$ 为插值基函数, $\mathbf{R}_j(t)$ 为插值截面上第 j 个节点的坐标向量. 通过截面插值可以获得更加密集的截面, 以便于控制实体单元的生成与单元尺寸, 如图 4(c) 所示.

提取相邻截面的相应四边形网格节点位置信

息,利用对应的 8 个节点生成一个六面体单元网格,最终获得叶片的有限元模型,如图 4(d)所示。

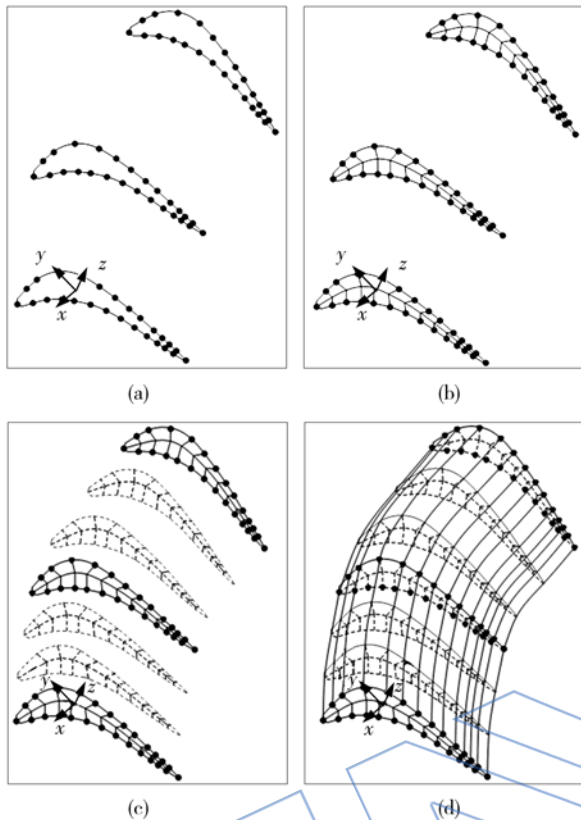


图 4 有限元模型建立过程示意图

Fig. 4 Schematic finite element modeling procedure

上述建模方法的优点在于:

1) 可以直接利用若干叶型边界曲线或者叶型点云文件生成有限元模型,避免了叶片 CAD 几何建模与 CAE 有限元建模之间繁琐的交互工作,实现了一体化建模;

2) 建模速度快,可以自动执行,有效地解决了叶片形状优化中的网格更新问题;

3) 在迭代过程中,可以保证网格拓扑形式不变,便于进行优化灵敏度分析,为应用基于梯度的优化算法奠定了基础。

1.3 叶片参数化有限元建模实例

根据上述方法,本工作建立了叶片有限元模型自动生成模块,只需读入各个叶型截面数据点云信息、单元尺寸的大小等参数,即可快速生成相应的实体网格模型,并自动将约束与载荷施加到模型上。对于图 1 中所示的叶片,利用该模块只需在 3~10 s 即可完成有限元建模(取决于模型规模)。建模时,选取 8 号截面作为基准面并进行四

边形网格划分,然后利用网格变形技术将其网格映射至其他 15 个叶型截面,图 5(a)所示为该叶片叶尖截面(15 号截面)、8 号截面和叶根截面上所映射出的网格,由图可见网格拓扑结构形式一致。图 5(b)所示为叶片的网格划分效果。该网格模型的单元数为 47 700 个,且无畸形网格。由此可见,该方法不仅可以快速实现变截面弯扭叶片的有限元建模,而且能够保证良好的网格质量。

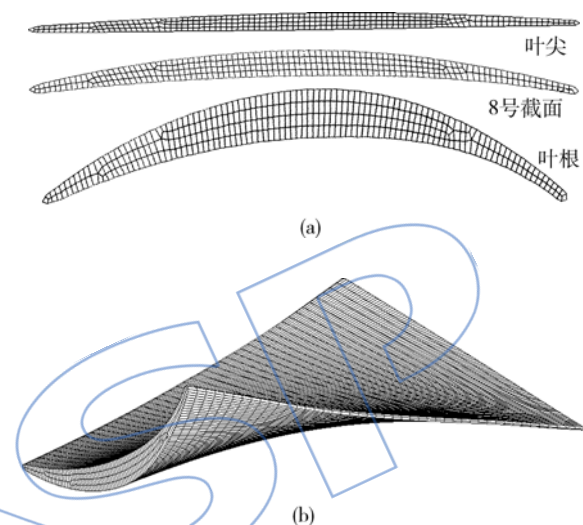


图 5 叶片的有限元模型

Fig. 5 FE modeling of a blade

1.4 优化迭代过程中有限元模型的更新与重构

在罩量优化设计过程中,优化迭代导致相关控制截面位置发生改变,利用以上介绍的参数化建模思路,有限元模型的更新与重构的具体流程如下:

1) 根据改变后的罩量,将相关叶型截面上平面网格的节点坐标进行平移处理;

2) 利用选定的插值算法重新进行叶型截面之间的插值,获得所有截面网格;

3) 在相邻截面之间创建实体网格,写入边界条件和载荷信息,完成有限元模型的重构。

2 罩量优化设计

2.1 灵敏度分析

当叶型截面较多时,若直接以各个截面偏移量为设计变量进行优化,那么势必会造成较大的计算量,而且相邻截面的相对偏移过大还会影响到叶片表面的光顺性,进而影响到叶片的气动性能。

本文提出将罩量进行参数化处理,沿叶高 z 方向拟合为参数曲线(如样条、Bezier 曲线、NURBS (non-uniform rational B-spline) 曲线

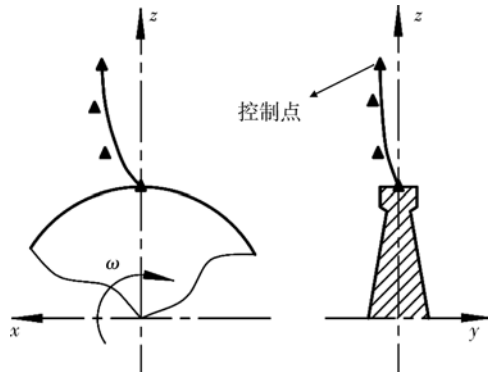


图6 积叠线的定义

Fig. 6 Stacking line definition

等),如图6所示,然后选取 q 个控制点(依次为 $c_1, c_2, \dots, c_q$)在 x, y 方向的位置作为设计变量

$$\bar{\mathbf{r}} = (x_{c1} \quad y_{c1} \quad x_{c2} \quad y_{c2} \quad \dots \quad x_{cq} \quad y_{cq}) \quad (2)$$

假设 $\bar{\mathbf{e}}$ 为所有 n 个叶型截面的偏移向量,即

$$\bar{\mathbf{e}} = (x_1 \quad y_1 \quad x_2 \quad y_2 \quad \dots \quad x_n \quad y_n) \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} &= \left[\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \right] \\ \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \bar{\mathbf{e}}} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial x_1} & \frac{\partial x}{\partial y_1} & \frac{\partial x}{\partial x_2} & \frac{\partial x}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial x}{\partial x_n} & \frac{\partial x}{\partial y_n} \\ \frac{\partial y}{\partial x_1} & \frac{\partial y}{\partial y_1} & \frac{\partial y}{\partial x_2} & \frac{\partial y}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial y}{\partial x_n} & \frac{\partial y}{\partial y_n} \end{bmatrix} \\ \frac{\partial \bar{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{r}} &= (\mathbf{M}_1 \quad \mathbf{M}_2 \quad \dots \quad \mathbf{M}_i \quad \dots \quad \mathbf{M}_n)^T \end{aligned} \right. \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} L_1(u) & 0 & L_2(u) & 0 & \dots & L_q(u) & 0 \\ 0 & L_1(u) & 0 & L_2(u) & \dots & 0 & L_q(u) \end{bmatrix}^T$$

由于第 i 个叶型截面内的第 j 个节点的坐标 $\mathbf{R}_j^i$ 仅随该截面偏移量 (x_i, y_i) 的变化,即在 $z=z_i$ 的平面上做平动,则其速度场为

$$\mathbf{V}_j^i = \frac{\partial \mathbf{R}_j^i}{\partial \bar{\mathbf{e}}} \frac{\partial \bar{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{r}} = (\mathbf{W}_1 \quad \mathbf{W}_2 \quad \dots \quad \mathbf{W}_k \quad \dots \quad \mathbf{W}_q) \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{W}_k = \begin{bmatrix} L_k(u) & 0 \\ 0 & L_k(u) \end{bmatrix}$$

在采用式(1)插值产生的截面内,第 j 个节点

的坐标 $\mathbf{R}_j(t)$ 在 $z = \sum_{i=1}^n B_i(t) \cdot z_i$ 的平面上变化,

因此,第 i 个叶型截面的偏移量 (x_i, y_i) 可通过对式(2)中控制点的坐标值进行插值得到

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^q L_k(u) \begin{bmatrix} x_{ck} \\ y_{ck} \end{bmatrix} \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (4)$$

其中 $L_k(u)$ 为插值基函数.

于是,相对设计变量的灵敏度可采用链式法则求解

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{R}} \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \bar{\mathbf{e}}} \frac{\partial \bar{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{r}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{R}} \mathbf{V} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{R}$ 为叶片有限元网格节点坐标矩阵.由于设计变量扰动过程中,叶型截面上网格节点的 z 向坐标保持不变,所以该问题的速度场 $\mathbf{V}$ 实质上为平面速度场.需要指出的是,此处的速度场指的是由变量扰动引起的网格位置变化大小^[15],完全不同于流体分析中的速度场.于是,式(5)中各分量具体可表示为

坐标满足 $\mathbf{R}_j(t) = \sum_{i=1}^n B_i(t) \mathbf{R}_j^i$,其速度场为

$$\mathbf{V}_j(t) = \frac{\partial \mathbf{R}_j(t)}{\partial \bar{\mathbf{e}}} \frac{\partial \bar{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{r}} = \left[\sum_{i=1}^n B_i(t) \frac{\partial \mathbf{R}_j^i}{\partial \bar{\mathbf{e}}} \right] \frac{\partial \bar{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{r}} \quad (8)$$

通过得到叶片上所有节点坐标随偏移设计变量的扰动关系,即可完成叶片罩量优化设计的速度场分析.

基于以上公式,可进一步推导叶片有限元模型节点位移与应力响应的灵敏度.叶片结构的静力学有限元计算表达式如下:

$$\mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (9)$$

对该式两边求导可得

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{r}} = \mathbf{K}^{-1} \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{r}} - \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{U} \right] \quad (10)$$

其中 $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{K}$ 分别为载荷向量和刚度矩阵, 它们的偏导数可进一步在单元层次上展开

$$\frac{\partial \mathbf{F}_e}{\partial \mathbf{r}} = \frac{\partial \mathbf{F}_e}{\partial \mathbf{R}} \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{e}} \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{r}} = \frac{\partial \mathbf{F}_e}{\partial \mathbf{R}} \mathbf{V}_e \quad (11)$$

$$\frac{\partial \mathbf{K}_e}{\partial \mathbf{r}} = \frac{\partial \mathbf{K}_e}{\partial \mathbf{R}} \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{e}} \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{r}} = \frac{\partial \mathbf{K}_e}{\partial \mathbf{R}} \mathbf{V}_e \quad (12)$$

这里的下标 e 代表第 e 个单元的相关参数. 当外载 $\mathbf{F}$ 具有设计无关性时, 载荷关于设计变量的导数 $\partial \mathbf{F}_e / \partial \mathbf{r}$ 为 0. 但叶片罩量优化设计中, 叶片承受的离心载荷与气动载荷均为设计相关载荷, 其偏导数不能忽略.

实际上, 形状灵敏度可以通过半解析法求解, 也就是将(11)和(12)式在单元尺度上通过差分方法展开, 其中包括前文推导得到的速度场 $\mathbf{V}_e$.

$$\frac{\partial \mathbf{F}_e}{\partial \mathbf{r}} \approx \frac{\mathbf{F}_e(\mathbf{R} + \mathbf{V}_e \Delta \bar{\mathbf{r}}) - \mathbf{F}_e(\mathbf{R})}{\Delta \bar{\mathbf{r}}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \mathbf{K}_e}{\partial \mathbf{r}} \approx \frac{\mathbf{K}_e(\mathbf{R} + \mathbf{V}_e \Delta \bar{\mathbf{r}}) - \mathbf{K}_e(\mathbf{R})}{\Delta \bar{\mathbf{r}}} \quad (14)$$

其中 $\Delta \bar{\mathbf{r}}$ 为偏移设计变量的扰动量.

这样就可以得到位移向量对偏移设计变量的灵敏度. 再通过应力-位移关系, 可以进一步得到应力关于偏移设计变量的灵敏度

$$\frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial \mathbf{r}} = \mathbf{E} \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{r}} \quad (15)$$

其中 $\boldsymbol{\sigma}$ 为单元应力矩阵, $\mathbf{E}$ 为弹性矩阵, $\mathbf{B}$ 为几何矩阵.

2.2 优化策略

本文采用序列二次规划算法(SQP)对该问题进行求解, 其基本思想是: 在每个迭代步中构造一个二次规划子问题进行求解, 以其优化解作为下一步迭代的初始解进行计算, 最终逼近实际问题的最优解.

如前所述, 将罩量沿叶高方向拟合为 Bezier 曲线, 选取该曲线的 q 个控制点(编号依次为 $c_1, c_2, \dots, c_q$)的坐标作为设计变量; 以极小化整个叶片的最大等效应力值作为优化问题的目标函数; 另外, 为保证叶型位置调整不破坏叶身的光顺, 须对各截面在转子轴向和周向的偏移范围给出比较严格的约束. 于是, 该优化问题的数学模型可以表示为

$$\begin{cases} \text{Find } \bar{\mathbf{r}} = (x_{c1} & y_{c1} & x_{c2} & y_{c2} & \dots & x_{cq} & y_{cq}) \\ \text{Min } \max \{ \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N \} \\ \text{s. t. } \underline{x}_{ck} \leq x_{ck} \leq \bar{x}_{ck} & (k = 1, 2, \dots, q) \\ \underline{y}_{ck} \leq y_{ck} \leq \bar{y}_{ck} & (k = 1, 2, \dots, q) \end{cases} \quad (16)$$

式中 $\underline{x}_{ck}, \underline{y}_{ck}$ 分别表示 x_{ck} 和 y_{ck} 的下界; $\bar{x}_{ck}, \bar{y}_{ck}$ 分别表示 x_{ck} 和 y_{ck} 的上界; σ_e 表示第 e 个单元的等效应力, N 表示单元数目.

优化的整体流程如图 7 所示.

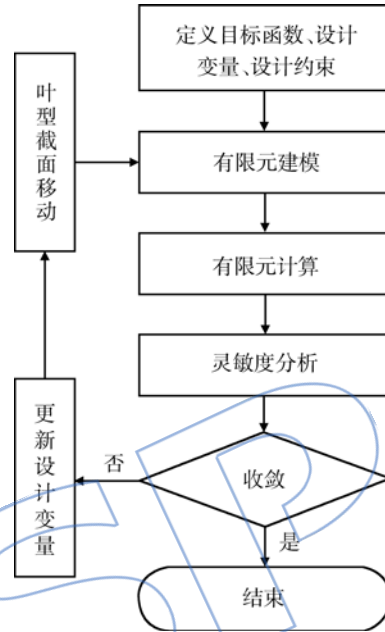


图 7 罩量优化设计流程图

Fig. 7 Optimization design procedure of the gravity center eccentricity

2.3 数值算例

针对图 1 所示的叶片模型, 本文将罩量参数沿叶高方向拟合为三次 Bezier 曲线, 曲线的四个控制点分别位于编号为 0, 5, 10, 15 的叶型截面所在的平面上. 其中编号为 0 的叶根截面固定, 与 5 号、10 号、15 号叶型截面对应的三个控制点分别编号为 c_1, c_2, c_3 , 以其 x, y 坐标位置作为设计变量, 其他各叶型截面的偏移量(罩量值)通过插值得到. 为保证罩量调整不破坏叶身槽道的光顺, 要求控制点 c_2 与 c_3 在 x, y 方向上的位移控制在 2 mm 以内, 离叶根较近的控制点 c_1 在 x, y 方向上的位移控制在 1 mm 以内. 其优化模型可表示为

$$\begin{cases} \text{Find } \bar{\mathbf{r}} = (x_{c1} & y_{c1} & x_{c2} & y_{c2} & x_{c3} & y_{c3}) \\ \text{Min } \max \{ \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N \} \\ \text{s. t. } -1 \leq x_{c1} \leq 1 \\ -1 \leq y_{c1} \leq 1 \\ -2 \leq x_{ck} \leq 2 & (k = 2, 3) \\ -2 \leq y_{ck} \leq 2 & (k = 2, 3) \end{cases} \quad (17)$$

优化过程中同时考虑叶片的离心载荷和气动载荷,离心载荷通过叶片的转速进行设定,气动载荷的分布可以通过相关的计算获得,然后将叶身离散为若干小区域,以小区域中心位置的气动力近似为该区域的均布载荷并进行加载。

图8给出了叶片最大等效应力值在优化过程中的迭代曲线,迭代过程稳定。叶片的初始最大等效应力为227.8 MPa,优化后降为182.2 MPa,降低幅度为20.02%,优化前后模型的应力分布如图9所示。由此可见,罩量优化设计可显著改善叶片结构的应力分布,降低应力集中。

设计变量在优化过程中的迭代曲线如图10所示,变量 x_{c2} , y_{c2} 与 y_{c3} 达到约束上限2 mm,而变量 x_{c1} , x_{c3} 与 y_{c1} 则没有达到约束上限,分别收敛于

0.9484, 0.7798, 0.2624 mm。

优化后,叶片 x , y 方向罩量沿叶高的分布曲线分别如图11(a)和(b)所示,各个截面的罩量值

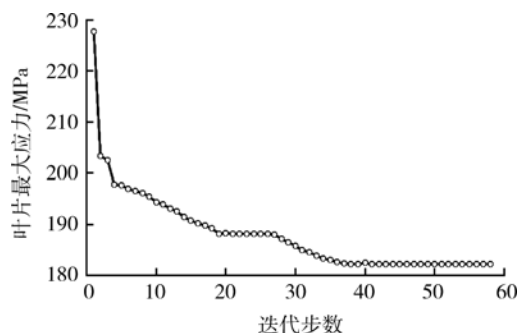


图8 叶身最大应力迭代曲线

Fig. 8 Iteration history of the maximum stress

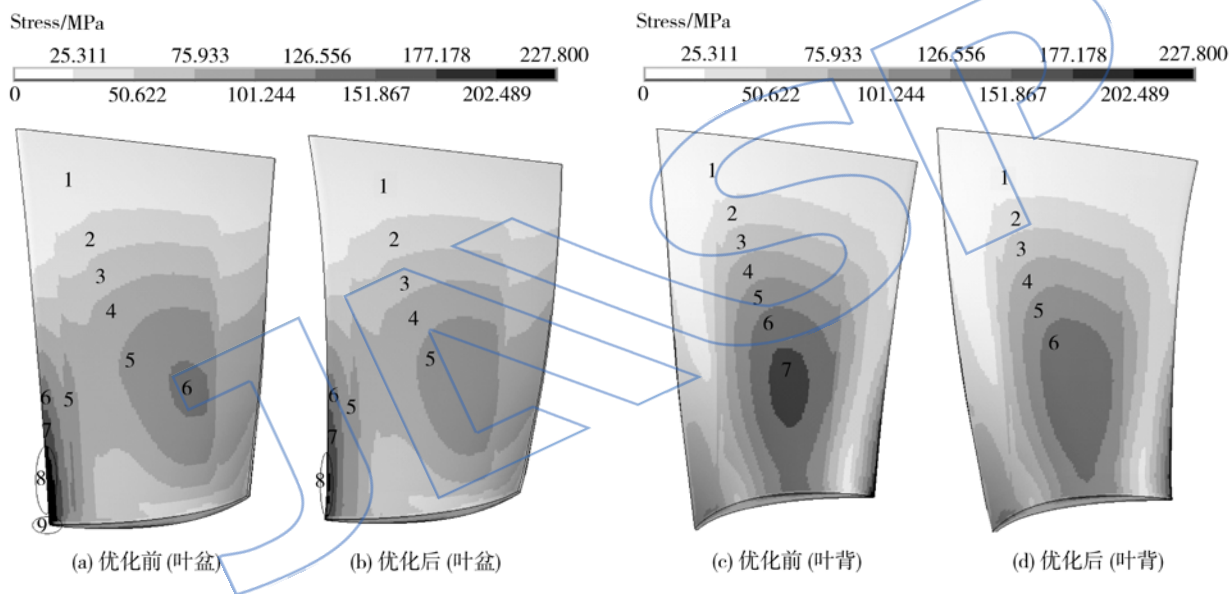


图9 优化前后应力分布云图

Fig. 9 Initial and optimal stress distributions

表1 优化后各叶型截面的罩量值

Table 1 Optimal gravity center eccentricity at each blade profile

截面号	x 方向偏移量/mm	y 方向偏移量/mm	截面号	x 方向偏移量/mm	y 方向偏移量/mm
0	0	0	8	1.2757	1.2723
1	0.3559	0.1622	9	1.3194	1.4372
2	0.5287	0.2832	10	1.3307	1.5896
3	0.6935	0.4246	11	1.3061	1.7249
4	0.8469	0.5816	12	1.2422	1.8382
5	0.9852	0.7495	13	1.1356	1.9250
6	1.1052	0.9238	14	0.9826	1.9805
7	1.2031	1.0996	15	0.7798	2.0000

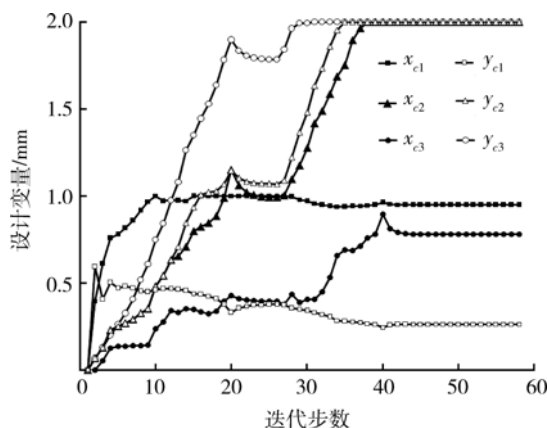


图 10 设计变量迭代曲线

Fig. 10 Iteration history of design variables

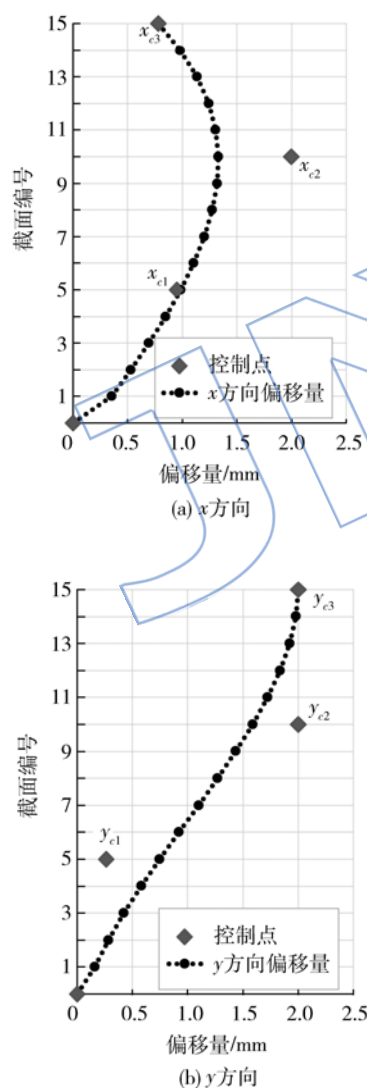


图 11 优化后罩量沿叶高分布

Fig. 11 Optimal gravity center eccentricity along the blade height

(偏移量)如表 1 所示. 采用 Bezier 曲线拟合罩量沿叶高的分布较好地保证了叶身的光顺性.

3 结 论

1) 本文提出了一种变截面弯扭叶片有限元参数化模型的建模方法, 该方法可以有效保证优化迭代过程中网格拓扑形式不变, 同时适用于任何轴向叶片的快速有限元建模, 而且其所采用的六面体单元网格比采用自由网格划分技术生成的四面体单元网格有着更好的计算精度. 因而, 利用该方法可以有效地将有限元强度分析应用到叶片的造型阶段, 解决文献[4]中所提出的将叶片造型和结构强度分析联系起来的问题. 此外, 该网格生成算法可推广到一般变截面结构的建模与优化设计工作中, 具有工程应用价值.

2) 对叶片罩量优化设计的灵敏度进行了理论推导, 将形状优化的方法应用到叶片的罩量优化设计中, 建立了叶片罩量优化设计的一般流程. 工程数值算例表明, 采用基于梯度的优化算法, 在降低叶片形状优化设计的计算量的同时, 可以有效改善叶片应力分布, 叶片最大等效应力降幅达到了 20%.

参考文献:

- [1] 蔡肇云, 金六周. 航空发动机强度设计、试验手册(试用本): 叶片强度与振动计算[M]. 北京: 第三机械工业部第六研究院, 1981.
- [2] 《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, 2001.
- [3] 王咏梅, 陈葆实. 罩量调节对风扇压气机气动性能和强度影响的研究[J]. 航空发动机, 2000, 26(1): 6-11.
WANG Yongmei, CHEN Baoshi. The effect of the modification of gravity center eccentricity on aerodynamic performance and structural strength of fan/compressor[J]. Aeroengine, 2000, 26(1): 6-11. (in Chinese)
- [4] 张正秋, 邹正平, 刘宝杰. 高负荷风扇叶片重心线调节对叶片强度和气动性能的影响分析[J]. 航空学报, 2006, 27(3): 380-385.
ZHANG Zhengqiu, ZOU Zhengping, LIU Baojie. Influence of gravity center modification on structural strength and aerodynamic performance of blade in high load fan blade design[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(3): 380-385. (in Chinese)
- [5] 段海波, 马枚. 压气机叶片罩量优化的数学模型研究[C]// 中国航空学会第八届发动机结构强度振动学术会议论文集. 西安: 西北工业大学出版社, 1996: 80-83.
- [6] 王荣桥, 林丹, 樊江, 等. 基于特征的压气机叶片结构设计[J]. 航空发动机, 2004, 30(2): 5-9.

- WANG Rongqiao, LIN Dan, FAN Jiang, et al. Feature-based structure design of compressor blades[J]. *Aero-engine*, 2004, 30(2): 5-9. (in Chinese)
- [7] Ahn C S, Kim K Y. Aerodynamic design optimization of a compressor rotor with Navier-Stokes analysis[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2003, 217(2): 179-184.
- [8] Jang C M, Kim K Y. Optimization of a stator blade using response surface method in a single-stage transonic axial compressor[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2005, 219(8): 595-603.
- [9] Jang C M, Li P, Kim K Y. Optimization of blade sweep in a transonic axial compressor rotor[J]. *JSME International Journal-Series B*, 2005, 48(4): 793-801.
- [10] Samad A, Kim K Y. Multi-objective optimization of an axial compressor blade[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2008, 22(5): 999-1007.
- [11] Samad A, Kim K Y. Shape optimization of an axial compressor blade by multi-objective genetic algorithm[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2008, 222(6): 599-611.
- [12] Oyama A, Liou M S, Obayashi S. Transonic axial-flow blade shape optimization using evolutionary algorithm and three-dimensional Navier-Stokes solver[R]. *AIAA Paper* 2002-5642, 2002.
- [13] 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): 257-266.
- ZHOU Zhenggui. Current situations and key techniques of automatic aerodynamic design of compressor/fan blades[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(2): 257-266. (in Chinese)
- [14] 杨军刚. 压力载荷作用下的结构拓扑形状联合优化[D]. 西安: 西北工业大学, 2009.
- YANG Jungang. Simultaneous topology and shape optimization of structure under pressure loads[D]. Xi'an: North-western Polytechnical University, 2009. (in Chinese)
- [15] ZHANG Weihong, WANG Dan, YANG Jungang. A parametric mapping method for curve shape optimization on 3D panel structures[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2010, 84(4): 485-504.