

文章编号:1000-8055(2011)09-2032-07

复杂构件 MDO 六面体网格重构方法

王荣桥, 贾志刚, 樊江, 胡殿印, 申秀丽
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 从参数化模型和模型拓扑特征出发, 提出了一套六面体网格重构的有限元模型建模方法. 同时, 使用随动点来约束网格的拓扑边界, 保证网格的正交性, 确保了网格重构后的网格质量; 结合现有的商用软件 ICEM 的网格生成算法, 开发了基于特征的参数化有限元 (FE) 建模程序. 最终, 针对航空发动机低压涡轮带冠叶片的叶冠参数进行的多学科优化 (MDO), 实例验证了网格重构方法的有效性和可行性.

关 键 词: 网格重构; 随动点; 拓扑特征; 基于特征的参数化有限元 (FE) 模型; 多学科优化

中图分类号: V232.4

文献标志码: A

Hexahedral mesh regeneration method for MDO on complex aero-engine components

WANG Rong-qiao, JIA Zhi-gang, FAN Jiang, HU Dian-yin, SHEN Xiu-li

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A set of hexahedral mesh regeneration modeling method was presented in this paper based on the tools of both the parametric model and topological characteristic. The parametric fixed points were designed on the local where the optimized parameters exit, while their function was to constraint the meshing topology boundary and then ensure the orthogonality of the grid and the quality of mesh regeneration. Further, the feature-based parametric finite element (FE) modeling method was developed from the mesh generation algorithm of ICEM. Finally, testing the case of the MDO (multidisciplinary design optimization) on the low pressure turbine shrouded blade, the method of the mesh regeneration showed in this paper is effective.

Key words: mesh regeneration; parametric fixed point; topological characteristics; feature-based parametric finite element (FE) modeling; multidisciplinary design optimization (MDO)

当前针对航空发动机复杂三维模型的多学科优化 (MDO) 分析, 主要是依据各种数值仿真工具进行的, 这其中包括针对流体的有限体积法、有限差分法和针对结构的有限元方法. 这些方法的基础都是离散的网格模型, 将复杂结构的几何模型解析为形状简单的、易于方程描述的四面体或者

六面体网格. 所以, 网格的质量就成了影响数值仿真精度的关键因素之一.

面向涡轮 MDO 设计的分析对有限元网格模型的要求^[1-3]包括: 第一, 由于 MDO 需要循环计算至最优点, 所以几何模型需要反复的更改, 这必然要求 MDO 中的有限元模型必须能够自动进行

收稿日期: 2010-09-16; 修订日期: 2011-05-13

作者简介: 王荣桥 (1968—), 男, 山东莱阳人, 教授、博士生导师, 研究方向为航空发动机结构强度可靠性、多学科优化设计等.

网格重构;第二,在网格重构的过程中必须保证网格的质量,高质量的网格才能确保数值仿真的精度,使用低质量的网格可能使本次数值仿真崩溃,即使能够进行,低精度的数值结果也会影响 MDO 中最佳设计点的寻找。

1 多学科优化中的网格重构

三维 MDO 的有限元建模使用的网格主要包括四面体单元和六面体单元。网格的划分方式直接影响微分方程离散的难易,也关系到解的精度、收敛的难易快慢和计算效率的高低。相比四面体网格,六面体网格由于求解精度高、抗变形能力强、单元数量少等优点成为数值分析的首选网格。目前可以自由划分的四面体网格在 multidisciplinary optimization 中得到广泛的应用。但是在网格数量方面,对于相同结构,四面体有限元模型往往需要四到十倍的网格数量才能达到和六面体有限元模型相同的求解精度。庞大的网格数量必然增加求解的时间成本。遗憾的是,高阶次的四面体单元在计算时倾向于倒置 (inversion) 和内边向外翻转 (turn inside out) 的问题,这将严重的影响数值计算的精度^[4-7]。但六面体网格具有复杂的拓扑关系,且对模型适应能力差,对于不规则外形的结构,连续完整的六面体有限元模型网格重构将会更加困难。这在复杂的航空发动机构件优化中尤其的真实。所以,本文结合参数化模型和模型拓扑特征研究了六面体网格重构方法。

1.1 低压涡轮带冠叶片参数化模型

参数化模型^[8]可以得到通用的产品设计模型,不仅能够完整地描述产品的几何结构,而且能为产品的后续过程提供充足的信息,从而提高信息复用程度和产品开发的自动化程度,大大地缩短产品开发周期。这正好符合多学科优化中几何结构自动更新的特点。

本文选择低压涡轮带冠叶片验证基于特征参数化有限元 (FE) 建模方法。本研究采用锯齿形叶冠,其在装配时,工作面靠预扭压紧 (或刚好接触)。工作时,由于叶片的扭曲变形,工作面紧度加大,因而减振效果较好。为了加强封气效果,减少叶片间隙处的轴向漏气,更有效地提高涡轮效率,叶冠上带有封严齿,与涡轮机匣上易磨环相配合,可以取得很好的封严效果。依据航空发动机叶冠的一般设计准则和技术要求,低压涡轮叶冠如图 1 所示。表 1 展示了图 1 中各参数的物理意义。

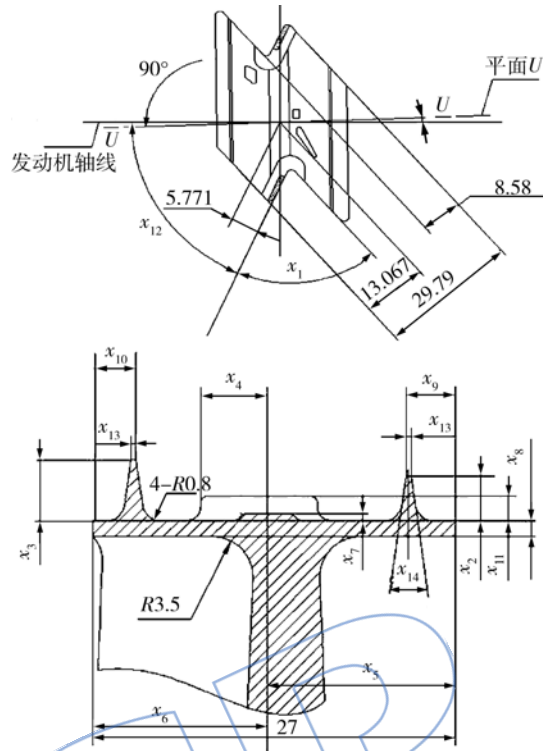


图 1 锯齿叶冠参数化模型 (单位:mm)

Fig. 1 Parametric model of serrated shroud (Unit:mm)

表 1 锯齿叶冠参数释义

Table 1 List of parameters of serrated shroud

模型参数	参数解释
x_1	非阻尼面与发动机轴线夹角
x_2	右端封严齿的高度
x_3	左端封严齿的高度
x_4	阻尼凸台半宽
x_5	中心线到右端面的距离
x_6	中心线到左端面的距离
x_7	中部小凸台厚
x_8	叶冠厚度
x_9	封严齿定位尺寸
x_{10}	封严齿定位尺寸
x_{11}	阻尼凸台厚
x_{12}	阻尼面与发动机轴线夹角
x_{13}	封严齿宽
x_{14}	封严齿角度

1.2 模型拓扑特征模块

六面体网格复杂的拓扑将会影响网格的质量和网格重构的质量。因此,本研究将网格拓扑过程

分成两部分:一部分是模型拓扑特征;另一部分是确保重构网格的质量,将由本研究所开发程序中的随动点来保证。

模型拓扑特征来源于网格拓扑和商业软件 ICEM 中虚拟块的思想^[9-11]。创建虚拟块,通过直线和高曲率的边线分割虚拟块,然后,将虚拟块投影到几何模型的表面上,并代替几何模型进行网格生成。这些虚拟块将构成模型拓扑特征信息,并且可以单独的保存。最终,结合参数化模型稳健的几何特征,程序可以反复地调用模型拓扑特征信息,进行网格重构。

目前,在对计算流体动力学(CFD)模型进行的网格画分时存在多种的拓扑策略,这包括 Y-block, O-block, J-block, C-block 等等。同样,这些网格的拓扑策略也适用于结构有限元网格。例如如图 2 所示,在叶片和冠面的转接处存在一个楔形角,这将很大的影响冠面上网格的内角质量。在这里采用 Y-block 策略,如图 2(a),在牺牲楔形角附近几个网格质量的情况下,保证冠面上远离楔形角部分的网格质量。再如图 2(b)所示,由于叶片尾缘是圆弧形,所以 O-block 的使用可以保证网格线与几何体的正交性。

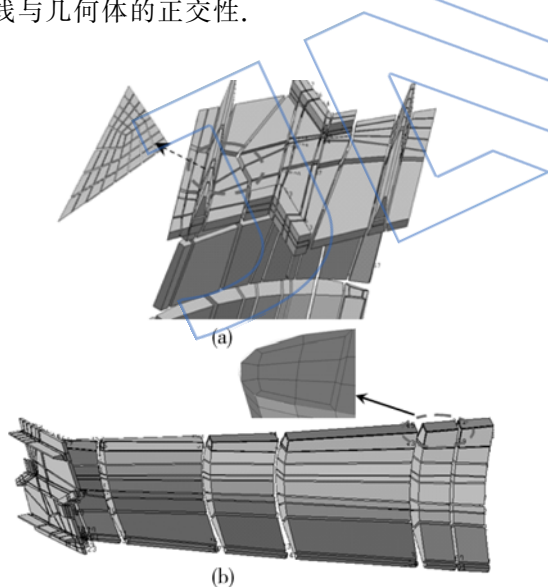


图 2 低压涡轮带冠叶片的拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of shrouded blade

利用结构的拓扑特征信息还有一个优点就是方便结构新特征的添加。在以往的有限元模型建立时,对几何结构作略微的变化往往会导致有限元模型重新建立。重建的过程费时又费力,设计人员在有限元模型的修正上浪费时间。而本文提出的模型拓扑特征模块可以为建立好的模型特征添加新的模型特征。例如倒角,如图 3。在几何结构

上添加完倒角特征后,只需要调入先前的模型拓扑信息,然后通过虚拟块的分割功能将倒角特征加入。另外,模型的拓扑特征信息还可以加入网格稀疏性信息,结合单步的数值仿真的精度和效率,在拓扑信息上加上合适的网格尺寸。

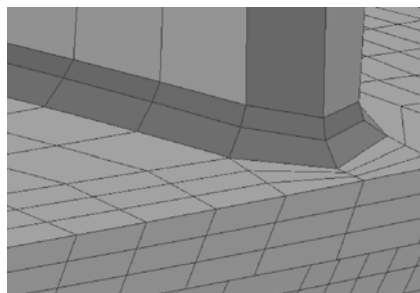


图 3 倒角特征

Fig. 3 Feature of chamfer

在网格重构的过程中,本文通过设计程序调用模型拓扑特征的方式实现航空发动机复杂结构六面体网格重生。对于复杂结构,如果每次重构都从网格拓扑开始,会使得有限元模型建立过程异常的困难繁琐,程序代码众多,也容易导致出错,重构失败。所以,先根据复杂的几何结构建立模型拓扑特性文件,然后在程序中调用这个模型拓扑文件。

2 基于特征的参数化 FE 建模程序

航空发动机复杂构件的 MDO 分析特点是有限元模型必须能够自动更新,中间不需要人为干预,本研究利用 ICEM 软件提供的 script 接口和批处理方式,调用软件部分功能,使分网过程实现流程化和自动化操作。程序流程图(图 4)展示网格重构过程的核心内容,包括随动点的建立和对应、特征变换,以及外部的参数驱动。

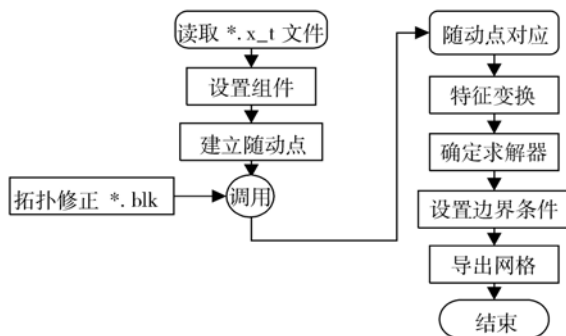


图 4 基于特征的参数化 FE 建模流程图

Fig. 4 Flow-chart of feature-based parametric finite element modeling

2.1 随动点的建立及对应

在结构拓扑已经确定的情况下,随着优化过程中设计参数的变化,尽管结构的拓扑特征不变,但是对于局部特征,尤其是在设计参数大范围变动的地方,如果不加修正的使用原先的网格拓扑文件,将会导致网格质量的下降甚至网格生成失败.针对这一问题,本文采用参数化建模的思想,在包含结构设计参数的局部创建参数化的点,这些点称之为随动点.随动点具有几何参数化的特性,随着结构尺寸的变化而改变.随动点的主要作用是方便网格定位,在网格重构中保证网格的质量.

例如叶冠网格中,如图5,在优化齿顶参数时,两个随动点需要建立在这个特征上.由于点 v_{183} 和点 v_{179} 的位置会随着封严齿定位尺寸 x_{10} 的改变而变化,所以为了保证在叶冠厚度和此齿顶上的网格重构的质量,在基于特征参数化 FE 建模程序里建立随动点 $pnt.02$ 和 $pnt.03$. $pnt.02$ 和 $pnt.03$ 两点分别是由几何点 v_{183} 和点 v_{179} 在 $line1$ 上的投影得到的.如果点 v_{183} 和点 v_{179} 的位置变动,由于投影关系,点 $pnt.02$ 和 $pnt.03$ 的位置也会相应的改变.同时,将模型拓扑特征的相应顶点锁定在 $pnt.02$ 和 $pnt.03$ 上,使得网格拓扑以其为边界点,由于投影所带来的正交关系,保证了这一局部网格的正交性.

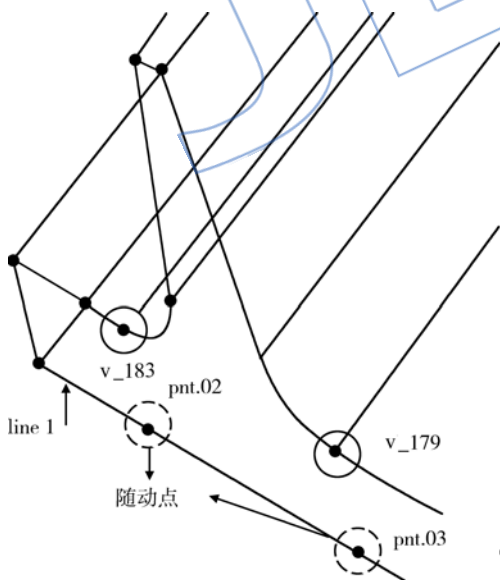


图5 局部随动点

Fig. 5 Local parametric fixed points

随动点需要在具有以下特征的位置建立:

1) 对于局部具有需要进行优化的尺寸时,需要使用随动点来确保网格重构的质量,如图5所

示;

2) 在进行 block 分割操作时,如图6(a),需要先建立随动点,再以该随动点来进行 block 分割的定位依据;

3) 在使用拓扑策略对模型做特定的拓扑策略时,需要先建立随动点.例如图6(b),在对叶片尾缘进行 O-block 前,需要根据尾缘的大小,在尾缘附近建立随动点.

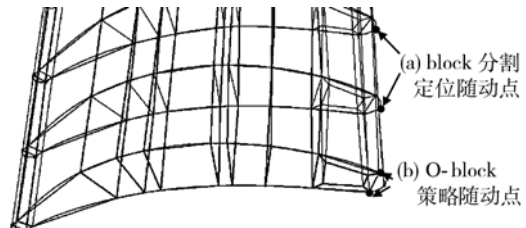


图6 拓扑随动点

Fig. 6 Topological parametric fixed points

随动点的建立优点:首先,在单步数值仿真中就起到了提高网格质量的作用,这是因为随动点的建立和几何结构有着直接相对应的关系,这将有利于网格的正交性;其次,网格的重构过程中,随动点和几何结构的相关性,使网格拓扑结构可以随着参数的变化而变化,保证了重构网格的正交性,提升重构网格的质量.

2.2 特征变换

特征变化功能是在充分利用现有网格模型的基础上,解决有限元模型的两类问题:一是周期性对称分析和边界条件完整性之间的矛盾;二是学科之间结构体空间位置的变化所导致的气动数据坐标和结构结点坐标不匹配.

例如在低压涡轮带冠叶片的分析中,由于周期性,可以简化使用单个叶片进行模拟仿真,但是由于叶冠间接接触应力的存在,通常选择在仿真分析中模拟三个带冠叶片,以确保数值仿真边界条件的合理性^[12],保证叶冠两侧阻尼面接触应力的真实性.本文所提出的特征变化功能之一就是充分利用已有的有限元模型,得到满足完整性的数值分析结果.主要分为两个步骤:先确定单个带冠叶片的周期性边界条件,如图7(a);然后把拓扑信息、几何信息一同进行周期性复制,如图7(b),复制过程中需要保证所有几何信息和拓扑信息的扩展.

另外,对于 MDO,各学科的专业研究人员分析时可能造成坐标系不统一的情况.特征变换模

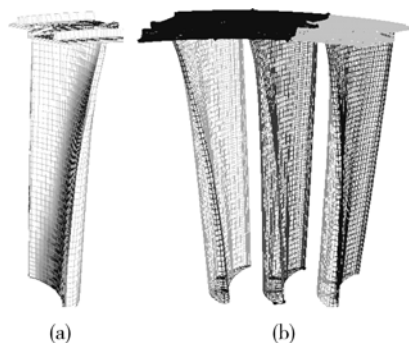


图7 特征变换

Fig. 7 Transformation of feature

块利用特征的空间变换功能,根据分析需要适时的改变有限元模型的空间位置.

2.3 参数驱动

网格重构的过程还必须包含参数驱动程序.参数驱动程序的执行过程是:首先,利用软件UG(Unigraphics)建立的参数化模型,并且使用已有的参数表达式文件控制UG中设计参数;其次,在优化中,优化算法通过对当前设计点的设计变量和数值分析结果进行分析,得到下一步设计变量的步长和方向,将当前设计变量修改后写入参数表达式文件.然后,通过设计开发的UG_API读取参数表达式文件中的设计变量,达到修改模型并输出parasolid格式(*.x_t)模型文件.最终,在批处理模式下,通过基于特征的参数化FE模型程序调用模型的中间格式parasolid文件实现几

何体的更新.

3 网格重构方法实现

本文的MDO重点在于展示复杂结构六面体有限元模型重构的方法.所以,仅对叶冠参数进行优化以即可验证该方法.低压涡轮带冠叶片材料采用DZ125,该材料适用于1000℃下的动叶和1050℃下的静叶设计.边界条件包括叶身表面的温度场和压力场,其数值大小是通过CFD计算得到涡轮叶片的结点温度和压力.同时,在结构计算时,叶片采用根部固支和离心力.采用序列二次规划算法(sequential quadratic programming,简称SPQ)帮助验证本文提出的六面体网格重构方法.

3.1 六面体网格重构的质量

本研究围绕基于特征的FPFEM建模程序,建立带冠叶片的网格模型,其多学科优化分析流程如图8所示.网格模型总共包括37254个六面体单元和26956个表面壳元,并且针对软件ANSYS的单元质量检查标准,本方法生成的网格没有警告单元和错误单元.图9和图10分别展示了以单元内角和单元长宽比为标准的单元质量.

并且在网格重构的过程中,网格质量保持不变.图11所示为带冠叶片优化分析过程中一个萼齿高度参数变化所带来的网格重构.可以看出在优化流程中,六面体网格可以成功的应用于有限元模型的建立,能够自动重构网格,并且能够得到高质量的六面体网格.

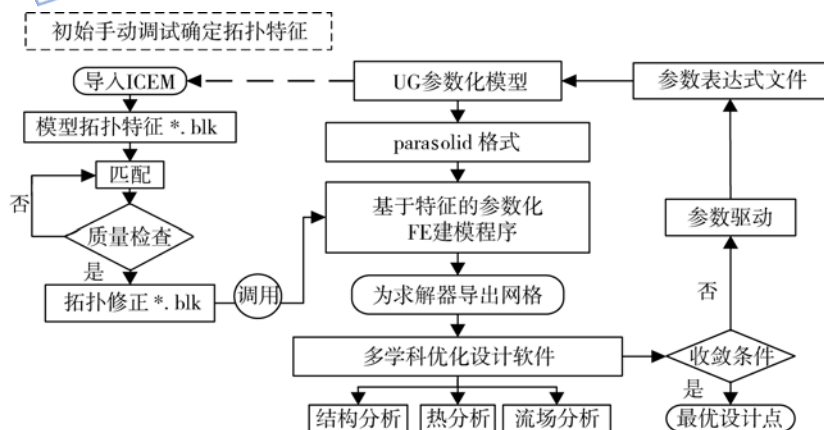


图8 多学科优化的网格重构流程

Fig. 8 Mesh generation process of MDO

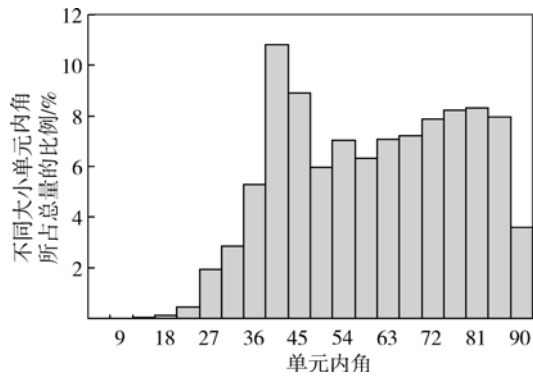


图9 网格质量——内角

Fig. 9 Angle as the criterion

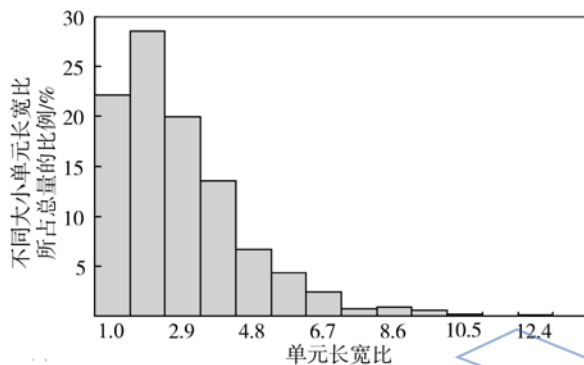


图10 网格质量——单元长宽比

Fig. 10 Aspect ratio as the criterion

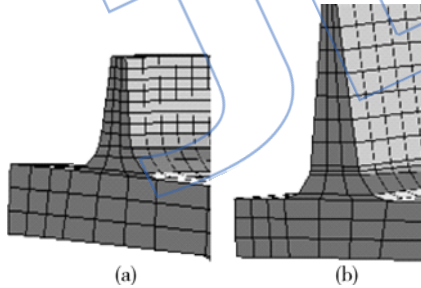


图11 网格重构的局部展示

Fig. 11 Result of simulation

3.2 低压叶冠参数的优化结果

优化模型选择为

$$\min M_{\text{mass}}$$

$$\text{s. t. } T_{\text{max}} - 1273 \text{ K} \leq 0$$

$$\sigma_{\text{b_max}} \leq \text{Endurance strength}/1.45$$

$$\sigma_{\text{z_max}} \leq \text{Bearing strength}$$

$$\sigma_{\text{f_max}} \leq \text{Endurance strength}/1.3$$

$$dx_{\text{tip}} \leq 0.0005$$

(Maximum elongation at tip)

$$X \in [a, b]$$

其中 M_{mass} 为优化目标——带冠叶片的质量; T_{max} 为带冠叶片的最大温度; $\sigma_{\text{b_max}}$ 为叶身最大应力; $\sigma_{\text{z_max}}$ 为阻尼面的最大挤压应力; $\sigma_{\text{f_max}}$ 为叶身和叶冠转接处的最大应力; dx_{tip} 为叶尖的最大变形量; X 为叶冠参数; $[a, b]$ 为参数的变化范围。

在低压涡轮带冠叶片的优化中对三个带冠叶片进行分析以达到考虑叶冠接触的目的。这将包括两个接触对, 单个设计点的数值仿真时间将会有所增加。整个优化过程耗时 27.3 h。表 2 展示了在保证约束条件在边界条件的限制下, 低压涡轮带冠叶片的质量下降了 2.01%。表 3 展示在优化前后各个几何设计变量的变化情况。

表2 叶冠约束和优化目标的优化结果

Table 2 Comparison of constraints and object before and after optimization

Constraint	Initial	Optimized	Effect/%
$\sigma_{\text{b_max}}/\text{MPa}$	441.415	495.364	+10.9
$\sigma_{\text{z_max}}/\text{MPa}$	80.1019	115.673	+30.8
$\sigma_{\text{f_max}}/\text{MPa}$	306.608	495.364	+38.1
Object	Initial	Optimized	Effect/%
M_{mass}/g	130.480	127.857	-2.01

表3 叶冠设计变量的优化结果

Table 3 Comparison of parameters on the serrated shroud before and after optimization

Geometric parameters	Initial	Optimized
x_2/mm	3.0	2.7
x_3/mm	3.5	3.1
x_4/mm	2.0	1.8
x_5/mm	13.0	12.2
x_6/mm	12.0	11.0
x_7/mm	1.7	1.3
x_8/mm	1.4	1.0
x_9/mm	3.7	3.89
x_{10}/mm	3.3	3.28
x_{11}/mm	2.8	2.52
$x_{12}/(^{\circ})$	62.0	63.0

4 结 论

本文通过对航空发动机复杂构件多学科优化

时网格重构方法的研究,研究结论如下:

1) 通过使用参数驱动程序修改参数表达式文件达到更新参数化模型的目的;然后,调用已设计好的模型拓扑特征文件,结合 ICEM 的网格划分算法,实现了多学科优化中的网格重构。

2) 在原有参数化模型的基础上添加随动点,结合拓扑特征文件详细定位网格拓扑位置,保证网格的正交性,确保了网格重构后能够得到高质量的六面体网格。

3) 针对网格重构,本文提出了基于特征的参数化 FE 建模方法,并结合低压涡轮带冠叶片验证了该方法有限元模型生成的稳定性和可行性。

4) 本研究为航空发动机复杂结构提供了一套稳定可行的多学科优化设计和分析方法。

参考文献:

- [1] 杨俊杰,王荣桥,樊江,等. 涡轮叶片的气动-热-结构多学科设计优化研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(3): 617-622.
YANG Junjie, WANG Rongqiao, FAN Jiang, et al. Multi-disciplinary aerodynamic-thermal-structure design optimization for turbine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(3): 617-622. (in Chinese)
- [2] 田文正,王荣桥. 基于 MDO 体系的涡轮叶片热-结构耦合分析[J]. 航空发动机, 2008, 34(2): 5-9.
TIAN Wenzheng, WANG Rongqiao. Coupled thermal-structural analysis of turbine blade based on MDO system[J]. Aeroengine, 2008, 34(2): 5-9. (in Chinese)
- [3] Baker M L, Munson M J, Alston K Y, et al. Integrated hypersonic aeromechanics tool (IHAT) [R]. AIAA 2003-6952, 2003.
- [4] Costa V, Oliveira L, Figueired A. A control volume based finite element method for three-dimensional incompressible turbulent fluid flow, heat transfer and related phenomena [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1995, 21(5): 591-613.
- [5] Cifuentes A O, Kalbag A. A performance study of tetrahedral and hexahedral elements in 3-D finite element analysis[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1992, 12(3-4): 313-318.
- [6] Ramos A, Simoes J. Tetrahedral versus hexahedral finite elements in numerical modeling of the proximal femur[J]. Medical Engineering and Physics, 2006, 28(9): 916-924.
- [7] Kiran H S, Srinivas C T, Nicole M G. Feature-based multiblock finite element mesh generation[J]. Computer-aided Design, 2010, 42(12): 1108-1116.
- [8] 张健乔,刘永红,吕广忠. 基于参数化模型特征的有限元网格划分方法研究[J]. 制造业自动化, 2008, 27(8): 33-36.
ZHANG Jianqiao, LIU Yonghong, LÜ Guangzhong. The FEM generation method based on characteristic[J]. Manufacturing Automation, 2008, 27(8): 33-36. (in Chinese)
- [9] Shivanna K H, Tadepalli S C, Grosland N M. Feature-based multiblock finite element mesh generation[J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(3): 1108-1116.
- [10] 关振群,宋超,顾元宪,等. 有限元网格生成方法研究的新进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(1): 1-14.
GUAN Zhenqun, SONG Chao, GU Yuanxian, et al. Recent advances of research on finite element mesh generation methods[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2003, 15(1): 1-14. (in Chinese)
- [11] Charles E S, Venkat T, David M, et al. Multidisciplinary analysis and optimization of combustion sub-system using a network-centric approach[C]// 42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Material Conference and Exhibit, Seattle, WA: [s. n.], 2001: 1-12.
- [12] 汤凤,孟光. 带冠涡轮叶片的接触分析[J]. 噪声与振动控制, 2005, 25(4): 5-7.
TANG Feng, MENG Guang. Contact analysis of shrouded turbine blade[J]. Noise and Vibration Control, 2005, 25(4): 5-7. (in Chinese)