

doi :10.3969/j.issn.1005-3026.2016.06.016

基于 Kriging 模型的数据拟合及多场耦合动力学特性分析

杨文军¹,袁惠群²,赵天宇¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院,辽宁 沈阳 110819 ;2. 东北大学 理学院,辽宁 沈阳 110819)

摘 要 : 航空发动机日益向高负荷、高效率和高可靠性的趋势发展 ,使得多物理场耦合问题越来越受到重视 .以某型航空发动机压气机的叶盘系统为研究对象 ,采用循环对称分析法 ,建立了其单扇区三维流场和结构模型 .考虑前一级静叶尾迹的影响 ,模拟了压气机内部的三维流场 .基于 Kriging 模型实现了流场气动、温度载荷向结构场的传递 ,并讨论了气动、温度、离心力的耦合作用对压气机叶盘系统的疲劳寿命的影响 .结果表明 ,利用 Kriging 模型进行多场耦合界面载荷数据的传递可以满足多场耦合动力学的计算要求 .在低压压气机中 ,离心力载荷对叶盘系统的变形、应力起到主要作用 ,气动压强、温度载荷引起的弯曲应力可以抵消一部分离心力载荷引起的弯曲应力 ,但温度载荷会使得叶盘系统的最大变形增加 .

关 键 词 : 压气机转子 ;循环对称分析法 ;Kriging 模型 ;多场耦合 ;动力学特性

中图分类号 : V 231.3 **文献标志码 :** A **文章编号 :** 1005-3026(2016)06-0834-05

Multi-field Coupling Dynamic Characteristics and Data Fitting Based on Kriging Model

YANG Wen-jun¹ ,YUAN Hui-qun² ,ZHAO Tian-yu¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation , Northeastern University , Shenyang 110819 , China ;
2. School of Sciences , Northeastern University , Shenyang 110819 , China. Corresponding author : YUAN Hui-qun , E-mail : yuan_hq@163.com)

Abstract : Aero-engine is increasingly to face the trend of higher load , efficiency and reliability , so that multi-field coupling problems are taken more and more attention. This research took the semal system of an aero-engine compressor as the research object , 3D flow field in the single sector and structural models were established by the method of cyclic symmetric. Considering the influence of former stator wakes , compressor flow field was simulated. Based on the Kriging model , load transfer of aerodynamic pressure and temperature achieved from flow field to blade structure. Then the coupling effects of aerodynamic pressure , temperature and centrifugal stress on compressor fatigue life were discussed. The results show that the load transfer with the Kriging model can meet the requirement of multi-field coupling dynamic calculation. In the low pressure compressor , centrifugal force plays a major role on deformation and stress of semal system , and bending stress induced by aerodynamic pressure and temperature can counteract part of bending stress induced by centrifugal force. However , temperature load makes the maximal deformation of blade-disc system increase.

Key words : compressor rotor ; cyclic symmetric method ; Kriging model ; multi-field coupling ; dynamic characteristics

压气机作为航空发动机的关键组成部分之一 ,其工作条件十分复杂 ,承受着离心力、气动力、

收稿日期 : 2015-04-23
基金项目 : 国家自然科学基金资助项目(51275081) ;国家自然科学基金重点资助项目(51335003) ;沈阳市科技创新专项(F15-199-1-01) .
作者简介 : 杨文军(1988-) ,男 ,内蒙古赤峰人 ,东北大学博士研究生 ;袁惠群(1954-) ,男 ,河北石家庄人 ,东北大学教授 ,博士生导师 .

振动、热应力等综合作用。航空发动机日益向高负荷、高效率和高可靠性的趋势发展,同时叶片材料越来越轻薄,这就使得发动机内部气动载荷对压气机叶片的影响大大增加,导致叶片的振动问题越来越显著。因此,综合考虑气动、温度、叶-盘结构的耦合作用,对研究压气机的气动稳定性和疲劳寿命是非常必要的。

国内外学者对叶片的多场耦合力学行为作了大量研究。1946 年 Collar 提出了气动弹性力学三角形^[1],直观地表达了气动弹性问题中各种力之间的联系。Eckert 等^[2]研究了等腰三角形、长方形截面的通道中壁面内周向导热对通道内紊流换热的影响。随着航空工业的迅猛发展,考虑单一物理场已无法满足发动机的性能要求,多物理场耦合问题日益得到重视^[3-4]。Tran 等^[5]利用流固耦合方法在时域和频域上分析了气动弹性的稳定性。Gottfried 等^[6]借助流固耦合模型通过时域仿真预测了多种振动模式下的气动阻尼。王征等^[7]和樊小莉等^[8]基于计算流体动力学和计算结构力学耦合算法,研究了压气机典型叶片的流固耦合问题及颤振特性。袁惠群等^[9]利用热-结构-动力学耦合理论,探讨了停车后不同时刻的稳态温度场对某航空发动机高压转子系统的振动特性的影响。

更多学者对流固耦合和热-结构耦合问题进行了研究,而综合考虑气动、温度、叶-盘结构多场耦合的动力学问题还有待进一步研究。本研究建立了某型航空发动机压气机的单扇区三维流场和结构模型,考虑了前一级静叶尾迹的影响,采用循环对称分析法,模拟了压气机内部的三维流场。基于 Kriging 模型实现了流场气动、温度载荷向结构场的传递,并讨论了气动、温度、离心应力的耦合作用对压气机叶盘系统的疲劳寿命的影响。

1 计算模型及理论

1.1 计算模型

本研究以某型航空发动机为研究对象,选取流场和结构的单扇区模型作为计算区域,采用循环对称法进行分析,具体模型如图 1 所示。为了考虑前一级静叶尾迹的影响,流体域包含了前一级静叶流场及下游动叶流场两部分。应用 CFD 软件的专业前处理工具 Gambit 对单通道流体域进行网格划分,生成结构化六面体网格单元总数为 67 925,节点总数为 79 304。经检查网格的长宽比小于 5,正交性大于 10,延展比小于 1 000,网格的

质量良好。固体域为动叶单扇区,叶片和轮盘部分分别采用 Solid185 单元和 Solid187 单元进行网格划分,得到网格的单元总数为 67 891,节点总数为 105 812。

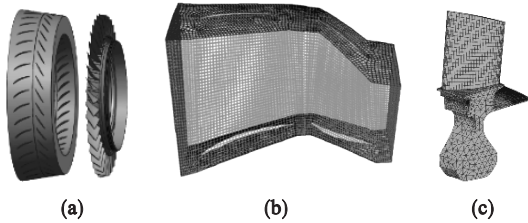


图 1 计算模型

Fig. 1 Models of computation

(a)—流场和结构模型;(b)—流场域网格;
(c)—固体域网格。

压气机动、静叶流场的交界面采用滑移网格处理,选择标准 $k-\varepsilon$ 模型和隐式耦合求解方法。压气机工作转速为 11 383 r/min,进口总压为 $1.0 \times 10^1 325$ Pa,温度为 300 K,出口静压为 $1.08 \times 10^1 325$ Pa,固壁为无滑移绝热壁面,介质为可压缩理想空气。

叶片材料为钛合金 TA11,其密度为 $4 370 \text{ kg/m}^3$,轮盘材料为钛合金 TC17,其密度为 $4 680 \text{ kg/m}^3$ 。叶片和轮盘材料在不同温度下的弹性模量如表 1 所示,泊松比为 0.3。固体域求解时,对榫筒截面节点进行约束,设置为固定边界条件。

表 1 各温度下叶片和轮盘材料的弹性模量
Table 1 Elastic modulus of blade and disk materials at different temperatures GPa

材料	温度/℃					
	20	100	200	300	400	500
叶片 TA11	113	109	106	101	97	93
轮盘 TC17	112	105	99	97	92	83

1.2 控制方程

1.2.1 结构的动力学方程

叶片结构的动力学响应可以描述为^[9]

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t). \quad (1)$$

式中: M 表示质量矩阵; C 表示阻尼矩阵; K 表示刚度矩阵; u 表示叶片结构的位移; \dot{u} 表示叶片结构的速度; \ddot{u} 表示叶片结构的加速度; F 表示作用于叶片表面的气动载荷。

根据文献[10]可知,叶片的气动载荷可简化为简谐激励。设

$$u = u_{\max} e^{i\alpha} e^{i\omega t} = u_0 e^{i\omega t}, \quad (2)$$

$$F = F_{\max} e^{i\beta} e^{i\omega t} = F_0 e^{i\omega t}. \quad (3)$$

式中: u_{\max} 为位移幅值; F_{\max} 为气动载荷幅值; α 为

位移相位角 β 为气动载荷相位角 ω 为振动频率.

将式 (2) 、式 (3) 代入式 (1) , 整理得

$$(K - \omega^2 M + i\omega C)u_0 = F_0. \quad (4)$$

通过求解方程 (4) , 可以获得在气动载荷作用下叶片结构的响应. 假定多场耦合界面上流体域表面位移与结构域表面位移相等 , 以此作为边界条件.

1.2.2 流体的动力学方程

对于流体域 , 其需满足各物理守恒定律 , 如质量守恒、动量守恒及能量守恒等. 虽然各守恒方程包含了不同个数的变量 , 但都反映了物理量在单位时间、单位体积内的守恒特性. 令 φ 为通用变量 , 则控制方程可表示为

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\varphi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\varphi) + S. \quad (5)$$

式中 : $\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}$ 为瞬态项 ; $\text{div}(\rho u\varphi)$ 为对流项 ; $\text{div}(\Gamma \text{grad}\varphi)$ 为扩散项 ; S 为源项.

压气机中气体的运动需考虑湍流模型 , 因为它属于带旋转的三维非稳态不规则运动. 选用标准 $k-\varepsilon$ 模型 , 其湍流能与耗散率的控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (7)$$

式中 ρ 是气体密度 μ 为流体的动力黏度 k 为湍流能 ε 为湍流耗散率 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ 为湍流黏度 ; $C_1 = 1.44 ; C_2 = 1.92 ; C_\mu = 0.09 ; \sigma_k = 1.0 ; \sigma_\varepsilon = 1.3$.

2 耦合界面的载荷传递

2.1 多场耦合分析流程

多场耦合分析的具体流程 (图 2) 如下 :

- 1) 基于专业 CFD 前处理软件 Gambit 建立三维流场的单扇区有限元模型 ;
- 2) 利用流体仿真软件 Fluent 进行压气机三维流场的 CFD 模拟 ;
- 3) 基于 Ansys 软件前处理模块建立叶盘结构的单扇区有限元模型 ;
- 4) 采用 Kriging 模型完成流场叶片表面气动压强、温度载荷向结构叶片的传递 ;

5) 利用 Ansys 软件热分析模块进行叶盘系统的热 - 结构耦合分析 ;

6) 基于有限元软件 Ansys 完成叶盘系统热 - 流 - 结构多场耦合动力学分析 ;

7) 输出分析结果 , 并进行后处理.

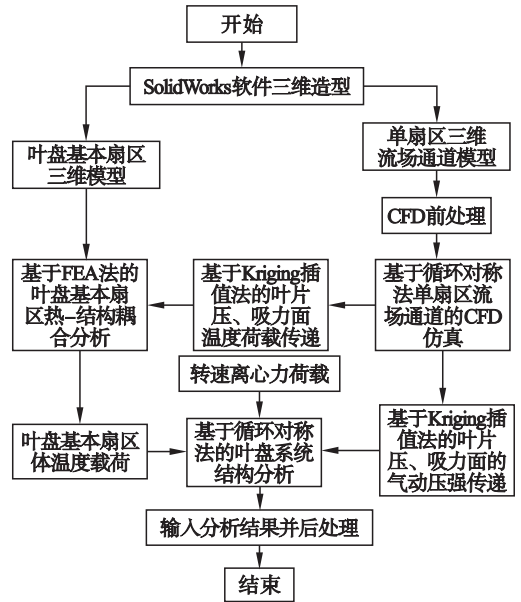


图 2 多物理场耦合分析流程
Fig. 2 Analysis process of multi-field coupling

2.2 基于 Kriging 模型的载荷传递

多物理场耦合动力学分析中的关键问题是如何实现耦合界面的载荷数据传递. 本文基于 Kriging 模型的耦合面载荷数据传递程序 , 实现了流场气动压强和温度载荷向结构场的传递.

Kriging 模型是一种方差最小的无偏估计模型 , 最初由南非地质学家提出 , 其在预估未知点处载荷的分布情况方面具有明显的优势. Kriging 模型中 , 以多项式和随机分布来表示全部函数值与自变量之间的关系 :

$$y(x) = F(\beta, x) + z(x). \quad (8)$$

式中 $F(\beta, x) = [f_1(x) f_2(x) \dots f_p(x)] \beta = f^T(x) \beta$ 表示回归模型 $z(x)$ 表示统计随机过程 , 其均值为 0 , 方差为 σ^2 .

经过推导可得待插值点 x 处的预测值 :

$$\hat{y}(x) = \hat{\beta} + r^T(x) R^{-1}(y - f \hat{\beta}). \quad (9)$$

式中 R 表示样本点之间的相关矩阵. 在计算的过程中 , 等式右端的参数可根据已知点的载荷分布获得.

经过对压气机内部三维流场的模拟 , 获得了流场动叶表面的气动压强和温度载荷. 借助 dacefit 函数 , 根据多场耦合界面流体域表面的节点坐标、气动压强或温度载荷来建立 Kriging 模型. 利用 predictor 函数 , 基于 Kriging 模型对多场

耦合界面结构域表面各节点的气动压强和温度载荷进行预测. 另外,采用优化算法进一步对 Kriging 模型的相关参数进行寻优,提高多场耦合界面载荷数据的传递精度.

依照上述过程,编制了基于 Kriging 模型进行气动压强和温度载荷传递的程序. 具体流程如下.

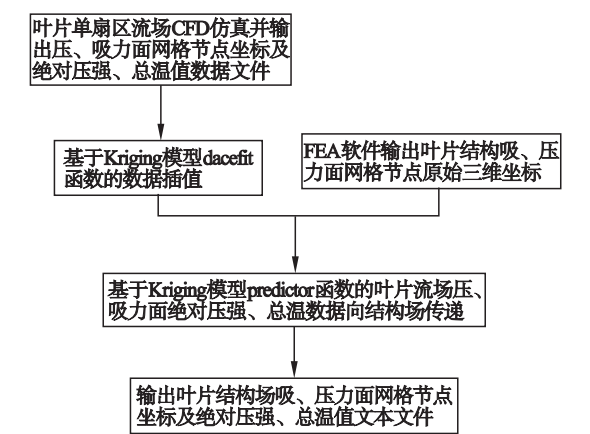


图 3 气动压强、温度载荷的传递流程
Fig. 3 Transfer process of aerodynamic pressure and temperature load

3 耦合计算结果与分析

3.1 载荷传递结果对比

根据 Kriging 模型实现了耦合界面的载荷传递,图 4~图 7 所示为流场域耦合界面节点的气动压强、温度分布及载荷数据传递后结构场耦合界面节点的气动压强、温度分布.

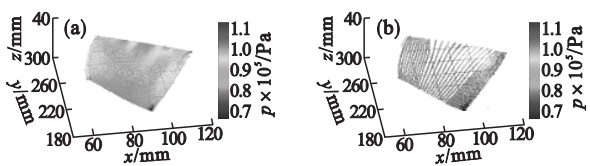


图 4 叶片吸力面节点的气动压强分布
Fig. 4 Aerodynamic pressure on blade suction surface nodes
(a)—流场;(b)—结构场.

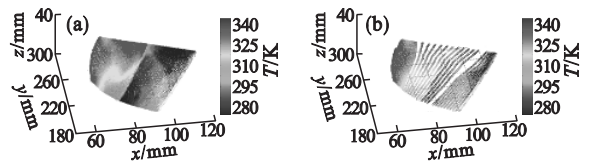


图 5 叶片吸力面节点的温度分布
Fig. 5 Temperature load on blade suction surface nodes
(a)—流场;(b)—结构场.

对比插值前后的叶片表面压强和温度的分布图可以发现,吸力面和压力面的流场节点压强分

布与结构节点压强分布吻合较好,说明利用 Kriging 模型进行压强载荷的传递可以满足多场耦合力学的计算要求.

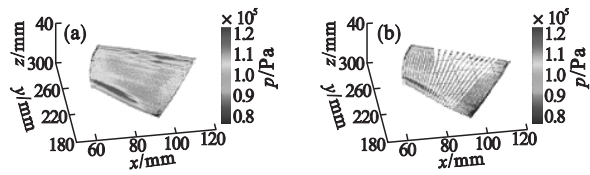


图 6 叶片压力面节点的气动压强分布
Fig. 6 Aerodynamic pressure on blade pressure surface nodes
(a)—流场;(b)—结构场.

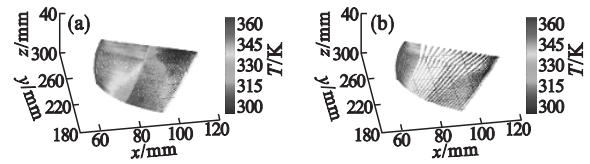


图 7 叶片压力面节点的温度分布
Fig. 7 Temperature load on blade pressure surface nodes
(a)—流场;(b)—结构场.

3.2 叶盘系统的强度分析

多场耦合计算后,叶盘系统的位移和应力分布如图 8 和图 9 所示.

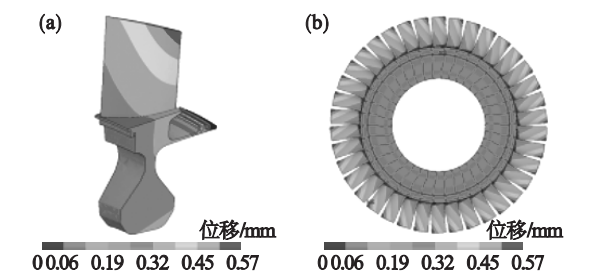


图 8 多场耦合作用下叶盘系统的位移分布
Fig. 8 Displacement distribution of blade-disc system on multi-field coupling
(a)—基本扇区;(b)—叶盘系统.

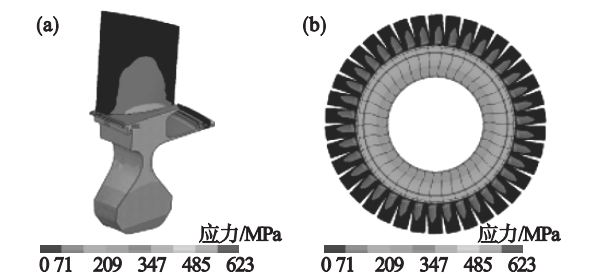


图 9 多场耦合作用下叶盘系统的应力分布
Fig. 9 Stress distribution of blade-disc system on multi-field coupling
(a)—基本扇区;(b)—叶盘系统.

为了进一步分析,分别计算了离心应力、气动

压强及温度载荷作用下压气机叶盘系统的动力学特性 ,得到了不同载荷作用情况叶盘系统的最大变形 S_{\max} 、最大 von Misses 应力 $\sigma_{v_{\max}}$ 及最大主应力 $\sigma_{p_{\max}}$,如表 2 所示.

表 2 不同载荷作用下叶盘系统的最大变形、von Mises 应力和主应力
Table 2 Maximum deformation , von Mises stress and principal stress of blade-disc system on various loads

载荷类型	S_{\max} /mm	$\sigma_{v_{\max}}$ /MPa	$\sigma_{p_{\max}}$ /MPa
离心力	0. 628	646	715
离心力、气动压强	0. 568	642	710
离心力、气动压强、温度载荷	0. 573	623	689

从表 2 中发现 ,仅有离心力载荷作用的情况下 ,压气机叶盘系统的最大变形、最大 von Misses 应力及主应力值最大. 施加气动压强、温度载荷作用后 ,最大 von Misses 应力及主应力值均有所降低. 但在离心力、气动载荷基础上增加温度载荷后发现 ,叶盘系统的最大变形有所增加 ,这主要由于温度载荷使得叶盘的弹性模量降低 ,导致了变形增加 ,增大了叶盘系统振动的可能性.

4 结 论

以某型航空发动机压气机的叶盘系统为研究对象 ,建立了三维流场和结构模型. 考虑前一级静叶尾迹的影响 ,采用循环对称分析法 ,对压气机内部的三维流场进行了模拟. 基于 Kriging 模型实现了流场气动、温度载荷向结构场的传递 ,并讨论了气动、温度、离心力的耦合作用对压气机叶盘系统的强度的影响 ,得出了以下结论 :

- 1) 基于 Kriging 模型插值后的吸力面和压力面流场节点的压强和温度分布与结构节点分布吻合较好 ,说明利用 Kriging 模型进行耦合界面载荷数据的传递可以满足多场耦合力学的计算要求.
- 2) 在低压压气机中 ,离心力载荷对叶盘系统的变形、应力起到了主要作用. 气动压强、温度载荷引起的弯曲应力可以抵消一部分离心力载荷引起的弯曲应力 ,但温度载荷会使得叶盘系统的最大变形增加.

参考文献 :

[1] Försching H W. Grundlagen der aeroelastik[M]. Berlin : Springer-Verlag ,1974.
[2] Eckert E R G , Low G M. Temperature distribution in

internally heated walls of heat exchangers composed of nonnuclear flow passages[R]. Hampton :NACA ,1951.
[3] Dechaumphai P ,Wieting A R ,Thornton E A. Flow-thermal-structural study of aerodynamically heated leading edges[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets* ,1989 ,26(4) :201 – 209.
[4] Giles M B. Stability analysis of numerical interface conditions in fluid-structure thermal analysis [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* ,1997 ,25(4) :421 – 436.
[5] Tran D M ,Liauzun C ,Labaste C. Methods of fluid-structure coupling in frequency and time domains using linearized aerodynamics for turbo machinery[J]. *Journal of Fluids and Structures* 2003 ,17(8) :1161 – 1180.
[6] Gottfried D A ,Fleeter S. Aerodynamic damping predictions in turbo machines using a coupled fluid-structure model[J]. *Journal of Propulsion and Power* 2005 ,21(2) :327 – 334.
[7] 王征 ,吴虎 ,史亚锋 ,等. 基于 CFD/CSD 技术的压气机叶片流固耦合及颤振分析[J]. *航空动力学报* ,2011 ,26(5) :1077 – 1084.
(Wang Zheng ,Wu Hu ,Shi Ya-feng ,et al. Fluid-structure interaction and flutter analysis of compressor blade based on CFD/CSD[J]. *Journal of Aerospace Power* ,2011 ,26(5) :1077 – 1084.)
[8] 樊小莉 ,刘云飞 ,郭然 ,等. 轴流压气机转子叶片的流固耦合分析[J]. *工程热物理学报* ,2012 ,33(2) :218 – 221.
(Fan Xiao-li ,Liu Yun-fei ,Guo Ran ,et al. The research and application on coupled fluid-structure simulation of compressor rotor[J]. *Journal of Engineering Thermophysics* ,2012 ,33(2) :218 – 221.)
[9] 袁惠群 ,张连祥 ,朱向哲 ,等. 某航空发动机高压转子系统热振动特性研究[J]. *振动与冲击* 2008 ,27(sup) :23 – 25.
(Yuan Hui-qun ,Zhang Lian-xiang ,Zhu Xiang-zhe ,et al. Study on thermal bending response of high pressure rotor system[J]. *Journal of Vibration and Shock* 2008 ,27(sup) :23 – 25.)
[10] Adamczyk J J. Aerodynamic analysis of multistage turbomachinery flows in support of aerodynamic design[J]. *Journal of Turbomachinery* ,1999 ,122(2) :189 – 217.