



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110566506 A

(43)申请公布日 2019. 12. 13

(21)申请号 201910820285.6

(22)申请日 2019.09.01

(71)申请人 西北工业大学

地址 710072 陕西省西安市友谊西路127号

(72)发明人 吴虎 杨晨 李进广 张莹

(74)专利代理机构 西北工业大学专利中心

61204

代理人 金凤

(51)Int. Cl.

F04D 29/38(2006.01)

G06F 17/50(2006.01)

权利要求书2页 说明书7页 附图3页

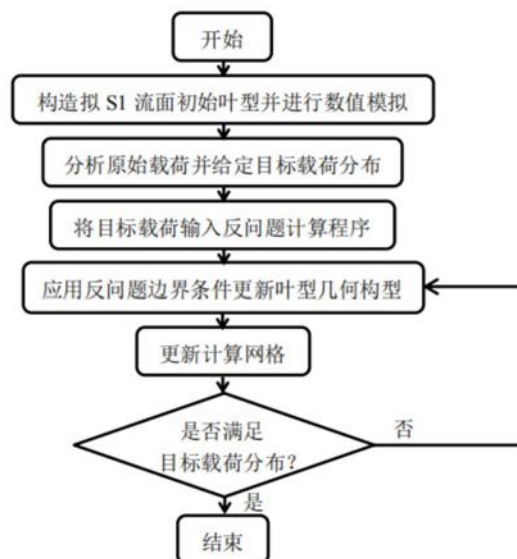
(54)发明名称

轴流压气机拟S1流面反问题设计方法

(57)摘要

本发明提供了一种轴流压气机拟S1流面反问题设计方法,选定轴流压气机叶片,计算上下型线的坐标,进行拟S1流面的构造,获得流场流动情况以及流动参数分布,通过参数化方法,得到新的载荷分布曲线,计算拟S1流面中弧面虚拟移动速度及相应的虚拟位移,更新网格计算域边界及内部网格节点坐标,对压气机叶片进行至少五个多设计截面的拟S1流面反问题设计,将反问题计算得到满足目标载荷的各设计截面的叶型几何,通过几何积叠生成新的全叶高压气机叶片几何构型,再通过全三维粘性正问题计算验证新的压气机叶片气动性能。本发明通过自主给定拟S1流面载荷分布,对初始叶片进行反问题改型设计,最终得到满足目标载荷分布的新的叶片几何构型。

CN 110566506 A



1. 一种轴流压气机拟S1流面反问题设计方法,其特征在于包括下述步骤:

步骤1:选定要进行反问题设计研究的轴流压气机叶片,计算确定设计截面拟S1流面在子午平面内上下型线的坐标:

$$A_{S1} = \pi(r_s^2 - r_h^2) \quad (1)$$

$$r_s + r_h = 2r_m \quad (2)$$

其中, A_{S1} 代表拟S1流面环面面积, r_s 和 r_h 分别代表拟S1流面上下型线半径坐标, $r_s - r_h$ 代表拟S1流面厚度, r_m 代表拟S1流面平均半径,轴流压气机叶片轮毂和叶尖半径会随着轴向坐标的变化而变化,通过线性插值得到拟S1流面平均半径 r_m :

$$r_m = x \cdot r_{hub} + (1-x) \cdot r_{tip} \quad (3)$$

其中, $x \in [0, 1]$,代表流面系数, r_{hub} 和 r_{tip} 分别表示叶片轮毂和叶尖的半径,将式(3)带入式(2),联立式(1)进行求解,得到拟S1流面上下型线坐标为:

$$r_h = r_m - \frac{A_{S1}}{\pi \cdot 4r_m} \quad (4)$$

$$r_s = r_m + \frac{A_{S1}}{p \cdot 4r_m} \quad (5)$$

步骤2:通过Numeca中AutoGrid5模块进行拟S1流面的构造,将 r_s 和 r_h 沿轴向坐标的变化写入初始几何GeomTurbo文件中,并导入AutoGrid5模块生成结构化网格拓扑结构,输出Plot3D格式的网格文件,将Plot3D网格文件转化为.dat的网格文件,并将叶片排定义、边界条件定义和其他参数设定分别对应输出到BladeRowDefinition.dat、BoundaryDefinition.dat、和Config.dat中,同时,通过时间推进方法求解全三维粘性控制方程,实现复杂跨音流场的定常求解,将经过CIDS配置的网格文件,对初始叶型进行全三维粘性流场数值模拟,获得流场流动情况以及原始载荷、静压、压比等流动参数分布;

步骤3:通过参数化方法,采用B样条曲线重新构造新的载荷分布曲线,或是通过现有原始载荷分布基础之上进行调整得到新的载荷分布曲线;

对新的载荷分布曲线采用三点加权参数化光顺方法进行:

$$(P_i)^{new} = \frac{P_{i-1} + \omega P_i + P_{i+1}}{(2 + \omega)} \quad (6)$$

其中, P_i^{new} 表示光顺后的载荷值, P_i 表示研究点当前的载荷值, P_{i-1} 和 P_{i+1} 分别表示研究点的前一点和后一点载荷值, ω 为光顺因子,取值范围为(3,20),取值越小,表示对载荷分布的光顺幅度越大;

步骤4:将目标载荷分布进行反问题计算,通过载荷与中弧面之间的定量关系,计算得到拟S1流面中弧面虚拟移动速度及相应的虚拟位移,计算公式如下:

$$(v_n^+)_{new} = (v_n^-)_{new} = \frac{\Delta p_{sp} - (p^+ - p^-)}{\rho^+ c^+ + \rho^- c^-} \quad (7)$$

其中上标正、负号分别代表吸力面和压力面参数, $(v_n^\pm)_{new}$ 表示拟S1流面吸、压力面法向虚拟移动速度, Δp_{sp} 代表目标载荷, $(p^+ - p^-)$ 表示实际计算载荷, $\rho^+ c^+$ 、 $\rho^- c^-$ 分别代表吸、压力

面气流密度与声速的乘积;由式(7)可知,当拟S1流面实际计算载荷(p^+ - p^-)逐渐向给定目标载荷 Δp_{sp} 靠近直至两者相等时, $(v_n^\pm)_{new}$ 逐渐变为0,假设拟S1流面中弧面的虚拟法向速度 v_n 与吸、压力面处速度相等,即:

$$v_n = (v_n^\pm)_{new} \quad (8)$$

v_n 乘以虚拟时间步长 Δt ,计算出拟S1流面中弧线的虚拟位移 δf 为:

$$\delta f = \Delta t \cdot v_n \quad (9)$$

将原始叶型几何厚度叠加,采用式(9)更新后的中弧线面上完成吸、压力面型线的更新,式(9)的推导过程则决定了在计算收敛后,更新得到的新的叶型几何其载荷分布与目标载荷分布完全一致;

步骤5:由于每步反问题均会更新叶型几何,导致计算域边界发生变动,对初始生成的计算域内部网格节点坐标进行更新;在保持初始网格结构和拓扑不变的情况下,依据式(9)计算得到的拟S1流面吸、压力面的虚拟位移量完成对叶片几何边界的更新,进一步采用弹簧光滑动网格技术更新网格计算域边界及内部网格节点坐标;

弹簧光滑模型将拟S1流面网格拓扑内所有节点之间网格线模化为虚拟弹簧系统,在进行拟S1流面反问题计算前,网格内部的整个虚拟弹簧系统处于受力和形变的平衡状态,即弹簧受到的挤压或者拉伸力与形变产生的作用力相互抵消,进行拟S1流面反问题计算时,吸、压力面坐标的不断更新,使相邻节点之间的网格线长度发生变化,根据胡克定律(Hook's Law),各网格节点受到弹簧力的作用,如下式(10)所示:

$$F_i = \sum_{j=1}^n k_{i,j} (\Delta s_j - \Delta s_i) \quad (10)$$

其中 Δs_i 和 Δs_j 为两个相邻网格节点*i*和*j*对应的坐标变化量,*n*表示所生成网格拓扑的总节点数, $k_{i,j}$ 为当前研究网格节点与相邻节点间网格线的胡克系数,其中下标*i*表示当前网格点编号,*j*表示相邻网格点编号,定义如下:

$$k_{i,j} = \frac{1}{\sqrt{l_{i,j}}} \quad (11)$$

其中 $l_{i,j}$ 表示相邻节点之间网格线的长度,当计算域更新产生坐标变化量时,通过式(12)的迭代求解,计算出计算域边界及内部各网格节点的坐标变化量:

$$(\Delta s_i)^{m+1} = \frac{\sum_{j=1}^n k_{i,j} (\Delta s_j)^m}{\sum_{j=1}^n k_{i,j}} \quad (12)$$

将坐标变化量叠加到现有网格节点坐标就得到更新后的计算域网格,此时网格内部的整个虚拟弹簧系统又达到新的平衡状态,直到拟S1流面反问题计算载荷分布与目标载荷分布重合,即计算达到收敛为止,即可得到满足目标载荷分布的新的叶型几何;

步骤6:对压气机叶片进行至少五个多设计截面的拟S1流面反问题设计,将反问题计算得到满足目标载荷的各设计截面的叶型几何,通过几何积叠生成新的全叶高压气机叶片几何构型,再通过全三维粘性正问题计算验证新的压气机叶片气动性能。

轴流压气机拟S1流面反问题设计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及单/多叶片排/多级风扇/压气机气动设计,特别是一种拟S1流面反问题叶片的设计方法。

背景技术

[0002] 众所周知,压气机部件性能对航空发动机总体性能起着决定性作用。轴流压气机作为航空发动机中最具挑战性的设计部件之一,气流在其复杂几何边界条件内部的流动呈现出明显的三维粘性特征和非定常性;除此之外,在超/跨声速压气机中,激波的存在会导致气流的强逆压梯度,进而容易诱发流动分离,再加上激波/附面层的相互作用,使得气流在压气机内部的流动更加复杂;高速旋转的压气机在运行过程中难免会出现结构不稳定、结构过度变形和气动失速、喘振等不稳定现象,这使得气流在压气机内部的流动变得极其复杂,为压气机的设计带来了严峻的挑战。

[0003] 如何通过新设计方法/新设计手段不断提升压气机气动性能一直是设计人员的不懈追求,当代高性能压气机要求压气机用尽可能少的级数实现更高的压比,以减小发动机整体的重量;要求压气机能够实现更宽广的稳定工作范围,以适应各种飞行条件;要求压气机具有更高的热力效率,以实现更高的能量转换率,这些要求均促使压气机气动设计方法不断革新。

[0004] 轴流压气机经过一个多世纪的发展,已经形成较为系统的两种设计方法:正问题设计方法和反问题设计方法。当前成熟的压气机设计体系是以正问题设计为主要方法,通过一维平均半径设计、二维轴对称通流设计以及三维性能分析和优化设计完成整个压气机叶片初始设计和流场分析。如果该流场结构不满足设计要求,需要不断调整初始叶型的几何构型,反复求解其流场中参数的分布情况,直到达到设计目标。在这个过程中,重复步骤多,设计周期长,效率较低。

[0005] 反问题设计方法是一种典型的叶型设计方法,与传统正问题方法的反复迭代过程不同的是,在应用CFD技术(通过求解流域中控制方程得到流场细节分布,主要起到求解器的作用。)对给定的原始叶型进行数值模拟,得到流场参数分布之后,设计人员可以按照设计意图修改流场中气动参数(等熵马赫数、静压、载荷、速度等)的分布,将这些气动参数分布作为设计变量,输入求解器中开始进行反问题设计计算,求解得到满足上述设计意图的叶型。相比较正问题的重复计算流场,反问题设计方法通过给定和控制叶片表面气动参数分布,将目标气动性能与等熵马赫数分布或压力分布直观地联系在一起,可以直接解出满足设计目标的叶片几何构型,整个设计过程目的性更强,设计流程得到简化,设计效率有效提升。

[0006] 文献[1](刘昭威,吴虎,唐晓毅.跨声速轴流压气机转子反问题优化方法[J].推进技术,2015,36(09):1309-1316.)基于反问题设计方法计算叶栅激波损失控制,文献[2](刘昭威,吴虎,唐晓毅.跨声速轴流压气机多叶排反问题优化方法[J].西北工业大学学报,2016,34(01):118-124.)是一种声速轴流压气机多叶排反问题优化方法,文献[3](梁言,吴

虎,刘昭威.多级环境下轴流压气机反方法改型设计[J].航空动力学报,2018,33(01):201-208.)是在多级环境下轴流压气机反方法进行改型设计。其中文献[1]给出了全三维粘性反问题设计理论与具体的方法步骤,并将其应用于跨声速轴流压气机转子改型设计中;文献[2]、[3]进一步拓展反问题设计方法应用范围到压气机多叶排以及多级设计中。

[0007] 上述文献中的反问题设计技术主要是针对全叶高叶片进行的全三维粘性设计,从叶片径向区域选择一个或多个叶高截面作为设计截面,主动修改设计截面气动参数分布,其余叶高截面气动参数分布不变并将其分布特征作为设计变量,输入全三维粘性反问题设计计算程序中,最终得到满足目标气动参数分布的气动性能提升的单、多叶片排/多级压气机叶片。

[0008] 由于全三维粘性反问题设计计算耗时较长,设计周期相对较长,容易出现计算结果不收敛,难以针对性地、直观地提高某个拟S1流面的气动性能。

发明内容

[0009] 为了克服现有技术的不足,本发明提供一种轴流压气机拟S1流面反问题设计方法。本发明基于全三维粘性反问题设计方法计算周期长的缺点,提供了拟S1流面是沿叶片径向Blade-to-Blade流面选取的任意回转面,因此,拟S1流面反问题设计针对性更强,能够更加直观地提高某个设计截面的气动性能,进而研究该截面气动性能对叶片整体气动性能的影响,使得反问题设计更加迅速灵活。本发明将全三维反问题设计简化为准三维的反问题设计,大大缩减了反问题设计计算时间,提升了反问题设计计算效率,能够快速高效准确得到满足目标气动参数分布的气动性能提升的单、多叶片排/多级压气机叶片。

[0010] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案包括以下步骤:

[0011] 步骤1:选定要进行反问题设计研究的轴流压气机叶片,计算确定设计截面拟S1流面在子午平面内上下型线的坐标:

$$[0012] \quad A_{S1} = \pi(r_s^2 - r_h^2) \quad (1)$$

$$[0013] \quad r_s + r_h = 2r_m \quad (2)$$

[0014] 其中, A_{S1} 代表拟S1流面环面面积, r_s 和 r_h 分别代表拟S1流面上下型线半径坐标, $r_s - r_h$ 代表拟S1流面厚度, r_m 代表拟S1流面平均半径,轴流压气机叶片轮毂和叶尖半径会随着轴向坐标的变化而变化,通过线性插值得到拟S1流面平均半径 r_m :

$$[0015] \quad r_m = x \cdot r_{hub} + (1-x) \cdot r_{tip} \quad (3)$$

[0016] 其中, $x \in [0, 1]$,代表流面系数, r_{hub} 和 r_{tip} 分别表示叶片轮毂和叶尖的半径,将式(3)带入式(2),联立式(1)进行求解,得到拟S1流面上下型线坐标为:

$$[0017] \quad r_h = r_m - \frac{A_{S1}}{\pi \cdot 4r_m} \quad (4)$$

$$[0018] \quad r_s = r_m + \frac{A_{S1}}{p \cdot 4r_m} \quad (5)$$

[0019] 步骤2:通过Numeca中AutoGrid5模块进行拟S1流面的构造,将 r_s 和 r_h 沿轴向坐标的变化写入初始几何GeomTurbo文件中,并导入AutoGrid5模块生成结构化网格拓扑结构,输出Plot3D格式的网格文件,将Plot3D网格文件转化为.dat的网格文件,并将叶片排定义、边

界条件定义和其他参数设定分别对应输出到BladeRowDefinition.dat、BoundaryDefinition.dat、和Config.dat中,同时,通过时间推进方法求解全三维粘性控制方程,实现复杂跨音流场的定常求解,将经过CIDS配置的网格文件,对初始叶型进行全三维粘性流场数值模拟,获得流场流动情况以及原始载荷、静压、压比等流动参数分布;

[0020] 步骤3:通过参数化方法,采用B样条曲线重新构造新的载荷分布曲线,或是通过现有原始载荷分布基础之上进行调整得到新的载荷分布曲线;

[0021] 对新的载荷分布曲线采用三点加权参数化光顺方法进行:

$$[0022] \quad (P_i)^{new} = \frac{P_{i-1} + \omega P_i + P_{i+1}}{(2 + \omega)} \quad (6)$$

[0023] 其中, P_i^{new} 表示光顺后的载荷值, P_i 表示研究点当前的载荷值, P_{i-1} 和 P_{i+1} 分别表示研究点的前一点和后一点载荷值, ω 为光顺因子,取值范围为(3,20),取值越小,表示对载荷分布的光顺幅度越大;

[0024] 步骤4:将目标载荷分布进行反问题计算,通过载荷与中弧面之间的定量关系,计算得到拟S1流面中弧面虚拟移动速度及相应的虚拟位移,计算公式如下:

$$[0025] \quad (v_n^+)_{new} = (v_n^-)_{new} = \frac{\Delta p_{sp} - (p^+ - p^-)}{\rho^+ c^+ + \rho^- c^-} \quad (7)$$

[0026] 其中上标正、负号分别代表吸力面和压力面参数, $(v_n^\pm)_{new}$ 表示拟S1流面吸、压力面法向虚拟移动速度, Δp_{sp} 代表目标载荷, $(p^+ - p^-)$ 表示实际计算载荷, $\rho^+ c^+$ 、 $\rho^- c^-$ 分别代表吸、压力面气流密度与声速的乘积;由式(7)可知,当拟S1流面实际计算载荷 $(p^+ - p^-)$ 逐渐向给定目标载荷 Δp_{sp} 靠近直至两者相等时, $(v_n^\pm)_{new}$ 逐渐变为0,假设拟S1流面中弧面的虚拟法向速度 v_n 与吸、压力面处速度相等,即:

$$[0027] \quad v_n = (v_n^\pm)_{new} \quad (8)$$

[0028] v_n 乘以虚拟时间步长 Δt ,计算出拟S1流面中弧线的虚拟位移 δf 为:

$$[0029] \quad \delta f = \Delta t \cdot v_n \quad (9)$$

[0030] 将原始叶型几何厚度叠加,采用式(9)更新后的中弧线面上完成吸、压力面型线的更新,式(9)的推导过程则决定了在计算收敛后,更新得到的新的叶型几何其载荷分布与目标载荷分布完全一致;

[0031] 步骤5:由于每步反问题均会更新叶型几何,导致计算域边界发生变动,对初始生成的计算域内部网格节点坐标进行更新;在保持初始网格结构和拓扑不变的情况下,依据式(9)计算得到的拟S1流面吸、压力面的虚拟位移量完成对叶片几何边界的更新,进一步采用弹簧光顺动网格技术更新网格计算域边界及内部网格节点坐标;

[0032] 弹簧光顺模型将拟S1流面网格拓扑内所有节点之间网格线模化为虚拟弹簧系统,在进行拟S1流面反问题计算前,网格内部的整个虚拟弹簧系统处于受力和形变的平衡状态,即弹簧受到的挤压或者拉伸力与形变产生的作用力相互抵消,进行拟S1流面反问题计算时,吸、压力面坐标的不断更新,使相邻节点之间的网格线长度发生变化,根据胡克定律(Hook's Law),各网格节点受到弹簧力的作用,如下式(10)所示:

$$[0033] \quad F_i = \sum_{j=1}^n k_{i,j} (\Delta s_j - \Delta s_i) \quad (10)$$

[0034] 其中 Δs_i 和 Δs_j 为两个相邻网格节点 i 和 j 对应的坐标变化量, n 表示所生成网格拓扑的总节点数, $k_{i,j}$ 为当前研究网格节点与相邻节点间网格线的胡克系数, 其中下标 i 表示当前网格点编号, j 表示相邻网格点编号, 定义如下:

$$[0035] \quad k_{i,j} = \frac{1}{\sqrt{|l_{i,j}|}} \quad (11)$$

[0036] 其中 $l_{i,j}$ 表示相邻节点之间网格线的长度, 当计算域更新产生坐标变化量时, 通过式 (12) 的迭代求解, 计算出计算域边界及内部各网格节点的坐标变化量:

$$[0037] \quad (\Delta s_i)^{m+1} = \frac{\sum_{j=1}^n k_{i,j} (\Delta s_j)^m}{\sum_{j=1}^n k_{i,j}} \quad (12)$$

[0038] 将坐标变化量叠加到现有网格节点坐标就得到更新后的计算域网格, 此时网格内部的整个虚拟弹簧系统又达到新的平衡状态, 直到拟 S1 流面反问题计算载荷分布与目标载荷分布重合, 即计算达到收敛为止, 即可得到满足目标载荷分布的新的叶型几何;

[0039] 步骤 6: 对压气机叶片进行至少五个多设计截面的拟 S1 流面反问题设计, 将反问题计算得到满足目标载荷的各设计截面的叶型几何, 通过几何积叠生成新的全叶高压气机叶片几何构型, 再通过全三维粘性正问题计算验证新的压气机叶片气动性能。

[0040] 本发明的有益效果在于针对单、多叶片排/多级轴流压气机, 能够按照设计要求通过自主给定拟 S1 流面载荷分布, 对初始叶片进行反问题改型设计, 最终得到满足目标载荷分布的新的叶片几何构型。本发明对 NASA Rotor37 分别进行了斜激波和预压缩改型设计, 在保证该单级压气机其他设计结果不变的情况下, 使 Rotor37 近峰值点流量分别增加了 0.05%、0.85%, 压比分别提高了 1.8%、4.6%, 绝热效率分别提升了 1.65%、1.99%。

附图说明

[0041] 图 1 为本发明 LoadManager 软件用户界面。

[0042] 图 2 为本发明拟 S1 流面反问题设计方法基本流程图。

[0043] 图 3 为本发明改型前后 85% 叶高处拟 S1 流面载荷分布对比图。图 3 (a) 图为斜激波改型设计的载荷分布对比图; 图 3 (b) 为预压缩改型设计的载荷分布对比图。

[0044] 图 4 为本发明改型前后叶片压比和绝热效率特性曲线, 图 4 (a) 为绝热效率特性曲线分布图, 图 4 (b) 为压比特性曲线分布图。

[0045] 图 5 为本发明静子 70% 流面载荷分布对比。

具体实施方式

[0046] 下面结合附图和实施例对本发明进一步说明。

[0047] 本发明直接通过压气机叶片几何构造拟 S1 流面, 将其作为反问题设计研究对象进行直观、高效、针对性强的反问题设计研究。

[0048] 步骤1:选定要进行反问题设计研究的轴流压气机叶片,计算确定设计截面(可以沿叶片展向任意位置确定设计截面)拟S1流面在子午平面内上下型线的坐标:

$$[0049] \quad A_{S1} = \pi(r_s^2 - r_h^2) \quad (1)$$

$$[0050] \quad r_s + r_h = 2r_m \quad (2)$$

[0051] 其中, A_{S1} 代表拟S1流面环面面积, r_s 和 r_h 分别代表拟S1流面上下型线半径坐标, $r_s - r_h$ 代表拟S1流面厚度, r_m 代表拟S1流面平均半径,轴流压气机叶片轮毂和叶尖半径会随着轴向坐标的变化而变化,通过线性插值得到拟S1流面平均半径 r_m :

$$[0052] \quad r_m = x \cdot r_{hub} + (1-x) \cdot r_{tip} \quad (3)$$

[0053] 其中, $x \in [0, 1]$,代表流面系数, r_{hub} 和 r_{tip} 分别表示叶片轮毂和叶尖的半径,将式(3)带入式(2),联立式(1)进行求解,得到拟S1流面上下型线坐标为:

$$[0054] \quad r_h = r_m - \frac{A_{S1}}{\pi \cdot 4r_m} \quad (4)$$

$$[0055] \quad r_s = r_m + \frac{A_{S1}}{p \cdot 4r_m} \quad (5)$$

[0056] 步骤2:通过Numeca中AutoGrid5模块进行拟S1流面的构造,将 r_s 和 r_h 沿轴向坐标的变化写入初始几何GeomTurbo文件中,并导入AutoGrid5模块生成结构化网格拓扑结构,输出Plot3D格式的网格文件,将Plot3D网格文件转化为.dat的网格文件,并将叶片排定义(转子、静子、叶片排网格范围及交界面对接关系)、边界条件定义(依次指定进口、出口、壁面及周期面网格标号起止范围)和其他参数(进口总温、总压、Ma、出口背压、迭代次数、收敛标准等)设定分别对应输出到BladeRowDefinition.dat、BoundaryDefinition.dat、和Config.dat中,同时,通过时间推进方法求解全三维粘性控制方程,实现复杂跨音流场的定常求解,将经过CIDS配置的网格文件,对初始叶型(构造的拟S1流面)进行全三维粘性流场数值模拟,获得流场流动情况以及原始载荷、静压、压比等流动参数分布;

[0057] 步骤3:通过参数化方法,采用B样条曲线重新构造新的载荷分布曲线,或是通过现有原始载荷分布基础之上进行调整得到新的载荷分布曲线;

[0058] 为使载荷分布更加平缓光滑,对新的载荷分布曲线采用三点加权参数化光滑方法进行:

$$[0059] \quad (P_i)^{new} = \frac{P_{i-1} + \omega P_i + P_{i+1}}{(2 + \omega)} \quad (6)$$

[0060] 其中, P_i^{new} 表示光滑后的载荷值, P_i 表示研究点当前的载荷值, P_{i-1} 和 P_{i+1} 分别表示研究点的前一点和后一点载荷值, ω 为光滑因子,取值范围为(3,20),取值越小,表示对载荷分布的光滑幅度越大。基于上述目标载荷曲线构造及光滑方法,编制了可视化的、人机友好的拟S1流面载荷分布曲线构造软件LoadManager。图1为LoadManager用户使用界面,左侧为拟S1流面吸、压力面静压及对应的载荷分布曲线,右侧则是用户操作界面,通过选择构造、调整或光滑方法直观地调控载荷分布,进而高效、快速地给定目标载荷;

[0061] 步骤4:将目标载荷分布进行反问题计算,通过载荷与中弧面之间的定量关系,计算得到拟S1流面中弧面虚拟移动速度及相应的虚拟位移,计算公式如下:

$$[0062] \quad (v_n^+)_{new} = (v_n^-)_{new} = \frac{\Delta p_{sp} - (p^+ - p^-)}{\rho^+ c^+ + \rho^- c^-} \quad (7)$$

[0063] 其中上标正、负号分别代表吸力面和压力面参数, $(v_n^\pm)_{new}$ 表示拟S1流面吸、压力面法向虚拟移动速度, Δp_{sp} 代表目标载荷, $(p^+ - p^-)$ 表示实际计算载荷, $\rho^+ c^+$ 、 $\rho^- c^-$ 分别代表吸、压力面气流密度与声速的乘积; 由式 (7) 可知, 当拟S1流面实际计算载荷 $(p^+ - p^-)$ 逐渐向给定目标载荷 Δp_{sp} 靠近直至两者相等时, $(v_n^\pm)_{new}$ 逐渐变为0, 此时认为反问题计算过程收敛, 拟S1流面吸、压力面将不会继续更新变化, 假设拟S1流面中弧面的虚拟法向速度 v_n 与吸、压力面处速度相等, 即:

$$[0064] \quad v_n = (v_n^\pm)_{new} \quad (8)$$

[0065] v_n 乘以虚拟时间步长 Δt , 计算出拟S1流面中弧线的虚拟位移 δf 为:

$$[0066] \quad \delta f = \Delta t \cdot v_n \quad (9)$$

[0067] 将原始叶型几何厚度叠加, 采用式 (9) 更新后的中弧线面上完成吸、压力面型线的更新, 式 (9) 的推导过程则决定了在计算收敛后, 更新得到的新的叶型几何其载荷分布与目标载荷分布完全一致;

[0068] 步骤5: 由于每步反问题均会更新叶型几何, 导致计算域边界发生变动, 对初始生成的计算域内部网格节点坐标进行更新; 在保持初始网格结构和拓扑不变的情况下, 依据式 (9) 计算得到的拟S1流面吸、压力面的虚拟位移量完成对叶片几何边界的更新, 进一步采用弹簧光滑网格技术更新网格计算域边界及内部网格节点坐标;

[0069] 弹簧光滑模型将拟S1流面网格拓扑内所有节点之间网格线模化为虚拟弹簧系统, 在进行拟S1流面反问题计算前, 网格内部的整个虚拟弹簧系统处于受力和形变的平衡状态, 即弹簧受到的挤压或者拉伸力与形变产生的作用力相互抵消, 进行拟S1流面反问题计算时, 吸、压力面坐标的不断更新, 使相邻节点之间的网格线长度发生变化, 根据胡克定律 (Hook's Law), 各网格节点受到弹簧力的作用, 如下式 (10) 所示:

$$[0070] \quad F_i = \sum_{j=1}^n k_{i,j} (\Delta s_j - \Delta s_i) \quad (10)$$

[0071] 其中 Δs_i 和 Δs_j 为两个相邻网格节点 i 和 j 对应的坐标变化量, n 表示所生成网格拓扑的总节点数, $k_{i,j}$ 为当前研究网格节点与相邻节点间网格线的胡克系数, 其中下标 i 表示当前网格点编号, j 表示相邻网格点编号, 定义如下:

$$[0072] \quad k_{i,j} = \frac{1}{\sqrt{|l_{i,j}|}} \quad (11)$$

[0073] 其中 $l_{i,j}$ 表示相邻节点之间网格线的长度, 当计算域更新产生坐标变化量时, 通过式 (12) 的迭代求解, 计算出计算域边界及内部各网格节点的坐标变化量:

$$[0074] \quad (\Delta s_i)^{m+1} = \frac{\sum_{j=1}^n k_{i,j} (\Delta s_j)^m}{\sum_{j=1}^n k_{i,j}} \quad (12)$$

[0075] 将坐标变化量叠加到现有网格节点坐标就得到更新后的计算域网格,此时网格内部的整个虚拟弹簧系统又达到新的平衡状态,直到拟S1流面反问题计算载荷分布与目标载荷分布重合,即计算达到收敛为止,即可得到满足目标载荷分布的新的叶型几何;

[0076] 步骤6:对压气机叶片进行至少五个多设计截面的拟S1流面反问题设计,将反问题计算得到满足目标载荷的各设计截面的叶型几何,通过几何积叠生成新的全叶高压气机叶片几何构型,再通过全三维粘性正问题计算验证新的压气机叶片气动性能。

[0077] 按照图2所示流程对NASA Rotor37分别进行了斜激波和预压缩改型设计。分别沿15%,30%,50%,70%及85%五个叶高位置构造拟S1流面进行反问题改型设计。图3分别对比了Rotor 37两种改型前后85%叶高拟S1流面上原始载荷(虚线表示)、目标载荷分布(圆圈表示)和反问题设计计算完成时得到的载荷分布(实线表示)。

[0078] 将五个拟S1流面反问题设计得到的叶型几何通过积叠形成完整的三维叶片几何,然后对其进行全三维粘性数值模拟,得到两种改型转子叶片的全工况绝热

[0079] 效率和压比特性曲线分布,并与原始Rotor37特性进行对比,如图4所示。从图中可以明显看出,对于Inversed1,其堵点流量和喘点流量基本与原型相同,压比和绝热效率均略高于原型;对于Inversed2来说,其堵点流量要远大于原型,喘点流量要略小于原型,因此整个工况范围的流量变化量与原型基本相同,绝热效率和压比均明显高于原始和Inversed1。

[0080] 同样对下游静子叶片进行多个拟S1流面的反问题改型设计(15%、30%、50%、和70%),然后将反问题改型设计得到新静子叶型几何通过三维积叠成新的静子叶片,再将其与改型转子叶片组合成的改型压气机级进行全三维粘性正问题数值模拟验证。图5为静子70%叶高处拟S1流面原始载荷、目标载荷及反问题计算载荷分布对比图。

[0081] 表1压气机级Stage37改型前后近峰值效率点性能参数对比表

[0082]

	流量 (Kg/s)	压比	绝热效率
原始Stage37	20.987	2.098	0.846
Inversed1压气机级	20.946	2.083	0.852
增幅 (%)	-0.003	-0.75	0.74
Inversed2压气机级	21.024	2.143	0.850
增幅 (%)	0.18	2.1	0.47

[0083] 表1给出了近峰值效率点气动参数值,对于Inversed1(转子斜激波设计),其流量和压比均低于原型Stage37,但是效率提升比较明显,达0.74%;而Inversed2(预压缩设计)的流量、压比和绝热效率均较原型Stage37得到了提升。

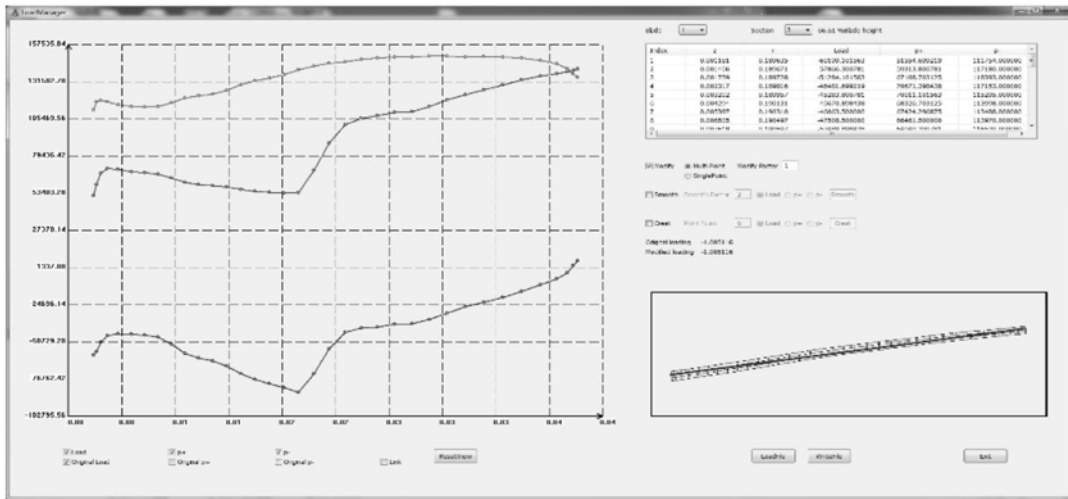


图1

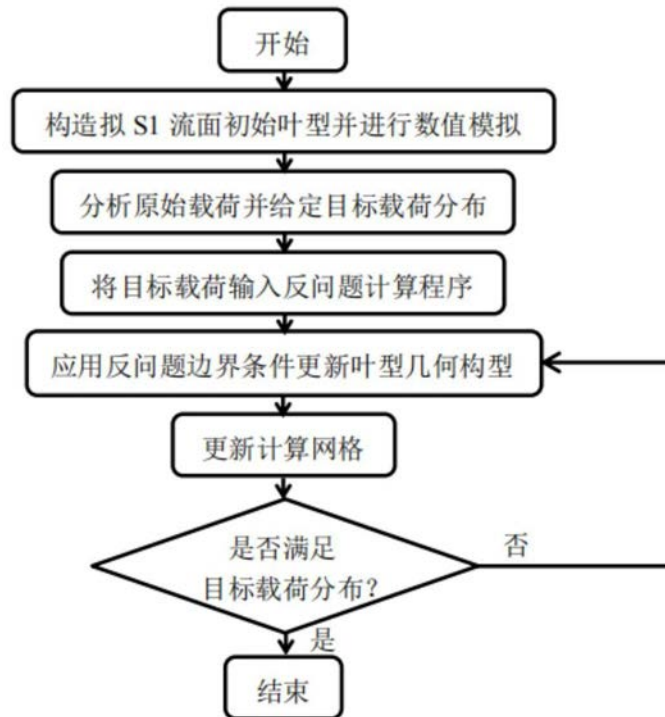


图2

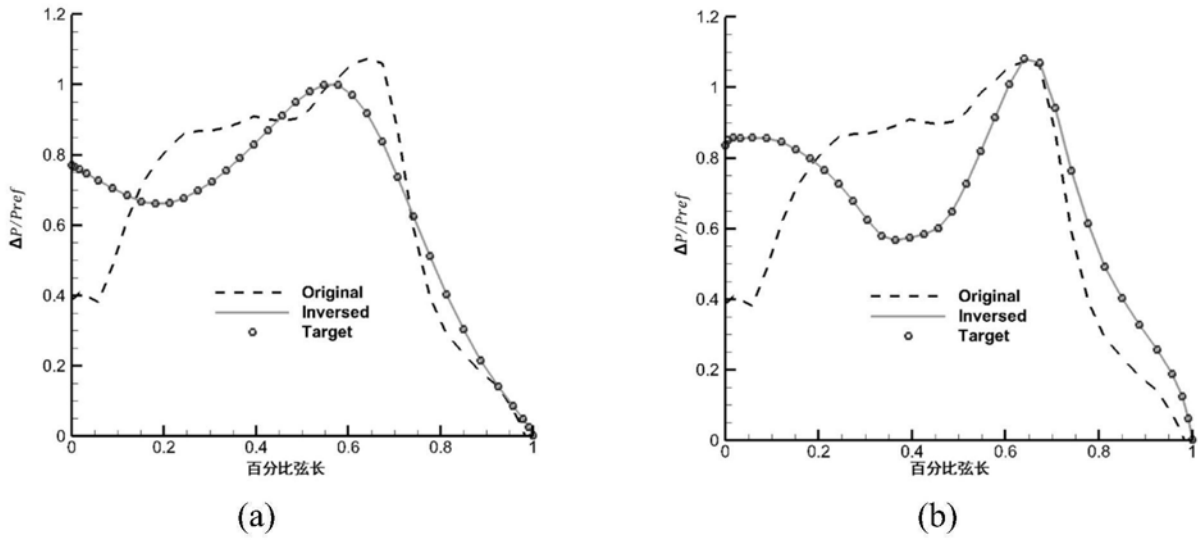


图3

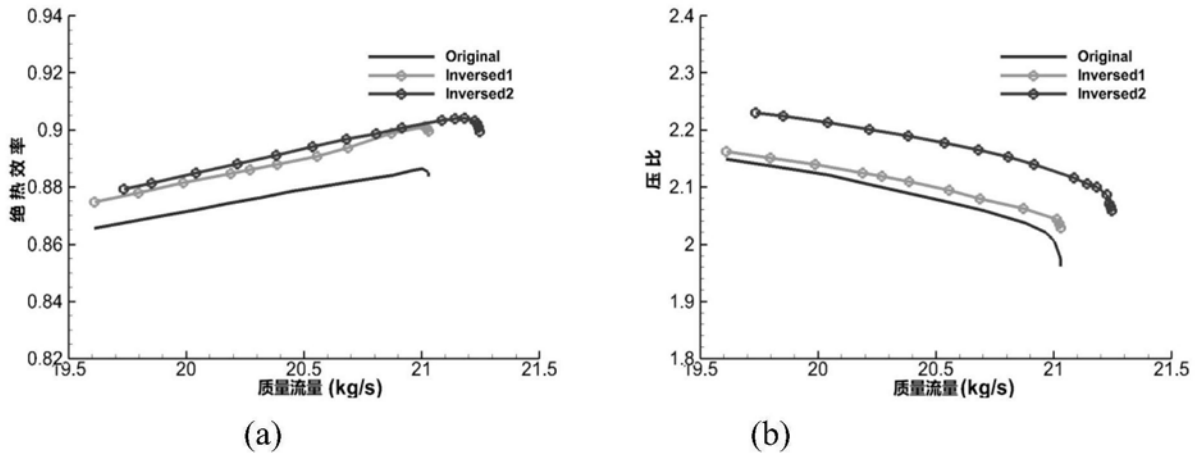


图4

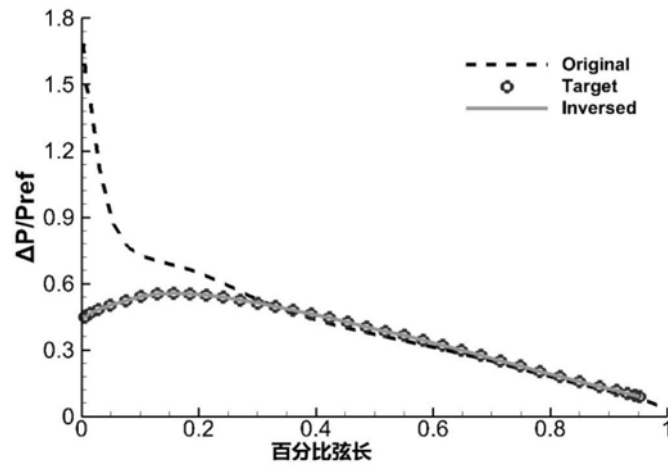


图5