

文章编号: 1000 8055(2008)09 1695-06

进口畸变下非定常数值模拟进口边界数学模型

余春华, 李秋实, 袁 巍, 周 盛

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 进口畸变下压气机内存在的不同空间和时间尺度的非定常流动之间的相互作用是进口畸变对压气机性能影响的重要流动机理. 介绍了一种用于周向进口总压畸变下单转子通道内非定常数值模拟的进口边界简化模型, 并基于该模型进行了三维非定常数值模拟. 数值模拟结果显示了进口周向总压畸变的大尺度总压脉动和压气机转子通道非定常分离流场的相互作用过程. 该模型为周向进口畸变的三维非定常数值模拟提出了一种简化方法.

关 键 词: 进口畸变; 非定常数值模拟; 边界条件

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Boundary condition model for unsteady numerical simulation under inlet distortion

YU Chun-hua, LI Qiu-shi, YUAN Wei, ZHOU Sheng

(National Key Laboratory on Aero Engine,

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

Abstract: The unsteady vortices interactions in different scales of space and time for the compressor flow fields under inlet distortion are major influential factors to the performance of compressor. A boundary condition model for unsteady numerical simulation under inlet circumferential distortion was presented in this paper. A 3-D unsteady numerical simulation was conducted based on the boundary condition model. The results show that the model could reveal the unsteady interaction between wide scale total pressure wave resulting from inlet distortion and unsteady separation flow field in the rotor passage. This model provides a simple method for 3-D unsteady numerical simulation under inlet circumferential distortion.

Key words: distortion; unsteady numerical simulation; boundary conditions

进口畸变对压气机性能影响的研究较早就受到关注^[1]. 为了预测进口畸变对压气机性能的影响, 研究者们开展了大量的研究工作, 提出了各种简化模型, 如 Pearson^[2] 等的平行压气机模型、Mazzaw^y^[3] 多子区平行压气机模型、激盘模型^[4] 以及国内的二维可压缩模型^[5]、矩阵分析模型^[6] 等. 这些模型为工程上估算畸变对压气机性能的影响提供了较为适用的方法. 考虑到压气机真是流动的非定常性, 近几年来, 随着非定常流研究的

发展, 人们注重于进口畸变的非定常特性的研究. 旋转畸变的研究^[7-9] 表明, 畸变对失速裕度的影响和旋转畸变的频率有关, 而且在低速工况, 某些反向旋转畸变下压气机的失速裕度反而比均匀进口条件下有所提升. 因此, 畸变对压气机性能影响的非定常流动机理还有待于研究者们进一步的深入认识.

进口畸变条件下, 压气机内的流场包含了不同空间和时间尺度的非定常流动特征. 如由于畸

变流场周向分布不均匀对于旋转转子进口形成空间上以压气机进口直径为尺度,时间上以转子旋转频率为尺度的大尺度低频的非定常特征;空间上以栅距和叶片弦长为尺度,时间上以涡脱落频率为尺度的叶栅通道内和尾迹流动中的中等尺度的非定常特征;以及边界层内的微小尺度的湍流脉动的非定常特征.这些不同尺度的非定常流动之间的相互作用将影响着压气机的性能.非定常激励对压气机影响的实验研究^[10]结果得出,压气机的稳定裕度随着改变进口导叶数目而变化,存在使稳定裕度最大的最佳频率范围.这表明,不同尺度的非定常扰动对压气机的影响有很大的不同.

数值模拟能够较方便和详细的从流场细节的角度来分析畸变对压气机性能的影响.Hirai^[11]等应用多节点的并行计算对跨音压气机的周向总压畸变进行了全周的三维非定常数值模拟,分析了畸变下跨应转子中的激波移动造成的压气机损失增加.文献[12-13]做了进口畸变下压气机转子的全周数值模拟,研究从定性的角度揭示畸变对压气机性能的影响.若要详细描述进口畸变下压气机内不同尺度的非定常流动之间的相互作用,畸变下压气机的非定常数值模拟将需要高精度的格式和高密度的计算网格.全周的非定常计算虽然保证了转子空间上的连续和完整却又牺牲了计算精度和计算时间.那么,我们是否可以通过单通道或者几个通道内的较高精度格式的非定常数值模拟来探索进口畸变对压气机影响的机理呢?

本文探讨了应用单通道或者几个通道的高精度非定常数值模拟来分析稳态周向总压畸变对压气机转子的响应的方法.针对稳态周向进口总压畸变,本文提出了一种将进气道出口截面上的参数确定为非定常数值模拟进口边界条件的简化模型,并基于该模型,对一低速压气机实验台转子进行了进口畸变下的三维非定常数值模拟,分析周向进口总压畸变的大尺度扰动对转子叶尖流场时空结构的影响.

1 畸变进口边界的数学模型

进口畸变条件下的非定常数值模拟与均匀进口条件相比而言,其不同点主要是边界条件的不同.畸变进口下非定常数值模拟的边界条件的主要特点有:首先,对于进口边界是非定常的脉动,就稳态畸变而言,在绝对坐标系下是定常的,而对于转子相对坐标系而言,进口边界参数是随着计算时间的推进而周期变化的,所以需要确定合理

的进口非定常边界来模拟转子相对坐标系的进口畸变流场;其次,叶排通道的相邻边界不再满足均匀进口条件下的周期性边界条件,需要进行合理的处理,来满足相邻通道流场空间分布不均匀特征,如可以应用相延迟周期边界条件.

1.1 相对坐标系下进口畸变流场的描述

进口畸变下的流动参数沿周向、径向分布都是不均匀的,而且包含有非定常的紊流脉动.周向进口畸变对压气机的影响比径向进口畸变的影响要严重很多,因此,本文讨论针对稳态周向进口总压畸变,且不考虑紊流脉动分量.

图1为某一稳态进口畸变的流场图谱.如图所示,对于给定的畸变图谱,在绝对坐标系下进口截面上的任意一点 P 的流动参数为空间和时间的函数,即

$$q = q(r, \theta, z, t) \quad (1)$$

其中 q 为流动物理参数,如总压、总温、速度等. r, θ, z 为绝对坐标.对于稳态的畸变而言, q 简化为以 2π 为周期得 θ 的空间函数.即

$$q = q(\theta) \quad (2)$$

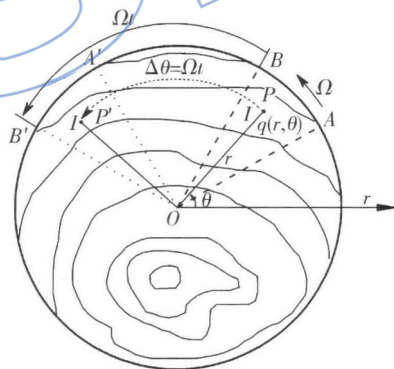


图1 进口畸变下总压分布图谱

Fig. 1 Distribution of total pressure under inlet distortion

设压气机转子转速为 Ω , t 为相对坐标系下的时间.那么,转子相对坐标和绝对坐标坐标下的畸变流场图谱的关系就为

$$\theta = \theta(t) = \theta_0 + \Omega t \quad (4)$$

所以, t 时刻相对坐标系下转子进口任意点 I 的流动参数值就为

$$f_I(t) = q^P(\theta) = q(\theta_0 + \Omega t) \quad (5)$$

式中 $f_I(t)$ 为相对坐标系下转子参数时域函数,其为 $T = 2\pi/\Omega$ 的周期函数.所以,只要确定了进口畸变流场的图谱,就可以得到转子相对坐标下的任意一点参数随时间的变化函数.对于给定的畸

变图可以进行插值得到 q 的分布, 然后再插值计算就可以得到的非定常数值模拟中的进口边界上每个网格点的真实进口边界条件参数值.

1.2 相对坐标系下进口畸变流场的傅立叶展开

稳态畸变下, 假设绝对坐标系下进口总压的分布为

$$p^* = q(r, \theta, z) \tag{6}$$

那么, 相对坐标系下的转子上一点的相对总压时空间分布为

$$p_w^* = f(r, \varphi, z, t) = q[r, (\theta_0 + \Omega t), z] \tag{7}$$

对于稳态的纯周向总压畸变, 可以简化为

$$p^* = q(r, \theta, z) = q(\theta) \tag{8}$$

$$p_w^* = q(r, \theta_0 + \Omega t, z) = q(\theta_0 + \Omega t) \tag{9}$$

设转子转速为 Ω 在转子相对坐标系下, 进口任意一点的参数就成为随转子周期变化的时间函数, 可以对其进行 Fourier 展开, 从而分析频谱特征.

$$p_w^* = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[a_k \cos\left(\frac{k\Omega t}{2}\right) + b_k \sin\left(\frac{k\Omega t}{2}\right) \right] \tag{10}$$

其中, 系数为

$$a_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} q(\varphi + \Omega t) \cos\left(\frac{k\pi t}{T}\right) dt, \tag{11}$$

$(k = 0, 1, 2, \dots)$

$$b_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} q(\varphi + \Omega t) \sin\left(\frac{k\pi t}{T}\right) dt,$$

$(k = 1, 2, 3, \dots)$

设 D_k 各阶频率的幅值, 那么

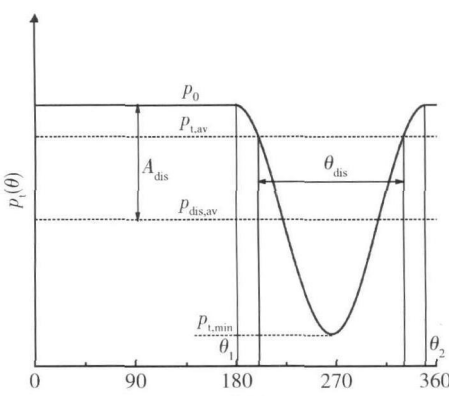
$$D_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \tag{12}$$

公式 (10) 表示 p_w^* 可以展开为以转子旋转频率 $f_R = \frac{1}{T} = \frac{\Omega}{2\pi}$ 为基频, 以及一系列振幅为 D_k 的基频的倍频的正弦波的叠加. 即这一系列正弦波作用的叠加就得到了相对坐标系下转子进口边界上一点总压随时间变化的非定常脉动.

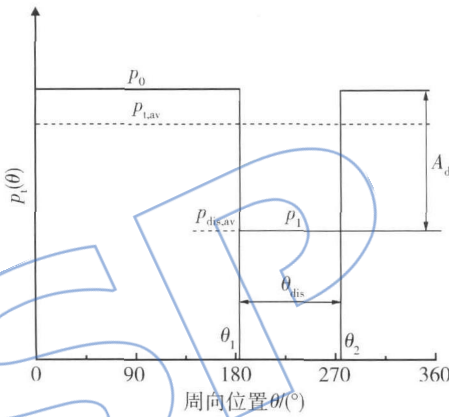
1.3 简化的进口畸变边界条件模型

真实的畸变图谱中流动参数 q 不能用简单的函数描述出来. 对于机理性的数值模拟探索研究, 可以对畸变流场的分布形式进行假设和简化. 对于一般情况下存在有一个相对低压区的稳态周向进口畸变, 可以假设简化为如图 2 中 $p_t(\theta)$ 形式的脉冲总压沿周向的分布. $\theta_{dis} = \theta_2 - \theta_1$ 表示畸变低压区的范围. 对于纯周向进口总压畸变, 每一个径向截面上分布范围和幅值都相同.

1) 低压区连续脉冲型进口总压分布函数



(a) 低压区余弦分布



(b) 低压区方波脉冲分布

图 2 模拟稳态周向总压进口畸变的简化分布函数

Fig. 2 Numerical function used to simulation the inlet distortion

$$p_t(\theta) = \begin{cases} p_0 & 0 \leq \theta < \theta_1 \text{ 或 } \theta_2 \leq \theta < 2\pi \\ p_0 + (p_0 - p_{\min}) \cdot \left[\cos\left(\frac{\theta - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1} \cdot 2\pi\right) - 1 \right] & \theta_1 \leq \theta < \theta_2 \end{cases} \tag{13}$$

2) 低压区阶跃脉冲型进口总压分布函数

$$p_t(\theta) = \begin{cases} p_0 & 0 \leq \theta < \theta_1 \text{ 或 } \theta_2 \leq \theta < 2\pi \\ p_1 & \theta_1 \leq \theta < \theta_2 \end{cases} \tag{14}$$

进口畸变非定常数值计算中进口边界上总压随非定常计算时间 t 的变化函数为

$$p_t = p_t(\theta_0 + \Omega t) \tag{15}$$

其中 θ_0 为 $t = 0$ 时刻该点的初始相位. 可以由 $p_t(\theta)$ 分布, 求出进口截面上的稳态总压畸变指数. 即

$$DC(\theta) = \frac{p_{t,av} - p_{dis,av}}{q_2} \quad (16)$$

其中 $p_{t,av}$ 为进口截面总压平均值, $p_{dis,av}$ 为低压区总压平均值, q_2 为进口截面的动压头, $DC(\theta)$ 为稳态周向总压畸变指数。

2 进口畸变下非定常数值模拟

2.1 数值模拟方法

数值模拟的控制方程为三维非定常粘性可压缩雷诺平均 Navier Stokes 方程. 在固结转子上的三维直角坐标系下, 采用 Runge Kutta 方法时间精确推进求解守恒型无量纲方程. 并通过时间平均得到时均流动性能. 使用 5 阶精度差分格式离散求解对流通量与粘性通量, 采用群速度控制方法抑制数值波动. 使用 Baldwin Lomax 湍流模型求解湍流粘性系数。

应用上述进口畸变的进口边界条件简化模型, 针对一低速压气机转子进行了进口畸变下的三维非定常数值模拟. 转子转速 3 000 r/min, 设计流量 2.88 kg/s. 畸变区总压分布形式为图 2 中 (b) 低压区阶跃脉冲型, 低压区范围为 90°. 周向总压畸变指数 $DC(\theta) = 0.26$ 。

2.2 数值结果和分析

图 3 和图 4 为计算得到的压气机特性曲线, 由图可以看出, 进口畸变与均匀进口条件相比, 压比和效率都有所降低. 同时, 由计算结果可以看出, 畸变下转子的压比效率特性曲线在大流量下变化比较小, 而在小流量下的变化比较大. 特性曲线图中的失速边界点由叶尖分离区的流场分析确定, 当叶尖 S_2 流面的分离堵塞达到整个通道时, 判定为失速点. 分析流场表明, 由于在小流量下压气机转子通道内有较强的分离流场, 容易受外界扰动而造成大尺度的分离, 所以进口畸变的非定常扰动对压气机性能的影响在低压区更为突出和明显。

图 5 为小流量工况下一个转子周期内的叶栅通道 80% 叶高截面上的相对马赫数分布, 其中图 5(i) 为各个时刻叶栅通道进口总压. 由图可以看出, 当进口边界进入低压畸变区, 在吸力面卷起了较大的分离区域. 而随着进入高压区, 分离流场逐级被抑制和减弱. 分离区域的增加与减小与进口进入高低压区存在着时间差的延迟. 叶栅通道内分离团生成的时间延迟是周向畸变下转子响应的滞后的原因。

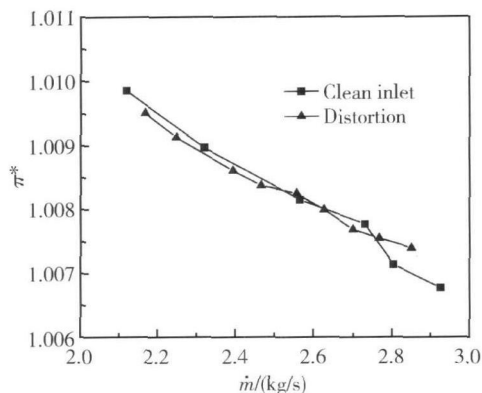


图 3 计算得到的转子压比特性曲线

Fig. 3 Rotor distorted total pressure ratio map

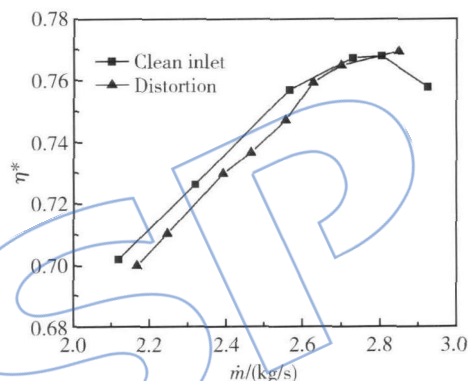


图 4 计算得到的转子效率特性曲线

Fig. 4 Rotor distorted efficiency map

流场分析表明, 进口高低总压交替的非定常扰动激起了转子叶片表面的非定常大尺度的分离漩涡. 动态的流动分析显示, 当转子进口进入低压区, 而此时叶片表面自身产生的非定常分离也达到最大时, 低压区将促使叶片表面卷起更大的大尺度分离区. 进口畸变的扰动与叶片通道的非定常旋涡流相互作用引起了转子内的分离损失增大。

从计算结果的分析看, 所建立的进口畸变下非定常数值模拟的进口边界数学模型能够反映进口周向总压畸变的大尺度总压脉动和压气机转子通道非定常分离流场的作用相互过程, 为进口畸变下压气机转子内的非定常时空流场结构的分析提供了一种简化的进口边界处理方法. 进口畸变对压气机性能影响的重要方面还在于对稳定性的影响, 其具有很强的非定常流动特征的问题, 需要较高精度的非定常数值模拟出非定常特征. 此次计算中转子不带叶尖间隙, 而转子失速的形成与叶尖泄漏流、主流以及叶片表面的分离流场的非定常相互作用密切相关. 这有待于下一步工作的展开。

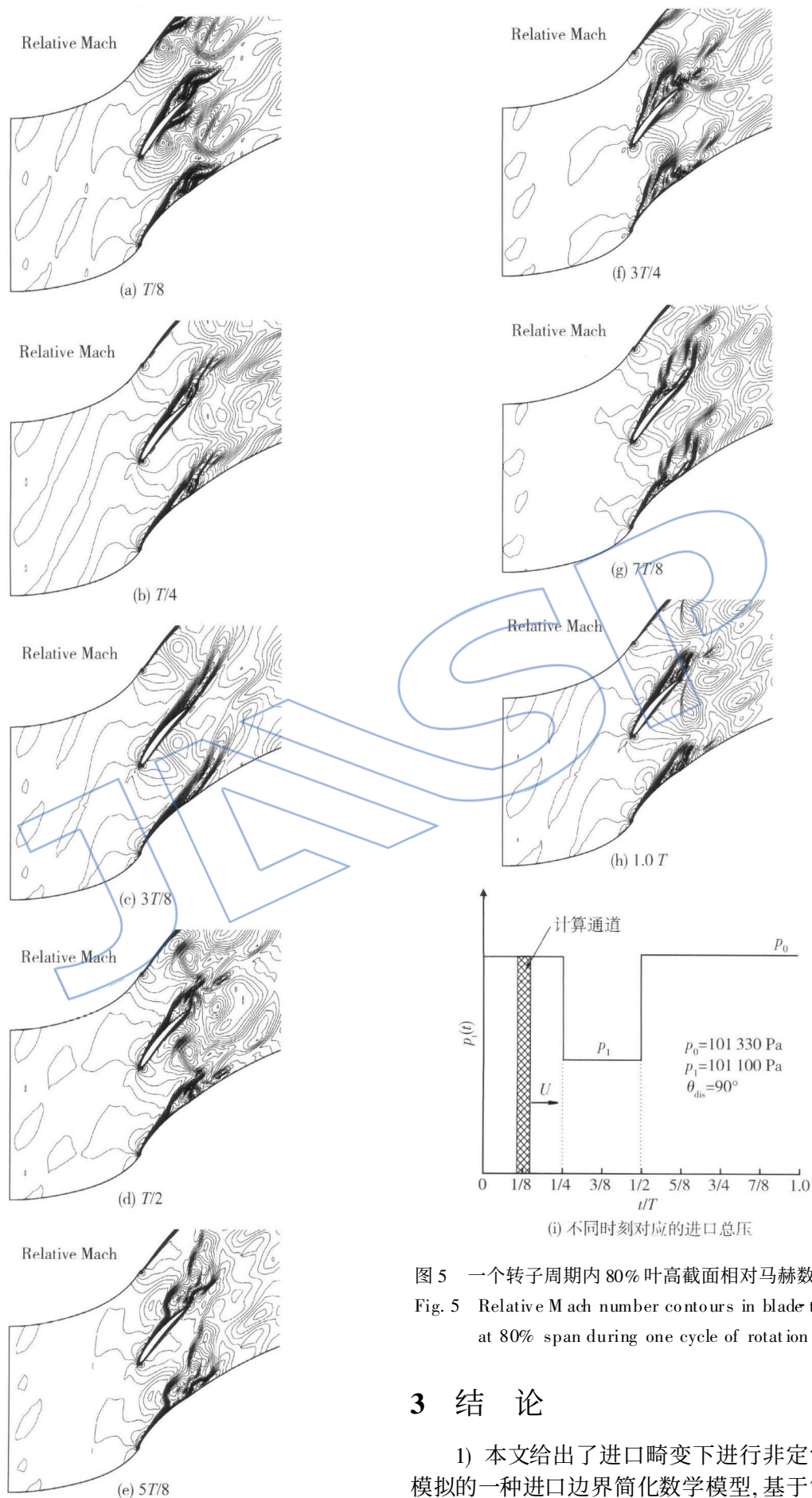


图 5 一个转子周期内 80% 叶高截面相对马赫数分布图
Fig. 5 Relative Mach number contours in blade-to-blade at 80% span during one cycle of rotation

3 结 论

1) 本文给出了进口畸变下进行非定常数值模拟的一种进口边界简化数学模型, 基于简化模

型进行的非定常数值模拟表明了该简化处理能够在一定程度上反映进口畸变对压气机性能影响的非定常特性。

2) 周向进口畸变条件下,随着转子进口总压的低压区 and 高压区交替,叶片通道的分离有增大和减弱的交替过程,与文献[14]得到的失速波在畸变区激发和在非畸变区受到抑制有相似的结果。

3) 低速压气机转子非定常数值表明,进口畸变下高低压总压交错的非定常扰动增强了叶片表面的分离旋涡的非定常脉动,转子总效率降低。

参考文献:

- [1] Reid C. The response of axial compressor to intake flow distortion[R]. ASME Paper 69-GT-29, 1969.
- [2] Pearson H, Mckenzie A B. Wakes in axial compressor[J]. Journal of the Royal Aeronautical Society, 1959, 63: 154-186.
- [3] Mazzawy R S. Multiple segment parallel compressor model for circumferential flow distortion[J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1977, 99: 288-296.
- [4] Hawthorne W R, Mitchell N A, McCune J E, et al. Non-axisymmetric flow through annular actuator disks: inlet distortion problem[J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1978, 100: 604-617.
- [5] 胡骏. 均匀与非均匀进气条件下多级轴流压气机性能计算-周向畸变的影响[J]. 航空动力学报, 2000, 15(3): 229-232.
HU Jun. Calculation of off design performance of multi-stage compressor with circumferential distorted inlet flow[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(3): 229-232. (in Chinese)
- [6] 吴虎, 阮建刚. 周向总压畸变在轴流压气机中的传递特性预测新模型[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(3): 291-294.
WU Hu, RUAN Jiangang. A new model for predicting circumferential pressure distortion in multistage axial flow compressor[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(3): 291-294. (in Chinese)
- [7] Longley J P, Shi H W, Plumley R E, et al. Effects of rotating distortion on multistage compressor stability[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1996, 118: 181-188.
- [8] Peter T, Fottner L. Effects of α and counter rotating inlet distortions on a 5-stage HP compressor[R]. ASME GT-2002-30395, 2002.
- [9] 李传鹏, 胡骏. 旋转进气畸变对轴流压气机气动稳定性影响实验研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(4): 433-437.
LI Chuanpeng, HU Jun. Effects of rotating inlet distortion on a 5 stage HP compressor stability[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(4): 433-437. (in Chinese)
- [10] 金亮, 李志平, 陆亚钧. 尾流撞击效应在低速轴流压气机中应用实验研究的初探[J]. 航空动力学报, 2005, 20(6): 1048-1053.
JIN Liang, LI Zhiping, LU Yajun. Applied study on a low speed axial compressor with Wake effects[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 1048-1053. (in Chinese)
- [11] Hirai K, Kodama H, Nozaki O, et al. Unsteady three dimension analysis of inlet distortion in turbomachinery[R]. AIAA-97/2735, 1997.
- [12] Charalambous N, Ghisu T, Iurisci G, et al. Axial compressor response to inlet flow distortions by a CFD analysis[R]. ASME GT2004-53846, 2004.
- [13] 孙鹏, 冯国泰. 某小型风扇内进口总压畸变引起流动损失分析[J]. 航空动力学报, 2007, 22(2): 245-250.
SUN Peng, FENG Guotai. Analysis of flow loss induced by inlet total pressure distortion in a small fan[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(2): 245-250. (in Chinese)
- [14] Feng L, Meilin L, Jingyi C. Long to short length scale transition: A stall inception phenomenon in an axial compressor with inlet distortion[R]. ASME GT2005-68656, 2005.