

文章编号: 1000-8055(2010)03-0531-06

双级对转压气机轴向间隙对性能的影响

王掩刚, 牛楠, 刘波, 贾瑞琦, 陈云永
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 设计了 7 组不同轴向间隙的对转压气机几何数据, 应用数值模拟手段获取其性能和流场细微结构, 研究了对转转子轴向间距对压气机性能、进气角以及流场结构的影响。结果表明: ①在轴向间隙从 30 %C (C 为转子叶片根部弦长) 到 70 %C 增加的过程中, 对转压气机峰值效率降低 2 % 左右, 上、下游对转转子峰值效率也降低约 4 %; ②设计转速下近失速点效率和流量先上升后降低, 在 55 %C 间距时达到最大值; 堵塞点流量增加, 效率降低约 3 %; ③在堵塞工况下, 随着轴向间隙的增加, 上、下游转子进口气流角减小; ④当轴向间隙增大至 50 %C 时, 继续增大对上下游转子来流攻角影响不大; ⑤如果掺混损失占主导地位, 通过减小轴向间距可有效提高压气机性能, 如果是二次流损失占主导地位通过增加轴向间距来提高压气机性能是可行的方法。

关 键 词: 对转压气机; 性能; 轴向间隙; 数值模拟

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Investigation into effects of axial spacing on performance of a dual-stage counter-rotating compressor

WANG Yan-gang, NIU Nan, LIU Bo, JIA Rui-qi, CHEN Yun-yong

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Seven modules with different axial spacings between two reversed rotating rotors of a counter-rotating compressor were designed, and then the detailed flow structure and performance of them in different rotating speeds was obtained by numerical simulations. The effect of axial spacing on performance of the counter-rotating compressor, inlet flow angle of two rotors and flow structure have been investigated. When the axial spacing between two reversed rotating rotors was changed from 30 %C to 70 %C, the following observations were obtained: (1) The peak efficiency of counter-rotating compressor decreased approximately 2 %, the efficiency of two reversed rotating rotors decreased approximately 4 %. (2) At the near stall condition with designed rotating speed, the efficiency and mass flow rate increased firstly and then decreased, and the maximum of the two parameters happened when the axial spacing was 55 %C. (3) At the choke condition, the inlet flow angle of the two rotors decreased, contrary to the trend of the choke mass flow rate change. (4) When the axial spacing was bigger than 50 %C, it could not affect the inlet flow angle of the two rotors noticeably. (5) Decreasing the axial spacing can improve the performance of the counter-rotating compressor when the loss of mixing is dominating. If the secondary flow loss is the primary loss, increasing the axial spacing is feasible to improve the performance of the counter-rotating compressor.

Key words: counter-rotating compressor; performance; axial spacing; numerical simulation

收稿日期: 2009-03-06; **修订日期:** 2009-06-01

基金项目: 陕西省自然科学基金(07E219); 西北工业大学创新基金(2008 KJ01004)

作者简介: 王掩刚(1976-), 男, 陕西武功人, 副教授, 博士, 主要从事叶轮机气动热力学研究。

随着航空发动机对叶轮机械性能要求的日益提高,目前关于叶轮机械设计趋向于用更少的级数达到更高负荷的同时还能保持或提高机组效率,对转技术作为一种有效的新型技术得到了研究人员的广泛重视^[1-3]. 压缩系统的对转技术是近年来研究人员关注的研究内容之一,国内外研究人员先后探索了对转压缩系统的设计技术、内部流动特征和损失机理,加深了设计者对其内部复杂流动机理的深入认识^[4-6],并在国外已经进行了吸附式对转压气机的设计和实验研究^[7]. 叶轮轴向间隙作为重要参数之一对其噪声、甚至性能都有至关重要的影响,国内外研究人员针对传统的动、静叶排交替的叶轮机械轴向间隙问题在流动特征、损失机理以及性能影响方面开展了大量的研究工作. 如胡骏等人以某低速压气机为实验对象,研究了低速条件下压气机轴向间隙对其全流量特性的影响,研究结果表明:轴向间距减小失速流量减小、稳定性增强^[8]; Gorrell S E 等人结合一台跨声速压气机详细研究了导向叶片与转子叶排轴向间距变化的流动效应,研究结果认为:减少轴向间距,压气机压比、效率以及流通能力均有所下降,当轴向间距很小时,存在附加损失,而且附加损失是造成压比、效率下降的主要成因^[9-10]. 在对转压缩系统的叶轮轴向间隙研究方面,Sharma P B 结合一个低速(最高转速 2 500 r/min)试验台进行了一些研究工作,研究指出转子间的轴向间隙对上游转子性能有重要影响,进而影响对转压气机级的性能,在小轴向间隙时下游转子可以有效延迟上游转子失速^[11-12]. 然而 Sharma P B 的文章并没有给出详细的机理性解释,另外其研究结果能否应用于对转压气机的高速流动仍需要深入研究,所以有必要针对高速流动条件下对转压气机轴向间隙的变化对其性能和流场结构的发展变化过程进行细致研究,为设计高效、紧凑的对旋式压缩系统提供依据.

1 研究对象及计算方法

本文所研究的对转压气机设计参数如下:上、下游转子转速为 8 000 r/min(从进口向下游看, R_1 为顺时针旋转; R_2 为逆时针旋转),流量为 6.4 kg/s、总压比为 1.22,绝热效率为 0.86. 其中上游转子叶片根部弦长 C 为 54.6 mm,两排对转转子原始轴向间隙为 40 % C . 为研究不同轴向间隙对压气机的性能影响特点,本文新设计了 6 组转子轴向间隙,即 30 % C ,45 % C ,50 % C ,55 % C ,60 % C

和 70 % C ,应用数值模拟手段对其进行深入研究,并与原始间隙(40 % C)进行对比分析.

数值计算采用 NUMECA 软件包,应用有限体积法求解圆柱坐标系下三维定常 Navier-Stokes(N-S)方程组. 边界条件进行如下设定,即进口给定总压、总温(标准大气条件)以及气流角(轴向进气),出口给定静压,各个工况进口边界条件相同,出口边界反压不同,通过改变出口静压得到相同转速下不同工况特性及流场参数分布,当改变给定出口静压数值计算结果不收敛时认定此时压气机进入失速工况,前一点即为近失速点. 对不同轴向间隙下对转压气机堵塞点的判定统一定义为:当出口平均静压为标准大气压时即为压气机进入堵塞工况. 计算网格使用 NUMECA 软件包中的 AUTO-GRID 模块,自动生成 H-O-H 型网格,网格总数约为 120 万,近壁面 $Y^+ < 4$.

2 计算结果分析讨论

应用上述方法,针对 7 种不同转子轴向间隙的对转压气机进行了不同转速(上下游转速大小相同,方向相反)时各个工况的详细数值模拟,获取其性能以及流场细节. 现分析如下:

2.1 典型工况压气机性能随轴向间隙变化

图 1 至图 3 给出了不同轴向间隙、对转转子不同换算转速时压气机峰值效率、点级效率、上、下游转子效率随轴向间隙变化曲线. 从图中可以明显看出:不同转速下,对转压气机峰值效率随着轴向间隙的增加都呈现下降趋势;在轴向间隙从 30 % C 增加至 70 % C 的过程中,设计转速下对转压气机效率降低 2 %,上、下游转子效率都有 4 % 左右的降低;这可能是因为轴向间隙的增加,给上游转子尾迹提供了充分发展的机会,一方面使得尾迹与主流掺混效应增强损失增大,另外上游附面层的高熵尾迹气流随着主流的拖拽充分融入主流,降低了下游转子的做功能力,使得下游转子效率降低;另外,转子轴向间距的增大使得流动更加均匀,二次流动减弱,从另外一个方面讲提高了对转压气机轴向速度,对于上游转子而言,轴向速度的提高增加了叶表附面层损失,从而效率也会降低.

图 4 和图 5 给出了设计转速下对转压气机近失速点性能随轴向间隙的变化曲线,从图中看出:在近失速点压气机级效率和流量随着轴向间距的增大呈现先增大后减小,在 55 % C 处达到最大值. 从对转级上/下游转子效率、流量随着轴向间

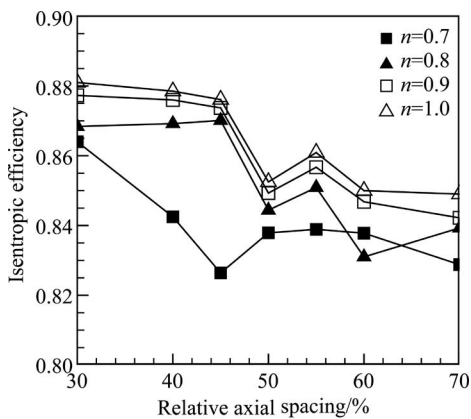


图 1 压气机最大效率随轴向间距变化
Fig. 1 Peak efficiency of compressor versus axial spacing

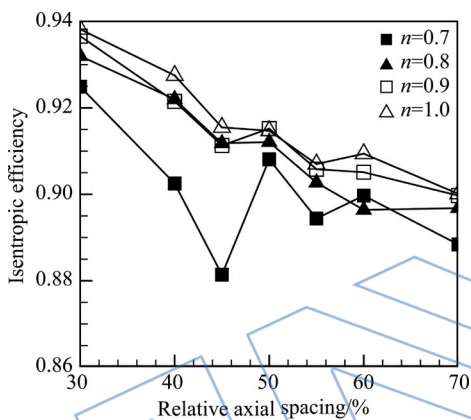


图 2 压气机最大效率点上游转子效率随轴向间距变化
Fig. 2 Efficiency of rotor upstream versus axial spacing on the peak efficiency of compressor

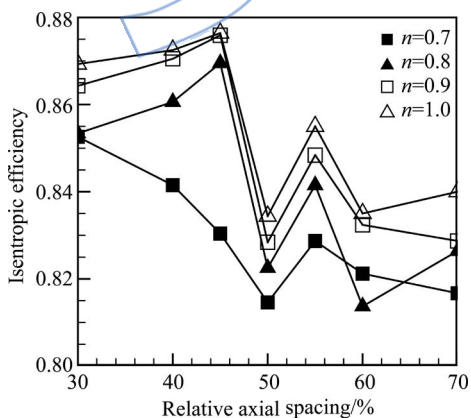


图 3 压气机最大效率点下游转子效率随轴向间距变化
Fig. 3 Efficiency of rotor downstream versus axial spacing on the peak efficiency of compressor

失速工况下,两排转子都工作在较强的逆压梯度下,气流分离效应增强,上游的高熵尾迹流使得下游转子通道内二次流损失增加,此时尾迹与主流掺混的损失虽然占总损失的一定份额,但不再是主要因素,在轴向间隙从 30 %C 到 55 %C 变化过程中,由于轴向间距的增大,尾迹流与主流掺混机会增加,气流的均匀性提高,二次流的损失降低,导致效率有所提高,但随着轴向间隙的进一步增大,此时掺混能力对二次流降低带来的损失降低贡献已经较小,但掺混所带来的损失仍然存在,并随着轴向间隙的增大而增大,使得压气机效率降低。

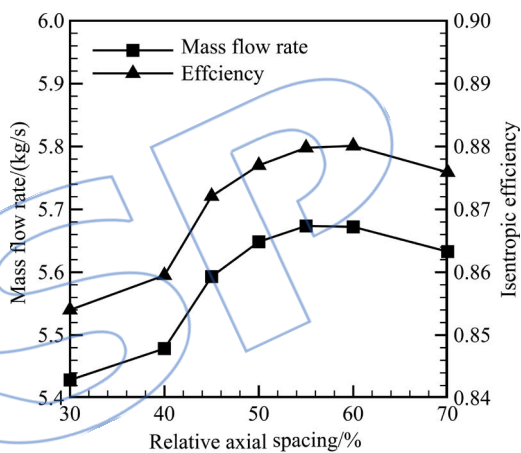


图 4 近失速点压气机性能随轴向间距变化
Fig. 4 Curves of compressor performance with different axial spacings near stall condition

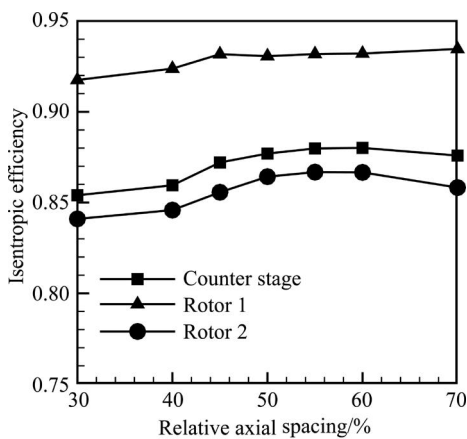


图 5 近失速点效率随轴向间距变化
Fig. 5 Curves of efficiency with different axial spacings near stall condition

距变化趋势来看,压气机近失速点效率随着轴向间距的变化趋势与下游转子的效率走势基本类似,并且都处在相对较低的量级.这是因为:在近

图 6 和图 7 给出了设计转速下对转压气机堵塞点性能随轴向间隙变化曲线,从图中可以看到:堵塞条件下,压气机效率随着轴向间距增加呈现

下降趋势,流量则随着轴向间隙增加有所提高,当间隙增加至 50 %*C* 后,间隙增加对堵塞流量基本没有影响,但效率仍然呈现下降趋势,从图 7 还可以看到,堵塞工况时下游转子效率极低,可以推断在大流量工况时下游转子特性成为制约压气机性能的瓶颈。

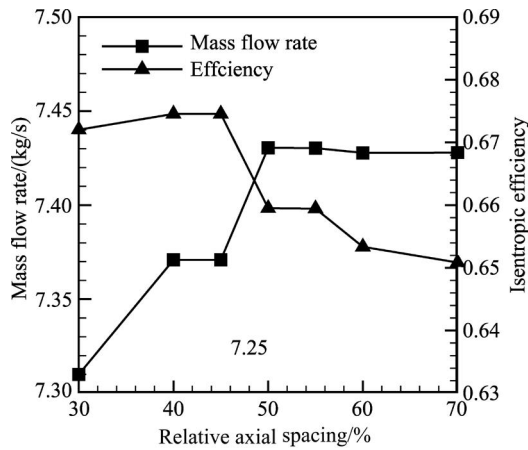


图 6 堵塞点性能随轴向间距变化

Fig. 6 Curves of compressor performance with different axial spaces at choke condition

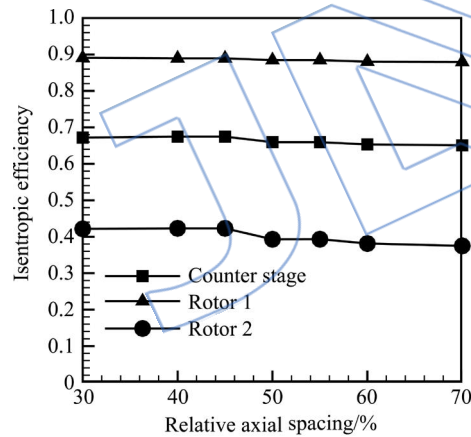


图 7 堵塞点效率随轴向间距变化

Fig. 7 Curves of efficiency with different axial spacings at choke condition

2.2 典型工况转子气流角随轴向间隙变化

从上文的分析可以初步判断:轴向间隙增大对导致压气机轴向速度有所提高,进而影响压气机性能.为进一步研究轴向间隙变化对压气机内部流动参数的影响,本文给出了设计转速下,不同轴向间隙时两排转子叶片在近失速以及堵塞工况时进口气流角沿叶高分布.图 8 给出了对转压气机堵塞工况时上游转子进口气流角沿叶高分布随轴向间隙的变化曲线.从图中看到:堵塞工况下对

转压气机上游转子工作于较大的负攻角条件下,随着轴向间距增大,上游转子攻角略有减小,流量必然增大;如图 9 所示,从堵塞工况时下游转子工作于较大的正攻角条件下,随着轴向间隙的增大攻角有所减小,并且轴向间距对下游转子根部气流角的影响要大于其他位置.对比上、下游转子进气角沿叶高分布不难发现,当轴向间距增大至 50 %*C* 时,继续增大轴向间距上游转子进气角基本不变.图 10、图 11 给出了近失速工况时上、下游转子进口气流角沿叶高分布随轴向间距的变化曲线.从图中可以明显看到:近失速工况下,上游转子工作在接近零攻角条件,轴向间隙对上游转子进气角影响不大;下游转子来流攻角较大,其进口二次流必然增强,导致损失较大,增大轴向间隙,下游转子攻角减小,其损失必然减小,这进一步印证了前面的论述。

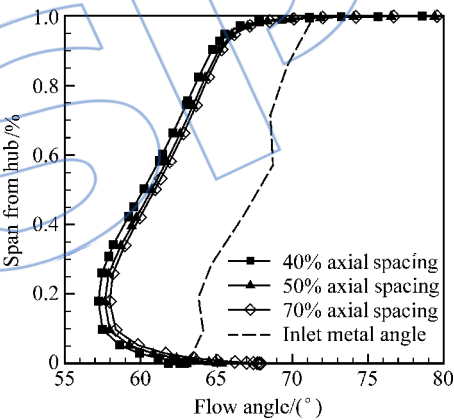


图 8 堵塞状态下,上游转子进口气流角沿叶高分布

Fig. 8 Inlet flow angle of rotor upstream along rotor span at choke condition

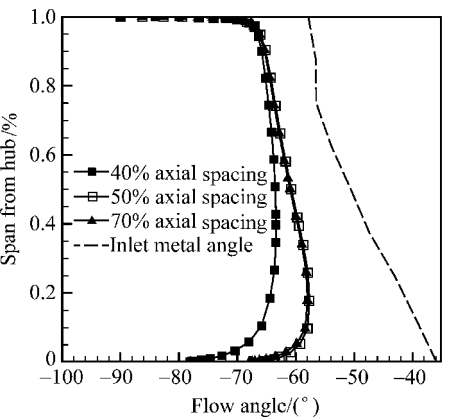


图 9 堵塞状态下,下游转子进口气流角沿叶高分布

Fig. 9 Inlet flow angle of rotor downstream along rotor span at choke condition

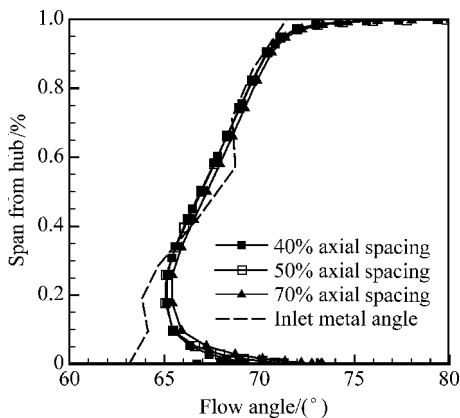


图 10 近失速点上游转子进口气流角沿叶高分布

Fig. 10 Inlet flow angle of rotor upstream along rotor span near stall condition

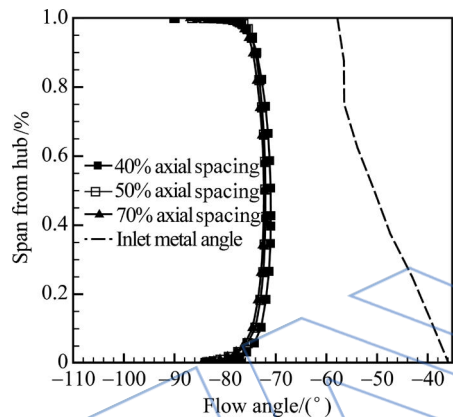


图 11 近失速点下游转子进口气流角沿叶高分布

Fig. 11 Inlet flow angle of rotor downstream along rotor span near stall condition

2.3 近失速工况时轴向间隙对流动结构的影响

为了研究轴向间隙改变对上游转子尾迹发展以及下游转子进口处流场结构的影响,图 12 给出了不同轴向间隙时距离下游转子进口 5 % 轴向弦长处 S_3 面的相对马赫数分布。从图中可以看到随着轴向间隙的增加,上游尾迹与主流的掺混过程加长,流动参数均匀性增强,主要表现在:随着轴向间距的增加流场中马赫数梯度减小,高马赫数区域和低马赫数区域面积都存在不同程度的减小,值得指出的是:通过轴向间隙的增加来提高下游转子来流品质从而提高压气机性能的方式并不见得有效,关键在于对转转转子间尾迹掺混损失、二次流损失何种因素占主导地位?如果掺混损失占主导地位,则通过减小轴向间距可有效提高压气机性能,如果是二次流损失占主导地位则通过增加轴向间距来提高压气机性能是可行的方法。

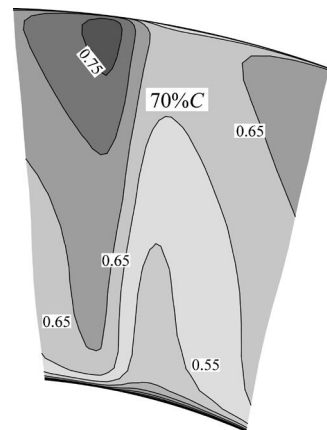
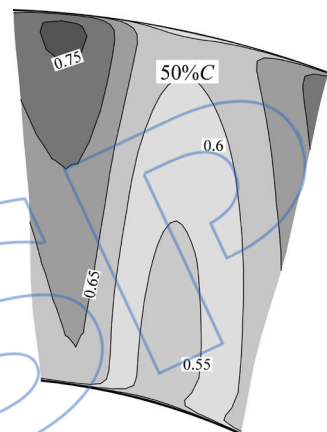
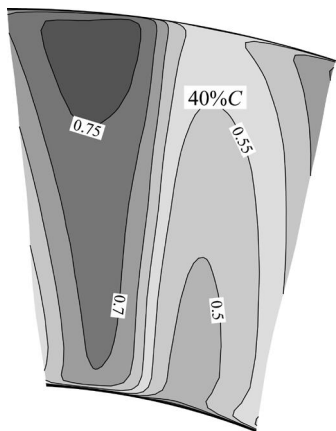


图 12 近失速点不同轴向间隙条件下,下游转子进口 - 5 % 轴向弦长处 S_3 面相对马赫数分布

Fig. 12 Relative Mach number of S_3 surface at - 5 % C of rotor downstream near stall condition with different axial spacings

3 结 论

本文采用数值模拟手段研究了不同转速下、7 种轴向间隙对转压气机不同工况下的特性和内部流动情况,并对计算结果中的特性曲线和流动参

数进行了详细的对比分析研究,同时对典型工况下对转压气机内部流场结构进行了对比分析,可以得出以下几点结论:

1) 在轴向间隙从 30 %C 到 70 %C 增加过程中,对转压气机峰值效率降低 2 % 左右,上、下游对转转子峰值效率也同时降低约 4 %;近失速点效率和流量先上升后降低,在 55 %C 间距时达到最大值;堵塞点的流量增加,效率降低约 3 %.

2) 两排转子中,下游转子工作条件恶劣,效率较低是制约对转压气机性能的主要瓶颈,增加轴向间隙可以使得下游转子来流品质有所改善,但随着轴向间隙的增加这种正效应逐渐减弱.

3) 在堵塞工况下,随着轴向间隙的增加,上游转子来流气流角减小,攻角减小,堵塞流量增大,当轴向间隙增大至 50 %C 时,继续增大对上下游转子来流攻角影响不大;近失速工况下,上游转子工作在接近零攻角条件,轴向间隙对上游转子进气角影响不大;下游转子来流攻角较大,增大轴向间隙,下游转子攻角减小.

4) 通过轴向间隙的增加来提高下游转子来流品质从而提高对转压气机性能的方式并不见得有效.如果掺混损失占主导地位,则通过减小轴向间距可有效提高压气机性能,如果是二次流损失占主导地位则通过增加轴向间距来提高压气机性能是可行的方法.

参考文献:

- [1] 程荣辉. 轴流压气机设计技术的发展[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(2): 1-8.
CHENG Ronghui. Development of design technology for axial compressor[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(2): 1-8. (in Chinese)
- [2] Pempie P, Puet L. Counter-rotating turbine designed for turbo-pump rocket engine[R]. AIAA 2003-4768, 2003.
- [3] 蔡睿贤. 有关对转涡轮基本设计与应用的进一步思考[J]. 航空动力学报, 2002, 16(3): 193-198.
CAI Ruixian. Consideration on the basic desic design and application of counter-rotating turbines[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 16(3): 193-198. (in Chinese)
- [4] Roche J M, Pala D T, Hunter J E. Investigation of exoskeletal engine propulsion system concept [R]. NASA/ TM-2005-213369.
- [5] 刘波, 候为民, 陈云永, 等. 对转压气机转差特性试验与数值模拟[J]. 航空动力学报, 2009, 24(2): 403-408.
LIU Bo, HOU Weimin, CHEN Yunyong, et al. Experiment and numerical simulation of rotating-speed difference effects on a dual-stage counter-rotating compressor flow field and performance [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(2): 403-408. (in Chinese)
- [6] 王掩刚, 贾瑞琦, 刘波, 等. 双级对转压气机多工况数值分析研究[J]. 西北工业大学学报, 2008, 26(5): 535-539.
WANG Yangang, JIA Ruiqi, LIU Bo, et al. Numerical investigation of dual stage counter-rotating compressor for on-design or off-design conditions [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2008, 26(5): 535-539. (in Chinese)
- [7] Kerrebrock J L, Epstein A H, Merchant A A. Design and test of an aspirated counter-rotating fan [R]. ASME Turbo. Expo., GT2006-90582, 2006.
- [8] 李传鹏, 胡骏, 张燎原, 等. 轴向间距变化对轴流压气机全流量特性的影响[J]. 推进技术, 2004, 25(6): 508-511.
LI Chuanpeng, HU Jun, ZHANG Liaoyuan, et al. Effect of axial spacing on compressor performance in all flow range [J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(6): 508-511. (in Chinese)
- [9] Gorrell S E, Okiishi T H, Copenhaver W W. Stator/ rotor interaction in a transonic compressor: Part 1 - Effect of blade row spacing on performance [R]. ASME Paper GT-2002-30494.
- [10] Gorrell S E, Okiishi T H, Copenhaver W W. Stator/ rotor interaction in a transonic compressor: Part 2 - Description of a loss production mechanism [R]. ASME Paper GT-2002-30495.
- [11] Sharma P B, Jain Y P, Pundhir D S. Study of some factors affecting the performance of a contra-rotating axial compressor state [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Power and Process Engineering, 1988, 202 (A1): 15-21.
- [12] Sharma P B, Jain Y P, Jha N K, et al. Stalling behavior of a contra-rotation axial compressor stage [R]. ISABE 85-7087, 1985.