

文章编号:1000-8055(2011)12-2741-08

可调高压导叶对 1+1/2 对转涡轮性能影响的数值研究

雒伟伟^{1,2}, 张 磊^{1,2}, 王会社¹, 徐建中¹

(1. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100190)

摘 要: 对 1+1/2 对转涡轮高压导叶转动不同角度后不同落压比时的涡轮性能进行了数值计算和分析, 获得了不同导叶开度和不同落压比对涡轮性能影响的关系曲线. 结果表明, 高压导叶转角的变化可以有效地调节 1+1/2 对转涡轮的流量; 当导叶打开时, 随着落压比的变化涡轮效率存在一个峰值, 当导叶关闭时, 涡轮效率随落压比的减小持续降低, 并且降低的幅度更加明显; 当涡轮压比较低时, 导叶开大时的涡轮效率略高于导叶未动时的效率, 并且随着落压比的进一步降低, 差异更加明显, 这与文献中常规涡轮导叶调整后涡轮效率均会降低明显不同; 在保证效率和功量的前提下, 高压导叶开大对于 1+1/2 对转涡轮高低压级出功比保持在合理范围内是有利的.

关 键 词: 1+1/2 对转涡轮; 可调高压导叶; 流量调节; 出功比; 变工况性能; 数值模拟

中图分类号: V235.1

文献标志码: A

Effects of high-pressure guide vane adjustment on 1+1/2 counter-rotating turbine

LUO Wei-wei^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2}, WANG Hui-she¹, XU Jian-zhong¹

(1. Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A detailed numerical simulation was carried out to investigate the 1+1/2 counter-rotating turbine performance with different openings of high-pressure guide vane and turbine expansion ratios. By analyzing the results, the variable high-pressure vane could effectively control the massflow of 1+1/2 counter-rotating turbine; when the high-pressure guide vane was opened, there was a peak turbine efficiency with the change of the expansion ratio, when the high-pressure guide vane was closed, the efficiency decreased steadily with the reduced expansion ratio, and the efficiency reduced more quickly than that when the high-pressure guide vane was opened; in the case of the lower expansion ratio, the efficiency improved with the increase of the opening of the high-pressure guide vane, and the improvement was more obvious with the decrease of expansion ratio, which is significantly different from the efficiency of conventional turbine that generally decreases in the variable guide vane; the results show that the opened high-pressure guide vane is favorable for the specific work ratio (SWR) of high-pressure turbine to that of low-pressure turbine remained within reasonable limits.

收稿日期:2010-12-22; 修订日期:2011-05-13

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划(90718025); 国家重点基础研究发展计划(2010CB227302)

作者简介:雒伟伟(1985—),女,陕西宝鸡人,博士生,主要从事发动机气动热力学研究.

Key words: 1+1/2 counter-rotating turbine; variable high-pressure guide vane; massflow regulation; ratio of specific work; off-design performance; numerical simulation

近年来伴随着航空领域的发展,对航空发动机的要求也越来越高,对转涡轮技术以其独特的优势受到越来越多的关注.国外自上世纪50年代以来便针对对转涡轮技术进行了大量的理论和实验研究^[1-3],国内也于上世纪90年代初开始这方面的研究^[4-9].1+1/2对转涡轮即无低压导叶对转涡轮与常规涡轮相比具有其独特的特点:高压动叶采用缩放型流道,涡轮喉部位于高压动叶中,即高压动叶喉部是整个涡轮的流量控制截面,高压动叶出口截面沿整个叶高均超声,涡轮流量不会随着背压的变化而变化^[8,10].因此,1+1/2对转涡轮的流量控制及其变工况性能必然不同于常规涡轮.本文通过数值模拟计算,分析了不同高压导叶开度和不同落压比时的涡轮性能,研究了导叶开度对涡轮流量的调节规律、高低压级匹配关系及其变工况性能.

1 数值方法

1.1 计算软件

本文数值计算采用 Numeca 软件包,求解三维定常 Navier-Stokes 方程组,应用格子中心式有限体积法,空间差分采用中心差分格式,CFL (Courant-Friedrichs-Lewy)数取为3.0,湍流模型采用 Spalart-Allmaras 一方程模型.本文所用网格为 H-O-H 多块结构化网格,由 Numeca/Auto-Grid 生成,每一种算例的计算总网格节点数均约为200万(图1),高压导叶端部和轮毂之间间隙的网格节点数约10万(图2).

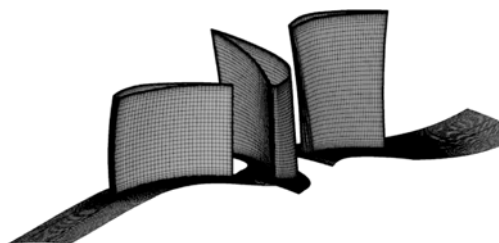


图1 计算所用网格三维视图
Fig.1 Grid used in the calculation

1.2 计算条件

本文对1+1/2对转涡轮高压导叶转动不同角度后不同落压比时的涡轮变工况性能进行了数

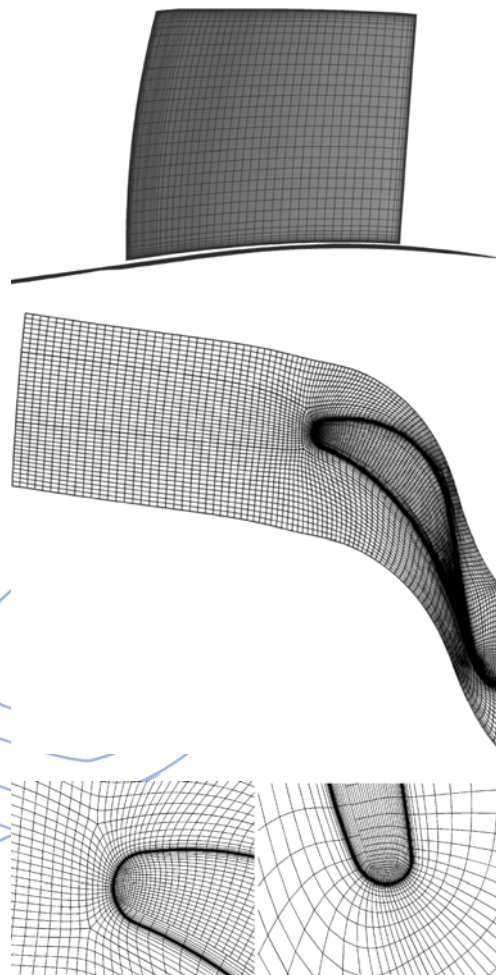


图2 高压导叶网格及端部间隙网格
Fig.2 Grid of the high-pressure guide vane and the tip clearance

值计算和分析,计算针对六种高压导叶开度:原型、导叶关闭5°和8°、导叶打开5°,10°和15°(图3),规定导叶打开为正,用“+”表示,导叶关闭为负,用“-”表示.各工况的进口边界条件相同:总温为500K、总压为300kPa,设计工况时的出口静

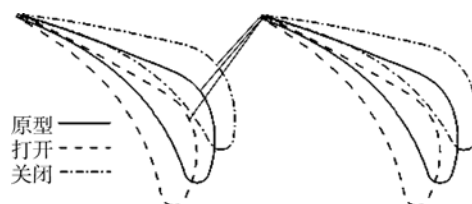


图3 可调导叶示意图
Fig.3 Schematic diagram of variable high-pressure guide vane

压为 40 kPa, 通过调节出口静压获得不同的落压比。

2 计算结果及分析

为了保证高压导叶可以转动, 在高压导叶端部和轮毂之间必须预留一定间隙, 此间隙在导叶不可调时是不存在的, 间隙越大泄漏损失就越大, 同时还要考虑材料的热膨胀因素, 因此在保证导叶能够转动的前提下, 导叶端部间隙应尽可能小^[11], 有关研究表明将可调导叶根尖两端面设计成同心球面, 对应的内外机匣设计成与叶片两端相配合的球面, 可保持两端径向间隙保持均匀且最小, 从而大大减少径向间隙的漏气损失^[12-13]。在本文中, 考虑到叶片材料的热膨胀性, 高压导叶端部间隙取叶高的 1.8%^[11], 约为 1.2 mm, 导叶两端面未进行球面设计, 并且当导叶转动时, 假定此间隙仍均匀, 其大小不发生变化。

采用可调导叶时, 为了减小叶片转动时导叶尾缘的摆动量以及削弱导叶和动叶之间轴向间隙变化而引起的动叶振动, 导叶转动的支点选择在叶片后部较好^[13]。在本文计算中导叶转动的支点暂定为尾缘点(图 3)。每一个导叶开度下分别计算了 9 个不同出口静压时的涡轮性能, 设计工况时涡轮的出口静压为 40 kPa, 当出口静压升高至 130 kPa 以上或降低至 30 kPa 以下时, 计算将不能收敛。

2.1 可调高压导叶对涡轮流量的影响

1+1/2 对转涡轮区别于常规涡轮的气动性能是: 高压动叶采用了缩放型流道, 涡轮喉部位于高压动叶中, 所以高压动叶喉部就成为整个涡轮的流量控制截面, 其出口沿整个叶高都超声(除两端壁外, 出口马赫数介于 1.4~1.6 之间), 而常规涡轮一般不将整个叶高均设计为超声, 会留出部分叶高的亚声区以通过尾喷管开度控制发动机的流量。但是在 1+1/2 对转涡轮中, 由于高压动叶限制了流量, 通过尾喷管开度难以控制涡轮流量, 那么要调节流量只有改变进口气流条件, 即总温、总压、气流角。调节高压导叶开度以实现此目标不失为一种合理、有效的途径。

图 4 是涡轮流量随高压导叶开度变化和落压比变化的关系曲线, 从图中可以看出通过调节高压导叶开度可以有效地控制涡轮流量, 导叶打开时涡轮流量增大, 导叶关小时涡轮流量减小, 并且流量减小的幅度更加明显。但涡轮流量的变化范围要受到风扇、压气机等其他部件的限制, 因此,

采用可调导叶时需综合考虑各种因素的影响, 选择合适的开度变化范围。另外, 在不同导叶开度时, 涡轮流量几乎不随落压比的变化而增减。

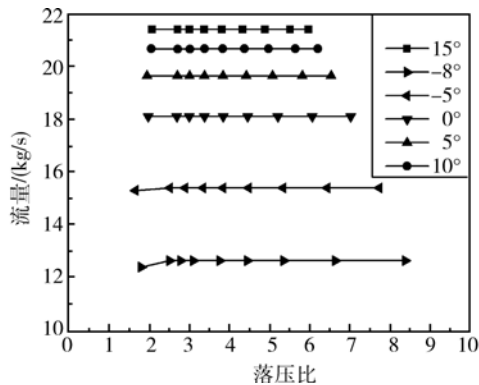


图 4 流量特性

Fig. 4 Massflow characteristic

在 1+1/2 对转涡轮中, 气动喉部面积随落压比和高压导叶开度的变化不明显, 由临界流量关系式

$$G_{\max} = A_{cr} K \frac{p_{w1}^*}{\sqrt{T_{w1}^*}} \quad (1)$$

可知, 对涡轮流量产生主要影响的是高压动叶进口的相对总压和相对总温, 当高压导叶的开度变化时, 使得高压动叶进口气流条件发生变化, 进而影响整个涡轮的流量。图 5 是 $p_{w1}^* / \sqrt{T_{w1}^*}$ (即高压动叶进口相对总温、相对总压) 在设计压比和远离设计压比时随导叶开度的变化曲线, 可以看出, $p_{w1}^* / \sqrt{T_{w1}^*}$ 并不随落压比升降而发生变化, 但是随着导叶开大或者关小产生明显变化, 这个关系和流量与开度、落压比的变化关系是一致的, 进一

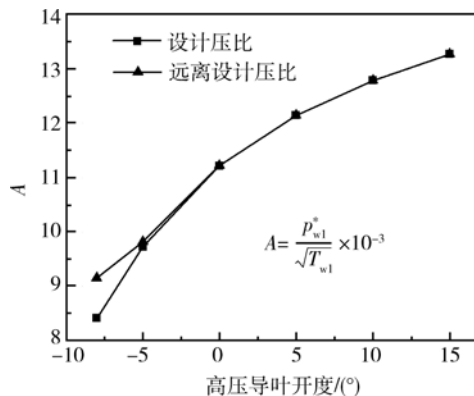


图 5 高压导叶进口相对总温总压变化

Fig. 5 Changes of the relative total temperature and total pressure in the inlet of the high-pressure guide vane

步说明在 $1+1/2$ 对转涡轮中,通过调节高压导叶开度可以有效地控制涡轮流量。

2.2 可调高压导叶对涡轮效率的影响

国内外许多关于可调导叶的研究表明:无论导叶开大或关小,涡轮效率均会降低,但降低的程度不同,导叶开大的降低量小于导叶关小的降低量^[12-15].效率降低的主要原因是采用可调导叶时存在导叶端部间隙的漏气损失、攻角损失以及叶型损失等。

图6是 $1+1/2$ 对转涡轮的效率特性曲线,图7是不同导叶开度时高压动叶叶中流线图。当导叶打开时,随着落压比的变化涡轮效率存在一个峰值,当背压提高,落压比低于此值时,涡轮效率降低,当导叶关小时,涡轮效率随着落压比的减小持续降低,并且降低的幅度更加明显,原因是导叶关小,导叶的喉部面积减小,使得导叶出口气流速度较高,流速的增加导致损失的增加,而导叶开大时,导叶的喉部面积增大,尾缘堵塞度相对减小,对于提高效率是有利的;另外,当导叶关小时,高压动叶进口气流角趋向于正攻角运行,在高压动叶吸力面前缘产生分离(图7(a),图7(b));导叶开大时,高压动叶进口气流角向负攻角转变,而负攻角引起的损失明显小于正攻角引起的损失(图7(d),图7(e),图7(f))。

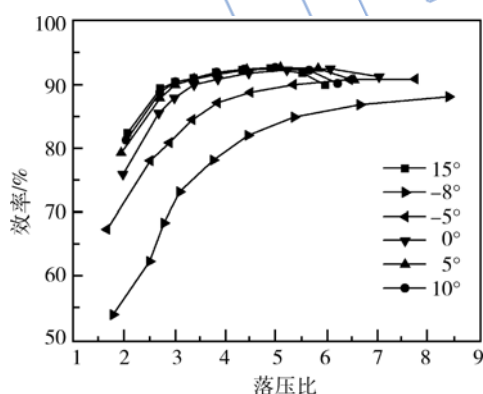


图6 效率特性

Fig. 6 Efficiency characteristic

但是,当落压比较低,导叶开大时 $1+1/2$ 涡轮效率略高于导叶未动时的效率,并且随着落压比的进一步降低,差异更明显,这一现象与文献中得到的结论有所不同,分析原因是:此 $1+1/2$ 对转涡轮在设计工况时,高压动叶的进口气流角带有一定的正攻角,而非零攻角(图7(c)),当高压导叶开大时,高压动叶的进口气流角就会向零攻

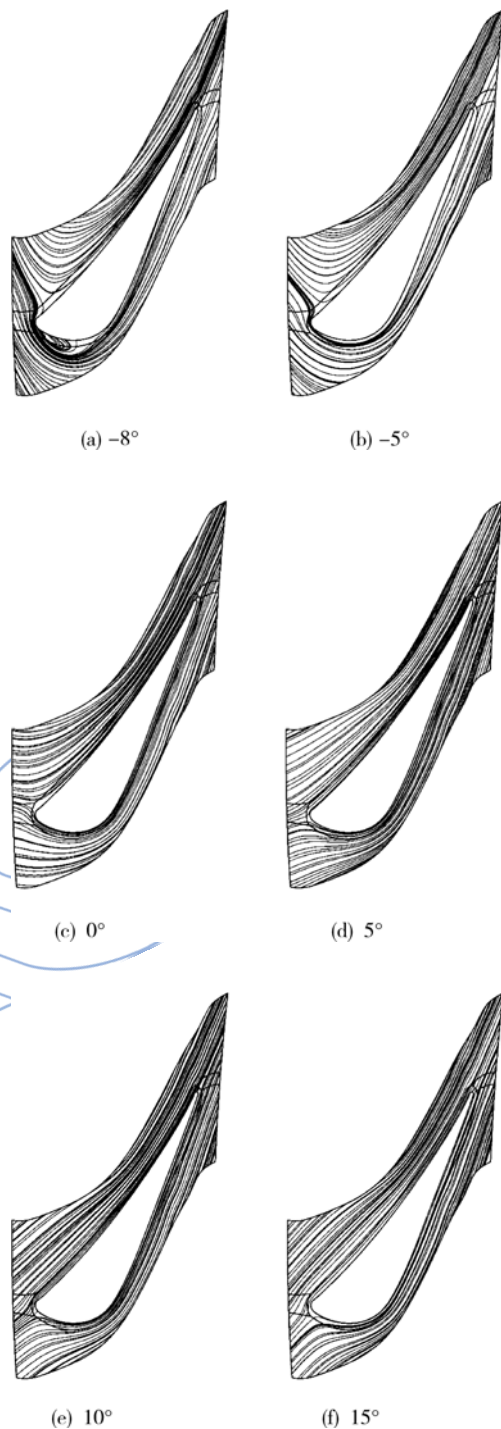


图7 不同导叶开度时高压动叶叶中流线图
(设计压比时)

Fig. 7 Streamline of the high-pressure rotor
in the different openings
(design pressure-ratio)

角及负攻角方向转变(图7(d),图7(e),图7(f)),进而影响涡轮的效率.因此,若采用可调导叶,动叶在设计时最好带有一定的负攻角,这样当导叶开大时,动叶攻角趋向于更大的负攻角,导叶关小时,则其趋向于零攻角或较小正攻角,从而削弱导

叶开度变化对效率的影响。

为分析导叶开度变化时总压损失的变化,定义总压损失系数如下:

$$C_p = \frac{p_{in}^* - p^*}{\frac{1}{2} \rho_{in} \omega_{in}^2} \quad (2)$$

式中 p_{in}^* 表示涡轮进口相对总压; p^* 表示当地相对总压; ρ_{in} 表示涡轮进口平均密度; ω_{in} 表示涡轮进口平均速度。

图 8 是在设计压比下不同导叶开度时高压导叶出口处总压损失系数沿叶高的分布,从图中可以看出,当导叶关小时,总压损失系数明显高于导叶未动和开大时的,导叶开大时,总压损失系数小于导叶未动时的,但是差别很小,说明导叶关小时在导叶流道内的流动损失较大。另外不同开度时,在叶片根部总压损失较高,这主要是由于在导叶端部和轮毂之间存在间隙,间隙的存在必然伴随着漏气损失以及间隙泄漏流与主流的相互作用,并且随着开度的减小,气流折转角增大,流道中的横向压力梯度增大,从而导致端壁附近附面层中气流横向流动加强,附面层增厚,损失增大。

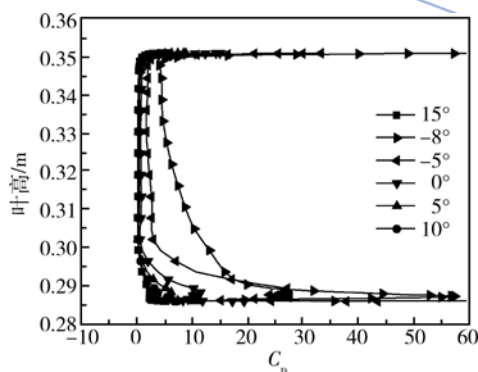


图 8 不同导叶开度时高压导叶出口总压损失系数分布(设计压比时)

Fig. 8 Total pressure loss coefficient at the outlet of high-pressure guide vane in the different openings (design pressure-ratio)

2.3 可调高压导叶对涡轮功量的影响

图 9 是涡轮功量随高压导叶开度和涡轮落压比的变化曲线,不同导叶开度时,涡轮的出功量均随着落压比的升高而上升;导叶开大时,涡轮的做功能力提高,这主要与流量随导叶开度增大而增加有关。图 10 为设计压比时高低压级出功量随导叶开度的变化情况,可以看出导叶开大时高压级出功量略有降低,低压级出功明显增大;导叶关小

时,高压级和低压级的出功量均减小,但高压级减小的幅度没有低压级显著。因此,导叶开度变化对涡轮功量的影响主要表现为低压级做功的变化。

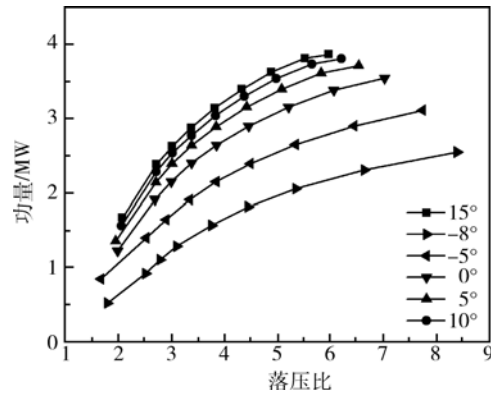


图 9 功量特性

Fig. 9 Work characteristic

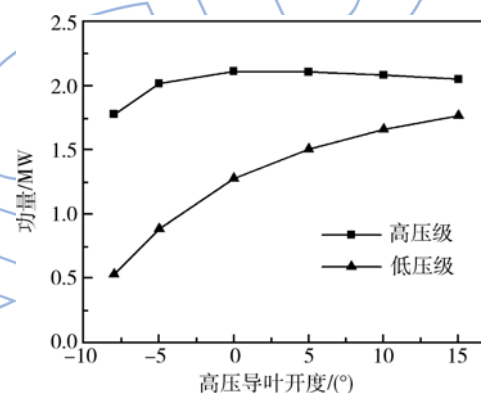


图 10 不同导叶开度时高低压级出功量(设计压比时)

Fig. 10 Work both of high-pressure stage and low-pressure stage in the different openings (design pressure-ratio)

图 11 给出了设计压比下导叶在不同开度时三排叶片中叶展的静压分布,可以看出,导叶的打开或者关闭对三排叶片的表面静压分布有明显的影响。当导叶打开时,高压导叶吸力面尾缘处的扩压段更加明显,并且有逐渐向前缘延伸的趋势,容易导致分离;高压动叶压力面和吸力面的顺压梯度均随导叶打开而增大,其做功能力没有明显变化;低压动叶表面静压曲线包围的面积增大,说明低压动叶的出功量随导叶的开大而增大。当导叶关小时,高压导叶尾缘的扩压段很小,其出口静压明显下降;高压动叶吸力面前缘出现明显逆压区,导致吸力面前缘出现分离泡(图 7(a));低压动叶出功量随导叶关小而降低。

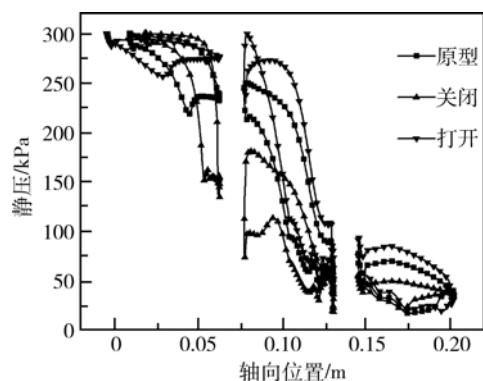


图 11 中叶展静压分布(设计压比时)

Fig. 11 Static pressure in the middle span (design pressure-ratio)

图 12 是 $1+1/2$ 对转涡轮高低压级出功比随导叶开度和落压比的变化曲线. 当落压比降低时, 高低压级出功比增大, 主要原因是落压比降低, 高低压级出功量均降低, 但是低压级降低的更为明显, 以至于低压级出功偏低. 为避免低压级的出功量过低, $1+1/2$ 对转涡轮在设计时要求高低压级出功比小于 1.8. 从图 12 可以看到, 若高压导叶开度不变或关小, 那么落压比稍有降低就会使得高低压级出功比发生明显变化, 特别是导叶关小时, 出功比增大的趋势更加明显; 但若高压导叶开大, 那么在一个较大的落压比变化区间, 高低压级出功比也会保持在较理想范围内, 这主要是因为导叶开大, 高压级出功量变化不大, 但是低压级出功量会显著增加(图 10). 因此, 在保证效率和功量的前提下, 高压导叶开大对于 $1+1/2$ 对转涡轮高低压级出功比保持在合理范围内是有利的.

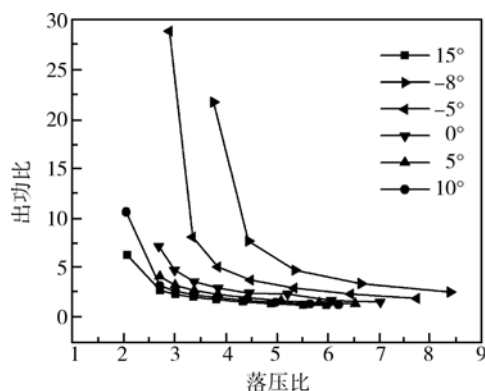
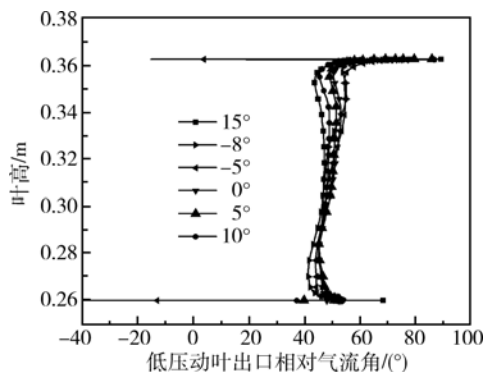
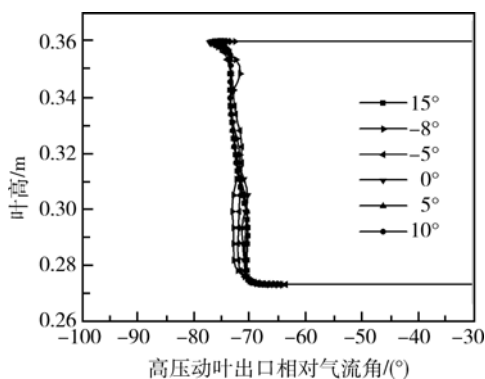
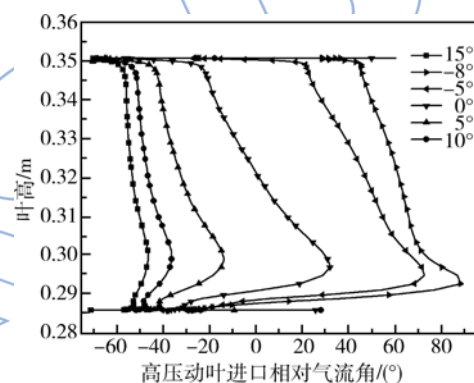


图 12 不同落压比、导叶开度时高低压级出功比

Fig. 12 Ratio of specific work of high-pressure stage to that of low-pressure stage in the different expansion ratios and openings

2.4 高压导叶可调对各叶排进出口气流角的影响

图 13 给出了设计压比下不同导叶开度时各叶排进出口气流角的变化. 由图可见, 导叶开度的变化对高压动叶进口相对气流角和低压动叶出口绝对气流角影响较大, 但是对高低压动叶出口相对气流角影响较小. 当导叶打开时, 高压动叶进口气流角减小为负攻角, 打开得越大, 负攻角越大, 高压动叶工作于负攻角下其做功基本不变(图 10); 低压导叶出口绝对气流角随着导叶的打开而增加, 偏离轴向. 当导叶关小时, 高压动叶进口气流角明显增加, 高压动叶工作于正攻角下, 容易在吸力面产生分离, 并且高压级出功量减小; 低压级出口气流角随着导叶的关小而减小为负值, 严重偏离轴向, 损失增大, 效率降低.



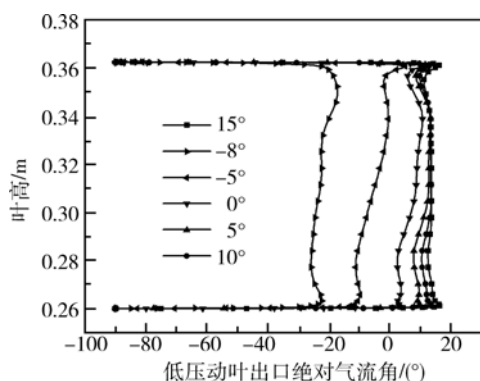


图 13 导叶开度对各叶排进出口气流角的影响
(设计压比时)

Fig. 13 Change of flow angle in the different openings (design pressure ratio)

3 结 论

1) 通过调节高压导叶的开度可以有效地控制 1+1/2 对转涡轮的流量,导叶打开时涡轮流量增大,关小时流量减小,并且减小的幅度更加明显,但是涡轮流量的变化范围要受到风扇、压气机等其他部件的限制。因此,采用可调导叶时需综合考虑各种因素的影响,选择合适的导叶开度变化范围。

2) 当导叶打开时,随着落压比的变化涡轮效率存在一个峰值,当落压比低于此值时,涡轮效率降低;当导叶关小时,涡轮效率随着落压比的减小持续降低,并且降低的幅度更加明显。

3) 当 1+1/2 对转涡轮落压比较低时,导叶开大时的涡轮效率略高于导叶未动时的效率,并且随着落压比的进一步降低,差异更加明显,这与文献中常规涡轮导叶调整后涡轮效率均会降低明显不同。

4) 导叶开大时涡轮的做功能力提高,这主要与流量随导叶开度增大而增加有关。导叶开大时高压级出功量略有降低,低压级出功量明显增大;导叶关小时高压级和低压级的出功均减小,但高压级减小的幅度没有低压级显著,因此,导叶开度变化对涡轮功量的影响主要表现为低压级出功量的变化。

5) 在保证效率和功量的前提下,高压导叶开大对于 1+1/2 对转涡轮高低压级出功比保持在合理范围内是有利的。

参考文献:

[1] Sotsenko Y V. Thermogasdynamic effects of the engine

turbines with the countra-rotating rotors[R]. ASME Paper 90-GT-63,1990.

[2] Ponomariov B A, Sotsenko Y V. Using contra-rotating rotors for decreasing sizes and component number in small GTE[R]. ASME Paper 92-GT-414,1992.

[3] Haldeman C W, Dunn M G, Abhari R S. Experimental and computational investigation of the time-average and time-resolved pressure loading on a vaneless counter-rotating turbines[R]. ASME Paper 2000-GT-0445,2000.

[4] 蔡睿贤. 对转涡轮基本分析[J]. 航空学报,1992,13(1): 57-63.

CAI Ruixian. Basic analysis of counter-rotating turbine [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,1992,13(1): 57-63. (in Chinese)

[5] 季路成,钟文涛,徐建中. 关于 1+1/2 对转涡轮的基本分析和初步设计[J]. 工程热物理学报,2001,22(2):167-170.

JI Lucheng, ZHONG Wentao, XU Jianzhong. Primary analysis and design of a vaneless counter-rotating turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2001,22(2): 167-170. (in Chinese)

[6] 季路成,黄海波,徐建中,等. 1+1/2 对转涡轮应用中的关键技术问题[J]. 工程热物理学报,2003,24(1):35-38.

JI Lucheng, HUANG Haibo, XU Jianzhong, et al. The key techniques in utilizing vaneless counter-rotating turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2003,24(1): 35-38. (in Chinese)

[7] 季路成,肖翔,陈江. 1+1/2 对转涡轮设计及控制方法探索[J]. 工程热物理学报,2004,25(3):405-407.

JI Lucheng, XIAO Xiang, CHEN Jiang. Numerical investigations about the vaneless counter-rotating turbine for the cold-air test [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2004,25(3):405-407. (in Chinese)

[8] 张惠. 1+1/2 对转涡轮流动特性分析及其气膜冷却流动机理研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所),2008.

ZHANG Hui. Investigation on flow characteristics and film-cooling mechanism in a 1+1/2 counter-rotating turbine[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics), 2008. (in Chinese)

[9] 赵庆军,王会社,赵晓路,等. 涡轮转速对无导叶对转涡轮流动特性的影响[J]. 工程热物理学报,2007,28(6):925-928.

ZHAO Qingjun, WANG Huishe, ZHAO Xiaolu, et al. Influence of rotor speeds on flow characteristics in a vaneless counter-rotating turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2007,28(6):925-928. (in Chinese)

[10] 王会社,张永军,赵庆军,等. 背压对缩放型流道涡轮动叶激波结构的影响[J]. 工程热物理学报,2009,30(8):1299-1302.

WANG Huishe, ZHANG Yongjun, ZHAO Qingjun, et al. Numerical simulation of shock systems in converging-diverging nozzle rotor turbine stage with different outlet static pressure[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2009,30(8):1299-1302. (in Chinese)

- [11] 邱超,宋华芬.变几何涡轮的损失研究[J].燃气轮机技术,2007,20(01):39-42.
QIU Chao, SONG Huafen. Loss research of variable geometry turbine[J]. Gas Turbine Technology, 2007, 20(1): 39-42. (in Chinese)
- [12] Yue G Q, Yin S Q, Zheng Q, et al. Numerical simulation of flowfields of variable geometry turbine with spherical end-walls or nonuniform clearance[R]. ASME Paper 2009-GT-59737, 2009.
- [13] 胡松岩.变几何涡轮及其设计特点[J].航空发动机,1996(3):21-26.
HU Songyan. Variable geometry turbine and design characteristics[J]. Aeroengine, 1996(3): 21-26. (in Chinese)
- [14] QIU Chao, SONG Huafen, WANG Yonghong, et al. Performance estimation of variable geometry turbines[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power and Energy, 2009, 223(A4): 441-449.
- [15] Cells C, Pinto P D R, Barbosa R S, et al. Modeling of variable inlet guide vanes affects on a one shaft industrial gas turbine used in a combined cycle application[R]. ASME Paper 2008-GT-50076, 2008.

JALSP