

文章编号: 1000-8055(2004)06-0822-06

雷诺数对涡轮部件性能的影响

李 维¹, 邹正平², 赵晓路¹

(1 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100080;

2 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 利用数值模拟手段研究了雷诺数对低压涡轮部件性能的影响, 分析了低压涡轮内部流动的变化。结果表明低压涡轮效率随雷诺数降低而下降, 且其变化趋势为非线性变化; 叶片表面速度分布亦发生较明显的变化, 导致叶型损失与二次流损失增大; 结果还表明叶片表面速度分布的设计对涡轮性能随雷诺数变化的规律具有重大影响, 在低雷诺数条件下涡轮部件的设计中需加以注意。

关键词: 航空、航天推进系统; 雷诺数; 涡轮; 叶型损失; 二次流损失

中图分类号: V 211.1

文献标识码: A

The Effects of Reynolds Number on the Characteristics of the Low Pressure Turbine

L I W ei¹, Z H O U Zheng-ping², Z H A O Xiao-lu¹

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100080;

2 The School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

Abstract: The effect of Reynolds number on the characteristics of the Low Pressure Turbine (LPT) was investigated and the variations of flow structures with Reynolds number were analyzed by numerical simulation. The results show that the efficiency of LPT is decreased with the reduction of Reynolds number, and the relationship between the efficiency and Reynolds number change is non-linear. Obvious changes of blade surface velocity distribution at different Reynolds number can be found, which induce the increases of profile loss and secondary flow loss. The results also show that the design of blade surface velocity distribution has significant influence on turbine characteristics change with Reynolds number. It is very important to the aerodynamic design of LPT which is intended to operate at low Reynolds number conditions.

Key words: aerospace propulsion system; Reynolds number; turbine; profile losses; secondary flow losses

对于无人机所用的小发动机, 特别是高空无人
机发动机而言, 面临一个严重挑战, 即其工作雷

诺数低, 这将使高空巡航时效率比地面工作状态的
效率降低几个百分点, 以 PW 545 发动机为例,

收稿日期: 2003- 11- 04; 修订日期: 2004- 03- 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(502006001); 航空科学基金资助项目(03C51030)

作者简介: 李维(1973-), 男, 湖南株洲人, 中国航空动力机械研究所高级工程师, 中国科学院工程热物理研究所博士生, 主要从事航空发动机叶轮机气动设计研究

其在高空巡航时发动机效率效率下降 4% 左右^[1], 同样的情况存在于“全球鹰”高空无人侦察机的发动机 AE3007H 中, 在高空 19 800 m 巡航状态工作时该发动机效率下降几个百分点^[2]。研究结果表明发动机效率下降的主要原因为低压涡轮性能的急剧恶化。

对于涡轮来说, 影响其损失的主要因素有: 雷诺数, 斯特劳哈尔数, 尾迹强度(包括尾迹的湍流强度、速度亏损、尾迹宽度)、叶片的负荷分布以及通道扩张角等等^[3]。在高空, 由于密度降低等原因, 低压涡轮的工作雷诺数可以降至 25 000, 甚至更低, 远远低于自模化雷诺数。在这种情况下, 叶片表面大部分地方为层流, 抗拒分离的能力非常弱, 涡轮叶片吸力面后缘经常发生分离, 导致涡轮效率急剧下降, 无人机发动机损失增加, 效率降低。对于低压涡轮, 特别是出口级低压涡轮而言, 由于雷诺数更低, 所以情况更为严重。

本文通过三维粘性定常计算分别模拟了某发动机涡轮在不同工作雷诺数(对应不同飞行高度)下的流动状况, 得到了低压涡轮效率随雷诺数降低而变化的曲线, 并通过对比分析地面状态和高空状态的流动现象, 初步探讨了低雷诺数影响涡轮性能的原因。

1 计算模型及条件

本文计算的涡轮由一级跨音速高压涡轮和两级亚音速低压涡轮组成。叶片排之间采用掺混面模型处理。计算中虽然包括了高压涡轮在内, 但考虑到低雷诺数问题对处于后面级的低压涡轮有着更明显的影响, 因此本文着重研究低雷诺数对低压涡轮的影响。

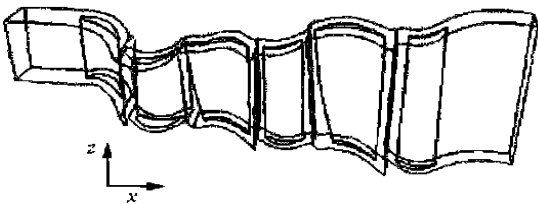


图 1 计算网格示意图

Fig 1 Sketch map of mesh

计算使用 Fluent 软件。计算中求解三维定常的雷诺平均 N-S 方程。数值方法采用耦合显式算法, 质量、动量、能量连续方程均采用二阶迎风差分, 湍流方程采用一阶迎风差分, 并采用多重网格技术加速收敛。本文在计算地面高雷诺数状态时

选取双方程 $k-\epsilon$ 模型和标准壁面函数计算高雷诺数下固壁表面的湍流流动。而在高空低雷诺数状态时, 因为叶片表面可能存在层流及转捩现象, 所以选取双方程 $k-\epsilon$ 模型和双层低雷诺数壁面函数来捕捉转捩位置。

计算网格采用非结构网格, 低压涡轮网格总数为 38 万。计算网格如图 1 所示。为了对叶片表面近壁区流动进行较好的分辨, 在计算低雷诺数状态时采用自适应网格加密固壁附近的网格, 距叶片表面最近网格线的 y^+ 控制在 5 以内。

2 计算结果及分析

2.1 地面状态性能参数计算值与实验值的校合

低压涡轮地面最大状态的性能参数可与试验数据进行比较, 以验证计算的可靠性和准确度。计算结果表明: 折合流量、折合转速、膨胀比、效率计算值与试验值的误差均在 1% 以内。因此, 可认为本计算采用的方法和模型能够在定量的基础上模拟和分析涡轮内部的流动, 计算结果是可信的。

表 1 低压涡轮地面性能参数试验值与计算值的比较

Table 1 Comparison of the experiment and calculate performance of LPT on ground condition

	试验值	计算值
进口折合流量	1 441.3	1 420.1
折合转速	352.5	353.4
总膨胀比	2.16	2.19
总绝热效率	0.885	0.883

2.2 低雷诺数对低压涡轮性能参数的影响

为模拟雷诺数变化对低压涡轮性能参数的影响, 对 4 个不同工作雷诺数进行了计算。其中低压涡轮出口叶片的雷诺数分别是: 1.065×10^5 (对应地面最大工作状态), 5.71×10^4 , 1.76×10^4 , 0.940×10^4 (对应高空巡航状态)。 Re 的定义基于叶片排出口的气动参数和叶片中径的轴向弦长。

图 2 给出了低压涡轮绝热效率随雷诺数变化的曲线。由图可以看出, 随工作雷诺数降低, 效率下降, 而且涡轮效率随雷诺数变化的趋势并不是线性的, 在雷诺数较高的部分 ($Re > 1 \times 10^5$), 效率随雷诺数降低而降低的趋势较缓慢; 但是当雷诺数进一步降低时, 效率下降的趋势急剧加大。这种

情况与公开文献中美国 PW 545、俄罗斯 A 122 高、低压涡轮的效率随雷诺数变化曲线的趋势是相同的。图 3 示出了美国 PW 545 低压涡轮的效率随雷诺数变化曲线^[4]。

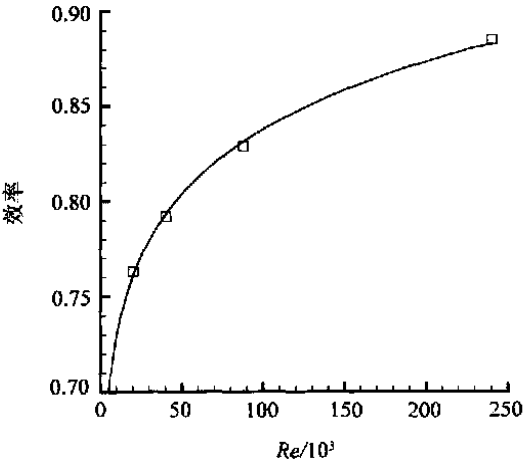


图 2 低压涡轮绝热效率随雷诺数变化曲线
Fig 2 Efficiency vs Re of a LPT

对比图 2 和图 3 可以看出，PW 545 高压涡轮工作的雷诺数变化范围与本文低压涡轮工作的雷诺数变化范围基本相同，但是本文低压涡轮的效率下降比 PW 545 剧烈得多。这说明在考虑雷诺数对涡轮性能影响规律的时候，应该将雷诺数的变化对性能的影响与具体的涡轮设计结合起来，这一点在后来的设计中得到进一步的证实^[5]。由于涡轮叶片表面速度分布对涡轮性能具有非常大的

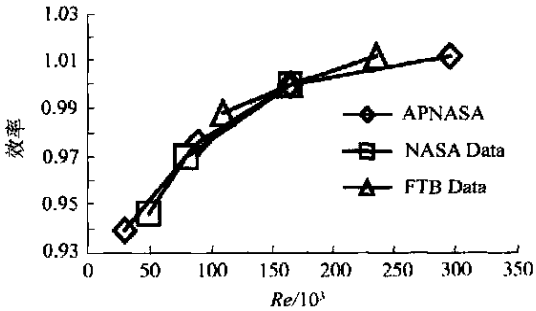


图 3 PW 545 低压涡轮效率随雷诺数的变化曲线^[4]
Fig 3 Normalized Efficiency vs Re of PW 545 LPT

影响，本文将从低雷诺数影响叶片表面速度分布的角度来研究低雷诺数影响涡轮性能的机理。

2 3 低雷诺数对低压涡轮各叶片排表面速度分布的影响

计算结果表明，低压涡轮在低雷诺数情况下的效率比在高雷诺数情况下下降幅度超过 10%，其中最为主要的原因就是低雷诺数的影响。因为计算所用低压涡轮是两级亚音速涡轮，而且叶尖带冠，由于叶尖泄漏和激波引起的损失不大，而叶型和二次流损失有可能为主要损失源。本文对各叶片排表面的速度分布进行了比较，以找出叶型损失和二次流损失在低雷诺数情况下增大的原因。图 4~ 图 7 示出了各排叶片的根、中、尖截面在最大和最小工作雷诺数情况下的马赫数分布。

由图可以看出，低雷诺数情况下各排叶片的

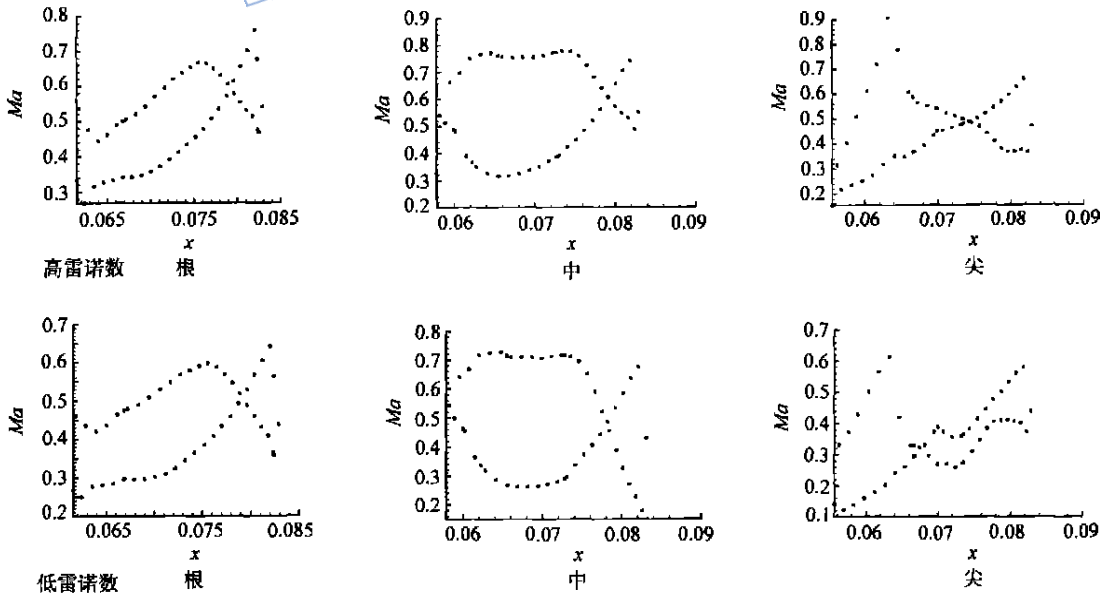


图 4 第一级导叶不同叶高处马赫数分布图
Fig 4 Velocity distribution of the first vane

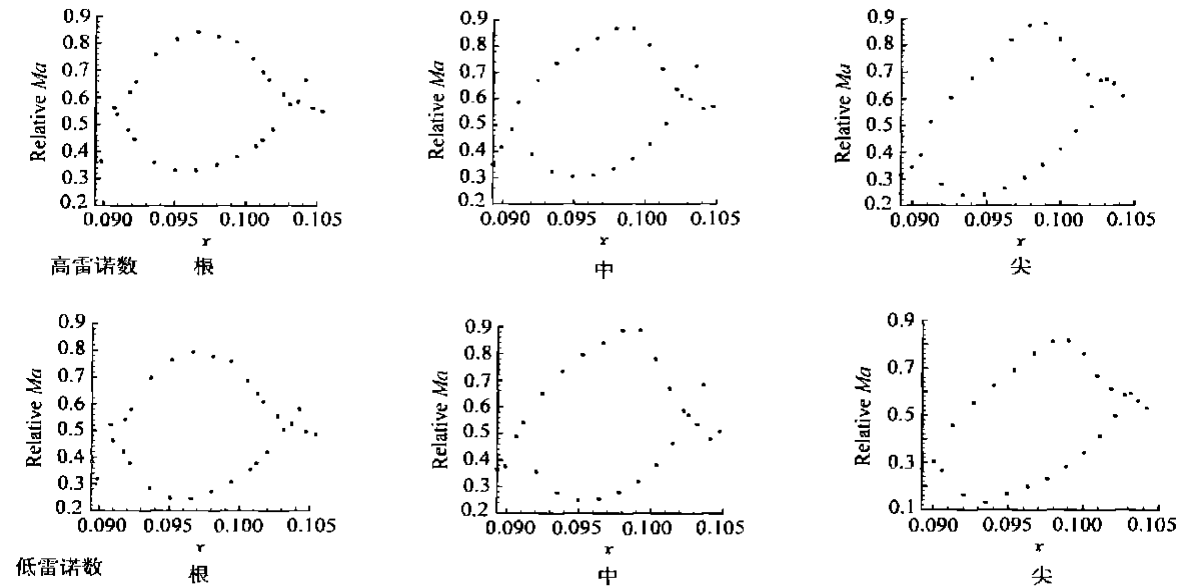


图 5 第一级动叶不同叶高处马赫数分布图

Fig 5 Velocity distribution of the first blade

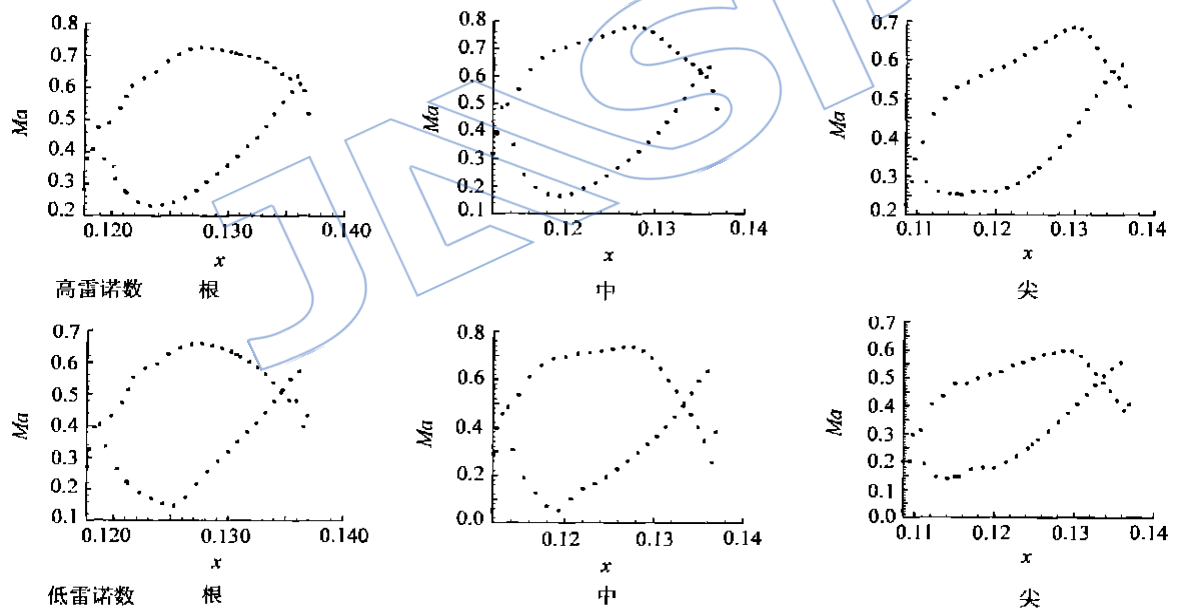


图 6 第二级导叶不同叶高处马赫数分布图

Fig 6 Velocity distribution of the second vane

速度分布都有较明显的变化。这些变化主要表现在: (1) 叶片吸力面出口的扩压梯度明显增大, 有些地方甚至进入了压气机状态。这将带来叶型损失的增大, 同时也加剧了叶片表面附面层分离的危险。在低雷诺数下, 叶片表面存在较长的层流附面层, 它的抗分离能力较弱, 因此在高的扩压梯度情况下很可能分离, 从而带来很大的附面层分离损失。(2) 叶片进口的压力面与吸力面速度差明显

增大。这意味着叶片槽道进口的横向压力梯度增强, 而叶片进口的横向压力梯度是叶片槽道内二次流的主要动力来源, 因此这些变化代表了叶片二次流损失的增大。在较小展弦比低压涡轮中, 二次流损失占叶片损失的 30%~40%, 这也是低雷诺数下涡轮损失明显增大的一个重要方面。(3) 叶片压力面进口的扩压梯度也有所增加, 在低雷诺数下, 叶片表面可能存在分离泡。

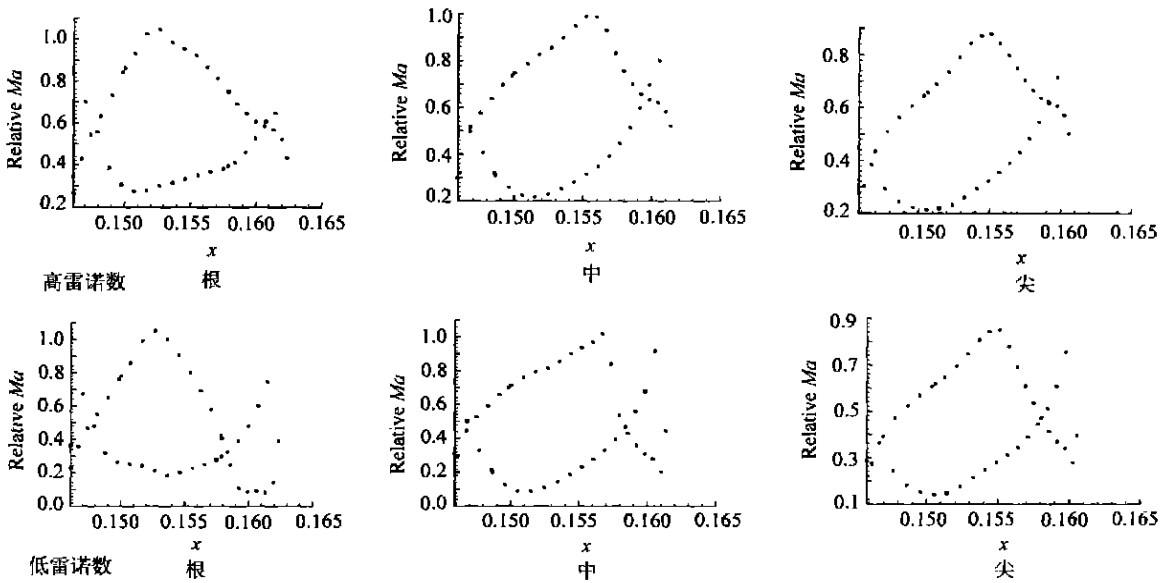


图 7 第二级动叶不同叶高处马赫数分布图

Fig 7 Velocity distribution of the second blade

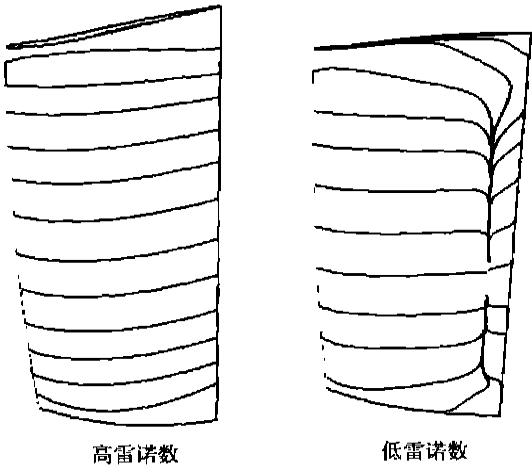


图 8 第二级导叶吸力面极限流线

Fig 8 Extreme stream line on suction surface of the second vane

对比不同雷诺数状态下叶片表面的速度分布变化程度可以看出,低雷诺数问题对叶片表面速度分布的影响主要的表现在于叶片吸力面出口的扩压梯度的增加,这种情况的起因还需要进一步研究,但是可以肯定的是,当原始叶片表面速度分布存在较大的逆压梯度时,在低雷诺数情况下这些逆压梯度将更为加强,逆压梯度的影响范围也同时扩大,结合低雷诺数下叶片表面的层流附面层流动状态,那么大面积分离甚至是开放式分离就很容易发生了。文献[6]对低压涡轮叶栅 T106D-E 1Z 进行了数值模拟,其中给出的叶片表面流动状况及表面速度分布,可以明显地看出低

雷诺数情况下逆压梯度影响范围增大及开放式分离现象的存在。

2.4 低雷诺数对低压涡轮各叶片排三维流场的影响

低雷诺数下低压涡轮各叶片排速度分布表现出进口横向压力梯度增大,压力面进口、吸力面出口扩压梯度增大的现象,这些改变将造成三维流动中的二次流增强和吸力面大面积分离的效果,图 8~图 11 给出了出口级的叶片表面极限流线,清楚地显示这种现象的存在。

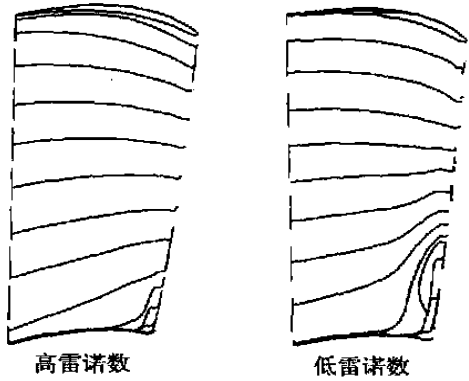


图 9 第二级导叶压力面极限流线

Fig 9 Extreme stream line on pressure surface of the second vane

由图可以看出,低压二级导、动叶在高雷诺数情况下流动较好,但在低雷诺数下叶片吸力面出口段均存在贯穿叶高的开放式分离区,由于二动

叶片表面速度分布出口段扩压梯度在原设计时就比二导的大, 因此在低雷诺数情况下其分离区也相应的更大一些; 另外, 低雷诺数情况下导、动叶的二次流区域明显扩大, 影响明显增强, 在轮毂和

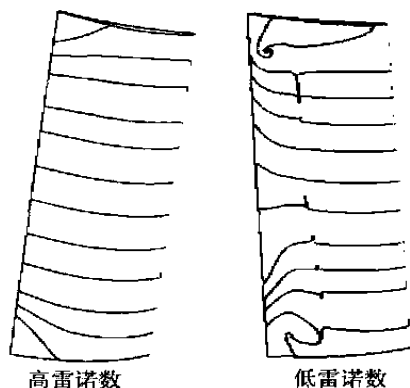


图 10 第二级动叶吸力面极限流线

Fig 10 Extreme stream line on suction surface of the second blade

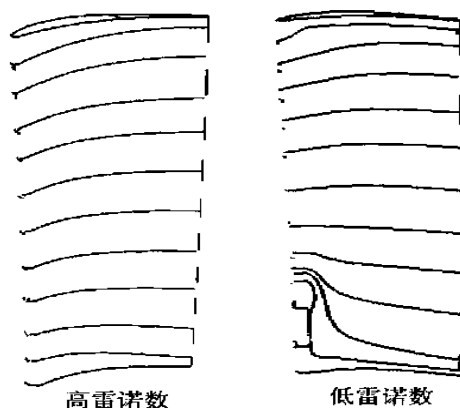


图 11 第二级动叶压力面极限流线

Fig 11 Extreme stream line on pressure surface of the second blade

机匣附近可以清晰看到扩大了二次流区域。这些都明确地表示, 在低雷诺数情况下涡轮流动情况急剧恶化, 从而进一步地证明了涡轮性能参数的下降和叶片表面速度分布分析的正确性。

3 结 论

本文通过三维粘性定常计算分别模拟了不同雷诺数情况下低压涡轮内部的流动状况, 给出了低压涡轮效率随雷诺数降低而变化的曲线, 并通

过对比分析, 初步探讨了低雷诺数影响涡轮性能的原因。可以得出以下结论:

(1) 低压涡轮在低雷诺数下的性能大幅度下降, 并且涡轮效率随雷诺数变化的趋势是非线性的: 在雷诺数较高的部分 ($Re > 1 \times 10^5$), 效率随雷诺数降低而降低的趋势较缓慢, 但当雷诺数进一步降低时, 效率下降幅度急剧加大。

(2) 在考虑雷诺数对涡轮性能影响规律的时候, 应将雷诺数的变化对性能的影响与具体的涡轮设计结合起来, 尤其是叶片表面速度分布的设计对涡轮性能随雷诺数变化的规律具有重大影响。

(3) 低雷诺数情况下低压涡轮各排叶片的速度分布都有较明显的变化。这些变化主要表现在: 叶片吸力面出口的扩压梯度明显增大, 有些地方甚至进入了压气机状态, 叶型损失急剧增大; 叶片进口的压力面与吸力面速度差明显增大, 轮毂和机匣附近二次流区域扩大, 二次流的影响明显增强, 导致二次流损失增大。

(4) 在高高空低雷诺数涡轮流动中, 低雷诺数造成的影响不仅是叶片表面流动呈层流状态, 它同时也扩大了叶片表面速度分布中逆压梯度的强度和影响范围, 这两种因素共同作用形成了高高空低雷诺数下涡轮效率的急剧下降。因此, 进一步深入研究低雷诺数下叶片表面附面层流动状态的变化和叶片表面速度分布形式对低雷诺数涡轮性能的影响十分必要。

参考文献

- [1] 胡晓煜 高高空、长航时无人机动力技术简介[J]. 航空周刊, 2002, 10, 40/41: 19- 20.
- [2] Lake J P, King P I, Rivir R B. Reduction of Separation Losses on a Turbine Blade With Low Reynolds Number[R]. AIAA 99- 0242.
- [3] Hodson H P. Modelling Unsteady Transition and Its Effects on Profile Loss[J]. ASME J. of Turbomachinery, 1990, 112 (4): 691- 701.
- [4] Raymond C, Santo C. An Engine Research Program Focused on Low Pressure Turbine Aerodynamic Performance[R]. ASME GT- 2002- 30004.
- [5] 李维, 邹正平, 赵晓路. 低雷诺数环境中涡轮部件的气动设计[J]. 推进技术, 2004, 24(3): 219- 223.
- [6] 邹正平, 宁方飞, 刘火星, 等. 雷诺数对涡轮叶栅流动的影响[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(2): 216- 219.