

文章编号: 1000-8055(2006)01-0144-06

汽轮机末级三维非定常流动数值模拟

綦 蕾¹, 邹正平¹, 陆宏志², 于尔亮³, 田东强³, 师黎明³

(1 北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083;

2 香港理工大学 机械学系, 香港;

3 北京北重汽轮电机有限责任公司, 北京 100040)

摘要: 采用三维粘性非定常数值模拟方法, 对某汽轮机设计状态末级非定常流动进行了模拟, 并对设计状态下各因素引起末级动叶表面产生非定常力的大小和作用机理进行了分析。结果表明, 本文中的汽轮机末级在设计条件下, 上游静叶尾缘激波和位势场对下游转子的影响比尾迹作用的影响更大, 静叶尾缘激波和位势场导致下游转子叶片表面非定常力大小呈周期性变化; 此外上游静子尾迹以及动叶尾缘出口膨胀波等也是产生转子叶片表面非定常力的因素。

关键词: 航空、航天推进系统; 汽轮机末级; 透平; 非定常流; 数值模拟

中图分类号: V 221

文献标识码: A

Numerical Simulation of the 3-D Unsteady Flow in the Steam Turbine Last Stage

Q I Lei¹, ZOU Zheng-ping¹, LU Hong-zhi², YU Er-liang³,
Tian Dong-qiang³, Shi L i m i n g³

(1 National Key Laboratory on Aero-Engines,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2 Department of Mechanical Engineering,
The Hong Kong Polytechnic University, Hongkong, China;

3 Beijing Beizhong Steam Turbine Generator CO. LTD, Beijing 100040, China)

Abstract: The unsteady flow of the steam turbine at design state was studied by the method of numerical simulation of 3-D viscous flow, and the analyses of unsteady force on the blade surface and the mechanism of action were carried out. The result indicates that at typical design operating conditions in the last stage of the steam turbine investigated here, shock and potential field interaction from upstream blade row is an order of magnitude greater than wake interaction. The shock and potential field interaction effects cause a periodic increase in the strength of the unsteady force acting on the downstream rotor blade surface. In addition, the wake interaction of upstream blade row and the expansion wave at rotor exit also cause an unsteady force acting on the downstream rotor blade surface.

Key words: aerospace propulsion system; the last stage of steam turbine; turbine; unsteady flow; numerical simulation

收稿日期: 2004- 12- 27; **修订日期:** 2005- 03- 28

作者简介: 綦蕾(1981-), 女, 湖南株洲人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院博士生, 主要从事汽轮机内部非定常流动机理的研究

高周疲劳是蒸汽轮机/燃气轮机发生故障的主要原因之一。涡轮叶片产生高周疲劳的主要原因是颤振和强迫振动, 其中强迫振动的主要原因之一是涡轮级内部的强三维非定常粘性流动, 包括上游叶片排的尾迹, 叶片排之间的位势作用等。非定常流动导致叶片表面产生大幅度的非定常力, 当非定常力的频率和叶片的固有频率接近时, 不仅会引发严重的叶片振动, 甚至可能使叶片断裂^[1]。高周疲劳问题在高负荷的汽轮机/燃气轮机中更为突出。因此深入理解涡轮级中非定常力产生的机理对汽轮机以及叶轮机械的发展都具有重要意义。

很多学者已经对涡轮级中引起非定常力各因素的作用机理进行了研究。Dring 等人在 1982 年的研究表明^[2], 当静子和转子之间间距为 15% 平均轴向弦长左右时, 转子前缘的非定常压力脉动可高达相对动压的 80% 左右, 这意味着它在叶片表面会产生大的非定常载荷, 对叶轮机的性能、叶片强度等将会产生大的影响。D éaos 等人研究了跨音涡轮级中转子承受非定常气动力的情况, 结果表明控制涡轮转子表面压力脉动的主要因素为上游静叶尾缘激波引起的强压力梯度, 减少激波强度, 则可以降低叶片表面的压力脉动幅度^[3]。M iller 等人研究了典型设计条件下跨音涡轮级内的非定常流动, 结果显示在典型设计条件下, 上游叶片排出口激波对下游叶片的影响比尾迹作用的影响更大, 上游导叶尾缘激波对下游转子叶片的影响强度呈周期性变化^[4]。

蒸汽轮机在典型设计状态下末级的流动具有超音特性, 导致叶片排之间具有很强的相互作用。上游静子形成的尾缘激波对下游转子前缘产生了很强的非定常压力场, 上游静子尾缘周围的位势场对转子叶片前部也产生了较强的压力脉动。另外, 上游静子的尾迹和转子自身的流动特点都会引起转子叶片表面产生较强的非定常压力脉动。本文研究的目的是了解这些因素引起非定常力的大小, 以及产生非定常力的机理, 从而为在蒸汽轮机和涡轮的气动设计中考虑非定常力的影响提供思路 and 理论依据。

本文通过非定常三维数值模拟手段, 计算了某汽轮机在典型设计状态下末级的非定常流动, 并分析和研究了在此状态下汽轮机末级动叶表面的非定常流动现象及流动机理。

1 数值方法

1.1 计算方法

本文计算中求解非定常雷诺平均 N-S 方程。数值方法空间采用中心差分格式, 时间采用二阶迎风格式, 同时非定常计算中采用了隐式双重时间步法以加速收敛。湍流模型采用 S-A 模型。

1.2 网格设置

为保证网格质量, 计算模型采用 H-O-H 型网格。一个周期通道网格总数约 1100 000, 其中静叶进口段 H 型网格数 $25 \times 33 \times 25$, 环绕静叶叶片 O 型网格数 $21 \times 33 \times 141$; 环绕动叶叶片 O 型网格数 $21 \times 33 \times 161$, 动叶出口段 H 型网格数为 $25 \times 33 \times 49$ 。静叶的 y^+ 约小于 12, 动叶 y^+ 约小于 6。图 1 为计算网格图。

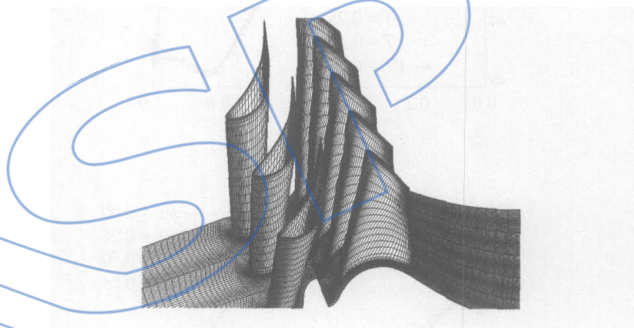


图 1 三维计算网格

Fig 1 Three-dimensional computational grid

1.3 计算参数设定

非定常计算采用 Domain Scaling 方法, 它要求上下游叶片的计算域周向尺寸相等, 为此, 将静叶和动叶数简化为 3:5, 同时为了保证叶片堵塞度一致, 对静子和转子叶片尺寸均按一定比例进行缩放。计算时一个周期内设定 60 个物理时间步。动静叶交界面处信息传递采用插值方法。

在计算中考虑到实际流动的末级进口不是均匀流动, 来流状况与次末级的流动相关, 因此在进口边界条件的处理上计入了次末级流动对末级流动的影响。先进行次末级加末级两级定常计算, 将计算结果得到的次末级出口总温、总压和气流角周向平均值沿展向的分布, 作为非定常计算的进口边界条件。出口背压利用径向平衡原理给定叶中处静压值。

2 结果及分析

计算结果显示, 设计点的流动具有很强的非

定常性,下文将主要针对引起设计点非定常流动的因素进行分析。

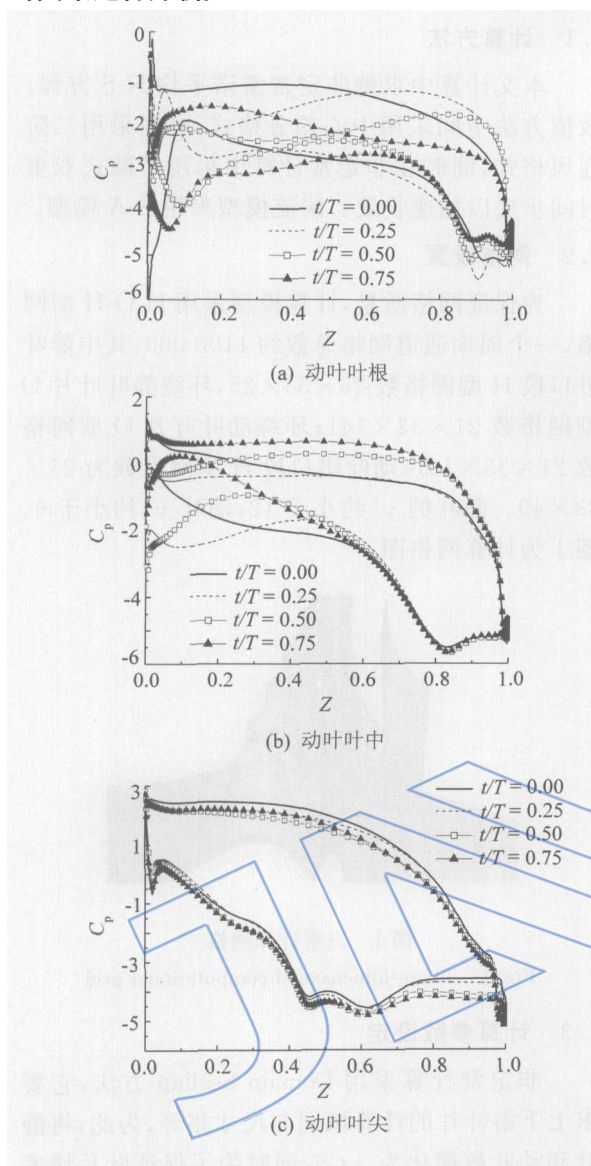


图2 一个周期(T)内动叶表面静压系数分布

Fig. 2 Rotor surface static pressure coefficient distributions over one time period

由于最终希望了解末级动叶受到的非定常力,因此在流场计算结果中最关心的是末级动叶表面的压力分布情况。图2是一个周期内不同时刻末级动叶根、中、尖(分别对应10%, 50%和90%叶高,下同)表面静压系数分布,横轴 Z 表示轴向弦长,纵轴 C_p 表示静压系数,它定义为:

$$C_p = \frac{P - P_{\text{ref}}}{(1/2) \rho_{\text{ref}} W^2}$$

其中: P 为静压, ρ 为密度, W 为相对速度,下标“ref”表示参考值,取叶片进口截面平均值的时间平均。从图中可以看到,在不同时刻动叶根、中、尖

的表面静压分布都有明显的变化,特别是在叶片根部和中部的绝大部分区域静压的变化更为剧烈,表明在设计点末级动叶表面的非定常性较强。叶片表面静压分布的变化将直接影响叶片表面非定常力的分布,包括非定常力的幅值及频率。

图3给出了一个周期内动叶根、中、尖表面压力变化时空图。其中横轴 T 表示静子通过的周期(即相位变化),纵轴 Z 表示动叶的轴向弦长。从图中看出影响末级动叶表面非定常力的因素较多,比较突出的主要有上游静叶尾缘激波和位势场作用,静子尾迹作用,以及转子尾缘出口膨胀波作用等。

2 1 激波和位势场作用

从图3可以看出,静叶根、中部尾缘激波和位势场对动叶表面非定常压力脉动起着主导作用,其绝对幅值明显高于其他影响因素。随着静子和转子周向位置的不断变化,转子叶片表面前缘受到上游静叶尾缘激波以及静叶位势场影响而产生大幅度的压力脉动。从图中观察到,静叶尾缘出口激波的作用范围较小,但是引起的压力脉动相对较大;而静叶周围压力分布造成的位势场作用范围比出口激波的作用范围大,它引起的压力脉动也较大。激波与位势作用存在相位差,这与当地的叶片造型及流动组织有关。

计算结果分析表明在本算例所给定条件下,静叶根、中部尾缘激波和位势场对末级动叶表面的压力脉动起主要作用。这意味着通过合理分布静叶尾缘的负荷,对流场进行良好的组织,能够有效减少由于静子尾缘激波及位势作用对转子的影响,从而达到控制转子根、中部叶片表面非定常力的目的。

2 1 1 静子尾缘激波作用

图4是 $t/T = 0.0$ 时刻末级根、中、尖 S_1 流面相对马赫数分布,从图4(a)和图4(b)中可以明显看到静叶叶根和叶中出口的激波。随着转子和静子周向相对位置的变化,激波首先接触到转子叶片吸力面顶点,之后沿着叶片吸力面向上游移动一直到达叶片的前缘。它的影响可以从图3(a)和图3(b)中观察到,在叶根吸力面 $0 \sim 0.2$ 倍轴向弦长区域以及叶中吸力面 $0 \sim 0.3$ 倍轴向弦长区域存在沿左上角至右下角分布的高压力梯度对角线。从对角线的分布趋势可以判断,这一对角线表示了转子叶片吸力面压力受静叶尾缘激波的影响。

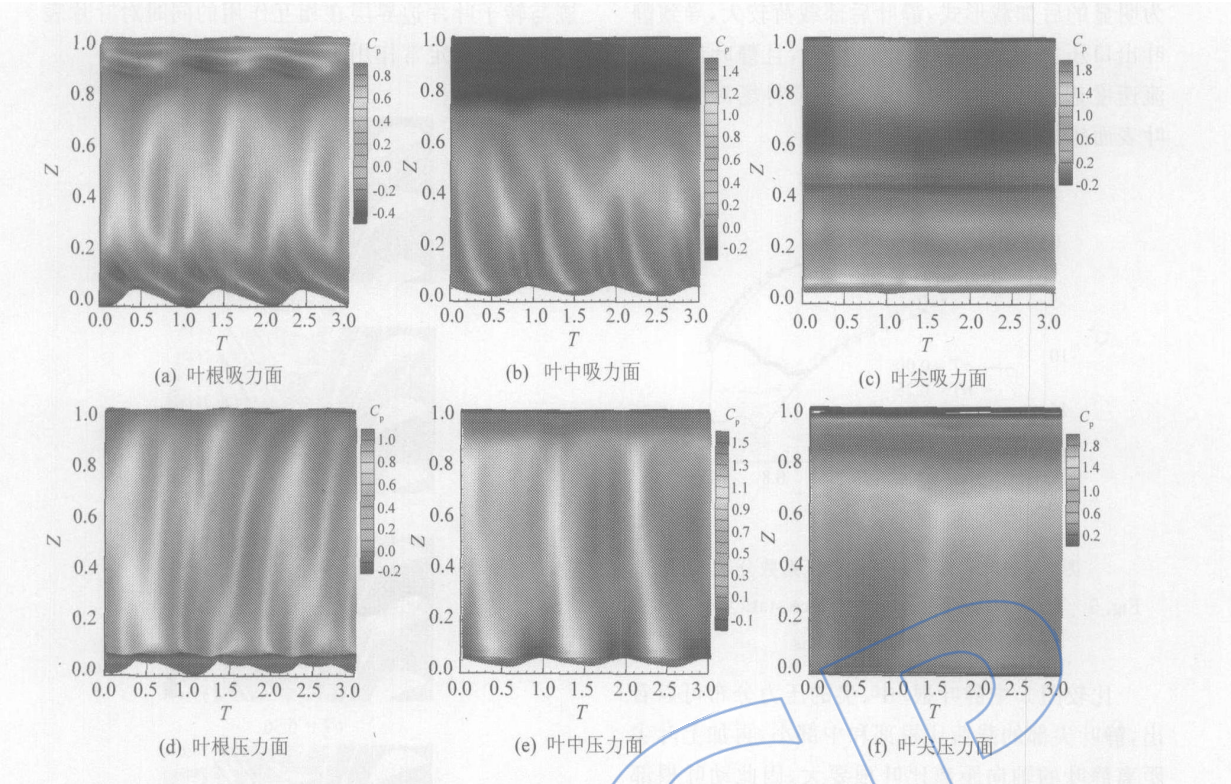


图3 动叶表面静压系数分布

Fig 3 Rotor surface static pressure coefficient distributions

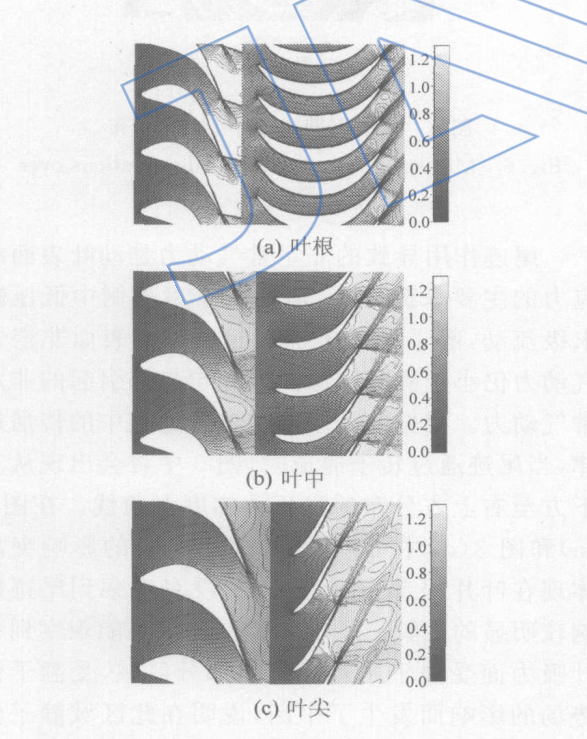


图4 $t/T = 0.0$ 时刻 S_1 流面相对马赫数分布

Fig 4 Blade-to-blade surface relative mach number distributions of $t/T = 0.0$

图3(a)和图3(b)中沿左上角至右下角分布的

高压力梯度对角线说明动叶吸力面根部至中部区域受静叶尾缘激波的影响较大,而在压力面和吸力面叶尖几乎不受静叶尾缘激波的影响,如图3(c)~(f)。静叶尾缘的激波不能直接撞击到动叶压力面上,因此动叶压力面受激波的影响相对较小。吸力面叶尖受激波影响较小,是因为上游静叶尖部比中部和根部做功小,如图5(图中 H 表示叶高),静叶尖部出口处没有产生足够强度的激波(如图4(c)所示),再加上叶尖静叶和动叶之间的轴向距离较大,导致动叶尖部压力没有受到静叶尾缘激波的影响。

2 1 2 静子位势场作用

除了静子尾缘激波对下游转子叶片表面产生的非定常气动力,静叶尾缘位势场也会对下游动叶产生非定常气动力。如图3(a),图中变化趋势与静叶尾缘激波相同(从左上角到右下角分布),而影响贯穿动叶 $0\sim 0.2$ 倍弦长整个周向区域的压力变化就是静叶位势场引起的。位势场的影响范围较大,从图3(a),(b)和(e)都可以观察到压力分布受位势场的影响。上游静叶的位势场影响之所以比较大,可以从图5中静叶表面压力分布来解释,图中显示了静叶根、中、尖时间平均表面静压系数分布。从图中可以看出静叶的负荷形式为明

显的后加载形式,静叶后部载荷较大,导致静叶出口压力沿周向的变化也较大,且静叶出口汽流速度达到超音,因此上游静叶位势场对下游动叶表面压力分布的影响较大。

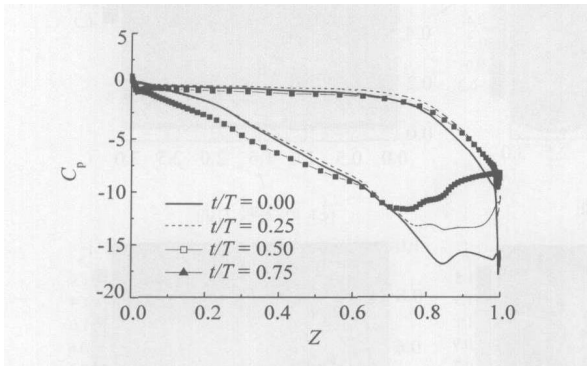


图5 静叶表面时间平均静压系数分布

Fig. 5 Time average of stator surface static pressure coefficient distributions

比较图5中静叶根、中、尖的压力分布可以看出,静叶尖部的载荷比根部和中部小,再加上叶尖距离静叶的轴向距离比叶根要大,因此动叶根部和中部受静叶位势场影响较大,而尖部几乎看不到静叶位势场的影响。

2.2 静子尾迹作用

熵分布可以间接表示流场中损失的大小和分布情况。图6为一个周期内不同时刻叶中熵分布,从图中可以看出损失较大的区域主要分布在动、静叶片吸力面尾缘边界层以及叶片下游出口尾迹区域。上游静子尾迹通过下游转子时与转子叶片相互作用,并产生非定常力,它是非定常流动现象的重要来源之一。并且尾迹向下游传播的距离比位势作用传播的距离要大,可以影响到下游几个弦长区域。

从图6可以观察到静子尾迹在下游转子通道中的演化和发展,以及尾迹流与叶片边界层的相互作用。在进入转子通道前,静子尾迹的分布比较集中,没有明显的扩散,而进入转子通道后,尾迹逐渐被转子叶片的前缘分割,并与叶片表面边界层相互作用,在叶片表面产生高熵增区域,造成边界层的损失增加。通道中间的尾迹则与转子通道中的主流发生掺混,尾迹中的高损失涡团破碎扩散,高损失区的范围扩大,强度减小,这种影响一直发展到下游动叶出口。尾迹在通道内运动时会产生一对方向相反的二次环流,并使得尾迹下游区域吸力面的速度增加,静压减小,而尾迹上游区域吸力面的速度减小,静压增加^[5]。这使得静子尾

迹与转子叶片边界层在相互作用的同时对叶片表面产生了非定常作用力。

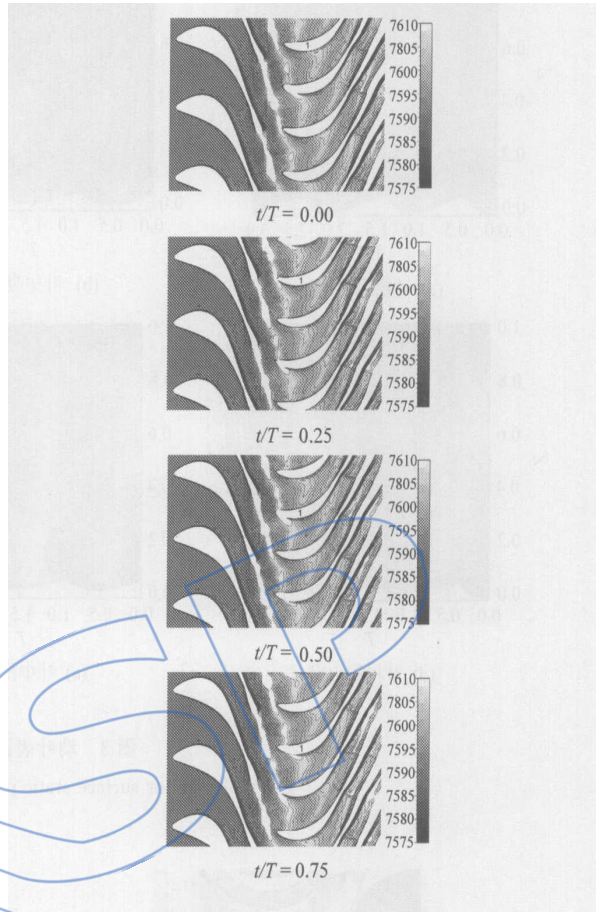


图6 一个周期(T)内叶中熵分布

Fig. 6 Mid-span surface entropy distributions over one time period

尾迹作用导致的非定常气动力是动叶表面动应力的主要来源之一,但是对于本算例中低压缸末级流动,静子尾迹干扰引起的动叶表面非定常气动力仍小于静叶尾缘激波和位势场引起的非定常气动力。根据静子尾迹在转子通道中的传播规律,当尾迹通过转子通道时,图3中将会出现从左下方至右上方分布的高压力梯度对角线。在图3(a)和图3(d)中可以看到,尾迹作用的影响突出体现在叶片根部,在叶片中部没有观察到尾迹影响较明显的区域。另外在图3(a)中还能观察到动叶吸力面受静子尾迹影响的部分区域,受静子位势场的影响而发生了中断,说明在此区域静子位势场的影响强于静子尾迹作用。综上所述,在动叶根部中间区域对叶片表面非定常气动力起主要作用的因素是静子尾迹,而在动叶根部前缘和叶中大部分区域位势作用对非定常气动力的贡献更大,尾迹作用相对较弱。

2.3 转子通道喉部膨胀波作用

汽流在涡轮叶栅通道中是膨胀加速流动的, 加速到一定程度在叶片喉部会产生一道膨胀波, 汽流经过膨胀波时相对马赫数增加, 静压减小。图 3(a) 显示在动叶吸力面尾缘处(约 0.8 倍轴向弦长之后区域)压力分布有一定脉动。对应图 4(a) $t/T = 0.0$ 时刻叶根相对马赫数分布可以发现, 此处有较明显的膨胀波。从图 2(a) 动叶叶根表面压力系数分布能看到, 动叶吸力面尾缘处受膨胀波影响压力分布有小的凹坑, 且在不同时刻随动静之间相对位置的改变而上下波动, 对动叶吸力面尾缘也能产生一定的非定常气动力。

2.4 动叶表面脉动压力分布

图 7 为末级动叶表面静压系数脉动值的均方根分布, 对压力脉动均方根的定义为:

$$\overline{C_p'} = \sqrt{\frac{1}{60} \sum_{i=1}^{60} (C_{p,i} - C_{p,ave})^2}$$

其中下标“i”表示各瞬时刻的压力, “ave”表示时间平均压力。两幅图间接表示了动叶表面非定常压力的分布规律。从图中可以看出, 从叶根到约 70% 叶高之间动叶吸力面前缘处压力脉动相对较大, 说明这部分区域叶片表面的非定常力较大。此

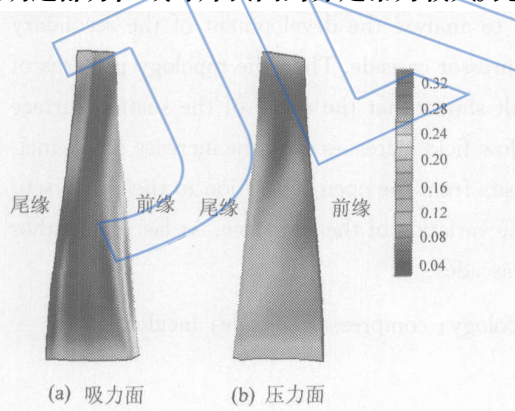


图 7 动叶表面静压系数脉动均方根分布

Fig. 7 RMS distributions of rotor surface static pressure coefficient

外在叶片中部以下动叶压力面绝大部分区域, 动叶吸力面根部, 还有动叶吸力面尾缘处都有较大的压力脉动值, 说明这些区域都存在较大的非定常力。这些都与前面的分析相符。

3 结 论

(1) 对某汽轮机末级三维非定常数值模拟结

果的分析发现, 在设计工况下, 转/静子之间的非定常相互作用比较强烈, 此时非定常气动力对叶片所受动应力的影响不可忽视。

(2) 对本算例计算结果的分析发现, 在设计点的流动中, 对动叶表面非定常力影响最大的因素是静叶尾缘激波和静叶位势场的影响, 它们对下游转子叶片表面产生了强烈的压力脉动, 是产生动叶表面非定常力最主要的原因。

(3) 静叶出口尾迹作用主要造成动叶根部吸力面和压力面的压力脉动, 它也是本算例中影响动叶表面非定常力大小的主要因素之一, 相比较而言对非定常力的影响没有静叶尾缘激波和位势场的影响强烈。

(4) 在设计点, 由于汽流在通道中膨胀加速程度较大, 在动叶尾缘喉部产生了膨胀波, 膨胀波对动叶吸力面尾缘的压力分布有一定影响, 它也是产生动叶表面非定常力的因素之一。

(5) 通过分析设计工况动叶表面压力脉动的均方根分布发现, 动叶表面压力脉动值较大的区域集中在叶片根部至 70% 叶高之间的动叶吸力面前缘, 这些区域受非定常力的影响最大; 叶片中部以下动叶压力面绝大部分区域, 动叶吸力面根部, 还有动叶吸力面尾缘处也较大的压力脉动分布, 这些区域受非定常力的影响也不可忽视。

参考文献

- [1] 陈懋章. 风扇/压气机技术发展和对今后工作的建议[J]. 航空动力学报, 2002, 17(1): 1~15.
CHEN Mao-zhang. Development of Fan/Compressor Techniques and Suggestions on Further Researches[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2002, 17(1): 1~15.
- [2] Dring R P, Joslyn H D, Hardin L W, Wagner J H. Turbine Rotor-Stator Interaction[R]. *ASME 82- GT- 3*, 1982.
- [3] D'Ás R, Arts T, Paniagua G, Michelassi V, Martelli F. Investigation of the Unsteady Rotor Aerodynamics in a Transonic Turbine Stage[R]. *ASME 2000- GT- 0435*, 2000.
- [4] Miller R J, Moss R W, Ainsworth R W. Wake, Shock and Potential Field Interactions in a 1.5 Stage Turbine: Part I: Vane-Rotor and Rotor-Vane Interaction[R]. *ASME 2002- GT- 30435*, 2000.
- [5] Hodson H P, Dawes W N. On the Interpretation of Measured Profile Losses in Unsteady Wake-Turbine Blade Interaction Studies[R]. *ASME 96- GT- 494*, 1996.