

文章编号: 1000-8055(2010)04-0891-06

1.5 级跨声压气机中时序效应的研究

任晓栋, 顾春伟

(清华大学 机械工程学院 热能工程系 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 以在建中的 1.5 级跨声压气机试验台所使用的压气机为研究对象, 利用计算流体力学方法对其内部时序效应进行了研究. 研究表明: 静叶尾迹与出口导叶边界层中低能流体发生掺混时, 掺混损失小, 压气机效率高; 静叶尾迹与出口导叶主流区中的高能流体掺混时, 掺混损失大, 压气机效率低, 且最高效率与最低效率相差约 0.4%; 入口导叶与静叶间时序效应不明显. 此外, 得出了静叶-出口导叶轴向间隙与静叶-出口导叶间最佳时序位置的关系曲线.

关 键 词: 跨声压气机; 时序效应; 非定常; 尾迹; 掺混

中图分类号: V231.3; O357.1

文献标识码: A

Investigation on clocking effect of 1.5-stage transonic compressor

REN Xiao-dong, GU Chun-wei

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education,
Department of Thermal Engineering, School of Mechanical Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The clocking effect in the 1.5-stage compressor, which would be used in the 1.5-stage transonic compressor test rig, was investigated by computational fluid dynamics (CFD) method in this paper. The results show that: (1) The compressor efficiency is high and mixing loss is low when the stator wake is mixed with the outlet guide vane (OGV) boundary-layer fluid. (2) The compressor efficiency is low and mixing loss is high when the stator wake is mixed with the OGV main flow area fluid. (3) The highest efficiency is 0.4% higher than the lowest efficiency. (4) The inlet guide vane (IGV)-stator clocking effect can be neglected, just leading to 0.025% improvement of compressor efficiency. Besides, the optimal clocking position versus the stator-OGV axial clearance plot was got.

Key words: transonic compressor; clocking effect; unsteady; wake; mixing

为了进一步提高燃气轮机的性能, 国内外学者已经开始对燃气轮机内的非定常现象进行研究, 时序效应就是这些现象中的一种. 所谓时序效应是指叶轮机机械内, 同名叶栅(动叶与动叶或静叶与静叶)间周向相对位置的改变引起其性能(效率和动载荷等)改变的现象. 早在上世纪 70 年代, Walker^[1]就发现, 时序效应可以用来降低叶轮机机械内非定常现象引起的噪声. 到上世纪 80 年代中后期, 时序效应对叶轮机机械性能的影响开始受到

关注. 到目前为止, 国内外已有很多学者对时序效应进行了研究, 例如 Dorney 和 Sharma^[2], Huber^[3], He 和 Chen^[4]、侯安平^[5]对透平中的时序效应进行了研究, Walker^[1], Dorney^[6-8], Barankiewicz^[9]以及陈浮等人^[10-11]对压气机内的时序效应进行了研究. 大部分研究均表明: 当前一排叶片尾迹恰好撞在下一排叶片头缘上时, 效率最高, 当前一排叶片尾迹通过下一排叶片流道中部时, 效率最低.

收稿日期: 2009-04-01; 修订日期: 2009-06-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2007CB210105)

作者简介: 任晓栋(1985-), 男, 山西太原人, 博士生, 主要研究方向为叶轮机机械气动热力学.

此外,从以往的研究中可以发现,时序效应对透平效率的提升效果显著,而对压气机却成效甚微.这主要是由于:

- 1) 压气机中同名叶片排间隔排列(例如相邻静叶排被一排动叶隔开),当前一叶片排的尾迹经过异名叶片排作用后,强度有所降低;
- 2) 压气机中流动为逆压流动,前一排叶片尾迹在异名叶栅中的掺混强度很强,使得该尾迹与后一同名叶栅中的掺混损失随时序位置的变化很小,时序效应不显著;
- 3) 为了缓解压气机中由于逆压流动导致的失速喘振等不稳定现象的发生,压气机中各叶片排常布置不同的叶片数,致使前一叶片排部分尾迹必定与后一叶片排主流区发生掺混,掺混损失随时序位置的变化不大,时序效应不显著.

但是,在低负荷民用压气机(如 F 级燃气轮机采用的压气机)的设计中,为了使压气机出口气流接近轴向出气,常采用在压气机末级后安装一排或两排出口导叶(如图 1),且出口导叶叶片数与末级静叶叶片数相同.在这种情况下,静叶与出口导叶间的时序效应应比较显著,可以为将来 F 级民用燃机中压气机效率的进一步提高提供一种途径.

本文以 1.5 级跨声压气机为研究对象,主要对相邻排列的三维静叶和出口导叶间的时序效应进行了研究,并发现利用静叶和出口导叶间的时序效应能使压气机的效率提高约 0.4%.此外,也对入口导叶-静叶间的时序效应和静叶-出口导叶轴向间隙对最佳时序位置的影响进行了研究,并得出了相应的结论.

1 研究对象

本文的研究对象为清华大学在建中的 1.5 级跨声压气机试验台所采用的 1.5 级跨声压气机,该压气机除了包括入口导叶、动叶和静叶之外,还包括一排出口导叶,且其叶片数与静叶相同,图 1 给出了该压气机的子午流道图.

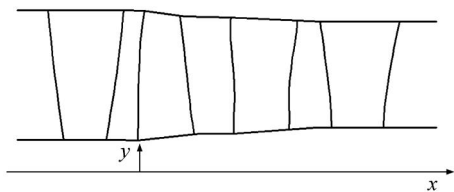


图 1 压气机子午流道图
Fig. 1 Flow path of 1.5-stage transonic compressor

2 研究方法

2.1 数值模拟软件及相关设置

尾迹掺混损失的变化是引起时序效应的主要原因之一,为了能够较好的捕获压气机中的尾迹,本文采用非定常方法对 1.5 级跨声压气机的时序效应进行研究,计算软件为 NUMECA. 流场求解采用雷诺时均 Navier-Stokes (N-S) 方程,Spalart-Allmaras (S-A) 湍流模型,显式龙格-库塔时间推进和双时间步长.对控制方程的离散采用二阶对称 TVD (total variation diminishing) 迎风格式.为了加快计算速度,计算采用了多重网格技术、当地时间步长和隐式残差光顺等方法.计算中,每一周期内取 20 个物理时间步,每个物理时间步内取 100 步虚拟时间步.

2.2 边界条件设置及网格划分

入口给定总压 101325 Pa,总温 288 K,轴向进气;出口给定轮毂处静压 111460 Pa,其他位置的处静压采用径向平衡方程给出;动静交界面采用滑移平面.

图 2 给出了各排叶片的整体网格图.网格类型为 H-O 型结构化网格,其中进出口延伸段采用 H 型网格划分,各排叶片的流道采用 O 型网格划分,表 1 给出了各部分相应的网格数.

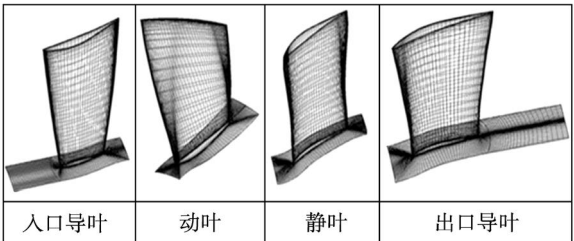


图 2 计算网格
Fig. 2 Computational grid

表 1 网格数量
Table 1 Number of grid

网格块	总数量	网格块	总数量
入口段	92 169	静叶流道	393 525
入口导叶流道	357 357	出口导叶流道	334 125
动叶流道	525 393	出口段	68 625

3 结果分析

3.1 静叶-出口导叶时序效应

为了研究静叶-出口导叶间时序效应,首先固定入口导叶和静叶的周向位置,然后改变出口导叶周向相对位置.图 3 给出了 50 %叶高处,出口导叶的时序位置示意图,表 2 给出了相应位置周向转过的角度(取位置 1 为 0°).

通过非定常计算,得出了效率与静叶-出口导叶间时序位置的关系曲线,如图 4 所示;从图中可以看出,静叶-出口导叶时序效应明显,可以使效率提升约 0.4 %,且在位置 2,3 和 4 处效率较高,

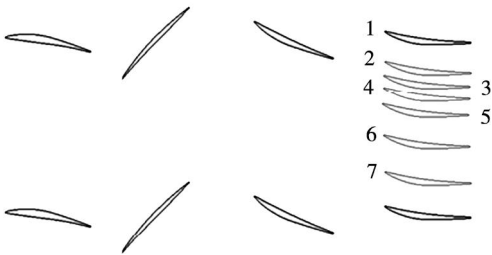


图 3 静叶与出口导叶时序位置示意图

Fig. 3 Sketch of the stator-OGV clocking position

表 2 出口导叶各位置对应的转角

Table 2 Outlet guide vane (OGV) rotational angle of each clocking position

时序位置	转角/ (°)	时序位置	转角/ (°)
1	0	5	6.26
2	3.13	6	9.39
3	3.83	7	12.52
4	4.53		

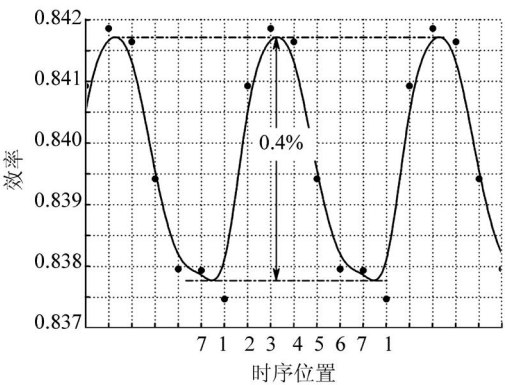


图 4 效率与静叶-出口导叶时序位置关系曲线

Fig. 4 Compressor efficiency versus stator-OGV clocking position

在位置 1,6 和 7 处效率较低.图 5 给出了,第一时刻 50 %叶高截面上的即时熵云图,可以看出,在时序位置 3(效率较高点)处,静叶尾迹和出口导叶边界层和尾迹中的低能流体掺混,在时序位置 1(效率较低点)处,静叶尾迹与出口导叶主流区的高能流体掺混.

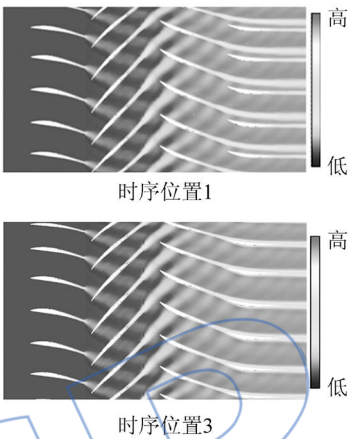


图 5 50 %叶高处熵分布图

Fig. 5 Entropy distribution at 50 % span

由于该压气机的叶片在径向存在少许的扭转和弯曲,所以某一叶高截面上的静叶尾迹分布并不能反映出整个叶高上的静叶尾迹分布情况.为了进一步了解静尾迹在径向上的详细分布情况,图 6 给出了第一时刻,出口导叶入口、50 %弦长和

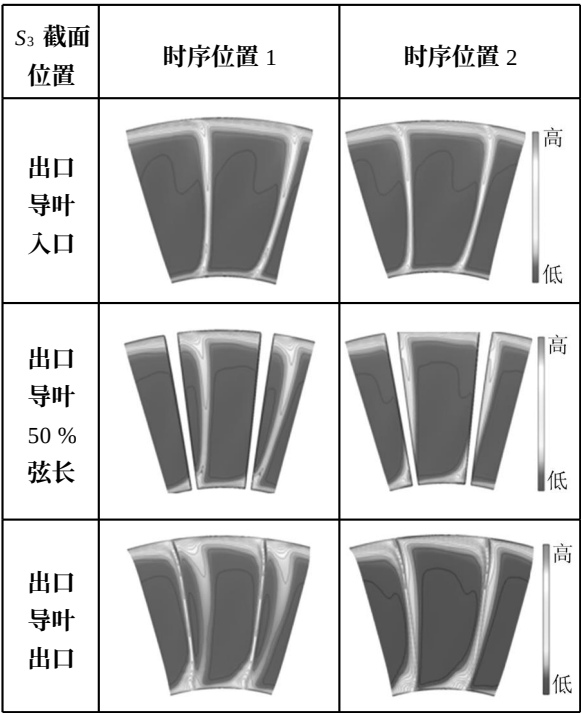


图 6 不同 S₃ 截面上的熵分布

Fig. 6 Entropy distribution at different S₃ stream surfaces

出口 3 个 S_3 截面上的即时熵分布图. 可以看出, 在效率较高位置 2 处, 静叶尾迹在部分叶高上与出口导叶边界层和尾迹掺混, 而在效率较低位置 1 处, 静叶尾迹在绝大部分叶高上均与出口导叶主流区掺混.

图 7 给出了时序位置 2、3 和 4 对应的出口导叶出口 S_3 截面的熵分布图. 可以看出, 时序位置 3 (效率最高位置) 对应的静叶尾迹在整个叶高上均与出口导叶尾迹中低能流体掺混, 而时序位置 2 和 4 对应的静叶尾迹在部分叶高处 (图中用圆标出) 并没有与出口导叶尾迹中的低能流体掺混.

设尾迹中的流体平均流速为 u_1 , 质量为 m_1 , 与其掺混的流体平均流速为 u_2 , 质量为 m_2 , 由动量守恒可得掺混后的流体平均流速为

$$m_1 + m_2 \ u = m_1 u_1 + m_2 u_2 \tag{1}$$

掺混造成的动能损失为

$$\Delta E = \frac{1}{2} [m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2 - (m_1 + m_2) u^2] = \frac{m_1 m_2}{2 (m_1 + m_2)} (u_1 - u_2)^2 \tag{2}$$

从式 (2) 可知, 与尾迹掺混的流体速度和尾迹中流体的速度相差越大, 掺混损失越大, 压气机效率越低.

由于 $|u_m - u_w| > |u_b - u_w|$, 所以尾迹与边界层中流体发生掺混带来的损失要低于尾迹与主流区掺混带来的损失.

综上, 可以得出以下结论:

- 1) 当静叶尾迹与出口导叶流道中低能流体 (边界层和尾迹) 掺混时, 掺混损失小, 效率较高;
- 2) 在整个叶高上, 静叶尾迹与出口导叶流道中低能流体掺混部分越多, 效率越高;
- 3) 当静叶尾迹与出口导叶流道中的高能流体 (主流区) 掺混时, 掺混损失较大, 效率较低;
- 4) 在整个叶高上, 静叶尾迹与出口导叶流道中高能流体掺混部分越多, 效率越低.

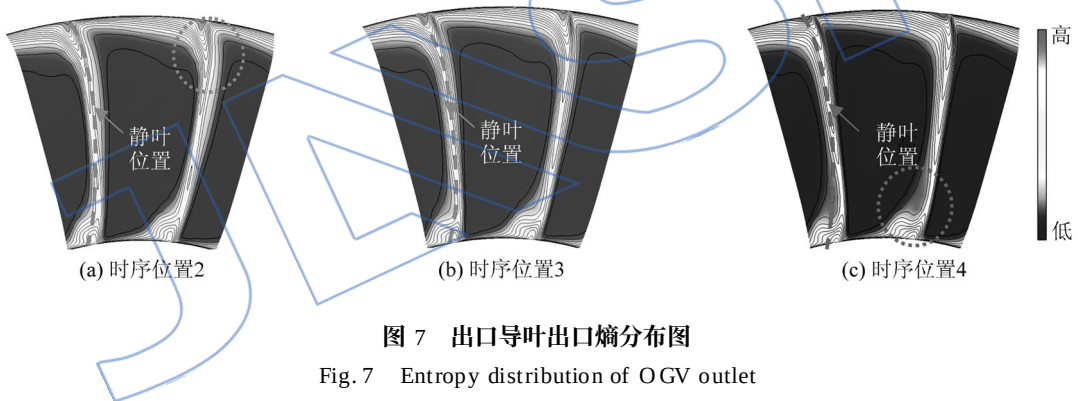


图 7 出口导叶出口熵分布图
Fig. 7 Entropy distribution of OGV outlet

3.2 静叶-出口导叶轴向间隙对最佳时序位置的影响

3.1 节结论是在固定静叶和出口导叶轴向间隙不变的情况下得出的, 为了研究静叶和出口导叶轴向间隙对最佳时序位置的影响, 本文取两种间隙进行研究, 如图 8. 在研究中, 定义静叶和出口导叶相对轴向间隙为

$$\delta = \frac{\delta}{L} \tag{3}$$

静叶和出口导叶相对周向位置为

$$\bar{d} = \frac{d}{L} \tag{4}$$

其中 L 为出口导叶 50 % 叶高处弦长在轴向方向上的投影长度; δ 为静叶与出口导叶 50 % 叶高处

的实际间隙大小, 如图 8; d 为 50 % 叶高处, 静叶尾缘和出口导叶头缘间平面距离, 如图 9.

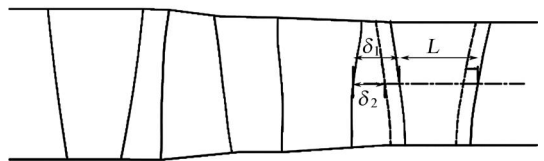


图 8 轴向间隙变化示意图
Fig. 8 Sketch of the axial clearance change

通过非定常计算得出了如图 10 的关系曲线, 其中圆点标志曲线为效率与相对轴向间隙间的关系曲线, 三角形标志曲线为相对周向位置与相对轴向间隙间的关系曲线. 从图中可以看到, 轴向间

隙减小后,最佳效率有所提高,这是由于间隙减小,间隙内的损失减小造成的;且随着静叶和出口导叶相对轴向间隙减小,静叶和出口导叶相对周向位置增大,这一曲线组可以为将来静叶和出口导叶轴向间隙变化后,最佳时序位置的确定提供理论依据。



图9 50%叶高处静叶和出口导叶周向相对位置

Fig.9 Relative circumferential position of stator and OGV at 50% span

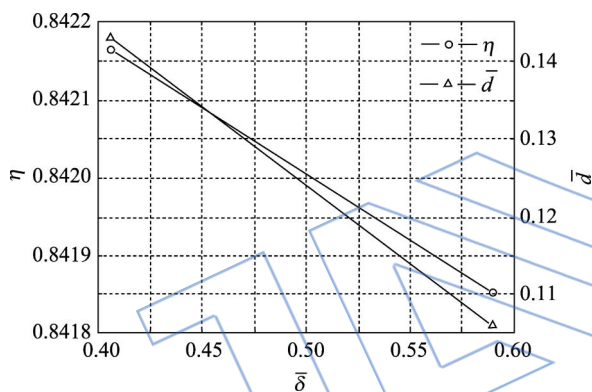


图10 最佳时序位置随轴向间隙变化曲线

Fig.10 Optimal timing position versus axial clearance

3.3 入口导叶-静叶时序效应

在入口导叶-静叶时序效应研究中,根据3.1小节的结论,取了两个典型的时序位置3_1和3_2分别对应效率较高点和效率较低点,且固定静叶与出口导叶处于最佳时序位置3。图11给出了50%叶高处,这两个时序位置的示意图(根据前面计算所得的熵分布图给出了预测的入口导叶尾迹的分布)。通过计算,得出了效率随入口导叶和静叶间时序位置变化的曲线,如图12。可以看出,入口导叶和静叶间的时序效应并不明显,仅使效率变化0.025‰。这是由于入口导叶的尾迹经过动叶的切割、掺混后强度已经降到很低,使入口导叶尾迹在静叶中的掺混损失降低,时序效应不明显。

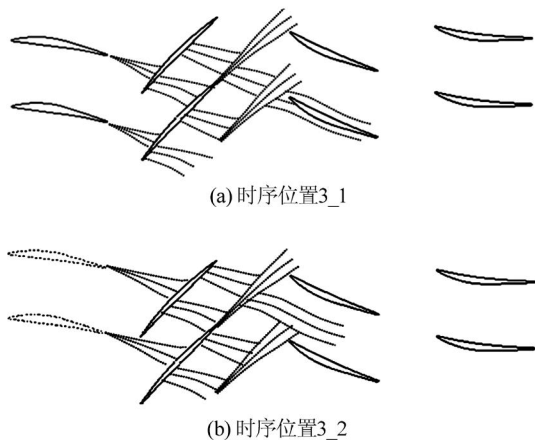


图11 入口导叶和静叶时序位置示意图

Fig.11 Sketch of IGV-stator timing position

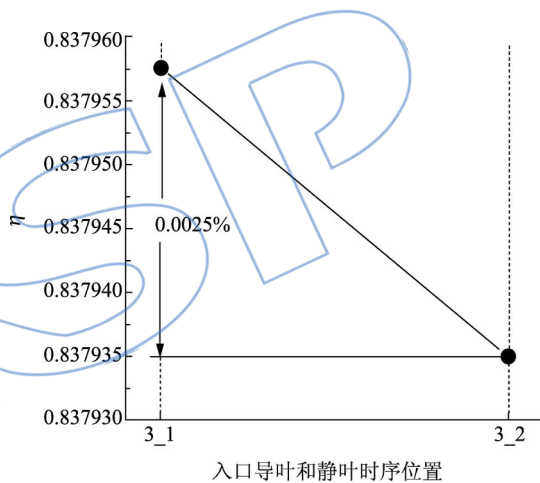


图12 效率与入口导叶-静叶时序位置关系曲线

Fig.12 Compressor efficiency versus IGV-stator timing position

4 结 论

本文研究了1.5级压气机的时序效应。研究表明:

- 1) 静叶与出口导叶间的时序效应效果明显。当静叶尾迹与出口导叶低能流体(边界层和尾迹)掺混时,掺混损失小,效率较高;当静叶尾迹与出口导叶高能流体(主流区)掺混时,掺混损失较大,效率较低。当出口导叶处于时序位置3时,静叶尾迹与出口导叶边界层和尾迹掺混,压气机效率最高,比最低效率提高约0.4%。
- 2) 入口导叶与静叶间的时序效应效果不明显,仅能使效率提高约0.025‰,可以忽略。
- 3) 静叶和出口导叶轴向间隙适当减小,可以使压气机最佳时序位置的最佳效率进一步增大。

且间隙变化会使最佳时序位置发生变化,本文得出了间隙与最佳时序位置间的变化曲线.

参考文献:

- [1] Walker G J, Hughes J D, Kohler I, et al. The influence of wake-wake interactions on loss fluctuations of a down-stream axial compressor blade row[R]. ASME Paper 97-GT-469, 1997.
- [2] Dorney D J, Sharma O P. A study of turbine performance increases through airfoil clocking[R]. AIAA Paper 96-2816, 1966.
- [3] Huber F W, Johnson P D, Sharma O P, et al. Performance improvement through indexing of turbine airfoils: Part I—Experimental investigation[R]. ASME Paper No. 95-GT-27, 1995.
- [4] He L I, Chen T. Analysis of rotor-rotor and stator-stator interferences in multi-stage turbomachine[R]. ASME Paper 2002-GT-30355, 2002.
- [5] 侯安平, 周盛. 轴流式叶轮机时序效应的机理探讨[J]. 航空动力学报, 2003, 18(1): 70-75.
HOU Anping, ZHOU Sheng. Probe into the mechanism of clocking effect in turbomachinery[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(1): 70-75. (in Chinese)
- [6] Dorney D J, Sharma O P, Gundy-Burlet K L. Physics of airfoil clocking in a high-speed axial compressor[R]. ASME Paper 98-GT-82, 1998.
- [7] Dorney D J, Sondak D L, Cizmas P G A, et al. Full-annulus simulations of airfoil clocking in a 1-1/2 stage axial compressor[J]. International Journal of Turbo and Jet Engines, 1999, 16(3): 149-160.
- [8] Gundy-Burlet K L, Dorney D J. Investigation of airfoil clocking and inter-blade row gaps in axial compressors[R]. AIAA 97-3008, 1997.
- [9] Barankiewicz W S, Hathaway M D. Effects of stator indexing on performance in a low speed multistage axial compressor[R]. ASME Paper 97-GT-496, 1977.
- [10] 陈浮, 陆华伟, 顾中华, 等. 轴向间隙对压气机时序效应影响之一: 总体性能[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(2): 232-234.
CHEN Fu, LU Huawei, GU Zhonghua, et al. Clocking effect of compressor with different axial vaps: Part I—Overall performance[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(2): 232-234. (in Chinese)
- [11] 陈浮, 陆华伟, 顾中华, 等. 轴向间隙对压气机时序效应影响之二: 截面特性[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(5): 769-771.
CHEN Fu, LU Huawei, GU Zhonghua, et al. Clocking effect of compressor with different axial vaps: Part II—Traverse measurement results[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(2): 769-771. (in Chinese)