



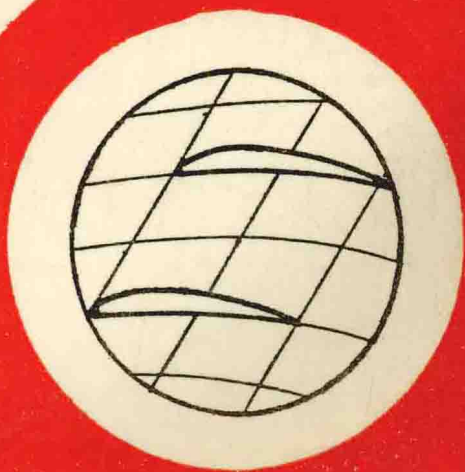
中国工程热物理学会

热机气动热力学学术会议

论文集

一九九三

庐山



目 录

I. 无粘 二维 三维流动	
离心压气机转子内部流场 S_1 / S_2 全三元迭代解	
(一)Krain 离心叶轮 S_1 / S_2 全三元迭代解	赵晓路 I-1-6
离心压气机转子内部流场 S_1 / S_2 全三元迭代解	
(二)Krain 离心叶轮全三元迭代解与准三元解及激光测量的比较	
.....	赵晓路 I-7-8
透平级组的完全三元流场计算	黄典贵 蒋滋康 I-15-6
NND 格式在有激波跨声速平面叶栅流场数值求解中的应用	
.....	赵育 汪庆桓 高居礼 I-21-13
叶片的周向弯曲与弦向弯曲及数值分析	
.....	顾发华 王仲奇 杨弘 冯国泰 I-34-6
用隐式格式计算长尾喷管跨音速流场	严红 何洪庆 I-40-5
用中心流线法设计离心压气机的回流器和扩压器	
.....	李京平 华耀南 I-45-6
具有分流叶片的离心式压气机 S_1 流场计算	
.....	李磊 华耀南 I-51-6
离心压气机叶轮流场的 S_1 / S_2 准三元解的分析	
.....	华耀南 饶江 李京平 I-57-8
高压比跨音速离心压气机的准三元流场分析	饶江 华耀南 I-65-6
II. 有粘 二维 三维流动	
使用非正交曲线坐标下 N-S 方程的叶栅粘性流动数值分析	
.....	王正明 II-1-6
小流量系数离心式窄叶轮的內流特性及粘性反问题通流计算	
.....	汪庆桓 喻达之 汤育红 II-7-10
考虑冷气掺混的边界层计算方法	杨弘 王仲奇 冯国泰 II-17-6
透平叶栅內三维旋涡流动的数值模拟	李春 冯国泰 王仲奇 II-23-6
基于扩散速度方法粘性流场的离散涡数值模拟	
.....	吴文权 李春 卜千里 II-29-6

高分辨率 TVD 格式用于可压粘性内流的数值模拟	黄伟光 陈乃兴	II-35-7
三维粘性不可压缩流求解方法 - 拟流函数 - 涡函数法	顾春伟 徐建中	II-42-4
采用非交错网格压力修正方法计算不可压及可压亚、跨、超音速流动	朱斌 蔡睿贤 蒋洪德	II-46-8
用多重网格 TVD-LW 格式数值求解 NS 方法	刘建军 蒋洪德	II-54-8
叶栅边界层转捩的实验研究与一个新的联合经验准则	蒋洪德 仲永兴 凌君阳	II-62-8
应用加罚有限元数值方法研究二维紊流场	胡志伟 李开泰 苗永森	II-70-6
子午加速风机后导叶内部流场的研究	李勤凌 谷传纲	II-76-6
III. 非定常流动		
跨音失速振荡透平叶栅的非定常流动特征	张卫伟 蒋滋康	III-1-6
尾流作用下的二维非定常流场的数值计算	梁秀英 马越	III-7-8
用“参数多项式方法”确定风力透平叶片的失速振荡流	陈佐一 孙永忠 杨玲	III-15-8
管道粘性非定常流动分布参数模型的一种精确与实用的近似方法	彭光正 徐航 王新雷 马元骥	III-23-8
叶栅气动弹性离散涡数值仿真 - II 数值试验	吴文权 西斯托	III-31-6
IV. 设计及优化		
大负荷高性能离心压缩机三元叶轮的设计及实验	王尚锦 席光 祁大同 袁民建 刘士学 袁沿 王世池	IV-1-7
关于旋成面叶栅两种气动杂交命题的讨论	戴韧 王宏光	IV-8-5
弯扭叶片栅内减少能量损失机理研究的新进展	王仲奇 苏杰先 钟兢军	IV-13-7
低展弦比透平叶片弯曲方法研究	王仲奇 韩万今 徐文远	IV-20-6

国产优化 300/600MW 汽轮机通流部气动

设计第一部分：设计体系与通流设计特点

蒋洪德 蔡睿贤 刘建军 朱荣国 陈乃兴 张丰显

苏 燕 任大康 李晓宇 杨其国 茅声凯 IV-26-8

国产优化 300/600MW 汽轮机通流部气动设计

第二部分：叶栅优化与完善化设计方法

茅声凯 李晓宇 刘建军 蔡睿贤 陈乃兴

蒋洪德 张丰显 李卫红 何咏梅 IV-34-8

适用于弯扭叶片的燃气涡轮气动设计软件体系

冯国泰 杨弘 顾发华 于青 王继宏 王仲奇 IV-42-8

轴流式风机流型优化模型及其数值分析 吕文灿 谭发生 IV-50-6

V. 实验研究

环形压气机叶栅通道内流场的实验研究 李宇红 吕飘 叶大均 V-1-7

弯扭静子叶片的环形叶栅试验 徐文远 于清 杨弘 王仲奇 V-8-6

叶片倾斜和弯曲对扩压叶栅出口流场的影响

钟兢军 苏杰先 王仲奇 陈莹 V-14-8

进口附面层厚度对大转角弯叶片损失的影响

韩万今 吕红卫 芦文才 王仲奇 V-22-6

在大转角透平叶栅中叶片反弯曲对通道涡及静压场影响的实验研究

谭春青 王仲奇 韩万今 V-28-8

小功率高转速蒸汽透平试验研究和优化 邵振麒 V-36-7

VI. 其他

关于“参数多项式方法”近似处理的误差分析及改进

井有浩 陈佐一 VI-1-7

关于求解复杂流动的“参数多项式方法”的机理论证

井有浩 陈佐一 VI-8-8

改进的变比热平行混合解析解 崔济亚 VI-16-5

基于变域变分理论的广义有限元方法 王宏光 刘高联 戴韧 VI-21-8

双时间尺度湍流模型的应用 蔡晓丹 陈义良 VI-29-6

超音通流进气道计算内特性 单鹏 VI-35-7

离心压气机转子内部流场 S_1 / S_2 全三元迭代解

(一) Krain 离心叶轮 S_1 / S_2 全三元迭代解

赵晓路

中国科学院工程热物理所

前言

S_1 / S_2 三元迭代计算解法已成为叶轮机械工程设计和流场分析的基本方法. 通常为了减少工作量往往只进行准三元迭代计算. 这样会忽略掉内部流动的一部分三元效应. 为了深入研究全三元效应的影响, 验证准三元迭代计算在工程设计和流场分析中的准确性. 需要进行全三元迭代计算, 并比较准三元解和全三元解的差异. [2,3,4] 进行了轴流式压气机高亚声速跨声速流场全三元迭代计算, 并和准三元迭代计算以及激光测量结果进行了比较. 结论是在高亚声速静叶 ($M_{i,max} = 0.8$) 和跨声速动叶 ($M_{i,max} = 1.3$, 级压比 1.5) S_1 流面翘曲量较小, 忽略掉这一部分三元效应的准三元解和全三元解差别不是很大. 在工程实际中使用比较简单快捷的准三元解进行工程设计和流场分析计算可以得到足够精确的结果.

一般认为, 在离心式压气机叶轮中 S_1 流面的相对翘曲会因为流程较长而变大. 因此, 对离心压气机叶轮内部流场进行全三元迭代计算, 分析其三元流动特点; 与准三元解进行比较, 以判断准三元解在进行离心压气机工程设计应用中的准确程度, 是一项具有一定实际意义的工作.

离心压气机叶轮内部流场全三元迭代计算

Krierman and Adler 最早对一低速离心压气机叶轮(叶盖处进口马赫数为 0.25, 最高马赫数为 0.5 左右)的内部流场进行了全三元迭代计算[5]. 他们通过数值实验证明了离心压气机叶轮内部流场全三元迭代计算的收敛性. 得到任意翘曲 S_1 / S_2 流面的形状和分布, 并和轮盖处静压测量进行了比较. 遗憾的是未和准三元迭代计算结果以及内部流场详细测量进行比较.

本文的全三元迭代计算流程见图 1, 步骤 I 首先进行中心 S_2 流面的正问题计算, 采用文[6]中的主方程(6). 计算坐标选在子午面上. 方程右端包含的 $V_\theta r$ 项在进行正问题计算时由于子午速度及中心 S_2 流面几何约束条件计算确定. 这时假定中心 S_2 流面几何形状与叶片中弧面一致, 只是出口区要根据滑差系数修正. 在下面步骤 III 进行的 S_2 流面反问题计算中不再输入 S_2 流面几何约束条件而是由上一轮 S_1 流面的计算提供 $V_\theta r$ 的分布. S_2 流面的计算程序可根据需要进行正反问题计算, 这样简化了全三元迭代计算体系的构成. 全三元迭代的步骤 II 进行由轮盘到轮盖八个回转 S_1 流面的计算. 步骤 III 进行由压力面到吸力面七个 S_2 流面的计算, 和[3]一样, 最靠近压力面和吸力面的二个 S_2 流面不与叶片型面贴合, 保留 5% 流量的间隙. 步骤 IV

计算八个翘曲 S_1 流面. 翘曲 S_1 流面的流函数主方程建立在与翘曲 S_1 流面贴合的坐标系上. (图 2) 和计算轴流叶轮机翘曲 S_1 流面[7]不同在于任意非正交曲线坐标系的定义. x^1x^2 仍取在 S_1 流面上, 第三个逆变基矢 \hat{e}_3 , 不再取在 z 轴方向, 而是取在子午面上并垂直于翘曲 S_1 流面与子午面的交线:

$$\hat{e}_1 = \frac{\partial r}{\partial x^1} \hat{r} + \frac{\partial z}{\partial x^1} \hat{z} + r \frac{\partial \varphi}{\partial x^1} \hat{\varphi}, \quad \hat{e}_2 = \frac{\partial r}{\partial x^2} \hat{r} + \frac{\partial z}{\partial x^2} \hat{z} + r \frac{\partial \varphi}{\partial x^2} \hat{\varphi}, \quad \hat{e}_3 = \left(\frac{\partial z}{\partial s} \hat{r} - \frac{\partial r}{\partial s} \hat{z} \right) \tau_n \quad (1)$$

度量张量为:

$$\sqrt{g} = \left(\frac{\partial z}{\partial s} \hat{r} - \frac{\partial r}{\partial s} \hat{z} \right) \tau_n \cdot \begin{vmatrix} \hat{r} & \hat{z} & \hat{\varphi} \\ \frac{\partial r}{\partial x^1} & \frac{\partial z}{\partial x^1} & r \frac{\partial \varphi}{\partial x^1} \\ \frac{\partial r}{\partial x^2} & \frac{\partial z}{\partial x^2} & r \frac{\partial \varphi}{\partial x^2} \end{vmatrix} = \left(\frac{\partial z}{\partial s} \frac{D(z, \varphi)}{D(x^1, x^2)} + \frac{\partial r}{\partial s} \frac{D(r, \varphi)}{D(x^1, x^2)} \right) \tau_n \quad (2)$$

$$\frac{D(z, \varphi)}{D(x^1, x^2)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial z}{\partial x^1} & r \frac{\partial \varphi}{\partial x^1} \\ \frac{\partial z}{\partial x^2} & r \frac{\partial \varphi}{\partial x^2} \end{vmatrix} \quad \frac{D(r, \varphi)}{D(x^1, x^2)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial r}{\partial x^1} & r \frac{\partial \varphi}{\partial x^1} \\ \frac{\partial r}{\partial x^2} & r \frac{\partial \varphi}{\partial x^2} \end{vmatrix}$$

得到相应的翘曲 S_1 流面的流函数主方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x^2} \left[\frac{1}{\rho} \left(\frac{g_{11}}{\sqrt{g}} \frac{\partial \psi}{\partial x^2} - \frac{g_{12}}{\sqrt{g}} \frac{\partial \psi}{\partial x^1} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x^1} \left[\frac{1}{\rho} \left(\frac{g_{12}}{\sqrt{g}} \frac{\partial \psi}{\partial x^2} - \frac{\sqrt{g_{22}}}{\sqrt{g}} \frac{\partial \psi}{\partial x^1} \right) \right] \\ & = -2\omega \frac{D(\varphi, r)}{D(x^1, x^2)} + \frac{\sqrt{g_{11}}}{W^1} \left(-\frac{\partial I}{\partial x^2} + T \frac{\partial S}{\partial x^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

翘曲 S_1 流面其它计算处理如[7]. 全三元迭代计算在 III、IV 两步间反复进行直到达到收敛标准.

Krain 转子内部流场 S_1 / S_2 全三元迭代解

离心压气机转子内部, 由于科氏力、黏性力、曲率、叶尖泄漏、二次流综合影响往往造成边界层分离, 并在出口区轮盖吸力面交角处形成低能量尾迹区[8]. 使用属于无黏范畴的 S_1 / S_2 三元迭代解很难准确地预估这种尾迹 / 射流流动. 很多作者[9-12]试图使用经验的方法去模拟这种尾迹 / 射流流动, 但未得到广泛应用. 为了减少忽略黏性力项给全三元、准三元迭代计算比较带来的影响. 本文选用一分离区较小不具有典型尾迹 / 射流流动的 Krain 离心压气机转子作为算例[13]. 这是一级压比为 4.7:1 的高压比离心压气机, 其叶型参数及激光测量结果都已公开发表.

全三元迭代计算在 III(7 个 S_2 流面)和 IV(8 个任意 S_1 流面)间进行. 图 2 给出第一轮全三元迭代计算 S_2 与 S_1 流面相对马赫数的比较. 其最大误差位于轮盖吸力面处. 经过四轮迭代马

赫数最大相对误差由 30% 下降到 12% 左右. 图 2 也比较了第四轮迭代计算 S_2 与 S_1 流面相对马赫数. 可以发现, 在中心 S_2 流面与靠近吸力面的 S_2 流面上两者十分接近收敛较好, 只是靠近压力面的 S_2 流面上两者相差较大收敛不太好. 图 3 给出叶轮通道各准正交面 (P3) 与 S_2 和 S_1 流面的交线. 在进口截面 I 由于根部较大正攻角的影响使 S_2 和 S_1 流面都发生较大扭曲, II 截面这种情况很快得到调正, S_2 和 S_1 流面的扭曲变小. 气流进入弯曲流道后 S_1 流面在压力边开始向轮盘方向翘曲. 这一翘曲趋势在 V 截面发展最为充分 ($\Delta H/H$ 达到 10% 左右). 在以后的截面翘曲逐渐变小, 至出口截面 S_1 流面翘曲为 S 型. 在下游 (57) 截面翘曲已逐渐消失. 这说明 S_1 流面翘曲主要发生在叶轮通道内, 上下游离开前后缘一段距离后 S_1 流面可被视为回转面, 计算中仍可以使用周期性边界条件.

图 4 给出从轮盘到轮盖 8 个任意 S_1 流面流片厚度周向分布情况. 可以看出其发展趋势和 S_1 流面翘曲发展变化是一致的, 即在进口截面由于根部正攻角的影响使得 S_1 流面流片厚度周向分布变化剧烈; 而后趋于缓和, 进入弯道后周向分布不均匀再次加大直到 V 截面, 然后逐渐减小. 和 S_1 流面最大翘曲发生在叶高中部不同, S_1 流面流片厚度周向分布最大变化发生在叶片根部和尖部. 图 5 为三个 S_2 流面流片厚度流向分布. 中心 S_2 流面和靠近吸力面的 S_2 流面流片厚度与叶轮通道宽度比 $p-t/p$ 相似, 但是靠近压力面的 S_2 流面流片厚度则相差很大, 它从大约 50% 流程处急剧增加, 至 90% 流程处达到 1.7 左右, 过去在轴流式压气机全三元迭代未曾出现过. 这一点可以从图 6 三个 S_1 流面流线分布得到解释. 因为压比较高 (级压比 4.7) 使叶片负载较大, 且此叶轮设计特点为大负载区偏后. 这使得流程 50% 后靠近吸力面的流管急剧扩大. 图 7 给出三个任意 S_1 流面的等马赫线分布. 可以看出, 由于采用了较低的比转速 ($N_s = 80$), 尽管级压比较高但叶轮通道内未出现跨声区和激波.

结束语

本文使用基于叶轮机械三元流动通用理论建立起来的全三元 S_1/S_2 两类流面迭代体系对一高压比离心压气机转子流场进行了全三元分析计算. 计算结果表明: 离心压气机叶轮通道内由于流程长, 气体在子午和园周两个方向上强烈改变运动方向, 加上科氏力的作用, 使得 S_1 流面的最大翘曲量比轴流式跨声压气机转子中的要大一个数量级左右 (离心 $\text{Max } \Delta H/H = 10\%$, 轴流式跨声 $\text{Max } \Delta H/H = 1.5\%$). 通过计算发现 S_1 流面的最大翘曲在周向主要发生在压力边区域, 在叶高方向则发生在叶高中部. 而 S_1 流面流片厚度的周向不均匀度不是在 S_1 流面翘曲最大的叶高中部最大, 反而是在轮盘轮盖两个型状应是回转面的 S_1 流面上为最大.

参考文献

- [1] Wu Chung-Hua, "A General Theory of Three Dimensional Flow in Subsonic or Supersonic Turbomachines of Axial Radial and Mixed Flow Types," ASME Paper No 50-A-79, ASME Trans. Nov., 1952, NACA TN 2604, 1952.
- [2] 汪庆桓, 吴文权, 朱根兴, 李卫红, 吴仲华, "轴流式压气机压气机两类流面迭代三元完全解," 工程热物理学报, 1983, Vol. 4, No. 4, pp 336-346.
- [3] 赵晓路, 秦立森, 吴仲华, "CAS 压气机转子跨声速流场 S_1/S_2 流面全三元迭代解," 工程热物理

学报, 1989, Vol. 10, pp 140-145.

[4] 秦立森, 赵晓路, 吴仲华, "CAS 压气机转子跨声速流场全三元解的分析及其与准三元解和双焦点激光测量值的比较," 工程热物理学报, 1989, Vol. 10, pp 255-261.

[5] Krimerman, Y., and Adler, D., "The Complete Three-Dimensional Calculation of the Compressible Flow Field in Turbo Impellers," J. of Mechanical Engineering Sciences, Vol. 20, 1978, PP149-158.

[6] Zhao Xiaolu, "Stream Function Solution of Transonic Flow along S_2 Stream surface of Axial Turbomachines," ASME Trans. J. of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 106, 1986, PP 138-143.

[7] 赵晓路, 秦立森, 翘曲 S_1 流面跨声速流函数解, "工程热物理学报, 1989, Vol. 8, pp 340-342.

[8] Eckardt, D., "Flow Field Analysis of Radial and Backswept Centrifugal Compressor Impellers," ASME Conference "Performance Prediction of Centrifugal Pumps and Compressors", 1980 PP 77-86.

[9] Starge, D.P., and Compsty, N.A., "Two Dimensional Method for Calculating Separated Flow in Centrifugal Compressor," ASME Trans, J. of Fluid Engineering, Vol. 97, 1975, PP 581-591.

[10] Howard, J.H.G., and Osborn, C., "A Centrifugal Compressor Flow Analysis Employing a Jet-Wake Passage Flow Method," ASME Trans. J. of Fluid Engineering, Vol. 99, 1977, PP 141-147.

[11] 郑群, 石道中, "离心叶轮内的三维流场," 中国工程热物理学会, 872062, 1987.

[12] 刘殿魁, "离心泵内具有射流尾迹模型的三元流动计算," 中国工程热物理学会, 842008, 1984.

[13] Krain, H., "Swirling Impeller Flow," ASME Trans. J. of Turbomachinery, Vol. 110, 1988, PP 122-128.

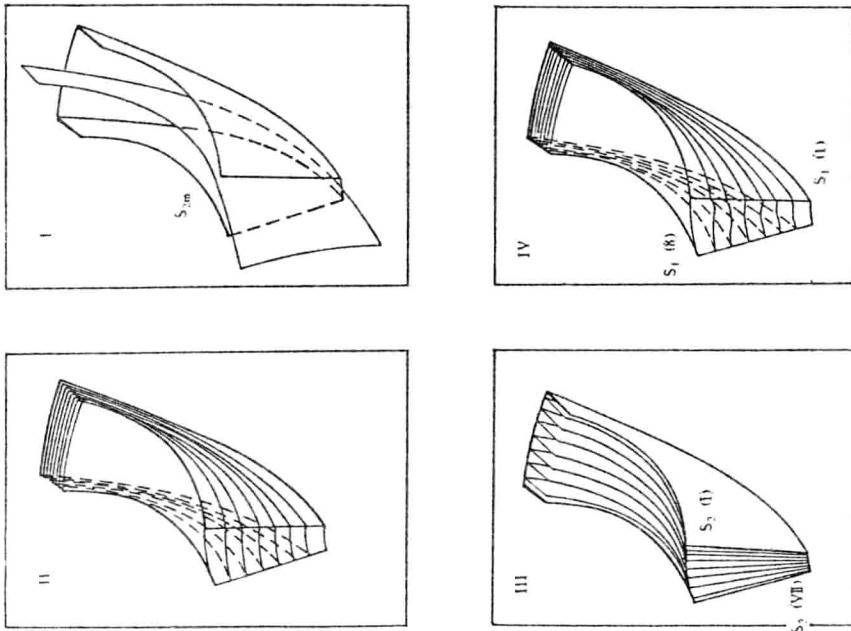


图 1 离心压气机转子内部流场全三元迭代流程

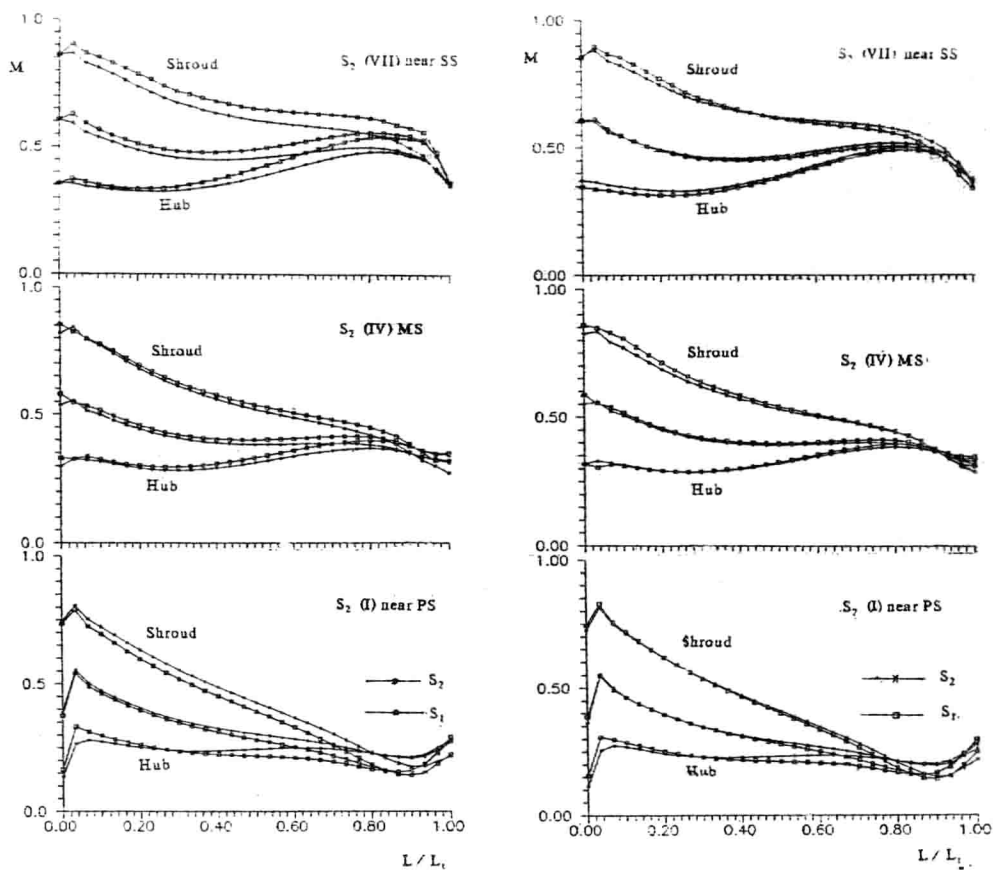


图2 第一轮、
第四轮全三元迭代
 S_1 S_2
流面上马赫数比较

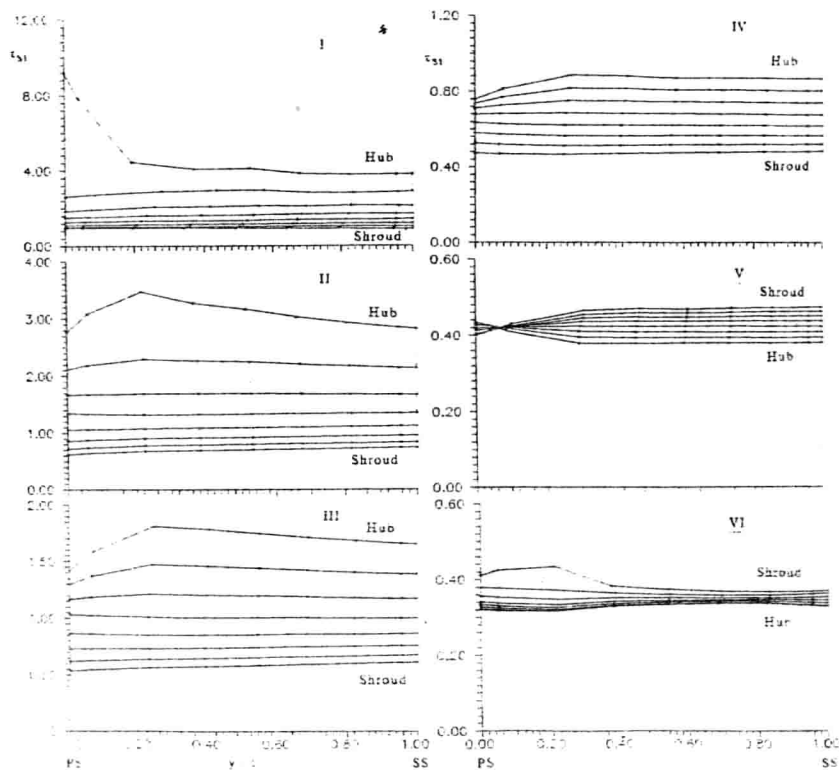


图4 S_1 流面流片
厚度周向分布

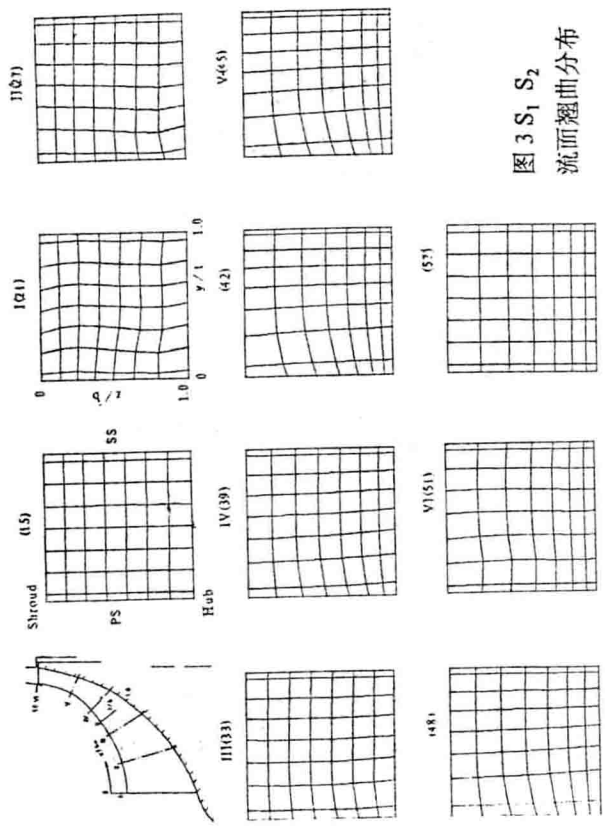


图 3 S_1, S_2 流面翘曲分布

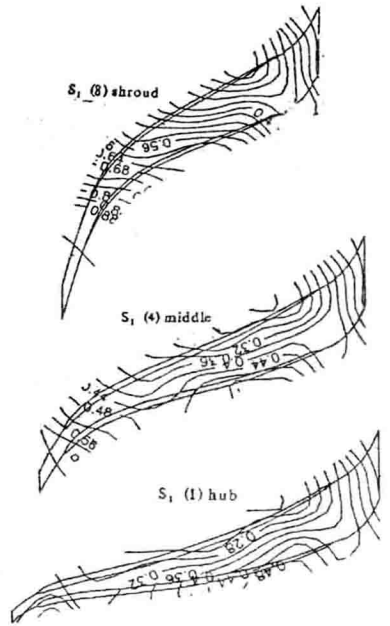


图 7 S_1 流面等马赫线分布

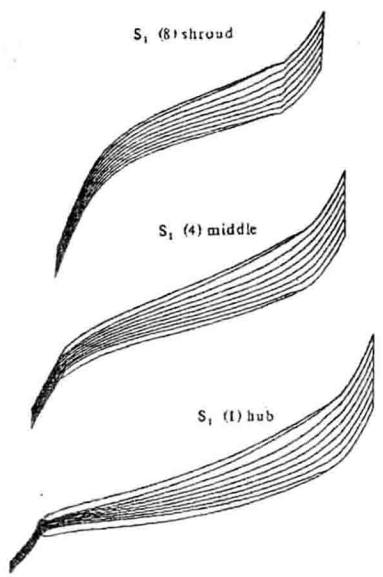


图 6 S_1 流面流线分布

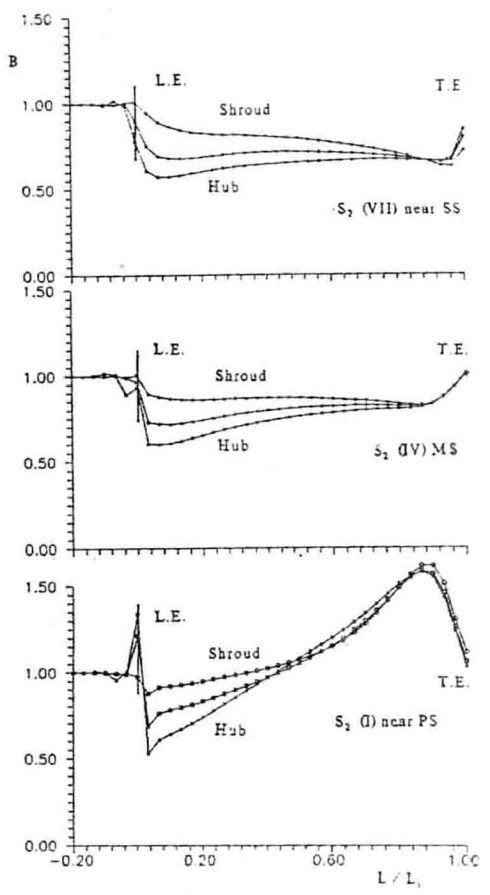


图 5 S_2 流面流片厚度流向分布

离心压气机转子内部流场 S_1 / S_2 全三元迭代解

(二) Krain 离心叶轮全三元迭代解与准三元解及激光测量的比较

赵晓路

中国科学院工程热物理所

前言

五十年代初[1]提出叶轮机械三元流动通用理论后,准三元迭代解被工程界广泛应用。随着叶轮机械的不断发展,为了提高效率,叶片径向扭转设计(主要是在轴流式叶轮机械领域)开始广为采用。在这种“可控涡设计”中, V_{θ} 、 r 沿径向的变化越大,叶轮内部流场相应的径向运动(或 S_1 流面偏离回转面假设的程度也就越大)。这种和主流流动方向大致垂直的径向运动也可被称为二次流,是可以无粘性气体运动方程计算得出的。[2],[3]试图使用全三元 S_1 / S_2 迭代的方法,及中心流面法来计算描述这种由于 V_{θ} 、 r 径向变化引起的无粘二次流动,而[4]则从理论上分析了由于无粘二次流所造成的 S_1 流面的翘曲与 V_{θ} 、 r 径向分布变化之间的关系。而后[5]又对跨声速轴流压气机转子内部流场进行了全三元 S_1 / S_2 迭代计算,进一步分析了三元激波对无粘二次流的影响

为了比较准三元解和全三元解的差异,验证准三元解在计算离心压气机转子内部流场的准确程度,研究离心压气机转子内部流场全三元流动特性。本文第一部分对一高压比离心压气机[6]叶轮内部流场进行了全三元迭代计算,并分析了 S_1 / S_2 两类流面在叶轮通道内分布形态。本文侧重于分析比较两类流面准三元解与全三元解的计算结果,并进一步和激光测量值及N-S三元直接解进行详细的比较。

子午速度及叶面马赫数的比较

在德国宇航院(DLR)对一压比为4.7的高压比离心压气机叶轮内部流场进行了详细的激光测量[6]。这一叶轮是Krain使用[7]所述CAD系统设计的并达到了较高的技术指标。在较高的级压比下,其级效率达到84%,转子效率为95%,使用双焦点激光测量发现:叶轮出口区流场与传统的射流/尾迹流动模型有所不同。随后[8,9]使用不同的三元N-S解法分析验算了这一转子内部流场,并用激光值进行了详尽的验证比较,对内部流动的细节有了进一步的了解。因设计级压比较高,为避免进口叶尖超音,设计时选用了较低的比转速($N_s=80$)。叶轮有24片 30° 后弯叶片。本文验算了设计工况点($m=4.0\text{kg/s}, n/n_0=1$)。图1表示了双焦点激光测量截面的位置。

如图2所示,为了便于和激光测量值比较全三元及准三元无粘 S_1 / S_2 迭代解的计算结

果在各个测量截面上都插值到激光测量点相应的位置上(通道深度分别为 $Z/b=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$), 在进口截面 I, 靠近轮盘处准三元迭代解计算得到的子午速度略高于全三元解, 相比之下, 更接近激光测量结果。在截面 II 靠近轮盘处全三元迭代计算得到的子午速度高于准三元计算值, 靠近轮盖处则反之。在这一截面 N-S 三元直接解计算得到的子午速度略高于激光测量值。I II 两截面, 因流动未发生分离, 有粘、无粘计算结果在趋势分布上都和激光测量符合得很好, 只是(属于无粘计算范畴)的全三元、准三元迭代解中使用的反映粘性阻塞效应的系数取得不够大, 计算出的子午速度略低于激光测量结果。情况在 III 截面处有了变化, 测量结果表明: 在 III 截面轮盖靠近压力面处 ($Z/b=0.1, y/t=0.3$), 出现了较大速度亏损, 说明开始出现流动分离。在这一截面全三元解与准三元解的差异分布趋势如截面 II。在这一测量截面各种数值计算都未能予估到流动的分开始产生。在 IV V 两截面全三元解和准三元解计算出的子午速度差别很小, 都未能予估出分离区的存在。迭代计算子午速度在各个通道深度上都是由压力面向吸力面单调升高, 而 N-S 解则计算出流动低能量区的存在, 其子午速度分布趋势定性上和激光测量值符合较好。在叶轮出口截面 VI, 从激光测量结果可以看出在周向不存在明显的流动低能量区。只是沿叶高方向, 在轮盖附近, 直至槽道深度 $Z/b=15\%$ 处叶间尖隙区内叶片厚度为零, 使这一带状区真实子午速度大为降低。正是因为出口测量截面真实流动不存在明显分离, 不计及粘性力的准三元和全三元迭代计算的结果在分布趋势上和激光测量结果的比较, 较 III IV V 截面有了很大改进。从计算结果也可明显看出在 VI 截面全三元迭代计算和准三元迭代计算分别得到的子午速度的差别要大于前五个截面, 并且全三元解的计算结果明显地优于准三元计算结果。而这种改进, 主要是由于全三元解计及了 S_1 流面的翘曲及 S_1 流面流片厚度的周向变化。

进行准三元迭代计算分析后发现: 计算得到子午速度周向分布基本上都是从压力面到吸力面单调增加的变化趋势。当时曾经猜想, 准三元计算忽略了 S_1 流面流片厚度沿周向的变化, 若进行全三元迭代考虑了流片沿周向的变化, 引入准三元计算所忽略掉的一部分二次流动效应, 或许能够得到更为接近真实流动的子午速度分布图象, III、IV、V 几个测量截面上子午速度在轮盖附近的中凹分布, 或许可以通过计及 S_1 流面的翘曲, 特别是 S_1 流面流片厚度的周向变化的全三元迭代计算而得到较好的数值模拟。结果, 这种设想未能成立, 正如吴仲华教授指出的[10]: 在不同类型叶轮机叶片流道内的实际粘性流动中, 叶片上边界层内由于主流区压差导致的二次流动, 以及叶片间隙处粘性流动造成的二次流动可能要比叶片径向扭曲(也就是涡量 V_θ 径向不均匀分布)造成的二次流动大得多。在过去计算级压比 < 1.5 的轴流式压气机叶轮流道内部流场得到的全三元、准三元无粘解和激光测量结果还比较接近。而在级压比为 4 以上的离心式压气机流道中, 粘性所引起的二次流动对主流的影响要比无粘二次流对主流的影响大得多。

Eckardt 在[11]中比较形象地描绘了粘性及间隙流动形成的粘性二次流图象(图 3) 由于主流区压力分布的影响边界层内低能量流体在轮盘处由压力面向吸力面, 叶片处由轮盘向轮盖流动, 再加上间隙流动, 其综合效应使低能量流体在吸力面轮盖角区聚集, 使子午速度出现明显的速度亏损分布。

图 4 给出了轮盘、轮盖、叶轮通道中间高度上三个 S_1 流面上分别使用准三元迭代和全三元迭代计算得到的马赫数分布的比较。全三元迭代的结果插值到准三元迭代计算的 S_1 回转流面上。两种迭代计算差别的分布总的来说是进、出口区要比中部为大, 在轮盖进口区全三元

迭代解计算马赫数高于准三元迭代解,而在轮盘进口区则反之。在出口截面上,全三元解计算得到的载荷要大于准三元解。值得注意的是:就这个离心叶轮内部流场而言,在 S_1 流面翘曲最大的叶高中部的 S_1 流面上,全三元迭代解和准三元迭代解的差别反而不如在轮盘和轮盖处 S_1 流面上的差别大。 S_1 流面的翘曲与流片厚度周向变化与全三元迭代解和准三元迭代解的差别之间存在什么关系,是需要做进一步探讨的问题。

相对流动角度分析比较

为了研究二次流在离心压气机转子三元流场中的分布,Krain[6]对各测量截面上气流的相对速度矢量与转动方向的夹角 β 的等位线分布进行了详细的研究分析。基于旋涡中心部分类似刚体转动这一假设,他根据 β 角等位线的分布,从激光测量的结果分析了叶轮通道各个测量截面上旋涡的发生发展情况,(详见[6])。[9]也用三元 N-S 方程的计算结果与激光测量值进行了比较。本文也尝试使用无粘全三元迭代计算得到的结果和激光测量值及三元 N-S 解做一比较分析。在进口截面 I,(图 5),无粘全三元迭代计算得到的 β 角等位线,和激光测量值在叶轮通道深度 0-60% 这一区域符合得较好,但在靠近轮盘处,因有较大正攻角,使用无粘方法计算不可能计及由于较大正攻角造成前缘区吸力面分离,使得计算所得到的气流角明显小于激光测量值。同样的,使用粘性 N-S 方程三元直接解,也未能充分计及大攻角分离,在轮盘区计算的计气流角尽管大于无粘三元迭代计算,但也明显小于激光测量值(见 I 截面)。在截面 II,无粘全三元迭代解的计算结果和 N-S 解都和激光测量符合得很好。当然无粘全三元迭代解不可能计及轮盖处间隙流动造成的旋涡流动,激光测量及 N-S 解计算都表明从截面 III 轮盖附近靠压力面首先发生流动分离处,首先产生了旋涡流动,而无粘三元迭代计算得到的等 β 线分布无法予估这一旋涡的发生。从截面 IV 到 VI,真实流动的旋涡有了进一步的发展,从激光测量和三元 N-S 方程解得到的 β 角等位线分布都表明了其发展变化情况:属于无粘范畴的全三元迭代解得到的 β 等位线无法显示这些现象。但是值得注意的是三元 N-S 方程解在不考虑叶片间隙流动时得到的 β 角等位线在主流区的分布和全三元迭代解得到的比较接近。这说明间隙流动在旋涡发展过程中起了十分重要的作用。

关于无粘二次流动的讨论

为了进一步考查无粘二次流动的分布图 6 给出子午流线与准正交线夹角在准正交面上的分布,它反映了无粘二次流动的方向以及 S_1 流面的翘曲。在准正交面 I 等 σ 线反映了进口攻角径向分布造成的 S_1 流面翘曲。在截面 II 靠近轮盖处 S_1 流面靠近吸力边下弯,这一点在第一部分图 3 表现得不明显。III IV V VI 几个截面等 σ 线分布反映 S_1 流面翘曲和第一部分图 3 完全一致。

[4]详细地讨论了轴流式叶轮机械 S_1 流面的翘曲,从无粘运动方程出发对无粘二次流动进行了定量的分析,参照[4]可以给出适用估计于离心式叶轮机械 S_1 流面的翘曲量的公式:

$$\frac{\partial \sigma}{r \partial \varphi} = \frac{1}{W_i} \left[\frac{(V_{\theta} r)}{\partial n} - \xi_i \right] \quad (1)$$

其中 $\sigma = \lg^{-1} \left(\frac{W}{W_1} \right)$, n 为子午流线的正交方向, ξ 为绝对旋度, ξ 为子午流线切向。假设流

动无粘、进口无子旋, 则式(1)可简化为:

$$\frac{\partial \sigma}{r \partial \varphi} = \frac{1}{W_1} \left[\frac{\partial (V_{\theta} r)}{\partial n} \right] \quad (2)$$

从式 2 可以看出 S_1 流面的翘曲除了受流长度的影响外, 主要取决于 $V_{\theta} r$ 在子午流线正交方向的变化梯度的大小, 而翘曲的方向则取决于这一梯度值的正负号。[4]定性分析出在无子旋压气机中 S_1 流面在动叶吸力面处外翘, 在压力面处内翘。本文第一部分计算得到的 S_1 流面翘曲分布和这一予测符合得很好。但从本文第一部分图 3 中可以明显地观察到 S_1 流面的翘曲在压力边发展最为充分。这实际上也是由于 $V_{\theta} r$ 在准正交方向的梯度决定的。图 7 给出了该离心叶轮在三个 S_2 流面上 $V_{\theta} r$ 的分布, 可以明显地看出靠近吸力面的 S_2 流面上 $V_{\theta} r$ 沿叶高方向的变化最小, 而靠近压力面的 S_2 流面上的最大。图 8 进一步给出了这三个 S_2 流面上位于叶高中部流线上 $\frac{\partial V_{\theta} r}{\partial x}$ 分布, (x^2 方向是准正交方向)。靠近压力面处 S_2 流面上 $V_{\theta} r$ 的变化梯度为最大, $V_{\theta} r$ 的这种分布特点决定了 S_1 流面的翘曲在压力边处最大, 而在吸力边处最小。

结束语

使用 S_1 / S_2 两类流面迭代计算的方法对 Krain 高压比离心压气机转子内部流场进行了全三元分析, 并和准三元迭代解、N-S 三元直接解以及双焦点激光测量结果进行了详细的分析比较。在流场未发生分离的情况下, 无粘的全三元迭代解和准三元迭代解都和激光测量结果比较接近。全三元迭代解和准三元迭代解之间的差别没有象予想的那么大。当然全三元迭代解计及了由于 S_1 流面翘曲和 S_1 流面流片厚度周向变化。这些三元效应, 得到的结果比准三元解更接近激光测量值。但全三元解的计算工作量要比准三元迭代解增加很多。建议在工程中使用准三元迭代解就可以达到令人满意的精度。在需要精细的分析的验算中则可以考虑使用全三元迭代解的进一步分析流场的全三元效应。分析比较表明, 和轴流式压气机不同, 在离心压气机转子中由于粘性及二次流动等效应作用强烈, 使得流动往往存在较强的局部分离。这种分离, 可能进一步发展, 形成典型的尾迹 / 射流出口区流动。即使在局部分离区较小, 分离流动重新附着, 出口区未形成尾迹死水区 (如本文算例) 的情况下, 使用忽略粘性力项的流面迭代计算方法也无法予测这种分离流动及相应的由粘性效应引起的二次流动。使用准三元迭代而忽略掉的三元效应造成的误差可能会远远小于忽略粘性力项而造成的误差, 如何在两类流面迭代计算中计及粘性效应是今后需要做进一步努力的研究课题。

参考文献

- [1] Wu Chung-Hua, "A General Theory of Three Dimensional Flow in Subsonic or Supersonic

Turbomachines of Axial Radial and Mixed Flow Types," ASME Paper No 50-A-79, ASME Trans. Nov., 1952, NACA TN 2604, 1952.

[2] 汪庆桓, 吴文权, 朱根兴, 李卫红, 吴仲华, "轴流式压气机压气机两类流面迭代三元完全解," 工程热物理学报, 1983, Vol. 4, No. 4, pp 336-346.

[3] Zhao Xiaolu, Sun Chunlin and Wu Chung-Hua, "A Simple Method for Solving Three-Dimensional Inverse Problems of Turbomachine Flow and the Annular Constraint Condition", ASME Trans., Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 107, PP. 293-300, (1985)

[4] 蔡睿贤, "叶轮机械设计自变数在内外环壁面上的限制条件及轴流式叶轮机械 S_1 流面的翘曲," 中国科学 A 辑, 1982, 12 期 PP1140-1145.

[5] Wu Chung-Hua, Zhao Xiaolu and Qin Lisen, "Three Dimensional Rotational Flow in Transonic Turbomachines: Part II- Three-Dimensional Flow in CAS Rotor Obtained by Using a Number of S_1 and S_2 Stream Filaments," ASME Trans. Journal of Turbomachinery, Vol. 114, PP. 55-60., (1992)

[6] Krain, H., "Swirling Impeller Flow," ASME Trans. J. of Turbomachinery, Vol. 110, 1988, PP 122-128.

[7] Krain, H., "A CAD Method for Centrifugal Compressor Impeller," ASME J. of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 106, PP 482-488, 1984.

[8] Krain, H., Hoffmann, W., "Verification of an Impeller Design by Laser Measurements and 3D-Viscous Flow Calculation," ASME Paper- 89 -GT- 159, 1989.

[9] Hah, C., and Krain, H., "Secondary Flows and Vortex Motion in a High - Efficiency Backswept Impeller at Design Conditions," ASME Paper 89-GT-181, 1989.

[10] 吴仲华, 工作通信, 1992.7.

[11] Eckardt, D., "Detailed Flow Investigations within a High-Speed Centrifugal Compressor Impellor," ASME Trans. J. of Fluids Engineering, Vol. 98, PP 390-402.

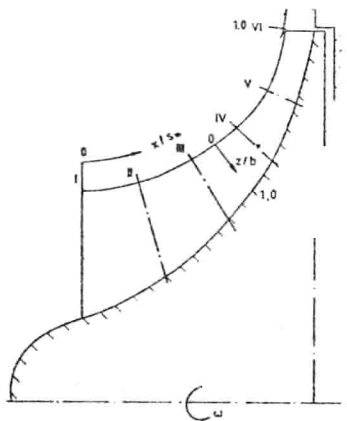


图1 激光测量截面分布

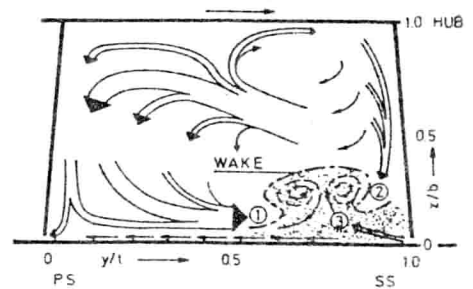


图3 离心压气机转子内部二次流动图象

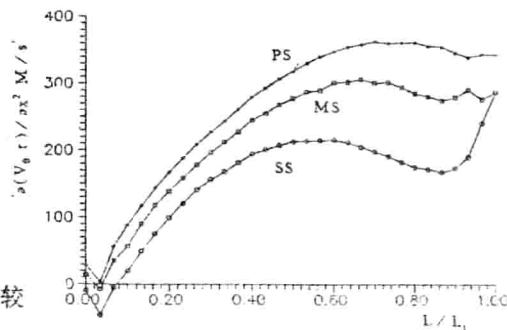


图8 叶中 S_1 流面上 $\frac{\partial(V_0 r)}{\partial x^2}$ 分布比较

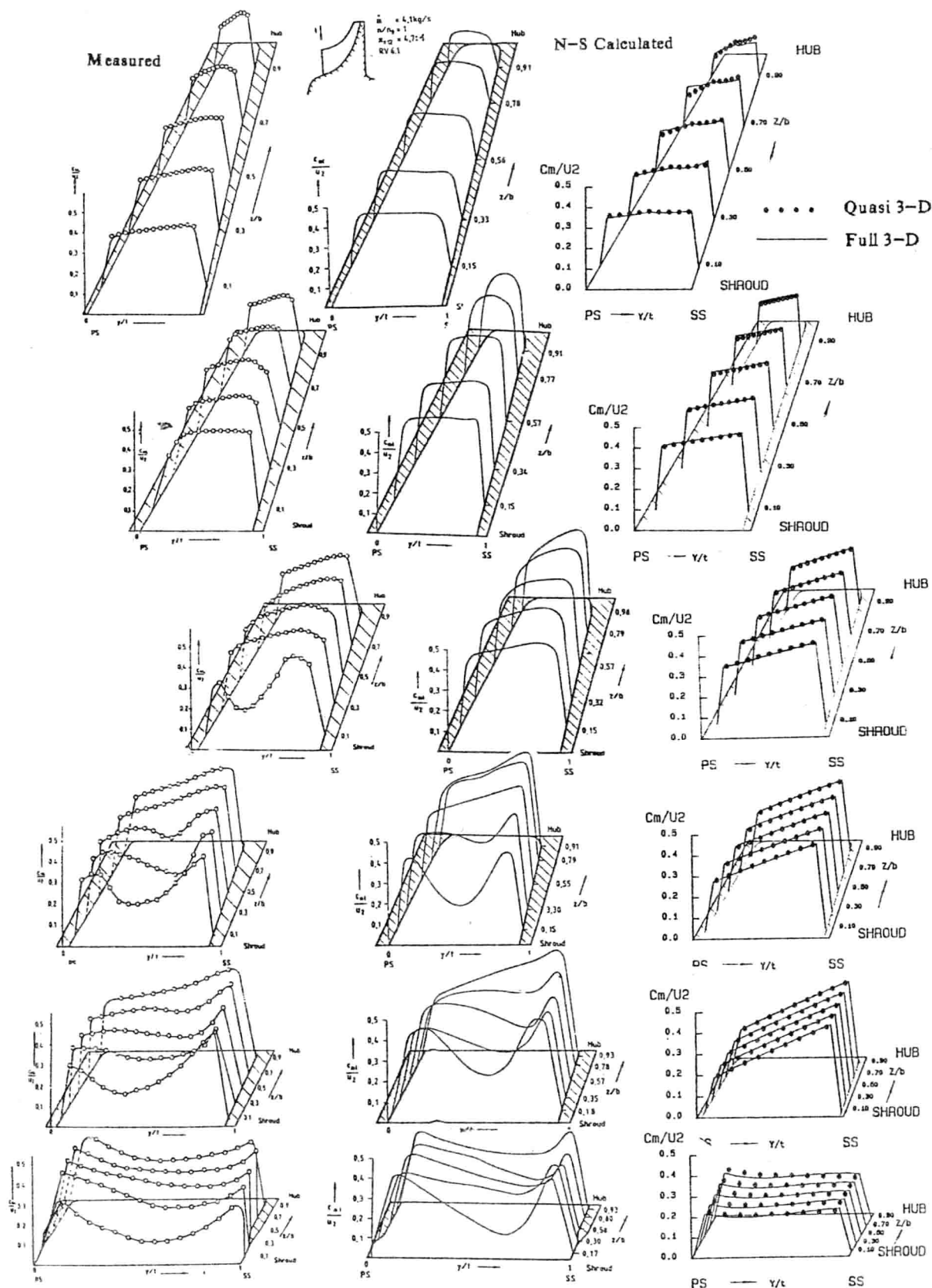


图2 测量截面上子午速度分布比较

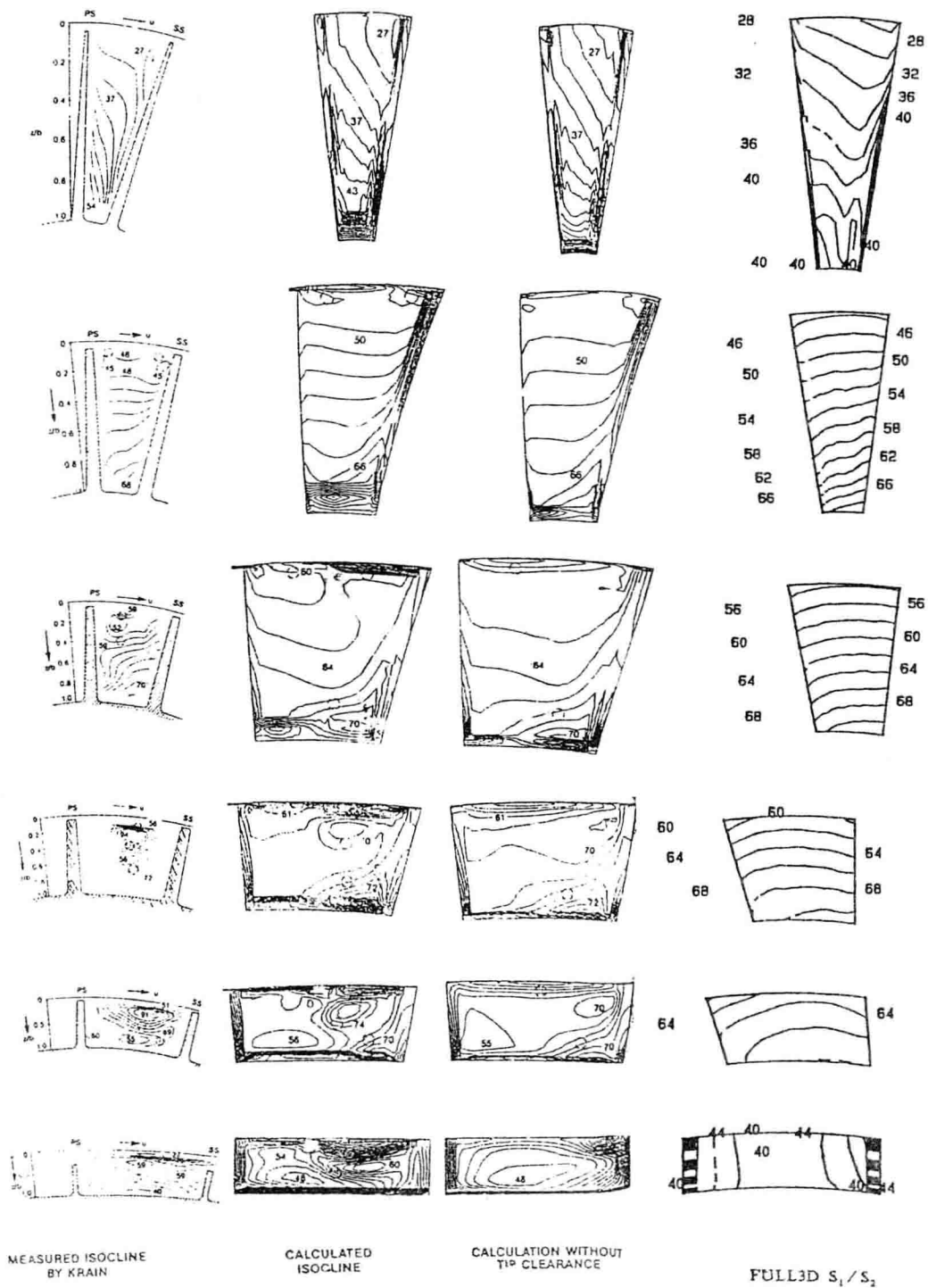


图5 测量截面上等 β 角线分布比较