

算方法是 Novak R A^[1]提出的求解完全径向平衡方程的流线曲率法；Marsh H^[2]提出的引入流函数的矩阵通流方法；以及由于一些优秀的数值格式如 Law-Wendroff 格式、TVD 可靠性和先进的网格生成方法的发展而在 70 年代中期兴起的求解欧拉方程的方法。本文比较了这三种方法在工程设计中的优劣以及所受的限制和准确性。

2 方程体系的比较

在文献 [3] 中定义了三元流解法中 S_2 流面的概念，而工程应用中多采用周向平均的中心 S_2 流面^[4]概念。本文所用的程序均采用了中心 S_2 流面的定义方法，坐标系均采用半正交曲线坐标系。

欧拉方程的求解通常是在粗网格上利用隐式的时间相关法。无论是应用有限体积还是有限差分法，它们的物理概念清晰，便于理解和编程。但这种方法一般在很粗的网格上使用简单的一阶数值格式，并用“延迟”修正将最后的解增至二阶精度。粗网格带来的主要问题是过大的数值粘性造成的伪熵。对于直接求解守恒型欧拉方程来说，这个问题的严重性要比流线曲率法、流函数法大得多。因为后者的方程隐含着“熵守恒”，数值误差是局部的，而当直接求解守恒型欧拉方程时，格式粘性产生的伪熵的传播会破坏方程的总体解。但在计算机条件容许的情况下，加密网格后这个问题可以明显缓解。另外从方程的推导中可以看出，流线曲率法中过多的引入人为的假设，方程体现气体真实流动的能力就会低于欧拉法。但流线曲率法方程中各项的物理意义还是非常明确的。流函数方法中由于流函数概念的引入，我们很难分析其方程各项的物理意义。另外三种方法都是计算理想无粘气体的，所以在实际计算中不可避免要引入损失模型，而损失模型的好坏将最终决定计算结果的准确性。

3 计算方法的比较

3.1 流线曲率法

流线曲率法是 S_2 流面的一个二元问题化为一元问题来求解。但这种假设是要付出代价的。为了简化计算作了如下假设：(1) 流动绝热；(2) 流动定常；(3) 运动方程忽略粘性力，粘性力引起的损失使熵 S 发生变化。熵 S 的增加通过总压恢复系数 σ 和流动效率 η 来计算， σ 、 η 由损失模型确定；(4) 由于粘性的影响计算中要引入流量系数 $\mu_{ksj} = G_{\text{计算}}/G_{\text{实际}}$ ；(5) 流体为完全气体。计算之中首先假定流线，逐站计算参数，之后重新确定新流线。采用判断计算出的流线与给定作为已知的流线基本重合为止的流线迭代法得到最终解。

3.2 流函数方法

我们利用三点差分公式将流函数微分方程变为差分方程后进行数值求解。对于每一个 i 计算站，取计算节点 $k=1, 2, 3, \dots, n-1$ 。这样 $n-1$ 个计算节点可列出 $n-2$ 个方程，考虑到边界条件 $\Psi_{i,1}=0$ 和 $\Psi_{i,n}=1$ ，则 n 个方程包含 n 个未知数 $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \dots, \Psi_n$ 这样方程组封闭。所以对 $i=1, 2, 3, \dots, m$ 可列出 $m \times (n-2)$ 个方程，通过求解上面的三对角矩阵方程组，计算出各节点的流函数 Ψ 。在通过流函数 Ψ 去计算速度。

3.3 欧拉法

本文所采用的欧拉法，采用代数方法生成计算网格，差分格式采用高精度 TVD 格式求解守恒型欧拉方程。其中由于粘性力的影响而引起的熵增，通过引入损失模型来加入。具体差分格式的推导见文献 [5]。求解欧拉方程时，设计者只须给定 p_0^* 、 T_0^* ，叶片排出口面积和出

口静压,而不需给定流量,在全部堵塞时迭代计算求出的流量就是由 p_0^* , T_0^* , 叶片排出口面积唯一确定的流量。

从三种计算方法中可看出流函数方法的最后求解方程组是三对角矩阵方程组,可用追赶法迅速求解。流线曲率法要进行流线迭代,计算时间很大程度上取决于初始流线的给定。欧拉法采用时间推进的方法,计算时间较长。结果表明在三种方法中流函数方法求解最为迅速,流线曲率法次之,欧拉法计算所需时间最长。

在计算跨音速压气机时,由于动叶的马赫数大于1,所以会发生部分堵塞和全部堵塞的现象。在求解 S_2 流面问题时,流线曲率法和流函数法须给定入口总压 p_0^* , 入口总温 T_0^* 及入口流量 G 。在亚音速情况下,叶片排出口面积 A 与出口背压 p_2 一一对应,可以相互调整。然而当超音速时,在发生堵塞的情况下,通过该级的最大流量 G_{\max} 由 p_0^* , T_0^* 和 G_{\max} 唯一确定,无论 G_{\max} 还是 A 都与出口背压 p_2 无关。显然在正问题计算时,发生全部堵塞的情况下,如果由 p_0^* , T_0^* , A 确定的 G 与给定流量一致则可以迅速获得收敛解;反之,即使两流量之间有微小差别,也难获得收敛解。在反问题计算时不存在这样的问题,因为这时只给定入口流量 G 、总压 p_0^* 、总温 T_0^* 和环量,而叶片排出口面积 A 可以随出口背压 p_2 调整。对于流函数来讲,求解跨音压气机还存在着方程自身的缺陷。首先是密度双值问题,因为在跨音区无法由流函数的偏导数唯一正确地确定出应有的速度 W (或 ρ) 的值。流函数 Ψ 与密流 ρW 一一对应。在 S_2 流面反问题计算时,只要气流在子午面上速度不超音,密度双值问题就不会发生;对于正问题,只要 S_2 流面上的速度大于音速即使子午面的分速仍为亚音速,也会出现密度双值问题,此时只有利用速度积分的办法去求解 W 。另外流函数方法的主方程属于混合型偏微分方程。我们知道主方程类型不同,数值解法的区别就很大,而且边界条件的给定也不一样。一般地,当使用流函数求解 S_2 流面正问题时只要 S_2 流面上的速度超音速,即使其子午分速不超音,描述 S_2 流面运动的流函数方程类型仍为双曲型,同时还存在密度双值问题;而使用流函数求解 S_2 流面反问题时,只要子午面上的分速度不超音,即使 S_2 流面的速度超音方程仍为椭圆型,此时也不存在密度双值问题。求解具有原参数的欧拉方程完全可以避免密度双值;并且数值格式采用 TVD 格式还可以自动捕捉激波。因此在全面堵塞的情况下,与流函数、流线曲率法相比,欧拉法可以解决由于堵塞和数值格式带来的求解上的困难。

4 计算结果比较

鉴于流函数正问题求解时会因方程类型而引起收敛性较差的情况,本文采用流函数反问题、流线曲率法和欧拉法正问题校核了国产某型涡喷发动机。三种程序的损失及落后角修正均采用文献 [7, 8] 中提供的计算模型。

在进口总压为 0.101MPa,进口总温为 288.15K 转速为 29500r/min 情况下三种方法计算值与出口实际测量值见表 1。

从上述结果看,欧拉法计算出的流量偏小,而流线曲率法计算的总体参数与测量值吻合的比较好。但还没有足够的实验数据能说明对于其他压气机来讲,流线曲率法对总体参数的计算精度就高。然而我们仍然可发现三种方法在总体参数的计算精度上的差异并不是很大,并且与测量值十分接近。

三种方法得到的动叶进口马赫数和压比及静叶进口和出口马赫数沿叶高分布见图 1~4。

Table 1 Compare value of caculation with actual metrical

Method		Total pressure of compressor	Total efficient of compressor	Total consumptive power (kW)	Total temperature of compressor (K)	Total mass flow of compressor (kg/s)
Actual metrical value		3.939	75%	1161.1	471.3	6.28
Streamline curvature solution method	Value of calculation	3.977	73.2%	1198.76	479.281	6.28 (Prearrangement)
	Deviation	0.96%	2.4%	3.24%	1.68%	
Flow function method	Value of calculation	4.004	74.3%	1180.85	477.85	6.28 (Prearrangement)
	Deviation	1.65%	0.93%	1.7%	1.4%	
Euler solution method	Value of calculation	3.8 (prearrangement)	72.44%	1120.06	485.5	5.86212
	Deviation		3.4%	3.5%	3.01%	6.65%

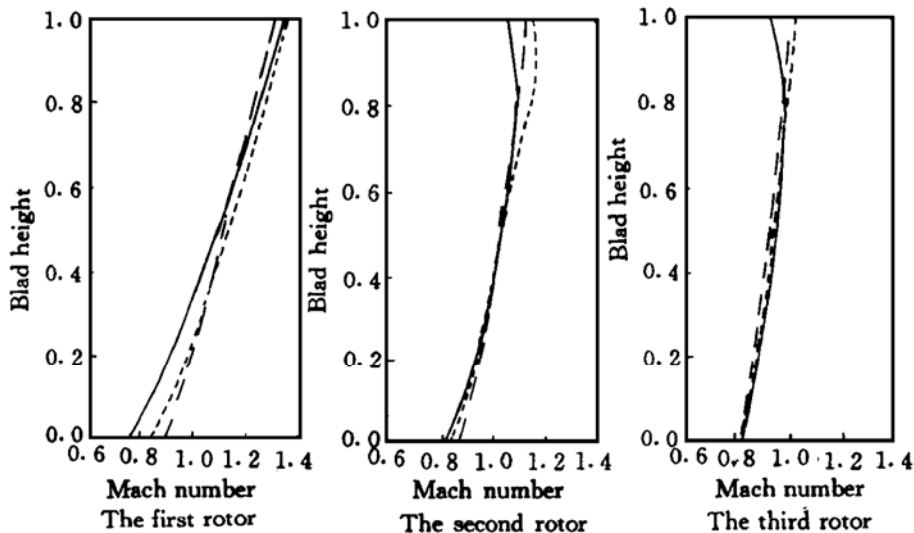


Fig. 1 Mach distribution along the blad height at inlet of rotor

Euler solution method
 Flow function method
 Sreamline curvature solution method

由图 1 可见在动叶进口三种方法计算结果是十分接近的，较大的偏差发生在第一级的根部和第二级、第三级的顶部。图 2 动叶出口的差异较进口大一些，但三种方法的相对偏差并

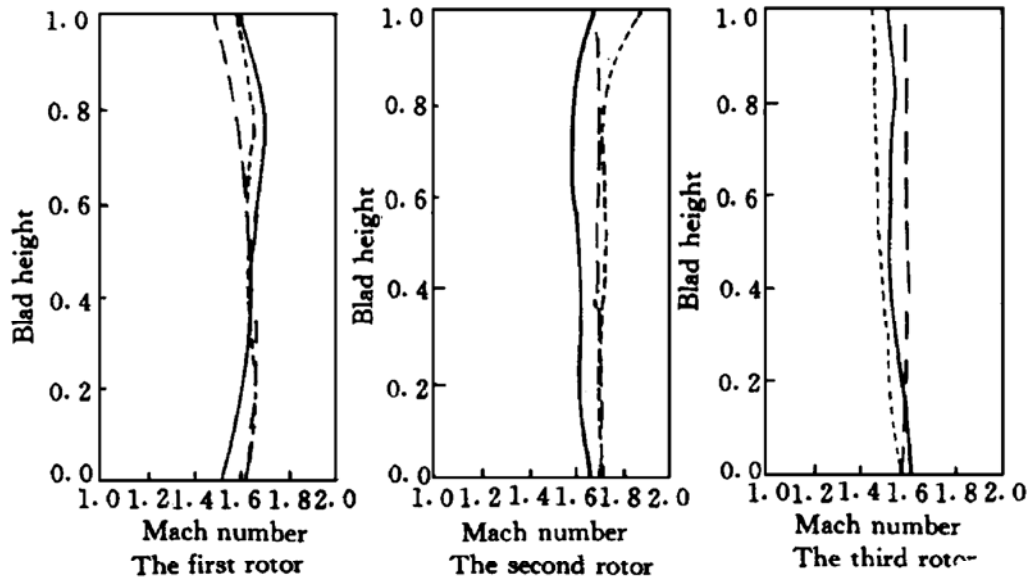


Fig. 2 Total pressure distribution along the blad height at outlet of rotor

_____ Euler solution method
 ----- Flow function method
 Sreamline curvature solution method

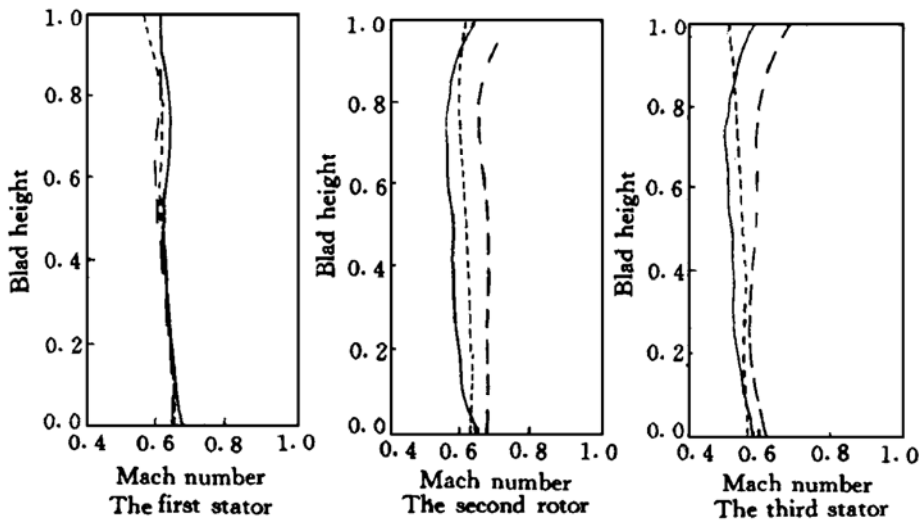


Fig. 3 Mach distribution along the blad height at inlet of stator

_____ Euler solution method
 ----- Flow function method
 Sreamline curvature solution method

不大。图 3、图 4 表明在静叶中这三种方法的计算结果的差异也是不显著的。另外，我们可以看出无论是静叶还是动叶在第一级的计算结果都吻合的十分好。这是因为在第一级没有误差的积累。而在后面级中由于前面级差异的积累造成差异加大，并不是计算方法的原因。因此在应用三种方法对多级轴流压气机的计算中后面级的计算结果差异要相对大一些。同时三种方法对边界的敏感程度不同，所以在边界变化较大（如第一级动叶进口根部轮毂较大的曲率）的地方其计算结果的差异也较大。NASA 的一些文献表明，不同的叶型，不同的工况甚至在不同叶高区域中，三种计算方法的计算精度也不同。有时这种方法更接近实验值，有时

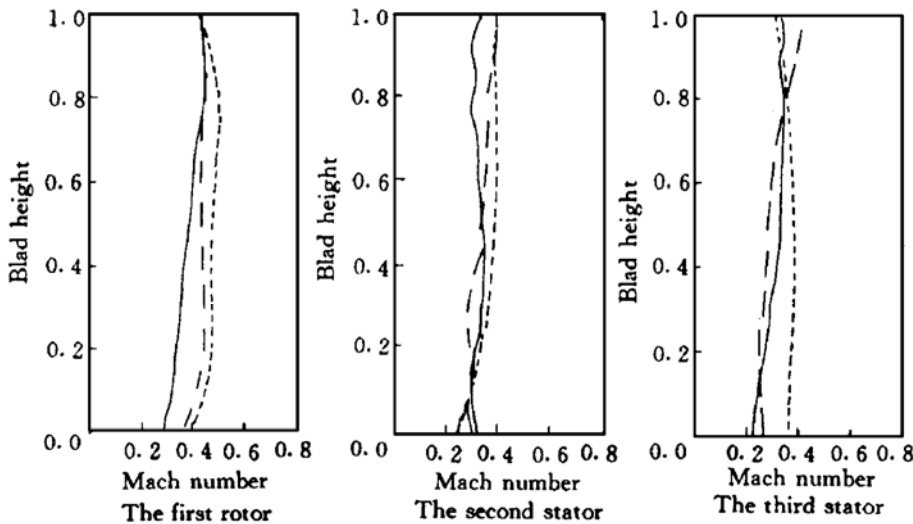


Fig. 4 Mach distribution along the blade height at outlet of stator

———— Euler solution method - - - - - Flow function method Streamline curvature solution method

另一种方法更接近实际。因此在工程设计中应根据实际情况灵活运用这三种方法进行气动设计。

5 结 论

(1) 在叶栅环发生全部堵塞时，由于给定流量和数值格式方面的问题，在正问题的计算中，利用流函数、流线曲率法求解比较困难，建议采用求解原参数欧拉方程的欧拉法。

(2) 在流函数 S_2 流面求解过程中，在正问题时只要 S_2 流面分速度超音，主方程就为双曲型，同时存在密度双值问题。在反问题计算时，只要子午分速不超音，方程仍为椭圆型，不存在密度双值问题。在多数跨音压气机中，一般子午分速不超音而 S_2 流面速度却超音。因此建议在 S_2 流面流函数计算中采用反问题计算。

(3) 从总体参数的计算准确性来看，流线曲率法较另外两种方法具有更高的精度。同时考虑到流线曲率法使用的主方程中各项物理意义明确，易于比较各项的大小，所以在进行优化设计时采用流线曲率法比较适宜。

(4) 三种方法中以流函数法计算速度最快，并且所需时间同另外两种方法不在同一量级上，因此在初步方案的选定及损失的计算中采用流函数法，可以大幅度减少设计方案所需时间。由于对边界条件及子午型线的敏感性比较强，所以欧拉法更能体现端壁参数的变化。另外欧拉法计算初值中不需给出流量，因此在优化设计中考虑对流量的影响时，欧拉法更为直接和可靠。

(5) 由于三种方法均属无粘计算，所以损失模型及落后角的修正将最终决定它们的准确性。

基于以上结论，并且从不同工况下，甚至沿叶高的不同区域内三种方法的计算结果和实验结果的吻合程度上看，还没有足够的理由说明究竟哪一种方法更好些。所以本文建议在设计过程中应抓住问题的主要矛盾，灵活运用三种方法分析问题。

参 考 文 献

- 1 Novak R A. Streamline curvature computing procedures for fluid problems. ASME Journal of Engineering for Power, 1961, 10: 478~490.
- 2 Marsh H. A digital computer program for through-fluid mechanics in an arbitrary turbomachine using a matrix method. Aeronautical Research Council R & M No. 3509, 1968.
- 3 舒士甄, 葛满初, 蒋滋康. 叶轮机械原理. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- 4 刘凤君. 弯扭叶片在汽轮机工程设计中的应用研究: [学位论文]. 哈尔滨工业大学, 1994.
- 5 傅德薰. 流体力学数值模拟. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- 6 林星山. 压气机文集. 航空科技情报所, 1989.
- 7 Monsarrat N T, Keenan M J, Tramm P C. Design report single stage evaluation of highly loaded high mach number compressor stages. NASA CR-72562, 1960.
- 8 Davis W R, Miller D A J. A comparison of the matrix and streamline curvature method of axial flow turbomachinery analysis from a user's a point of view. ASME SA, 1975 (4)

简 讯

波音公司加速高超音速武器发展

波音北美公司已完成超燃冲压发动机推进的骑波升力体的风洞初步试验。当前,该公司期望美国国防高级研究计划局(DARPA)支持此项研究作为未来高超音速武器研制的一部分。

当从 NASA Myper-x(高超音速试验研究飞行器)计划的初始阶段开始研究时,要求就被提出来了,这将对首次使用 $Ma > 5$ 的非火箭推动的大气层飞行器进行验证。Hyper-x 和新提出的高超音速武器族一样,将采用吸气式超燃冲压发动机技术,包括波音北美公司在内的一个小组一直在研究。

该公司的高级计划管理人塞特·桑福德认为高超音速飞行器能够跟踪关键时刻的目标,所以制造这种飞行器是很重要的。他还声称要在加利福尼亚的风洞中进行有关骑波外力体的试验,还要在 NASA 兰利中心做这种试验。并说研究目的是要研究“快速反应防区外发射武器”的弹体和推进技术。他们已经完成初步研究并希望将获得美国海军和 DARPA 的支持。

波音公司认为很感兴趣的一些理由是吸气式高超音速导弹内不需要携带燃料用的氧气,所以结果可能小得多,故用射程换取有效载荷。

热防护用碳结构复合材料和低密度聚合物烧蚀材料也在研究。这有可能提高推进剂的百分率而不影响射程/有效载荷,也将更好地攻击坚固的目标,这种高速导弹在常规飞机进行空中突击时会提供理想的防御抑制武器。

研究的许多技术将在 Hyper-x 计划中进行试验,约在 1998 年 11 月和四个研究飞行器中的第一个一起进行飞行试验,每个飞行器约长 3.5m,翼展为 1.6m。这时飞行器由轨道科学公司的改进火箭助推,由 NASA 德赖登的 B-52 试验飞机投放。第一个 Myper-x 飞到 $Ma = 7$,第二个可能飞到 $Ma = 5$ 。2000 年后期和 2001 年,第三和第四个飞行器分别达到 $Ma = 10$ 。

(龙玉珍 供稿)

涡轮泵转子工作转速的模糊可靠性 确定方法及其应用*

郭凤英 何洪庆

(西北工业大学航天工程学院,西安,710072)

摘要: 针对涡轮泵转子共振失效的特点,分析了转子工作状态超界的隶属函数,详细讨论了隶属函数中有关参数的确定方法,建立了转子工作转速模糊可靠性计算模型,推导出工作转速的计算公式,并与常规的工作转速确定法进行了比较。

主题词: 液体推进剂火箭发动机,转子转速,模糊数学,可靠性设计

分类号: V434.21

THE FUZZY RELIABILITY DESIGN METHOD FOR WORKING ROTATION SPEED OF TURBOPUMP ROTOR ASSEMBLY AND ITS APPLICATIONS

Guo Fengying He Hongqing

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: The determination of critical rotation speed of turbopump rotor or the transition of operating rotation speed from admissible to inadmissible, or the rotor condition changing from normal to fault, are evolutionary process, namely, fuzzy events. Aiming at the feature of resonance of the rotor, the fault membership function of the working state is analyzed. The determination of related parameters in the membership function is discussed particularly. The fuzzy reliability computing model of working rotation speed of the rotor is set up. The computing formula of the working rotating speed is derived and compared with the usual determining method.

Subject terms: Liquid propellant rocket engine, Speed of rotation, Fuzzy mathematics, Reliability design

1 引言

涡轮泵是液体火箭发动机的关键部件,其性能好坏,工作可靠与否对发动机的性能影响很大。高速转动的涡轮泵工作转速必须避开其临界转速,否则,较大的机械振动将引起涡轮泵参数的波动,泵后流量和压力的波动将导致燃烧室喷雾参数的波动,如与燃烧室的压力波动耦合,则将发生不稳定燃烧。当工作转速处于发生共振的临界转速区时,剧烈的振动将使转动零件与固定的壳体碰擦,造成轴承破坏、轴断裂、密封破坏或相碰擦的转动和静止零件破坏等,严重时将引起氧化剂和燃料接触,发生爆炸。然而,工作转速离开临界转速的区间多大为合理呢?本文从可靠度的角度,用模糊理论来确定。