

叶轮机械新流型探索刍议*

北京航空航天大学 刘景梅 周 盛

【摘要】 从“流型”的角度,对比飞行器空气动力学和叶轮机械气体动力学的发展历程,认为叶轮机械内的流动仍在追求定常附体流型,由于其流动及结构特性,使得“有害”分离问题难以避免。本文提出应探索将外流领域内的定常脱体涡流型或下一代非定常脱体涡流型引入到叶轮机械的可能性与技术途径。本文并综述了上述探索性研究的有关背景和现状,以及所设想的基本途径和影响因素。

主题词: 流型 脱体涡 非定常流动 分离流

分类号: V 231. 3

1 引言

纵观百年来外流的研究进程,流型可以说始终贯穿其中。随着流型问题从附体流型到目前广泛采用的定常脱体涡流型以及正在研究发展中的下一代非定常脱体涡流型,飞行器也经历了几次飞跃。但是与外流相对应的另一分支,叶轮机气动力学在流型方面的工作却相对平淡些,至今仍徘徊在实现第一代附体流型的阶段,就航空发动机来说,要想大幅度的提高风扇/压气机性能尚存在不少困扰并相当艰巨,困惑究竟在哪里?本文拟针对作者所从事的叶轮机械气动力学这一分支的研究概况,从“流型”的角度做一思考与综述。

2 飞行器空气动力学中的几代流型

流型的概念是普朗特教授首先推出的。具体是指飞机机翼的一类稳定而易于控制的流动。随着航空科技的发展,已出现了几代流型,人们对于流动分离的认识深化和对旋涡的利用,构成了区分几代航空流型的重要标志。

众所周知自然界中存在着很多钝体。在钝体之后将形成大尺度分离区和非定常涡。为了描述这种具有大尺度分离区的钝体绕流,过去多使用柯希霍夫死水区模型。与之对应,在叶轮机中如平面叶栅分离流这种大尺度分离流可以说是百害而无一利。

第一代定常附体流型针对有害的大尺度分离现象开创了历史性的变革。从二维翼型的升力与环量之间的关系开始,由于附面层理论的提出而揭开了达朗贝佯谬的迷雾,再加上稍后些时候的三维有限翼展理论,上述诸观点相互结合导致了空气动力学理论的第一次飞跃,意味着第一代定常附体流型的诞生。从流动分离的角度来看,就是力求避免诸如钝体绕流那种有害的大尺度分离流,所以针对翼型尖后缘提出的库塔-儒柯夫斯基条件意味着尖后缘处上下翼表

面近壁涡层的汇合。从旋涡角度来看,第一代定常附体型也就被称为附着涡流型。这种第一代航空流型的诞生,为人类乘载重航空器提供了理论依据,与由柯希霍夫死水区模型所描述的自然界广泛存在的钝体绕流相比,当然是巨大的飞跃!

在飞行器设计中,对于这类“附着涡流型”弱旋涡的运动问题,通过大量的研究与实践,已基本趋于解决,60、70年代发展起来的适用于跨音流范畴的超临界翼型技术使这代流型在理论和实践方面都取得了很大进展。

定常脱体涡/混合流型虽然突破了第一代定常附体流型关于分离流必然有害的过时观念的禁区,借助三维前缘分离涡实现了高非线性升力和扩大了可用迎角,但绝非发展到顶峰了。从基本模型和基本假设角度来推敲,突破原一代流型中的定常流基本假设应当是逻辑上合理的延伸。自然界中很多种昆虫都天赋具有在极大可用迎角条件下利用与控制非定常脱体涡升力的能力^[1],这就表明,人利用和控制非定常分离流并不是不可能的。吴建民教授曾多次阐述过这一设想与可能的途径,并将非定常脱体涡流型定义为新一代流型,认为这将导致空气动力学的又一次飞跃^[2]。进入70年代以后,非定常分离与旋涡主动控制的研究,在国际上引起广泛注意。利用弱非定常扰动对流动的激发作用和旋涡的非线性效应,可以达到增升、减阻、获得更高气动效益的目的,它向人们展示了旋涡的巨大潜力^[3]。

“定常脱体涡流型”与“非定常脱体涡流型”之间存在着关联与共性。笔者认为它们的共性在于都要利用前缘分离涡。前缘分离涡主要是由于上、下面压差和速度不同而形成薄的分离涡层。在涡层卷绕过程中,从分离涡层演化观点来看,在短波扰动之下,涡层将很不稳定,光滑涡层会变成波浪形,并进一步卷成一个个离散涡,向下游发展,随着汇合涡量越来越大,反过来影响上游涡层的演化。

对于非定常脱体涡流型说来,由于非定常激发极弱,其振幅大约仅是主流速度的 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 数量级,能量仅为主流能量的 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 数量级,所以探索的主要目的是希望找到合适的外界非定常激发频率,探索涡层对外界激发的感受性^[4],包括最敏感的位置和对应的外激励频率,以期实现涡层演化过程对于特定的外界非定常激发作出最优响应,也就是希望弱的外界非定常激发强制波与涡层自身所固有的不稳定涡波之间发生最强作用。如果能在以定常脱体涡流型为基础的三维机翼前缘分离涡层结构中加入适当的激发,并使得二者之间发生某种“共振”,则可以期望三维机翼脱体涡流的强度与抗破碎能力大大提高。当然,这时应精心选择非定常弱激发波的频率与波数,分析各流动参量之间的相位关系,探讨不同波形的效果,特别是采用怎样的局部结构才有更强的感受性或者可能是自适应性等等^[5]。

非定常流动和旋涡的控制和利用,是当前非常活跃的研究领域,其中蕴藏着巨大的潜力。让我们从外流回过头来看叶轮机械气动力学的发展,是否会有类似的发展过程,以及目前处在什么阶段?

3 叶轮机械内部流动的流型

以跨音压气机转子中的流动为例^[6],由于端壁、叶片表面附面层、叶尖漏流、二次流、角涡和三维激波的存在,以及它们之间的相互作用,并且在多级或有进口导向叶片的情况下,还要受到上游尾迹区影响。从已有的转子内流动数据可知,转子出口处分离区占出口面积的很大一部分,如何控制分离,或减小损失是几代叶轮机气动力学研究人员长期共同追求的目标。如果我们把叶轮机械气动力学同飞行器空气动力学相联系,对比其发展中的气动布局?不难看出,

当代战斗机的气动布局百花齐放,没有雷同的^[7]。然而,如果将世界各国涡轮风扇与涡轮喷气发动机的跨音风扇/压气机进口级加以对照,除尺寸大小不同外,起码是从目测的叶片三维外观形状上很难明确指出从 50 年代到 80 年代在气动布局上的重大改变。从目前的情况来看,显然叶轮机械内的流动仍属于由外流空气动力学中引进移植过来的第一代定常附体流型。这就意味着分离一直被认为是应当力图予以消除的有害因素,也就是没有考虑对于叶轮机内的旋涡流动如何有效利用,于是不同尺度的旋涡随机脱落并相互作用,直至破碎,引起损失剧增。也就是柯希霍夫死水区型分离流动,一直从不同侧面困扰着人们^[8]。然而,从另外角度来看,在叶片表面是难以全面维持第一代定常附体流型的,特别对于风扇和压气机。

由流型的角度来看,如何将新一代流型引入到叶轮机械中去,例如特别是采用怎样的方式才能在叶轮机械中较为自如地实现定常脱体涡/混合流型,或实现下一代非定常脱体涡流型?这是值得关注的问题。

4 叶轮机械中的新一代流型探索雏议

尽管机翼绕流问题中前缘脱体涡的存在与利用已有较长时间,并且相当成功,但关于叶轮机中的前缘脱体涡现象在迟至 1985 年的一个船用螺旋桨叶片实验中才被证实存。在这个实验是在水洞中螺旋桨静止,并且其叶片是直叶的情况下观察到的。真正公开报道在旋转叶片上发现前缘脱体涡的存在是在 1987 年^[9],它是在一个对旋桨扇的叶片表面油流显示实验中观测到的(图 1 示),实验研究了不同负荷工况下前缘脱体涡的存在、位置和大小等,同时也观测到前缘脱体涡的发展情况和它与叶尖涡的归并现象。并且还发现了由于前缘涡的存在,前缘负荷增高。这是首次在叶轮机中发现定常脱体涡/混合流型的存在,此项发现受到相当重视,在美国已被列入 1987 年航空科学进展中。

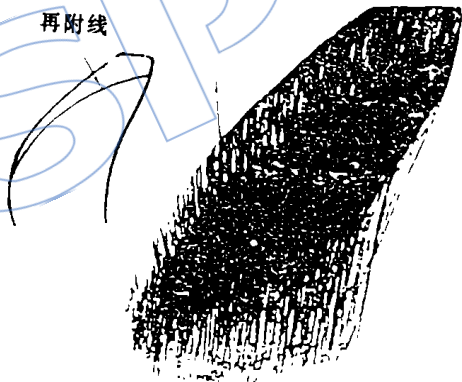


图 1 旋转桨扇上的脱体涡油流显示

在闭式叶轮机械旋转叶片上是否观测到与第一

代定常附体流型所不相同的新流型,迄今为止未见文献公开报道。但叶轮机械中的新流型的研究属于国防关键技术,在近 3 年美国国防部呈送美国国会的“关键技术计划”报告中^[10],每次在 20 项左右的关键技术中都含有“吸气式推进”这一项,而其中“后掠空气动力学”研究处于相当醒目的位置。后掠空气动力学与新一代脱体涡/混合流型密切相关的可能性是难以排除的。美国国防部正在主要针对航空发动机执行一项耗资数十亿美元的“一体化高性能涡轮发动机技术(HPTET 计划)”^[10],在此项庞大计划中,针对风扇和压气机的“后掠空气动力学”占有明显的重要性。美国人期待用单级风扇加 3 级高压气机来实现今天 3 级风扇加 11 级高压压气机所实现的 25 左右的总压缩比。不仅如此,在 1990 年就有文献^[11, 12]报道了一个后掠的跨音风扇级设计,其转子叶片高度后掠,尽管最初大后掠的概念来自于机翼理论中的亚音前缘概念,将它移植到叶轮机中来,原本是为了达到无槽道激波的设计。但时至今日,“后掠空气动力学”的内涵可能就不仅仅是为了它最初提出时的目的了。新一代流型在叶轮机中的作用很可能隐含在许多无意的工程举措中,例如美国的一个低展弦比,高叶尖切线速度的高通流、大负荷跨音

压气机级, 静子叶根做了比较大的前掠, 并要求其静子前缘法向马赫数不大于 0.4, 这个静子的设计是相当成功的, 气流经过静子后级平均效率只比转子效率下降了 2 个百分点, 这比通常要低得多。尽管十多年前设计者并没有把它同流型相关联, 也没有对其内部流场做进一步的测试分析, 但从笔者们的研究观点看, 其中不无可能隐含着新流型的萌芽, 以及由它而获得的收益。由此可见, 当今叶轮机跨音级设计趋势——小展弦比、大后掠的设计特点有可能与新流型的思想相关联。

当今空气动力学不可逾越的障碍, 简而言之, 就是非定常分离流, 可以说所有利用升力的空气动力学设计都尽可能地设法避免有害的分离。可是最新的一些研究表明, 非定常分离流中不仅蕴藏着极大的能量, 而且这些能量还可能转化为升力, 使将来飞机的机动性和可用升力是现代飞机的好几倍, 并称之为“空气动力学的新曙光”。与机翼绕流相比较, 叶轮机机械重要的特征就是高速旋转。由于转/静子交互排列, 存在转/静两套座标系, 在叶轮机流场中存在着的周期性非定常因素要显著和复杂得多, 这也就意味着在非定常流方面它的潜力与机遇也就更多。然而在叶轮机机械领域内部却尚未见到有关新一代非定常脱体涡流型研究的公开报道。

在飞行器领域中, 当前对于新一代非定常脱体涡流型探讨的主流并不是直接探索飞鸟或者昆虫翅膀那种高度灵活的非定常流型, 而是仍以现有的固定式机翼和相应的定常脱体涡/混合流型为基础, 进一步探索弱的非定常激发措施, 来大大加强固定式机翼的前缘脱体涡强度和抗破碎能力。然而在叶轮机机械领域内, 至今仍为经典的第一代定常附体流型所统治, 定常脱体涡流型能否取得大的进展还未知。叶轮机中流动的三维性, 加之径向掺混, 前、后流场的条件也比机翼情况复杂得多, 能否象上述飞行器领域中一样, 在定常脱体涡/混合流型的基础上来发展进一步的非定常脱体涡流型, 还需要验证。很可能针对叶轮机固有的非定常流动特性, 非定常脱体涡流型将直接是叶轮机机械研究领域的一个新机遇。而这项探索可以从外界弱的非定常激发做起。

这里需要一提的是, 目前文献中关于主动控制技术的报道相当多^[13-15]。主动控制技术作为一种技术手段来说, 它不涉及压气机叶片的几何形状与流动情况, 也就是从传统意义上并没有使流型更新换代, 它的目标更多的是集中在使用什么手段来增加压气机系统的气动稳定性。但主动控制技术在流型的探索中也有一定的借鉴和启发作用。特别是在它的进一步发展中, 渐渐也成为揭示流动本质的一种手段^[16,17]。将主动控制的概念与流动感受性、稳定性研究相结合, 也取得了不少进展。尽管它们的对象还显得抽象和简单, 但它对内流问题基本模型的建立有可能将会有很大帮助。

将新一代流型概念引进到叶轮机机械中来, 将意味着更高的效率、更少的级数、更快的叶尖切线速度、更宽广的稳定运行范围以及更良好的机组运行可靠性和结构完整性。原苏联战斗机苏-27 能够做出与前飞方向呈 $110^\circ \sim 120^\circ$ 夹角的普加乔夫眼镜蛇高难度飞行动作, 这种战斗机就是以定常脱体涡/混合流型为基础来进行气动布局的^[18]。如果将类似思路引入到叶轮机机械中来, 对于防止失速、扩展压缩系统稳定工作范围将有可能带来巨大的裨益。

5 结束语

在摆脱原始的第一代定常附体流型束缚和探索适用于叶轮机机械的新一代流型时, 既要充分借鉴目前外流领域新流型方面的已有成果, 还需要考虑到开式与闭式各类叶轮机机械的具体结构与流动特点, 例如: 旋转效应、转/静子交叉排列引起的非定常性、同一叶片排间的干扰作

用、闭式机匣以及跨音级内三维激波、二次流、叶尖漏流的存在和交互作用。考虑在这些具体结构特点下建立新模型,利用外界弱的非定常激发来研究分离、旋涡等对激发的感受性、稳定性和相应的控制手段。看来是很有吸引力的!

感谢自然科学基金会和光华基金会,他们从不同方面对本项研究提供了有力资助。感谢童秉纲、崔尔玺、李素循、吴介文诸位教授所给予的指教和启发^[19,20]。

参 考 文 献

- 1 Maxworthy T. Experiments on the Weis- Fogh Mechanism of Lift Generation by Insects in Hovering Flight J. Fluid Mech. 1979, 93: 47- 63
- 2 Reynolds, W C and Carr, L W. Review of Unsteady, Driven, Separated Flows AIAA 85- 0528, 1985
- 3 Wu J Z, Vakili, A D and Wu J M. Review of the Physics of Enhancing Vortex Lift by Unsteady Excitation. Prog Aerospace Sci, 1991, 2: 73- 131
- 4 Goldstein M E and Hultgren L S. Boundary- Layer Receptivity to Long- Wave Free- Stream Disturbances Ann. Rev. Fluid Mech. 1989, 21: 137- 166
- 5 吕志咏, 黄政. 平板扰动片振动诱导涡运动研究. 北京航空航天大学学报, 1986, 4
- 6 任汝根, 周盛. 叶轮机械中的非定常流动. 燃气涡轮试验与研究, 1991, 4: 1- 24
- 7 卢成文主编. 世界飞机手册. 航空工业出版社, 1988, 12
- 8 Hah C N. A Viscous Flow Study of Shock- Boundary Layer Interaction, Radial Transport, and wake Development in a Transonic Compressor. ASME 91- GT- 69, 1991
- 9 Vaczy C M and McCormick D C. A study of the Leading Edge Vortex and Tip Vortex on Prop- Fan Blades. ASME 87- GT- 234
- 10 美国国防部呈送美国国会的“关键技术计划”. 1989, 1990, 1991, 航天部情报所译.
- 11 Neubert R J, Hobbs D E and Weingold H S. Application of Sweep to Improve the Efficiency of a Transonic Fan, Part I. Design AIAA 90- 1915
- 12 Rabe D C, Hoving D A and Koff S G. Application of Sweep to Improve the Efficiency of a Transonic Fan, Part II, Performance and Laser Test Results. AIAA 91- 2544
- 13 Epstein A H, Ffowcs Williams J E and Greitzer E M. Active Suppression of Aerodynamic Instability in Turbomachines. J. Propulsion, 1989, 5(2)
- 14 Ffowcs Williams J E and Huang X Y. Active Stabilization of Compressor Surge. J. Fluid Mech. 204: 245- 262
- 15 Pinsley J E, Guenette G R, Epstein A H and Greizer E M. Active Stabilization of Centrifugal Compressor Surge. ASME Paper 90- GT- 123
- 16 Garnier V H, Epstein A H and Greitzer E M. Rotating Waves as a Stall Inception Indication in Axial Compressors. ASME Paper 90- GT- 156
- 17 Longley J P. A Review of Non- Steady Flow Models for Compressor Stability. ASME Paper 93- GT- 17
- 18 傅前哨, 邵辽婴. 也谈眼镜蛇动作的特点及战术意义, 国际航空, 1992, (3): 34- 36. 19 吴介文, 马晖扬, 周明德. 涡动力学引论. 高等教育出版社, 1993
- 20 童秉纲, 张炳暄, 崔尔玺. 非定常流与涡运动. 国防工业出版社, 1993

(责任编辑 魏星禄)

SURVEY PAPER

PRELIMINARY SEARCH FOR NEW FLOW - TYPES IN TURBOMACHINERY

Liu Jingneil and Zhou Sheng

(4th Dept Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT As viewed from flow - types, the developing process of aircraft aerodynamics is compared with that of turbomachine gasdynamics. For the branch of turbomachine's gasdynamics, it is found that the steady body-fitted flow - type is still the searching object. However, the entire body-fitted flow - type is impossible. It means that the unexpected separations in turbomachinery can not be eliminated. And our comparison has shown that, as for the development of flow - types, the branch of turbomachine's gasdynamics lags considerably behind the branch of aircraft aerodynamics! Some of the suggestions, with regard to the possible ways of introducing new ideas of flow - types from aircraft aerodynamics into turbomachine gasdynamics, are presented in this paper.

Key words Turbomachines Vortex flow Non-steady flow Separated flow

FULL - LENGTH PAPERS

AEROACOUSTIC SOLUTION OF TURBOMACHINERY IN FREQUENCY DOMAIN

Ju Hongbin

(Dept. of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Zhong Fangyuan

(Shanghai University, Shanghai 20003)

ABSTRACT According to the sound radiation solution of rotating source in frequency domain, formulae of noise sources in turbomachine have been derived. Then the detailed aeroacoustic solutions of the sound field in the turbomachine, the blades of which are thin and bent slight in the mid-chord alignment were obtained. The result is suitable for near sound field analysis. Moreover the influence of geometric parameters and operation conditions are explicitly expressed in the frequency domain solutions.

Key words Turbomachines Frequency domain analysis Aerodynamic noise

EFFECT OF SMALL RADIAL DISTORTION OF INLET FLOW ON STALL FLUTTER IN AXIAL FLOW COMPRESSOR

Feng Yucheng, Zhao Xihua, Hu Zongan, Ji Tu, Wang Yunwei

(4th Dept Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT The effect of small radial stagnation pressure distortion of inlet