

· 成果简介 ·

# 叶轮机械内部真实流动研究的某些进展

陈佐一 叶大均

(清华大学, 北京 100084)

[关键词] 叶轮机械, 振荡流体力学, 流场诊断

## 1 研究背景

叶轮机械安全性与经济性的改善对经济发展有举足轻重的影响。在安全性方面, 除机械原因引起的应力过载与振动超标外, 因气动非定常力与机械振动耦合产生的流体激振特别是叶片通道内分离流引起的振动是极重要的破坏诱发因素。在提高叶轮机械气动性能以改善经济性方面, 除了提高二维叶栅的升力及减少阻力外, 减少二次流损失是最重要的技术措施。叶轮机械研制周期往往长达5—10年, 耗资巨大。因此, 缩短周期, 减少在研机械的调试费用有重要意义, 而流场诊断技术在此可发挥重要辅助作用。

鉴于叶轮机械的研究已经比较深入, 简单的个别的模型已经难于解决上述实践中提出的问题, 必须从基础上建立比较本质的物理模型, 应用现代数学与物理手段, 力求在对问题的本质获得较透彻理解的基础上作出一些可用于工程实践的技术成果。我们在国家自然科学基金支持下(包括重点基金和多项面上基金), 对叶轮机械内部真实流动数学和物理模型的研究取得了决定性的进展。

## 2 取得的主要成果

(1) 叶轮机械振荡流动的数学物理模型的研究及在此基础上建立的振荡流体力学体系  
叶轮机械内的非定常流动是其真实流动的最本质的特征之一, 而在非定常流动中, 随时间作周期性变化的振荡流则是最为基本而且工程意义最为重要的一种流动, 是研究各种流体激振的关键, 它直接关系到叶轮机械的安全性, 如叶片颤振, 气封与叶片围带间隙的间隙流激振, 级间抽气引起的叶片激振, 进口流场畸变或静叶出口不均匀而对于下排动叶的激振, 调节阀杆振动对下游的气流激振等等。而各种激振的稳定性分析, 归根到底取决于围绕各种被激振的物体的振荡流场的性质。因此, 求解在各种流动条件下和各种振动条件下的振荡流场, 就成为研究叶轮机械气动安全性的最重要的内容。我们通过对叶轮机械振荡流场数学物理模型的研究, 建立了振荡流体力学体系, 建立了振荡流体力学的基本方程组和振荡边界条件, 并给出了在各种流动条件和物体振动条件下振荡流场的求解方法, 出版了《振荡流体力学》专著, 在国内外学术刊物和学术会议上发表了近50篇论文, 受到国际学术界的重视。

(2) 二次流动 二次流动源出于流动的粘性效应。在叶轮机械级的进口, 由于两个端壁的存在, 产生了叶栅通道内垂直于主流方向的横向流动, 即叶栅二次流; 存在于三维叶片中

---

本文于1995年12月5日收到。

的径向潜流以及叶栅二次流与端壁边界干扰耦合而成的角隅区流动。这些流动的物理机制十分复杂,在目前的实验技术及计算水平上,还难于准确地模拟其流动及预估其流动损失。

课题组首先从实验上详尽地研究了叶栅二次流,通过热线对叶栅通道内部的二次流场进行测量,并对比了进口附面层厚度对二次流场的影响,拟定了无粘模型分析二次流场的数学方法,得到二次流损失的预估模型;继而,又分析了进口流场及环量分布对径向潜流的影响,从实验上总结了径向潜流的生成原因及降组的方向。这两部分的研究工作既为设计现代三维叶片积累了物理认识,也为减少二次流损失的技术措施(如弯扭联合成型的三维叶片设计)提供了技术基础。本研究还同时取得了航空部发动机预研的支持。

(3) 叶栅分离流 在现代高负荷叶轮机械中,部分的分离流动是难于完全避免的,特别是在多级叶轮机械的变负荷运行工况中,分离流动往往会引起整个机械的性能恶化。我们在二维收敛叶栅通道内进行了详尽的实验研究,搞清了分离条件、再附可能以及分离区的轮廓线,拟定了采用无粘模型条件下工程上可以接受的流型。继而又做了三维扩散型叶片通道内大攻角流动的测量,该研究成果受到国际学术界的重视。对于叶轮机械设计而言,要设法尽量避免分离流或减少其对性能恶化的影响。近年来国际国内都有学者提出如何积极地利用分离涡以增加叶片升力和改进叶轮机械的性能,这一问题的研究还在深入进行中。

上述几项的综合研究成果已获国家教委科技进步二等奖。

(4) 流场诊断技术 课题组发展了一项流场诊断技术,即在有限的工程上许可的测量数据支持下,利用数学模型猜测复杂的多级压气机内的流场细节,以便准确判断真实流动与设计预想流场间的差异,求得调整改进的方向,以节约研制费用。从数学上看,这是一项不适定的微分方程组求解过程,难度很大。我们在发动机研制部门的支持下已经获得初步成果,诊断程序已经实现了实用化,在发动机研制过程中发挥了作用,并已得到国家攀登计划研究课题的继续支持。

(5) 求解叶轮机械内复杂流动的超快速方法——参数多项式方法的建立 叶轮机械真实流动是极其复杂的,在当前条件下要完全依靠求解完整的全 N-S 方程来进行研究,还有相当大的困难,而工程应用对于求解真实流动又提出了迫切的要求。因此,寻求一种快速有效的数值方法,既符合真实流动的机理(即建立在求解 N-S 方程的基础上),又有一定条件的适于工程应用的简化,这一研究具有重要的应用基础研究的意义。参数多项式方法依据复杂流动中任一流动参数总是可以表达为其坐标变量多项式的原理,将求解基本方程中的流动参数,转化为求解参数多项式系数,从而将偏微分方程化为常微分方程求解,简化了计算过程。这个超快速计算的数学模型研究,已在多种工程研究中得到了应用。

### 3 基础研究向工程应用的转化

叶轮机械内部真实流动的物理数学模型的基础研究成果已经在工程中得到了很多应用。应用振荡流体力学研究成果进行了“七五”攻关子课题“风力透平叶片气动弹性稳定性分析”的研究;“八五”攻关子课题“汽轮机内各类流体激振机理研究”;与哈尔滨汽轮机厂、东方汽轮机厂等合作进行“叶片颤振”、“气封间隙流激振”等研究,与东北电力集团进行调峰机组气动安全性研究等。

我们通过多年来的研究实践深深体会到,在热力设备的气动热力学领域中,直接从工程问题来解决工程问题,往往只能解决局部性的问题,而且经常无法推广到普遍的情况。反

之，如果只有一些规律性的研究而不深入地向技术应用领域延伸，则问题解决不深不透，也得不到应用部门的真正重视。研究人员的基础与应用研究的结合，基金会及应用部门的交叉支持，才能得到科学与技术成果的真正丰收。

## OME RESEARCH PROGRESS OF REAL FLOW IN TURBOMACHINERY

Chen Zuoyi      Ye Dajun

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

**Key words**    turbomachinery, oscillating fluid mechanics, flow field diagnosis

---

# 中国的中生代鸟类化石

侯连海

(中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044)

[关键词]    中国, 中生代, 鸟类的起源和进化

我国鸟类化石研究起步较晚，而中生代鸟类化石的研究仅开始于本世纪 80 年代。甘肃鸟 (*Gansus*, Hou and Liu, 1984) 的发现和研究表明了这一研究领域的开端。自 80 年代末以来，在中国科学院特别支持费和国家自然科学基金会的支持下，我国辽宁朝阳地区陆续发现了大量晚侏罗世—早白垩世的鸟类化石和羽毛化石。另外，在内蒙古、河北的相近地层中又发现了更多的鸟类骨骼化石。并且，在山东、宁夏等地区也发现了中生代鸟类羽毛化石。这引起新的发现不仅丰富了世界中生代鸟类的种类和数量，而且将鸟类进化和适应辐射的时间向前大大推移。

1995 年初，笔者应邀在浙江博物馆短期工作时，鉴定和观察一产自浙江临海地区晚白垩世的一原始鸟类化石，其前肢构造简单，相当原始，有一长尾，但颌没有牙齿。这又为我国中生代鸟类地史分布填补了一重要空白。

迄今为止，我国发现的中生代鸟类化石，采集之丰富，分布之广泛和地层层位之多是世界其他国家所不能相比的。尤其在辽宁朝阳地区，可以说发现了一座早白垩世鸟类化石库，已采获计几十件标本，在晚侏罗世地层中也已采集到八件保存都相当好的带羽毛印痕的标本，另外还有许多块羽毛化石。而德国始祖鸟化石，自 1861 年至今，连同一枚羽毛总计才 7 件标本。近几年，我国在国内外重要学术刊物发表十余篇研究论文，这些文章有对某些化

---

本文于 1995 年 9 月 28 日收到。