

申请博士学位论文

离心式叶轮内叶栅通道流场的研究

研究生姓名: 武晓松

学科、专业: 航空发动机

研究 方向: 叶轮机空气动力学

江苏工业学院图书馆
藏书章

南京航空学院

一九九〇年八月

**STUDIES ON BLADE-TO-BLADE
PASSAGE FLOW FIELD OF A
CENTRIFUGAL IMPELLER**

**A Dissertation for the Degree of Doctor
of Engineering in the Department of
Power Engineering**

By

WU XIAOSONG

Under

The Guidance and Supervision of

Prof. WU GUOCHUAN

**NANJING AERONAUTICAL INSTITUTE
AUGUST, 1990**

摘 要

本文用二维激光多普勒测速仪测量了离心叶轮进口和旋转叶片通道内的流场。研究表明,激光测速仪作为一种先进的非接触式测速仪器在旋转流场特别是流道高度很小的离心旋转流场的研究中较之传统仪器更合适、更方便。使用激光测速仪测量旋转流场所要解决的一个主要问题是测点空间位置的定位问题,本文针对离心叶轮的特点,设计了一种定位方法,称为旋转测量窗。这种方法的基本原理是利用旋转叶轮的不透明轮盘或轮盖对发射激光束的阻挡作用,使激光束只有在叶轮转到某些指定位置时才能通过实现的。用旋转测量窗对测点的空间位置进行定位具有结构简单,定位可靠和使用方便等特点。这种方法的一个突出优点是测点定位装置完全独立于激光测速系统,因而对任何激光多普勒测速仪都是适用的。然而,旋转测量窗的突出问题是窗口效应问题。本文经过实验研究和理论分析发现,如果旋转窗口与测量体积靠得太近,窗口本身的旋转速度信号将会进入测速仪的接收系统从而掩盖流场速度信号。消除窗口效应的方法是尽可能使测量体积远离旋转测量窗或适当地调整光学接收系统。

本文用旋转测量窗定位方法对离心叶轮叶片通道的旋转流场进行了实际测量。对实验数据进行的分析表明,由于叶片数有限的影响,叶片通道中等半径截面上的相对速度分布型在大部分通道中向吸力面一侧倾斜,而在叶片出口附近则向压力面倾斜。然而与许多同类文献中的测量比较,本文的实验模型由于叶片数相对较多,因而相对速度的分布型比较饱满。

本文首次将平均雷诺方程的数值求解技术与激光测速仪结合起来研究离心叶轮旋转通道内的流动。在适体曲线坐标系上相继计算了二维直通道、平面叶栅和离心旋转平面叶栅的湍流流场，与相应的实验数据比较，两者的吻合是令人满意的。对离心叶轮进行的计算表明，数值结果能够反映叶片通道内部的真实流动情况，湍流动能和湍流动能耗散率的计算值能够定性地反映真实分布规律。本文的数值计算程序具有通用性强、稳定性和收敛性均较好以及收敛速度较快等特点。

本文在任意适体曲线网格生成中研究了泊松方程非齐次源项对网格贴体的影响，并提出了一种源项计算方法。使用这种源项可以使曲线网格准确地实现贴体并大大加快了网格生成速度。

Abstract

The inlet and blade-to-blade flow fields of a centrifugal impeller were measured using two-dimensional laser Doppler anemometer in the present paper. It is shown that laser anemometry, as a non-intrusive anemometer, is more suitable and convenient than traditional instruments in application to rotational flow fields, especially to the flow within centrifugal impellers which have only small width of flow passage. One important problem of laser anemometer application to rotational flows is the measurement of blade rotational position. A method of determining blade position, called rotational measurement window, was developed in the present paper according to features of centrifugal impellers. The principle of the method is to use a hole window which allows transmitting laser beams to pass only when the impeller rotates to positions assigned. The method has some features such as simple structure, reliable positions of measurement points and convenient applications. The outstanding advantage of the method is that the position measurement device undepends completely on anemometry system. An important problem, however, is the window effect. With experimental study and theoretical analysis, the present paper discovered that if the distance between the measurement volume and the window is too small, signals of window rotational speed will enter into receiving system of the anemometer and disturb or even submerge flow velocity signals. To eliminate the window effect, the distance should be set as possible as large or the optical receiving system should be properly adjusted.

The blade-to-blade passage flow field of a centrifugal impeller was measured in the present paper with the rotational measurement window. Analysis to the measurement data shows that, due to number of the blades is limited, the relative velocity distributions in equi-radius slope to suction surface in most part of the passage, and slope to pressure surface near the blade outlet. However, being compared with many other measurements, velocity profiles of the present paper are more full owing to relatively more blades of the centrifugal impeller.

The present paper combines the numerical solution of mean steady Navier-Stokes equations with laser Doppler anemometry for the first time to study the blade-to-blade passage flow field of a centrifugal impeller. Turbulent flow field calculations of 2-D straight channel, plane cascade and centrifugal rotational cascade were completed. The calculation results are in good agreement with the corresponding experimental data. It is shown that the numerical results of calculation of centrifugal impeller flow field can reflect the real circumstances, and turbulent kinetic energy and dissipation rate can simulate qualitatively the real distributions. The present algorithm is universal, and has good stability and convergence. The convergent speed is comparatively rapid.

The flow governing equations were solved in arbitrary curvilinear boundary-fitted

grid system. The present paper studied the effects of non-homogeneous source terms of Poisson equations on the boundary fitting grid. A method of source term calculations was suggested. With which, the grid fits boundary lines very well and grid generating can be speeded up greatly.

主要符号说明

A	控制方程系数
b	叶片高度
B, B^u, B^v	速度修正系数
C	光速; 绝对坐标系合成速度; 速度修正系数, 平面叶栅弦长; 有限控制体积
C^u, C^v	速度修正系数
C_1, C_2, C_μ	湍流模型系数
C_P	压力系数
C_r	旋转叶轮通道内气流的绝对径向速度
C_u	旋转叶轮通道内气流的绝对周向速度
D_1, D_2	离心叶轮叶片进出口直径
e	有限控制体积东侧边界面
E	有限控制体积东侧相邻网格点; 壁面函数常数 (9.793)
f	任意二阶连续可导函数, 真空光频率
f_d	多普勒频率
G	湍流动能生成
G_1, G_2	任意曲线坐标系当量速度
i	下标变量 (ξ 方向)

j	下标变量 (n 方向)
J	坐标变换的雅可比行列式
k	湍流动能
l	离心旋转叶栅叶片弧长
n	叶轮转速; 有限控制体积北侧界面
N	有限控制体积北侧相邻网格点
P	压力; 泊松方程非齐次源项; 有限控制体积中心网格点
P'	修正压力
Q	泊松方程非齐次源项; 流量
r	相对坐标系位置半径
Re	雷诺数
s	有限控制体积南侧界面
S	有限控制体积南侧相邻网格点; 控制方程源项
S_C, S_P	源项线性化系数
t	时间
u	相对坐标系 x 方向速度
u_1, u_2	旋转叶轮叶片进出口旋转速度
u'	湍流脉动量; 速度修正
v	相对坐标系 y 方向速度
v'	湍流脉动量; 速度修正
w	有限控制体积西侧界面

$\vec{w}$	相对坐标系速度矢量
w	有限控制体积西侧相邻网格点; 平行于固体壁面的速度
w_τ	摩擦速度
w^+	平行于固体壁面的无量纲速度
x	相对直角坐标
y	相对直角坐标
z	离心旋转叶栅叶片数; 壁面法向距离
z^+	无量纲壁面法向距离
α	坐标变换参数; 低松弛因子; 栅距角
β	坐标变换参数
β_{1A}, β_{2A}	旋转叶轮叶片进出口安装角
γ	坐标变换参数
Γ	扩散参数
δ	叶片厚度
Δ	误差分量
$\varnothing$	通用因变量
ξ	任意曲线坐标
η	任意曲线坐标
θ	入射激光束夹角
κ	卡门常数

μ	流体粘性系数
μ_t	涡粘性系数
μ_e	有效扩散系数
ρ	流体密度
σ	合成不确定度
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	湍流模型常数
ω	叶轮旋转角速度
τ_w	壁面剪切应力
ϵ	湍流动能耗散率

目 录

主要符号说明

第一章 前 言	1
§ 1—1 叶栅流场研究和激光测速仪	1
§ 1—2 用 L A 测量旋转流场所需要解决的主要 问题	5
§ 1—3 L A 应用于旋转流场测量在国外的 发展	9
§ 1—4 L A 在我国叶轮旋转流场研究中的 应用现状	13
§ 1—5 叶轮机械流场的数值预测技术	14
§ 1—6 本文的目的与主要工作	16
第二章 实验模型和 L D A 系统	19
§ 2—1 离心风机实验模型	19
§ 2—2 测点定位方法和测点布置	20
§ 2—3 激光测速仪原理	22
§ 2—4 激光多普勒测速仪简介	23
第三章 实验研究	27
§ 3—1 窗口效应研究	27
§ 3—2 叶轮进口流场测量	30

§ 3—3 离心旋转叶栅通道流场测量·····	3 1
§ 3—4 测量误差分析·····	3 3
§ 3—5 结 论·····	3 9
第四章 离心叶轮旋转叶片通道流动的控制	
方程·····	4 1
§ 4—1 引 言·····	4 1
§ 4—2 控制方程·····	4 2
§ 4—3 湍流模型·····	4 5
§ 4—4 任意曲线坐标系上的通用输运方程·····	5 3
第五章 数值求解方法·····	
§ 5—1 网格系统和有限体积法·····	5 7
§ 5—2 通用输运方程的数值离散·····	5 9
§ 5—3 源项的积分与线化处理·····	6 5
§ 5—4 压力修正方程·····	6 9
§ 5—5 压力修正方程的改造·····	7 4
§ 5—6 近壁区处理(壁面函数)·····	7 9
第六章 网格生成·····	
§ 6—1 叶栅通道曲线网格生成方法·····	8 4
§ 6—2 适体曲线网格自动生成·····	8 8
§ 6—3 关于非齐次源项的讨论·····	9 2
§ 6—4 非齐次离散源项·····	9 3

第七章 二维直通道和平面叶栅流场计算.....	97
§ 7—1 引 言.....	97
§ 7—2 二维直通道湍流流场计算.....	99
§ 7—3 平面叶栅湍流流场计算.....	102
第八章 离心旋转叶栅流场计算及与 L D A数据的对比分析.....	105
§ 8—1 离心旋转平面叶栅求解域和网 格生成.....	105
§ 8—2 离心旋转叶栅湍流流场数值计算.....	106
§ 8—3 数值计算结果与 L D A数据的 对比和分析.....	108
§ 8—4 主要结论.....	110
第九章 结 论.....	111
致 谢.....	114
参 考 文 献.....	115
附录2—1 后弯式离心叶轮设计	123
附录4—1 通用输运方程和连续方程在 任意曲线坐标系上的变换.....	129
附 图.....	134

第一章 前 言

§ 1-1 叶栅流场研究和激光测速仪

在航空、航海和能源工业上广泛应用的叶轮机械（如压气机、透平、风扇、螺旋桨、直升机旋翼等）是最为复杂的流体机械之一。

为了满足工程上的需要，压气机正在向着高压、高速和高效率发展，透平则向着高温、高速和高效率发展。现在，压气机的增压比已从四十年代的 $3 \sim 4$ 发展到 $25 \sim 30$ ，其流通能力越来越大。六十年代初，人们成功地研制了超音速级。同时，透平的进气温度也从四十年代初的 1073K 提高到现在的 1650K ，并发展了超音速透平级〔1〕。

在压气机和透平的设计中，人们总是力图提高叶栅的空气动力负荷和效率，尽可能加大工况范围，提高喘振裕度，减少整机级数和重量。对压气机而言，如何提高单级增压比和效率始终是一个重要的问题。改善叶栅设计是提高气动效率和载荷的一个主要途径，采用气动性能优良的翼型可以使气动载荷在叶片上合理分布。在叶片的排列和布置上则尽可能加大气流的转角，增加其做功能力。采用某些措施（如串列叶栅〔2〕）控制叶片表面上的附面层分离、再附和转换过程，从而最大程度地减小气动损失。

完善地解决叶栅设计问题，有赖于对叶栅内流动现象的详细理解。叶栅流场特别是旋转流场，无论从绝对的观点还是从相对观点来看都是十分复杂的三维流动现象。即使在平面叶栅中，由于二次流的存在，在空间三个方向上都存在速度梯度。因此，要在同一空间位置同时确定总压、静压、速度等流场参数是非常困难的。在离心压气机中，流道高度很小，特别是在叶尖处，放入任何形式的探

头都有可能引起严重的阻塞效应,从而导致测量数据的失真。当转速很高时,在转子上安装探头还要受到机械方面的限制。叶轮机械流动的这些特殊性给实验研究带来了很大困难。迄今为止,人们对叶轮机械流场中的某些流动现象仍然了解得不够,特别是当湍流、粘性及三维效应同时起主要作用的时候。如果这些流动现象成为效率损失的主要来源,设计者就必须给予足够的重视。因此,为了使叶轮机械的性能有重大突破,就必须从实验上彻底弄清叶栅流场的流动问题。

叶轮机械中的流体力学问题是目前工程上最广泛的研究课题之一,主要包括如下几个方面:

- (1) 非旋转通道与旋转通道的流场数值预测技术。
- (2) 非设计状态下的工作性能、非定常流动和稳定性问题。
- (3) 实验研究,包括发展新的测试仪器和测试技术。

显然,前两个方面的进展有赖于流场的实验研究。就数值计算而言,一方面,叶栅流场的数值模拟可以提供比实验多得多的流场信息,通过数值实验可以优化设计,提高设计效率,减少设计费用;另一方面,由于计算机容量的限制,人们不得不采用许多物理上和数值上的假设来简化原始的 $N-S$ 方程,在求解中还不能使用可以描述湍流微观尺度的离散网格。因而,数值计算的可靠性需要用实验数据加以验证,才能应用到实际的叶栅设计中。然而遗憾的是,在叶轮机械几种主要的流动型式,还缺乏足够的实验数据,使得叶轮机械的气动设计方法不能有很大改进。目前,人们主要地仍然是使用二维的方法设计叶栅,而且在很大程度上依赖于设计者的经验。

叶轮机械中旋转流场的复杂性使其实验研究工作较之其它形式

的流场要困难得多。首先，测试手段应该能够适应流场旋转这一特殊情况，使信号从旋转部件传输到接收装置；其次，当叶片表面附面层发生湍流分离时，在回流区中，由于脉动速度与时均速度具有大致相当的量级，瞬时速度的大小和方向都有高频大幅度变化，因而要求测试仪器具有高频响应特性和易于感受流动方向变化的能力。

传统的叶栅流场测量技术有很多种，如热线或脉冲热线以及一些基于压力测量的技术。其共同特点是都需要安装探头，对流场造成不同程度的扰动，它们都包含着测出量与速度信号之间的非线性关系，这种非线性关系还可能随时间或环境条件变化，因而标定困难。在多维流场测量中，这些仪器易受到横向流动的影响。在高速流场测量中，某些仪器的高频响应特性也显得不够。

激光测速技术（L A）是六十年代中期发展起来的一种新型的光学测速技术。与其它测试技术相比，激光测速有一些独特的优点（以激光多普勒测速仪为例）：

- (1) 为非接触式测量，对流场没有干扰。这一点对尺度很小的流场是极为重要的。
- (2) 多普勒频移信号与速度成线性关系，且这种线性性质仅取决于激光波长和波束夹角，不随时间变化。
- (3) 多普勒频移信号是确定方向上的速度分量。

除此以外，激光测速仪的速度信号是通过接收散射光得到的，从测量位置到光学接收部件之间的信号传输不需要任何机械或电子装置，因而它能够胜任恶劣环境中的流场测量。如旋转流场、燃烧室内的高温流场等。

自从1972年Wisler和Mossey首次将激光多普勒测速