



气动 热力学与 燃烧 论文选集

QIDONG
RELIXUE YU
RANSHAO
LUNWEN
XUANJI

工程热物理研究所
西安交通大学 能源与动力工程系 主编
动力机械工程系

西安交通大学出版社

气动热力学与燃烧论文选集

工程热物理研究所
西安交通大学 能源与动力工程系 主编
动力机械工程系

西安交通大学出版社

序 言

气动热力学与燃烧是工程热物理领域内的两个重要学科,它们所研究的内容已在能源、交通、动力、化工、环境保护、节能技术、国防工业以及各种高效率动力机械设备工程上得到了广泛应用。近 20 年来,由于工农业的发展,国防的现代化以及高技术与新技术的开发,对从事气动热力学与燃烧学这两门应用基础学科的研究工作者不断提出了许多新的研究课题。因此,深入了解和研究气动热力学与燃烧方面的机理,对应用在上述各工程方面的设备设计、工况预测、提高能源利用效率以及保证设备安全运行等都具有极其重要的意义。

从 50 年代末起我校开始进行动力机械的气动性能与燃烧特性方面的研究工作,60 年代初在动力机械系成立了国内第一个工程热物理研究室,1979 年经教育部(现国家教育委员会)批准在西安交通大学建立了工程热物理研究所。研究所下设五个研究室,即:多相流与传热研究室,气体动力研究室,燃烧研究室,低温技术研究室与热工基础研究室。1984 年起又增设了涡轮机械研究室与内燃机研究室。

研究所成立以来,与动力机械工程系及能源与动力工程系密切合作,取得了一些科研成果。本论文选集收集了工程热物理研究所及两个系的研究人员、教师在压气机、风机、内燃机与锅炉等方面有关气体动力与燃烧特性研究的部分论文,这些论文都已在国内或国外学术会议或刊物上发表过。希望这一以气动热力学与燃烧为主的论文专刊的内容,能为国内从事能源与动力工业的科技工作者及其它有关科研人员参考应用。

陈 学 俊

于西安交通大学工程热物理研究所

1987 年 8 月

目 录

序言

第 I 部分 气动热力学

径向无叶扩压器的几何形状对性能的影响

.....朱营康 S.A.肖兰道(加拿大卡尔顿大学) 1

轴流风机总体设计的优化王明德 13

无叶扩压器中恒定流的损失预测马 林 姚承范 程道晋 24

坐标变换光滑样条方法郭新生 34

轴流式及混流式压气机扩压因子流型设计的理论、应用及其优化谷传纲 42

跨音速长、短叶片环形叶栅工作范围的确定与堵塞、分离的实验研究

.....姜培正(西安交通大学) 廉小纯(西北工业大学) 50

离心风机叶轮子午型线的数值设计姚承范 王明德 马 林 曹 琦 60

非正交曲线坐标系下叶轮机械紊流流动方程及其模化形式席 光 王尚锦 69

非极性混合物的假临界常数徐 忠 79

离心通风机叶轮叶片型线研究及边界层计算郭宪民 朱报祯 91

气态有机介质音速的计算与测量.....陈亚平 韩绍辛 陈丹之 102

在半测地坐标下用有限元法对任意透平叶栅气动性能的计算.....翁泽民 110

亚音速环形喷嘴叶栅中径向压力梯度对根部损失影响的研究

.....孟 岱 翁泽民 向一敏 120

增压器涡轮排气道改进的试验研究.....蔡元基 向一敏 129

可变截面涡轮增压器特性及其匹配的试验研究

.....沈祖达 丰镇平 侯小军(铁道科学研究院) 139

轴流无叶喷嘴环内部流动与损失的研究.....王则明 翁泽民 向一敏 147

轴流无叶喷嘴及其级的特性实验.....张建军 翁泽民 沈祖达 向一敏 156

低沸点工质的热力性质对透平选型与设计的影响.....陈丹之 陈亚平 韩绍辛 164

可变截面无叶蜗壳气动特性的试验研究.....丰镇平 沈祖达 向一敏 175

第 II 部分 燃 烧

混合速率、尾喷射和压力室容积对直喷柴油机碳氢化合物排放的影响

.....R.C.Yu等(美国康明斯发动机公司) 张滋伟 191

汽油机燃烧过程的热化学法数值模拟.....陈长佑 205

应用乳化油时柴油机的燃烧和热效率.....张滋伟 杨 进 陈晓务 218

非增压柴油机功率逐点修正法的试验研究.....王陈生 柳玉美 231

减少汽油机进气反喷和降低油耗的研究.....	周龙保 姚长贵 杨中极	239
汽油机燃烧过程热力模型计算的改进.....	毕小平 蒋德明	248
低速燃烧系统稳态工况的模化法则.....	陈丹之	259
不同布风装置的循环流化床冷态特性比较.....	俞建洪 J.Deinert, K.Schugerl	266
二段转化炉的模型研究及燃烧过程预测.....	周玉铭 许晋源 程晋玲	273
火床炉风室配风特性的研究.....	刘尧奇 徐通模 惠世恩	285
夹心风Ⅱ型燃烧器的研究		
..... 徐通模 惠世恩 许晋源 郭家骊 胡 勇 魏新建(武汉锅炉厂)		293
夹心风燃烧器一次风口结构的探索		
..... 徐通模 惠世恩 周玉铭 郭家骊 胡 勇 (武汉锅炉厂)		
..... 蒋 斌 罗 维 何经波 (分宜发电厂)		304
烟气脱硫超声波雾化器研究		
..... 张永照 牛长山 杨嘉钰 张西民 李荫堂 程晋玲		313
粗粒子流化床空气动力工况的试验研究.....	张永照 李荫堂	321
火床炉炉拱的特性.....	黄祥新	327
风室隔板结构及配风特性的试验研究.....	刘尧奇 徐通模 惠世恩	335

CONTENTS

Preface

Part 1 Aerothermodynamics

- Effect of Geometry on the Performance of Radial Vaneless Diffusers
.....*Zhu Yingkang Steen A. Sjolander*
- Optimization of Overail Design for Axial Fans..... *Wang Mingde*
- A Loss Prediction Method of to Steady Flow in Vaneless Diffusers
.....*Ma lin Yao Chengfan Cheng Naijin*
- The Smooth Method of Spline by Coordinate Converting
..... *Guo Xinsheng*
- Theory, Application and Optimization of the Diffusion Factor Flow-
Type Design for Axial-Flow and Mixed-Flow Compressors
..... *Gu Chuangang*
- The Determination of the Working Range of a Transonic Annular Casca-
des With Long and Short Blades and Experimental Investigation of
Flow Blockage and Separation
..... *Jiang Peizheng Lian Xiaochun(Northwestern Polytechnical
University)*
- A Numerical Procedure for Designing the Profile of Impeller Meridian
Passage in a Centrifugal Fan
..... *Yao Chengfan Wang Mingde Ma Lin Cao Qi*
- Turbomachinery Turbulent Flow Equations Expressed and Their Modeled
Form in Non-Orthogonal Curvilinear Coordinates
..... *Xi Guang Wang Shangjin*
- Pseudocritical Constants for Nonpolar Mixtures.....*Xu Zhong*
- Investigations on the Bland Shape of Centrifugal Impeller and Calcula-
tion of the Boundary Layer on the Blades.....*Guo Xianmin Zhu Baozhen*
- The Calculation and Measurement of Sound Velocity of Gaseous Organic
Mediums.....*Chen Yaping Han Shaoxin Chen Danzhi*
- Calculation of the Aerodynamic Performance of an Arbitrary Turbine
Cascade Using the Finite Element Method in Semi-Geodesic Coordi-
nate *Weng Zemin*
- The Influence of the Radial Pressure Gradient on the Blade Root Loss-
es in an Annular Subsonic Nozzle Cascade
..... *Meng Dai Weng Zemin Xiang Yimin*

An Experimental Investigation to Improve the Turbine Exhaust Performance of a Turbo-SuperchargerCai Yuanji Xiang Yimin
Investigation on Performance of a Variable Area Turbocharger and its Matching Tests with Vehicle Engines

.....Shen Zuda Feng Zhenping Hou Xiaojun(China Academy of Railway Science)

A Study on the Flow and Loss in an Axial Flow Nozzleless Casing

.....Wang Zeming Weng Zemin Xiang Yimin

Researchs on the Performance of an Axial Flow Turbine Stage with Nozzleless Casing

.....Zhang Jianjun Weng Zemin Shen Zuda Xiang Yimin

Influence of Thermodynamic Properties of Low Boiling Temperature Mediums on the Type Selection and Design of Gas Turbines

.....Chen Danzhi Chen Yaping Han Shaoxin

Experimental Investigation on Aerodynamic Characteristics of a Variable Area Nozzleless Volute

.....Feng Zhenping Shen Zuda Xiang Yimin

Part 2 Combustion

The Effect of Mixing Rate, End of Injection and Sac Volume on Hydrocarbon Emissions from a D.I.Diesel Engine

.....Zhang Ziwei R.C.Yu etc. (Cummins Engine Company)

Numerical Simulation of the Combustion Process in Spark Ignition Engines Using Thermochemical Method.....Chen Changyou

The Combustion and Thermal Efficiency of the Diesel Engine Using Emulsified Fuel.....Zhang Ziwei Yang Jin Chen Xiaowu

Experimental Research on the Point by Point Correction Method of Naturally Aspirated Diesel Engine Output.....Wang Chensheng

Liu Yumei Study on Minimization of Inverse Inlet Flow and Reduction of Specific Fuel Consumption in Petrol Engines

.....Zhou Longbao Yao Changgui Yang Zhongji

Improvement in Calculating the Thermodynamic Model of Combustion Process in SI Engines.....Bi Xiaoping Jiang Deming

The Modeling Rules of Steady Performances of Combustion Systems at Low Flow Mach Number.....Chen Danzhi

The Characteristic Comparisons of the Circulation Fluid Beds with Two Different Air-Arrange Sets

.....Yu Jianhong J.Deinert K.Schugert

- The Modeling Study of the Secondary Reformer and the Prediction of its Combustion Process.....*Zhou Yuming Xu Jinyuan Cheng Jinling*
- Research on the Characteristics of Air Distribution in Air Chamber of Grate-Firing Boiler.....*Liu Yaoqi Xu Tongmo Hui Shien*
- Research on Type II Sandwiched Air Burner
.....*Xu Tongmo Hui Shien Xu Jinyuan Guo Jiachang Hu Yong*
Wei Xinjian(Wuhan Boiler Works)
- Research on the Primary Air Nozzle of the Sandwiched Air Pulverized Coal Burner
.....*Xu Tongmo Hui Shien Zhou Yuming*
Guo Jiachang Hu Yong(Wuhan Boiler Works)
Jiang Bin Luo Wei He Jingbo(Fenxi Power Station)
- Research of Supersonic Atomizer for Flue-Gas Desulfurization
.....*Zhang Yongzhao Niu Changshan Yang Jiayu*
Zhang Ximin Li Yintang Cheng Jinling
- An Experimental Study of Air Dynamics of Coarse Particles Fluidized Bed *Zhang Yongzhao Li Yintang*
- Arch Study of Stoker-Fired Furnaces..... *Huang Xiangxin*
- Experimental Studies on Structures of Diaphragms of Air Chamber and Characteristics of Air Distribution
.....*Liu Yaoqi Xu Tongmo Hui Shien*

径向无叶扩压器的几何形状对性能的影响

朱营康 S. A. 肖兰道

(加拿大卡尔顿大学)

摘 要

本文介绍了对壁面从轻度扩展到强烈收敛的 5 种径向无叶扩压器稳定气动特性的试验研究情况。在相当宽的流量范围内, 确定了各种扩压器的压力恢复特性并沿扩压器的进出口宽度测量了流动参数。发现壁面收敛会使扩压器的压力上升曲线具有稳定的负斜率; 并发现在大流量时, 由于壁面收敛使压力恢复减小的程度远比预想的小, 在中等流量时, 壁面收敛恰恰改善了压力恢复。采用收敛形壁面可使扩压器得到比预想更好的性能, 这与得到明显改善的扩压器出口处的流动均匀性密切相关。

符 号 说 明

A 径向面积	z 轴向坐标
b 扩压器宽度	α 从切向测量的气流角
B 宽度与半径之比, $B = b/R_3$	β 从切向测量的转子叶片角
B_f 径向速度畸变参数	Ω 总压损失系数
C_p 静压恢复系数	$\Omega = (p_{03} - p_{04}) / (\frac{1}{2} \rho v_3^2)$
$\dot{m}$ 质量流量	ρ 密度
p_0 总压	θ 名义壁面收敛角
p_s 静压	θ' 有效壁面收敛角 (按宽度从 R_3 到 R_4 线性变化)
r 径向坐标	下标:
R 半径	1, 2, 3, 4 分别为转子进口, 出口, 扩压器进口和出口
R' 半径比, $R' = r/R_3$	上标: — 平均值
v 合成速度	
v_r 径向速度分量	
v_t 切向速度分量	

0 引 言

径向无叶扩压器广泛地使用于工业离心式压缩机中。影响径向无叶扩压器性能的主要几何参数有: (1) 进口宽度与进口半径之比 b_3/R_3 ; (2) 出口半径与进口半径之比 R_4/R_3 ; (3) 扩压器壁面倾斜角 θ 。简单的一元粘性计算^[1,2]表明: 当 R_4/R_3 一定, b_3/R_3 的值大时, 损失低而静压恢复高, 这是由于相对于通流面积来说湿润面积较小之缘故。然而, 对一定的质

量流量, 大的 b_3/R_3 值将暗示着气流角 α_3 较小, 这将会使扩压器靠近倒流和旋转脱离的临界角^[7]。计算还表明^[14]: 宽度较窄的扩压器临界角较小, 这已被实验所证实^{[10][19]}。对扩压器径比的影响也有不少研究, Abdel-Hamid^[1]发现, 对 $b_3/R_3 = 0.116$ 的扩压器, 临界气流角随径比的增加而增加。细长扩压器($b_3/R_3 = 0.0257$ 和 0.0153)的临界角对径比变化更为敏感^[10]。

以上提到的研究都是对平行壁扩压器的。Ludtke^[11]报道了一系列压缩机级性能试验结果, 他采用了 4 种不同壁面形状的无叶扩压器: 平行壁, 平行壁后接强收敛壁, 等通流面积(轻度收敛)和强烈收敛壁面。发现使用收敛形扩压器后虽然效率有些降低, 但使压缩机级的喘振极限得到了显著改善。从总体来看, 等通流面积扩压器最好, 它使喘振极限得到了实质性改善而效率的降低最小。遗憾的是, Ludtke 仅作了整级性能测试, 而没有揭示收敛形扩压器能改善喘振极限的原因以及气动方面所需付出的代价。Eckard^{[3][4][5]}在等面积扩压器进出口测得的总压分布图形中也表明, 进出口之间的总压均匀性得到了很大的改善。还有一些文献^{[16][17]}报道了对型线壁面扩压器流动情况的试验研究, 检验了扩压器进口快速收缩以及收敛和扩展形壁面扩压器的效果。研究结果用静压恢复有效度($\Delta p_{s\text{实际}}/\Delta p_{s\text{理想}}$)曲线表示。据报道, 具有 2° 收敛壁面的扩压器获得最高有效度。由于仅仅测量了壁面静压, 故对收敛形扩压器性能较好的原因还不十分清楚。

本试验所采用的 5 种径向无叶扩压器具有相同的进口宽度和半径比, 壁面从轻度扩展到强烈收敛, 具有不同的倾斜度。目的在于检验斜壁对扩压器稳定气动特性的影响, 并希冀搞清楚收敛形扩压器使机器稳定运行范围扩大的原因及确定可能需付出的代价。我们的测量均取平均值。

1 试验装置及过程

1.1 试验装置

本研究所用试验装置如图 1 所示。为了给扩压器进口提供多种流动分布, 使用了 5 种不同的带盖叶轮, 其几何参数如表 1 所示。试验在 $5000 \pm 50 \text{ r/min}$ 的等转速下进行, 叶轮外径 $D_2 = 223\text{mm}$, 其相应周速为 58.4m/s , 全部测量基本上是在不可压缩流动工况下进行的。流量用吸气口处的节流阀和卡装在整个扩压器外缘的不同多孔网格板调节。计算表明: 在所观察的流量范围内, 叶轮 A~D 的叶片进口角 β_1 能与 5000r/min 时的气流冲角较好地匹配,

表 1 叶轮几何参数表

叶轮编号	A	B	C	D	E
叶片数	24	12	12	12	12
$\beta_1(^{\circ})$	55	55	55	55	30
$\beta_2(^{\circ})$	30	30	60	90	60
$D_1 = 64\text{mm}$, $D_2 = 223\text{mm}$, 叶片厚度 $\delta = 1.6\text{mm}$					

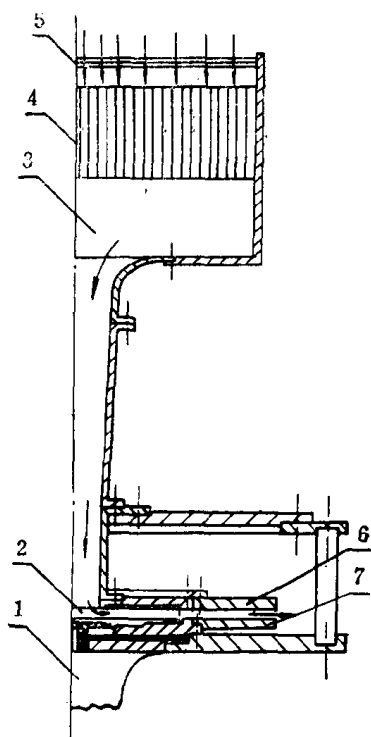


图1 试验装置示意图
1—马达 2—叶轮 3—缓冲室
4—气流整流器 5—节流阀
6—扩压器盖 7—扩压器盘

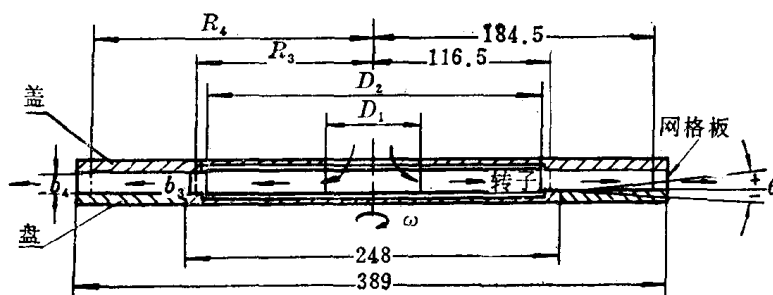


图2 扩压器几何参数

	1	2	3	4	5
$\theta(^{\circ})$	-3	0	3	5.5	8.2
$\theta'(^{\circ})$	-2.7	0	2.7	4.9	7.3
$b_3(\text{mm})$	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9
$b_4(\text{mm})$	16.1	12.9	9.7	7.1	4.2
A_4/A_3	1.98	1.58	1.19	0.87	0.52

$$R_4/R_3 = 1.58 \quad b_3/R_3 = 0.111$$

而叶轮 E 在所有运行工况下，都有较大的正冲角。

试验所用的 5 种扩压器的几何参数摘录在图 2 中。两个测量截面分别选在 $1.045R_2$ 和 $1.655R_2$ 处 (R_2 系叶轮外缘半径)。扩压器性能是在 $R_4/R_3 = 1.584$ 的范围中测定的。出口测量截面在扩压器排气口上游 10mm 处。通道宽度随可拆换的扩压器盘侧壁面变化，壁面倾斜度从 -3° (扩展) 变化到 8.2° (收敛)。由于装置的原始设计原因，壁面从进口测量截面下游 7.5mm 处开始倾斜，如果设 R_3 和 R_4 之间的宽度呈线性变化，相应的有效倾斜角是从 -2.7° 变化到 $+7.3^{\circ}$ 。扩压器进口宽度 b_3 为 $0.116R_2$ 或 $0.111R_3$ ，出口和进口测量截面的面积比在 1.98 到 0.52 之间变化。

1.2 试验过程

本试验使用复合眼镜蛇式标准探针在两测量截面的各 5 个位置测量扩压器流动的横向分布。探针采用对向式，在测量时，保持探针的两侧孔压力相等，探针中孔压力即为总压。气流方向的测量偏差小于 $\pm 0.5^{\circ}$ ，测点的位置偏差小于 0.25mm。图 7~9 表明，在流动容积内，气动参数的变化相当有序，虽然没有给出边界层的详细情况，但所做的测量足以表征其总体情况。为了积分，根据在壁面上无滑移的条件，在壁面上增加两个附加点。在观察测量重复性的基础上，估计总压的测量偏差不大于测量截面上平均动压的 $\pm 5\%$ 。壁面静压的测量是在探针头部所在的半径处用直径 0.5mm 的壁面静压孔测定的，静压的测量偏差不大于进口动压的 $\pm 2\%$ 。所有压力测量的二次仪表均采用气动回路的单管式测压计或压力传感器。因气动回

路有相当长的管路和足够大的容积, 故其可吸收绝大部分压力波动。假定由扩压器盖侧壁上测得的静压适合于整个截面, 便可从测得的总压计算出扩压器中的合成速度分布, 然后从探针测得的气流角计算出径向速度分量和切向速度分量, 并对其分别进行平均, 径向速度分量的平均值可由质量流量求出, 切向速度分量的平均值由角动量相等得出:

$$\bar{v}_r = \frac{\int_0^b \rho 2\pi r v_r dz}{\rho 2\pi r b} \quad (1)$$

$$\bar{v}_\tau = \frac{\int_0^b \rho 2\pi r^2 v_\tau dz}{r \dot{m}} \quad (2)$$

扩压器进口处的平均气流角为 $\text{Arctan}(\bar{v}_r/\bar{v}_\tau)$, 平均总压为:

$$\bar{p}_0 = \frac{\int_0^b p_0 \rho 2\pi r v_r dz}{\dot{m}} \quad (3)$$

由平均总压和在壁面上测得的静压则可求得平均动压。

在扩压器进出口截面上, 通过对径向分速积分可得到质量流量, 将其与由在装置进气口测量的静压而求得的质量流量相比较, 证实测量是比较准确的。在大流量下, 3 个质量流量十分一致, 差别在 5% 以内。然而在非常小的流量下, 由扩压器进口截面得出的质量流量高于其它两个质量流量, 这可能主要是由于周向流动不均匀性造成的。流量愈小, 这一原因愈清楚。在扩压器进口测量截面上, 跨叶片气流的不均匀性混合尚未完成, 显然, 用低频响仪表测出的平均总压将会高于真实总压的平均值。流量测量误差的另一个原因在于探针角度的测量偏差, 对于小的 α_s 值, 它可导致明显的质量流量偏差。由于我们没有对总压和壁面静压测量值进行修正, 虽然低估的 p_{s3} 值和高估的 $\frac{1}{2}\rho v_3^2$ 会部分抵消, 但压力系数仍存在一定误差。

$$C_p = \frac{p_{s4} - p_{s3}}{\frac{1}{2}\rho v_3^2} \quad (4)$$

从测试中得出: 气流的均匀性对于斜壁式扩压器的性能是一个重要的影响因素。Senoo^[12] 已研究了径向气流畸变对等宽度扩压器的影响, 他发现差的均匀性将减小压力恢复并增加损失。Senoo 和 Kinoshita^[15] 的计算也认为径向流动畸变对倒流临界角有着明显影响。Senoo^[12] 所定义的径向速度畸变参数为:

$$B_f = \frac{\int_0^b \rho v_r^2 dz / \int_0^b \rho v_r dz}{\int_0^b \rho v_r dz / \int_0^b \rho dz} \quad (5)$$

在我们的研究中, 也采用 B_f 作为对流动不均匀性的一种度量。

2 试验结果

2.1 叶轮几何参数的影响

叶轮几何参数对静压恢复系数及总压损失系数的影响示于图 3、图 4, 横坐标均为进口气流角($90^\circ - \bar{\alpha}_3$), 这是一个用来代替流量的通用参数。我们估算出压力系数的精度为 ± 0.015 , 其中不包括由于未对周向流动不均匀性作定量分析所引起的偏差。正如预料的那样, 在小流量下, 压力恢复恶化, 总压损失增加。

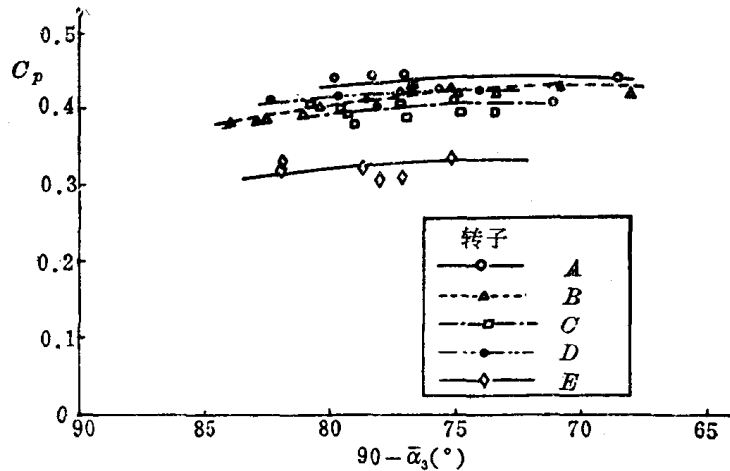


图 3 转子几何参数对静压恢复的影响 (平行壁扩压器)

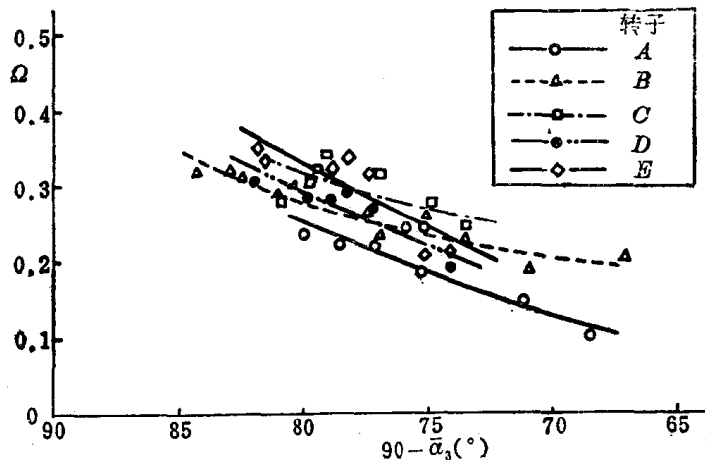


图 4 转子几何参数对总压损失的影响 (平行壁扩压器)

由图 3、图 4 可知: 对于叶轮 $A \sim D$, 扩压器的性能很相似, 而对叶轮 E , 静压恢复明显降低, 损失有所增大。如前所述, 当在 5000 r/min 下运转时, 在所有的流量下, 叶轮 E 都有较大的正冲角, 这将导致高畸变流动, 这也可以从 Senoo 的畸变参数 B_f 的分布得到证实, 用叶轮 E 时的畸变参数较用其它叶轮时为高。观察到的从盘到盖的畸变以及必然存在的周向畸变可能使静压恢复减小。然而从叶轮 $A \sim D$ 的结果可知, 如果叶轮设计得好并能很好匹配,

扩压器的性能对叶轮的具体几何参数,如叶片数、叶片后弯角等并不十分敏感。因此,斜壁式扩压器的性能仅由一种叶轮测出(叶轮 *B* 用于扩压器 1~4, 叶轮 *A* 用于扩压器 5)。这一结果具有广泛的适用性。

2.2 扩压器壁面倾斜的影响

由简单分析可知,如不计损失,平行壁扩压器的压力上升曲线 $C_p-\alpha_3$ 的斜率为零,当存在不同的损失时(如在 α_3 范围内观察到的),其斜率均为正值。收敛性扩压器的压力上升曲线具有负的斜率。压缩机级的稳定性一阶准则要求,压缩机级的总的压力上升曲线应具有负斜率^[6]。因为总的压力上升曲线是转子和扩压器压力上升曲线的合成。总体来说,收敛形扩压器所具有的负斜率压力上升曲线显然会使机器更为稳定。这似乎是对 Ludtke^[11] 采用收敛形扩压器改善了喘振极限的最简单的一种解释。分析也表明,壁面收敛会使大流量下的压力恢复减小,因随着 α_3 的增加,径向速度分量的减小对于压力恢复变得越来越重要,减速率的减小(对收敛足够大的加速流动也是这样)将表现为压力恢复的明显减小。使用收敛形扩压器时需要付出一定的压力恢复减小的代价。

图 5 表示了 5 种扩压器的静压恢复曲线,其中含有因周向不均匀性所引起的测量偏差,这可使 C_p 的绝对数值存在某些不可靠性,然而,它们的相对大小应是正确的,因为大部分

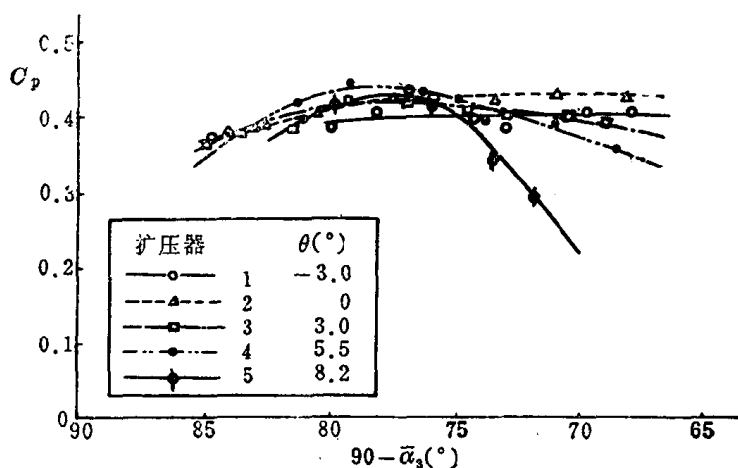


图 5 扩压器几何形状对静压恢复的影响

测量是用同一种叶轮进行的,在一定流量下,它将对所有扩压器给出基本相同的进口状态。曲线的总趋势与简单分析相符,对足够收敛情况(本试验中大约为 3°),斜壁的影响足以弥补损失的影响,将产生稳定的具有负斜率的压力上升曲线。还有一个重要试验结果为:由于壁面收敛所引起的压力恢复的降低并不象简单分析那样总是大的,事实上,在中等流量下,壁面内倾 5.5° 的扩压器压力恢复最高。

对以上的压力恢复特性的部分解释可归之为扩压器扩压损失的机理。图 6 表示了扩压器几何参数对总压损失系数的影响。在大流下,收敛能明显地减小损失。例如,当壁面倾角由 0° 增加到 5.5° 时,总压损失大约减小了一半。其机理还不十分清楚,这也许与流体粒子在扩压器中的运动路径的变化有关,因增加径向速度分量而减小了有效湿润面积。

壁面倾斜与流动均匀性之间的关系对斜壁式扩压器的压力恢复特性、也许还对损失特性

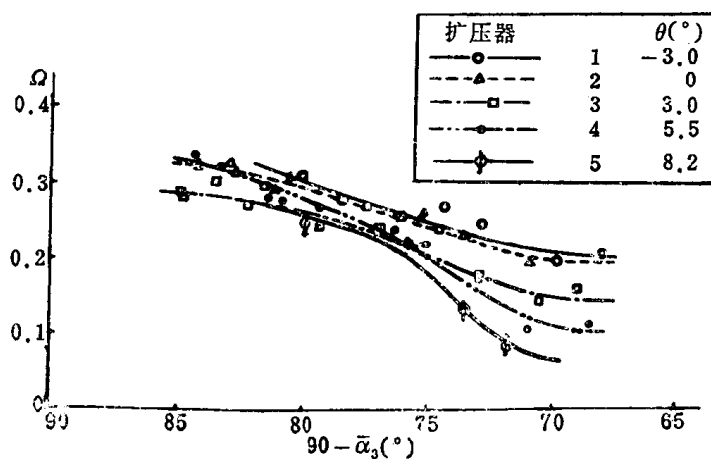
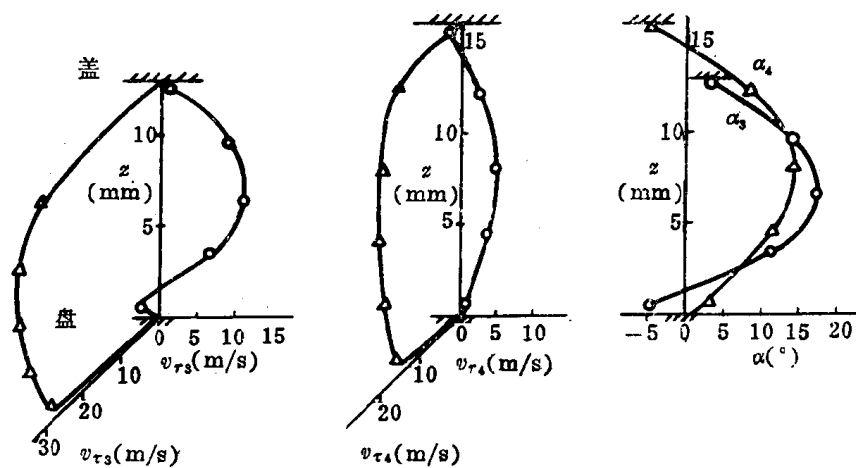
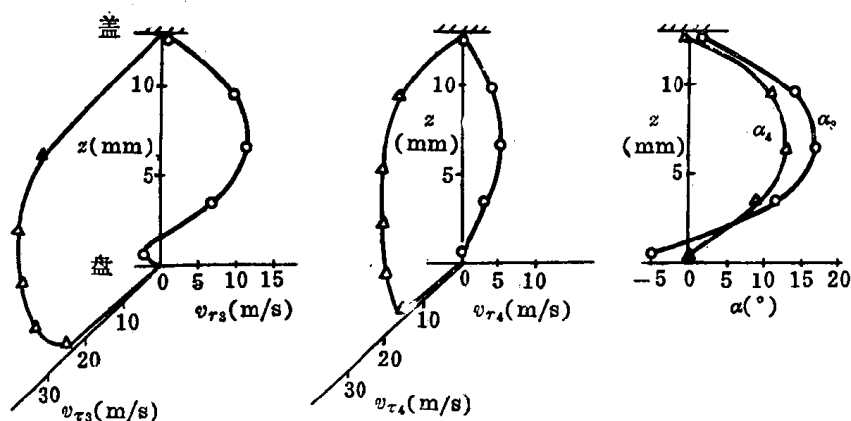
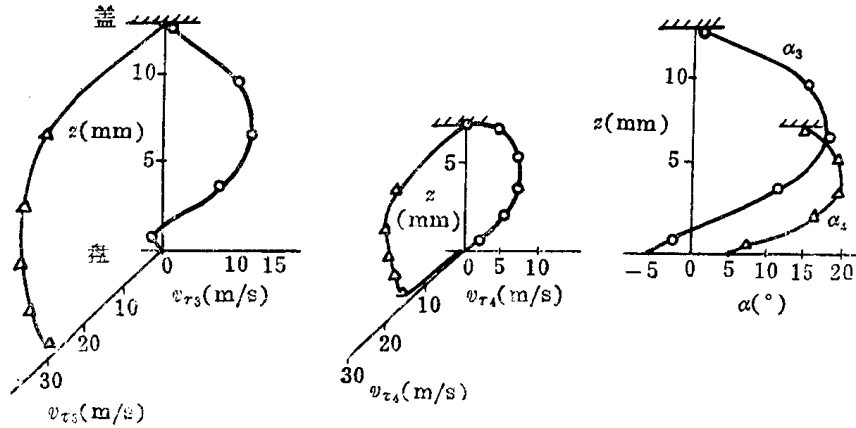


图 6 扩压器几何参数对总压损失的影响

方面起着重要作用。图 7~9 示出平均进口气流角约为 10° 时 3 种扩压器的进出口速度分布情况。当壁面变得收敛时,对径向速度的均匀性有着实质性的改善。为了定量地分析这种影响,


 图 7 速度和气流角分布 ($\theta = -3^\circ$, $\alpha_3 = 10^\circ$)

 图 8 速度和气流角分布 ($\theta = 0^\circ$, $\alpha_3 = 9.5^\circ$)

图9 速度和气流角分布 ($\theta = 5.5^\circ$, $\alpha_3 = 10.7^\circ$)

在全部工况中,我们计算了进出口处的 B_f , 其结果表示在图 10 中。对扩展形、平行壁和轻度收敛形扩压器, 从进口到出口的不均匀性逐渐增加, 在大流量下, 这将会促进壁面边界层的增长。在小流量下, 由图 7 和图 8 可知, 倒流区不均匀性也增加了, 由于边界层位移厚度以及倒流的影响, 将会产生阻塞, 减小通流面积, 使出口动压升高, 因而减小了出口静压。与此相反, 如图 10 所示, 壁面收敛 5.5° 和 8.2° 的斜壁扩压器进出口之间的均匀性实际上得到了

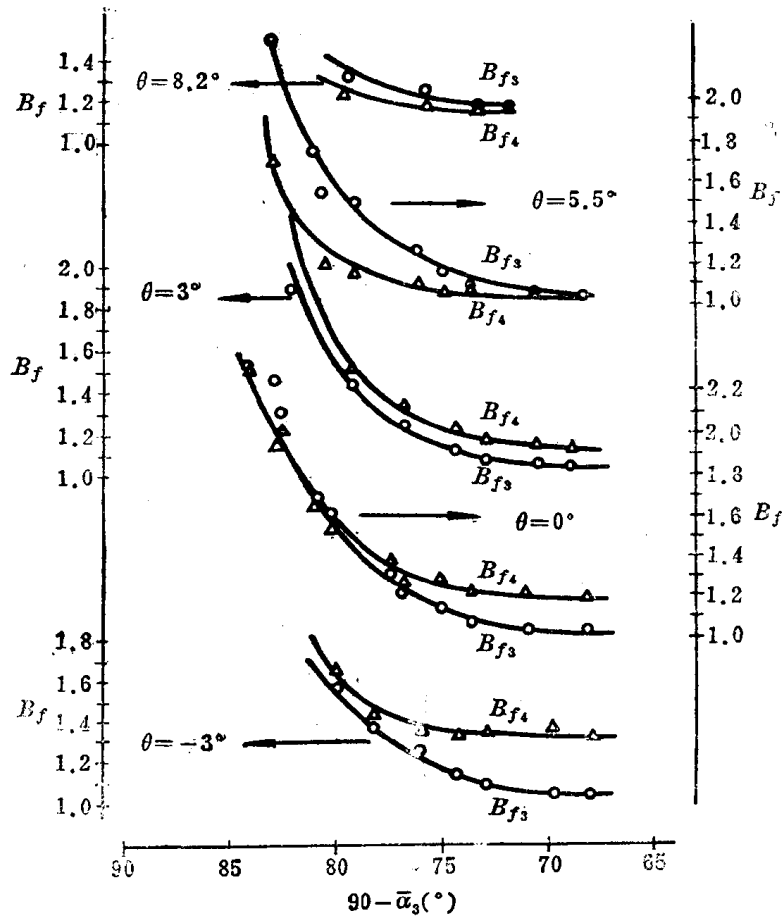


图10 壁面倾斜角与径向速度均匀性的关系

改善,正如图9所示那样,结果使径向的流动阻塞减小,也使由于壁面收敛所引起的宽度减小得到某种程度的补偿。这对于收敛形扩压器能获得比预想更好的压力恢复也许是一种额外的、同时也可能是最重要的原因。

低损失也可能是收敛形扩压器中流动不均匀性得以改善的一个因素。改善了均匀性增加了壁面附近的气流角,因而缩短了壁面附近流体的路径长度,这将使表面摩擦损失减小(图9)。另外,较好的均匀性也减小了壁面外层的速度梯度,从而减小粘性耗散以及流场内部的紊动。

收敛形壁面倾向于使整个扩压器内的倒流区缩小甚至消失,这与旋转脱离密切相关。在我们所采用的宽度对半径之比的条件下,因为倒流首先出现在进口,壁面的这种作用是有限的。然而,据一些文献^[14]介绍,在较宽的扩压器中,倒流首先出现在出口,在此情况下,收敛形扩压器将会有利于整机的稳定,因为具有负斜率的压力上升曲线将能有效地推迟近出口处倒流的发生。

3 结 论

扩压器壁面足够收敛将使压力上升曲线呈稳定的负斜率,这将有助于解释 Ludtke^[11]在离心压缩机中采用收敛形扩压器所观察到的喘振极限的改善。试验表明:由于壁面收敛所引起的静压恢复的减小远比人们预料的小,而且具有 5.5° 收敛角的斜壁式扩压器在中等流量下,得到了最大的压力恢复。收敛形扩压器也有抑制扩压器出口附近倒流的有用特性,这将会推迟较宽扩压器中的旋转失速的出现,在这种扩压器中,旋转失速的发生是以在出口附近发生倒流为标志的。

收敛形扩压器具有比预想更好的性能,其中一个重要因素是因为径向速度的均匀性得到了明显改善。在较大收敛角下,扩压器出口气流比进口气流更加均匀,相应地减小了空气动力阻塞,部分地补偿了物理面积的减小,这有利于压力恢复。较好的均匀性也有利于缩短靠近壁面附近流管中流体的路径长度,这将使表面摩擦损失减小。

在无叶扩压器的通常设计中,我们认为采用轻度收敛壁面是有用的。就所试验的这类扩压器而言, $3^\circ \sim 5.5^\circ$ 的名义收敛角最好,在中等流量下,收敛角在此范围内的扩压器能给出最好的压力恢复和具有负斜率的压力上升曲线;它们具有大致相等的通流面积,同文献^[11]的情况相符,这也许是选取不同宽度对半径之比扩压器收敛角的一个简便而有用的经验。

本研究由加拿大自然科学和工程委员会依照 A1671 许可证提供经济资助,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Abdel-Hamid, A.N., Effects of Vaneless Diffuser Geometry on Flow Instability in Centrifugal Compression Systems, *Canadian Aeronautics and Space Journal*, Vol. 29, No. 3, 1983 pp. 259~266 (also ASME Paper 81-GT-10)