

984428

高等学校教材

轴流风机

上海电力学院 杨诗成 编

432.1

37



高等学校教材

轴流风机

上海电力学院 杨诗成 编

水利电力出版社

内 容 提 要

轴流风机在火力发电厂的大容量机组中,已经得到广泛的应用。本书主要分析与讨论轴流风机的作用原理、结构、性能、运行的工况调节、主要型式及运行中的问题,如磨损、轴向力、噪声、失速与喘振等。

本书是以引进丹麦 NOVENCO 公司及德国 TLT 公司所生产的轴流风机为主进行结构分析的。

本书为高等工科院校本科“电厂热能动力”专业的选修课教材,也可作为有关专业风机课程的教学参考书,并可供有关专业的工程技术人员参考。

高 等 学 校 教 材

轴 流 风 机

上海电力学院 杨诗成 编

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市地矿局印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 5.125 印张 113 千字
1995 年 11 月第一版 1995 年 11 月北京第一次印刷

印数 0001—1070 册

ISBN 7-120-02394-2/TK·353

定价 4.20 元

前 言

《轴流风机》是电厂热能动力专业本科的选修课教材。

目前大容量锅炉机组的送引风机的发展趋势是，采用动叶可调的轴流风机。而《泵与风机》教材由于篇幅有限，这部分内容极少。所以，撰写本书的目的是为了使学生毕业后，在工作岗位上能很好地适应专业的需要。

本书主要内容为轴流风机的原理、性能、结构与运行。考虑到学生的将来的需要，在内容安排上亦涉及有关设计的基本原理、方法等。由于篇幅较少，所以在原理方面以孤立翼型、等环量为主进行讨论、分析；风机设备、结构取材，以引进国外专利并已经在国内生产、使用的丹麦 VARIAX 型及德国 TLT 轴流风机为主。

本教材初稿在 1989 年完成，曾先后在校内供四届学生使用。现在，又对原稿作了修改与增删。

本书在搜集资料的过程中，曾得到望亭电厂原总工程师叶国骅、高级工程师吴兰芳的热诚帮助。

上海交通大学杨惠宗副教授为本书的主审。他为了提高本书稿质量做了许多工作，付出了辛勤的劳动。笔者在此一并深表感谢！

由于作者水平所限，书中难免有错误之处，恳请读者不吝指教。

编 者

1994 年 9 月

目 录

前 言

第一章 轴流风机的原理与结构.....	1
第一节 概述	1
第二节 轴流风机作用原理	4
第三节 轴流风机欧拉方程	11
第四节 叶栅气动力基本方程	13
第五节 叶高方向上气流参数的变化	14
第六节 子午加速轴流风机	18
第七节 轴流风机的型式	22
第八节 轴流风机的主要部件与结构	26
第二章 轴流风机的性能.....	36
第一节 叶栅中的损失与效率	36
第二节 轴流风机性能曲线	41
第三节 轴流风机主要结构参数对其性能的影响	43
第三章 轴流风机的运行.....	47
第一节 轴流风机的工况调节	47
第二节 旋转脱流与喘振	56
第三节 轴流风机并联运行的不稳定性	64
第四节 轴流风机的磨损	65
第五节 轴流风机的轴向力	68
第六节 轴流风机的噪声及其控制措施	70
主要参考文献	77

第一章 轴流风机的原理与结构

第一节 概 述

随着对能源需求的不断增长, 电力工业的发展速度亦不断加快。于是大容量的汽轮发电机组应运而生。火力发电厂的锅炉送引风机已经逐渐用轴流风机取代离心风机。

离心风机由于结构简单, 运行可靠, 效率较高, 制造成本较低, 噪声亦较低, 所以目前离心风机在有些机组上仍然被用作大容量单元机组锅炉的送引风机。如美国帕达拉斯电厂 650MW 的微正压锅炉配置 4 台离心送风机。又如美国阿姆斯电厂 1300MW 的微正压锅炉配置 3 台离心送风机。再如前苏联斯拉维扬斯克电厂 800MW 的锅炉配置离心送引风机各 6 台。但是, 这些大容量锅炉用增加离心风机的运转台数、增大风机叶轮尺寸来满足它对容量增长的需求。增加风机台数, 虽然可在变工况运转时, 使多数的风机在高效率工况区内运行, 经济性可能好些, 但是由于烟风道系统、调节系统复杂, 投资大, 占地多等缺点, 它受到一定的限制; 增大风机叶轮尺寸又受到材料强度的制约。离心风机按现有的制造技术水平, 最大的双吸离心风机, 其流量约达 $30 \times 10^3 \sim 40 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{min}$, 叶轮外径亦增大到 3~4m (石横电厂 300MW 机组引风机为双吸离心风机, 叶轮外径达 2.85m; 平圩电厂 600MW 机组双吸离心风机, 叶轮外径达 3.8m)。叶轮材料已用高强度合金钢取代碳钢。据国外报道, 这种离心风机常因焊接问题, 引起叶片断裂损坏。实际上离心风机的容量已经达到了极限。所以, 目前不少国家, 在大容量锅炉上, 广泛采用动叶可调的轴流风机作锅炉的送引风机。轴流风机的比转速较高, 因而它具有流量大、全压低的特点。因此, 轴流风机作为大容量锅炉的送引风机是很合适的。

丹麦和德国早在 30 年代就开始试制火力发电厂锅炉用轴流风机。那时, 研制成功的轴流风机叶轮上的叶片是固定的。1948 年丹麦诺文科风机公司, 在世界上首先研制成功在运转中可以调节动叶片节距的伐列克斯 (VARIAX) 型轴流风机。40 多年来, 动叶可调轴流风机已在德国、法国、瑞典、美国、前苏联、日本等国被广泛应用, 作为火力发电厂的一次风机、送风机和引风机等, 目前已有 2000 余台。表 1-1 为三个火力发电厂单元机组配用轴流风机的技术参数。威尔电厂和贝克斯巴赫电厂的两台引风机是当前世界上最大的轴流风机, 其动叶外径 5.3m, 叶顶圆周速度 162m/s, 而且动叶片的材料为球墨铸铁。

国内鼓风机厂引进丹麦诺文科 (NOVENCO) 公司、德国 TLT 公司、KKK 公司等专利技术所生产的轴流风机, 已能满足 200、300MW 及 600MW 机组火力发电厂锅炉对送引风机的要求。

当前, 大容量锅炉使用动叶可调轴流风机已成为发展的趋势。动叶可调轴流风机在使用过程中, 具有下列特点。

表 1-1

单元机组配用轴流风机的技术参数

电 厂	威尔电厂			贝克斯巴赫电厂			曼海姆电厂	
机组容量 (MW)	707			750			450	
燃 料	烟煤			烟煤			烟煤	
投运年份	1975			1983			1982	
运行小时	约 45000			约 3000			约 10000	
风机类型	送风机	引风机	一次风机	送风机	引风机	一次风机	送风机	引风机
风机流量 (m ³ /s)	838	1330	107	905	1361	133	489	727
全 压 (Pa)	11105	5837	9810	8888	6260	14323	6573	6053
动叶外径 (mm)	4750	5300	1800	4750	5300	2120	3350	4250
级 数	2	1	2	2	1	2	1	1
圆周速度 (m/s)	145	162	140	145	162	164	173	165
转 速 (r/min)	585	585	1480	585	585	1480	985	740
电动机驱动功率 (kW)	9300	9300	1400	11500	11500	2400	4200	5500
叶片材料	铸 铝	球墨铸铁	铸 铝	铸 铝	球墨铸铁	铸 铝	塑 性 铝合金	球墨铸铁

1. 变工况工作时经济性好

轴流风机在额定负荷时,效率最高可达 90%左右,略低于高效离心风机的。可是当机组负荷改变,尤其是在低负荷状态下工作时,动叶可调轴流风机的运行效率大大高于具有入口导流器调节的离心风机的。如表 1-2 所列出的数据,机组带 100%负荷时,轴流风机效率为 86%,离心风机效率为 84%;机组负荷降低至 54%~50%时,轴流风机的效率都为 70%左右,离心风机的效率则为 28%与 25%。两者效率相差甚多。由此可知,轴流风机带部分负荷时的效率远远超过离心风机的。动叶可调轴流风机在变工况运行时的经济性是很明显的。所以,大容量机组如有较长时间在低负荷状态下运行,则选用动叶可调轴流风机是经济的。

表 1-2

日本 220MW 和 375MW 微正压锅炉送风机性能比较

性能比较		机 组 容 量 风 机 型 式	220MW		375MW	
			轴流式	离心式	轴流式	离心式
流 量 (m ³ /min)			7400	7400	11380	11380
全 压 (Pa)			7649	7649	8580	8580
转 速 (r/min)			1750	1150	1750	1160
轴功率 (kW)			1060	1100	1815	1856
风机效率 (%)	机 组 容 量	100%	86	84	86	84
	负 荷	81%	83.5	69	—	—
		54%	71	28	—	—
		50%	—	—	70	25

2. 对烟风道系统流量、全压变化的适应性强

目前锅炉烟风道的阻力还不能计算得很精确,尤其是锅炉烟道侧的阻力计算误差较大;实际运行时煤种变化,亦会造成所需流量、全压的变化;除尘器的改进、改造或增设烟气脱硫装置等使系统阻力变化。这些变化的因素要求风机的流量及全压能有相应的变化。可是离心风机如果容量选得大,则其效率将显著降低;如果容量选得小,则锅炉机组可能带不足满负荷。而使用动叶可调轴流风机时,只需要根据将来加装烟气脱硫装置等因素选用风机,运行时只需改变动叶的角度,风机产生的全压、输送的流量就可满足需要。此时,风机的效率变化却不很大。

3. 体积小、重量轻、启动力矩小

轴流风机的结构紧凑,体积小。如与相同性能离心风机作比较,轴流风机的空间尺寸约比离心风机的小30%。轴流风机重量轻,所以其基础重量亦可减小。轴流风机可以采用较高的转速和较高的流量系数,所以在相同的流量和全压的情况下,轴流风机转子的重量较轻。因此,轴流风机转子的飞轮效应(转动惯量)比离心风机的小得多。于是轴流风机的启动力矩大大小于离心风机的启动力矩。一般轴流送引风机的启动力矩只有离心送引风机启动力矩的14.2%~27.8%。启动力矩小,可减少电动机功率的富裕量和对电动机启动特性的要求,同时电动机造价可降低。如以600MW机组负压燃煤锅炉为例,采用轴流送风机可比离心式的轻30t;轴流引风机可比离心式的轻35t。轴流送风机的电动机比离心送风机的轻3.4t。轴流引风机的飞轮效应比离心引风机的小 $18800\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

由于轴流风机尺寸小、重量轻、飞轮效应小,因此容易布置。它可卧式布置,也可立式布置;它可以低位布置,也可以高位布置;甚至将轴流引风机布置在烟囱内,节省占用空间,而且还可省去消声装置和隔声罩(有烟囱外壳的遮蔽,可以防止噪声的传送)。

4. 避免大容量锅炉发生内向爆破

当今大容量负压燃烧的锅炉,因为在烟道内采用较高的烟气流速,所以烟气侧的阻力大增。如装设烟气脱硫装置,则引风机的全压可达到9806Pa以上,这本身就增加了炉膛和烟气流道发生内向爆破的潜在危险性。在锅炉运行中,如果突然关小或关闭离心送风机入口挡板(或导流器),则炉膛与烟道负压突然增加。这时,引风机处于小流量、高压力区域运行,炉膛和烟道、风道结构承受不了这个升高的负压力,就可能发生炉膛和烟风道的内向爆破事故。而轴流风机在小流量区域内工作时,风机的全压将沿着失速线明显地降低。轴流风机的这个特性正是防止炉膛、烟风道发生内向爆破所希望的。使用轴流送引风机的锅炉,完全可以避免大容量锅炉发生内向爆破事故,增加运行的安全性。

5. 风机转子结构复杂、制造精度高

动叶可调轴流风机,转子结构复杂、精密,转动部件多,造价较高。但是,经过多年来不断地在设计、结构、材料和工艺上改进、提高,目前动叶可调轴流风机运行的可靠性已大为提高,并不亚于离心风机。

6. 噪声高

轴流风机由于叶片多,叶轮圆周速度高,所以产生的噪声要比同性能的离心风机的高。但是,轴流风机的噪声频率发生在较高的倍频程频带,所以消除亦比较容易些。据国外资料,

不装消声器的轴流送风机的噪声可达 110~130dB (A)，而离心送风机的噪声约在 90~110dB (A)。但是，若轴流风机与离心风机性能相同，把噪声降到允许标准 (85dB)，则它们所花费用基本相同。

总之，虽然离心风机具有结构简单、噪声较小、较耐磨等优点，但随着单元机组容量的增大轴流风机取代离心风机作为锅炉送引风机仍是目前发展的主要趋势。

第二节 轴流风机作用原理

一、叶型、叶栅等名词解释

图 1-1 所示为轴流风机简图。轴流风机主要由叶轮、叶轮外壳、扩压器、进气箱、集流器等组成。设叶轮外径为 D ，叶轮轮毂直径为 d 。现用小于 $D/2$ ，大于 $d/2$ 的任意半径 r 的圆柱面切割叶轮，然后将圆柱截面在平面上展开，得到图 1-2 所示的直线叶栅。叶栅中叶片截面称为叶型。相同叶型作等距离排列称为叶栅。叶栅展开后排列在一直线上，称为直线叶栅。

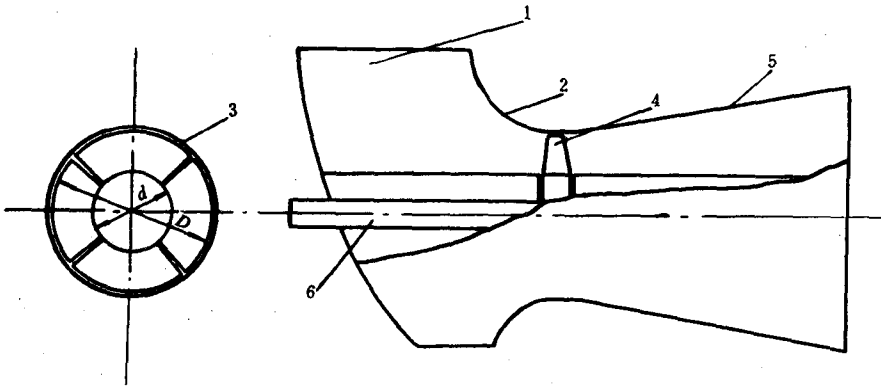


图 1-1 轴流风机简图

1—进气箱；2—集流器；3—叶轮外壳；4—叶轮；5—扩压器；6—轴

图 1-2 (a) 所示的翼型前端称为前缘，后端称为后缘。连接前缘与后缘的直线，称为翼弦，其弦长记为 b 。通过翼型中心的线，即翼型上表面与下表面内切圆中心连线称为翼型中弧线或中线。从翼弦到中线的距离称为挠度，其最大值称为最大挠度 f 。在弦长法线方向上，翼型上下表面之间的距离称为厚度，其最大值称为最大厚度 c 。来流的气流速度 v_∞ 与翼弦间的夹角，称为冲角 i 。

在叶栅中，两相邻翼型在圆周方向上的距离，称为栅距 t 。栅距 t 应该等于 $2\pi r/z$ ，其中 r 为圆柱截面的半径， z 为叶片数。弦长与栅距之比 b/t ，称为叶栅稠度，从叶片外缘向轮毂方向的叶栅稠度一般是逐渐增加的。翼弦与叶轮圆周方向之间的夹角 β_b ，称为叶片安装角。轴流风机沿叶片高度方向，安装角是变化的，所以安装角是指叶轮平均半径 r_m 处的值。

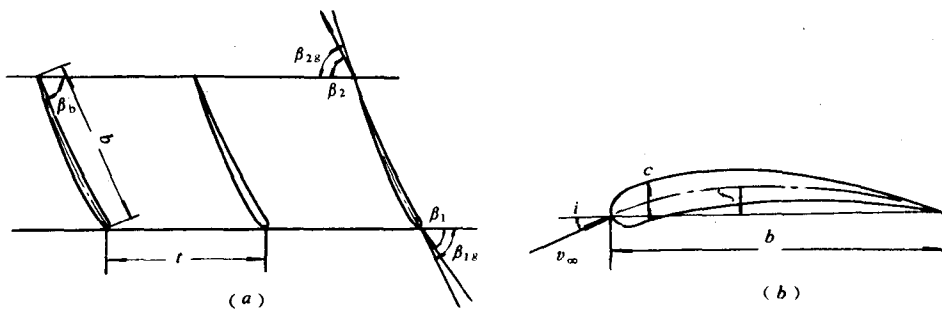


图 1-2 直线叶栅

(a) 叶栅; (b) 翼型

$$r_m = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{1 + \bar{\alpha}^2}{2}} \quad (1-1)$$

式中 D ——叶轮直径;

$\bar{\alpha}$ ——叶轮的轮毂比, $\bar{\alpha} = d/D$ (d 为轮毂直径)。

翼型前缘点中线的切线与圆周速度方向间的夹角 β_{1g} , 称为叶片进口安装角。翼型后缘点中线的切线与圆周速度方向间的夹角 β_{2g} , 称为叶片出口安装角。叶片出口安装角与叶片进口安装角之差, 称为翼型的弯曲角 θ , $\theta = \beta_{2g} - \beta_{1g}$ 。气流流入叶栅的方向与圆周速度方向间的夹角 β_1 , 称为气流进口角, 而叶片进口安装角 β_{1g} 与 β_1 之差, 称为气流的冲角 i , $i = \beta_{1g} - \beta_1$ 。气流流出叶栅方向与圆周速度反方向间的夹角 β_2 , 称为气流出角, 而叶片出口安装角 β_{2g} 与 β_2 之差, 称为气流出角落后角 δ , $\delta = \beta_{2g} - \beta_2$ 。气流出角 β_2 与进口角 β_1 之差, 称为气流折转角 ϵ , $\epsilon = \beta_2 - \beta_1$ 。

二、流体绕流翼型产生的升力与阻力

轴流风机叶片大多采用机翼的翼型, 流体绕流风机叶片的流动与飞机在大气中飞行的情况雷同。

在二元流场中, 来流速度 v_∞ 绕流一机翼时, 只要有适当的冲角 i , 就会产生绕机翼的速度环量, 于是机翼获得了升力。若流体是不可压缩的, 并作定常有势流动, 则无粘性流体绕机翼所产生的单位长度的升力为

$$F = \rho v_\infty \Gamma \quad (1-2)$$

式中 ρ ——流体密度;

v_∞ ——无穷远处流体的速度, 即来流速度;

Γ ——速度环量。

粘性流体绕流机翼时, 除了产生升力外, 还会产生阻力, 如图 1-3 示。如果用试验公式来计算, 则

$$\left. \begin{aligned} F_L &= c_L \frac{\rho v_\infty^2}{2} A \\ F_D &= c_D \frac{\rho v_\infty^2}{2} A \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 F_L, F_D ——升力与阻力；

c_L, c_D ——升力系数与阻力系数；

A ——机翼翼型的投影面积 ($A=bl$, 其中 l 为翼展)。

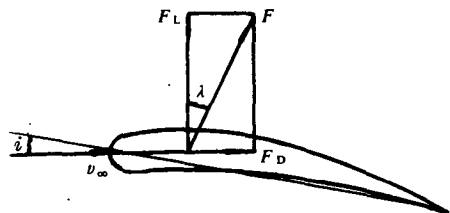


图 1-3 机翼上的升力与阻力

升力系数和阻力系数与翼型截面的形状、表面粗糙度、冲角及雷诺数等有关。各个翼型的升力系数与阻力系数，都是在风洞中试验而得。对于已定的翼型，升力系数与阻力系数是冲角 i 的函数，如图 1-4 (a) 所示。随着冲角 i 的增大，升力系数 c_L 与阻力系数 c_D 均增大。典型的翼型当冲角 i 增大至 16° 附近时，升力系数达到最大。当冲角大于 16° 时，升力系数急剧下降，而阻力系数不断增加，这种情况称为失速。此时，流体在翼型的上表面处发生边界层的分离，如图 1-5 所示。边界层的分离，使翼型所获得的升力骤然下降。为了使翼型能安全的工作，必须使它的工作点不落在失速区里。

降，而阻力系数不断增加，这种情况称为失速。此时，流体在翼型的上表面处发生边界层的分离，如图 1-5 所示。边界层的分离，使翼型所获得的升力骤然下降。为了使翼型能安全的工作，必须使它的工作点不落在失速区里。

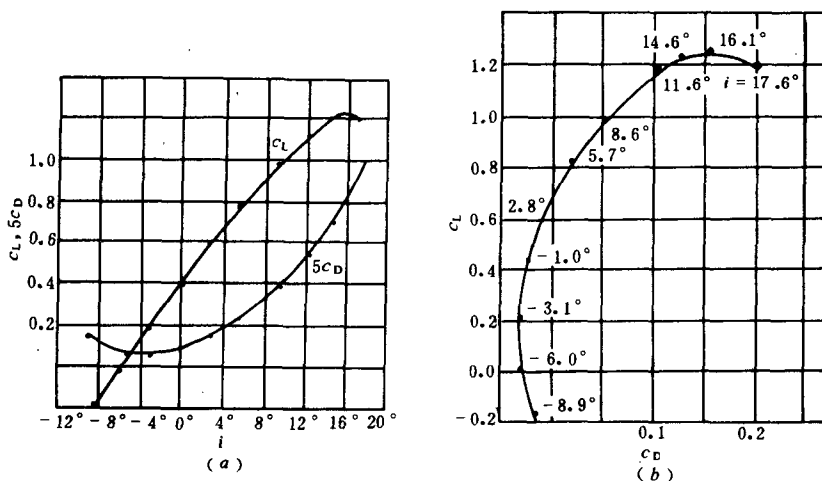


图 1-4 翼型空气动力性能

(a) 翼型性能曲线；(b) 翼型极曲线

优良的翼型应该具有大的升力，小的阻力，亦即具有较大的升阻比 F_L/F_D 。对于已定的翼型，升阻比在冲角 i 较小的地方，具有最大值。为了获得良好的翼型，已进行了大量的试验研究，目前所用翼型的升阻比可达 20 以上。

图 1-4 (b) 所示的翼型极曲线，横坐标是阻力系数，纵坐标是升力系数，翼型极曲线

用 $c_L = f(c_D)$ 表示, 并标出相对应的冲角 i 值。通过坐标原点的极曲线的切线, 可从图 1-4 (b) 看出它的比值 c_L/c_D 取极大值。切点附近的区域为翼型的最高质量区, 设计时选用的冲角应位于该区域内。将 $1/\text{tg}\lambda$ 称为翼型的质量, 则

$$1/\text{tg}\lambda = F_L/F_D = c_L/c_D \quad (1-4)$$

式中 λ ——流体对翼型的升力与合力之间的夹角。

λ 越小, 则 $1/\text{tg}\lambda$ 越大, 升阻比亦越大, 翼型的质量越高。

轴流风机的翼型, 常把已有的、性能良好的机翼或螺旋桨叶型作为原始叶型。它们有美国的 NACA, 英国的 RAF、LS, 德国的格廷根 (Göttingen), 以及圆弧形等叶型。

美国国家航空咨询委员会 (NACA), 有许多翼型的系列。如 NACA4406~4415 系列的翼型, 它的第一位数字表示最大挠度与弦长的比值, 第二位数字为前缘到最大挠度处的距离与弦长的比值, 后二位数字为最大厚度与弦长的比值。如 4406 翼型, 最大挠度为 $0.4b$, 距前缘为 $0.04b$, 最大厚度为 $0.06b$ 。表 1-3 为 NACA4406~4412 翼型截面参数。CLARK-Y 翼型亦是 NACA 翼型, 该翼型的截面尺寸如表 1-4 所列, 其中 x 、 y 均为弦长的百分数。

图 1-6 所示为 $c/b=0.1$, 雷诺数 $Re=8 \times 10^6$ 时的 CLARK-Y 翼型的气动力性能数据。



图 1-5 翼型的失速

英国皇家飞机厂 (RAF) 的 RAF-6E 翼型的截面尺寸如表 1-5 所列, 其中 x 、 y 均为弦长的百分数。图 1-7 为 RAF-6E 翼型气动力性能数据。

等厚度圆弧薄板翼型的气动力性能数据, 如图 1-8 所示。它是德国格廷根大学研究的试验数据。图中的横坐标是 b/R 和 f/b , 并画出 i 为常数与 c_D/c_L 为常数的曲线。在图 1-8 中, c_D/c_L 的最佳值位于 $0.05 < \frac{f}{b} < 0.1$

的范围内。对轴流风机来说, 简单的圆弧形是最实用的叶型。

选择轴流风机的翼型应该满足升阻比大而失速性能平缓的要求, 使风机在所需的流量、全压的情况下, 具有较高的效率和较宽的流量调节能。薄翼型的叶片, 当轴流风机偏离设计工况点时, 效率可能急剧下降。较厚的翼型叶片, 能在宽的流量调节范围内, 具有较高的效率。此外, 翼型应该具有较宽的试验雷诺数, 以利于翼型在各种条件下工作。

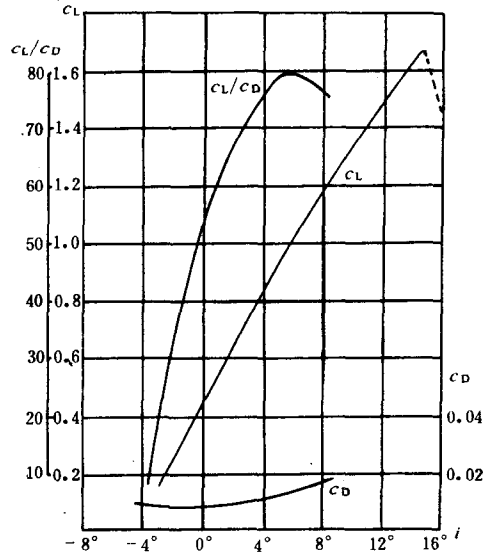


图 1-6 CLARK-Y 翼型气动力性能数据

表 1-3

NACA 4406~4412 翼型

翼弦坐标	翼 型													
	4406		4407		4408		4409		4410		4411		4412	
	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘
0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.25	1.25	-0.64	1.44	-0.78	1.63	-0.92	1.81	-1.05	2.02	-1.27	2.23	-1.30	2.44	-1.43
2.5	1.88	-0.79	2.12	-0.98	2.36	-1.17	2.61	-1.37	2.87	-1.57	3.13	-1.76	3.39	-1.95
5	2.79	-0.82	3.11	-1.10	3.43	-1.38	3.74	-1.65	4.07	-1.93	4.40	-2.21	4.73	-2.49
7.55	3.53	-0.73	3.90	-1.06	4.27	-1.40	4.64	-1.74	5.02	-2.08	5.39	-2.41	5.76	-2.74
10	4.15	-0.60	4.55	-0.93	4.96	-1.63	5.37	-1.73	5.77	-2.10	6.18	-2.48	6.59	-2.86
15	5.15	-0.25	5.61	-0.68	6.07	-1.11	6.52	-1.55	6.97	-2.00	7.43	-2.44	7.89	-2.88
20	5.90	+0.12	6.38	-0.35	6.86	-0.82	7.33	-1.30	7.82	-1.78	8.31	-2.26	8.80	-2.74
25	6.42	+0.46	6.91	-0.03	7.40	-0.52	7.90	-1.02	8.41	-1.52	8.91	-2.01	9.41	-2.50
30	6.76	+0.74	7.25	+0.24	7.75	-0.26	8.25	-0.76	8.76	-1.26	9.26	-1.76	9.76	-2.26
40	6.90	+1.10	7.38	+0.62	7.86	+0.14	8.35	-0.35	8.81	-0.84	9.32	-1.32	9.80	-1.80
50	6.55	+1.24	6.99	+0.81	7.43	+0.38	7.87	-0.07	8.31	-0.52	8.75	-0.96	9.19	-1.40
60	5.85	+1.27	6.23	+0.90	6.61	+0.53	7.00	+1.4	7.38	-0.24	7.76	-0.62	8.14	-1.00
70	4.85	+1.16	5.15	+0.86	5.45	+0.56	5.76	+0.26	6.07	-0.05	6.38	-0.35	6.69	-0.65
80	3.56	+0.91	3.78	+0.69	4.00	+0.47	4.21	+0.26	4.43	+0.05	4.66	-0.17	4.89	-0.39
90	1.96	+0.49	2.08	+0.38	2.20	+0.27	2.33	+0.14	2.45	+0.02	2.58	-0.10	2.71	-0.22
95	1.05	+0.24	1.12	+0.17	1.19	+0.10	1.26	+0.03	1.33	0.04	1.40	-0.10	1.47	-0.16
100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

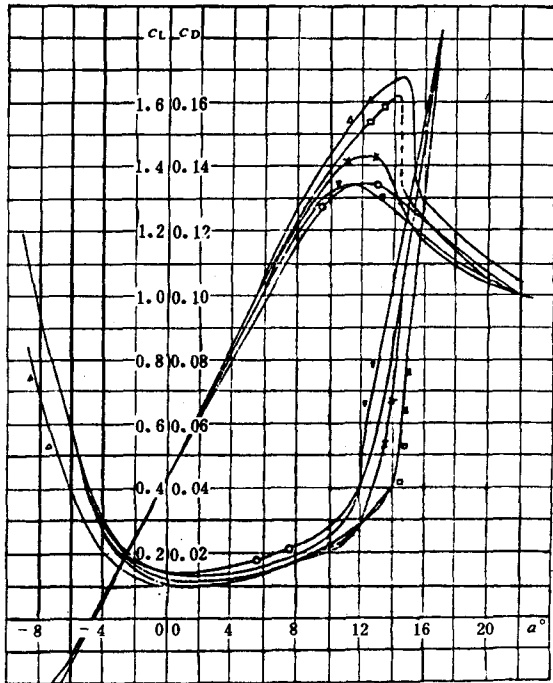


图 1-7 RAF-6E 翼型气动性能数据
 ○— $Re=0.312 \times 10^6$; ▽— $Re=0.791 \times 10^6$;
 ×— $Re=1.50 \times 10^6$; □— $Re=3.10 \times 10^6$;
 △— $Re=5.07 \times 10^6$

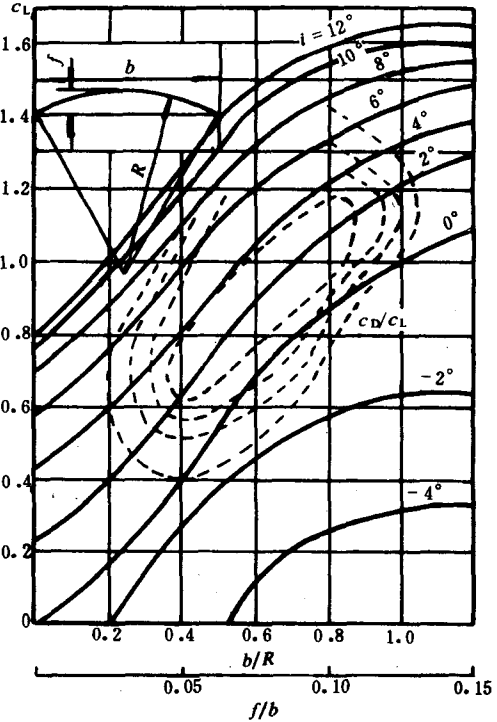


图 1-8 等厚度圆弧薄板翼型气动性能数据

表 1-4

CLARK-Y 翼型

距前缘距离 (x)	0.00	1.25	2.50	5.00	7.50	10.00	15.00	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00	90.00	95.00	100.00
上表面坐标 (y)	2.99	4.66	5.56	6.75	7.56	8.20	9.14	9.72	10.00	9.75	9.00	7.82	6.28	4.46	2.39	1.27	0.10
下表面坐标 ($-y$)	2.99	1.65	1.26	0.80	0.54	0.36	0.13	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 1-5

RAF-6E 翼型

距前缘距离 (x)	0.00	1.25	2.50	5.00	7.50	10.00	15.00	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00	90.00	95.00	100.00
上表面坐标 (y)	1.15	3.19	4.42	6.10	7.24	8.09	9.28	9.90	10.30	10.22	9.80	8.98	7.70	5.91	3.79	2.58	0.76

三、流体绕流叶栅产生升力与阻力

为了简化所研究的问题，先将流体作为理想流体讨论。一直线叶栅，取翼型流道中心流线组成的封闭曲线 $ABCD$ ，其中包含叶栅中的一个叶片，如图 1-9 所示。以 $ABCD$ 为控制体（垂直于纸面的高度为 1），列动量方程，求解气流绕流叶栅对翼型的作用力。

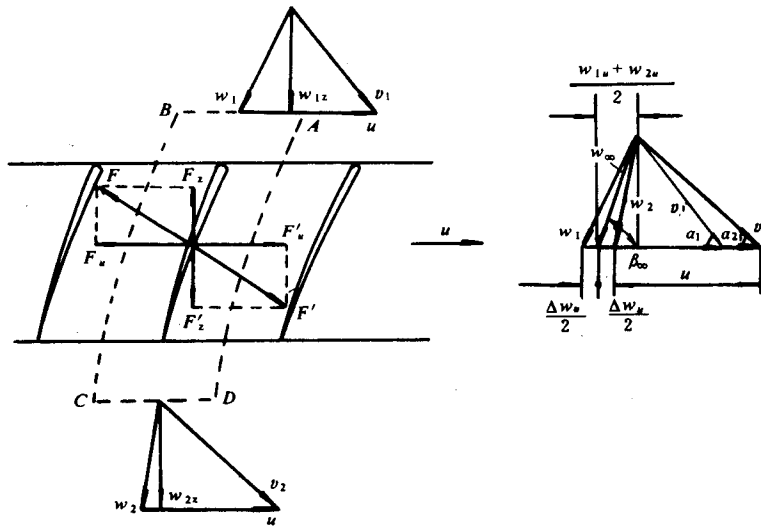


图 1-9 气流绕流叶栅的流动及速度三角形

气流绕流翼型时，对翼型的作用力为 F ，力 F 分解为轴向力 F_z 与圆周力 F_u 。轴流风机可以被圆周方向力 F_u 驱动，但是轴流风机从原动机输入功率，以速度 u 推动叶栅，所以叶栅给予流体的反作用力 F' ，大小等于 F ，方向与 F 相反。反作用力可被分解成圆周力 F'_u 与轴向力 F'_z 。轴向力 F'_z 使气流沿轴向流动，产生流量，增加动能。圆周力 F'_u 使气流沿圆周方向运动，获得能量。

设气流以相对速度 w_1 流入控制面 AB ，而以相对速度 w_2 流出控制面 CD 。由于图 1-9

中的叶栅是在任意半径 r 处展开的, 而流体又在半径为 r 的圆柱面上流动, 所以气流在 AB 面与 CD 面上的圆周速度是相同的。图中 v_1 与 v_2 为控制面上进出口处气流的绝对速度。

对流过栅距为 t 的流体, 应用连续性方程, 可得

$$\rho w_{1z}t = \rho w_{2z}t$$

由此得到

$$w_{1z} = w_{2z}$$

计算封闭周线的速度环量 Γ_{ABCD} , 即

$$\Gamma_{ABCD} = \Gamma_{AB} + \Gamma_{BC} + \Gamma_{CD} + \Gamma_{DA}$$

中间流线 AD 与 BC 上的速度、压力分布均相同, 所以

$$\Gamma_{AD} = \Gamma_{BC}$$

因此

$$\Gamma_{ABCD} = \Gamma_{AB} + \Gamma_{CD} = (w_{1u} - w_{2u})t \quad (1-5)$$

列圆周方向动量方程, 得

$$F'_u = \rho w_{1z}t(w_{1u} - w_{2u})$$

将式 (1-5) 代入上式, 可得

$$F'_u = \rho w_{1z}\Gamma \quad (1-6)$$

其次, 在叶栅的进出口之间应用伯诺里方程, 得到

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2}(w_{2u}^2 - w_{1u}^2)$$

列轴向动量方程, 得

$$F'_z = (p_2 - p_1)t = \frac{\rho}{2}(w_{1u}^2 - w_{2u}^2)t = \rho\Gamma \frac{w_{1u} + w_{2u}}{2}$$

式中 p_1, p_2 —— AB 面与 CD 面上气流的压力。

由图 1-9 可知

$$w_{\infty u} = \frac{w_{1u} + w_{2u}}{2}$$

因此

$$F'_z = \rho w_{\infty u}\Gamma$$

翼型给气流的合力为

$$F' = \sqrt{F_u'^2 + F_z'^2} = \rho w_{\infty}\Gamma \quad (1-7)$$

速度 w_{∞} 表示流体流入翼型前和流出翼型后的相对速度的向量平均值。

$$\vec{w}_{\infty} = \frac{\vec{w}_1 + \vec{w}_2}{2}$$

w_{∞} 与圆周速度的夹角为 β_{∞} , 由图 1-9 可求得

$$\operatorname{tg}\beta_{\infty} = w_z/w_{\infty u} = \frac{2w_z}{w_{1u} + w_{2u}} \quad (1-8)$$

$$w_{\infty} = \sqrt{w_z^2 + \left(\frac{w_{1u} + w_{2u}}{2}\right)^2} \quad (1-9)$$

粘性流体绕流叶栅的情况, 当然也和绕流孤立翼型的情况一样, 要产生阻力。粘性流体对叶栅翼型产生的升力与阻力可由下述公式表达, 即

$$\left. \begin{aligned} F_L &= c_L \frac{\rho w_\infty^2}{2} A \\ F_D &= c_D \frac{\rho w_\infty^2}{2} A \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

式中 c_L, c_D ——叶栅翼型的升力系数与阻力系数。

流体绕流翼型的流动，是孤立翼型的问题。在孤立翼型中，离开翼型一定距离，流体的流动就维持原来的方向，翼型对流场的干扰亦消失。而叶栅则不然，即使距叶栅相当远，仍存在一定量气流偏转角。因而，对翼型的作用力，要由叶栅前后速度向量的平均值 w_∞ 决定。同时，叶栅的翼型具有厚度，使流道面积减小，流速加快。其次，在叶栅边界层中，摩擦力使边界层增厚，流道的通流面积还要缩小。这些因素，如果叶栅稠度 $b/t=0.5\sim 0.7$ 时（轴流风机多半在此范围内），翼型间相互干扰就较小，孤立翼型的升力系数与阻力系数能应用于叶栅中。所以，轴流风机的叶栅绕流可以简化为孤立翼型的绕流问题来处理。如叶栅稠度 $b/t>1$ 时，实际翼型在叶栅中的升力系数不等于孤立翼型的升力系数，而需要进行叶栅试验，确定升力系数，然后进行轴流风机的计算。

第三节 轴流风机欧拉方程

欧拉方程是轴流风机的基本方程。它是研究叶栅给予气流能量的函数关系。

由图 1-9 所示，气流在动叶栅进出口处，沿圆周速度方向的动量矩变化为

$$\rho q_V (v_{2u} r - v_{1u} r)$$

式中 ρ ——气流密度；

q_V ——气流的体积流量；

v_{2u}, v_{1u} ——叶轮出口与进口处，气流的绝对速度在圆周上的分量，即 $v_{2u} = v_2 \cos \alpha_2, v_{1u} = v_1 \cos \alpha_1$ ；

r ——圆柱截面的半径。

设作用在气流上的外力矩为 M ，由动量矩方程得

$$M = \rho q_V r (v_{2u} - v_{1u})$$

用叶轮旋转角速度 ω 乘上式两端，可得

$$M\omega = \rho q_V u (v_{2u} - v_{1u})$$

若无粘性流体从轴流风机中获得的全压为 p_t ，则它从风机中获得的功率为 $q_V p_t$ ，等于轴流风机所给予流体的功率 $M\omega$ 。因此可得

$$p_t = \rho u (v_{2u} - v_{1u}) \quad (1-11)$$

式 (1-11) 为轴流风机欧拉方程。

又，根据速度三角形可得

$$v_2 \cos \alpha_2 = u - v_{2z} \operatorname{ctg} \beta_2; \quad v_1 \cos \alpha_1 = u - v_{1z} \operatorname{ctg} \beta_1$$

风机叶轮如在轴向的通流面积相等，则 $v_{1z} \approx v_{2z}$ 。因而

$$p_t = \rho u v_z (\operatorname{ctg} \beta_1 - \operatorname{ctg} \beta_2) \quad (1-12)$$

由式 (1-12) 可知:

增加叶轮的圆周速度可提高轴流风机的全压。然而, 叶轮圆周速度的增加, 主要受到叶片材料强度的限制。一般轴流风机叶顶圆周速度 $u \leq 100\text{m/s}$, 目前轴流风机最大的叶顶圆周速度达 162m/s 。

其次, 气流的 β_2 必须大于 β_1 , 此时风机的全压才能大于零。所以, 增加风机的全压, 也可以增大气流的折转角 $\epsilon = \beta_2 - \beta_1$ 。可是太大的气流折转角, 易产生边界层分离, 导致气流流动情况恶化。为了能得到高的叶栅效率, 一般考虑最大的气流折转角 ϵ 等于 $40^\circ \sim 45^\circ$ 。

再次, 增加轴向速度 v_z 可增加风机的全压 p_t 。但 v_z 的增大主要是增加了风机气流中的动压。目前一般轴流风机的轴向速度 $v_z \leq 30 \sim 60\text{m/s}$ 。

综上所述, 单级轴流风机所产生的全压是不很大的。为了获得较高的全压, 轴流风机可以采用多级叶轮。目前, 火力发电厂的锅炉送引风机已有多级轴流风机。

p_t 是无粘性流体在轴流风机中所获得的全压。考虑流体流动时各种损失的因素, 粘性流体所获得的全压 p , 会有所降低, 即

$$p = p_t \eta \quad (1-13)$$

式中 η ——轴流风机的全压效率。

轴流风机的全压包含动压与静压两部分。气流通过风机后, 静压 p_{st} 与全压 p_t 之比, 定义为反作用度 Ω 。

$$\Omega = p_{st} / p_t \quad (1-14)$$

由速度三角形可得

$$uv_2 \cos \alpha_2 - uv_1 \cos \alpha_1 = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$

$$p_t = \rho \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} \right) \quad (1-15)$$

式中: $\rho \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}$ 为动压; $\rho \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$ 为静压。反作用度 Ω 可写成

$$\Omega = \frac{w_1^2 - w_2^2}{2u(v_{2u} - v_{1u})}$$

∴ $w_1^2 - w_2^2 = w_{1u}^2 - w_{2u}^2 = (w_{1u} + w_{2u})(w_{1u} - w_{2u})$

而 $\frac{w_{1u} + w_{2u}}{2} = w_{\infty u}$

$$v_{2u} - v_{1u} = w_{1u} - w_{2u}$$

∴ $\Omega = w_{\infty u} / u = \frac{w_{1u} + w_{2u}}{2u} \quad (1-16)$

式 (1-16) 为反作用度公式。它是轴流风机的一个重要参数。经过适当变换, 还可用下式表示:

$$\Omega = 1 - \frac{v_{1u}}{u} - \frac{v_{2u} - v_{1u}}{2u} = 1 - \frac{v_{1u}}{u} - \frac{\Delta v_u}{2u} \quad (1-17)$$

式中: v_{1u} 称为气流的预先旋绕, 即预旋。若 $v_{1u} > 0$, 称为正预旋; $v_{1u} < 0$, 称为负预旋。式中 $v_{2u} - v_{1u} = \Delta v_u$, 表示气流在叶栅中的绕流, 又称扭速, 与气流折转角 ϵ 的涵义是一致的。