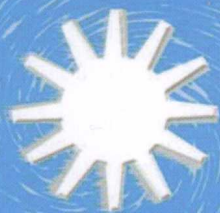


# 轴流通风机的工程 设计方法 —— 设计手册

ZHOULIUTONGFENGJI DE  
GONGCHENG SHEJI FANGFA  
SHEJI SHOUCHE

吴秉礼 李文洲 编著



吉林大学出版社

# 轴流通风机的工程设计方法

## ——设计手册

吴秉礼 李文洲 编著

吉林大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

轴流通风机的工程设计方法/吴秉礼,李文洲编著.

长春:吉林大学出版社,2007.9

ISBN 978-7-5601-3695-0

I. 轴… II. ①吴…②李… III. 轴流通风机-工程设计

IV. TH432.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 148143 号

书名:轴流通风机的工程设计方法

编著者:吴秉礼 李文洲

责任编辑、责任校对:陈 铨

吉林大学出版社出版、发行

开本:880×1230 毫米 1/32

印张:9.25 字数:243 千字

ISBN 978-7-5601-3695-0

封面设计:创意广告

吉林大学印刷厂印刷

2007年9月第1版

2007年9月第1次印刷

印数:1-2000册

定价:22.00元

版权所有 翻印必究

社址:长春市明德路421号 邮编:130021

发行部电话:0431-88499826

网址:<http://www.jlup.edu.cn>

E-mail:[jlup@mail.jlu.edu.cn](mailto:jlup@mail.jlu.edu.cn)

## 内容简介

本书是在综合国内外先进实用的轴流通风机气动设计方法以及作者多年从事轴流通风机设计实践与研究成果的基础上编著的。

全书共两部分内容:第一部分阐述了轴流通风机气动设计的工程方法;第二部分论述了构造轴流通风机产品系列群的现代设计方法。与这两部分内容相关的知识、资料等均在附录中介绍。

本书可供风机行业及其他有关部门从事轴流通风机设计的工程技术人员阅读,亦可供高等院校相关专业的师生参考。

## 前 言

以手册形式编著《轴流通风机的工程设计方法》，旨在为相关设计人员更好、更快地学习、掌握轴流通风机设计的一种简易、实用的方法。

本书阐述了轴流通风机空气动力设计的工程方法；论述了构造轴流通风机产品系列群的现代设计方法；与这两部分内容相关的知识、资料等均在附录中介绍。

目前，国内轴流通风机的空气动力设计有两类方法：传统（常规）设计方法<sup>[1,2]</sup>和现代（优化）设计方法<sup>[3,4]</sup>。前者简单易学，但需要有统计数据（或曲线）以及修正系数作支撑，并需经验地选取效率值，且设计计算精度易受到影响；后者以三维流理论为基础，运用通用或专用软件由计算机计算求解，计算精度虽然较高，但设计计算成本亦高，且计算复杂，一般设计人员不易掌握。

与上述两类设计方法相比，本书提供的工程设计方法，物理概念清晰，数学关系式简单，计算快捷，容易掌握，且具有足够的精度。作为工业用途的轴流通风机，使用量大，应用面广，性能要求千变万化。对此，作者以为，既然各类空气动力设计方法的物理模型都有缺欠（不考虑气流黏性影响），亦就不必在数学处理方法上精益求精；能够用初等数学解决设计计算问题，何必采用高等数学？！须知，提高轴流通风机的运行效率要比绞尽脑汁地提高 2~3 个百分点的风机效率重要的多。轴流通风机气动设计的工程方法本质上亦是一种优化设计方法，即判据优化设计法，该方法简明地解决了物理模型与数学方法间的关系，必将在设计实践中得到推广应用。

现今，国内轴流通风机大都采用系列化设计方法获得系列产品。实践表明，系列化产品只能满足用户的一般（常规）需要，难以满足市场多变

的、特殊的需求,如进一步提高或降低风压、减少噪声等。对此,作者同样以为,轴流通风机产品从系列化设计向系列群化设计转变,是全方位满足市场需要的必然要求,是轴流通风机产品设计的必经之路。为此,本书将论述构造轴流通风机产品系列群的现代方法,而产品的具体结构型式不在叙述之列。

本书讨论的对象为普通型式的轴流通风机。由于子午加速轴流通风机的叶片流道内存在径向流动,形成多变的轴向和径向的混合流动,已超出本书的讨论范围。

本书第2部分中的2.2节:相似原理与相似设计概述以及附录A、B、C、D由李文洲编写,其余内容由吴秉礼完成,全书由吴秉礼统稿。

需要指出的是,《轴流通风机的工程设计方法》作为讲义,曾于2004年5月在我国风机行业举办的轴流通风机设计学习班上讲用;经修订后,2006年又在中国风机技术网站上连载。这期间,沈阳鼓风机研究所所长陈凤仪高级工程师、《风机技术》副主编高科光高级工程师以及郭庆富高级工程师给予了热情的支持和帮助。在本书正式出版之际,向他们表示诚挚的感谢!

本书是在上述工作的基础上,经再次修订后出版的。在编著本书的过程中,得到了运城市安运风机有限公司董事长兼总经理李文洲高级工程师的大力支持;该公司的工程师们提出了宝贵的意见和建议。对此,向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,错误和疏漏之处请读者批评、指正。

编著者

2007年4月

# 符 号

## 1. 几何参数

$D$ ——叶轮直径, m

$R$ ——叶轮半径, m

$r$ ——叶片切面半径, m

$\bar{r}=r/R$ ——叶片切面相对半径

$r_b$ ——轮毂半径, m

$X_b=r_b/R$ ——轮毂比

$C$ ——叶剖面(翼型)弦长, m

$\bar{C}=C/R$ ——相对弦长

$t$ ——叶剖面(翼型)最大厚度, m

$\bar{t}=t/D$ ——相对厚度

$\sigma_F$ ——风机实度

$\sigma_r$ ——叶片实度

$n$ ——叶片数

$A_2/A_1$ ——扩压比

$F=\frac{\pi D^2}{4}$ ——叶轮面积,  $m^2$

## 2. 运动参数

$V_a$ ——流经叶轮的气流轴向速度, m/s

$U=\Omega \cdot r$  叶片切面的圆周速度, m/s

$\Omega=2\pi n/60$ ——叶轮旋转角速度, 1/s

$n$ ——叶轮工作转速, r/min

$V_m$ ——叶片切面气流的合速度, m/s

$V_\theta = \omega r$ ——叶轮前或后在某位置  $r$  处的气流旋转线速度, m/s

$\omega$ ——气流旋转角速度, 1/s

### 3. 动力参数

$L$ ——叶剖面(翼型)升力, N

$D$ ——叶剖面(翼型)阻力, N

$Z$ ——叶剖面(翼型)轴向力, N

$Y$ ——叶剖面(翼型)切向力, N

$T$ ——扭矩, N·m

$Q$ ——轴流通风机流量,  $\text{m}^3/\text{s}$

$P_T$ ——轴流通风机全压, Pa

$P_s$ ——轴流通风机静压, Pa

$P_d$ ——轴流通风机动压, Pa

$N$ ——轴流通风机功率, kW

### 4. 系数

$C_L$ ——升力系数

$C_D$ ——阻力系数

$\nu = C_L/C_D$ ——升阻比

$\bar{Q}(\Phi)$ ——流量系数  $\bar{Q}(\Phi) = Q / \frac{1}{4} \pi D^2 \cdot U$

$\bar{P}_T(\Psi_T)$ ——全压系数  $\bar{P}_T(\Psi_T) = P_T / \frac{1}{2} \rho \cdot U^2$

$\bar{P}_s(\Psi_s)$ ——静压系数  $\bar{P}_s(\Psi_s) = P_s / \frac{1}{2} \rho \cdot U^2$

$\bar{N}(\lambda)$ ——功率系数  $\bar{N}(\lambda) = N / \frac{1}{8} \pi D^2 \cdot \rho \cdot U^3$

$\eta_T$ ——全压效率

$\eta_s$ ——静压效率

$\eta_{BL}$ ——级或叶片效率

$K_T$ ——全压系数  $K_T = P_T / \frac{1}{2} \rho V_a^2$



$K_{th}$ ——理论全压系数  $K_{th} = K_T / \eta_{BL}$

$\epsilon (\epsilon_s, \epsilon_p)$ ——旋流系数

$\lambda$ ——流速系数

## 5. 角度

$\phi$ ——叶片扭曲角

$\xi$ ——叶片摆差角或前伸角

$\beta_m$ ——合速度  $V_m$  与轴向速度  $V_a$  之夹角

$\alpha (i)$ ——气流攻角

$\beta_1$ ——气流绝对入口角

$\beta_2$ ——气流绝对出口角

$\theta$ ——叶剖面的弯度角

$\delta$ ——气流出口落后角

$\theta_{op}$ ——最佳扩压角之半

$\theta_e$ ——当量扩压角之半

## 6. 注脚

MS——平均的

R——叶轮的

P——前导叶的

S——后导叶的

D——扩压器的

b——叶根处的

th——理论的

i——理想的

Cu——曲率的

1——风机级的入口处

2——风机级的出口处

## 目 录

1. 空气动力设计 .....	1
1.1 主要关系式的建立 .....	1
1.1.1 基本假设 .....	1
1.1.2 两个参数的引入与定义 .....	2
1.1.3 气流流动的基本方程 .....	3
1.1.3.1 叶轮前后的压力关系 .....	3
1.1.3.2 气流速度的大小与方向 .....	6
1.1.4 叶剖面上的升力和阻力 .....	7
1.1.5 气流绝对入口角和出口角 .....	12
1.2 设计内容及其方法步骤 .....	13
1.2.1 叶轮设计 .....	14
1.2.1.1 孤立翼型设计法 .....	16
1.2.1.2 改进的孤立翼型设计法 .....	16
1.2.1.3 干扰因子修正设计法 .....	19
1.2.1.4 叶栅设计法 .....	19
1.2.1.5 叶轮损失计算 .....	22
1.2.2 导叶设计 .....	28
1.2.2.1 前导叶设计 .....	28
1.2.2.2 后导叶设计 .....	34
1.2.2.3 对称导叶和弯板导叶设计 .....	38
1.2.3 辅助部件设计 .....	41
1.2.3.1 集流器设计 .....	41
1.2.3.2 头部整流罩设计 .....	43
1.2.3.3 扩压器设计 .....	44
1.2.3.4 进气箱设计 .....	57
1.2.3.5 扩散塔与出风箱设计 .....	58

1.2.4	风机级与装置效率的表述	63
1.2.4.1	风机级效率	64
1.2.4.2	风机装置效率	64
1.3	设计举例	66
1.3.1	孤立翼型设计法的应用举例	66
1.3.1.1	低压轴流通风机之一	66
1.3.1.2	低压轴流通风机之二	71
1.3.2	改进的孤立翼型设计法的应用举例	73
1.3.3	干扰因子修正设计法的应用举例	75
1.3.3.1	等厚度弯板轴流通风机	75
1.3.3.2	中压大流量轴流通风机	82
1.3.4	叶栅设计法的应用举例	87
1.3.5	其他风机级的设计举例或设计说明	93
1.3.5.1	前导叶+叶轮(P+R)级	93
1.3.5.2	前导叶+叶轮+后导叶(P+R+S)级	99
1.3.5.3	R+S+R+S两级轴流通风机	99
1.3.5.4	$R_I + R_{II}$ 对旋轴流通风机	100
1.4	空气动力性能估算	107
1.4.1	平均半径的定义与分析	108
1.4.2	叶轮叶片性能估算	109
1.4.2.1	旋流系数与流速系数关系式的建立	109
1.4.2.2	压力关系式及叶轮的效率损失	113
1.4.2.3	多翼干扰的影响与修正	114
1.4.3	导叶性能估算	115
1.4.3.1	前导叶性能估算	115
1.4.3.2	后导叶性能估算	116
1.4.4	装置性能	116
1.4.5	举例	117
1.4.5.1	调角轴流通风机性能估算	117
1.4.5.2	高压轴流通风机性能估算	123
2.	产品系列群的实施设计	130
2.1	关于产品系列群	130
2.1.1	母系列的确立	131

2.1.2 子系列的生成 .....	131
<b>2.2 相似原理与相似设计概述 .....</b>	<b>132</b>
2.2.1 相似原理 .....	132
2.2.2 性能的相似换算 .....	134
2.2.3 相似设计方法步骤 .....	135
<b>2.3 关于实度效应 .....</b>	<b>136</b>
2.3.1 实度及其相似与转换 .....	137
2.3.2 性能的实度换算 .....	139
2.3.2.1 实度换算关系式的建立 .....	139
2.3.2.2 实度换算方法步骤 .....	146
2.3.2.3 实度换算举例 .....	148
2.3.2.4 实度换算的试验验证 .....	159
<b>2.4 模化-模块化设计 .....</b>	<b>163</b>
2.4.1 关于模化设计 .....	163
2.4.2 关于模块化设计 .....	163
2.4.3 关于模化-模块化设计 .....	165
2.4.4 设计应用 .....	165
<b>2.5 叶轮的组合设计 .....</b>	<b>167</b>
2.5.1 组合设计关联式 .....	168
2.5.2 应用举例 .....	171
<b>2.6 渐进设计方法 .....</b>	<b>182</b>
2.6.1 渐进设计法的构思 .....	182
2.6.2 应用举例 .....	184
<b>附录 .....</b>	<b>.....</b>
<b>附录 A 轴流通风机的分类 .....</b>	<b>190</b>
<b>附录 B 轴流通风机的空气动力略图 .....</b>	<b>193</b>
<b>附录 C 轴流通风机进口和出口的规定 .....</b>	<b>194</b>
<b>附录 D 轴流通风机的空气动力性能与曲线 .....</b>	<b>196</b>
D1 气动性能 .....	196
D1.1 流量 .....	196
D1.2 风压 .....	197
D1.3 功率 .....	198
D1.4 效率 .....	198

D2	气动性能曲线 .....	199
<b>附录 E</b>	<b>轴流通风机气动设计判据综述 .....</b>	<b>201</b>
E1	关于载荷限定 .....	201
E2	关于流速系数和旋流系数的限定 .....	203
E3	关于叶片阻塞的判定 .....	205
E4	关于边壁失速的判定 .....	207
E5	关于雷诺数的检验 .....	208
E6	关于动静叶片数的匹配与轴向间距的配置 .....	208
E6.1	动静叶片数的匹配 .....	209
E6.2	动静叶片轴向间距配置 .....	210
<b>附录 F</b>	<b>孤立翼型与叶栅翼型资料 .....</b>	<b>212</b>
F1	孤立翼型 .....	212
F1.1	基础知识 .....	212
F1.2	常用的孤立翼型 .....	224
F2	叶栅翼型 .....	244
F2.1	几何参数、气流特征角及其之间的关系 .....	247
F2.2	常用叶栅翼型的型面坐标 .....	248
F2.3	常用叶栅翼型的气动性能曲线 .....	252
F3	翼型的选定与升力系数的选取 .....	257
<b>附录 G</b>	<b>叶片设计图样的绘制 .....</b>	<b>259</b>
G1	绘制前的技术准备 .....	259
G1.1	几何参数的协调 .....	259
G1.2	过渡切面的修型 .....	260
G1.3	圆弧翼型坐标值的转换 .....	262
G1.4	叶片几何参数表的推荐 .....	268
G1.5	设计参数与工艺参数的转换 .....	271
G2	叶片设计图样绘制方法与步骤 .....	274
<b>附录 H</b>	<b>射流轴流通风机气动设计的注记 .....</b>	<b>277</b>
H1	射流风机的性能 .....	277
H2	射流风机气动设计要点 .....	279
	<b>参考文献 .....</b>	<b>280</b>

## 1. 空气动力设计<sup>[5]</sup>

叶轮机械的空气动力设计有正、反问题之分。

轴流通风机空气动力设计反问题,是在给定流量、压力的条件下,确定出风机直径、轮毂比和工作转速的最佳匹配,计算出动、静叶片的叶型——沿径向的宽度(弦长)、厚度和扭曲角度的分布规律以及控制切面所选翼型的坐标值。轴流通风机空气动力设计的正问题,是在已知动、静叶片相关几何参数的情况下,预测或估算出风机的空气动力性能。本章将着重叙述反设计计算(即通常所说 空气动力设计),适当叙及正设计计算。

空气动力设计采用的是自由涡(等环量)流型,并有孤立翼型设计法和叶栅设计法之分。对于中、高压轴流通风机,自由涡流型较好的符合气体绕叶轮的实际流动;对于较小轮毂比的低压轴流通风机,这里推荐经改进的自由涡流设计法而不采用任意涡流型。

自由涡流型关系式的推导中,对气流的径向流动予以忽略,气体的压缩性与黏性不予考虑。本手册所涉及的空气动力学的基础理论知识不再赘述,因为这方面内容的书藉业已做了大量介绍。

### 1.1 主要关系式的建立

#### 1.1.1 基本假设

①假定沿叶片半径方向气流的轴向速度保持不变,即不考虑径向速度分量的影响,认为气流的轴向速度沿半径方向处处相同。在叶轮的头罩设计合理并保证均匀的人流条件下,此假设条件是可以达到的;即使不

能实现完全均匀的轴向速度分布,其平均偏差亦很小,对所推导的关系式的正确性不会产生明显的影响。

②假定气流流经叶轮后,沿叶片半径的压升为常数,即流经叶片的任何一个剖面,气流都得到相同的压力提升。这个假设是比较符合实际情况的。

由以上两个假设可进一步推断,气流沿叶片径向没有流动,而是一圈一圈的互不渗混的流动。由此可知,通常情况下,气流通过叶片剖面具有二维性质,二维翼型的空气动力性能可用于叶片的设计上。

③假定叶轮具有无限多个叶片,亦即忽略叶片运动间隙性的影响。此时可认为,叶轮如同一个圆盘,在每个半径的圆周上,对气流的作用是完全均匀和连续的。事实表明,对于有限个叶片的叶轮或叶片数较少的叶轮,这个假设亦是合理的、可行的。

满足以上三个假设条件的流动称为自由涡流型或等环量流型。

### 1.1.2 两个参数的引入与定义

在将要推导的叶轮流动的主要关系式以及轴流通风机空气动力设计计算中,几乎所有的物理量都可表达为如下两个参数的函数,并使计算关系式变得十分简单,成为工程设计方法的突出特点。两个基本参数的定义如下:

#### (1) 旋流系数

在流动通道的某个位置上,气流的旋转线速度与轴向速度之比,称作该位置处的旋流系数并以 $\epsilon$ 表示:

$$\epsilon = \frac{V_{\theta}}{V_a} = \frac{\omega \cdot r}{V_a} \quad (1-1)$$

式中——

$\omega$ ——气流的旋转角速度;

$r$ ——半径位置;

$V_{\theta} = \omega \cdot r$ ——气流的旋转线速度;

$V_a$ ——通过叶轮的平均轴向速度。

由前导叶引起的位于前导叶之后、叶轮之前的气流旋转线速度以  $V_{\theta_p}$  表示, 相应的旋流系数表示为  $\epsilon_p = V_{\theta_p} / V_a$ , 并与与叶轮旋转方向的反方向为正号。由叶轮引起的位于叶轮之后、后导叶之前的气流旋转线速度以  $V_{\theta_s}$  表示, 相应的旋流系数表示为  $\epsilon_s = V_{\theta_s} / V_a$ , 并与与叶轮旋转方向相同为正号。

### (2) 流速系数

在叶片的某一半径处, 气流的轴向速度与该半径处叶片的旋转线速度之比, 称作该半径处气流的流速系数并以  $\lambda$  表示:

$$\lambda = V_a / \Omega \cdot r \quad (1-2)$$

式中

$\Omega$ ——叶轮叶片的旋转角速度;

$r$ ——叶片某半径位置;

$V_a$ ——通过叶轮的轴向速度。

由(1-2)式进一步得到:

$$\Lambda = V_a / \Omega \cdot R = \lambda \cdot \bar{r} \quad (1-3)$$

$\Lambda$  为叶尖处的流速系数;

$\bar{r} = r / R$  为相对半径,  $R$  为叶轮半径。

## 1.1.3 气流流动的基本方程

### 1.1.3.1 叶轮前后的压力关系

由图 1-1, 从中取一微元环形通道, 其半径为  $r$ , 圆环宽度为  $dr$ 。假定不存在径向流动, 微元环内的气体不与外界交换, 气流轴向进入前导叶后产生一个与叶轮旋转方向相反的旋转(切向偏转)( $V_{\theta_p}$ ); 经过叶轮后的气流产生一个与叶轮旋转方向相同的旋转( $V_{\theta_s}$ ); 再经过后导叶, 气流变成单一的轴向流动。于是, 流道内各截面处的伯努利方程分别为:

在前导叶之前的 0-0 截面:

$$P_{T_0} = P_{S_0} + \frac{1}{2} \rho V_a^2 \quad (1-4)$$

在前导叶之后、叶轮之前的 1-1 截面:



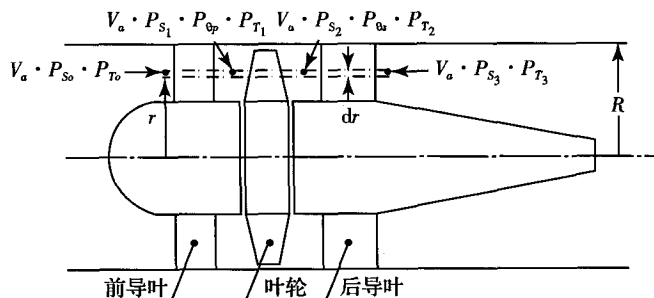


图 1-1 气流参数示意图

$$P_{T_1} = P_{S_1} + \frac{1}{2} \rho V_a^2 + \frac{1}{2} \rho V_{\theta_p}^2 \quad (1-5)$$

在叶轮之后、后导叶之前的 2-2 截面：

$$P_{T_2} = P_{S_2} + \frac{1}{2} \rho V_a^2 + \frac{1}{2} \rho V_{\theta_s}^2 \quad (1-6)$$

在后导叶之后的 3-3 截面：

$$P_{T_3} = P_{S_3} + \frac{1}{2} \rho V_a^2 \quad (1-7)$$

以上各式中， $P_T$ 、 $P_S$ 、 $V_a$  和  $V_\theta$  分别表示全压、静压、气流轴向速度和旋转速度。

气流经过风机级的全压升可表示为：

$$P_{T_3} - P_{T_0} = \Delta P_{Th} - \Delta h_R - \Delta h_p - \Delta h_s \quad (1-8)$$

式中——

$\Delta P_{Th}$ ——气流流经风机级全压升的理论值，即理论全压升；

$\Delta h_R$ ——叶轮压力损失；

$\Delta h_p$ ——前导叶压力损失；

$\Delta h_s$ ——后导叶压力损失。

(1-8)式的无因次形式表达为：

$$\frac{P_{T_3} - P_{T_0}}{\frac{1}{2} \rho V_a^2} = K_{th} - K_R - K_p - K_s \quad (1-9)$$