

清华大学能源动力系列教材

通风机和压缩机

(第2版)

Fans and Compressors
(Second Edition)

吴玉林 陈庆光 刘树红 编著

清华大学出版社

清华大学能源动力系列教材

通风机和压缩机

(第2版)

Fans and Compressors
(Second Edition)

吴玉林 陈庆光 刘树红 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是在 2005 年出版的第 1 版的基础上修订而成的。全书共分 14 章,主要介绍了离心式和轴流式通风机及压缩机的基本原理、气动力设计方法和通风机的性能试验,同时还介绍了通风机噪声、内部湍流计算、气动噪声预测、内部流动测量以及压缩机三维反问题气动设计理论和方法等方面的内容及其研究进展。

本书可作为流体机械专业本科生的教学用书,也是流体机械等相关专业研究生、科研人员、设计人员以及广大通风机和压缩机使用者的首选参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

通风机和压缩机/吴玉林,陈庆光,刘树红编著.--2 版.--北京:清华大学出版社,2011.12
(清华大学能源动力系列教材)

ISBN 978-7-302-27261-8

I. ①通… II. ①吴… ②陈… ③刘… III. ①通风机—高等学校—教材 ②压缩机—高等学校—教材 IV. ①TH43 ②TH45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 229112 号

责任编辑:庄红权 杨 倩 赵从棉

责任校对:赵丽敏

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:25.5 字 数:523 千字

版 次:2011 年 12 月第 2 版 印 次:2011 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:43.00 元

产品编号:044919-01

前言

FOR
E
W
O
R
D

通风机和压缩机是一种用量最大的通用机械,在矿山和冶金工程、石油和化学工业、航空航天和航海工程、能源工程和车辆工程等国民经济的各个部门都有广泛的应用。由于应用场合、性能参数、输送介质和使用要求的不同,通风机和压缩机的品种及规格繁多,其结构形式多种多样。本书主要介绍通风机和压缩机的基本原理、基本的气动力设计计算方法、三维反问题气动设计计算和通风机的性能试验。在通风机和压缩机的选型设计和运行分析方面,本书可作为广大通风机和压缩机使用者的参考书,对通风机和压缩机的设计人员也会有所帮助。同时,本书还介绍了通风机内部三维湍流计算、通风机气动噪声预测计算和通风机内部流动测量等方面的内容及其研究进展情况,也可以作为流体机械教学和科研的参考书。

本书共分 14 章,其中,第 1~7 章由吴玉林和刘树红编写,第 8 章和第 9 章由陈庆光和张扬军编写,第 10 章由陈庆光、吴玉林和唐宏芬编写,第 11~13 章由陈庆光和邢卫东编写,第 14 章由杨魏编写。全书由陈庆光统稿。张扬军和邢卫东审阅了全书。本书的编写,得到了编者在清华大学的前辈和同事们的帮助,以及其他高校的专家和有关科研单位技术人员的大力帮助,在此一并表示衷心的感谢。

随着科学技术的进步和计算流体力学、叶轮机转子动力学和流动测量技术的迅速发展,通风机和压缩机研究的新成果不断涌现,编者希望读者能够以本书为基础并参考国内外的最新文献,共同推进通风机和压缩机的研究发展。

本书的写作得到了柴油机增压技术重点实验室基金项目的支持。

再版说明

本书第 1 版于 2005 年 2 月出版,本次出版为第 2 版。与第 1 版相比,主要对第 1~5 章、第 7~10 章进行了较多的修改,并增加了第 14 章。修改内容包括:修正了第 1 版各章中的印刷错误;引用了一些最新颁布的国家和行业标准(第 10 章);更新了部分章节的内容(如第 7~10 章);调整了部分章节内容的编排顺序;根据内容需要增加和删除了一些附图和表格;统一了部分变量和符号;结合作者近年来的研究工作补充了一种轴流通风机设计方法(第 5 章的混合设计法);补充了压缩机的三维反

问题设计计算理论和方法；补充了一些例题和算例。本书修改工作主要由陈庆光教授完成。

在书稿修改过程中，清华大学热能系流体机械及工程研究所的祝宝山副教授提出了很多宝贵的意见和建议，山东科技大学通风机技术研究所的张永超博士、房菲硕士和徐晓硕士在文字整理和绘制插图等方面做了大量的工作，在此对他们表示衷心的感谢。

本次再版虽然对第1版中存在的一些错误和缺陷进行了一定程度的弥补，但由于作者水平有限和时间仓促，缺点和错误仍在所难免，敬请读者和同行专家批评指正。

编者于清华大学

2011年8月

目 录



第 1 章 概述	1
1.1 风机和压缩机的分类和应用	1
1.1.1 风机和压缩机的分类	1
1.1.2 风机和压缩机的应用	6
1.2 通风机的结构和主要性能参数	10
1.2.1 通风机的结构	10
1.2.2 通风机的主要性能参数	11
1.3 气体的物理性质	13
1.3.1 标准大气状态	13
1.3.2 通风机标准进口状态	14
1.3.3 空气的参数	14
1.4 气体的状态变化和能量转换	16
1.4.1 热力学第一定律	16
1.4.2 理想气体状态方程	17
1.4.3 气体机械中的能量转换	18
1.4.4 封闭系统中气体的状态变化	19
1.4.5 开式系统中气体状态变化和功的计算	22
第 2 章 离心式通风机的的工作原理	24
2.1 流体力学基本方程	24
2.1.1 理想流体的基本方程	24
2.1.2 离心式通风机叶轮中的相对运动	25
2.2 通风机的基本方程	27
2.2.1 叶轮进出口速度三角形	27
2.2.2 欧拉方程	27
2.2.3 欧拉方程的物理意义	28
2.3 叶轮的反应度和叶轮的形式	29
2.3.1 叶轮的反应度	29
2.3.2 叶轮的形式	30

2.4	气体在叶轮中的实际流动	33
2.4.1	作用在叶轮中气体上的作用力	33
2.4.2	有限叶片数的影响	35
2.4.3	进口气流冲角	38
2.5	离心通风机的损失、功率和效率	39
2.5.1	流动损失	39
2.5.2	泄漏损失	40
2.5.3	轮阻损失	41
2.5.4	功率及效率	42
2.6	通风机的无量纲系数	44
2.6.1	压力系数	45
2.6.2	流量系数	45
2.6.3	功率系数	46
2.6.4	比转速、直径系数和转速系数	46
2.7	相似设计	53
2.8	离心式通风机的性能曲线	55
2.8.1	不计任何损失时的性能曲线	56
2.8.2	计入损失后的性能曲线	56
2.8.3	有量纲性能曲线	57
2.8.4	无量纲性能曲线	58
2.8.5	通风机的空气动力学略图	58
2.8.6	系列产品的综合性能曲线	59
2.8.7	系列产品的对数坐标曲线	60
2.9	离心式通风机中的内部流动	65
2.9.1	一般离心叶轮中的射流-尾迹流动结构	65
2.9.2	离心通风机叶轮的内部流态	67
第3章	离心式通风机设计	69
3.1	叶轮	69
3.1.1	叶轮的结构形式	69
3.1.2	叶轮主要结构参数的确定	70
3.2	叶片型线的绘制	80
3.2.1	平直叶片	80
3.2.2	圆弧形叶片	81

3.2.3 机翼形叶片	83
3.3 离心式通风机的进气装置	84
3.3.1 进气室	84
3.3.2 进气口	86
3.3.3 进口导流器	86
3.4 蜗壳设计	87
3.4.1 基本假设	87
3.4.2 蜗壳内壁型线	88
3.4.3 蜗壳宽度	90
3.4.4 蜗壳出口长度及扩压器	91
3.4.5 蜗舌	92
3.4.6 蜗壳出气口位置	93
3.5 离心式通风机的理论设计	94
3.5.1 方案选择	94
3.5.2 设计计算步骤	95
3.5.3 离心通风机设计计算举例	100
第 4 章 轴流式通风机	105
4.1 轴流式风机的工作原理和概况	105
4.1.1 基元级上的速度三角形	106
4.1.2 叶轮对气体所做的功	107
4.1.3 反应度和预旋	107
4.2 轴流式通风机的几种方案	108
4.2.1 叶轮前设置导叶	108
4.2.2 叶轮后设置导叶	109
4.2.3 单独叶轮的级	109
4.2.4 叶轮前后都设置导叶	109
4.2.5 多级轴流通风机	109
4.3 叶栅的空气动力学特性	110
4.3.1 叶型和叶栅参数	110
4.3.2 叶栅的升力	112
4.3.3 叶型和叶栅的空气动力学特性	114
4.3.4 叶栅的气动力基本方程	115
4.3.5 平面叶栅吹风试验数据	117

4.4	气流参数沿叶片高度的变化	121
4.4.1	扭速沿半径的变化	122
4.4.2	气流速度沿半径的变化	122
4.4.3	气流角沿半径的变化	123
4.4.4	$C'_y \frac{b}{t}$ 沿半径的变化	123
4.5	叶栅中的损失	124
4.5.1	实际气体流过叶栅时的损失	124
4.5.2	扩散器中的损失	127
4.6	轴流通风机的特性分析	127
4.6.1	风压特性曲线	127
4.6.2	功率特性曲线	129
第5章	轴流通风机的设计计算	130
5.1	概述	130
5.2	孤立叶型试验数据	131
5.2.1	RAF-6E 叶型	131
5.2.2	CLARK y 叶型	132
5.2.3	LS 叶型	133
5.2.4	哥廷根叶型	134
5.2.5	圆弧板叶型	135
5.3	主要结构参数的选取	135
5.3.1	轮毂比 ν	136
5.3.2	叶轮外径 D_t	136
5.3.3	叶片数 z	138
5.4	第一种孤立叶型设计法	138
5.5	第二种孤立叶型设计法	143
5.5.1	轴流通风机的无量纲系数	143
5.5.2	设计计算步骤	145
5.6	平面叶栅的翼叶造型	148
5.6.1	原始叶型	148
5.6.2	翼叶造型的几何角	149
5.6.3	叶型中心线	150
5.6.4	各种叶型中心线的长度	152
5.7	第一种叶栅设计法	152

5.8 第二种叶栅设计法	153
5.9 混合设计法	155
5.10 导叶的设计计算	160
5.10.1 前导叶	160
5.10.2 后导叶	162
5.11 径向间隙和轴向间隙	165
5.11.1 径向间隙	165
5.11.2 轴向间隙	165
5.12 集流器、整流罩和扩散筒	165
5.12.1 集流器	166
5.12.2 整流罩和整流体	166
5.12.3 扩散器	167
第 6 章 通风机在管网中的工作及调节	170
6.1 管网及其性能曲线	170
6.1.1 管网的概念	170
6.1.2 管网的阻力计算	171
6.1.3 管网的性能曲线	172
6.2 通风机与管网的联合工作	173
6.3 通风机的联合运行	174
6.3.1 并联运行	174
6.3.2 串联运行	177
6.4 通风机的调节	178
6.4.1 调节方法	178
6.4.2 各种调节方法的比较	181
6.5 非稳定工况及喘振	182
6.5.1 工况变化及其性能稳定性	182
6.5.2 喘振	183
第 7 章 通风机的噪声	187
7.1 声波及其传播	187
7.1.1 声波	187
7.1.2 声速	188
7.1.3 声波的反射、折射、绕射和干涉	189
7.1.4 声波的辐射和衰减	190

7.2	噪声的物理量度	190
7.2.1	声压与声压级	190
7.2.2	声强与声强级、声功率与声功率级	192
7.2.3	声强、声功率与声压之间的关系	193
7.3	噪声的评价	194
7.3.1	频段与频谱	194
7.3.2	噪声的主观评价	196
7.4	噪声测量与声功率级的计算	199
7.4.1	噪声测量仪器	199
7.4.2	通风机噪声测量条件和测点位置	201
7.4.3	声功率级的计算	202
7.5	通风机的噪声源	205
7.5.1	通风机的主要噪声源	205
7.5.2	通风机噪声的声源特性	207
7.6	通风机的声功率级和比声功率级	208
7.6.1	通风机的声功率级	208
7.6.2	通风机的比声功率级	209
7.7	通风机噪声与性能的关系	209
7.8	通风机的噪声特性	211
7.8.1	后弯离心通风机的噪声特性	211
7.8.2	前弯多翼离心通风机的噪声特性	212
7.8.3	轴流通风机的噪声特性	213
7.9	通风机的噪声控制	214
7.9.1	噪声控制的一般原则	214
7.9.2	噪声控制的基本程序	214
7.9.3	通风机噪声控制方法概述	214
第8章	通风机内部三维湍流计算	222
8.1	通风机内部流动的控制方程	222
8.2	通风机内部三维湍流的计算方法	223
8.2.1	无粘性流动解	224
8.2.2	粘性流动计算	224
8.3	湍流模型及其应用	226
8.4	通风机内部三维非定常湍流的计算	228

8.4.1	动静干扰网格模型和湍流模型选择	229
8.4.2	计算实例 1	233
8.4.3	计算实例 2	237
第 9 章	通风机气动噪声的数值预测	242
9.1	引言	242
9.2	通风机噪声数值预测的现状	243
9.2.1	数学物理模型	243
9.2.2	轴流通风机噪声模型	244
9.2.3	离心通风机噪声模型	247
9.3	CFD 在通风机噪声预测中的应用	248
9.3.1	通风机噪声预测的 CFD 商用软件	248
9.3.2	FLUENT 软件模拟噪声的计算流程	249
9.3.3	通风机噪声预测实例	250
第 10 章	通风机性能试验与内部流场测量	261
10.1	通风机性能试验的目的及试验的分类	261
10.1.1	通风机性能试验的目的	261
10.1.2	通风机试验的分类	261
10.1.3	通风机性能试验装置的分类	262
10.2	压强的测量	266
10.2.1	压强测量仪表	266
10.2.2	风道内平均静压强的测定	267
10.3	流量的测量	269
10.3.1	流量测量方法	269
10.3.2	皮托静压管测流量	270
10.4	温度和湿度的测量	272
10.4.1	温度的测量	272
10.4.2	湿度的测量	273
10.5	转速的测量	273
10.5.1	通风机轴的转速	273
10.5.2	转速测量方法及要求	273
10.6	输入功率的测定	274
10.6.1	测量精度	274
10.6.2	通风机的轴功率	274

10.6.3	电气测量法测定轴功率	274
10.6.4	叶轮功率	275
10.6.5	传动系统	275
10.7	尺寸的测量和面积的确定	275
10.7.1	流量测量装置	275
10.7.2	尺寸公差	276
10.7.3	截面积的确定	276
10.8	空气密度、湿空气气体常数和粘度的确定	276
10.8.1	试验环境空气密度、湿空气气体常数和截面平均密度	276
10.8.2	蒸汽压强的确定	277
10.8.3	空气粘度的确定	277
10.9	通风机噪声的测量	278
10.10	通风机性能试验参数的计算与试验数据处理方法	280
10.10.1	A 型风室进气试验	280
10.10.2	B 型管道出气试验	284
10.11	通风机性能参数换算及特性曲线绘制	289
10.11.1	性能参数换算	289
10.11.2	特性曲线绘制	290
10.12	通风机性能试验数据采集与处理系统简介	291
10.12.1	概述	291
10.12.2	MGS 通风机试验数据采集与处理系统简介	292
10.13	通风机内部流场测量	295
10.13.1	概述	295
10.13.2	皮托管测速技术	296
10.13.3	环形叶栅内部流动的 PIV 测量	296
第 11 章	离心式压缩机原理	301
11.1	离心式压缩机的结构及应用	301
11.2	离心式压缩机的基本方程	302
11.2.1	欧拉方程	302
11.2.2	能量方程	302
11.2.3	伯努利方程	303
11.2.4	压缩过程在 $T-s$ 图上的表示	304
11.2.5	总耗功和功率	306

11.2.6	滞止参数的表示	307
11.2.7	压缩机效率的表达式	308
11.3	压缩机内的基本过程变化	309
11.3.1	压缩机进气道	310
11.3.2	工作级间的等熵压缩过程	311
11.3.3	级中实际压缩过程	311
11.4	进气道气动计算	312
11.4.1	进口截面的气流参数	312
11.4.2	截面 1—1 处的气流参数	312
11.5	叶轮	313
11.5.1	叶道中的流动	314
11.5.2	叶轮中的损失	315
11.5.3	叶轮设计参数的确定	317
11.6	无叶扩压器	320
11.6.1	气体在无叶扩压器中的流动	320
11.6.2	无叶扩压器进口参数的确定	321
11.6.3	无叶扩压器出口参数的确定	322
11.7	叶片扩压器	323
11.7.1	气体在叶片扩压器中的流动	323
11.7.2	叶片扩压器的损失和效率	324
11.7.3	叶片扩压器主要参数的确定	326
11.8	蜗壳(排气室)	326
11.9	离心压缩机气动参数计算	329
11.9.1	原始数据	329
11.9.2	进气道参数	329
11.9.3	压缩机叶轮参数	330
11.9.4	无叶扩压器段参数	334
11.9.5	叶片扩压器参数	335
11.9.6	蜗壳参数	337
11.9.7	压缩机参数校核	337
11.10	离心压缩机的特性曲线	338
第 12 章	压缩机的相似率	341
12.1	压缩机相似的基本准则	341

12.2	压缩机的相似条件	342
12.2.1	几何相似	343
12.2.2	进口速度三角形相似	343
12.2.3	绝热指数 k 相等	343
12.2.4	马赫数 Ma 相等	343
12.3	相似理论的应用	346
12.3.1	同一压缩机在不同工作条件下的相似	346
12.3.2	几何相似的压缩机的相似工况	348
12.3.3	用无量纲参量表示压缩机的性能	350
12.4	相似设计	350
12.5	性能换算	351
12.5.1	符合相似时的性能换算	351
12.5.2	近似相似时的换算	352
第 13 章	轴流式压缩机原理	355
13.1	基元级速度三角形	355
13.2	级中的气体压缩过程	356
13.3	轴流压缩机气动参数沿径向的变化	359
13.4	轴流压缩机的叶型和叶栅	361
13.4.1	平面叶栅的主要参数	361
13.4.2	压缩机叶栅的特性	363
13.5	压缩机平面叶栅设计	366
13.5.1	“名义工况”关系式	367
13.5.2	“最大升阻比”关系式	370
13.5.3	“最小损失”关系式	371
13.5.4	根据平面叶栅数据设计基元级	371
13.6	轴流压缩机的损失	372
第 14 章	压缩机的三维气动设计方法	375
14.1	基本原理	376
14.2	速度的求解	376
14.2.1	周向平均速度的求解	376
14.2.2	周期速度的求解	378
14.3	密度的计算	379
14.4	叶片形状的计算	379

14.5	数值求解方法	380
14.6	数值求解难点	382
14.7	环量分布给定方法	382
14.7.1	“三段线”法	382
14.7.2	B样条曲线法	383
14.7.3	经验给定法	383
14.8	设计算例	384
参考文献		386

风机和压缩机是用于输送气体的机械,广泛应用于国民经济的各个部门,尤其在矿山、冶金、石油、化工、航空航天、航海、能源和车辆工程等领域;从能量转换的观点来看,它们又都是把原动机的机械能转换为气体的动能和压力能的机械。为了便于学习和了解风机和压缩机,本章先介绍一些基本知识。

1.1 风机和压缩机的分类和应用

1.1.1 风机和压缩机的分类

1. 按工作原理分类

风机和压缩机按工作原理可分为3类:

(1) 容积式,包括活塞式(图 1.1)和回转式,后者又可分为滑片式(图 1.2)、罗茨式(图 1.3)和螺杆式(图 1.4)等;

(2) 叶片式,又称透平式,包括离心式(图 1.5)、混流式(图 1.6)、轴流式(图 1.7)和横流式(图 1.8);

(3) 喷射式(图 1.9)。

活塞式或往复式风机通常由两部分组成,一部分是直接和气体进行能量交换的工作端,另一部分是和其他机械进行动力传递的传动端。工作端主要包括缸体、活塞(或柱塞)、吸入阀和排出阀。

现以工作过程的示功图(图 1.1(a))来说明往复式风机的工作原理。示功图的横轴为缸体的容积,纵轴为缸体内气体的压强。当用作气体输送机械时,缸体内的压强沿 $ABCD$ 线按逆时针方向变化。在活塞向右方移动的瞬间,缸体内的压强降到 A 点,这时吸入阀开启,排出阀关闭,随着活塞向右移动,低压气体被吸入缸体,这期间缸体内的气体压强保持不变,吸入过程至活塞移动到缸体容积最大的下死点 B 为止。随后排出过程开始。在活塞向左移动的瞬间,缸体内的压强从 B 点上升到 C 点,吸入阀关闭,排出阀开启,活塞继续向左移动并排出高压气体,至活塞到达缸体容积最小的上死点 D 为止。活塞往复一次完成一个工作循环。