

# 气 动 手 册

徐炳辉 主编

中国液压气动密封件工业协会气动专业分会

上海科学技术出版社

## 内 容 提 要

本书从气动技术应用出发,介绍了气动基础知识、实现气动自动化所需的气动执行元件、控制元件及气动辅件工作原理、为正确配置和选用气动元件所需的气动逻辑控制回路设计、动力系统设计和维护修理方面的知识。对应用实例和设计时常用的一些标准和图表也选择性地进行了介绍,手册还对气动用于高压和气力输送进行了介绍。

本书可供气动技术工厂的设计和使用人员、科研机构及气动元件生产企业的有关人员使用;其中的一些章节也可供工科院校相关学科、专业作教学参考。

# 前 言

气动技术是以压缩空气为动力,进行传动和控制,以实现生产的机械化和自动化的重要技术。其特点是气压传动速度快,元件结构简单,维护方便,使用安全,成本低廉,便于集中供气,特别是它工作时没有污染,使用时可带来很大的社会效益,已应用在工业生产的许多部门以及医疗器械等各行各业中。

随着气动技术的不断发展,气动和机械、液压、电气技术的结合,使该技术正向着精密化和小型化、高可靠性、节能、无油化和高智能控制方向发展,特别是计算技术的进步,优秀的控制用软件、巧妙驱动执行元件有关的传感器和电气变换器、新型原理和结构的执行元件的发明及使用,将使气动技术的应用越来越广泛。

本书内容以实用为主,同时注意一定的理论基础和元件选择介绍,供应用气动技术的工程技术人员在进行系统设计时,能根据具体情况设计出高效率、低能耗,便于操作使用,技术适用、经济性良好的机械设备,以适应经济建设发展和竞争的需要。

由于气动元件更新换代较快,同时各类元件的型号、规格及尺寸目前还没有统一的标准,故本手册中对这些元件的型号、规格未予编入。

从实用前景出发,本书在介绍传统的气压传动及控制之外,对将来有推广价值的高压气动技术及气力输送均进行了介绍。在第10章中对气动测量和气垫搬运也以实例说明其应用前景。从技术角度看,某些大型物体的搬迁和移位采用气垫技术较为合理,经济效益也更高。对此中央人民广播电台的“科学博览”节目中也给予了推荐介绍。由于手册篇幅所限,某些有关内容(如元件测试技术等内容)从略。

本书由虞兰(第1章)、徐炳辉(第2、3章,第8~12章)、陆鑫盛(第4、5、6章)、许红兵(第7章)共同编写,全书由徐炳辉主编。在编写过程中潘胜利和徐申为本手册提供了有关的外文及译文资料。

在本书中,中国液压气动密封件工业协会气动专业分会及全国液压气动标准化技术委员会气压传动和控制分技术委员会的领导和专家陈明、印永谊等负责组织征集了广告并审阅了书稿中有关标准内容。

作者对在本书编写过程中国内外各公司、研究单位提供的资料和协助表示衷心感谢。

由于我们编写水平有限,对书中的问题和不足欢迎读者批评指正。

编 者

# 目 录

前 言.....	1
<b>1 气动技术的特点及其基础 .....</b>	<b>1</b>
1.1 气动技术的应用 .....	1
1.2 气动技术的特点 .....	1
1.2.1 优点 .....	1
1.2.2 缺点 .....	1
1.3 理论基础 .....	2
1.3.1 大气的组成和压力 .....	2
1.3.2 空气压力表示方法 .....	3
1.3.3 空气的质量 .....	3
1.3.4 空气的黏度 .....	4
1.3.5 湿空气 .....	4
1.3.6 空气的状态方程 .....	5
1.3.7 空气的状态变化 .....	6
1.3.8 连续性方程 .....	8
1.3.9 伯努利方程 .....	8
1.3.10 能量方程.....	9
1.3.11 临界压力 .....	10
1.3.12 气体通过喷嘴时的流动 .....	11
1.3.13 气容的充气 and 放气 .....	12
1.3.14 管路的压力损失 .....	16
1.3.15 气动元件流量特性的表示方法 .....	18
1.3.16 气动元件流量的计算 .....	20
1.3.17 气阻 .....	20
1.3.18 气容 .....	22
1.3.19 阻容环节 .....	22
<b>2 气动系统计算式及常用图表.....</b>	<b>24</b>
2.1 由压缩空气求与其相应的自由空气体积.....	24
2.2 绝热变化时压力与温度的关系.....	24
2.3 绝热变化时压力与体积的关系.....	25
2.4 绝热变化时体积与温度的关系.....	26

2.5	管道的压力降与流量及管径的关系	27
2.6	管道直径与管内流量及流速的关系	29
2.7	气缸输出力与气缸内径( $D = 0.01 \sim 0.1 \text{ m}$ 时)及工作压力的关系	29
2.8	气缸输出力与气缸内径( $D = 0.1 \sim 0.5 \text{ m}$ 时)及工作压力的关系	30
2.9	气缸耗气量	30
2.10	空气流过小孔或阀时的空气流量	32
2.11	储气罐容积	33
2.12	气阀的有效截面积	34
2.13	求合成有效截面积	35
2.14	气动元件的漏气量	36
<b>3</b>	<b>压缩机及气源处理</b>	<b>38</b>
3.1	气源概述	38
3.1.1	空气压缩机	38
3.1.2	后冷却器	44
3.1.3	气罐	45
3.2	气源处理	47
3.2.1	压缩空气净化处理系统	47
3.2.2	压缩空气质量等级要求	47
3.2.3	由应用行业和所用气动元件选定气源质量等级	48
3.2.4	压缩空气净化处理系统的元件配置	48
3.2.5	干燥器	50
3.2.6	主管过滤器	54
<b>4</b>	<b>气动执行元件</b>	<b>56</b>
4.1	气缸	56
4.1.1	分类	56
4.1.2	普通气缸	57
4.1.3	标准气缸	72
4.1.4	其他各类气缸	73
4.1.5	膜片气缸	89
4.1.6	气缸的选择与使用	91
4.2	气动马达	94
4.2.1	摆动式气动马达	94
4.2.2	连续回转式气动马达	97
<b>5</b>	<b>气动控制阀</b>	<b>100</b>
5.1	概述	100
5.1.1	分类	100

5.1.2	和液压阀的比较 .....	100
5.1.3	阀的结构特性 .....	101
5.2	压力控制阀 .....	106
5.2.1	减压阀 .....	106
5.2.2	溢流阀(安全阀) .....	112
5.2.3	顺序阀 .....	115
5.3	流量控制阀 .....	116
5.3.1	流量控制原理 .....	116
5.3.2	节流阀 .....	116
5.3.3	选择与使用 .....	121
5.4	方向控制阀 .....	121
5.4.1	分类 .....	121
5.4.2	电磁阀 .....	125
5.4.3	气控阀 .....	136
5.4.4	ISO 阀 .....	139
5.4.5	人控阀 .....	141
5.4.6	机控阀 .....	143
5.4.7	单向型控制阀 .....	145
5.4.8	换向阀的主要性能参数 .....	146
5.4.9	方向控制阀的选用方法 .....	150
5.5	阀岛 .....	151
5.5.1	带多针接口的阀岛(第一代阀岛) .....	151
5.5.2	带现场总线的阀岛(第二代阀岛) .....	152
5.5.3	阀岛技术的进一步发展 .....	152
5.6	气动比例阀 .....	155
5.6.1	气动比例阀的分类 .....	155
5.6.2	喷嘴—挡板式比例控制阀 .....	155
5.6.3	电磁铁驱动的比例阀 .....	158
5.6.4	PWM 调制高速控制阀 .....	159
5.7	气动伺服阀 .....	160
5.7.1	气动伺服阀的分类 .....	160
5.7.2	气动伺服阀结构及性能 .....	161
5.8	气动逻辑元件 .....	162
5.8.1	分类 .....	162
5.8.2	结构及性能 .....	163
6	气动辅件 .....	166
6.1	传感器 .....	166
6.1.1	气动位置传感器 .....	166

6.1.2	光电式传感器 .....	172
6.1.3	光纤式传感器 .....	173
6.1.4	电感式传感器 .....	174
6.2	转换器 .....	174
6.2.1	气—电转换器 .....	174
6.2.2	压力开关 .....	175
6.3	气—液元件 .....	177
6.3.1	气—液转换器 .....	177
6.3.2	气—液阻尼缸 .....	178
6.3.3	气—液增压缸 .....	180
6.3.4	缓冲器 .....	181
6.4	真空元件 .....	184
6.4.1	概述 .....	184
6.4.2	真空发生器 .....	185
6.4.3	真空吸盘 .....	187
6.4.4	其他真空元件 .....	188
6.5	过滤器 .....	190
6.5.1	概述 .....	190
6.5.2	分水过滤器 .....	191
6.5.3	油雾过滤器 .....	192
6.6	自动排水器 .....	193
6.6.1	概述 .....	193
6.6.2	浮子式自动排水器 .....	193
6.6.3	弹簧式自动排水器 .....	194
6.6.4	压差式自动排水器 .....	194
6.6.5	电动式自动排水器 .....	194
6.7	油雾器 .....	195
6.7.1	油雾器的工作原理 .....	196
6.7.2	油雾器的分类 .....	196
6.7.3	油雾器的结构 .....	197
6.7.4	油雾器的性能及选用 .....	201
6.8	消声器 .....	202
6.8.1	概述 .....	202
6.8.2	分类 .....	203
6.8.3	结构和特性 .....	205
6.9	管件 .....	207
6.9.1	概述 .....	207
6.9.2	管道 .....	207
6.9.3	使用注意事项 .....	208

6.9.4	接头 .....	209
6.9.5	软管 .....	210
6.9.6	软管接头 .....	211
6.10	密封.....	212
6.10.1	概述.....	212
6.10.2	材料.....	213
6.10.3	密封的设计和使用的.....	215
7	高压气动技术和气力输送 .....	220
7.1	高压气动技术 .....	220
7.1.1	概述 .....	220
7.1.2	高压压缩空气的主要来源 .....	220
7.1.3	高压气动截止阀 .....	221
7.1.4	高压气动系统中的减压阀 .....	221
7.1.5	高压气动系统的连接管道、管件.....	222
7.1.6	高压空气过滤器 .....	222
7.1.7	二位二通电磁阀 .....	222
7.1.8	二位三通阀 .....	226
7.1.9	气动管形阀 .....	227
7.1.10	高压气动执行元件.....	227
7.1.11	高压伺服压力控制装置.....	228
7.1.12	使用高压气动时注意问题.....	229
7.1.13	高压气动技术的应用.....	229
7.2	气力输送 .....	233
7.2.1	气力输送的特点 .....	233
7.2.2	气力输送装置的类型 .....	234
7.2.3	气力输送装置的主要设备 .....	237
7.2.4	气力输送的应用 .....	244
8	气动控制回路及回路设计 .....	246
8.1	基本回路 .....	246
8.1.1	压力控制回路 .....	246
8.1.2	换向回路 .....	247
8.1.3	速度控制回路 .....	247
8.1.4	逻辑回路 .....	248
8.2	应用回路 .....	249
8.2.1	增压回路 .....	249
8.2.2	单缸往复回路 .....	250
8.2.3	顺序动作回路 .....	251

8.2.4	冲击回路 .....	252
8.2.5	缓冲回路 .....	252
8.2.6	同步回路 .....	253
8.2.7	张力控制回路 .....	254
8.2.8	振荡回路 .....	255
8.2.9	防止启动飞出的安全回路 .....	255
8.3	气动顺序控制回路的设计 .....	255
8.3.1	概述 .....	255
8.3.2	信号-动作线图设计法(X-D线图法) .....	255
8.3.3	气动通用顺序控制装置 .....	262
8.3.4	电-气控制回路 .....	270
8.3.5	可编程控制器(PLC)电子-气动控制装置 .....	274
9	气动系统的设计 .....	280
9.1	明确设计依据和工作要求 .....	281
9.1.1	装置规格型式的掌握 .....	281
9.1.2	执行器机能的选定 .....	283
9.1.3	回路压力的确定 .....	285
9.1.4	循环时间的决定 .....	286
9.1.5	系统的安全要求 .....	286
9.2	设计气动回路 .....	287
9.2.1	决定回路的控制方式 .....	287
9.2.2	设计控制回路 .....	287
9.3	气动元件及配管尺寸的确定 .....	289
9.3.1	确定气动执行元件的使用工作条件 .....	290
9.3.2	确定气压传动回路 .....	290
9.3.3	执行元件的尺寸计算和型号选择 .....	291
9.3.4	检查气缸的缓冲性能 .....	292
9.3.5	计算控制元件的合成流通能力(有效截面积) .....	293
9.3.6	选择控制元件 .....	293
9.3.7	检查气缸动作时间 .....	296
9.3.8	选择气动三联件 .....	296
9.3.9	选择压缩机 .....	296
9.4	空气净化水平的确定 .....	300
9.5	气源站的设计 .....	300
9.5.1	计算工厂压缩空气消费量 .....	300
9.5.2	计算缓冲储气罐的容积 .....	300
9.5.3	决定压缩机的排气量 .....	301
9.5.4	决定空气压缩机的台数 .....	301

9.5.5	气源站配套设备的尺寸规格 .....	301
9.6	系统的噪声控制 .....	301
9.6.1	噪声源的种类 .....	301
9.6.2	往复压缩机的噪声对策 .....	301
9.6.3	回转式压缩机的噪声对策 .....	301
9.6.4	用消声器降低排气噪声 .....	301
9.6.5	冲击噪声 .....	302
9.7	其他注意事项 .....	302
9.7.1	气源处理元件和管道安装 .....	302
9.7.2	控制箱 .....	303
9.7.3	气动系统设计图纸绘制 .....	303
9.7.4	特殊情况的处理 .....	303
<b>10</b>	<b>气动技术应用举例</b> .....	<b>305</b>
10.1	气垫搬运.....	305
10.2	气桥法测量尺寸及分选.....	306
10.3	气动检测漏泄.....	307
10.3.1	桶罐漏泄湿法检测装置.....	307
10.3.2	工件的干法漏泄检查装置.....	308
10.4	凸轮操纵式气控压蜡机.....	309
10.5	带材跑偏控制.....	310
10.6	胶印轮转机张力控制系统.....	311
10.6.1	工作要求.....	311
10.6.2	基本工作原理.....	311
10.6.3	走纸张力气控系统.....	312
10.6.4	系统特点.....	312
10.7	注射成型机工件的自动送进、取出装置 .....	313
10.8	气-液传动在硬质合金刀片磨床中的应用 .....	314
10.8.1	气动马达供气回路.....	314
10.8.2	气缸控制回路.....	314
10.8.3	气-液增压缸及液压缸控制回路 .....	315
10.8.4	磨头快进缸和工作进给缸控制回路.....	315
10.9	气动微振压实造型机.....	315
10.9.1	造型机气动控制回路图.....	315
10.9.2	动作说明.....	315
10.9.3	障碍信号及其排除.....	317
10.10	转塔式六角车床气动控制 .....	317
10.10.1	工作顺序 .....	317
10.10.2	气动控制回路 .....	317

10.10.3	动作说明 .....	317
10.10.4	障碍信号及其排除 .....	317
10.11	气控复合材料牙膏软管成型机 .....	318
10.11.1	工作顺序 .....	318
10.11.2	气动控制回路 .....	318
10.11.3	动作说明 .....	318
10.11.4	障碍信号及其排除 .....	320
<b>11</b>	<b>维修管理和故障处理</b> .....	<b>321</b>
11.1	维修管理 .....	321
11.1.1	维修管理概述 .....	321
11.1.2	冷凝液的产生原因及处理 .....	323
11.1.3	流量不足 .....	324
11.1.4	冻结处理方法 .....	326
11.1.5	润滑管理和无给油系统 .....	327
11.1.6	配管施工时的注意点 .....	328
11.1.7	预防维修 .....	330
11.2	故障处理 .....	331
11.2.1	压缩机的故障处理对策 .....	331
11.2.2	冷冻式干燥器的故障处理对策 .....	332
11.2.3	过滤器的故障原因及处理对策 .....	333
11.2.4	油雾器的故障原因及处理对策 .....	333
11.2.5	减压阀的故障原因及处理对策 .....	334
11.2.6	单向节流阀的故障原因及处理对策 .....	334
11.2.7	电磁换向阀的故障原因及处理对策 .....	335
11.2.8	气缸的故障原因及处理对策 .....	335
11.2.9	摆动马达的故障原因及处理对策 .....	336
11.2.10	气动马达的故障原因及处理对策 .....	336
11.2.11	气-液元件的故障原因及处理对策 .....	337
<b>12</b>	<b>气动常用术语及图形符号</b> .....	<b>338</b>
12.1	气动常用术语 .....	338
12.2	气动液压图形符号及新旧符号对照 .....	344
12.2.1	符号要素和功能要素 .....	344
12.2.2	管路、管路接口和接头 .....	348
12.2.3	控制机构和控制方法 .....	349
12.2.4	旋转式能量转换元件——泵和马达 .....	353
12.2.5	缸和特殊能量转换器 .....	355
12.2.6	能量储存器 .....	357

---

12.2.7	动力源.....	357
12.2.8	能量控制和调节元件.....	358
12.2.9	流体储存和调节元件.....	366
附录	气动技术标准.....	370
附录 1	气动行业现行有效标准目录 .....	370
附录 2	气动系统通用技术条件( GB/T7932—2003 ) .....	373
附录 3	气动气缸技术条件( JB/T5923—1997 ) .....	401
附录 4	气动换向阀技术条件( JB/T6378—1992 ) .....	406
附录 5	气动空气过滤器技术条件( JB/T7374—1994 ) .....	416
附录 6	气动油雾器技术条件( JB/T7375—1994 ) .....	422
附录 7	气动空气减压阀技术条件( JB/T7376—1994 ) .....	428
参考文献	.....	436

# 1 气动技术的特点及其基础

## 1.1 气动技术的应用

气动技术是以空气压缩机为动力源,以压缩空气为工作介质,进行能量和信号传递的工程技术,是实现生产过程自动化的有效技术之一。

远在两千多年前,人们就开始利用空气的能量完成各种工作。比如,希腊人利用压缩空气来增大石弩的射程。在近代,车辆的制动装置、采煤用的风钻等都应用了气动装置。到20世纪30年代,气动技术成功地应用于自动门的开闭以及各种机械的辅助动作上,但这些都还是将气动技术作为传动的一种手段。进入到20世纪60年代及70年代,随着工业机械化和自动化的发展,气动技术广泛应用于生产自动化的各个领域,形成了现代气动技术。

气动技术与电子电器技术和液压技术一样,都是实现生产自动控制的重要手段之一,广泛应用于采矿、冶金、各类机械制造、航空、交通运输、轻工和化工等各行业。

## 1.2 气动技术的特点

生产中传动和自动控制技术的主要方式有:机械方式、电气方式、电子方式、液压方式和气动方式。气动技术是其中一种传动与控制技术,与其他技术相比,其特点如下:

### 1.2.1 优点

(1) 机器结构简单、轻便,易于安装维护;压力等级低,使用安全。

(2) 工作介质是在地表随处可取的空气,若采用将润滑油事先密封的无给油系统,排气会变得相当清洁,且在大多数场合,排气可无须处理直接进入大气。

(3) 能容易地得到直线往复运动,并具有相当的功率,速度变化范围广,既可实现高速驱动,也可实现低速驱动。一般气缸的平均运动速度为 $50\sim 500\text{ mm/s}$ ,最低可到 $0.5\sim 1\text{ mm/s}$ ,用于高压气动中最高可达 $100\text{ m/s}$ 。

(4) 利用空气的可压缩性,可存储能量,实现集中供气。可在短时间内释放能量,以得到间歇运动中的高速响应和大冲击力。可实现缓冲,对冲击负载和过负载有较强的适应能力,使气动装置在一定条件下有自保护能力。

(5) 全气动控制具有防火、防爆、耐潮的能力,与液压方式和电气方式相比,气动方式可在高温场合中应用。

(6) 由于空气流动损失小,压缩空气可集中供应,远距离输送。

### 1.2.2 缺点

(1) 由于空气的可压缩性,气缸的动作速度易受负载变化的影响。

(2) 气缸输出力比液压缸小。

气动技术由于上述特征,在生产控制及自动控制领域得到广泛应用。近来,在计算机集成制造(CIM)的大趋势引导之下,气动装置更多地应用在控制复杂动作的清洁机器,以及生

物工程等领域中。

## 1.3 理论基础

### 1.3.1 大气的组成和压力

不含有水蒸气的空气称为干空气。干空气在基准状态(温度  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,压力  $0.1013\text{ MPa}$ )的体积组成和质量组成如表 1-1 所示。

表 1-1 干空气的组成

气体分子	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	Ar	$\text{CO}_2$
体积组成(%)	78.09	20.95	0.93	0.03
质量组成(%)	75.53	23.14	1.28	0.05

事实上,空气中总含有一定的水蒸气,这样的空气称为湿空气。当空气中所含有的水蒸气达到了它最大的可能含量时,就成为了饱和湿空气。在温度  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,压力  $0.1013\text{ MPa}$  ,相对湿度  $65\%$  的条件下的空气状态称为标准状态。

空气的压力是干空气的分压力和其中的水蒸气分压力之和,即空气总压力

$$p = p_a + p_s \quad (\text{MPa}) \quad (1-1)$$

式中  $p_a$ ——空气中所含干空气分压力(MPa);

$p_s$ ——空气中所含水蒸气分压力(MPa)。

相对湿度为  $\varphi$  的湿空气,其分压

$$p_s = \varphi p_b \quad (\text{MPa}) \quad (1-2)$$

式中  $p_b$ ——同温度下饱和水蒸气分压(MPa)。

表 1-2 为饱和湿空气表。其中  $\rho_b$  为饱和水蒸气密度,相对湿度为  $\varphi$  的湿空气水蒸气密度

$$\rho_s = \varphi \rho_b \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-3)$$

表 1-2 饱和湿空气表

温度 $^{\circ}\text{C}$	饱和水蒸气分压 $p_b(\text{MPa})$	饱和水蒸气密度 $\rho_b(\text{g/m}^3)$	温度 $^{\circ}\text{C}$	饱和水蒸气分压 $p_b(\text{MPa})$	饱和水蒸气密度 $\rho_b(\text{g/m}^3)$
-20	0.000 1	1.07	40	0.007 4	51.0
-10	0.000 26	2.25	50	0.012 3	82.9
0	0.000 6	4.85	60	0.019 9	129.8
10	0.001 2	9.4	70	0.031 2	197.0
20	0.002 3	17.3	80	0.047 3	290.8
30	0.004 2	30.3	100	0.101 3	—

注意空气的标准状态与标准大气的区别。在海平面处,标准大气的参数为温度  $t_0 = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,压力  $p_0 = 0.1013\text{ MPa}$  , $\rho_0 = 1.225\text{ kg/m}^3$ 。不同海拔高度的标准大气的参数温度  $t$ 、压力  $p$ 、密度  $\rho$  与  $t_0$ 、 $p_0$ 、 $\rho_0$  之比见表 1-3。

表 1-3 标准大气

(  $t_0 = 15^\circ\text{C}$  , 压力  $p_0 = 0.1013\text{ MPa}$  ,  $\rho_0 = 1.225\text{ kg/m}^3$  )

高度 (km)	温度比 $t/t_0$	压力比 $p/p_0$	密度比 $\rho/\rho_0$	高度 (km)	温度比 $t/t_0$	压力比 $p/p_0$	密度比 $\rho/\rho_0$
0	1.000	1.000	1.000	12	0.752	0.191	0.254
2	0.955	0.784	0.822	14	0.752	0.139	0.185
4	0.910	0.608	0.669	16	0.752	0.101	0.135
6	0.865	0.466	0.538	18	0.752	0.074	0.098
8	0.819	0.351	0.429	20	0.752	0.054	0.072
10	0.774	0.261	0.337	25	0.752	0.025	0.033
11	0.752	0.223	0.297	30	0.752	0.011	0.015

### 1.3.2 空气压力表示方法

国际单位制中,压力的单位为 Pa(  $1\text{ Pa} = 1\text{ N/m}^2$  ),这也是我国的法定压力单位。较大的压力单位用 kPa(  $1\text{ kPa} = 1 \times 10^3\text{ Pa}$  )或 MPa(  $1\text{ MPa} = 1 \times 10^6\text{ Pa}$  )。Pa 与其他压力单位的换算见表 1-4。

表 1-4 各种压力单位的换算

	Pa	atm	bar	kgf/cm <sup>2</sup>	lbf/in <sup>2</sup>	mmHg	mmH <sub>2</sub> O
Pa	1	$9.87 \times 10^{-6}$	$10^{-5}$	$1.02 \times 10^{-5}$	$1.45 \times 10^{-4}$	$7.5 \times 10^{-3}$	0.102
atm	101 325	1	1.013	1.033	14.7	760	10 330
bar	$10^5$	0.987	1	1.02	14.5	750	10 200
kgf/cm <sup>2</sup>	98 100	0.968	0.981	1	14.22	735.6	$10^4$
lbf/in <sup>2</sup>	68 600	0.068	0.068 6	0.07	1	51.71	703
mmHg	133.3	$1.136 \times 10^{-3}$	$1.33 \times 10^{-3}$	$1.36 \times 10^{-3}$	$19.34 \times 10^{-3}$	1	13.6
mmH <sub>2</sub> O	9.81	$9.681 \times 10^{-5}$	$9.81 \times 10^{-5}$	$10^{-4}$	$1.42 \times 10^{-3}$	$7.36 \times 10^{-2}$	1

工程上,以大气压为基准表示的压力称为表压,以绝对零压力为基准表示的压力称为绝对压力。在大气中,用压力测量表直接测得的是表压。低于大气压的压力称为负压或真空度,其测量仪表称为负压表或真空表。除了进行压力差值计算时可用表压,其他的计算应用绝对压力值进行。

### 1.3.3 空气的质量

单位体积的空气质量即空气密度。干空气密度

$$\rho_a = 3.484 \times 10^{-3} p/T \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-4)$$

式中  $p$ ——空气的绝对压力(Pa);

$T$ ——空气的温度(K)。

对于水蒸气

$$\rho_s = \varphi \rho_b = 2.165 \times 10^{-3} \varphi p_b / T \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-5)$$

式中  $\varphi$ ——相对湿度(%);

$T$ ——空气的温度(K);

$p_b$ ——温度  $t$  下的饱和水蒸气分压力(Pa)。

对于湿空气

$$\rho = \rho_a + \rho_s = 3.484 \times 10^{-3} (p - 0.379\varphi p_b) / T \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-6)$$

式中  $p$ ——空气的绝对压力(Pa);

$\varphi$ ——相对湿度(%);

$T$ ——空气的温度(K);

$p_b$ ——温度  $t$  下的饱和水蒸气分压力(Pa)。

### 1.3.4 空气的黏度

空气黏度的变化只与温度有关,其大小用黏度  $\mu$  (单位 Pa·s),以及运动黏度  $\nu$  ( $\nu = \mu/\rho$ , 单位  $\text{m}^2/\text{s}$ )表示。气体的黏度  $\mu$  与温度  $t$  有如下关系

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{273 + t + C} \left( \frac{273 + t}{273} \right)^{1.5} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (1-7)$$

式中  $\mu_0$ ——0℃时气体的黏性系数,空气为  $17.09 \times 10^{-6}$  Pa·s,水蒸气  $8.93 \times 10^{-6}$  Pa·s;

$C$ ——常数,空气为 111,水蒸气 961;

$T$ ——气体温度(℃)。

对于湿空气,可将其视为干空气与水蒸气的混合气体,其黏性系数可由下式确定

$$1/\mu = Y_a/\mu_a + Y_s/\mu_s \quad (1-8)$$

式中  $\mu_a$ 、 $\mu_s$ ——空气与水蒸气的黏性系数(Pa·s);

$Y_a$ ——空气的质量百分比(%),  $Y_a = \rho_a/\rho$ ,  $\rho_a$ 、 $\rho$  由式(1-4) (1-6)确定;

$Y_s$ ——水蒸气的质量百分比(%),  $Y_s = \rho_s/\rho$ ,  $\rho_s$ 、 $\rho$  由式(1-5) (1-6)确定。

### 1.3.5 湿空气

湿空气是干空气与水蒸气的混合气体,实际存在的大气一般为湿空气。在气动技术中,湿空气总压为干空气分压与水蒸气分压之和,见式(1-1)。湿空气中干空气质量、水蒸气质量以及湿空气质量的计算公式见式(1-4) 式(1-5) 式(1-6)。

#### 1.3.5.1 湿度

湿空气中的水分(水蒸气)含量通常用湿度来表示。表示方法有绝对湿度和相对湿度,定义如下:

$$\text{绝对湿度 } x = \frac{\text{湿空气中的水蒸气含量(kg)}}{\text{湿空气中的干空气含量(kg)}} \times 100\% \quad (1-9)$$

$$\text{相对湿度 } \varphi = p_s/p_b = \rho_s/\rho_b \quad (\%) \quad (1-9a)$$

式中  $p_s$ ——空气中水蒸气分压(MPa);

$p_b$ ——同温度下饱和水蒸气分压(MPa);

$\rho_s$ ——水蒸气密度( $\text{kg/m}^3$ );

$\rho_b$ ——饱和水蒸气密度( $\text{kg/m}^3$ )。

#### 1.3.5.2 露点

湿空气中的水蒸气含量会随着温度及压力的变化而改变。

露点就是指在一定的压力下,使不饱和和湿空气温度下降,直到其中的水蒸气达到饱和状态,水蒸气开始凝结成水滴而从空气中析出的温度。露点有大气露点和压力露点之分。大气露点是指在大气压力下水分凝结的温度,而压力露点则是在高于大气压力的压力下水分凝结的温度。压力露点与大气露点的关系见图 1-1。在图中可找出,大气露点为  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  对应的  $1\text{ MPa}$  压力的压力露点为  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。即  $1\text{ MPa}$  压力下冷却到  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  出现水滴的空气,减压到大气压后要冷却到  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  才出现水滴。一般,空气露点是由压力露点表示,有时也有用大气压下的露点表示除湿效果的。

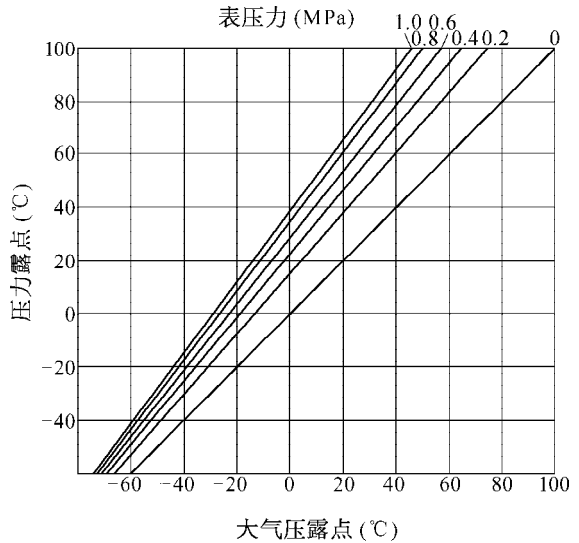


图 1-1 压力露点与大气露点关系

### 1.3.5.3 气分管线中产生的冷凝水量的计算

自由状态的空气经过压缩机压缩后,由于压力的增加,压缩空气中的水蒸气含量有所降低,所以经压缩后的空气,产生的冷凝水量可由下式计算:

$$G = \rho_{b1} \frac{\varphi_1}{100} - \frac{p_1 - \varphi_1 p_{b1}}{T_1} \frac{T_2}{p_2 - p_{b2}} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-10)$$

式中  $G$ ——每立方米的吸入空气经过压缩后产生的排水量( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\rho_{b1}$ ——吸入空气温度下的饱和水蒸气密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\varphi_1$ ——吸入空气的相对湿度(%);

$p_1$ ——吸入空气的压力(MPa);

$T_1$ ——吸入空气的温度(K);

$p_{b1}$ ——吸入空气温度下的饱和水蒸气分压(MPa);

$p_2$ ——压缩后空气的压力(MPa);

$T_2$ ——压缩后空气的温度(K);

$p_{b2}$ ——压缩后空气温度下的饱和水蒸气分压(MPa)。

### 1.3.6 空气的状态方程

#### 1.3.6.1 理想气体状态方程

理想气体是实际不存在的假想气体,这种气体的分子是一些弹性的、不占体积的质点,分子之间没有相互作用力。实际气体的密度较小(即比容较大)时,符合上述条件,可视作理想气体。理想气体在平衡状态时,其状态参数  $p$ 、 $\rho$ 、 $t$  之间有如下关系

$$pv = RT \quad (1-11)$$

式中  $p$ ——压力(Pa);

$v$ ——比容或称比体积( $\text{m}^3/\text{kg}$ );

$R$ ——气体常数,空气为  $287\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;