

# 气 动 技 术

(上册)

上海机械学院射流教研组  
北京清华大学力学系气动组

1976.12.

## 毛主席语录

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。

学生也是这样，以学为主，兼学别样，即不但学文，也要学工、学农、学军，也要批判资产阶级。学制要缩短，教育要革命，资产阶级知识分子统治我们学校的现象，再也不能继续下去了。

大学还是要办的，我这里主要说的是理工科大学还要办，但学制要缩短，教育要革命，要无产阶级政治挂帅，走上海机床厂从工人中培养技术人员的道路。要从有实践经验的工人农民中间选拔学生，到学校学几年以后，又回到生产实践中去。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

我们能够学会我们原来不懂的东西。我们不但善于破坏一个旧世界，我们还将善于建设一个新世界。

# 目 录

绪 论	(1)
第一章 流体力学基本知识	(4)
§ 1 概论	(4)
一、流体力学与气动控制技术	(4)
二、流体的某些物理性质	(4)
三、理想流体与实际流体	(8)
§ 2 空气的性质	(9)
一、空气的组成	(9)
二、理想气体状态方程	(9)
三、湿空气	(14)
四、压缩空气	(19)
§ 3 静止液体的特性	(20)
一、重力作用下静止液体中的压力	(20)
二、连通器及其应用	(22)
三、液体的浮力	(24)
§ 4 不可压缩理想流体定常管流	(25)
一、基本概念	(25)
二、流量与连续性方程	(26)
三、能量及能量方程	(28)
§ 5 不可压缩实际流体定常管流	(44)
一、流体运动的两种状态——层流和紊流	(44)
二、直圆管中的定常层流流动	(46)
三、直圆管中的定常紊流流动	(48)
四、管道中沿程损失的计算	(48)
五、流体运动的动量方程	(51)
六、管道中局部损失的计算	(52)
七、旋涡及其形成	(56)
八、气阻	(57)
九、气容及延时环节	(60)
§ 6 可压缩理想气体的管流	(64)
一、音速和M数	(64)
二、管道截面的变化与气流速度的关系	(65)
三、压力比 $P_0/P_{出}$ 对管流的影响	(66)
第二章 气源系统	(68)
§ 1 概述	(68)

一、对压缩空气的要求	(68)
二、压缩空气的净化问题	(68)
三、压缩空气站的设备	(69)
§ 2 压缩空气站的设备	(71)
一、空气压缩机和风机	(71)
二、后冷却器	(80)
三、油水分离器	(81)
四、贮气罐	(82)
五、干燥器	(84)
§ 3 气源系统的管道设计	(90)
一、压缩空气供气系统确定的一般原则	(90)
二、管道布置的原则	(92)
三、管道的计算	(95)

### 第三章 气动执行元件—气缸及气马达 (99)

§ 1 各类气缸的工作原理及用途	(99)
一、气缸的种类	(99)
二、几种常见气缸的工作原理及用途	(99)
§ 2 普通气缸及气液阻尼缸的设计、计算	(130)
一、单向作用缸的设计计算	(130)
二、双向作用缸的设计计算	(131)
三、气—液阻尼缸的设计计算	(137)
§ 3 标准气缸系列及结构形式	(147)
一、标准化气缸的标记及系列	(147)
二、标准化气缸主要参数的选择和确定	(148)
三、五种系列标准化气缸的结构形式	(148)
§ 4 气缸加工的工艺要求	(158)
一、气缸筒的技术要求	(158)
二、气缸盖的技术要求	(159)
三、活塞的技术要求	(159)
四、活塞杆的技术要求	(159)
§ 5 气缸的密封	(159)
一、密封元件在气缸中的作用	(159)
二、对密封件的基本要求	(160)
三、密封件的材料	(160)
四、气缸用密封元件	(160)
五、密封件的标准	(164)
§ 6 气缸的应用	(164)
一、气缸应用举例	(164)
二、气缸的选择与使用要求	(164)

§ 7 气动马达	(169)
一、概述	(169)
二、气动马达的特点及其应用	(169)
三、叶片式气动马达的简单工作原理	(170)
四、叶片式气动马达的特性	(170)
五、气动马达的制造精度	(170)
§ 8 气动钻削动力头	(171)
一、概述	(171)
二、动力头结构及工作原理	(171)
三、动力头主要技术规格	(174)
四、动力头的使用与维修	(174)

#### 第四章 气动夹具及气—液传动装置 (176)

§ 1 力的基本性质、约束力的分析和力的平衡	(176)
一、力的基本性质	(176)
二、约束力的分析	(178)
三、力的平衡	(179)
§ 2 摩擦的基本概念	(180)
一、摩擦现象	(180)
二、摩擦力的大小	(180)
三、摩擦力的方向	(181)
四、摩擦角	(182)
五、“自锁”的基本概念	(182)
§ 3 扩力机构	(183)
一、扩力机构的特性指标	(183)
二、机械扩力机构的分类及计算	(184)
§ 4 气动夹具	(191)
一、气动夹具的作用、组成、要求及优缺点	(191)
二、气动弹簧卡头	(193)
三、气动卡盘	(203)
§ 5 气—液传动装置及其应用	(204)
一、气液传动装置的作用	(204)
二、气液转换缸	(204)
三、气液增压传动装置	(205)
四、气液泵	(210)

#### 第五章 上料装置 (214)

§ 1 概述	(214)
§ 2 杆料上料装置	(214)
§ 3 料仓上料装置	(216)

一、靠自重送进	(218)
二、强制送进	(218)
§ 4 料斗上料装置	(219)
一、料斗结构简析	(219)
二、常见的料斗结构形式举例	(220)
三、几种常见的定向方法	(226)
四、挡料器	(228)
§ 5 工业机械手简介	(229)
一、机械手的类型	(230)
二、机械手的组成	(236)
三、抓取机构	(237)
<b>第六章 压力控制元件</b>	<b>(247)</b>
§ 1 概述	(247)
§ 2 调压阀	(247)
一、概述	(247)
二、直动式调压阀	(248)
三、先导式调压阀	(258)
四、定值器	(259)
§ 3 安全阀	(263)
§ 4 顺序阀	(266)
<b>第七章 流量控制元件</b>	<b>(272)</b>
§ 1 概述	(272)
§ 2 节流阀	(272)
§ 3 单向节流阀	(275)
§ 4 排气节流阀	(278)
§ 5 行程节流阀	(278)
§ 6 流量控制阀的使用	(278)
<b>第八章 方向控制元件</b>	<b>(280)</b>
§ 1 方向控制阀的分类	(280)
§ 2 气压控制换向阀	(286)
一、加压控制	(286)
二、泄压控制	(291)
三、差压控制	(295)
四、延时控制	(297)
§ 3 人力控制换向阀	(300)
一、手动阀	(300)
二、脚踏阀	(309)

§ 4	机械控制换向阀	(311)
	一、机械式行程阀	(311)
	二、差动式行程阀	(313)
	三、脉冲式行程阀	(314)
§ 5	电磁控制换向阀	(316)
	一、直动式电磁阀	(316)
	二、先导式电磁阀	(325)
§ 6	单向型控制阀	(333)
	一、单向阀	(333)
	二、梭阀	(334)
	三、双压阀	(335)
	四、快速排气阀	(336)
§ 7	空气控制阀的使用和维修	(337)
	一、气阀的选用	(337)
	二、安装与维修	(338)
§ 8	方向控制阀的性能及其测试	(339)
	一、阀的基本性能	(339)
	二、换向阀性能的测试方法	(345)
	三、产品品种规格介绍	(361)
§ 9	换向阀的设计计算	(361)
	一、确定阀的公称直径	(361)
	二、阀的结构形式的选择	(361)
	三、阀的结构参数的设计计算	(369)

# 绪 论

气动技术通常是指以压缩空气为动力源实现各种生产过程自动化的一门技术。它涉及的范围很广，本书主要涉及气压传动及断续生产过程的自动控制，而不涉及气动调节仪表及风动工具等内容。

气动控制技术是利用各种气动元件及装置组成所需要的控制回路来进行自动控制的。这些装置和元件按其功能大致可以分为以下几类：

气压发生装置，即获得压缩空气的装置和设备。如各种类型的空气压缩机和风机；

气动执行元件，以压缩空气为工作介质产生机械运动的装置。如作直线运动的气缸、作回转运动的气马达；

气动控制元件，通过它改变工作介质的压力、流量和流动方向来实现执行元件所规定的运动。如各种压力阀、流量阀、方向阀和逻辑元件（各类逻辑阀及射流元件）；

气动辅助元件，为了能源介质（压缩空气）的净化、元件的润滑、元件间的连接、消音等所需要的一些辅助装置；

气动传感元件，将各种被测参数（如位置、压力……等）接收下来的装置。如位置传感器、压力传感器等。

随着社会主义革命和社会主义建设的飞速发展，我国广大工人和革命技术人员，在党和毛主席的英明领导下，在大搞技术革新和技术革命的过程中，发扬了独立自主、自力更生、奋发图强、艰苦奋斗的精神，高举起鞍钢宪法的旗帜，积极发展气动控制技术。解放以来，特别是无产阶级文化大革命以来，气动技术在我国许多工业部门得到了广泛的应用。

例如：在机械工业（机床、汽车、轴承、农机等）、冶金工业（铸造、锻压、轧钢等）、化学工业、交通运输、包装、卸货、仓库管理以及轻工业机械（纺织机械、自行车、手表、缝纫机等）都作出了不少成绩。不少气动组合机床、气动自动线和气动控制装置都已投入生产。许多地方的工厂因陋就简自己生产元件，大搞技术革新，单机自动化、流水线、自动线层出不穷。实现了机械和生产过程的自动控制，对改善劳动条件、减轻劳动强度、降低成本、提高产品的数量和质量发挥了很大的作用。

气动控制技术和机械、电器、电子、液压控制技术一样，得到很快的发展，是由于它具有一些独特的优点：如直观易懂，便于普及推广，安全可靠，制作维护使用方便、成本低等。是一种实现自动化的新技术，深为广大工人群众的欢迎。它的优点概括起来还有以下几点：

1. 空气可以从大气中取之不竭，无介质费用的损失和供应上的困难；同时，可以直接将用过的空气任意放到外界大气中去，处理方便，万一空气管路有泄漏，除引起部分功率损失外不致产生不利于工作的严重影响。

2. 空气的粘度很小，在管道中的压力损失较小，一般其阻力损失不到油路损失的千分之一，因此压缩空气便于集中供应（空压站）和远距离输送。

3. 压缩空气的工作压力较低（一般在  $3-8 \text{ kg/cm}^2$ ），因此，可降低对气动元件的材料



和制造精度上的要求。

4. 相对液压传动而言气动动作迅速、反应快,这是它突出的优点。

5. 气动维护简单、介质清洁、管道不易堵塞,亦不存在介质变质、补充、更换等问题。

6. 使用安全,没有防爆的问题,并且便于实现过载自动保护。因而在石油、化工、农药及矿山机械上有特殊的优越性。

7. 气动元件可以根据不同的场合,采用相应的材料,使元件能够在恶劣的环境(强振动、强冲击、强腐蚀和强辐射等)下进行正常工作。

气压传动中也存在以下的一些缺点:

1. 气动装置中的信号传递速度比电子控制、光学控制慢,仅限于声速的范围内,若与电子技术中信号传递速度(相当于光速)相比较,其信号要产生较大的延迟和失真。所以气动技术不宜用于信号传递速度要求十分高的复杂线路中,同时,实现生产过程的遥控也比较困难,但对一般的机床工作速度来说,气动信号的传递速度也足够了。

2. 由于空气具有可压缩的特性,因而工作速度的稳定性较差。因此当要求运动速度均匀稳定时,采用气-液联动阻尼缸能得到比较好的效果。

3. 因为工作压力较低,又因结构尺寸不宜过大,因而气压装置的总推力一般不可能很大。

4. 目前气压传动的传动效率较低,因而一般工厂建立压缩空气站,以便统一分配和供应,以提高压缩空气的利用率。

气动控制与其他控制方式性能比较见下表:

性能项目	控制方式		电 控 制		机 械 控 制
	气压控制	液压控制	电 气	电 子	
操 作 力	中 等 (约 1 吨)	最 大 (可达几十吨)	不 大	最 小	较 大
构 造	简 单	复 杂	稍 复 杂	最 复 杂	一 般
动 作 快 慢	较 快	较 慢	快	最 快	慢
负 荷 变 化 影 响	较 大	有 一 些	几 乎 没 有	没 有	一 般
远 距 离 操 纵	中 距 离	短 距 离	长 距 离	长 距 离	短 距 离
环 境 要 求	适 应 性 好	不 怕 振 动	要 求 高	要 求 特 高	一 般
维 护	一 般	要 求 高	要 求 较 高	要 求 更 高	简 单
无 级 调 速	较 好	良 好	良 好	良 好	很 困 难
工 作 寿 命	长	一 般	较 短	短	一 般
使 用 价 格	便 宜	稍 贵	稍 贵	最 贵	一 般

随着气动控制技术的发展,要求生产更多的品种规格、质量高、寿命长的气动元件。例如,一套气动轧钢机需要 200 多套气动元件,一条气动铸工生产流水线需要 190 多种规格品种的气动元件。为了加速我国气动技术的发展,一机部于 1975 年 1 月召开了全国气动元件座

谈会，确定了定点生产气动元件的工厂、制订了五年及十年科研生产规划，并成立了各类阀、气缸、气动逻辑元件等全国联合设计组，为气动元件的标准化、通用化、系列化创造了条件。目前，全国联合设计的气动元件的品种规格已达300多种，并已有部分产品投产销售。

我们坚信：随着我国社会主义革命和建设的发展特别是在粉碎了王、张、江、姚“四人帮”反党阴谋集团的推动下，我国气动技术和气动元件的生产和应用必将有一个大发展，一定会在不远的将来，赶上和超过世界的先进水平。

气动元件生产的发展和气动技术的广泛被采用，许多同志提出了要求迅速普及这门技术，而目前国内这方面的资料很少，更没有普及的教材。为了满足广大工农兵的强烈愿望，在各兄弟厂、所的大力支援下，在两校分别为一机部举办气动技术短训班的基础上，我们于今年四月着手编写这本教材。教材基本内容是介绍我国设计和生产的气动元件的原理、结构、性能测试、气动元件的设计，以及气动回路的设计方法。为了有利于开展技术革新和技术革命，教材中也介绍了与气动控制密切相关的一些执行机构。另外，气动传感器是一个很有希望的发展方向，故在可能的条件下，也作了一点介绍。本教材为了便于具有初中以上文化程度的广大工农兵自学，力求编写得通俗些。

本教材是在汇总一机部系统各工厂、研究所丰富的实践经验的基础上写出来的。由于气动技术在我国还是一门比较年青的自动控制技术，教材中有些观点不一定正确、妥当，有待生产实践不断地对它加以补充和完善。特别是因为编写的同志们也是刚接触这方面的工作，实践很少，故本教材肯定有不少缺点和错误，望读者给予指正。

本稿在编写过程中，承北京水暖器材二厂、北京机床所、北京第一皮鞋厂、济南铸锻研究所、广东肇庆气动元件厂、上海工业自动化仪表所、上海长红机械配件厂、上海红光机械厂、上海东海阀门厂、河北石家庄地区晋县轴承厂、上海水泵厂、铁岭气动元件厂、洛阳气动元件厂、上海纺织轴承一厂、上海中国纺织机械厂、济南铁路配件厂等单位的广大工人和技术人员的帮助，很多同志百忙中帮助我们审稿，仅在此表示感谢。

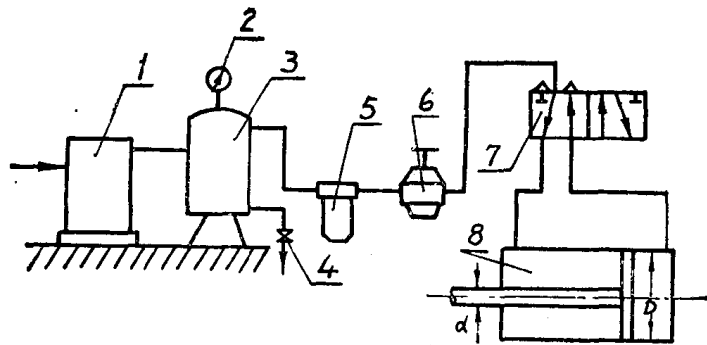
# 第一章 流体力学基本知识

## §1. 概 论

### 一、流体力学与气动控制技术:

流体，实际上是气体和液体的统称。一般来讲，流体力学就是研究流体的静止和运动的规律的科学，即研究它们的能量转换规律以及这些规律在实际工程中的应用。

气动控制技术是近年来迅速发展起来的一门技术。它是直接利用了有压气体作为工作介质，使气动元件实现机械运动，故气动控制技术中的各类气动元件的设计原理，管路联结等无不涉及有关流体力学方面的问题。例如图(1-1)所示为一简单的气动控制系统。其中气罐



1. 压缩机 2. 压力表 3. 气罐 4. 泄水阀 5. 过滤器 6. 减压阀  
7. 换向阀 8. 气缸

图1-1 简单气动控制系统示意图

内气体的压力测量，压缩空气中饱和水份的析出量，各类管路设计及管道阻力的计算，直到气动装置的设计计算等都涉及流体力学的问题。因此，流体力学是气动控制技术的一门重要的技术基础。

但是，流体力学作为一门科学来讲，内容丰富，涉及的范围较广，这里，我们仅针对气动控制技术的要求，选编其内容，除介绍一般有关流体的基体概念和一些流动规律外，还对气体（包括压缩空气）的有关热力学特性进行讨论，以供从事气动控制技术这方面工作的同志有所参考。

### 二、流体的某些物理性质:

#### (一) 密度、重度、比重:

流体和固体一样都具有重量和质量，但物体的重量又与当地的重力加速度有关。当地的重量除以当地的重力加速度称为物体的质量，则有：

$$m = \frac{G}{g} \dots\dots\dots (1-1)$$

式中：G——重量，单位为公斤(kg)

$g$  —— 重力加速度, 单位为米/秒<sup>2</sup> ( $m/sec^2$ )  
(在北京  $g=9.8012$  米/秒<sup>2</sup>)

故质量  $m$  的单位是  $\frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}}$ , ( $\frac{\text{kg} \cdot \text{sec}^2}{\text{m}}$ ),

流体质量的大小, 通常用密度  $\rho$  来加以描述。在均质流体中, 所谓密度  $\rho$  是指单位体积流体所具有的质量, 即:

$$\rho = \frac{m}{V} \dots \dots \dots (1-2)$$

式中,

$V$  —— 流体的容积, 单位是米<sup>3</sup>, ( $m^3$ )。

故密度  $\rho$  的单位是  $\frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4}$ , ( $\frac{\text{kg} \cdot \text{sec}^2}{\text{m}^4}$ ),

流体重量的大小, 通常用重度  $\gamma$  来加以描述。在均质流体中所谓重度  $\gamma$  是指单位体积流体所具有的重量, 即:

$$\gamma = \frac{G}{V} \dots \dots \dots (1-3)$$

故流体重度  $\gamma$  的单位是  $\frac{\text{公斤} \cdot (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}{\text{米}^3}$  或克/厘米<sup>3</sup> ( $g/cm^3$ )。

由式 (1-1) 和 (1-2) 代入 (1-3) 可得重度与密度之间的关系为:

$$\gamma = \rho \cdot g \dots \dots \dots (1-4)$$

比重是物体的重量与同体积的 4°C 水的重量之比, 用符号  $\delta$  表示。比重大于 1, 说明该物体比水重; 比重小于 1, 说明该物体比水轻。显然比重是个无量次数, 它没有单位。

现将常用流体的密度、重度、比重列表如下:

表 1-1 常用流体的  $\rho \cdot \gamma \cdot \delta$ 。

流体名称	密度 (公斤·秒 <sup>2</sup> /米 <sup>4</sup> )	重度 (公斤/米 <sup>3</sup> )	比重	测定条件
干空气	0.142	1.40	0.0014	760 $\frac{\text{mm}}{\text{Hg}}$ , -20°C
干空气	0.132	1.293	0.00129	760 $\frac{\text{mm}}{\text{Hg}}$ , 0°C
干空气	0.123	1.206	0.00121	760 $\frac{\text{mm}}{\text{Hg}}$ +20°C
水银	1387.6	13600	13.6	0°C
蒸馏水	101.9	1000	1.000	4°C
蒸馏水	101.7	998	0.998	20°C
润滑油	96.7~93.8	890~920	0.89~0.92	15°C

(二) 压缩性和膨胀性:

流体在压力的作用下, 能改变自身体积大小的特性称为压缩性。

流体当温度变化时, 能改变自身体积的特性称为膨胀性。

值得注意的是, 流体的压缩性和膨胀性对液体和气体是有很大的不同。对液体来说, 液体

的压缩性和膨胀性很小。液体的重度虽然随温度与压力的改变也有变化,但变化很小。例如:根据实测,在压力每升高1个大气压力时,水的体积只改变了万分之零点五左右。在温度较低情况下(0°C~20°C),温度每升高1°C,水的体积最大只改变万分之一点五。在温度较高的情况下(90°C~100°C),温度每升高1°C,水的体积也只改变万分之七。其它液体情况也很类似。显然,在实际工程中,在温度和压力变化不大的范围内,引起这样小的变化是完全可以忽略不计的。所以,在实际工程中,一般情况下把液体都看成不可压缩的流体。即认为液体的重度不随温度和压力而变化。只有在高温情况下,其温度或压力的变化范围很大时,才考虑液体的重度和体积变化的问题。但对气体来说,就不是这样,温度和压力的变化对气体的重度影响较大。例如在生活中,我们可以毫不费力地用打气筒把体积大三、四倍的自由空气打入自行车胎内。同样,某容器内的气体如没有容器壁对它的限制,那么它的体积膨胀是没有止境的。故气体是可压缩和可膨胀的。可是,在实际工程中往往会遇到以下情况,就是气体处在压力和温度不变或变化很小的状态下,这时气体的重度并不发生变化或变化很小,在这种情况下,气体的重度就可看成是一个常数。此外根据理论和实践证明,当气体流动时(或物体在气体内部运动时)只要它的速度远小于音速,气体的重度变化也是很小的。例如当气流的速度为50米/秒时,密度只变化约为1%,在这种情况下我们也可把气体看作不可压缩流体,这样处理将使问题大为简化。

综上所述,流体的压缩性和膨胀性是不同的,一般而言,液体通常视为不可压缩的流体,气体视为可压缩的流体;但在某些条件下,气体也可看成是不可压缩流体,要按具体问题灵活考虑应用。在气动控制技术中对压缩空气的应用就有这个情况,如将自由状态的空气经压缩机压缩到具有一定压力能的压缩空气,这时的气体视为可压缩的;但具有一定压力能的压缩空气在管路内低速流动时,便可当作不可压缩的来看待。

### (三) 温 度:

温度是用以表示物体冷热程度的物理量。人们对于冷热的认识,首先是从感觉开始的,当人接触一个物体时,如果感觉到冷,一般说来这个物体的温度是较低的,而当感觉热时,则这一物体的温度较高,但这不是标准的,因为人们常常会发生错觉,如冬季室内的铁器和木器同如室温,但我们摸到铁器总感到比摸到木器时要冷一些。

为了科学的认识物体的冷热程度,对温度有个数量上的概念,就必然要建立温标。温标就是温度的标尺。工程上,常用的是摄氏温标,它规定在标准大气压力下(760<sup>mm</sup>Hg)冰的熔点为0°C,水的沸点为100°C,中间等分100等分,每一等分称为1度,用符号t°C表示。但有时也要用热力学绝对温标,它的分度与摄氏温标完全相同,但它的起点与摄氏温标不同,以相当于摄氏零下273.16°C作为零度,即0°K = -273.16°C,按绝对温标分度的温度称绝对温度、用符号 T°K 表示。它与摄氏温度的换算关系是:

$$t^{\circ}\text{C} = T^{\circ}\text{K} - 273.16 \dots\dots\dots (1-5)$$

工程计算中用273代替273.16已足够准确。

此外,还有华氏温标(记为t°F),与摄氏温标的关系是:

$$t^{\circ}\text{F} = 1.8t^{\circ}\text{C} + 32 \dots\dots\dots (1-6)$$

### (四) 压力 (压强):

在充满静止流体的容器中,流体对器壁的作用力不是集中于一点,而是分布于整个容器壁上,因此,只能用单位面积上所受力的大小来衡量流体对容器壁的作用力。容器壁单位面积上所受力的大小称为压力强度,简称压强,在工程上人们习惯于称为压力,用符号p表

示。工程上压力的常用单位是公斤/厘米<sup>2</sup> (kg/cm<sup>2</sup>) 或公斤/米<sup>2</sup> (kg/m<sup>2</sup>)。于是有 1kg/cm<sup>2</sup> = 10<sup>4</sup>kg/m<sup>2</sup>。

实际上，人类生活在地球上，也同样受着大气压强的作用，而这大气压强的大小，也并不是固定不变的，它不仅随各地区海拔高度的增加而略为减小，而且还与当地的气候条件有关。通常我们把纬度为45°的海平面上的大气压强叫做标准大气压力，(有的参考书上称为物理大气压强)。

即：

$$1 \text{ 标准大气压强} = 760\text{mmHg} = 1.0333 \text{ 公斤/厘米}^2,$$

工程计算中，往往就把1公斤/厘米<sup>2</sup>的压强叫做1个工程大气压力，相当于735mmHg。

现将各种压力度量单位及其换算关系列于表1—2中

表1—2 各种压力度量单位

工程大气压	标准大气压	巴	公斤/厘米 <sup>2</sup>	米水柱	毫米汞柱	磅/吋 <sup>2</sup>
		bar	kg/cm <sup>2</sup>	mH <sub>2</sub> O	mmHg	lb/in <sup>2</sup>
1	0.968	0.981	1	10	735.6	14.22
1.033	1	1.013	1.033	10.33	760	14.69
1.02	0.987	1	1.02	10.2	750.2	14.50
0.07	0.068	0.0686	0.07	0.703	51.71	1

工程上，计压的方法有两种，一种是以物理真空作为计压的起点，一种是以一个大气压力作为起点。前者称为绝对压力，后者称为相对压力或表压力(即用压力表测得的压力)。故绝对压力  $P_{\text{绝}}$  与表压力  $P_{\text{表}}$  的关系是：

$$P_{\text{绝}} = P_a + P_{\text{表}} \dots\dots\dots (1-7)$$

式中  $P_a$  是大气压力。工程计算中，常令  $P_a = 1\text{kg/cm}^2$ 。

若绝对压力小于大气压力，则大气压力与该绝对压力之差称为真空压力(又名真空度)。其相互关系表示在图1—2上。

例题1：

已知流体某点的静压力为1400公斤/米<sup>2</sup>，试以工程大气压及米水柱高来表示其大小。

$$(1) p = 1400 \text{ 公斤/米}^2 = \frac{1400}{100^2} \text{ 公斤/厘米}^2$$

厘米<sup>2</sup> = 0.14公斤/厘米<sup>2</sup> = 0.14工程大气压。

$$(2) p = 1400 \text{ 公斤/米}^2 = 0.14 \text{ 公斤/厘米}^2 = 0.14 \times 10 \text{ 米水柱高} = 1.4 \text{ 米水柱高。}$$

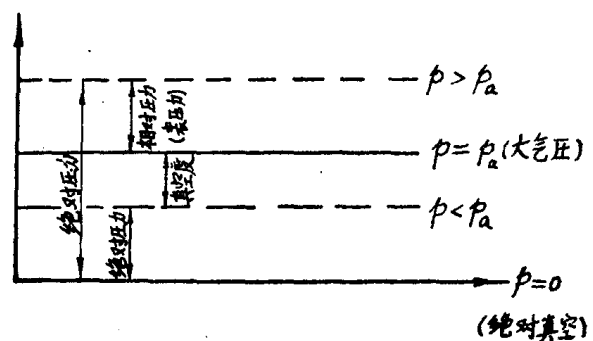


图1—2

### (五) 粘滞性:

流体与固体不同, 流体分子之间的吸引力小, 因此, 只要在静止流体上稍加一点外力, 它就会开始流动, 故流体具有极大的易流动性。由于流体具有流动性, 故当流体流动时, 在流体相邻各层次之间要作相对运动, 这就会产生内摩擦切应力来阻止这种相对运动的发生, 这个特性称为流体的粘性, 或称粘滞性。液体的粘滞性的大小显示出流体流动时摩擦阻力的大小及流体变形快慢的程度, 因此摩擦阻力是流体粘性的表现形式。只有当流体各部分之间具有相对运动的时候, 流体的粘性才会表现出来。如在我们日常生活中所见, 当水流过某一凹槽时, 由于粘性的作用, 槽中心的水流速度总是高于凹槽两边水流速度。

关于流体粘性的大小, 用粘性系数  $\mu$  表示 ( $\mu$  又称动力粘性系数), 它的工程实用单位是公斤·秒/米<sup>2</sup> (kg·sec/m<sup>2</sup>)。影响系数  $\mu$  的因素很多, 与流体的性质, 温度的高低等很多因素有关。

在工程计算中, 往往采用该流体的粘性系数  $\mu$  除以它的密度  $\rho$  而得到一个物理量, 此量称做运动粘性系数, 用符号  $\nu$  表示, 即:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots \dots \dots (1-8)$$

运动粘性系数的工程实用单位是: 米<sup>2</sup>/秒 (m<sup>2</sup>/sec)。

在不同温度下, 空气和水的粘性系数列于表 1—3 中。

表 1—3 空气和水的粘性系数

	符号	单位	-20°C	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C
空 标 准 大 气 压	动力粘度 $\mu$	kg·sec/m <sup>2</sup>	1.66 $\times 10^{-6}$	1.75 $\times 10^{-6}$	1.80 $\times 10^{-6}$	1.85 $\times 10^{-6}$	1.90 $\times 10^{-6}$	1.95 $\times 10^{-6}$	2.0 $\times 10^{-6}$
	运动粘度 $\nu$	m <sup>2</sup> /sec	11.93 $\times 10^{-6}$	13.7 $\times 10^{-6}$	14.7 $\times 10^{-6}$	15.7 $\times 10^{-6}$	16.6 $\times 10^{-6}$	17.6 $\times 10^{-6}$	18.6 $\times 10^{-6}$
水	$\mu$	kg/sec/m <sup>2</sup>		1.83 $\times 10^{-4}$	1.334 $\times 10^{-4}$	1.025 $\times 10^{-4}$	0.818 $\times 10^{-4}$	0.67 $\times 10^{-4}$	0.56 $\times 10^{-4}$
	$\nu$	m <sup>2</sup> /sec		1.83 $\times 10^{-4}$	1.334 $\times 10^{-4}$	1.026 $\times 10^{-4}$	0.821 $\times 10^{-4}$	0.675 $\times 10^{-4}$	0.568 $\times 10^{-4}$

从上表看出, 对液体来说,  $\mu$  值随温度增加而减小; 对气体来说,  $\mu$  值随温度增加而增加。

当温度为 10°C 时, 空气的粘性系数  $\mu = 1.80 \times 10^{-6}$  kg·sec/m<sup>2</sup>, 水的粘性系数  $\mu = 1.334 \times 10^{-4}$  kg·sec/m<sup>2</sup>, 20°C 机油的粘性系数  $\mu = 0.019$  kg·sec/m<sup>2</sup>。由这些比较可以看出, 液体 (特别是油) 比气体的粘性大得多, 故研究液体的流动规律时, 一般必须考虑到粘性的作用。

### 三、理想流体与实际流体:

我们已经知道, 一切流体都具有粘性, 但是在通常情况下, 若考虑到它的粘性作用的话, 则会使流体流动规律的研究变得复杂起来, 故在工程技术中, 往往是当流体的粘性力的作用远小于流体的压力、重力等的作用时, 为了抓住事物的主要矛盾进行分析研究, 有时就忽略粘性力的作用。为此, 我们把不计粘性力作用的流体称做理想流体, 而把自然界实际存在的流体称做实际流体, 或称为粘性流体。

实践证明，在某些场合下，应用理想流体的假定研究出来的结果和实际情况是相当符合的。

这里必须指出，上述理想流体只是一种人为的，假想的流体，而实际自然界中存在的一切流体都具有粘性。

## §2 空气的性质

### 一、空气的组成：

自然界的空气实际上是由若干气体混合组成，其主要成份是氮(N<sub>2</sub>)氧(O<sub>2</sub>)氩(Ar)，二氧化碳(CO<sub>2</sub>)以及其它的一些气体。除此以外，我们说，空气里都或多或少含有一定量的水蒸汽。我们把不含有水蒸汽的空气叫做干空气，而把含有水蒸汽的空气叫做湿空气。

对于干空气的组成成份，经在标准情况下分析测定(温度为 t=0°C，大气压力为 p<sub>a</sub>=760mmHg，重力加速度 g=980.66cm/sec<sup>2</sup>)，列表如下：

表 1—4 干空气的组成

	主 要 成 份				其 它 气 体
	氮(N <sub>2</sub> )	氧(O <sub>2</sub> )	氩(Ar)	二氧化碳(CO <sub>2</sub> )	
体积百分比(%)	78.09	20.95	0.93	0.03	
重量百分比(%)	75.5	23.1	1.28	0.045	约占0.075

### 二、理想气体状态方程：

#### (一) 理想气体状态方程式：

我们知道一定质量的气体，当它处于平衡状态时，必定占有一定的体积从而具有一定的密度 ρ，且当气体静止时，其各部分都具有相同的温度 T、压力 p。在工程上我们通常用 p, ρ, T、这三个物理量来表征此时气体所处的状态，所以这三个量又称做状态参数。在气动控制技术中所遇到的情况大都是这三者同时变化。如图(1—1)所示系统中，压缩机将初始状态为(p<sub>1</sub>, ρ<sub>1</sub>, T<sub>1</sub>)的自由空气压入气罐，气罐内终态压缩空气的状态为(p<sub>2</sub>, ρ<sub>2</sub>, T<sub>2</sub>)，在此压缩过程中，p、ρ、T这三者都同时发生了变化，密度 ρ，压力 p，温度 T 都升高了。此时若我们用手去接触气罐表面就会感到烫手。经无数次的反复实践可归纳出一条规律，即对于一定质量的气体来说，无论它的状态 p, ρ, T 如何变化，只要在稳定之后处于平衡状态，它的压力 p，密度 ρ，温度 T，这三个参数之间必定有下列关系：

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2} = \frac{p_3}{\rho_3 T_3} = \dots = \frac{p_n}{\rho_n T_n} = \text{常量 } R_1 \dots\dots\dots (1-9)$$

根据式(1—2)则上式可改写成

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_3 V_3}{T_3} = \dots = \frac{p_n V_n}{T_n} = \text{常量 } R \dots\dots\dots (1-10)$$

式中：角标 1, 2, 3, …, n 表示各个状态，例如 p<sub>1</sub>, V<sub>1</sub>, T<sub>1</sub>，就是表示在第 1 个状态时气体的压力，体积和温度。

在工程计算中人们还往往喜欢用重度 γ 来代替密度 ρ，因为 γ = ρ.g。所以(1—9)式也可变为



$$\frac{P_1}{\gamma_1 T_1} = \frac{P_2}{\gamma_2 T_2} = \frac{P_3}{\gamma_3 T_3} = \dots = \frac{P_n}{\gamma_n T_n} = \text{常量 } R$$

或:

$$p = \gamma RT \dots\dots\dots (1-11)$$

这个式子称为气体的状态方程(我们也可把(1-9)式等叫做状态方程)。式中:

R——气体常数,单位是公斤·米/公斤°K。它与气体的状态无关,但不同的气体有不同的值。据实验,对空气(干燥)来说  $R = 29.27$  公斤米/公斤°K,对于水蒸汽则  $R = 47.1$  公斤·米/公斤°K。

将式(1-3)代入式(1-11),气体状态方程可变成

$$pV = GRT \dots\dots\dots (1-12)$$

由上述方程式可知:

1. 气体状态变化时,若已知状态参数三个物理量(p.V.T)中任何二个,便可求第三个量。而且,不论气体是在流动中还是在密封容器中产生状态变化,上述方程式均可应用,只不过应注意的,若气体在作稳定的流动时,其状态参数(p.V.T)应该用同一位置的值。
2. 当气体的压力高于几百个大气压或温度很低时,气体状态方程才不适用或需修正。比如对空气而言,当压力达200个大气压,温度在-20°C至+50°C之间,气体状态方程计算结果与实际值才有4%的误差。

(二) 理想气体状态变化过程的特例:

1. 等温过程:

对于一定质量的气体,若其状态变化是在温度不变的条件下进行,则称这个过程为等温过程。在工程中一般气体状态变化很缓慢进行的过程都可看作是等温过程。例如,气罐中气体经小孔放气,则气罐中气体状态变化可视为等温过程。

因为  $T_1 = T_2$

所以:  $p_1 V_1 = p_2 V_2 = \dots = p_n V_n = \text{常数} \dots\dots\dots (1-13)$

由上式可见,气体在等温状态变化时,当气体的体积增大(如膨胀时)则其压力下降。

2. 等容过程:

对一定质量的气体,若其状态变化是在容积不变的条件下进行,称这个过程为等容过程。如气罐中的气体,由于外界加温或冷却,气罐内气体状态变化就可看成等容过程。即:

$V_1 = V_2$

所以有:  $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = \dots = \frac{P_n}{T_n} = \text{常数} \dots\dots\dots (1-14)$

3. 等压过程:

对一定质量的气体,若其状态变化是在压力不变的条件下进行,称这个过程为等压过程。如气体由于加温而自由膨胀的过程。

因有:  $p_1 = p_2,$

所以:  $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \dots = \frac{V_n}{T_n} = \text{常数} \dots\dots\dots (1-15)$

4. 绝热过程:

上述气体状态变化的等温过程,等容过程,等压过程都伴随着热量的放出或吸入,即与外界进行了热量交换。譬如对等温过程,气体压缩时要放出热量,膨胀时要吸入热量。对等