



教育部提升专业服务能力项目
机电一体化技术专业核心课程建设规划教材

气动与液压技术

主 编 ● 王俊洲 张晓娟 赵淑娟
副主编 ● 潘 玲 黄 伟 杨 乐

QIDONG YU YEYA

JISHU



西南交通大学出版社



教育部提升专业服务能力项目
机电一体化技术专业核心课程建设规划教材

气动与液压技术

主 编◎王俊洲 张晓娟 赵淑娟
副主编◎潘 玲 黄 伟 杨 乐

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

内容简介

本书根据高职高专课堂教学和实验操作的要求,以提高实际工程实践能力为目的,深入浅出地对气动技术和液压技术做了系统和完整的介绍。本书的特点是:以项目为导向,从生产实际中提炼出几个典型项目,可以在实验室中模拟完成,重在培养学生对气动和液压技术的开发应用能力。

全书包括五个项目。主要介绍了气动技术和液压技术的基础知识、气缸及气动应用控制的各种阀件、气动系统各种控制回路的设计及应用、气动系统的设计方法等。在各个项目之后安排了技能训练和思考题。

本书可作为高职高专院校机械工程、工业自动化、电气自动化技术、机电一体化技术等专业的教材及实验指导书,同时也可作为相关专业技术人员的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

气动与液压技术 / 王俊洲, 张晓娟, 赵淑娟主编.
—成都: 西南交通大学出版社, 2015.1
教育部提升专业服务能力项目 机电一体化技术专业
核心课程建设规划教材
ISBN 978-7-5643-3642-4

I. ①气… II. ①王… ②张… ③赵… III. ①气压传动—高等职业教育—教材②液压传动—高等职业教育—教材 IV. ①TH138②TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 004770 号

教育部提升专业服务能力项目
机电一体化技术专业核心课程建设规划教材
气动与液压技术

主编 王俊洲 张晓娟 赵淑娟

责任编辑	张华敏
特邀编辑	唐建明 蒋雨杉
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路 146 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都勤德印务有限公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	11
字 数	287 千
版 次	2015 年 1 月第 1 版
印 次	2015 年 1 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-3642-4
定 价	33.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

随着经济建设的快速发展,我国已成为世界性的制造业大国。机电设备的生产制造及应用非常广泛。气压传动系统具有结构简单、造价低、易于控制的特点,特别是其适合在有毒有害、放射、易燃易爆等恶劣环境中工作。而液压系统在船舶、铸造等行业更是具有不可替代的作用。为了给机电行业培养更多的复合型高级技能型人才,我们根据教育部专业与课程改革要求,并广泛征求了企业、相关科研院所和已毕业的学生对本门课程的反馈意见,在既适应新技术的发展又满足教学要求的基础上,编写了本教材。

本教材具有以下特点:

1. 将气压传动技术和液压传动技术有机地融合在一起,降低了它的理论难度和学习难度。
2. 从理论上讲,气动技术和液压技术有许多共同的工作原理。但液压系统的泄露容易污染环境,不利于在实验室中做实验;而气动系统对环境影响小,便于在实验室中模拟控制系统,为了提高学生的实践动手能力,所以本教材以气压传动控制技术为主进行讲解,辅之以液压技术作为和气动技术的对照论述。这样做的优点在于既减少了重复又增加了对比,同时还增加了实践机会。
3. 以项目为导向,突出重点,重在提高学生的工程实践能力。在讲清传动系统和元件基本原理的基础上,正确应用气动与液压传动知识进行系统的分析、元件选型和设计。最后,要求学生完成相应的实践练习,独立完成项目分析、元件选型、设计、安装和调试。
4. 注重学生实践能力的培养和知识的巩固。在每个项目后都安排了技能训练。
5. 为了适应科技发展的需要,考虑到电子技术在气动和液压传动中的广泛应用,本书除了介绍普通元件和系统外,还增加了电气-气动控制的相关知识。
6. 本书所使用的名词术语、图形符号和单位都符合国家标准。

因本书由重庆工业职业技术学院的王俊洲、张晓娟、赵淑娟任主编,潘玲、黄伟、杨乐任副主编。另外,重庆工业职业技术学院自动化学院的领导及机电一体化教研室全体成员对本书的出版给予了大力支持和帮助,并提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,我们还参考了相关领域专家及同行的部分著作和文献资料,在此也表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误及疏漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2014 年 12 月

目 录

项目一 公共汽车车门开闭控制系统	1
项目描述	1
项目教学目标	1
任务1 气动系统认知	2
任务2 气源装置的组建	12
任务3 车门开闭执行机构的组建与调试	30
项目实践	44
思考与练习	45
项目二 机床气动夹紧装置	46
项目描述	46
项目教学目标	46
任务1 控制元件的选用	46
任务2 气动传感与检测元件的选用	65
项目实践	73
思考与练习	74
项目三 冰淇淋喷巧克力机	75
项目教学目标	75
项目描述	75
任务1 气动控制回路设计	75
任务2 气动系统的安装、调试与维护	89
项目实践	100
思考与练习	100
项目四 自动化生产线气动机械手	101
项目教学目标	101
项目描述	101
任务1 确定气动系统的设计方法	102
项目实践	112
思考与练习	116

项目五 剪板机液压系统	117
项目教学目标	117
项目描述	117
任务1 液压系统认知	118
任务2 液压源装置认知	126
任务3 液压执行机构认知	140
任务4 液压控制元件认知	143
任务5 液压控制回路的设计	151
任务6 液压系统设计	157
项目实践	162
思考与练习	162
附录 常用气动图形符号（摘自 GB/T 786.1—1993）	163
参考文献	169

项目一 公共汽车车门开闭控制系统

★ 项目描述

公共汽车穿梭于熙熙攘攘的城市中，承载着人们的往来。我们在乘坐公共汽车时，如果汽车到站，司机师傅会按下“开门”按钮，汽车车门就会开启；汽车离站时，司机会按下“关门”按钮，汽车车门就会关闭。城市公共汽车车门的开启与关闭一般有电动控制和气动控制两种方式。图 1-1 所示为公共汽车车门开、闭控制示意图，它由相应的机构拉、推车门，以便打开、关闭车门，该机构由一套气动系统驱动。这套气动系统通过公共汽车发动机驱动空气压缩机将空气压缩到储气罐中，在进行车门的开启、关闭时，利用储气罐内的压缩空气来实现对车门的打开和关闭动作。那么这套系统是由哪些部分组成的呢？它们是如何进行协调工作的呢？

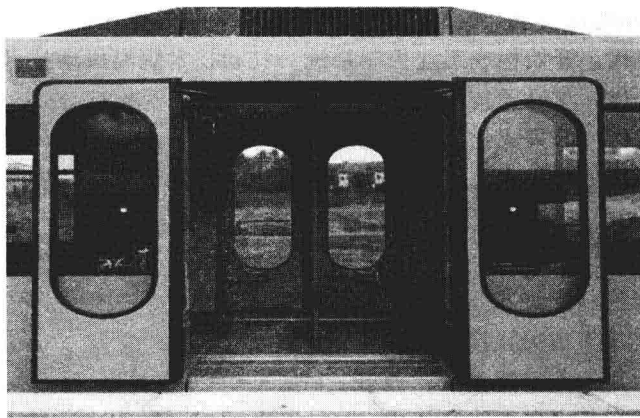


图 1-1 公共汽车车门开、闭系统图

★ 项目教学目标

1. 知道气动系统的组成、工作原理、特点。
2. 熟悉空气的基本性质，会用气体的理想状态方程进行计算。
3. 熟悉空压机的分类、工作原理、特点。
4. 熟练掌握气源净化器件的结构、工作原理。
5. 懂得压缩空气管路系统的主要配置类型、布置原则。
6. 掌握直线运动气缸的种类、特点。
7. 掌握摆动气缸的种类、工作原理。
8. 掌握气动手指（气爪）的工作原理、组成。

任务1 气动系统认知

【任务引入】

公共汽车在开门或关门的时候，我们都会听到“哧”的声响，这是压缩空气排入大气的声音。因为这套车门启闭系统是采用了气动系统，我们接触的大气到底有什么样的特性？空气压缩后又有怎样的特性？为什么压缩的空气才能驱动机构工作呢？我们下面进行介绍。

【任务分析】

公共汽车车门气动开、闭控制系统是根据气压原理制成的。在公共汽车车门上有一个铁盒子，里面有一个汽缸，气缸内的活塞在运行时会把缸内的气体排出气缸，这就是“哧”的一声的原因。气体是具有可压缩性的，压缩后的气体，体积减小、压强增大，具有高压的气体才能推动气缸活塞运动。为此，我们需要了解气压的相关知识。

【相关知识】

1.1 气动技术历史

- ✎ 2000年前，希腊人 DSTESIBIOS 制造了一门空气弩炮，成为使用气动技术第一人。
- ✎ 公元一世纪出现了有关压缩空气作为能源应用的第一本书。
- ✎ 20世纪中叶，气动技术开始在工业生产上实际应用并迅速推广。
- ✎ 20世纪60年代，开始构成工业控制系统，气动技术脱离风动技术而自成体系。
- ✎ 20世纪70年代，与电子技术结合，在自动化领域广泛推广。
- ✎ 20世纪80年代，向集成化、微型化发展。
- ✎ 20世纪90年代，向集成化、微型化、模块化、智能化方向发展。

1.2 气动技术的应用

- ✎ 在机床中用于送料、夹紧、定位、翻转、进给等工序。
- ✎ 在工程机械上用于混凝土搅拌、建筑机械。
- ✎ 在塑料机械上用于真空成型、吹瓶等。
- ✎ 在冶金工业，用于各种恶劣环境中。
- ✎ 在汽车制造行业，用于焊接生产线。
- ✎ 用在轻工机械的各种生产线上。
- ✎ 在电子、半导体制造行业，家用电器装配生产线上，用于抓起、升降、搬运等各种动作。
- ✎ 用在食品、医药、包装、印刷、焊接等行业上。

1.3 气压传动的工作原理及组成

1.3.1 气压传动的工作原理

气压传动的工作原理是：以压缩气体为工作介质，靠气体的压力传递动力信息的流体传动。传递动力的系统是将压缩气体经由管道和控制阀输送给气动执行元件，把压缩气体的压力转换为机械能而做功，见图1-2。传递信息的系统是利用气动逻辑元件或射流元件以实现逻辑运算等功能，亦称气动控制系统。

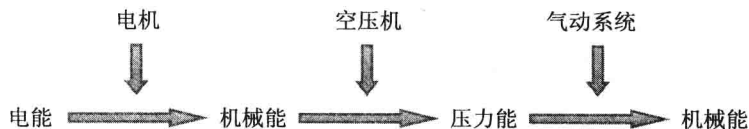


图 1-2 能量转化示意图

1.3.2 气压传动系统的组成

气压传动系统的组成如图 1-3 和图 1-4 所示。

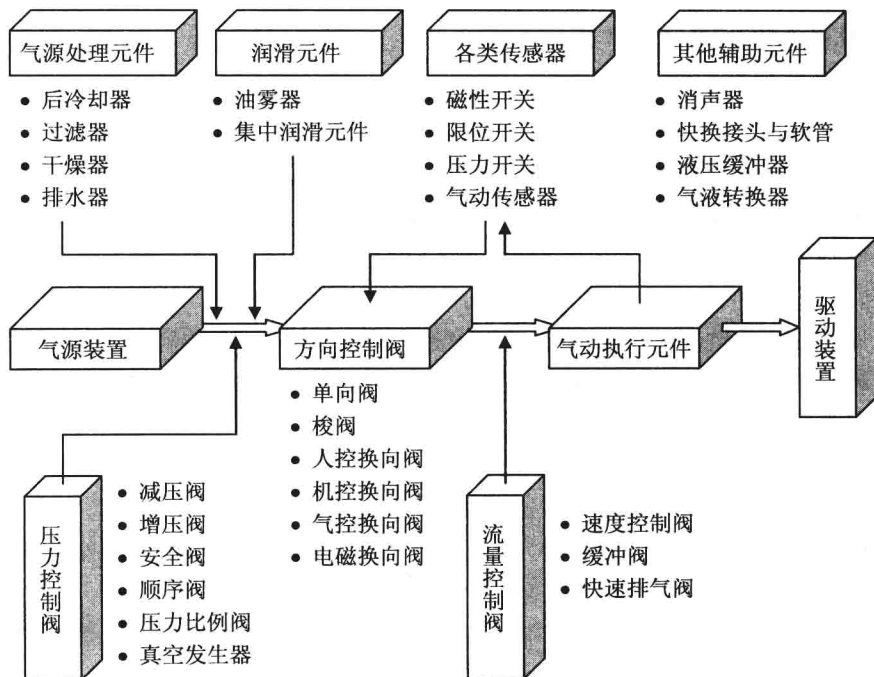


图 1-3 气动系统的基本组成框图

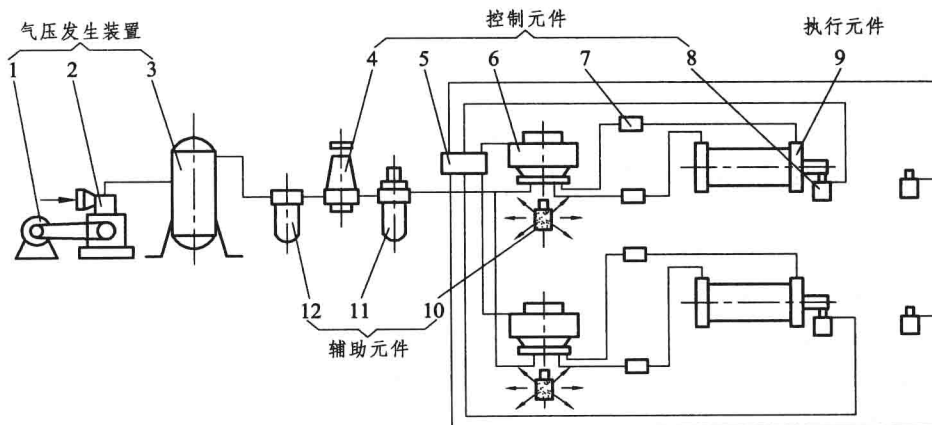


图 1-4 气动系统的组成示意图

- 1—电动机；2—空气压缩机；3—储气罐；4—压力控制阀；5—逻辑元件；6—方向控制阀；7—流量控制阀；8—机控阀；9—气缸；10—消声器；11—油雾器；12—空气过滤器

- 气源装置：获得压缩空气的设备，空气净化设备，如空压机、空气干燥机等。
- 执行元件：将气体的压力能转换成机械能的装置，也是系统能量输出的装置，如气缸、气马达等。
- 控制元件：用以控制压缩空气的压力、流量、流动方向以及系统执行元件工作程序的元件，如压力阀、流量阀、方向阀和逻辑元件等。
- 辅助元件：起辅助作用，保证压缩空气的净化、元件的润滑、元件间的连接及消声等，如过滤器、油雾器、管件、消声器、散热器、冷却器、放大器等。

1.3.3 压缩空气产生系统

- 压缩机：常压下的空气被压缩并以较高的压力输送给气动系统，这样就能把机械能转变为气压能。
- 电动机：给压缩机提供机械能，它是把电能转变成机械能。
- 压力开关：将储气罐内的压力信号用来控制电动机，它被设定一个压力范围，达到压力上限就停止电动机，当储气罐内压力跌到压力下限就重新启动电动机，使空气压缩机工作，给储气罐充压。
- 单向阀：让压缩空气从压缩机进入储气罐，而阻止储气罐内的高压气体倒流回压缩机。
- 储气罐：储存压缩空气。它的尺寸大小由压缩机的容量来决定，储气罐的容积越大，压缩机运行时间间隔就越长。
- 压力表：显示储气罐内的压力。
- 自动排水器：无需人手操作，排掉凝结在储气罐下部的水。
- 安全阀：当储气罐内的压力超过允许限度，可将压缩空气排出，直到储气罐内的压力低于最高压力限度，起保护储气罐的作用。
- 冷冻式空气干燥器：将压缩空气制冷到零上若干度，使压缩空气中大部分的湿气凝结，这就免除了后面系统中的水分。
- 主管道过滤器：在主要管路中，主管道过滤器必须具有最小的压力降和油雾分离能力。它能滤除管道内的灰尘、水分和油污。

1.3.4 压缩空气消耗系统

- 压缩空气的输出：压缩空气要从主管道的顶部输出，以便残留的凝结水仍留在主管道中，当压缩空气到达低处时，水流到管道的下部，流入自动排水器中，这样就能将凝结水排除。
- 自动排水器：每一根下接管的末端都应有一个排水器，最有效的方法是用一个自动排水器，将留在管道内的水自动排除。
- 空气处理元件：使压缩空气保持清洁和合适的压力以及加润滑油到需要润滑的零件中，以延长这些零件的使用寿命。
- 执行元件：把压缩空气的压力能转变成机械能，可以是直线气缸，也可以是回转执行元件或气动马达等。
- 方向控制阀：通过对气缸两个接口交替的加压和排气，来控制气缸的运动方向。
- 速度控制阀：能简便实现执行元件的无级调速。

- 压力控制阀：能够调节进口压力的大小，使出口压力满足系统的需要。

1.4 气动系统的特点

1.4.1 优点

① 空气可以从大气中取得，同时，用过的空气可直接排放到大气中去，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，也不会污染环境。

② 空气的黏度很小，在管道中的压力损失较小，因此压缩空气便于集中供应（空压站）和远距离输送。

③ 因压缩空气的工作压力较低（一般为 $0.3 \sim 0.8 \text{ MPa}$ ），因此，对气动元件的材料和制造精度上的要求较低。

④ 气动系统维护简单，管道不易堵塞，也不存在介质变质、补充、更换等问题。

⑤ 使用安全，没有防爆的问题，并且便于实现过载自动保护。

1.4.2 缺点

① 气动装置中的信号传递速度较慢，仅限于声速的范围内，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，实现生产过程的远距离控制也比较困难。

② 由于空气具有可压缩的特性，因而运动速度的稳定性较差。

③ 因为工作压力较低，又因结构尺寸不宜过大，因而气压传动装置的总推力很小。

④ 目前气压传动的传动效率较低。

1.5 气动技术的发展趋势

① 电气一体化：微电子技术与气动元件相结合组成了 PC 机—接口—小型阀—气缸的电气一体化的气动系统；同时，与电子技术相结合的自适应控制气动元件已经问世，如压力比例阀、流量比例阀等，使气动技术从以往的开关控制到高精度的反馈控制，使定位精度提高到 $\pm 0.1 \sim 0.01$ 。电气一体化已经渗透到工厂本身的加工、装配、检测等生产领域。

② 小型化、轻量化：由于气动技术在电子行业、工业自动化等领域的应用，气动元件必须小型化和轻量化。各种新技术、新材料的应用，使气动元件实现了小型化和轻量化。

③ 复合集成化：为了节省空间、减少配管、简化装配、提高效率，多功能复合化和集成化的元件相继出现，例如：将所需数目的阀配置在集成板上，带阀气缸等。

④ 无油化：为适应食品、医药、电子、纺织等行业的无污染要求，预先添加润滑脂的不供油润滑元件大量问世；同时，正在开发用自润滑材料制造、无需添加润滑脂就能工作的无油润滑元件。

⑤ 低功率：为了与微机、程序控制器直接连用，电磁阀必须实现低功率化。目前，电磁阀的功率已降至 1 W ，甚至 0.5 W 。

⑥ 高精度：位置控制精度已由过去的 1 mm 级提高到 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。

⑦ 高质量：由于新材料、新技术的应用及加工工艺水平的提高，电磁阀的寿命可达 $3\,000$ 万次以上，气缸运行耐久性已达 $2\,000 \sim 6\,000 \text{ km}$ 。

⑧ 高速度：提高电磁阀的工作频率和气缸速度对提高生产效率有着重要意义。电磁阀工作频率可达 25 Hz，气缸速度从 1 m/s 提高到 3 m/s。

⑨ 高出力：采用杠杆式扩力机构或气液增压器，可使输出力增大几倍至几十倍。

1.6 空气的基本性质

在气压传动与控制系统中，工作介质是压缩空气，所以我们要了解一下空气的物理性质。

1.6.1 空气的组成

在地球表面存在一个大气层。大气层重量压在海平面上，在单位面积上所受的力称为“大气压力”。把高于大气压力的压力称为“空气压”。

自然界的空气由若干种气体混合而成，如表 1-1 所示。

表 1-1 空气的组成

成分	氮 (N ₂)	氧 (O ₂)	氩 (Ar)	二氧化碳 (CO ₂)	氢 (H ₂)	其他气体
体积分数 (%)	78.03	20.95	0.93	0.03	0.01	0.05

1.6.2 空气的基本状态参数

(1) 空气的密度

单位体积内所含气体的质量称为密度，用 ρ 表示，即：

$$\rho = m/V \quad (1-1)$$

式中， ρ 是空气密度，单位是 kg/m³； m 是空气的质量，单位是 kg； V 是空气的体积，单位是 m³。

(2) 空气的压力

压力是由气体分子热运动而相互碰撞，在容器的单位面积上产生的力的统计平均值，用 p 表示。

压力的法定计量单位是 Pa，较大的压力单位用 kPa (1 kPa = 1 × 10³ Pa) 或 MPa (1 MPa = 1 × 10⁶ Pa)，工程中常用巴：bar (kgf/cm²)。各种压力单位的换算如表 1-2 所示。

表 1-2 各种压力单位换算

单 位	Pa	bar	mmHg	mmH ₂ O
Pa (N/m ²), 帕	1	10 ⁵	7.5 × 10 ⁻³	0.102
bar, 巴	10 ⁵	1	750	1.02 × 10 ⁴
mmHg, 毫米汞柱	133.3	1.33 × 10 ⁻³	1	13.6
mmH ₂ O, 毫米水柱	9.81	9.81 × 10 ⁻⁵	7.36 × 10 ⁻²	1

注：760 mmHg 称为一个物理大气压。

为了确保标准大气压是一个定值，1954 年第十届国际计量大会决议声明，规定标准大气压值为：

$$1 \text{ 标准大气压} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$$

对于湿空气来说, 根据道尔顿定律, 湿空气的压力应为干空气的分压力与水蒸气的分压力之和, 即:

$$p = p_{\text{干}} + p_{\text{湿}} \quad (1-2)$$

式中, p 为湿空气的压力, $p_{\text{干}}$ 是干空气的分压力, $p_{\text{湿}}$ 是湿空气中水蒸气的分压力, 单位都是 Pa。

压力可用绝对压力、表压力和真空度来度量。

- 绝对压力: 以绝对真空作为基准所计的压力。一般需在表示绝对压力的符号的右下角标注“ABS”, 即 p_{ABS} 。

- 相对压力: 以大气压力作为基准所计的压力, 由于大多数测压仪所测得的压力都是相对压力, 故相对压力也称为表压力(表压)。

- 真空度: 当某点的绝对压力小于大气压时, 则将在这点上的绝对压力比大气压力小的那部分数值叫做真空度。真空度 = 大气压 - 绝对压力。

- 真空压力: 绝对压力与大气压力之差。真空压力在数值上与真空度相同, 但应在其数值前加负号。真空压力 = 绝对压力 - 大气压。

绝对压力、表压力和真空度的相互关系如图 1-5 所示。

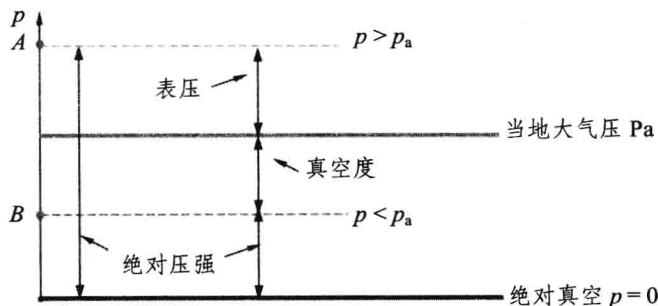


图 1-5 绝对压力、表压力和真空度的相互关系图

当 $p > p_a$ 时: 相对压力(表压) = 绝对压力 - 当地大气压。

当 $p < p_a$ 时: 相对压力(真空度) = 当地大气压 - 绝对压力。

在工程计算中, 常将当地大气压用标准大气压力代替, 即令 $p_a = 101\,325 \text{ Pa}$ 。

(3) 温度 T

温度表示气体分子热运动动能的统计平均值, 有热力学温度、摄氏温度、华氏温度等。

热力学温度用符号 T 表示, 其单位名称为开(尔文), 单位符号为 K。

摄氏温度用符号 t 表示, 其单位名称为摄氏度, 单位符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温度与热力学温度的关系如下式表示:

$$t = T - 273.15 \quad (1-3)$$

华氏温度用符号 θ 表示, 其单位名称为华氏度, 单位符号为 $^{\circ}\text{F}$ 。华氏温度和摄氏温度的关系如下式表示:

$$\theta = 1.8 \times t + 32 \quad (1-4)$$

1.6.3 空气的压缩性

一定质量的静止气体, 由于压力改变而导致气体所占容积发生变化的现象, 称为气体的压缩性。由于气体比液体容易压缩, 故液体常被当做不可压缩流体, 而气体常被称为可压缩流体。气体容易压缩, 有利于气体的贮存, 但难以实现气缸的平稳运动和低速运动。

1.6.4 空气的黏性

气体在流动过程中产生内摩擦力的性质称为黏性, 表示黏性大小的量称为黏度。空气黏度随温度的变化而变化, 温度越高, 黏度越大。

1.6.5 空气的湿度

空气的湿度, 表示大气干燥程度的物理量。在一定的温度下, 在一定体积内的空气里含有的水汽越少, 则空气越干燥; 水汽越多, 则空气越潮湿。空气的干湿程度叫做“湿度”。常用绝对湿度、相对湿度及露点等物理量来表示。

(1) 绝对湿度

每立方米湿空气中含有的水蒸气的质量, 称为绝对湿度。也就是湿空气的水蒸气密度, 用 X 表示, 即

$$X = m_{\text{水}} / V \quad (1-5)$$

式中, X 为绝对湿度, 单位是 kg/m^3 ; $m_{\text{水}}$ 为水蒸气质量, 单位是 kg ; V 为湿空气体积, 单位是 m^3 。

湿空气是干空气和水蒸气的混合气体, 湿空气中水蒸气的含量是有极限的。在一定温度和压力下, 空气中所含水蒸气达到最大可能的含量时, 这时的空气叫饱和空气。饱和空气所处的状态叫饱和状态。

(2) 相对湿度

每立方米湿空气中, 水蒸气的实际含量 (即未饱和空气的水蒸气密度) 与同温度下最大可能的水蒸气含量 (即饱和水蒸气密度) 之比称为相对湿度, 用 ϕ 表示, 即:

$$\phi = \frac{X}{X_{\text{饱}}} \times 100\% = \frac{\rho_{\text{未饱}}}{\rho_{\text{饱}}} \times 100\% \quad (1-6)$$

(3) 露点

未饱和空气, 保持水蒸气分压力不变而降低温度, 使之达到饱和状态时的温度称为露点。温度降至露点以下, 湿空气中便有水滴析出。降温法清除湿空气中的水分, 就是利用这个原理。

表 1-3 所示为绝对压力在 0.1013 MPa 下, 饱和空气中水蒸气的分压力、饱和绝对湿度和温度的关系。

表 1-3 饱和空气中水蒸气的分压力、饱和绝对湿度和温度的关系

温度 $t/^\circ\text{C}$	饱和水蒸气分压力 p_b/MPa	饱和绝对湿度 $X_b/(\text{g}/\text{m}^3)$	温度 $t/^\circ\text{C}$	饱和水蒸气分压力 p_b/MPa	饱和绝对湿度 $X_b/(\text{g}/\text{m}^3)$	温度 $t/^\circ\text{C}$	饱和水蒸气分压力 p_b/MPa	饱和绝对湿度 $X_b/(\text{g}/\text{m}^3)$
100	0.1013	—	29	0.004	28.7	13	0.0015	11.3
80	0.0473	290.8	28	0.0038	27.2	12	0.0014	10.6
70	0.0312	197.0	27	0.0036	25.7	11	0.0013	10.0
60	0.0199	129.8	26	0.0034	24.3	10	0.0012	9.4
50	0.0123	82.9	25	0.0032	23.0	8	0.0011	8.27
40	0.0074	51.0	24	0.0030	21.8	6	0.0009	7.26
39	0.0070	48.5	23	0.0028	20.6	4	0.0008	6.14
38	0.0066	46.1	22	0.0026	19.4	2	0.0007	5.56
37	0.0063	43.8	21	0.0025	18.3	0	0.0006	4.85
36	0.0059	41.6	20	0.0023	17.3	-2	0.0005	4.22
35	0.0056	39.5	19	0.0022	16.3	-4	0.0004	3.66
34	0.0053	37.5	18	0.0021	15.4	-6	0.00037	3.16
33	0.0050	25.6	17	0.0019	14.5	-8	0.0003	2.73
32	0.0048	33.8	16	0.0018	13.6	-10	0.00026	2.25
31	0.0045	32.0	15	0.0017	12.8	-16	0.00015	1.48
30	0.0042	30.3	14	0.0016	12.1	-20	0.0001	1.07

例 1 10 m^3 的大气，温度为 10°C 时，相对湿度为 65%，被压缩为 $6 \times 10^5\text{ Pa}$ 表压力，温度运行升高到 25°C ，问将有多少水凝结出来？（当地的大气压为 $1.013 \times 10^5\text{ Pa}$ ； 25°C 时，饱和绝对湿度为 $23\text{ g}/\text{m}^3$ ； 40°C 时，饱和绝对湿度为 $51\text{ g}/\text{m}^3$ ）

解 10°C 时（在 10°C 时，从表 1-3 查得：饱和绝对湿度为 $9.4\text{ g}/\text{m}^3$ ）， 10 m^3 空气中最多含水分： $9.4 \times 10 = 94\text{ (g)}$

10 m^3 空气中实际含水量为： $94 \times 0.65 = 61.1\text{ (g)}$ 。

压缩到 $6 \times 10^5\text{ Pa}$ 表压力后的体积 V_2 为：

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

$$V_2 = \frac{p_1}{p_2} V_1$$

即：
$$V_2 = \frac{1.013 \times 10^5\text{ Pa}}{(6 + 1.013) \times 10^5\text{ Pa}} \times 10\text{ m}^3 = 1.44\text{ m}^3$$

1.44 m^3 空气在 25°C 时的最大含水量为： $23\text{ g} \times 1.44 = 33.12\text{ (g)}$ 。

压缩后，从空气中析出的水分为： $61.1 - 33.12 = 27.98\text{ (g)}$ 。

所以，将有 27.98 g 水被凝结出来。

1.6.6 标准状态和基准状态

标准状态：指温度为 20 °C、相对湿度为 65%、压力为 0.1 MPa 时的空气状态。在标准状态下，空气的密度 $\rho = 1.185 \text{ kg/m}^3$ 。

基准状态：指温度为 0 °C、压力为 101.3 kPa 的干空气的状态。在基准状态下，空气的密度 $\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$ 。

1.7 理想气体状态方程

理想气体是指没有黏性的气体，理想气体的状态见表 1-4。

表 1-4 理想气体的状态

名 称	适用条件	数学表达式	说 明
理想气体 状态方程	一定质量的理想气体在 状态变化的某一稳定瞬 时，压力和体积的乘积 与其绝对温度之比不变	$\frac{pV}{T} = \text{常数}$ $p\nu = RT$ $\frac{p}{\rho} = RT$	p ——绝对压力 (N/m^2) V ——气体体积 (m^3) ν ——质量体积 (m^3/kg) ρ ——气体密度 (kg/m^3) T ——热力学温度 (K) R ——气体常数 干空气 $R = 287.1 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
等容过程	容积不变	$\frac{p}{T} = \text{常数}$ $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$	气体状态变化时，其压力 p 与热力学温度 T 成正比
等压过程	压力不变	$\frac{V}{T} = \text{常数}$ $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	气体状态变化时，其体积 V 与热力学温度 T 成正比
等温过程	温度不变	$pV = \text{常数}$ $p_1V_1 = p_2V_2$	气体状态变化时，其压力 p 与体积 V 成反比
绝热过程	与外界无热交换	$\frac{p}{\rho^k} = \text{常数}$ $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^k$ $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{k}{k-1}}$	k ——绝热指数 对于空气 $k = 1.4$
多变过程	气体按其中间过程变化	$\frac{p}{p^n} = \text{常数}$ $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{n}{n-1}}$ $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{n}{n-1}}$	n ——多变指数 绝热过程 $n = k$ 等温过程 $n = 1$ 等压过程 $n = 0$ 等容过程 $n = \infty$

1.8 气体的流动规律

1.8.1 气体流动的基本方程

(1) 连续性方程

根据质量守恒定律, 气体在管道内做定常流动时, 通过流管任意截面的气体质量、流量都相等, 即:

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad (1-7)$$

式中: ρ 为空气的密度 (kg/m^3); v 为气体的运动速度 (m/s); A 为流管的截面积 (m^2)。

(2) 伯努利方程

水平流动的流体流过管径不同的管道时, 如图 1-6 所示, 在点 1 和点 2 的总能量相同。

总能量 = 压力能 + 动能, 即:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (1-8)$$

注: 若流速不超过 330 m/s 时, 此方程对气体也适用。

1.8.2 声速与马赫

(1) 声速

我们可以认为声波的传播过程是可逆的绝热过程,

即存在关系式 $\frac{p}{\rho^k} = \text{常数}$, 则:

$$\frac{dp}{d\rho} = k \frac{p}{\rho} = kRT$$

则有

$$c = \sqrt{k \frac{p}{\rho}} = \sqrt{kRT} \quad (1-9)$$

式中: k 为绝热指数; R 为气体常数; p 为绝对压力 (N/m^2); ρ 为气体密度 (kg/m^3); T 为热力学温度 (K); c 为当地音速。

可见, 声速与当地绝对温度有关。

(2) 马赫数

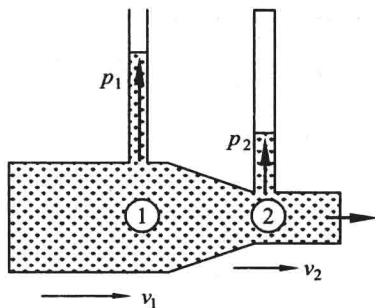
马赫数是流体的流动速度 v 与当地音速 c 的比值, 即:

$$M_a = \frac{v}{c} \quad (1-10)$$

当 $v < c$ 、 $M_a < 1$ 时为亚声速流动; 当 $v > c$ 、 $M_a > 1$ 时为超声速流动; 当 $v = c$ 、 $M_a = 1$ 时为声速流动, 即临界状态流动。

1.8.3 气体在管道中的流动速度

流动时的马赫数 $M_a < 0.2 \sim 0.3$, 我们可以当作不可压缩流动; 当空气在管道中做高速流动



$p_1 > p_2$, $v_1 < v_2$ (v_1 、 v_2 为流体速度)

图 1-6 流体伯努利方程的工作原理示意图