

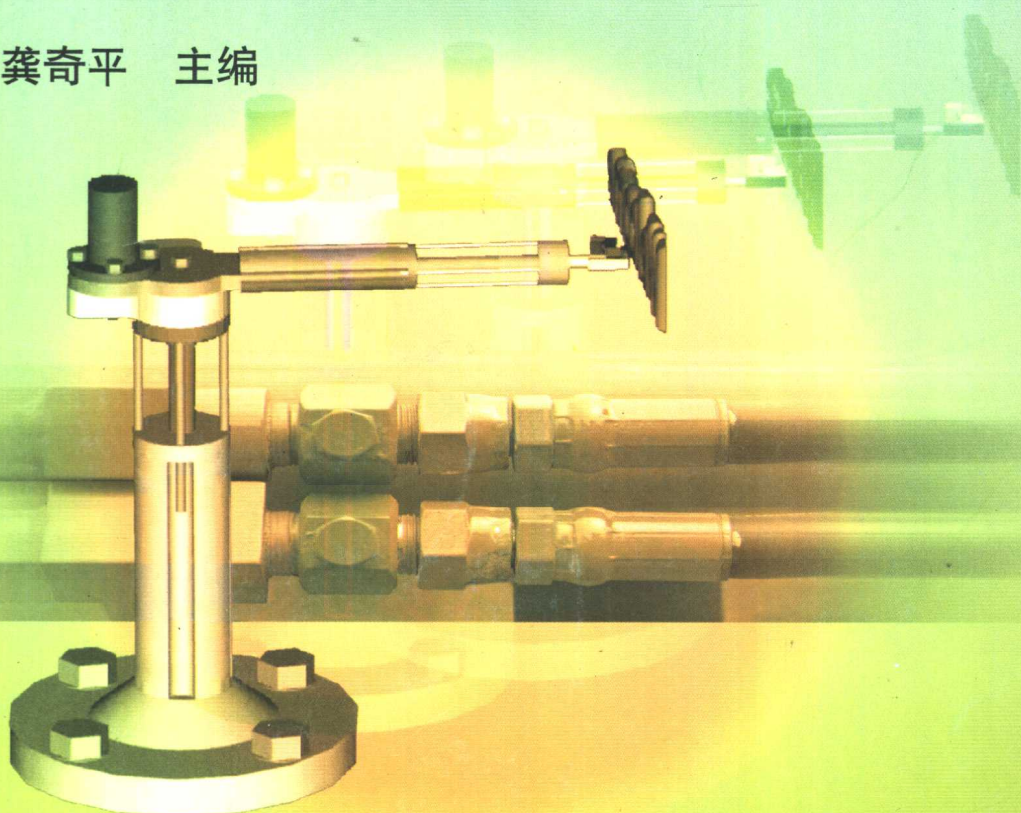


中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

液压与气动

(机电设备安装与维修专业)

龚奇平 主编



 机械工业出版社

中等职业教育国家规划教材

全国中等职业教育教材审定委员会审定

液 压 与 气 动

(机电设备安装与维修专业)

主 编	龚奇平			
副 主 编	陶永德			
参 编	王崇秋	吴正勇	赵学清	
责任主审	罗圣国			
审 稿	黄效国	陈新华		

机 械 工 业 出 版 社

本书是中等职业教育机电设备安装与维修专业的规划教材。全书分液压传动和气压传动两大部分，共七章。

本书以应用为主线，以实用、够用为原则，在介绍液压与气压基本知识的前提下，结合生产实际和专业特点，强调了常用液压、气动元件的结构原理和典型回路及系统的工作原理。同时，重点介绍了典型液压元件和系统的常见故障诊断及排除方法。

本书也可作为从事液压、气动的企业技术工人的培训教材和技术参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

液压与气动/龚奇平主编. —北京: 机械工业出版社, 2002.1

中等职业教育国家规划教材

ISBN7-111-09728-9

I. 液… II. 龚… III. ① 液压传动—专业学校—教材 ② 气压传动—专业学校—教材 IV. ① TH137 ② TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 097329 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 冯 铤 版式设计: 霍永明 责任校对: 张佳

封面设计: 姚 毅 责任印制: 付方敏

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·8.25 印张·200 千字

0 001—5 000 册

定价: 10.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677—2527

中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成〔2001〕1 号）的精神，我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲（课程教学基本要求）编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

二〇〇一年十月

前 言

本书是中等职业教育机械设备安装与维修专业的规划教材，其内容包括两大部分：液压传动、气压传动，共七章。

根据中等职业教育的特点，本书在编写过程中，注意了以应用为主线，以实用、够用为原则，在介绍基本知识的前提下，密切结合生产实际和专业特点，强调了常用液压、气动元件的结构原理和典型回路及系统的工作原理，同时还在第七章中专门介绍了典型液压元件和系统的常见故障诊断及排除方法。学生通过本书的学习后，可具备液压、气动的基础知识及调试、维护的基本技能，并为继续学习打下基础。

本书也可作为从事液压、气动技术工作的工程技术人员、修理人员的参考用书及培训教材。

本书由重庆工业职业技术学院龚奇平（第三章第一节、第七章）、常州机械学校陶永德（第四章、第七章）、常州机械学校吴正勇（第五章、第六章）、重庆工业职业技术学院王崇秋（第一章、第二章、第三章第一节）、张家界航空工业学校赵学清（第三章第二、三、四节）编写。龚奇平任主编，陶永德任副主编。

本书由四川工程职业技术学院赵长旭任主审。参加审稿会的有：江苏理工大学李锦飞副教授、张家界航空工业学校刘坚高级讲师、东风汽车公司刘文芳、镇江职教中心徐冬元、德阳安装工程学校黄国雄、常州机械学校居耀成、许朝山等。

本书采用的图例是从全国众多的液压、气动书上选取的，编者在此向他们致谢。

由于编者经验不足，水平有限，书中定有不少错漏之处，恳请读者予以批评指正。

编者

2001 年 11 月

目 录

前言	
第一章 概论	1
第一节 液压与气压传动的工作原理 与组成	1
第二节 液压与气压传动的优缺点及发展	2
思考题与习题	3
第二章 液压传动基础知识	4
第一节 液压油	4
第二节 液体静力学基础	7
第三节 液体动力学基础	9
第四节 液体流经小孔和缝隙的流量	13
思考题与习题	15
第三章 液压元件	16
第一节 液压泵与液压马达	16
第二节 液压缸	27
第三节 液压控制阀	33
第四节 液压辅助元件	48
思考题与习题	51
第四章 液压回路及系统	53
第一节 压力控制回路	53
第二节 速度控制回路	55
第三节 方向控制回路	61
第四节 多缸工作控制回路	63
第五节 组合机床动力滑台液压系统	67
第六节 万能外圆磨床液压系统	71
第七节 SZ-250/160 塑料注射成型机 液压系统	78
思考题与习题	84
第五章 气压传动基础	87
第一节 空气的物理性质及气体状态方程	87
第二节 气源装置及辅助元件	88
第三节 气动执行元件	91
第四节 气动控制元件	94
思考题与习题	98
第六章 气动回路	100
第一节 气动基本回路	100
第二节 典型气压传动系统	105
思考题与习题	107
第七章 液压系统的故障诊断及排除	108
第一节 液压系统的故障诊断	108
第二节 典型液压元件、液压系统的故障诊断 及排除方法	112
附录 常用液压与气动元件图形符号	119
参考文献	125

第一章 概 论

常见的机器的传动形式有以下几种：机械传动、电气传动、液压传动和气压传动等。机械传动和电气传动在其他课程中已有介绍，本课程主要介绍液压与气压传动。

液压传动 是指以液体为工作介质来传递能量的一种传动形式。如液压机、推土机等都属于这种传动形式。

气压传动 是指以压缩空气为工作介质来传递能量的一种传动形式。如风钻、射钉枪等都属于这种传动形式。

第一节 液压与气压传动的工作原理与组成

一、液压与气压传动的工作原理

1. 液压传动系统的工作原理

图 1-1 所示为液压千斤顶的工作原理图，其工作原理如下：摆动杠杆 1，使小活塞 2 不断上下运动从油箱中吸油，再把油压入到大活塞 3 下面的腔内，使大活塞 3 不断上升，逐渐将重物举起。小活塞 2 是该系统的原动件，相当于一个单柱塞泵；大活塞 3 是执行件，相当于液压缸，单向阀 4 的作用是保证油液沿箭头所指方向流动，反方向截止，是一个控制元件。由于大小活塞的面积是按一定的倍数设计的，所以在杠杆 1 上只需作用较小的力，就能把较大重物顶起来。

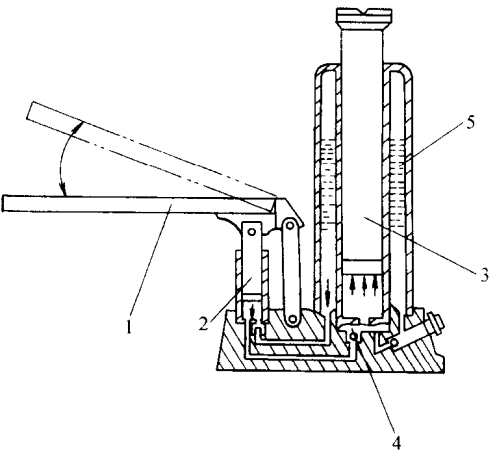


图 1-1 液压千斤顶的工作原理

1—杠杆 2—小活塞

3—大活塞 4—单向阀 5—油箱

2. 气压传动系统的工作原理

图 1-2 所示为剪切机剪切前的情况。当工料 11 由上料装置（图中未画出）送入剪切机并到达规定位置，将行程阀 8 的按钮压下后，换向阀 9 的下腔 A 通过行程阀 8 与大气相通，使换向阀芯在弹簧力的作用下向下移动。由空气压缩机 1 产生的压缩空气，经过初次净化处理后储藏在贮气罐 4 中，经过分水滤气器 5、减压阀 6 和油雾器 7 以及换向阀 9，进入气缸 10 的下腔。气缸 10 上腔的压缩空气通过换向阀 9 排入大气。这时，气缸活塞在气压力的作用下向上运动，带动剪刀将工料 11 切断。工料剪下后，随即与行程阀 8 脱开，行程阀复位，阀芯将排气通道封死，换向阀 9 的下腔 A 中的气压升高，迫使换向阀的阀芯上移，气路换向。压缩空气进入气缸 10 的上腔，气缸 10 的下腔排气，气缸活塞向下运动，带动剪刀复位，准备第二次下料。

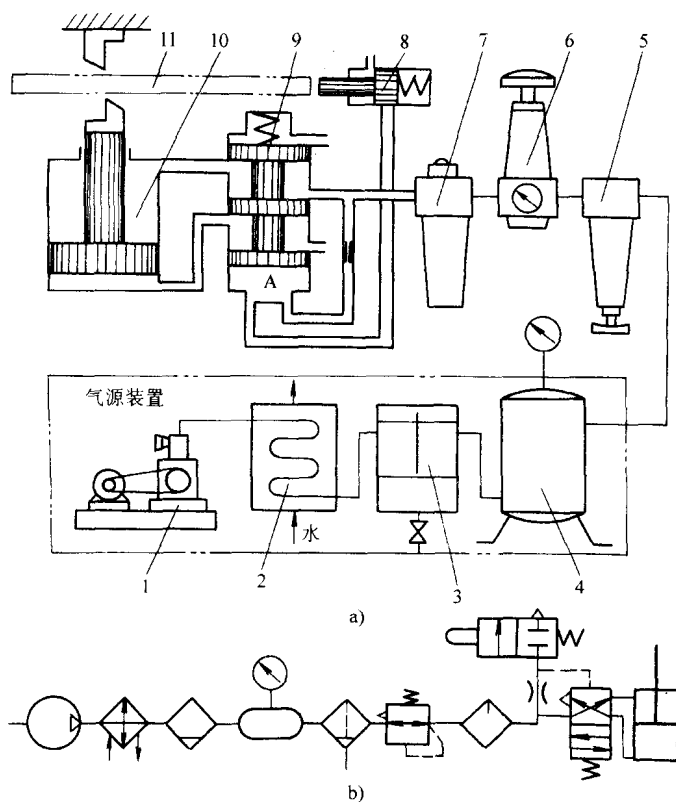


图 1-2 气动剪切机工作原理图

a) 结构原理图 b) 图形符号

1—空气压缩机 2—冷却器 3—油水分离器 4—贮气罐 5—分水滤气器
6—减压阀 7—油雾器 8—行程阀 9—换向阀 10—气缸 11—工件

二、液压及气压传动系统的组成

由上述例子可见，液压与气压传动系统由以下四个基本部分组成：

(1) 动力装置 液压泵或空气压缩机。它是将原动机（电动机）供给的机械能转变为液体或者气体的压力能的装置，为各类液（气）压设备提供动力。

(2) 执行元件 包括各种缸和马达。它的功用是将液体或气体的压力能转变为机械能，实现工作机构所需要的动力和运动。

(3) 控制调节元件 如压力阀、流量阀、方向阀等。它们的作用是控制执行元件的压力、流量和方向，以保证执行元件完成预期的工作运动。

(4) 辅助元件 是使工作介质（油或气）贮存、输送、净化、润滑、测量以及用于元件间连接的装置，如过滤器、油管、压力计、流量计、油箱、油雾器、消声器等。

第二节 液压与气压传动的优缺点及发展

一、液压与气压传动的优缺点

1. 液压与气压传动系统的优点

1) 质量轻、体积小、反应快。无论是液压传动元件还是气压传动元件, 在输出相同的功率条件下, 体积和质量相对较小, 因此惯性力小, 动作灵敏。这对制造自动控制系统很重要。

2) 实现无级调速, 调速范围大, 可在系统运行中调速, 还可获得很低的速度。

3) 操作简单, 调整控制方便, 易于实现自动化。特别是和机、电联合使用, 能方便地实现复杂的自动工作循环。

4) 便于实现“三化”, 即系列化、标准化和通用化。

5) 便于实现过载保护, 使用安全、可靠。

由于液压传动与气压传动工作介质不同, 因此它们还具有不同的优点。例如, 液压传动可输出较大的推力和转矩, 传动平稳; 液压系统能够自润滑, 因此液压元件使用寿命长, 而气动元件在气压传动中需设置给油润滑装置。气压传动的优点是: 工作介质是空气, 取之不尽, 用之不竭, 用后直接排入大气, 干净而不污染环境, 特别是在食品加工、纺织、印刷、精密检测等高净化, 无污染场合, 有很好的发展前途。因空气的粘度很小, 约为油粘度的万分之一, 其损失也很小, 因此气压传动的效率也高于液压传动, 适宜于远距离输送和集中供气。

2. 液压与气压传动系统的缺点

1) 元件制作精度要求高, 系统要求封闭、不泄气、不泄油, 因而加工和装配的难度较大, 使用和维护的要求较高。

2) 实现定比传动困难, 因此不适用于传动比要求严格的场合, 例如螺纹和齿轮加工机床的传动系统。

3) 系统出现故障不易查出原因。平时维护要求高, 洁净度好。

二、液压传动与气压传动的应用和发展

液(气)压传动技术在我国于 20 世纪 50 年代开始应用于某些工业部门, 60 年代中期引进国外的生产技术, 开始建立液压与气动元件厂。70 年代, 液压与气动行业联合进行设计生产, 开始有了系列化的气动产品, 并很快投入批量生产。80 年代起, 瞄准世界发展主流的元件系列型谱, 有计划地引进、消化、吸收, 调整产品结构, 大力开展产品国产化工作, 特别是近几年, 我国的液(气)压传动行业快速组建了一些液压与气动研究机构, 加上生产厂和高等院校, 现已成为一个初具规模并有一定科研开发能力的新兴行业, 我国的液(气)压传动技术已不再是原有概念的传动技术, 无论是产品的质量, 还是产品的创新, 都取得了良好的成绩, 而且发展成为包括传动、控制与检测在内的自动化技术, 并广泛用于机械、电子、轻工、纺织、食品、医药、包装、航空、交通运输等各个部门。随着机械手、组合机床、加工中心、自动检测等的大量使用, 在提高生产效率、自动化程度、产品质量、工作可靠性和复杂工艺, 机床配置方面, 越来越显示出液(气)压传动技术的优越性。

思考题与习题

1. 什么是液压与气压传动? 试述它们的基本工作原理。

2. 液压、气压传动系统由哪几部分组成? 说明各部分的作用与优缺点。

第二章 液压传动基础知识

第一节 液 压 油

一、液压油的性质

1. 粘度

粘度是液压油的重要指标。粘度可分为两大类：一类为绝对指标，可分为动力粘度和运动粘度；另一类为相对指标，可分为恩氏粘度、赛氏粘度和雷氏粘度。

(1) 动力粘度 系指流体在一定切应力下流动时内摩擦因数的大小，用 μ 表示。

(2) 运动粘度 动力粘度 μ 与其密度 ρ 的比值，称为运动粘度，用 ν 表示。即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-1)$$

运动粘度 ν 的单位为 m^2/s 。

(3) 相对粘度 相对粘度又称条件粘度。由于测量仪器和条件不同。各国相对粘度的含义也不同，如美国采用赛氏粘度 (SSU)，英国采用雷氏粘度 (R)，而我国、德国和前苏联则采用恩氏粘度 $^{\circ}\text{E}$ 。恩氏粘度计测定过程是：取 200mL 被测液体装入粘度计的容器内，容器周围充水，电热器通过水使液体均匀升温到温度 t ，液体由容器底部 $\phi 2.8\text{mm}$ 的小孔流尽所需要的时间 t_1 和同体积蒸馏水在 20°C 时流过同一小孔所需时间 t_2 (通常平均值 $t_2 = 51\text{s}$) 的比值，称为被测液体在这一温度 t 时的恩氏粘度 $^{\circ}\text{E}$ 。即

$$^{\circ}\text{E}_t = \frac{t_1}{t_2} \quad (2-2)$$

2. 粘度与压力的关系

液体所受的压力增加时，其分子间的距离将减小，于是内聚力增加，粘度也略随之增大。对于液压油，在中、低压液压系统中，压力变化很小，因对粘度影响较小，可以忽略不计。当压力较高 (大于 50MPa) 时，则应考虑压力对粘度的影响。

3. 粘度与温度的关系

液压油粘度对温度的变化十分敏感，温度升高，粘度下降。这种油的粘度随温度变化的性质称为粘温特性。粘温特性的好坏在粘温图或粘温指数上选择。

4. 液体的可压缩性

液体受压力作用而使其体积发生变化的性质，称为液体的可压缩性。

实际应用中，常用液体的体积弹性模量来说明液体抵抗压缩能力的大小，它表示产生单位体积相对变化量所需的压力增量。

矿物油的体积弹性模量为 $(1.4 \sim 2) \times 10^9 \text{N/m}^2$ ，它的可压缩性约比钢大 $100 \sim 150$ 倍。但对于一般液压系统来说，当其压力不高时，液体的可压缩性很小，因此可以认为液体是不可压缩的。然而，当液体中混入空气时，其可压缩性将显著增加，并将严重影响液压系统的

工作性能，故在液压系统中应使油液中的空气含量减少到最低限度。

二、液压油的分类

我国等效采用国际标准 ISO 6743/4—1982，制订了液压系统用油分类标准 GB/T 7631.2—1987。液压油的分类如表 2-1 所示。

表 2-1 液压油分类

总应用	特殊应用	更具体应用	组成和特性	产品符号	典型应用	备注
液压系统	流体静压系统	液压导轨系统	无抗氧剂的精制矿油	HH		
			精制矿油，并改善其防锈和抗氧性	HL		
			HL 油，并改善其抗磨性	HM	高负荷部件的一般液压系统	
			HL 油，并改善其粘温性	HR		
			HM 油，并改善其粘温性	HV	机械和船用设备	
			无特定难燃性的合成液	HS		特殊性能
			HM 油，并具有粘-滑性	HG	液压和滑动轴承导轨润滑系统合用的机床，在低速下使振动或间断滑动（粘-滑）减为最小	
		需要难燃液的场合	水包油乳化液	HFAE		含水质量分数大于 80 %
			水的化学溶液	HFAS		
			油包水乳化液	HFB		含水质量分数小于 80 %
			含聚合物水溶液	HFC		
			磷酸酯无水合成液	HFDR		选择本产品时应小心，因可能对环境与健康有害
			氯化烃无水合成液	HFDS		
			HFDR 和 HFDS 液混合的无水合成液	HFDT		
			其它成分的无水合成液	HFDU		

三、液压油的选择

粘度是液压油最重要的使用性能指标之一，它的选择合理与否，对液压系统的运动平稳性、工作可靠性与灵敏性、系统效率高低、腐蚀现象、温升变化和磨损等都有显著影响，甚至关系到液压系统能否正常工作，所以选用液压油时，要根据具体情况选择合适粘度的牌号。通常按以下几个方面进行选用：

- (1) 按工作机械的不同要求选用 精密机械与一般机械对粘度的要求不同。为了避免温度升高而引起机件变形，精密机械宜采用较低粘度的液压油。如机床液压伺服机构。
- (2) 按液压泵的类型选用 按液压泵类型选用油液的粘度如表 2-2 所示。

表 2-2 按液压泵类型推荐用油粘度

液压泵类型 \ 条 件		环境温度 (5~40)℃ 时 $\nu \times 10^{-6} \text{ (mm}^2/\text{s) (40}^\circ\text{C)}$	环境温度 (40~80)℃ 时 $\nu \times 10^{-6} \text{ (mm}^2/\text{s) (40}^\circ\text{C)}$
叶片泵	7MPa 以下	30~50	40~75
	7MPa 以上	50~70	55~90
齿轮泵		30~70	65~165
柱塞泵		30~80	65~240

(3) 按液压系统工作压力选用 工作压力越高，宜选用粘度越大的液压油。

(4) 考虑液压系统的环境温度 矿物油的粘度由于受温度的影响变化很大，为保证在工作时有较适宜的粘度，还必须考虑环境温度。当温度高时，宜采用粘度较高的液压油；反之，宜采用粘度较低的液压油。

(5) 考虑液压系统中的运动速度 当液压系统中工作部件的运动速度很高时，液压油的流速也高，发热大，而泄漏相对减少，因此宜用粘度较低的液压油；反之，宜选用粘度较高的液压油。

液压油品种选择可参见表 2-3。

表 2-3 液压油品种选择

液压设备液压系统举例	对液压油的要求	可选择的液压油品种
低压或简单机具的液压系统	抗氧化安定性和抗泡沫性一般，无抗燃要求	HH 无本产品时可选 HL 油
中、低压精密机械等液压系统	要求有较好的抗氧化安定性，无抗燃要求	HL 无本产品时可选用 HM
中、低压和高压液压系统	要求抗氧化安定性、抗泡沫性、防锈性好，抗磨性好	HM 无本产品时可选用 HV、HS 油
环境变化较大和工作条件恶劣的（指野外工程和远洋船舶等）低、中、高压系统	除上述要求外，要求凝点低、粘度指数高、粘温性好	HV、HS
环境温度变化较大和工作条件恶劣的（野外工程和远洋船舶等）低压系统	要求凝点低，粘度指数高	HR 对有银部件的液压系统，北方选用 HR 油，南方用 HM 油或 HL 油
液压和导轨润滑合用的系统	在 HM 油基础上改善粘-滑性（防爬行性好）	HG
煤矿液压支架，静压系统和其他不要求回收废液和不要求有良好润滑的情况，但要求有良好的难燃性，使用温度为 5~50℃	要求抗燃性好，并具有一定的防锈、润滑性和良好的冷却性，价格便宜	HFAE
冶金、煤矿等行业的中压和高压，高温和易燃的液压系统，使用温度为 5~50℃	抗燃性、润滑性和防锈性好	HFB
需要难燃液的低压液压系统和金属加工等机械，使用温度为 5~50℃	不要求低温性、粘温性和润滑性，但抗燃性要好，价格便宜	HFAS
冶金和煤矿等行业的低压和中压液压系统，使用温度为 -20~50℃	低温性、粘温性和对橡胶的适用性好，抗燃性好	HFC
冶金、火力发电、燃气轮机等高温高压下操作的液压系统，使用温度为 -20~100℃	要求抗燃性好，抗氧化安定性和润滑性好	HFDR

第二节 液体静力学基础

液体静力学是研究液体处于相对平衡状态下的力学规律和这些规律的实际应用。这里所说的相对平衡，是指液体内部各个质点之间没有相对位移。

一、液体的静压力及其特性

1. 液体静压力

若在液体的面积 A 上受均匀分布的作用力 F 时，则液体的静压力可表示为

$$p = \frac{F}{A} \quad (2-3)$$

式中 F ——作用力，单位为 N ；

A ——面积，单位为 m^2 。

当液体相对静止时，液体单位面积上所受的垂直力称为压力，通常用 p 表示，在物理学中称为压强，但在液压传动中习惯称为压力。在 SI 制中，压力的单位为 N/m^2 或 Pa 。在液压技术中，常用的单位为 MPa 。

2. 液体静压力的特性

1) 液体的压力沿着法线方向作用于承压面，即静止液体只有法向力，而无剪切力和拉力。

2) 静止液体内任一点处所受到的静压力在各方向上都相等。

二、液体静力学的基本方程

如图 2-1 所示，密度为 ρ 的液体在容器内处于静止状态，作用在液面上的压力为 p_0 ，若计算离液面深度为 h 处某点的压力 p ，可以假想从液面往下切取高度为 h 、底面积为 ΔA 一个小液柱为研究体，如图 2-1b 所示，则

$$\begin{aligned} p\Delta A &= p_0\Delta A + \rho gh\Delta A \\ p &= p_0 + \rho gh \end{aligned} \quad (2-4)$$

式 (2-4) 称为液体静力学基本方程。由上式可知：

1) 静止液体的液面与大气接触时， p_0 为大气压力 p_a ，故式 (2-4) 可改写为 $p = p_a + \rho gh$ 。

2) 液体静压力随液深 h 呈线性规律分布。

3) 离液面深度相同的各点组成了等压面，此等压面为一水平面。

如图 2-1 所示密封容器内取一基准平面 $M-M$ 为相对高度的起始点，则距离 A 点的压力，按式 (2-4) 可写成

$$\begin{aligned} p &= p_0 + \rho g (h_0 - h_A) \\ \frac{p}{\rho} + gh &= \frac{p_0}{\rho} + gh_0 = \text{常数} \end{aligned} \quad (2-5)$$

式中 gh ——单位质量液体的势能，称位置水头；

$\frac{p}{\rho}$ ——单位质量液体的压力能，称为压力水头。

上式的物理意义为：静止液体中任意一点的势能和压力能之和为常数，压力能与势能可

转换。

三、压力的传递

由静压力基本方程知，静止液体中任意一点的压力都包含了液面压力 p_0 ，也就是说，在密闭容器中，由外力作用在液面上的压力能等值地传递到液体内部的所有点。这就是帕斯卡原理，或称静压力传递原理。

在液压传动系统中，一般液压装置都不高，通常由外力产生的压力要比由液体自重产生的压力 ρgh 大得多，若忽略它，便可认为系统中相对静止液体各点压力均相等。

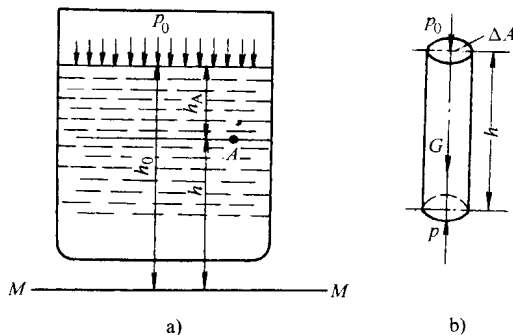


图 2-1 静止液体内的压力分布规律

例 2-1 图 2-2 所示为相互连通的两个液压

缸，已知大缸内径 $D = 100\text{mm}$ ，小缸内径 $d = 20\text{mm}$ ，大活塞上放有一重物 $G = 20000\text{N}$ 的物体。问在小活塞上应加多大的力 F 才能使大活塞顶起该重物？

解 根据帕斯卡原理，由外力产生压力在两缸中相等。即

$$\frac{4F}{\pi d^2} = \frac{4G}{\pi D^2} = p$$

故顶起重物时在小活塞上应加的力为

$$F = \frac{d^2}{D^2} G = \frac{20^2}{100^2} \times 20000\text{N} = 800\text{N}$$

若 $G = 0$ ， $p = 0$ ， G 越大，液压缸中压力也越大，推力也越大。这就说明了液压系统的工作压力取决于外负载。

四、大气压力、相对压力、绝对压力真空度

(1) 大气压力 由大气中空气重力产生的压力称为大气压力，用 p_a 表示，如图 2-3 所示。

(2) 相对压力 以大气压力为基准测得的高出大气压的那一部分压力称为相对压力。通常，压力计所指示的压力是相对压力，液压系统中的压力指的也是相对压力，如图 2-3 所示。

(3) 绝对压力 以绝对真空为基准测得的压力称为绝对压力，如图 2-3 所示。

(4) 真空度 如果作用在液体某处上的绝对压力小于大气压力时，绝对压力与大气压力差值，叫做该点的真空度，如图 2-3 所示。

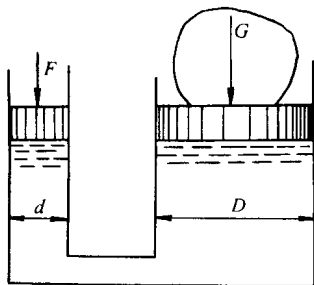


图 2-2 帕斯卡原理应用

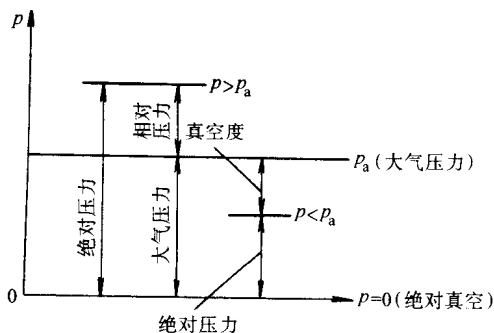


图 2-3 绝对压力、相对压力、真空度

第三节 液体动力学基础

本节主要讨论液体在外力作用下流动时的运动规律，即讨论作用在液体上的力与液体运动之间的关系以及能量关系。

一、基本概念

1. 理想液体和稳定流动

由于实际液体具有粘性和可压缩性，液体在外力作用下流动时有内摩擦力，这样就增加了解决问题的难度。为简化起见，假定液体为无粘性、不可压缩的理想液体。

液体流动时，若液体中任一点处的压力、流速和密度不随时间而变化，则称为稳定流动，反之，若压力、流速或密度中有一个参数随时间而变化，则称为非稳定流动。

2. 流量和平均流速

流量和平均流速是描述液体流动的主要参数。液体在管道中流动时，通常将垂直于液体流动方向的截面称为通流截面或称过流截面。

(1) 流量 单位时间流过某一通流截面的液体体积称为流量，用 q_V 表示， $q_V = \frac{V}{t}$ ，单位为 m^3/s ，工程上也常用 L/min 。

(2) 平均流速 由于液体都具有粘性，液体在管中流动时，管壁不动，速度为零，中间速度为最大，在同一截面上各点的流速是不相同的，分布规律为抛物线，它的计算很不方便，因而引入一个平均流速概念，即假设过通流截面上各点的流速一样。液体在圆管中流过 L 行程，形成液体的体积为 $V = AL$ 。代入流量公式，则得

$$q_V = \frac{VA}{tA} = vA \quad (2-6)$$

在实际工程中，平均流速才具有应用价值。液压缸工作时，活塞运动的速度就等于缸内液体的平均流速。活塞运动速度与液压缸有效面积 A 和流量 q_V 有关。活塞运动速度的大小，由输入液压缸的流量来决定。

3. 层流和紊流

(1) 层流 层流是指液体流动时形成线状或层状的流动。

(2) 紊流 紊流是指液体流动时形成混乱状或散乱状的流动。

两种流动状态的物理现象可以通过一个实验观察。液体流动是层流还是紊流，可利用雷诺数来判别。雷诺实验装置如图 2-4 所示。

实验证明，液体在管中的流动状态不仅与管内液体的平均流速 v 有关，还与管道水力直径 d 及液体的运动粘度 ν 有关，而以上三个因素所

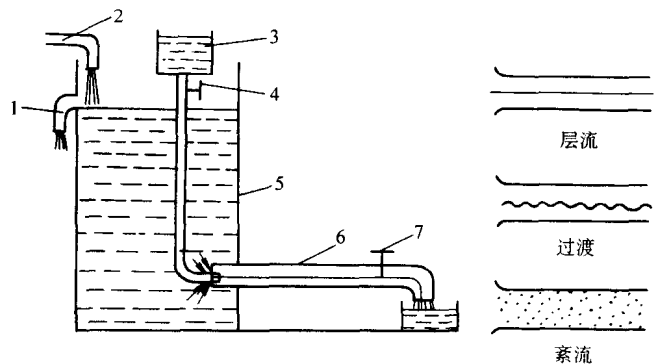


图 2-4 雷诺实验装置

1—溢流管 2—进水管 3—容器
4、7—阀门 5—水箱 6—出水管

组成的一个无量纲数就是雷诺数，用 Re 表示

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (2-7)$$

实验表明：液体从层流变为紊流时的雷诺数大于由紊流变为层流时的雷诺数，前者称为上临界雷诺数，后者称为下临界雷诺数。工程中是以下临界雷诺数 Re_c 作为液流状态判断依据，若 $Re < Re_c$ 液流为层流； $Re \geq Re_c$ 液流为紊流。常见金属圆管临界雷诺数 $Re = 2300$ 。

二、连续性方程

连续性方程是质量守恒定律在流体力学中的一种表达形式。根据物质不灭定律，液体既不可能增多，也不可能减少，所以它在单位时间内流过管道每一截面的液体是相等的。这就是液体的连续性原理。

液体在管道中作稳定流动，两个通流截面面积分别为 A_1 和 A_2 ，此两截面的密度和平均速度为 ρ_1 、 v_1 和 ρ_2 、 v_2 。假定液体不可压缩， $\rho_1 = \rho_2$ ，根据质量守恒定律，在同一时间内流过两个截面的液体质量相等，即 $m_1 = m_2$

$$\begin{aligned} \rho_1 v_1 A_1 &= \rho_2 v_2 A_2 \\ v_1 A_1 &= v_2 A_2 = \text{常数} \end{aligned} \quad (2-8)$$

上式表明液体在管中流动时流过各个通流截面的流量是相等的，因而流速和过流面积成反比，管粗流速低，管细流速快。

三、伯努利方程

1. 理想液体的伯努利方程

当液体在图 2-5 所示的管道中流动时，取两通流截面 A_1 、 A_2 ，其离基准线的距离分别为 h_1 、 h_2 ，流速分别为 v_1 、 v_2 ，压力分别为 p_1 、 p_2 ，根据能量守恒定律，则有

$$\frac{p_1}{\rho} + gh_1 + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + gh_2 + \frac{v_2^2}{2} \quad (2-9)$$

上式称为理想液体的伯努利方程，其物理意义是：在密闭管道内，作稳定流动的液体具有三种形式的能量（压力能、势能、动能），在沿管道流动过程中，三种能量之间可互相转化，但在任一截面处，三种能量的总和为常数。

2. 实际液体伯努利方程

实际液体在管道中流动时，由于液体有粘性，产生内摩擦力；而且管道形状和尺寸的变化，使液体产生扰动，从而造成能量损失。另外，由于在管道通流截面上各点的实际流速不同，用平均流速 v 来代替实际流速计算动能

时，会产生偏差，因此，必须引入动能修正系数 α 来补偿偏差。这样，实际液体的伯努利方程为

$$\frac{p_1}{\rho} + gh_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + gh_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2} + gh_w \quad (2-10)$$

式中 gh_w ——单位质量液体的能量损失；

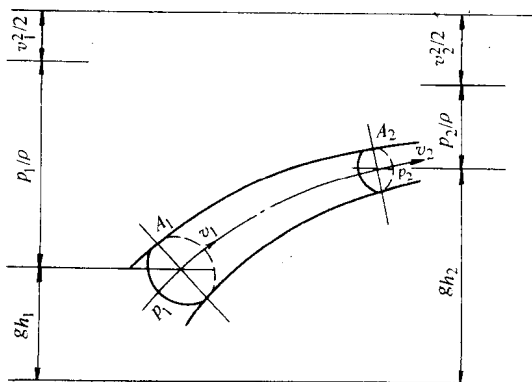


图 2-5 伯努利方程图

α_1 、 α_2 ——动能修正系数，一般在紊流时取 1，层流时取 2。

例 2-2 如图2-6所示，液压泵的流量 $q = 32\text{L/min}$ ，进油管口径 $d = 20\text{mm}$ ，液压泵进油口距离液面高度 $h = 500\text{mm}$ ，液压油的运动粘度 $\nu = 20 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ ，密度 $\rho = 0.9\text{g/cm}^3$ ，不计压力损失，求液压泵进油口的真空度。

解 进油管的油流速度

$$v = \frac{q}{A} = \frac{q}{\frac{\pi}{4}d^2} = \frac{32 \times 10^3}{\frac{\pi}{4} \times 2^2 \times 60} \text{cm/s} = 170 \text{cm/s}$$

油液运动粘度 $\nu = 20 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s} = 0.2\text{cm}^2/\text{s}$

油液在进油管中的流动状态

$$Re = \frac{dv}{\nu} = \frac{2 \times 170}{0.2} = 1700$$

$Re < Re_c = 2300$ ，说明油液在进油管中的运动为层流运动状态，因此可用伯努利方程求出液压泵进油口的真空度。

$\alpha_1 = \alpha_2 = 2$ ，选取油箱液面为 I-I 截面，泵的进油口为 II-II 截面，以 I-I 截面为基准面，因此 $h_1 = 0$ （基准面）， $h_2 = h$ ， $v_1 = 0$ （因为截面大，流速不明显）， $p_1 = p_a$ （液面受大气压力作用）。不考虑摩擦损失，则 $gh_w = 0$ 。列伯努利方程

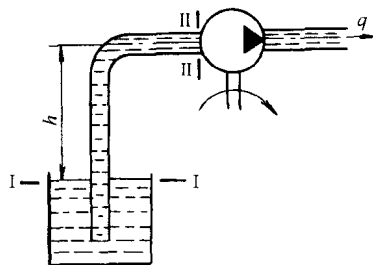


图 2-6 液压泵的真空度

$$\frac{p_1}{\rho} + gh_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + gh_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2} + gh_w$$

泵进油口（II-II 截面）的真空度为

$$p_a - p_2 = \rho gh + 2 \frac{\rho v_2^2}{2} = 0.9 \times 980 \times 50 + 0.9 \times 170^2 \text{Pa} = 7\text{kPa}$$

四、管路内压力损失计算

实际液体具有粘性，以及液体在流动时会产生撞击和出现旋涡等，因而液体流动时会有阻力。为了克服阻力，就造成一部分能量损失。在液压管路中能量损失表现为液体压力损失。

液体压力损失可分为两种，一种是沿程压力损失，一种是局部压力损失。

1. 沿程压力损失

液体在等径直管中流动时，因内外摩擦而产生的压力损失，称为沿程压力损失。它主要决定于液体的流速、粘性和管路的长度及油管的内径等。经理论推导，液体流经 d 的直管时在管长 l 段上的压力损失计算公式为

$$\Delta p_\lambda = \lambda \frac{l \rho v^2}{d} \quad (2-11)$$

式中 v ——液流的平均流速；

ρ ——液体的密度；

λ ——沿程阻力系数。它可适用于层流和紊流，只是 λ 选取的数值不同。对于圆管层流，理论值 $\lambda = 64/Re$ 。

2. 局部压力损失