

著名资深液压专家

学习实践液压技术四十余年的感悟凝炼

张海平◎编著

白话液压

HYDRAULICS
FOR EVERYONE

剖析现象，深入浅出，梳理因果，揭示本质
介绍渊源和未来，帮助读者全面了解液压技术
拒绝晦涩，开启轻松学习液压的妙趣之旅
彩色印刷，图文清晰，关键词醒目，便于快速理解



彩色印刷
4 - color printing

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



白话液压

HYDRAULICS
FOR EVERYONE

张海平◎编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书以中学物理知识为基础,深入浅出地介绍了液压技术的概况、原理及发展前景。

附赠资源中包括介绍液压广泛应用的幻灯片文件“液压应用.ppsx”和作者已发表的部分文章。

本书的特点是,通俗易懂,图文并茂,剖析现象,揭示本质,梳理因果,是液压零基础读者的不二选择。

本书可作为大专院校机械类在校学生学习流体动力控制课程的入门读物,也可作为机械类企业的工程技术人员和高级技工自学液压的入门书,或作为液压基础培训教材,为进一步深入学习研究液压打下基础,同时可用作各类高等院校和成人教育学院机电类专业的教学参考书。

本书也可以帮助非机械类专业人士,如初涉液压的金融投资人员、决策人员、行业和企业领导了解液压技术。

图书在版编目(CIP)数据

白话液压 / 张海平编著. —北京: 机械工业出版社, 2018.7
ISBN 978-7-111-60421-1

I. ①白… II. ①张… III. ①液压技术—基本知识
IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 154722 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张秀恩 责任编辑: 张秀恩

责任校对: 陈越 封面设计: 鞠杨

责任印制: 李昂

北京瑞禾彩色印刷有限公司印刷

2018 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·12.75 印张·245 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-60421-1

定价: 79.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com



前言

PREFACE

本书旨在帮助读者对液压有一个全面的了解。因此，作者写作本书的宗旨是：

- 通俗易懂，便于自学；
- 剖析现象，揭示本质，梳理因果；
- 由历史到现状，介绍发展趋势；
- 实事求是，辨识真伪。

本书是为以下一些朋友而写的。

——即将学习液压的大学生们：

你们即将学习液压，但液压为何物，心中没底，请你打开本书，这里没有教材中晦涩难懂的语言，也没有复杂的计算公式，但通过本书的学习，你能掌握液压的全貌、原理，了解到教材中没有的当今世界液压新技术，分享作者 30 多年的领悟。

——初涉液压的金融投资机构的分析师、决策者：

你们学经济金融出身，可能从未接触过液压产品，对液压尚一无所知，但却需要在短时间内做出决策，是否投资某项液压技术和产品。凭着你们极强的理解能力，花几小时浏览本书，你们就可以了解液压技术的概况、市场发展趋势和前景，抓住液压技术的脉络，从大局认识液压技术的价值。

——液压企业的二代企业家：

你们从父母手中接过了液压企业，为了推进我国液压产业的发展，你们有责任继续引领企业发展。虽然某些技术细节问题可以交给员工处理，你们一时还不需关注，但液压技术的总体概况你们需要把握，以便支持创新。本书可以为你们以后深入了解某项目或产品细节提供技术地图和指南。

——液压企业的管理人员、财务、采购人员：

也许你们有很多的时间与液压产品亲密接触，却不太清楚这些产品是怎么工作的，价值何在。这是因为，在液压系统工作时，液压油在管道和元件内部流动，



看不见，摸不到，所以，会感到液压控制很抽象，不好懂。本书可以帮助你们透过液压元件的外壳，了解液压元件系统是怎么工作的，从而可以更理性地了解本企业的产品，企业发展前景，了解一线的同事们在为何而流汗，与他们有共同语言，不说外行话，知道怎么更好地配合他们。

——液压企业的工艺人员、制造员工等：

你们也许没有读过大学，没有听过有关液压的课程。不要紧，液压并不难懂。要读懂本书，只要有中学物理基础就够了，没有学过微积分也可以。在你们所从事的工作方面你们是行家里手，毋庸置疑，但读了本书，你们可以更了解液压技术的原理和概况，更懂得你们目前工作的价值和意义，不仅知其然，而且知其所以然，从而做得更好。有些难点，在初读时，可以先跳过。读着读着，你就懂了；想着想着，你就通了。

——来到液压企业或主机企业，一头雾水的大学机械类毕业生们：

你们在学校也学过液压课程，知道一些液压的理论，但由于种种原因，见木不见林，还未抓住液压技术的概况和关键、现状与趋势，来到液压企业，不知该怎么发力。这是很常见的，因为你们学校里用的液压课本大多是很基础的，面很窄，重点放在以学科为中心的学科知识体系，以理论思维训练为中心，注重公式推导，却不重视物理量之间的因果关系。课堂讨论的都是理想状况，一些最关键的本质因果关系都未曾揭示。遑论有些所谓教材，东拼西凑，南抄北袭，未经自己的思索，也未到实践中去检验，导致不恰当的，甚至是错误的提法，广泛流传，给读者带来困惑和误导。有些课本内容极其陈旧，与世界液压技术当前发展状况相去甚远，很多 20 世纪 80 年代就已出现，现在已十分成熟普遍应用的技术都未介绍。

而目前有许多应用于培养技能型人才的高职液压教材，只是本科教材内容的缩减而已，晦涩难读，并不适宜自学。

说实在的，作为液压工程师，能用微分方程描述液压元件系统，固然好。但是，面对实际应用、设备故障，在绝大多数情况下，都是先定性再定量。很多场合，光定性就能解决问题了。需要的是清醒而周密的逻辑判断能力，要使用微分方程才能解决问题的场合是少而又少的。

液压技术面对的全都是非理想状况，有大量的不确定性。驾驭这些非理想不确定，才是液压工程师的真本事。



虽然液压产业在整个国民经济中是一个小行业，但现代液压技术经过近百年的发展，现在已是极其丰富，相当成熟了。其中几乎每一项技术都有几十甚至几百个专业技术人员花了几年甚至几十年时间研究过，有很多很多的技术细节、特殊情况的特殊处理，有着极深的学问，这些相对个人的学习能力而言，是博大精深，穷毕生精力都学不完的。所以，真不能误解液压技术如本书叙述的那么简单，还是需要一些耐心学习的。不花时间，掌握不了其精髓。

本书不能帮助你们登上液压技术的巅峰，但可以帮助你们了解概况，尽快到达山脚，看清攀登的途径。祝你们成功！

千里之行，始于跬步。借朋友的一首诗，献给热爱液压的朋友们。

走着走着
天就蓝了 海就阔了

走着走着
花就开了 草就绿了

走着走着
坡就缓了 路就直了

走着走着
你就来了 心就醉了

目前，在液压技术领域内，有一些捕风捉影，混淆概念，传播不实的说法。希望本书能帮助读者鉴别真伪。

本书的目的在于帮助读者尽可能轻松地了解当前液压技术的概况。而世间诸事往往都有例外，液压技术亦然。若要面面俱到，则必定烦琐不已。为了简明通俗，突现本质，本书简化了某些叙述，略去了一些细节、不常见的工况和尚在研究探索试验中的设想，因此，必定是不全面，不十分精准的。但可以肯定地说，是八九不离十的。

由于国内的液压技术术语大多是舶来货，多人各自翻译，很不统一，而且在不同行业还常常不同，本书不可能一一列举。还请读者根据情况，在需要时，参考其他书籍。

为缩减篇幅，本书使用了下列简称：

IFAS——Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen, RWTH Aachen 德国亚琛工业大学流体技术传动与控制研究所，自 2018 年 4 月起，改称流体技术传动与系统研究所；

伊顿——美 Eaton-Vickers 公司；

派克——美 Parker Hannifin 公司；

布赫——德 Bucher Hydraulik 公司；

哈威——德 HAWE Hydraulik SE 公司；

利勃海尔——德 Liebherr 公司；

升旭——美 Sun Hydraulics 公司；

力士乐——德 Bosch-Rexroth AG 公司；

海德福斯——美 HydraForce 有限公司；

泰丰——山东泰丰智能控制股份有限公司。

本书的附赠资源放在百度网盘中，读者可登录下列网址下载。密码：w5gx。

<https://pan.baidu.com/s/1pnnPMXuJjiklozU3Na2KYA>

其中有幻灯片文件“液压应用.ppsx”，收集了液压技术的多方面应用，以及作者一些已公开发表的文章，以便读者查阅。

本书尽管反复检查，但难免还有错误。作者衷心欢迎读者提出意见和建议，作者电子信箱：hpzhang856@sina.cn。读者还可通过作者的博客：blog.sina.com.cn/lwczf，查阅不断更新的勘误表。

感谢本书所引用的参考文献的所有作者。由于本书写作时间较长，有些引用文献可能遗漏标注，恳请有关作者谅解。

本书写作期间得到了以下公司的支持，谨此致以衷心感谢。

青州锦荣液压科技有限公司、烟台未来自动装备有限责任公司、宁波克泰液压有限公司、英国维泰科（WEBTEC）产品有限公司。

张海平



目录

CONTENTS

前 言	
第 1 章 概述	1
1.1 什么是液压	1
1.2 衡量液压技术的最基本的物理量	4
1.3 液压技术的历史与当今应用	8
1.4 为什么液压技术会被广泛应用	10
1.5 对液压元件的要求	12
1.6 液压产业概况	14
1.7 液压元件的图形符号	17
第 2 章 负载力	18
2.1 不同特性的负载力	18
2.2 负载力的综合作用	24
2.3 对控制负载运动的要求	26
第 3 章 液压油及其他压力介质	28
3.1 作为传递动力的媒介	28
3.2 液压油的其他作用与特性	31
3.3 难燃液	34
3.4 环保液	35
3.5 清水	36
第 4 章 液压缸	37
4.1 典型结构和功能	38
4.2 类型和特点	40
4.3 一些关键技术问题	42
第 5 章 液压阀	48
5.1 液压阀的分类与命名	49
5.2 单向阀与梭阀	51
5.3 压力阀	52
5.4 流量阀	57



5.5	换向阀	59
5.6	换向节流阀	64
5.7	电调制阀	64
5.8	平衡阀	67
5.9	阀的连接安装形式	68
第6章	液压泵与马达	74
6.1	衡量液压泵的基本参数	74
6.2	齿轮泵	77
6.3	叶片泵	79
6.4	柱塞泵	80
6.5	驱动泵用的原动机	83
6.6	泵的变量特性	87
6.7	马达	90
6.8	流量脉动与噪声	93
6.9	选用	94
第7章	密封件	95
7.1	作用原理与种类	95
7.2	要求与应对措施	96
7.3	应用中损坏的原因	100
第8章	液压辅件	102
8.1	管道	102
8.2	油液污染	104
8.3	过滤器	107
8.4	油箱	111
8.5	蓄能器	114
第9章	液压回路	118
9.1	差动回路	118
9.2	节流回路	119
9.3	闭式容积控制回路	124
9.4	多泵回路	126
9.5	多缸回路	129
9.6	闭环控制回路	130
9.7	能量回收与利用	131
第10章	液压驱动+电控	134
10.1	为什么液驱要电控	134



10.2	电控系统简介	135
10.3	液驱电控的三级水平	140
10.4	状况监测和综合效益	141
第 11 章	液压测试	144
11.1	测试是液压的灵魂	144
11.2	液压测试的种类	145
11.3	液压测试的仪器	146
11.4	液压测试的准备	149
11.5	努力读懂测试曲线	150
第 12 章	液压系统的安装、调试、维护与故障排除	154
12.1	安装	154
12.2	调试	156
12.3	维护	159
12.4	故障诊断与排除	161
12.5	再制造	164
第 13 章	设计与仿真	166
13.1	关于液压元件设计	167
13.2	关于液压系统设计	170
13.3	关于液压仿真	174
第 14 章	液压的增长热点、研发热点与发展前景	180
14.1	液压产业当前增长热点	180
14.2	液压技术当前研发热点	182
14.3	液压技术会被取代吗?	187
附录	192
参考文献	194



第1章 概述

CHAPTER 1

1.1 什么是液压

用一根棍子，克服阻力，可以推动一个物体（见图 1-1）。物体移动的速度取决于棍子移动的速度，因为棍子是固体。

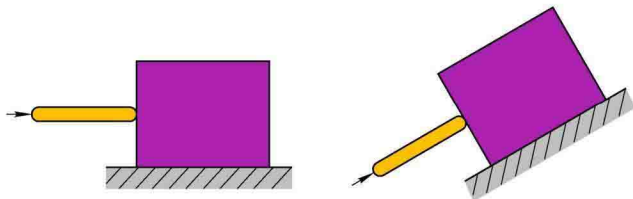


图 1-1 用棍子推动物体示意

如果用水流冲击物体，也可能推动一个物体（见图 1-2）。水量越大，水流速度越高，则推动力越大。物体移动的速度不同于水流的速度，因为水是液体，没有固定的形状。

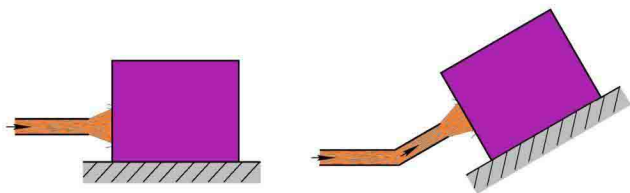


图 1-2 用水流推动物体示意

水流敞开的話，会有很大的损失。如果把水流收集在容器里，水就不会损失，能效也会高一些。

因为这种技术主要是靠液体的**速度**和**质量**，也就是**动能**，来发挥作用的，所以，被称为**动压传动**，或**液力传动**。由于其灵活，也有一定的应用，如**液力耦合器**、**液力变矩器**等，但产品种类较少，不属于本书介绍的主题。

如果把水封闭起来去**挤压**棍子，也可以推动物体（见图 1-3）。

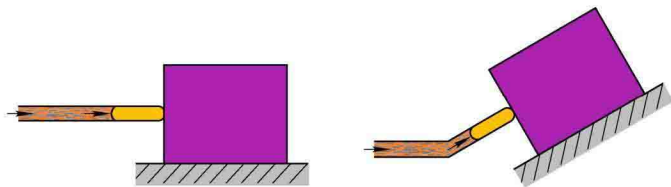


图 1-3 用液压推动物体示意

物体移动的距离取决于水量：送进去多少水，物体就移动多少。

物体移动的速度取决于单位时间送进去的水量：单位时间送进去的水越多，物体移动得越快。当然，使用其他液体代替水，可以有类似的效果。

这种让**液体以压**的方式，使物体克服**阻力**运动，也就是传递**动力（力和速度）**的技术，就是**液压传动**，也被简称为**液压**。

因为相比较上述的**动压**传动而言，这里的液体流动速度可以慢得多，所以，也被称为**静压**传动、**静液压**传动。

因为水的形状可改变，所以，作用的方向和距离就较仅仅用棍子去推灵活得多。

以**气体**为工作介质，以压的方式，传递动力，被称为**气压**传动或**气动**。

以液体和气体为工作介质的技术被合称为**流体技术**。

1. 液压系统的实例

图 1-4 所示为一简单的液压系统，采用的液体是液压油（图中橘红色）。

图 1-4 中，液压泵 3 的工作原理类似于打气筒。在利用手柄 1 压下柱塞 2 时，由于吸油单向阀 9 封住了吸油管 10，液压泵 3 中的液压油只能经过排油管 4 和排油单向阀 5，进入液压缸 6，推动活塞 7 上升，压缩工件 8。

在手柄 1 带动柱塞 2 上升时，液压泵 3 中出现真空，油箱 13 中的液压油在大气压力的推动下，经过吸油管 10，推开吸油单向阀 9，进入液压泵 3。由于排油单向阀 5 封住了排油管 4，液压缸 6 中的液压油不会返回，所以，活塞 7 不会下降。

反复提压手柄 1，就可推动活塞 7 不断

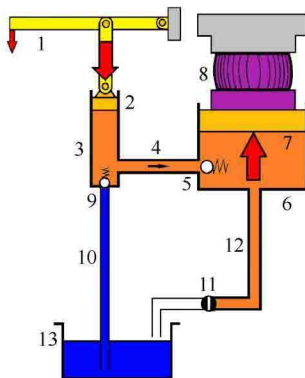


图 1-4 液压系统示例

- 1—手柄 2—柱塞 3—液压泵 4—排油管
- 5—排油单向阀 6—液压缸 7—活塞
- 8—工件 9—吸油单向阀 10—吸油管
- 11—卸荷开关阀 12—回油管 13—油箱



上升。

只有开启卸荷开关阀 11，液压缸 6 中的液压油才会经过回油管 12 流回油箱 13，活塞 7 才会下降。

一般称为“千斤顶”的小型起重设备就是这样工作的。

上述系统可以工作，但是如果需要经常驱动，依靠手动，毕竟太累了。所以，实际应用的**液压泵**都是由电动机或发动机带动，输出液压油的。如图 1-5 所示，液压阀 4 用于控制液压油的流动方向，从而改变液压缸的运动方向。

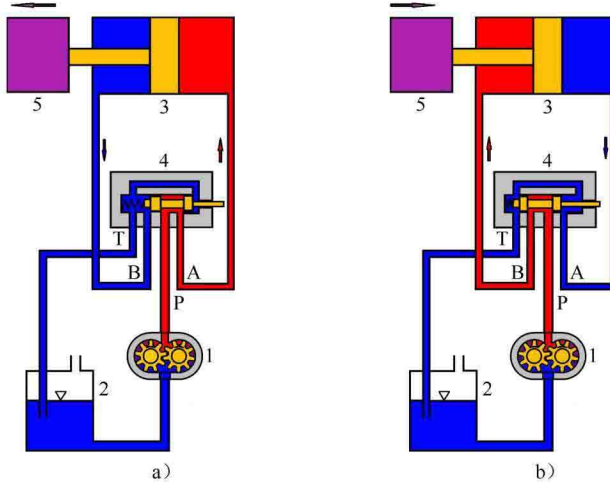


图 1-5 液压系统示例

a) 推动负载向左 b) 推动负载向右

1—液压泵 2—油箱 3—液压缸 4—液压阀 5—负载

2. 液压系统的组成

实际应用的液压系统大体由**液压泵**、**液压阀**、**液压执行器**和**辅件**等组成（见图 1-6）。

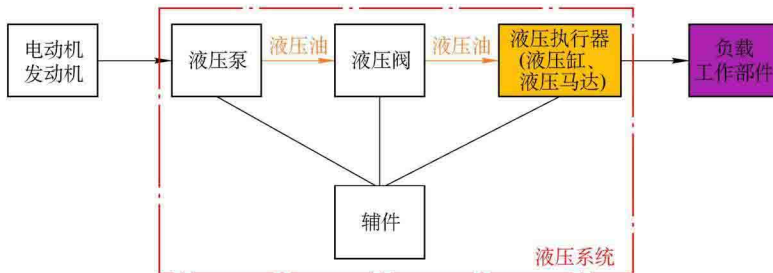


图 1-6 液压系统的组成

- 1) **液压泵**在电动机或发动机的驱动下，排出液压油。
- 2) **液压执行器**，与工作部件相连，在液压油的推动下，驱动工作部件。

驱动，通常指的是，使工作部件**运动**。液压执行器还有一个任务：使工作部件从动到不动，即**制动**。本书中把驱动和制动统称为**控制**，把需要由液压执行器来控制其运动的工作部件统称为**负载**。

控制负载运动，是液压技术赖以生存的基本任务。

要控制负载运动，就要克服各种影响运动的**阻力**。所以，本书把由**液压执行器**来克服的各种阻力，统称为**负载力**。

液压执行器分为液压**缸**和液压**马达**。

大体来说，液压**缸**控制负载**直线**运动，克服的是**负载力**；液压**马达**控制负载**转动**或**摆动**，克服的是负载**转矩**。为简洁起见，以下一般用液压缸泛指液压执行器，一般仅提负载力，省略负载转矩。

根据国家标准，马达指“**提供旋转运动的执行元件**”，含液压马达和气动马达。因为本书不涉及气动，所以，以下简称液压马达为“**马达**”。

3) 液压阀用来限制液压油的流动，从而控制液压执行器的运动。

4) 辅件包括连接管道、油箱、过滤器、加热器、冷却器、指示仪表等。

因为**液体**没有固定的形状，所以，液压执行器、液压阀和液压辅件可以安排在任何需要的地方，只要液压管道可以通得到，没有方向和距离的限制。因此，就非常灵活。

1.2 衡量液压技术的最基本的物理量

衡量人的身体状况有很多指标，其中最基本的是身高、体重。与之相似，衡量液压元件和系统的性能状况也有两个最基本的物理量：**压力**、**流量**。

1. 压力

液压技术中，液体的**压力**，指的是作用在**单位面积上的力**，在中学物理中被称为**压强**，通常以 P 表示。

液体的**压力**，实际上是液体中分子团无规则运动撞击力的宏观表现。

(1) 单位

压力的单位，直到 20 世纪六七十年代，一直使用公斤力/厘米² (kgf/cm²)，俗称**公斤**。因为很容易理解记忆：1 公斤力作用在 1 厘米² 的面积上产生的压力就是 1 公斤，所以至今还有人在用。

力的单位用牛顿 (N) 后，用巴 (bar) 作为压力的单位，1bar=10N/cm² (≈1.02kgf/cm²)，在欧美普遍使用至今。

中国国家标准，按国际单位制，要求使用帕 (Pa)，1Pa=1N/m²=0.0001N/cm²=0.00001bar。对液压技术来说，Pa 太小，所以，除个别场合使用千帕 (kPa) 外，一般都使用兆帕 (MPa)，即 10⁶Pa。1MPa=10bar。



(2) 基准

以**绝对真空**为基准的,称为**绝对压力**(见图 1-7)。大气的绝对压力在 0.1MPa 上下波动:台风是低压;冷空气来了,大气压力升高。

因为几乎所有液压设备都工作在有大气压力的场所,其工况的绝对压力随大气压力而变,所以,液压技术中一般都以大气压力作为基准,称为**相对压力**。低于大气压力的压力就为负压力,也称**真空度**。绝对真空就为负压力,约 -0.1MPa,或真空度约 100kPa。

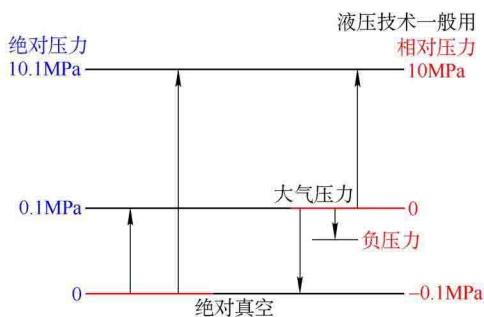


图 1-7 绝对压力与相对压力

(3) 重力引起的压力

液柱的重力引起的压力 p 由液柱的高度 h 和液体的密度 ρ 决定,与容器形状无关(见图 1-8)。

$$p = h\rho g$$

式中 g ——重力加速度。

因为水的密度为 $1\text{g}/\text{cm}^3$,重力加速度 g 约为 $9.8\text{m}/\text{s}^2$,所以,在高为 10m 的水柱底部,水柱重力引起的**压力**为 $10\text{m} \times 1\text{g}/\text{cm}^3 \times 9.8\text{m}/\text{s}^2 = 9.8\text{N}/\text{cm}^2 \approx 1\text{bar} = 0.1\text{MPa}$ 。

当代液压技术,一般称 7MPa 以下为低压,10~21MPa 为中压,31MPa 以上为高压(各行业有所不同,无严格的规定)。所以,低压大致相当于水深 700m 以内的压力,中压则为水深 1000~2100m 的压力,高压则为水深 3100m 以上的压力。

因为常用液压油的密度比水小,所以,相同高度的油柱引起的压力低于水柱。

(4) 外力引起的压力

静止的液体具有这样的特性:

作用于液体任一部分的**压力**,必然按原来的大小,由液体向**四面八方**传递,即如图 1-9 所示:外力 W 在液体中引起的压力 $p=W/A$,容器中各部分液体就都有压力 p 。此原理由法国人帕斯卡在 1648 年归纳,所以,也称**帕斯卡原理**。

此液体对容器壁的**作用力**,就

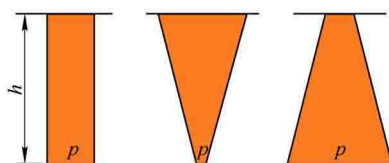


图 1-8 重力引起的压力仅依赖于液柱高度

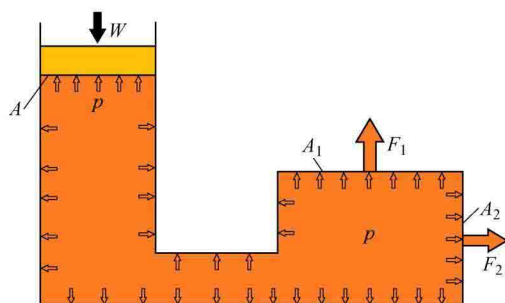


图 1-9 压力的传递

是压力与作用面积之乘积： $F_1=pA_1$ ， $F_2=pA_2$ 。

以上是为了便于理解而理想化了的，与**现实**有差距。因为，精确地说，在地球上，容器下部的压力，由于液体重量的影响，总会高于上部。但因为水或油 1m 高度差带来的压力差小于 0.01MPa，与现代液压技术常用的压力相比，小得多，因此，在多数应用场合，高度差引起的压力差就常忽略不计了。

(5) 液压杠杆

生活经验，使用杠杆，可以用较小的力撬动较重的负载（见图 1-10a）。

根据液体的前述特性，也可以组成所谓的**液压杠杆**。图 1-10b 中，负载力 F_1 在液压缸中产生的压力 $p_1=F_1/A_1$ 。如果液压泵的作用面积 $A_2 < A_1$ ，则较小的作用力 $W=p_2A_2$ 就可以克服较大的负载力 F_1 ，推动负载上升。

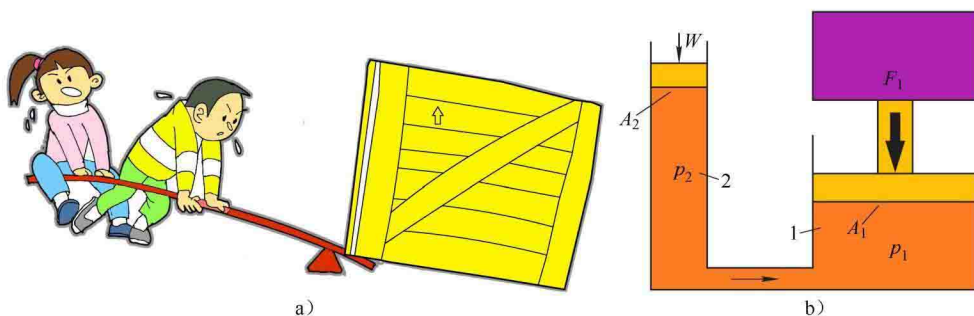


图 1-10 杠杆

a) 普通杠杆 b) 液压杠杆
1—液压缸 2—液压泵

注意：要使负载上升，就要让液体从液压泵流向液压缸，帕斯卡原理有效的前提条件——**静止**液体，在实际液压系统中是不能满足的。液体的压力会由于流动时的摩擦力造成的损失而下降，所以，实际需要的 p_2 必须高于 p_1 。

液压系统的工作压力越高，元件、管道受到的作用力就越大，就越需要元件、管道结实耐压。

所有液压元件、管道都有其耐压极限，只是高低不同而已。就好像，一般气球可以吹爆，自行车内胎虽然吹不爆，但用打气筒就能打爆。

液压元件可**持续承受**的压力，一般称**额定压力**。

2. 流量

(1) 体积流量

单位时间内流过一个截面 A 的液体**体积** V （见图 1-11），称为**体积流量**，在液压技术中，常简称**流量**，以 q 表示。类似还有**质量流量**，但极少用。

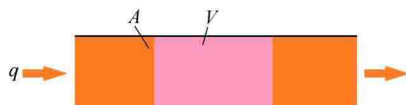


图 1-11 体积流量



流量的单位常用 L/min (升/分)。如图 1-12 所示, 如果通过管道的流量 q 是 100L/min, 那么, 充满一个容积 $V=1000\text{L}$ 的空箱, 需要的时间 $t=V/q$, 为 10min (分钟)。如果流量 $q=200\text{L}/\text{min}$, 那么 5min 就够了。

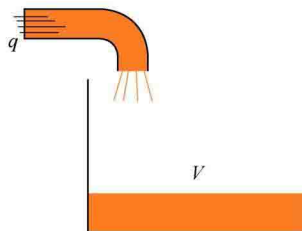


图 1-12 流量的单位

(2) 流速

液体在管道内流动的速度不是处处相同的。但是, 可以从流量算出一个**平均流速** (见图 1-13)。

$$v = \frac{\text{流量 } q}{\text{截面积 } A}$$

因为

$$\text{流量 } q = \frac{\text{体积 } V}{\text{时间 } t}$$

体积 $V = \text{截面积 } A \times \text{距离 } L$

所以, 也可以说

$$\text{平均流速 } v = \frac{\text{距离 } L}{\text{时间 } t}$$

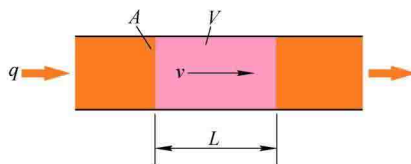


图 1-13 液体的流速

(3) 流道截面变化时的流速

“两岸猿声啼不住, 轻舟已过万重山”说的是当年三峡的水流湍急。这是因为河道被两岸绝壁所限, 通流面积狭窄, 江水只得快马加鞭, 增高流速。在液压管道中 (见图 1-14) 也相似。

因为, 如果液体的量在流动过程中, 既不增加, 也不减少, 各处的流量始终是相同的。那就意味着, 不管流道的截面积如何变化, 都有

$$\begin{aligned} q &= v_1 A_1 \\ &= v_2 A_2 \end{aligned}$$

所以

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1}$$

也就是, 流速与截面积成反比: 流道越细, 流速越高。

(4) 流动与压力损失

液体流动, 必定会有压力损失, 这来自两方面的**摩擦**:

——液体与流道壁面的摩擦;

——液体内部相互间的摩擦。

因此, 流道壁面越粗糙, 形状越多变, 流速越高, 压力损失就越大。

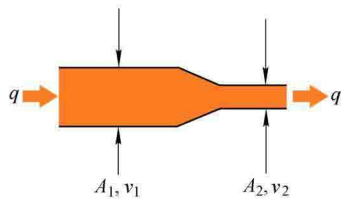


图 1-14 封闭流道中液体的流速