

李鄂民 编著

实用液压技术 一本通

SHIYONG YEYA JISHU YIBENTONG



化学工业出版社

李鄂民 编著

实用液压技术 一本通

SHIYONG YEYA JISHU YIBENTONG



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

实用液压技术一本通/李鄂民编著. —北京: 化学工业出版社, 2009.8

ISBN 978-7-122-06040-2

I. 实… II. 李… III. 液压技术-基本知识
IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 102242 号

责任编辑: 黄 滢

装帧设计: 王晓宇

责任校对: 吴 静

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 14 字数 277 千字 2009 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

FORWORD

前言

随着世界工业的快速发展,液压传动与控制已经成为服务于各行各业技术装备的集传动、控制和检测于一体的综合自动化技术。特别是随着新材料、新工艺和加工手段的日臻完善,液压元件的性能、可靠性以及使用寿命得到了显著提高,促使液压传动与控制技术的应用更加宽泛和普及。学习和掌握液压传动与控制技术已是当今机械、机电类工程技术人员的必需,本书正是应这种迫切要求而编写的实用型专业技术用书。

全书内容共九章,主要包括液压传动的流体力学基础知识,液压元件的工作原理和结构特点,液压基本回路的组成和典型系统分析,液压系统设计简介和安装、调试、维护保养要点,并对液压系统常见故障的分析与排除方法作了适当的介绍。

笔者长期从事流体传动与控制专业的教学工作,为企业做过液压技术讲座和液压技术工业培训,主持和参与多项科研与工程项目,为编写这本实用型技术用书积累了较丰富的经验和专业素材。

本书在内容取舍上贯彻少而精、理论联系实际的基本原则。为体现实用的特点,流体力学基础知识部分以必需、够用为度,液压元件、基本回路和典型液压系统专业知识部分加强针对性和实用性,注重理论与实践的紧密结合,并在一定程度上反映了国内外液压传动与控制领域比较成熟的新技术和新成果。为方便广大读者朋友阅读和理解,本书在介绍液压元件工作原理时均配以简明易懂的结构原理图,对典型结构示例还配以常用新型的实际结构图。此外,全书所涉及的液压图形符号均采用最新的国家标准绘制。

本书主要作为机械、机电类工程技术人员学习和掌握液压技术的专业用书;可作为企业工程技术人员和高级技工的技术培训教材;也可作为高等工科院校、高等职业技术学院、高等专科学校、成人教育学院、夜大学、函授大学的机械、机电类专业的教学参考用书。

全书由兰州理工大学李鄂民编著。

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳切希望同仁和广大读者批评指正。

编著者

CONTENTS

目录

第1章 绪论

1.1 液压传动的工作原理	1
1.2 液压传动系统的组成及类型	3
1.3 液压传动的优缺点	4
1.4 液压技术的发展及应用	5
思考、巩固与提高	6

第2章 液压传动基础知识

2.1 液体的性质	7
2.1.1 液体的密度	7
2.1.2 液体的可压缩性	7
2.1.3 液体的黏性	8
2.1.4 液压油(液)的选用	10
2.2 液体静力学基础	12
2.2.1 液体的静压力及其性质	12
2.2.2 液体静力学的基本方程	13
2.2.3 压力的传递	14
2.2.4 绝对压力、相对压力、真空度	15
2.2.5 液体作用在固体壁面上的力	15
2.3 液体动力学基础	16
2.3.1 基本概念	16
2.3.2 连续性方程	18
2.3.3 能量方程	18
2.3.4 动量方程	22
2.4 管道内的压力损失	23
2.4.1 层流、紊流和雷诺数	23

2.4.2	沿程压力损失	25
2.4.3	局部压力损失	26
2.4.4	管道系统中的总压力损失	27
2.5	液体流经小孔和间隙的流量	27
2.5.1	液体流经小孔的流量	27
2.5.2	液体流经间隙的流量	29
2.6	气穴现象和液压冲击	32
2.6.1	气穴现象	32
2.6.2	液压冲击	33
	思考、巩固与提高	33

第3章 液压动力元件

3.1	液压泵概述	35
3.1.1	液压泵的工作原理和类型	35
3.1.2	液压泵的基本性能参数	36
3.2	齿轮泵	38
3.2.1	外啮合齿轮泵	38
3.2.2	内啮合齿轮泵	41
3.3	叶片泵	42
3.3.1	单作用叶片泵	42
3.3.2	双作用叶片泵	44
3.3.3	变量叶片泵	46
3.4	柱塞泵	48
3.4.1	斜盘式轴向柱塞泵	48
3.4.2	斜轴式轴向柱塞泵	51
3.4.3	径向柱塞泵	54
3.5	液压泵的选择和使用	56
3.5.1	液压泵的工作特点	56
3.5.2	液压泵的主要性能和选用	56
3.5.3	液压泵常见故障的分析和排除方法	57
	思考、巩固与提高	58

第4章 液压执行元件

4.1	液压马达概述	60
4.1.1	液压马达的特点与分类	60
4.1.2	液压马达的主要性能参数	61
4.2	高速马达	63
4.2.1	齿轮马达	63
4.2.2	叶片马达	63

4.2.3 轴向柱塞马达	64
4.3 低速马达	65
4.3.1 曲轴连杆式径向柱塞马达	65
4.3.2 多作用内曲线径向柱塞马达	66
4.3.3 摆线内啮合齿轮马达	69
4.4 液压缸	71
4.4.1 液压缸的类型和特点	71
4.4.2 液压缸的结构形式及安装方式	76
4.4.3 液压缸常见故障的分析和排除方法	79
思考、巩固与提高	80

第5章 液压控制元件

5.1 液压阀概述	82
5.1.1 液压阀的分类	82
5.1.2 液压阀的共性问题	82
5.1.3 液压阀的基本参数	85
5.2 压力控制阀	86
5.2.1 溢流阀	86
5.2.2 减压阀	91
5.2.3 顺序阀	94
5.2.4 压力继电器	96
5.3 流量控制阀	96
5.3.1 节流口的形式和流量特性	97
5.3.2 节流阀	99
5.3.3 调速阀	99
5.3.4 溢流节流阀	101
5.4 方向控制阀	102
5.4.1 单向阀	102
5.4.2 换向阀	104
5.5 叠加阀、插装阀	112
5.5.1 叠加阀	112
5.5.2 二通插装阀	113
5.6 电液比例控制阀	118
5.6.1 比例电磁铁	118
5.6.2 比例压力控制阀	119
5.6.3 比例流量控制阀	120
5.6.4 比例方向控制阀	121
5.6.5 比例控制阀的主要性能指标	122
5.7 液压阀的选择与使用	125

5.7.1 液压阀的选择	125
5.7.2 液压阀的安装	125
5.7.3 液压阀常见故障的分析和排除方法	125
思考、巩固与提高	128

第6章 液压辅助元件

6.1 蓄能器	130
6.1.1 蓄能器的类型、结构和工作原理	130
6.1.2 蓄能器的功用	131
6.1.3 蓄能器的安装和使用	132
6.2 过滤器	132
6.2.1 过滤器的主要性能指标	132
6.2.2 过滤器的种类和结构特点	133
6.2.3 过滤器的选用	135
6.2.4 过滤器的安装	135
6.3 油箱	136
6.3.1 油箱的结构	136
6.3.2 油箱的设计要点	136
6.4 管道及管接头	138
6.4.1 管道的种类和材料	138
6.4.2 管道的尺寸	139
6.4.3 管接头	140
6.5 密封件	142
6.5.1 对密封件的要求	143
6.5.2 密封件的材料	143
6.5.3 密封件的种类及特点	143
思考、巩固与提高	147

第7章 液压基本回路

7.1 压力控制回路	148
7.1.1 调压回路	148
7.1.2 减压回路	149
7.1.3 增压回路	150
7.1.4 卸荷回路	151
7.1.5 平衡回路	152
7.2 速度控制回路	154
7.2.1 调速回路	154
7.2.1.1 节流调速回路	155
7.2.1.2 容积调速回路	160

7.2.1.3 容积节流调速回路	164
7.2.2 速度变换回路	165
7.3 方向控制回路	168
7.3.1 换向回路	168
7.3.2 锁紧回路	169
7.3.3 浮动回路	169
7.4 多执行元件动作控制回路	170
7.4.1 顺序动作回路	170
7.4.2 同步控制回路	171
思考、巩固与提高	173

第8章 液压传动系统

8.1 典型液压传动系统分析	176
8.1.1 压力机液压系统	176
8.1.2 组合机床动力滑台液压系统	179
8.1.3 塑料注射成型机液压系统	182
8.1.4 挖掘机液压系统	186
8.2 液压传动系统的设计简介	189
8.3 液压系统的安装和调试	191
8.3.1 液压系统的安装	191
8.3.2 液压系统的调试	192
8.4 液压系统的使用与维护	193
8.4.1 液压系统的使用要求	194
8.4.2 液压设备的维护和保养	194
8.5 液压系统常见故障的分析和排除方法	195
8.5.1 液压系统发生故障的规律	195
8.5.2 液压系统常见故障的分析和排除方法	196
思考、巩固与提高	197

第9章 液压伺服控制系统

9.1 概述	198
9.1.1 液压伺服控制系统的工作原理	198
9.1.2 液压伺服控制系统的组成和分类	199
9.2 液压伺服阀的基本类型	200
9.2.1 滑阀	200
9.2.2 喷嘴挡板阀	202
9.2.3 射流管阀	202
9.3 电液伺服阀	203
9.4 液压伺服控制系统举例	204

9.4.1 机液伺服系统	204
9.4.2 电液伺服控制系统	205
思考、巩固与提高	208

附录 常用液压图形符号 (摘自 GB/T 786.1—1993)

参考文献

第1章

绪论

► 液压传动及控制是研究以有压流体为传动介质来实现各种机械的传动和控制的学科。液压传动是基于流体力学的帕斯卡原理，主要利用液体的压力能来进行能量传递和控制的传动方式，利用各种元件组成具有所需功能的基本回路，再由若干基本回路有机组合成传动和控制系统，从而实现能量的转换、传递和控制。因此，了解传动介质的基本物理性质及其力学特性，研究各类元件的结构、工作原理和性能，研究各种基本回路的性能和特点，并在此基础上形成对传动及控制系统的分析、设计和使用，这就是本学科的研究对象。

1.1 液压传动的工作原理

以图 1-1 所表示的手动液压千斤顶为例，说明液压传动的工作原理。由大缸体 5 和大活塞 6 组成举升液压缸；由手动杠杆 4、小缸体 3、小活塞 2、进油单向阀 1 和排油单向阀 7 组成手动液压泵。

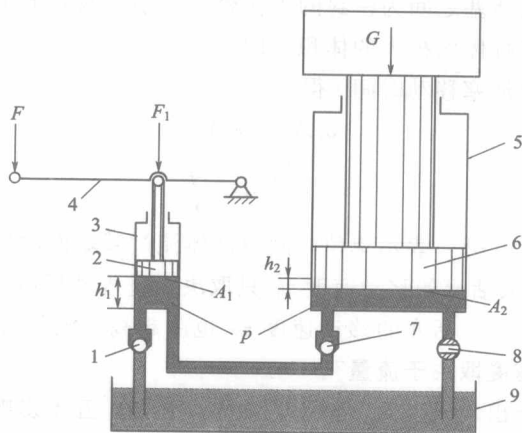


图 1-1 液压千斤顶工作原理

- 1—进油单向阀；2—小活塞；3—小缸体；4—手动杠杆；5—大缸体；
6—大活塞；7—排油单向阀；8—截止阀；9—油箱

当手动杠杆摆动时，小活塞做上下往复运动。小活塞上移，泵腔内的容积扩大而形成真空，油箱中的油液在大气压力的作用下，经进油单向阀 1 进入泵腔内；小活塞下移，泵腔内的油液顶开排油单向阀 7 进入液压缸内使大活塞带动重物一起上

升。反复上下扳动杠杆，重物就会逐步升起。手动泵停止工作，大活塞停止运动；打开截止阀 8，油液在重力的作用下排回油箱，大活塞落回原位。这就是液压千斤顶的工作原理。

下面以图 1-1 所示为例，分析两活塞之间的力关系、运动关系和功率关系，说明液压传动的基本特征。

(1) 力的关系

当大活塞上有重物负载时，其下腔的油液将产生一定的液体压力 p ，即

$$p = G/A_2 \quad (1-1)$$

在千斤顶工作中，从小活塞到大活塞之间形成了密封的工作容积，依帕斯卡原理“在密闭容器内，施加于静止液体上的压力将以等值同时传到液体各点”，因此要顶起重物，在小活塞下腔就必须产生一个等值的压力 p ，即小活塞上施加的力为

$$F_1 = pA_1 = \frac{A_1}{A_2}G \quad (1-2)$$

可见在活塞面积 A_1 、 A_2 一定的情况下，液体压力 p 取决于举升的重物负载，而手动泵上的作用力 F_1 则取决于压力 p 。所以，被举升的重物负载越大，液体压力 p 越高，手动泵上所需的作用力 F_1 也就越大；反之，如果空载工作，且不计摩擦力，则液体压力 p 和手动泵上的作用力 F_1 都为零。液压传动的这一特征，可以简略地表述为“压力取决于负载”。

(2) 运动关系

由于小活塞到大活塞之间为密封的工作容积，小活塞向下压出油液的体积必然等于大活塞向上升起缸体内扩大的体积，即 $A_1 h_1 = A_2 h_2$ ，

上式两端同除以活塞移动时间 t 得

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (1-3)$$

$$\text{或} \quad v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 = \frac{q}{A_2} \quad (1-4)$$

式中 $q = v_1 A_1 = v_2 A_2$ ，表示单位时间内液体流过某截面的体积。由于活塞面积 A_1 、 A_2 已定，所以大活塞的移动速度 v_2 只取决于进入液压缸的流量 q 。这样，进入液压缸的流量越多，大活塞的移动速度 v_2 也就越高。液压传动的这一特征，可以简略地表述为“速度取决于流量”。

这里需要着重指出，以上两个特征是独立存在的，互不影响。不管液压千斤顶的负载如何变化，只要供给的流量一定，活塞推动负载上升的运动速度就一定；同样，不管液压缸的活塞移动速度怎样，只要负载一定，推动负载所需的液体压力就确定不变。

(3) 功率关系

若不考虑各种能量损失，手动泵的输入功率等于液压缸的输出功率，即

$$F_1 v_1 = W v_2$$

$$P = pA_1 v_1 = pA_2 v_2 = pq \quad (1-5)$$

式中, $W=G$, 为液压缸的推力。

可见, 液压传动的功率 P 可以用液体压力 p 和流量 q 的乘积来表示, 压力 p 和流量 q 是液压传动中最基本、最重要的两个参数。

上述千斤顶的工作过程, 就是将手动机械能转换为液体压力能, 又将液体压力能转换为机械能输出的过程。

综上所述, 可归纳出液压传动的基本特征是: 以液体为工作介质, 依靠处于密封工作容积内的液体压力能来传递能量; 压力的高低取决于负载; 负载速度的传递是按容积变化相等的原则进行的, 速度的大小取决于流量; 压力和流量是液压传动中最基本、最重要的两个参数。

1.2 液压传动系统的组成及类型

图 1-2 所示为一机床工作台的液压传动系统, 它由液压泵、溢流阀、节流阀、换向阀、液压缸、油箱以及连接管道等组成。

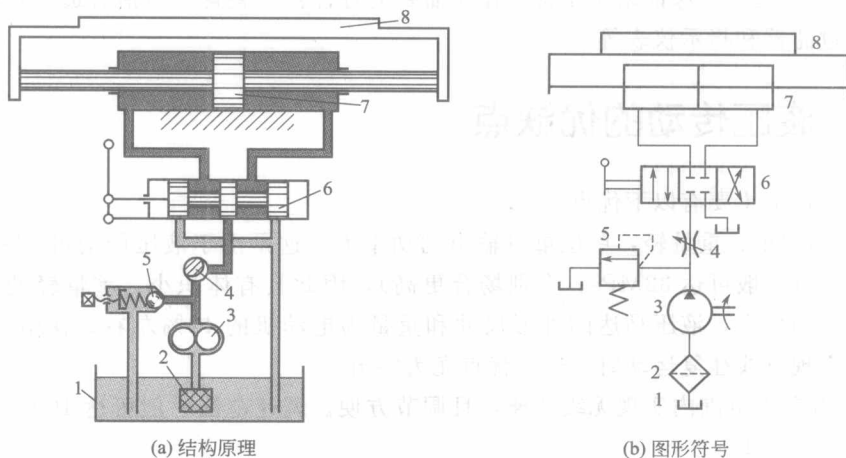


图 1-2 机床工作台液压系统的工作原理

1—油箱; 2—过滤器; 3—液压泵; 4—节流阀; 5—溢流阀;
6—换向阀; 7—液压缸; 8—工作台

其工作原理是: 液压泵 3 由电动机带动旋转, 从油箱 1 经过滤器 2 吸油, 液压泵排出的压力油先经节流阀 4 再经换向阀 6 (设换向阀手柄向右扳动, 阀芯处于右端位置) 进入液压缸 7 的左腔, 推动活塞和工作台 8 向右运动。液压缸右腔的油液经换向阀 6 和回油管道返回油箱。若换向阀的阀芯处于左端位置 (手柄向左扳动)

时, 活塞及工作台反向运动。改变节流阀 4 的开口大小, 可以改变进入液压缸的流量实现工作台运动速度的调节, 多余的流量经溢流阀 5 和溢流管道排回油箱。液压缸的工作压力由活塞运动所克服的负载决定。液压泵的工作压力由溢流阀调定, 其值略高于液压缸的工作压力。由于系统的最高工作压力不会超过溢流阀的调定值, 所以溢流阀还对系统起到过载保护的作用。

图 1-2(a) 所示的液压系统工作原理图是半结构式的, 其直观性强, 易于理解, 但绘制起来比较繁杂。图 1-2(b) 所示是用液压图形符号绘制成的工作原理图, 其简单明了, 便于绘制, 图中的符号可参见液压气动图形符号标准 (GB/T 786.1—93)。

由上例可见, 液压传动系统由以下四部分组成。

① 动力元件, 即液压泵, 其功能是将原动机输出的机械能转换成液体的压力能, 为系统提供动力。

② 执行元件, 即液压缸、液压马达, 它们的功能是将液体的压力能转换成机械能, 以带动负载进行直线运动或旋转运动。

③ 控制元件, 即压力、流量和方向控制阀, 它们的作用是控制和调节系统中液体的压力、流量和流动方向, 以保证执行元件达到所要求的输出力 (或力矩)、运动速度和运动方向。

④ 辅助元件, 保证系统正常工作所需要的各种辅助装置。包括管道、管接头、油箱、过滤器和指示仪表等。

1.3 液压传动的优缺点

液压传动主要有以下优点。

① 体积小、重量轻, 单位重量输出的功率大。这是由于液压传动可以采用很高的压力 (一般可达 32MPa, 个别场合更高), 因此具有体积小、重量轻的特点。如在同等功率下, 液压马达的外形尺寸和重量为电动机的 12% 左右。在中、大功率以及实现直线往复运动时, 这一优点尤为突出。

② 可在大范围内实现无级调速, 且调节方便。调速范围一般可达 100 : 1, 甚至高达 2000 : 1。

③ 操纵控制方便, 与电子技术结合更易于实现各种自动控制和远距离操纵。

④ 由于体积小、重量轻, 因而惯性小, 响应速度快, 启动、制动和换向迅速。如一个中等功率的电动机启动需要几秒钟, 而液压马达只需 0.1s。

⑤ 因执行元件的多样性 (如液压缸、液压马达等) 和各元件之间仅靠管路连接, 采用液压传动使得机器的结构简化, 布置灵活方便。

⑥ 易于实现过载保护, 安全性好; 采用矿物油为工作介质, 自润滑性好。

液压传动的主要缺点如下。

① 液压传动系统中存在的泄漏和油液的压缩性,影响了传动的准确性,不易实现定比传动。

② 由于油液的黏度随温度变化而变化,容易引起工作性能的变化,所以液压传动不宜在温度变化范围很大的场合工作。

③ 由于受液体流动阻力和泄漏的影响,液压传动的效率还不高。

④ 液压传动系统对油液的污染比较敏感,必须有良好的防护和过滤措施。

液压传动的优点是主要的,液压元件已标准化、系列化和通用化,便于系统的设计、制造和推广应用。因此液压传动在现代化的生产中有着广阔的发展前途和应用前景。

1.4 液压技术的发展及应用

液压技术从 1795 年英国制成世界上第一台水压机算起,已有二百多年的历史了,然而在工业上的真正推广使用却是 20 世纪中叶的事。第二次世界大战期间,在一些武器装备上用上了功率大、反应快、动作准的液压传动和控制装置,大大提高了武器装备的性能,也大大促进了液压技术本身的发展。战后,液压技术迅速由军事转入民用,在机械制造、工程机械、锻压机械、冶金机械、汽车、船舶等行业中得到了广泛的应用和发展。20 世纪 60 年代以后,原子能技术、空间技术、电子技术等的迅速发展,再次将液压技术向前推进,并在各个工业领域得到了更加广泛的应用。

现代液压技术与微电子技术、计算机技术、传感技术的紧密结合已形成并发展成为一种包括传动、控制、检测在内的自动化技术。当前,液压技术在实现高压、高速、大功率、经久耐用、高度集成化等各项要求方面都取得了重大的进展;在完善发展比例控制、伺服控制、开发数字控制技术上也许多新成绩。同时,液压元件和液压系统的计算机辅助设计(CAD)和测试(CAT)、微机控制、机电液一体化(Hydraulics)、液电一体化(Fluidics)、可靠性、污染控制、能耗控制、小型微型化等方面也是液压技术发展和研究的方向。而继续扩大应用服务领域,采用更先进的设计和制造技术,将使液压技术发展成为内涵更加丰富的完整的综合自动化技术。

目前,液压技术已广泛应用于各个工业领域的技术装备上,例如机械制造、工程、建筑、矿山、冶金、军用、船舶、石化、农林等机械,上至航空、航天工业,下至地矿、海洋开发工程,几乎无处不见液压技术的踪迹。液压技术的应用领域大致上可归纳为以下几个主要方面。

① 各种举升、搬运作业。尤其在行走机械和较大驱动功率的场合,液压传动已经成为一种主要方式。例如,从起重、装载等工程机械到消防、维修、搬运等特种车辆;船舶的起货机、起锚机;高炉、炼钢炉设备;船闸、舱门的启闭装置;剧

场的升降乐池和升降舞台；各种自动输送线等。

② 各种需要作用力大的推、挤、压、剪、切、挖掘等作业装置。在这些场合，液压传动已经具有垄断地位。例如，各种液压机；金属材料的压铸、成型、轧制、压延、拉伸、剪切设备；塑料注射成型机、塑料挤出机等塑料机械；拖拉机、收割机以及其他砍伐、采掘用的农林机械；隧道、矿井和地面的挖掘设备；各种船舶的舵机等。

③ 高响应、高精度的控制。例如，火炮的跟踪驱动、炮塔的稳定、舰艇的消摆、飞机和导弹的姿态控制等装置；加工机床高精度的定位系统；工业机器人的驱动和控制；金属板材压下、皮革切片的厚度控制；电站发电机的调速系统；高性能的振动台和试验机；多自由度的大型运动模拟器和娱乐设施等。

④ 多种工作程序组合的自动操纵与控制。例如，组合机床，机械加工自动线等。

⑤ 特殊工作场所。例如，地下、水下、防爆等特殊环境的作业装备。



思考、巩固与提高

1. 何谓液压传动？
2. 液压传动系统由哪几部分组成？各部分的作用是什么？
3. 液压传动与机械传动、电气传动相比有哪些优缺点？
4. 液压系统原理图中元件的表示方法有哪几种？为什么通常液压系统采用图形符号(GB/T 786.1—1993)来表示？熟悉常用的液压图形符号。

第2章

液压传动基础知识

② 液压传动是以液体作为工作介质来进行能量传递的。因此，了解液体的基本物理、化学性质和研究液体平衡和运动的力学规律，将有助于对液压传动基本原理的正确理解，同时这些内容也是液压系统设计、计算和合理使用的理论基础。

2.1 液体的性质

2.1.1 液体的密度

物体维持原有运动（或相对静止）状态的性质叫作惯性，表征惯性的物理量是质量，液体单位体积内的质量称为密度，以 ρ 表示

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2-1)$$

式中 m ——液体的质量，kg；

V ——液体的体积， m^3 。

液体的密度随压力和温度的变化而变化，即随压力的增加而加大，随温度的升高而减少。在一般情况下，由压力和温度引起的变化都比较小，在实用中油液的密度可近似地视为常数。

石油型液压油液的密度在 900kg/m^3 左右。

2.1.2 液体的可压缩性

液体受压力作用而发生体积变化的性质称为液体的可压缩性。液体压缩性的大小通常以体积压缩率 κ 来度量。它表示当温度不变时，在单位压强变化下液体体积的相对变化量，即

$$\kappa = -\frac{1}{\Delta p} \times \frac{\Delta V}{V} \quad (\text{m}^2/\text{N}) \quad (2-2)$$

式中 V ——液体加压前的体积， m^3 ；

ΔV ——加压后液体体积变化量， m^3 ；

Δp ——液体压强变化量， N/m^2 。

当压强增大时，液体体积总是减小，所以上式中冠一负号以使压缩系数为正值。液体的压缩率 κ 的倒数称为液体的体积弹性模量，以 E 表示，其值为