

液压传动与控制

贾铭新 曹诚明 编

YEYACHUANDONG

YU

KONGZHI

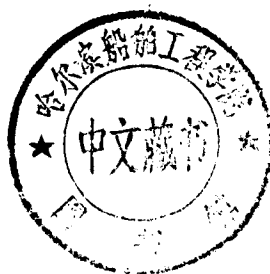


哈尔滨工程大学出版社

411543

液压传动与控制

贾铭新 曹诚明 编



哈尔滨工程大学出版社

(黑)新登字第9号

内 容 提 要

DY57/33

本书是以液压传动为主、控制为辅的机类非液压专业的本科生教材。书中介绍了液压传动与控制的基本原理、基本概念,介绍了机床及工程机械中常用的液压元件、典型液压回路以及液压传动在机床、压力机械、船舶机械等通用机械设备中的具体应用实例和液压系统的设计方法。

全书共十章:第一、第二章为液压传动的基础部分,即液压传动的概念和液压流体力学基础;第三至第六章为液压元件,包括液压泵、液压马达、液压缸、液压阀和液压辅助装置;第七章至第九章为液压基本回路、典型液压系统和液压系统的设计与计算;第十章为液压伺服控制系统。

本书由中船总公司液压教材委员会(小组)推荐为机类非液压专业本科生液压传动与控制课程教学用书。它可以做为普通工科高等院校及广播电视大学、业余大学、职工大学、函授学院等有关的教材,也可以供从事液压技术的工程技术人员学习、参考。

液压传动与控制

贾铭新 曹诚明 编
责任编辑 张彦

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行
新华书店经销
大庆市第一印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 15.5 字数 355 千字

1993年12月修订版 1995年7月第2次印刷

印数:9001—20000册

ISBN 7-81007-144-0

TP·7 定价:12.50元

前 言

本书是根据中船总公司 1986 年 6 月九江会议所制定的全国高等院校船舶类专业教材选题规划和经中船总公司液压教材委员会（小组）审定通过的机械类非液压专业“液压传动与控制”教材大纲而编写的本科生统编教材。其目的旨在使机械类专业学生学习后既能较全面、扎实地掌握液压传动与控制的基本理论、概念，又能获得独立分析和设计一般液压系统的技能。

本书共十章。第一至第九章为液压传动部分：包括液压传动的基本理论、液压元件、液压基本回路、典型液压系统和液压传动的设计与计算；第十章为液压伺服系统：包括伺服控制的基本概念、液压控制阀、液压动力元件、电液伺服阀和电液伺服系统。全书涉及到液压流体力学基本概念，液压元件、回路和系统的工作原理、性能及应用，液压系统的设计方法和步骤等方面内容。

根据编者的多年教学和科研工作实践，本书在编写过程中做到了如下几点：

一、语言简练、条理清晰，深入浅出、由易到难，重点突出、难点分散，便于组织教学，有利于启发式教学方法的实施。

二、鉴于液压课教学的概念性、实践性都很强的特点，本书在着重讲清基本概念（理论）的同时，注重加强基本概念实际应用环节，以使学生在学完本课程后能合理选择、使用和设计液压元件、回路和系统，增强学生分析和解决实际工程问题的能力。例如：本书在阐述基本概念、常用液压件工作原理的同时，注重加强其应用的说明；在讲清典型液压回路、系统工作原理的同时，注重加强对回路、系统的分析方法和设计思想的讨论，等等。

三、本书注意把液压课的基础理论——液压流体力学的有关知识有机地揉入液压课的“元件”和“系统”中去，以克服某些同类教材的基础理论与专业内容相脱节的弊端，使液压课的基础理论与专业内容前后呼应，增强了学生对教学内容的深入理解和掌握。

四、尽量反映国内外的有关新成就，其中也包括我们近期的一些科研成果。

另外，鉴于机械类专业面较宽，考虑到不同行业的需要，本书中列举的典型元件、回路和系统的例子较多，故机械类的不同专业可有所侧重的选择；为消化、吃透书中的内容，培养分析问题和解决问题的能力，每章都附有一定数量的习题和例题。

本书是由中船总公司液压教材委员会（小组）推荐的机械类非液压专业教材，可做普通工科高等院校教材，也可做为广播电视大学、业余大学、职工大学、函授学院的教材，同时也可做为工程技术人员在科研实践中的重要参考资料。

本书第一至第九章由哈尔滨工程大学贾铭新副教授编写，第十章由哈尔滨工程大学曹诚明副教授编写，贾铭新同志任主编。武汉水运工程学院甄少华教授担任本书主审，提出了不少宝贵意见。在此表示衷心感谢。

本书在编写过程中还得到了有关同志和单位的不少帮助，在此谨表衷心谢意。

由于编者水平有限，书中难免有错或不当之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 液压传动的基本概念	1
第二节 液压传动的主要优缺点	4
习 题	5
第二章 液压油和液压流体力学基础	6
第一节 液压油的性质和选用	6
第二节 静止液体力学	15
第三节 流动液体力学	19
第四节 液体在管道中的流动	25
第五节 液流流经小孔及缝隙的流量计算	32
第六节 液压冲击和空穴现象	36
习 题	38
第三章 液压泵和液压马达	41
第一节 概述	41
第二节 齿轮泵和齿轮液压马达	45
第三节 叶片泵及叶片液压马达	48
第四节 柱塞泵及柱塞液压马达	54
第五节 液压泵（液压马达）的选用	57
习 题	58
第四章 液压缸	60
第一节 液压缸的类型及其特点和应用	60
第二节 液压缸的结构和组成	65
第三节 液压缸的设计和计算	73
第四节 液压缸的材料及技术条件	76
习 题	78
第五章 液压阀	80
第一节 液压阀的分类及基本要求	80
第二节 方向控制阀	80
第三节 压力控制阀	92
第四节 流量控制阀	101
第五节 比例阀和逻辑阀	104
习 题	108
第六章 辅助装置	110

第一节	滤油器	110
第二节	蓄能器	114
第三节	油箱和热交换器	118
第四节	其它辅件	121
	习 题	123
第七章	液压基本回路	124
第一节	调速回路	124
第二节	快速运动回路和速度换接回路	137
第三节	方向控制回路	140
第四节	压力控制回路	142
第五节	多缸工作控制回路	148
第六节	液压马达回路	153
	习 题	155
第八章	典型液压系统	159
第一节	组合机床液压系统	159
第二节	M1432A 型万能外圆磨床液压系统	162
第三节	YB32-300 型四柱万能液压机液压系统	166
第四节	船舶机械液压系统	170
	习 题	173
第九章	液压系统的设计与计算	174
第一节	明确设计要求, 进行工况分析	174
第二节	液压系统主要性能参数的确定	178
第三节	拟订液压系统图	180
第四节	计算和选择液压件	181
第五节	液压系统性能的估算	182
第六节	绘制工作图、编写技术文件	184
第七节	液压系统的设计计算举例	185
	习 题	196
第十章	液压伺服系统	198
第一节	概述	198
第二节	液压控制阀	201
第三节	液压动力元件	213
第四节	机械液压伺服系统	226
第五节	电液伺服阀和电液伺服系统	232
	参考文献	242

第一章 绪 论

液压传动相对于机械传动来说,是一门新兴的技术。人类使用水力机械及液压技术虽然已有很长历史,但是液压技术在机械领域中得以应用并取得迅速发展则是本世纪、特别是第二次世界大战以来的事。由于液压传动具有许多突出的优点,因而目前已广泛地应用在工农业机械、机床、交通运输、陆地行走设备、船舶控制、火炮控制、飞机、导弹等各个方面。

本章的目的是搞清液压传动的工作原理,了解液压传动的主要优缺点及应用,初步掌握液压传动的两个工作特性。

第一节 液压传动的基本概念

一、液压传动的工作原理及工作特性

(一)工作原理

对于不同的液压装置和设备,它们的液压传动系统虽然不同,但液压传动的基本工

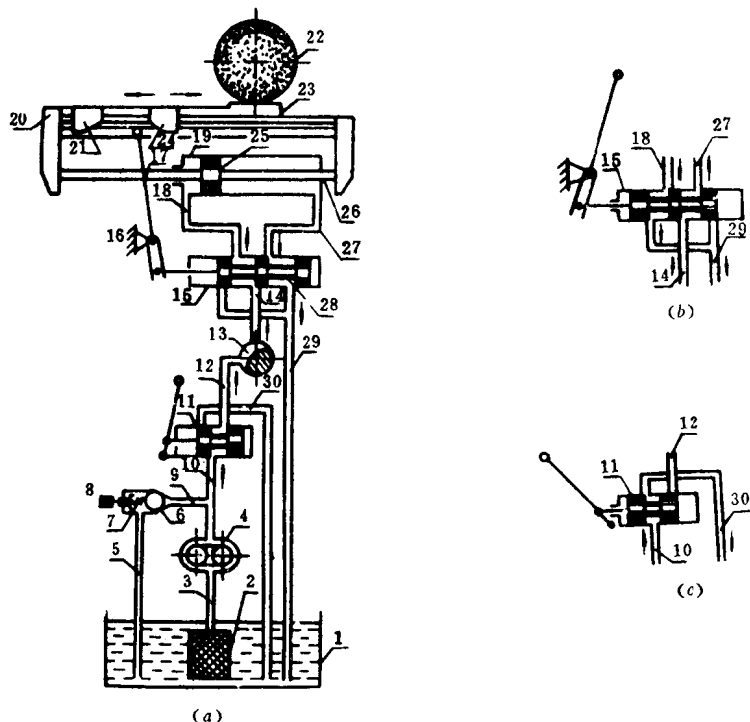


图 1-1 磨床工作台液压系统工作原理图(半结构图)

作原理是相同的。为了了解液压传动的基本工作原理,现以一简化了的机床液压系统为例加以说明。

图 1-1(a)为一磨床工作台液压系统工作原理图。图中,1 是油箱,2 是滤油器,4 是液压泵,8 是溢流阀,11 是开停阀,13 是节流阀,15 是换向阀,19 是液压缸(其缸筒固定在机床床身上,活塞杆 26 与工作台 20 相连),3、5、9、10、12、14、18、27、29、30 是油管。与机械传动相似,液压传动中的执行元件是在油压力的推动下按预定的要求动作的。对于图 1-1(a)中的执行元件——液压缸来说,它所完成的动作要求是:直线运动、运动的变速、运动的换向和在任意位置的停留。下面就从这一液压系统是如何实现这四个动作的分析入手,得出液压传动的基本工作原理。

1. 液压缸的直线运动

液压泵 4 由电机(图中未画出)带动旋转,从油箱 1 吸油。油液经滤油器 2 通过油管 3 进入液压泵后,被输送到油管 10(同时也输入旁路油管 9,该部分油路分析稍后),并经开停阀 11、油管 12、节流阀 13、油管 14、换向阀 15、油管 18 进入液压缸 19 的左腔,作用于活塞 25 左侧的环形面积上。当油液对活塞向右的推力大于等于阻碍活塞向右移动的所有阻力之和时,活塞 25、活塞杆 26 以及和活塞杆相连的工作台 20(连同装夹在工作台上的工件 23)一起向右移动。这时,液压缸右腔的回油从液压缸的出口,经油管 27、换向阀 15、油管 29 排回油箱。这样就实现了液压缸(即工作台)的向右直线运动。

2. 液压缸的运动变速

磨床在磨削工件时,根据加工要求的不同,工作台运动的速度必须可调。在图 1-1(a)中,工作台 20 运动速度的快慢是通过节流阀 13 来调节的,节流阀 13 象个自来水龙头,可以开大,也可以关小。当它开大时,流入液压缸内的油液就增多,工作台运动速度就加快;关小时,工作台的速度就减慢。

3. 液压缸的运动换向

为了进行连续磨削,工作台 20 必须作往复(左右)运动。在工作台 20 的侧面上装有挡块 21 和 24。当工作台向右运动到其左挡块 21 碰到换向杆 17 时,换向杆 17 绕其支点 16 顺时针方向转动,拨动换向阀阀芯 28,使之从图面上的位置移向左位,成为图 1-1(b)所示状态。这时,从油管 14 输来的油液经换向阀 15 后,经油管 27 进入液压缸的右腔,并作用于活塞 25 右边的环形面积上。当油液对活塞向左的推力大于等于阻碍活塞向左移动的所有阻力之和时,活塞、活塞杆及工作台便一起向左移动,同时液压缸左腔的油液从液压缸出口流出,经油管 18、换向阀 15、油管 29 排回油箱。此后,当工作台向左运动到其右挡块 24 碰到换向杆 17 时,又使杆 17 逆时针方向转动而使阀芯 28 移向右位,回复到图 1-1(a)的状态。如此循环往复,工作台不停地左右运动,磨削加工就可以持续地进行下去。

4. 液压缸在任意位置上的停留

在工件装卸、尺寸检测或进行其它有关工作时,需要短期停止工作台的运动并能使其停留在任意位置上。这个动作可由开停阀 11 来完成(当然也可以由关闭节流阀 13 或关掉电机来实现,不过前者不能卸荷,后者则由于频繁启闭电机而有损于电机寿命)。当拨动开停阀 11 的操纵手柄,使其阀芯处于阀体的左位,即如图 1-1(c)所示的状态时,液压泵输出的油液经油管 10、开停阀 11、油管 30 直接排回油箱,液压缸中无油液输入,工作台停止运动,停留在某个位置上。

当活塞在油液压力的作用下带动工作台一起运动时,阻碍活塞或工作台运动的阻力(包括导轨的磨擦力、砂轮 22 和工件 23 间的切削力等)越大,所需油液的压力也越大,反之亦然。调整油液压力使其与阻力(即外界负载)相适应是由溢流阀 8 来完成的。如前所述,由液压泵输出的油液除一部分经油管 10 输入液压缸外,另一部分则通过油管 9 进入溢流阀 8;当油液压力一旦超过阀 8 中弹簧 7 的调定压力时,钢球 6 便被顶开,油液进入阀 8 并经油管 5 排回油箱。这时油液压力与弹簧 7 的调定值相适应,不再升高,维持定值。当外界负载较大时,调整弹簧 7,使弹簧力增加,当钢球被顶开时,就得到了与较大负载相适应的较高的定值油液压力;反之亦然。由此可见,溢流阀在这里起到了调节、控制油液压力的作用,以适应不同负载的要求。与此同时,溢流阀还起到了把液压泵输出的多余油液排回油箱的溢流作用。

液压系统中滤油器 2 的作用是滤去油液中的污染物质,保证油液的清洁,使系统正常工作。

由上述分析中,可以看出:

(1)所谓液压传动就是以液体为介质,依靠运动着的液体的压力能来传递动力的(液压传动与液力传动不同,后者是依靠液体的动能来传递动力的,如水轮机、液力变矩器等,液力传动不是本课程的内容)。

(2)液压系统工作时,液压泵把电机传来的回转式机械能转变为油液的压力能;油液被输送到液压缸(或液压马达)后,又由液压缸(或液压马达)把油液的压力能转变为直线式(或回转式)的机械能输出。

(3)液压系统中的油液是在受调节、控制的状态下进行工作的,因此液压传动和液压控制在这个意义上来说是难以截然分开的。

(4)液压系统必须满足其执行元件(如上例中的液压缸)在力和速度方面的要求。

(二)液压传动的工作特性

液压系统工作时,外界负载越大(在有效承压面积一定的前提下),所需油液的压力也越大,反之亦然。因此,液压系统的油压力(简称系统的压力,下同)大小取决于外界负载。负载大,系统压力大;负载小,系统压力小;负载为零,系统压力为零。另外,活塞或工作台的运动速度(简称系统的速度,下同)取决于单位时间通过节流阀进入液压缸中油液的体积即流量。流量越大(在有效承压面积一定的前提下)系统的速度越快,反之亦然。流量为零,系统的速度亦为零。液压系统的压力和外界负载,速度和流量的这两个关系称做液压传动的两个工作特性。这两个特性很重要,随着课程的深入,要进一步加深对它的理解。

二、液压系统的组成

从上述例子可以看出,液压系统由以下四个主要部分组成:

(1)能源装置 它是将电机输入的机械能转换为油液的压力能(压力和流量)输出的能量转换装置,一般最常见的形式是液压泵。

(2)执行元件 它是将油液的压力能转换成直线式或回转式机械能输出的能量转换装置,在上例中,它是做直线运动的液压缸,在别的情况下,也可是做回转运动的液压马达。

(3)调节控制元件 它是控制液压系统中油液的流量、压力和流动方向的装置,在上例中,就是控制液体流量的节流阀、控制液体压力的溢流阀及控制液流方向的换向阀、开

停阀等液压元件的总称。这些元件是保证系统正常工作不可缺少的组成部分。

(4)辅助元件 是除上述三项以外的其它装置,如上例中的油箱、滤油器、油管、管接头等。这些元件对保证液压系统的可靠、稳定持久的工作,有重大作用。

以上四个组成部分将在下面各章节中分别介绍。

三、液压系统的图形符号

在图 1-1 所示的液压系统原理图中,各元件的图形基本上表示了该元件的内部结构原理,称此图为半结构式原理图,简称为半结图。这种图直观性强,容易理解,当液压系统发生故障时,根据此图检查也较方便,但图形较复杂,特别当系统中元件较多时,绘制更不方便。为简化液压原理图的绘制,我国制订了一套液压图形符号(GB786—76),将各液压元件都用相应的符号表示。这些符号只表示相应元件的职能,连接系统的通路,不表示元件的具体结构和参数,并规定各符号所表示的都是相应元件的静止位置或零位置,称这种符号为职能符号。图 1-2 即为用职能符号绘制的上述磨床工作台的液压系统工作原理图(职能符号图)。由于这种图图面简洁,油路走向清楚,对系统的分析、设计都很方便,因此现在世界各国采用的较多(具体表示方法大同小异)。如果有些液压元件(如某些自行设计的非标准件)的职能无法用这些符号表示时,仍可以采用结构示意图。常用液压元件的职能符号在以后讲述到具体元件时,还要提到。

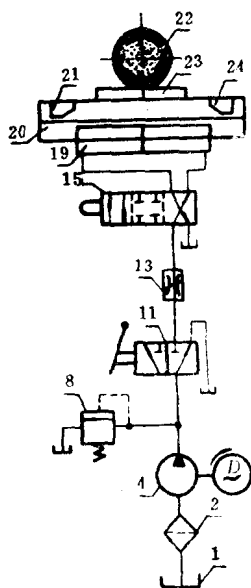


图 1-2 磨床工作台液压系统原理图(职能符号图)

第二节 液压传动的主要优缺点

液压传动与机械、电力等传动相比,有以下优点:

- (1)能方便地进行无级调速,调速范围大。
- (2)体积小、重量轻、功率大。一方面,在相同输出功率前提下,其体积小、重量轻、惯性小、动作灵敏,这对于液压自动控制系统具有重要意义。另一方面,在体积或重量相近的情况下,其输出功率大,能传递较大的扭矩或推力(如万吨水压力等)。
- (3)控制和调节简单、方便、省力,易实现自动化控制和过载保护。
- (4)可实现无间隙传动,运动平稳。
- (5)因传动介质为油液,故液压元件有自我润滑作用,使用寿命长。
- (6)液压元件实现了标准化、系列化、通用化,便于设计、制造和推广使用。
- (7)可以采用大推力的液压缸和大扭矩的液压马达直接带动负载,从而省去了中间的减速装置,使传动简化。

液压传动的主要缺点是:

(1)漏。由于作为传动介质的液体是在一定的压力下、有时是在较高的压力下工作的,因此在有相对运动的表面间不可避免地要产生泄漏。同时,由于油液并不是绝对不可以压缩的,油管等也会产生弹性变形,所以液压传动不宜用在传动比要求较严格的场合。

(2)振。液压传动中的“液压冲击和空穴现象”会产生很大的振动和噪声。

(3)热。在能量转换和传递过程中,由于存在机械摩擦、压力损失、泄漏损失,因而易使油液发热,总效率降低,故液压传动不宜用于远距离传动。

(4)液压传动性能对温度比较敏感,故不易在高温及低温下工作。液压传动装置对油液的污染亦较敏感,故要求有良好的过滤设施。

(5)液压元件加工精度要求高,一般情况下又要求有独立的能源(如液压泵站),这些可能使产品成本提高。

(6)液压系统出现故障时不易追查原因,不易迅速排除。

综上所述,液压传动由于其优点比较突出,故在工农业各个部门获得广泛应用。它的某些缺点随着生产技术的不断发展、提高,正在逐步得到克服。

习 题

- 1-1 何谓液压传动(即液压传动的定义是什么)? 液压传动有哪两个工作特性?
- 1-2 液压传动的基本组成部分是什么? 试举例说明各组成部分的作用。
- 1-3 液压传动与机械传动相比有哪些主要优缺点? 为什么说这些优缺点只是相对的?

第二章 液压油和液压流体力学基础

液压传动是利用液体（通常都是矿物油）作为工作介质来传递动力和信号的。因此液压油的质量——物理、化学性质的优劣，尤其是其力学性质对液压系统工作的影响很大。所以在研究液压系统之前，必须对系统中所用的液压油及其力学性质进行较深入的了解，以便进一步理解液压传动的基本原理，为更好的进行液压系统的分析与设计打下基础。

第一节 液压油的性质和选用

一、液体的密度

（一）密 度

对非均质液体来说，液体在某点处的微小质量 Δm 与其体积 ΔV 之比的极限值，称为液体在该点处的密度，并常用符号 ρ 表示。即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (2-1)$$

对于均质液体，其单位体积的质量就是液体的密度。即

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

式中 V ——液体的体积；

m ——体积 V 中所包含的液体质量。

（二）单 位

在国际单位制（SI）中，液体的密度单位是 kg/m^3 。

在本书中，除特殊说明外，液压油都是均质的。对于矿物油，其密度 $\rho = (850 \sim 960) \text{ kg/m}^3$ ；对于机床、船舶液压系统中常用的液压油（矿物油），在 15°C 时其密度可取为 $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$ 。

(三) 密度与压力、温度的关系

液压油的密度随压力和温度的变化而变化。液体的密度随温度升高而下降，随压力的增加而增大。由于液压系统中工作压力变化不算太大，油液温度又是在控制范围内，所以油温和压力引起的密度变化甚微。因此在一般使用条件下，液压油的密度可视为常数。

二、液体的压缩性

(一) 液体的压缩性

液体的压缩性是指液体受压后其体积变小的性能。

液体的压缩性很小，所以在一般情况下，如在低压（压力低于 $180 \times 10^5 \text{Pa}$ ）和研究液压系统的静态特征时，是可以忽略不计的。但在高压、受压体积较大和研究液压系统的动态特性（包括研究液流的冲击、系统的抗振稳定性、瞬态响应以及计算远距离操纵的液压机构）时，往往必须考虑液压油的压缩性。

(二) 液体压缩性的表示方法

1. 液体的压缩性系数

液体的压缩性是用压缩性系数表示的。压缩性系数的定义为：受压液体在变化单位压力时引起的液体体积的相对变化量。

参看图 2-1，假定压力为 p 时，液体体积为 V ；压力增为 $p + \Delta p$ 时，液体体积为 $V - \Delta V$ 。根据定义，液体的压缩性系数为

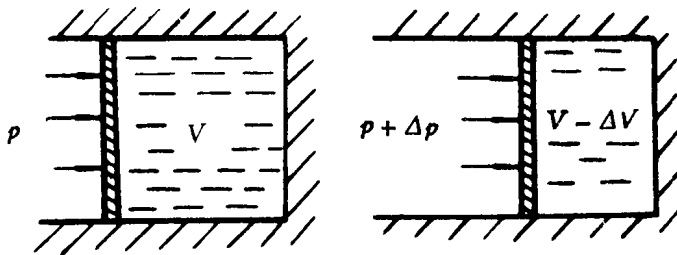


图 2-1 压力升高时液体体积的变化

$$\beta = - \frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (2-3)$$

式中 β ——液体的压缩性系数；

ΔV ——液体的压力变化所引起的液体体积变化值；

Δp ——液体的压力变化值。

压力增大时，液体体积减小，反之则增大，所以 $\Delta V/V$ 为负值。为了使 β 为正值，故在式 (2-3) 的右边加了一个负号。液压油的压缩性系数 β 值一般为 $(5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ 。

2. 液体的容积弹性模数

在工程上常用液体的容积弹性模数或体积弹性模量（简称为容积模数） β_e 来表示液

体的抗压性（或压缩性），液体压缩性系数的倒数定义为液体的容积模数。即

$$\beta_c = \frac{1}{\beta} = - \frac{V \cdot \Delta p}{\Delta V} \quad (2-4)$$

液压油的容积模数越大，液体的压缩性越小，其抗压性能越强，反之越弱。液压油的容积模数一般为 $(1.4 \sim 2.0) \times 10^9 \text{N/m}^2$ ，而钢的弹性模数为 $2.06 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ 。可见前者与后者相比，压缩性差 100~150 倍。

液压油的容积模数 β_c 与压缩过程、温度、压力等因素有关，等温压缩与绝热压缩下的 β_c 值不同，但由于二者差别很小，故工程上使用通常不加以区别。

3. 液压油的等效容积模数

当压力变化时，除纯液体（不含气体）的体积有变化外，液体中混入的气体，包容液体的容器（如液压缸和管道等）也会变形。这就是说，只有全面考虑液压油本身的压缩性、混合在油液中空气的压缩性以及盛放液压油的封闭容器（包含管道）的容积变形，才能真正说明液体压缩的实际情况。根据定义，考虑了上述情况后的液体的容积模数——等效容积模数 β_c' 由式(2-4)推得为

$$\frac{1}{\beta_c'} = \frac{1}{\beta_c} + \frac{1}{\beta_g} + \frac{V_g}{V_c \beta_g} \quad (2-5)$$

式中 β_c —— 容器壁材料的容积模数（在一般液压系统中容器的变形主要来自管道）；

β_g —— 混入液体中的气体（空气）的容积模数（气体的等温容积模数等于系统的压力 p ，绝热容积模数，对于空气 $\beta_g = 1.4 p$ ）；

V_g —— 液体中所含纯气体的体积；

V_c —— 容器内液体、气体总的体积（即含有气体的液体体积）。

对于金属液压缸和金属管道，由于其容积模数比液体的大得多，所以其变形的影响一般不考虑。但是当使用橡胶软管或尼龙软管时，由于这些管道的容积模数比液体的小得多，所以计算时必须考虑管道的影响。

在不计管道壁弹性的情况下，即设 $\beta_c \rightarrow \infty$ 时，式（2-5）可化简为

$$\frac{1}{\beta_c'} = \frac{1}{\beta_g} + \frac{V_g}{V_c \beta_g} \quad (2-6)$$

当油液中无气泡时，式（2-5）可化简为

$$\frac{1}{\beta_c'} = \frac{1}{\beta_c} + \frac{1}{\beta_g} \quad (2-7)$$

应当指出,以溶解形式存在于液体中的空气对液体的压缩性没影响;以混合形式存在于液体中的空气对液体的容积模数影响很大。所以,液压系统在使用和设计时应尽量设法不使油液中混有空气。

例题 2-1 有一机床和船舶机械液压系统,其系统工作压力分别为 $35 \times 10^5 \text{N/m}^2$ 和 $140 \times 10^5 \text{N/m}^2$,两个系统的液压油分别混入了 1% 和 5% 的空气量,试求两个系统分别都采用钢管和软管时液压油的等效容积模数。

解 在式 (2-5) 中: $\beta_e = (1.4 \sim 2) \times 10^9 \text{N/m}^2$, 取 $\beta_e = 1.5 \times 10^9 \text{N/m}^2$; 对钢质油管 $\beta_e = (16 \sim 35) \times 10^9 \text{N/m}^2$, 取 $\beta_e = 35 \times 10^9 \text{N/m}^2$; 对软管 $\beta_e = (1/4 \sim 1/20) \beta_e$, 取 $\beta_e = \beta_e/5$; $\beta_r = 1.4p$ (p 为系统工作压力, $p = 35 \times 10^5 \text{N/m}^2$ 、 $140 \times 10^5 \text{N/m}^2$); $V_g/V_x = 1\%$ 、 5% 。把这些数据代入式 (2-5) 后,将计算结果列于表 2-1 中。

由表 2-1 可见:

(1) 尽管液压油中混有少量空气,也会使液压油的等效容积模数显著下降(例如,在使用钢管、 $V_g/V_x = 0.01$ 时,对于机床液压系统的液体有效容积模数仅是纯液压油的 25%;对于船舶机械液压系统则是 55%)。

(2) 在其它条件相同时,含气量虽然只增加了 4%,但液体的等效容积模数却明显地下降(例如在使用钢管时,机床液压系统液压油的等效容积模数下降了 76%;船舶机械液压系统下降了 63%)。

(3) 比较船舶机械与机床液压系统不难看出,增加压力会提高液压油的等效容积模数(例如,在使用钢管且 $V_g/V_x = 0.01$ 时,工作压力由 $35 \times 10^5 \text{N/m}^2$ 增加到 $140 \times 10^5 \text{N/m}^2$,液体等效容积模数则提高了 124%)。这就是液压伺服系统多采用高压控制的原因之一。

(4) 液压系统中的软管对油液等效容积模数的影响通常比油液中混入空气的影响还要大。

三、液体的粘性和粘度

(一) 粘 性

1. 定 义

液体在外力作用下流动时,分子间的内聚力阻碍分子间的相对运动而产生一种内摩擦力。液体的这种性质,叫做液体的粘性。

2. 特 点

液体只有在流动时才表现出粘性,静止液体是不呈现粘性的。

液体粘性的大小是用粘度来表示的。粘度大,液层间内摩擦力就大,油液就“稠”;反之,油液就“稀”。

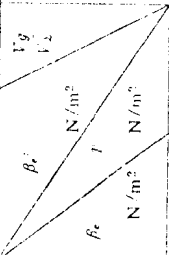
(二) 粘 度

粘度是表示液体粘性大小的物理量,在液压系统中所用液压油常根据粘度来选择。常用的粘度表示方式有三种:绝对粘度(动力粘度)、运动粘度、相对粘度。

1. 绝对粘度

如图 2-2 所示,在两个平行平板(下板不动、上板动)间充满某种液体。当上板以速度 v_0 相对于下平板移动时,由于液体分子与固体壁面间的附着力,使紧挨着上平板的

表 2-1 可变管道腔液-气混合体的等效容积模数 β_e 计算表

				
β_e N/m ²			0.01	0.05
钢	35×10^5	$\frac{1}{\beta'_e} = \frac{1}{35 \times 10^5} + \frac{1}{1.5 \times 10^9} + \frac{0.01}{1.4 \times 35 \times 10^5} = 2.736 \times 10^{-9}$ $\beta'_e = 0.37 \times 10^9$	$\frac{1}{\beta''_e} = \frac{1}{35 \times 10^5} + \frac{1}{1.5 \times 10^9} + \frac{0.05}{1.4 \times 35 \times 10^5} = 10.90 \times 10^{-9}$ $\beta''_e = 0.09 \times 10^9$	
	140×10^5 $\beta_e = 35 \times 10^9$	$\frac{1}{\beta'_e} = \frac{1}{35 \times 10^5} + \frac{1}{1.5 \times 10^9} + \frac{0.01}{1.4 \times 140 \times 10^5} = 1.205 \times 10^{-9}$ $\beta'_e = 0.83 \times 10^9$	$\frac{1}{\beta''_e} = \frac{1}{35 \times 10^5} + \frac{1}{1.5 \times 10^9} + \frac{0.05}{1.4 \times 140 \times 10^5} = 3.246 \times 10^{-9}$ $\beta''_e = 0.3 \times 10^9$	
软管	35×10^5	$\frac{1}{\beta'_e} = \frac{1}{0.3 \times 10^9} + \frac{1}{1.5 \times 10^9} + \frac{0.01}{1.4 \times 35 \times 10^5} = 6.041 \times 10^{-9}$ $\beta'_e = 0.17 \times 10^9$	$\frac{1}{\beta''_e} = \frac{1}{0.3 \times 10^9} + \frac{1}{1.5 \times 10^9} + \frac{0.05}{1.4 \times 35 \times 10^5} = 14.20 \times 10^{-9}$ $\beta''_e = 0.07 \times 10^9$	
	140×10^5 $\beta_e = \frac{\beta_e}{5}$ $= \frac{1.5 \times 10^9}{5}$ $= 0.3 \times 10^9$	$\frac{1}{\beta'_e} = \frac{1}{0.3 \times 10^9} + \frac{1}{1.5 \times 10^9} + \frac{0.01}{1.4 \times 140 \times 10^5} = 4.510 \times 10^{-9}$ $\beta'_e = 0.22 \times 10^9$	$\frac{1}{\beta''_e} = \frac{1}{0.3 \times 10^9} + \frac{1}{1.5 \times 10^9} + \frac{0.05}{1.4 \times 140 \times 10^5} = 6.551 \times 10^{-9}$ $\beta''_e = 0.153 \times 10^9$	