

YEYA CHUANDONG SHIYONG JISHU

# 液压传动实用技术

姚春东

刘明珍

编著

刘国志

审

石油工业出版社

# 液压传动实用技术

姚春东 刘明珍 编著

刘国志 审

84-2/55

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书共分六章,内容包括液压传动概述、液压流体力学基础、液压系统的基本回路分析、典型液压传动系统分析、液压伺服控制基本回路及系统分析,以及液压传动系统的设计与使用。重点介绍了应用于各行各业的各种实用回路,以及常用的典型液压系统的分析与评价。

本书可作为工科大学非机械设计与制造专业学生的教材,也可供现场从事液压传动设计、使用,以及从事液压传动设备技术改造的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

液压传动实用技术/姚春东等编著.

北京:石油工业出版社,2001.7

ISBN 7-5021-3375-5

I. 液…

II. 姚…

III. 液压传动-基本知识

IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 25161 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

河北省徐水县印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开本 9.5 印张 240 千字 印 1—800

2001 年 7 月北京第 1 版 2001 年 7 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3375-5/TE·2531

定价:25.00 元

# 前 言

液压传动技术由于其独特的优越性，使其得到了越来越广泛的应用。在机械、冶金、航空、航海、石油机械等各个行业，尤其在各种自动化生产装备和生产线中都得到了广泛的应用，极大地提高了生产效率、产品质量和制造精度。

近年来，液压传动技术在油田现场的应用也越来越广泛，如测井车、捞油车、修井作业机、井口机械化设备等都采用了液压传动技术，而且越来越多地将机械传动与控制的设备改造为液压传动与控制的驱动方式，极大地提高了设备的自动化水平与动作的准确程度。在进行液压设备的设计和技术革新时，掌握液压传动系统的设计方法、选用合适的液压回路来组成合理的液压系统是设计工作的关键之一。

本书以介绍液压传动实用技术为目的，按照系统的理论体系精炼地叙述了液压技术的一些主要问题。尽可能全面地介绍了应用于各行各业的实用液压基本回路的工作原理、功能、特点及应用；详细地分析了典型液压系统的功能、特点；较全面地介绍了液压伺服控制基本回路的工作原理及特点；最后介绍了液压传动系统的设计与使用方面的知识，为读者掌握液压控制系统原理、设计与使用提供了方便。

本书系统性较强，内容结合实际，理论分析严谨、精要。讲述方法由浅入深，是一本适合于工科类大学生及现场工程技术人员学习液压技术与液压控制系统的精要教材。

由于作者水平有限，书中的缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编著者

2000年12月

# 目 录

|                         |      |
|-------------------------|------|
| 第一章 概 述                 | (1)  |
| 第一节 液压传动的应用及发展现状        | (1)  |
| 第二节 传动的类型及液压传动的基本原理     | (2)  |
| 第三节 各种传动方式的比较           | (3)  |
| 第四节 液压传动系统的组成及工作原理      | (4)  |
| 第五节 液压系统图及图形符号          | (6)  |
| 第二章 液压流体力学基础            | (8)  |
| 第一节 液压油                 | (8)  |
| 第二节 液体压力和静压强公式          | (17) |
| 第三节 连续性原理与伯努力方程         | (20) |
| 第四节 流体的动量法则             | (23) |
| 第五节 实际流体能量损失            | (23) |
| 第六节 液压冲击与气穴现象           | (28) |
| 第三章 液压系统的基本回路           | (31) |
| 第一节 方向控制基本回路            | (31) |
| 第二节 压力控制回路              | (32) |
| 第三节 卸荷回路                | (36) |
| 第四节 限速回路                | (38) |
| 第五节 多油缸顺序动作回路           | (39) |
| 第六节 调速回路                | (43) |
| 第七节 增速回路                | (55) |
| 第八节 速度换接回路              | (57) |
| 第九节 同步控制回路              | (60) |
| 第十节 浮动回路                | (62) |
| 第十一节 油马达控制回路            | (64) |
| 第四章 典型液压传动系统实例分析        | (68) |
| 第一节 液压系统的形式及其评价         | (68) |
| 第二节 液压随动恒功率控制系统         | (76) |
| 第三节 Baker 修井机起升系统       | (78) |
| 第四节 推土机液压系统             | (80) |
| 第五节 单斗挖掘机液压系统           | (82) |
| 第六节 QY3 型汽车起重机液压系统      | (83) |
| 第七节 YT4543 型动力滑台液压系统    | (86) |
| 第八节 CB3463-1 型六角车床的液压系统 | (90) |
| 第五章 液压伺服控制基本回路及系统       | (98) |

|                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| 第一节 液压伺服控制的基本概念 .....         | (98)         |
| 第二节 伺服控制基本回路 .....            | (101)        |
| 第三节 液压伺服系统在工程机械中的应用 .....     | (116)        |
| <b>第六章 液压传动系统的设计与使用 .....</b> | <b>(123)</b> |
| 第一节 液压传动系统的设计 .....           | (123)        |
| 第二节 液压传动系统的安装与调试 .....        | (130)        |
| 第三节 液压传动系统的使用与维护 .....        | (135)        |
| <b>附录 常用液压系统图形符号 .....</b>    | <b>(138)</b> |
| <b>参考文献 .....</b>             | <b>(146)</b> |

# 第一章 概 述

## 第一节 液压传动的应用及发展现状

像机械传动一样，液压传动也是传送动力的方法之一。它是靠密封容器内受静压力的液体传送动力的（图 1.1）。在液压系统中，油泵将具有一定转矩  $M$  和转速  $n$  的电动机的机械能，转变成具有一定压力  $p$  和流量  $Q$  的液压能，通过控制阀的调节，借助执行机构（油缸和油马达）还原成所需要的移动或回转的机械能。由于这种动力的变换和传递是依靠液压油作传动介质的，所以叫液压传动。

液压传动技术是在 18 世纪末出现的。1795 年，英国制成了世界上第一台工业设备水压机。19 世纪末，德国制造了液压龙门刨床，美国制造了液压六角车床和液压磨床。但由于当时没有成熟的液压元件，因而液压技术并未得到普遍使用。

20 世纪初，由于精研加工工艺的成熟，为液压元件向高压、高效率的发展创造了条件，因而在第一次世界大战到第二次世界大战期间，液压技术被用于军事上而得到很大发展。在这期间出现了动作准确、反应迅速的液压传动装置，并用于大炮、飞机、坦克上，而且在舰艇上也出现了电液伺服阀和伺服系统。第二次世界大战后，将这些军事上应用的成果转用到民用工业，并且由于控制论的发展以及高性能液压油不断使用和液压元件结构的不断改进，液压技术得到了飞速的发展。20 世纪 50 年代初，液压技术已开始应用到各行各业，如机床、汽车、工程机械等。在这期间出现了仿形机械、自动机床、各种流水作业线以及自动传动器的液控系统。到了 20 世纪 60 年代以至最近二三十年以来，由于空间技术、大型舰船以及电子技术的发展，液压技术的发展又达到一个全新的阶段。目前，液压技术广泛用于机械制造、冶金、造船、石油化工、建筑、汽车、工程机械、注塑、纺织、食品加工及其它部门。在国防方面，如飞机、舰艇、大炮、坦克上的应用以及原子能方面的应用仍是一个重要的技术领域，已经出现了反应灵敏、动作准确的液压随动系统。特别是比例阀的出现和发展，它与电子技术结合起来，可以大面积地实现生产过程的自动化。现在，在生产中应用着工作压力  $400 \times 10^5 \text{ Pa}$  以上、流量  $1000 \text{ L/min}$  ( $16.67 \text{ L/s}$ ) 以上、功率  $368 \text{ kW}$  以上的高压大功率元件。液压马达可以做到重量只是同功率电动机的  $10\% \sim 20\%$ ，体积是同功率电动机的  $12\% \sim 13\%$ 。液压元件和系统达到了小型化、集成化。例如美国生产的 Allison 传动器，实现一个 5 挡（或以上）变速箱的动力换挡、自动跳挡的液压控制系统，全部元件和系统采用集成板结构，其面积只有  $1 \text{ ft}^2$ ，厚度只有  $1 \text{ in}$ 。其它如静压轴承、静压导轨、静压丝杆等都在生产中得到成功应用。近年来又出现了交流液压技术，如液压镐及原子能工业中的机械手。此外，液压射流技术也获得了应用和发展。

总之，液压传动与伺服控制技术是近代工业技术中的一个重要分支。可以相信，随着它与迅猛发展起来的电子技术及计算机应用技术的日益紧密结合，将有更新、更高的发展。随着国民经济的发展，液压传动与伺服控制技术将会在更多方面进一步显示出其强大的威力和优越性。

## 第二节 传动的类型及液压传动的基本原理

一部机器一般都有传动机构，借助传动机构以达到对动力进行传递和控制的目的。传动的形式有多种，按照传动所采用的机件或工作介质的不同可分为机械传动、电气传动、气压传动和液体传动。

机械传动：是通过轴、齿轮、齿条、蜗轮、蜗杆、皮带、链条和杠杆等机件直接传递动力和进行控制的一种传动方式。它是发展最早而应用最为普遍的传动形式。

电气传动：是利用电力设备并调节电参数来传递动力和进行控制的一种传动方式。

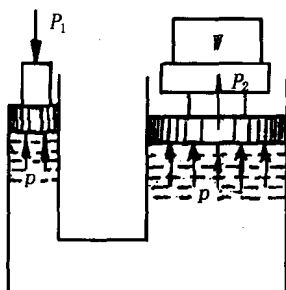
气压传动：是以压缩空气为工作介质进行能量传递和控制的传动方式。

液体传动：是以液体为工作介质进行能量传递和控制的传动方式。

在液体传动中，按其工作原理的不同又可分为液力传动和液压传动。液力传动主要是利用液体动能的传动方式，如液力耦合器和液力变矩器。这种传动机构实际上是一组离心泵与涡轮机组，也称为涡轮式传动。液力传动的工作原理是基于流体力学的动量矩定律。液压传动主要是利用液体静压能来传递能量的一种传动方式，也称为静液传动或容积式传动。

以上几种传动可以单独应用，也可以联合使用。本书着重讨论液压传动的工作原理及其工作特征。

图 1.1 为液压传动基本原理图。在两个互相连通的密封液压缸中装有油液，在液压缸的上部装有活塞，小活塞和大活塞的面积各为  $A_1$ 、 $A_2$ ，在大活塞上放有重物  $W$ 。如果在小活塞上加力  $P_1$ ，在小液压缸中油液的压力为



$$p = P_1 / A_1 \quad (1-1)$$

根据巴斯卡定律，这一压力  $p$  将要传递到液体中的所有各点，因此也传到的大的液压缸中去。这时在大活塞上所产生的作用力

$$P_2 = pA_2 \quad (1-2)$$

将式 (1-1) 代入式 (1-2)，得

$$P_2 = A_2 P_1 / A_1 \quad (1-3)$$

$P_2$  如果足以克服重物所产生的作用力，就可以把重物抬起。从式 (1-3) 可以看出，如果  $A_2$  很大， $A_1$  很小，则只需要很小的力  $P_1$  便能获得很大的力  $P_2$  推动重物  $W$ ，可见这是一个力的放大机构。显然，如果重物  $W$  很重，即外界负载很大，则阻止油液运动的阻力很大，液压缸中的油压  $p$  必须相应升高才能推动大活塞运动；如果外界负载很小，油液只要有很小的压力就能够推动大活塞运动，液压缸中的油压也就不会继续升高。这就说明了系统中的油压是由外界负载决定的。

另外，若小活塞在  $t$  时间内向下移动一段距离  $h_1$ ，小液压缸排出油液的体积为  $A_1 h_1$ ，而大活塞一定要上升一段距离  $h_2$  并且  $A_1 h_1 = A_2 h_2$ ；即小液压缸排出油液的体积等于进入大液压缸油液的体积。将此式两端同除以时间  $t$ ，整理之后可得

$$v_2 = v_1 A_1 / A_2 \quad (1-4)$$

式中  $v_1$ ——小活塞的运动速度；

$v_2$ ——大活塞的运动速度。

由于  $A_1/A_2$  小于 1，则  $v_2 < v_1$ ，由此可见这又是一个速度变换机构，相当于一个减速传动机构。

由式 (1-4) 可得

$$v_2 A_2 = v_1 A_1 = Q \quad (1-5)$$

式中  $Q$ ——进出液压缸的流量。

由式 (1-5) 可以看出，当液压缸面积一定时，活塞运动的速度取决于流量。

由上述液压传动原理，可归纳出液压传动的特点为：

- (1) 采用液体作为传动介质；
- (2) 必须在封闭的容器内进行；
- (3) 以液体静压能为主；
- (4) 油压  $p$  是由外界负载  $P$  决定的。
- (5) 活塞运动的速度  $v$  取决于流量  $Q$ 。

### 第三节 各种传动方式的比较

前面已经叙述了机器传动的几种方式，它们各有其特点、用途及适用范围。

机械传动的优点是传动准确可靠、操作简单、负载对传动特性几乎没有影响、传动效率高、制造容易和维护简单等。缺点是一般不能进行无级调速，机械无级变速装置虽然能够无级调速，但多应用在小功率的传动中。此外，机械传动远距离操作困难，结构也比较复杂。

电气传动的优点是能量传递方便（导线柔软、连接方便）、信号传递迅速、标准化程度高、易于实现自动化等。缺点是运动平稳性差，易受外界负载的影响；惯性大、换向慢，电气设备和元件要耗用大量的有色金属，成本高；受温度、湿度、振动、腐蚀等环境影响较大。

气压传动的优点是结构简单、成本低、易于实现无级变速；气体粘性小，阻力损失小，流速可以很高，如可以使气动内圆磨头的转速每分钟达 10 万多转、气动凿岩机冲击次数每分钟高达 3500 次；能防火、防爆，可以在高温下工作。缺点是空气容易压缩，负载对传动特性的影响较大，不宜在低温下工作（凝结成水，结冰）；空气不易被密封，气压传动系统的工作压力一般小于 0.7~0.8MPa，只适用于小功率传动。

与其它传动形式（如机械传动、电力传动、气压传动）相比较，液压传动有下列优点：

(1) 液压传动装置能在运行过程中进行无级调速，调速方便且调速的范围比较大，达 100:1 至 2000:1。

(2) 在同等功率的情况下，液压传动装置的体积小，重量轻，惯性小，结构紧凑（如液压马达的重量只有同功率电动机重量的 10%~20%），而且能传递较大的力或力矩。

(3) 液压传动装置工作比较平稳，反应快，冲击小，能高速起动、制动和换向。液压传动装置的换向频繁，回转运动每分钟可达 500 次，往复直线运动每分钟可达 400~1000 次。

(4) 液压传动装置的控制、调节比较简单，操纵比较方便、省力，易于实现自动化。当

与电气装置配合使用时，更能实现复杂的顺序动作和远程控制。

(5) 液压传动装置易于实现过载保护。由于采用油液作为工作介质，液压传动装置能自行润滑，故使用寿命较长。

(6) 液压传动装置由于其元件实现了系列化、标准化、通用化，故易于设计、制造和推广使用。

(7) 液压传动装置能很方便地实现直线运动和回转运动，液压元件的排列和布置也具有很大的机动灵活性。

(8) 在液压传动装置中，由于功率损失等原因所产生的热量可由流动着的油液带走，因此，可以避免在系统某些局部部位产生过度温升现象。

液压传动的主要缺点为：

(1) 液压传动装置以液体为工作介质，无法避免泄漏。液体的泄漏和液体的可压缩性使液压传动无法保证严格的传动比。

(2) 液压传动装置由于在能量转换及传递过程中存在着机械摩擦损失、压力损失和泄漏损失而总效率降低，不宜作远距离传动。

(3) 液压传动装置对油温和负载的变化都比较敏感，不宜在低温及高温条件下工作。液压传动装置对油液的污染亦比较敏感，要求有良好的过滤设施。

(4) 液压传动装置要求有单独的能源（例如，液压泵站），液压能不能像电能那样从远处送来。液压元件制造精度要求高、造价贵，须组织专业生产。

(5) 液压传动装置出现故障时不易追查原因、迅速排除。

总之，液压传动的优点较多，其缺点则随着生产技术的发展正在逐步加以克服，因此液压传动在现代化的生产中有着广阔的发展前景。

## 第四节 液压传动系统的组成及工作原理

在现实应用中，一个液压传动系统往往比较复杂。下面通过一个简化了的磨床工作台的液压传动系统，来概括地说明液压传动系统的组成及工作原理。

图 1.2 是其工作原理图。由图可见：液压系统由油箱 1、滤油器 2、液压泵 4、溢流阀 8、开停阀 11、节流阀 13、换向阀 15、液压缸 19 等元件，以及连接这些元件的油管 3、5、9、10、12、14、18、27、29 和 30 等组成。液压泵 4 由电动机带动旋转，从油箱 1 中吸油。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，在图 1.2 (a) 所示的状态下，它流经开停阀 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，推动活塞 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，液压缸右腔的油液从油管 27、换向阀 15、油管 29 排回油箱。这样实现了用液压来驱动机床部件的运动。

工作台的侧面装有挡块 21 和 24，当工作台向右移动到其左挡块 21 碰着换向杆 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，使之移向左位，成为图 1.2 (b) 所示的状态。这时，从油管 14 输来的压力油经换向阀 15 后，由油管 27 进入液压缸的右腔，推动工作台等向左运动，并使液压缸左腔的油液由油管 18、换向阀 15、油管 29 排回油箱。此后，当工作台向左移动到其右挡块 24 碰着换向杆 17，使它逆时针方向转动而使阀芯 28 移向右位，回复到图 1.2 (a) 的状态时，工作台又向右移动。如此循环往复，工作台

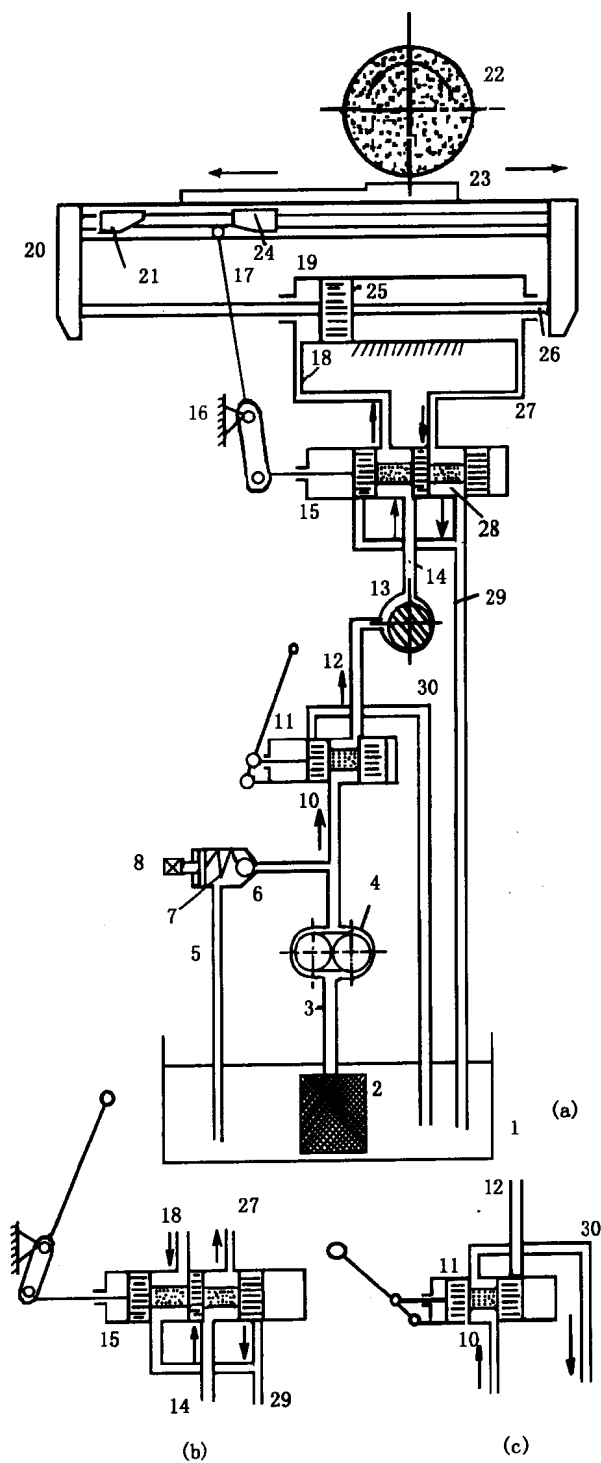


图 1.2 磨床工作台液压系统工作原理图 (半结构图)

1—油箱；2—滤油器；3—吸油管；4—液压泵；5—回油管；6—钢球；7—弹簧；8—溢流阀；  
9、10、12、14、18、27、29、30—油管；11—开停阀；13—节流阀；15—换向阀；16—支点；17—换向杆；  
19—液压缸；20—工作台；21、24—挡块；22—砂轮；23—工件；25—活塞；26—活塞杆；28—阀芯

不停地左右移动，磨削加工就可以持续地进行下去。

工作台移动速度的快慢是通过节流阀 13 来调节的。节流阀像个自来水龙头，可以开大，也可以关小。当它开大时，通入液压缸的油液增多，工作台移动速度就加快；当它关小时，移动速度就减慢。

工作台移动时，为了克服导轨的摩擦力、砂轮 22 和工件 23 间的切削力等，液压缸需要有一个足够大的推力；这个推力是由油液压力产生的（油液的压力越大，工作台受到的推力亦越大）。另外，液压泵输出的油液除了通过油管 10 输向液压缸外，还通过油管 9 进入溢流阀 8。当油流的压力升高到稍稍超过溢流阀中弹簧 7 的调定压力时，钢球 6 被顶开，油液经油管 5 排回油箱，这时油液的压力不再升高，维持定值。在这里，溢流阀在控制油液压力的同时，还起着把液压泵输出的多余油液排回油箱的作用。

当需要短期停止工作台运动时（如在装卸工件或测量尺寸时），可以拨动开停阀 11 的操纵手柄，使其阀芯位于左位，如图 1.2 (c) 的状态。这时，液压泵输出的油液由油管 10、开停阀 11、油管 30 直接排回油箱，不再输到液压缸中去，工作台停止运动。

液压系统中的滤油器 2 的作用是滤去油中的杂质物质，保证油液清洁，使系统工作正常。

从上面这个简单的液压传动系统例子中可以看到：

(1) 液压传动是依靠运动着的液体的压力能来传递动力的，它与依靠液体的动能来传递动力的“液力传动”（如水轮机、液力变矩器等）有质的不同。

(2) 液压传动系统工作时，液压泵先把电动机传来的机械能转变为油液的压力能；油液在被输送入液压缸后，又通过液压缸把油液的压力能转变成驱动工作台运动的机械能。

(3) 液压传动系统中的油液是在受调节、控制的状态下进行工作的，液压传动和液压控制常常是难以截然分割的。

(4) 液压传动系统必须满足它所驱动的部件（在上例中是机床工作台）在力和速度方面提出的要求。

从上面的例子可以看出，液压传动系统有以下 4 个主要组成部分：

(1) 能源装置：它是把机械能转换成油液压力能的装置。一般最常见的形式就是液压泵，它给液压系统提供压力油，使整个系统能够动作起来。

(2) 执行装置：它是把油液的液压能转换成机械能的装置。在上例中，它是作直线运动的液压缸，在其它场合还有用于转动的液压马达及摆动液马达等。

(3) 控制调节装置：它们是控制液压系统中油液的压力、流量和流动方向的装置。在上例中，是开停阀、溢流阀、节流阀、换向阀等液压元件的总称。这些元件是保证系统正常工作必不可少的组成部分。

(4) 辅助装置：它们是除上述三项以外液压系统中需要的其它装置。如上例中的油箱、滤油器、油管等。它们对保证液压系统可靠、稳定、持久地工作有重大作用。

## 第五节 液压系统图及图形符号

液压系统的结构图绘制起来十分费事，而且只能供一般地了解外形结构、组装和维护之用。当要求了解系统的工作原理时，必须使用图 1.2 那样的系统图。这是一幅半结构式的工作原理图，直观性强，容易理解，但绘制起来还是比较麻烦，特别是液压元件数量较多时更

是如此。为了适应液压技术的迅速发展，我国已制订了一套液压及气动图形符号（GB786—76），可以方便而清晰地表达各种类型的液压系统。图 1.3 即为用这套符号绘制出来的上述磨床工作台的液压系统。由于符号表示的是元件的职能而不是它的结构，因此图面显得特别简洁。有些液压元件的职能如果无法用这些符号表示，仍可以采用其结构示意图。

因此，为了能够读懂并能够准确无误地绘出液压系统图，必须掌握各液压元件的职能符号。常用液压元件的职能符号见附录。

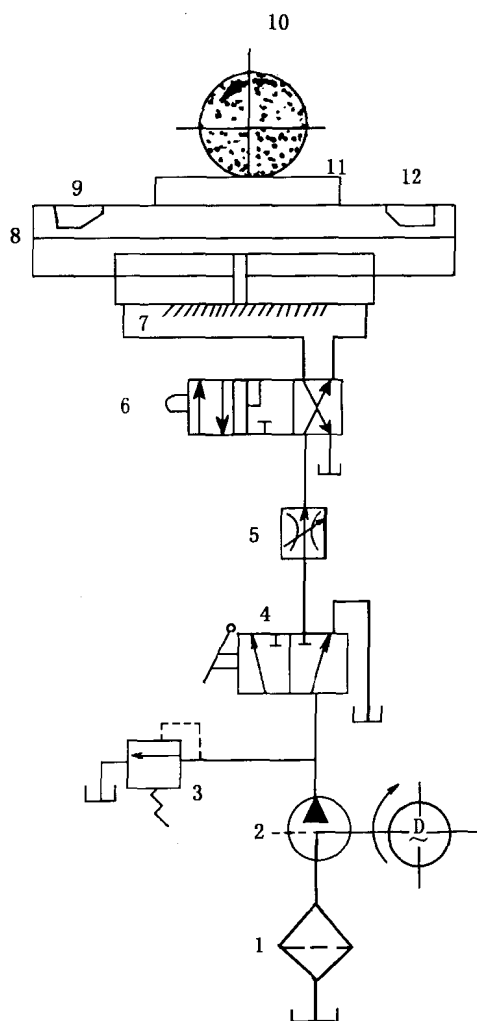


图 1.3 磨床工作台液压系统工作原理图（职能符号图）

1—滤油器；2—液压泵；3—溢流阀；4—开停阀；5—节流阀；6—换向阀；

7—液压缸；8—工作台；9—挡块；10—砂轮；11—工件；12—挡块

## 第二章 液压流体力学基础

### 第一节 液 压 油

#### 一、液压油的性质

在液压传动装置中，通常都采用矿物油（石油基液体）作为工作介质，它不但能传递能量，而且对液压装置的机构与零件起润滑作用。液压系统中液体的压力、流速和温度在很大范围内变化着，油的质量优劣直接影响着液压系统的工作，因而对工作液体性质的研究和作液体的选择是不容忽视的。

##### 1. 液压油的物理性质

##### (1) 重度和密度：

①重度：液体单位体积的重量称为重度。

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (2-1)$$

式中  $G$ ——液体的重量，N；

$V$ ——液体的体积， $\text{m}^3$ 。

矿物油的重度  $\gamma = 8400 \sim 9500 \text{N/m}^3$ 。

②密度：液体单位体积的质量称为密度。

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

式中  $m$ ——液体的质量，kg；

$V$ ——液体的体积， $\text{m}^3$ 。

矿物油的密度  $\rho = 850 \sim 960 \text{kg/m}^3$ 。

由于重量等于质量乘重力加速度  $g$ ，即  $G = mg$ ，所以

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (2-3)$$

上式表明了重度与密度的关系。重力加速度  $g$  的数值为  $9.81 \text{m/s}^2$ 。

液压油的密度和重度都随压力和温度的变化而变化。液体的密度和重度随温度变化甚微，所以在一般使用条件下，油液的密度可视为常数。

##### (2) 压缩性：

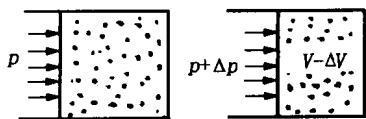


图 2.1 压力升高时油  
液体积的变化

液体受压力作用发生体积变化的性质叫压缩性。液体的压缩性极小，在很多场合下，可以忽略不计。但在受压体积较大或进行动态分析时就有必要考虑液体的可压缩性。液体的相对压缩量与压力增量成正比，如图 2.1。

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

式中  $V$ ——增压前液体的体积,  $\text{m}^3$ ;

$\Delta V$ ——压力增量  $\Delta p$  时, 因压缩而减小的体积,  $\text{m}^3$ ;

$\Delta p$ ——压力增量,  $\text{Pa}$ ;

$\beta$ ——液体压缩率或称压缩系数。

式 (2-4) 中  $\beta$  为正值, 而当压力增加,  $\Delta p$  为正值时, 体积总是减少, 即  $\Delta V$  为负值, 所以在上式的左边要加一负号。 $\beta$  值的物理意义是: 液体的压力增加为单位增量时, 体积的相对变化率。

$\beta$  值与压缩的过程有关, 等温压缩与绝热压缩系数值不同, 但液压油的等温和绝热压缩系数差别很小, 故工程上通常不加以区别, 常用液压油的压缩率为  $\beta = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ 。

压缩系数  $\beta$  的倒数称为容积弹性模数, 其值为

$$E = \frac{1}{\beta} = (1.4 \sim 1.9) \times 10^9 \text{ N/m}^2 \quad (2-5)$$

从上式中可以看出, 油的弹性模数约比钢的弹性模数小 100~150 倍。当油中混有空气时, 可压缩性将显著增加。例如油中混有 1% 空气时, 则容积弹性模数降低到纯油的 5% 左右; 油中混有 5% 空气时, 容积弹性模数降低到纯油的 1% 左右, 故液压系统在使用和设计时应努力设法不使油中混有空气。

### (3) 粘度:

①粘度的定义及其单位: 粘性是液体流动时在液体分子间所呈现的内部摩擦力。粘性是液压油的各种物理性质中最重要的特性, 也是选择液压油的一个非常重要的依据。粘性的大小可用粘度来表示。

图 2.2 (a) 所示是平行平板间液体的流动, 设上平板以速度  $v$  相对下平板运动, 紧贴于上平板上的油液粘附于上平板上, 其速度为  $v$ 。紧贴于下平板上的油液粘附于下平板上, 其速度为零, 中间油液的速度按线性分布。我们可以把这种流动看成是许多无限薄的油层在运动, 如图 2.2 (b) 所示。当运动较快的油层在运动较慢的油层上滑过时, 两层间由于粘

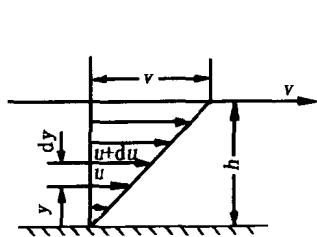


图 2.2 (a) 平行平板间液体的流动

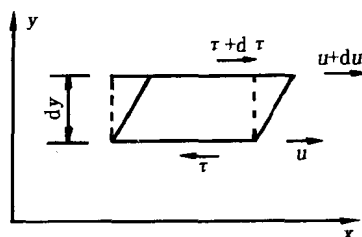


图 2.2 (b) 粘性液体两无限薄层间滑移变形

性就产生内摩擦力的作用。根据实际测定数据得知, 油层间的内摩擦力  $F_\tau$ , 与油层的接触面积  $A$  及油层的相对速度  $du$  成正比, 而与此二油层的距离  $dy$  成反比, 即

$$F_\tau = \mu A \frac{du}{dy}$$

以  $\tau = \frac{F_\tau}{A}$  表示切应力, 则有

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2-6)$$

$\frac{du}{dy}$  称为速度梯度，又称剪切率， $\mu$  是一比例系数，称为绝对粘度，又称动力粘度。当速度梯度变化时， $\mu$  为不变常数的液体称为牛顿液体， $\mu$  为变数的液体称为非牛顿液体。除高粘度或含有特种添加剂的油液外，一般的液压油均可视为牛顿液体。粘度有如下几种表示方法：

A. 动力粘度  $\mu$ 。在物理意义上讲，即是面积各为  $1\text{cm}^2$  和相距  $1\text{cm}$  两层液体，当其中的一层液体以  $1\text{cm/s}$  的速度与另一层液体作相对运动时所产生的摩擦力。

动力粘度的物理单位为达因·秒/厘米<sup>2</sup>，又称“泊”。百分之一“泊”称为“厘泊”。在国际单位制中，绝对粘度的单位为帕·秒。国际单位和物理单位换算关系如下：

$$1 \text{ 泊 (达因·秒/厘米}^2\text{)} = 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}; \quad 1 \text{ 厘泊} = 0.1 \times 10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

B. 运动粘度  $\nu$ 。在计算中经常采用运动粘度。它是液体的动力粘度与其密度之比值

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2-7)$$

式中  $\mu$ ——液体的动力粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ；

$\rho$ ——液体的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

运动粘度在物理单位制中为厘米<sup>2</sup>/秒，这个单位习惯上称为沱 (St)。沱的单位太大，应用不便，常用厘沱来表示：

$$1 \text{ 厘沱} = 10^{-2} \text{ St} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

运动粘度  $\nu$  没有什么特殊的物理意义，只是因为液压系统的理论分析和计算中常常碰到绝对粘度和密度  $\rho$  的比值，因而才采用运动粘度这个单位来代替  $\mu/\rho$ 。它之所以称为运动粘度，是因为在它的单位中只有长度与时间因次的缘故。

C. 相对粘度。动力粘度和运动粘度是理论分析和推导中经常使用的粘度单位，它们实际上难以直接测量，因此工程上常采用另一种可以用仪器直接测量的粘度表示法，即相对粘度。

相对粘度是以相对于水的粘性的大小来表示该液体的粘度的。相对粘度又称条件粘度。各国采用的相对粘度单位有所不同。有的用赛氏粘度，有的用雷氏粘度，我国采用恩氏粘度。

恩氏粘度的测定方法如下：测定  $200\text{cm}^3$  某一温度的被测液体在自重作用下流过直径  $2.8\text{mm}$  小孔所需的时间  $t_A$ ，然后测出同体积的蒸馏水在  $20^\circ\text{C}$  时流过同一孔所需时间  $t_B$  ( $t_B = 50 \sim 52\text{s}$ )， $t_A$  与  $t_B$  的比值即为流体的恩氏粘度值。恩氏粘度用符号  $^\circ\text{E}$  表示。被测液体温度  $t$  时的恩氏粘度用符号  $^\circ\text{E}_t$  表示。

工业上一般以  $20^\circ\text{C}$ 、 $50^\circ\text{C}$ 、 $100^\circ\text{C}$  作为测定恩氏粘度的标准温度，并相应地以符号  $^\circ\text{E}_{20}$ 、 $^\circ\text{E}_{50}$  和  $^\circ\text{E}_{100}$  来表示之。

工作液的粘度对液压装置的工作影响很大。粘度越大则液体通过缝隙的漏泄越小，但液体流经管路孔道时的摩擦阻力增加，粘度过大还易使液压泵吸油不足，所以应选择粘度适当的工作液体。一般说来，对于高压系统及工作温度较高时选择粘度较大的油液，反之则应选择粘度较小的油液。

②调合油的粘度及调合率的计算：有时，一种液压油的粘度不合乎某种用途的要求，必

须用几种液压油调合以达到所要求的粘度。如用两种液压油调合成调合油，其粘度的计算公式如下：

$$^{\circ}\text{E} = \frac{a^{\circ}\text{E}_1 + b^{\circ}\text{E}_2 - c (^{\circ}\text{E}_1 - ^{\circ}\text{E}_2)}{100} \quad (2-8)$$

式中  $^{\circ}\text{E}_1$ 、 $^{\circ}\text{E}_2$  和  $^{\circ}\text{E}$ ——分别表示第一种油、第二种油及两种油调合后的恩氏粘度 ( $^{\circ}\text{E}_1 > ^{\circ}\text{E}_2$ )；

$a$ 、 $b$ ——两种油液各占的百分比；

$c$ ——系数，其数值可参阅表 2-1。

表 2-1 系数  $c$

|         |     |      |      |      |      |      |      |    |    |
|---------|-----|------|------|------|------|------|------|----|----|
| $a$ (%) | 10  | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80 | 90 |
| $b$ (%) | 90  | 80   | 70   | 60   | 50   | 40   | 30   | 20 | 10 |
| $c$     | 6.7 | 13.1 | 17.9 | 22.1 | 25.5 | 27.9 | 28.2 | 25 | 17 |

#### (4) 空气溶解量：

液压油中所含空气的量（以体积百分比计）叫含气量。空气在油中的状态可分混入和溶解两种，混入油的空气以直径 0.25~0.5mm 的气泡状态悬浮于油中，它对液压油的容积弹性模数和粘度产生很大影响。溶解于油中的空气呈均匀的溶解状态，它对液压油的容积弹性模数和粘度不产生影响。

油中空气的溶解量正比于绝对压力，在一个大气压和常温下，按体积百分比计的空气溶解量对矿物油系液压油为 5%~10%，合成型液压油 5%，水、乙醇系为 1%~2%，油中水型乳化液为 5%~7%。

压力加大时，部分混入空气将溶入油中，其余的仍以气相存在。混入的空气量增加，则油液的容积弹性模数急剧下降，油液中的压力波传播速度减慢。油液的粘度将按下列经验公式计算：

$$\mu_B = \mu_0 (1 + 0.015B) \quad (2-9)$$

式中  $B$ ——混入空气的体积百分比；

$\mu_0$ ——液压油中没有混入空气时的动力粘度；

$\mu_B$ ——含有  $B$  % 的混入空气时的动力粘度。

如果压力低于某一压力  $p_B$  值时，则油液中过饱和的空气发生气泡而加速分离出来，这个压力称为空气分离压。影响空气分离压的因素是因油液的种类、空气溶解量和温度而不同，油温越高，空气溶解越多，则空气分离压越高。

#### (5) 其它物理性质：

①比热容：单位质量的液体增加每单位温度所需的热量叫做比热容  $c$ 。对矿物油系液压油可取

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho_{15}}} (0.403 + 0.00081t) \times 4186.8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}) \quad (2-10)$$

式中  $t$ ——温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\rho_{15}$ ——在 15 $^{\circ}\text{C}$  时的油的密度， $\text{kg}/\text{L}$ 。

②导热系数：液体的导热系数系指在沿热流方向单位温度梯度（即在单位长度内温度降