

四川省产教融合示范项目系列教材

# 工程机械液压技术

王海波 漆 俐 杜 润 © 主编  
侯 刚 王 伟 © 主审

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

工程机械是国家基础建设的主要设备，广泛应用于矿山、公路、铁路、机场、水利、房地产以及其他公共设施的建设中，特别是在重大工程施工中发挥着重要作用。工程机械行业是国民经济的支柱产业，是国家重大装备制造业，更是国家综合经济实力的象征。

液压技术在工程机械中应用非常广泛，尤其是高性能液压元件以及为适应不同机型和工况所组成的高性能液压控制系统，是工程机械稳定、高效运行必不可少的支撑。液压传动与控制是工程机械基础性技术，是各主机产业升级、技术进步的重要保障，是工程机械的核心技术之一。

有关液压传动与控制的教材和专著已有很多，对液压泵和液压控制阀的结构、原理、特性分析及常用回路等基础性液压知识已有详尽介绍。但针对工程机械液压技术的专业书籍尚不多见，且内容也不全面，本书即以此而编写。本书共分为 8 章，以工程机械应用的液压技术为主，介绍了变量泵的压力、流量、功率控制及复合控制；多路阀、插装阀的结构及其在工程机械上的应用；工程机械工作装置和底盘部分常用机构液压回路；典型工程机械整机液压系统分析等内容。

本书由西南交通大学机械工程学院工程机械系王海波、漆俐、杜润共同编写，由贵阳海之力液压有限公司高级工程师侯刚、博世力士乐（常州）有限公司高级工程师王伟主审。具体编写分工如下：第 1、2、3 章由王海波编写，第 4、5、6 章由漆俐编写，第 7、8 章由杜润编写。

本书由浅入深，力求通俗易懂，对复杂的液压系统进行了简化及分步讲解，可以作为机械类本科生专业课程教材、在职液压技术人员的培训教材，还适合机械类从业人员，特别是工程机械和农业机械的液压设计师等参考使用。

本书在编写过程中得到了许多专家、同仁的大力支持，感谢西南交通大学王少华、黄松和、吴晓、丁君军对本书出版的大力支持，也特别感谢贵阳海之力液压有限公司高级工程师侯刚、博世力士乐（常州）有限公司高级工程师王伟对本书编写提出的宝贵意见和建议。感谢研究生李金键、黄凡、黄晓烽、刘祎喆、徐世明和 Amin Issa Alsaïd Hammed 参与本书液压

图的绘制。同时，编者参考了同类教材和有关文献，引用了力士乐、恒立、川崎、三一重工等公司的部分产品样本资料，在此谨向他们表示衷心的感谢。

本书的出版得到了四川省产教融合示范项目——“交大-九州电子信息装备产教融合示范”的资助。

由于编者经验不足、水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大师生、读者提出宝贵意见，以便及时修订。

编者  
2023年5月



工程机械液压技术实例

第 1 章 液压传动与控制基础知识	1
1.1 液压传动与控制基本概念	1
1.2 工程机械液压系统的组成	3
1.3 基本液阻网络	5
1.4 液压传动的工作介质	10
复习思考题	16
第 2 章 液压动力源及控制	17
2.1 原动机	18
2.2 变量泵压力控制	21
2.3 变量泵恒功率控制	23
2.4 变量泵转速感应控制	30
2.5 变量泵流量控制	41
2.6 变量泵的复合控制	59
复习思考题	64
第 3 章 液压控制阀	67
3.1 液压控制阀的类型及功能	67
3.2 插装阀	76
3.3 叠加阀	103
3.4 多路阀	108
复习思考题	130
第 4 章 液压执行元件	132
4.1 液压缸的类型与特点	132
4.2 液压缸的基本参数	139
4.3 工程机械液压缸典型结构	140
4.4 液压马达	147
复习思考题	151

<b>第 5 章 工程机械工作装置常用机构液压回路</b>	153
5.1 变幅机构液压回路	153
5.2 回转机构液压回路	163
5.3 起升机构液压回路	173
5.4 伸缩机构液压回路	186
复习思考题	200
<b>第 6 章 工程机械底盘常用机构液压回路</b>	202
6.1 支腿机构液压回路	202
6.2 行走机构液压回路	207
6.3 转向机构液压回路	215
6.4 制动机构液压回路	230
6.5 动力换挡变速器液压控制回路	234
复习思考题	237
<b>第 7 章 挖掘机液压系统</b>	239
7.1 挖掘机概述	239
7.2 主油泵控制分析	245
7.3 多路阀系统	251
7.4 回转机构液压系统及其控制	259
7.5 行走机构液压系统及其控制	264
7.6 先导控制	265
复习思考题	266
<b>第 8 章 起重机液压系统</b>	268
8.1 起重机概述	268
8.2 汽车式起重机液压系统总体组成	270
8.3 汽车式起重机下车液压系统分析	272
8.4 汽车式起重机上车液压系统分析	276
复习思考题	280
<b>参考文献</b>	281

# 第 1 章 液压传动与控制基础知识

## 1.1 液压传动与控制基本概念

一部完整的机器通常由原动机、传动系统、控制系统、工作装置四大部分组成。原动机为整机提供动力；传动系统把原动机的动力传递到执行机构，为走行、作业、转向、制动及控制系统提供动力。常见的传动类型分为机械传动、电气传动、流体传动三种，能量或动力传递的方式及介质通常用作区别不同传动类型的判断依据，如图 1-1 所示。

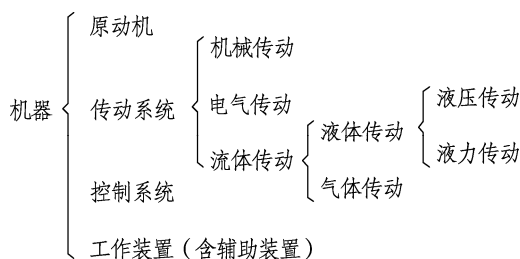


图 1-1 传动类型

流体传动是以流体为工作介质，应用帕斯卡原理进行能量传递的传动，包括气体传动和液体传动。气体传动是以气体为工作介质的流体传动，液体传动是以液体为工作介质的流体传动。液体传动系统指的是在一个或多个环节以液体作为工作介质进行能量传递和控制的传动系统，系统中的能量在传递过程中经过多次转换，转换的能量形式有机械能和液体能等。液体能的主要形式有位能、压力能和动能，依靠液体的动能来传递能量的液体传动称为液力传动，依靠液体的压力能实现能量传递的系统称为液压传动（帕斯卡原理）。

### 1.1.1 液压传动的特点

与其他传动形式相比，液压传动的主要特点如下：

#### 1. 优点

(1) 功率密度大，结构紧凑。在同等功率下，液压传动系统比机械等其他传动系统的体积小、质量轻。

(2) 无级调速。液压装置可实现大范围速度内的无级调速。

(3) 传动平稳。液压装置在传递能量的过程中较为平稳，由于质量轻、惯性小等特点，可适应快速反应或者频繁换向等工况。

(4) 易标准化、易控制。液压装置实现了标准化设计，其制造和使用均十分方便，且对系统中压力、流量和方向的控制容易，同时可与其他如电气控制相结合，易于实现自动化。

(5) 自润滑、寿命长。液压装置的工作介质一般为液压油，可对系统中的零部件随时进行润滑，降低了零部件的损耗，提升了工作装置的寿命。

## 2. 缺点

(1) 对温度较敏感。液压传动系统在运行过程中如果发热量较大或者环境温度较高，将对其性能造成较大影响。

(2) 密封要求较高。较高的密封要求直接造成液压装置零部件的加工精度和密封件的选用十分严格。

(3) 传动比不精确、传动效率低。液压传动系统工作介质的性能造成了液压传动的传动比精度较低、传动效率较低。

(4) 发生故障不易检查。液压传动系统发生故障的原因多种多样，一般情况无法直接观察，检修过程较为烦琐。

### 1.1.2 液压系统的分类

液压控制是采用液压控制元件和液压执行元件，根据液压传动原理建立起来的控制系统，使液压系统能实现其特定的功能。液压系统控制理论按研究对象的不同分为两大类：研究连续控制系统运动规律的理论，一般称为连续控制；研究断续自动控制系统运动规律的理论，称为开关控制或逻辑控制。

图 1-2 为液压连续控制系统的两种基本控制方式：开环液压控制和闭环液压控制。图 1-2 (a) 为开环液压控制系统，输出端没有反馈信号。图 1-2 (b) 为闭环液压控制系统，输出端有检测并反馈，为反馈闭环控制。反馈控制的基本原理是利用控制装置将被控制对象的输出信号回输到系统的输入端，并与指令输入信号进行比较，形成偏差信号，以产生对被控制对象的控制作用，使系统的输出量与指令之差保持在容许的范围内。

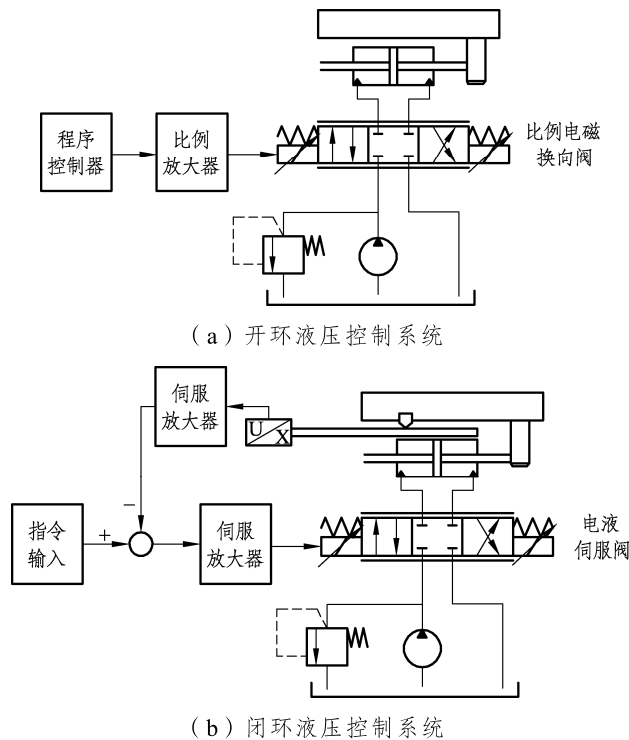


图 1-2 液压控制系统

液压闭环控制系统有多种分类方法。

#### 1. 按照控制系统完成的任务分类

按照控制系统完成的任务类型，液压控制系统可以分为液压伺服控制系统（简称液压伺服系统）和液压调节控制系统。

#### 2. 按照控制系统各组成元件的线性情况分类

按照控制系统是否包含非线性组成元件，液压控制系统可以分为线性系统和非线性系统。

#### 3. 按照控制系统各组成元件中控制信号的连续情况分类

按照控制系统中控制信号是否均为连续信号，液压控制系统可以分为连续系统和离散系统。

#### 4. 按照被控物理量分类

按照被控物理量不同，液压控制系统可以分为位置控制系统、速度控制系统、力控制系统和其他物理量控制系统。

#### 5. 按照液压控制元件或控制方式分类

按照液压控制元件类型或控制方式不同，液压控制系统可以分为阀控系统（节流控制方式）和泵控系统（容积控制方式）。进一步按照液压执行元件分类，阀控系统可分为阀控液压缸系统和阀控液压马达系统；泵控系统可分为泵控液压缸系统和泵控液压马达系统。

#### 6. 按照控制信号传递介质分类

按照控制信号传递介质不同，液压控制系统可分为机械液压控制系统（简称机液伺服系统或机液伺服机构）、电液控制系统、气液控制系统等。

## 1.2 工程机械液压系统的组成

工程机械作为一种高度集成化的机电液一体化工程装备，液压传动及控制应用广泛，比如装载机转向驱动常用液压传动，转向控制为反馈控制；工作装置驱动采用液压传动；制动系统常用液压、气压传动或液气压复合传动。随着液压技术的发展，工程机械产品液压化程度越来越高，有许多中小型产品已全液压化，如挖掘机的全液压传动与控制。

工程机械液压系统通常由五大部分组成，如图 1-3 所示。

(1) 动力源：将机械能转换成液体压力能的元件，如液压泵组件。

(2) 执行元件：把液体的压力能转换成机械能以驱动工作机构的元件，如液压缸、液压马达，工程机械一般有多个执行元件。

(3) 控制元件：对系统中油液压力、流量、方向进行控制和调节的元件，以及进行信号转换、逻辑运算和放大等功能的信号控制元件，如压力、方向、流量控制阀及伺服阀等。

(4) 辅助元件：上述三个组成部分以外的其他元件，如管道、管接头、油箱、滤油器、蓄能器、油雾器、消声器等。

(5) 工作介质：液压油，进行能量和信号的传递。

下面以 TY320 推土机工作装置液压系统（见图 1-4）为例，说明工程机械液压传动系统的组成及各部分完成的功能。



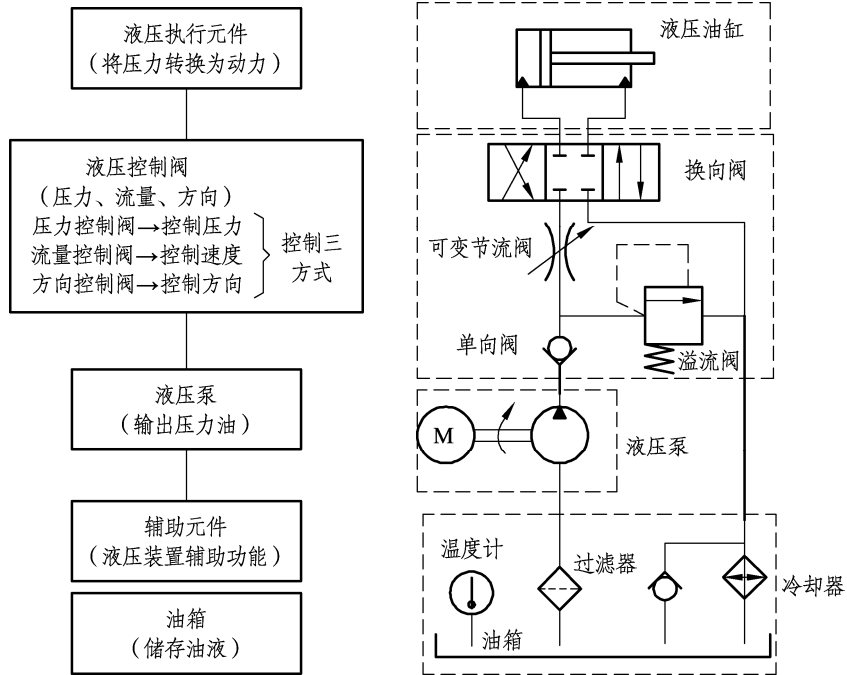
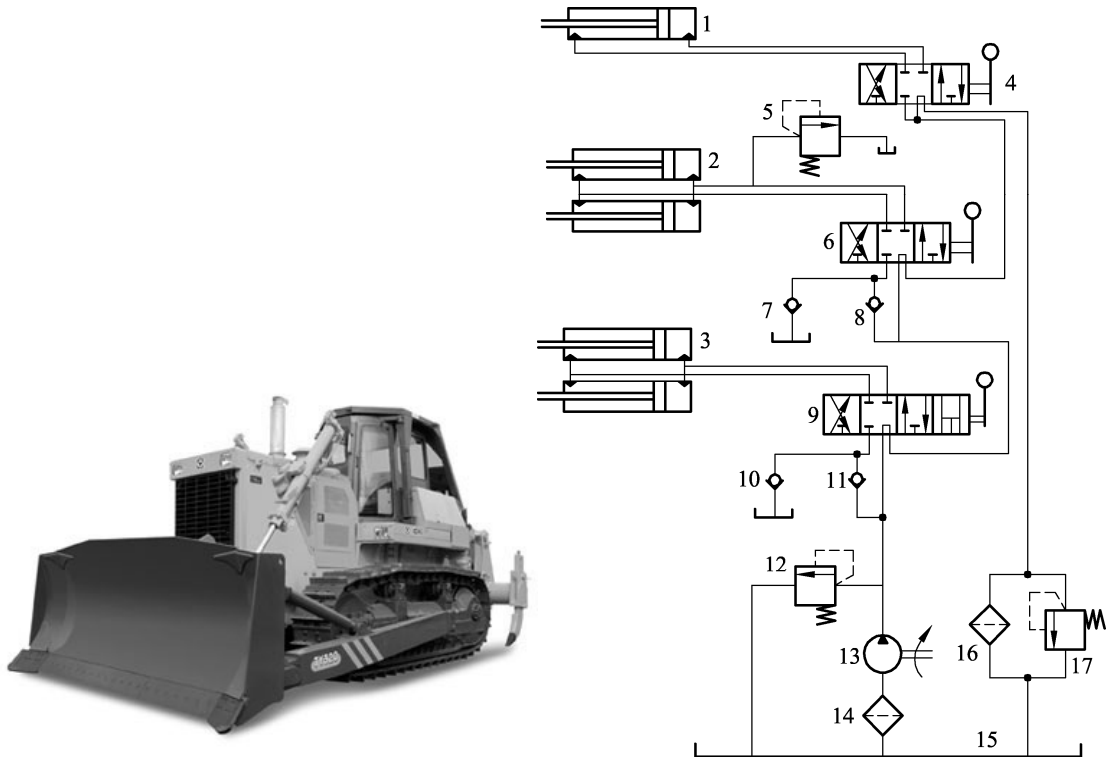


图 1-3 液压回路组成



1—铲刀垂直液压缸；2—松土器升降液压缸；3—铲刀升降液压缸；4—铲刀垂直倾斜操纵阀；  
5, 12, 17—溢流阀；6—松土器升降操纵阀；7, 10—补油单向阀；8, 11—止回单向阀；  
9—铲刀升降操纵阀；13—液压泵；14, 16—过滤器；15—油箱。

图 1-4 TY320 推土机工作装置液压系统

图示 TY320 推土机工作装置液压传动系统的动力由动力元件液压泵 13 提供；铲刀垂直液压缸 1、松土器升降液压缸 2、铲刀升降液压缸 3 为推土机工作装置液压系统中的执行元件；三种液压缸的工作顺序及系统压力由控制元件控制，控制元件包括铲刀垂直倾斜操纵阀 4、松土器升降操纵阀 6、铲刀升降操纵阀 9 三种主控制阀以及多个溢流阀、单向阀。三种主换向阀为滑阀，均采用手柄控制，控制三种液压缸实现不同动作。溢流阀 5 用于控制松土器升降液压缸 2 大腔的压力；溢流阀 17 用于防止过滤器 16 堵塞造成回油油路压力过大；单向阀 8 和 11 用于防止油液回流；单向阀 7 和 10 用于对液压缸进行从油箱直接补油，防止因自重造成液压缸因下降速度过快，供油不足，在吸油腔形成局部真空而产生气蚀现象；过滤器 14、16 和油箱 15 等作为系统中的辅助元件，用于液压传动系统进油和回油油路的油液过滤、油液清洁，降低了零部件损耗，提高了液压传动系统的寿命；工作介质液压油随着系统运行，将能量传递至执行元件，完成既定动作，同时对系统中的零部件进行润滑，带走磨屑。

### 1.3 基本液阻网络

液阻，从广义上来说，凡是能局部改变液流的过流面积使液流产生压力损失，或在压差一定的情况下，分配调节流量的液压阀阀口以及类似的结构。如薄壁小孔、短孔、细长孔、缝隙等，都称之为液阻。

液阻的本质性能体现在两个方面：隔压是其阻力特性，液阻前后的压力可以差别很大；限流是其控制特性，改变液阻的大小可以改变通过的流量。

#### 1.3.1 液阻结构与连接方式

液压系统中，从动力元件出口泵出的高压油液经过一系列方向、流量等控制元件后，在不考虑压力控制元件的情况下，一般会产生压力损失，随着系统功能逐渐复杂，压力损失逐渐增加，有时甚至达到几兆帕的压力损失，所以工作介质在流经液阻元件时，出口压力往往小于进口压力。通过液阻元件的流量  $q$  和进出口压差  $\Delta p$  之间的关系一般表示为

$$q = kA\Delta p^m \quad (1-1)$$

式中  $k$  ——液阻系数，与过流通道形状和工作介质性质有关；

$A$  ——液阻过流截面面积；

$m$  ——与液阻结构形式相关的指数。

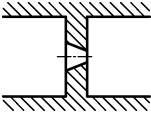
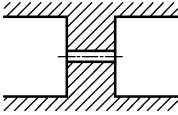
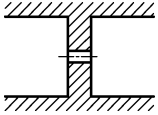
液阻的主要类型包括两种：静态液阻  $R$  和动态液阻  $R_d$ 。静态液阻指液阻元件两端压差和过流流量之间的比值；动态液阻指液阻元件两端压差的微分与过流流量微分之间的比值。两种液阻的计算公式如表 1-2 所示。

表 1-2 静态液阻和动态液阻

液阻类型	
静态液阻 / ( N · s/m <sup>5</sup> )	动态液阻 / ( N · s/m <sup>5</sup> )
$R = \Delta p / q$	$R_d = d\Delta p / dq$

在液阻元件的流量  $q$  和进出口压差  $\Delta p$  之间的计算公式中, 指数  $m$  的大小与液阻的结构形式有关, 常见的液阻结构形式主要有三种, 其结构特点和流量压力特性如表 1-3 所示。

表 1-3 常见的液阻结构形式

结构类型	薄刃型	细长孔型	混合型
长径比 $L/d$	$\leq 0.5$	$\geq 4$	$2 \sim 4$
液阻形式			
流量-压力特性	$q = c_d A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$	$q = \frac{\pi d^4}{128 \mu L} \Delta p$	$q = c^3 \sqrt{\Delta p^2}$
静态液阻	$R = \frac{\Delta p}{q} = \frac{\sqrt{\Delta p}}{c_d A \sqrt{2/\rho}}$	$R = \frac{128 \mu L}{\pi d^4}$	$R = \frac{\sqrt[3]{\Delta p}}{c}$
动态液阻	$R_d = \frac{d\Delta p}{dq} = \frac{2\sqrt{\Delta p}}{c_d A \sqrt{2/\rho}}$	$R_d = \frac{128 \mu L}{\pi d^4}$	$R_d = \frac{3\sqrt[3]{\Delta p}}{2c}$

上述液阻计算公式中:  $c_d$  为液阻的流量系数, 而系数  $c$  是一个与液阻通流孔长度  $L$  (m)、液阻直径  $d$  (m) (薄刃型结构中指小孔直径)、液压油的运动黏度  $\nu$  (m<sup>2</sup>/s) 相关的参数, 其计算公式为

$$c = \left( \frac{\pi^2 d^2}{224 \rho} \sqrt{\frac{4}{\pi L \nu}} \right)^{2/3} \quad (1-2)$$

当多个液阻元件在使用时, 最简单的组合形式主要有两种, 分别为串联与并联, 两种不同组合形式的液阻所表达的流量特性也存在区别。以圆孔的薄刃型液阻结构为例, 其流量表达式见表 1-3, 与液阻过流通道形状和液体性质有关的参数  $k$  的表达式为

$$k = c_d \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (1-3)$$

用系数  $k$ 、流量  $q$  和液阻孔径  $d$  表示的液阻  $R$  表达式为

$$R = \frac{\Delta p}{q} = \frac{q}{k^2 d^4} \quad (1-4)$$

串联和并联液阻结构的合液阻、流量、压差等参数表达式如表 1-4 所示。

表 1-4 串联与并联液阻网络特性

结构类型	串 联	并 联
等效液阻 $R$	$R_1 + R_2$	$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$
等效通流孔直径 $d$	$\left[ \frac{(d_1 d_2)^4}{d_1^4 + d_2^4} \right]^{1/4}$	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$

结构类型	串 联	并 联
液阻前后压差 $\Delta p_x$	$\Delta p_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4} \Delta p$ $\Delta p_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4} \Delta p$	—
液阻流量 $q_x$	—	$q_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2} q$ $q_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2} q$

### 1.3.2 基本桥路

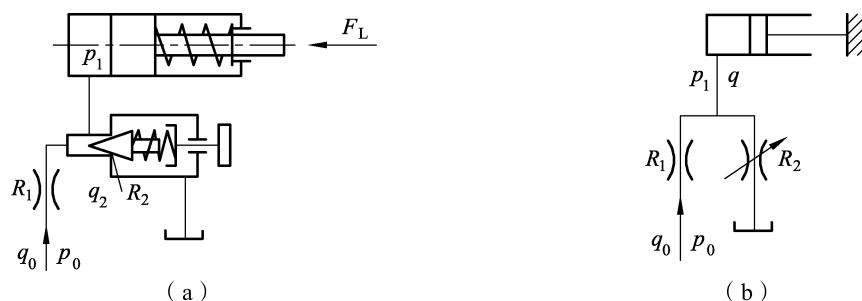
单个复杂液阻网络通常由多个基本网络组合而成，基本液阻桥路网络主要分为三类：半桥液阻网络、全桥液阻网络和  $\pi$  桥液阻网络，三种基本液阻桥路网络具有不同的液阻特性。

#### 1. 半桥液阻网络

半桥液阻网络，在同一回路中，进油与回油油路上各存在一个液阻，液阻形式可以是固定阻值，也可以是可变阻值。典型的半桥液阻网络如图 1-5 (a)、(b) 所示的锥阀和固定液阻控制的单作用单活塞杆液压缸。图 1-5 (a) 所示的液压缸单活塞杆一端作用压力为  $p_1$  的液压油，预置平衡的活塞杆另一端作用有负载力  $F_L$  和弹簧力。在该液阻网络中， $R_1$  是固定阻值液阻，锥阀口是可变阻值液阻  $R_2$ ，液阻网络的输入压力为  $p_0$ ，输出压力为  $p_1$ 。图 1-5 (b) 为液阻符号表示的该液阻网络。

对于半桥液阻网络，其形式有多种类型，按液阻是否可变和它们之间的不同排列方式，半桥液阻网络可以分为 A、B、C、D 四种类型，四种半桥液阻网络原理如图 1-5 (c)、(d)、(e)、(f) 所示。

这四种半桥液阻网络的共同点是：只有一个输入控制口，一个输出控制口，可以控制单作用单杆液压缸，并且有部分液压油流回油箱，产生能量损失。目前，半桥液阻网络主要用于先导控制、变量控制、驱动阀芯阀杆，也用于液阻网络的分压，一般不会用作主油路驱动油缸。



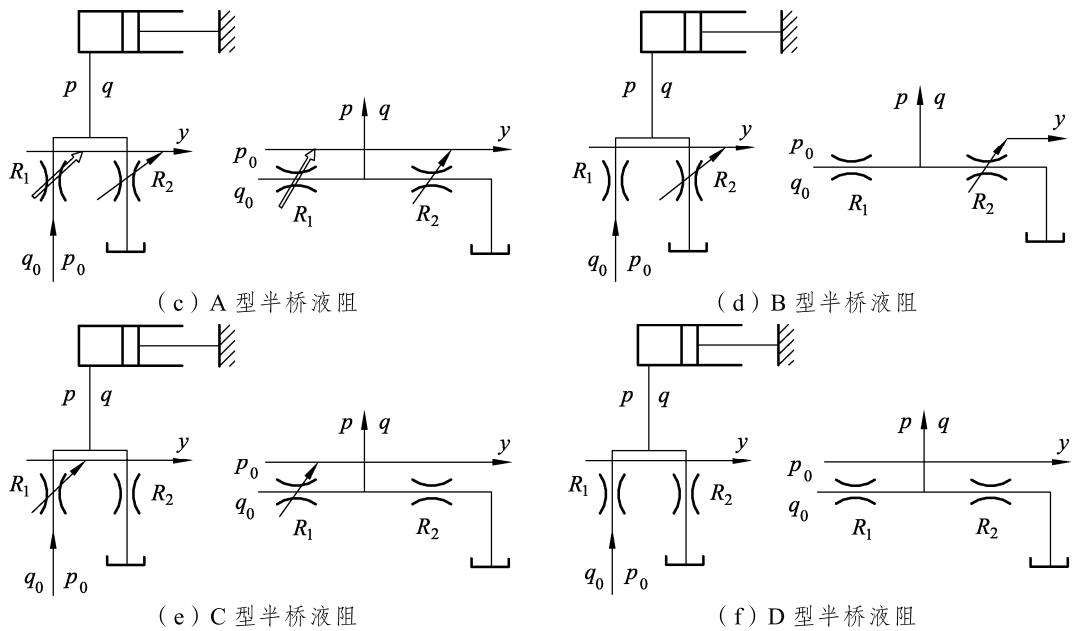
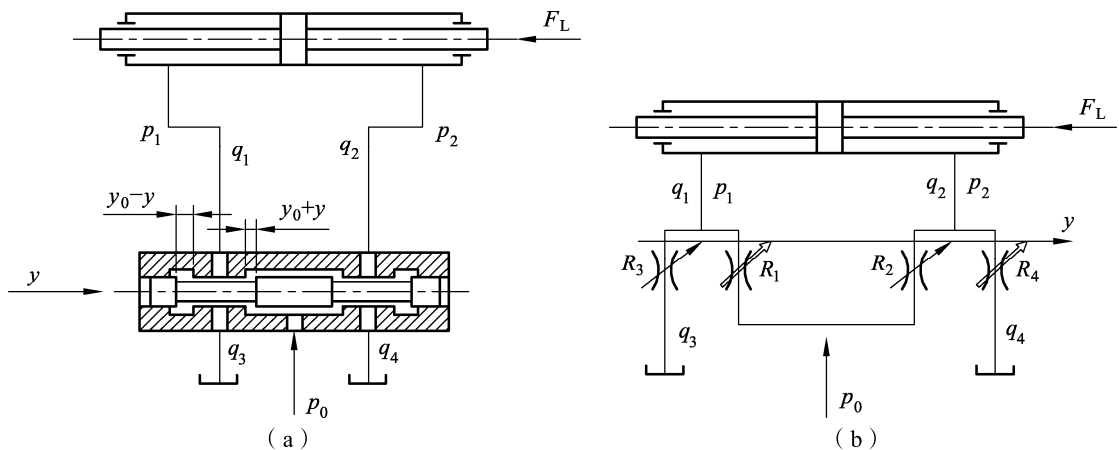


图 1-5 半桥液阻网络

## 2. 全桥液阻网络

如图 1-6 所示的全桥液阻网络，图 1-6 (a) 为 4 通滑阀控制的双活塞杆对称液压缸，图中，滑阀阀芯与阀体之间形成 4 个阀口，每个阀口就是一个液阻，因此，共形成 4 个阻值可控的液阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 。 $p_0$  为滑阀的输入， $p_1$ 、 $p_2$  为滑阀的输出，4 通滑阀形成的液阻网络用可变液阻符号表示，如图 1-6 (b) 所示。图 1-6 (c) 是类似于电路桥式回路的表示方法，其效果等同于图 1-6 (b)，4 通滑阀的 4 个液阻阻值的大小由移动阀芯控制。

全桥液阻网络一般由两个半桥液阻网络组成，其类型有多种，不同全桥液阻网络的区别主要在于液阻的变化与否和相互之间的组合，最终对外展现出特殊的液阻特性。其实全桥液阻网络可以看成是半桥的组合，比如 A+A 型、A+B 型、A+C 型、A+D 型、B+B 型、C+C 型等（全桥液阻网络），其共同特点是：有一个输入控制口，两个输出控制口，可以控制双作用液压缸或液压马达的双向运动，同时有部分液压油通过液阻流回油箱，产生能量损失。目前，全桥液阻网络广泛应用于伺服阀的先导级和主级的控制回路中。



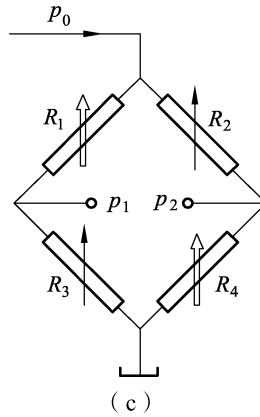
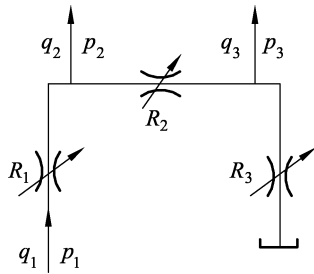


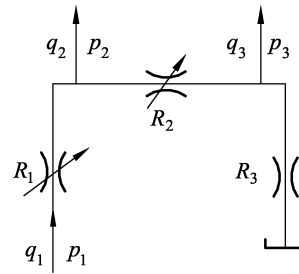
图 1-6 全桥液阻网络

### 3. $\pi$ 桥液阻网络

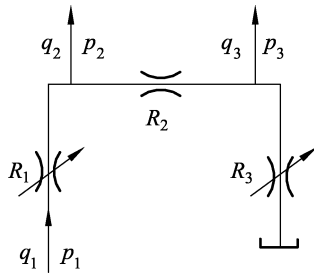
$\pi$  桥液阻网络一般指由三个液阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  组成的桥式液阻网络，因其原理图类似希腊字母  $\pi$  而得名。 $\pi$  桥液阻网络有一个输入控制口，两个输出控制口，与半桥液阻网络的分类方式类似。根据  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  三个液阻阻值是否可变， $\pi$  桥液阻网络可分为 A、B、C、D、E、F、G 七种类型，如图 1-7 所示。



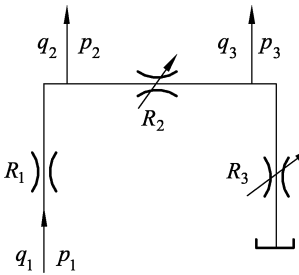
(a) A 型  $\pi$  桥



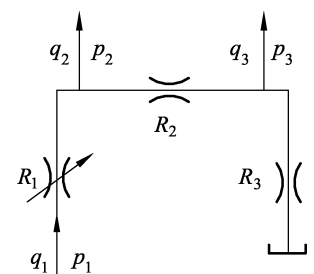
(b) B 型  $\pi$  桥



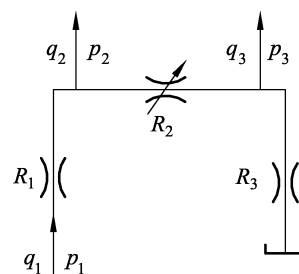
(c) C 型  $\pi$  桥



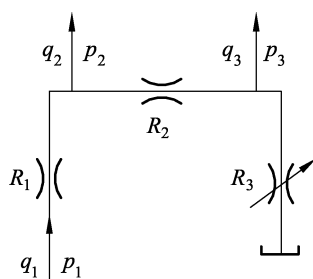
(d) D 型  $\pi$  桥



(e) E 型  $\pi$  桥



(f) F 型  $\pi$  桥



(g) G 型  $\pi$  桥

图 1-7  $\pi$  桥液阻网络

$\pi$  桥液阻网络可以单独控制非对称液压缸的双向运动,与复位弹簧配合使用时也可以控制对称液压缸的双向运动。

## 1.4 液压传动的工作介质

### 1.4.1 液压传动系统对工作介质的要求

在液压传动系统中,能量从动力元件传递至执行元件需要依靠工作介质,液压传动系统的工作介质通常采用液压油,为适应不同工作环境的需求,需要采用不同性质的液压油。一般而言,为了保证所设计的液压传动系统能够正常可靠地运行,对系统工作介质液压油有以下要求。

#### 1. 黏 性

在液压传动系统中,工作介质液压油的黏性直接影响动力元件泵的容积效率和机械效率,上述两种效率直接决定液压系统的性能。若要液压传动系统能够保持较高的工作效率,需要兼顾泵的容积效率和机械效率,故一般液压油的黏度选取范围为  $2^\circ E_{50} \sim 8^\circ E_{50}$ 。同时,液压油黏度受温度影响较大,温度的变化将直接导致液压油黏度的变化,这种变化不可避免,但一般要求液压油黏度对温度的变化具有低敏感性,即液压油要有良好的黏温性能。

#### 2. 润 滑

液压油的主要作用是传递能量,同时在系统的运行过程中发现,如果液压油没有良好的润滑能力,系统中相互接触且存在频繁相对位移的元件磨损较为严重。随着系统元件和零部件的损耗,系统的工作性能将大大降低。故需要在液压油中添加抗磨剂,提高液压油的抗磨性,减少系统元件和零部件不必要的磨损,提高系统的使用寿命。

#### 3. 防锈和抗腐蚀性

液压传动系统中的大部分零件和元件均为金属材质,为了得到良好的性能和成本控制,钢质材料使用较为普遍。零部件在不可避免与水和空气接触的情况下极易发生锈蚀,锈蚀产生的金属颗粒杂质在系统中作为磨粒会进一步加剧系统元件和零部件的磨损。在液压油中添加防锈剂可有效减缓系统中元件和零部件的锈蚀速度,保持油液的清洁性,提高系统的使用寿命。

#### 4. 抗氧化和热稳定性

由于液压油在工作过程中，大多数情况均不为绝对密闭空间，其与空气或多或少会直接接触。液压油在与空气接触后被空气中的氧化成分氧化，发生化学反应，产生沉淀，加剧系统磨损、污染油液、堵塞元件，进而造成系统无法正常工作。液压油中的成分易与空气发生反应，尤其在温度较高时将进一步加剧反应的程度，同时液压油中的一些成分在高温条件下会直接进行分解。所以，为了保持液压油的性质稳定，一方面需要在液压油中加入抗氧化剂，降低液压油与空气接触后的氧化反应程度；另一方面，需要提高液压油在高温条件下的稳定性。

#### 5. 抗泡沫性

液压传动系统中混入油液中的空气一般会引起噪声、振动等现象。降低液压油中气泡对液压系统运行的影响主要有两个方面：第一，可以增加液压油对产生气泡的抗性，即抗泡沫性；第二，增加液压油释放气泡的能力，即空气释放性。

#### 6. 抗乳化性

液压油的乳化指的是水油混合物在剧烈搅动下所形成的一种水油乳化液。液压油中因混入水所形成的乳化液将导致系统中元件和零部件发生锈蚀，生成沉淀或腐蚀性物质，简而言之，油水乳化液会直接影响液压传动系统中的元件、零部件以及系统本身的正常工作，且会加剧系统损坏，故需要提高液压油的抗乳化能力，即抗乳化性。通过降低液压油与水之间的溶解，进而使液压油具有良好的水解安定性。

#### 7. 压缩性和抗剪切性

为了使液压传动系统能够高效率地传递能量，同时具备较快的响应速度，处于受压状态的液压油在受压初始阶段，其体积变化应尽可能小，即液压油的可压缩性尽可能小。

液压传动系统在工作过程中，不同元件或者单个元件不同结构之间的频繁接触分离会对液压油中的高分子聚合物产生较大的剪切作用，进而破坏聚合物的分子链。液压油中的高分子聚合物是保证液压油具有一定黏度的关键，切断聚合物的分子链会导致液压油的黏度下降，直接影响液压系统中元件的容积效率和机械效率，故需要提高液压油的抗剪切能力。

#### 8. 洁净性和过滤性

液压油进入传动系统前必须保证其具有较高的洁净性，不能混入固体颗粒或其他杂质；液压油中的杂质会对系统中的精密元件造成较大影响。液压油中混入杂质后，通常采用系统过滤对其进行清除，对于开式液压系统，一般采用进油过滤和回油过滤等多种方式组合过滤，确保系统中油液的清洁性。

#### 9. 阻燃性

不同工作环境下，对工程机械液压传动系统的要求不同，处于高温或接触明火的液压系统要求易燃的工作介质液压油具备一定的阻燃性能，以免发生安全事故。

#### 10. 其他

由于应用液压系统的装备所处的工作环境多样，一般根据不同的工作环境特点，液压系统的工作介质需要具备不同的特性，以满足需求，比如水下、高空等特殊环境。



综上所述，虽然对于液压油而言，可以通过添加不同的添加剂使其具备一定的特性，但同时具备上述所有特点的油液是不存在的，在选用液压油的种类时，需要根据特定的需求，选取对应种类的液压油。

#### 1.4.2 液压传动系统工作介质的分类和选用

上一小节介绍了液压传动系统工作介质液压油的一些特性，下面对系统介质液压油的种类和选用方法进行介绍。

##### 1. 液压油的分类

液压油作为一般液压系统中常用的工作介质，为了适应不同的使用场合，液压油被分为不同种类，分类的依据一般有液压油的用途、组成、使用温度范围、特性、使用压力等，不同的液压油分类标准反映了液压系统在自身发展过程中对工作介质的不同特性和各种性能要求。目前，我国使用的液压油分类标准为 GB/T 7631.2—2003，同时在后续的标准补充文件中对液压油的性能进行了进一步的明确。液压油的分类如表 1-5 所示。

表 1-5 液压油的分类

	应用范围	适用系统	具体应用	组成和特性	产品符号 L-
液 压 油 (H)	液 压 系 统	流 体 静 压 系 统	石 油 型	无抗氧化剂的精制矿油	HH
				防锈和抗氧化性的精制矿油	HL
				改善抗磨性的 HL 油	HM
				改善黏温性的 HL 油	HR
				改善黏温性的 HM 油	HV
				无特定难燃性的合成液	HS
			液压导轨系统	HM 油，具有黏滑性	HG
			难 燃 型	水包油乳化液 (O/W)	HFAE
				油包水乳化液 (W/O)	HFB
				含聚合物的水溶液	HFC
				磷酸酯液	HFDR
				其他	

同时满足各项特殊性能的液压油是不存在的，目前广泛使用的液压设备均采用石油基液压油。为了满足不同液压系统对油液某些方面的特殊需求，一般向液压油中添加各种成分，使得油液具有目标性能。常用的添加剂分为两大类：一类为物理添加剂，比如增黏剂、抗磨剂和防爬剂等；另一类为化学添加剂，比如抗氧化剂、防锈剂、消泡剂和降凝剂等。加入上述不同添加剂后，石油基液压油的某方面性能可以得到有效提升，进而适应液压系统的需求。添加剂的种类在添加时有严格要求，加入同一种油液中的添加剂两两之间不得发生有害反应，尽量保证油液的优异性能，这也是不存在具备所有特殊性能油液的原因所在。

石油基的液压油一般分为四类：机械油、汽轮机油、普通液压油和专用液压油。机械油

常用于压力较低且要求不高的液压系统；汽轮机油性能比机械油稍加优异，具有较好的氧化安定性和抗乳化性；普通液压油具备一般的优异性能，比如抗氧化性、防锈性等，满足一般的性能需求，在要求不高的普通液压系统中用途较为广泛；专用液压油在某一两个方面的性能尤为突出，对液压油的某一个性能有较高需求的液压系统一般选用专用液压油，比如抗磨液压油、低温液压油、高黏度指数液压油等。

难燃型液压液分为两大类：含水液压液和合成液压液。含水液压液的分类指标为液压液的含水体积分数，一般以 80% 为分界线，含水体积分数大于 80% 的液压液为高含水液压液，包括水包油乳化液（L-HFAE）和水的化学溶液（L-HFAS）；含水体积分数小于 80% 的液压液包括油包水乳化液（L-HFB）、含聚合物水溶液和水-乙二醇液（L-HFC）。合成液压液以磷酸酯无水合成液（L-HFDR）为代表，还包括其他类的合成液压液，比如氯化氢无水合成液（L-HFDS）等。

除了上述介绍的液压系统工作油液，近年来，为了进一步满足更为特殊的工作环境，比如深水、海洋等，以纯水或者海水为工作介质的液压系统技术正在研究中。此外，为了获得更加特殊的电性能油液，多国相关领域的学者正在研究一种电流变流体（ERF）的特殊液体介质。

## 2. 液压油的选用

液压油作为液压系统中较为关键的工作介质，其质量决定了液压系统对不同工作环境的适应能力，同时对系统中元件进行润滑，降低元件的损耗，延长系统的寿命和可靠性，故正确选用液压油对液压系统至关重要。

选择液压油时需要考虑的各种因素主要包括以下 4 个方面，分别为系统工作条件、系统工作环境、油液自身质量和经济性。

系统工作条件主要由系统的各项参数决定，比如系统压力的范围，液压油在使用压力等级上有明确分类，使用压力范围是选择液压油的重要决定因素；系统温度的范围，对液压油的黏度、黏温性、热稳定性等性能的影响较大。

系统工作环境主要为外在环境对液压系统所提出的硬性约束，比如噪声控制、环境污染、高温高寒、是否有毒有味等。对于噪声控制，由于液压油中气泡的存在是系统运行产生噪声和振动的主要因素，故为了控制噪声，需要液压油对空气的溶解性和消泡性有明显优势，通过减少液压油中的空气来降低系统运行过程中所产生的噪声和振动。其他成分的限制要求决定了液压油对环境的影响。

油液自身质量方面主要包括油液的防腐、抗腐蚀、剪切稳定性、氧化稳定性、抗水解、过滤性能、物理特性、对金属和密封件的相容性等方面的能力。

在满足上述限制因素的基础上，还需考虑油液的经济性。经济性主要包括油液的价格、使用寿命、维护与更换成本等。

在上述液压油选择过程中需要考虑的诸多因素中，多项因素最终反映到液压油中就是油液黏度的变化，且液压系统中的元件对液压油黏度变化最为敏感的是动力元件液压泵。相同系统温度条件下，不同液压泵的许用黏度范围存在区别，液压泵的最佳使用黏度需要通过试验判断，在许用黏度范围内，最佳使用黏度一般接近最小黏度。根据液压系统温度范围选用油液种类的黏度等级如表 1-6 所示。

表 1-6 根据工作温度范围的液压油黏度等级

泵的类型	40 °C 黏度/ (mm <sup>2</sup> /s)		液压油牌号
	系统工作温度 5~40 °C	系统工作温度 40~80 °C	
叶片泵 (<7 MPa)	30~50	40~75	HH 油: 32、46、68
叶片泵 (>7 MPa)	50~70	55~90	HM 油: 46、68、100
螺杆泵	30~50	40~80	HL 油: 32、46、68
齿轮泵	30~70	95~165	HL/HM 油: 32、46、68、100、150
径向柱塞泵	30~50	65~240	HL/HM 油: 32、46、68、100、150
轴向柱塞泵	40	70~150	HL/HM 油: 32、46、68、100、150
液压油的选用中, HL 油适用于中低压系统, HM 油适用于高压系统			

选择合适的液压油通常需要经历以下几个步骤:

- (1) 明确液压油的特性需求, 比如黏度、密度、体积模量、压力范围、温度范围、润滑性、阻燃性、相容性等。
- (2) 根据产品样本, 选择符合要求的工作介质类型。
- (3) 对存在的多项特性要求, 综合考虑、权衡各项参数的影响, 调整各个参数的比重。
- (4) 联系供货商, 最终确定工作介质。

经过上述对液压油种类、特性的选择后, 在液压油的运输过程和液压系统正常运行时, 均需要对油液的性质进行检查, 确保液压油的参数稳定, 符合系统要求, 避免出现由于液压油的原因造成系统元件损坏, 引起不必要的损失。

### 1.4.3 液压传动系统工作介质的污染与控制

无数液压系统故障案例证明, 液压系统油液的污染是系统发生故障的主要原因。由于油液在系统中流经绝大部分元器件, 油液的污染将直接影响相关元器件的使用性能, 严重的将造成元器件发生故障, 进而引起系统级故障, 大大降低系统元器件和整个系统的设计寿命, 所以在液压系统设计时对液压油的选用以及液压系统使用时对液压油的过滤清理和维护都极其重要。

#### 1. 污染物种类及来源

对于正常工作的液压系统, 主要的污染物分为以下几种: 固体颗粒、水、空气、溶剂、微生物等。上述污染物中, 固体颗粒污染物会加速系统中元器件的磨损, 其他污染物会降低液压油的相关性能, 或者与液压油中的某些成分发生化学反应, 引起液压油变质。故针对存在的污染物, 需要明确污染物进入液压系统的途径。液压油中污染物来源如表 1-7 所示。

表 1-7 液压油中的污染物

外界侵入的污染物			工作过程中产生的污染物	
液压油运输过程中带来的污染物	液压系统组装机时遗留的污染物	从系统周围环境中混入的污染物	液压系统中元器件相对运动磨损时产生的污染物	液压油自身发生物理化学性能变化时产生的污染物

## 2. 污染度等级

液压系统中油液污染度指单位体积工作介质中固体颗粒污染物的含量，即工作介质中所含固体颗粒的浓度。对于油液中污染物等级划分标准，国际和国内分别制定了相关标准文件，我国现行的标准是 GB/T 14039—2002《液压传动 油液固体颗粒污染等级代号》(ISO 4406:1999)，国际上采用的有 NAS 1638 等，如表 1-8 和表 1-9 所示。

表 1-8 ISO 4406 油液颗粒污染物等级 (1 mL 所含颗粒数)

颗粒数	等级	颗粒数	等级	颗粒数	等级
0.002 5 ~ 0.005	00	1.3 ~ 2.5	8	640 ~ 1 300	17
0.005 ~ 0.01	0	2.5 ~ 5	9	1 300 ~ 2 500	18
0.01 ~ 0.02	1	5 ~ 10	10	2 500 ~ 5 000	19
0.02 ~ 0.04	2	10 ~ 20	11	5 000 ~ 10 000	20
0.04 ~ 0.08	3	20 ~ 40	12	10 000 ~ 20 000	21
0.08 ~ 0.16	4	40 ~ 80	13	20 000 ~ 40 000	22
0.16 ~ 0.32	5	80 ~ 160	14	40 000 ~ 80 000	23
0.32 ~ 0.64	6	160 ~ 320	15	80 000 ~ 160 000	24
0.64 ~ 1.3	7	320 ~ 640	16	—	—

表 1-9 NAS 1638 污染度分级标准 (100 mL 所含颗粒数)

颗粒尺寸范围/ $\mu\text{m}$					污染物等级
5 ~ 15	15 ~ 25	25 ~ 50	50 ~ 100	>100	
125	22	4	1	0	0
250	44	8	2	0	0
500	89	16	3	1	1
1 000	178	32	6	1	2
2 000	356	63	11	2	3
4 000	712	126	22	4	4
8 000	1 425	253	45	8	5
16 000	2 850	506	90	16	6
32 000	5 700	1 012	180	32	7
64 000	11 400	2 025	360	64	8
128 000	22 800	4 050	720	128	9
256 000	45 600	8 100	1 440	256	10
512 000	91 200	16 200	2 880	512	11
1 024 000	182 400	32 400	5 760	1 024	12

## 3. 污染物的控制

污染物作为液压油中无法彻底清除的有害成分，为了降低污染物对液压油性能的影响，常见的控制液压系统污染物措施有以下几种：

(1) 组装前严格清洗液压元件和系统。清洗系统元件作为液压系统组装前必不可少的一个步骤，可以有效减少元器件残留污染物进入液压系统。液压元件如泵、阀、过滤器等在出厂前均需要进行测试试验，由于试验重复多次，无法确保元件中残留的脏油或者通过其他途径进入其中的杂物已经被清理干净，故在液压系统组装前需要经过一次或者两次清洗，保证各元器件中残留的污染物已经清理干净。常见的清理方式是使用汽油清洗零部件，清洗完毕后使用高压气枪吹净残余油液。

(2) 做好密封，避免污染物从外界侵入。针对组装完毕的液压系统，确保密封完毕，特别是在外界环境和内部环境中往复运动的部件，比如油缸活塞杆处等易于发生污染物入侵系统的位置做好防护措施，常见的如活塞杆防尘圈、油箱的空气滤清器等。密封一方面可以有效防止杂物入侵，另一方面可以防止空气入侵，以免影响系统的正常运行。

(3) 有效过滤。在做好清洗和密封的前提下，液压系统中元件结构间磨损产生磨粒等杂质不可避免，针对系统内部产生的污染物，需要使用过滤器进行过滤，尤其在系统进油处和回油处应增设过滤器。

(4) 控制工作介质温度。液压系统中部分能量损失以热能的形式发散，最直观的表现是工作介质温度明显上升，温度上升对工作介质的影响较大，特别是介质的黏度和化学性能等。不同的液压系统对工作介质的适宜温度范围不同，需要根据需要进行设计。一般情况下，工作介质温度上升弊大于利，在系统中增设散热器等元件控制系统温度是有效的措施之一。

(5) 定期检查和更换工作介质。工作介质作为液压系统中关键的能量传递介质，其工作环境较为恶劣，定期检查和更换工作介质可以及时发现系统介质的情况，有效避免关键元件的损坏；同时更换工作介质可以延长液压系统的有效寿命。值得一提的是，一旦发现液压系统工作介质被污染，更换工作介质前需要对整个系统进行仔细清洗。

## 复习思考题

1. 传动类型有哪几种？液压传动与其他传动形式相比，有什么优缺点？
2. 工程机械液压传动由哪几部分组成？各部分的作用是什么？
3. 名词解释：液压传动、液压控制。
4. 液压传动对液压油有哪些方面的要求？工程机械液压油的选择应考虑哪些因素？
5. 工程机械在使用过程中如何防止液压油被污染？