

X iandai G ongcheng Jix ie Y eya Y u Y eli X itong

# 现代工程机械液压与液力系统

## ——基本原理·故障分析与排除

颜荣庆 李自光 贺尚红 编著

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书内容分为两篇,第一篇是介绍现代工程机械中液压与液力传动的基本知识,包括液压传动、液压泵和液压马达、液压缸、液压控制阀、液压辅助装置和液力传动等;第二篇是介绍液压与液力传动中出现的故障及其排除方法,包括基本概论,汽车式、履带式起重机械液压系统分析,土方工程机械液压系统分析,路面工程机械液压系统分析,水泥混凝土机械液压系统分析等,可供各施工部门的管理、使用和维修人员使用,亦可作为高等院校、中等专业学校的师生阅读以及设计、科研部门的技术人员参考。

### 现代工程机械液压与液力系统

——基本原理·故障分析与排除

颜荣庆 李自光 贺尚红 编著

版式设计:刘晓方 责任校对:刘高彤 责任印制:

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号 010—64216602)

各地新华书店经销

印刷厂印刷

开本: 787× 1092  $\frac{1}{16}$  印张: 插页: 字数: 千

2001年4月 第1版

2001年4月 第1版 第1次印刷 总第1次印刷

印数:0001—4000册 定价:39.00元

ISBN 7-114-03916-6

U · 02856

# 前 言

液压与液力传动技术在现代工程机械中应用日益广泛,尤其是从国外大量引进各种先进的液压传动工程机械之后,显得更为突出。但是,在实际使用中,往往由于对液压传动知识了解不够,以致工程机械中经常出现的许多液压技术上的故障难以诊断和排除,造成经济损失的事例举不胜举。针对这种情况,应有关公路、水电、建筑等工程使用部门的要求,我们编著了本书。该书是在原出版的《液压与液力传动》、《现代工程机械应用技术》、《滑模式水泥混凝土摊铺机及施工工艺》、《现代工程机械液压系统分析》等书的基础上,同时参考了国内外现代工程机械液压及液力传动系统技术中较为成熟的液压故障分析与排除的书籍、文献和大量的实际经验编著而成的。

本书内容分为两篇。第一篇主要介绍现代工程机械中液压与液力传动的有关基本知识。第二篇主要是通过国内目前在用的一些典型的国内、外工程机械(重点是公路工程及有关建设上使用的起重机械和筑路机械等)系统分析,从而重点介绍了液压与液力传动中出现的故障及其排除方法。因此,本书主要供各建设工程机械化施工部门从事管理、使用及维修的人员使用,也可作为高等院校、中等专业学校师生及设计科研部门技术人员参考。

本书由长沙交通学院颜荣庆教授、李自光教授、贺尚红副教授担任主要编著者,朱福民高级工程师及李万莉副教授参加部分编著工作。另外,参加本书编著的人员还有:湖南省公路管理局曹继昌高级工程师、广东省公路管理局柯建雄高级工程师、广东省筑路机械租赁联营公司符传进高级工程师、广州新绿兰科技实业有限公司颜蔚工程师、广西壮族自治区公路管理局陆天标高级工程师、湖南省公路桥梁建设总公司张宁高级工程师及湖南省公路管理局李学俊工程师等。

本书编著过程中还得到了CM I公司、湖南省三一重工集团、宝钢十三冶建设公司、湖南省公路局、湖南省道路桥梁建设总公司、广东省筑路机械租赁联营公司、广西壮族自治区公路管理局及有关国内外起重机械、工程机械厂家等单位的大力支持,在此一并表示衷心感谢。

限于编著者水平和实际经验有限,书中错误或不足之处在所难免,恳请有关专家和广大读者批评指正。

编著者

2000年5月于长沙

# 目 录

## 第一篇 液压与液力传动基本知识

第一章 液压传动基本知识.....	1
第一节 液压传动基本原理及工作特点.....	1
一、液压传动基本工作原理 .....	1
二、液压传动基本特征 .....	2
三、液压系统的组成 .....	2
四、液压传动的特点 .....	3
第二节 液压油.....	3
一、液压油的分类 .....	4
二、液压油的物理化学性能 .....	4
三、液压油的选择 .....	8
第三节 静止液体力学基本规律.....	9
一、液体静压力及其特性 .....	9
二、液体静力学基本方程和帕斯卡定律 .....	9
三、压力的表示方法 .....	10
第四节 流动液体力学基本规律 .....	10
一、流动液体的基本概念 .....	10
二、流动液体的流量连续方程 .....	11
三、流动液体能量方程(伯努利方程) .....	12
四、流动液体动量方程式 .....	13
第五节 液体流动中的能量损失 .....	14
一、液体流动中的沿程压力损失 .....	14
二、液体流动中的局部压力损失 .....	15
三、减小压力损失的措施 .....	15
第六节 液体在节流孔中的流动 .....	15
一、液体流经小孔的流量及压力变化规律 .....	15
二、3种节流形式的特点及应用 .....	16
第七节 液体在缝隙中的流动 .....	16
一、平行面缝隙流动 .....	17
二、圆环缝隙流动 .....	17
三、楔形平面缝隙流动 .....	18
第八节 液压冲击、气穴与气蚀、振动和噪声 .....	19

一、液压冲击 .....	19
二、气穴和气蚀 .....	20
三、振动和噪声 .....	20
第二章 液压泵和液压马达 .....	21
第一节 液压泵和液压马达的基本概念 .....	21
一、液压泵和液压马达的作用、工作原理和分类 .....	21
二、液压泵和液压马达的基本参数 .....	22
第二节 齿轮液压泵和齿轮液压马达 .....	25
一、齿轮液压泵 .....	25
二、齿轮液压马达 .....	26
第三节 叶片液压泵和叶片液压马达 .....	27
一、叶片液压泵 .....	27
二、叶片液压马达 .....	29
第四节 柱塞式液压泵和柱塞式液压马达 .....	29
一、径向柱塞式液压泵和径向柱塞马达 .....	29
二、轴向柱塞式液压泵和马达 .....	33
第五节 液压泵和液压马达的选择和使用 .....	35
一、液压泵的选择 .....	35
二、液压马达的选择 .....	36
三、泵和马达的使用 .....	36
第三章 液压缸 .....	37
第一节 液压油缸的种类和特点 .....	37
第二节 工程机械用液压缸 .....	39
一、单杆双作用液压缸的构造 .....	40
二、单杆双作用液压缸底部结构 .....	40
第四章 液压控制阀 .....	42
第一节 液压控制阀概述 .....	42
一、液压控制阀概述 .....	42
二、液压控制阀的分类 .....	43
三、对液压控制阀的基本要求 .....	43
第二节 方向控制阀 .....	43
一、单向阀 .....	43
二、换向阀 .....	45
第三节 压力控制阀 .....	47
一、溢流阀 .....	47
二、减压阀 .....	51
三、顺序阀 .....	54
四、平衡阀 .....	55
五、背压阀 .....	55
六、压力继电器 .....	56

第四节	流量控制阀	56
一、	概述	56
二、	节流阀	56
三、	调速阀	57
四、	同步阀	58
五、	稳流分流阀	59
第五节	多路换向阀	61
一、	多路阀结构形式	61
二、	多路阀连通方式	61
三、	典型结构介绍	61
第六节	伺服阀	63
一、	伺服阀工作原理	63
二、	电液伺服阀工作原理	63
三、	电液伺服系统工作原理	64
第七节	电液比例阀	65
一、	电液比例压力先导阀	65
二、	电液比例调速阀	66
三、	电液比例换向阀	67
第八节	逻辑阀	67
一、	逻辑阀的锥阀式基本单元	68
二、	由逻辑元件组成逻辑阀	68
第五章	液压辅助装置	70
第一节	蓄能器	70
一、	蓄能器的类型及工作原理	70
二、	蓄能器的作用	70
三、	蓄能器的安装及使用	71
第二节	滤油器	71
一、	滤油器的作用和要求	71
二、	滤油器的种类	72
三、	滤油器典型结构介绍	73
四、	滤油器在液压系统中的安装位置及维护	74
第三节	液压油油箱	75
一、	液压油油箱容积的确定	75
二、	液压油油箱结构	75
第四节	密封	76
一、	间隙密封	76
二、	接触密封	76
第五节	液压油油管 and 管接头	78
一、	液压油管	78
二、	管接头	79

第六节 冷却器 .....	80
第六章 工程机械液压传动系统的基本概念 .....	81
第一节 工程机械液压传动系统的组成及要求 .....	81
一、液压系统的组成 .....	81
二、对工程机械液压系统的要求 .....	81
第二节 液压系统基本型式 .....	82
一、开式、闭式系统 .....	82
二、单泵、多泵系统 .....	83
三、定量、变量系统 .....	84
四、分功率变量、总功率变量系统 .....	85
五、执行元件串、并、串并联系统 .....	87
六、有级调速、无级调速及复合调速系统 .....	88
第三节 液压系统的性能指标及基本要求 .....	90
一、液压系统的效率(经济性指标) .....	90
二、功率利用(节能性指标) .....	91
三、调速范围和微调指标(调速指标) .....	91
四、液压系统刚度(机械特性指标) .....	92
五、负载能力(工作性能指标) .....	92
第七章 液力传动 .....	92
第一节 液力传动简介 .....	92
一、液力偶合器 .....	93
二、液力变矩器 .....	95
三、液力传动的优缺点 .....	97
第二节 液力传动的水力学知识 .....	97
一、液体流动的一些基本概念 .....	97
二、进、出口速度三角形 .....	98
三、能量转换力矩方程式 .....	98
四、相似理论和力矩公式 .....	102
第三节 液力变矩器工作原理及特性曲线 .....	104
一、工作原理 .....	104
二、特性曲线 .....	106
第四节 液力变矩器的结构类型 .....	108
一、第一类型和第二类型 .....	108
二、向心、轴流和离心涡轮式 .....	108
三、单级、双级和多级 .....	108
四、简单式和综合式 .....	109
五、液力机械变矩器 .....	109
第五节 综合式液力变矩器 .....	110
第六节 液力变矩器与发动机共同工作 .....	113
一、共同工作输入特性曲线 .....	114

二、共同工作的输出特性曲线 .....	114
三、功率匹配及速度匹配 .....	115
四、变矩器选择 .....	118
第七节 液力变矩器的补偿系统.....	121

## 第二篇 工程机械液压与液力系统分析与使用、维修及故障排除

第一章 液压与液力系统故障及排除基本概论.....	123
第一节 液压系统故障分类及诊断方法.....	123
一、液压故障分类 .....	123
二、故障诊断方法 .....	124
第二节 液压油及液压元件的故障与排除概述.....	128
一、液压油污染的危害(是否混入水、空气、固体杂质) .....	128
二、液压泵故障 .....	128
三、液压马达 .....	128
四、液压缸 .....	129
五、溢流阀 .....	129
六、减压阀 .....	129
七、顺序阀 .....	129
八、液控单向阀 .....	129
九、电磁换向阀 .....	130
十、电液换向阀 .....	130
十一、多路换向阀 .....	130
十二、管道 .....	130
第三节 齿轮泵与齿轮马达故障与排除.....	130
一、对齿轮泵的要求 .....	130
二、齿轮泵故障与排除 .....	131
第四节 叶片泵与叶片马达故障与排除.....	134
一、对叶片泵的要求 .....	134
二、叶片泵与叶片马达故障与排除 .....	134
第五节 柱塞泵和柱塞马达.....	137
一、轴向柱塞泵的安装,使用与维护 .....	137
二、常见故障分析及排除 .....	138
第六节 液压缸故障与排除.....	140
一、柱塞缸 .....	140
二、活塞缸 .....	141
三、液压缸的安装、使用和维护 .....	146
第七节 液压阀的故障与排除.....	149
一、单向阀 .....	149
二、换向阀 .....	150

三、溢流阀 .....	154
四、减压阀 .....	158
五、顺序阀 .....	159
六、流量控制阀 .....	161
七、电液伺服阀 .....	163
八、电液比例阀(比例阀) .....	164
九、压力继电器 .....	164
第八节 辅助元件的故障与排除 .....	165
一、油箱 .....	165
二、蓄能器 .....	166
三、滤油器 .....	166
第九节 液压传动介质的污染 .....	166
一、认真选好适用的工作介质 .....	166
二、防止水分、化学制品、空气、固体杂质混入液压系统 .....	167
第十节 液压传动系统常见故障与排除 .....	169
一、正确使用工作油 .....	169
二、正确使用液力系统 .....	170
第十一节 液压工程机械的维护 .....	173
一、使用要求 .....	173
二、维护 .....	174
三、常用液压元件的维修配合间隙 .....	175
第十二节 液压系统常见故障与排除 .....	176
一、液压系统振动和噪声 .....	176
二、液压系统泄漏 .....	177
三、液压冲击 .....	177
四、液压系统中的“爬行” .....	178
五、液压系统中的液压卡紧 .....	179
六、液压系统中的温升 .....	179
第二章 汽车式、履带式起重机液压系统分析 .....	180
第一节 起重机械常用液压回路 .....	180
一、起升机构液压回路 .....	180
二、伸缩臂机构液压回路 .....	180
三、变幅机构液压回路 .....	181
四、回转机构液压回路 .....	182
五、支腿机构液压回路 .....	182
六、转向机构液压回路 .....	183
第二节 汽车式起重机 .....	185
一、QY 16 型汽车式起重机液压系统 .....	185
二、LOKOM 系列汽车起重机液压系统 .....	192
三、NK 800 型汽车式起重机液压系统 .....	196

四、TG 1500E 型汽车式起重机液压系统 .....	202
第三节 履带式起重机械.....	229
一、CC 2000 型履带式起重机液压系统 .....	229
二、KH 100 型履带式多功能起重机液压系统 .....	235
第三章 土方工程机械液压系统分析.....	242
第一节 铲土运输机械.....	242
一、推土机 .....	242
二、铲运机 .....	247
三、装载机 .....	250
四、平地机 .....	258
五、振动压路机 .....	266
第二节 液压挖掘机.....	277
一、YW 160 液压挖掘机 .....	277
二、日本 1.8m <sup>3</sup> 液压挖掘机.....	279
三、EX 400 型液压挖掘机.....	284
第三节 稳定土拌和机.....	287
一、W BY 210 型全液压稳定土拌和机 .....	287
二、M PH -100 型液压稳定土拌和机 .....	290
三、稳定土拌和机液压系统常见故障、故障原因及排除方法 .....	292
第四章 路面工程机械液压系统分析.....	294
第一节 沥青混凝土摊铺机.....	294
一、LTU 4 型沥青混凝土摊铺机 .....	294
二、TITAN 411 沥青混凝土摊铺机.....	301
三、SA 125 型履带式沥青混凝土摊铺机 .....	309
四、沥青摊铺机的维修及故障排除 .....	311
第二节 水泥混凝土摊铺机.....	320
一、轨道式水泥混凝土摊铺机 .....	320
二、滑模式水泥混凝土摊铺机 .....	326
第五章 水泥混凝土机械液压系统分析.....	347
第一节 水泥混凝土搅拌运输车.....	348
第二节 水泥混凝土输送泵.....	349
一、BP 750R 型混凝土泵的液压系统分析 .....	351
二、混凝土泵的使用维护与故障排除 .....	353
第三节 水泥混凝土泵车.....	358
一、搅拌回路 .....	360
二、清洗回路 .....	360
三、冷却和润滑回路 .....	360
四、混凝土泵送回路(主液压回路) .....	361
五、回转油路、悬臂伸缩回路、支腿工作回路 .....	361
参考文献.....	365

# 第一篇 液压与液力传动基本知识

## 第一章 液压传动基本知识

### 第一节 液压传动基本原理及工作特点

流体传动是指研究以流体能量来产生、控制和传递动力的技术。可以说,流体动力是驱动现代工业的“臂膀”,可以用来驱动几乎所有的工业机器。例如,采用流体动力操纵和控制汽车、发射航天飞机、开垦土地、收获庄稼、采煤、驱动机床、控制飞机、加工食品等。

在工程机械上,传动是指能量或动力由发动机向工作装置的传递,通过不同的传动方式使发动机的转动变为工作装置各种不同的运动形式。例如:车轮的转动、推土机铲刀的升降、起重机转台的回转、挖掘机动臂、抖杆及铲刀的复杂运动等。

目前常用的传动形式根据工作介质的不同可分为机械传动、流体传动和电力传动等。其中流体传动有液体传动和气体传动两种形式。以液体为工作介质传递能量和进行控制的传动方式叫液体传动,根据所利用的液体能量形式,液体传动又包括利用液体压力能的液压传动和利用液体动能的液力传动。

#### 一、液压传动基本工作原理

图 1-1-1 所示是液压千斤顶的工作原理,液压千斤顶的小油缸 1、大油缸 2、油箱 6 以及连接管道构成一个密闭的工作容腔,里面充满液压油。在开关 5 关闭的情况下,当提起手柄时,小油缸 1 的柱塞上移使其工作容积增大形成真空,阀 4 在负载压力作用下处于关闭状态,油箱 6 里的油液便在大气压力作用下通过滤网 7 和单向阀 3 进入小油缸;压下手柄时,小油缸的柱塞下移,挤压其下腔的油液,阀 3 处于关闭状态,这部分压力油便顶开单向阀 4 进入大油缸,推动大柱塞从而顶起重物。再提起手柄时,大油缸内的压力将力图倒流入小油缸,但此时单向阀 4 自动关闭,使油不能倒流而只能进入大油缸以将重物顶起。这样,当手柄反复提起和压下时,小油缸不断交替进行着吸油和排油,压力油不断进入大油缸,并将重物一点点地顶起。当需放下重物时,打开开关 5,大油缸的柱塞便在重物作用下下移,将大油缸中的液压油挤回油箱 6。

图 1-1-1 油压千斤顶工作原理

1-小油缸;2-大油缸;3、4-单向阀;5-开关;6-油箱;7-滤油器

由液压千斤顶工作过程可以看出液压传动有以下几个基本条件：以在空间上连续分布且具有流动性的液体为介质,从而实现能量的传递；液体在密闭工作容腔中任意一点的压力(此处压力是指物理学中的压强)以等值沿各方向传递,即帕斯卡原理。

## 二、液压传动基本特征

通过分析上述油压千斤顶工作过程,可得出液压传动的几个基本特征:

### 1. 力的传递与变换

设小油缸作用面积为  $A_1$ ,作用外力为  $F_1$ ,大油缸作用面积为  $A_2$ ,外负载力为  $F_2$ ,小活塞移动速度为  $v_1$ ,大活塞移动速度为  $v_2$ ,忽略一切能量损失和元件泄漏。其作用力  $F_1$  和  $F_2$  之间有如下关系:

$$F_1/A_1 = F_2/A_2 \text{ (帕斯卡原理)}$$

即: 
$$F_2 = F_1(A_2/A_1) \quad (1-1-1)$$

在这里显然有:  $A_1 < A_2$ , 则  $F_2 > F_1$ , 即实现了力的放大。液压千斤顶正是利用液压传动这一特征通过在手柄上输入极小的机械力而将重物举起。

### 2. 速度的传递和变换

根据质量守恒定律,在小活塞向下压时单位时间(忽略液压油的压缩性)压出的液体体积应与进入大油缸下腔的液体体积相等,因此有:

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$$

即: 
$$v_2 = v_1(A_1/A_2) \quad (1-1-2)$$

因:  $A_1 < A_2$ , 则  $v_2 < v_1$ , 即实现了速度变换。一般来讲执行元件工作速度远小于原动机的工作速度,此外,速度的变换包括大小、方向和速度类型(即直线运动方式和旋转运动方式)的变换。

### 3. 能量的转换和守恒

由式(1-1-1)和(1-1-2)可得:  $F_1 \cdot v_1 = F_2 \cdot v_2$ , 适当变换后得:

$$F_1 \cdot v_1 = p \cdot Q = F_2 \cdot v_2 \quad (1-1-3)$$

式中:  $p = F_1/A_1 = F_2/A_2$  (Pa), 称为液压油的压力(压应力);

$Q = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$  ( $m^3/s$ ), 称为液压油的流量(单位时间流经过流截面的液体体积)。

以  $p$  和  $Q$  为能量特征的能量形式称为液压能。

由上可知从动力机(此例为小油缸 1)到工作机(大油缸 2)其能量经过了:“机械能 液压能 机械能”的变换过程,且符合能量守恒定律。

因此从能量的角度来说,液压传动是通过动力机将机械能转化成液压能,再利用流体的流动性将液压能向工作机传递。然后再通过工作机将液压能转化成机械能拖动工作负载。即以液压能为能量媒体利用液体的流动性来实现动力机与工作机的能量传递和变换。

### 4. 信息的传递

在上述工作过程中,还伴随有信息的流动,控制信息通过控制元件的协调(本例中的阀 3、4 和 5)在系统管道中合理流动,从而保证系统协调工作。

## 三、液压系统的组成

分析液压千斤顶各元件的作用,可看出该系统由以下几个部分组成:

1. 动力元件:即液压泵,其作用是将原动机的机械能转变成液压能。液压千斤顶的小油缸

1 即起到油泵的作用(实际上是一个手动泵)。

2. 执行元件:即液压缸或液压马达,其作用是将液压能转化成机械能对外做功。油压千斤顶中的大油缸 2 就是液压执行元件。

3. 控制元件:即各类控制阀,其作用是调节液压系统油液工作压力、流量和运动方向,以满足工作机械的要求。油压千斤顶中的单向阀 3、4 和开关 5 就是控制液流方向的,开关 5 还可以控制液流流量以控制重物下降的快慢。

4. 辅助装置:包括油箱、滤油器、密封件、冷却器及管道等。其作用是负责油液的贮存、净化、输送、散热和密封等辅助性工作。油压千斤顶中的油箱 6、油路及滤网 7 即为辅助元件。

5. 工作介质:即液压油,其作用是传递液压能,同时还起散热和润滑作用。

液压系统各部分组成一个有机联系的整体,各部分性能都直接影响系统工作特性。

#### 四、液压传动的特点

传递动力有 3 种基本方法:机械传动、电力传动、流体传动。实际上多数应用是采取这 3 种方法的综合,以获得有效的完善系统。

与其他形式的传动系统相比,液压传动具有以下几个方面的显著优点:

1. 质量轻、体积小;即单位重量输出功率大,因而使得机械质量轻、结构紧凑。如一个液压系统能简单、有效地将力从千分之几牛顿放大到数万牛顿输出。通常泵和液压马达单位功率的重量指标是发电机和电动机的 1/10。而且随着液压系统工作压力的提高,这一特点将更加突出。

2. 动作迅速,换向快;与电力系统相比,液压马达比电动机有较高的力矩—惯量比。液压马达的力矩-惯量比是 20,而电机是 2,所以其加速性能较强,液压马达可实现高频正反转。

3. 可实现无级调速,调速范围大,且运动平稳、不易受外界负载的影响。这是一般机械传动所无法实现的。液压传动的调速范围可达 1000 : 1。

4. 可实现恒力和恒转矩运行。对于液压系统,不管速度怎样变化,它总能提供一个恒力或恒转矩。无论工作输出量是以每小时几厘米还是每分钟几百厘米的速度运动,或是每小时几转,还是每分钟几千转的转速运行,都能保持恒力或恒转矩。

5. 液压系统借助安全阀等可自动实现过载保护,同时以液压油为介质,相对运动表面间可自行润滑,故使用寿命长。

尽管液压传动系统具有这些高度理想的特性,但对于所有动力传输问题它也不是一种万灵药方。液压传动也有其自身的缺点:如液压油比较肮脏,并且要完全消除泄漏是不可能的,外泄会造成环境污染并造成液压油的浪费,内泄会降低传动效率;液压元件制造精度要求高,因而目前液压系统成本较高;液压油粘度受温度影响大,高温和低温环境下传动性能受影响。

## 第二节 液 压 油

液压系统中最重要的材料是工作介质。因此液压油的物理、化学性能对设备的性能和寿命有决定性的作用。在正常情况下,使用清洁、高质量的液体对于达到液压系统高效率工作的目的是最重要的。

大多数现代化液压流体是为了满足工作要求而仔细配制的复杂化合物。除基本的液体外,液压油还含有特殊的添加剂,以提供所要求的特性。

液压油通常应具有 4 种主要功能：

- 1) 传递动力；
- 2) 润滑运动零件；
- 3) 密封表面粗糙零件之间的间隙；
- 4) 散热。

## 一、液压油的分类

目前液压系统采用的液压油主要有两大类：一类是矿物型液压油，一类是不燃或难燃性液压油。矿物油主要成分是石油，加入各种添加剂（抗氧化、耐高温）精制而成。矿物油润滑性好、腐蚀小、化学安全性较好，因而被大多数液压系统所采用。

不燃或难燃液压油分高水基液压油和合成型液压油两类：高水基液压油的主要成分是水，加入某些防锈、润滑等添加剂。高水基液压油价格便宜、不怕火，其缺点是润滑性差、腐蚀性大及适用温度范围小，故只在液压机（水压机）上使用。合成液压油是由多种磷酸脂和添加剂用化学方法合成，国内研制成功 4611、4602-1 等品种，其润滑性较好、凝固点低、防火性能好，适用于对防火有特殊要求的场合。

## 二、液压油的物理化学性能

### （一）密度和重度

对于均质的液体来说，单位体积所具有的质量叫做密度，单位体积所具有的重量叫做重度。

$$= m / V \quad (\text{kg} / \text{m}^3) \quad (1-1-4)$$

$$= \rho g \quad (\text{N} / \text{m}^3) \quad (1-1-5)$$

式中：m —— 液体质量(kg)；

V —— 液体体积( $\text{m}^3$ )；

g —— 重力加速度( $\text{m} / \text{s}^2$ )。

液体的密度和重度都随温度和压力的变化而变化，随压力的变化体现在液压油的压缩性，随温度的变化体现在液压油的热胀冷缩特性。但是在一般条件下，温度和压力引起的密度和重度变化很小，可近似认为液压油的密度和重度是固定不变的。

### （二）压缩性

液体受压力的作用发生体积变化的性质叫压缩性。由于液体的压缩性极小，所以在很多场合下是忽略不计的。但是在压力较高或在进行动态分析时就必须考虑液体的压缩性。液体压缩性的大小可用体积压缩系数来表示，是指液体所受的压力每增加一个单位压力时，其体积的相对变化量，即：

$$= - \frac{1}{\rho} \rho \frac{\Delta V}{V} \quad (1-1-6)$$

式中： $\rho$  —— 液体压力的变化值(Pa)；

V —— 液体体积在压力变化  $\rho$  时，其体积的变化量( $\text{m}^3$ )；

V —— 液体的初始体积( $\text{m}^3$ )。

式中负号是因为压力增大时，液体体积反而减小，反之则增大。为了使为正值，故加一负号。液体体积压缩系数的倒数，称为液体体积弹性模量，用 K 表示，即：

$$K = 1/ \quad (1-1-7)$$

常用液压油的压缩系数 =  $(5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ , 故  $K = (1.4 \sim 2) \times 10^9 \text{Pa}$ , 而钢的弹性模量为  $2.06 \times 10^{11} \text{Pa}$ , 可见液压油的弹性模量仅为钢的弹性模量的 1.65% 左右。

在实际液压系统中, 如果液压油中混入一定量的处于游离状态的气体, 会使实际的压缩性显著增加, 也就是使液体的弹性模量降低。

### (三) 液压油的粘性

液压油在流动过程中, 其微团间因有相对运动而产生内摩擦力。流动液体内部产生粘性内摩擦力的这种性质称为粘性。粘性是流体固有的属性, 但只有在流动时才呈现出来。静止流体不呈现出粘性, 粘性是液压油最重要的特性之一。

#### 1. 粘性的度量

粘性的大小用粘度来表示。粘度是液体流动的缓慢程度的度量。当粘度较低时, 液体较稀很容易流动, 难流动的液体具有较高的粘度。

太高的粘度将招致: 对流动的阻力较大, 使液体的运动缓慢; 由于摩擦损失, 增加了功率的消耗; 在阀门和管路上增加了压降; 由于摩擦而产生较高的温度。

另一方面, 如果粘度太低, 其结果是: 增加了密封处的泄漏损失; 由于运动零件之间的油膜破裂, 加快了零件的磨损。

液体粘度表示方法常用动力粘度、运动粘度和条件粘度 3 种形式。

#### (1) 动力粘度

根据牛顿内摩擦定律而导出的粘度单位叫动力粘度, 通常用  $\mu$  表示。在 SI 单位制中, 动力粘度单位为帕·秒 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ), 即:  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。常用的 SI 倍数关系为  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。在物理单位制中单位为达因·秒/厘米<sup>2</sup>, 称为泊 (P)。换算关系为:

$$1\text{P} = 0.1\text{Pa} \cdot \text{s}; 1\text{cP} (\text{厘泊}) = 1\text{mPa} \cdot \text{s}$$

考虑图 1-1-2 所示两块面积很大的光滑平板内液体流动, 上块受  $F = \tau A$  ( $A$  为上板面积, 是液体与板面的切应力) 的力作用以常速  $v$  平行于液面运动。上下板接触的液体速度分别为  $v$  和零, 板间流速  $u$  沿高度方向成线性分布, 速度梯度  $du/dz = v/h$ , 油的动力粘度可以表示为:

$$\mu = \frac{\tau}{v/h} \quad (1-1-8)$$

式中:  $\tau$  — 相邻流层之间的粘性内摩擦力;

$\mu$  — 动力粘度;

$h$  — 油膜厚度。

由上可得出动力粘度的物理意义: 动力粘度就是当速度梯度为 1 时接触层间单位面积上的内摩擦力。

图 1-1-2 平行平板液流速度分布

#### (2) 运动粘度

由于许多流体力学方程中出现有动力粘度与液体密度的比值, 于是流体力学中把同一温度下这一比值定义为运动粘度, 以  $\nu$  表示。即:

$$\nu = \mu / \rho \quad (1-1-9)$$

应当明确,运动粘度已超出基本力学涵义,本身不能像  $\mu$  一样直接表示粘性大小,但对密度相同或相近的液体(如各种液压油),显然有相同的度量比较效果,使得它能够作为粘度单位。之所以称为运动粘度,是因为其单位中含有速度与位移这种运动学的要素——时间和长度的量纲。

运动粘度的单位,在 SI 单位制中为  $\text{m}^2/\text{s}$ ,其倍数的选择为  $\text{mm}^2/\text{s}$ ,称为厘斯(cSt),厘斯的 100 倍称为斯。换算关系为:

$$1\text{m}^2/\text{s} = 10^4\text{St} = 10^6\text{cSt}$$

机械油所标明的牌号表示该液压油在 50 时其运动粘度平均值的厘斯值。所以机械油的牌号可以帮助我们明确该油的运动粘度。

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。因采用 SI 制及其倍数单位中的绝对单位制,故称为绝对粘度。各种毛细管粘度计就是用来测定绝对粘度的,但因这种方法较难掌握,一般不采用。

### (3) 条件粘度

条件粘度是指在规定条件下可以直接测量的粘度。根据测定条件的不同,各国采用的条件粘度单位不同,美国用赛氏粘度 SSU,英国用雷氏粘度 R,我国、德国和原苏联用恩氏粘度 E。

恩氏粘度是被测液体与水的粘性的相对比值。它用恩氏粘度计来测量。其测定办法是在某个标准温度 T 下,将被试液体  $200\text{cm}^3$  装入恩氏粘度计的容器中,测定这些液体经容器底部小孔(直径 2.8mm)流尽的时间  $t_1$ ,又在 20 时将  $200\text{cm}^3$  蒸馏水装入恩氏粘度计的同一容器中,测出这些水经容器底部小孔流尽的时间  $t_2$ 。时间  $t_1$  和  $t_2$  的比值就是被试液体在该标准温度 T 下的恩氏粘度。

$$E = t_1 / t_2 \quad (1-1-10)$$

式中:  $t_1$  为  $200\text{cm}^3$  的被试液体在温度 T 下流尽的时间(s);  $t_2$  为  $200\text{cm}^3$  的蒸馏水在温度为 20 时流尽的时间(s),  $t_2$  的平均值是 51s。

工业上一般用 20 和 50 和 100 作为测定恩氏粘度的标准温度,并相应地以符号 E 20、E 50 和 E 100 来表示。而一般以 50 作为测量标准温度。

通常采用如下经验公式作为恩氏粘度和运动粘度的换算式:

$$= 0.0731 E - \frac{0.0631}{E} \quad (\text{St}) \quad (1-1-11)$$

或: 
$$= 7.31 E - \frac{6.31}{E} \quad (\text{cSt})$$

还可以利用各种手册上绘制好的粘温图及标尺来进行粘度换算。

## 2. 压力对粘性的影响

一般说来,液压油的粘度随压力的增加而增大。但压力值在 20M Pa 以下时,变化不大,实用上可忽略不计。当压力很高时粘度将急剧增大,不容忽视。在实际应用中,当压力在 0 ~ 50M Pa 的范围内变化时,可用下列公式计算油的粘度:

$$v_p = v_0(1 + b_j p) \quad (1-1-12)$$

式中:  $v_p$ ——压力为 p 时的运动粘度;

$v_0$ ——在一个大气压下的运动粘度;

p——油压力;

b——系数,对于一般液压油有,  $b = 0.002 \sim 0.003(\text{Pa})^{-1}$ 。

### 3. 温度对粘性的影响

液压油的粘性对温度十分敏感,在低温范围内表现得特别强烈。液压油的粘温特性表现为温度升高粘性降低。油液粘性变化会直接影响液压系统的工作性能,因此希望液压油的粘性随温度的变化越小越好。油温在 20~80 范围内,粘温关系可用如下经验公式表示:

$$\mu = \mu_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (1-1-13)$$

式中:  $\mu$ 、 $\mu_0$ ——分别为温度为  $t$  和  $t_0$  时该油液的动力粘度,  $\alpha$  为取决于油液物理性能的粘温系数。对矿物系液压油可取  $\alpha = 1.8 \sim 3.6 \times 10^{-2} [^\circ\text{C}]^{-1}$ 。

液压油的运动粘度还可以从粘温图上查得。

液压油的粘性随温度变化而变化的程度可用粘度指数来衡量。粘度指数的代号为 VI。它表示被试油液的粘性随温度变化的程度与标准液压油的粘性随温度变化的程度之间的相对比较值。粘度指数越大的液压油其粘性随温度的变化越小,即粘温特性好。

过去,为了使油的粘度指数在 0~100 之间变化,将当时粘温特性最差的环烷基油定为 VI = 0; 而将当时粘温特性最好的石蜡基油定其 VI = 100, 以此两类油作为确定粘度指数的标准油。近年来,由于炼油技术的发展,油的品种大增,粘度指数高于 100 和低于 0 的油相继出现,因而原来设定的标准只剩下参考的价值,而 VI = 0 和 VI = 100 也失去作为液压油粘温变化界限的意义。目前,液压油的粘度指数一般要求在 90 以上,优良的在 100 以上。

在国标《GB 1995—80 石油产品粘度指数算法》中规定粘度指数计算公式如下:

(1) 粘度指数 VI = 0~100 时,

$$VI = \frac{L - U}{L - H} \times 100 \quad (1-1-14a)$$

(2) 粘度指数 VI > 100 时,

$$VI = \frac{10^{N-1}}{0.00715} + 100 \quad (1-1-14b)$$

其中: 
$$N = \frac{\lg H - \lg U}{\lg U}$$

式中:L、U、H 分别为标准油液 VI = 0、VI = 100 及 VI 待求油液在温度 40 时的运动粘度,其单位均为 cSt。

在计算时,H、L 的数值在国标(G B 1995—80)中有表可查用。但在实际工作中,只要知道液压油在 40 和 100 时的运动粘度(cSt)后,其粘度指数值可在国标《GB 2541—81 石油产品粘度指数计算表》中直接查到,不用计算。

### 4. 调和油的粘度

有时,一种液压油的粘度不符合要求,必须用几种液压油调节达到要求的粘度,则此调和油的粘度可用下式计算:

$$E = \frac{a E_1 + b E_2 - c(E_1 - E_2)}{100} \quad (1-1-15)$$

式中:  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E$ ——参加调和的两种油及调和后的粘度,而且  $E_1 > E_2$ ;

$a$ 、 $b$ ——参加调和的两种油各占的百分数, $a + b = 100$ ;

$c$ ——试验所得的系数,见表 1-1-1。