

工程机械液压传动 原理、故障诊断与排除

刘忠 杨国平 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



工程机械液压传动 原理、故障诊断与排除

刘忠 杨国平 编著

龙国键 审定



机械工业出版社

液压传动技术几乎渗透到现代工程机械的每个领域。本书通过大量的实例,采用由浅入深、通俗易懂的形式,详细地介绍了常用工程机械(挖掘机、推土机、装载机、压路机、摊铺机、工程起重机、混凝土泵车等)液压传动系统原理与故障诊断技术。

本书可供工程机械设备管理人员、驾驶操作人员和维护修理人员阅读使用,也可作为从事各类工程机械设计的科技人员和高等院校工程机械及相关专业师生的实用工具书。

图书在版编目(CIP)数据

工程机械液压传动原理、故障诊断与排除/刘忠,杨国平编著
—北京:机械工业出版社,2004.8

ISBN 7-111-14103-2

I. 工… II. ①刘… ②杨… III. ①工程机械—液压传动—原理②工程机械—液压传动—故障诊断③工程机械—液压传动—故障修复 IV. TU60

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第016138号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:曲彩云 张亚秋 责任印制:石冉

三河市宏达印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005年1月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·26.25印张·631千字

0001—4000册

定价:48.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着我国国民经济的快速发展，能源、交通、城市建设的发展步伐进一步加快，建设工程点多面广，作为机械化施工主要设备的建设工程机械起着越来越重要的作用。工程机械液压设备的性能直接影响到工程施工的质量和速度，其液压系统的故障是往往引起工程机械设备整机故障的主要原因。因此，在充分熟悉工程机械液压传动系统工作原理的基础上，还必须掌握其液压传动系统的故障诊断技术。

本书详细的分析了建设工程机械液压传动原理，结合大量实例介绍了工程机械液压传动系统及其关键液压元件的故障诊断与排除方法。它可为从事工程机械设计的技术人员提供液压系统设计的理论依据；可为工程机械操作人员和维护管理人员快速排除设备故障提供帮助；也可作为高等院校工程机械及相关专业的教学参考用书。

本书由刘忠、杨国平编著，龙国键主审。此外，刘勇、黄琼、艾继承、朱浩参加了部分编写工作。

本书得到了建设部长沙建设机械研究院副院长龙国键研究员和孙在鲁研究员、清华大学精密仪器与机械学系博士生导师褚福磊教授、中南大学机电工程学院博士生导师杨襄璧教授的细心审阅与热情指导。此外，还得到了长沙中联重工科技发展股份有限公司有关领导、湖南师范大学工学院李仲阳教授和郑从富副教授以及长沙博大工程机械有限公司有关同志的大力支持和帮助，他们为本书提供了宝贵的资料，在此一并致以衷心的感谢。

在编著过程中，参阅了国内外有关文献、书籍和技术资料，未一一列举，在此谨向有关作者和单位表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥或谬误之处，欢迎读者和同行专家批评指正。

编著者

2005年1月于长沙岳麓山

目 录

前言

第1章 液压与液力传动基础理论	1
1.1 概述	1
1.1.1 液压传动发展概况	1
1.1.2 液压传动的优势与不足	1
1.1.3 液压传动在工程机械中的应用	2
1.2 液压传动系统工作原理与组成	3
1.2.1 液压传动系统的工作原理	3
1.2.2 液压传动系统的组成	4
1.3 液压油	4
1.3.1 液压油液的特性	4
1.3.2 液压油的分类	7
1.3.3 对液压油的要求和选用	9
1.4 液压流体力学基础	10
1.4.1 液体静力学原理	10
1.4.2 液体动力学原理	13
1.4.3 管路中液体的压力损失	17
1.4.4 液体流经孔口和缝隙的流量—压力特性	20
1.4.5 液压冲击及气穴现象	24
1.5 液力传动基础	24
1.5.1 概述	24
1.5.2 液力流体力学基础	28
第2章 工程机械常用液压元件	35
2.1 液压泵和液压马达	35
2.1.1 概述	35
2.1.2 齿轮泵和齿轮液压马达	39
2.1.3 叶片泵及叶片液压马达	43
2.1.4 柱塞液压泵和柱塞液压马达	50
2.2 工程液压缸	62
2.2.1 活塞式液压缸	62
2.2.2 柱塞液压缸	66
2.2.3 伸缩式套筒液压缸	67
2.2.4 摆动液压缸	67
2.3 液压控制阀	72
2.3.1 概述	68
2.3.2 方向控制阀	69
2.3.3 压力控制阀	73

2.3.4	流量控制阀	83
2.3.5	多路换向阀	88
2.3.6	逻辑阀	90
2.3.7	伺服阀	93
2.3.8	电液比例阀	95
2.3.9	高速开关阀	99
2.4	液压辅助装置	106
2.4.1	油箱及其附件	101
2.4.2	蓄能器	103
2.4.3	过滤器	105
2.4.4	油管及管接头	108
2.4.5	密封装置	111
第3章	工程机械液压传动系统基本型式	114
3.1	基本回路	114
3.1.1	压力控制回路	114
3.1.2	速度控制回路	115
3.1.3	方向控制回路	121
3.2	液压传动系统的型式	122
3.2.1	开式系统与闭式系统	122
3.2.2	单泵、双泵与多泵系统	123
3.2.3	定量系统与变量系统	125
3.2.4	串联与并联系统	127
3.3	工程机械液压系统性能指标与要求	128
3.3.1	液压系统的效率(经济性指标)	129
3.3.2	功率利用(节能性指标)	130
3.3.3	调速范围(调速指标)	130
3.3.4	液压系统刚度(机械特性指标)	130
3.3.5	负载能力(工作性能指标)	130
第4章	工程机械液压传动系统设计与实践	131
4.1	液压传动系统的设计	131
4.1.1	工况分析	131
4.1.2	液压元件主要参数的计算与选择	132
4.1.3	液压系统的验算	135
4.1.4	绘制正式工作图、编制技术文件	137
4.2	液压传动系统的安装与调试	146
4.2.1	液压系统的安装	138
4.2.2	液压系统的清洗与试压	141
4.2.3	液压系统的调试	142
4.3	液压传动系统的使用与维护	152

4.3.1	液压油的使用和维护	144
4.3.2	防止空气进入液压系统	144
4.3.3	防止油温过高	145
第5章	典型工程机械液压传动系统分析	146
5.1	挖掘机液压传动系统	146
5.1.1	EX400型液压挖掘机液压系统分析	146
5.1.2	WY100型履带式液压挖掘机液压系统分析	149
5.1.3	WY160液压挖掘机液压系统分析	150
5.2	装载机液压传动系统	152
5.2.1	KLD80装载机液压系统	152
5.2.2	ZL100装载机液压系统	155
5.2.3	天工——利勃海尔L551B装载机作业液压系统	157
5.3	推土机液压传动系统	168
5.3.1	D8N推土机液压传动系统	160
5.3.2	TY320(D155A)推土机液压系统	163
5.3.3	D355A型推土机工作装置液压系统	166
5.4	铲运机液压传动系统	168
5.4.1	922型铲运机液压系统	168
5.4.2	CY928D型铲运机液压系统	172
5.5	平地机液压传动系统	176
5.5.1	PY180型平地机液压系统	176
5.5.2	PY190型自行式平地机液压系统	180
5.6	压路机液压传动系统	182
5.6.1	CC21型振动压路机的液压控制系统	183
5.6.2	YZC12串联式振动压路机液压系统分析	184
5.6.3	YZ18全液压重型振动压路机液压系统	186
5.7	工程起重机液压传动系统	189
5.7.1	NK250E—III型汽车起重机的液压系统	189
5.7.2	160吨伸缩臂式铁路起重机液压系统	197
5.7.3	船用起重机液压系统分析	200
5.8	混凝土泵及泵车液压传动系统	204
5.8.1	HBT40混凝土泵液压系统	205
5.8.2	GEHO系列混凝土泵液压控制系统	208
5.8.3	国外混凝土泵车液压系统分析	210
5.9	摊铺机液压传动系统	216
5.9.1	沥青混凝土摊铺机液压系统	216
5.9.2	DYNAPAC F18C/S型沥青混合料摊铺机液压系统分析	221
5.10	钻凿掘进机械液压系统	229
5.10.1	QZL-165型潜孔钻机液压系统分析	229

5.10.2	TH530 型全液压钻车液压系统	232
5.10.3	SJ-4 全断面岩石掘进机的液压系统	237
5.11	其它工程机械液压系统分析	240
5.11.1	FD150 系列叉车双速起升液压系统的工作原理	240
5.11.2	液压打桩锤的液压系统分析	245
5.11.3	张力架线机液压系统分析	248
5.11.4	MGTY250/600-1.1D 型电牵引采煤机液压系统	251
第 6 章	工程机械液压传动系统故障诊断方法	255
6.1	工程机械液压传动系统故障原因分析	255
6.1.1	对工程机械液压系统的要求	255
6.1.2	工程机械液压系统常见故障	255
6.1.3	工程机械液压系统故障原因	256
6.2	工程机械液压传动系统故障诊断基本方法	258
6.2.1	工程机械液压系统故障诊断的一般步骤	258
6.2.2	直观检查法	259
6.2.3	操作调整检查法	259
6.2.4	对比替换检查法	260
6.2.5	仪表测量检查法	260
6.2.6	逻辑分析法	261
6.2.7	事故树分析法	262
6.2.8	模糊数学方法	262
6.2.9	灰色关联度诊断法	263
6.2.10	专家诊断系统分析法	265
6.3	工程机械液压传动系统故障诊断技术的发展	265
6.3.1	基于液压装置信息检测的故障检测与诊断技术	266
6.3.2	基于油液污染检测的故障诊断技术	267
第 7 章	工程机械常用液压元件的故障诊断	269
7.1	液压泵的故障诊断与排除	269
7.1.1	齿轮泵故障诊断与排除	269
7.1.2	叶片泵的故障诊断与排除	271
7.1.3	柱塞泵的故障诊断与排除	274
7.2	工程用液压马达故障诊断与排除	276
7.3	工程液压缸的故障诊断与排除	277
7.3.1	柱塞缸	278
7.3.2	活塞缸	278
7.4	液压阀的故障诊断与排除	282
7.4.1	液压阀的失效原因及几种典型的液压现象	282
7.4.2	溢流阀的故障分析和排除	284
7.4.3	单向阀的故障分析和排除	287

7.4.4	换向阀的故障分析和排除	288
7.4.5	减压阀的故障分析和排除	290
7.4.6	平衡阀的故障分析和排除	291
7.4.7	顺序阀的故障分析和排除	292
7.4.8	伺服阀的故障分析和排除	293
7.4.9	比例阀的故障分析和排除	295
7.5	液力偶合器故障诊断与排除	295
7.6	工程机械液力变矩器的故障诊断与排除	296
第8章 工程机械液压传动系统常见故障与诊断排除实例		301
8.1	推土机液压传动系统故障诊断与排除	301
8.1.1	TY220 型履带式推土机液压系统故障分析与排除	301
8.1.2	小松 D155 型推土机液压传动系统故障诊断与排除	304
8.1.3	T140—1 型推土机液压系统常见故障及排除	306
8.1.4	CATD8N 履带式推土机液压油温过高行走无力故障的排除	309
8.1.5	小松 D85A 推土机液力传动系统油温过高的原因与排除	311
8.1.6	上海-320 型推土机底盘液压系统的故障与排除	314
8.1.7	推土机变速液压系统故障的检查与判断	317
8.1.8	工程推土机的保养、调整与常见故障的排除	319
8.2	挖掘机液压传动系统故障诊断与排除	325
8.2.1	液压挖掘机液压传动系统故障的判断与排除	325
8.2.2	PC220-5 型挖掘机铲斗缸和左行走马达工作无力故障的排除	330
8.2.3	PC 系列挖掘机回转缓慢和回转制动失灵故障的排除	332
8.2.4	WY60 型轮式挖掘机转向系统故障分析与排除	333
8.2.5	液压挖掘机 OLSS 控制系统故障的排除	334
8.2.6	挖掘机液压油温升过快且过高的原因及解决措施	337
8.2.7	挖掘机斗杆缸活塞杆不能缩回故障的诊断	339
8.2.8	WY160A 挖掘机液压系统故障诊断	341
8.3	装载机液压传动系统故障诊断与排除	343
8.3.1	装载机液压系统常见故障原因分析及排除方法	343
8.3.2	装载机全液压转向系统故障及排除方法	345
8.3.3	ZL50 装载机液压系统高温故障诊断	346
8.3.4	装载机液压系统故障诊断与状态监测	349
8.4	工程起重机液压传动系统故障诊断与排除	352
8.4.1	汽车起重机吊臂伸缩油路常见故障分析与排除	352
8.4.2	NK-300 汽车起重机液压系统故障排除一例	354
8.4.3	QY16 全液压汽车起重机起升紊乱的故障诊断	355
8.4.4	QTZ25 型塔式起重机顶升液压系统故障诊断与排除	358
8.5	混凝土泵(车)液压传动系统故障诊断与排除	360
8.5.1	混凝土泵液压系统故障分析两例	360

8.5.2	IPF-85B 混凝土泵车主液压系统故障分析	361
8.5.3	混凝土泵车泵送无力故障的分析与排除	363
8.5.4	混凝土泵(车)的常见故障与排除	365
8.6	压路机液压传动系统故障诊断与排除	367
8.6.1	压路机行走机构液压系统故障诊断与排除	367
8.6.2	BW214D 压路机行走液压系统的故障诊断与调整	369
8.6.3	YZT14G 型压路机液压振动系统常见故障的诊断及排除	371
8.6.4	CA25D 型振动压路机行走无力和振动间断故障的判断与排除	374
8.7	液压冲击机械液压传动系统故障诊断与排除	376
8.7.1	液压凿岩机液压系统故障的诊断与排除	376
8.7.2	COP1038HD 型凿岩机液压系统的故障诊断及对策	379
8.7.3	凿岩台车液压系统故障探析	381
8.7.4	TB-700x 型液压碎石冲击器的故障处理	382
8.8	其他工程机械液压传动系统故障诊断与排除	384
8.8.1	稳定土拌和机液压系统的故障诊断	384
8.8.2	WBL20 型稳定土拌和机液压系统故障诊断两例	385
8.8.3	叉车液压系统常见故障的分析及排除方法	387
8.8.4	蓄电池叉车液压系统两种常见故障排除	388
8.8.5	TOR0151E 铲运机液压传动系统故障诊断	389
8.8.6	PY160B 平地机液压与液力传动系统故障诊断与排除	393
8.8.7	MLS3-170 采煤机液压系统故障分析及处理	396
8.8.8	LT6 型沥青混凝土摊铺机液压系统常见故障及排除	396
8.8.9	自卸汽车车箱举升不起的故障分析与诊断	401
8.8.10	卡玛斯 55111 型自卸车液压系统故障的诊断与排除	402
8.8.11	混凝土搅拌机液压系统常见故障分析与排除	403
	参考文献	407

第 1 章 液压与液力传动基础理论

1.1 概述

1.1.1 液压传动发展概况

液压传动技术是实现现代传动与控制的关键技术之一，在工程机械、机床工业、汽车制造、冶金矿山、航天航空等工业领域，得到了广泛的应用与普及。

17 世纪帕斯卡提出了著名的帕斯卡定理，奠定了液压传动的理论基础；18 世纪末英国制成了世界上第一台水压机；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。由于当时机械加工制造水平较低，没有成熟可靠的液压元件，因而液压传动技术并未得到普遍应用。液压传动技术经历了很长的历史时期，但作为现代传动与控制技术的发展却只需追溯到第二次世界大战期间，由于当时工业和军事工程的需要，对液压控制系统的快速性、动态精度、功率—重量比提出了很高的要求。在这期间出现了动作准确、反应迅速、驱动功率大的液压传动装置，并用于飞机、大炮和坦克，而且在舰艇上也出现了电液控制阀及其伺服系统，推动了液压传动技术的发展。第二次世界大战后，液压技术迅速从军事领域转向民用工业，世界上几乎所有的机械装备都能见到液压技术的踪迹。

当前，液压传动技术正向高压、高速、高集成化、大功率、高可靠性方向发展，现代液压传动技术与以微电子技术、计算机控制技术、传感技术等为代表的新技术紧密结合，形成了一个完善而高效的控制中枢，成为包括传动、控制、检测、显示乃至诊断、校正、预报在内的机电液一体化技术（Hydromechatronics）。它是大中功率机械设备实现自动化不可缺少的基础支撑技术，应用极为广泛。

1.1.2 液压传动的优势与不足

液压传动技术几乎渗透到所有的现代工业领域，特别是近二、三十年来得到了广泛而迅速的应用和发展。和机械传动、电力传动相比，液压传动具有独特的优点。概括起来，有以下几个方面：

1) 在相等的体积下，液压传动装置比电气装置产生的动力更大；在同等功率的情况下，液压传动装置体积小，重量轻，结构紧凑。

2) 液压传动装置能在很大的范围内实现无级调速，而且工作准确平稳；结构简单，成本低廉。

3) 液压传动装置易于实现自动化，可以完成各种复杂的动作，并且操作简便。

4) 液压传动装置容易实现过载保护。液压元件能自行润滑，因而磨损少，使用寿命长。

5) 液压元件已实现了标准化、系列化、通用化，液压系统的设计、制造和使用都非常方便。液压元件的排列布置具有较大的柔性。

液压传动的不足：

- 1) 由于存在摩擦损失和泄漏损失, 液压传动系统能量损失较大。
- 2) 对油液的清洁度要求较高, 并要求定期更换。
- 3) 液压传动系统对温度的变化比较敏感, 它的工作性能易受温度的影响。
- 4) 液压系统与元件制造维护要求较高, 价格较贵, 且进行故障诊断较困难。

总而言之, 液压传动系统由于其优势明显, 因而在现代工业领域得到广泛应用, 它的一些不足也将随着科学技术的进步而逐步得到克服。

1.1.3 液压传动在工程机械中的应用

随着国民经济的迅速发展, 作为主要施工设备的工程机械在国家经济建设中发挥着越来越重要的作用。由于液压传动装置具有功率密度高、易于实现直线运动、速度刚度大、便于冷却散热、动作实现容易等突出优点, 因而在工程机械中得到了广泛的应用。目前 95% 以上的工程机械都采用了液压技术, 工程机械液压产品在整个液压工业销售总额中占 40% 以上, 现在采用液压技术的程度是衡量一个国家工业水平的重要指标。

工程机械最初采用液压传动技术是为了解决车辆转向阻力问题, 以减轻司机的劳动强度, 在转向系中使用了液压助力器。由于液压助力器在应用过程中显示出的突出优点以及人们对液压元件和液压系统研究的深入, 液压传动装置及技术很快在工程机械领域中推广应用, 其发展经历了以下几个阶段。

1. 应用初期

20 世纪 40~50 年代是工程机械液压传动技术应用的初期阶段。人们摸索着将简单的液压元件和液压系统应用到工程机械上来解决用其他方式比较难以实现的问题(如执行器的直线运动等)。其系统工作压力一般很低, 大约在 2~7MPa。

2. 高速发展阶段

工程机械液压传动技术的应用在 20 世纪 60、70 年代发展迅速, 其液压传动系统向着高速、高压化发展, 系统压力的提高使得液压传动功率密度大幅度增加、液压元件的重量明显下降。液压传动技术的应用逐渐由工程机械工作装置扩展到转向系统、行走系统、传动系统和制动系统, 人们研制出了全液压挖掘机和全液压叉车等工程机械。

3. 增强可靠性阶段

大多数工程机械都在野外作业, 工作环境恶劣, 其液压系统经常受到尘埃、振动、高温低寒、风雨雪的影响; 同时, 由于液压元件如泵在高速、高压运转时所产生的噪声、振动的原因, 工程机械的液压传动系统常常引发故障。因此在 20 世纪 80 年代, 降低工程机械液压系统污染、提高设备可靠性便成为这一时期的应用主题。

4. 电液控制技术应用阶段

随着微电子和计算机技术的迅猛发展, 使现代控制理论在工程机械液压传动装置中的应用成为现实。计算机控制的变量泵系统、采用高速开关阀和步进电机驱动的数字阀大大提高了液压系统的效率。出现了智能型液压挖掘机、凿岩隧道机器人、混凝土泵车等工程机械机型, 大大提高了设备的作业精度和发动机的功率利用率。以计算机技术为核心的机电液一体化技术在液压系统中的应用标志着现代工程机械液压传动与控制的最高水平。

目前几乎所有工程机械的工作装置都采用了液压传动控制。即使以前很少采用液压技术的塔式起重机, 现在也开始用低速大扭矩液压马达驱动起重机的提升、变幅、回转等机

构，出现了全液压塔式起重机，大大提高了起重机操作性能和调速性能。装载机采用了转向液压缸来实现整机转向控制，全液压挖掘机则通过对内外侧车轮的驱动液压马达转速的控制实现滑移转向，甚至原地转向，大大提高了整机的机动性和灵活性。由于静液传动具有满载工况下启动平稳、功率损耗小、易于实现前进倒退的转换、可实现无级调速、传递功率大等优点，而广泛应用在工程机械行走系统中。

工程机械的变速箱大都采用了液压操作的动力换档变速箱，大大减轻了司机的劳动强度，提高了传动系换档性能。此外，由于液压制动器动作响应快、制动平稳可靠，因而在工程机械制动系中得到了普及应用。

总之，液压传动与控制技术几乎渗透到工程机械的每个部分，达到了“无液不成机”程度。

1.2 液压传动系统工作原理与组成

1.2.1 液压传动系统的工作原理

图 1.1 为国内多数厂家采用的塔式起重机液压顶升机构工作原理图。具体布置为：平衡阀 10 采用板式或管式结构装于液压缸 1 之上，液压泵 4、过滤器 6、7 等均装入油箱 5 内部，而手动换向阀 9、溢流阀 8 则装在油箱箱体上。

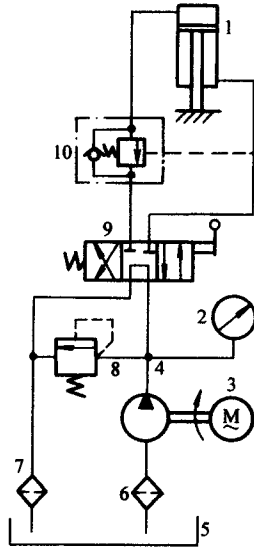


图 1.1 液压顶升机构工作原理图

- 1—顶升液压缸 2—压力表 3—电动机 4—液压泵 5—油箱 6—吸油过滤器
7—回油过滤器 8—溢流阀 9—手动换向阀 10—平衡阀

电动机 3 启动后，液压泵 4 来油经 M 型手动换向阀 9 中位回油。推动手柄当换向阀 9 处于左位时，压力油经外控平衡阀 10 单向阀口进入顶升液压缸大腔，塔机向上顶升；反之，换向阀 9 处于右位，压力油进入液压缸小腔的同时开启平衡阀 10，使大腔油液流回油箱 5；液压泵 4 出口处溢流阀 8 起安全阀作用。此油路结构简单、维修方便，可满足一般塔机顶

升要求。当外载压力低于安全阀调定压力 90% 以下时，系统不具备速度调节功能；当两者接近且安全阀调定压力略大于外载压力时（压力差小于 10%）顶升速度可以微调。

由此可见任何一种工程机械设备都由三部分组成，即动力装置、工作机构和传动机构。

工作机构为了完成设备的任务，对力、速度等有一定的要求；而动力装置往往难以满足这些要求，因此需要传动机构将动力装置的能量传递给工作机构，并对其进行控制，以满足工作机构的要求。

工程机械常以液体为工作介质，利用液压传动和液力传动来传递和控制能量。

1.2.2 液压传动系统的组成

液压传动系统，除以液体为传动介质外，通常由以下四部分组成：

1. 动力元件

将机械能转化为液体压力能的元件。如上述塔机液压顶升机构中的液压泵即起此种作用。最常见的形式是液压泵，它为液压系统提供压力油。

2. 执行元件

将液体的压力能转化为机械能的液压元件。塔机液压顶升机构中的液压缸即起此种作用。在液压系统中常见的是作直线往复运动的液压缸或作回转运动的液压马达。

3. 控制调节元件

对液压系统的压力、流量和液流方向进行控制或调节的元件。塔机液压顶升机构中的溢流阀、手动换向阀和平衡阀即属于此类元件。液压系统中的液压控制阀均为控制调节元件。

4. 辅助元件

上述三部分以外的其他元件。塔机液压顶升机构中的油箱、吸油过滤器、回油过滤器属此类元件。液压系统中的油箱、油管、管接头、压力表、过滤器和冷却器等均为辅助元件，它们对保证系统的正常工作也有重要作用。

1.3 液压油

1.3.1 液压油液的特性

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，油液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与工作液体的选择是十分重要的。

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。

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

式中 G ——液体的重量 (N)；

V ——液体的体积 (m^3)。

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

2) 密度: 液体单位体积的质量称为密度。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

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

由于重量等于质量乘重力加速度 g , 即 $G=mg$, 所以:

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1-3)$$

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

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的变化很小, 所以在一般使用条件下, 油液的密度可视为常数。

(2) 压缩性 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。

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

式中 V ——增压前液体的体积 (m^3);

ΔV ——压力增量 Δp 时, 因压缩而减小的体积 (m^3);

Δp ——压力增量 (Pa);

β ——体压缩率或称压缩系数。

式(1—4)中 β 为正值, 而当压力增加, Δp 为正值时, 体积总是减少, 即 ΔV 为负值, 所以在上式的左边要加一负号。 β 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。

β 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 β 的倒数称为容积弹性模数, 其值为:

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

从上式中可以看出, 油液的弹性模数约为钢的弹性模数的 $1/100\sim 1/150$ 倍。当油液中混有空气时, 可压缩性将显著增加。例如油中混有 1% 空气时, 则其容积弹性模数降低

到纯油的 5% 左右；油中混有 5% 空气时，其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 当液体在外力作用下流动时，由于液体与固体壁面的附着力及液体本身分子之间内聚力的存在，使液体内部各处的速度产生差异。如图 1.2 所示，液体在管路中流动时的速度并不相等，紧贴管壁的液体速度为零，管路中心处的速度最大。我们可将管中液体的流动看成是许多无限薄的同心圆筒形的液体层的运动，运动较慢的液体层阻滞运动较快的液体层，而运动较快的液体层又带动运动较慢的液体层，这种液体层之间的作用类似于固体之间的摩擦过程，因而在液体之间产生摩擦力。由于这种摩擦力是发生在液体内部，所以称为内摩擦力。

液体在外力作用下流动时，在其内部产生内摩擦力的性质，就称为液体的粘性。粘性所起的作用只能延缓液体内部相互滑动的过程，而不能消除这种滑动。液体只有流动时，才会呈现粘性，而静止的液体不呈现粘性。它是液体一个非常重要的特性，其大小可用粘度来衡量。

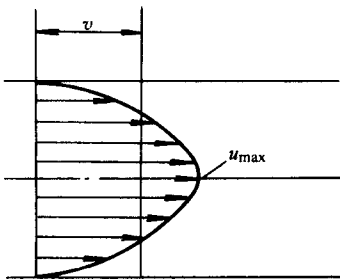


图 1.2 液体在管道内的速度分布

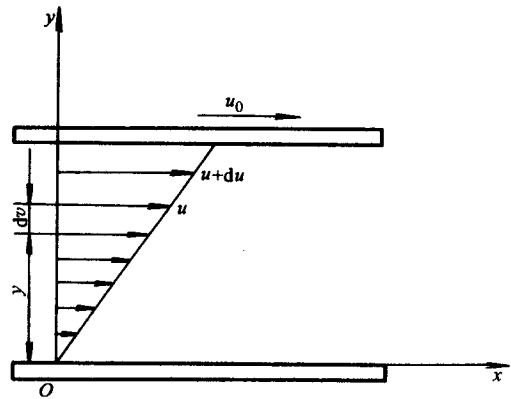


图 1.3 液体的粘性表示图

1) 动力粘度 μ 实验表明(牛顿内摩擦定律)，液体流动时相邻液层间的内摩擦力 F_f 与液层接触面积 A 、液层间的速度梯度 du/dy 成正比，如图 1.3 所示，可用下式表示：

$$F_f = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

若用单位面积上的摩擦力(切应力)来表示，则式(1-6)可改写成：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式中 μ ——比例系数，称为动力粘度，单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕·秒)。

以前(CGS 制中)使用的单位是 $\text{dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$ (达因·秒每二次方厘米)，又称为 P (泊)。
 $1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{P} = 10^3\text{cP}$ (厘泊)。

由式(1-7)可知，液体动力粘度 μ 的物理意义是：当速度梯度等于 1 时，接触液体层间单位面积上的内摩擦力 τ 。

2) 运动粘度 动力粘度和液体密度 ρ 的比值，就称为液体的运动粘度 ν 。即：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-8)$$

运动粘度的单位是 m^2/s ，工程单位制使用的单位还有 cm^2/s ，通常称为 St（斯），工程中常用 cSt（厘斯）来表示， $1\text{m}^2/\text{s}=10^4\text{St}=10^6\text{cSt}$ 。运动粘度 ν 虽没有明确的物理意义，但习惯上常用它来标志液体的粘度，例如各种矿物油的牌号就是该种油液在 400°C 时的运动粘度 ν （单位为 cSt）的平均值。

3) 相对粘度 相对粘度又称条件粘度，它是采用特定的粘度计在规定的条件下测出的液体粘度。

德国、前苏联等国家采用恩氏粘度 $^\circ\text{E}$ ，美国用赛氏粘度 SSU，英国则用雷氏粘度 RS。

恩氏粘度用恩氏粘度计测定：将 200mL 温度为 t （单位为 $^\circ\text{C}$ ）的被测液体装入恩氏粘度计的容器内，由其下部直径为 2.8mm 的小孔流出，测出液体流尽所需的时间 t_1 （s），再测出 200mL 温度为 20°C 的蒸馏水在同一粘度计中流尽所需的时间 t_2 （标定值，一般 $t_2=50\sim 52\text{s}$ ）。

这两个时间的比值便是该液体在 $t^\circ\text{C}$ 时的恩氏粘度： $(t/t_2)^\circ\text{E}$ 。一般以 20°C 、 40°C 、 50°C 及 100°C 作为测定液体粘度的标准温度，由此而得到的恩氏粘度分别用 $^\circ\text{E}_{20}$ 、 $^\circ\text{E}_{40}$ 、 $^\circ\text{E}_{50}$ 、 $^\circ\text{E}_{100}$ 来标记。

液体粘度的测定可用旋转粘度计或运动粘度测定器直接测定，也可以先测出液体的相对粘度，然后再根据关系式换算出动力粘度或运动粘度。恩氏粘度与运动粘度间的换算关系式为：

$$\nu = \left(7.31^\circ\text{E} - \frac{6.31}{^\circ\text{E}}\right) \times 10^{-6} \quad (1-9)$$

液体粘度随液体压力和温度的变化而变化。对液压油而言，压力增大，粘度增大，但其变化量很小，在一般的中、低压系统中可以忽略不计。但液压油的粘度受温度变化的影响十分敏感，温度升高，使液体中分子间的内聚力减小，粘度降低。液压油的粘度随温度变化的关系称为液压油的粘温特性。液压油粘度的变化直接影响液压系统的性能和泄漏量。因此，希望粘度随温度的变化越小越好，即粘温特性要好。粘温特性可用粘度指数 $V\cdot I$ 表示。粘度指数 $V\cdot I$ 是用被测油液粘度随温度变化的程度同标准油液粘度变化程度比较的相对值。

$V\cdot I$ 值越高，表示液压油粘度随温度变化越小，即粘温特性越好。对于普通的液压传动系统，一般要求 $V\cdot I > 90$ 。

2. 其他性质

作为传动介质的液压油还需要有其他一些性质，如热安定性、氧化安定性、抗泡沫性、抗乳化性、防锈性、润滑性以及相容性（标志它和密封材料、涂料等起作用的程度）等。这些性质都对液压油的选择和使用有重要的影响，需在精炼的矿物油中加入各种添加剂来获得。

1.3.2 液压油的分类

在 GB/T498-1987 中“润滑剂和有关产品”规定为 L 类产品。在 CB/T7631.1-1987 中，又将 L 类产品按应用场合分为 19 个组，H 组用于液压传动系统（见表 1.1）。GB/T3141-1994 将工业液体润滑剂按 40°C 时的运动粘度的中心值分为 20 个粘度等级（见表 1.2）。