

工程机械液压传动原理、 故障诊断与排除

刘忠 等编著

第2版



 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

第 2 版

刘 忠 钟佳炜 高新豪 编著
程龙瑞 蒋 波 王伟华



机械工业出版社

液压与液力传动技术几乎渗透到现代工程机械的各个领域。本书在阐述其基本原理的基础上,通过大量的工程实例,采用由浅入深、通俗易懂的形式详细地介绍了常用工程装备(起重机、挖掘机、推土机、装载机、压路机、摊铺机、混凝土泵车等)液压与液力传动系统的原理、故障诊断与排除技术。

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技术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/刘忠等编著. —2版. —北京:机械工业出版社, 2018.4

ISBN 978-7-111-59150-4

I. ①工… II. ①刘… III. ①工程机械-液压传动 IV. ①TH137

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第028041号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:黄丽梅 责任编辑:黄丽梅 责任校对:刘志文

封面设计:陈沛 责任印制:张博

三河市国英印务有限公司印刷

2018年6月第2版第1次印刷

184mm×260mm·33.5印张·824千字

0001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-59150-4

定价:129.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

工程机械的发展水平是国家宏观经济发展的重要标志，随着我国“一带一路”战略的持续推进，参与该战略的沿线国家大量的基础建设工程为工程机械提供了新的发展机遇。借势“一带一路”战略，开启全球化之路，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，涉及的领域和范围不断扩大，作为机械化施工主要设备的工程机械起着越来越重要的作用。工程机械液压与液力传动系统是工程装备的驱动控制单元，其性能的优劣直接影响工程施工的质量和速度，液压与液力传动系统的故障往往是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与液力传动系统工作原理的基础上，还必须掌握其液压与液力传动系统的故障诊断技术。

本书由刘忠、钟佳炜、高新豪、程龙瑞、蒋波、王伟华编著，其中刘忠编写了第1、2、3章及第5、8章的绝大部分；钟佳炜编写了第4章，并参加了全书的校稿工作；高新豪编写了第7章；程龙瑞编写了第6章；蒋波、王伟华参加了第5、8章的部分编写，并绘制了全书的原理插图。全书由刘忠统稿。

北京航空精密机械研究所罗松保研究员、中南大学罗春雷教授、广西大学蔡敢为教授对本书的修订提出了宝贵的意见。在本书的编著过程中，还得到了国家电网西藏电力公司易建山总工程师、国网西藏电力经研院洛桑达娃院长、山河智能无锡必克液压股份有限公司聂雄总经理、湖南宏迅亿安新能源科技有限公司朱浩董事长、江苏常熟安得电力机具制造有限公司周丹总经理以及桂林华力重工机械有限责任公司的有关领导和同志们的大力支持和帮助，他们为本书提供了宝贵的技术资料，并提出了很好的建议，在此一并致以衷心的感谢！

特别感谢桂林航天工业学院领导和专家的热情支持和鼓励，他们为作者及团队成员提供了优越的科研和学习平台，使本书得以顺利完成。

此次再版修订，离不开广大读者和同行的厚爱与帮助，特别要感谢机械工业出版社的领导和编辑老师，他们为此书的再版和修订付出了辛勤的劳动。

本书在编著过程中，参阅了国内外有关文献、书籍和技术资料，挂一漏万，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 者

目 录

前 言

第 1 章 液压与液力传动理论 1

1.1 液压传动基础 1

1.1.1 流体液压技术的发展史 1

1.1.2 液压传动的基本概念 2

1.1.3 液压传动的工作介质 5

1.1.4 液压油的要求与选用 8

1.1.5 液压传动系统的基本参数 9

1.1.6 静止液体的基本性质 9

1.1.7 液体流动的基本规律 13

1.1.8 液体在缝隙和小孔中的流动 规律 15

1.1.9 液体流动的压力损失 19

1.1.10 液压冲击和气穴现象 21

1.2 液力传动基础 25

1.2.1 概述 25

1.2.2 液力传动的流体力学基础 28

1.3 液压传动在工程机械中的应用及其 发展趋势 33

1.3.1 液压传动在工程机械中的应用 33

1.3.2 液压传动技术的发展趋势 34

第 2 章 工程机械常用液压、液力 元件 37

2.1 液压动力元件 37

2.1.1 液压泵概述 37

2.1.2 齿轮泵 40

2.1.3 叶片泵 42

2.1.4 柱塞泵 47

2.1.5 液压泵的选用 52

2.2 液压执行元件 52

2.2.1 液压缸 52

2.2.2 液压马达 61

2.3 液压控制元件 67

2.3.1 液压阀概述 67

2.3.2 方向控制阀 69

2.3.3 压力控制阀 77

2.3.4 流量控制阀 83

2.3.5 逻辑插装阀 89

2.3.6 电液比例阀 94

2.3.7 电液伺服阀 96

2.3.8 电液数字控制阀 101

2.4 液压辅助元件 104

2.4.1 油箱及其附件 104

2.4.2 蓄能器 106

2.4.3 过滤器 109

2.4.4 油管及管接头 113

2.4.5 密封装置 116

2.5 液力元件 119

2.5.1 液力耦合器 119

2.5.2 液力变矩器 125

第 3 章 工程机械液压传动系统 形式 128

3.1 基本液压回路 128

3.1.1 压力控制回路 128

3.1.2 方向控制回路 134

3.1.3 速度控制回路 137

3.1.4 多执行元件控制回路 148

3.2 开式液压系统与闭式液压系统 152

3.2.1 开式液压系统 152

3.2.2 闭式液压系统 152

3.3 单泵液压系统与多泵液压系统 153

3.3.1 单泵液压系统 153

3.3.2 双泵液压系统 154

3.3.3 多泵液压系统 156

3.4 定量系统与变量系统 156

3.4.1 定量系统 156

3.4.2 变量系统 157

3.5 串联系统与并联系统 158

3.5.1 串联系统 158

3.5.2 并联系统 158

3.6 分功率变量系统与总功率变量系统	159	4.5 液压系统的安装与调试	180
3.6.1 分功率变量系统	159	4.5.1 液压系统的安装	180
3.6.2 总功率变量系统	159	4.5.2 液压系统的清洗与试压	183
3.7 工程机械液压系统的性能指标与要求	160	4.5.3 液压系统的调试	184
3.7.1 液压系统的效率(经济性指标)	160	4.6 液压系统的使用与维护	185
3.7.2 液压系统的功率利用(节能性指标)	161	4.6.1 液压油的使用和维护	186
3.7.3 液压系统的调速范围及指标(调速指标)	161	4.6.2 防止空气进入液压系统	186
3.7.4 液压系统的刚度(机械特性指标)	161	4.6.3 防止油温过高	186
3.7.5 液压系统的负载能力(工作性能指标)	162	第5章 常用工程机械液压系统	188
第4章 工程机械液压系统的设计与实践	163	5.1 起重机械	188
4.1 液压系统的绿色设计原则和策略	163	5.1.1 QLY1560型轮胎起重机液压系统	188
4.1.1 液压系统的绿色设计原则	163	5.1.2 线型绞车液压系统	194
4.1.2 液压系统的绿色设计策略	164	5.1.3 NK250E-Ⅲ型汽车起重机液压系统	197
4.2 工程机械液压系统的设计	165	5.1.4 大吨位伸缩臂履带式起重机液压系统	204
4.2.1 工程机械液压系统的设计要求	166	5.1.5 160t伸缩臂式铁路起重机液压系统	208
4.2.2 工程机械主要技术参数的确定	166	5.1.6 船用起重机液压系统	213
4.2.3 工程机械液压系统的设计计算	167	5.1.7 TL345J型铰接式自卸车液压系统	216
4.2.4 拟定液压系统工作原理图	170	5.1.8 FD150系列集装箱作业叉车双速起升液压系统	220
4.2.5 液压元件的选择及非标准液压元件的设计	171	5.2 土方机械	224
4.2.6 液压系统的验算	172	5.2.1 沃尔沃 EC210B型挖掘机液压系统	224
4.2.7 绘制液压系统装配图和编写技术文件	174	5.2.2 利勃海尔 R914B型履带式挖掘机液压系统	226
4.3 液压系统的仿真优化与性能分析	174	5.2.3 天工-利勃海尔 L551B型装载机作业液压系统	230
4.3.1 概述	174	5.2.4 WZ20-30A型挖掘装载机液压系统	232
4.3.2 基于MATLAB的液压系统的仿真技术研究与应用	175	5.2.5 WJ-7FB型矿用铲运机液压转向系统	233
4.3.3 AMESin仿真技术及其在液压系统中的应用	176	5.2.6 GR300型平地机液压系统	237
4.4 液压系统装配图的绘制	179	5.2.7 BW202AD-2型压路机液压系统	239
4.4.1 液压装置的总体布局	179	5.2.8 TY320(D155A)型推土机液压系统	241
4.4.2 液压阀的配置形式	179	5.2.9 EX400型液压挖掘机液压系统	244
4.4.3 集成块设计	179	5.2.10 KLD80型装载机液压系统	247
4.4.4 绘制正式液压系统装配图和编写技术文件	180	5.2.11 ZL100型装载机液压系统	249

5.2.12	922 型铲运机液压系统	252	6.2.3	液压系统中温度的测试	329
5.2.13	PY180 型平地机液压系统	256	6.2.4	液压系统测试装置	330
5.3	桩工机械	259	6.3	工程机械液压系统故障原因分析	334
5.3.1	抱夹式液压静力压桩机全液压 自动压桩系统	259	6.3.1	对工程机械液压系统的要求	334
5.3.2	ZYJ900 型液压静力压桩机液压 系统	262	6.3.2	工程机械液压系统常见故障	334
5.3.3	液压打桩锤的液压系统	266	6.3.3	工程机械液压系统故障原因	335
5.4	钢筋混凝土机械	269	6.4	工程机械液压传动系统故障诊断基本 方法	337
5.4.1	混凝土搅拌运输车	269	6.4.1	工程机械液压系统故障诊断的 一般步骤	337
5.4.2	HBT60 型混凝土泵液压系统	270	6.4.2	直观检查法	338
5.4.3	钢筋预应力张拉机液压系统	270	6.4.3	操作调整检查法	338
5.4.4	混凝土搅拌机液压系统	273	6.4.4	对比替换检查法	339
5.4.5	混凝土泵车液压系统	275	6.4.5	仪表测量检查法	339
5.5	凿岩破碎钻孔机械	281	6.4.6	逻辑分析法	340
5.5.1	破碎锤液压系统	281	6.4.7	事故树分析法	341
5.5.2	QZL-165 型潜孔钻机液压系统	282	6.4.8	模糊数学方法	341
5.5.3	全液压钻机液压系统	285	6.4.9	灰色关联度诊断法	342
5.5.4	TH530 型全液压钻车液压系统	287	6.4.10	专家诊断系统分析法	344
5.6	路面机械	292	6.5	工程机械液压系统故障诊断技术的 发展	344
5.6.1	滑模式混凝土摊铺机液压系统	292	6.5.1	基于液压装置信息检测的故障 检测与诊断技术	344
5.6.2	DYNAPAC F18C/S 型沥青混合料 摊铺机液压系统	297	6.5.2	基于油液污染检测的故障诊断 技术	346
5.6.3	HT4500 水泥混凝土摊铺机的行走 液压系统	304	第 7 章 工程机械常用液压、液力 元件的故障诊断		
5.7	桥梁机械和隧洞机械	305	7.1	液压泵的故障诊断与排除	348
5.7.1	EBZ160 型悬臂式掘进机液压 系统	305	7.1.1	齿轮泵的故障诊断与排除	348
5.7.2	盾构刀盘液压驱动系统	307	7.1.2	叶片泵的故障诊断与排除	351
5.7.3	MRH-S100 型掘进机液压系统	310	7.1.3	柱塞泵的故障诊断与排除	353
5.7.4	SJ-4 型全断面岩石掘进机液压 系统	312	7.2	工程用液压马达的故障诊断与排除	355
5.7.5	JQG160/50 型公路架桥机液压 系统	315	7.3	工程用液压缸的故障诊断与排除	356
第 6 章 工程机械液压系统的测试与 故障诊断技术		319	7.3.1	柱塞缸	357
6.1	工程机械液压系统测试技术概述	319	7.3.2	活塞缸	357
6.1.1	液压测试技术基础	319	7.4	液压阀的故障诊断与排除	362
6.1.2	液压测试系统组成	321	7.4.1	液压阀的失效原因及几种典型的 液压现象	362
6.2	液压系统基本参数的测试及测试 仪器	322	7.4.2	溢流阀的故障分析和排除	364
6.2.1	液压系统中压力的测试	322	7.4.3	单向阀的故障分析和排除	367
6.2.2	液压系统中流量的测试	326	7.4.4	换向阀的故障分析和排除	368
			7.4.5	减压阀的故障分析和排除	371
			7.4.6	平衡阀的故障分析和排除	372

7.4.7 顺序阀的故障分析和排除	373	排除	422
7.4.8 伺服阀的故障分析和排除	374	8.2.7 挖掘机液压油温升过快且温度 过高的原因及解决措施	424
7.4.9 比例阀的故障分析和排除	375	8.2.8 挖掘机斗杆缸活塞杆不能缩回 故障的诊断	426
7.5 液力耦合器的故障诊断与排除	376	8.2.9 WY160A 型挖掘机液压系统故障 诊断	428
7.6 液力变矩器的故障诊断与排除	377	8.2.10 HDE60-7 型液压挖掘机常见 故障的诊断及排除	429
第 8 章 工程机械液压系统故障的 诊断与排除实例	382	8.2.11 PC200-7 型挖掘机液压泵故障的 诊断、分析及排除方法	432
8.1 推土机液压系统故障的诊断与排除 ..	382	8.3 装载机液压系统故障的诊断与排除 ..	435
8.1.1 推土机的保养、调整与常见故障的 排除	382	8.3.1 装载机液压系统常见故障的原因 分析及排除方法	435
8.1.2 TY220 型履带式推土机液压系统 故障的分析与排除	388	8.3.2 装载机液压系统的故障诊断与 状态监测	437
8.1.3 D155 型推土机液压系统故障的 诊断与排除	391	8.3.3 装载机工作装置液压系统故障的 诊断	440
8.1.4 T140-1 型推土机液压系统的 常见故障及排除	394	8.3.4 装载机全液压转向系统的故障及 排除方法	444
8.1.5 CATD8N 型履带式推土机液力传动 系统油温过高行走无力故障的 排除	396	8.3.5 ZL50C 型装载机转向系统故障的 诊断与排除	445
8.1.6 D85A 型推土机液力传动系统油温 过高的原因与排除	397	8.3.6 ZL50 系列装载机制动系统的故障 分析及维修	447
8.1.7 TY180 型推土机工作装置液压 系统的常见故障及诊断	401	8.3.7 ZL50 系列装载机液压系统高温 故障的诊断	448
8.1.8 SD22 型推土机推土无力故障的 分析与排查	404	8.3.8 TORO151E 型铲运机液力传动 系统故障的诊断	450
8.1.9 推土机变速液压系统故障的检查与 判断	406	8.4 工程起重机液压系统故障的诊断与 排除	454
8.1.10 上海-320 型推土机底盘液压 系统的故障与排除	408	8.4.1 汽车起重机吊臂伸缩油路常见 故障的分析与排除	454
8.1.11 SD32 型推土机常见液压系统 故障的分析与解决方法	410	8.4.2 NK-300 型汽车起重机液压系统 故障的排除	456
8.2 挖掘机液压系统故障的诊断与排除 ..	412	8.4.3 QY16 型全液压汽车起重机起升 紊乱的故障诊断	457
8.2.1 液压挖掘机液压系统故障的 判断与排除	412	8.4.4 QTZ25 型塔式起重机顶升液压 系统故障的诊断与排除	459
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 ..	416	8.4.5 POTAIN 系列塔式起重机液压顶升 系统的常见故障与排除	461
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	418	8.4.6 QUY35 型履带式起重机行走液压 系统故障的排除	462
8.2.4 WY60 型轮式挖掘机转向系统 故障的分析与排除	419	8.4.7 自升塔式起重机液压顶升系统	
8.2.5 挖掘机回转动作缓慢故障的 排查	420		
8.2.6 液压挖掘机 OLSS 控制系统故障的			

故障的分析	465	系统的故障诊断及维修	499
8.5 混凝土泵（车）液压系统故障的 诊断与排除	467	8.7 凿岩掘进机械液压系统故障的诊断与 排除	500
8.5.1 混凝土泵（车）的常见故障与 排除	467	8.7.1 MRH-S100-41 型掘进机行走部 故障的诊断和排除	500
8.5.2 混凝土泵车臂架系统故障诊断 实例	468	8.7.2 S200 型掘进机行走部常见故障的 排除	502
8.5.3 IPF-85B 型混凝土泵车主液压 系统故障分析	471	8.7.3 凿岩机液压系统故障的诊断	503
8.5.4 混凝土泵车泵送无力故障的分析与 排除	473	8.7.4 COP1038HD 型凿岩机液压系统的 故障诊断及对策	504
8.5.5 混凝土泵车故障诊断实例	474	8.7.5 凿岩台车液压系统故障探析	506
8.5.6 混凝土泵液压系统故障分析 两例	476	8.7.6 液压凿岩机液压系统故障的 诊断与排除	508
8.5.7 S1800、ABG423 型摊铺机液压 系统故障的原因分析与诊断	477	8.7.7 钻机液压系统故障的分析与 排除	511
8.5.8 混凝土搅拌机液压系统常见故障 的分析与排除	479	8.8 其他工程机械液压系统故障的诊断与 排除	513
8.5.9 沥青混凝土摊铺机液压系统的 常见故障	482	8.8.1 稳定土拌和机液压系统的故障 诊断	513
8.5.10 LT6 型沥青混凝土摊铺机液压 系统的常见故障及排除	483	8.8.2 WBL20 型稳定土拌和机液压 系统故障诊断两例	515
8.6 压路机液压系统故障的诊断与排除 ..	487	8.8.3 叉车液压传动系统故障诊断 实例	516
8.6.1 压路机行走机构液压系统故障的 诊断与排除	487	8.8.4 蓄电池叉车液压系统两种常见 故障排除	519
8.6.2 BW202AD-2 型压路机行走和振动 液压回路原理及故障诊断	489	8.8.5 PY160B 型平地机液压与液力传动 系统故障的诊断与排除	520
8.6.3 YZT14G 型压路机液压振动系统 常见故障的诊断及排除	492	8.8.6 自卸汽车车厢举升不起的故障 分析与诊断	522
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	495	8.8.7 卡玛斯 55111 型自卸车液压系统 故障的诊断与排除	523
8.6.5 BW214D 型压路机行走液压 系统的故障诊断与调整	497	8.8.8 叉车液压系统常见故障的分析及 排除方法	524
8.6.6 CA25 型振动压路机行走液压		参考文献	526

1.1 液压传动基础

1.1.1 流体液压技术的发展史

流体液压技术有着悠久的历史，液压传动与控制是人类在生产实践中逐步发展起来的一门实用的技术。

对流体力学学科的形成做出第一个贡献的是古希腊人阿基米德（Archimedes），他建立了物理浮力定律和液体平衡理论。1648年，法国人帕斯卡（B. Pascal）提出静止液体中压力传递的基本定律，奠定了液体静力学基础。17世纪，力学奠基人牛顿（Newton）研究了在流体中运动的物体所受到的阻力，针对黏性流体运动时的内摩擦力提出了牛顿黏性定律。1738年，瑞士人欧拉（L. Euler）采用了连续介质的概念，把静力学中的压力概念推广到运动流体中，建立了欧拉方程，正确地用微分方程组描述了无黏性流体的运动。伯努利（D. Bernoulli）从经典力学的能量守恒出发，研究供水管道中水的流动，进行试验分析，得到了流体定常运动下的流速、压力、流道高度之间的关系——伯努利方程。欧拉方程和伯努利方程的建立，是流体动力学作为一个分支学科建立的标志，从此开始了用微分方程和试验测量进行流体运动定量研究的阶段。1827年，法国人纳维（C. L. M. Navier）建立了黏性流体的基本运动方程；1845年，英国人斯托克斯（G. G. Stokes）又以更合理的方法导出了这组方程，这就是沿用至今的N-S方程，它是流体动力学的理论基础。1883年，英国人雷诺（O. Reynolds）发现液体具有两种不同的流动状态——层流和湍流，并建立了湍流基本方程——雷诺方程。

1795年，英国人布拉默（J. Bramah）发明了第一台液压机，它的问世是流体动力应用于工业的成功典范，到1826年液压机已被广泛应用，此后还发展了许多水压传动控制回路，并且采用机能符号取代具体的设计和结构，方便了液压技术的进一步发展。19世纪是流体传动技术走向工业应用的世纪，它奠基于流体力学的成果之上，而工业革命以来的产业需求为液压技术的发展创造了先决条件。

1905年，美国人詹尼（Janney）首先将矿物油引入传动介质，并设计研制了带轴向柱塞机械的液压传动装置，并于1906年应用于军舰的炮塔装置上，为现代液压技术的发展揭开了序幕。

1922年，瑞士人托马（H. Thoma）发明了径向柱塞泵。

1936年，美国人威克斯（H. Vickers）一改传统的直动式机械控制机构，发明了先导控

制式压力控制阀；稍后电磁阀和电液换向滑阀的问世，使先导控制形式多样化。

20世纪是液压传动与控制技术飞速发展并日趋成熟的世纪，也是控制理论与工程实践相互结合飞速发展的世纪，它为流体控制工程的进步提供了强有力的理论基础和技术支持。

1922年，美国人米诺尔斯基（N. Minorsky）提出用于船舶驾驶伺服机构的比例、积分、微分（PID）控制方法。

1932年，瑞典人奈奎斯特（H. Nyquist）提出根据频率响应判断系统稳定性的准则。

1948年，美国科学家埃文斯（W. R. Evans）提出了根轨迹分析方法，同年香农（C. E. Shannon）和维纳（N. Wiener）出版《信息论》与《控制论》。

1950年，摩根（Moog）成功研制采用微小输入信号控制的电液伺服阀后，美国麻省理工学院的布莱克本（Blackburn）、李（Lee）等人在系统高压化和电液伺服机构方面进行了深入研究。

第二次世界大战后，液压技术在航空航天、国防、汽车和机床工业中得到广泛应用，并且走向产业独立发展，西方各国相继成立了行业协会和专业学会，液压传动和控制被作为新兴技术得到重视。这一时期称得上是液压工业的黄金岁月。

1960年布莱克本（Blackburn）的《液气动控制》和1967年梅里特（Merritt）的《液压控制系统》两部科学著作相继问世，对液压控制理论做出了系统、科学的阐述。

从1962年开始制定液压元件的标准（CETOP、ISO/TC 131）。

1970年前后信号功率介于开关控制和伺服控制之间的比例阀问世。

1980年前后出现了微机可直接数字控制的高速（高频）开关阀。

1990年前后可用于计算机直接控制的数字液压元件及系统研制成功。

在近现代工业中，液压传动与控制技术不论是对于行走机械，还是对于固定的工业设备，都是很好的实用技术。目前液压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，获得了广泛的应用与普及。液压技术正向高压、高速、高集成化、大功率、高可靠性方向发展，现代液压技术与微电子技术、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、预报和维护在内的机电液一体化（Hydromechatronics）技术。

1.1.2 液压传动的基本概念

1. 液压传动的工作原理

所谓液压传动就是以液体作为工作介质，依靠液体的压力来传递动力，靠液体的体积来传递运动的装置。

图1-1所示是一个典型的升降式工作台液压系统原理图，其工作原理如下：

如图1-1所示，工件（未画出）放置在工作台1上，而工作台1则可在主缸3的活塞杆的作用下上升或下降。辅助缸4的活塞杆上加有配重2，两缸的无杆腔由一个管路相连，该连接管路上装有两个相对设置的液控单向阀5、6，液控单向阀5、6的控制油路分别来自两缸的有杆腔。这样，两缸反向串联起来。

三位四通换向阀7用来控制两缸的运动方向。如果要使工作台1上升，则三位四通换向阀7置右位，液压泵10排出的液压油经过单向阀9、调速阀8和三位四通换向阀7向辅助缸

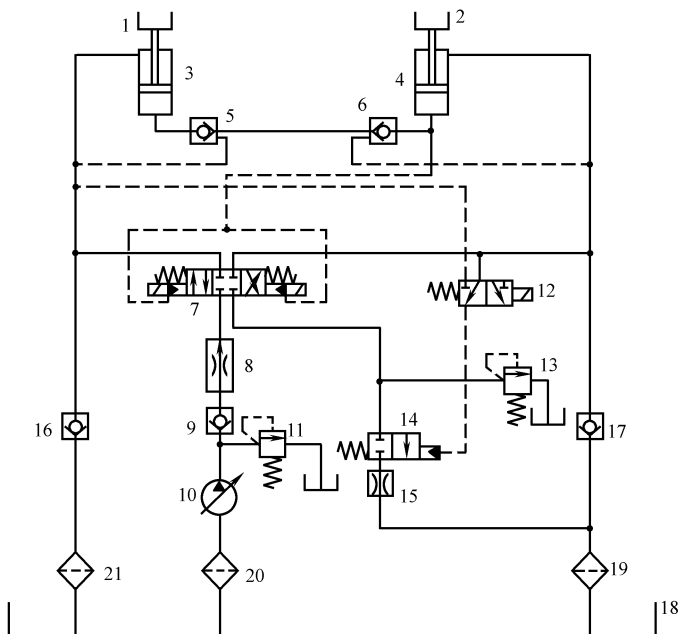


图 1-1 升降式工作台液压系统原理图

- 1—工作台 2—配重 3—主缸 4—辅助缸 5、6—液控单向阀 7—三位四通换向阀
8—调速阀 9、16、17—单向阀 10—液压泵 11、13—溢流阀 12—二位三通换向阀
14—二位二通换向阀 15—节流阀 18—油箱 19、21—回油过滤器 20—进油过滤器

4 的有杆腔中供油，此时液控单向阀 6 被打开，使辅助缸 4 的无杆腔中的液压油经过液控单向阀 6、5 流进主缸 3 的无杆腔中，而主缸 3 的有杆腔中的液压油则经过三位四通换向阀 7、二位二通换向阀 14 和节流阀 15 流回油箱 18 中，从而使辅助缸 4 的活塞杆带动着配重 2 下降，而主缸 3 的活塞杆带动着工作台 1 上升。这一过程相当于将配重 2 的势能传给了工作台 1。

如果要使工作台 1 下降，则三位四通换向阀 7 置左位，液压泵 10 排出的液压油经过单向阀 9、调速阀 8 和三位四通换向阀 7 向主缸 3 的有杆腔中供油，此时液控单向阀 5 被打开，使主缸 3 的无杆腔中的液压油经过液控单向阀 5、6 流进辅助缸 4 的无杆腔中，而辅助缸 4 的有杆腔中的液压油则经过三位四通换向阀 7、二位二通换向阀 14 和节流阀 15 流回油箱 18 中，从而使主缸 3 的活塞杆带动着工作台 1 下降，此时辅助缸 4 的活塞杆带动着配重 2 上升。这一过程相当于将工作台 1 的势能传给配重 2。

由此可见，两缸 3、4 的无杆腔中的液压油是一种互补关系，通过这种液压油间的互补交换，实现了工作台 1 与配重 2 之间的能量互补交换，这样，液压泵 10 的供给压力可明显低于无辅助缸的液压系统的供给压力，因而显著地降低了能耗。

二位二通换向阀 14 用来起保护作用，其工作原理如下所述：如果工作平台上升时所携带工件质量很小或未携带工件，或是平台下降时所携带工件质量很大，如果没有二位二通换向阀 14，则有可能使主缸 3 和辅助缸 4 的活塞运动速度剧增而无法控制，甚至导致液压缸的损坏。加上二位二通换向阀 14，就可以在出现上述情况时截断主缸或辅助缸的有杆腔与

油箱之间的油路，从而起到保护作用。

由此可见，任何一种液压设备一般都由四部分组成，即动力装置（液压泵）、执行机构（液压缸或液压马达等）、传动与转换控制机构（各类液压阀）和辅助装置（如滤油器、蓄能器等）。

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。液压机械常以液压油为工作介质，利用液压传动来传递和控制能量。

2. 液压系统基本组成

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。如上述升降台液压系统中的液压泵即起此种作用，它为液压系统提供液压油。液压泵按压力由低到高的顺序分类可以是叶片泵、齿轮泵和柱塞泵。叶片泵压力最低，柱塞泵压力最高。最常用的是齿轮泵，压力处于中高挡。

(2) 执行元件 将液体的压力能转化为机械能的液压元件。升降台液压系统的液压缸即起此种作用。在液压系统中常见的是做直线往复运动的液压缸或做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。升降台液压系统中的溢流阀、手动换向阀即属于此类元件。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。升降台液压系统中的油箱、过滤器、油管属此类元件。一般液压系统中的油箱、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。

3. 液压传动系统的优势与不足

(1) 液压传动系统的优势 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获得了广泛而迅速的应用和发展。和机械传动、电力传动相比，它具有独特的优点，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。

(2) 液压传动系统的不足

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。

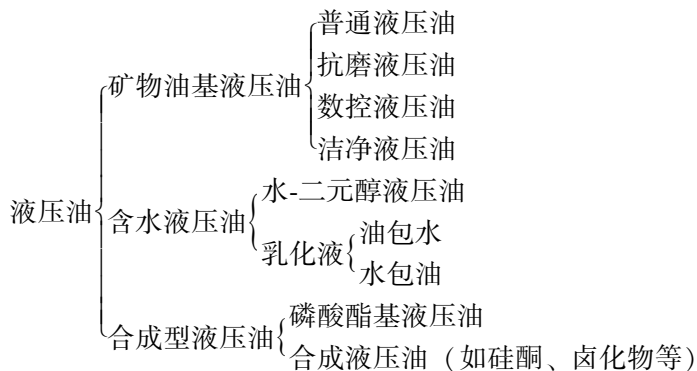
4) 液压系统与元件制造维护要求较高，价格较贵，且进行故障诊断较困难。

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 液压传动的工作介质

1. 液压油的类型

液压传动是以液体作为工作介质传递能量的，液压油的物理、化学特性将直接影响液压系统的工作。目前液压传动中采用的工作介质主要有矿物油基液压油、含水液压油和合成型液压油三大类。液压油的分类如下：



由于矿物油基液压油的润滑性能好、耐蚀性好、品种多、化学安定性好，能满足各种黏度的需要，故大多数液压传动系统都采用矿物油基液压油作为传动工作介质。矿物油基液压油主要分为普通液压油、液压导轨油、抗磨液压油、低温液压油、高黏度指数液压油、机械油、汽轮机油和其他专用液压油。

国内常用的液压油有 L-HL 液压油、L-HM 抗磨液压油、L-HV 低温抗磨液压油、L-HS 低凝抗磨液压油、L-HG 液压导轨油和抗燃液压油等。

常用液压油及其主要性能和适用范围：

1) L-HL 液压油：具有一定的抗氧化防锈和抗泡性，适用于系统压力低于 7MPa 的液压系统和一些低载荷的齿轮箱润滑。

2) L-HM 抗磨液压油：除了具有 L-HL 液压油的性能外，抗磨性能强，适用于系统压力为 7~21MPa 的液压系统。高压抗磨液压油能在系统压力为 35MPa 的情况下正常工作。

3) L-HV 低温抗磨液压油和 L-HS 低凝抗磨液压油：在 L-HM 抗磨液压油的基础上加强了黏温性能和低温流动性，适合在寒区或严寒区工程机械液压系统中使用。

4) L-HG 液压导轨油：具有防爬性，适用于润滑机床导轨及其液压系统。

5) 抗燃液压油：抗燃性好，应用在高温易燃的场合。

2. 液压油的物理性质

(1) 液体的密度 单位体积液体的质量称为液体的密度，用符号 ρ 表示。

若液体体积为 V ，质量为 m ，则

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

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。对于矿物油基液压油，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（矿物油基），在 15°C 时其密度可取 $\rho = 900 \text{kg/m}^3$ ；对于工程机械常用液压油，其密度 $\rho = 880 \text{kg/m}^3$ 左右。在实用中可认为液压油的密度不受温度和压力的影响。

(2) 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。

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

式中 V ——增压前液体的体积；

ΔV ——压力增量 Δp 时，因压缩而减小的体积；

Δp ——压力增量；

β ——体积压缩率或压缩系数。

式 (1-2) 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，所以在式 (1-2) 的左边要加一负号。 β 值的物理意义：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，常用液压油的体积压缩率 $\beta = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ 。

体积压缩率 β 的倒数称为体积弹性模量（用 E 表示），其值为

$$E = \frac{1}{\beta} = (1.4 \sim 1.9) \times 10^9 \text{N/m}^2 \quad (1-3)$$

从式 (1-3) 中可以看出，油液的体积弹性模量为钢的体积弹性模量的 $1/150 \sim 1/100$ 。当液压油中混有空气时，可压缩性将显著增加。例如，液压油中混有体积分数为 1% 的空气时，则其体积弹性模量降低到纯液压油的 5% 左右；液压油中混有体积分数为 5% 的空气时，其体积弹性模量降低到纯液压油的 1% 左右，故液压系统在使用和设计时应努力设法不使液压油中混有空气。

(3) 液体的黏性和黏度 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。液体的这种性质称为液体的黏性。

牛顿液体内摩擦定律：液层间的内摩擦力 F 与液层接触面积 A 及液层间速度 du/dy 成正比。如图 1-2 所示，内摩擦力 F 的表达式为

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

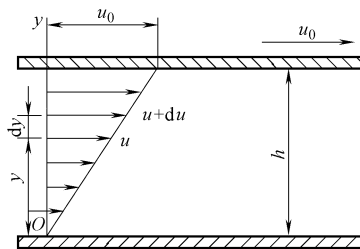


图 1-2 液体黏性示意图

液体只有在流动时才表现出黏性，静止液体是不呈现黏性的。液体黏性的大小是用黏度来表示的。黏度大，液层间内摩擦力就大，油液就“稠”；反之，油液就“稀”。

黏度是表示液体黏性大小的物理量。在液压系统中所用液压油常根据黏度来选择。常用的黏度表示方式有三种：绝对黏度（动力黏度）、运动黏度和相对黏度。

1) 绝对黏度 (动力黏度) μ 。若用单位面积上的摩擦力 (切应力 τ) 来表示内摩擦力, 则式 (1-4) 可改写成

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

式中 μ ——比例系数, 称为动力黏度;

du/dy ——流体层间速度差异的程度, 称为速度梯度。

动力黏度 μ 的单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。以前 (CGS 制中) 使用的单位是 $\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ (达因秒每平方厘米), 又称为 P (泊)。 $1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{P} = 10^3\text{cP}$ (厘泊)。

由式 (1-5) 可知, 液体动力黏度 μ 的物理意义: 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) 运动黏度 ν 。运动黏度是绝对黏度 μ 与密度 ρ 的比值, 即

$$\nu = \mu / \rho \quad (1-6)$$

运动黏度的 SI 单位为 m^2/s 。还可用 CGS 制单位: St (斯), 斯的单位太大, 应用不便, 常用 1%St, 即 cSt (厘斯) 来表示, 故

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

它之所以被称为运动黏度, 是因为在它的量纲中只有运动学的要素——长度和时间量纲的缘故。机械油的牌号上所标明的号数就是表明以厘斯为单位的、在温度为 50°C 时运动黏度 ν 的平均值。例如, 10 号机械油指明该油在 50°C 时其运动黏度 ν 的平均值是 10cSt。蒸馏水在 20.2°C 时的运动黏度 ν 恰好等于 1cSt, 所以从机械油的牌号即可知道该油的运动黏度。例如, 20 号机械油说明该油的运动黏度约为水的运动黏度的 20 倍, 30 号机械油的运动黏度约为水的运动黏度的 30 倍, 依此类推。

动力黏度和运动黏度是理论分析和推导中经常使用的黏度。它们都难以直接测量, 因此工程上采用另一种可用仪器直接测量的黏度, 即相对黏度。

3) 相对黏度。相对黏度是以相对于蒸馏水的黏性的大小来表示该液体的黏性的。相对黏度又称条件黏度。各国采用的相对黏度单位有所不同, 有的用赛氏黏度, 有的用雷氏黏度, 我国采用恩氏黏度。

恩氏黏度的测定方法: 测定 200cm^3 某一温度的被测液体在自重作用下流过直径为 2.8mm 的小孔所需的时间 t_A , 然后测出同体积的蒸馏水在 20°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黏度值。恩氏黏度用符号 $^\circ E$ 表示。被测液体温度为 t (单位为 $^\circ\text{C}$) 时的恩氏黏度用符号 $^\circ E_t$ 表示。即

$$^\circ E_t = t_A / t_B \quad (1-7)$$

由上述可知, 恩氏黏度是一个量纲为一的量。恩氏黏度与运动黏度的换算关系式为

$$\nu = \left(8^\circ E - \frac{8.64}{^\circ E} \right) \times 10^{-6} \quad 1.35 < ^\circ E < 3.2$$

$$\nu = \left(7.6^\circ E - \frac{4}{^\circ E} \right) \times 10^{-6} \quad ^\circ E > 3.2 \quad (1-8)$$

液体的黏度随着压力的增大而增大, 但在一般液压系统的使用压力范围内, 增大的数值很小, 可不计。液体的黏度对温度的变化十分敏感, 温度升高, 黏度下降。黏度的变化影响着液压系统的性能, 其重要性不亚于黏度本身。

1.1.4 液压油的要求与选用

1. 对液压油的基本要求

工程机械液压系统使用液压油作为工作介质，这类液压系统中液压油的流速不大而压力较高，故称为静压传动。液压油质量的优劣将在很大程度上影响液压系统工作的可靠性和使用寿命。通常对液压油的质量要求有如下几点：

- 1) 适宜的黏度及良好的黏温性能，以确保在工作温度发生变化的条件下能准确、灵敏地传递动力，并能保证液压元件的正常润滑。
- 2) 具有良好的防锈性及抗氧化安定性，在高温高压条件下不易氧化变质，使用寿命长。
- 3) 具有良好的抗泡沫性，使油品在受机械不断搅拌的工作条件下，产生的泡沫易于消失，以使动力传递稳定，避免液压油的加速氧化。
- 4) 良好的抗乳化性，能与混入油中的水迅速分离，以免形成乳化液导致液压系统金属材质的锈蚀和降低使用效果。
- 5) 良好的极压抗磨性，以保证液压泵、液压马达、控制阀和液压缸中的摩擦副在高压、高速等苛刻条件下得到正常的润滑，减少磨损。

除上述基本质量要求外，对于一些特殊性能要求的液压油尚有特殊的要求，如低温液压油要求具有良好的低温使用性能，抗燃液压油要求具有良好的抗燃性能等。

液压油的一般使用温度为 40~50℃。当温度超过 80℃ 时，液压油氧化加剧；当温度低于 10℃ 时，液压油的黏度增大，造成液压系统起动困难。

2. 液压油的选用

选择液压油时，首先考虑其黏度是否满足要求，同时兼顾其他方面。常见液压油的系列品种见表 1-1。

表 1-1 常见液压油的系列品种

种类	牌 号		原 名	用 途
	油 名	代 号		
普通液压油	N ₃₂ 号液压油 N ₆₈ G号液压油	YA-N ₃₂ YA-N ₆₈	20号精密机床液压油 40号液压导轨油	用于工作环境温度为 0~45℃ 的各类液压泵的中、低压液压系统
抗磨液压油	N ₃₂ 号抗磨液压油 N ₁₅₀ 号抗磨液压油 N ₁₆₈ K号抗磨液压油	YA-N ₃₂ YA-N ₁₅₀ YA-N ₁₆₈ K	20抗磨液压油 80抗磨液压油 40抗磨液压油	用于工作环境温度为 -10~40℃ 的高压柱塞泵或其他泵的中、高压系统
低温液压油	N ₁₅ 号低温液压油 N ₄₆ D号低温液压油	YA-N ₁₅ YA-N ₄₆ D	低凝液压油 工程液压油	用于工作环境温度为 -20℃ 至高于 40℃ 的各类高压系统
高黏度指数液压油	N ₃₂ H号高黏度指数液压油	YD-N ₃₂ D	—	用于工作环境温度变化不大且对黏温性能要求更高的液压系统