

应用型本科 机械类专业“十三五”规划教材

流体传动与 控制技术

主 编 刘 忠 赵根林
副主编 管建峰 马文斌 刘军军 曹昌勇
主 审 杨襄璧

- 内容新颖：新知识、新技术、新工艺
- 特色鲜明：突出“应用、实践、创新”
- 定位准确：面向工程技术型人才培养
- 质量上乘：应用型本科专家全力打造



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

应用型本科 机械类专



流体传动与控制技术

主 编 刘 忠 赵根林
副主编 管建峰 马文斌 刘军军 曹昌勇
主 审 杨襄璧

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是面向工程教育应用型人才培养目标而编写的。全书共分 11 章,分别介绍了液压技术基本理论、液动力与执行元件、液压控制与辅助元件、液压控制系统分析、液压系统设计计算、电液控制技术及应用、液压系统测试与故障诊断技术、气压传动基础知识、气源装置与气动元件、气压传动基本回路和气动控制系统、流体传动与控制基础实验等。

本书可作为普通高等学校机械类、交通运输类、自动化类专业本科生及研究生教材,也可作为从事流体传动与控制技术工作的工程技术人员和操作人员的实用工具书。

☆ 本书有配套的电子课件,有需要的老师可登录出版社网站,免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

流体传动与控制技术/刘忠,赵根林主编.

—西安:西安电子科技大学出版社,2016.6

应用型本科机械类专业“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-4057-0

I. ① 流… II. ① 刘… ② 赵… III. ① 液压传动—

高等学校—教材 ② 气压传动—高等学校—教材

IV. ① TH137 ② TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 084759 号

策划编辑 高 樱

责任编辑 马武装 曹 锦

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西大江印务有限公司

版 次 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 27

字 数 642 千字

印 数 1~3000 册

定 价 46.00 元

ISBN 978-7-5606-4057-0/TH

XDUP 434900 1-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

应用型本科 机械类专业规划教材 编审专家委员名单

主任:张杰(南京工程学院 机械工程学院 院长/教授)

副主任:杨龙兴(江苏理工学院 机械工程学院 院长/教授)

张晓东(皖西学院 机电学院 院长/教授)

陈南(三江学院 机械学院 院长/教授)

花国然(南通大学 机械工程学院 副院长/教授)

杨莉(常熟理工学院 机械工程学院 副院长/教授)

成员:(按姓氏拼音排列)

陈劲松(淮海工学院 机械学院 副院长/副教授)

郭兰中(常熟理工学院 机械工程学院 院长/教授)

高荣(淮阴工学院 机械工程学院 副院长/教授)

胡爱萍(常州大学 机械工程学院 副院长/教授)

刘春节(常州工学院 机电工程学院 副院长/副教授)

刘平(上海第二工业大学 机电工程学院 教授)

茅健(上海工程技术大学 机械工程学院 副院长/副教授)

王荣林(南理工泰州科技学院 机械工程学院 副院长/副教授)

王书林(南京工程学院 汽车与轨道交通学院 副院长/副教授)

王树臣(徐州工程学院 机电工程学院 副院长/教授)

吴雁(上海应用技术学院 机械工程学院 副院长/副教授)

吴懋亮(上海电力学院 能源与机械工程学院 副院长/副教授)

许泽银(合肥学院 机械工程系 主任/副教授)

许德章(安徽工程大学 机械与汽车工程学院 院长/教授)

周扩建(金陵科技学院 机电工程学院 副院长/副教授)

周海(盐城工学院 机械工程学院 院长/教授)

朱龙英(盐城工学院 汽车工程学院 院长/教授)

朱协彬(安徽工程大学 机械与汽车工程学院 副院长/教授)

唐友亮(宿迁学院 机电工程系 副主任/副教授)

前 言

目前,《中国制造 2025》国家发展战略发布,结合我国装备制造业快速发展的需要,面向应用型工程技术人才培养现状,以及教学与科研的实际需求,编者编写了本书。本书详细分析了液压与气压传动原理、元件结构和工作机能、液压与气压控制系统组成及典型应用、电液控制系统及技术原理、液压系统测试与故障诊断方法,并结合实例介绍了流体传动技术在工程中的具体应用。本书内容理论与实践紧密结合,注重培养学生的创新精神和创造性思维,力求突出流体传动作为高效传动技术的优势,并推进机/电/液/气一体化与集成技术的教学与工程应用。

本书教学课时建议为 48 课时。

本书由常熟理工学院刘忠、赵根林主编,中南大学杨襄璧教授主审。刘忠教授编写了第 1、3、4、6、7 章,赵根林副教授编写了第 9、10 章,马文斌副教授、管建峰高级工程师编写了第 2、5 章,戴军副教授、刘军军博士编写了第 8 章,易风讲师、张尧成博士以及皖西学院的曹昌勇副教授编写了第 11 章。全书由刘忠、赵根林统稿。本书的编写还得到了华南理工大学丁问司教授、湖南大学朱浩副教授和苏州海虞智能设备有限公司王涵高级工程师的大力支持与帮助,在此一并致以诚挚的谢意。

在本书的编写过程中,编者参阅了国内外有关文献、书籍和技术资料,在此谨向有关作者和单位表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,欢迎广大读者和同行专家批评、指正。

编 者

2016 年 1 月

目 录

第 1 章 液压技术基本理论	1	思考题与习题 1	33
1.1 流体技术发展史	1	第 2 章 液压动力与执行元件	36
1.2 液压传动基本概念	2	2.1 液压动力元件	36
1.2.1 液压传动工作原理	2	2.1.1 液压泵概述	36
1.2.2 液压系统基本组成	4	2.1.2 齿轮泵	39
1.2.3 液压传动系统的优势与不足	4	2.1.3 叶片泵	41
1.3 液压传动的工作介质	5	2.1.4 柱塞泵	47
1.3.1 液压油的类型	5	2.1.5 液压泵的选用	53
1.3.2 液压油的物理性质	6	2.2 液压执行元件	54
1.3.3 液压油的要求与选用	8	2.2.1 液压缸	54
1.4 液压传动基本参数	9	2.2.2 液压马达	65
1.5 静止液体基本性质	10	典型应用案例 2	71
1.5.1 液体静压力及其特性	10	本章小结	72
1.5.2 液体静力学方程	11	思考题与习题 2	72
1.5.3 压力的表示方法及单位	12	第 3 章 液压控制与辅助元件	75
1.5.4 帕斯卡原理	13	3.1 液压控制阀	75
1.5.5 液压静压力对固体壁面的作用力	14	3.1.1 液压阀概述	75
1.6 液体流动的基本规律	14	3.1.2 方向控制阀	77
1.6.1 流动液体的连续性原理	15	3.1.3 压力控制阀	87
1.6.2 伯努利方程	15	3.1.4 流量控制阀	94
1.6.3 流动液体的动量方程	16	3.1.5 逻辑插装阀	100
1.7 液体在缝隙和小孔中的流动规律	17	3.1.6 电液比例阀	106
1.7.1 液体在缝隙中的流动规律	17	3.1.7 电液伺服阀	108
1.7.2 液体在小孔中的流动规律	20	3.1.8 电液数字控制阀	113
1.8 液体流动的压力损失	21	3.2 液压辅助元件	117
1.9 液压冲击和空穴现象	23	3.2.1 油箱及其附件	117
1.9.1 液压冲击现象	23	3.2.2 蓄能器	119
1.9.2 空穴现象	27	3.2.3 过滤器	123
1.10 液压传动在机械工程中的应用	27	3.2.4 油管及管接头	126
1.10.1 液压传动在工业机床上的应用	27	3.2.5 密封装置	131
1.10.2 液压传动在工程机械上的应用	28	典型应用案例 3	134
1.11 液压传动技术的发展趋势	30	本章小结	134
典型应用案例 1	31	思考题与习题 3	135
本章小结	32		

第4章 液压控制系统分析	138	5.2.2 分析工况,确定液压系统的 主要参数	185
4.1 基本控制系统	138	5.3 液压系统原理图确定和液压元件 计算选择	187
4.1.1 压力控制系统	138	5.3.1 进行方案设计,确定液压系统原理图	187
4.1.2 方向控制系统	145	5.3.2 液压元件计算与选择	189
4.1.3 速度控制系统	148	5.3.3 液压系统性能验算及校核	193
4.1.4 多执行元件控制回路	159	5.4 液压系统仿真与性能分析	197
4.2 开式系统与闭式系统	166	5.4.1 概述	197
4.2.1 开式液压系统	166	5.4.2 基于 MATLAB 的液压系统仿真技术 研究与应用	198
4.2.2 闭式液压系统	166	5.4.3 AMESIM 仿真技术及其在液压系统 中的应用	200
4.3 单泵系统与多泵系统	167	5.5 液压系统装配图的绘制	203
4.3.1 单泵液压系统	168	5.5.1 液压装置总体布局	203
4.3.2 双泵液压系统	168	5.5.2 液压阀的配置形式	203
4.3.3 多泵液压系统	169	5.5.3 集成块设计	203
4.4 定量系统与变量系统	170	5.5.4 绘制正式液压系统装配图,编写 技术文件	204
4.4.1 定量系统	170	5.6 典型液压系统设计应用实例	204
4.4.2 变量系统	170	5.6.1 250 克塑料注射机液压系统设计 要求及有关设计参数	204
4.5 串联系统与并联系统	171	5.6.2 液压执行元件载荷力和载荷 转矩计算	205
4.5.1 串联系统	171	5.6.3 液压系统主要参数计算	206
4.5.2 并联系统	172	5.6.4 制定系统方案和拟定液压系统图	208
4.6 分功率变量系统与总功率变量系统	172	5.6.5 液压元件的选择	209
4.6.1 分功率变量系统	172	5.6.6 液压系统性能验算	212
4.6.2 总功率变量系统	173	典型应用案例 5	215
4.7 液压控制系统性能指标与要求	173	本章小结	215
4.7.1 液压系统的效率(经济性指标)	174	思考题与习题 5	216
4.7.2 功率利用(节能性指标)	175		
4.7.3 调速范围及指标(调速指标)	175		
4.7.4 液压系统刚度(机械特性指标)	175		
4.7.5 负载能力(工作性能指标)	175		
典型应用案例 4	175		
本章小结	176		
思考题与习题 4	177		
第5章 液压系统设计计算	182	第6章 电液控制技术及应用	217
5.1 液压系统的设计原则与策略	182	6.1 电液控制技术概述	217
5.1.1 液压系统绿色设计原则	182	6.1.1 电液伺服控制	217
5.1.2 液压系统绿色设计策略	182	6.1.2 电液比例控制	218
5.2 液压系统的设计内容与步骤	184	6.1.3 数字液压控制	218
5.2.1 明确对液压系统的设计要求	184	6.1.4 电液控制策略	219

6.1.5 电液控制技术的发展趋势	220	7.5.2 基于信号分析的故障诊断方法	280
6.2 电液伺服控制技术	221	7.5.3 基于人工智能的故障诊断方法	281
6.2.1 电液伺服系统工作原理及特点	221	7.6 液压系统故障诊断应用实例	284
6.2.2 电液伺服控制技术应用	224	7.6.1 液压挖掘机液压系统的常见故障及 诊断与排除	284
6.3 电液比例控制技术	232	7.6.2 基于 FTA 分析法的液压压砖机远程 故障诊断专家系统	287
6.3.1 电液比例控制概述	232	7.6.3 汽车起重机液压缸爬行的故障树 分析	291
6.3.2 电液比例控制的基本原理	233	7.7 液压系统故障诊断技术的发展	295
6.3.3 电液比例阀的组成及分类	234	典型应用案例 7	296
6.3.4 电液比例系统构成及特点	236	本章小结	298
6.3.5 电液比例技术应用实例	237	第 8 章 气压传动基础知识	299
6.4 数字液压控制技术	243	8.1 气压传动与控制的定义及工作原理	299
6.4.1 数字液压元件	243	8.2 气压传动的优缺点及发展与应用	300
6.4.2 数字液压控制技术应用	246	8.3 空气的物理性质	303
典型应用案例 6	249	8.4 气体状态方程	306
本章小结	250	8.5 气体流动规律	308
思考题与习题 6	250	本章小结	313
第 7 章 液压系统测试与故障诊断技术	252	第 9 章 气源装置与气动元件	314
7.1 液压测试技术概述	252	9.1 气源装置及辅助元件	314
7.1.1 液压测试技术基础	252	9.1.1 气源装置	314
7.1.2 液压测试系统组成	254	9.1.2 气动辅助元件	316
7.2 液压系统基本参数的测试及测试仪器	255	9.2 气动执行元件	321
7.2.1 液压系统中压力的测试	255	9.2.1 气缸	321
7.2.2 液压系统中流量的测试	259	9.2.2 气马达	328
7.2.3 液压系统中温度的测量	262	9.3 气动控制元件	329
7.2.4 液压系统测试装置	264	9.3.1 气动压力控制阀	329
7.3 液压系统测试工程应用实例	268	9.3.2 气动流量控制阀	332
7.3.1 矿用支架液压件 CAT 测试系统	268	9.3.3 气动方向控制阀	333
7.3.2 液压冲击机械测试系统	271	9.4 气动逻辑元件	338
7.4 液压元件故障诊断与排除	274	本章小结	343
7.4.1 液压泵常见故障分析与排除方法	274	第 10 章 气压传动基本回路和气动控制系统	344
7.4.2 液压缸的常见故障及排除方法	274	10.1 气压传动基本回路	344
7.4.3 常用液压阀的故障分析与排除	275		
7.5 液压系统故障诊断方法	279		
7.5.1 简易的故障诊断方法	279		

10.1.1 压力和力控制回路	344	实验一 液压泵拆装实验	369
10.1.2 换向回路	345	实验二 二级调压回路实验	372
10.1.3 速度控制回路	348	实验三 换向回路实验	373
10.1.4 位置控制回路	351	实验四 电磁阀和调速阀控制的调速回路实验	376
10.2 其他常用回路	352	实验五 行程开关控制的顺序动作回路实验	379
10.2.1 安全保护回路	352	实验六 液压缸并联的同步回路实验	382
10.2.2 同步控制回路	354	实验七 差动连接的增速回路实验	384
10.2.3 往复动作回路	355	实验八 顺序阀控制的顺序动作回路实验	387
10.2.4 延时回路	356	实验九 调速阀串联控制的二次进给回路实验	390
10.3 气压传动与控制应用实例	356	实验十 PLC控制气缸往复运动回路实验	394
10.3.1 组合机床动力头控制系统	356	实验十一 PLC控制气缸顺序动作回路实验	395
10.3.2 气动机械手	358		
10.3.3 工作夹紧气动控制系统	360		
10.4 气压传动控制系统的设计	361	附录 常用液压与气动元件图形符号	398
10.4.1 X-D线图法的设计步骤	361	部分思考题与习题参考答案	405
10.4.2 气动顺序控制回路设计举例	361	参考文献	422
10.5 气压传动控制技术应用	364		
本章小结	368		
思考题与习题 10	368		
第 11 章 流体传动与控制基础实验	369		

第1章 液压技术基本理论

1.1 流体技术发展史

流体液压技术有着悠久的历史，流体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，从此人们开始用微分方程和实验测量进行流体运动定量研究。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)又以更合理的方法推导出了这组方程，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，并建立湍流基本方程——雷诺方程。

1795年英国人布拉默(J. Bramsh)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，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年美国詹尼(Janney)首先将矿物油引入传动介质，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；以后电磁阀和电液换向滑阀问世，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及飞速发展的世纪，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年穆格(Moog)研制成功采用微小输入信号的电液伺服阀,随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,对液压控制理论作出了系统、科学的阐述。

从1962年开始制定液压元件的标准(CETOP, ISO/TC131)。

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、预报和维护在内的机/电/液一体化技术(Hydronechanics)。

1.2 液压传动基本概念

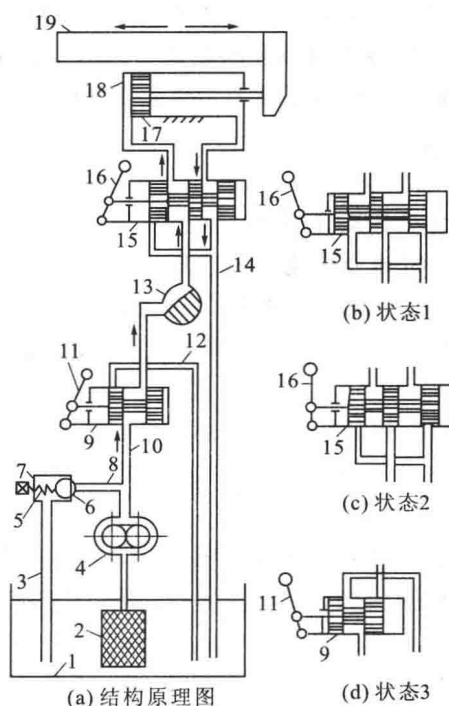
1.2.1 液压传动工作原理

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,依靠液体的体积来传递运动的装置。

图1.1所示为一台用半结构式图形绘出的驱动磨床工作台的液压传动系统图。

这个系统可使工作机构作直线往复运动,并能克服各种阻力和调节工作机构的运动速度,通过它可以进一步了解液压传动系统的工作原理。在图1.1(a)中,液压泵4由电动机驱动旋转,从油箱1中吸油。油液经过滤器2进入液压泵,当它从液压泵输出进入压力管10后,通过开停(换向)阀9、节流阀13、换向阀15进入液压缸18的左腔,推动活塞17和工作台19向右移动。这时,液压缸右腔的油液经换向阀和回油管14排回油箱。

如果将换向阀手柄16转换成如图1.1(b)所示的状态,则压力管10中的油液将经过开停(换向)阀、节流阀和换向阀进入液压缸的右腔,推动活塞和工作台向左移动,并使液压缸左腔的油液经换向阀和回油管14排回油箱。



1—油箱；2—过滤器；3、12、14—回油管；4—液压泵；5—弹簧；6—钢球；7—溢流阀；
8—压力支管；9—开停(换向)阀；10—压力管；11—开停阀手柄；13—节流阀；
15—换向阀；16—换向阀手柄；17—活塞；18—液压缸；19—工作台

图 1.1 磨床工作台液压传动系统图

工作台的移动速度是由节流阀来调节的。当节流阀口开大时，进入液压缸的油液增多，工作台的移动速度增大；当节流阀口关小时，进入液压缸的油液减少，工作台的移动速度减小。

为了克服移动工作台所受到的各种阻力，液压缸必须产生一个足够大的推力，这个推力是由液压缸中的油液压力产生的。要克服的阻力越大，液压缸中的油压越高；反之压力就越低。液压泵输出的多余油液经溢流阀 7 和回油管 3 排回油箱，这只有在压力支管 8 中的油液压力对溢流阀钢球 6 的作用力等于或略大于溢流阀中弹簧 5 的预紧力时，油液才能顶开溢流阀中的钢球流回油箱。所以，在图 1.1(b) 所示液压系统中，液压泵出口处的油液压力是由溢流阀决定的，它和液压缸中的压力不一样大。

如果将换向阀手柄转换成图 1.1(c) 所示的状态，压力管中的油液将经溢流阀和回油管 3 排回油箱，不输送到液压缸中去，这时工作台停止运动，而系统保持溢流阀调定的压力。

如果将开停阀手柄 11 转换成图 1.1(d) 所示的状态，压力管中的油液将经开停(换向)阀和回油管 12 排回油箱，不输送到液压缸中去，这时工作台就停止运动，而液压泵输出的油液直接流回油箱，使液压系统卸荷。

由此可见，任何一种液压设备一般都由四部分组成：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。

1.2.2 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。它是指将机械能转化为液体压力能的元件。如上述磨床工作台液压系统中的液压泵即起此种作用,它为液压系统提供压力油。液压泵按压力高低的不同可以是叶片泵、齿轮泵和柱塞泵。其中叶片泵压力最低,柱塞泵压力最高。最常用的是齿轮泵,压力处于中高档。

(2) 执行元件。它是指将液体的压力能转化为机械能的液压元件。磨床工作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。它是指对液压系统的压力、流量和液流方向进行控制或调节的元件。磨床工作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。它是指上述三部分以外的其他元件。磨床工作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、滤油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。

1.2.3 液压传动系统的优势与不足

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,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。

【特别提示】

液压传动的工作原理、液压传动系统的组成、液压传动的特点、液压传动技术的应用等内容是学习本课程的起点。液压传动的工作原理是重中之重，其他是该内容的延伸和深化，通过对其分析，可以对液压传动有一个概括的认识，为进一步学习液压传动技术建立基础。当学习了全部课程后，会对其赋予新的内涵。

1.3 液压传动的工作介质

1.3.1 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。液压油的分类如图 1.2 所示。

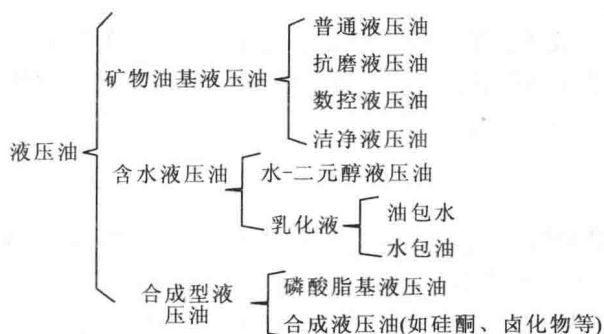


图 1.2 液压油的分类

由于矿物油润滑性能好、腐蚀性小、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作为传动工作介质。矿物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。

液压油的主要性能及适用范围：

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

(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。它适用于系统压力 7~21 MPa 的液压系统。高压抗磨液压油，能在系统压力为 35 MPa 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。它适合在寒区或严寒区工程机械液压系统使用。

(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。

1.3.2 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 ，其质量为 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，其密度 $\rho=850\sim 960 \text{ kg}/\text{m}^3$ ；对于机床、船舶液压系统中常用的液压油(矿物油)，在 15°C 时其密度可取 $\rho=900 \text{ kg}/\text{m}^3$ ；对于工程机械，常用液压油密度 ρ 为 $880 \text{ kg}/\text{m}^3$ 左右。在实用中可认为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 为增压前液体的体积； ΔV 为压力增量 Δp 时，因压缩而减小的体积； Δp 为压力增量； β 为体积压缩率或称压缩系数。

在式(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，所以在该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 的倒数称为体积弹性模数，其值为

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

从式(1-3)中可以看出，油液的弹性模数约为钢的弹性模数的 $1/150\sim 1/100$ 。当油液中混有空气时，可压缩性将显著增加。例如，当油中混有 1% 空气时，则其容积弹性模数降低到纯油的 5% 左右；当油中混有 5% 空气时，其体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. 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。液体黏性示意图如图 1.3 所示。

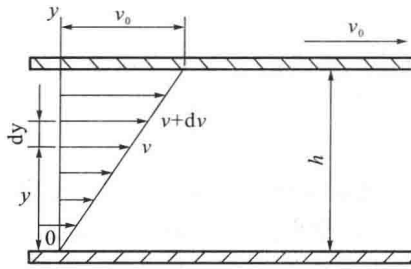


图 1.3 液体黏性示意图

内摩擦力表达式:

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

牛顿液体内摩擦定律:液层间的内摩擦力与液层接触面积及液层间的速度成正比。

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、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)来表示内摩擦力,则式(1-4)可改写成

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

式中, μ 为比例系数,称为动力黏度。动力黏度 μ 的单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕·秒)。它以前(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)。 du/dz 表示流体层间速度差异的程度,称为速度梯度。

由式(1-5)可知,液体动力黏度 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) 运动黏度 ν

运动黏度 ν 是液体的绝对黏度 μ 与密度 ρ 的比值:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-6)$$

运动黏度的SI单位为 m^2/s (米²/秒)。它还可使用CGS制单位:斯(托克斯,St),斯的单位太大,应用不便,常用1%斯,即1厘斯来表示,符号为cSt,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:长度和时间因子。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 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10 cSt。蒸馏水在 20.2°C 时的运动黏度 ν 恰好等于1 cSt,所以从机械油的牌号即可知道该油的运动黏度。例如,20号油说明该油的运动黏度约为水的运动黏度的20倍,30号油的运动黏度约为水的运动黏度的30倍,如此类推。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单位。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单位,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如下:测定 200 cm^3 某一温度的被测液体在自重作用下流过直径 2.8 mm 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 $^\circ\text{E}$ 表示。被测液体温度 $t\text{ }^\circ\text{C}$ 时的恩氏黏度用符号 $^\circ\text{E}_t$ 表示。

$$^\circ\text{E}_t = \frac{t_A}{t_B} \quad (1-7)$$

由以上分析可知,恩氏黏度是一个无因次量。恩氏黏度与运动黏度的换算关系式为

$$\begin{aligned} \nu &= \left(8 \times ^\circ\text{E} - \frac{8.64}{^\circ\text{E}}\right) \times 10^{-6} \quad 1.35 < ^\circ\text{E} < 3.2 \\ \nu &= \left(7.6 \times ^\circ\text{E} - \frac{4}{^\circ\text{E}}\right) \times 10^{-6} \quad ^\circ\text{E} > 3.2 \end{aligned} \quad (1-8)$$

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,可忽略不计。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。

1.3.3 液压油的要求与选用

1. 液压油的基本要求

机械工程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的工作可靠性和使用寿命。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) 具有良好的抗乳化性,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) 具有良好的极压抗磨性,以保证液压油泵、液压马达、控制阀和油缸中的摩擦副在高压、高速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。若为低温液压油,则要求具有良好的低温使用性能;抗燃液压油,则要求具有良好的抗燃性能。

一般使用的液压油温在 $40\sim 50^\circ\text{C}$ 之间,当液压油温超过 80°C 时,氧化加剧;当液压油温低于 10°C 时,黏度增大,启动困难。