



全国本科院校机械类**创新型**应用人才培养规划教材

液压传动与控制 实用技术

刘 忠 主 编
杨襄璧 主 审



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

液压传动与控制实用技术



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是根据我国高等工程教育应用型人才培养目标编写的,全书共分9章,第1章主要介绍液压技术基本理论,第2章着重介绍液压动力和执行元件的结构、原理、性能和选用,第3章主要介绍和分析液压控制阀与辅助元件的结构、原理与应用,第4、5章介绍液压基本回路及控制系统的组成、功能、特点及应用情况,并详细介绍液压系统的设计计算方法和原则,第6章介绍电液控制技术的特点及工程应用,第7章重点分析机械工程各类设备液压传动与控制系统原理及特点,第8章介绍液压系统测试技术的方法和应用,第9章介绍液压系统故障诊断技术原理、应用及发展趋势。

本书适用于普通高等学校机械类、交通运输类、自动化类各专业学生,也适合各类成人高校、自学考试有关机械类、交通运输类和自动化类各专业学生,同时也可作为从事液压传动与控制技术工作的工程技术人员和使用操作人员的实用工具书。

图书在版编目(CIP)数据

液压传动与控制实用技术/刘忠主编. —北京:北京大学出版社,2009.8

(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-15647-6

I. 液… II. 刘… III. ①液压传动—高等学校—教材 ②液压控制—高等学校—教材 IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 137388 号

书 名: 液压传动与控制实用技术

著作责任者: 刘 忠 主编

策 划 编 辑: 郭穗娟

责 任 编 辑: 李 楠

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-15647-6/TH·0154

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 世界知识印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.25 印张 彩插 4 521 千字

2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 36.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

根据高等工程教育的发展现状和人才培养目标,结合我国现代工业技术快速发展的需要,本书详细地分析了液压传动技术原理、液压元件结构和工作机能、液压控制系统组成及典型应用,还介绍了电液控制技术的最新应用,并结合大量实例介绍了液压传动与控制系统及其关键液压元件的测试、故障诊断与排除方法。本书理论与实践紧密结合,并突出工程案例和解决工程实际问题;注重培养创新精神和开发创新思维,在基本理论的基础上引出新概念、新技术和新成果;力求突出液压传动与控制作为高效传动技术的优势;推进机电液一体化技术、液压集成技术的教学与工程应用。

在理论分析的基础上,本书突出了液压控制技术的应用,如电液控制技术的组成原理与应用;面向机床、工程建筑机械、农业机械、轻工机械、冶金矿山机械及车辆工程等机械装备的工程实际。本书给出了机械装备典型液压传动与控制系统的组成原理与技术应用;同时,引入了液压工程测试技术的基本理论和技术运用;在此基础上,重点分析了机械工程装备液压传动与控制系统的故障诊断方法与应用实例。

本书既是机械类专业的专业课教材,又是一本液压技术实用工具书。本书教学课时建议为48课时。

本书由湖南师范大学刘忠主编;中南大学杨襄璧教授主审。此外,本书得到了湖南科技大学刘德顺教授和长沙理工大学张新教授的细心审阅与热情指导。

本书的编写还得到了湖南师范大学彭可副教授、黄琼、何谦等老师的大力支持与帮助,研究生彭金艳、李伟、梁承杰等担任了部分插图、表格的绘制工作,在此一并致以衷心的感谢。

在本书编写过程中,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诚挚的感谢!

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

2009年5月于长沙岳麓山

目 录

第 1 章 液压技术基本理论	1
1.1 历史回顾	2
1.2 液压传动的基本概念	4
1.2.1 液压传动的工作原理	4
1.2.2 液压系统的基本组成	5
1.2.3 液压传动系统的优势和 不足	6
1.3 液压传动的工作介质	6
1.3.1 液压油类型	6
1.3.2 液压油的物理性质	7
1.3.3 液压油的要求和选用	9
1.4 液压传动的的基本参数	11
1.4.1 压力和负载的关系	11
1.4.2 流量和速度的关系	11
1.4.3 液压功率	11
1.5 液体流动的基本规律	11
1.5.1 流动液体的连续性原理	11
1.5.2 伯努利方程	12
1.5.3 流动液体的动量方程	13
1.6 液体在缝隙和小孔中的流动 规律	14
1.6.1 液体在缝隙中的流动 规律	14
1.6.2 液体在小孔中的流动 规律	17
1.7 液体流动的压力损失	18
1.7.1 层流时的压力损失	19
1.7.2 紊流时的压力损失	19
1.7.3 局部压力损失	19
1.7.4 管路系统中的总压力损失与 效率	20
1.8 液压冲击和气穴现象	20
1.8.1 液压冲击现象	20
1.8.2 空穴现象	24
1.9 液压传动在机械工程中的应用	24
1.9.1 液压传动在工业机床上的 应用	24
1.9.2 液压传动在工程机械上的 应用	25
1.10 液压传动技术的发展趋势	26
思考与习题	28
第 2 章 液压动力与执行元件	31
2.1 液压动力元件	32
2.1.1 液压泵概述	32
2.1.2 齿轮泵	35
2.1.3 叶片泵	36
2.1.4 柱塞泵	42
2.1.5 液压泵的选用	48
2.2 液压执行元件	49
2.2.1 液压缸	49
2.2.2 液压马达	59
思考与习题	65
第 3 章 液压控制阀与辅助元件	68
3.1 液压控制阀	69
3.1.1 液压阀概述	69
3.1.2 方向控制阀	71
3.1.3 压力控制阀	79
3.1.4 流量控制阀	86
3.1.5 逻辑插装阀	92
3.1.6 电液比例阀	97
3.1.7 电液伺服阀	98
3.1.8 电液数字控制阀	104
3.2 液压辅助元件	107
3.2.1 油箱及其附件	107
3.2.2 蓄能器	109
3.2.3 过滤器	113
3.2.4 油管及管接头	116
3.2.5 密封装置	120
思考与习题	123
第 4 章 液压控制系统分析	127
4.1 基本控制系统	128

4.1.1 压力控制系统	128	5.2.2 分析工况, 确定液压系统的主要参数	174
4.1.2 方向控制系统	135	5.3 液压系统原理图确定和液压元件的计算选择	176
4.1.3 速度控制系统	138	5.3.1 进行方案设计, 确定液压系统原理图	176
4.1.4 多执行元件控制回路	149	5.3.2 液压元件计算与选择	178
4.2 开式系统与闭式系统	156	5.3.3 液压系统性能验算及校核	182
4.2.1 开式液压系统	156	5.4 液压系统仿真与性能分析	185
4.2.2 闭式液压系统	156	5.4.1 概述	185
4.3 单泵系统与多泵系统	157	5.4.2 基于 MATLAB 的液压系统的仿真技术与应用	186
4.3.1 单泵液压系统	157	5.4.3 AMESim 仿真技术及其在液压系统中的应用	188
4.3.2 双泵液压系统	158	5.5 液压系统装配图的绘制	191
4.3.3 多泵液压系统	158	5.5.1 液压装置总体布局	191
4.4 定量系统与变量系统	159	5.5.2 液压阀的配置形式	191
4.4.1 定量系统	159	5.5.3 集成块设计	191
4.4.2 变量系统	159	5.5.4 绘制正式液压系统装配图, 编写技术文件	192
4.5 串联系统与并联系统	160	5.6 典型液压系统设计应用实例	192
4.5.1 串联系统	160	5.6.1 250 克塑料注射机液压系统设计及要求及有关设计参数	192
4.5.2 并联系统	161	5.6.2 液压执行元件载荷力和载荷转矩计算	192
4.6 分功率变量系统与总功率变量系统	161	5.6.3 液压系统主要参数计算	194
4.6.1 分功率变量系统	161	5.6.4 制定系统方案和拟定液压系统图	195
4.6.2 总功率变量系统	162	5.6.5 液压元件的选择	197
4.7 液压控制系统性能指标与要求	162	5.6.6 液压系统性能验算	199
4.7.1 液压系统的效率(经济性指标)	163	思考与习题	203
4.7.2 功率利用(节能性指标)	164		
4.7.3 调速范围及指标(调速指标)	164		
4.7.4 液压系统刚度(机械特性指标)	164		
4.7.5 负载能力(工作性能指标)	164		
思考与习题	165		
第 5 章 液压系统设计计算	170		
5.1 液压系统的设计原则与策略	171	第 6 章 电液控制技术及应用	204
5.1.1 液压系统绿色设计原则	171	6.1 电液控制技术概述	205
5.1.2 液压系统绿色设计策略	171	6.1.1 电液伺服控制	205
5.2 液压系统的设计内容与步骤	173	6.1.2 电液比例控制	206
5.2.1 明确对液压系统的设计要求	173	6.1.3 数字液压控制	207
		6.1.4 电液控制策略	207
		6.1.5 电液控制技术的发展趋势	209

6.2 电液伺服控制技术	209	7.4.3 注塑机液压系统	268
6.2.1 电液伺服系统工作原理及特点	209	7.5 矿山机械液压系统	270
6.2.2 电液伺服控制技术应用	212	7.5.1 采煤机液压系统	270
6.3 电液比例控制技术	219	7.5.2 液压冲击机械控制系统	274
6.3.1 电液比例控制概述	219	7.5.3 采矿钻车液压系统分析	277
6.3.2 电液比例控制的基本原理	220	7.6 冶金机械液压系统	282
6.3.3 电液比例阀的组成及分类	222	7.6.1 电弧炼钢炉液压传动系统	282
6.3.4 电液比例系统的构成及特点	223	7.6.2 高炉泥炮液压系统	284
6.3.5 电液比例技术应用实例	224	7.6.3 板带轧钢机压下装置液压系统	285
6.4 数字液压控制技术	230	7.7 工程车辆液压系统	287
6.4.1 数字液压元件	230	7.7.1 汽车起重机液压系统	287
6.4.2 数字液压控制技术应用	232	7.7.2 汽车转向液压系统	290
思考与习题	236	7.7.3 自卸车举升机构液压系统	292
		7.7.4 前移式叉车液压系统	293
		思考与习题	296
第7章 典型液压系统应用实例	238	第8章 液压系统测试技术	297
7.1 机床液压系统	239	8.1 液压测试技术概述	298
7.1.1 组合机床动力滑台液压系统	239	8.1.1 液压测试技术基础	298
7.1.2 M1432A 型万能外圆磨床液压系统	242	8.1.2 液压测试系统组成	300
7.1.3 液压机液压系统	245	8.2 液压系统基本参数的测试及测试仪器	301
7.2 建筑机械液压系统	248	8.2.1 液压系统中压力的测试	301
7.2.1 挖掘机液压系统	248	8.2.2 液压系统中流量的测试	305
7.2.2 ZL100 装载机液压系统	251	8.2.3 液压系统中温度的测量	309
7.2.3 HBT60 型混凝土泵液压系统	253	8.2.4 液压系统测试装置	310
7.2.4 压路机液压系统	256	8.3 液压系统测试工程应用实例	314
7.3 农业机械液压系统	257	8.3.1 矿用支架液压件 CAT 测试系统	314
7.3.1 拖拉机液压系统	258	8.3.2 液压冲击机械测试系统	318
7.3.2 东风 ZKB-5 型联合收获机液压系统	260		
7.3.3 林业集材机液压系统	262	第9章 液压系统故障诊断技术	321
7.3.4 饲料压块机液压系统	263	9.1 液压元件故障诊断与排除	322
7.4 轻工机械液压系统	265	9.1.1 液压泵常见故障分析与排除方法	322
7.4.1 造纸机液压控制系统	265		
7.4.2 纺织浆纱机液压系统	267		

9.1.2 液压缸的常见故障与排除方法	323	9.3.3 汽车起重机液压缸爬行的故障树分析	340
9.1.3 常用液压阀的故障分析与排除方法	324	9.4 液压系统故障诊断技术的发展	343
9.2 液压系统故障诊断方法	328	9.4.1 多种知识表示方法的结合	343
9.2.1 简易的故障诊断方法	328	9.4.2 经验知识与原理知识的紧密结合	344
9.2.2 基于信号分析的故障诊断方法	328	9.4.3 多种智能故障诊断方法的混合	344
9.2.3 基于人工智能的故障诊断方法	330	9.4.4 虚拟现实技术将得到重视和应用	344
9.3 液压系统故障诊断应用实例	333	9.4.5 数据库技术与人工智能技术相互渗透	344
9.3.1 液压挖掘机液压系统的常见故障及诊断排除	333		
9.3.2 基于 FTA 分析法的液压压砖机远程故障诊断专家系统	336	参考文献	348

第1章 液压技术基本理论

学习目标

通过学习液压传动技术基本理论,会运用液压传动的原理分析液压传动的基本组成。通过学习液体动力学和压力损失的计算,掌握液体压力的表示方法及力的计算方法,掌握流量、流速、压力损失的计算,为液压元件的结构及油路的分析提供依据。同时为学生顺利学习和掌握液压传动与控制实用技术打下基础。

学习要求

在回顾液压传动与控制技术的基础上,让学生在初步理解的基础上掌握液压传动与控制的^①概念、组成及基本原理,了解液压技术的发展、特点及应用;掌握液压油的主要物理性质、污染原因与控制方法,了解液压油的使用要求、选用;重点掌握流动流体3个基本方程、局部压力损失和沿程损失;了解并掌握流体流经小孔及间隙流量、液压冲击与空穴现象的概念及防止措施;了解液压冲击的计算。



引例

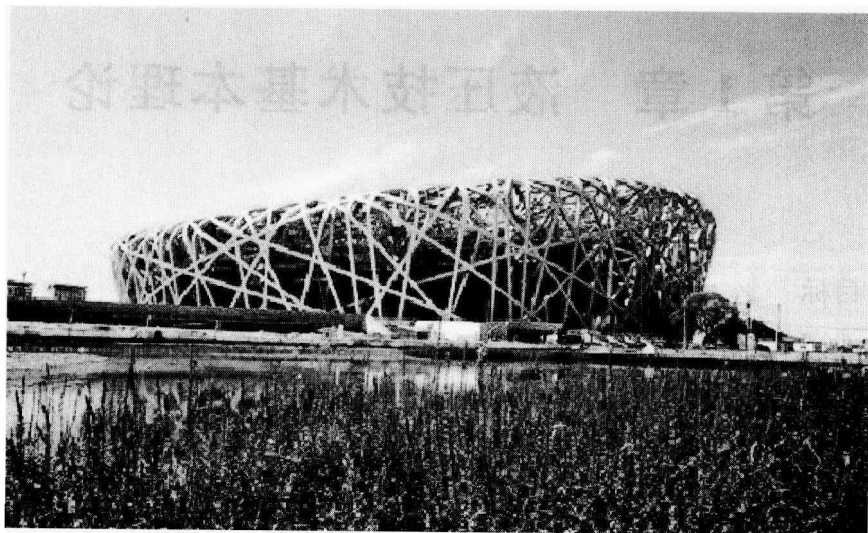
液压传动与控制技术是现代传动与控制的关键技术之一,在学习本课程之前,先举一个令人自豪又回味的液压技术工程实例,这就是2008年北京奥运会主体育场——鸟巢的建设。

北京奥运会国家体育场——鸟巢是21世纪最伟大的建筑之一,它采用全钢结构顶棚设计,其中鸟巢钢结构的卸载过程就是用液压千斤顶架起钢结构使临时支撑点的钢片松动并取出钢片的过程,这项工作的原理与人们给汽车换轮胎是相同的。

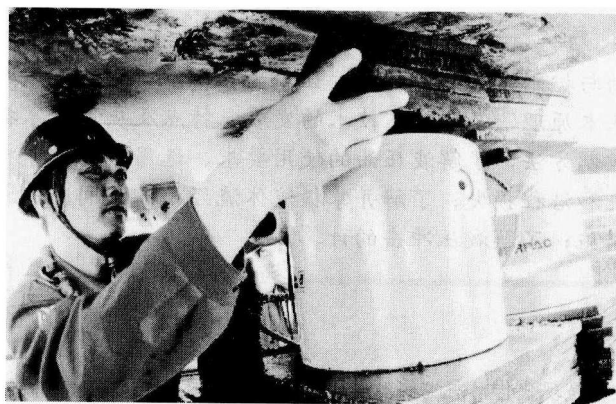
鸟巢的钢结构是支撑在支撑塔的两个小支柱上面的,要将小支柱的垫片撤出来,首先就要将液压千斤顶结构顶起来,使得小支柱上面的垫片松动,以便拆除。拆完以后液压千斤顶下降,达到钢结构与支撑点脱离的目的,这样卸载工作就完成了^②一步。

顶起鸟巢钢架的工作由特殊的液压千斤顶来完成。千斤顶顶升的高度完全由计算机控制,顶升的高度将使钢结构与垫片脱离至1~2mm的高度。由于每个卸载点中圈24个卸载点需要顶升的力度不一样,因此顶升高度也不同。通过控制中心计算机的控制,每个点输入不同的力,与千斤顶连接的液压泵为千斤顶供油,使其按输入力度数据将钢结构顶到合适的高度。在顶的过程,工人及时监测千斤顶的变位,一旦发现支撑点的垫片已经松动,千斤顶的上升状态将被立即转换到停止状态。

整个卸载过程分为7大步骤,35小步,在78个支撑钢架上布设了156个液压千斤顶,通过千斤顶与受力钢塔架支撑点交替受力、交替下降,分步实现卸载。此前,35个卸载步骤已完成33个。最后的步骤是使中圈和内圈剩余支撑点完全剥离。整个过程共卸下约1.4万吨钢结构。鸟巢钢结构的卸载采取的是分级同步卸载,采用中央处理器控制,用计算机统一发出指令,实施自动同步卸载的方法进行。



北京奥运会主体育场——鸟巢



用液压千斤顶卸载鸟巢钢结构

1.1 历史回顾

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技术。

对流体力学学科的形成第一个做出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(I. 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实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. 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,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年将其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;稍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年美国米诺尔斯基(N. Minorsky)提出了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)提出了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)出版了《信息论》与《控制论》。

1950年摩根(Moog)成功研制了采用微小输入信号的电液伺服阀后,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,液压技术在航天、国防、汽车和机床工业中得到了广泛应用,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年布莱克本的《液动气动控制》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,不论是对于行走机械,还是对于固定的工业设备,液压传动与控制技术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。

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 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 的活塞杆则带动着工作台 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, 而辅助缸 4 的活塞杆则带动着配重 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, 3、4 两缸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 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重量很小或未携带工件, 或是平台下降时所携带工件重量很大, 那么没有换向阀 14, 会有可能使主缸 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 4 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。

1.2.2 液压系统的基本组成

液压传动系统除了以液体为传动介质外, 通常由以下 4 部分组成。

1. 动力元件

动力元件是将机械能转化为液体压力能的元件。如上述升降式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分为叶片泵、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, 压力处于中高挡。

2. 执行元件

执行元件是将液体的压力能转化为机械能的液压元件。升降式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

控制调节元件是对液压系统的压力、流量和液流方向进行控制或调节的元件。升降式工作台液压系统中的溢流阀、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 3 部分以外的其他元件即为辅助元件。升降式工作台液压系统中的油箱、进油过滤器、回油过滤器属于此类元件。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的作用。

1.2.3 液压传动系统的优势和不足

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，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，液压传动装置的体积小、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，因而磨损小、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。

液压传动的不足有以下几个方面。

(1) 由于存在摩擦损失和泄漏损失，液压传动系统的能量损失较大。

(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，由于液压传动系统的优势明显，因而在现代工业领域得到了广泛应用，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

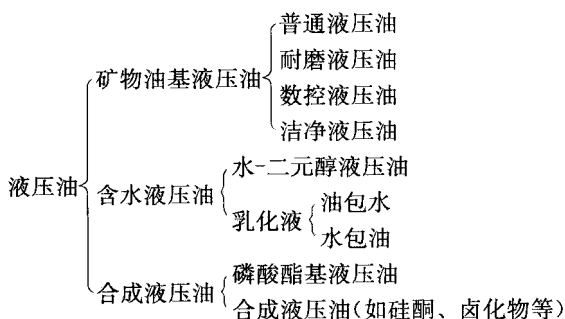
液压传动的工作原理、液压传动系统的组成、液压传动的特点、液压传动技术的应用等内容是学习本课程的起点。液压传动的工作原理是重中之重，其他是该内容的延伸和深化。通过对其分析，可以对液压传动有一个概括的认识，为进一步学习液压传动技术建立基础。当学习了全部课程后，会对其赋予新的内涵。

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，液压油的分类如下。



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如下。

(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，其抗磨性能强，适用于系统压力 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-RV 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。

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，液体密度的单位是 kg/m^3 。

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 $\rho = (850 \sim 960) \text{kg/m}^3$ ；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 $\rho = 900 \text{kg/m}^3$ ；对于工程机械常用液压油其密度为 $\rho = 880 \text{kg/m}^3$ 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)。

式(1-2)中 β 为正值, 而当压力增加、 Δp 为正值时, 体积总是减小, 即 ΔV 为负值, 所以在式(1-2)的左边要加负号。 β 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

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

从式(1-3)可以看出, 油液的弹性模数约比钢的弹性模数小 100~150 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, 其容积弹性模数降低到纯油的 5% 左右; 油中混有 5% 空气时, 其体积弹性模数则降低到纯油的 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。

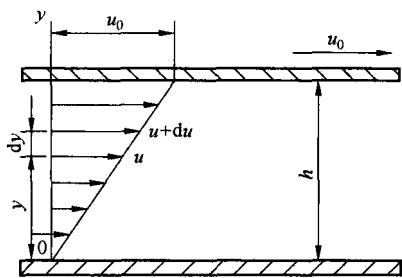


图 1.2 液体的黏性示意图

3. 液体的黏性和黏度

液体在外力作用下流动时, 由于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。液体的黏性示意图如图 1.2 所示。

内摩擦力表达式为

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

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。在液压系统中所用的液压油常根据黏度来选择。常用的黏度表示方式有 3 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)来表示, 则式(1-4)可改写成

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

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)。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

运动黏度是绝对黏度 μ 与密度 ρ 的比值, 即

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

式中, ν 为液体的动力黏度; ρ 为液体的密度。

运动黏度的 SI 单位为 m^2/s (米²/秒), 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, 是由于在它的量纲中只有运动学的要素长度和时间因次的缘故。机械油的牌号上所标明的号数就是以厘斯为单位, 在温度为 50℃ 时运动黏度 ν 的平均值。例如 10 号机械油指明该油在 50℃ 时其运动黏度 ν 的平均值是 10cSt。蒸馏水在 20.2℃ 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, 以此类推。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

相对黏度以相对于蒸馏水的黏性的大小来表示该液体的黏性, 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 200cm³ 某一温度的被测液体在自重作用下流过直径 2.8mm 小孔所需的时间 t_A , 然后测出同体积的蒸馏水在 20℃ 时流过同一孔所需的时间 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 $t^{\circ}\text{C}$ 时的恩氏黏度用符号 $^{\circ}E_t$ 表示。

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

由以上可知, 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

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

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 液压油的要求和选用

1. 对液压油的基本要求

机械工程液压系统使用液压油作为工作介质, 这类液压系统中油液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。