

高等院校机电类 **工程教育** 系列规划教材

液压与气压传动

■ 主编 张 奕

→ **液压与气压传动**：本书是在省级精品课程“液压传动”教学实践的基础上结合“工程教育”的教学理念编写而成的。内容上，分液压传动与气压传动两部分；编排上，融基础理论、工程实例、经典例题、经验总结于一体。同时，还设立了“工程实例”、“工程应用点评”等环节，并免费为采用本书授课的教师提供电子课件和书中所有插图。详细内容请见目录与索引>>>



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等院校机电类工程教育系列规划教材

液压与气压传动

主编 张 奕

副主编 赵升吨 丁 锋 张兴国 张力平

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本教材是在省级精品课程“液压传动”教学实践的基础上结合“工程教育”的教学理念编写而成的。全书共 12 章，分为上下两篇。上篇为液压传动，包括绪论、液压流体力学基础、液压泵与液压马达、液压缸、液压控制阀、液压辅助元件、液压基本回路、液压系统的设计与应用实例；下篇为气压传动，包括气压传动基础知识、气源装置与气动元件、气压传动基本回路、气压传动系统设计与实例。教材中还设立了“工程实例”、“工程应用点评”等环节，并免费为采用本书授课的教师提供电子课件和书中所有插图（通过 yuy@phei.com.cn 进行申请）。

本书可作为普通高等院校机械设计制造及其自动化、机械电子工程、测控技术与仪器等相关专业主干技术基础课程“液压传动”或“气压传动”的教科书，也可供从事液压与气压传动设计和研究的工程技术人员参考。

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

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动 / 张奕主编. — 北京: 电子工业出版社, 2011.1

(高等院校机电类工程教育系列规划教材)

ISBN 978-7-121-12235-4

I. ①液… II. ①张… III. ①液压传动—高等学校—教材②气压传动—高等学校—教材 IV. ①TH137
②TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 218093 号

策划编辑: 余 义

责任编辑: 余 义

印 刷: 北京市海淀区四季青印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19.25 字数: 493 千字

印 次: 2011 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 36.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

序

2008年7月间,电子工业出版社邀请全国20多所高校几十位机电领域的老师,研讨符合“工程教育”要求的教材的编写方案。大家认为,这适应了目前我国高等院校工科教育发展的趋势,特别是对工科本科生实践能力的提高和创新精神的培养,都会起到积极的推动作用。

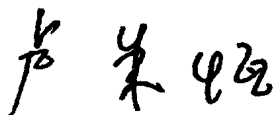
教育部于2007年1月22日颁布了教高(2007)1号文件《教育部财政部关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》。同年2月17日,紧接着又颁布了教高(2007)2号文件《教育部关于进一步深化本科教学改革全面提高教学质量的若干意见》。由这两份文件,可以看到国家教育部已经决定并将逐步实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(简称质量工程),而质量工程的核心思想就在于培养学生的实践能力和创新精神,提高教师队伍整体素质,以及进一步转变人才培养模式、教学内容和方法。

教学改革和教材建设从来都是相辅相成的。经过近两年的教改实践,不少老师都积累了一定的教学经验,借此机会,编写、出版符合“工程教育”要求的教材,不仅能够满足许多学校对此类教材的需求,而且将进一步促进质量工程的深化。

近一年来,电子工业出版社选派了骨干人员与参加编写的各位教授、专家和老师进行了深入的交流和研究。不仅在教学内容上进行了优化,而且根据不同课程的需要开辟了许多实践性、经验性和工程性较强的栏目,如“经验总结”、“应用点评”、“一般步骤”、“工程实例”、“经典案例”、“工程背景”、“设计者思维”、“学习方法”等,从而将工程中注重的理念与理论教学更有机地结合起来。此外,部分教材还融入了实验指导书和课程设计方案,这样一方面可以满足某些课程对实践教学的需要,另一方面也为教师更深入地开展实践教学提供丰富的素材。

随着我国经济建设的发展,普通高等教育也将随之发展,并培养出适合经济建设需要的人才。“高等院校机电类工程教育系列规划教材”就站在这个发展过程的源头,将最新的教改成果推而广之,并与其共进,协调发展。希望这套教材对更多学校的教学有所裨益,对学生的理论与实践的结合发挥一定的作用。

最后,预祝“高等院校机电类工程教育系列规划教材”项目取得成功。同时,也恳请读者对教材中的不当、不贴切、不足之处提出意见与建议,以便重印和再版时更正。



中国工程院院士、西安交通大学教授

教材编写委员会

主任委员 赵升吨(西安交通大学)

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

芮延年(苏州大学)

胡大超(上海应用技术学院)

钱瑞明(东南大学)

袁清珂(广东工业大学)

参编院校

(按拼音排序)

※ 安徽工业大学

※ 沈阳工业大学

※ 长安大学

※ 苏州大学

※ 东南大学

※ 苏州科技学院

※ 广东工业大学

※ 同济大学

※ 华南理工大学

※ 五邑大学

※ 华南农业大学

※ 武汉科技学院

※ 淮海工学院

※ 西安电子科技大学

※ 吉林师范大学

※ 西安工程大学

※ 南通大学

※ 西安工业大学

※ 山东建筑大学

※ 西安交通大学

※ 陕西科技大学

※ 西安科技大学

※ 上海应用技术学院

※ 西安理工大学

※ 深圳大学

※ 西安文理学院

前 言

液压与气压传动技术是机械设备实现传动与控制的关键技术之一，世界各国对液压与气压传动工业的发展都给予了高度的重视。液压与气压传动技术所具有的独特优点，使其广泛应用于国民经济和国防建设的各个领域。“液压与气压传动”课程已成为高等学校机械类专业的必修课程之一。

为了进一步深化本科教学改革全面提高教学质量，实施“质量工程”，同时将多年来建设“液压传动”省级精品课程的教学实践经验和积累融入教材之中，我们编写了这本教材。

在编写中注重“工程教育”的教学理念，力求在满足理论教学的同时更好地结合工程实践。使学生能掌握液压与气压传动技术的基本概念、基本原理和应用方法，完成工程师的基本能力训练，这就是我们编写本教材的指导思想和基本出发点。

为了适应工程应用型人才培养的要求，本书在编写过程中紧密结合教学大纲，融基础理论、工程实例、经典例题、经验总结、实践训练于一体。在教材中设立了“工程实例”、“工程应用点评”等环节。力求处理好理论与实践的关系，使教材具有实用性、系统性和先进性。

本书以液压与气压传动技术的基本概念、基本理论、基本方法、以及工程实例为主线，介绍了液压与气压传动的典型元件的结构、工作原理及基本参数，典型回路及系统的组成和设计方法等。全书共 12 章，分为上下两篇。上篇为液压传动，主要介绍液压流体力学的基础知识、各类液压元件的结构及工作原理、各类液压基本回路的组成及特点、液压系统的分析与设计方法以及工程实例等。下篇为气压传动，主要介绍气压传动的基础知识、各类气压元件的结构及工作原理、各类气压基本回路的组成及特点、气压系统的分析与设计方法以及工程实例等。本书的配套教学资源包括电子课件和书中所有插图，采用本书授课的教师通过 yuy@phei.com.cn 可免费获取。

本书可作为普通高等院校机械设计制造及其自动化、机械电子工程、测控技术与仪器等相关专业主干技术基础课程“液压传动”或“气压传动”的教科书，也可供从事液压与气压传动设计和研究的工程技术人员参考。

本书由长安大学张奕教授担任主编，西安交通大学赵升吨教授、西安工业大学丁锋副教授、南通大学张兴国副教授、长安大学张力平副教授担任副主编。全书共 12 章，第 1、2、8 章由张奕编写，第 3、12 章由赵升吨编写，第 6、7、11 章由丁锋编写，第 9、10 章由张兴国编写，第 4、5 章由张力平编写。全书由张奕统稿。

在教材编写过程中，我们参考并引用了液压和气压传动方面的教材、论著和资料，并得到了许多同行专家教授的支持和帮助，限于篇幅，不能在文中一一列举，在此一并致以衷心的感谢。

限于编者水平有限，书中难免存在错误疏漏和不妥之处，敬请读者提出宝贵意见。

编 者

2010 年 10 月于西安

目 录

上篇 液 压 传 动

第 1 章 绪论	(1)	2.3.4 动量方程	(20)
1.1 液压传动的基本原理及液压系统的组成	(1)	2.4 液体流动时的能量损失 ...	(22)
1.1.1 液压传动的基本原理及特点	(1)	2.4.1 层流、紊流、雷诺判据 ...	(23)
1.1.2 液压传动系统的组成 ...	(3)	2.4.2 沿程能量损失	(24)
1.1.3 液压传动的图形符号 ...	(4)	2.4.3 局部能量损失	(27)
1.2 液压传动的优缺点及发展概况	(4)	2.4.4 管路系统总能量损失	(28)
1.2.1 液压传动的优缺点	(4)	2.5 孔口和缝隙流动	(30)
1.2.2 液压传动技术的发展概况	(5)	2.5.1 小孔出流及节流特性方程	(30)
第 2 章 液压流体力学基础	(6)	2.5.2 缝隙流动	(33)
2.1 液压传动的工作介质	(6)	2.6 液压冲击和气蚀现象	(37)
2.1.1 液压传动工作介质的种类	(6)	2.6.1 液压冲击	(37)
2.1.2 液压油的的主要物理性质	(7)	2.6.2 气穴和气蚀现象	(39)
2.1.3 液压油的选用	(10)	2.7 本章小结	(40)
2.1.4 液压油的污染及其控制	(11)	2.8 习题	(40)
2.2 液体静力学	(12)	第 3 章 液压泵与液压马达	(43)
2.2.1 静压力及其特性	(12)	3.1 液压泵与液压马达的性能参数	(43)
2.2.2 静力学基本方程	(13)	3.1.1 液压泵与液压马达的基本工作原理	(43)
2.2.3 压力表示法	(13)	3.1.2 液压泵的主要性能参数	(44)
2.2.4 帕斯卡原理	(14)	3.1.3 液压马达的主要性能参数	(46)
2.2.5 静止液体对固体壁面的作用力	(14)	3.2 齿轮泵与齿轮马达	(49)
2.3 液体动力学	(16)	3.2.1 外啮合齿轮泵	(50)
2.3.1 相关的基本概念	(16)	3.2.2 内啮合齿轮泵	(54)
2.3.2 连续性方程	(18)	3.2.3 齿轮马达	(55)
2.3.3 伯努利方程(能量方程)	(18)	3.3 叶片泵与叶片马达	(58)
		3.3.1 双作用叶片泵	(58)
		3.3.2 单作用叶片泵	(62)
		3.3.3 叶片马达	(65)
		3.4 柱塞泵与柱塞马达	(66)

3.4.1	轴向柱塞泵	(66)	5.5	插装阀	(129)
3.4.2	径向柱塞泵	(72)	5.5.1	概述	(129)
3.4.3	轴向柱塞马达	(75)	5.5.2	插装方向阀	(131)
3.4.4	径向柱塞马达	(75)	5.5.3	插装压力阀	(133)
3.5	液压泵与液压马达的选用	(77)	5.5.4	插装流量阀	(134)
3.5.1	液压泵的选用	(77)	5.6	电液比例阀	(134)
3.5.2	液压马达的选用	(78)	5.6.1	概述	(134)
3.6	本章小结	(79)	5.6.2	电液比例压力阀	(135)
3.7	习题	(80)	5.6.3	电液比例流量阀	(137)
第4章	液压缸	(81)	5.6.4	电液比例方向阀	(138)
4.1	液压缸的结构与分类	(81)	5.7	本章小结	(140)
4.1.1	活塞式液压缸	(82)	5.8	习题	(141)
4.1.2	柱塞式液压缸	(83)	第6章	液压辅助元件	(143)
4.1.3	摆动式液压缸	(84)	6.1	滤油器	(143)
4.2	液压缸的设计计算	(84)	6.1.1	滤油器的分类	(143)
4.2.1	液压缸的主要尺寸计算 与校核	(84)	6.1.2	滤油器的选用与 安装	(144)
4.2.2	液压缸设计中应注意 的问题	(86)	6.2	蓄能器	(145)
4.3	本章小结	(88)	6.2.1	蓄能器的作用	(146)
4.4	习题	(88)	6.2.2	蓄能器的分类	(146)
第5章	液压控制阀	(89)	6.2.3	蓄能器的容量计算	(147)
5.1	概述	(89)	6.3	液压管件	(148)
5.1.1	液压控制阀的分类	(89)	6.3.1	液压油管	(148)
5.1.2	液压控制阀的共性 特点	(90)	6.3.2	管接头	(149)
5.2	方向控制阀	(91)	6.4	密封件	(151)
5.2.1	单向阀	(91)	6.4.1	密封件的要求	(151)
5.2.2	换向阀	(93)	6.4.2	密封件的分类	(152)
5.2.3	多路换向阀	(101)	6.5	液压油箱	(154)
5.3	压力控制阀	(105)	6.5.1	油箱容积的确定	(154)
5.3.1	溢流阀	(105)	6.5.2	油箱的结构设计	(154)
5.3.2	减压阀	(113)	6.6	热交换器	(154)
5.3.3	顺序阀	(117)	6.6.1	冷却器	(154)
5.3.4	压力继电器	(120)	6.6.2	加热器	(155)
5.3.5	压力控制阀小结	(121)	6.7	本章小结	(155)
5.4	流量控制阀	(122)	6.8	习题	(156)
5.4.1	节流阀	(122)	第7章	液压基本回路	(157)
5.4.2	调速阀	(125)	7.1	压力控制回路	(157)
5.4.3	溢流节流阀	(127)	7.1.1	调压回路	(157)
5.4.4	分流集流阀	(128)	7.1.2	减压回路	(158)
			7.1.3	增压回路	(158)
			7.1.4	卸荷回路	(159)

7.1.5	平衡回路	(160)	8.1	液压系统的分类	(182)
7.1.6	保压回路	(160)	8.1.1	开式循环系统	(182)
7.2	速度控制回路	(162)	8.1.2	闭式循环系统	(182)
7.2.1	调速回路	(162)	8.2	典型液压系统应用实例	(184)
7.2.2	快速运动回路	(171)	8.2.1	机床滑台液压系统	(184)
7.2.3	速度换接回路	(172)	8.2.2	注塑机液压系统	(186)
7.3	方向控制回路	(175)	8.2.3	履带式单斗挖掘机液压系统	(188)
7.3.1	采用换向阀的换向回路	(175)	8.3	液压系统的设计计算	(190)
7.3.2	采用双向变量泵的换向回路	(175)	8.3.1	明确设计要求	(191)
7.4	多执行元件控制回路	(176)	8.3.2	分析工况, 确定主参数	(191)
7.4.1	顺序动作回路	(176)	8.3.3	拟订液压系统图	(195)
7.4.2	同步回路	(177)	8.3.4	液压元件的计算选择	(197)
7.5	其他回路	(178)	8.3.5	液压系统的性能验算	(198)
7.5.1	锁紧回路	(178)	8.3.6	进行结构设计, 编写技术文件	(200)
7.5.2	浮动回路	(179)	8.3.7	液压系统设计计算实例	(201)
7.6	本章小结	(179)	8.4	本章小结	(205)
7.7	习题	(180)	8.5	习题	(205)
第 8 章	液压系统的设计与应用实例	(182)			

下篇 气压传动

第 9 章	气压传动基础知识	(206)	第 10 章	气源装置与气动元件	(221)
9.1	气压传动概述	(206)	10.1	气源装置	(221)
9.1.1	气压传动的特点	(206)	10.1.1	气压传动系统对压缩空气品质的要求	(221)
9.1.2	气压传动系统的组成	(208)	10.1.2	气源装置的组成	(222)
9.2	空气的物理性质	(210)	10.1.3	空气压缩机及其净化设备	(222)
9.2.1	空气的性质	(210)	10.1.4	气动三联件	(229)
9.2.2	湿度和含湿量	(212)	10.2	气动执行元件	(229)
9.3	理想气体状态方程	(213)	10.2.1	气缸	(230)
9.3.1	理想气体状态方程	(213)	10.2.2	气马达	(240)
9.3.2	气体状态变化过程	(213)	10.2.3	真空元件	(242)
9.4	气体的流动规律	(216)	10.3	气动控制元件	(244)
9.4.1	气体流动的基本方程	(216)	10.3.1	压力控制阀	(244)
9.4.2	气动元件的通流能力	(217)	10.3.2	流量控制阀	(249)
9.4.3	充、放气温度与时间的计算	(218)	10.3.3	方向控制阀	(251)
9.5	本章小结	(219)	10.3.4	气动逻辑元件	(259)
9.6	习题	(219)			

10.4	气动辅件·····	(261)	11.6.2	互锁回路·····	(273)
10.4.1	过滤器·····	(261)	11.6.3	双手操作回路·····	(273)
10.4.2	油雾器·····	(263)	11.7	同步动作回路·····	(273)
10.4.3	消声器·····	(263)	11.8	往复动作回路·····	(274)
10.4.4	其他辅件·····	(264)	11.9	记数回路·····	(274)
10.5	本章小结·····	(265)	11.10	延时回路·····	(275)
10.6	习题·····	(265)	11.11	本章小结·····	(276)
第 11 章	气压传动基本回路·····	(267)	11.12	习题·····	(276)
11.1	压力控制回路·····	(267)	第 12 章	气压传动系统设计	
11.1.1	一次压力控制回路	(267)	与实例·····	(277)	
11.1.2	二次压力控制回路	(267)	12.1	气压传动系统设计·····	(277)
11.2	速度控制回路·····	(268)	12.1.1	气压传动系统设计的主要内容	
11.2.1	气缸调速回路·····	(268)		与程序控制的分类·····	(277)
11.2.2	快速往复动作回路	(269)	12.1.2	行程程序控制回路信号	
11.2.3	速度换接回路·····	(269)		——动作状态图与原理图绘制	
11.3	换向控制回路·····	(269)		的规定·····	(280)
11.3.1	单作用气缸换向		12.1.3	多缸单往复行程程序回路	
	回路·····	(269)		设计·····	(283)
11.3.2	双作用气缸换向		12.1.4	多缸多往复行程程序回路	
	回路·····	(269)		设计·····	(289)
11.4	位置控制回路·····	(270)	12.2	气压传动系统实例·····	(290)
11.4.1	多位置缸的位置控制		12.2.1	气压传动机械手·····	(290)
	回路·····	(270)	12.2.2	震压造型机的气压传动	
11.4.2	用缓冲挡铁的位置控制			系统·····	(291)
	回路·····	(271)	12.3	本章小结·····	(293)
11.5	气液联动回路·····	(271)	12.4	习题·····	(293)
11.5.1	气液转换控制回路	(272)	索引·····	(295)	
11.5.2	气液增压缸回路·····	(272)	参考文献·····	(296)	
11.6	安全保护回路·····	(272)			
11.6.1	过载保护回路·····	(272)			

上篇 液压传动

第1章 绪论

1.1 液压传动的基本原理及液压系统的组成

一台完整的机器一般由三个主要部分组成：原动机、传动装置和工作机构。原动机包括内燃机、电动机等。工作机构是完成该机器的工作任务所需的直接工作部分。由于原动机输出的扭矩和转速范围有限，为了适应工作机构的输出扭矩（力）和输出转速（速度）变化范围较宽的要求，以及操纵、控制性能的要求，必须在原动机和工作机构之间设置传动装置。

任何机器上的传动装置都是将能量或动力由原动机向工作机构的传递。通过各种不同的传动方式使原动机的转动变为工作机构各种不同的运动形式，如车轮的转动、转台的回转、挖掘机动臂的升降等。因此，传动装置就是设于原动机和工作机构之间，起传递动力和进行控制作用的装置。传动的类型有多种，按照传动所采用的机件或工作介质的不同，可分为机械传动、电力传动、气压传动和液体传动等。

(1) 机械传动：通过齿轮、齿条、皮带、链条等机件传递动力和进行控制的一种传动方式。它是发展最早、应用最为普遍的传动形式。

(2) 电力传动：利用电力设备，通过调节电参数来传递动力和进行控制的一种传动方式。

(3) 气压传动：以压缩空气为工作介质进行能量传递和控制的一种传动方式。

(4) 液体传动：以液体为工作介质进行能量传递和控制的一种传动方式。按其工作原理的不同又可分为液力传动和液压传动。液力传动的工作原理是基于流体力学的动量矩原理，主要是以液体动能来传递动力，故又称为动力式液体传动。液压传动是基于流体力学的帕斯卡原理，主要是利用液体静压能来传递动力，故也称为容积式液体传动或静液传动。

1.1.1 液压传动的基本原理及特点

图1-1所示为液压传动的基本原理图。假设在面积为 A_1 的单柱塞泵的活塞1上作用一个力 F_1 ，则单柱塞泵输出油液压力为

$$p = \frac{F_1}{A_1} \quad (1-1)$$

根据帕斯卡原理，此压力将以同样大小传递给作用面积为 A_2 的液压缸的活塞2上，因而，液压缸可以产生的推力为

$$F_2 = pA_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1} \quad (1-2)$$

由式(1-2)力传递基本方程式看出：如果 A_2 很大， A_1 很小，则只需要很小的力 F_1 便能获

得很大的推力 F_2 。可见，这是一个力的放大机构，即液压传动具有增力效应，其增大倍率为 A_2/A_1 ，这是液压传动的一个重要特征。

力 F_1 之所以能够从活塞 1 传递到活塞 2 上去，是因为它通过处于两个活塞之间的密封容器内的受压液体进行了传递。处于密封容器内的受压液体，像齿轮、齿条等固体传动机件一样能够传递动力。

由式(1-2)还可看出： F_2 越大，即外负载越大，液压缸油腔中的压力 p 也就越大。这说明系统中的压力大小是由外负载决定的。

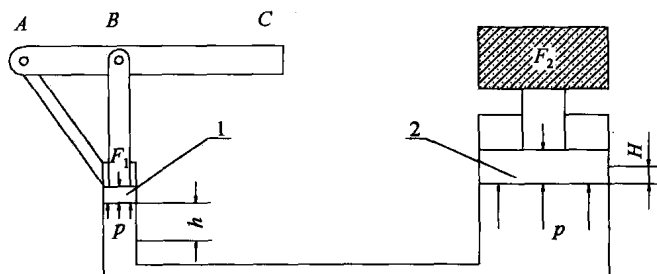


图 1-1 液压传动的基本原理图

1, 2—活塞；A, B—铰接点；C—施力点

假如活塞 1 在 F_1 的作用下，在时间 t 内向下移动一段距离 h ，则柱塞泵排出油液的体积为 hA_1 ；而活塞 2 一定要向上移动一段距离 H 。在活塞与缸（泵）体滑动面之间完全密封及液体不可压缩的情况下，有

$$A_1 h = A_2 H \quad (1-3)$$

将式(1-3)两端除以时间 t ，整理后得

$$v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2} \quad (1-4)$$

式中， v_1 与 v_2 分别为活塞 1 与活塞 2 的运动速度。

由于 $A_1/A_2 < 1$ ，则 $v_1 > v_2$ ，由此可见，这又是一个速度变换机构，其速度的变换和传递是靠液体容积变化相等的原则进行的。

由式(1-4)得

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = Q \quad (1-5)$$

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} \quad (1-6)$$

或

$$v_2 = \frac{Q}{A_2}$$

式中， Q 为流入液压缸的流量，也是柱塞泵排出的流量。

式(1-6)表明，液压缸活塞速度正比于流入液压缸的流量，反比于活塞面积。

显而易见，单位时间内活塞 1 和活塞 2 所做的功（即功率）分别为

$$N_1 = v_1 F_1 = \frac{Q}{A_1} p A_1 = pQ$$

和

$$N_2 = v_2 F_2 = \frac{Q}{A_2} p A_2 = pQ$$

由此看出： $N_1 = N_2$ ，它表明液压传动符合能量守恒定律。压力与流量的乘积就是功率，这个概念以后要经常用到。

综上所述，可归纳出液压传动的特点是：（1）以液体为传动介质，靠处于密闭容器内的液体静压力来传递动力，其静压力的大小取决于外负载；（2）负载速度的传递是按液体容积变化相等的原则进行的，其速度大小取决于流量。

1.1.2 液压传动系统的组成

所谓液压传动系统，就是根据机械的生产工艺循环和生产能力的要求，用管路将有关的液压元件合理、有机地连接起来，形成一个整体，用以完成规定的动力传动职能。

图1-2所示的是推土机的液压系统结构简图。推土机的液压系统由液压泵1、液压缸2、换向阀3、安全阀4、滤油器5及油箱6等组成。发动机带动液压泵从油箱中吸油，并以较高的压力输出，即液压泵把发动机的机械能转变为液压油的压力能。液压缸活塞杆的伸缩使推土机铲刀升降，即把液压油的压力能转变为机械能传递给铲刀。换向阀的作用是控制液流的方向，它共有P、A、B、O四个油口，分别与液压泵、液压缸上下腔及油箱相通。阀杆有四个操作位置，对应于推土机的四种工作状态。当阀杆处于中立位置I时，在换向阀内部P口与O口相通，A口与B口被封闭，此时液压泵输出的油液不通过液压缸而直接流回油箱，液压泵卸荷，液压缸活塞保持在一定位置；当阀杆在位置II时，换向阀内部P口与B口相通，A口与O口相通，液压泵输出的油液经换向阀进入液压缸下腔，液压缸活塞杆缩回，提升铲刀，液压缸上腔的油经换向阀流回油箱；当阀杆在位置III时，液压泵输出的油液进入液压缸上腔，使铲刀下降，液压缸下腔的油经换向阀流回油箱；当阀杆在位置IV时，换向阀内部四个口全通，此时铲刀处于浮动状态。在阀杆处于位置II或III时，如果液压缸活塞杆上升或下降到极限位置，液压缸内的压力便急剧上升，可能造成油管破裂等事故，为此设置了安全阀4，以限制系统内的最高压力。当系统压力高于某一限定值时，安全阀开启，液压泵出口的油液通过安全阀直接流回油箱。油箱的作用主要是储存液压油并散热。滤油器的作用是滤去工作油液中的杂质，以减小对液压元件的磨损。

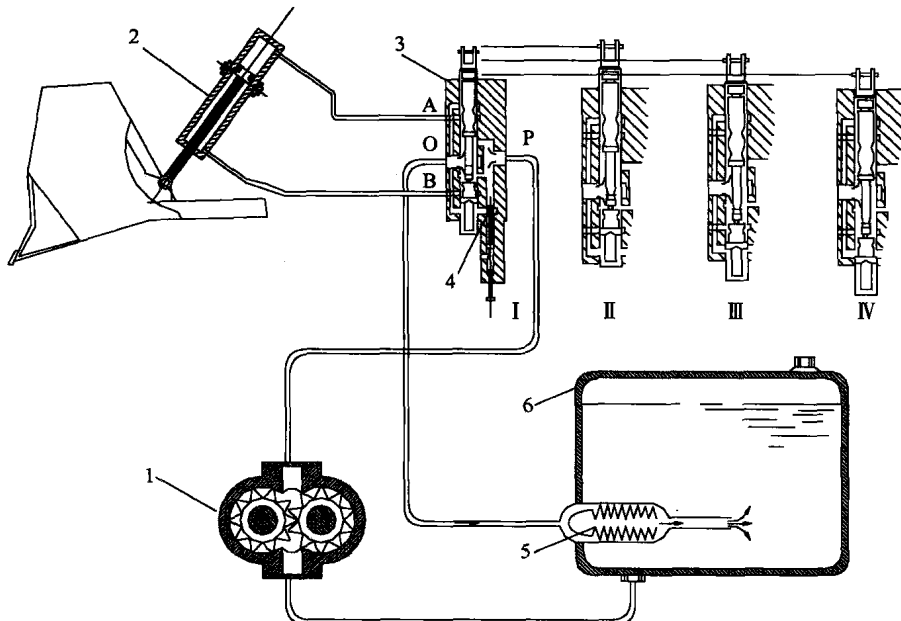


图 1-2 推土机的液压系统结构简图

1—液压泵；2—液压缸；3—换向阀；4—安全阀；5—滤油器；6—油箱

由上面的例子可以看出, 液压传动系统由以下几部分组成。

(1) 动力元件——包括各种液压泵。它们用来将原动机的机械能转换成工作液体的压力能。

(2) 执行元件——包括各类液压缸和液压马达。它们的作用是把工作液体的压力能转变为机械能, 推动负载运动。液压缸完成直线运动, 液压马达完成旋转运动。

(3) 控制元件——包括各类压力、流量、方向控制阀等。通过它们控制和调节液压系统中液压油的压力、流量和流向, 以保证执行元件所要求的输出力、速度和方向。

(4) 辅助元件——包括液压油箱、管路、滤油器、蓄能器、冷却器、加热器、压力表、温度计等。它们对保证液压系统正常、可靠、稳定的工作是不可缺少的。

(5) 工作介质——也称为工作液体, 是传递能量的媒介。它的性质对液压系统的正常工作有直接的重要影响。

1.1.3 液压传动的图形符号

液压系统由许多元件组成, 如果用各元件的结构图来表达整个液压系统, 则绘制起来非常复杂, 而且往往难以将其原理表达清楚, 因而工程实践中常以各种符号表示元件的职能, 将各元件的符号用管路连接起来组成液压系统图, 以表示液压传动及控制系统的原理。图1-3就是用图形符号表示的图1-2所示推土机的液压系统。

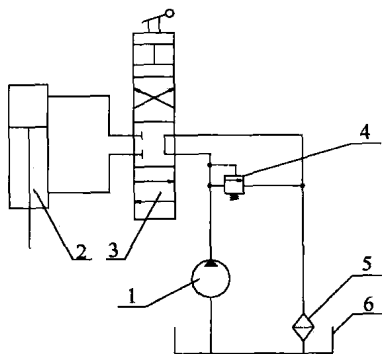


图 1-3 推土机液压系统图

1—液压泵；2—液压缸；3—换向阀；
4—安全阀；5—滤油器；6—油箱

现行的液压系统图形符号只表示元件的职能和连接通路, 既不表示元件的具体结构和参数, 也不表示从一个工作状态转到另一个工作状态的过渡过程。系统图只表示各元件的连接关系, 不表示系统布置的具体位置或元件在机器中的实际安装位置。系统图中的符号通常以元件的静止位置或零位置表示, 如图1-2中的换向阀有四个位置, 在系统图中一般以其静止位置即不操作时的中立位置表示。

当需要标明元件的名称、型号和参数时, 一般在系统图的零件表中说明, 必要时可标注在元件符号旁边。对于标准中没有规定的图形符号, 可以根据标准的原则和所列图例的规律进行派生。当无法直接引用或派生时, 或者有必要特别说明系统中某一元件的结构及动作原理时, 允许局部采用结构简图来表示。

1.2 液压传动的优缺点及发展概况

1.2.1 液压传动的优缺点

液压传动与其他传动形式相比, 有许多独特的优点。

(1) 能容量大, 即较小重量和尺寸的液压元件, 可传递较大的功率。如液压马达的外形尺寸约为同功率电动机的12%, 重量约为同功率电动机的10%~20%。

(2) 惯性小, 启动、制动迅速, 运动平稳, 冲击小, 换向迅速。

(3) 能在运行过程中进行无级调速, 调速方便, 调速范围较大, 可从100:1至2000:1。

(4) 简化整机结构, 减少零件数目, 减轻整机重量。例如, 斗容量为1 m³的机械式挖掘

机,零件总数为1500多件,机重41吨,而相同斗容量的全液压挖掘机,零件总数为700多件,机重23吨。

(5) 易于实现低速大扭矩;易于实现直线往复运动,可以直接驱动工作装置;各液压元件间用管道连接,因而安装位置自由度大,易于总体布置。

(6) 操纵方便,省力,控制、调节简单,易于实现自动化。与电气元件相配合,易于实现复杂的控制操作。

(7) 由于系统充满油液,对各液压元件有自润滑作用;又由于液压系统容易实现过载保护,因而有利于延长元件的使用寿命。

(8) 易于实现标准化、系列化和通用化,便于设计、制造和维修。

液压传动与其他传动形式相比,也存在着下面一些缺点。

(1) 由于存在泄漏及油的可压缩性,因而不能用于高精度的定比传动。

(2) 由于油的黏度随温度变化,影响传动系统的工作性能,因而不宜在高温或低温下工作。

(3) 能量损失较大,因而效率较低。

(4) 对油液的污染比较敏感,要求有良好的防护和过滤设施。

(5) 液压元件制造精度要求高,造价高。

(6) 故障诊断及排除比较困难,要求操作维修人员有较高的专业水平。

1.2.2 液压传动技术的发展概况

1795年英国人 Joseph Braman,在伦敦用水作为工作介质,以水压机的形式将其应用于工业上,诞生了世界上第一台水压机。1905年,人们将工作介质改为油,使水压机的性能进一步得到改善。

第一次世界大战后,液压传动广泛应用,特别是1920年以后,发展更为迅速。液压元件大约在19世纪末20世纪初的20年间,才开始进入正规的工业生产阶段。1925年, Vickers发明了压力平衡式叶片泵,为近代液压元件工业和液压传动的逐步建立奠定了基础。

第二次世界大战期间,在美国机床中有30%应用了液压传动。大规模的武器生产促进了机械制造工业标准化、模块化概念与技术的形成和发展。车辆、舰船、航空、兵器等采用了反应快、动作准、功率大的液压传动装置,推动了液压技术的发展。

第二次世界大战以后,液压技术迅速转向民用工业的各个领域。液压传动有许多突出的优点,因此它的应用非常广泛。例如,一般工业用的塑料加工机械、压力机械、机床等,行走机械中的工程机械、建筑机械、农业机械、汽车等,钢铁工业用的冶金机械、提升装置等,土木水利工程用的防洪闸门及堤坝装置、河床升降装置、桥梁操纵机构等,发电厂涡轮机调速装置、核发电厂等,船舶用的甲板起重机械(绞车)、船头门、舱壁阀、船尾推进器等,特殊技术用的巨型天线控制装置、测量浮标、升降旋转舞台等,军事工业用的火炮操纵装置、船舶减摇装置、飞行器仿真、飞机起落架的收放装置和方向舵控制装置等。

应该特别提及的是,近年来,科学技术不断迅速发展,各领域对液压传动提出了更高的要求。液压传动与电子技术结合在一起,广泛应用于智能机器人、海洋开发、宇宙航行、地震预测及各种电液伺服系统,使液压传动的应用提到了一个崭新的高度。

第2章 液压流体力学基础

流体力学的研究对象是流体，研究流体的宏观运动、平衡规律及流体与固体的相互作用。液压流体力学是流体力学的一个组成部分，是研究液体静止和运动时的力学规律，以及应用这些规律解决液压技术中工程计算等问题的学科。因此，液压流体力学是学习液压传动技术所必需的基础知识。

在分析液体的力学规律之前，应该对液体所具有的下列特性有所了解。

(1) 连续性：液体是一种连续介质，这样就可以把液体的运动参数看做时间和空间的连续函数，并有可能利用解析数学来描述它的运动规律。

(2) 不抗拉：由于液体分子与分子间的内聚力极小，几乎不能抵抗任何拉力而只能承受较大的压力，不能抵抗剪切变形而只能对变形速度呈现阻力。

(3) 易流性：不管作用的剪力怎样微小，液体总会发生连续的变形，这就是液体的易流性，它使得液体本身不能保持一定的形状，只能呈现所处容器的形状。

(4) 均质性：液体的密度是均匀的，物理特性是相同的。

2.1 液压传动的工作介质

2.1.1 液压传动工作介质的种类

工作介质是液压系统基本组成部分之一，它在液压系统中的主要作用是：① 传递能量；② 润滑；③ 将热量及污染物带走。

液压系统使用的工作介质种类较多，大体可分为石油基液压油、抗燃液压液和水（海水或淡水）三大类，其中石油基液压油最为常用。各种工作介质的性能特点与适用场合见表 2-1。

表 2-1 液压传动工作介质分类

类型	名称	组成	特性	适用场合
石油基 液压油	L-HH 液压油	无添加剂的石油基液压油	氧化稳定性、低温性能、防锈性较差	不重要的液压系统
	L-HL 普通液压油	HH + 抗氧化、抗腐、抗泡、抗磨、防锈等添加剂	良好的防锈性、抗氧化性、抗泡性和对橡胶密封件的适应性	高精密机床或要求较高的中、低压系统
	L-HR 高黏度指数液压油	HL + 增黏、油性等添加剂	良好的黏温特性及抗剪切安定性，黏度指数达 175 以上；较好的润滑性，可有效的防止低速爬行和低速不稳定现象	环境温度变化较大的低压系统，数控精密机床及高精度坐标镗床的液压系统
	L-HM 抗磨液压油	HL + 抗磨剂	良好的抗磨、润滑、抗氧化及防锈性	高压、高速工程机械和车辆液压系统
	L-HV 低凝液压油	HM + 增黏、降凝等添加剂	低温下有良好的启动性能，正常温度下有很好的工作性能，黏度指数在 130 以上；良好的抗剪切性能	低温地区的户外高压系统，环境温度变化较大的中、高压系统
	L-HG 液压-导轨油	HM + 油性剂	用于导轨润滑时具有良好的防爬性能	机床液压和导轨润滑合用的系统

(续表)

类型	名称	组成	特性	适用场合
抗燃液 压液	L—HF AE 水包油乳化液	水(90%~95%)+基础油(5%~10%)+乳化、防锈、助溶、防霉、抗泡等添加剂	微小油滴均匀分布在水中, 润滑性、黏温特性、低温性差; 良好的阻燃性和冷却性; 具有较高的饱和蒸汽压及 pH 值	对润滑性、黏温特性要求不高的低压系统, 如液压支架、水压机系统; 系统所用液压泵的转速不宜超过 1200 r/min
	L—HF B 油包水乳化液	水(40%)+基础油(60%)+乳化、抗磨、防锈、抗氧化、抗泡等添加剂	既具有石油基液压油的良好特性, 又具有抗燃性; 对金属材料 and 密封材料无特殊要求	对于抗燃性、润滑性、防锈性均有要求的液压系统; 使用温度不超过 65℃
	L—HF AS 高水基抗燃工作液	水(95%)+抗磨、防锈、抗腐、乳化、抗泡、增黏等添加剂(5%)	成本低; 特别良好的抗燃性; 良好的冷却性; 但黏温特性、润滑性差	对润滑性和黏温特性要求不高, 但是对抗燃性要求特别高的液压系统
	L—HF C 水-乙二醇液	水(35%~55%)+乙二醇+增稠、抗氧化、抗泡、防锈、抗磨、防腐等添加剂	良好的黏温特性, 黏度指数高(130~170); 良好的抗燃性; 凝点低(-50℃); 与大多数金属材料相适应	要求防火的中、低压系统, 以及在低温下使用的液压系统; 使用温度为-18℃~65℃
	L—HF DR 磷酸酯液	无水磷酸酯+增稠、抗氧化、抗泡、防锈、抗磨等添加剂	优良的抗燃性; 良好抗氧化性和润滑性; 可在高压下使用; 价格昂贵; 有毒性; 与多种密封材料(如丁腈橡胶、氯丁橡胶等)相容性差	抗燃性要求很高的中、高压系统; 使用温度范围可达-45℃~135℃; 与丁基胶、乙丙胶、氟橡胶、硅橡胶、聚四氟乙烯等均可相容
水	海水	海水	无可燃性; 优良的环保性; 润滑性、抗磨性、防锈性差; 需要专门材质(如海军黄铜、陶瓷等)的液压元件; 元件制造工艺要求高; 系统效率较低	海上钻井平台、潜艇、军舰、水下机器人等的液压系统
	淡水(纯水)	淡水、自来水	无可燃性; 优良的环保性; 润滑性、抗磨性、防锈性差; 需要专门材质(如海军黄铜、陶瓷等)的液压元件; 元件制造工艺要求高; 系统效率较低	对环保要求高的系统; 不允许有油液泄漏的液压设备(如食品机械、印刷机械、制药机械等)

2.1.2 液压油的主要物理性质

1. 密度

单位体积液体的质量称为液体的密度。体积为 V , 质量为 m 的液体的密度为

$$\rho = \frac{m}{V}$$

矿物油型液压油的密度随温度的上升而有所减小, 随压力的提高而稍有增大, 但变动值很小, 可以认为是常值。我国采用 20℃ 时的密度作为油液的标准密度。

2. 黏性

液体在外力作用下, 液层间作相对运动时产生内摩擦力的性质, 称为黏性。摩擦阻力是液体黏性的表现形式。黏性是液体固有的物理特性, 但是液体只有在流动(或有流动趋势)时才会呈现出黏性, 静止的液体是不呈现黏性的。

黏性是油液的基本属性, 对液压元件的性能和系统的工作特性有极大影响。黏性也是选择液压用油的重要依据。

(1) 牛顿内摩擦定律

如图 2-1 所示, 在两个平行平板 B 、 C 间充满油液。下平板 C 不动, 上平板 B 以速度 v 沿 x 轴正向运动, 贴近两个平板的液体必黏附在平板上。附着在上平板的油液以与平板相同的速度 v 运动, 附着在下平板的油液速度为零。显然, 两个平板间油层速度各不相同, 从上