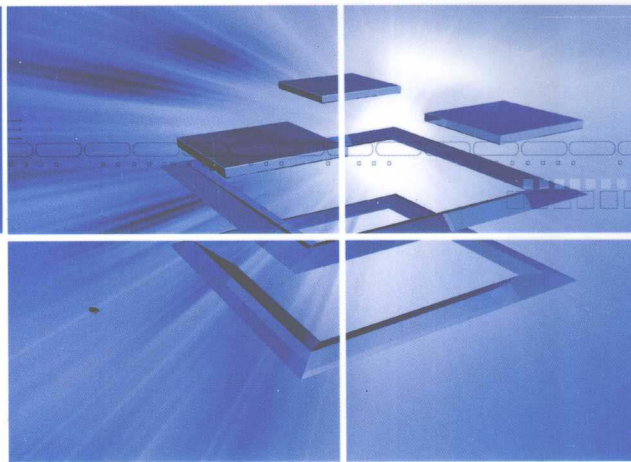




普通高等教育“十五”国家级规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



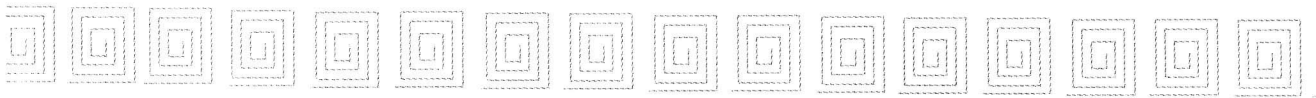
# 液压元件与系统

第3版

李壮云 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十五”国家级规划教材  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 液 压 元 件 与 系 统

第 3 版

主 编：李 壮 云  
副 主 编：贺 小 峰 万 会 雄  
主 审：何 存 兴 丁 凡



机 械 工 业 出 版 社

本书共分四篇二十一章，书中提供了各类液压元件、介质、辅件和系统的基本理论和基础知识，内容包括基本概念、理论分析、结构特点、设计方法、静动态特性及分析、使用与维护方法等；同时，也反映了该学科国内外的最新研究成果及发展趋势，体现了基础性、系统性、先进性和工程应用性等特点。

本书可作为我国高等学校机械工程及自动化专业、机械电子工程专业流体传动与控制方向以及其他相关专业的教材。本书也可供从事液压技术的工程技术从员、研究人员和高等工科院校有关师生学习和参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

液压元件与系统/李壮云主编. —3 版. —北京: 机械工业出版社, 2011. 6  
普通高等教育“十五”国家级规划教材  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-111-34233-5

I. ①液… II. ①李… III. ①液压元件—高等学校—教材②液压系统—高等学校—教材 IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 084457 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: 余 皞 责任编辑: 韩 冰 余 皞

责任校对: 刘怡丹 封面设计: 张 静

责任印制: 乔 宇

三河市国英印务有限公司印刷

2011 年 9 月第 3 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 30 印张 · 741 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-34233-5

定价: 56.00 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

网络服务

社 服 务 中 心 : (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 一 部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部: (010)88379649

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

# 第3版前言

根据教育部1998年正式颁布实施的《普通高等学校本科专业目录》，原来曾在国内几十所高校设置的“流体传动与控制”专业已不复存在。然而，国内从民用到军用的众多领域，每年对液压技术人才却大量急需。因此，很多高校仍将流体传动与控制列为一个专业方向，将其整合到机械工程及自动化或其他相关专业中。学生在低年级必修“液压与气压传动”课程，到高年级可选修“液压元件与系统”等专业课程，并完成相关教学实践环节的学习，毕业后即可从事流体传动与控制方面的技术工作。

在全国高校专业大调整后，我国流体传动与控制专业教学指导委员会一致认为，为了满足培养高水平液压技术人才的需要，完全有必要编写一本理论性、系统性及工程实用性较强的液压元件与系统教材。这一观点同样得到了全国机械工程及自动化专业指导委员会的赞同与支持，并且由教育部批准，将《液压元件与系统》列为“十一五”期间国家级重点规划教材，由机械工业出版社出版发行。

《液压元件与系统》第1版于1999年出版。当时考虑到学生已学过“液压与气压传动”课程，并具备了一定的理论基础，所以该教材主要从元件和系统的共性出发，重点分析各类液压元件和系统的主要性能和基本规律。出版后，读者反映该教材系统性及理论性不够强，自学比较困难。

于2005年出版的《液压元件与系统》第2版，是在综合考虑了第1版教材所存在问题的基础上编写的。全书形成了独立的体系，对各类液压元件、辅件和系统进行了较深入的分析，理论性和系统性较强，出版后受到了读者的认可。但有的读者认为，该教材对相关技术领域的最新发展，分析和介绍得还不够全面。

为了满足教学及液压技术人员深入学习的需要，我们在总结多年的教学心得，综合国内外同行的宝贵意见，以及回顾液压技术最新发展的基础上，对本书内容进行了更新和调整，主要包括：

(1) 重新编写了第一篇“液压泵、液压马达和液压缸”全部内容，着重从运动学、动力学及摩擦学的角度，对各类液压泵、液压马达和液压缸进行了较为系统和深入的分析。

(2) 介绍了有关水液压传动技术的一些基础知识。

(3) 采用了最新的国家标准及国际标准。

(4) 将原书第八章中关于水压控制阀部分分离出来单独作为第十四章，并增加了一些相关内容。

(5) 将原书第二十章与第二十一章合并为第二十一章。

(6) 修订和更新了第三篇“液压传动系统”中的部分内容。

(7) 增加了常用单位换算表及常用液压与气动元件图形符号作为附录，便于读者参考。

本书可作为我国高等学校机械工程及自动化专业流体传动与控制方向的本科生、研究生以及机械电子工程等其他相关专业的教材。虽然全书内容较多，覆盖面较广，但各章内容基

本上是相互独立的，因此，在教学过程中可择需选用。

本书也可供从事液压技术的工程技术人员、研究人员和高等学校有关师生学习和参考。本书的系统性、理论性及工程实用性较强，内容通俗易懂，便于自学。

本书由华中科技大学李壮云主编，华中科技大学贺小峰及武汉理工大学万会雄为副主编。全书编写分工如下：李壮云编写第一章、第一篇及第四篇，贺小峰编写第二篇，万会雄编写第三篇。

华中科技大学何存兴教授和浙江大学丁凡教授为本书主审。主审对本书原稿进行了细致、详尽的审阅，提出了许多宝贵意见，特此向他们表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，加之液压技术的不断发展，书中难免存在错误、疏漏和不足之处，敬请广大读者指正。

编 者

## 第 2 版前言

本书是根据全国高等学校机械工程及自动化专业指导委员会推荐，由教育部批准列为“十五”国家级重点教材出版规划而编写的；同时，本书也被批准列为我国面向 21 世纪的机械类专业教材。

由于液压技术本身所具有的独特技术优势，使得它在现代农业、制造业、能源工程、化学与生化工程、交通运输与物流工程、采矿与冶金工程、油气探测与加工、建筑与公共工程、水利与环保工程、航天与海洋技术、船舶与舰艇、生物与医学工程、科学实验装置、军事装备、国防工程等领域获得了广泛应用，成为农业、工业、国防和科学技术现代化进程中不可替代的一项重要基础技术，也是当代工程师希望掌握的重要基础技术知识之一。在当前科学技术全球化的环境下，特别是在我国加入 WTO 以后，培养高水平的液压技术人才，发展具有我国自主知识产权的液压技术，迅速改变我国液压基础件落后于主机设备发展需要的现状，使其能早日满足我国制造业向强国发展的迫切需求和适应对环境保护的挑战，对学科和行业都是十分紧迫和现实的历史使命。

基于上述原因，我们在认真总结和分析了《液压元件与系统》（第 1 版）一书在使用过程中所存在问题的基础上，将本书定位于为读者提供各类液压元件、介质、辅件和系统的有关基本理论和基础知识，内容包括基本概念、理论分析、结构特点、设计方法、静动态特性及分析、使用与维护方法等；同时也注意反映该学科国内外的最新研究成果及发展趋势，尽可能地体现液压技术的基础性、系统性、先进性和工程应用性等特点。

本书的重点是液压元件及传动技术，书中尽管也涉及到与电液比例技术相关的部分电液控制技术，但基本不涉及以闭环控制为主的电液伺服器件及系统。

本书可作为我国高等学校机械工程及其自动化专业、机械电子工程专业流体传动与控制方向以及其他相关专业本科生及研究生的教材。在教学过程中，可以针对不同专业的要求和特点，有所侧重地加以选用。书中还编入了一些思考题及习题，有利于学生复习巩固所学的基础知识，提高学生分析问题和解决问题的能力。

本书也可供从事液压技术的工程技术人员、研究人员和高等工科院校有关师生学习和参考，以满足他们从事液压技术的工程应用、设计、制造、试验和维护时的需要。

本书由华中科技大学李壮云任主编，武汉理工大学万会雄、华中科技大学贺小峰和聂松林任副主编。全书编写分工如下：李壮云编写第一章及第四篇；聂松林编写第一篇；贺小峰编写第二篇；万会雄编写第三篇。廖义德、徐兴斋、刘永健等参加了部分编写工作。全书由李壮云和万会雄统稿。

浙江大学吴根茂教授为本书主审。吴根茂教授对本书原稿进行了细致、详尽的审阅，提出了许多宝贵意见。在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限以及液压技术发展迅速，书中难免存在错误、疏漏和不足之处，恳请广大读者指正。

编者

# 第1版前言

本书是根据全国流体传动及控制专业教学指导委员会推荐，由国家教委批准列为我国高等教育“九五”国家级重点教材出版规划而编写的。本书系我国高校机械工程及自动化专业流体传动与控制专业方向的专业教材，同时也可供从事液压元件和液压系统的工程技术人员、研究人员和高等院校有关专业师生学习和参考。

本书包括液压元件和液压系统两大部分。根据教学改革的需要，并且基于编者多年的教学和科研实践，在本书的体系和内容安排上，着重考虑了下列几点：

1) 打破原有教材按液压元件和液压系统基本回路分章节的传统体系，改为从元件和系统的共性出发，应用理论力学、流体力学和控制理论等基础知识去分析各大类液压元件和液压系统的基本规律和主要性能，形成新的体系。

2) 着重叙述基本理论、控制机理和静动态特性，力求为学生打下坚实的基础。但对结构和设计也作了适当介绍。

3) 突出不同类型元件和系统的主要特征、特性及其分析方法，以利于提高学生分析问题和解决问题的能力。每章附有思考题和习题，便于学生复习巩固及培养学生设计、计算能力。

4) 为了扩充学生的专业基础知识，增加了液压介质、污染控制、液压可靠性和失效分析等方面的内容，供教学时选用。

5) 选材注意贯彻“少而精”的原则，并注意尽量反映国内外有关液压技术的最新发展状况。

6) 内容的阐述注意循序渐进，注意启发性，便于自学。

本书由华中理工大学李壮云、浙江大学葛宜远主编，华中理工大学陈尧明副主编，燕山大学韩屋谷参编。全书编写分工如下：李壮云编写第一、二、十二及十三章；陈尧明编写第三、四及十一章；葛宜远编写第五至第七章；燕山大学韩屋谷编写第八至第十章。

太原重型机械学院王明智为本书主审。主审对本书原稿进行了细致的审阅，提出了许多宝贵的意见。

由于编者水平所限，书中难免存在缺点和疏误，恳请广大读者批评指正。

编者

# 目 录

## 第3版前言

## 第2版前言

## 第1版前言

第一章 绪论 .....	1
第一节 液压传动的工作原理和基本特征 .....	1
第二节 液压传动系统的组成及图形符号 .....	3
第三节 液压传动的特点和应用领域 .....	4

第四节 液压技术发展历史的回顾及 在我国的发展趋势 .....	6
思考题和习题 .....	9

## 第一篇 液压泵、液压马达和液压缸

第二章 概述 .....	10
第一节 液压泵和液压马达的分类 .....	10
第二节 液压泵和液压马达的主要性能 参数 .....	11
第三节 限制液压泵（或液压马达）工作 压力和转速的因素 .....	15
第四节 摩擦副的摩擦学特性及设计方法 .....	17
思考题和习题 .....	23
第三章 齿轮泵及螺杆泵 .....	25
第一节 外啮合齿轮泵的流量及流量脉动 .....	25
第二节 外啮合齿轮泵的困油 现象及卸荷措施 .....	29
第三节 外啮合齿轮泵高压化需要解决的 主要问题 .....	31
第四节 外啮合齿轮泵的设计要点 .....	39
第五节 内啮合齿轮泵 .....	41
第六节 螺杆泵 .....	44
思考题和习题 .....	45
第四章 叶片泵 .....	47
第一节 双作用叶片泵的工作 原理和工作特点 .....	47
第二节 双作用叶片泵的排量、流量计算 .....	48
第三节 双作用叶片泵的定子曲线 .....	50

第四节 高压双作用叶片泵的结构特点 .....	56
第五节 双作用叶片泵主要结构参数的 确定 .....	60
第六节 变量叶片泵 .....	63
思考题和习题 .....	66
第五章 轴向柱塞泵 .....	68
第一节 轴向柱塞泵的工作原理及结构 特点 .....	68
第二节 斜盘式轴向柱塞泵的运动 学分析及流量计算 .....	73
第三节 斜盘式轴向柱塞泵的摩擦副之一 ——柱塞和缸体孔 .....	78
第四节 斜盘式轴向柱塞泵的摩擦副之二 ——滑靴和斜盘 .....	81
第五节 轴向柱塞泵最关键的摩擦副 ——配流盘和缸体配流端面 .....	85
第六节 无铰型斜轴式轴向柱塞泵 .....	95
第七节 轴向柱塞泵的变量调节机构 .....	100
第八节 柱塞式水液压泵 .....	106
思考题和习题 .....	109
第六章 液压马达 .....	111
第一节 高速液压马达 .....	111
第二节 曲轴连杆式径向柱塞液压马达 .....	115



第三节 静力平衡式液压马达 .....	120	第一节 液压缸的分类及安装方式 .....	133
第四节 多作用内曲线径向柱塞式液压 马达 .....	124	第二节 液压缸的设计计算 .....	135
第五节 其他低速大转矩液压马达 .....	129	第三节 液压缸主要零部件结构分析 .....	139
思考题和习题 .....	132	第四节 几种特殊液压缸 .....	141
第七节 其他低速大转矩液压马达 .....	129	思考题和习题 .....	145
第七节 思考题和习题 .....	132		
第七章 液压缸 .....	133		

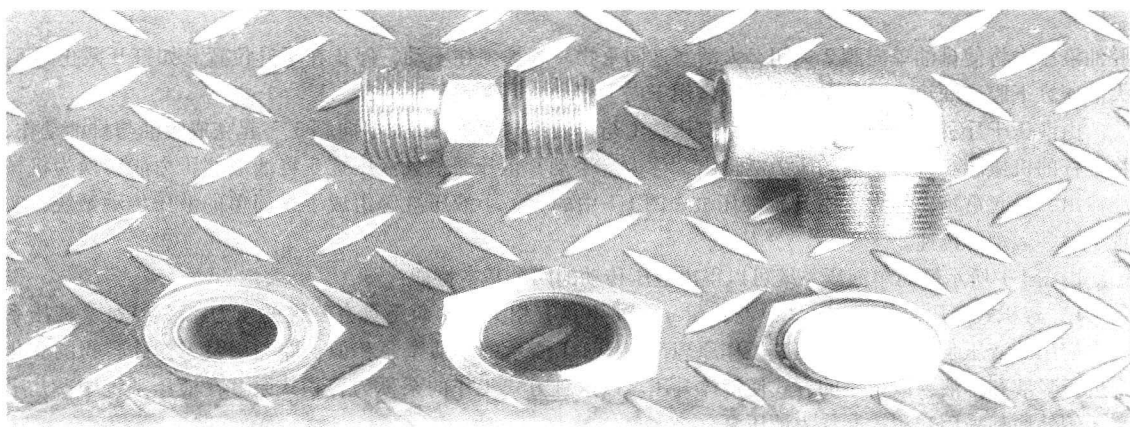
## 第二篇 液压控制阀

第八章 液压控制阀概述 .....	147	第一节 单向阀 .....	216
第一节 液压控制阀的分类 .....	147	第二节 换向阀 .....	219
第二节 液压阀上的作用力 .....	149	第三节 多路换向阀 .....	230
第三节 阀口压力流量特性 .....	154	第四节 其他类型的方向控制阀 .....	231
第四节 液压阀的级间耦合 .....	156	思考题和习题 .....	235
第五节 液压阀的控制输入装置 .....	157	第十二章 插装阀 .....	236
第六节 液压控制阀的噪声 .....	164	第一节 二通插装阀控制技术的发展 及其技术特点 .....	236
第七节 液压控制阀的材料及工艺要求 .....	166	第二节 盖板式二通插装阀的结构 和工作原理 .....	237
思考题和习题 .....	168	第三节 盖板式二通插装阀的控制组件 .....	242
第九章 压力控制阀 .....	169	第四节 螺纹插装阀 .....	248
第一节 溢流阀 .....	169	思考题和习题 .....	254
第二节 减压阀 .....	185	第十三章 电液比例阀 .....	255
第三节 顺序阀 .....	190	第一节 概述 .....	255
第四节 平衡阀 .....	192	第二节 电液比例压力阀 .....	258
第五节 压力继电器 .....	193	第三节 电液比例流量阀 .....	265
思考题和习题 .....	195	第四节 电液比例方向阀 .....	269
第十章 流量控制阀 .....	196	第五节 高性能电液比例方向阀 .....	273
第一节 节流口概述 .....	196	思考题和习题 .....	275
第二节 节流阀 .....	198	第十四章 水压控制阀 .....	276
第三节 调速阀 .....	202	第一节 水压控制阀的关键技术难题 .....	276
第四节 温度补偿调速阀 .....	211	第二节 几种水压控制阀的结构及特点 .....	277
第五节 溢流节流阀 .....	212	思考题和习题 .....	280
第六节 分流集流阀 .....	213		
思考题和习题 .....	215		
第十一章 方向控制阀 .....	216		

## 第三篇 液压传动系统

第十五章 液压传动系统的分类 与基本回路 .....	281	第十六章 液压传动系统的性能分析 .....	307
第一节 液压传动系统的分类 .....	281	第一节 节流调速回路性能分析 .....	307
第二节 液压传动系统的基本回路 .....	285	第二节 容积调速回路性能分析 .....	317
思考题和习题 .....	305	第三节 压力、流量及功率适应回路 .....	325
		第四节 蓄能器回路动态特性分析 .....	328
		第五节 液压系统振动、噪声和爬行 .....	

分析 .....	332	思考题和习题 .....	354
思考题和习题 .....	336	<b>第十八章 液压系统设计</b> .....	357
<b>第十七章 典型液压系统分析</b> .....	339	第一节 明确设计要求和进行工况分析 .....	357
第一节 M1432A 型万能外圆磨床		第二节 确定液压系统的主要参数 .....	359
液压系统分析 .....	339	第三节 拟定液压系统原理图 .....	361
第二节 液压机液压系统分析 .....	342	第四节 液压元件的计算和选择 .....	362
第三节 挖掘机液压系统分析 .....	345	第五节 液压系统性能验算 .....	364
第四节 液压起货机液压系统分析 .....	347	第六节 液压装置的结构设计 .....	366
第五节 机械手液压系统分析 .....	349	第七节 绘制工作图和编写技术文件 .....	369
第六节 导弹发射勤务塔架液压系统		第八节 液压系统设计计算举例 .....	369
分析 .....	352	思考题和习题 .....	373
		<b>第四篇 液压系统工作介质、污染控制及液压辅件</b>	
<b>第十九章 液压系统工作介质</b> .....	376	第三节 过滤原理、过滤器结构	
第一节 液压系统对工作介质的		及其性能参数 .....	405
主要性能要求 .....	376	第四节 过滤系统的设计 .....	409
第二节 工作介质的主要理化性能 .....	378	第五节 液压系统污染控制与管理 .....	414
第三节 工作介质的分类 .....	384	思考题和习题 .....	417
第四节 液压油(液)的主要品种		<b>第二十一章 液压辅件</b> .....	418
及技术性能 .....	385	第一节 液压密封装置 .....	418
第五节 液压油(液)的选用 .....	388	第二节 蓄能器 .....	433
第六节 液压油(液)的合理使用		第三节 油箱 .....	441
和维护 .....	391	第四节 冷却器 .....	446
第七节 水液压传动的优越性及使		第五节 液压管路及接头 .....	450
用要点 .....	395	思考题和习题 .....	455
思考题和习题 .....	397	<b>附录</b> .....	457
<b>第二十章 工作介质的污染控制</b>		附录 A 单位换算表 .....	457
<b>与管理</b> .....	398	附录 B 常用液压与气动元件图形符号 .....	460
第一节 污染物的种类、来源及危害 .....	398	<b>参考文献</b> .....	466
第二节 油液污染度等级及其测定 .....	400		



# 第一章 绪 论

液压传动是以液体作为工作介质，进行能量转换、传递和控制的一种传动方式。

因为液压传动所具有的独特优越性，使其得到了十分广泛的应用，现已成为工业、农业、国防和科学技术现代化进程中不可替代的一项重要的基础技术。

随着微电子技术、传感检测技术、计算机技术及自动控制理论的发展，极大地推动了液压传动技术的迅速发展，使它成为包括传动、控制及检测在内的一门新型技术学科，具有显著的机、电、液一体化特征，其应用和发展水平被普遍认为是衡量一个国家现代工业发展水平的重要标志。

## 第一节 液压传动的工作原理和基本特征

一部机器通常由三部分组成，即原动机→传动装置→工作机。原动机的作用是把各种形态的能量转变为机械能，是机器的动力源；工作机的作用是利用机械能对外做功；传动装置设在原动机和工作机之间，起传递动力和进行控制的作用。传动装置的类型有多种，按照其所采用的机件或工作介质的不同，主要可分为机械传动、电力传动、气压传动和液体传动等。

以液体作为工作介质进行能量传递的传动称为液体传动。根据工作原理的不同，液体传动又可分为液压传动和液力传动。前者基于帕斯卡原理，主要利用液体的压力能来传递动力；后者基于欧拉方程，利用叶轮使工作腔中液流动量矩发生变化来传递动力，其输入轴与输出轴的连接是非刚性的。液力传动具有良好的自适应性，主要用于工作机的调速，本教材对此内容不作介绍。

液压传动是利用液体静压传动原理来实现的。现以图 1-1 所示的液压千斤顶为例来说明液压传动的工作原理和基本特征。

如图 1-1 所示，当向上抬起杠杆 7 时，小液压缸 1 中的小活塞向上运动，小液压缸下腔容积增大形成局部真空，排油单向阀 2 关闭，油箱 4 中的油液在大气压作用下经吸油管顶开吸油单向阀 3 进入小液压缸的下腔。当向下压杠杆 7 时，小液压缸 1 下腔容积减小，油液受挤压，压力升高，关闭吸油单向阀 3，顶开排油单向阀 2，油液经排油管进入大液压缸 6 的下腔，推动大活塞上移，顶起重物做功。如此不断地上下扳动杠杆 7，则不断有油液进入大液压缸下腔，使重物逐渐举升。如杠杆停止动作，大液压缸下

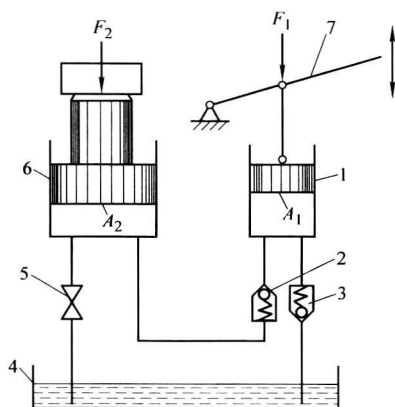


图 1-1 液压千斤顶工作原理图

- 1—小液压缸 2—排油单向阀
- 3—吸油单向阀 4—油箱 5—截止阀
- 6—大液压缸 7—杠杆

腔油液压力将使排油单向阀 2 关闭, 大活塞连同重物一起被锁住不动, 停止在举升位置。如打开截止阀 5, 大液压缸下腔通油箱, 大活塞将在自重作用下向下移动, 恢复到原始位置。

由液压千斤顶的工作原理可知, 小液压缸 1 与排油单向阀 2、吸油单向阀 3 一起完成吸油与排油动作, 将杠杆的机械能转换为油液的压力能输出, 称为(手动)液压泵。大液压缸 6 将油液的压力能转换为机械能输出, 抬起重物, 称为(举升)液压缸。图 1-1 中的大、小液压缸等组成了最简单的液压传动系统, 实现了力和运动的传递。

由图 1-1 所示的简单液压系统可以得出液压传动的四个基本特征:

1) 容积式液压泵的工作压力  $p$  与流量  $q$  之间不具有相关性, 而是具有刚性的压力-流量特征。液压系统中使用的液压泵种类繁多, 但其工作原理都与图 1-1 所示的单活塞泵相似, 即利用泵工作腔容积的变化来进行吸液和排液, 以挤压的方式使液体升压。以这种方式工作的泵称为容积式泵。在液压系统中, 几乎毫无例外地都采用容积式泵作为液压泵。

容积式泵的特点表现在其压力-流量特性上。泵的流量是指单位时间内泵排出的液体体积, 以  $q$  表示。从图 1-1 所示的单活塞泵的工作过程可以看出, 容积式泵的流量取决于泵腔内工作容积的大小(即小液压缸活塞的横截面积  $A_1$  和其位移  $s$  的乘积)和泵的工作速度(即小液压缸活塞在单位时间内的往复次数), 而与泵的工作压力基本无关。也就是说, 容积式泵的流量  $q$  与工作压力  $p$  在理论上不具有相关性, 而是具有刚性的压力-流量特性, 如图 1-2 中曲线  $a$  所示。实际上, 由于泄漏等原因, 随着工作压力的升高, 泵的流量将略有降低, 如图 1-2 中曲线  $b$  所示。因此, 从理论上讲, 容积式泵能在任何高压下输出基本固定不变的流量, 保证执行机构能够平稳地工作, 这就是液压系统中均采用容积式泵的原因。

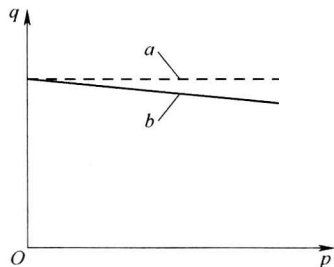


图 1-2 容积式泵的压力-流量特性

2) 容积式液压泵的工作压力主要取决于负载。在图 1-1 所示的液压系统中, 如果忽略管路中的流动阻力, 就可以认为其中的传递符合帕斯卡原理, 即整个液体的连续空间内部具有相同的压力  $p$ 。那么, 这时作用在大、小液压缸活塞上的压力均等于  $p$ , 即

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

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

式中  $A_1$ 、 $A_2$ ——小液压缸活塞和大液压缸活塞的作用面积;

$F_1$ ——作用在小液压缸活塞上的力;

$F_2$ ——作用在大液压缸活塞上的力。

由式(1-2)可以看出, 当  $A_1$ 、 $A_2$  一定时, 负载力  $F_2$  越大, 则液压泵的工作压力  $p$  越大。即液压泵的工作压力取决于负载(实际上, 负载包括外负载力和液体阻力), 而与其流量无关。

尽管出于安全方面的考虑, 液压系统的工作压力应有一定限制, 不允许任意提高, 但只要增大液压缸的工作面积  $A_2$ (或增大作旋转运动的液压马达的排量), 理论上就可以得到任意大小的输出力(或力矩)。正是基于这种液体静压传动原理, 因此很容易制造出工业上广泛需要的大型液压设备。

3) 液压缸(或液压马达)的运动速度主要取决于输入的流量, 与负载无关。如果不考虑液体的可压缩性、泄漏和管路变形等因素, 根据液体运动的连续性原理, 图 1-1 中的小液压缸活塞向下移动所压缩的容积, 应等于大液压缸活塞向上移动所扩大的容积。即

$$A_1 s_1 = A_2 s_2$$

上式两边同除以运动时间  $t$ , 得

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = q \quad (1-3)$$

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

式中  $s_1$ 、 $s_2$ ——小液压缸活塞、大液压缸活塞的位移;

$v_1$ 、 $v_2$ ——小液压缸活塞、大液压缸活塞的平均运动速度；

$q$ ——液压泵输出的平均流量，即输入液压缸的流量。

由式(1-4)可以看出，在液压缸横截面面积一定的情况下，大液压缸活塞的运动速度  $v_2$  与输入的流量  $q$  成正比，与活塞横截面面积  $A_2$  成反比，而与负载无关。只要不断调节输入液压缸的流量，就可以连续地改变活塞及其负载的运动速度，从而实现无级调速。

4) 液压功率等于压力和流量的乘积。功率是指单位时间内所做的功。所以，液压泵活塞的输出功率  $P_1$  应为

$$P_1 = F_1 \frac{s_1}{t} = F_1 v_1 = p A_1 v_1 = p q \quad (1-5)$$

液压缸活塞的输入功率  $P_2$  为

$$P_2 = F_2 \frac{s_2}{t} = F_2 v_2 = p A_2 v_2 = p q \quad (1-6)$$

式中，若取压力  $p$  的单位为 Pa ( $\text{N}/\text{m}^2$ ，帕)，流量  $q$  的单位为  $\text{m}^3/\text{s}$ ，则功率  $P$  的单位为 W ( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{s}$ ，瓦)。

由式(1-5)、式(1-6)可以看出，在不计损失的情况下，液压缸的输入功率等于液压泵的输出功率。实际上，由于粘性阻力的存在，液压缸的输入功率要加上泵与缸之间的功率损失，才等于泵的输出功率。

由上述的讨论可以看出，与外负载相对应的流体参数为工作压力  $p$ ；与运动速度相对应的流体参数为流量  $q$ 。工作压力  $p$  与流量  $q$  的乘积等于功率，称为液压功率，这与机械功率用力与速度的乘积表示、电动功率用电压与电流的乘积表示完全相似。

## 第二节 液压传动系统的组成及图形符号

### 一、液压传动系统的组成

工程实际中的液压传动系统，在液压泵和液压执行元件（液压缸或液压马达）之间，还应设置若干用来控制执行元件运动方向、运动速度和最大作用力的装置以及其他一些辅件，下面以图 1-3 所示的磨床工作台液压系统为例，说明其组成。

液压泵 3 由电动机驱动旋转，从油箱 1 经过滤器 2 吸油。当换向阀 5 的阀芯处于图示位置时，压力油经流量控制阀 4、换向阀 5 和管道 9 进入液压缸 7 的左腔，推动活塞向右运动。液压缸 7 右腔的油液经管道 6、换向阀 5 和管道 10 流回油箱。当换向阀 5 的阀芯处于左端工作位置时，液压缸活塞反向运动。

改变流量控制阀 4 的开口，可以改变进入液压缸的流量，从而控制液压缸活塞的运动速度。液压泵排出的多余油液经溢流阀 11 和管道 12 流回油箱。液压缸 7 的工作压力取决于负载，液压泵 3 的最大工作压力由溢流阀 11 调定，其调定值应为液压缸 7 的最大工作压力及系统中油液流经阀和管道的压力损失的总和。因此，系统的工作压力不会超过溢流阀的调定值，溢流阀对系统起着过载保护作用。

由上述例子可以看出，一个完整的液压系统应包含以下五个基本组成部分：

(1) 液动力元件 将原动机（常用的人力机构、电动机和内燃机等）所提供的机械能转变为工作介质压力能的机械装置，通常称为液压泵。

(2) 液压执行元件 液压执行元件是指将液压泵所提供的液压能转变为机械能的装置，其作用是在工作介质的作用下输出力和速度（或转矩和转速），以驱动工作机构对外做功。作直线往复运动的执行元件称为液压缸，作连续旋转运动的执行元件称为液压马达。

(3) 液压控制元件 对液压系统中工作介质的压力、流量和流动方向进行调节控制的机械装置，通常称为液压阀或液压控制阀，如压力控制阀、流量控制阀、方向控制阀等。

(4) 液压辅助元件 液压辅助元件是指为保证液压系统正常工作所需的上述三类元件以外的装置，在系统中起输送、储存、加热、冷却、过滤和测量等作用。它包括油箱、管道、管接头、密封元件、过滤器、蓄能器、冷却器、加热器以及各种液体参数的监测仪表等。它们的功能是多方面的，各不相同。

(5) 工作介质 工作介质是液压系统中进行能量和信号传递的工作液体。它是液压系统中十分重要的组成部分，它的特性对液压设备的性能和寿命有决定性的影响。

以上五个部分将在后续章节中分别进行深入介绍。

## 二、液压系统的图形符号表示

图 1-3 所示的磨床工作台液压系统是一种半结构式的工作原理图，其直观性强，容易理解，但绘制起来比较繁琐。为了简化液压系统的表示方法，通常采用图形符号来绘制液压系统原理图。元件的图形符号脱离了元件本身的具体结构，只表示其职能、操作（控制）方法及外部连接。用图形符号绘制的液压系统图表明组成系统的元件、元件间的相互关系及整个系统的工作原理，并不表示其实际安装位置及管道布置，具有简单明了、绘制方便等优点。我国已制订了有关液压与气动图形符号的标准（GB/T 786.1—2009），图 1-4 所示即为按 GB/T 786.1—2009 绘制的图 1-3 所示的磨床工作台液压系统原理图。

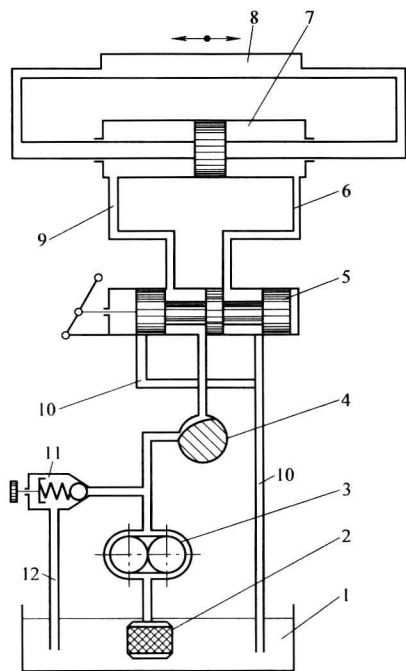


图 1-3 磨床工作台液压系统  
工作原理结构示意图

- 1—油箱 2—过滤器 3—液泵  
4—流量控制阀 5—换向阀  
6、9、10、12—管道 7—液压缸  
8—工作台 11—溢流阀

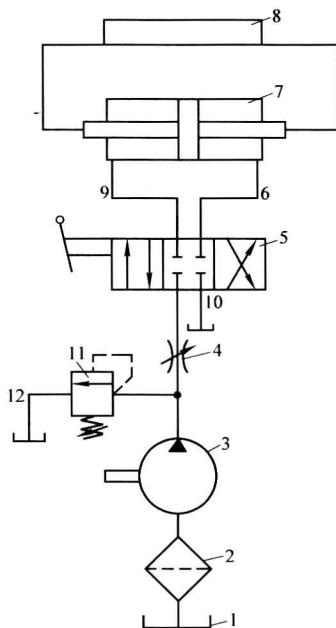


图 1-4 磨床工作台液压系统原理图

- 1—油箱 2—过滤器 3—液泵  
4—流量控制阀 5—换向阀  
6、9、10、12—管道 7—液压缸  
8—工作台 11—溢流阀

## 第三节 液压传动的特点和应用领域

### 一、多种传动方式的比较

传递动力主要有三种基本方式：机械传动、电力传动及流体动力传动（含气压传动和液压传动）。为了能正确地选择传动方式，首先要了解和对比每种传动方式的基本特点。

机械传动是通过齿轮、齿条、带、链等机件传递动力和进行控制的。其优点是传动准确可靠，制造容易，操作简单，维护方便和传动效率高等。其缺点是—般不能进行无级调速，远距离传动较困难，结构比较复杂等。

电力传动是利用电力设备并调节电参数来传递动力和进行控制的。其主要优点是能量传递方便，信号传递迅速，标准化程度高，易于实现自动化等。其缺点是运动平稳性差，易受外界负载的影响，惯性大，起动及换向慢，成本较高，受温度、湿度、振动、腐蚀等环境因素影响较大。为了改善其传动性能，有些

场合往往与机械、气压或液压传动结合使用。

气压传动是用压缩空气作为工作介质进行能量传递和控制的。其优点是结构简单，成本低，易于实现无级调速，阻力损失小，防火、防爆，对工作环境适应性好。其缺点是空气易压缩，负载对传动特性的影响较大，工作压力低，只适用于小功率传动。

与上述传动方式相比，液压传动具有其独特的优越性。表 1-1 列举了各种传动方式的几种主要传动特性的比较。

表 1-1 各种传动方式的主要传动特性比较

性能比较 传动方式	传动特性 功率与质量比	转矩与转动 惯量比	响应速度	可控性	负载刚度	调速范围
机械传动	小	小	低	差	中等	小
电力传动	小	小	中等	中等	差	中等
机电传动	小	小	中等	中等、好	差	中等、大
气压传动	中等	中等	低	中等	差	小
液压传动	大	大	高	好	大	大

## 二、液压传动的优点

1) 功率-质量比及力-质量比大，控制灵活，响应速度快。相同功率的液压泵或液压马达的功率-质量比要比电机的大十倍，而外形尺寸只有电机的 12% 左右。例如，一般发电机和电动机的功率-质量比约为 165W/kg，而液压泵和液压马达可达 1650W/kg，在航空、航天领域应用的液压马达可达 6600W/kg。由于液压传动的体积小、质量轻，因而惯性小，起动、制动迅速。例如，起动一个中等功率的电动机需要 1s 或更长一些时间，而起动同等功率的液压马达只需 0.1s 左右。所以，利用液压传动易于实现平稳的起、停、变速或换向。

液压缸单位面积的输出力及力-质量比分别可达  $700 \sim 3000\text{N/cm}^2$  及  $13000\text{N/kg}$ ，而对于直流直线式电动机则分别为  $30\text{N/cm}^2$  及  $130\text{N/kg}$ ，两者相差近百倍。一般液压马达的转矩-转动惯量比是同容量电动机的 10~20 倍。转矩-转动惯量大，就意味着液压系统能产生大的加速度，也就是说时间常数小，响应速度快，具有良好的动态品质。

2) 速度调节容易，而且能方便地实现无级调速，调速范围大，低速性能好。液压传动可以在比较大的调速范围内实现无级调速，调速比可达  $100:1 \sim 2000:1$ 。多作用内曲线液压马达可在  $0.5 \sim 1\text{r/min}$  的转速下平稳运转，单作用静力平衡液压马达的最低稳定转速可小于  $5\text{r/min}$ 。采用电力传动虽可实现无级调速，但调速范围小得多，且低速时不稳定。

3) 操纵省力，控制方便，易于实现自动化或遥控。液压传动本身的调节、控制比较简单，操纵方便、省力。特别是电液联合应用时，很容易实现复杂的程序动作和远程控制。

4) 利用溢流阀很容易实现过载保护，工作安全可靠。

5) 由于工作介质的润滑和吸振作用，使液压传动工作平稳，使用寿命长。

6) 液压元件容易实现通用化、标准化和系列化，便于设计、制造和推广使用。

7) 液压传动的各类元件可以根据主机需要灵活布置。液压传动是通过管路中的油液来传递动力的，因此可以把液压马达或液压缸安置在远离原动机的任意位置，而不需要中间的机械传动环节。如果液压马达或液压缸在工作时的位置会发生变动，则只需采用挠性管道连接就可保证其正常工作，这是机械传动难以实现的。

## 三、液压传动的缺点

液压传动虽然具有许多突出优点，但也存在以下缺点：

1) 液压传动以液体作为工作介质，在液压元件中相对运动的摩擦副间无法避免泄漏，再加上液体的可压缩性及管路弹性变形等原因，难以实现严格的传动比。油液泄漏将造成环境污染、资源浪费，油液燃烧

可能导致重大事故。

2) 液体粘度和温度有密切关系,当粘度随温度变化时,将直接影响泄漏、压力损失及通过节流元件的流量等,从而引起执行元件运动特性的变化。液压油液的性能及使用寿命均受温度影响很大,所以,液压系统不宜在很高或很低的温度下工作。

3) 传动效率较低。液压系统中的能量要经过两次转换,在能量转换及传递过程中存在机械摩擦损失、压力损失及泄漏损失。加之对液压系统能量利用不尽合理等原因,使液压传动的效率偏低。

4) 液压传动的工作可靠性目前还不如电力传动和机械传动。其主要原因是工作中液压元件的摩擦副承受很大的比压和相对运动速度,很容易导致磨损失效。特别是当工作介质污染严重时,更会加剧磨损,甚至堵塞控制通道,导致失效,使使用寿命和可靠性降低。

5) 液压元件的制造精度要求高,造价较贵,使用、维护要求有一定的专业知识和较高的技术水平。

6) 液压能的获得与传递不如电能方便。由于压力损失等原因,液压能不宜远距离输送。

7) 液压系统中各种元件、辅件及工作介质均在封闭的系统内工作,其故障征兆难以及时发现,故障原因较难确定。

#### 四、液压传动的主要应用领域

总的来说,液压传动的优点很多,但其缺点也不容忽视。为了提高其竞争力,液压技术一直在不断地发展和进步,借助于现代科技的支持及相关学科的最新成果,其缺点正逐步被克服,性能正不断提高,应用领域也在不断扩大。当前广泛应用液压技术的领域主要包括以下五个方面:

1) 工业机械。液压技术可应用于锻压机械、注塑机、挤压机、冶金机械、矿山机械、包装机械、机床、加工中心、机器人、试验机以及其他生产设备等,一般称为工业液压技术。

2) 行走机械。液压技术可应用于工程机械、建筑机械、农业机械、汽车以及其他可移动设备等,一般称为行走机械液压技术。

3) 航空及航天。液压技术可应用于飞机、宇宙飞船、导弹液压舵机、火箭姿态控制及卫星发射装置等,一般称为航空航天液压技术。

4) 舰艇(艇)。液压技术可应用于船舶、舰艇中的舵机、甲板机械、操作系统、控制系统、海水淡化及水雾灭火系统等,一般称为船舶液压技术。

5) 海洋开发工程。液压技术可应用于海洋钻探平台、海底工作机械、海洋开发机械及水下作业工具等,一般称为海洋工程液压技术。

## 第四节 液压技术发展历史的回顾及在我国的发展趋势

### 一、液压技术发展历史的回顾

液压技术的发展是与流体力学、材料学、机构学、机械制造等相关基础学科的发展紧密相关的。

对流体力学学科的形成最早作出贡献的是古希腊人阿基米德。公元前250年,他就发表了《论浮体》一文,精确地给出了“阿基米德定律”,从而奠定了物体平衡和沉浮的基本理论。1648年,法国人帕斯卡(B. Pascal)提出了静止液体中压力传递的基本定律——帕斯卡原理,奠定了液体静力学基础。

但流体力学尤其是流体动力学成为一门严密的学科,是在经典力学建立了速度、加速度、力、流场等概念,以及质量、动量、能量三个守恒定律建立之后才逐步形成的。

1687年,力学奠基人牛顿(I. Newton)出版了他的著作《自然哲学的数学原理》。该书的第二部分研究了在流体中运动的物体所受到的阻力,针对粘性流体运动时的内摩擦力,提出了牛顿内摩擦定律,为粘性流体动力学奠定了初步的理论基础。

1654年,德国人盖利克(O. Von Guericke)发明了真空泵,他在雷根斯堡(Regensburg)用16匹马拉拽两个合在一起的抽成真空的半球,首次向人们显示了真空和大气压的威力。

1681年,帕潘(D. Papin)发明了带安全阀的压力釜,实现了压力自动控制。

1733年,法国人卡米(M. Camus)提出齿轮啮合基本定律。

瑞士人伯努利(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。他在1738年出



版的著作《流体力学》中，建立了流体势能、压力能和动能之间的能量转换关系，即伯努利方程。

瑞士人欧拉 (L. Euler) 是经典流体力学的奠基人。他在 1755 年发表的著作《流体运动的一般原理》中，提出了流体连续介质的概念，建立了流体连续性微分方程和理想流体的运动微分方程，即欧拉方程，正确地用微分方程组描述了无粘性流体的运动。

欧拉方程和伯努利方程的建立，是流体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。

1772 ~ 1794 年，英国人瓦洛 (C. Vario) 和沃恩 (P. Vaughan) 先后发明了球轴承。

1774 年，英国人威尔金森 (J. Wilkinson) 发明了比较精密的镗床，使缸体精密加工成为可能。

1779 年，法国人拉普拉斯 (P. S. Laplace) 提出了“拉普拉斯变换”，后来成为线性系统分析的主要数学工具。

1785 年，法国人库仑 (C. A. de Coulomb) 用机械啮合概念解释干摩擦，首次提出了摩擦理论。

1788 年，英国人瓦特 (J. Watt) 用离心式调速器控制阀门，调节蒸汽机转速。

1797 年，英国人莫利兹 (H. Maudslay) 发明了包含丝杠、光杠、进刀架和导轨的车床，可车削不同螺距的螺纹。

1827 年，法国人纳维 (C. L. M. H. Navier) 在流体介质连续性、流体质点变形连续性等假设的基础上，第一个提出了不可压缩流体的运动微分方程组；1846 年，英国人斯托克斯 (G. G. Stokes) 又以更合理的方法严格地导出了这些方程。后来引用该方程时，便统称为纳维-斯托克斯方程 (N-S 方程)，它是流体力学的理论基础。

1883 年，英国人雷诺 (O. Reynolds) 用实验证明了粘性流体存在两种不同的流动状态——层流和湍流，找出了实验研究粘性流体流动规律的相似准则数——雷诺数，以及判断层流和湍流的临界雷诺数，并且建立了湍流基本方程——雷诺方程。

自 16 世纪到 19 世纪，欧洲人对流体力学、近代摩擦学、机构学和机械制造等所作出的一系列贡献，为 20 世纪液压传动的发展奠定了科学与工艺基础。

在帕斯卡提出静压传递原理后的 147 年，英国人布拉默 (Joseph Braman) 于 1795 年获得了第一项关于液压机的英国专利。两年后，他制成了由手动泵供压的水压机，到 1826 年，水压机已被广为应用，成为继蒸汽机以后应用最普遍的机械。此后，还发展了许多水压传动控制回路，并且采用职能符号取代具体的结构和设计，促进了液压技术的进一步发展。

由于水具有粘度低、润滑性差、易产生锈蚀等缺点，从而严重影响了水液压技术的发展。因此，当电力传动兴起后，水压传动的发展和應用不断地减少了。

20 世纪初，由于石油工业的兴起，矿物油与水相比具有粘度大、润滑性能好、防锈蚀能力强等优点，促使人们开始研究采用矿物油代替水作为液压系统的工作介质。

1905 年，美国人詹尼 (Janney) 首先将矿物油引入液压传动系统作为工作介质，并且设计制造了第一台油压轴向柱塞泵及由其驱动的油压传动装置，并于 1906 年应用到军舰的炮塔控制装置上，揭开了现代油压技术发展的序幕。

液压油的引入改善了液压元件摩擦副的润滑性能，减少了泄漏，从而为提高液压系统的工作压力和工作性能创造了有利条件。由于结构材料、表面处理技术及复合材料的引入，动、静压轴承设计理论和方法的研究成果，以及丁腈橡胶等耐油密封材料的出现，使油压技术在 20 世纪得到迅速发展。

由于车辆、舰船、航空等大型机械功率传动的需求，需要不断提高液压元件的功率密度和控制特性。1922 年，瑞士人托马 (H. Thoma) 发明了径向柱塞泵。随后，斜盘式轴向柱塞泵、斜轴式轴向柱塞泵、径向液压马达及轴向变量马达等的相继出现，使液压传动的性能不断得到提高。

汽车工业的发展及第二次世界大战中大规模武器生产的需要，促进了机械制造工业化、模块化概念和技术的形成与发展。1936 年，美国人威克斯 (Harry Vickers) 发明了以先导控制压力阀为标志的管式系列液压控制元件，20 世纪 60 年代出现了板式以及叠加式液压元件系列，20 世纪 70 年代出现了插装式系列液压元件，从而逐步形成了以标准化功能控制单元为特征的模块化集成单元技术。

由于高分子复合材料的发展以及复合式旋转和轴向密封结构的改进，至 20 世纪 80 年代，液压传动与