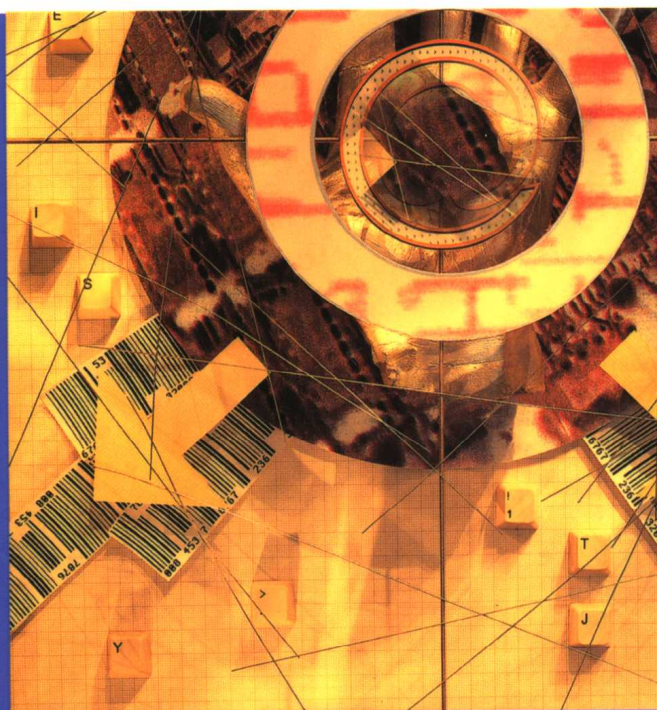


高职高专规划教材

液压与气压传动

马振福 主编



高职高专规划教材

液压与气压传动

主 编 马振福
副主编 马晓燕



机械工业出版社

本书为高职高专机电类教材,全书包括液压传动与气压传动两部分。主要内容包括:液压与气压传动的基本知识,液压与气动元件的结构及工作原理,液压辅助元件,液压与气压基本回路,液压系统实例,液压传动系统设计计算方法及设计实例,液压 CAD 技术简介,液压伺服系统的工作原理及液压伺服系统实例;气源净化装置,气压传动系统实例,气动程序系统设计方法及设计实例,液压与气压传动系统的安装调试、故障分析及使用维护等内容。

本书着重基本概念和原理的阐述,注重理论知识的应用,突出应用能力和创新能力的培养。

本书可作为高职高专院校机电类、机械类专业教材,也适合作为成人高校相关专业的教材,也可供工程技术人员和工人参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

液压与气压传动/马振福主编. —北京:机械工业出版社, 2004.1

高职高专规划教材

ISBN 7-111-13727-2

I. 液… II. 马… III. ①液压传动—高等学校: 技术学校—教材②气压传动—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TH137②TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 122064 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 王世刚 王玉鑫 版式设计: 霍永明

责任校对: 程俊巧 封面设计: 饶 薇 责任印制: 闫 焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ ·16 印张·392 千字

定价: 23.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着电子技术和计算机技术的迅速发展, 液压与气动技术在各行各业都得到了广泛的应用。特别是与微电子、计算机技术相结合后, 液压与气动技术已发展成为包括传动、控制和检测在内的一门完整的自动化技术。因此, 液压与气动技术是实现工业自动化的一种重要手段, 具有广阔的发展前景。

本书是为适应我国高职高专教育的需要而编写的。编者在本书编写中, 根据高职高专机电专业的培养目标, 以社会需求为出发点, 以技术应用能力的培养为主线, 力求使教材由单一学科型向综合型转换, 实现理论与实践的综合, 知识与技能的综合。在编写时遵循了“少而精”的原则, 并尽力做到通俗易懂, 便于自学。在教材内容的选取上, 尽量贴近工程实践, 书中编写了液压与气压传动系统的安装调试、使用维护和故障分析与排除等内容。同时力争反映我国液压与气动技术的新发展。在教材章节编排上, 改革了传统的编写方式, 使教材结构更符合学生的认知规律, 体现职业教育的特点。

本书主要讲述液压与气压传动的基础知识, 液压与气动元件的结构及工作原理, 液压与气压的基本回路, 气源装置, 液压与气压传动系统实例, 液压与气压传动系统的设计及液压与气压传动系统的安装、调试、故障分析与排除等内容。

本书在编写过程中, 着重考虑了以下几个关系:

1) 液压与气压 在内容编排上, 以液压为主线, 并使液压与气压有机结合, 共性问题触类旁通, 避免重复, 科学处理传统内容与新技术内容的关系。

2) 元件与回路系统 改革传统的“元件—回路—系统”的编写方式, 编写时将元件与回路紧密结合, 使学生学了元件后就学习该元件在系统中的作用及其应用回路, 更符合认知规律。

3) 理论与实践 着重反映基本理论在现代工业技术上的应用, 编写了系统安装、调试、使用维护和故障分析排除等内容。

4) 促进教学方法改革 每章前给出要重点掌握的知识点, 并在相关章节中给出课上讨论练习题, 促进教与学的互动性, 以调动学生学习的积极性, 启迪学生的科学思维。

本书由马振福、马晓燕、陈建雯、张克良共同编写, 其中, 马振福编写了绪论、第四、六、九、十三章, 马晓燕编写了第一、二、三章, 陈建雯编写了第五、七、八章, 张克良编写了第十、十一、十二、十四、十五章。本书由马振福任主编, 马晓燕任副主编。

本书在编写过程中, 得到了相关学校和有关同志的热情支持和帮助, 在此表示衷心的感谢。

限于编者水平, 书中难免存在缺点和错误, 敬请广大读者批评指正。

本书常用量及其符号、单位和换算关系

量的名称	符号	单位名称	单位符号	换算关系
质量	m	千克 (公斤) 吨	kg t	$1\text{t} = 1000\text{kg}$
长度	L	米	m	
面积	A	平方米	m^2	
体积 容积	V	立方米 升	m^3 L	$1\text{m}^3 = 1000\text{L}$ $1\text{L} = 1000\text{cm}^3$
时间、时间间隔	t	秒 分 时	S min h	$1\text{h} = 60\text{min}$ $1\text{min} = 60\text{s}$
力 重力	F $W (G)$	牛 [顿]	N	
力矩 转矩	M T	牛 [顿] 米	$\text{N}\cdot\text{m}$	
功、能 (量)	W	焦 [耳]	J	$1\text{J} = 1\text{N}\cdot\text{m}$
功率	P	瓦 [特]	W	$1\text{W} = 1\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}$
压力	P	帕 [斯卡]	Pa	$1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$
排量	V	升每转 毫升每转	L/r mL/r	$1\text{L}/\text{r} = 1000\text{mL}/\text{r}$
流量	q	立方米每秒 升每分	m^3/s L/min	$1\text{L}/\text{min} = 1.67 \times 10^{-5}\text{m}^3/\text{s}$

注：书中所用体积流量 q_v 均简化为流量 q 。

目 录

前言	
本书常用量及其符号、单位和换算关系	
绪论	1
思考题和习题	5
第一章 液压与气压传动基本知识	6
第一节 流体的主要物理性质	6
第二节 流体静力学基础	11
第三节 流体动力学基础	14
第四节 流体流动时的压力损失	18
第五节 流体流经孔口和缝隙的流量	19
第六节 液压冲击和空穴现象	23
思考题和习题	24
第二章 液压动力装置	26
第一节 液压泵概述	26
第二节 齿轮泵	29
第三节 叶片泵	32
第四节 柱塞泵	36
第五节 液压泵的选用	39
思考题和习题	40
第三章 液压执行元件	42
第一节 液压缸	42
第二节 液压马达	54
思考题和习题	57
第四章 液压控制元件及基本回路	60
第一节 液压控制阀的功用、 分类及性能要求	60
第二节 方向控制阀及方向控制回路	62
第三节 压力控制阀及压力控制回路	72
第四节 流量控制阀及速度控制回路	84
第五节 其他基本回路	101
第六节 其他液压控制阀及其应用	106
思考题和习题	112
第五章 液压辅助元件	120
第一节 管件	120
第二节 密封装置	122
第三节 过滤器	124
第四节 蓄能器	127
第五节 油箱、热交换器及压力计	130
思考题和习题	133
第六章 液压传动系统实例	134
第一节 组合机床动力滑台的 液压系统	134
第二节 数控机床的液压系统	137
第三节 装卸堆码机液压系统	139
第四节 液压电梯的液压系统	141
思考题和习题	143
第七章 液压系统的设计与计算	147
第一节 液压系统的设计步骤和方法	147
第二节 液压系统设计计算实例	158
第三节 液压 CAD 技术简介	165
思考题和习题	167
第八章 液压伺服系统	168
第一节 概述	168
第二节 液压伺服系统的 基本类型及其应用	170
思考题和习题	177
第九章 液压传动系统的安装 调试和故障分析	178
第一节 液压传动系统的安装与调试	178
第二节 液压传动系统的 故障分析与排除	182
思考题和习题	187
第十章 气源装置及辅助元件	188
第一节 气源装置	188
第二节 其他辅助元件	193
思考题和习题	196
第十一章 气动执行元件	197
第一节 气缸	197

第二节 气马达	200	思考题和习题	228
思考题和习题	203	第十四章 气压传动系统设计	229
第十二章 气动控制元件及 基本回路	204	第一节 气动程序系统设计步骤 和方法	229
第一节 压力控制阀及压力控制回路	204	第二节 行程程序控制回路设计	230
第二节 流量控制阀及速度控制回路	207	思考题和习题	235
第三节 方向控制阀及方向控制回路	210	第十五章 气压传动系统的安装调试和 故障分析	236
第四节 其他常用基本回路	215	第一节 气压传动系统的安装与调试	236
第五节 气动逻辑元件简介	218	第二节 气压系统主要元件常见故障 和排除方法	238
思考题和习题	220	思考题和习题	242
第十三章 气压传动系统实例	221	附录 常用液压与气动元件 图形符号	243
第一节 气动机械手气压传动系统	221	参考文献	247
第二节 门户自动开闭系统	223		
第三节 数控加工中心气动换刀系统	224		
第四节 气动生产线气压传动系统	225		

绪 论

液压与气动技术是机电设备中发展速度最快的技术之一，特别是近年来，随着机电一体化技术的发展，液压与气动技术向更广阔的领域渗透。它是实现工业自动化的一种重要手段，具有广阔的发展前景。

液压与气压传动是以流体（液压油或压缩空气）为工作介质进行能量传递和控制的一种传动形式。利用各种元件组成不同功能的基本回路，再由若干个基本回路有机地组合成能完成一定控制功能的传动系统来进行能量的传递、转换和控制，以满足机电设备对各种运动和动力的要求。

一、液压与气压传动的工作原理

1. 液压传动的工作原理

(1) 液压千斤顶 液压与气压传动的基本工作原理是相似的，现以图 0-1 所示的液压千斤顶为例，简述液压传动的工作原理。由图 0-1 可知，大缸体 9 和大活塞 8 组成举升缸，杠杆手柄 1、小缸体 2、小活塞 3、单向阀 4 和 7 组成手动液压泵。如提起手柄使小活塞向上移动，小活塞下腔容积增大，形成局部真空，于是油箱 12 中的油液在大气压力的作用下，通过吸油管 5 推开单向阀 4 进入小活塞下腔（此时单向阀 7 关闭），即手动液压泵吸油。当用力压下手柄时，小活塞下移，其下腔的密封容积减小，油压升高，单向阀 4 关闭，单向阀 7 打开，下腔的油液经管道 6 进入大缸体 9 的下腔，迫使大活塞 8 向上移动一段距离，举起重物，即完成一次压油动作。当再次提起手柄吸油时，举升缸下腔的压力油将力图倒流入手动液压泵内，但此时单向阀 7 自动关闭，使油液不能倒流，从而保证了重物不会自行下落。不断地往复提、压手柄，就能不断地把油液压入举升缸下腔，使重物逐渐升起，达到起重的目的。当工作完毕，打开截止阀 11，举升缸下腔的油液通过管道 10、阀 11 流回油箱，大活塞在重物和自重作用下向下移动，回到原始位置。

由液压千斤顶的工作过程可知，小液压缸与单向阀 4 和 7 一起完成吸油与压油，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。大液压缸将油液的压力能转换为机械能输出，顶起重物，称为执行元件（液压缸）。在这里大、小液压缸组成了最简单的液压传动系统，实现了运动和动力的传递。

(2) 机床工作台的液压传动系统

图 0-2a 为机床工作台液压系统结构原理。它由油箱 1、过滤器 2、液压泵 3、溢流阀

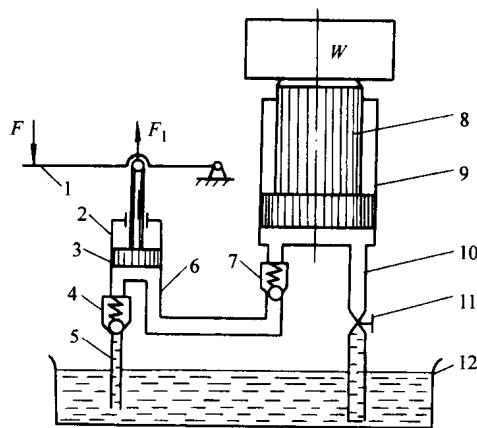


图 0-1 液压千斤顶工作原理

- 1—杠杆手柄 2—小缸体 3—小活塞
4、7—单向阀 5—吸油管 6、10—管道
8—大活塞 9—大缸体 11—截止阀 12—油箱

4、换向阀5、节流阀6、换向阀7、液压缸8以及连接这些元件的油管、接头等组成。

该系统的工作原理是：电动机驱动液压泵旋转，从油箱经过滤器吸油，泵输出的压力油→换向阀5→节流阀6→换向阀7→液压缸8左腔，推动活塞而使工作台9向右运动。这时液压缸8右腔的油液→换向阀7→回油管①→油箱。

如果将换向阀手柄转换成图0-2b所示状态，则压力油→换向阀7→液压缸右腔，推动活塞而使工作台向左运动。并使液压缸左腔油液→换向阀7→回油管①→油箱。

工作台的运动速度是由节流阀6来调节的。改变节流阀的开口大小，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。

为了克服推动工作台时受到的各种阻力，液压缸必须产生一个足够大的推力，而这个推力是由液压缸中的油液压力所产生的。要克服的阻力越大，缸中的油液压力就越高；阻力小，压力就低。这就说明了液压传动的一个基本原理，即压力取决于负载。

溢流阀的作用是调节和稳定系统的最大工作压力，并溢出定量泵多余的油液。当工作台工作进给时，液压缸活塞需要克服大的负载并作慢速运动。因此，进入液压缸的压力油必须有足够的稳定压力才能推动活塞带动工作台运动。调节溢流阀的弹簧力，使之与液压缸最大负载力相平衡。当系统压力升高到稍大于溢流阀的弹簧力时，溢流阀便打开，将定量泵输出的部分油液经油管②溢回油箱。这时系统压力不再升高，工作台保持稳定的低速运动。当工作台快速退回时，因负载小所需压力低，溢流阀关闭，泵的流量全部进入液压缸，工作台则实现快速运动。

如果将换向阀5手柄转换成图0-2c所示状态，则液压泵输出的压力油→换向阀5→回油管③→油箱。这时工作台停止运动，系统处于卸荷状态。

图0-3所示为该液压系统的图形符号图。结构式原理图直观性好，容易理解，但图形复杂，绘制困难。为了简化系统图，目前各国均用元件的图形符号来绘制液压和气压系统图。这些符号只表示元件的职能及连接通路，而不

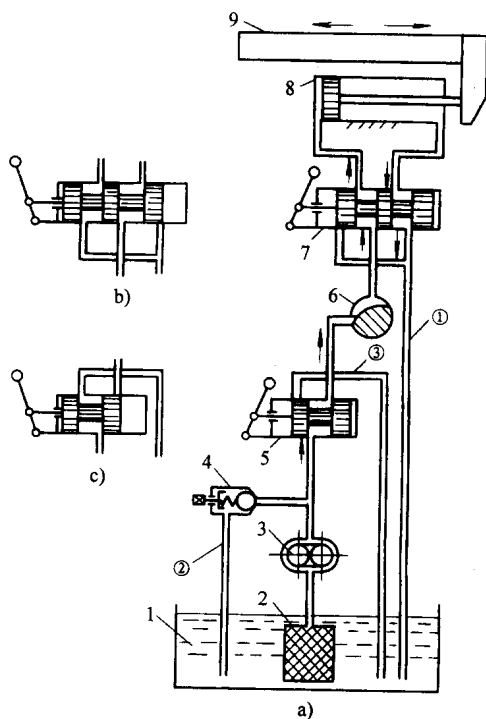


图0-2 机床工作台液压系统结构原理

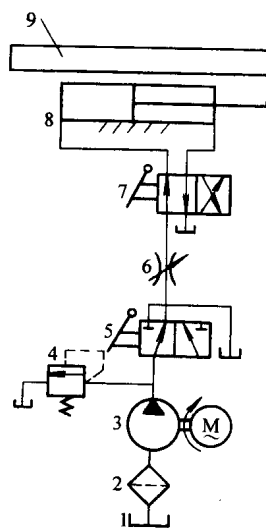


图0-3 机床工作台液压系统的图形符号图

表示其结构和性能参数。目前我国的液压与气压系统图采用 GB/T 786.1—1993 所规定的图形符号绘制。

2. 气压传动的工作原理

图 0-4 为气动剪切机的工作原理。图示位置为剪切前的预备状态，空气压缩机 1 输出的压缩空气→冷却器 2→油水分离器 3（降温及初步净化）→贮气罐 4（备用）→分水滤气器 5（再次净化）→减压阀 6→油雾器 7→换向阀 9→气缸 10。此时换向阀 A 腔的压缩空气将阀芯推到上位，使气缸上腔充压，活塞处于下位，剪切机的剪口张开，处于预备工作状态。

当送料机构将工料 11 送入剪切机并到达规定位置时，工料将行程阀 8 的阀芯向右推动，换向阀 A 腔经行程阀 8 与大气相通，换向阀阀芯在弹簧的作用下移到下位，将气缸上腔与大气连通，下腔与压缩空气连通。此时活塞带动剪刀快速向上运动将工料切下。工料被切下后，即与行程阀脱开，行程阀阀芯在弹簧作用下复位，将排气口封死，换向阀 A 腔压力上升，阀芯上移，使气路换向。气缸上腔进压缩空气，下腔排气，活塞带动剪刀向下运动，系统又恢复到图示预备状态，待第二次进料剪切。

从上面例子可以看到：液压泵（压缩机）将电动机的机械能转换为流体的压力能，然后通过液压缸或液压马达（气缸或气马达）将流体的压力能再转换为机械能以推动负载运动。液压与气压传动的过程即是：

机械能——→流体压力能——→机械能
 （电动机） （液压泵, 空压机） [液压(气) 缸, 液(气) 压马达]

二、液压与气压传动系统的组成

由上面的例子可以看出液压与气压传动系统主要由以下几部分组成：

(1) 能源装置 把机械能转换成流体的压力能装置。一般常见的是液压泵或空气压缩机。

(2) 执行元件 把流体的压力能转换成机械能的装置。它可以是作直线运动的液压缸或气缸，也可以是作回转运动的液压马达或气压马达。

(3) 控制调节元件 对系统中流体压力、流量和流动方向进行控制和调节的装置。例如溢流阀、流量阀、换向阀等。

(4) 辅助元件 保证系统正常工作所需的上述三部分以外的装置。如油箱、过滤器、分水滤气器、油雾器、消声器、蓄能器、管件等。

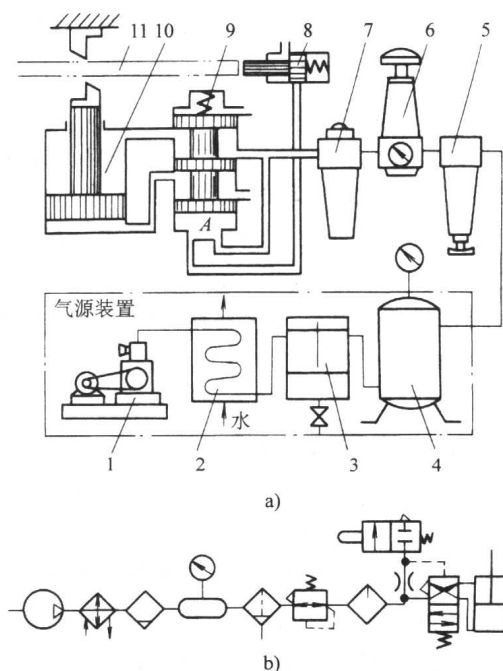


图 0-4 气动剪切机的工作原理图

a) 结构原理图 b) 图形符号图

1—空气压缩机 2—冷却器 3—油水分离器
 4—贮气罐 5—分水滤气器 6—减压阀 7—油雾器 8—行程阀 9—气控换向阀 10—气缸 11—工料

(5) 传动介质 传递能量的流体, 即液压油或压缩空气。

三、液压与气压传动的优缺点

与机械传动和电力拖动系统相比液压与气压传动具有以下优缺点。

1. 液压与气压传动的优点

- 1) 液压与气动元件的布置不受严格的空間位置限制, 布局安装灵活, 可构成复杂系统。
- 2) 在运行过程中可实现无级调速, 调速范围大。

3) 操作控制方便、省力、易于实现自动控制, 与电气、电子控制结合易于实现自动工作循环和自动过载保护。

4) 液压与气动元件已标准化、系列化和通用化, 便于系统的设计、制造和推广使用。

2. 液压与气压传动的缺点

- 1) 在传动过程中, 能量需经两次转换, 故传动效率低。
- 2) 由于传动介质的可压缩性和泄漏等因素的影响, 其传动不能保证严格的传动比。
- 3) 液压与气动元件制造精度高, 系统出现故障不易查找。

3. 液压与气压传动的各自特点

(1) 液压传动

1) 液压传动可采用很高的压力 (一般可达 32MPa 或更高), 故可输出更大的动力。在同等输出功率的情况下, 液压传动装置体积小, 重量轻, 惯性小, 动态性能好。

2) 运动平稳, 反应快。

3) 采用油液作工作介质, 能自行润滑, 故使用寿命长, 但有油液污染。

4) 油液在管路中流动压力损失较大, 故不宜作远距离传动。

5) 液压传动对油温的变化较敏感, 不宜在低温、高温和温度变化很大的环境中工作。

(2) 气压传动

1) 工作介质是空气, 取之不尽, 用之不竭, 成本低, 用后排入大气不污染环境。

2) 气体在管路中流动压力损失小, 适用于集中供气和远距离输送。

3) 压缩空气的压力较低, 一般用于输出动力较小的场合。

4) 空气可压缩性大, 气压传动稳定性差。

总的来说, 液压与气压传动的优点是主要的, 其缺点将随着科学技术的发展不断得到克服。例如, 将液压传动、气压传动、电力传动、机械传动合理地联合使用, 构成气—液, 电—液 (气), 机—液 (气) 等联合传动, 以进一步发挥各自的优点, 弥补某些不足, 因此, 在工程实际中得到了广泛应用。

四、液压与气动技术的应用和发展

液压传动因具有结构简单、体积小、重量轻、反应速度快、输出力大、可方便地实现无级调速、易实现频繁换向、易实现自动化等优点, 所以在机床、工程机械、矿山机械、压力机械和航空工业等领域得到广泛应用。

气压传动因具有操作方便、无油、无污染、防火、防电磁干扰、抗振动、抗冲击等优点, 所以在电子工业、包装机械、印染机械、食品机械等领域应用广泛。

随着液压机械自动化程度的不断提高, 液压元件数量急剧增加, 元件小型化、系统集成化是必然的发展趋势。特别是近年来, 机电技术的迅速发展, 液压技术与传感技术、微电子技术密切结合, 出现了许多新型元件, 如电液比例阀、数字阀、电液伺服液压缸等, 机

(液)电一体化元器件,使液压技术正向高压、高速、大功率、节能高效、低噪声、长寿命、高集成化等方面发展。同时,液压元件和液压系统的计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助测试(CAT)、计算机实时控制也是当前液压技术的发展方向。

当今气动技术已发展成包括传动、控制与检测在内的自动化技术。它作为柔性制造系统(FMS)在包装设备、自动生产线和机器人等方面成为不可缺少的重要手段。由于工业自动化技术的发展,气动控制技术以提高系统的可靠性、降低总成本为目标,研究和开发系统控制技术和机、电、液、气综合技术。显然,气动元件的微型化、节能化、无油化、位置控制高精度化以及与电子相结合的应用元件是当前的发展特点和研究方向。

思考题和习题

- 0-1 什么叫液压传动?什么叫气压传动?
- 0-2 液压与气压传动系统由哪些基本组成部分?试说明各组成部分的作用。
- 0-3 液压传动与机械、电气传动比较有哪些主要的优缺点?
- 0-4 液压传动与气压传动有何异同?
- 0-5 一个工厂能否采用一个液压泵站集中供给压力油?说明理由。

第一章 液压与气压传动基本知识

液压传动的工作介质是液体。最常用的是液压油。此外还有乳化型传动液和合成型传动液等。气压传动的工作介质是压缩空气。

本章主要讲述工作介质的物理性质、液压气压传动系统对工作介质的要求和选用。液体静力学的基本特性、液体与气体流动时的运动特性等液压与气压传动的基础知识。

本章重点

- 1) 液压油的物理性质。
- 2) 液压传动的基本原理，即连续性方程和伯努力方程，液体流经管路的压力损失等。
- 3) 液压油的选用。
- 4) 空气的基本性质及气压传动系统对工作介质的要求。

第一节 流体的主要物理性质

一、密度与重度

密度 是单位体积流体的质量，通常用 ρ (kg/m^3) 表示，即

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

式中 m ——流体的质量 (kg)；

V ——流体的体积 (m^3)。

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加，但变动值很小，可忽略不计。常用液压油的密度为 $900\text{kg}/\text{m}^3$ 。

二、粘性

1. 粘性的意义

流体在外力作用下流动（或有流动趋势）时，分子间的内聚力阻止分子相对运动而产生一种内摩擦力，这种现象叫流体的粘性。流体只有在流动（或有流动趋势）时才会呈现出粘性，静止流体是不呈现粘性的。

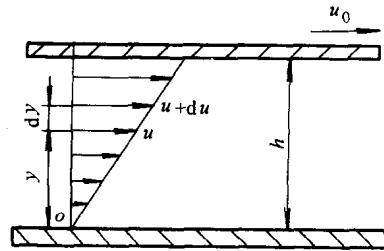


图 1-1 液体的粘性示意图

粘性使流动流体内部各处的速度不相等，以图1-1为例，若两平行平板间充满流体，下平板不动，而上平板以速度 u_0 向右平动。由于流体的粘性，使紧靠下平板和上平板的流体层速度分别为零和 u_0 ，而中间各流层的速度则从上到下按递减规律，呈线性分布。

实验测定表明，流体流动时相邻流层间的内摩擦力 F 与流层接触面积 A 、流层间相对运动的速度梯度 du/dy 成正比

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-2)$$

式中, μ 是比例常数, 称为动力粘度。若以 τ 表示内摩擦切应力, 即单位面积上的内摩擦力, 则

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

这就是牛顿流体内摩擦定律。

2. 流体的粘度

流体粘性的大小用粘度来表示, 常用的粘度有三种: 即动力粘度、运动粘度和相对粘度。

(1) 动力粘度 μ 流体在单位速度梯度下流动时, 流动层间单位面积上产生的内摩擦力, 单位为 $\text{N}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ (帕·秒)。

(2) 运动粘度 ν 是动力粘度与其密度的比值, 即 $\nu = \mu/\rho$, 单位为 m^2/s 。运动粘度 ν 无明确的物理意义, 但 ISO 规定统一采用运动粘度来标志流体粘度, 液压油的牌号就是采用它在 40°C 时运动粘度 (以 mm^2/s 计) 的中心值来标号的, 例如 L—HL32 普通液压油在 40°C 时的运动粘度的中心值为 $32\text{mm}^2/\text{s}$ 。

(3) 相对粘度 相对粘度又称条件粘度, 由于测量仪器和条件不同, 各国相对粘度的含义也不同, 如美国采用赛氏粘度 (SSU); 英国采用雷氏粘度 (R); 而我国、德国和俄罗斯等国用恩氏粘度 $^\circ E$ 。

恩氏粘度 $^\circ E$ 用恩氏粘度计测定, 即将 200ml 被测液体装入粘度计的容器内, 容器周围充水, 电热器通过水使液体均匀升温到温度 $t^\circ\text{C}$, 液体由容器底部 $\phi 2.8\text{mm}$ 的小孔流尽所需要的时间 t_1 (s) 和同体积蒸馏水在 20°C 时流过同一小孔所需时间 t_2 (s) (通常平均值 $t_2 = 51\text{s}$) 的比值, 称为被测液体在这一温度 $t^\circ\text{C}$ 的恩氏粘度 $^\circ E$, 即

$$^\circ E_t = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-4)$$

恩氏粘度与运动粘度 (m^2/s) 的换算关系为

当 $1.35 \leqslant ^\circ E \leqslant 3.2$ 时

$$\nu = \left(8^\circ E - \frac{8.64}{^\circ E} \right) \times 10^{-6} \quad (1-5)$$

当 $^\circ E > 3.2$ 时

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

(4) 调合油的粘度 当油液产品的粘度不符合要求时, 可将同一型号两种粘度不同的油按适当的比例混合起来使用, 称为调合油。调合油的粘度可用下面经验公式计算

$$^\circ E = \frac{a_1 ^\circ E_1 - a_2 ^\circ E_2 - c}{100} \quad (1-7)$$

式中 $^\circ E_1$ 、 $^\circ E_2$ ——混合前两种油液的恩氏粘度, 取 $^\circ E_1 > ^\circ E_2$;

$^\circ E$ ——混合后的调合油的恩氏粘度;

a_1 、 a_2 ——两种油液各占的百分数 ($a_1 + a_2 = 100\%$);

c ——实验系数, 见表 1-1。

3. 粘度与温度的关系

液压油粘度对温度的变化十分敏感, 如图 1-2 所示, 温度升高, 粘度下降。这种油液粘度随温度变化的性质称为粘温特性。不同种类的液压油有不同的粘温特性, 由图可见, 温

度对液压油粘度影响较大，必须引起重视。

表 1-1 实验系数 c 的值

a_1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
a_2	90	80	70	60	50	40	30	20	10
c	6.7	13.1	17.9	22.1	25.5	27.9	28.2	25	17

液体的粘温特性常用粘度指数 vi 来度量。粘度指数 vi 值越大，说明油液粘度随温度的变化率越小，即粘温特性越好。

一般要求工作介质的粘度指数 vi 值应在 90 以上。当液压系统的工作温度范围较大时，应选用粘度指数较高的工作介质。几种典型工作介质的粘度指数列于表 1-2 中。

三、流体的可压缩性

流体受压力作用而使其体积发生变化的性质，称为流体的可压缩性。对于一般液压系统压力不高时，液体的可压缩性很小，因此可认为液体是不可压缩的，而在压力变化很大的高压系统中，就必须考虑液体可压缩性的影响。而气体的

可压缩性比液体要大得多。当液体混入空气时，其可压缩性将显著增加，并将严重影响液压系统的工作性能，因此在液压系统中应使油液中的空气含量减少到最低限度。

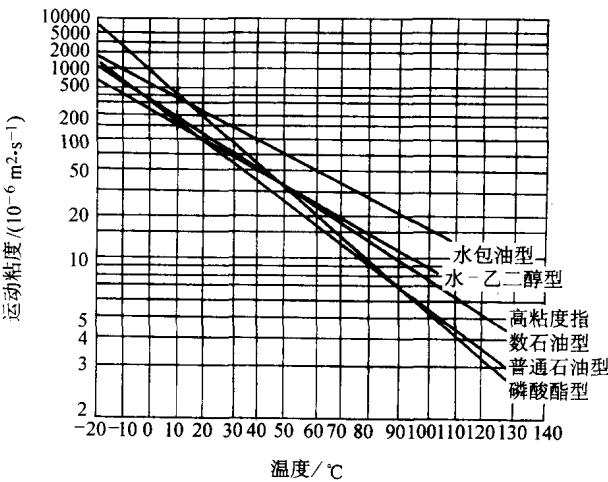


图 1-2 粘度和温度的关系

表 1-2 典型工作介质的粘度指数

介质种类	粘度指数 vi	介质种类	粘度指数 vi
常用液压油 L-HL	90	高含水液 L-HFAE	≈130
抗磨液压油 L-HM	≥95	油包水乳化液 L-HFB	130~170
低温液压油 L-HV	130	水-乙二醇液 L-HFC	140~170
高粘度指数液压油 L-HR	≥160	磷酸脂液 L-HFDR	-31~170

四、空气的基本性质

1. 空气的湿度

自然界中的空气是由多种成分组成的，其中 78% 是氮气 (N_2)，21% 是氧气 (O_2)，1% 为其它气体。此外，空气中常含有一定量的水蒸气，含有水蒸气的空气称为湿空气，不含有水蒸气的空气称为干空气。大气中的空气基本上都是湿空气。在一定温度下，含水蒸气越多，空气就越潮湿。当温度下降时，空气中水蒸气的含量降低。

空气作为传动介质，其干湿程度对传动系统的稳定性和寿命有直接影响。因此，各种元件对空气的含水量有明确规定，常采取一些措施滤除空气中的水分。

2. 空气的可压缩性

空气的体积受温度和压力的影响较大，有明显的可压缩性。温度越高、压力越大，空气

的可压缩性越大。只有在某些特定条件下，才能将空气看作是不可压缩的。

在实际工程中，管路内气体流速较低，湿度变化不大，可将气体看作是不可压缩的，其误差很小。但在某些气动元件（如气缸、气马达）中，局部流速很高，则必须考虑气体的可压缩性。

3. 气阻与气容

在气压传动系统中，为了控制运动（例如气缸的调速），常用气阻来调节压力和流量的大小。所谓气阻，就是指体积小、阻力大的流通部件，其形式很多，可以做成恒定值的（如毛细管），也可以做成可调值的（如可调节流装置）。恒定值气阻是指在一定的压降和流量时，两者的比值为定值，不可调节。

气压传动系统中储存或放出气体的空间称为气容。管道、气缸、储气罐等都是气容。气动系统的运行过程，实际上存在着无数次的充、放气过程。因此，在气动系统的设计、安装、调试及维修中，必须考虑气容。例如，为了提高气压信号的传输速度，提高系统的工作频率和运行的可靠性，应限制管道气容，消除气缸等执行元件的气容对控制系统的影响。又如，为了延时、缓冲等目的，应在一定的部位设置适当的气容。特别是在调试及维修中，不适当的气容往往造成系统工作不正常。

4. 气体的高速流动及噪声

气压传动设备工作时，常出现气体的高速流动，如气缸、气阀的高速排气，冲击气缸喷口处的高速流动，气动传感器的喷流等。气动设备工作时的排气，由于出口处气体急剧膨胀，会产生刺耳的噪声。噪声的强弱随排气量、排气速度和排气通道的形状而变化，排气的速度和功率越大，噪声也就越大。为了降低噪声，应合理设计排气口形状并降低排气速度。

讨论练习题：

- 1) 把分别盛有水和某种油液的两个容器放在桌面上，试问这两种液体哪种粘度大？为什么？
- 2) 液压油的粘度是否受温度的影响？如何影响？举例说明。

五、对液压油的要求和选用

1. 对液压油的要求

在液压系统中，液压油除传递运动和动力外，又起润滑和散热的作用，为此，应具备以下性能：

- 1) 适当的粘度，较好的粘温特性。
- 2) 润滑性能好。在工作压力和温度发生变化时，应具有较高的油膜强度。
- 3) 成分纯，杂质少。
- 4) 对金属和密封件有良好的相容性。
- 5) 具有良好的化学稳定性和热安定性，油液不易氧化、不易变质。
- 6) 抗泡沫性好，抗乳化性好，腐蚀性小，防锈性好。
- 7) 流动点和凝固点低，闪点（明火能使油面上油蒸气闪燃，但油本身不燃烧时的温度）和燃点高。

8) 对人体无害，成本低。

2. 液压油的种类和选用

(1) 液压油的种类

液压油的种类很多，主要有石油型、合成型和乳化型三类。液压油的主要品种及其性质列于表 1-3。

表 1-3 工作介质的主要类型及其性质

种 类 性 能	可燃性液压油			抗燃性液压油			
	石油型			合成型		乳化型	
	通用液 压油	抗磨液 压油	低温液 压油	磷酸脂液	水—乙二 醇液	油包水液	水包油液
密度 / (kg·m ⁻³)	850~900			1100~1500	1040~1100	920~940	1000
粘度	小~大	小~大	小~大	小~大	小~大	小	小
粘度指数 vi≥	90	95	130	130~180	140~170	130~150	极高
润滑性	优	优	优	优	良	良	可
防锈蚀性	优	优	优	良	良	良	可
闪点 / °C≥	170~200	170	150~170	难燃	难燃	难燃	不燃
凝点 / °C≤	-10	-25	-35~-45	-20~-50	-50	-25	-5

石油型液压油是以机械油为原料，精练后按需要加入适当添加剂而成。这类液压油润滑性能和防锈性能好，粘度等级范围宽，目前有 90% 以上的液压系统采用石油型液压油作为工作介质。但它抗燃性较差，液压油的主要品种及其特性和用途列于表 1-4。

表 1-4 液压油的主要品种及其特性和用途

分类	名 称	代 号	主 要 用 途
石油型	普通液压油	L—HL	适用于 7~14MPa 的液压系统及精密机床液压系统（环境温度为 0°C 以上）
	抗磨液压油	L—HM	适用于低、中、高压液压系统，特别适用于有防磨要求并带叶片泵的液压系统
	低温液压油	L—HV	适用于 -25°C 以上的高压、高速工程机械、农业机械和车辆的液压系统（加降凝剂等，可在 -20~-40°C 下工作）
	高粘度指数 液压油	L—HR	用于数控精密机床的液压系统和伺服系统
	液压导轨油	L—HG	适用于导轨和液压系统共用一种油品的机床，对导轨有良好的润滑性和防爬性
	全损耗 系统用油	L—HH	浅度精制矿油，抗氧化性、抗泡沫性较差，主要用于机械润滑，可做液压代用油，由于要求不高的低压系统
	汽轮机油	L—TSA	深度精制矿油加添加剂，改善抗氧化、抗泡沫等性能，为汽轮机专用油，可做液压代用油，用于要求不高的低压系统
	其它液压油		加入多种添加剂，用于高品质的专用液压系统
乳化型	水包油 乳化液	L—HFA	又称高水基液，特点是难燃、温度特性好，有一定的防锈能力，润滑性差，易泄漏，适用于有抗燃要求、油液用量大且泄漏严重的系统
	油包水 乳化液	L—HFB	既具有石油型液压油的抗磨、防锈性能，又具有抗燃性，适用于有抗燃要求的中压系统
合成型	水—乙 二醇液	L—HFC	难燃，粘温特性和抗蚀性好，能在 -30~60°C 温度下使用，适用于有抗燃要求的中低压系统
	磷酸脂液	L—HFDR	难燃，润滑抗磨性能和抗氧化性能良好，能在 -54~135°C 温度范围内使用；缺点是有毒。适用于有抗燃要求的高压精密液压系统