



随书附光盘一张

高等学校规划教材

液压与气压传动

YEYA YU QIYA CHUANDONG

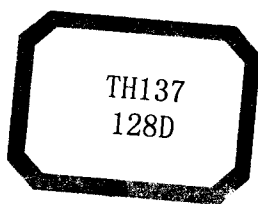
主编 李笑 副主编 吴冉泉 主审 官忠范



国防工业出版社

National Defense Industry Press

高等学校规划教材



液压与气压传动

主 编 李 笑
副主编 吴冉泉
主 审 官忠范

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书主要介绍液压与气动技术原理,配有多媒体光盘。主要内容包括液压流体力学、动力元件、执行元件、控制元件、辅助元件、液压基本回路、典型液压系统、气源装置及气动元件、气动基本回路、气动逻辑系统设计和气动系统应用实例等。多媒体光盘用大量的平面动画和立体动画演示元件及回路的工作原理,学习者可通过本书与光盘的配合来学习和掌握液压与气动技术。

本书可作为普通高等院校机械类专业的教材,并适用于其他各类成人高校、电大等相关专业,也可供从事液压与气动的工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动/李笑主编;吴冉泉副主编. —北京:
国防工业出版社, 2006.3
ISBN 7-118-04381-8

I. 液... II. ①李...②吴... III. ①液压传动②气
压传动 IV. ①TH137②TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 014660 号

※

国防工业出版社 出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)
腾飞胶印厂印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 20½ 字数 515 千字
2006 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 35.00 元(含光盘)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

由多年教学实践深知,让初涉专业领域学习者在有限的时间内掌握液压与气动技术有较大的难度,其主要原因在于液压与气动元件的结构较为复杂,元件及回路的原理较难理解,教学内容及形式比较抽象和单调。而具有表现力、参与性及受控性强等特点的多媒体技术,能够为解决这个难题提供有效的途径。因此,如何将先进的多媒体技术与本课程教学相结合,编写出一本适合本课程教学特点的多媒体教材,一直是从事本课程教学工作十分关注的课题。结合长期的教学实践,我们编写了这本教材,并开发了相应的多媒体光盘。本书着重从以下几方面进行了尝试:

(1) 配备了多媒体光盘,教师可以充分利用平面和立体动画、三维结构爆炸示图等多媒体素材,介绍液压与气压传动基本原理,从而提高教学质量和效果。

(2) 增添了反映当今液压与气压传动新理论、新技术和新进展的教学内容,如二次调节原理、电液比例变量泵等,以拓宽学生的知识面,适应新时代人才培养的要求。

(3) 对流体力学、液压传动和气压传动三部分内容进行了适当分配,简要介绍流体力学基本理论,主要介绍液压与气压传动技术的基本原理,增加了实用例题和习题,强调基本训练,以提高学生分析问题和解决问题的能力。

本书共分两篇。第一篇共8章,介绍液压传动基本知识,第二篇共5章介绍气压传动基本知识。第1章概述液压流体力学基础知识;第2章~第5章分别介绍液压传动系统所使用的动力元件、执行元件、控制元件和辅助元件;第6章~第8章分别介绍液压传动基本回路、典型液压系统和液压系统的设计计算;第9章~第11章分别介绍气压传动基础知识、气源装置及气动元件和气动基本回路;第12章介绍气动逻辑控制系统设计;第13章介绍气动系统应用实例。

本书的绪论、第6章~第8章由李笑编写,第2、3、9、10、11、12、13章由吴冉泉编写,第4章、第5章由肖体兵编写,第1章和习题由杨雪荣编写,全书由李笑主编并统稿。

本书由沈阳工业大学官忠范教授主审。他详细审阅了书稿,并提出了许多宝贵意见和建议,在此谨向他表示诚挚的谢意。在编写过程中,广东工业大学吴百海教授、吴小洪教授、黄志坚教授给予了很大的帮助,在此一并表示感谢。

由于编者水平所限,书中难免有疏误和缺陷,恳切希望读者批评指正。

编者
2006年2月

目 录

绪论	1	0.3 液压与气压传动的优缺点	4
0.1 液压与气压传动的工作原理	1	0.4 液压与气压传动的发展概况	5
0.2 液压与气压传动系统的组成	3		

第一篇 液压传动

第1章 流体力学基础知识	7	5.2 管件和压力表	111
1.1 液压油	7	5.3 过滤器	114
1.2 液体静力学	11	5.4 密封装置	117
1.3 液体动力学	14	5.5 蓄能器	121
1.4 管道中液流的特性	17	第6章 液压基本回路	124
1.5 孔口及缝隙的压力流量特性	21	6.1 压力控制回路	124
1.6 液压冲击和气穴现象	26	6.2 速度控制回路	129
第2章 液压动力元件	28	6.3 方向控制回路	143
2.1 液压泵概述	28	6.4 多执行元件控制回路	145
2.2 齿轮液压泵	31	6.5 其他控制回路	150
2.3 叶片液压泵	34	第7章 典型液压系统	152
2.4 柱塞液压泵	39	7.1 万能外圆磨床液压系统	152
2.5 液压泵的使用	44	7.2 液压机液压系统	156
第3章 液压执行元件	47	7.3 塑料注射成型机液压系统	159
3.1 旋转运动执行元件	47	7.4 机械手液压系统	163
3.2 直线往复运动执行元件	52	7.5 电液比例、电液伺服控制 系统	165
第4章 液压控制元件	64	第8章 液压系统的设计与计算	168
4.1 液压阀概述	64	8.1 明确设计要求进行工况分析	168
4.2 方向控制阀	66	8.2 确定液压系统主要参数	171
4.3 压力控制阀	76	8.3 拟定液压系统原理图	174
4.4 流量控制阀	87	8.4 计算和选择液压件	175
4.5 插装阀和叠加阀	92	8.5 验算液压系统性能	178
4.6 伺服阀	96	8.6 绘制工作图及编制技术文件	180
4.7 电液比例控制阀	101	8.7 液压系统设计计算举例	181
第5章 液压辅件	108		
5.1 油箱和热交换器	108		

第二篇 气压传动

第9章 气压传动基础知识	190	11.5 往复运动回路	251
9.1 空气的物理性质	190	11.6 安全保护回路	253
9.2 气体状态方程	194	11.7 真空回路	256
9.3 气体的流动规律	196	11.8 计数回路	257
9.4 气动元件的通流能力	198	第12章 气动逻辑控制系统设计	259
9.5 充、放气参数计算	201	12.1 逻辑代数基本知识	259
第10章 气源装置及气动元件	205	12.2 非时序逻辑控制系统设计	261
10.1 气源装置	205	12.3 时序逻辑控制系统设计	266
10.2 气动执行元件	217	第13章 气动系统应用实例	284
10.3 普通气动控制阀	225	13.1 气动机械手	284
10.4 气动逻辑元件	231	13.2 气动定量系统	287
10.5 气动仪表	238	13.3 机械加工设备气动系统	290
第11章 气动基本回路	243	习题	296
11.1 压力与力控制回路	243	附录 常用液压与气动元件图形符号	
11.2 速度控制回路	245	(GB/T 786.1—93)	317
11.3 方向控制回路	248	参考文献	322
11.4 位置与同步控制回路	250		

绪 论

一部机器通常由原动机、传动装置和工作机构三部分组成。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;工作机构的作用是利用机械能来改变材料或工件的性质、状态、形状或位置,以进行生产或达到其他预定目的;传动装置设于原动机和工作机构之间,起传递动力和进行控制的作用。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、电气传动和流体传动。

机械传动是通过齿轮、齿条、涡轮、蜗杆、皮带、链条、杠杆等机件传递动力和进行控制的一种传动形式,它是发展最早的传动形式。

电气传动是利用电气设备通过调节电参数来传递动力和进行控制的一种传动形式,它是应用最广的传动形式。

流体传动是以流体(液体或压缩空气)为工作介质进行能量传递和控制的一种传动形式。按工作介质不同可分为液体传动和气体传动。按工作原理不同又可将液体传动分为液力传动和液压传动。液力传动是利用液体的动能来传递动力;液压传动是利用液体的静压能来传递动力。气体传动主要指气压传动,是利用压缩空气的静压能来传递动力。液压与气压传动是发展速度最快的技术之一。

本书介绍的是液压与气压传动系统的组成、动力传递原理及其设计计算方法。

0.1 液压与气压传动的工作原理

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。

当向上提起手柄 1 使小液压缸 2 的活塞上移时,小液压缸下腔容积增大而形成局部真空,单向阀 3 关闭,油箱 5 的油液在大气压作用下经吸油管顶开单向阀 4 进入小液压缸下腔。当向下按压手柄使小液压缸的活塞下移时,小液压缸下腔容积减小,油液受挤压而压力升高,单向阀 4 关闭,刚才被吸入的油液顶开单向阀 3 经排油管进入大液压缸 7 下腔,推动大活塞上移顶起重物。如此不断扳动手柄,油液就不断进入大液压缸下腔,将重物逐渐举起。如果打开截止阀 6,大液压缸下腔油液在重物作用下排回油箱,重物从举高的位置下移,回到原始位置。

重物之所以能在手柄的往复作用下逐渐升起,这是由液压传动的特征所决定的。现分析该系统中力、运动速度和功率的传递关系。

1. 力比例关系

在图 0-1 中,假设大液压缸活塞面积为 A_2 ,重物作用在活塞上的负载为 F_2 ,则该力在大液压缸下腔产生的压力为 $p = F_2$

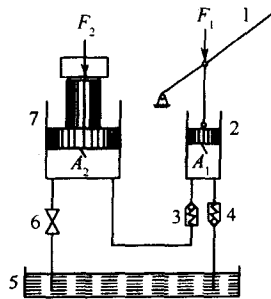


图 0-1 液压千斤顶原理图

- 1—手柄; 2—小液压缸;
- 3、4—单向阀; 5—油箱;
- 6—截止阀; 7—大液压缸。

$/A_2$ 。根据帕斯卡原理,在密闭容器内,施加于静止液体上的压力可以等值地传递到液体各点,此压力将以同样大小传给作用面积为 A_1 的小液压缸活塞上。为了克服负载使重物上升,手柄杠杆作用在小液压缸活塞上的力应为

$$F_1 = pA_1 = F_2 \frac{A_1}{A_2} \quad (0-1)$$

由式(0-1)看出,如果 A_2 很大, A_1 很小,则只需很小的力 F_1 便能克服很大的负载 F_2 而举起重物。可见这是一个力的放大机构,即液压传动具有增力效应。

由式(0-1)还可以看出, F_2 越大,即负载越大,油腔的压力 p 也就越大,这说明系统中的工作压力是由负载决定的,这是液压传动的一个重要特征。

2. 速度关系

如果不考虑液体的可压缩性、泄漏和缸体、管路的变形,小液压缸排出的液体体积应等于进入大液压缸的液体体积。设小液压缸活塞的位移为 h_1 ,大液压缸活塞的位移为 h_2 ,则

$$h_1 A_1 = h_2 A_2 \quad (0-2)$$

两边同除时间 t ,整理后得

$$v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2} \quad (0-3)$$

式中 v_1 、 v_2 ——小液压缸活塞的速度和大液压缸活塞的速度。

由于 $A_2 > A_1$,则 $v_2 < v_1$,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(0-3)得

$$q_2 = v_2 A_2 = v_1 A_1 = q_1 \quad (0-4)$$

式中 q_1 、 q_2 ——小液压缸输出的流量和大液压缸输入的流量。

式(0-4)表明,大液压缸活塞的运动速度只取决于输入流量的大小,而与负载无关,这是液压传动的又一个重要特征。

3. 功率关系

由式(0-1)和式(0-3)得

$$F_1 v_1 = F_2 v_2 \quad (0-5)$$

式(0-5)左端为输入功率,右端为输出功率,这说明在不计损失的情况下,输入功率等于输出功率。由式(0-1)和式(0-4)得

$$F_1 v_1 = p A_1 v_1 = p q_1 = p q_2 = p A_2 v_2 = F_2 v_2 \quad (0-6)$$

从式(0-6)可以看出,小液压缸将扳动手柄的机械功率 $F_1 v_1$ 转换成液压功率 $p q_1$ 输入系统,经系统传递后变为液压功率 $p q_2$,再由大液压缸将液压功率 $p q_2$ 转换为机械功率 $F_2 v_2$ 输出。可见,液压传动是以液体的压力能来传递动力的,液压功率是压力和流量之积,压力和流量是液压传动中两个最基本的参数。

从上例可以看出,液压传动系统有两次能量转换。通常把机械能转换成液压能的元件或装置称为液压泵或能源装置,而把液压能转换成机械能的元件或装置称为执行元件或执行装置。在上例中,手柄1、小液压缸2、单向阀3和4一起完成吸油排油,将手柄杠杆的机械能转换为液压能输出,称为(手动)液压泵。大液压缸7将液压能转换为机械能输出,举起重物,称为液压执行元件。

0.2 液压与气压传动系统的组成

工程实际中的液压传动系统,除了液压泵和液压执行元件外,还需设置控制元件来控制执行元件运动方向、运动速度和最大推力,设置辅助元件以保证系统正常工作。现以图 0-2 为例,说明液压传动系统的组成。

图 0-2 所示系统的工作原理是:液压泵 3 由电动机带动旋转后,吸油腔产生真空,油箱 1 的油液在大气压作用下,经过过滤器 2 进入液压泵吸油腔,并经液压泵输出进入压力油路。当换向阀 5 阀芯处于图示右端位置时,压力油经阀 4、阀 5 和管道 9 进入液压缸 7 的左腔,推动活塞向右运动。液压缸右腔的油液经管道 6、阀 5 和管道 10 流回油箱。若换向阀阀芯处于左端位置,液压缸活塞就反向运动。若换向阀阀芯停在中间位置,压力油不能进入液压缸,液压缸活塞就停止不动。

改变节流阀 4 的开口,可以改变进入液压缸的流量,从而可以控制液压缸活塞的运动速度。在这种情况下,液压泵排除的多余油液,经溢流阀 11 和管道 12 流回油箱。

液压缸的工作压力是由负载决定的。液压泵出口压力由溢流阀 11 调定,其调定值应为液压缸的最大工作压力与油液流经各阀和管道进入液压缸的压力损失之总和。液压缸的最大推力由溢流阀调定值决定。溢流阀对系统还起着过载保护作用。

由图 0-2 所示系统可以看出,液压传动系统主要由以下四部分组成。

(1) 能源装置。把机械能转换成液压能的装置。最常见的形式是液压泵,它给系统提供压力油。

(2) 执行元件。把油液的液压能转换成机械能输出的装置。它可以是作直线运动的液压缸、也可以是作回转运动的液压马达。

(3) 控制元件。对系统中油液压力、流量和流动方向进行控制或调节的装置。如上例中的

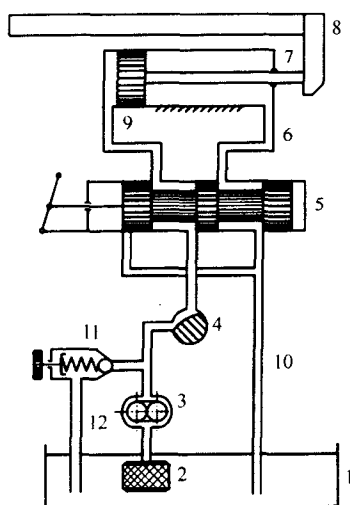


图 0-2 典型液压系统原理图

1—油箱; 2—过滤器; 3—液压泵;
4—节流阀; 5—换向阀; 6、9、10、12—管道;
7—液压缸; 8—工作台; 11—溢流阀。

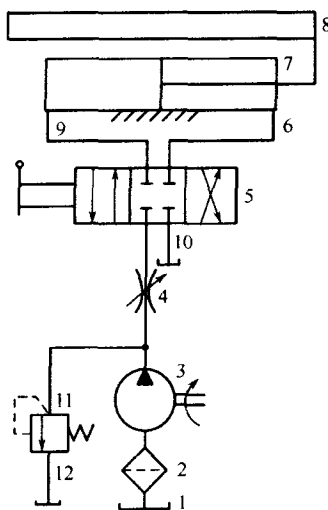


图 0-3 典型液压系统
原理图形符号图

溢流阀、节流阀和换向阀等。

(4) 辅助元件。保证系统正常工作所需的上述三种以外的装置。如油箱、过滤器、油管等。

气压传动系统与液压传动系统的组成相似,除了能源装置为输出压缩空气的气源装置,执行元件是气缸或气马达,控制元件是气动阀,辅助元件是分水过滤器、油雾器、消声器、管件等外,常常还装有完成逻辑功能的逻辑元件等。

图 0-2 所示系统图是一种半结构式的工作原理图,它直观性强,容易理解,但绘制起来比较麻烦,系统元件数量越多越是如此。为了简化液压与气压传动系统的表示方法,通常采用图形符号来绘制系统原理图。图形符号脱离了元件的具体结构,只表示元件的具体职能,用它表达元件的作用和整个系统的原理简单明了,便于绘制。我国已制订出《液压与气动图形符号标准》(GB/T 786.1—93),见附录。图 0-3 就是按该标准绘制的图 0-2 所示系统工作原理图。

0.3 液压与气压传动的优缺点

与机械传动和电气传动比,液压传动有以下优点。

(1) 功率质量比大。在同等功率下,液压装置的体积小,质量轻,即功率密度大。如液压马达的体积约为同等功率电动机的 12%,质量约为同等功率电动机的 12% ~ 20%。

(2) 工作平稳。由于体积小、质量轻、惯性小,因而启动、制动迅速,变速、换向快速而无冲击,液压装置运动平稳。

(3) 无级调速。能在运行过程中进行无级调速,调速方便,调速范围大(可达 2000 : 1)。

(4) 自动控制。与电气、电子或气动控制相配合,对液体压力、流量和方向进行调节或控制,易于实现系统的远程操纵和自动控制。

(5) 过载保护。可以方便地用压力阀控制系统的压力,从而防止过载,避免事故发生。

(6) 元件寿命长。液压系统中使用的介质大都为矿物油,它对液压元件产生润滑作用,因而元件寿命较长。

(7) 标准化、系列化和通用化。液压元件标准化、系列化和通用化程度较高,有利于缩短液压系统的设计、制造周期,并可降低制造成本。

液压传动的缺点是。

(1) 易出现泄漏。液压系统的油压较高,液压油容易通过密封或间隙产生泄漏,引起液压介质消耗,并引起环境污染。

(2) 传动效率低。液压传动在能量传递过程中,常存在较多的能量损失(压力损失和流量损失等),使传动效率较低。

(3) 传动比不准确。由于传动介质的可压缩性、泄漏和管路弹性变形等因素影响,液压系统不能严格保证定比传动。

(4) 对温度敏感。油液的黏度随温度而变,黏度变化引起流量、泄漏量和阻力变化,容易引起工作机构运动不稳定。

(5) 制造成本高。为了减少泄漏,液压元件的制造精度要求较高,从而提高了制造成本。

气压传动与液压传动相比,有一些独特的优点。

(1) 空气可以从大气中取之不竭,无传动介质成本问题。将用过的气体排入大气,处理方便。传动介质泄漏后除引起部分功率损失外,不会严重影响工作,也不会污染环境。

(2) 空气的黏度很小,在管路中的压力损失远远小于液压传动系统,因此压缩空气便于集中供应和远程传输。

(3) 压缩空气的工作压力较低(一般为 $0.3\text{MPa} \sim 0.8\text{MPa}$), 因此对元件材料和制造精度的要求较低。

(4) 维护简单, 使用安全, 没有防爆问题, 并且便于实现过载保护。

(5) 气动元件采用相应材料后, 能够在恶劣的环境下(强振动、强冲击、强腐蚀和强辐射等)进行正常工作。

气压传动与电气、液压传动比有以下缺点。

(1) 气压传动装置的信号传递较慢, 仅限制在声速范围内, 所以它的工作频率和响应速度远不如电子装置, 并且信号要产生较大的失真和迟滞, 不便于构成较复杂的回路, 也难以实现生产过程的远距离控制。

(2) 空气的压缩性远远大于液压油的压缩性, 因此在动作的响应能力、速度的平稳性上不如液压传动。

(3) 气压传动出力较小, 且传动效率较低。

总的来说, 液压传动与气压传动的优点是主要的, 它们的缺点将随着科学技术的进步, 逐步得到克服或改善。

0.4 液压与气压传动的发展概况

液压传动技术的发展是与流体力学理论的发展密切相关的。1650 年帕斯卡提出了静止液体的压力传递规律——帕斯卡原理, 1686 年牛顿揭示了黏性液体的内摩擦定律, 18 世纪相继建立了流体力学的两个重要原理——连续性方程和伯努利能量方程, 这些理论成就为液压技术的发展奠定了基础。18 世纪末英国首先制造出世界上第一台水压机, 标志着液压传动技术开始进入工程领域。

但是, 液压传动技术在工业上被广泛采用并有较大幅度的发展却是 20 世纪中期的事情。在第二次世界大战期间, 军事工业迫切需要提供反应迅速、动作精确和输出功率大的液压传动及控制装置, 因而出现了以电液伺服系统为代表的高精度液压元件和控制系统, 促使液压传动技术得到了迅速发展。战后 50 年代, 液压传动技术快速转人民用工业, 在机床、工程机械、农用机械、汽车、船舶等行业中得到了大幅度的应用和发展。60 年代以后, 随着原子能、空间技术、电子技术等方面的迅速发展, 液压传动技术不断地向着更深、更广泛的领域发展, 已经形成了具有传动、检测和控制技术特征的一门完整的自动化技术。

20 世纪后期, 随着液压机械自动化程度的不断提高, 所用液压元件的数量急剧增加, 因而元件小型化、集成化就成为液压传动技术发展的必然趋势。随着传感器技术、微电子技术的发展以及与液压技术紧密结合, 出现了电液比例控制阀、电液比例控制泵和马达、数字阀等机电一体化器件, 使液压技术向着高度集成化和柔性化的方向发展。

随着液压技术与计算机技术的结合, 液压元件和液压系统的计算机辅助设计、计算机辅助测试、计算机仿真和计算机控制, 已成为液压传动技术发展的重要方向。利用计算机技术, 不仅提高了液压系统的设计和开发效率, 也提高了液压设备的自动化水平。

降低能耗提高效率是目前液压传动技术面临的重要课题, 也是提高它与机械传动和电气传动竞争力的重要措施。采用负荷传感、二次调节等技术设计新型节能元件和系统, 是当今液压传动技术的重要发展方向。

随着液压传动技术向高压、高速、大流量方向发展, 降低噪声、防止漏油便是突出的问题。近年来, 在新型密封和无泄漏管件的开发、液压元件和系统的优化设计等方面取得了重要的

进展。

液压传动技术在发展初期,一直以水作为传动介质。直到 20 世纪初,随着石油工业的兴起,出现了矿物油,水传动介质才被矿物油取代。由于矿物油具有黏度大、润滑性能好、防锈、相容性好等优良的综合理化性能,克服了水压传动的许多缺点,使液压元件和系统的性能得到了极大提高,从而推动了液压传动技术的发展。但 20 世纪 70 年代出现的“石油危机”,以及随后出现的全球“生态危机”使成熟的油压传动技术面临着严峻的挑战。虽然此后液压界掀起了高水基液的研究热潮,但是高水基液只能解决能源短缺而不能解决环保问题。水作为一种天然的清洁能源这才又进入了人们的视野,且其优点越来越得到认可。特别是近年来材料学、摩擦学、润滑理论与密封技术、计算技术、精密加工技术、表面处理等相关学科的发展,使水压传动技术的研究取得了突破性进展。目前,对水压传动技术的研究已经成为流体传动及控制技术领域国际学科前沿的重要研究方向,是国际液压行业新的经济增长点。

以空气作为工作介质传递动力做功很早就有应用。如利用自然风力推动风车、带动水车提水灌田,近代用于汽车的自动开关门、火车的自动抱闸、采矿用的风钻等。到了 20 世纪 50 年代,随着工业自动化的发展,气动技术已发展成一门新兴的技术。由于以空气为工作介质具有防火、防爆、防电磁干扰,抗振动、冲击、辐射和结构简单等优点,所以气动技术已成为实现生产过程自动化不可缺少的重要手段。近年来气动技术的应用领域已经从机械、冶金、采矿、交通运输等工业扩展到轻工、食品、化工、军事等各行各业。和液压传动技术一样,气动技术也已发展成为包含传动、控制与检测在内的自动化技术。随着微电子技术、计算机技术和传感器技术的发展,现代气动元件及系统正向着小型化、集成化、高速化、精确化、节能化和智能化的方向发展,为气动技术的广泛应用展现了更加广阔的前景。

第一篇 液压传动

第 1 章 流体力学基础知识

液压传动是以液体为工作介质的,因此,了解液体的基本性质,掌握液体静止和运动的主要力学规律,对于正确理解液压传动的基本原理以及合理设计和使用液压系统是十分必要的。

本章将简要叙述液压油的性质以及对液压油的要求和选用等内容,并将着重阐述液体静力学和动力学的几个重要方程式。

1.1 液压油

1.1.1 液压油的性质

1. 密度

单位体积液体的质量称为该液体的密度。体积为 V 、质量为 m 的液体的密度 ρ 为

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

矿物油型液压油的密度随温度的上升而有所减小,随压力的上升而稍有增大,但其变化量一般很小,可以认为是常值。一般液压油的密度为 900kg/m^3 。

2. 可压缩性

液体体积随作用压力的变化而发生相应变化的性质称为液体的可压缩性。其压缩性的大小用压缩系数 k ,即单位压力变化下的体积相对变化量来表示。如体积为 V 的液体,压力增大 Δp 时,体积减小 ΔV ,则压缩系数 k 定义为

$$k = -\frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V} \quad (1-2)$$

由于压力增大时液体的体积减小,为使 k 为正值,式中有一负号。 k 的倒数称为液体的体积弹性模量,以 K 表示,则

$$K = \frac{1}{k} = -\Delta p \frac{V}{\Delta V} \quad (1-3)$$

式中 K ——产生单位体积相对变化量所需要的压力增量。在实际应用中,常用来说明液体抵抗压缩能力的大小。

液体体积弹性模量的大小与温度、压力有关。温度增加时, K 值减小;压力增大时, K 值增大,但这种变化不呈线性关系,当 $p \geq 3\text{MPa}$ 时, K 值基本上不再增大。液压油的体积弹性模量 K 值一般在 $(1.2 \sim 2) \times 10^3\text{MPa}$ 之间,故对于一般液压系统,可认为液压油是不可压缩的。若液压油中混入空气时, K 值将大大减小,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。故在液压系统中应尽量减少油液中的空气含量。

3. 黏性

1) 黏性的意义

液体在外力作用下流动时,液体分子间的内聚力会阻碍分子相对运动,即分子之间产生一种内摩擦力,这一特性称为液体的黏性。黏性是液体阻止自身发生剪切变形的一种特性,它存在于液体内部。液体只有在流动(或有流动趋势)时才会呈现出黏性,静止液体是不呈现黏性的。由于液体黏性的存在,液体在流动过程中,因为要克服自身的内摩擦力,必然要做功。因此,液体的黏性是液体产生机械能损失的根源。黏性是液体的重要物理特性,也是选择液压油的依据。

液体流动时,由于液体和固体壁面之间的附着力以及液体的黏性,会使液体各液层间的速度大小不等。如图 1-1 所示,若两个平行平板之间充满液体,下平板不动,而上平板以速度 u_0 向右移动时,在附着力的作用下,紧贴于上平板和下平板的液体层速度分别为 u_0 和 0,而中间各层液体的速度则从上到下近似呈线性递减的规律变化。这是由于相邻两液体层间内摩擦力的作用,层与层之间互相影响,相对滑动。该内摩擦力对上层液体起阻滞作用,而对下层液体则起拖拽作用。

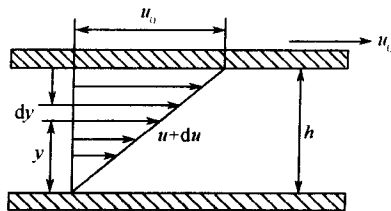


图 1-1 液体黏性示意图

实验测定结果表明,液体流动时相邻液层间的内摩擦力 F_f 与液层接触面积 A 、液层间的速度梯度 du/dy 成正比,即

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

式中 μ ——比例系数。

令 τ 为液层间在单位面积上的内摩擦力 τ ,则

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

这就是牛顿的液体内摩擦定律。

2) 液体的黏度

黏度是衡量液体黏性的指标。常用的黏度有三种:即动力黏度、运动黏度和相对黏度。

(1) 动力黏度 μ 。是表征液体流动时相邻液层间的内摩擦力 F_f 的内摩擦因数,由式(1-5)可知

$$\mu = \tau / \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

它是指液体在单位速度梯度下流动时单位面积上产生的内摩擦力,即为动力黏度,又称绝对黏度,单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕·秒)或 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ (牛·秒/米²)。

在 CGS 制中, μ 的单位为 P(泊),P 的 1/100 为 cP(厘泊)。其换算关系如下: $1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{P} = 10^3\text{cP}$

(2) 运动黏度 ν 。液体动力黏度 μ 和密度 ρ 之比值称为运动黏度 ν ,即

$$\nu = \mu / \rho \quad (1-7)$$

单位为 m^2/s (米²/秒)。

在 CGS 制中, ν 的单位为 St(沱),St 的 1/100 为 cSt(厘沱)。其换算关系如下: $1\text{m}^2/\text{s} =$

$$10^4 \text{St} = 10^6 \text{cSt} = 10^6 \text{mm}^2/\text{s}。$$

运动黏度 ν 并不具有表示液体黏度的物理意义,但工程中常用它来标识液体的黏度。如液压油的牌号,就是这种油液在 40°C 时的运动黏度 $\nu(\text{mm}^2/\text{s})$ 的平均值。如 L-AN32 液压油在 40°C 时运动黏度 ν 的平均值为 $32\text{mm}^2/\text{s}$ 。

(3) 相对黏度。由于液体的动力黏度和运动黏度直接测量比较困难,因此,工程上常用特定的黏度计在规定的条件下直接测量液体的黏度,即相对黏度又称条件黏度。根据测量条件的不同,各国采用的相对黏度的单位也不同。我国、德国及俄罗斯等国采用恩氏黏度 $^\circ\text{E}$ 。

恩氏黏度由恩氏黏度计测定。在一定温度 $t^\circ\text{C}$ 下,将 200cm^3 的被测液体装入底部有 $\phi 2.8\text{mm}$ 小孔的恩氏黏度计的容器中,液体在自重作用下流过小孔所需的时间 t_1 ,同体积的蒸馏水在 20°C 时流过同一小孔所需的时间 t_2 ,则该液体在 $t^\circ\text{C}$ 时的恩氏黏度 $^\circ\text{E}_t$ 为

$$^\circ\text{E}_t = t_1/t_2 \quad (1-8)$$

一般以 20°C 、 50°C 、 100°C 作为测定恩氏黏度的标准温度,由此而得来的恩氏黏度分别用 $^\circ\text{E}_{20}$ 、 $^\circ\text{E}_{50}$ 、 $^\circ\text{E}_{100}$ 表示。

恩氏黏度可方便地换算为运动黏度,换算关系式为

$$\nu = \left(7.31^\circ\text{E} - \frac{6.31}{^\circ\text{E}} \right) \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s}) \quad (1-9)$$

3) 调和油的黏度

液压油的黏度,对液压系统的工作性能有着十分重要的作用。工程实际中经常会出现现有油液的黏度不能满足系统要求的情况,这时可把两种不同黏度的油液混合起来使用,称为调和油。调和油的黏度一般可用经验公式计算:

$$^\circ\text{E} = \frac{a^\circ\text{E}_1 + b^\circ\text{E}_2 - c(^\circ\text{E}_1 - ^\circ\text{E}_2)}{100} \quad (1-10)$$

式中 $^\circ\text{E}_1$ 、 $^\circ\text{E}_2$ ——混合前两种油液的黏度($^\circ\text{E}_1 > ^\circ\text{E}_2$);

$^\circ\text{E}$ ——混合后的调和油的黏度;

a 、 b ——参与调和的两种油液各占的百分比($a\% + b\% = 100\%$);

c ——实验系数,如表 1-1 所列。

表 1-1 系数 c 的数值

a	10	20	30	40	50	60	70	80	90
b	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

4) 黏度和温度的关系

油液的黏度对温度十分敏感,当油液温度升高时,其黏度显著下降。油液黏度的变化直接影响液压系统的性能和泄漏量,因此希望油液的黏度随温度的变化越小越好。油液的黏度与温度之间的关系称为油液的黏温特性,不同的油液有不同的黏温特性。黏温特性一般可用黏温图、经验公式或黏温指数来描述,图 1-2 为几种液压油的黏温图。

5) 黏度与压力的关系

油液的黏度随压力的增加而增加。在压力小于 20MPa 时,油液的黏度变化不大;但当压力很高时,黏度将急剧增大。油液的黏度与压力之间的关系称为油液的黏压特性,不同的油液有不同的黏压特性。

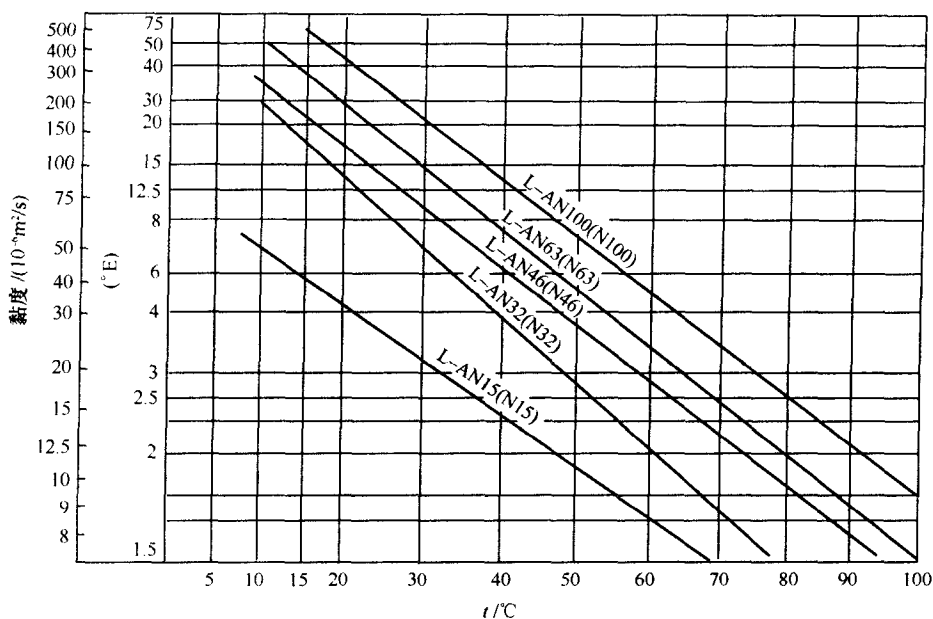


图 1-2 几种液压油的黏温图

油液的黏度随压力的变化关系式为

$$\nu_p = \nu_0 e^{bp} \quad (1-11)$$

式中 ν_p ——压力为 p 时油液的运动黏度($10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$);

ν_0 ——1 个大气压下的油液的运动黏度($10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$);

b ——黏度压力系数,对一般液压油 $b = 0.002 \sim 0.003$ 。

4. 其他特性

液压油还有其他一些物理化学性质,如抗燃性、抗氧化性、抗泡沫性、抗乳化性、防锈性、润滑性、导热性、稳定性(热稳定性、氧化稳定性、水解稳定性、剪切稳定性等)以及相容性(主要指对密封材料、软管等不侵蚀、不溶胀的性质)等,这些性质对液压系统的工作性能有重要影响。不同品种的液压油,这些性质的指标也不同,具体应用时可查油类产品手册。

1.1.2 对液压油的要求和选用

1. 液压系统对液压油的基本要求

液压系统中,油液必须完成三个基本功能:传递动力、润滑和冷却。因此油液的性能会直接影响液压传动的性能,如工作的可靠性、灵敏性、工况的稳定性、系统的效率及零件的寿命等。油液应具备如下性能。

- (1) 适当的黏度,黏温特性好。
- (2) 良好的润滑性。
- (3) 质地纯净,杂质少。
- (4) 良好的化学稳定性。
- (5) 抗泡沫性好,抗乳化性好。
- (6) 对金属和密封件有良好的相容性。
- (7) 热膨胀小,比热容和传热系数高。

- (8) 凝固点低,闪点和燃点高。
- (9) 无毒性,成本低。

2. 选用

液压油的选用应满足液压系统的要求。液压油的黏度对液压系统的性能有很大的影响。在一定条件下,选用油液的黏度过高或过低,都会影响系统的正常工作。黏度过高,会导致液体流动压力损失增大及发热量增大,从而降低液压系统的效率;黏度过低,会使泄漏量加大,导致系统的容积效率下降。

在选择液压油时要根据具体情况或系统的要求来选用黏度合适的油液。选择时一般考虑以下几个方面。

- (1) 液压系统的工作压力。工作压力较高的液压系统宜选用黏度较大的液压油,以减少系统泄漏;反之,可选用黏度较小的液压油。
- (2) 环境温度。环境温度较高时宜选用黏度较大的液压油。
- (3) 运动速度。液压系统执行元件运动速度较高时,为减小液流的功率损失,宜选用黏度较低的液压油。
- (4) 液压泵的类型。液压系统中,液压泵对液压油的黏度最为敏感。一般要根据液压泵的类型及要求来选择液压油的黏度,如表 1-2 所列。

表 1-2 按液压泵类型推荐用液压油的黏度

液压泵类型		油液黏度 $\nu/(\text{mm}^2/\text{s})$	
		液压系统温度 5℃ ~ 40℃	液压系统温度 40℃ ~ 80℃
轴向柱塞泵		43 ~ 77	70 ~ 172
径向柱塞泵		30 ~ 49	65 ~ 270
齿轮泵		30 ~ 70	105 ~ 190
叶片泵	$p < 7.0\text{MPa}$	30 ~ 49	43 ~ 77
	$p \geq 7.0\text{MPa}$	54 ~ 70	65 ~ 99

1.2 液体静力学

液体静力学是研究液体处于静止时的平衡规律及其应用。这里所说的静止,是指液体内部质点之间没有相对运动,至于液体整体,完全可以如刚体一样进行各种运动。

1.2.1 静压力及其特性

1. 液体的静压力

作用在液体上的力可以分为两种,即质量力和表面力。质量力是指作用于液体内部每一个质点上,且与液体质量成正比的力,如重力、惯性力等。表面力是指作用在液体外表面,且与液体表面积成正比的力。表面力可以是其他物体作用在液体上的力(外力),也可以是一部分液体作用在另一部分液体上的力(内力)。一般情况下,表面力可以分解为法向力和切向力。只有液体之间有相对运动时才有切向力,在静止的液体中只有法向力。静止液体在单位面积上所受的 法向力称为静压力。液体内某点处微小面积 ΔA 上作用有法向力 ΔF ,当 ΔA 趋近于 0 时, $\Delta F/\Delta A$ 的极限就定义为该点处的静压力 p ,即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \tag{1-12}$$