

国家“十一五”应用型人才培养规划教材

液压与 气压传动

A decorative graphic on the right side of the cover. It features a stylized sun with red rays emanating from a central point. Below the sun is a large, dark grey gear. A thick, dark grey arrow points upwards and to the right, passing through the center of the gear. The entire graphic is set against a light yellow background.

YEYAYUQIYACHUANDONG

邓英剑 刘志勇 主 编
陈义庄 朱红玲 副主编
刘忠伟 主 审

 国防工业出版社
National Defense Industry Press

TH137/141

2007

国家“十一五”应用型人才培养规划教材

液压与气压传动

邓英剑 刘志勇 主编

陈义庄 朱红玲 副主编

刘忠伟 主审

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书共 16 章。章前有导读,章后有小结,并有自我检测题及其解答,同时附有习题。本书主要内容包括液压与气压传动的共性与特点,液压与气压传动元件的结构、工作原理及应用,液压与气动基本回路和典型系统的组成与分析,液压系统的传动设计,液压与气动系统的安装、使用与维护等。

本教材在编写过程中力求少而精,突出实用性和先进性的原则,使液压传动与气压传动进行有机结合,切实起到帮助学生灵活运用知识,培养学生解决实际问题的能力。

本书可作为普通高等院校、高等职业技术学院、高等专科学校、职工大学、函授学院、成人教育学院等机械类及机电类专业的教学用书,也可供从事液压与气动的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动/邓英剑,刘志勇主编. —北京:国防工业出版社,2007.8
国家“十一五”应用型人才培养规划教材
ISBN 978-7-118-05265-7

I. 液... II. ①邓...②刘... III. ①液压传动—高等学校—教材②气压传动—高等学校—教材 IV. TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 103256 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18¼ 字数 420 千字

2007 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—5000 册 定价 34.00 元

(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

本书立足于突出实用性和先进性的原则,基于理论联系实际的思想,以培养技术应用型人才为目标,在汲取同类教材精华的基础上,结合作者多年来教学实践和科研工作的经验精心编写而成。

全书分为 16 章。章前有导读,章后有小结,并有自我检测题及其解答,同时附有习题。主要介绍了液压与气压传动的共性与特点,液压与气压传动元件的结构、工作原理及应用,液压与气动基本回路和典型系统的组成与分析,液压系统的传动设计,液压与气动系统的安装、使用与维护等。

本书由邓英剑、刘志勇主编,陈义庄、朱红玲副主编。第一、五、七、八、九章由邓英剑编写,第二、四章由刘志勇编写;第三章由邓根清编写;第六章由张志明编写;第十章由陈波编写;第十一章由刘自辉编写;第十二、十三、十四章由陈义庄编写;第十五、十六章由朱红玲编写。各章的导读、小结、自我检测题及其解答和习题均由邓英剑编写。全书由邓英剑统稿。

本书由湖南工业大学刘忠伟主审,他对本书编写提出了许多好的意见和建议,作者在此表示衷心的感谢。

本书可作为普通高等院校、高等职业技术学院、高等专科学校、职工大学、函授学院、成人教育学院等机械类及机电类专业的教学用书,也可供从事液压与气动的工程技术人员参考。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在错误,恳请同仁和广大读者批评指正。

编 者

2007 年 6 月

目 录

第一篇 液压与气压传动概述

第一章 绪论	1
第一节 液压与气压传动的工作原理及工作特性	1
第二节 液压与气压传动系统的组成和图形符号	3
第三节 液压与气压传动的特点	5
第四节 液压与气压传动的应用及发展	5
小结	6
自我检测题及其解答	7
习题一	7

第二篇 液 压 传 动

第二章 液压传动基础	8
第一节 液压油	8
第二节 液体静力学基础	15
第三节 液体动力学方程	18
第四节 液体流动时的压力损失	23
第五节 液体流经小孔或间隙的流量计算	24
第六节 液压冲击与空穴现象	28
小结	29
自我检测题及其解答	30
习题二	30
第三章 液压动力元件	32
第一节 概述	32
第二节 齿轮泵	35
第三节 叶片泵	40
第四节 柱塞泵	45

第五节 螺杆泵	50
第六节 液压泵的选用	51
小结	53
自我检测题及其解答	53
习题三	54
第四章 液压执行元件	55
第一节 液压马达	55
第二节 液压缸	60
小结	72
自我检测题及其解答	72
习题四	74
第五章 液压控制元件	75
第一节 液压阀的分类及基本要求	75
第二节 方向控制阀	76
第三节 压力控制阀	88
第四节 流量控制阀	103
第五节 叠加阀和插装阀	108
第六节 液压阀的选择与使用	112
小结	117
自我检测题及其解答	118
习题五	119
第六章 液压辅助元件	121
第一节 蓄能器	121
第二节 滤油器	123
第三节 油箱	128
第四节 其他辅件	129
小结	136
自我检测题及其解答	137
习题六	138
第七章 液压基本回路	139
第一节 方向控制回路	139
第二节 压力控制回路	142
第三节 调速回路	150
第四节 其他基本回路	163
小结	171

自我检测题及其解答	171
习题七	172
第八章 典型液压系统	174
第一节 阅读液压系统图的一般步骤	174
第二节 组合机床动力滑台液压系统	174
第三节 液压机液压系统	178
第四节 数控机床中 JS01 型工业机械手液压系统	181
第五节 注塑机液压系统	186
小结	190
自我检测题及其解答	190
习题八	191
第九章 液压系统的设计计算	192
第一节 概述	192
第二节 液压系统的设计	192
第三节 液压系统设计计算举例	200
小结	207
习题九	207
第十章 液压系统的安装和使用	208
第一节 液压系统的安装与调试	208
第二节 液压系统的使用和维护保养	211
小结	213
习题十	213
第十一章 液压伺服和电液比例控制技术	214
第一节 液压伺服控制	214
第二节 电液比例控制	221
小结	225
自我检测题及其解答	225
习题十一	226

第三篇 气压传动

第十二章 气压传动基础	227
第一节 空气的物理性质	227
第二节 气体状态方程	229
第三节 气体流动规律	231

小结·····	234
自我检测题及其解答·····	235
习题十二·····	235
第十三章 气源装置及气动辅件·····	236
第一节 气源装置·····	236
第二节 气动辅助元件·····	238
小结·····	245
自我检测题及其解答·····	245
习题十三·····	246
第十四章 气动执行元件·····	247
第一节 气缸·····	247
第二节 气马达·····	253
小结·····	254
自我检测题及其解答·····	254
习题十四·····	254
第十五章 气动控制元件·····	255
第一节 方向控制阀·····	255
第二节 压力控制阀·····	258
第三节 流量控制阀·····	261
第四节 气动逻辑元件·····	263
小结·····	266
自我检测题及其解答·····	266
习题十五·····	266
第十六章 气动回路与气压传动系统·····	267
第一节 气动回路·····	267
第二节 气压传动系统·····	272
小结·····	278
自我检测题及解答·····	278
习题十六·····	279
附录 常用液压与气动图形符号·····	280
参考文献·····	284

第一篇 液压与气压传动概述

第一章 绪 论

【导读】液压与气压传动(又称液压气动技术)是机械设备中发展速度最快的技术之一,它是以流体(液压油或压缩空气)作为工作介质来进行能量转换、传递和控制的学科。本章介绍了液压与气压传动的工作原理、工作特性、系统组成、图形符号、特点、应用及其发展。

第一节 液压与气压传动的工作原理及工作特性

一、液压传动的工作原理及工作特性

1. 液压传动的工作原理

对于不同的液压装置和设备,它们的液压传动系统虽然不同,但液压传动的基本工作原理是相同的。下面以如图 1-1 所示的液压千斤顶为例,介绍其工作原理。图中大小两个缸体 5 和 3 的内部分别装有大活塞 6 和小活塞 2。当向上提起手动杠杆 4 时,小活塞就被带动上升,于是小缸体 3 的下腔密封容积增大,腔内压力下降,形成部分真空,油箱中的油液在大气压力的作用下推开进油单向阀 1 进入小缸的下腔,完成一次吸油动作。当压下手动杠杆 4,小活塞下移,小缸下腔的密封容积减小,腔内压力升高,这时进油单向阀 1 关闭,小缸下腔的压力油顶开进油单向阀 7 进入大缸体 5 的下腔,推动大活塞带动重物一起上升一段距离。如此反复地提压手动杠杆 4,就能使重物不断上升,达到起重的目的。

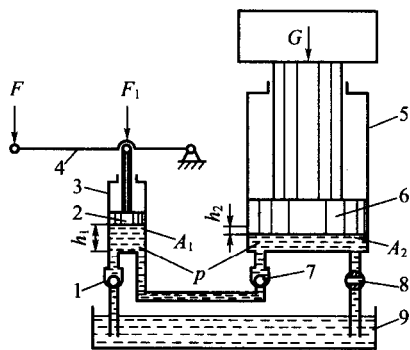


图 1-1 液压千斤顶工作原理图

- 1—进油单向阀; 2—小活塞; 3—小缸体;
4—手动杠杆; 5—大缸体; 6—大活塞;
7—排油单向阀; 8—截止阀; 9—油箱。

若将截止阀 8 打开,则在重物自重的作用下,大缸中的油液流回油箱,大活塞落回到原位。

分析液压千斤顶的工作过程,可知液压传动是依靠液体在密封容积变化中的压力能来实现运动和动力传递的。液压传动装置本质上是一种能量转换装置,它先将机械能转换为便于输送的液压能,然后将液压能转换为机械能作有用功。

2. 液压传动的工作特性

当大活塞上有重物负载时,其下腔的油液将产生一定的压力 p ,即

$$p = G/A_2 \quad (1-1)$$

根据流体力学中的帕斯卡定律“在密闭容器内,施加于静止液体上的压力将以等值同时传动液体各点”,若要顶起重物,则在小活塞下腔就必须产生一个等值的压力 p ,即小活塞上施加的力 F_1 为

$$F_1 = pA_1 = GA_1/A_2 \quad (1-2)$$

式中: A_1 、 A_2 分别为大小活塞 6、2 的面积。

可见在活塞面积 A_1 、 A_2 一定的情况下,液体压力 p 取决于重物负载 G ,而小活塞上施加的力 F_1 则取决于压力 p 。所以,负载越大,液体压力 p 越高,小活塞上所需要施加的力 F_1 也就越大;反之,如果空载工作,且不计摩擦力,则液体压力 p 和小活塞上施加的力 F_1 都为零。即有了负载,液体才会有压力,并且压力大小取决于负载。简单地说,液压传动中液体压力取决于负载。实际上,液压传动中液体的压力相当于机械传动中机械构件的应力。机械构件应力是取决于负载的,同样液体的压力也取决于负载。但是机械构件在传动时可以承受拉、压、弯、剪等各种应力,而液压传动中液体只能承受压力,这是两者的重要区别。

另外,由于小活塞到大活塞之间为密封工作容积,所以小活塞向下压出油液的体积必然等于大活塞向上升起缸体内扩大的体积,即 $A_1 h_1 = A_2 h_2$ 。

上式两端同时除以活塞移动的时间 t 得

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

令 $q = v_1 A_1$,其中 q 表示小活塞以速度 v_1 运动时,单位时间内从小缸体 3 中排出液体的体积,称为流量。流量 q 进入大缸时,大活塞 6 的运动速度为

$$v_2 = q/A_2 \quad (1-4)$$

即大活塞 6 的运动速度取决于进入活塞缸的流量。流量越大,速度越快,反之亦然。流量为零,速度也为零。简单地说,速度取决于流量。

液压系统的压力和外界负载,速度和流量的这两个关系称作液压传动的两个工作特性。这两个特性很重要,随着课程的深入,要进一步加深对它的理解。

二、气压传动的工作原理

气压传动与液压传动的基本工作原理是相似的,它利用空气压缩机将电动机、内燃机或其他原动机输出的机械能转变为空气的压力能,然后在控制元件的控制及辅助元件的配合下,利用执行元件把空气的压力能转变为机械能,从而完成直线或回转运动并对外做功。下面以剪切机的工作过程为例来说明其工作原理。图 1-2 所示是气动剪切机工作原理图。当工料 11 由上料装置(图中未画)送入剪切机的规定位置时,将行程阀 8 顶开,换向阀 9 的下腔通过行程阀 8 与大气相通,使换向阀 9 的阀芯在弹簧力的作用下向下移动。由空气压缩机 1 产生的压缩空气,经过初次净化处理后储藏在储气罐 4 中,经过分水滤气器 5、减压阀 6 和油雾器 7 和换向阀 9,进入汽缸 10 的下腔。汽缸 10 上腔的压缩空

气通过换向阀 9 排入大气。此时,汽缸活塞在气压力的作用下向上运动,带动剪刀将工料 11 剪断。工料剪下后,马上与行程阀 8 脱开,行程阀复位,阀芯将排气通道堵死,换向阀 9 下腔的气压升高,迫使换向阀 9 的阀芯上移,气路换向。压缩空气进入汽缸 10 的上腔,汽缸 10 的下腔排气,汽缸活塞下移,带动剪刀复位,准备第二次下料。

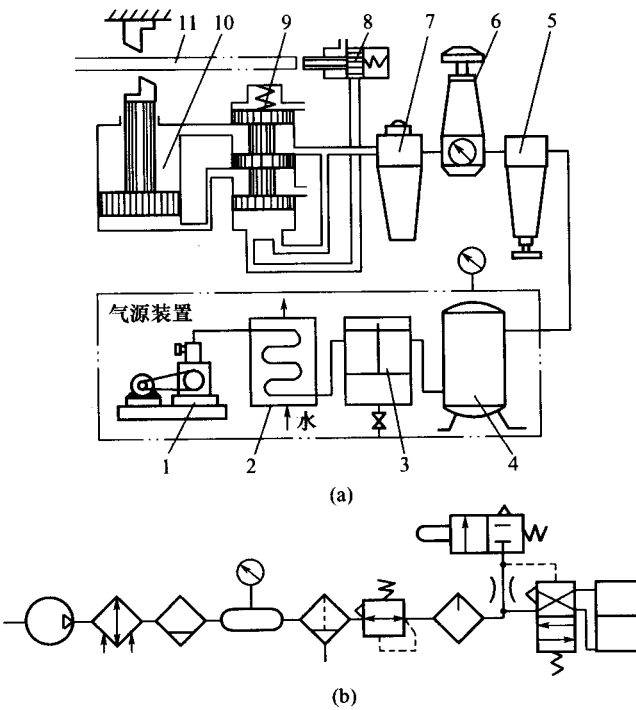


图 1-2 气动剪切机工作原理图

(a) 结构原理图; (b) 图形符号。

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

第二节 液压与气压传动系统的组成和图形符号

一、液压与气压系统的组成

图 1-3 所示为一机床工作台的液压传动系统,它由液压泵、换向阀、溢流阀、节流阀、液压缸、油箱以及连接管道等组成。

在图 1-3(a)中,液压泵 3 由电动机(图中未示出)带动旋转,从油箱 1 经过滤器 2 过滤后吸油,油液流往液压泵。液压泵排出的压力油经节流阀 5 和换向阀 6 进入液压缸 7 的左腔,推动活塞连同工作台 8 向右移动。这时,液压缸右腔的油通过换向阀 6 和回油管返回油箱。

若将换向阀手柄扳到左边位置(见图 1-3(b)所示状态),则压力油经换向阀进入液压缸的右腔,推动活塞连同工作台向左移动。这时,液压缸左腔的油亦经换向阀和回油管

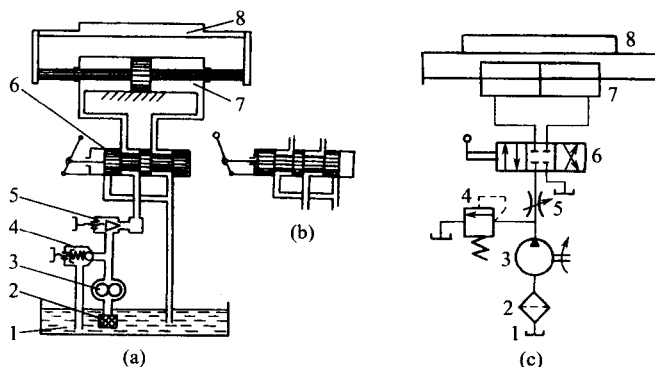


图 1-3 机床工作台液压传动系统

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

返回油箱。

工作台的移动速度是通过节流阀来调节的。改变节流阀 5 的开口大小,可以改变进入液压缸的液压油流量,从而控制工作台的移动速度,多余的液压油经溢流阀 4 和溢流管道排回油箱。当节流阀开口较大时,进入液压缸的流量较大,工作台的移动速度较快;反之,当节流阀开口较小时,工作台移动速度则较慢。

调节溢流阀弹簧的预压力能调整液压泵出口的油液压力(其值略高于液压缸的工作压力),并让多余的油液在相应压力下打开溢流阀,经回油管流回油箱。由于系统的最高工作压力不会超过溢流阀的调定值,所以溢流阀对系统起到过载保护的作用。

从以上例子可以看出,液压与气压传动系统均由以下四个部分组成。

(1) 动力元件。它将原动机(电动机)输入的机械能转换成为液体或气体的压力能,其作用是为系统提供动力,也称为能源装置,一般最常见的形式是液压泵或空气压缩机。

(2) 执行元件。它是将液体或气体的压力能转换成直线式或回转式机械能输出的能量转换装置,以驱动工作部件。可以是做直线运动的液压缸,也可能是做回转运动的液压马达。

(3) 控制元件。它是控制系统中执行元件的流量、压力和方向的。如图 1-3 所示机床工作台的液压传动系统中,控制液体流量的节流阀(流量阀)、控制液体压力的溢流阀(压力阀)和控制液流方向的换向阀(方向阀)。这些元件是保证系统正常工作不可缺少的组成部分。

(4) 辅助元件。保证系统正常工作所需要的辅助装置,包括油箱、管道、过滤器以及各种指示仪表等。

二、液压与气压传动系统的图形符号

在图 1-3(a)中,组成液压系统的各个元件是用半结构式图形画出来的,这种图直观性强,容易理解,当系统发生故障时,根据此图检查也较方便,但难于绘制,特别当系统中元件较多时,绘制更不方便。为简化液压与气动原理图的绘制,我国制订了一套液压与气动图形符号(GB/T 786.1—93),将各液压与气动元件都用相应的符号表示。这些符号只表示相应元件的职能、连接系统的通路,不表示元件的具体结构和参数,并规定各符号所表示的都是相应元件的静止位置或零位置,称这种符号为图形符号(也称为职能符号)。

图 1-3(c)即为用职能符号绘制的上述机床工作台的液压系统工作原理图(职能符号图)。由于这种图图画简洁,油路走向清楚,对系统的分析、设计都很方便,因此现在世界各国采用得较多(具体表示方法大同小异)。如果有些元件(如某些自行设计的非标准件)的职能无法用这些符号表示时,仍可采用结构示意图。常用液压与气动元件的图形符号在以后讲述具体元件时还要提到。GBT 786.1—93 液压与气动图形符号见本书附录。

第三节 液压与气压传动的特点

一、液压与气压传动的优点

(1) 质量轻,体积小,反应快。无论是液压传动元件还是气压传动元件,在输出相同的功率条件下,体积和质量相对较小,因此惯性力小,动作灵敏。如在相同功率情况下,液压马达的外形尺寸和质量为电动机的 12% 左右。在中、大功率以及实现直线往复运动时,这一优点尤为突出。这对制造自动控制系统很重要。

(2) 可在大范围内实现无级调速,且调节方便。还可获得很低的速度。

(3) 操作简单,调整控制方便,易于实现自动化。与电子技术结合更易于实现各种自动控制和远距离操纵。

(4) 易于实现“三化”,即系统化、标准化和通用化,便于设计、制造和使用。

(5) 便于实现过载保护,使用安全、可靠。

液压传动与气压传动工作介质不同,因此它们还具有不同的优点。例如,液压传动可输出较大的推力和转矩,传动平稳;液压系统能够自润滑,因此液压元件使用寿命长,而气动元件在气压传动中需设置给油润滑装置。气压传动的优点是:工作介质是空气,取之不尽,用之不竭,用后可直接排入大气中,干净而不污染环境,特别是在食品加工、纺织、印刷、精密检测等高净化、无污染场合,有很好的发展前途。因空气的黏度很小,约为油黏度的万分之一,其损失也很小,因此气压传动的效率也高于液压传动,适宜于远距离输送和集中供气。

二、液压与气压传动的缺点

(1) 元件制造精度要求高,因此加工和装配的难度较大,产品成本提高,使用和维护的要求较高。

(2) 由于传动介质的可压缩性和泄漏等因素的影响,不能保证严格的传动比。

(3) 系统出现故障时不易查出原因。

总的说来,液压与气压传动由于优点比较突出,而某些缺点随着生产技术的不断发展、提高,正在逐步得到克服,故在工农业各个部门获得广泛应用。

第四节 液压与气压传动的应用及发展

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 年牛顿提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。第二次世界大战期间,在一些武器装备上用上了功率大、反应快、动作准的液压传动和控制装置,大大提高了武器装备的性能,也大大促进了液压与气压传动本身的发展。战后,液压技术迅速由军事转入民用,在机械制造、工程机械、锻压机械、冶金机械、汽车、船舶等行业中得到了广泛的应用和发展。特别是在 20 世纪 60 年代以后,随着原子能技术、空间技术、计算机技术等迅速发展,液压技术也得到了很大发展,渗透到国民经济的各个领域之中,在军工、冶金、工程机械、农机、汽车、轻纺、船舶、石油、航空和机床工业中都得到了普遍应用。

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。

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。

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,气动技术已发展成为一门新兴的技术。由于以空气为工作介质具有防火、防爆、防电磁干扰、抗振动、抗冲击及结构简单等优点,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。

我国的液压与气动工业是在建国初期,从仿制苏联产品起步,附属于机床制造等主机行业,而逐步发展起来的。其产品最初应用于机床和锻压设备,后来又用于拖拉机和工程机械。自 1964 年开始从国外引进液压元件生产技术,同时自行设计液压产品以来,我国的液压件生产已形成系列,并在各种机械设备上得到了广泛的使用。在 20 世纪 60 年代中期开始建立气动元件厂,1984 年组建了行业技术归口研究机构——无锡气动技术研究所。

目前,我国机械工业在认真消化、推广从国外引进的先进液压与气压技术的同时,大力研制开发国产液压与气压传动的新产品,加强产品质量可靠性和新技术应用的研究,积极采用国际标准和执行新的国家标准。可以预见,随着我国社会主义现代化建设的发展,液压与气动技术必将会有新的飞跃,它在各个工业部门的应用也将会越来越广泛。

小 结

(1) 液压气动技术是以流体(液压油或压缩空气)作为工作介质来进行能量转换、传

递和控制的学科。

(2) 液压传动的两个工作特性(液压系统的压力和外界负载,速度和流量的两个关系)。

(3) 液压与气压传动的工作原理。

(4) 液压气压系统的四大组成部分及其作用。

(5) 液压系统的图形符号。液压与气压传动元件和系统原理图按 GBT 786.1—93 绘制,系统中元件符号均连接于静态(或零工位)位置。

自我检测题及其解答

【题目】如图 1-4 所示的两个相互连通的液压缸,已知大缸内径 $D = 100\text{mm}$,小缸内径 $d = 20\text{mm}$,若在大缸活塞上放置 5000kg 的物体,问在小缸活塞上需加多大的力 F 才能使大活塞顶起重物?

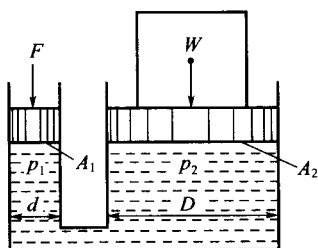


图 1-4 液压缸

【解答】令大活塞的面积为 A_2 ,小活塞的面积为 A_1 ,则

$$F = WA_1/A_2 = W \frac{\pi}{4} d^2 / \frac{\pi}{4} D^2 = Wd^2/D^2 = 5000 \times 20^2/100^2 = 200\text{kg}$$

习题一

1-1 什么是液压气动技术?简述它们的工作原理。

1-2 液压与气压传动系统由哪些组成部分?并说明各组成部分的作用。

1-3 绘制几个液压与气动元件的图形符号。

第二篇 液 压 传 动

第二章 液压传动基础

【导读】液压传动是利用液压油(通常都是矿物油)作为工作介质来传递运动和动力的,因此液压油质量的好坏,尤其是其力学性质对液压系统工作性能影响很大。所以在研究液压系统之前,必须了解液压油的污染及其控制方面的知识,同时对液压油的力学性质也进行深入地了解,以便进一步理解液压传动的基本原理,为更好地进行液压系统的分析与设计打下基础。

第一节 液 压 油

一、液压油的性质

1. 液体的密度

单位体积液体的质量称为液体的密度,通常用 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ 表示,且

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

式中: V 为液体的体积(m^3); m 为液体的质量(kg)。

密度是液体的一个重要的物理参数,它的大小随着液体的温度或压力的变化会产生一定的变化,但其变化量较小,一般可忽略不计。

2. 液体的可压缩性

液体受压力作用而发生体积减小的性质称为液体的可压缩性。压力为 p_0 时体积为 V_0 的液体,当压力增大 Δp 时,由于液体的可压缩性,体积要减小 ΔV 。液体的可压缩性用体积压缩率 k 表示

$$k = - \frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V_0} \quad (2-2)$$

k 的物理意义是:单位压力变化下的体积相对变化率。常用液压油的 $k = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ 。

在工程实际应用中,常用体积弹性模量 K 值($K = 1/k$)来表示液体抵抗压缩能力的大小。液压油在正常工作温度范围内, K 值会有 5% ~ 25% 的变化;压力增大, K 值也增大,但这种变化,不呈线性关系,当压力高于 3.0MPa 时, K 值基本上不再增大。液压油中如混有空气时, K 值将大大减小。在常温(20℃)和常压(标大气压)下,纯净石油基液

压油的体积弹性模量为 $1.4\text{GPa} \sim 2.0\text{GPa}$, 其可压缩性是钢的 100 倍 $\sim$ 150 倍, 是橡胶和尼龙的 $1/4 \sim 1/20$ 。在一般情况下, 由于压力变化引起液体体积的变化很小, 可认为液体是不可压缩的。

3. 液体的黏性

1) 黏性的意义

当液体在外力作用下流动时, 由于液体本身分子之间内聚力以及与固体壁面的附着力的存在, 使液体内部各处的速度产生差异。如图 2-1 所示, 液体在管路中流动时速度并不相等, 紧贴管壁的液体速度为零, 管路中心处的速度最大。如果将管中液体的流动看成是许多无限薄的同心圆筒形的液体层的运动, 运动较慢的液体层阻滞运动较快的液体层, 而运动较快的液体层又带动运动较慢的液体层, 这种液体层之间相互的作用类似与固体之间的摩擦过程, 因而在液体之间产生摩擦力。由于这种摩擦力是发生在液体内部, 所以称为内摩擦力。液体的这种性质, 称为液体的黏性。液体只有流动时, 才会呈现黏性, 而静止的液体不呈现黏性。它是液体一个非常重要的特征, 是选择液压油的主要依据。黏性的大小用黏度来衡量。

2) 液体黏度

常用的黏度有绝对黏度、运动黏度、相对黏度三种。

(1) 绝对黏度

绝对黏度也称动力黏度, 用 μ 表示。图 2-2 所示两平行平板之间充满液体, 上平板以速度 u_0 向右动, 下平板固定不动。紧贴上平板的液体在吸附力作用下跟随上平板以速度 u_0 向右运动, 紧贴下平板的液体在黏性作用下保持静止, 中间液体的速度由上至下逐渐减小。当两平行板距离减小时, 速度近似按线性规律分布。

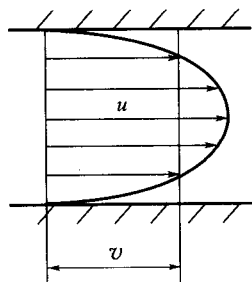


图 2-1 液体在管路内的速度分布

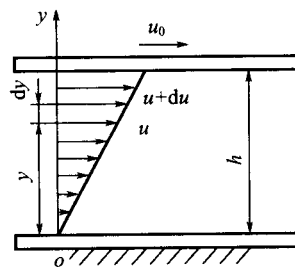


图 2-2 液体黏性示意图

实验表明(牛顿内摩擦定律), 液体流动时相邻层间的内摩擦力 F 与液层间接触面积 A 、液层间相对速度 du 成正比, 而与液层间的距离 dy 成反比。可用下式表示

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2-3)$$

若用单位面积上的摩擦力, 即切应力 τ 来表示液体黏性, 则上式可改成

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2-4)$$

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)。 du/dy 为速度梯度, 即液层相对运动速度对液层间距离的变化率。