

中等专业学校适用

工程机械实用液体传动

王玉卿 编著

43

机械工业出版社

TH137-43⁹²
1
3
TH137-43
1
2

中等专业学校适用

工程机械实用液体传动

王玉卿 编著

B386.1/16



机械工业出版社

本书着重实际应用。在系统讲解理论知识的基础上，理论联系实际，对各类控制阀、液压泵、液压缸、变矩器等元件的结构、工作原理、拆装方法、使用维修、故障分析与排除等都作了具体论述。对于常见工程机械的液压传动系统、转向系统、控制系统也作了详细介绍。

本书可作为中等专业学校教材，也可作技工学校、机械技术培训用书和机械管理、使用、维修人员及工厂技术人员的参考资料。

工程机械实用液体传动

王玉卿 编著

*

责任编辑：孙祥根 版式设计：冉晓华

封面设计：姚毅 责任校对：熊天荣

责任印制：王国光

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

机械工业出版社发行·机械工业出版社书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $20 \frac{1}{4}$ · 字数 496 千字

1991 年 7 月北京第一版 · 1991 年 7 月北京第一次印刷

印数 00,001—25,000 · 定价：6.80 元

*

ISBN 7-111-02892-9/TH·305

前 言

本教材是根据长期的教学、实践经验,结合当前国内工程机械上液压技术的应用的情况编写的,适合作中等专业学校的教材,也可作初级、中级机械专业技术人员的业务参考资料。

本书采用我国最新颁布的法定计量单位和规定的物理量名称及符号,结构图采用现行国家制图标准。内容上从实际应用出发,针对目前我国军队和地方使用较多的各种工程机械,着重写了液体传动的基本知识、主要液压元件的结构和工作原理、元件拆装方法、各种液压系统及系统的使用维护原则等。对于工程机械上应用较多的液力变矩器,从工作原理、结构及故障排除等方面也作了详细介绍。

该书由朱留贵同志主审,机械电子工业部教材编辑室主任高文龙、总参工程兵部李志学、周华生、陈继新、孙臣兴、王德朝、顾建强等同志参加了审稿工作,对该书原稿提出了许多建议和修改意见。该书在编写过程中,曾得到总参工程兵部技术处、科研所、有关部队、工厂的大力支持,作者在此一并致以谢意。

由于本人水平有限,加之时间仓促,书中难免有不妥之处,衷心希望广大读者提出宝贵意见。

作 者
1990年12月

目 录

第一篇 液 压 传 动

第一章 液压传动概论	1	第三节 滤油器	159
第一节 液压传动的基本原理和组成	1	第四节 蓄能器	163
第二节 图形符号和液压系统图	4	第五节 油箱	165
第三节 液压传动的优缺点	6	第六节 压力表开关和压力继电器	167
第四节 液压传动的应用和发展	6	习题	168
习题	8	第七章 液压基本回路	170
第二章 液压传动基础知识	9	第一节 压力控制回路	170
第一节 液压油的性质和选用	9	第二节 速度控制回路	171
第二节 液体静力学常识	15	第三节 多缸动作回路	174
第三节 液体动力学方程	17	习题	177
第四节 压力损失的计算	25	第八章 液压传动系统	178
第五节 液体经小孔和缝隙的流量	34	第一节 推土机液压传动系统	179
第六节 液压系统中常见的不利现象	39	第二节 装载机液压传动系统	191
习题	41	第三节 单斗挖掘机液压传动系统	197
第三章 液压泵与液压马达	43	第四节 汽车起重机液压传动系统	209
第一节 主要技术性能参数	43	第五节 几种新型工程机械液压传动系统	214
第二节 齿轮泵与齿轮马达	45	习题	218
第三节 叶片泵与叶片马达	66	第九章 液压随动系统	220
第四节 柱塞式液压泵与马达	75	第一节 液压随动系统的原理与特点	220
第五节 大力矩液压马达	81	第二节 液压随动系统在转向系统中的应用	223
习题	92	习题	241
第四章 液压缸	93	第十章 液压系统的使用、维修及故障分析	242
第一节 基本类型和工作原理	93	第一节 液压泵的使用与维修	242
第二节 液压缸的结构	96	第二节 液压缸的使用与维修	245
习题	103	第三节 控制阀的故障分析与维修	249
第五章 控制调节装置	106	第四节 密封的维护	251
第一节 方向控制阀	106	第五节 液压油的维护	253
第二节 压力控制阀	120	第六节 液压系统的调试及典型综合故障分析	256
第三节 流量控制阀	136	习题	260
第四节 多路换向阀	142		
习题	146		
第六章 辅助装置	147		
第一节 密封及密封元件	147		
第二节 油管 and 管接头	153		

第二篇 液 力 传 动

第十一章 液力传动概论	261	第十三章 液压控制系统	290
第一节 液力传动的基本原理	261	第一节 变速箱及液压换档离合器	290
第二节 液力元件	262	第二节 几种典型的液压控制系统	292
第三节 液力传动的特点	272	第三节 液压控制系统的故障分析与 排除	298
习题	276	习题	299
第十二章 变矩器的结构	277	附录一 液压图形符号	300
第一节 单级单相变矩器	277	附录二 部分液压元件型号说明示例 ...	307
第二节 单级二相综合式变矩器	279	附录三 工程机械常用液压泵技术 性能表	312
第三节 单级三相综合式变矩器	281	参考文献	317
第四节 双涡轮变矩器	285		
第五节 变矩器的维护和故障分析	288		
习题	289		

第一篇 液 压 传 动

第一章 液 压 传 动 概 论

任何一部工程机械都具有动力机和工作装置，动力机所产生的能量（或动力）必然要通过某种介质传递给工作装置，才能达到做功的目的，这种能量（或动力）的传递叫传动。

根据传递能量介质的不同，传动可分为机械传动、气体传动、电力传动和液体传动四大类型。各类传动的特点是不相同的。

1. 机械传动

该传动以各种机器零件（如齿轮、轴、链轮链条、传动皮带等）为传递能量的介质，历史悠久，制造工艺比较成熟，传动性能不受温度影响，传动比较准确。但是，传动系统结构复杂，笨重，操作费力，且不利于总体布局。

2. 气体传动

该传动以空气为传递能量的介质，通过调节供气量很容易实现无级调速。气体传动系统结构简单，操纵轻便，高压空气流动过程中压力损失少，而且空气可从大气中直接取得，又排到大气中去，对环境适应性强。其主要缺点是气体受压后体积变化大，无法获得稳定的运动，因此，它只适合于运动均匀性要求不高的机械中，如凿岩机、风镐、气锤等。此外，气体易泄漏，工作压力不高，一般限制在 $0.7\sim 0.8\text{MPa}$ 以内，所以气动元件的结构尺寸大，不易实现大功率的动力传递。在工程机械上只在不重要的场合使用气体传动，如制动器、离合器的操纵控制机构等。

3. 电力传动

该传动以电作为传递能量的介质，在有交流电源的地方，应用广泛。但交流电动机调速复杂，直流电动机虽然可以调速，电源却不易获得，只适用于功率不大，动作简单的机械上，如电瓶车、叉车等，故在大功率的工程机械和机床设备上电力传动的应用受到很大程度上的限制。

4. 液体传动

该传动以液体（一般用液压油）作为传递能量的介质。按液体传递能量的形式不同，液体传动又分为液压传动和液力传动两种。

第一节 液压传动的基本原理和组成

在液压传动中，主要是利用密闭容器中液体压力能（ p 、 V ）的变化来传递能量的，其工作原理可以通过千斤顶的做功过程来说明。

图1-1所示为液压千斤顶的结构图，它由小液压缸1、大液压缸7、单向阀2、4、开

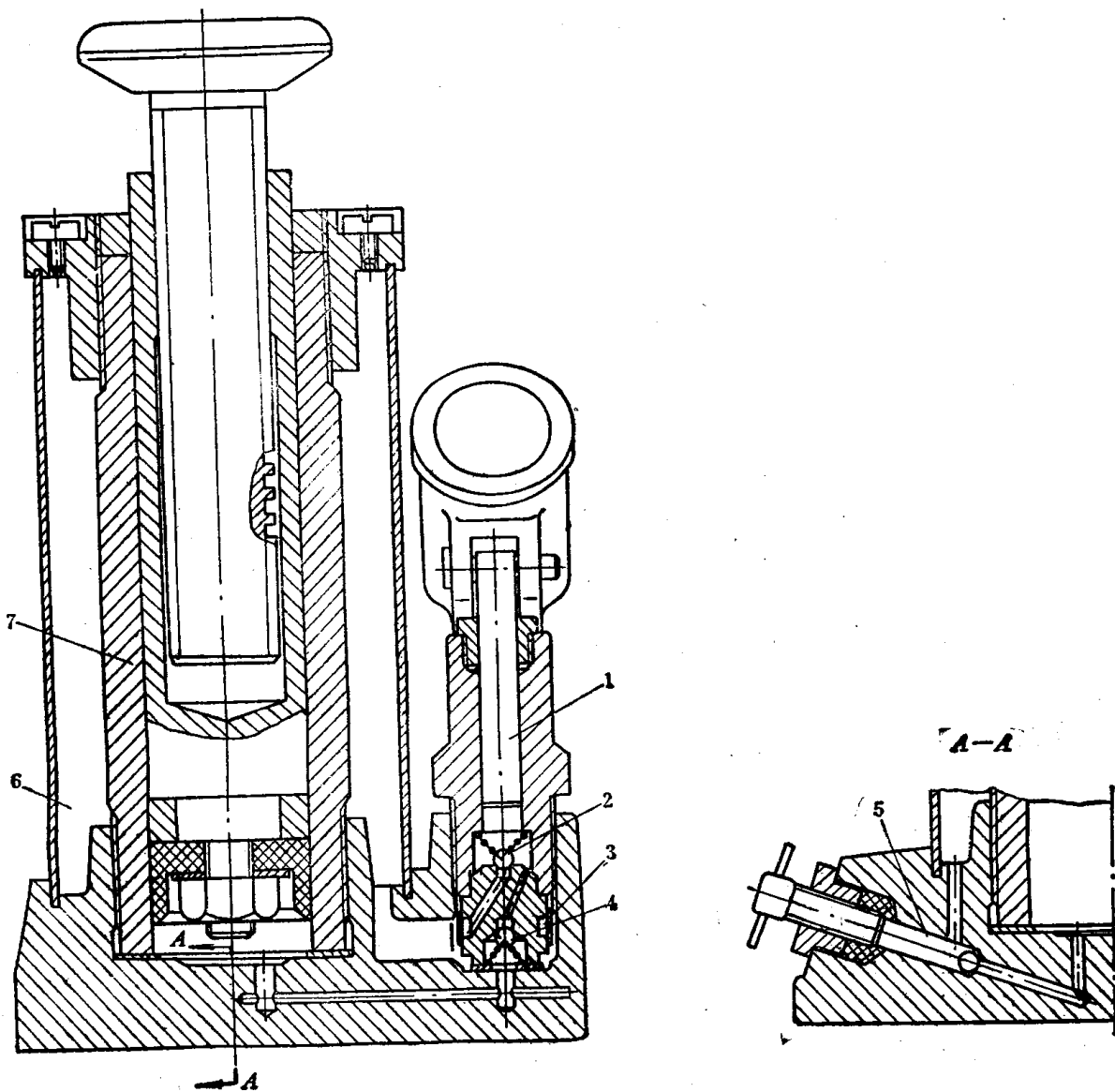


图1-1 液压千斤顶

1—小液压缸 2、4—单向阀 3—滤油器 5—开关 6—油箱 7—大液压缸

关5、油箱6和滤油器3等组成，两液压缸由通道连接构成一个密闭容器，里面充满液压油，油箱与大气不通，里面存有一部分空气。

在开关5关闭情况下，当提起手柄时，小液压缸1柱塞上移使其工作容积增大而形成真空，油箱6里的油便在空气压力作用下通过滤网3和单向阀2进入小液压缸；压下手柄时，小液压缸的柱塞下移，挤压其下腔的油液，这部分压力油便顶开单向阀4进入大液压缸，推动大柱塞上移，从而顶起重物。再提起手柄时，大液压缸内的压力油将力图倒流入小液压缸，此时单向阀4自动关闭，使油不致倒流，这就保证了重物不致自动落下；压下手柄时，单向阀2自动关闭，使液压油不致倒流入油箱，而只能进入大液压缸以将重物顶起。这样，手柄被反复提起和压下，小液压缸不断交替进行着吸油和排油过程，压力油不断进入大液压缸，将重物不断顶起。当需放下重物时，打开开关5，大液压缸的柱塞便在重物作用下下移，将大液压缸中的油液挤回油箱。可见，要使油压千斤顶工作必须具备两个条件：一是处于密闭

容器内的液体由于大小液压缸工作容积的变化而能够流动；二是这些液体具有压力。能流动并具有一定压力的液体能做功，我们说它具有压力能。油压千斤顶小液压缸的作用是将手动的机械能转换为油液的压力能；大液压缸则是将油液的压力能转换为顶起重物的机械能。

由上述千斤顶的工作过程可知，在液压传动中，动力主要是依靠密闭容器中液体压力能的变化传递的。液体压力能的大小决定于液体的体积和液体内部静压力的大小，所以影响液压传动各性能参数的主要因素是流动液体的体积和静压力。

液压传动又叫容积式液体传动或静液传动。

从油压千斤顶的工作原理可知，一个能完成能量传递的液压系统一般由四部分组成：

1) 液压泵 其职能是将机械能转换为液体的压力能。油压千斤顶的小液压缸 1 即起液压泵的作用。

2) 执行元件 其职能是将液体的压力能转换为机械能。执行元件包括液压缸和液压马达，液压缸带动负荷做往复运动；液压马达带动负荷做旋转运动。图1-1中大液压缸 7 就是油压千斤顶的执行元件。

液压泵与执行元件统称为液压动力元件，或能量转换装置，它们在液压系统中起能量转换的作用。

3) 控制调节装置 即各种阀。在液压系统中各种阀用以控制和调节各部分液体的压力、流量和方向，以满足机械的工作要求，完成一定的工作循环。油压千斤顶的单向阀 2、4 和开关 5 就是控制液流方向的。开关 5 还可控制液流流量，从而控制重物下降的快慢。

4) 辅助装置 包括油箱、滤油器、油管及管接头、密封件、冷却器、蓄能器等。

液压系统就是按机械的工作要求，用管路将上述各液压元件合理地组合在一起，形成一个能够使之完成一定工作循环的整体。

为了对液压传动系统有个初步的了解，我们将一个能实现工作台往复运动的简单的液压系统图1-2，进行分析如下：电动机（图中未示出）带动液压泵 3 旋转，泵从油箱 1 吸油，然后将具有压力能的油液输入管路，油液通过节流阀 4 流至换向阀 6 时（图1-2 a），由于手动换向阀处于中间位置，阀孔 P 与 A、B 均不相通，液压缸不通压力油，所以工作台停止不动，压力油经溢流阀 5 回油箱。若将手动换向阀向右推，使阀芯处于图1-2 b 所示位置时，阀孔 P 和 A 相通，B 和 O 相通，这时，油液经压力油孔 P 流入换向阀 6，再经阀孔 A 流入液压缸 8 左腔；因液压缸 8 固定不动，故活塞 9 在油压力的推动下，带动与活塞杆固定在一起的工作台 10 向右移动。液压缸右腔的油液经阀孔 B 进入换向阀 6，再经回油孔 O 流入油箱 1。如果扳动手柄 7，使换向阀 6 的阀芯移到左边位置，如图1-2 c 所示，这时，压力油经阀孔 P 进入换向阀，然后经阀孔 B 进入液压缸 8 的右腔工作台向左运动；液压缸左腔的油液经阀孔 A 和回油孔 O 流回油箱。由此我们可以看出，由于设置了换向阀 6，就能不断改变压力油的通路，使液压缸不断换向以实现工作台所需的往复运动。

同时根据加工要求的不同，工作台速度应该可以调节，上面提到的节流阀 4，就是为了满足这一要求而设置的。节流阀的作用，是利用改变节流阀开口的大小，来调节通过节流阀的油液的流量，以控制工作台的运动速度。

工作台运动时，要克服阻力，例如克服切削力和相对运动件表面间的摩擦力等。这些阻力，由液压泵输出油液的压力能来克服，根据工作情况的不同，液压泵输出油液的压力应当能够调整。另外，由于工作台速度的改变，泵排出的油液往往多于液压缸所需要的油液，因

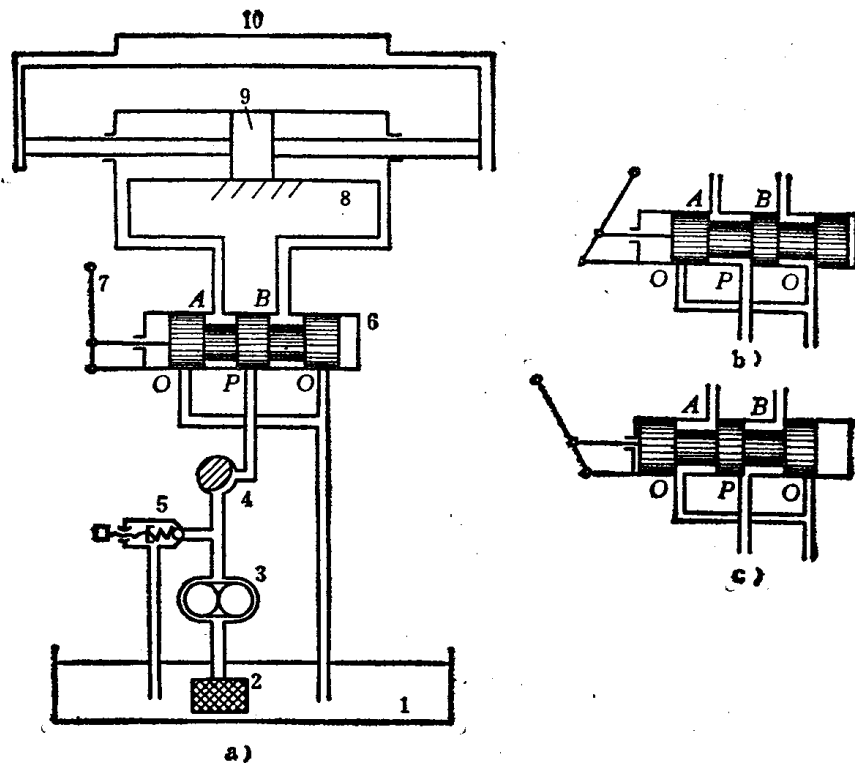


图1-2 液压传动工作原理图

1—油箱 2—滤油器 3—液压泵 4—节流阀 5—溢流阀
6—换向阀 7—操纵杆 8—液压缸 9—活塞 10—工作台

此必须将多余的油液排回油箱。这个功能由溢流阀5来完成，调整溢流阀可以改变液压泵3的输出压力。网式滤油器2对油液进行过滤，以防杂质进入系统中损坏各个液压元件。

一般工程机械或机床的动作是很复杂的，例如单斗液压挖掘机在挖土作业时，有动臂起落，斗杆摆动，铲斗翻转，工作台回转以及左、右支腿的收放等。这些动作有时单独进行，有时复合动作。所有的动作都要求由相应的液压元件组成的液压系统来完成，因而工程机械的液压传动系统是比较复杂的，但无论怎样复杂都可归纳为前面所述四大部分，其原理也基本相同。

以后各章将分别叙述各种元件的结构、工作原理、常用元件的拆装、检验、维修常识及常见的各种工程机械液压系统的组成、工作原理、故障分析与排除实际技能等。

第二节 图形符号和液压系统图

因为液压传动系统由很多元件组成，各元件的结构又是很复杂的，如果采用元件的实际结构图来表达一个液压传动系统，不但绘制起来非常困难，而且也难于将其工作原理表达清楚，所以在实践中为了便于分析问题，常以各种符号表示元件的职能，并以各种符号组成系统图来表达液压传动系统。

一、图形符号

图形符号就是表示元件职能的简单符号。各种元件的图形符号国家都有统一规定，参看附录一。

二、液压系统图

液压系统图是指根据液压系统的工作要求，将各元件的图形符号按液压系统实际结构顺序连结起来，表示一个工作循环的原理图。

液压系统分为传动系统和控制系统两大类。液压系统图可以表示传动原理和控制原理。传动原理是以传递能量为主，控制原理是以控制动作为主。

目前工程机械上传动系统占主要地位，控制系统在采用液力变矩器的机械上虽有应用，但在工作中仍以传动系统为主。

图1-3所示为液压千斤顶的液压传动系统图。图1-4所示为往复运动工作台液压系统图。

现行的液压系统图图形符号只表示元件的职能、连接系统的通路，不表示元件的具体结构和参数，也不表示系统管路的具体位置及元件的安装位置。

系统图中的元件符号均以静止位置或零位置表示。例如图1-2中的换向阀6有三个位置，在系统图1-4中与整个油路连接的只以其零位置（即未扳动阀杆时）表示；安全阀5有时开，有时关，但在系统图中则以静止位置（阀不受油压作用时）表示。有时为了说明系统的工作原理，确实需要画出元件某个工作位置，此时可不按上述规定画，但应作说明。

当需要标明元件的名称、型号和参数（如压力、流量、功率、管径等）时，一般在系统

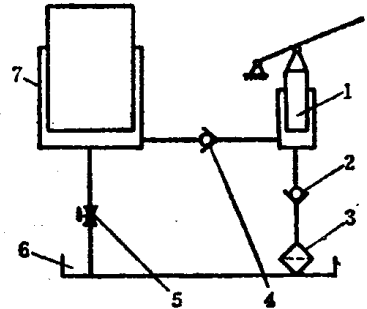


图1-3 液压千斤顶液压系统图

1—小液压缸 2、4—单向阀 3—滤油器 5—开关 6—油箱 7—大液压缸

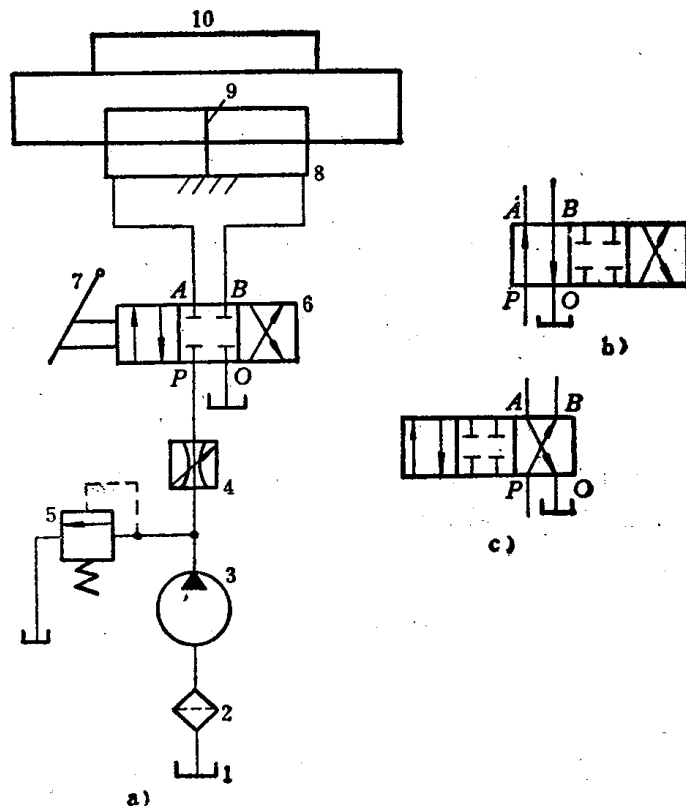


图1-4 往复运动工作台液压系统图

1—油箱 2—滤油器 3—液压泵 4—节流阀 5—溢流阀 6—换向阀
7—操纵杆 8—液压缸 9—活塞 10—工作台

图的元件表中标明,必要时也可标注在元件符号的旁边。

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性进行派生,当无法直接引用及派生时,或者有必要特别说明系统中某一重要元件的结构及动作原理时,也允许局部采用结构简图表示。

第三节 液压传动的优缺点

液压传动之所以能得到如此迅速的发展和广泛应用,是由于它和机械传动相比,有许多突出的优点:

- 1) 液压传动能方便地实现无级调速,调速范围大,可达100:1甚至到2000:1;
- 2) 相同功率的情况下,液压传动装置的体积小,重量轻,惯性小,结构紧凑,而且能传递较大的力和力矩;
- 3) 液压传动装置工作平稳,反应快,冲击小,能适应高速启动和频繁的换向;
- 4) 液压传动装置的控制、调节比较简单,操纵也比较方便、省力,便于实现自动化,特别当与电、气传动配合使用时,易于实现复杂的自动工作循环;
- 5) 液压传动易于实现过载保护,同时,由于采用油液作为工作介质,液压传动装置能自行润滑,故使用寿命较长;
- 6) 液压元件易于实现系列化,标准化和通用化,故便于设计,制造和推广使用。

液压传动的主要缺点为:

- 1) 液压系统中的泄漏和液体的可压缩性,使液压传动无法保证严格的传动比;
- 2) 液压传动装置对油温变化比较敏感,不宜在低温和高温条件下使用;
- 3) 液压传动由于存在着液体的压力损失和泄漏损失,所以传动效率较低,不适宜于远距离传动;
- 4) 零件加工质量要求高,因而目前液压元件成本较高;
- 5) 使用中不可能使油液完全不受污染,污染的油液会使某些元件孔道堵塞,如果油液中混入磨料,则会加速元件磨损,因而油液的污染是液压系统发生故障的主要原因之一。

液压传动的优、缺点决定了它的一定的使用范围,也构成我们工作中的有利和不利的两个方面,然而一切矛盾着的东西,都会在一一定的条件之下互相转化,随着具体条件的变化和液压技术本身的发展,液压技术一定会在国民经济各个领域里发挥更大的作用,我们也一定会更自如地掌握它,使之更好地为我国现代化服务。

总的说来,液压传动优点是主要的,而某些缺点随着生产技术的发展,是可以逐步克服的。如果能吸取其它传动方式的优点,采用电液、气液等联合传动时,更能充分发挥其优点。

第四节 液压传动的应用和发展

与机械传动相比,液压传动是一门新兴的技术领域。它的发展与流体力学的研究发展有着密切的联系。1650年人们认识了在密闭容器内静止液体中压力传递的规律,即帕斯卡原理;1686年牛顿提出了粘性液体内的摩擦定律,即牛顿摩擦定律;到了18世纪流体力学中的

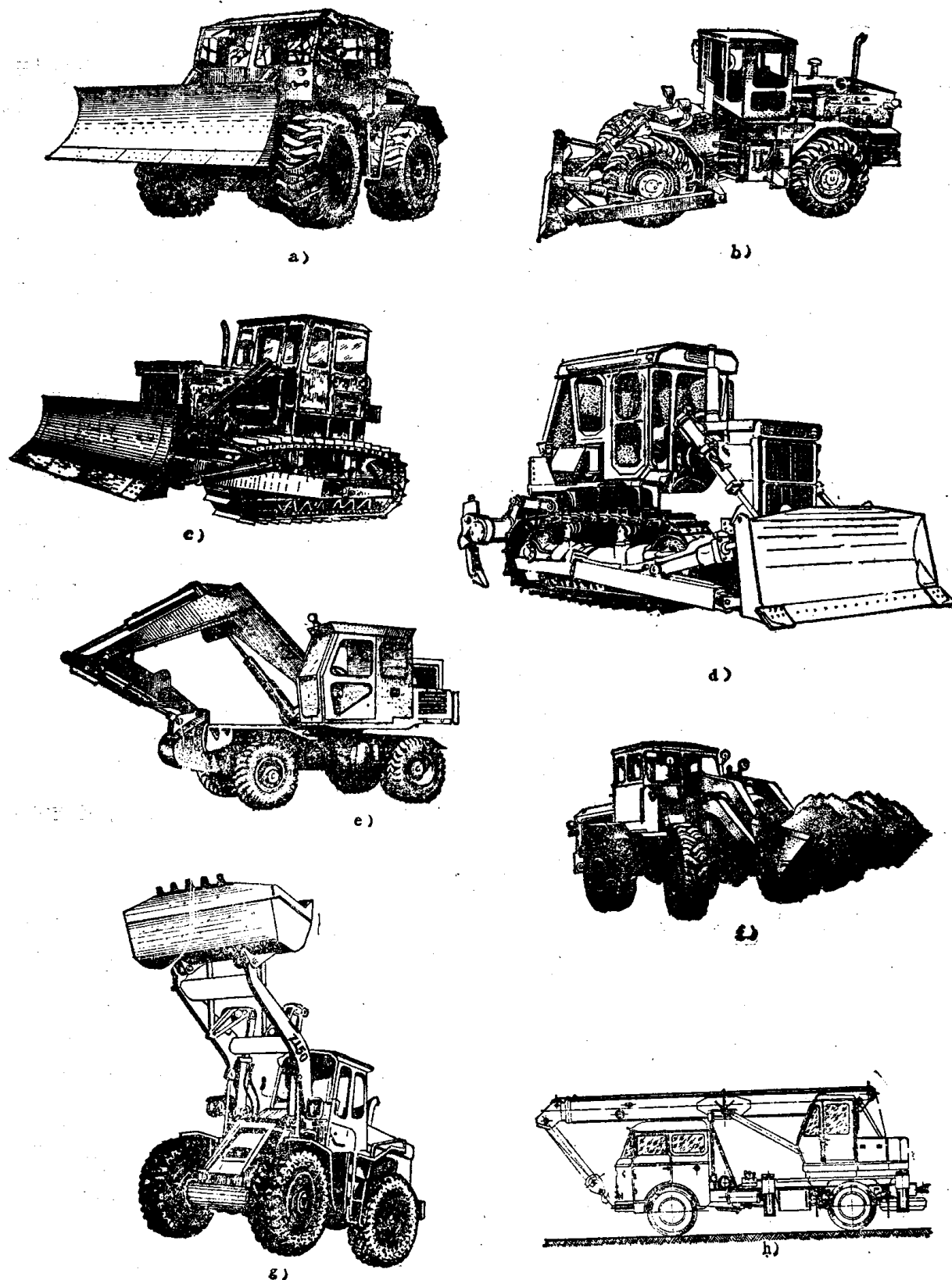


图1-5 几种液压传动工程机械外貌图

- a) TL160轮胎推土机 (74式推土机) b) WD140-4推土机 c) TY180推土机
 d) TY220 (D85A-18) 推土机 e) WLY60挖掘机 (W4-60挖掘机、74式挖掘机)
 f) 74式装载机 g) ZL50轮胎式装载机 h) QY8汽车起重机 (Q2-8汽车起重机)

两个著名原理即流动液体的连续性原理和伯努利定律相继被人们发现，为液压传动技术的应用和发展提供了可靠的科学依据。18世纪末，在英国第一次试制成功了水压机，并实际应用于当时盛兴的毛纺、榨油及造船等行业。

由于当时机械制造技术还比较落后，加工精度低，在高压情况下，泄漏严重，容积效率很低，再加之当时电气技术迅速发展，使得液压传动技术一度不被人们重视，几乎处于停滞发展状态。到了20世纪初，液压传动采用油液作为工作介质，大大改善了元件的润滑性能，提高了容积效率，加上一些较为先进的液压泵和辅助装置相继研制成功，液压传动技术又跃入了一个新的发展时期，液压传动技术逐渐被人们重视起来。到30年代，机床行业开始普及应用液压传动技术，首先是磨床、拉床、铣床等一些加工动作较为简单的设备，航空、航海事业方面也越来越多地采用了液压传动装置。到了50年代，各种先进的控制阀大量问世，液压传动技术得以迅速发展，不但生产出了大批液压传动的自动化机床设备，而且也促进了工程机械、矿山、运输机械的现代化和系列化。新液压机型的问世和性能的提高，对液压元件性能提出了新的要求，又促使液压元件本身性能的改进和提高，形成了相辅相成互相促进的良性循环。

我国在解放前工业水平很低，液压工业完全是个空白。解放后，随着工业的发展，液压传动技术也逐步被广泛采用，并注意引进外国技术，建立了不少专门研究机构和制造液压元件的工厂。虽然液压传动技术在我国起步比较晚，但发展却很迅速，60年代中期，还没有生产出性能可靠的液压传动工程机械，到70年代中期，一批液压传动工程机械已装备到部队。目前我国的液压挖掘机、液压轮式装载机及液压汽车起重机已形成系列产品；履带推土机、自行铲运机、压路机等液压传动机械也都成批生产。整个工程机械产品基本实现了液压化，有些产品性能已接近世界先进水平，图1-5为几种液压传动工程机械外貌图。由于许多先进的液压元件不断问世，使许多原有的液压传动部分不断改进形成新机型，性能更加完善先进。

习 题

1. 液压传动的基本原理是什么？实现液压传动应具备什么基本条件？
2. 一个完整的液压传动系统应有哪几部分所组成？各部分的作用是什么？
3. 何谓液压图形符号？何谓液压系统图？液压系统图的作用是什么？
4. 液压传动与机械传动相比，它有哪些优缺点？

第二章 液体传动基础知识

在液体传动中,主要以油液作为能量传递的介质。油液的一些性质,属于流体力学知识范畴。流体力学是一门研究流体平衡、运动规律及流体与固体之间相互作用的科学。流体力学分为理论流体力学和工程流体力学两大类,本章主要介绍工程流体力学的基本内容,为学习液压元件工作原理、进行系统故障分析及维修奠定理论基础。

第一节 液压油的性质和选用

液压油分为抗燃性油和可燃性油两大类型。在接近高温热源地方工作的机械(如高炉、轧机、锻压设备)和可能引起火灾的场所(如煤矿井下)均采用抗燃性油液作为传动介质。这种油分两个类型:一是合成型,如磷酸脂系、氧化烃系及二者混合的油,二是水成型,如水加二乙醇及油和水混合而成的乳化液。而一般工程机械和机床的液压系统中都采用可燃性矿物油,即石油基液压油。在系统工作时,它既传动能量、又起润滑作用,所以液压油的选择是否合适,其质量好与坏,对机械的工作性能影响很大,不容忽视。

一、液压油的物理性质

(一) 密度

对于均质液体来说,密度是指单位体积液体的质量。体积以 V 表示,单位为立方米(m^3),质量以 m 表示,单位为千克(kg),密度用 ρ 表示,则

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

实际上,液压油的体积还随着压力、油温的变化而变化,由于体积的变化量很小,可忽略不计,所以通常情况下可将液体的密度视为定值。常用液压油的密度 $\rho = 890 \sim 920 \text{ kg/m}^3$,实际计算中一般取 $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$ 。

(二) 重度

对均质液体来说,重度是指单位体积液体所具有的重力。重力是地球对物体的引力(注意:不要与重量混为一谈),其单位为牛顿(N),若以 W 表示重力,以 γ 表示液体的重度,则

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2-2)$$

由物理学知 $W = mg$ 。 g 为重力加速度,其值随地理位置不同而大小不等,一般粗略计算时取 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。常用液压油的重度一般可取平均值 $\gamma = 8820 \text{ N/m}^3$ 。再将 $W = mg$ 代入式(2-2)则有

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (2-3)$$

将式(2-3)整理并代入单位得液压油平均密度为

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \approx 900 \text{ N} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$$

(三) 粘度

液体在外力作用下流动时，由于分子间的内聚力，会阻碍分子间的相对运动，而产生一种内摩擦力，这一特性称为液体的粘性。液体粘性的大小，用粘度来表示。液体的粘度对机械的工作性能影响很大，是合理选用液压油的重要依据。法定计量单位规定，粘度的物理量名称分动力粘度和运动粘度，常用的多为运动粘度。在实用中也可以先用相对粘度计来测试出液体的相对粘度，尔后再换算成运动粘度。国外也有采用其它粘度单位制的，如美国采用国际赛氏秒 (SSU)，英国采用商用雷氏秒 (°R) 等。

1. 动力粘度 η

设两平行平板之间充满油液，上板以速度 u_0 右移，下板固定。附着于上板的液层便以速度 u_0 随上板右移，附着于下板的油层固定不动，当油层较薄时，中间油层的速度呈线性规律分布，如图2-1所示，即把油的运动看作是无数个薄流体层的运动。由于各层的流速不等，相邻油层之间快的带动慢的、慢的阻滞快的，这种液层之间的相互作用即液层之间的摩擦力 F 。实验表明：两液层（如两平板表面的附着液层）之间的摩擦力 F 不仅与液体的性质有关，还与液层间的距离 y 成反比，与两液层间的接触面积 A 和相对运动速度 u_0 成正比，即

$$F = \eta A \frac{u_0}{y} \quad (2-4)$$

式中的比例系数 η 称为粘性系数。粘性系数 η 为常数的流体，称为牛顿液体。公式 (2-4) 表达的关系称为牛顿流体摩擦定律。式中 $\frac{u_0}{y}$ 为沿垂直于速度方向上单位距离的速度平均变化率，当 y 取得无限小时， $\frac{u_0}{y}$ 就是垂直于速度方向上的速度梯度，用 $\frac{du}{dy}$ 表示，则式 (2-4) 演变为

$$F = \eta A \frac{du}{dy}$$

相邻两液层所受的摩擦应力（即剪应力）则为

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{du}{dy} \quad (2-5)$$

将式中的粘性系数 η 定义为动力粘度。

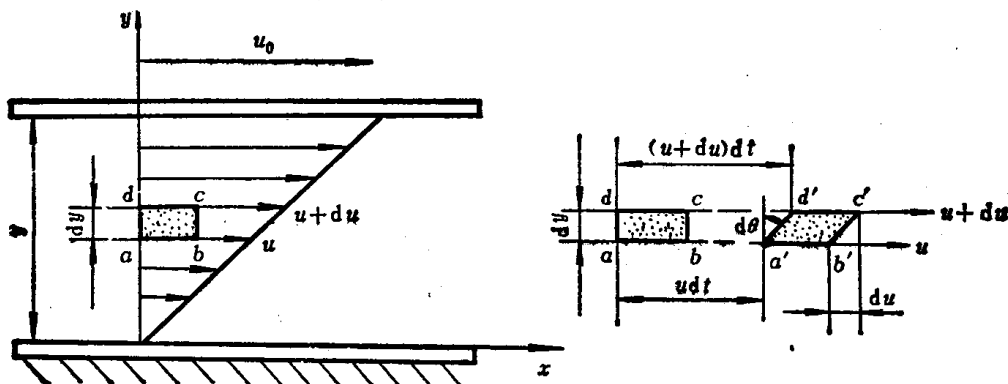


图2-1 粘性液体的速度梯度与角变形

任取距离为 dy 的两液层之间的断面 $abcd$ 观察, 经一段时间 dt 后, 变为 $a'b'c'd'$, 即由矩形变为平行四边形, $d\theta$ 为剪切变形的角度, 它随着速度梯度的增加而增加, 故 $\frac{du}{dy}$ 也直接代表了液体剪切变形的大小。

由式 (2-5) 知: 当 τ 值一定时, 若 η 增大则 $\frac{du}{dy}$ 减小, 即 $d\theta$ 变小, 这表明液体不易发生剪切变形。总之, 粘度 η 是指液体抵抗液层之间发生剪切变形的能力, 它可由式 (2-5) 得出

$$\eta = \frac{\tau}{du/dy}$$

η 的单位是 $\text{Pa}\cdot\text{s}$, 当面积各为 1m^2 , 相距 1m 的两液层, 其中一层以 1m/s 的速度相对于另一层移动时, 若产生的摩擦力为 1N , 则该液体的动力粘度 η 为 $1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。因此动力粘度 η 的物理意义是: 它表示当速度梯度为 1 时, 单位面积上的摩擦力。因 η 的量纲中含有力的单位, 是一个动力学的要素, 所以称动力粘度。过去使用的单位有泊或厘泊现已废除。

2. 运动粘度 ν

运动粘度是动力粘度 η 与液体密度 ρ 之比, 即

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2-6)$$

法定计量单位规定, 运动粘度的单位是 m^2/s (m^2/s), 工程上常用 m^2/s 的百万分之一 ($\text{m}^2/\text{s} \times 10^{-6}$) 做辅助单位。

运动粘度是为了计算方便才引入的物理量名称, 并无明确的物理意义。动力粘度和运动粘度都是以绝对单位表示的, 故称为绝对粘度。

在过去使用的粘度物理量名称中, 还有恩氏粘度即相对粘度。相对粘度又称条件粘度, 它是采用特定的粘度计在规定的条件下测出来的液体粘度。根据测量条件的不同, 各国采用的相对粘度的单位是不同的, 美国采用国际赛氏秒 (SSU), 英国采用商用雷氏秒 ("R), 我国和中欧国家采用恩氏粘度 ($^{\circ}\text{E}$)。

恩氏粘度用恩氏粘度计测定, 即将 200cm^3 的被测液体装入底部有 $\phi 2.8\text{mm}$ 小孔的恩氏粘度计容器中, 在某一特定温度 t 时, 测定其在液体自重作用下流尽所需的时间 t_1 , 和同体积的蒸馏水在 20°C 时流过同一小孔所需的时间 t_2 ($t_2 = 50 \sim 52\text{s}$) 之比值, 便是该液体在 t 时的恩氏粘度, 用符号 $^{\circ}\text{E}_t$ 表示

$$^{\circ}\text{E}_t = \frac{t_1}{t_2}$$

工业上常用 20°C 、 40°C 、 100°C 作为测定恩氏粘度的标准温度, 并分别以相应的符号 $^{\circ}\text{E}_{20}$ 、 $^{\circ}\text{E}_{40}$ 、 $^{\circ}\text{E}_{100}$ 表示。

恩氏粘度和运动粘度的换算关系式为

$$\nu = \left(7.31^{\circ}\text{E} - \frac{6.31}{^{\circ}\text{E}} \right) \times 10^{-6} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2-7)$$

ν 与 $^{\circ}\text{E}$ 的关系也可以从图 2-2 上对照查出。

恩氏粘度是一个无因次量, 可以作为测试液压油粘度的一种实用方法, 但它不属于法定计量单位。