



交通职业教育教学指导委员会推荐教材

全国交通高级技工学校、技师学院公路工程机械使用与维修专业教学用书

全国交通技师培训教材

公路工程 机械液压与液力传动

主编 朱烈舜

主审 刘雅洲



人民交通出版社

China Communications Press

交通职业教育教学指导委员会推荐教材

全国交通高级技工学校、技师学院公路工程机械使用与维修专业教学用书

全国交通技师培训教材

公路工程机械液压与液力传动

Gonglu Gongcheng Jixie Yeya Yu Yeli Chuandong

主编 朱烈舜

主审 刘雅洲

人民交通出版社

内 容 提 要

本书是全国交通技师培训教材,由交通职业教育教学指导委员会公路(技工)专业指导委员会组织编写。书中主要介绍公路工程机械液压与液力传动的结构原理、常见故障及其排除方法,包括液压流体力学,液压泵、液压控制阀、液压缸(液压马达)、辅助元件的结构原理,故障现象、原因与排除方法,液力传动的原理与故障排除,常见公路工程机械液压系统分析和常见故障排除等。

本书是全国交通高级技工学校、技师学院公路工程机械使用与维修专业教学用书,也可作为职业培训和技能鉴定教材,或供有关人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

公路工程机械液压与液力传动 / 朱烈舜主编. —北京:
人民交通出版社, 2007.10
ISBN 978-7-114-06652-8

I. 公… II. 朱… III. ①道路工程-工程机械-液压传动
②道路工程-工程机械-液力传动 IV. U415.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 093980 号

书 名: 全国交通技师培训教材
公路工程机械液压与液力传动
著 者: 朱烈舜
责任编辑: 江 好
出版发行: 人民交通出版社
地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号
网 址: <http://www.ccpres.com.cn>
销售电话: (010) 85285838, 85285977
总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司
经 销: 各地新华书店
印 刷: 三河市吉祥印务有限公司
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 26
插 页: 1
字 数: 626 千
版 次: 2007 年 10 月 第 1 版
印 次: 2007 年 10 月 第 1 版 第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-06652-8
印 数: 0001-3000 册
定 价: 46.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

交通职业教育教学指导委员会

公路(技工)专业指导委员会

主任：周以德

副主任：朱小茹 张文才

委员：卞志强 严 军 周萌芽 高连生 梁柱义

蒋 斌 杜建忠 任义学 刘雅洲

秘书：张宏春

前言

QIANYAN

交通行业是一个劳动密集型行业,全行业约有4000万从业人员,其中90%以上是在交通建设、养护和运输服务等一线工作的,处于交通工程建设、养护和交通运输服务的终端环节,其素质和能力在很大程度上决定了交通发展的质量和效益。目前,各个专业和工种都普遍缺乏技能型人才,特别是高技能人才,公路施工与养护、筑路机械操作与维护等工种都属于交通行业技能型紧缺人才。

为了配合“交通行业技能型紧缺人才培养培训工程”的实施,加快高技能人才的培养培训步伐,交通职业教育教学指导委员会公路(技工)专业指导委员会组织全国交通类高级技工学校、技师学院的教师编写了《公路施工与养护》和《公路工程机械使用与维修》两个专业工种的技师培训教材。编写人员进行了广泛的一线走访,听取了工程施工与养护生产一线高技能人员的意见,使本套教材具有良好的实用性和先进性。本套教材填补了我国在公路施工与养护和公路工程机械使用与维修方面技师培养培训教材的空白,既可作为技师学院教学用书,又可作为在职培训技师用教材,对本行业高技能人才的培养培训具有重要的现实意义。

本套教材具有以下特点:

1. 教材内容与技师等级标准、考核标准相衔接,适应现代公路工程机械化施工与养护的要求。
2. 教材全部采用最新的标准和规范,符合先进性、科学性和实用性的要求。
3. 教材编写满足理实一体化和模块式的教学方式,体现职业教育特色,重点培养学生的实际操作技能。
4. 每个单元后均附有思考题,力求提高学生思考问题、解决实际问题的能力,以达到技师标准的要求。

《公路工程机械液压与液力传动》是全国交通高级技工学校、技师学院公路工程机械使用与维修专业通用教材之一,书中主要介绍公路工程机械液压与液力传动的结构原理、常见故障及其排除方法,包括液压流体力学,液压泵、液压控制阀、液压缸(液压马达)、辅助元件的结构原理,故障现象、原因与排除方法,液力传动的原理与故障排除,常见公路工程机械液压系统分析和常见故障排除。

参加本书编写工作的有:北京市路政局技工学校李英奇(编写单元一,单元七的课题一、二),山东交通职业学院钟宝华(编写单元二,单元七的课题三),广西公路技工学校肖荣(编写单元三,单元七的课题五),山西省交通技师学院卫云贵(编写单元四~六,单元七的课题四),山东省公路高级技工学校朱烈舜(编写单元七的课题六~九)。全书由朱烈舜担任主编,河南南阳市公路技工学校刘雅洲担任主审。

本套教材在编写过程中得到了全国20余所交通类职业院校领导、工程施工养护领域的专家及一线高技能人才的大力支持和帮助,共有70余名专业教师参与了教材的编审工作,在此表示感谢。

由于我们的业务水平和教学经验有限,编审人员工作繁忙、时间仓促,书中难免有不妥之处,恳切希望使用本书的教师和读者批评指正。

交通职业教育教学指导委员会

公路(技工)专业指导委员会

二〇〇七年四月

目录

MULU

· 单元一 液压流体力学 ·	1
课题一 液压传动基本概念	1
课题二 液压传动的工作液体	7
课题三 静止液体力学基本规律	17
课题四 流动液体力学基本规律	22
课题五 液体流动中的压力损失	28
课题六 液体流动中的流量损失和功率计算	32
课题七 液压系统故障现象	38
· 单元二 液压泵与液压马达 ·	41
课题一 齿轮泵与齿轮马达	43
课题二 叶片泵与叶片马达	58
课题三 柱塞泵与柱塞马达	75
· 单元三 液压控制阀 ·	100
课题一 方向控制阀	101
课题二 压力控制阀	117
课题三 流量控制阀	132
课题四 电液伺服阀、电液比例阀	141
· 单元四 液压缸和辅助元件 ·	150
课题一 液压缸	150
课题二 液压辅助元件	164
· 单元五 常用液压系统回路及液压系统的使用与维护 ·	177
课题一 常用液压系统回路	177
课题二 液压系统常见故障与诊断排除	192
课题三 液压系统的使用要求与维护	198

· 单元六 液力传动 ·	208
课题一 液力传动基本知识	208
课题二 液力耦合器	214
课题三 液力变矩器	217
课题四 综合式液力变矩器	229
课题五 液力系统的正确使用和维护	231
· 单元七 常见公路工程机械液压液力系统分析 ·	236
课题一 推土机液压液力系统分析	236
课题二 装载机液压液力系统分析	255
课题三 平地机液压液力系统分析	274
课题四 振动压路机液压系统分析	297
课题五 全液压挖掘机液压系统分析	311
课题六 稳定土拌和机械液压系统分析	323
课题七 沥青混凝土摊铺机液压系统分析	329
课题八 水泥混凝土摊铺机液压系统分析	358
课题九 水泥混凝土专用机械液压系统分析	387
· 参考文献 ·	406

液压流体力学

知识点

1. 液压传动的组成、工作原理、优缺点, 液压传动的各种概念;
2. 工作液体的性质及液体的力学规律;
3. 液压系统的压力损失和流量损失以及功率计算。

技能点

进行液压传动功率的计算。

—— 课题一 液压传动基本概念 ——

一般工程机械都是由动力机构、传动机构、工作机构和控制部分 4 部分组成。传动机构是将动力机构(电动机、内燃机等)的输出功率传送给工作机构的一个重要部分。传动机构根据其传动形式的不同,可分为机械传动、电力传动、气压传动、液体传动以及它们的组合——复合传动等。

用液体作为工作介质进行能量传递的传动方式称为液体传动。按照其工作原理的不同,液体传动又可分为液压传动和液力传动两种形式。液压传动主要是利用液体的压力能来传递能量;而液力传动则主要是利用液体的动能来传递能量。

下面介绍液压传动的工作原理、组成、用途、优缺点及液压传动的发展史。

一、液压传动的工作原理和基本组成

1. 液压传动的工作原理

图 1-1-1a) 所示是液压千斤顶的工作原理图, 液压千斤顶由油箱、大活塞、小活塞、大油缸、小油缸、止回阀 1 和止回阀 2、杠杆手柄、放油阀组成。活塞与油缸之间保持良好的配合关系, 能实现可靠的密封。小油缸、大油缸、油箱以及它们之间的连接通道构成一个密闭的容器, 里

面充满液压油。

如图 1-1-1b) 所示, 当抬起杠杆手柄时, 带动小活塞向上运动, 小活塞下腔密封容积增大形成局部真空时, 止回阀 2 在负载的作用下处于关闭状态, 止回阀 1 在大气压的作用下打开, 于是油箱里的油液在大气压的作用下经过吸油管及止回阀 1 进入小油缸, 完成一次吸油动作。

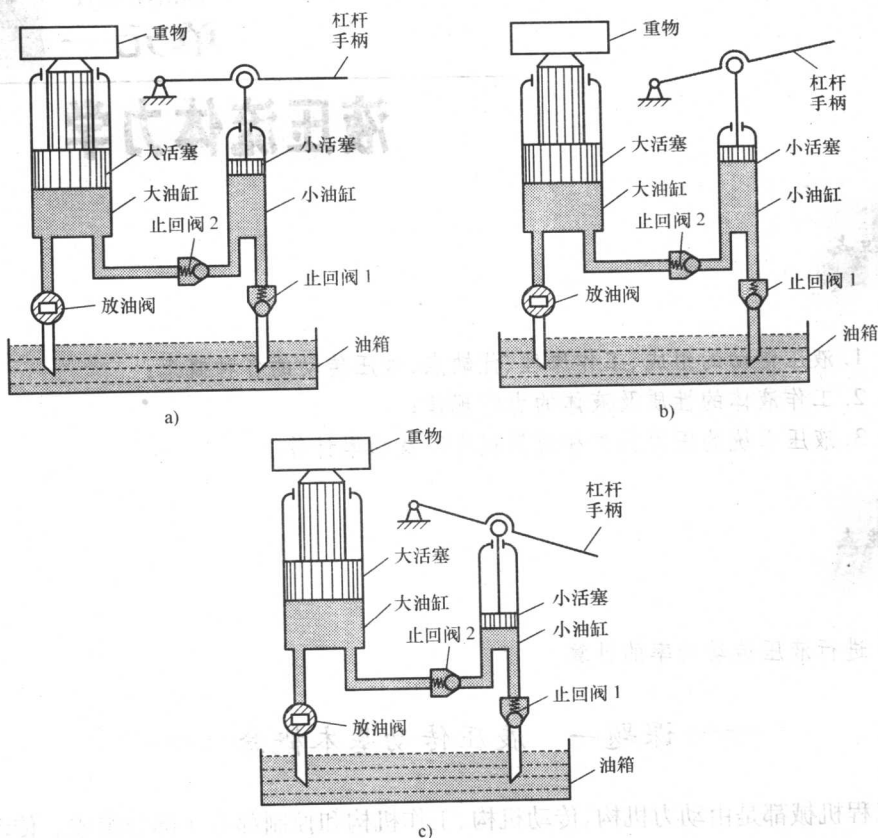


图 1-1-1 油压千斤顶工作原理图

如图 1-1-1c) 所示, 当用力压下杠杆手柄时, 小活塞向下运动挤压其下腔油液, 密封容积减小, 油压升高, 止回阀 1 处于关闭状态, 而止回阀 2 在压力油的作用下打开, 于是压力油通过止回阀 2 流入大油缸内, 大活塞在压力油的作用下将重物顶起, 完成一次压油动作。

再次提起杠杆手柄时, 大油缸内的压力油力图倒流入小油缸, 此时止回阀 2 自动关闭, 使油液不能倒流, 保证了重物不致落下。这样, 反复地抬、压杠杆手柄, 不断交替进行着吸油和压油过程, 使压力油不断地被压入大油缸, 将重物不断升高, 从而达到起重的目的。当需放下重物时, 将放油阀旋转 90°, 大活塞在自重和负载的作用下向下运动实现回程, 大油缸的油液排回油箱。这就是液压千斤顶的工作过程。

通过对液压千斤顶工作过程的分析, 可见其工作需要有两个基本条件: 一是处于密封容器内的液体为工作介质并且由于大小油缸工作容积的变化而能够流动, 从而实现能量的传递; 二是这些液体具有压力。能够流动并具有一定压力的液体能对外做功, 我们说它具有压力能。



液压千斤顶就是利用油液的压力能将作用在杠杆手柄上的力和杠杆的移动转变为顶起重物的力和重物在此力作用下的升起。压下杠杆小油缸输出压力油,将机械能转换成油液的压力能,压力油进入大油缸推动活塞顶起重物,将油液的压力能又转换成机械能。由此可见,液压传动是以液体为工作介质,利用液体的压力能实现动力传递的。

2. 液压传动系统的基本组成

现以图 1-1-2 所示推土机的铲刀升降液压系统来说明液压传动系统的基本组成。该系统

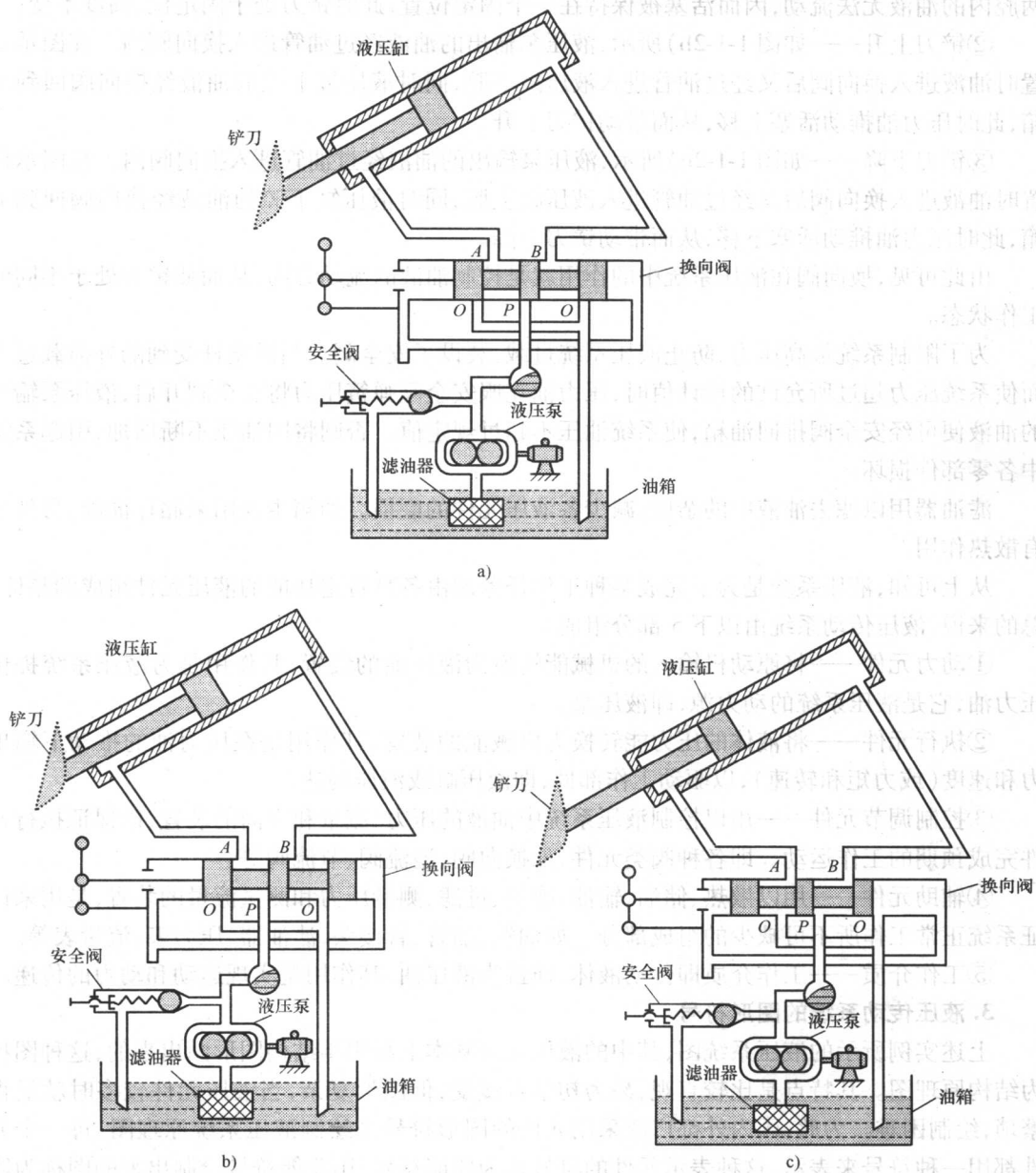


图 1-1-2 推土机液压系统简化结构式原理图



主要由液压泵、液压缸、换向阀、安全阀、滤油器、油箱、油管等组成。液压泵由发动机带动从油箱内吸油,并将压力油输入工作系统管路。这样,液压泵就将发动机的机械能转换成油液的压力能,成为推动铲刀升降油缸的动力来源。

在换向阀的作用下,铲刀升降油缸可以有3种工作状态:

①铲刀固定——如图1-1-2a)所示,液压泵输出的油液首先经过油管进入换向阀内,在图示位置时油液进入换向阀后又经过油管流回油箱,换向阀使液压缸两腔的油口被封闭,液压缸两腔内的油液无法流动,因而活塞被保持在一个固定位置,此时铲刀处于固定位,高度不变。

②铲刀上升——如图1-1-2b)所示,液压泵输出的油液经过油管进入换向阀内。在图示位置时油液进入换向阀后又经过油管进入液压缸下腔,同时液压缸上腔的油液经换向阀回到油箱,此时压力油推动活塞上移,从而带动铲刀上升。

③铲刀下降——如图1-1-2c)所示,液压泵输出的油液经过油管进入换向阀内。在图示位置时油液进入换向阀后又经过油管进入液压缸上腔,同时液压缸下腔的油液经换向阀回到油箱,此时压力油推动活塞下移,从而带动铲刀下降。

由此可见,换向阀在液压系统中的作用就是控制油液的流动方向,从而使铲刀处于不同的工作状态。

为了限制系统最高压力,防止液压系统过载,装设了安全阀。当活塞杆受到的外荷载过大而使系统压力超过所允许的设计值时,压力油克服安全阀弹簧压力将安全阀开启,液压泵输出的油液便可经安全阀排回油箱,使系统油压不超过规定值。否则将因油压不断增加,引起系统中各零部件损坏。

滤油器用以滤去油液中的杂质,减少各液压元件的磨损。油箱主要用来储存油液,另外还有散热作用。

从上可知,液压系统是为了完成某种工作任务而由各具特定功能的液压元件组成的整体。总的来说,液压传动系统由以下5部分组成。

①动力元件——将原动机输入的机械能转换为液压能的装置,其作用是提供压力油,它是液压系统的动力源,即液压泵。

②执行元件——将液体的压力能转换为机械能的装置,其作用是在压力油的推动下输出力和速度(或力矩和转速),以驱动工作部件,即液压缸或液压马达。

③控制调节元件——用以控制液压系统中油液的压力、流量和方向的装置,以保证执行元件完成预期的工作运动。即各种阀类元件,如换向阀、溢流阀、节流阀等。

④辅助元件——用以散热、储油、输油、连接、过滤、测量压力和测量流量的装置,是用来保证系统正常工作所不可缺少的组成部分。如油箱、油管、管接头、滤油器、压力表、流量表等。

⑤工作介质——工作介质即传动液体,通常为液压油,其作用是实现运动和动力的传递。

3. 液压传动系统的图形符号

上述实例所示的液压系统图,其中的液压元件基本上是用半结构图形画出来的,这种图称为结构原理图。其特点是比较直观,易为初学者接受,但图形复杂,当液压元件较多时就显得繁琐,绘制困难。为此,国内外都广泛采用元件的图形符号来绘制液压系统原理图,每一个元件都用一种符号来表示,这种表示元件的符号称为职能符号,用职能符号绘制出来的图称为职能符号原理图,我国已制定了此种图形符号的国家标准,即GB/T 786.1—93《液压系统图图形

符号》。如图 1-1-3 即为用职能符号绘制的推土机液压系统的原理图。图形符号脱离了元件的具体结构,只表示元件的职能,使系统图简化,原理简单明了,便于阅读、分析、设计和绘制。

应当说明的是,液压系统图的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;图形符号通常均以元件的静止位置或中立位置表示;符号在系统中的布置除有方向性的元件(油箱、仪表)外,根据具体情况可水平或垂直绘制;当需要标明元件的名称、型号和参数时,一般在系统图的零件表中说明,必要时可标注在元件图形符号的旁边。另外,若液压元件无法用图形符号表达时,仍允许采用结构原理图表示。

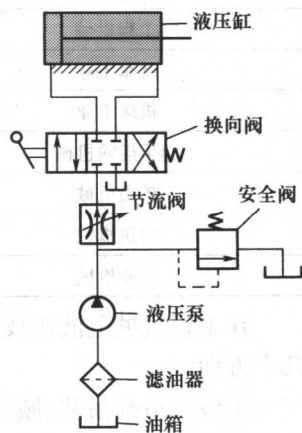


图 1-1-3 推土机液压系统原理图

二、液压传动的优缺点、用途

1. 液压传动的优缺点

液压传动与其他传动方式相比,有以下优点:

①液压传动易获得很大的输出力或力矩,可实现低速大吨位运动,且质量轻、体积小,即单位质量输出功率大,因而使得机械质量轻、结构紧凑。通常液压泵和液压马达与同功率的电机相比其外形尺寸仅为后者的 12% ~ 13%,质量为后者的 10% ~ 20%,如起质量为 5t 的液压起重机,每台可比机械传动式起重机械减轻自重 3 ~ 5t。随着液压系统工作压力的进一步提高,这一特点将更加突出。

②液压传动能很方便地实现无级调速,且调速范围大、运动平稳、不易受外界负载的影响。这是一般机械传动所无法实现的。液压传动的调速范围可达 1000:1。

③液压传动在工作中动作迅速、换向快;换向时不易使运动部件受冲击,因而可实现频繁换向;与电力系统相比,液压马达比电动机有较高的力矩——惯量比。液压马达的力矩——惯量比是 20,而电动机是 2,所以其加速性能较强,可实现高频正反转。

④液压系统操作简单,调速控制方便,易于实现自动化。特别是和机、电联合使用,能方便实现复杂的自动工作循环,便于实现远程控制。

⑤液压系统便于实现过载保护,使用安全可靠。同时以液压油为介质,相对运动表面间可实现自润滑,故元件的使用寿命长。

⑥液压元件易于实现系列化、标准化和通用化,便于设计、制造、维修和推广使用。

但是液压传动和其他传动相比也存在一些缺点:

①油液泄漏和液体的可压缩性影响了执行元件运动的准确性,故无法保证严格的传动比,因而不能用于高精度的定比传动。

②能量损失(流量损失和压力损失)较大,因而传动效率低,不适宜做远距离传动。

③对油温的变化比较敏感,不宜在低温和高温条件下工作。

④液压元件配合精度要求高,加工工艺较难,制造成本高,发生故障时,不易查找原因,维修也较困难。

2. 液压传动的用途

液压传动在机械设备中的应用非常广泛,具体在各类机械的应用情况见表 1-1-1。



液压传动的用途

表 1-1-1

行业名称	应用场所举例
工程机械	挖掘机、装载机、推土机、压路机、平地机、铲运机等
汽车工业	自卸式汽车、平板车、高空作业车、汽车中的转向器、减振器等
机床工业	磨床、铣床、刨床、拉床、自动和半自动车床、组合机床、数控机床等
起重运输机械	汽车吊、港口龙门吊、叉车、装卸机械、皮带运输机等
矿山机械	凿岩机、开掘机、开采机、破碎机、提升机、减压支架等
建筑机械	打桩机、液压千斤顶等
农业机械	联合收割机、拖拉机等

在工程机械上液压技术应用非常广泛,从现有的工程机械来看,液压技术主要应用在以下几个方面。

①液压举升吊装、倾斜翻转及水平回转。用液压传动来推动工作装置完成各种简单或复杂的动作已是越来越普遍采用的方法。例如推土机铲刀的提升和下降,装载机铲斗的翻转举升,挖掘机则采用多个液压缸和液压马达的协调动作完成铲斗的升降、回转、挖土、卸土等各种复杂的运动工序。

②液压驱动。所谓液压驱动就是利用液压系统驱动液压马达直接带动行走机械或其他旋转工作部件做旋转运动。如在挖掘机、沥青混凝土摊铺机和铲土运输机械上采用液压传动代替机械传动,可以部分或全部省去离合器、变速器、传动轴、差速器等部件,从而便于在总体设计上实现最优化。目前,大部分液压挖掘机、摊铺机的行走部分都采用了液压驱动,使底盘结构大大简化,重量大大减轻,易于改型和发展新品种。

③液压转向液压助力。在一些大功率的行走式工程机械上,普遍采用全液压转向机或液压助力器来实现转向,使操纵机械大大简化,操纵轻巧、灵便。加之采用液压换挡变速,使各类机械的操作手柄大为减少,从而减轻了驾驶员的劳动强度,提高了作业效率。

④液压支承。起重机、挖掘机等固定作业位置的机械采用液压支腿,从而大大缩短了作业准备时间;同时液压支腿采用液压锁锁紧,提高了机械作业时的稳定性。

采用液压技术极大地促进了工程机械的发展,既表现在产品结构的改进、性能的提高上,也表现在工程机械的规格、品种和数量的增加即工程机械的发展速度上。由于液压元件易于实现标准化、系列化、通用化,布置灵活,从而使整机的结构简单,因而研制一种新型的工程机械所费时间较短。我国和世界各国工程机械近年来发展迅速,液压技术的采用起到了至关重要的作用。

三、液压传动的发展史

现今,采用液压传动的程度已成为衡量一个国家工业水平的重要标志之一。如发达国家生产的95%的工程机械、90%的数控加工中心、95%以上的自动生产线都采用了液压传动技术。

液压传动相对于机械传动来说,是一门新学科。从17世纪中叶帕斯卡提出静压传递原理、18世纪英国制成第一台水压机至今,液压传动已有二三百年的历史。由于早期没有成熟

的液压传动技术和液压元件,因而没有得到普遍的应用,到19世纪末德国才制成了液压龙门刨床,美国制成了液压转塔车床和磨床,而一些通用机床到20世纪30年代才用上了液压传动。在第二次世界大战期间,由于军事上需要反应快、重量轻、功率大的各种武器装备,从而促进了液压技术的发展。战后,液压技术迅速转为民用,随着工业水平的不断提高,各种液压元件的研制和完善,各类液压元件的标准化、系列化和通用化,使它在机械制造、工程机械、农业机械、汽车制造等行业得到了推广使用。20世纪60年代以来,随着原子能、空间技术、计算机技术的发展,液压技术也得到了很大的发展,并渗透到各个工业领域中,液压技术开始向高压、高速、大功率、高效率、低噪声、低能耗、经久耐用、高度集成化等方向发展。从20世纪70年代开始,电子学和计算机进入了液压技术领域,使液压元件性能优化、成本降低、操作简化、自动化水平提高、可靠性增加。因此,近年来液压行业对于计算机的应用给予极大的关注,其中计算机辅助设计即CAD技术的推广使用和数字控制液压元件的研制开发尤其突出。另外,减小元件的体积和重量,提高元件的寿命,研制新介质,以及污染控制技术等方面也是当前液压传动及控制技术发展和研究的方向。

我国的液压工业开始于20世纪50年代,最初只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,我国生产的液压元件已形成系列,并在各种机械设备上得到了广泛的应用。目前,我国在消化、推广从国外引进的先进液压技术的同时,大力开展国产液压新产品的研制工作,并已取得了一定成效。40多年来,我国的液压工业从无到有,发展很快,取得了很大的成就。但我国的液压元件与国外先进的同类产品相比,在性能、种类、规格上仍存在着一定的差距。为了加速赶超世界先进水平,我国20世纪80年代起瞄准世界发展主流的液压元件系列型式,有计划地引进、消化、吸收国外先进的液压技术和产品,并对我国现行生产的液压产品进行清理整顿,合理调整产品结构,大力开展产品国产化工作,已取得初步成果。可以预见,随着液压技术进一步的发展,它在国民经济各个领域的应用也将会越来越广泛。

思考题

1. 液体传动有哪两种形式? 它们的主要区别是什么?
2. 液压传动的基本工作原理是什么?
3. 液压传动系统主要由哪几部分组成? 各组成部分的作用是什么?
4. 绘制液压系统图时,为何要采用职能符号表示液压元件? 试画出几种主要液压元件的图形符号。
5. 与其他传动形式相比,液压传动的主要优缺点是什么?
6. 举例说明液压技术在工程机械上的应用。

课题二 液压传动的工作液体

在液压系统中,用来传递动力和运动的工作介质即液压传动的工作液体是液压油。液压系统能否可靠有效地工作,在很大程度上取决于系统中的工作液体。因此,了解液压油的基本



性质、工作性能,对于正确理解液压传动原理与规律和正确使用液压系统都是非常必要的。

一、液压油的物理性质

1. 密度和重度

单位体积液体的质量称为液体的密度,以 ρ 表示;单位体积所具有的重力叫做重度 γ 。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-2-1)$$

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (\text{N/m}^3) \quad (1-2-2)$$

式中: m ——液体质量,kg;

V ——液体体积, m^3 ;

g ——重力加速度, m/s^2 。

液体的密度和重度都随着压力和温度的变化而变化,随压力的变化体现在液压油的压缩性,随温度的变化体现在液压油的热胀冷缩特性。我国采用油温为 20°C 的液压油密度为液压油的标准密度,以 ρ_{20} 表示,工程机械常用液压油密度为 $\rho_{20} = 880\text{kg/m}^3$ 左右。但是在一般条件下,温度和压力引起的密度和重度变化很小,可近似认为液压油的密度和重度是固定不变的。

2. 压缩性

液体的压缩性是指液体受压力作用后体积减小的性质。

8 液压体压缩性的大小可用体积压缩系数 β 来表示,是指液体所受的压力每增加一个单位压力时,体积的相对变化量,即:

$$\beta = -\frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (1-2-3)$$

式中: Δp ——液体压力的变化值,Pa;

ΔV ——液体体积在压力变化 Δp 时,其体积的变化量, m^3 ;

V ——液体的初始体积, m^3 。

式中负号是因为压力增大时,液体体积反而减小,反之则增大。为了使 β 为正值,故加一负号。液体体积压缩系数的倒数,称为液体体积弹性模量,用 K 表示,即:

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (1-2-4)$$

体积弹性模量 K 表示液体产生单位体积相对变化量时所需要的压力增量。在使用中,可用 K 值来说明液体抵抗压缩能力的大小,常用液压油的压缩系数 $\beta = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$,故 $K = (1.4 \sim 2) \times 10^3 \text{MPa}$,钢的弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$,可见液压油的弹性模量非常小,仅为钢的弹性模量的 1.65% 左右,即液体的可压缩性约为钢的 100 ~ 150 倍。

但在一般液压系统压力不高时,油液的压缩性可以忽略不计。而在压力变化很大和传动要求较高的高压系统中,在液体由高压到低压突然转换的瞬间,压缩后的液体突然膨胀而造成冲击,这种场合必须考虑到液体的压缩性。

如果液压油中混入一定量的处于游离状态的气体,会使实际的压缩性显著增加,也就是使液体的弹性模量降低,最终严重影响液压系统的工作性能,故在液压系统中应使油液中的空气含量减少到最低限度。由于油液中的气体难以完全排除,在工程计算中常取液压油的体积弹

性模量 $K = 0.7 \times 10^3 \text{ MPa}$ 左右。

液压油的体积弹性模量与温度、压力有关。温度升高时, K 值减小, 在液压油正常的工作温度范围内, K 值会有 5% ~ 25% 的变化。压力增大时, K 值增大; 反之则减小, 但这种变化不呈线性关系。当压力大于 3MPa 时, K 值基本上不再增大。

液压油的可压缩性对液压传动系统的动态性能影响较大, 但当液压传动系统在静态(稳态)下工作时, 一般不予考虑。

3. 热膨胀性

液体的热膨胀性是指液体因温度升高而体积增大的性质。

液体的热膨胀性用液体的膨胀系数表示。其定义为: 在一定压强下, 单位温度升高, 液体体积的相对增加值, 即:

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dT} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} \quad (1-2-5)$$

α_v 值愈大, 液体愈易热胀。 α_v 的单位是温度的倒数 $\frac{1}{^\circ\text{C}}$ 或 $\frac{1}{\text{K}}$ 。液体的膨胀系数也是随压强和温度而变化。

液体的热膨胀性是很微小的, 再加之液压传动系统的温升不能超过允许值, 所以在一般情况下可忽略不计。

4. 黏性

液体在外力作用下流动或有流动趋势时, 液体分子间的内聚力要阻止液体分子的相对运动, 由此产生一种内摩擦力, 这种性质称为液体的黏性。黏性是流体固有的属性, 但只有在流动时才呈现出来。静止流体不呈现出黏性, 黏性是液压油最重要的特性之一。

1) 牛顿液体内摩擦定律

液体在外力作用下流动时, 由于液体的黏性以及液体和固体壁面间的附着力, 会使液体内部各液层间的流动速度大小不等。如图 1-2-1 所示, 在两平行平板间充满液体, 下平板不动, 上平板以速度 u_0 向右平移。由于液体的附着力和黏性的作用, 两平板间的液体也随之流动。可以把液体流动看成许多无限薄的液层流层, 紧贴于上平板的流层速度为 u_0 , 紧贴于下平板的流层速度为零, 而中间各层液体速度则从上到下按递减规律, 呈线性分布。

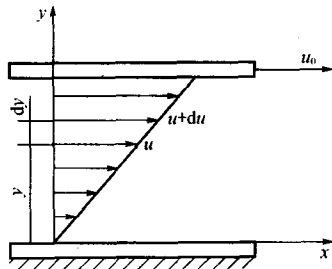


图 1-2-1 液体的黏性示意图

由于液体流动各层的运动速度不相等, 运动较快的流层带动运动较慢的流层; 或者说, 运动较慢的流层阻滞运动较快的流层。这样, 运动较快的流层在运动较慢的流层上流过时, 类似于固体表面之间相对滑动过程, 相邻液层之间必然产生内摩擦力。内摩擦力的方向总是与相对运动趋势相反。

通过大量的实验和理论研究, 1686 年牛顿通过著名的平板试验, 发现了液体内摩擦定律: 液体流动时相邻液体流层间的内摩擦力 F 与液层接触面积 A , 液层相对运动的速度梯度

$\frac{du}{dy}$ 成正比。

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-2-6)$$

式中： μ ——比例常数，称为黏性系数或动力黏度系数。

若以 τ 表示内摩擦切应力，即液层间在单位面积上的内摩擦力，则液体流动时相邻液层单位面积上的内摩擦力 τ 与液体运动时的速度梯度成正比。

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-2-7)$$

以上两式称为牛顿液体内摩擦定律。

2) 黏度

黏性的大小用黏度来表示。黏度是液体流动的缓慢程度的度量。当黏度较低时，液体较稀很容易流动，难流动的液体具有较高的黏度。

常用的黏度有3种：即动力黏度、运动黏度和相对黏度。

①动力黏度——又称为绝对黏度，用动力黏度系数 μ 表示。

由牛顿液体内摩擦定律可得：

$$\mu = \frac{F}{A} \frac{du}{dy} = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (1-2-8)$$

由此可知液体动力黏度的物理意义是：液体在单位速度梯度下流动或有流动趋势时，相接触的液层间单位面积上产生的内摩擦力。

动力黏度的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ($1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)，以前沿用的单位为 P (泊)，它们之间的关系是： $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P}$ 。

②运动黏度——液体的动力黏度 μ 与其密度 ρ 的比值称为液体的运动黏度，用 ν 即：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-2-9)$$

液体的运动黏度没有明确的物理意义，但它在工程实际中经常用到。因为它的单位只有长度和时间的量纲，类似于运动学的量，所以被称为运动黏度。它的法定计量单位为 m^2/s ，与以前沿用的单位 St (斯) (cm^2/s) 之前的关系是： $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ (St) = $10^6 \text{ mm}^2/\text{s}$ (cSt) (厘斯)。

我国液压油的牌号就是用它温度为 40°C 时的运动黏度平均值 cSt (厘斯)来标号，例如L-HV32号液压油，就是指这种油在 40°C 时的运动黏度，平均值为 $32 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。我国的液压油旧牌号则是采用按 50°C 时运动黏度的平均值表示的。

动力黏度和运动黏度为绝对黏度，不易直接测量，一般用于理论计算。

③相对黏度——又称条件黏度，是以液体的黏度与水的黏度比较的相对值表示的黏度，是采用特定的黏度计在规定的条件下测量出来的黏度。

由于测定仪器和条件不同，各国采用的相对黏度也不同，英国用雷氏黏度 (R_1S)，美国采用塞氏黏度 (SSU)，法国采用巴氏黏度 ($^\circ B$)，而我国、前苏联和德国采用的是恩氏黏度 (用 $^\circ E$ 表示)。

恩氏黏度用恩氏黏度计来测定。即将 200 mL 被测液体装入黏度计的容器内，容器周围充水，电热器通过水使液体均匀升温到温度 t ($^\circ\text{C}$)，测出液体由容器底部直径 $\phi 2.8 \text{ mm}$ 的小孔流尽所需的时间 t_1 和同体积蒸馏水在 20°C 时流过同一小孔所需时间 t_2 (通常平均值 $t_2 = 51 \text{ s}$)的比值，这一比值即被称为被测液体在这一温度 t 时的恩氏黏度 $^\circ E$ ，即：