



复旦卓越

普通高等教育21世纪规划教材

机械类、近机械类



液压与气动技术

谢亚青 郝春玲●主编

图书在版编目(CIP)数据

液压与气动技术/谢亚青,郝春玲主编. —上海:复旦大学出版社,2011.12
(复旦卓越·普通高等教育21世纪规划教材·机械类、近机械类)
ISBN 978-7-309-08584-6

I. 液… II. ①谢…②郝… III. ①液压传动-高等学校-教材
②气压传动-高等学校-教材 IV. ①TH137②TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 234652 号

液压与气动技术

谢亚青 郝春玲 主编

责任编辑/张志军

复旦大学出版社有限公司出版发行

上海市国权路 579 号 邮编:200433

网址:fupnet@fudanpress.com <http://www.fudanpress.com>

门市零售:86-21-65642857 团体订购:86-21-65118853

外埠邮购:86-21-65109143

大丰市科星印刷有限责任公司

开本 787×1092 1/16 印张 11.75 字数 250 千

2011 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

ISBN 978-7-309-08584-6/T·434

定价:22.00 元

如有印装质量问题,请向复旦大学出版社有限公司发行部调换。

版权所有 侵权必究

内 容 提 要

液压与气动技术是一项历史悠久、发展成熟、应用极其广泛的技术,已成为包括传动、控制、检测在内的,对现代机械装备技术进步有重要影响的基础技术。由于其独特的原理与性能,其应用遍布国民经济的各个领域,如在机床、工程机械、交通运输、冶金机械、农业机械、塑料机械、锻压机械、航空、航天、航海、兵器、石油与煤炭等许多方面广泛采用。

本教材以液压与气动技术为主线,分10个项目、28个任务,阐明了液压与气动技术的基本原理,着重培养学生分析、设计液压与气动基本回路的能力;安装、调试、使用、维护液压与气动系统的能力。

本书既可作为高职高专院校机械类、机电类专业的专业教材,也可作为各类成人教育、职大、夜大、函大等院校机械类、机电类专业的专业教材,并可供从事液压与气动技术的工程技术与使用维护人员参考。

前 言

液压与气动技术是一项历史悠久、发展成熟、应用极其广泛的技术,特别是近年来与微电子技术、计算机技术相结合,使液压与气动技术进入了一个崭新的历史阶段。液压与气动技术已成为包括传动、控制、检测在内的,对现代机械装备技术进步有重要影响的基础技术。由于其独特的原理与性能,其应用遍布国民经济的各个领域,如在机床、工程机械、交通运输、冶金机械、农业机械、塑料机械、锻压机械、航空、航天、航海、兵器、石油与煤炭等许多方面广泛采用。

本教材以液压与气动技术为主线,分10个项目、28个任务,阐明了液压与气动技术的基本原理,着重培养学生分析、设计液压与气动基本回路的能力,安装、调试、使用、维护液压与气动系统的能力。

本教材在编写过程中突出以下几点:

1. 充分考虑高职教育的职业教育特色和高职学生的学习特点,在教学内容的设计上,以必需、够用为度,注重理论联系实际,强化应用,增加生产现场的应用性知识,力求做到少而精。

2. 为加强学生实际应用能力的培养,对每个项目进行了描述,并设定了该项目的学习目标和能力目标;项目又通过若干个任务来实现,在任务中给出了活动情境、任务要求,以及要完成的技能训练和基本活动。

3. 本书主要介绍了各种液压与气压元件的结构、原理、特性、应用,以及液压与气动基本回路和系统。全书配有大量的工业应用图例,增加学生感性认识,具有很强的实用性,有利于提高学生分析问题和解决问题的能力。

本书项目一、项目五的任务2、项目六、项目七、附录及各任务的思考题、习题,由江苏食品职业技术学院谢亚青编写;项目二、项目三的任务1,由辽宁葫芦岛渤海船舶职业学院郝春玲编写;项目三的任务2、项目四,由江苏联合职业技术学院徐正保编写;项目



五的任务1,由郑州职业技术学院姬耀锋编写;项目八、项目九、项目十,由濮阳职业技术学院赵冬晗编写;全书由谢亚青负责统稿。

本书既可作为高职高专院校机械类、机电类专业的专业教材,也可作为各类成人教育、职大、夜大、函大等院校机械类、机电类专业的专业教材,并可供从事液压与气动技术的工程技术与使用维护人员参考。

尽管我们在教材建设方面作了很多努力,但限于编者水平,教材中难免存在一些缺陷和不妥之处,恳请广大读者多提宝贵意见,以便改进。

编 者

2011年11月

目 录

项目一 液压与气动系统	1	项目六 液压系统回路分析	85
任务 认识液压与气动系统	1	任务 1 压力控制回路设计分析	85
项目二 液压传动基础知识	8	任务 2 方向控制回路设计分析	92
任务 1 认识液压油	8	任务 3 速度控制回路设计分析	93
任务 2 学习液体静力学基础		任务 4 综合回路设计分析	104
知识	15	项目七 典型液压系统分析	114
任务 3 学习液体动力学基础		任务 1 YT4543 型动力滑台液压	
知识	19	系统分析	114
任务 4 认识液压冲击和气穴		任务 2 数控车床液压系统分析	118
现象	23	任务 3 液压机液压系统分析	121
项目三 拆装液压泵和液压马达	26	项目八 气源装置及气动辅助元件	126
任务 1 拆装液压泵	26	任务 1 认识气源装置	126
任务 2 拆装液压马达	39	任务 2 认识气源净化装置及辅助	
项目四 拆装液压缸	44	元件	129
任务 拆装液压缸	44	项目九 气动执行元件和控制元件	
项目五 拆装液压控制阀及辅助		分析	136
装置	55	任务 1 气动执行元件拆装	136
任务 1 拆装液压控制阀	55	任务 2-1 认识流量控制阀并组成	
任务 2 拆装辅助装置	73	速度控制回路	140
		任务 2-2 认识方向控制阀并组成	
		方向控制回路	145
		任务 2-3 认识压力控制阀并组成	



压力控制回路	153	系统分析	169
任务 2-4 认识气动逻辑元件	158	任务 3 汽车车门的安全操纵系统	
任务 2-5 设计其他常用回路	162	分析	171
项目十 气动系统分析	167	附录 常用液压与气动元件图形符号	
任务 1 气动机械手气压传动系统		(摘自 GB/T 786.1—1993)	174
分析	167	参考文献	181
任务 2 数控加工中心气动换刀			

项目一

· 液压与气动技术 ·

液压与气动系统

【项目描述】 本项目主要介绍液压与气动系统的组成、基本工作原理和液压与气动技术的应用,使学生对液压与气压传动有一个概括性了解,为他们以后的学习奠定一定的基础。

【学习目标】 掌握液压与气动系统的组成、基本工作原理和特点。

【能力目标】 能够分析出给定的液压与气动系统的组成及组成系统的元件的作用。

任务 认识液压与气动系统

活动情境

在实验室,认识液压与气动系统。

任务要求

- (1) 认识液压与气动系统的组成。
- (2) 认识液(气)压元件。
- (3) 根据国家标准 GB/T 786.1—1993 所规定的液(气)压元件图形符号绘制系统图。

技能训练

认识液(气)压元件,根据所学的知识组合液(气)压传动系统,按国家标准规定的液(气)压元件图形符号绘制出液(气)压传动系统的系统图,启动系统并观察其工作过程。

基本活动

- (1) 实训准备:液(气)压实验台,液(气)压元件,其他相关工具。
- (2) 学生观察实验台上由教师已经联结好的液(气)压传动系统。
- (3) 学生将联结好的液(气)压传动系统拆开,在指定位置摆放好液(气)压元件,认识液(气)压元件,并说出其名称。
- (4) 组合液(气)压传动系统。
- (5) 在教师检查系统没有错误时,启动系统,并观察其工作过程。

(6) 绘制出所组合的液(气)压传动系统的系统图。

知识链接

液压传动和气压传动统称为流体传动,它是工农业生产中广为应用的一门技术。如今,流体传动技术水平的高低已成为一个国家工业发展水平的标志。液压传动是以液体作为工作介质,利用液体压力能传递运动和动力,具有易于实现直线运动、功率与质量之比大、动态响应快等优点,在航空航天、舰船、武器装备、工程机械、冶金机械、运动模拟器、试验设备、机床、农林机械等领域得到了广泛应用。而气压传动则是以空气作为工作介质,清洁简便、成本低,并具有防火、防爆、防电磁干扰等优点,在轻工、食品、饮料、包装、化工、电子和自动生产线等领域得到了广泛应用。

1. 液压与气动系统的工作原理

液压传动与气压传动的工作原理是相似的,可以从最简单的液压千斤顶入手,图 1-1 所示为液压千斤顶的工作原理图。液压千斤顶由手动柱塞泵和举升缸两部分构成。

(1) 泵吸油过程 向上提起杠杆 1,带动小活塞 3 上行,缸体 2 下腔工作容积增多形成了部分真空,在大气压的作用下,油箱 12 中的油液经过吸油管 5,打开单向阀 4 进入下腔(如注射器将药液“吸”进去的过程)。

(2) 泵压油和重物举升过程 压下杠杆,带动小活塞下移,缸体下腔工作容积减小,其中的油液被挤出,经管道 6,推开单向阀 7,油液进入缸体 9 下腔,推动大活塞 8 向上移动,将重物顶起做功。

(3) 重物落下过程 需要大活塞下移时,将放油阀 11 开启,在重物自重的作用下,液压缸的油液经管道 10 直接流回油箱,大活塞下降到原位。

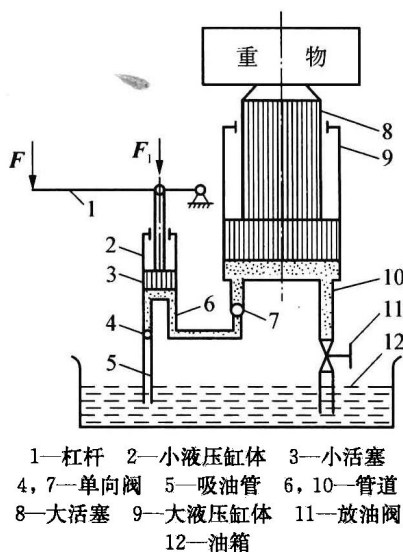


图 1-1 液压千斤顶工作原理图

从液压千斤顶的工作过程,可以归纳出液压传动的工作原理如下:

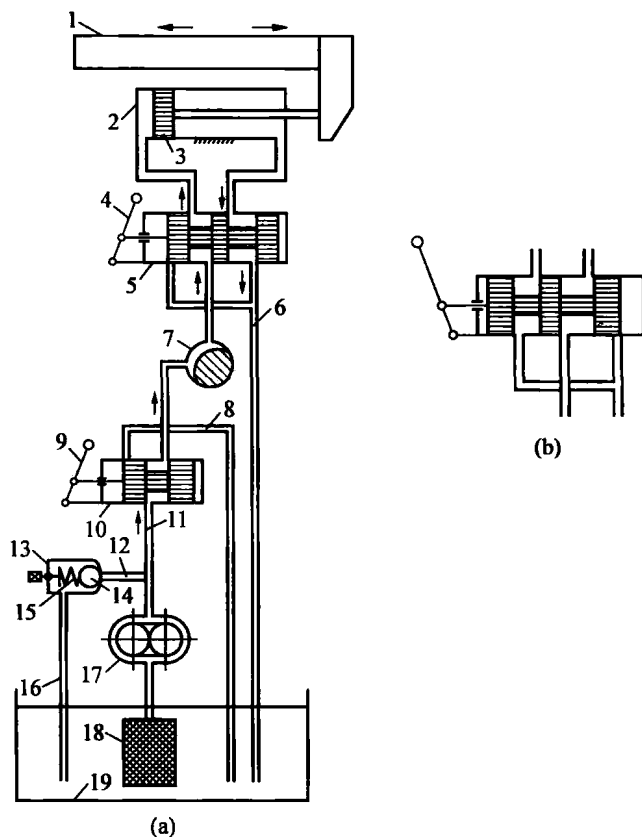
以油液作为工作介质,通过密封容积的变化来传递运动,通过油液内部的压力来传递动力。

气压传动和液压传动实现传动的方法是基本相同的,但其传动的工作介质不同,气压传动的工作介质是空气。气压传动是利用密闭系统中的受压气体来传递运动和动力的一种传动方式。

2. 液压与气动系统的组成

某种机床工作台的液压传动系统半结构图,如图 1-2 所示。

液压泵 17 由电动机驱动,从油箱 19 中吸油。油液经滤油器 18 进入液压泵,泵出口为高压油。在图 1-2(a)所示状态下,通过开停阀 10、节流阀 7、换向阀 5 进入液压缸 2 左腔,推动活塞 3 带动工作台一起向右移动。这时,液压缸右腔的油经换向阀 5 和回油管 6 排回油箱。如果将换向阀手柄 4 转换成图 1-2(b)所示状态,则压力管中的油将经过开停阀、节流阀和换向阀进入液压缸右腔,推动活塞带动工作台向左移动,并使液压缸左腔的油经换向



1—工作台 2—液压缸 3—活塞 4—换向手柄 5—换向阀 6, 8, 16—回油管
7—节流阀 9—开停手柄 10—开停阀 11—压力油管 12—压力支管 13—溢流阀
14—钢球 15—弹簧 17—液压泵 18—滤油器 19—油箱

图 1-2 机床工作台液压系统半结构图

阀和回油管排回油箱。当换向阀的阀芯处于中间位置时,换向阀的进、出油口全被堵死,使液压缸两腔既不进油也不回油,活塞停止运动。此时,液压泵输出的压力油液全部经过溢流阀 13 流回油箱,即在液压泵继续运转的情况下,也可以使工作台在任意位置停止。

气压传动的工作原理是,利用空压机把电动机或其他原动机输出的机械能转换为空气的压力能,然后在控制元件的作用下,通过执行元件把压力能转换为直线运动或回转运动形式的机械能,从而完成各种动作,并对外做功。

图 1-3 所示为某气压传动系统的组成原理图。电机 1 带动空气压缩机 2 旋转,产生压缩空气输送到气罐 3 中,通过过滤器 12、油雾器 11、压力控制阀 4、逻辑元件 5、方向控制阀 6 和流量控制阀 7 进入气缸 9 的一腔,推动气缸的活塞运动。气缸另一腔的气体通过流量控制阀、方向控制阀和消声器 10 排到大气中。由此可知,气压传动系统和液压传动系统类似。

从上述例子可以看出,液压与气动系统若能正常工作必须由以下 5 部分组成。

(1) 动力元件 它的作用是把原动机的机械能转换成液体或气体的压力能,是传动中

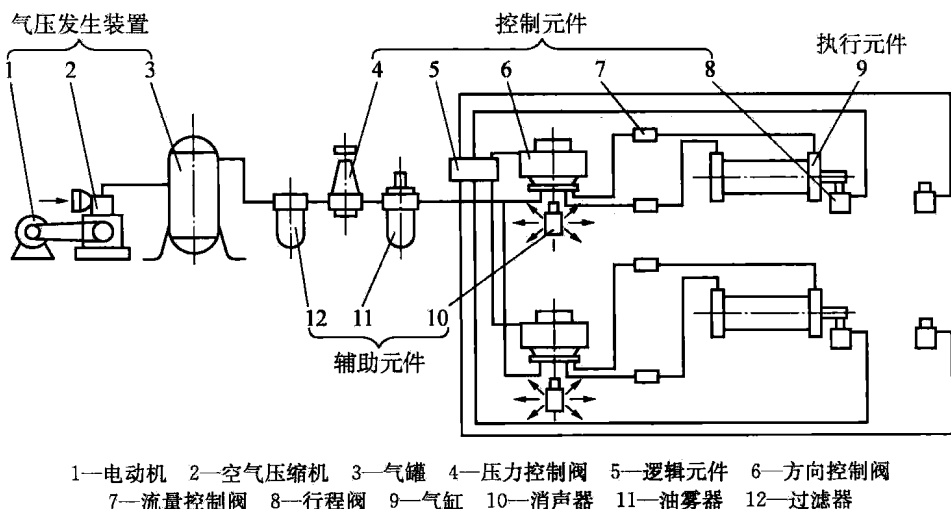


图 1-3 气压传动系统的组成

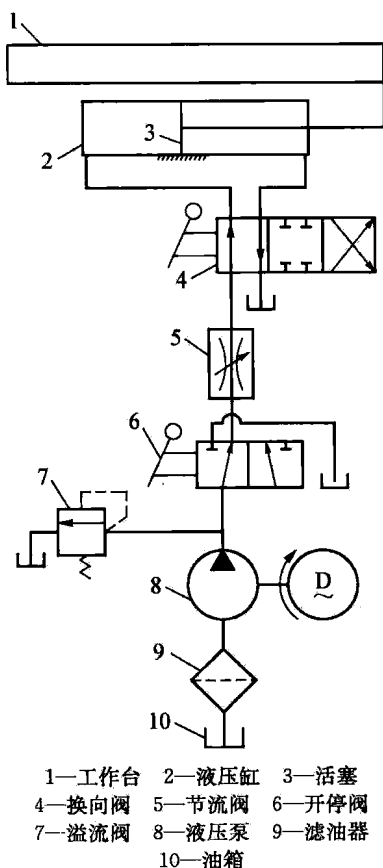


图 1-4 机床工作台液压系统符号图

的动力部分,最常见的形式为各种液压泵和空气压缩机。

(2) 执行元件 它的作用是将液体或气体的压力能转换成机械能,常见元件包括各类液压缸、液压马达及气缸和气马达。其中,缸体做直线运动,马达做旋转运动。

(3) 控制元件 包括压力控制阀、流量控制阀和方向控制阀等。它们的作用是对传动系统中工作介质的压力、流量和方向进行调节控制,满足执行元件不同的动作要求。

(4) 辅助元件 它的作用是保证油及压缩空气的净化、元件间的联结,包括除上述 3 部分以外的其他元件,如压力表、过滤器、蓄能装置、冷却器、各种管接头等。

(5) 工作介质 工作介质是指各类液压传动中的液压油或乳化液,气压传动中的压缩空气,它通过动力元件和执行元件实现能量转换。

3. 液压与气动系统的图形符号

图 1-2 所示的液压系统是一种半结构式的工作原理图,它有直观性强、容易理解的优点,但图形比较复杂,绘制比较麻烦。我国已经制定了用规定的图形符号来表示液(气)压原理图中的各元件和联结管路的国家标准,即《液压气动图形符号》(GB/T 786.1—1993)。采用图形符号来代表各液(气)压元件,绘制液(气)压系统原理图,方便且清晰,如图 1-4 所示。常用液(气)压元件及



液(气)压系统其他有关装置或器件的图形符号见附录。

4. 液压与气压传动的特点

4.1 液压传动的优点

(1) 液压传动装置运行平稳、反应快、惯性小,能高速启动、制动和换向。

(2) 同等功率情况下,液压传动装置体积小、重量轻、结构紧凑。例如,相同功率的液压马达的重量只有电动机的12%左右。

(3) 能在运行中方便地实现无级调速,且调速范围大,最大可达1:2 000(一般为1:100)。

(4) 操作简单、方便,易于实现自动化。当它与电气联合控制时,能实现复杂的自动工作循环和远距离控制。

(5) 易于实现过载保护。液压元件能自行润滑,使用寿命较长。

(6) 液压元件实现了标准化、系列化、通用化,便于设计、制造和使用。

4.2 液压传动的缺点

(1) 液压传动不能保证严格的传动比,这是由于液压油的可压缩性和泄漏等因素造成的。

(2) 液压传动对油温变化较敏感,这会影响它的工作稳定性。因此,液压传动不宜在很高或很低的温度下工作,一般工作温度在 $-15^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内较合适。

(3) 为了减少泄漏,液压元件制造精度要求较高,因此它的造价高,且对油液的污染比较敏感。

(4) 液压传动装置出现故障时,不易查找原因。

(5) 液压传动的传动效率不高。在工作过程中,有较多的能量损失(摩擦损失、泄漏损失等),不宜作远距离传动。

4.3 气压传动的优点

(1) 以空气为工作介质,工作介质获得比较容易,用后的空气排到大气中,处理方便,与液压传动相比不必设置回收的油箱和管道。

(2) 因空气的黏度很小(约为液压油动力黏度的万分之一),其压力损失也很小,所以便于集中供气、远距离输送。而且,泄漏不会像液压传动那样严重污染环境。

(3) 与液压传动相比,气压传动动作迅速、反应快、维护简单、工作介质清洁,不存在介质变质等问题。

(4) 工作环境适应性好,特别在易燃、易爆、多尘埃、强磁、辐射、振动等恶劣工作环境中,比液压、电子、电气控制优越。

(5) 成本低,过载能自动保护。

4.4 气压传动的缺点

(1) 由于空气具有可压缩性,因此工作速度稳定性稍差。但采用气液联动装置会得到较满意的效果。

(2) 因工作压力低,又因结构尺寸不宜过大,总输出力不宜大于10~40 kN。



(3) 噪声较大,在高速排气时要加消声器。

(4) 气动装置中的气信号传递速度在声速以内比电子及光速慢,因此,气动控制系统不宜用于元件级数过多的复杂回路。

5. 液压和气压传动的应用

5.1 液压传动的应用

液压传动在机械设备中的应用非常广泛。有的设备是利用其能传递大的动力,且结构简单、体积小、重量轻的优点,如工程机械、矿山机械、冶金机械等;有的设备是利用它操纵控制方便、能较容易地实现复杂工作循环的优点,如各类金属切削机床、轻工机械、运输机械、军工机械、各类装载机等。液压传动在机械行业中的应用情况,见表 1-1。

表 1-1 液压传动在机械行业中的应用实例

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、铲运机等
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、液压支架等
建筑机械	打桩机、液压千斤顶、平地机等
农业机械	联合收割机、拖拉机、农具悬挂系统等
冶金机械	电炉炉顶及电极升降机、轧钢机、压力机等
轻工机械	打包机、注塑机、校直机、橡胶硫化机、造纸机等
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
智能机械	折臂式小汽车装卸器、数字式体育锻炼机、模拟驾驶舱、机器人等
金属切削机床	磨床、铣床、刨床、组合机床、数控机床、加工中心等

5.2 气压传动的应用

(1) 在机械工业中,如组合机床的程序控制、轴承的加工、零件的检测、汽车制造、木工机械设备和工业机器人中已得到广泛应用。

(2) 在冶金工业中,金属冶炼、烧结、冷轧、热轧、线材、板材的打捆、包装、连铸连轧的生产线上已有大量应用,一个现代化钢铁厂中仅气缸就需 3 000 个左右。

(3) 在轻工、纺织、食品工业中,缝纫机、自行车、手表、彩色电视机、洗衣机、电冰箱、纺织机械、皮鞋、制革、卷烟、食品加工等生产线上已得到广泛应用。

(4) 在化工、军工企业中,对于化工原料的输送、有害液体的灌装、炸药的包装、石油钻采等设备上已有大量应用。

(5) 交通运输中,应用于列车的制动闸、车辆门窗的开闭,气垫船、鱼雷的自动控制装置等。

(6) 在航天工业中,因气动除能承受辐射、高温外还能承受大的加速度,所以在近代的



飞机、火箭、导弹的控制装置中逐渐得到广泛应用。

 思考题

- (1) 想一想,在日常生活中你还见到哪些设备采用了液压与气压传动方式?
- (2) 通过上网查询,列出世界上几个较为知名的液压和气动产品品牌。

 练习题

- 1-1 什么叫液压传动? 液压传动的基本工作原理是什么?
- 1-2 液压传动系统由哪几部分组成? 各组成部分的作用是什么?
- 1-3 液压传动与气压传动有什么不同?
- 1-4 较大型企业往往采用空压站集中向需要压缩空气的车间供气,能否采用同样方法集中供给压力油?

项目二

· 液压与气动技术 ·

液压传动基础知识

【项目描述】 本项目主要分4个任务来介绍液压传动的基础知识,从而使学生对液压传动的基础知识有一个概括性的了解,为以后的学习打下基础。任务1介绍工作介质的物理性质、类型、选择、使用和污染与控制;任务2介绍液体静力学的压力,静压方程,静压力的传递和压力的表示与测量;任务3介绍液体动力学的基本概念、流量连续性方程和伯努利方程;任务4介绍液压冲击和气穴现象。

【学习目标】 掌握液压传动的基础知识,包括工作介质的物理性质、类型、选择、使用和污染与控制;液体静力学中压力的概念和单位,静压方程,静压力的传递和压力的表示与测量;液体动力学的基本概念和连续性方程及应用;液压冲击和气蚀现象及其防治措施。

【能力目标】 能够较容易地鉴别出给定的工作介质(液压油)的品种,正确选择不同液压系统中的液压油,能很好地控制液压油的污染;正确应用静压方程、流量连续性方程和伯努利方程解决实际工程问题;掌握防止在液压系统工作中的液压冲击及气穴现象的方法。

任务1 认识液压油

活动情境

在实验室,通过恩氏黏度计测定液压油的恩氏黏度和认识液压油的品种。

任务要求

- (1) 通过恩氏黏度计测定液压油的恩氏黏度。
- (2) 通过实验认识黏性的意义。
- (3) 认识3种黏度的换算关系。
- (4) 通过实验认识运动黏度和液压油牌号之间的关系。
- (5) 通过简易鉴别法(看、嗅、摇等)认识液压油的品种。

技能训练

通过恩氏黏度计测定液压油的恩氏黏度,认识黏性的意义、表示方法,认识3种黏度的换算关系及运动黏度和液压油牌号之间的关系;通过简易鉴别法(看、嗅、摇等)认识液压油的品种;在不同的液压系统中,正确选择液压油。

基本活动

(1) 实训准备:恩氏黏度计,不同品种的液压油(取特征明显的几种液压油),盛装液压油的容器,其他相关工具。

(2) 教师讲解恩氏黏度的实验方法、液压油的简易鉴别法(看、嗅、摇等),以及实验的相关知识。

(3) 学生通过恩氏黏度计测定恩氏黏度,并通过恩氏黏度计算出运动黏度和动力黏度,检验计算的运动黏度是否符合液压油的牌号。

(4) 学生通过简易鉴别法(看、嗅、摇等)认识液压油的品种。

知识链接

在液压系统中,液压油是传递动力和运动的工作介质。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所用的液压油。因此,了解油液的基本性质和主要力学规律,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。

1. 液压油的作用和种类

液压油在液压系统中起着能量传递、系统润滑、防腐、防锈、冷却等作用。液压油首先要满足液压装置在工作温度与启动温度下对液体黏度的要求,因为油的黏度变化直接与液压动作、传递效率和传递精度有关。还要求油的黏温性能和剪切安定性,应满足不同用途所提出的各种需求。另外,液压油要与液压系统金属和密封材料有良好的配伍性、良好的过滤性,具有抗腐蚀能力和抗磨损能力以及抗空气夹带和起泡倾向,热稳定性及氧化安定性要好。对于某些特殊用途,还应具有耐燃性和对环境不造成污染(如易于生物降解和无毒性)。

液压油的种类繁多,主要可分为3大类:石油型、合成型和乳化型。

石油型液压油是以机械油为原料,精炼后按需要加入适量添加剂而成,这类液压油润滑性能好,但抗燃性较差。在一些高温、易燃、易爆的工作场合,为了安全起见,应该在系统中使用合成型和乳化型,如磷酸酯、水-乙二醇等合成液或油包水、水包油等乳化液。液压油的主要品种及其性质,见表2-1。

2. 液压油的性质

2.1 黏性

2.1.1 牛顿液体内摩擦定律

液体在外力作用下流动时,分子之间的内聚力要阻止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黏性。它是液体的重要物理性质,也是选择液压油的主要依据。

表 2-1 液压油的主要品种及其性质

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 酯液	水-乙 二醇液	油包 水液	水包 油液
密度/(kg/m ³)	850~900			1 100~1 500	1 040~1 100	920~940	1 000
黏度	小~大	小~大	小~大	小~大	小~大	小	小
黏度指数 VI 不小于	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/℃ 不低于	170~200	170	150~170	难燃	难燃	难燃	不燃
凝点/℃ 不高于	-10	-25	-35~-45	-20~-50	-50	-25	-5

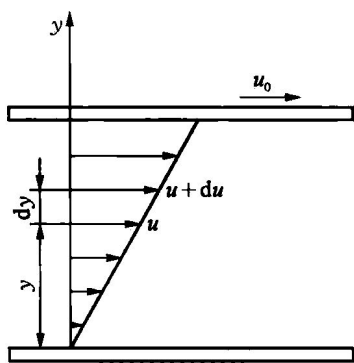


图 2-1 液体的黏性示意图

液体只有在流动时才会呈现黏性，静止液体不呈现黏性。液体流动时，由于液体和固体壁面间的附着力以及液体本身的黏性，会使液体各层面间的速度大小不等，如图 2-1 所示。若两平行平板间充满液体，下平板固定，而上平板以速度 u_0 向右平动，由于液体的黏性作用，紧靠着下平板的液体层速度为零，紧靠上平板的液体层速度为 u_0 ，而中间各层液体速度则从上到下递减，呈线性分布。

实验测定指出，液体流动时相邻液层间的内摩擦力 F 与液层接触面积 A 、液层间相对运动的速度梯度 du/dy 成正比，即

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

式中， μ 为比例常数，又称为黏性系数或动力黏度。

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

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

这就是牛顿液体内摩擦定律。

2.1.2 黏度

液体黏性的大小用黏度来表示，常用的黏度有 3 种。

(1) 动力黏度 表征流体黏性的内摩擦系数或绝对黏度，用 μ 表示，即