



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

液压与气动技术

(第二版)

主 编 林喜娜 王 强 石 磊



扫描二维码
共享立体资源

液压与气动技术
(第二版)
主 编 林喜娜 王 强 石 磊

北京出版集团
北京出版社

北京出版集团
北京出版社

图书在版编目(CIP)数据

液压与气动技术 / 林喜娜, 王强, 石磊主编. — 2
版. — 北京: 北京出版社, 2020.9

ISBN 978-7-200-16014-7

I. ①液… II. ①林… ②王… ③石… III. ①液压传
动—高等学校—教材②气压传动—高等学校—教材 IV.
① TH137 ② TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 209224 号

液压与气动技术 (第二版)

YEYA YU QIDONG JISHU (DI-ER BAN)

主 编: 林喜娜 王 强 石 磊

出 版: 北京出版集团
北 京 出 版 社

地 址: 北京北三环中路 6 号

邮 编: 100120

网 址: www.bph.com.cn

总 发 行: 北京出版集团

经 销: 新华书店

印 刷: 定州启航印刷有限公司

版 印 次: 2020 年 9 月第 2 版 2020 年 9 月第 1 次印刷

成品尺寸: 185 毫米 × 260 毫米

印 张: 15.5

字 数: 314 千字

书 号: ISBN 978-7-200-16014-7

定 价: 46.50 元

教材意见建议接收方式: 010-58572162 邮箱: jiaocai@bphg.com.cn

如有印装质量问题, 由本社负责调换

质量监督电话: 010-82685218 010-58572162 010-58572393

目 录

项目一 YCS-A 实验工作台的组装与调试	01
工作情境 某教学仪器公司液压实验台的组装调试	01
任务一 认识液压传动系统	03
任务二 液压油的选用与防护	10
任务三 液压泵安装高度的确定	18
任务四 解决液体流动的问题	31
任务五 小孔及缝隙流量的确定	37
项目思维导图	42
职业技能知识点考核	43
项目二 液压泵的检查、拆装及维护	45
工作情境 某学校液压实验室实验台液压泵故障诊断分析	45
任务一 认识液压泵及铭牌标识	47
任务二 齿轮泵的拆装及特性分析	51
任务三 叶片泵的拆装及特性分析	59
任务四 柱塞泵的拆装及特性分析	66
任务五 液压泵的选用	74
项目思维导图	77
职业技能知识点考核	78



项目三 MJ-50 数控车床液压系统的安装 81

工作情境 某机床制造厂制造安装 MJ-50 型数控车床 81

任务一 液压执行元件的选择 83

子任务一 液压缸的选择及参数设计 83

子任务二 液压马达的选择及参数设计 92

任务二 液压控制元件的选择 98

子任务一 方向控制阀的选择 99

子任务二 压力控制阀的选择 112

子任务三 流量控制阀的选择 126

任务三 液压辅助元件的选择 132

项目思维导图 146

职业技能知识点考核 147

项目四 镗、铣半自动机床动力滑台液压系统分析 149

工作情境 某机械零部件制造厂镗、铣半自动机床维修维护 149

任务一 方向控制回路分析 151

任务二 压力控制回路分析 154

任务三 速度控制回路分析 164

任务四 多缸控制回路分析 179

任务五 YT4543 型动力滑台的液压系统分析 187

项目思维导图 192

职业技能知识点考核 193

项目五 面粉袋包装机气动系统设计	196
工作情境 某面粉厂全自动面粉袋包装机组的设计	196
任务一 认识气压传动系统	198
任务二 面粉袋包装机气动系统元件的选择	202
任务三 面粉袋包装机气动系统设计	226
项目思维导图	230
职业技能知识点考核	230
附录 液压与气压传动常用图形符号	232

项目一

YCS-A 实验工作台的组装与调试

工作情境 某教学仪器公司液压实验台的组装调试

项目引入

某教学仪器有限公司，正在组装调试一台液压实验台，如果你是装配调试工人，应考虑哪些问题？完整的液压系统包括什么？安装时有哪些注意事项？容易出现哪些问题，如何解决？

项目要求

借助液压传动实验台（图 1-1）演示液压传动系统的组成及工作过程，引导同学们自己动手演示，观察其结构特点及工作原理。

通过演示液压传动实验台，观察液压系统的结构及工作过程。在实际观察和操作的基础上，分析液压系统的工作原理及工作过程，感知液压传动的结构及工作原理、特点，对液压系统有初步的认识。

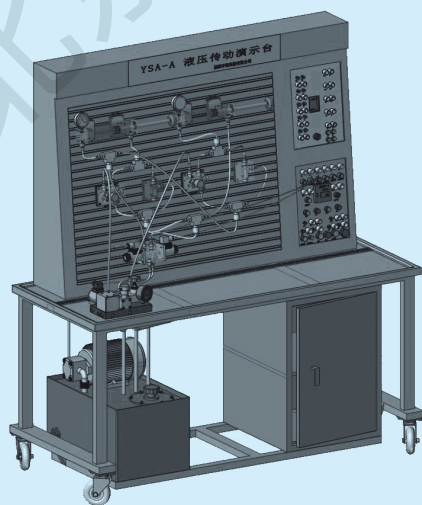
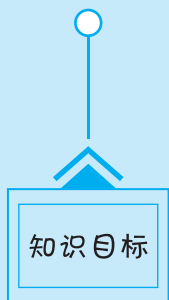


图 1-1 液压传动实验台



1. 掌握液压传动的基本原理。
2. 了解液压传动优缺点及应用发展状况。
3. 掌握液压油的物理性质及选用原则。
4. 掌握压力的表示方法。
5. 了解液体静力学及动力学基本方程的应用。
6. 掌握液压冲击及空穴现象产生的原因及预防措施。



1. 具有分析生活中用到的液压设备或者装置的能力。
2. 具有应用流体力学知识分析液压系统应用中的具体问题的能力。
3. 具有分析和处理液压系统运行中的常见问题的能力。



1. 具备认真踏实、严谨细致、吃苦耐劳的工作态度。
2. 具备良好的团队协作和组织协调能力。
3. 具备良好的沟通、应变能力及自信心。
4. 具备良好的职业道德素质、人文素养和工匠精神。
5. 具备较强学习能力与主动性。

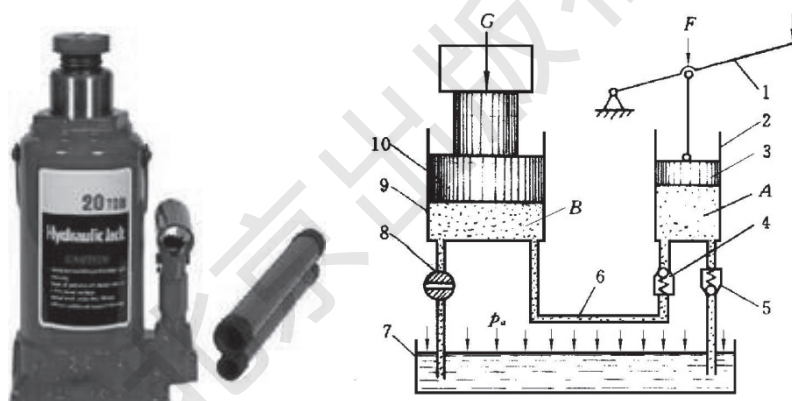
任务一 ··· 认识液压传动系统

任务目标

1. 会分析液压传动的组成及工作原理。
2. 会分析液压传动的优缺点。
3. 能够指出生活或工程中用到的液压设备或者装置。
4. 培养学生具有良好职业道德、人文素养和工匠精神。

任务引入与分析

手动液压千斤顶是一种新型多用工具(图 1-2),在装配与维修等工作中经常会用到,若在使用过程中,发生“能顶起重物却途中下降”故障,应该如何解决?



1—杠杆手柄; 2—小缸体; 3—小活塞; 4、5—单向阀;
6—油管; 7—油箱; 8—截止阀; 9—大缸体; 10—大活塞

图 1-2 手动液压千斤顶工作原理图

知识链接

液压传动是以液体作为工作介质,利用液体的压力能来实现能量传递的传动方式。相对于机械传动来说,液压传动是一门较新的技术。由于它具有许多突出的优点,近年来被广泛应用在工业、农业、交通、军事等各方面,也被应用在宇宙航行、海洋开发、核能建设等新的技术领域中。



千斤顶工作原理



一、液压传动的工作原理

液压传动的应用领域很广,具体的液压传动结构也比较复杂。下面仅以图 1-2 所示的液压千斤顶为例,简述液压传动的工作原理。图中,大小两个缸体 9 和 2 分别装有活塞 10 和 3,活塞和缸体之间配合良好,不仅活塞能在缸体内滑动,而且配合面之间又能实现可靠密封,液体不会产生泄漏,加之单向阀 4、5 和截止阀 8 的作用,便形成两个密封容腔。而杠杆手柄 1、小缸体 2、小活塞 3 及两个单向阀 4、5 组成手动液压泵;大缸体 9 和大活塞 10 组成举升液压缸。当提起手柄使小活塞上移时,其下端油腔容积增大,形成局部真空,油箱中的油液在大气压作用下,通过吸油管,顶开单向阀 5,补充到小活塞下端,完成吸油过程;用力压下手柄时,小活塞下移,其下腔油液受到挤压作用压力升高,使单向阀 5 关闭,有效防止了油液向油箱倒流,同时受压力作用的单向阀 4 开启,小活塞 3 下腔的油液输入大缸体 9 的下腔,迫使大活塞 10 上移,重物被顶起,完成一次压油过程。再次提起手柄完成吸油过程时,小缸体内再次形成的局部真空导致单向阀 4 自动关闭,使大活塞下腔油液不能倒流,从而保证重物不会因再次吸油而下滑。不断地往复扳动手柄,就能不断地把油液压入举升缸下腔,使重物逐渐升起。适当地选择两个大、小活塞面积和杠杆比,就可以用很小的外力举起很重的负载重物 G ,重物举升的速度决定于小活塞的下移速度和大、小活塞的面积之比。

千斤顶工作时,截止阀 8 关闭。当需要将大活塞(重物)放下时,打开截止阀 8,大缸中的油液在重力作用下经此阀流回油箱,大活塞下降到原位实现回程。

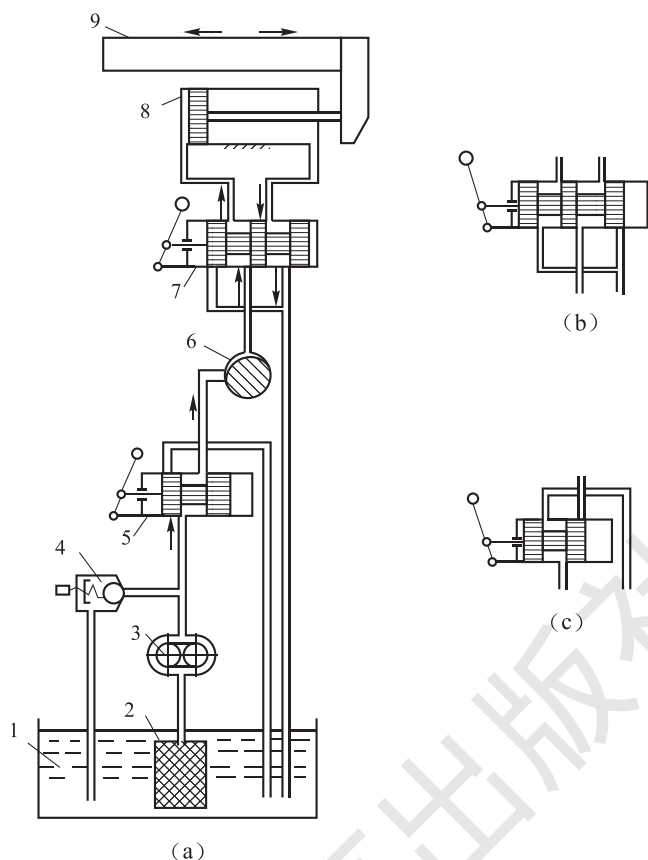
液压千斤顶是一个简单的液压传动装置,其右部分的手动液压泵不断地从油箱吸油并将油液压入举升液压缸,向举升液压缸提供具有一定流量的压力油液。举升液压缸用以带动负载,使之获得所需要的运动。从分析液压千斤顶的工作过程可知,液压传动是以密封容腔中的液体作为工作介质,利用密封容积变化过程中的液体压力能来实现动力和运动传递的一种能量转换装置。液压泵将输入的机械能转化为便于输送的液体压力能,然后举升液压缸,又将液压能转换为机械能输出而做功。所以,在液压传动中,在传递能量的同时,还存在着能量形式的转换。

二、液压传动的系统组成

(一) 简单机床的液压系统

液压传动,是指利用高压的液体经由一些机件控制之后来传递运动和动力。图 1-3(a)所示为一驱动机床工作台做往复运动的液压传动系统,它由油箱 1、滤油器 2、液压泵 3、溢流阀 4、换向阀 5 和 7、节流阀 6、液压缸 8、工作台 9 以及连接这些元件的油管、管接头等组成。

液压泵由电机驱动旋转,油液经滤油器从油箱中吸入液压泵,泵输出的压力油经换向阀 5、节流阀 6、换向阀 7 进入液压缸左腔。此时,液压缸右腔的油液经换向阀 7 和回油管路排回油箱,液压缸推动工作台向右移动。



磨床工作台工作原理

1—油箱；2—滤油器；3—液压泵；4—溢流阀；5、7—换向阀；
6—节流阀；8—液压缸；9—工作台

图 1-3 机床工作台液压系统的工作原理

当把换向阀 7 的手柄移动到图 1-3 (b) 所示状态时, 经节流阀 6 的压力油经换向阀 7 进入液压缸右腔。此时液压缸左腔的油经换向阀 7 和回油管排回油箱, 液压缸推动工作台向左移动。因而换向阀 7 的主要功能是控制液压缸中液体的流向, 进而控制工作台的运动方向。

工作台的移动速度就是液压缸活塞运动速度, 由节流阀 6 调节。改变节流阀的开口量大小, 便可调节流入液压缸油液的流量, 以控制工作台的运动速度。液压泵输出的多余油液, 经溢流阀 4 和回油管溢回油箱。

液压缸推动工作台移动时必须克服液压缸受到的各种阻力, 因而液压缸必须产生一个足够大的推力。这个推力是由液压缸中的油液压力产生的。要克服的阻力越大, 液压缸中的油液压力越高; 反之, 压力就越低。系统中由于节流阀调节输入液压缸油液的流量, 而液压泵输出的多余油液则经溢流阀排回油箱。只有在压力管路中的油液压力等于或略大于溢流阀中弹簧的预压力时, 油液才能冲开溢流阀流回油箱, 所以图示系统中液压泵出口处的油液压力是由溢流阀调定的。一般情况下, 液压泵出口处溢



流阀的调定压力值大于液压缸的工作压力(由负载决定),以克服负载和油液流经各种阀体和油管的压力损失。因而溢流阀在液压系统中的主要功能是控制系统的工作压力。

当需要短期停止工作台运动时(如在装卸工件或测量尺寸时),可以拨动换向阀 5 的操纵手柄,使其阀芯处于左位,如图 1-3(c)所示状态。此时,液压泵输出的油液不能流入液压缸,而是经换向阀 5 直接排回油箱,同时液压缸的进油管路被关闭,工作台停止运动。所以换向阀 5 通常又称为开停阀。这种情况液压泵没有负载,泵输出的油液便没有压力(忽略管路压力损失),这种状态称为卸荷。

液压系统中的滤油器 2 用以限制油液中的杂质进入泵和液压系统,保证油液的清洁度,使系统工作正常。

(二) 液压传动系统组成

液压装置一般由动力元件、执行元件、控制调节元件、辅助元件和工作介质组成。

(1) 动力元件。它将机械能转换成液体压力能。常见的液压泵由电动机带动,它提供一定流量的压力油液。

(2) 执行元件。它将液体压力能转换成机械能。液压系统最终目的是要推动负载运动,执行装置分为液压缸与液压马达(或摆动缸)两类。液压缸使负载做直线运动,液压马达(或摆动缸)使负载转动(或摆动)。

(3) 控制调节元件。液压系统除了让负载运动以外,还要完全控制负载的整个运动过程。在液压系统中,用压力阀来控制力量,流量阀来控制速度,方向阀来控制运动方向。

(4) 辅助元件。用来储存液压油的油箱,增强液压系统功能需有去除油内杂质的过滤器,还有冷却器及蓄能器等液压元件,我们称这些元件为辅助元件。

(5) 工作介质。传动液体,通常采用液压油。它用于实现动力和运动的传递。

三、液压传动的优缺点及应用

(一) 液压传动的优点

与机械传动、电气传动相比,液压传动具有以下优点。

(1) 在传递同等功率的情况下,液压传动装置的体积小、重量轻、结构紧凑。据统计,液压马达的重量只有同功率电动机重量的 10% ~ 20%,而且液压元件可在很高的压力下工作,因此液压传动能够传递较大的力或力矩。

(2) 液压装置由于重量轻、惯性小、工作平稳、换向冲击小,易实现快速启动、制动和换向频率高。对于回转运动每分钟可达 500 次,直线往复运动每分钟可达 400 ~ 1 000 次,这是其他传动控制方式无法比拟的。

(3) 液压传动装置易实现过载保护,安全性好,不会有过负载的危险。

(4) 液压传动装置能在运动过程中实现无级调速,调速范围大(可达范围 1:2 000),

速度调整容易,而且调速性能好。

(5) 液压传动装置调节简单、操纵方便,易于自动化,如与电气控制相配合,可方便地实现复杂的程序动作和远程控制。

(6) 工作介质采用油液,元件能自行润滑,故使用寿命较长。

(7) 元件已标准化、系列化和通用化。便于设计、制造、维修和推广使用。

(8) 液压装置比机械装置更容易实现直线运动。

(二) 液压传动的缺点

(1) 由于接管不良等原因造成液压油外泄,它除了会污染工作场所外,还有引起火灾的危险。

(2) 液压系统大量使用各式控制阀、接头及管子,为了防止泄漏损耗,元件的加工精度要求较高。

(3) 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造成的。

(4) 油温上升时,黏度降低;油温下降时,黏度升高。油的黏度发生变化时,流量也会跟着改变,造成速度不稳定。

(5) 系统将机械能转换成液体压力能,再把液体压力能转换成机械能做功,能量经两次转换损失较大,能源使用效率比传统机械低。

(6) 液压传动由于在两次能量转换过程中存在机械摩擦损失、液体压力损失和泄漏损失等,故不宜远距离传输。

(7) 液压传动装置出现故障时不易追查原因,不易迅速排除。

综上所述,液压传动的优点是主要的,缺点会随生产技术水平提高被逐步克服。因此,液压技术的发展十分迅速,它将在现代化生产中发挥越来越重要的作用。

(三) 液压传动技术的应用

由于液压传动优点很多,因而在国民经济的各个部门得到了广泛应用(表 1-1)。目前,其应用领域仍在不断扩展,从组合机床、机械手、自动加工及装配线到金属及非金属压延、注射成型设备,从材料及机构强度试验机到电液仿真试验平台,从建筑、工程机械到农业、环保设备,从能源机械调整控制到热力与化工设备过程控制,从橡胶、皮革、造纸机械到建筑材料生产自动线,从采煤机械到石油钻探及采收设备,从航空航天器控制到船舶、火车、汽车等运输设备等,液压传动与控制技术已成为现代机械工程制造业的基本要素和工程控制关键技术之一。

液压传动与控制技术在各个领域和部门中应用的出发点不尽相同。例如,工程机械、矿山机械、起重运输机械、压力机械等领域采用液压传动技术的重要原因是取其结构简单、体积小,可输出大力、大功率;航空、航天等领域采用液压传动技术的主要原因是其单位功率的重量轻、结构尺寸小;机床及其加工自动线上采用液压传动技术是取其能在工作过程中实现无级调速,易于实现频繁启动、制动及换向,易于实现自动化等。



表 1-1 液压传动在各类机械行业中的应用

行业名称	应用举例	行业名称	应用举例
工程机械	挖掘机、装载机、推土机	轻工机械	打包机、注塑机
矿山机械	凿石机、开掘机、提升机、液压支架	灌装机械	食品包装机、真空镀膜机、化肥包装机
冶金机械	轧钢机、压力机、步进加热炉	汽车工业	高空作业机、自卸式汽车、汽车起重机
锻压机械	液压机、模锻机	铸造机械	砂型压石机、加料机、压铸机
建筑机械	打桩机、液压千斤顶、平地机	纺织机械	织布机、抛砂机、印染机
机械制造	组合机床、车床、自动线	电子机械	IC 制造业

(四) 液压传动技术的发展概况

对于机械传动来说,液压传动是一门新兴的技术。如果从 17 世纪中叶帕斯卡提出静压力传递原理、18 世纪末英国制成世界上第一台水压机算起,液压传动已有 300 年的历史。然而广泛应用于工业、农业和国防等各个部门,还是近五六十年的事。

19 世纪是液压传动技术走向工业应用的世纪。18 世纪以前奠定的流体力学、热力学、摩擦学、机构学及控制理论等科学基础及机器制造工艺基础,为 20 世纪流体传动与控制技术的发展提供了科学与技术条件。值得一提的是,1905 年美国人詹尼(Janney)首先将矿物油引入液体传动作为传动介质,并设计研制了第一台轴向柱塞泵及其液压驱动装置。液压油的引入,为改善液压元件的摩擦、润滑和泄漏,提高液压系统工作压力创造了条件。由于没有成熟的液压元件,一些通用的机床设备及机械直到 20 世纪 30 年代才开始采用液压传动技术,而且很不普遍。第二次世界大战期间,大规模的武器生产促进了机械制造工业标准化、模块化概念与技术的形成和发展,车辆、舰船、航空、兵器等采用了反应快、动作准、功率大的液压传动装置,推动了液压元件功率密度和控制性能的提高,推动了液压技术的发展。战后,液压技术迅速转向民用,在机床、工程机械、汽车等行业中逐步推广。20 世纪 60 年代以后,随着原子能、空间技术、计算机技术等的发展,液压技术已渗透到国民经济的各个领域,得到了长足发展。我国的液压工业起步较晚,开始于 20 世纪 50 年代,但发展很快,现已形成了具有一定独立开发、设计能力,能生产一批技术先进、质量较好的液压元件和系统,产品门类比较齐全,具有一定技术水平和相当规模的液压工业体系。可以预期,随着我国国民经济的飞速发展,必将促进液压技术得到更为广泛的应用和发展,在我国现代化建设的进程中起到重要作用。

通过回顾历史可看出,液压传动技术是机械设备中发展速度最快的技术之一。特别是近年来液压与微电子、计算机技术相结合,使液压技术进入了一个新的发展阶段,使未来的液压技术变得更为机械、电子一体化、模块化、智能化和网络化。按照可持续发

展理念，未来液压传动介质、材料、工艺及产品应符合生态与环保要求，符合可再生、可持续发展要求，新的液压传动介质将可能具有自洁净、自补偿（压敏、场敏、温敏）、自降解（光敏或生物降解），更适应传动、润滑和生态环境友好的要求。随着材料科学的发展，新材料、新工艺被引入液压技术，将使液压传动与控制元器件加工精度及表面质量达到新的量级，从而使元器件效率、寿命得以数量级地提高。

任务实施

1. 设备、工具准备：手动液压千斤顶、扳手、液压回路图及工作原理动画。
2. 任务分析：
 - （1）操作使用千斤顶。
 - （2）借助液压回路图及工作原理动画分析结构原理。
 - （3）分析故障原因。

任务评价

表 1-2 过程考核评价表

评价内容	评价要素	评价方式			得分
		小组 自评 30%	小组 互评 30%	教师 评价 40%	
职业素养	语言表达能力和逻辑分析能力（10） 具有科学、严谨、创新的工作态度（10） 具有较强的安全意识、质量意识（10）				
专业知识 与技能	千斤顶操作能力（10） 千斤顶组成部分的分析（30） 千斤顶工作原理的分析（30）				

任务拓展

根据换向阀不同位置分析工作过程的油流情况。（图 1-4）

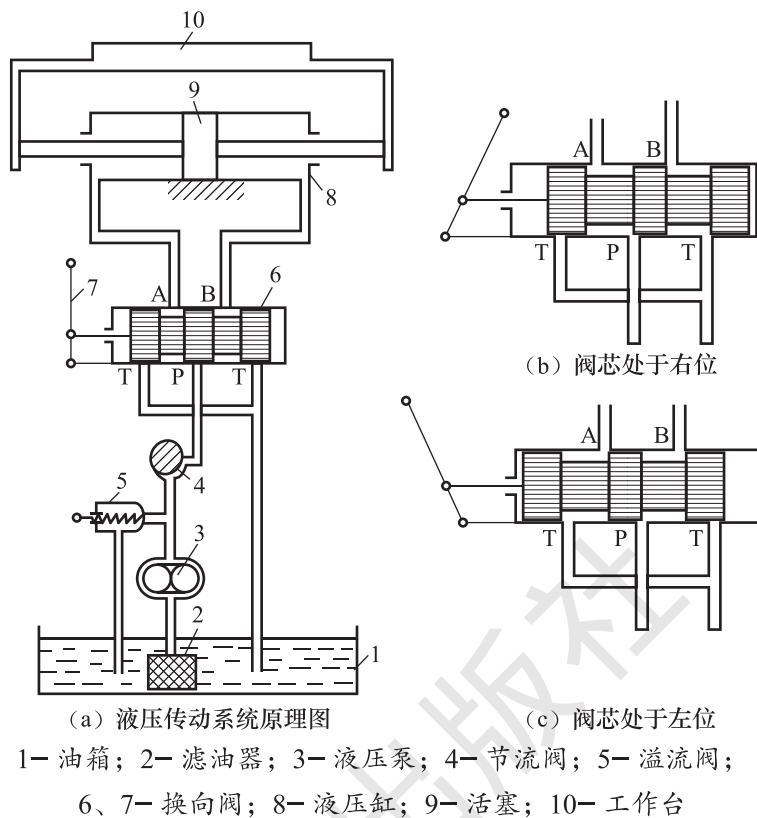


图 1-4 液压传动系统工作原理

1. 换向阀处于图 1-4 (b) 图位置时, 分析油液的流通过程及工作台的移动方向。
2. 换向阀处于图 1-4 (c) 图位置时, 分析油液的流通过程及工作台的移动方向。

思考与练习

1. 什么是液压传动? 液压传动的基本原理是什么?
2. 与其他传动方式相比, 液压传动主要有哪些优点和缺点?
3. 试举出几个生产生活中用到的液压设备或者液压装置。

任务二

··· 液压油的选用与防护



任务目标

1. 会分析液压油的物理性质。
2. 具有日常生活中或者工程实际中选用液压油的能力。
3. 能根据需要定期给液压设备更换液压油, 清洗和更换滤油器。

4. 培养学生具有良好职业道德、人文素养和工匠精神。

任务引入与分析

如果把液压系统比作人体躯干,那么液压油就相当于人体血液,在液压系统中,液压油起着能量传递、系统润滑、防腐、防锈、冷却等作用,液压系统能否有效地工作,与所选用的液压油的品种及黏度密切相关。而且液压装置的故障,70%与液压油有关,并且这70%中约90%是由于杂质所造成的。如果你是液压装配维修人员,如何进行液压油的选用和日常防护?

知识链接

液压传动中的工作介质在液压传动中不仅起传递运动和动力的作用,还起润滑、冷却、密封和防锈的作用。工作介质性能的好坏,选择是否得当,对液压系统能否有效、可靠地工作影响很大。因此,在掌握液压系统之前,必须先对工作介质有一个基本认识。

一、工作介质的物理特性

(一) 密度

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

式中: m ——液体的质量(kg);

V ——液体的容积(m^3 或 cm^3)。

液体的密度随温度和压力的变化而变化。对于液压系统的矿物油,在一般使用温度与压力范围内,其密度变化很小,可近似认为不变。其密度 $\rho \approx 900 \text{ kg/m}^3$ 。空气密度随温度和压力变化的规律符合气体状态方程。在标准状态下空气密度为 1.293 kg/m^3 。

(二) 液体的黏性

1. 黏性的含义。

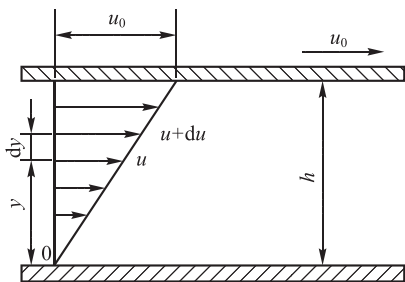
液体在外力作用下流动时,由于液体分子间的内聚力而产生一种阻碍液体分子之间进行相对运动的内摩擦力,液体的这种产生内摩擦力的性质称为液体的黏性。由于液体具有黏性,当液体发生剪切变形时,液体内部就产生阻滞变形的内摩擦力,由此可见,黏性表征了液体抵抗剪切变形的能力。处于相对静止状态的液体中不存在剪切变形,因而也不存在变形的抵抗,只有当运动液体流层间发生相对运动时,液体对剪切变形的抵抗,也就是黏性才表现出来。黏性所起的作用为阻滞液体内部的相互滑动,在任何情况下它都只能延缓滑动的过程而不能消除这种滑动。

2. 牛顿内摩擦定律。

黏性的大小可用黏度来衡量,黏度是选择液压用液体的主要指标,是影响流动液体



的重要物理性质。



牛顿内摩擦定律实验

图 1-5 液体的黏性示意图

当液体流动时,由于液体与固体壁面的附着力及液体本身的黏性使液体各处的速度大小不等,以液体沿图 1-5 所示的平行平板间的流动情况为例,设上平板以速度 u_0 向右运动,下平板固定不动。紧贴于上平板的液体黏附于上平板上,其速度与上平板相同。紧贴于下平板的液体黏附于下平板上,其速度为零。中间液体的速度按线性分布。我们把这种流动看成是许多无限薄的液体层在运动,当运动较快的液体层在运动较慢的液体层上滑过时,两层间由于黏性就产生内摩擦力的作用。根据实际测定的数据所知,液体层间的内摩擦力 F 与液体层的接触面积 A 及液体层的相对流速 du 成正比,而与此两液体层间的距离 dy 成反比,即:

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

式中: μ ——比例系数,也称为液体的黏性系数或黏度;

$\frac{du}{dy}$ ——相对运动速度对液体层间距离的变化率,也称速度梯度或剪切率。

此公式称为牛顿黏性公式,也称牛顿内摩擦定律。

液体黏性的大小用黏度来表示。常用的黏度有动力黏度、运动黏度和相对黏度。

3. 液体的黏度。

(1) 动力黏度 μ 。

上式中的比例系数 μ 表示液体抵抗变形的能力,即液体黏性的大小,称为液体的动力黏度。其单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, 或为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

(2) 运动黏度 ν 。

运动黏度是动力黏度 μ 与密度 ρ 的比值:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-3)$$

运动黏度 ν 无明确的物理意义,因为在其单位中只有长度和时间量纲,所以称为运动黏度。但在工程中常用它来标志液体的黏度。液压油的牌号,就是采用它在 40°C

时运动黏度的平均值来标号。例如 YA-N32 液压油就是指这种液压油在 40 °C 时运动黏度的平均值为 32 mm²/s。

(3) 相对黏度。

在液体黏度的实际测量过程中常用的黏度表示方法是相对黏度（又称条件黏度）。由于测量仪器和条件不同，各国相对黏度的单位也不同，如美国采用赛氏黏度（SSU），英国采用雷氏黏度（R），而我国和德国则采用恩氏黏度（°E）。

恩氏黏度的测定方法如下：测出 200 cm³ 某一温度的被测液体在自重作用下流过直径为 2.8 mm 小孔所需的时间为 t_A ，然后测出同体积的蒸馏水在 20 °C 时流过同一小孔所需时间 t_B （ $t_B=50 \sim 52$ s）， t_A 与 t_B 的比值即为液体的恩氏黏度值。恩氏黏度用符号 °E 表示。被测液体温度为 t °C 时的恩氏黏度用符号 °E_t 表示。

$$^{\circ}E_t = t_A / t_B \quad (1-4)$$

恩氏黏度与运动黏度的换算关系为：

$$\nu = 0.073 \, 1^{\circ}E - \frac{0.063 \, 1}{^{\circ}E} (\text{cm}^2/\text{s}) \quad (1-5)$$

4. 压力对黏度的影响。

在一般情况下，压力对黏度的影响比较小，在工程中当压力低于 5 MPa 时，黏度值的变化很小，可以不考虑。当液体所受的压力加大时，分子之间的距离缩小，内聚力增大，其黏度也随之增大。因此，在压力很高以及压力变化很大的情况下，黏度值的变化就不能忽视。在工程实际应用中，在液体压力低于 50 MPa 的情况下，可用下式计算其黏度：

$$\nu_p = \nu_0 (1 + a_p \cdot p) \quad (1-6)$$

式中： ν_p ——压力在 p （Pa）时的运动黏度；

ν_0 ——绝对压力为 1 个大气压时的运动黏度；

p ——压力（Pa）；

a_p ——决定于液体的黏度及液体温度的系数，一般取 $a_p = (0.002 \sim 0.004) \times 10^{-5} (1/\text{Pa})$ 。

5. 温度对黏度的影响。

液压油黏度对温度的变化是十分敏感的，当温度升高时，其分子之间的内聚力减小，黏度就随之降低。不同种类的液压油，它的黏度随温度变化的规律也不同。我国常用黏温图表示油液黏度随温度变化的情况。对于一般常用的液压油，当运动黏度不超过 76 mm²/s，温度在 30 ~ 150 °C 范围内时，可用下述近似公式计算其温度为 t °C 的运动黏度：

$$\nu_t = \nu_{50} (50/t)^n \quad (1-7)$$

式中： ν_t ——温度为 t °C 时油的运动黏度；

ν_{50} ——温度为 50 °C 时油的运动黏度；



n ——黏温指数。黏温指数 n 随油的黏度变化,其值可参考表 1-3。

表 1-3 黏温指数

$\nu_{50}/\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	2.5	6.5	9.5	12	21	30	38	45	52	60
n	1.39	1.59	1.72	1.79	1.99	2.13	2.24	2.32	2.42	2.49

(三) 液体的可压缩性

液体因所受压力增高而发生体积缩小的性质称为可压缩性。若压力为 p_0 时液体的体积为 V_0 , 当压力增加 Δp 时, 液体的体积减小 ΔV , 则液体在单位压力变化下的体积相对变化量为:

$$k = -\frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V_0} \quad (1-8)$$

式中: k ——液体的压缩系数。

由于压力增加时液体的体积减小, 因此式 (1-8) 的右边须加一负号, 以使 k 为正值。

液体压缩系数 k 的倒数 K , 称为液体的体积模量, 即 $K=1/k$ 。

表 1-4 列出了各种工作介质的体积模量。由表中数值可见, 石油基液压油的可压缩性是钢的 100 ~ 150 倍 (钢的弹性模量为 2.1×10^5 MPa)。

表 1-4 各种工作介质的体积模量 (20 °C, 101.325 kPa)

介质种类	体积模量 K/MPa	介质种类	体积模量 K/MPa
石油基液压油	$1.4 \times 10^3 \sim 2 \times 10^3$	水—乙二醇液	3.45×10^3
水包油乳化液	1.95×10^3	磷酸酯液	2.65×10^3
油包水乳化液	2.3×10^3		

一般情况下, 工作介质的可压缩性对液压系统的性能影响不大, 但在高压下或研究系统的动态性能时, 则必须予以考虑。由于空气的可压缩性很大, 所以当工作介质中有游离气泡时, K 值将大大减小。因此, 一般建议将石油基液压油 K 值取为 $0.7 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^3$ MPa, 且应采取措施尽量减少液压系统工作介质中游离空气的含量。

二、液压系统对工作介质的要求

液压油是液压传动系统的重要组成部分, 是用来传递能量的工作介质。除了传递能量外, 它还起着润滑运动部件和保护金属不被锈蚀的作用。液压油的质量及其各种性能将直接影响液压系统的工作。从液压系统使用油液的要求来看, 有下面几点:

(1) 适宜的黏度和良好的黏温性能。一般液压系统所用的液压油其黏度范围为:

$$\nu = 11.5 \times 10^{-6} \sim 35.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (2 \sim 5^\circ E_{50})$$

(2) 润滑性能好。在液压传动机械设备中, 除液压元件外, 其他一些有相对滑动的零件也要用液压油来润滑, 因此, 液压油应具有良好的润滑性能。为了改善液压油的润滑性能, 可加入添加剂。

- (3) 良好的化学稳定性, 即对热、氧化、水解、相容等都具有良好的稳定性。
- (4) 对金属材料具有防锈性和防腐性。
- (5) 比热、热传导率大, 热膨胀系数小。
- (6) 抗泡沫性好, 抗乳化性好。
- (7) 油液纯净, 含杂质量少。
- (8) 流动点和凝固点低, 闪点(明火能使油面上油蒸气内燃, 但油本身不燃烧的温度)和燃点高, 此外, 对油液的无毒性、价格便宜等, 也应根据不同的情况有所要求。

三、工作介质的选择

正确而合理地选用液压油, 乃是保证液压设备高效率正常运转的前提。

选用液压油时, 可根据液压元件生产厂样本和说明书所推荐的品种号数来选用液压油, 或者根据液压系统的工作压力、工作温度、液压元件种类及经济性等因素全面考虑。一般是先确定适用的黏度范围, 再选择合适的液压油品种。同时还要考虑液压系统工作条件的特殊要求, 如在寒冷地区工作的系统要求油的黏度指数高、低温流动性好、凝固点低; 伺服系统要求油质纯、压缩性小; 高压系统要求油液抗磨性好。在选用液压油时, 黏度是一个重要的参数。黏度的高低将影响运动部件的润滑、缝隙的泄漏以及流动时的压力损失、系统的发热温升等。所以, 在环境温度较高、工作压力较高或运动速度较低时, 为减少泄漏, 应选用黏度较高的液压油; 否则相反。

表 1-5 为常见液压油系列品种。其中液压油的牌号(即数字)表示在 40 ℃下油液运动黏度的平均值(单位为 cSt)。原名为过去的牌号, 其中数字表示在 50 ℃时油液运动黏度的平均值。

但是总的来说, 应尽量选用较好的液压油, 虽然初始成本要高些, 但由于优质油使用寿命长, 对元件损害小, 所以从整个使用周期看, 其经济性要比选用劣质油好些。

表 1-5 常见液压油系列品种

种类	牌号		原名	用途
	油名	代号		
普通液压油	N32 号液压油 N68G 号液压油	YA—N32 YA—N68	20 号精密机床液压油 40 号液压—导轨油	用于环境温度 0 ~ 45 ℃工作的各类液压泵的中、低压液压系统
抗磨液压油	N32 号抗磨液压油 N150 号抗磨液压油 N168K 号抗磨液压油	YA—N32 YA—N150 YA—N168 K	20 抗磨液压油 80 抗磨液压油 40 抗磨液压油	用于环境温度 -10 ~ 40 ℃工作的高压柱塞泵或其他泵的中、高压系统
低温液压油	N15 号低温液压油 N46D 号低温液压油	YA—N15 YA—N46 D	低凝液压油 工程液压油	用于环境温度 -20 ℃至高于 40 ℃工作的各类高压油泵系统
高黏度指数液压油	N32H 号高黏度指数液压油	YD—N32 D		用于温度变化不大且对黏温性能要求更高的液压系统



任务实施

1. 设备、工具准备：液压实验台、滤油器、拆卸工具。

2. 任务分析：

(1) 测量黏度：取一定量的试样，在规定温度（如：50℃、80℃、100℃）下，从恩氏黏度计流出200 mL试样所需的时间与蒸馏水在20℃流出相同体积所需要的时间(s)之比。并分析黏度的表示方法及影响因素。

(2) 为实验台清洗和更换滤油器。

(3) 通过液压油颜色、气味判断液压油的污染程度，更换液压油。



任务评价

表 1-6 过程考核评价表

评价内容	评价要素	评价方式			得分
		小组自评 30%	小组互评 30%	教师评价 40%	
职业素养	语言表达能力和逻辑分析能力 (10) 具有科学、严谨、创新的工作态度 (10) 具有较强的安全意识、质量意识 (10)				
专业知识 与技能	测量液压油的黏度 (20) 清洗和更换滤油器 (30) 更换液压油 (20)				



任务拓展

液压油的污染与防护

液压油是否清洁，不仅影响液压系统的工作性能和液压元件的使用寿命，而且直接关系到液压系统是否能正常工作。液压系统多数故障与液压油受到污染有关，因此控制液压油的污染是十分重要的。

1. 液压油被污染的原因主要有以下几方面。

(1) 液压系统的管道及液压元件内的型砂、切屑、磨料、焊渣、锈片、灰尘等污垢在系统使用前冲洗时未被洗干净，在液压系统工作时，这些污垢就进入到液压油里。

(2) 外界的灰尘、砂粒等，在液压系统工作过程中通过往复伸缩的活塞杆、流回油箱的漏油等进入液压油里。另外在检修时，稍不注意也会使灰尘、棉绒等进入液压油里。

(3) 液压系统本身也不断地产生污垢，而直接进入液压油里，如金属和密封材料的磨损颗粒，过滤材料脱落的颗粒或纤维及油液因油温升高氧化变质而生成的胶状

物等。

2. 油液污染的危害。

液压油污染严重时，直接影响液压系统的工作性能，使液压系统经常发生故障，使液压元件寿命缩短。造成这些危害的主要原因是污垢中的颗粒。对于液压元件来说，由于这些固体颗粒进入到元件里，会使元件的滑动部分磨损加剧，并可能堵塞液压元件里的节流孔、阻尼孔，或使阀芯卡死，从而造成液压系统的故障。水分和空气的混入使液压油的润滑能力降低并使它加速氧化变质，产生气蚀，使液压元件加速腐蚀，使液压系统出现振动、爬行等。

3. 防止污染的措施。

造成液压油污染的原因多而复杂，液压油自身又在不断地产生脏物，因此要彻底解决液压油的污染问题是很困难的。为了延长液压元件的寿命，保证液压系统可靠地工作，将液压油的污染度控制在某一限度以内是较为切实可行的办法。对液压油的污染控制工作主要是从两个方面着手：一是防止污染物侵入液压系统；二是把已经侵入的污染物从系统中清除出去。污染控制要贯穿于整个液压装置的设计、制造、安装、使用、维护和修理等各个阶段。

为防止油液污染，在实际工作中应采取如下措施：

(1) 使液压油在使用前保持清洁。液压油在运输和保管过程中都会受到外界污染，新买来的液压油看上去很清洁，其实很“脏”，必须将其静放数天后经过滤加入液压系统中使用。

(2) 使液压系统在装配后、运转前保持清洁。液压元件在加工和装配过程中必须清洗干净，液压系统在装配后、运转前应彻底进行清洗，最好用系统工作中使用的油液清洗，清洗时油箱除通气孔（加防尘罩）外必须全部密封，密封件不可有飞边、毛刺。

(3) 使液压油在工作中保持清洁。液压油在工作过程中会受到环境污染，因此应尽量防止工作中空气和水分的侵入。为完全消除水、气和污染物的侵入，采用密封油箱，通气孔上加空气滤清器，防止尘土、磨料和冷却液侵入，经常检查并定期更换密封件和蓄能器中的胶囊。

(4) 采用合适的滤油器。这是控制液压油污染的重要手段。应根据设备的要求，在液压系统中选用不同的过滤方式，不同的精度和不同的结构的滤油器，并要定期检查和清洗滤油器和油箱。

(5) 定期更换液压油。更换新油前，油箱必须先清洗一次，系统较脏时，可用煤油清洗，排尽后注入新油。

(6) 控制液压油的工作温度。液压油的工作温度过高对液压装置不利，液压油本身也会加速氧化变质，产生各种生成物，缩短它的使用期限。一般液压系统的工作温度最好控制在 65 ℃ 以下，机床液压系统则应控制在 55 ℃ 以下。



思考与练习

1. 什么是液体的黏性? 常用的黏度表示方法有哪几种? 它们的表示符号和单位各是什么?
2. 液压油的牌号和黏度有什么关系? 如何选择液压油的黏度?
3. 试简述黏度与温度、黏度与压力的关系。
4. 20℃时 200 mL 蒸馏水从恩氏黏度计中流尽的时间为 51 s, 如果 200 mL 的某液压油在 40℃时从恩氏黏度计中流尽的时间为 232 s, 已知该液压油的密度为 900 kg/m^3 , 试求该液压油在 40℃时的恩氏黏度、运动黏度和动力黏度。
5. 液压油的污染有何危害? 如何控制液压油的污染?

任务三 ••• 液压泵安装高度的确定

任务目标

1. 会分析静止液体力学性质规律。
2. 能区分绝对压力、相对压力和真空度的关系。
3. 会分析动力学基本方程及其应用。
4. 能够应用流体力学基本方程解决液压系统中的具体问题。
5. 具有良好的职业道德素质、人文素养和工匠精神。

任务引入与分析

液压泵从油箱吸油。液压系统安装时, 液压泵吸油口高于油箱液面多高合适? 高度与液压泵的哪些要素有关? 如果你是一名液压安装工, 如何确定其安装高度?

知识链接

流体力学以流体(包括液体和气体)为研究对象。因为液体对于体积变化有很大的抗拒力, 所以通常把它看作是**不可压缩的(也有例外)**; 气体对体积变化抗拒力较小, 具有可压缩性, 但在低速流动时, 压差不大, 在允许的精度范围内, 可作为不可压缩流体来看待。本任务所研究的流体主要是不可压缩流体。

一、流体静力学基础

流体静力学所研究的是静止流体的力学性质。这里所说的静止, 是指流体内部质点之间没有相对运动, 以至于流体整体完全可以像刚体一样做各种运动。

静止流体内的压力有如下特性:

- (1) 流体的压力沿着内法线方向作用于承压面；
- (2) 静止流体内任一点的压力在各个方向上都相等。

(一) 重力作用下静止流体中的压力分布

图 1-6 所示容器中，盛有密度为 ρ 的不可压缩流体，作用于流体表面上的压力为 $p_s = F/A + p_a$ (p_a 为大气压， A 为活塞横截面积)。为求任意深度 h 处的压力 p ，可以假想从流体表面往下切取一个垂直小流体柱作为研究体，设流体柱的底面积为 ΔA ，高为 h ，如图 1-6 所示。

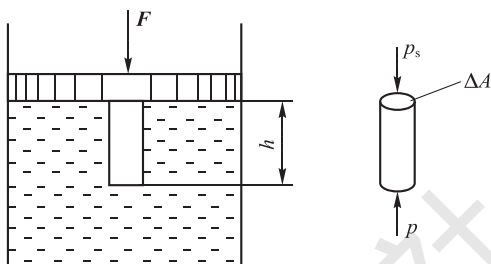


图 1-6 静止流体内的压力

由于流体柱处于平衡状态，于是有：

$$p\Delta A = p_s\Delta A + \rho gh\Delta A \quad (1-9)$$

因此，得：

$$p = p_s + \rho gh \quad (1-10)$$

上式为不可压缩流体静力学基本方程式。

由上式可知，重力作用下的静止流体内任一点处的压力都由两部分组成：一部分是表面上所受的压力 p_s ；另一部分是该点以上流体自重（重力）所形成的压力 ρgh 。当流体重力所形成的压力相对很小时，可忽略不计。此时，可认为流体内部各点的压力处处相等，且压力取决于外力（负载），即：

$$p = p_s = \frac{F}{A} \quad (1-11)$$

在 p_s 中不计大气压力时，压力 p 为相对压力。

当流体为液体，容器开口时，液面上只受大气压力 p_a 作用， $p_s = p_a$ ，即：

$$p = p_a + \rho gh \quad (1-12)$$

此时， p 为绝对压力。

液柱高度 h 也可作为一种压力单位，如：毫米汞柱、米汞柱。

(二) 绝对压力、相对压力和真空度

压力的表示方法有两种：一种是以绝对真空作为基准所表示的压力，称为绝对压力；



一种是以大气压力作为基准所表示的压力,称为相对压力。由于大多数测压仪表所测的压力都是相对压力,所以相对压力也称为表压力。绝对压力和相对压力的关系如下:

$$\text{相对压力} = \text{绝对压力} - \text{大气压力}$$

当绝对压力小于大气压力时,比大气压力小的那部分压力数值称为真空度。

即:

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力}$$

绝对压力、相对压力和真空度的相对关系见图 1-7。

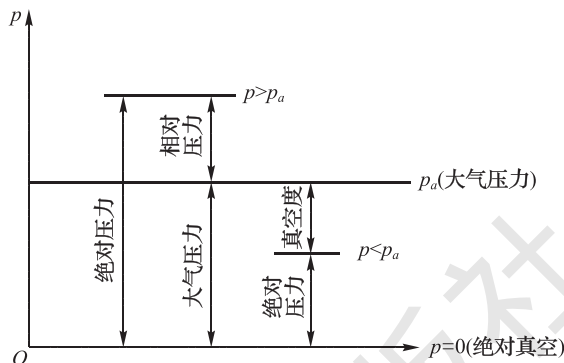


图 1-7 绝对压力与相对压力的关系

(三) 帕斯卡原理

由静力学基本方程式可知,盛放在密封容器内的流体,其外加压力 p_s 变化时,只要流体仍保持原来的静止状态,流体中任一点的压力,均将发生同样大小的变化。也就是说:在密闭的容器内,施加于静止流体上的压力将以等值同时传到流体内各点。这就是静压传递原理,或帕斯卡原理。如图 1-8 所示。

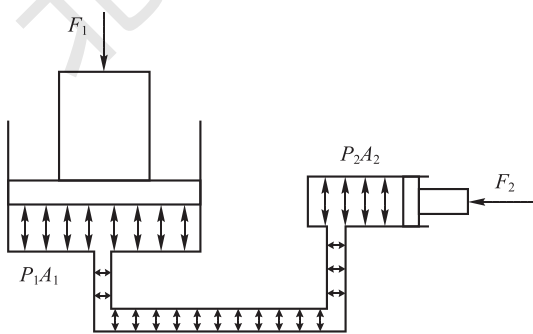


图 1-8 静压传递原理应用实例

帕斯卡原理的发现为封闭流体在传动和力放大方面的应用开辟了道路。

在液压系统中,外力作用所产生的压力远远大于由液体自重所产生的压力,因此常常将流体的自重产生的压力忽略不计,认为在密封容器中静止的流体的压力处处相等。

根据帕斯卡原理可以对密封容器中的压力进行有关运算。例如，本书开篇所述的液压千斤顶的计算。

（四）流体静压力对固体壁面的作用力

静止流体和固体壁面相接触时，固体壁面上各点在某一方向上所受流体的压力总和，便是流体在该方向上作用于固体壁面上的力。

如图 1-9 所示，在液压缸活塞、球阀和锥阀阀芯上，流体作用在固体壁面上某一方向的作用力 F 等于静止液体的压力 p 和受力面在该方向的投影面积 A 的乘积，即：

$$F = pA = p \frac{\pi}{4} d^2 \quad (1-13)$$

式中： d ——承压部分曲面投影圆的直径。

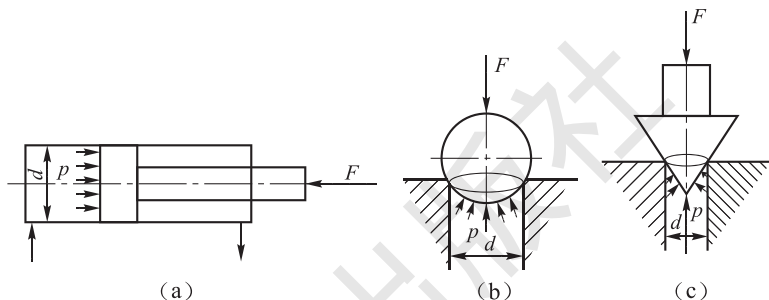


图 1-9 流体静压力对固体壁面的作用力

二、流体动力学基础

在液压传动系统中，液压油总是在不断的流动中，因此要研究液体在外力作用下的运动规律、作用在液体上的力及这些力和液体运动特性之间的关系。对液压流体力学我们只关心和研究平均作用力和运动之间的关系。本任务主要讨论三个基本方程式，即液流的连续性方程、伯努利方程和动量方程。它们是刚体力学中的质量守恒、能量守恒和动量守恒原理在流体力学中的具体应用。前两个方程描述了压力、流速与流量之间的关系，以及液体能量相互间的变换关系，后者描述了流动液体与固体壁面之间作用力的情况。

（一）液体流动的基本概念

1. 理想液体与定常流动。

液体具有黏性，并在流动时表现出来，因此研究流动液体时就要考虑其黏性，而液体的黏性阻力是一个很复杂的问题，这就使我们对流动液体的研究变得复杂。因此，我们引入理想液体的概念，理想液体就是指没有黏性、不可压缩的液体。首先对理想液体进行研究，然后再通过实验验证的方法对所得的结论进行补充和修正。这样，不仅使问题简单化，而且得到的结论在实际应用中仍具有足够的精确性。我们把既具有黏性又可



压缩的液体称为实际液体。

当液体流动时,可以将流动液体中空间任一点上质点的运动参数,例如压力 p 、流速 v 及密度 ρ ,表示为空间坐标和时间的函数,例如:

$$\text{压力 } p = p(x, y, z, t)$$

$$\text{流速 } v = v(x, y, z, t)$$

$$\text{密度 } \rho = \rho(x, y, z, t)$$

如果空间点上质点的运动参数 p 、 v 及 ρ 在不同的时间内都有确定的值,即它们只随空间点坐标的变化而变化,不随时间 t 变化,液体的这种运动称为定常流动或恒定流动。

在液体的运动参数中,只要有一个运动参数随时间而变化,液体的运动就是非定常流动或非恒定流动。

在图 1-10 (a) 中,我们对容器出流的流量给予补偿,使其液面高度不变,这样,容器中各点的液体运动参数 p 、 v 及 ρ 都不随时间而变,这就是定常流动。在图 1-10 (b) 中,我们不对容器的出流给予流量补偿,则容器中各点的液体运动参数将随时间而改变,例如随着时间的流逝,液面高度逐渐降低,因此,这种流动为非定常流动。

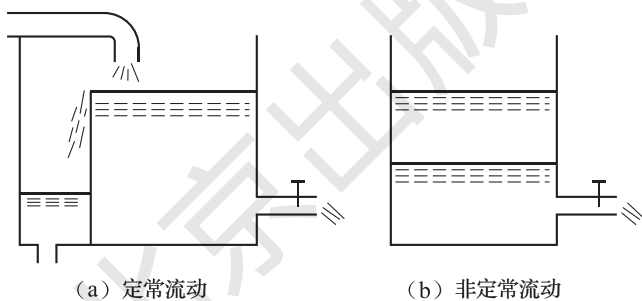


图 1-10 定常流动与非定常流动

2. 流动状态、雷诺数。

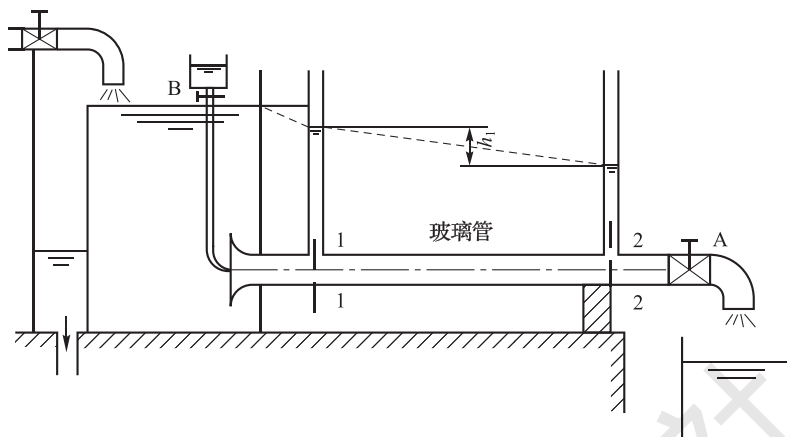
实际液体具有黏性,是产生流动阻力的根本原因。然而流动状态不同,则阻力大小也是不同的。所以先研究两种不同的流动状态。

(1) 流动状态——层流和紊流。

液体在管道中流动时存在两种不同状态——层流和紊流,它们的阻力性质也不相同,可以通过实验来观察。

实验装置如图 1-11 所示,实验时保持水箱中水位恒定和可能平静,然后将阀门 A 微微开启,使少量水水流经玻璃管,即玻璃管内平均流速 v 很小。这时,如将颜色水容器的阀门 B 也微微开启,使颜色水也流入玻璃管内,我们可以在玻璃管内看到一条细直而鲜明的颜色流束,而且无论颜色水在玻璃管内的任何位置,它都能呈直线状,这说明管中水流都是安定地沿轴向运动,液体质点没有垂直于主流方向的横向运动,所以颜色

水和周围的液体没有混杂。如果把 A 阀缓慢开大, 管中流量和平均流速 v 也将逐渐增大, 直至平均流速增加至某一数值, 颜色流束开始弯曲颤动, 这说明玻璃管内液体质点不再保持安定, 开始发生脉动, 不仅具有横向的脉动速度, 而且具有纵向的脉动速度。如果 A 阀继续开大, 脉动加剧, 颜色水就完全与周围液体混杂而不再维持流束状态。



雷诺实验

图 1-11 雷诺实验

层流: 在液体运动时, 如果质点没有横向脉动, 不引起液体质点混杂, 而是层次分明, 能够维持安定的流束状态, 这种流动称为层流。

紊流: 如果液体流动时质点具有脉动速度, 引起流层间质点相互错杂交换, 这种流动称为紊流或湍流。

(2) 雷诺数。

液体流动时究竟是层流还是紊流, 须用雷诺数来判别。

实验证明, 液体在圆管中的流动状态不仅与管内的平均流速 v 和水力直径 d_H 成正比, 而且与液体的运动黏度 ν 成反比。但是, 真正决定液流状态的, 却是这三个参数所组成的一个称为雷诺数 Re 的无量纲纯数:

$$Re = vd_H / \nu \quad (1-14)$$

由式 (1-14) 可知, 液流的雷诺数如相同, 它的流动状态也相同。当液流的雷诺数 Re 小于临界雷诺数时, 液流为层流; 反之, 液流大多为紊流。常见的液流管道的临界雷诺数由实验求得, 见表 1-7。

表 1-7 常见液流管道的临界雷诺数

管道的材料与形状	临界雷诺数 Re_{cr}	管道的材料与形状	临界雷诺数 Re_{cr}
光滑的金属圆管	2 000 ~ 2 320	带槽装的同心环状缝隙	700
橡胶软管	1 600 ~ 2 000	带槽装的偏心环状缝隙	400
光滑的同心环状缝隙	1 100	圆柱形滑阀阀口	260
光滑的偏心环状缝隙	1 000	锥状阀口	20 ~ 100



其中水力直径 d_H 为:

$$d_H = \frac{4A}{\chi} \quad (1-15)$$

式中: χ ——湿周, 为过流断面上的液体与固体相润湿的周长。

又如正方形的管道, 边长为 b , 则湿周为 $4b$, 因而水力直径为 $d_H = b$ 。水力直径的大小, 对管道的通流能力影响很大。水力直径大, 表明流体与管壁的接触少, 通流能力强; 水力直径小, 表明流体与管壁的接触多, 通流能力差, 容易堵塞。

(二) 连续性方程

能量守恒是自然界的客观规律, 不可压缩液体的流动过程也遵守能量守恒定律。在流体力学中这个规律用称为连续性方程的数学形式来表达。

如图 1-12 所示, 当液体在管内做恒定流动时, 在同一时间内, 流过管道的每一过流断面的质量流量相等。即:

$$q_m = \rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = \text{常数} \quad (1-16)$$

当忽略流体的可压缩性时, 密度相等, 则有:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (1-17)$$

由于过流断面是任意取的, 则有:

$$q = v_1 A_1 = v_2 A_2 = v_3 A_3 = \cdots = v_n A_n = \text{常数} \quad (1-18)$$

式中: v_1 、 v_2 分别是流管过流断面 A_1 及 A_2 上的平均流速。式 (1-18) 表明通过流管内任一过流断面上的流量相等, 当流量一定时, 任一过流断面上的过流面积与平均流速成反比。则有任一过流断面上的平均流速为:

$$v_i = q / A_i \quad (1-19)$$

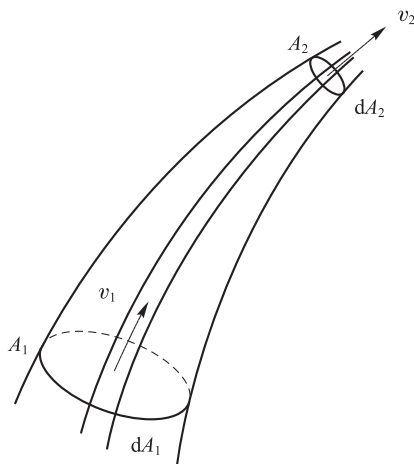


图 1-12 液体的微小流束连续性流动示意图

(三) 伯努利方程

伯努利方程是能量守恒定律在流体力学中的一种表达方式。

为了便于研究,我们从理想液体、恒定流动入手,逐步深入到实际液体。

1. 理想液体伯努利方程。

设密度为 ρ 的理想液体在如图 1-13 所示的管道内做恒定流动,任取一段液流 AB 作为研究对象,设 A 、 B 两个断面距基准面的高为 Z_1 和 Z_2 ,过流断面面积分别为 A_1 和 A_2 ,压力分别为 p_1 和 p_2 。由于是理想液体,断面上的流速可以认为是均匀分布的,故设 A 、 B 断面的流速分别为 v_1 和 v_2 ,假设经过很短的时间 Δt 以后, AB 段液体移动到 $A'B'$ 段位置。现分析该段液体的做功和能量变化情况。

(1) 外力所做的功。作用在该段液体上的外力有侧面和两断面的压力。因理想液体无黏性,侧面压力不能产生摩擦力做功,故外力所做的功仅是两断面压力所做的功的代数和:

$$w = p_1 A_1 v_1 \Delta t - p_2 A_2 v_2 \Delta t \quad (1-20)$$

由连续性方程知

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = q$$

或

$$A_1 v_1 \Delta t = A_2 v_2 \Delta t = q \Delta t = \Delta V$$

式中: ΔV —— AA' 段或 BB' 段微小液体的体积。

故有

$$w = (p_1 - p_2) \Delta V \quad (1-21)$$

(2) 液体机械能变化。因是理想液体做恒定流动,经过时间 Δt 后,中间 $A'B$ 段液体的所有力学参数均未发生变化,故这段液体的能量没有增减。液体机械能的变化仅表现在 BB' 和 AA' 两小段液体的能量差别上。由于前后两段液体有相同的质量:

$$\Delta m = \rho_1 v_1 A_1 \Delta t = \rho_2 v_2 A_2 \Delta t = \rho q \Delta t = \rho \Delta V$$

所以两段液体的位能差 ΔE_p 和动能差 ΔE_k 分别为:

$$\Delta E_p = \rho g q \Delta t (Z_2 - Z_1) = \rho g \Delta V (Z_2 - Z_1) \quad (1-22)$$

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \rho q \Delta t (v_2^2 - v_1^2) = \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2) \quad (1-23)$$

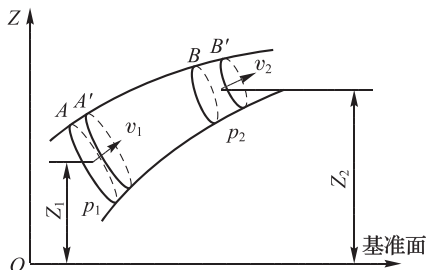


图 1-13 伯努利方程推导示意图

根据能量守恒定律,外力对液体所做的功等于该液体能量的变化量, $\omega = \Delta E_p + \Delta E_K$, 即:

$$(p_1 - p_2) \Delta V = \rho g \Delta V (Z_2 - Z_1) + \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2)$$

将上式各项分别除以微小段液体的体积 ΔV , 整理后得理想液体伯努利方程为:

$$p_1 + \rho g Z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g Z_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (1-24)$$

或写成:

$$p + \rho g Z + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{常数} \quad (1-25)$$

上式中各项分别是单位体积液体的压力能、位能和动能。因此,上述伯努利方程的物理意义是:在密封管道内做恒定流动的理想液体具有三种形式的能量,即压力能、位能和动能。在流动过程中,三种能量可以相互转化,但各个过流断面上三种能量之和为常数。

2. 实际液体的伯努利方程。

实际液体在管道内流动时,由于液体存在黏性,会产生内摩擦力;由于管道形状和尺寸的变化,流体会产生扰动。这些都会消耗能量。因此,实际液体流动时存在能量损失。设单位体积的液体在两断面之间流动的能量损失为 Δp_w 。

另外,由于实际液体在管道过流断面上的流速分布是不均匀的,在用平均流速代替实际流速计算动能时,必然会有误差,为了修正这一误差,需引入动能修正系数 α ,它等于单位时间内某过流断面处的实际动能与按平均流速计算的动能之比。

因此,实际液体的伯努利方程为:

$$p_1 + \rho g Z_1 + \frac{\rho \alpha_1 v_1^2}{2} = p_2 + \rho g Z_2 + \frac{\rho \alpha_2 v_2^2}{2} + \Delta p_w \quad (1-26)$$

式中,当紊流时取 $\alpha=1$,层流时取 $\alpha=2$ 。

伯努利方程揭示了液体流动过程中的能量变化规律,因此它是流体力学中的一个特

别重要的基本方程。伯努利方程不仅是进行液压系统分析的理论基础，而且还可以用来对多种液压问题进行研究和计算。

应用伯努利方程时必须注意：

- (1) 断面 1、2 上为恒定流动；
- (2) 流体上作用的质量力只有重力；
- (3) 流体不可压缩；
- (4) 断面 1、2 需顺流方向选取(否则 Δp_w 为负值)，且应选在缓变的过流断面上(断面近似为平面)；
- (5) 断面中心在基准面以上时， Z 取正值；反之 Z 取负值。通常选取特殊位置的水平面作为基准面。

(四) 动量方程

动量方程是动量定理在流体力学中的具体应用。它用来计算流动的液体作用于限制其流动的固体壁面上的总作用力。

根据理论力学中的动量定理，作用在物体上全部外力的矢量和应等于物体动量的变化率，即：

$$\Delta F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} \quad (1-27)$$

下面根据上式来推导恒定流动不可压缩流体的动量方程。

在图 1-14 所示的管流中，任意取出被过流断面 1、2 所限制的液体体积，称之为控制体积，断面 1、2 则称为控制表面。断面 1、2 上的流速分别为 v_1 、 v_2 。设该段液体在 t 时刻的动量为 $(mv)_{1-2}$ 。经 Δt 时间后，该段液体移动到 $1'-2'$ ，在新位置上的液体的动量为 $(mv)_{1'-2'}$ ，在 Δt 时间内动量的变化为：

$$\Delta(mv) = (mv)_{1'-2'} - (mv)_{1-2} \quad (1-28)$$

$$\Delta(mv)_{1-2} = (mv)_{1-1'} + (mv)_{1'-2} \quad (1-29)$$

$$(mv)_{1'-2'} = (mv)_{1'-2} + (mv)_{2-2'} \quad (1-30)$$

因为液体做恒定流动，则 $1'-2$ 之间的液体的各点流速经 Δt 时间后没有变化， $1'-2$ 之间的液体的动量也没有变化，故：

$$\Delta(mv) = (mv)_{1'-2'} - (mv)_{1-2} = (mv)_{2-2'} - (mv)_{1-1'} = \rho q \Delta t v_2 - \rho q \Delta t v_1 \quad (1-31)$$

于是：

$$\sum F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \rho q (v_2 - v_1) \quad (1-32)$$

上式即为液体做恒定流动时的动量方程。等式左边为作用于控制体积上的全部外力之和，等式右边则为液体动量的变化率。上式表明，作用在液体控制体积上的外力总和



等于单位时间内流出控制表面与流入控制表面的液体动量之差。上式为矢量表达式, 在应用中可根据问题的具体要求, 向指定方向投影, 列出该指定方向上的动量方程, 从而求出作用力在该方向上的分量。

由动量方程可知, 液体在流动过程中, 若其速度的大小、方向发生变化, 则一定有力作用在液体上; 同时, 液体也以大小相等、方向相反的力作用在使其速度改变的物体上。据此, 可求得流动液体对固体壁面的作用力。

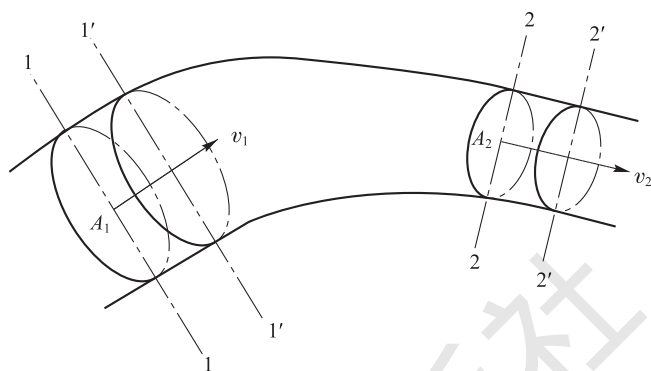


图 1-14 动量变化



任务实施

1. 设备、工具准备: 液压实验台、仿真软件、扳手。

2. 任务分析:

计算液压泵吸油腔处的真空度和允许的最大吸油高度。

如图 1-15 所示, 选取油箱液面为断面 I - I, 并为基准面, 泵吸油腔处为断面 II - II。设液压泵吸油腔距离油箱液面的高度为 h , 对断面 I - I 和 II - II 列伯努利方程如下:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho\alpha_1 v_1^2 + \rho g Z_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho\alpha_2 v_2^2 + \rho g Z_2 + \Delta p_w \quad (1-33)$$

式中 p_1 为油箱液面压力, 故 $p_1 = p_a$; $Z_2 - Z_1 = h$; v_2 为液压泵吸油腔处的流速, 一般取吸油管流速。 v_1 为油箱液面流速, 显然 $v_1 \ll v_2$, 所以 v_1 忽略不计; p_2 为泵吸油腔处的绝对压力; Δp_w 为压力损失。代入上式经简化后, 可得泵吸油腔处真空度 $p_a - p_2$ 为:

$$p_a - p_2 = \frac{1}{2}\rho\alpha_2 v_2^2 + \rho g h + \Delta p_w \quad (1-34)$$

所以泵的吸油腔处真空度由 3 部分组成: (1) 产生一定流速 v_2 的压力; (2) 把液体提升到高度 h 所需的压力 (即吸油口处距液面的高度); (3) 吸油管内的压力损失 Δp_w 。

液压泵吸油就是作用在油箱面上的大气压力 p_a 将油液压入泵内的过程。但液压泵在工作时吸油腔处真空度又不能太大，即泵吸油腔处绝对压力不能太低，否则当 p_2 小于油液的空气分离压 p_g 时将会产生气穴现象，引起噪声振动。所以为使真空度不致过大，需要限制泵的安装高度 h 。允许的最大吸油高度 $h_{\max}$ ，用空气分离压 p_g 来代替上式的 p_2 ，即得

$$h_{\max} \leq \frac{p_a - p_g}{\rho g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \frac{\Delta p_w}{\rho g} \quad (1-35)$$

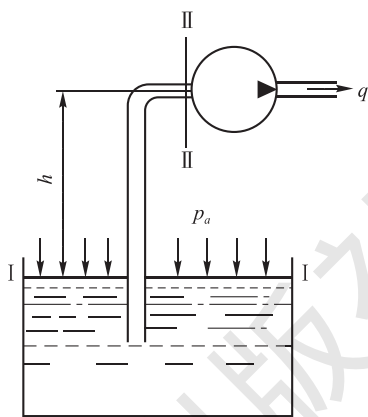


图 1-15 液压泵装置

其中，空气分离压一般为 $(0.02 \sim 0.03)$ MPa。在实际使用中，泵的吸油高度 h 值一般应小于 0.5 m。有时为使吸油条件得以改善，可将泵安装在油箱液面以下，或用在油箱液面加压的充压油箱上。

任务评价

表 1-8 过程考核评价表

评价内容	评价要素	评价方式			得分
		小组自评 30%	小组互评 30%	教师评价 40%	
职业素养	语言表达能力和逻辑分析能力 (10) 具有科学、严谨、创新的工作态度 (10) 具有较强的安全意识、质量意识 (10)				
专业知识与技能	实验台搭建压力表的读数 (10) 仿真软件分析压力的变化情况 (20) 压力损失的原因分析 (20) 液压损失的计算 (20)				



任务拓展

静压力的工程应用

修建水坝时,水坝底部要比顶部建的宽一些。

因为考虑到水坝底部距离水面的高度 h 较大,由此引起的水坝底部水压 p 值较大,为了提高水坝整体的坚固性,所以水坝底部修建时要比顶部宽一些。

思考与练习

1. 什么是压力? 压力有哪几种表示方法? 静止液体内的压力是如何传递的?
2. 当液压系统中液压缸的有效面积一定时,其内的工作压力的大小由什么参数决定? 活塞运动的速度由什么参数决定?
3. 液体在水平放置的变径管内流动时,为什么其管道直径越细的部位其压力越小?
(可用理想液体的伯努利方程进行解释)
4. 如图 1-16 所示的液压千斤顶中, F 是手压手柄的力,假设 $F=300\text{ N}$,两活塞直径分别为 $D=20\text{ mm}$, $d=10\text{ mm}$,试求:
 - (1) 作用在小活塞上的力 F_1 ;
 - (2) 系统中的压力 p ;
 - (3) 大活塞能顶起重物的重量 G ;
 - (4) 大、小活塞的运动速度之比 v_1/v_2 。

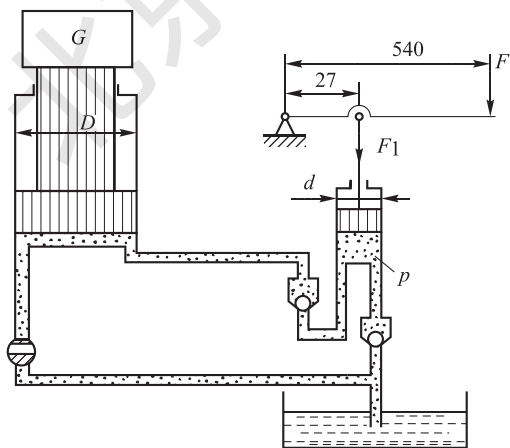


图 1-16 液压千斤顶

任务四 ··· 解决液体流动的问题

任务目标

1. 能分析液压系统中压力损失的类型及产生的原因。
2. 会分析液压冲击产生的原因及减少的措施。
3. 会分析气穴现象产生的原因及减少的措施。
4. 会用压力表测量压力值。
5. 具有良好的职业道德素质、人文素养和工匠精神。

任务引入与分析

一台机床定位夹紧机构，是由液压控制其先定位，再夹紧，可是在使用的过程中，加工零件还没有定好位，夹紧缸就开始动作，造成定位不准确，如果你是设备维修工程师，请分析原因，如何避免？

知识链接

一、管路内液体流动时的压力损失

实际液体具有黏性或管道形状和截面尺寸发生变化时，对液体流动会产生阻力，因此要损失一部分能量。压力损失由沿程压力损失和局部压力损失两部分组成。在设计液压系统时要尽量减小压力损失，从而提高系统效率，减小由此带来的温升。

（一）沿程压力损失

液体在等径直管中流动时产生的压力损失称为沿程压力损失，该损失与液体的流动状态有关。

1. 层流时的沿程压力损失。

液体在等径水平直管中的层流流动，如图 1-17 所示。取一段与管轴重合的微小圆柱体作为研究对象。液体处于受力平衡状态，即

$$(p_1 - p_2)\pi r^2 = \Delta p \pi r^2 = F_f = -2\pi r l \mu \frac{du}{dr} \quad (1-36)$$

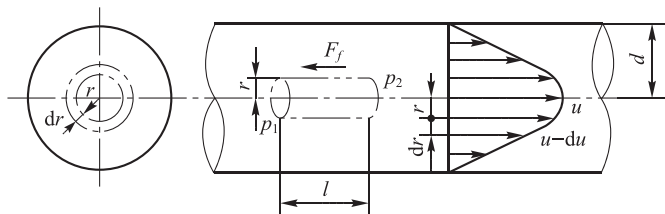


图 1-17 圆管层流运动分析

式中, F_f 是液体内摩擦力。这里用到了牛顿液体内摩擦定律。整理上式可得

$$du = \frac{\Delta p}{2\mu l} r dr \quad (1-37)$$

对上式进行积分, 并代入边界条件, 得

$$u = \frac{\Delta p}{4\mu l} (R^2 - r^2) \quad (1-38)$$

可见, 流速在半径方向上是按抛物线规律分布的, 在管道轴线上流速取最大值。

通过微元体的流量微元为

$$dq = u dA = 2\pi u r dr = 2\pi \frac{\Delta p}{4\mu l} (R^2 - r^2) r dr \quad (1-39)$$

积分上式可得

$$q = \frac{\pi d^4}{128\mu l} \Delta p \quad (1-40)$$

平均流速为

$$v = \frac{q}{A} = \frac{d^2}{32\mu l} \Delta p \quad (1-41)$$

沿程压力损失为

$$\Delta p_\lambda = \Delta p = \frac{32\mu l v}{d^2} \quad (1-42)$$

上式也可以写为

$$\Delta p_\lambda = \frac{64\mu}{dv} \rho \frac{l v^2}{d^2} = \frac{64 l}{\text{Re} d} \frac{\rho v^2}{2} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} \quad (1-43)$$

式中, λ 是沿程阻力系数。实际计算时, 对金属管取 $\lambda=75/\text{Re}$, 橡胶管取 $\lambda=80/\text{Re}$ 。

2. 紊流时的沿程压力损失。

紊流时计算沿程压力损失的公式在形式与上式相同。不同的是此时的 λ 不仅与雷诺数有关, 还与管壁的粗糙度有关, 即 $\lambda=f(\text{Re}, \Delta/d)$ 。绝对粗糙度 Δ 与管径 d 的比值

Δ/d 称为相对粗糙度。

（二）局部压力损失

液体流经管道的弯头、截面尺寸突变处或阀口、过滤网等局部区域时产生的压力损失称为局部压力损失。局部压力损失的计算公式如下

$$\Delta p_{\xi} = \xi \frac{\rho v^2}{2} \quad (1-44)$$

式中, ξ 是局部阻力系数。各种局部装置结构的 ξ 是由实验测定的, 可查手册。

阀类元件局部压力损失可按下式计算

$$\Delta p_{\xi} = \Delta p_n \left(\frac{q}{q_n} \right)^2 \quad (1-45)$$

式中, Δp_n 是阀在额定流量下的压力损失; q_n 是阀的额定流量; q 是阀的实际流量。

（三）管路系统总的压力损失

$$\sum \Delta p = \sum \Delta p_{\lambda} + \sum \Delta p_{\xi} \quad (1-46)$$

注意: 在两个局部阻力区之间的直管长度应大于 $(10 \sim 20) d$ 。

液体的流速对系统的压力损失影响最大, 流速增加压力损失会增大, 但流速太低会增加管路和阀类元件的尺寸。因此, 合理选择液体的流速在液压系统设计中显得尤其重要。

二、常见问题分析与处理

在液压传动中, 液压冲击和气穴现象都会给液压系统的正常工作带来不利的影响, 因此需要了解这些现象产生的原因, 并采取相应的措施以减小其危害。

（一）液压冲击

在液压系统中, 因某种原因引起液体压力在一瞬间突然升高, 产生很高的压力峰值, 这种现象称为液压冲击。

1. 液压冲击产生的原因及危害。

产生液压冲击的原因主要有以下几个方面。

(1) 液压冲击多发生在液流突然停止运动的时候。液流通路(如阀门)迅速关闭使液体的流动速度突然降为零, 这时液体受到挤压, 使液体的动能转变为液体的压力能, 于是液体的压力急剧升高, 从而引起液压冲击。

(2) 在液压系统中, 高速运动的工作部件突然制动或换向时, 因工作部件的惯性也会引起液压冲击。如液压缸做高速运动突然被制动, 油液被封闭在两腔中, 由于惯性力的作用, 液压缸仍继续向前运动, 因而回油腔的液体受到挤压, 瞬时压力急剧升高, 从而引起液压冲击。



(3) 液压系统中某些元件反应动作不够灵敏,也会引起液压冲击。如溢流阀在超压下不能迅速打开,形成压力的超调量;限压式变量液压泵在油温升高时不能及时减少输油量等,都会引起液压冲击。

液压冲击时产生的压力峰值往往比正常工作压力高好几倍,这种瞬间压力冲击不仅引起振动和噪声,使液压系统产生温升,有时会损坏密封装置、管路和液压元件,并使某些液压元件(如顺序阀、压力继电器等)产生错误动作,造成设备损坏。

2. 减少液压冲击的措施。

(1) 延长阀门开、闭和运动部件制动换向的时间,可采用换向时间可调的换向阀。

(2) 限制管路流速及运动部件的速度,一般将管路流速控制在 4.5 m/s 以内。

(3) 正确设计阀门或设置缓冲装置(如阻尼孔),使运动部件制动时速度变化比较均匀。

(4) 适当增大管径,不仅可以降低流速,而且可以减小压力传播速度。

(5) 尽量缩短管道长度,可以减小压力波的传播时间。

(6) 在容易发生液压冲击的地方采用橡胶软管或设置蓄能器,以吸收冲击的能量;也可以在容易出现液压冲击的地方,安装限制压力升高的安全阀。

(二) 气穴现象

1. 气穴现象的机制及危害。

在液压系统中,当某点处的压力低于液压油的空气分离压力,原先溶解在液体中的空气就会分离出来,使液体中出现大量气泡,这种现象称为气穴现象,又称为空穴现象。当液体的压力进一步降低到液体的饱和蒸气压时,液体将迅速汽化,产生大量蒸气气泡,使气穴现象更加严重。

气穴现象多发生在阀口和液压泵的吸油口处。在阀口处,一般由于过流断面较小使液流的速度增大,根据伯努利方程,该处的压力会大大降低,以致产生气穴。在液压泵的吸油过程中,吸油口绝对压力会低于大气压力,如果泵的安装高度过大,吸油口处过滤器的阻力和管路阻力太大,油液黏度过高或泵的转速过高,造成泵入口处的真空度过大,亦会产生气穴。

当液压系统中出现气穴现象时,大量的气泡破坏了液流的连续性,造成流量和压力的脉动,当带有气泡的液流进入高压区时,周围的高压会使气泡迅速破灭,使局部产生非常高的温度和冲击压力,引起振动和噪声。当附着在金属表面上的气泡破灭时,局部产生的高温和高压会使金属表面疲劳,时间长了就会造成金属表面的剥蚀。这种由于气穴造成的对金属表面的腐蚀作用称为气蚀。气蚀会使液压元件的工作性能变坏,并大大缩短液压元件的使用寿命。

2. 减少气穴现象的措施。

在液压系统中,只要液体压力低于空气分离压力,就会产生气穴现象。如想完全消除是十分困难的。为减少气穴和气蚀的危害,通常采取下列措施。

- (1) 减小阀孔或其他元件通道前后的压力降。
- (2) 保持液压系统中的油压高于空气分离压力。如尽量降低液压泵的吸油高度，采用内径较大的吸油管并少用弯头，吸油管的过滤器容量要大，以减小管路阻力。液压泵转速不能过高以防吸油不充分，必要时对大流量泵采用辅助泵供油。
- (3) 降低液体中气体的含量。如各元件的连接处要密封可靠，以防止空气进入。
- (4) 对容易产生气蚀的元件，如泵的配油盘等，采用抗腐蚀能力强的金属材料，增强元件的机械强度，减小表面粗糙度值，以提高液压元件的抗气蚀能力。

任务实施

1. 设备、工具准备：液压实验台、仿真软件。
2. 任务分析：
 - (1) 实验台安装定位夹紧机构回路观察压力表的读数。
 - (2) 借助 fluidSIM-H 仿真软件分析压力的变化情况与实际做比对。
 - (3) 分析压力损失的原因。
 - (4) 计算液压损失。

任务评价

表 1-9 过程考核评价表

评价内容	评价要素	评价方式			得分
		小组自评 30%	小组互评 30%	教师评价 40%	
职业素养	语言表达能力和逻辑分析能力 (10) 具有科学、严谨、创新的工作态度 (10) 具有较强的安全意识、质量意识 (10)				
专业知识与技能	理想伯努利方程 (20) 两通流截面参数分析 (30) 高度确定计算 (20)				

任务拓展

分析液体在下面的变径圆管道中流动时，管道直径不同的地方，竖直管道中液体的高度也不同，为什么？（图 1-18）

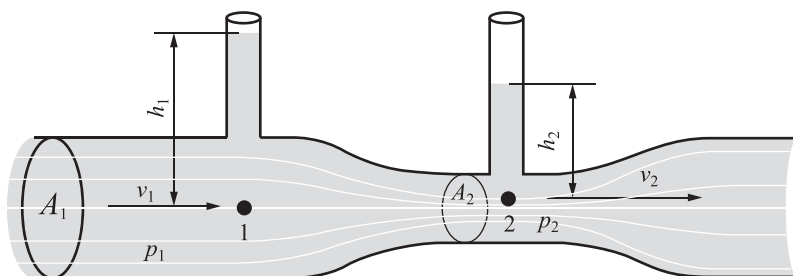


图 1-18

思考与练习

1. 液压系统中为什么会有压力损失？压力损失有哪几种？其值与哪些因素有关？
2. 何谓液压冲击？可采取哪些措施来减小液压冲击？
3. 液压冲击和气穴现象是怎样产生的？有何危害？如何防止？
4. 为什么要限制液体在管道内的流速？

5. 如图 1-19 所示，液压泵从油箱中吸油。液压泵排量 $V=72 \text{ cm}^3/\text{r}$ ，转速 $n=1\,500 \text{ r/min}$ ，油液运动黏度 $\nu=40 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，密度 $\rho=900 \text{ kg/m}^3$ 。吸油管长度 $l=6 \text{ m}$ ，吸油管直径 $d=30 \text{ mm}$ ，在不计局部损失时试求为保证泵吸油口真空度不超过 $0.4 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，液压泵吸油口高于油箱液面的最大值 H ，并回答此 H 是否与液压泵的转速有关。

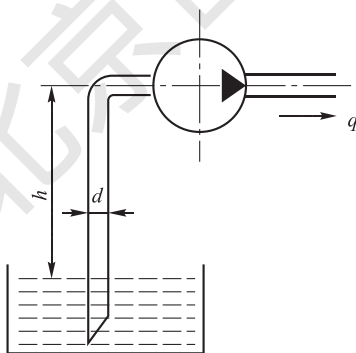


图 1-19 液压泵

任务五 ··· 小孔及缝隙流量的确定

任务目标

1. 会计算小孔和缝隙的流量。
2. 会分析液压执行元件的速度变化规律。
3. 能运用仿真软件分析流量控制阀的流量变化情况。
4. 会用压力表测量压力值。
5. 具有良好的职业道德素质、人文素养和工匠精神。

任务引入与分析

车床的刀架旋转控制液压回路要实现旋转马达转速的控制，如果你是一名设计人员，如何计算流经流量控制阀的流量值，从而实现调速阀的调试？

知识链接

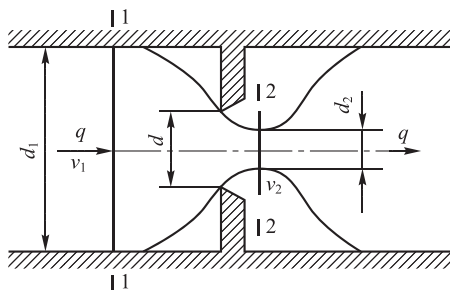
在液压系统中，孔口和缝隙流动是最常见的。研究液体在孔口和缝隙中的流动规律，了解影响它们的因素，对液压系统的分析和设计都很有意义。

一、孔口流量计算

（一）薄壁孔流量计算

孔口的长径比 $l/d \leq 0.5$ 时称为薄壁孔，如图 1-20 所示。对孔前通道断面 1-1 和收缩断面 2-2 之间的液体列出伯努利方程

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho \alpha_1 v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho \alpha_2 v_2^2 + \Delta p_w \quad (1-47)$$



薄壁小孔液流分析

图 1-20 典型薄壁孔



式中, $h_1 = h_2, v_1 \ll v_2, \alpha_2 = 1$, 局部损失 $\Delta p_w = \Delta p_\xi = \xi \frac{\rho v_2^2}{2}$, 整理上式后得

$$v_2 = C_v \sqrt{2\Delta p / \rho}$$

式中, C_v 是速度系数, $C_v = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}}$; Δp 是孔口前后压差, $\Delta p = p_1 - p_2$ 。

由此可得通过薄壁孔口的流量公式为

$$q = A_2 v_2 = C_v C_c A_T \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} = C_q A_T \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (1-48)$$

式中: A_2 ——收缩断面面积, 由实验测定;

C_c ——收缩系数, $C_c = A_2 / A_T$;

A_T ——孔口过流断面的面积, $A_T = \pi d^2 / 4$;

C_q ——流量系数, $C_q = C_v C_c$ 。

C_c 、 C_v 和 C_q 的数值可由实验确定。当液体完全收缩 ($\frac{D}{d} \geq 7$) 时, $C_q =$

0.61 ~ 0.62。当液体不完全收缩 ($\frac{D}{d} < 7$) 时, $C_q = 0.7 \sim 0.8$ 。

薄壁小孔因其沿程压力损失很小, 其能量损失只涉及局部损失, 因此通过薄壁孔口的流量与黏度无关, 即流量对油温的变化不敏感, 因此薄壁小孔适合用作节流元件。

(二) 短孔的流量计算

孔口的长径比 $0.5 < \frac{l}{d} \leq 4$ 时称为短孔。短孔的流量公式仍为式 (1-48), 但流量系数不同, 一般可取 $C_q = 0.82$ 。短孔的工艺性好, 通常用作固定节流器。

(三) 细长孔的流量计算

孔口的长径比 $\frac{l}{d} > 4$ 时称为细长孔。液体流过细长孔时, 一般为层流, 流量公式可用前面推出的圆管层流的流量公式, 即

$$q_v = \frac{\pi d^4}{128 \mu l} \Delta p \quad (1-49)$$

由上式可知, 液体流经细长孔的流量与液体黏度成反比。即流量随温度的变化而变化, 并且流量与小孔前后的压差呈线性关系。

上述各类小孔的流量可归纳为一个通用公式

$$q_v = C A_T \Delta p^m \quad (1-50)$$

式中: C ——由孔的形状、尺寸和液体性质决定的系数;

m ——由孔的长径比决定的指数。薄壁孔 $m = 0.5$, 细长孔 $m = 1$, 短孔 $0.5 < m < 1$ 。

二、缝隙流量计算

液压元件（因为相互间有相对运动）之间都存在缝隙（或称为间隙）。流过缝隙的油液流量就是泄漏量。了解影响泄漏量的因素是十分必要的。缝隙流量计算包括压差流动和剪切流动。

（一）平行平板缝隙流量计算

平行平板缝隙间的液体流动情况，如图 1-21 所示。设缝隙的长、宽、高分别为 l 、 b 、 h ，且 $l \gg h$ 、 $b \gg h$ ，液体通过缝隙的流动通常为层流。

1. 压差流动。

液体在压差 $\Delta p = p_1 - p_2$ 作用下通过缝隙的流动，称为压差流动。在压差 $\Delta p = p_1 - p_2$ 作用下，通过平行平板缝隙的流量为

$$q_p = \frac{bh^3}{12\mu l} \Delta p \quad (1-51)$$

2. 剪切流动。

压差为零时，液体仅在平板运动 u_0 作用下通过缝隙的流动，称为剪切流动。其值为

$$q_\tau = \frac{u_0}{2} bh \quad (1-52)$$

3. 总流量。

$$q_v = \frac{bh^3}{12\mu l} \Delta p \pm \frac{u_0}{2} bh \quad (1-53)$$

当 u_0 的方向与压差流动的方向相同时取“+”号；反之取“-”号。

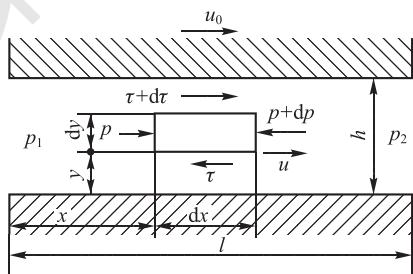


图 1-21 固定平行平板缝隙的液流

（二）环形缝隙流量计算

1. 同心环形缝隙流量计算。

如图 1-22，当 $\frac{h}{r} \ll 1$ 时，同心环形缝隙的流量为



$$q_v = \frac{\pi d h^3}{12 \mu l} \Delta p \pm \frac{u_0}{2} \pi d \quad (1-54)$$

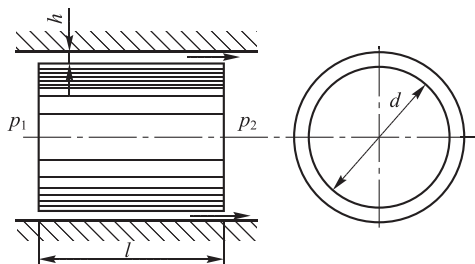


图 1-22 同心圆环缝隙的流量

2. 偏心环形缝隙流量计算。

偏心环形缝隙实际上, 圆柱体与孔的配合很难保持同心, 往往存在一定的偏心 e , 如图 1-23 所示。其流量表达式为

$$q_v = \frac{\pi d h^3}{12 \mu l} \Delta p (1 + 1.5 \varepsilon) \pm \frac{u_0}{2} \pi d h \quad (1-55)$$

式中, ε 为偏心距, $\varepsilon = e/h$; h 为同心时的缝隙量。

由上式可知, 同心环形缝隙的流量公式是偏心环形缝隙的流量公式在 $\varepsilon = 0$ 时的特例。当完全偏心时, 即 $e = h$, $\varepsilon = 1$, 此时

$$q_v = 2.5 \frac{\pi d h^3}{12 \mu l} \Delta p \pm \frac{u_0}{2} \pi d h \quad (1-56)$$

由上式可知, 在不考虑剪切流量时, 完全偏心时的流量是同心时的 2.5 倍。因此在制造和装配中保证较高的配合同轴度是非常必要的。

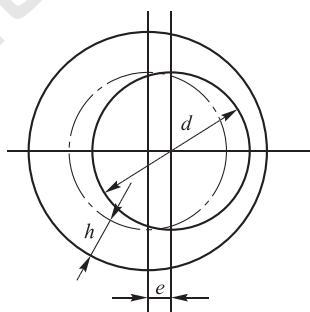


图 1-23 偏心圆环缝隙的流量

注意: 为减小泄漏损失 ($\Delta P = \Delta p q_v$), 应减小缝隙量; 但缝隙量的减小会使液压元件中的摩擦损失增加, 因此, 缝隙量有一个使这两种损失之和达到最小的最佳值, 并不是越小越好。

任务实施

1. 设备、工具准备：液压实验台、仿真软件。
2. 任务分析：
 - (1) 实验台安装节流调速，调整节流阀的开口大小观察执行元件的运动速度；
 - (2) 借助 fluidSIM-H 仿真软件分析速度变化；
 - (3) 分析速度变化规律；
 - (4) 计算流量控制阀的流量。

任务评价

表 1-10 过程考核评价表

评价内容	评价要素	评价方式			得分
		小组自评 30%	小组互评 30%	教师评价 40%	
职业素养	语言表达能力和逻辑分析能力 (10) 具有科学、严谨、创新的工作态度 (10) 具有较强的安全意识、质量意识 (10)				
专业知识与技能	实验台搭建回路液压缸运动速度调节 (10) 仿真软件分析速度的变化情况 (20) 速度变化规律分析 (20) 流量控制阀流量的计算 (20)				

任务拓展

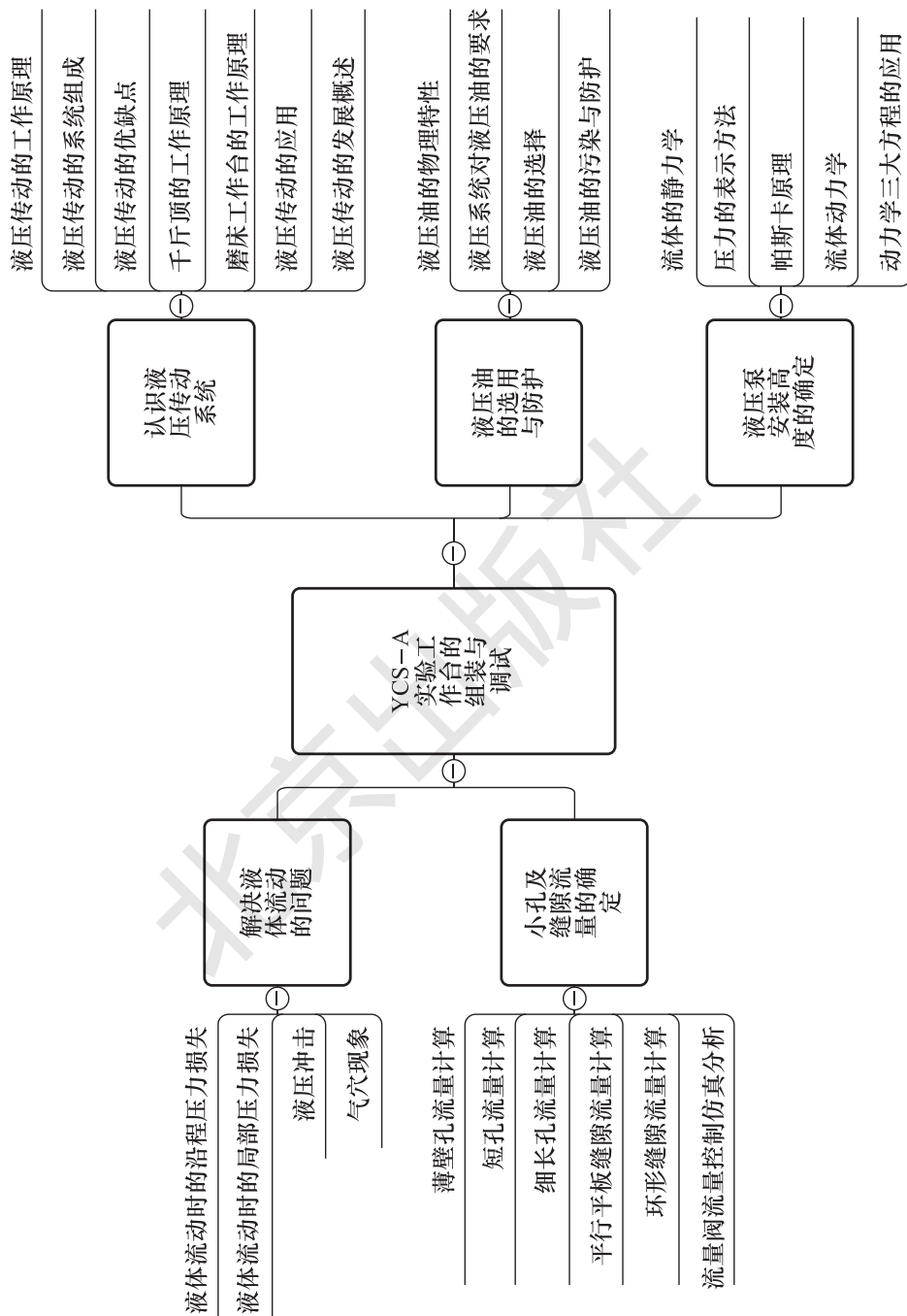
瞬变流动

在液压与气动系统中有时会出现流体的流速在极短的瞬间发生很大变化的现象，从而导致压力的急剧变化，这就是所谓瞬变流动。瞬变流动会给系统带来很大的危害，应尽量予以避免。

思考与练习

1. 指出小孔流量通用公式中各物理量的代数含义。
2. 内径 $d=1\text{ mm}$ 的阻尼管内有 $q=0.3\text{ L/min}$ 的流量流过，液压油密度 $\rho=900\text{ kg/m}^3$ ，运动黏度 $\nu=20\text{ mm}^2/\text{s}$ 。现欲使阻尼管的两端保持 1 MPa 的压差，试求阻尼管的长度。
3. 若通过一薄壁小孔的流量 $q=10\text{ L/min}$ ，孔前后压差为 0.2 MPa ，孔的流量系数 $C_d=0.62$ ，油液密度 $\rho=900\text{ kg/m}^3$ ，试求该小孔的通流面积。

42



职业技能知识点考核

一、填空题

1. 液压传动是以()能来传递和转换能量的。
2. 液压传动装置由()、()、()、()和()五部分组成,其中()和()为能量转换装置。
3. 液压系统中的压力取决于(),执行元件的运动速度取决于()。
4. 液体在管中流动时,存在()和()两种流动状态。液体的流动状态可用()来判定。()时黏性力起主导作用,()时惯性力起主导作用。
5. 在研究流动液体时,把假设既()又()的液体称为理想流体。
6. 液压系统中的压力,即常说的表压力,指的是()压力。
7. 在液压系统中,由于某一元件的工作状态突变引起油压急剧上升,在一瞬间突然产生很高的压力峰值,同时发生急剧的压力升降交替的阻尼波动过程称为()。
8. 液流流经薄壁小孔的流量与()的一次方成正比,与()的 $1/2$ 次方成正比。通过小孔的流量对()不敏感,因此薄壁小孔常用作可调节流阀。

二、判断题

1. 液压传动与机械、电气传动相配合时,易实现较复杂的自动工作循环。()
2. 液压油的可压缩性是钢的 $100 \sim 150$ 倍。()
3. 液体在变径的管道中流动时,管道截面积小的地方,液体流速高,而压力小。()
4. 液压传动不易获得很大的力和转矩。()
5. 液压传动装置工作平稳,能方便地实现无级调速,但不能快速起动、制动和频繁换向。()
6. 作用于活塞上的推力越大,活塞运动的速度就越快。()

三、选择题

1. 液压传动是以液体作为工作介质,利用液体的()来传递运动和动力的。
A. 动能
B. 压力能
C. 机械能
D. 势能
2. 液压元件使用寿命长是因为()。
A. 易过载保护
B. 能自行润滑
C. 工作平稳
D. 操纵方便



3. 油液的黏度指的是()。
- A. 油液流动时内部产生的摩擦力的大小
B. 黏度大, 牌号小
C. 黏度与温度无关
D. 黏度随温度升高而增大
4. 小孔的长度 L 和孔径 d 之比 $\frac{L}{d} \leq 0.5$ 时称()。
- A. 短孔
B. 薄壁小孔
C. 细长孔
D. 不一定
5. 小孔的长度 L 和孔径 d 之比 $\frac{L}{d} > 4$ 时称()。
- A. 短孔
B. 薄壁小孔
C. 细长孔
D. 不一定

四、简答题

1. 简述液压系统的组成及功用。(图 1-24)
2. 简述千斤顶的工作原理。(图 1-24)

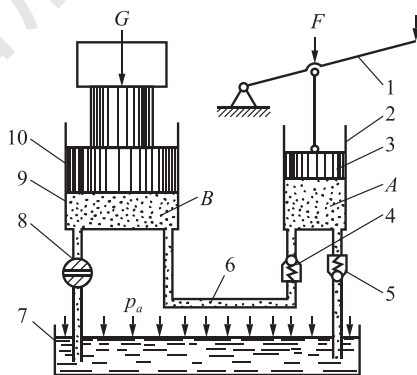


图 1-24