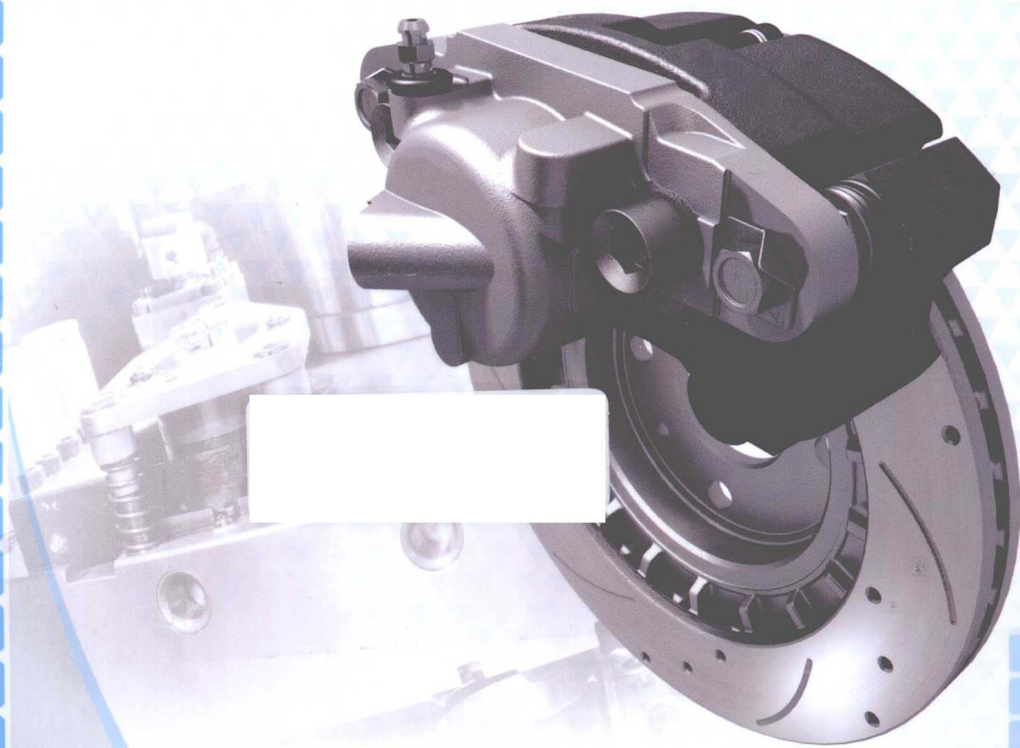


高等职业教育“十二五”规划教材
机电设备维修与管理专业

液压与气动技术

周进民 杨成刚 主 编
林 洪 涂仁喜 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书作为高等职业教育机电类专业教材,是根据教育部对高等职业教育人才培养目标的要求,结合高等职业教育人才培养特点和编者的教学与实践经验编写而成的。本书主要内容包括液压传动基础,液压系统工作介质,液动力元件,液压执行元件,方向控制元件,压力控制元件,流量控制元件,比例控制元件,液压系统的组建,气压传动系统与气源装置,气动执行元件,气动控制元件,气动系统的组建、安装、调试与维护。

本书是高职高专教育三年制机电类专业教材,适用于60~80学时的教学,教师可以根据专业培养目标的不同而进行内容的取舍。此外,本书也适合作为成人高校、中等职业学校机电类专业的教材,同时可供工程技术人员参考或作为自学用书。

本书配套资源丰富,配有电子课件、电子教案、视频、习题答案及试题库等,凡使用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 注册后下载。咨询邮箱: cmpgaozhi@sina.com。咨询电话:010-88379375。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气动技术/周进民,杨成刚主编. —北京:机械工业出版社, 2012.12

高等职业教育“十二五”规划教材. 机电设备维修与管理专业
ISBN 978-7-111-40261-9

I. ①液… II. ①周…②杨… III. ①液压传动-高等职业教育-教材
②气压传动-高等职业教育-教材 IV. ①TH137②TH138
中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第285499号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘良超 责任编辑:刘良超

版式设计:赵颖喆 责任校对:刘志文

封面设计:陈沛 责任印制:张楠

高教社(天津)印务有限公司印刷

2013年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·20印张·491千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-40261-9

定价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书作为高等职业教育机电类专业教材,是根据教育部对高等职业教育人才培养目标的要求,结合高等职业教育人才培养特点和编者的教学与实践经验编写而成的。基于液压与气动技术在机电类专业人才培养中的地位与作用,本书强调以真实项目为引导,突出完成工作任务与所需相关知识的密切联系,强化学生知识应用、综合技能和创新能力的培养。特别是知识拓展部分,汇集了液压与气动技术的最新发展、常用技术英语和现代企业管理等方面的知识,为学生课外阅读和深入学习提供了丰富的素材。

本书是高职高专教育三年制机电类专业教材,适用于60~80学时的教学,教师可以根据专业培养目标的不同而进行内容的取舍。此外,本书也适合作为成人高校、中等职业学校机电类专业的教材,同时可供工程技术人员参考或作为自学用书。

本书由重庆工业职业技术学院周进民教授、唐山工业职业技术学院杨成刚教授任主编,重庆工业职业技术学院林洪副教授、机械工业第三设计研究院涂仁喜任副主编。参与本书编写的还有重庆工业职业技术学院秦建生,唐山工业职业技术学院李小静、薄向东、杨珍明、赵士明,中国重汽集团唐山宏远专用汽车有限公司张辉,亚德客国际集团汪迪华。编写分工如下:项目一由周进民编写;项目二、项目八由林洪编写;项目三由李小静编写;项目四由薄向东编写;项目五由杨珍明编写;项目六由张辉编写;项目七由赵士明编写;项目九由杨成刚编写;项目十由涂仁喜编写;项目十一、项目十二由秦建生编写;项目十三由汪迪华编写。周进民对全书进行了策划和统稿,并编写了“技术英语阅读”部分。燕山大学的赵静一教授对本书进行了审阅并提出了宝贵意见,美国堪萨斯州立大学刘亦睿对书稿进行了订正,在此表示衷心感谢。

本书在编写过程中,得到了重庆工业职业技术学院数控教研室和唐山工业职业技术学院机械设备教研室老师们的大力支持和帮助,在此谨致以由衷的谢意。

本书配套资源丰富,配有电子课件、电子教案、视频、习题答案及试题库等,凡使用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 注册后下载。咨询邮箱: cmpgaozhi@sina.com。咨询电话:010-88379375。

由于编者水平和经验有限,书中难免存在一些不足和疏漏,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言	【鉴定与评价】	53
项目一 液压传动系统输出力的确定	【知识拓展】	54
【学习目标】	项目四 液压执行元件的应用	56
【学习场所、设备与资料】	【学习目标】	56
任务一 认识液压传动	【学习场所、设备与资料】	56
【相关知识】	任务 液压锯床执行元件的应用	56
【任务实施】	【相关知识】	56
【鉴定与评价】	【任务实施】	67
任务二 确定液压千斤顶的输出力	【鉴定与评价】	68
【相关知识】	【知识拓展】	69
【任务实施】	项目五 液压方向控制元件的应用	73
【鉴定与评价】	【学习目标】	73
【知识拓展】	【学习场所、设备与资料】	73
项目二 液压系统工作介质的应用	任务 液压折弯机方向控制元件的	
【学习目标】	应用	73
【学习场所、设备与资料】	【相关知识】	73
任务 液压机液压油的选用	【任务实施】	83
【相关知识】	【鉴定与评价】	84
【任务实施】	【知识拓展】	85
【鉴定与评价】	项目六 液压压力控制元件的应用	90
【知识拓展】	【学习目标】	90
项目三 液压动力元件的应用	【学习场所、设备与资料】	90
【学习目标】	任务 液压剪板机压力控制元件的	
【学习场所、设备与资料】	应用	90
任务一 液压叉车动力元件的应用	【相关知识】	90
【相关知识】	【任务实施】	104
【任务实施】	【鉴定与评价】	105
【鉴定与评价】	【知识拓展】	106
任务二 组合机床动力元件的应用	项目七 液压流量控制元件的应用	109
【相关知识】	【学习目标】	109
【任务实施】	【学习场所、设备与资料】	109
【鉴定与评价】	任务 平面磨床流量控制元件的	
任务三 液压拉床动力元件的应用	应用	109
【相关知识】	【相关知识】	109
【任务实施】	【任务实施】	117

【鉴定与评价】	118	【任务实施】	219
【知识拓展】	119	【鉴定与评价】	220
项目八 液压比例控制元件的应用	124	【知识拓展】	221
【学习目标】	124	项目十一 气动执行元件的应用	225
【学习场所、设备与资料】	124	【学习目标】	225
任务 注塑机比例控制元件的		【学习场所、设备与资料】	225
应用	124	任务 分选装置气动执行元件的	
【相关知识】	124	应用	225
【任务实施】	130	【相关知识】	226
【鉴定与评价】	131	【任务实施】	231
【知识拓展】	132	【鉴定与评价】	232
项目九 液压系统的组建	136	【知识拓展】	233
【学习目标】	136	项目十二 气动控制元件的应用	238
【学习场所、设备与资料】	136	【学习目标】	238
任务一 数控车床卡盘液压系统的		【学习场所、设备与资料】	238
组建	136	任务 加工中心气动控制元件的	
【相关知识】	136	应用	238
【任务实施】	162	【相关知识】	238
【鉴定与评价】	163	【任务实施】	250
任务二 数控车床卡盘液压站的		【鉴定与评价】	251
组建	164	【知识拓展】	252
【相关知识】	164	项目十三 气动系统的组建、安装、	
【任务实施】	181	调试、使用与维护	256
【鉴定与评价】	182	【学习目标】	256
任务三 液压系统的安装、调试、		【学习场所、设备与资料】	256
维修与故障诊断	183	任务一 气动钻床气动系统的	
【相关知识】	183	组建	256
【任务实施】	198	【相关知识】	257
【鉴定与评价】	199	【任务实施】	269
【知识拓展】	200	【鉴定与评价】	270
项目十 气压传动系统的气源装置		任务二 气动系统安装、调试、使用	
组建	204	与维护	271
【学习目标】	204	【相关知识】	271
【学习场所、设备与资料】	204	【任务实施】	279
任务一 认识气压传动系统	204	【鉴定与评价】	280
【相关知识】	204	【知识拓展】	281
【任务实施】	208	附录	284
【鉴定与评价】	209	附录 A 液压控制元件图形符号 (摘	
任务二 气源装置的组建	210	自 GB/T 786.1—2009) ...	284
【相关知识】	210	附录 B 气动控制元件图形符号 (摘	
		自 GB/T 786.1—2009) ...	299
		参考文献	312

项目一 液压传动系统输出力的确定



学习目标

通过本项目的学习，应掌握液压传动系统的工作原理、组成和液体静力学的有关知识，形成识别液压系统的各个组成部分和进行液体静压力计算的能力。其具体目标为：

- 1) 掌握液压传动系统的工作原理及组成。
- 2) 掌握液体静压力及传递原理。
- 3) 能识别液压元件图形符号。
- 4) 能说出液压传动优缺点。
- 5) 能识别液压系统的各个组成部分。
- 6) 能计算液体的静压力。



学习场所、设备与资料

- 1) 液压实训室或车间。
- 2) 个人防护用品、用具。
- 3) 安全的工作环境和工作场所。
- 4) 液压千斤顶、有液压系统的机电设备。
- 5) 液压千斤顶、机电设备使用说明书。
- 6) 有关职场安全与健康的法律、法规。
- 7) 有关危险化学品和危险商品的相关信息。

任务一 认识液压传动



相关知识

一、液压传动的概念

所谓传动，是指运动和动力的传递。常见的传动有机械传动、电气传动和流体传动。流体传动又包括液体传动和气体传动。液压传动是指以液体作为传动介质，利用液体的压力来实现运动和动力传递的传动方式。

二、液压千斤顶的工作原理

液压千斤顶是常见的重物举升工具和设备，其工作原理如图 1-1 所示。液压千斤顶由手

动柱塞泵和举升液压缸两部分构成。手动柱塞泵由杠杆1、小活塞2、小缸体3、单向阀4和5等组成，举升液压缸由大活塞7、大缸体6、卸油阀9等组成。液压千斤顶工作时，先手动提起杠杆1，小活塞2被带动上升，小缸体3下腔的密闭容积增大，腔内压力降低并形成部分真空，大缸体6下腔内的油液在重物G作用下形成压力并使单向阀5关闭，同时在油箱10液面上大气压力的作用下单向阀4打开，油箱10中的油液沿吸油管路进入并充满小缸体3的下腔，完成一次吸油动作。接着压下杠杆1，小活塞2下移，小缸体3下腔的密闭容积减小，其腔内压力升高而使单向阀4关闭，同时克服大缸体6下腔的压力而使单向阀5打开，小缸体3下腔的油液沿压油管路进入大缸体6的下腔（卸油阀9处于关闭状态），推动大活塞7

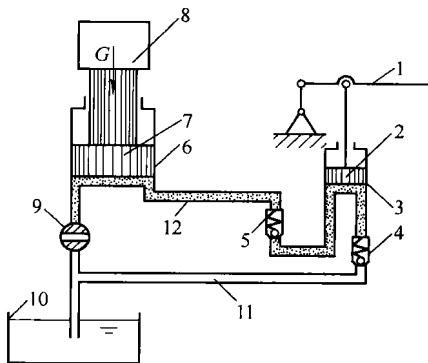


图 1-1 液压千斤顶的工作原理图

1—杠杆 2—小活塞 3—小缸体 4、5—单向阀
6—大缸体 7—大活塞 8—重物 9—卸油阀
10—油箱 11—吸油管路 12—压油管路

向上移动，顶起重物8。反复提、压杠杆1，就可以使大活塞7推举重物8不断上升，达到顶起重物的目的。将卸油阀9转动90°，大缸体6下腔与油箱10连通，大活塞7在重物8的重力作用下向下移动，下腔的油液通过卸油阀9流回油箱10。

液压千斤顶在工作时，大活塞下腔的压力与小活塞下腔的压力是相等的。但由于大活塞面积大于小活塞面积，因而大活塞上作用的力必然大于小活塞上作用的力。如果在小活塞上施加较小的力，则会在大活塞上输出较大的力而顶起重物，因此液压千斤顶在工作时能够省力。如果不考虑油液的可压缩性、漏损和缸体、油管的变形，则被小活塞压出的油液的体积必然等于大活塞向上升起后大活塞下腔扩大的容积。由于大活塞面积大于小活塞面积，因而大活塞上升的位移必然小于小活塞下降的位移，换句话说，大活塞上升的速度必然小于小活塞下降的速度，因此液压千斤顶在工作时顶起重物的速度比较慢。液压千斤顶工作时能够省力但不省功。

三、液压传动系统的工作原理

通过液压千斤顶实例可知，液压传动的工作原理是：以受压液体作为工作介质，通过液压元件密封容积的变化来传递运动；通过系统内部受压液体的压力来传递动力；液压传动系统工作时，可以通过对液体的压力、流量和方向的控制与调节来满足工作部件在力、速度和方向上的要求。

液压传动装置的本质是一种能量转换装置，液压传动的过程其实就是机械能—液压能—机械能的转换过程。

四、液压传动系统的组成

从以上实例可以看出，一个完整的液压传动系统主要由以下几部分组成：

1) 动力元件。它将原动机输出的机械能转换为油液的压力能，提供液压系统所需的压力油。常见的动力元件是液压泵。

2) 执行元件。它将油液的压力能转换为机械能，驱动工作机构作直线运动或旋转运

动。常见的执行元件是液压缸和液压马达。

3) 控制元件。它控制和调节系统中油液的压力、流量和流动方向。控制元件包括各种压力控制阀、流量控制阀和方向控制阀, 这些元件的不同组合组成了不同功能的液压系统。

4) 辅助元件。它将前面三部分元件连接起来组成一个系统, 起着储油、过滤、测量和密封等作用, 以保证液压系统能可靠、稳定、持久地工作。辅助元件包括管路、管接头、油箱、过滤器、蓄能器、密封件和控制仪表等。

5) 传动介质。它是液压传动系统中传递能量的液体。常用的传动介质是液压油。

五、液压传动系统的图形符号

液压传动系统的原理图是由代表各种液压元件、辅件及连接形式的图形符号组成的, 用以表达一个液压系统工作原理的示意图。

液压传动系统的原理图有两种表达方式: 一种是半结构式系统原理图, 这种图形比较直观, 元件结构特点清楚了, 但图形繁琐, 绘制麻烦, 一般较少使用; 另一种是用图形符号表示的系统原理图, 即把各类液压元件用规定的图形符号表示。

我国制定的液压与气动元件图形符号最新标准为 GB/T 786.1—2009《流体传动系统及元件图形符号和回路图 第1部分: 用于常规用途和数据处理的图形符号》, 其中的常用的液压控制元件图形符号摘录于本教材附录 A 中。

六、液压传动的特点

液压传动与机械传动、电气传动和气压传动相比较, 有以下特点:

1) 传动平稳。油液的可压缩性极小, 在常压下可以认为不可压缩。在液压传动系统中, 各传动装置依靠油液的连续流动进行运动和动力的传递。油液具有吸振能力, 加之在油路中可以设置液压缓冲装置, 因而传动十分平稳, 便于实现频繁换向。因此, 液压传动广泛应用于要求传动平稳的机械上, 如磨床传动机构几乎全部采用了液压传动。

2) 体积小、质量轻。液压传动与其他传动方式相比, 在输出同样功率的情况下, 其体积小、质量轻、结构紧凑, 因而惯性小、动作灵敏。例如, 采用液压传动的挖掘机比采用机械传动的挖掘机的质量小很多。

3) 承载能力大。液压传动易于获得很大的力和转矩, 因此广泛应用于压制机、隧道掘进机、万吨轮船操舵机、万吨水压机等。

4) 易于实现无级调速。液压传动系统在工作过程中, 调节液体的流量就可实现无级调速, 并且调速范围很大。

5) 易于实现过载保护。液压传动系统中采取了许多安全保护措施, 能够自动防止过载, 避免事故发生。

6) 液压元件能够实现自动润滑。由于通常采用液压油作为工作介质, 液压传动装置能自动润滑, 因此液压元件的使用寿命较长。

7) 容易实现复杂动作。采用液压传动能获得各种复杂的动作, 如仿形车床的液压仿形刀架、数控铣床的液压工作台等, 可以满足加工不规则形状零件的需要。

8) 结构简化。采用液压传动可以大大简化机械结构, 从而减少机械零部件数量。

9) 便于实现自动化。在液压传动系统中, 液体的压力、流量和方向非常容易调节和控

制，并很容易与电气、电子控制结合起来实现复杂的自动工作过程。液压传动目前在组合机床和自动生产线上应用十分普遍。

10) 便于实现“三化”。液压元件易于实现系列化、标准化和通用化，便于设计和组织专业性大批量生产，从而提高生产率和产品质量，降低成本。

11) 造价高。为了减少泄漏，对液压元件的加工和装配精度要求较高，对使用和维护要求比较严格，因而液压元件及液压设备的造价较高。

12) 实现定比传动困难。液压传动系统中由于存在泄漏，同时液体具有一定的可压缩性，因此无法保证严格的传动比。液压传动不宜应用在传动比要求严格的场合，例如螺纹和齿轮加工机床的传动系统等。

13) 对油温的变化比较敏感。由于液压油的粘性随温度的变化而改变，故不宜在高温或低温的环境下工作。

14) 不适宜远距离传动。由于液压传动中压力损失较大，传动效率相对较低，故不宜利用它进行远距离传动。

15) 空气混入油液中会影响液压传动系统的工作性能。油液中混入空气后，容易引起爬行、振动和噪声，使液压传动系统的工作性能受到影响。

16) 油液容易受污染。油液被污染后会影响到液压传动系统工作的可靠性。



任务实施

工作任务单

任务名称	认识液压传动				
工作任务	机电设备液压系统五个组成部分				
姓 名		班 级		小 组	
日 期		开始时间		结束时间	

任务描述:

在老师的指导下,在液压实训室或生产车间对机电设备的液压系统进行观察,找出所用液压系统的动力元件、执行元件、控制元件、辅助元件,并记录液压系统所用的工作介质

任务要求:

- 1) 了解职场安全知识并使用个人防护用品
- 2) 掌握危险化学品物品的安全使用与存放
- 3) 认识液压元件实物并记录其型号
- 4) 对液压元件进行归类

提交成果	1) 危及职场安全的各类潜在因素清单 2) 液压动力元件、执行元件、控制元件和辅助元件的型号清单 3) 液压工作介质清单				
考核评价	序号	考核内容	配分	评分标准	得分
	1	团队协作	10	在小组活动中,能够与他人进行有效合作	
	2	职场安全	20	在活动中,遵守安全规章、制度	
	3	个人防护用品的使用	10	正确使用个人防护用品、用具	
	4	潜在危险因素清单	20	职场安全危险因素查找全面、准确	
	5	液压元件清单	40	液压元件无遗漏、归类正确	
指导教师			得分合计		



鉴定与评价

一、请回答下列问题。

1. 什么是液压传动？其工作原理是怎样的？

2. 指出液压传动与机械传动的两个相同点和两个不同点？

3. 液压系统由哪几个部分组成？

4. 液压传动的优点非常突出，是否可以取代机械传动？为什么？

5. 据你观察和了解，哪些机电设备上采用了液压传动技术？

二、请判断下列说法的对错（正确画√，错误画×）。

1. 机械传动、电气传动和流体传动是工程中常见的传动方式。 ()
2. 液压传动实际上是一种力向另一种力的传递。 ()
3. 液压传动适用于大功率、自动化程度高、无级调速和传动比准确的场合。 ()
4. 液压传动系统中的执行元件能将机械能转换为压力能。 ()

三、请将正确的答案填入括号中。

1. 液压传动系统的组成部分包括 ()。

A. 能源装置	B. 执行装置	C. 控制调节装置	D. 工作介质
---------	---------	-----------	---------
2. 液压辅助元件不包括 ()。

A. 蓄能器	B. 过滤器	C. 油箱	D. 电动机
--------	--------	-------	--------
3. 液压传动系统中的动力元件是 ()。

A. 液压泵	B. 液压缸	C. 液压阀	D. 油箱
--------	--------	--------	-------

4. 液压系统中的能量转换元件不包括 ()。

A. 液压泵

B. 液压缸

C. 液压阀

D. 液压马达

指导教师评语:

教师签名: _____

日期: _____

任务二 确定液压千斤顶的输出力



相关知识

一、液体静压力

1. 液体静压力及其特性

作用在液体上的力有质量力和表面力。质量力是作用在液体所有质点上的力,如重力、惯性力等;表面力是作用在液体表面上的力,包括法向力和切向力。

液体静压力是指在液体单位面积上所受到的法向力。如果在液体内某点处微小面积 ΔA 上作用有法向力 ΔF ,则该点处的静压力 p 可表示为 $p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$ 。当在液体的作用面积 A 上受到均匀分布的法向作用力 F 时,则静压力 p 可表示为 $p = \frac{F}{A}$ 。

液体静压力有以下特性:液体静压力方向垂直指向作用面,静止液体内任一点的静压力在各个方向上都相等。

2. 液体静压力的基本方程

在重力作用下,静止液体所受的力除液体重力外还有液面上作用的外加压力,其受力情况如图 1-2 所示。不同深度液体的压力是不相同的。那么,离液面深度为 h 的某点压力 p 是多少?

在静止液体中取一个液柱,设液柱底面积为 ΔA ,高为 h ,则液柱体积为 $h\Delta A$ 。液柱受到的重力为 $G = \rho gh\Delta A$,其方向向下;液柱顶面受到的总压力为 $p_0\Delta A$,

其方向向下;液柱底面受到的总压力为 $p\Delta A$,方向向上;液柱侧面受到的力在垂直方向的分力大小为 0。液柱在以上各力作用下处于平衡状态,因此,在垂直方向上力的平衡关系为

$$\begin{aligned} p\Delta A &= p_0\Delta A + \rho gh\Delta A \\ p &= p_0 + \rho gh \end{aligned} \quad (1-1)$$

式 (1-1) 即为液体静压力的基本方程。由该方程可知:

1) 静止液体内任一点的压力由两部分组成:一部分是液面上的外加压力 p_0 ,另一部分是该点上液体自重所形成的压力 ρgh 。当液面压力为大气压力 p_a 时,液体内任一点处的压力

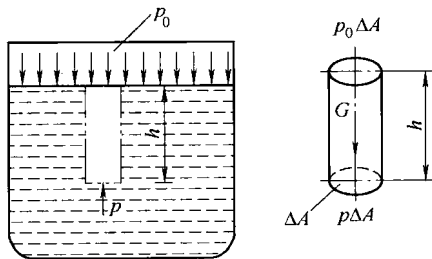


图 1-2 静止液体的受力情况

$$p = p_a + \rho gh。$$

- 2) 静止液体内某点的压力随该点距离液面的深度呈直线规律变化。
- 3) 离液面深度相等处各点的压力均相等, 即等压面是水平面。

二、压力的表示方法

压力的表示方法有绝对压力和相对压力两种。以绝对真空 ($p=0$) 为基准所表示的压力, 称为绝对压力, 用 p_{ab} 表示; 以大气压力作为基准所表示的压力, 称为相对压力, 用 p_{re} 表示。由于压力表在大气压力作用下的读数为 0, 所以压力表所测得的压力是相对压力 (习惯称表压力)。在本课程中所提到的压力, 如不特别说明, 均指相对压力。

绝对压力与相对压力的关系是

$$p_{ab} = p_a + p_{re} \quad \text{或} \quad p_{re} = p_{ab} - p_a \quad (1-2)$$

当绝对压力小于大气压力时, 相对压力为负值, 称为负压。把绝对压力小于大气压的那部分数值即相对压力的绝对值称为真空度, 用 p_v 表示, 即

$$p_v = -p_{re} = p_a - p_{ab}$$

绝对压力、相对压力和真空度的关系如图 1-3 所示。由图可知, 以大气压力为基准计算压力时, 基准以上为正值是相对压力, 基准以下为负值, 其绝对值就是真空度。

压力的国际单位是 Pa (帕, N/m^2) 或 MPa ($1MPa = 10^6 Pa$)。除此以外, 还有工程大气压 at (kgf/cm^2)、米水柱 (mH_2O)、毫米汞柱 ($mmHg$) 等单位, 但我国规定这些单位为非法定单位, 一般不允许采用。它们的换算关系是

$$\begin{aligned} 1at &= 1kgf/cm^2 = 10mH_2O = 9.81 \times 10^4 Pa \\ &= 0.0981MPa = 736 mmHg \end{aligned}$$

三、压力的传递

由静压力的基本方程可知, 静止液体中任意一点处的压力都包含了液面上的压力 p_0 。在液压传动中, 由于负载产生的外加压力 p_0 远远大于液体自重所形成的压力 ρgh , 因此可忽略 ρgh , 即认为液压传动中液体内部压力处处相等, $p = p_0$ 。若负载越大, 即 p_0 越大, 则液压系统中液体压力 p 也就越大, 反之亦然。由此也说明液压系统的工作压力取决于负载, 并随着负载的变化而变化。

在密闭容器中, 当外加压力发生变化时, 只要液体保持原来的静止状态, 则液体任一点的压力都将发生同样大小的变化。也就是说, 在密闭容器内, 施加于静止液体上的外加压力将以等值传递到液体所有各点。这就是静压传递原理, 也称帕斯卡原理。

在图 1-1 中, 假设小活塞面积为 A_1 , 其上作用的力是 F_1 , 则液体所受压力为 $p_1 = F_1/A_1$, 大活塞面积为 A_2 , 其上作用的力是 G , 则液体所受压力为 $p_2 = G/A_2$ 。由帕斯卡原理可知, $p_1 = p_2$, 则由 $F_1/A_1 = G/A_2$ 可得 F_1 与 G 的关系是

$$\frac{F_1}{G} = \frac{A_1}{A_2} \quad \text{或} \quad \frac{G}{F_1} = \frac{A_2}{A_1}$$

由于 $A_2 > A_1$, 故 $G > F_1$ 。也就是说, 在小活塞上施加较小的力 F_1 , 即可在大活塞上获得较大的输出力, 从而能够举升重物 G 。

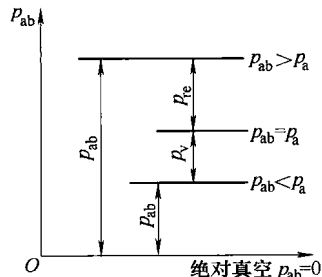


图 1-3 绝对压力、相对压力和真空度

四、液体对固体壁面的作用力

静止液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静压力的总和就是液体在该方向上对固体壁面的作用力。

当固体壁面为一平面时，如不计重力作用，则平面上各点的静压力大小相等。液体对平面壁的作用力 F 等于静压力 p 与作用面积 A 的乘积，即 $F = pA$ ，其方向垂直于平面壁。

当固体壁面为一曲面时，液体对曲面在某 x 方向上的作用力 F_x 等于液体压力 p 与该曲面在该 x 方向上的投影面积 A_x 的乘积，即 $F_x = pA_x$ 。

如图 1-4 所示，假设与锥阀接触的液体压力为 p ，锥面与阀口接触处的直径为 d ，则液体在轴线方向对锥面的作用力 F_y 就等于液体压力 p 与受压锥面在轴线方向的投影面积 $\frac{\pi}{4}d^2$ 的乘积，即 $F_y = \frac{\pi}{4}d^2p$ 。

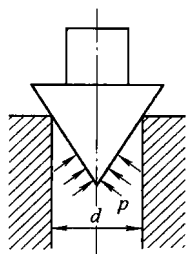


图 1-4 液体对锥面的作用

五、液体流动的基本概念

1. 理想液体

既无粘性又不可压缩的假想液体称为理想液体。而把事实上的既有粘性又具有压缩性的液体称为实际液体。理想液体的引入是为了研究问题方便而进行抽象化的假设。

2. 稳定流动

如果液体中任一点的压力、速度和密度都不随时间变化，则称这种流动为稳定流动（也称为定常流动或恒定流动）。反之，则为非稳定流动。

3. 通流截面

液体在管道中流动时，与液体的流速方向相垂直的面即为通流截面。

4. 流量

单位时间内流过某一通流截面的液体的体积称为流量。流量的单位是 m^3/s 或 L/min 。在液压传动中常用 L/min ，在气压传动中常用 m^3/s 。

5. 平均流速

平均流速是通过整个通流截面的流量 q 与通流截面面积 A 的比值，见式 (1-3)。平均流速在工程中有实际应用价值。

$$v = \frac{q}{A} \quad (1-3)$$

六、连续性方程

流量连续性方程是质量守恒定律在流体力学中的一种表现形式。如图 1-5 所示，液体在任意形状的管道中作稳定流动，任取 1、2 两个不同的通流截面。根据质量守恒定律，单位时间内流过这两个截面的液体质量是相等的，即

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad (1-4)$$

若忽略液体的可压缩性，即 $\rho_1 = \rho_2$ ，则

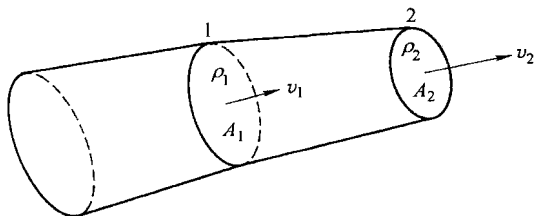


图 1-5 连续性方程示意图

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = q = C$$

由于流管两端的通流截面是任意选取的, 因此有

$$q = Av = C \quad (1-5)$$

这就是理想液体的连续性方程式, 它说明液体流过各通流截面的体积流量是相等的。这个方程式表明, 不管平均流速和通流截面沿着流程怎样变化, 液体流过不同通流截面的流量是不变化的。在液压传动中管道的横截面即为通流截面, 应用连续性方程可以很方便地求得管道内的流速或通过各通流截面的流量, 同时可得到不同管径与其流速之间的关系。

七、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现形式。这里首先讨论理想液体的伯努利方程, 然后对它进行修正, 最后得到实际液体的伯努利方程。

1. 理想液体的伯努利方程

理想液体在稳定流动的状态下, 根据能量守恒定律, 单位质量的液体流过 1 截面的总能量和到达 2 截面的总能量相等, 即

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + z_1 g = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + z_2 g \quad (1-6)$$

该公式还可以转化为单位体积液体的能量方程

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g z_2 \quad (1-7)$$

由于流管两端的通流截面是任意选取的, 还可以写成

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z = c \quad (1-8)$$

伯努利方程的物理意义是: 在管道中作稳定流动的理想液体所具有的压力能、动能、势能三种形式的能量, 在任意一个通流截面上可以相互的转化, 但总的能量保持不变。

伯努利方程还可以写成另一种形式:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (1-9)$$

式 (1-9) 中各项分别为压力能头、动能头、势能头, 它们的单位都为 m。

伯努利方程的几何意义是: 在管道中作稳定流动的理想液体所具有的压力能头、动能头、势能头在任意一个通流截面上可以相互转化, 但总的能量头保持不变, 如图 1-6 所示。

2. 实际液体的伯努利方程

由于实际的液体是有粘性和可压缩的, 因此单位体积液体从 1 截面流到 2 截面的总能量是不相等的, 在流动过程中, 会有能量的损失的。因此实际液体的伯努利方程的形式为

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g z_2 + \Delta p \quad (1-10)$$

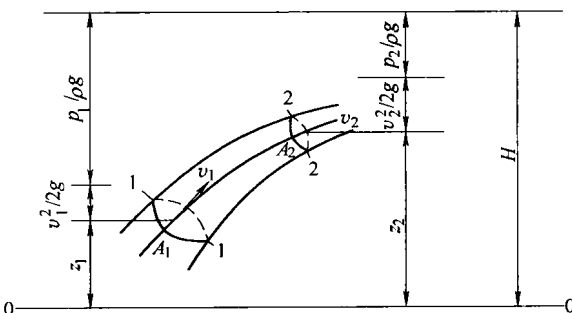


图 1-6 伯努利方程示意图

式中 Δp ——液体从 1 截面到 2 截面的总压力损失。

3. 液压系统中的伯努利方程

液压系统是依靠压力能来进行能量传递的。系统中的压力能比动能、势能大得多，在研究液压系统时，为了方便，可以将动能、势能忽略不计，因此对实际流体的伯努利方程进行修改，就可得到液压系统的伯努利方程为

$$p_1 = p_2 + \Delta p \quad (1-11)$$

式中 p_1 ——1 截面的压力；

p_2 ——2 截面的压力；

Δp ——液体从 1 截面流到 2 截面总的压力损失。

式 (1-11) 在分析液压系统和确定液压泵的工作压力时非常有用。

八、液流的压力损失

实际液体在流动过程中会发生能量损失。液体在液压管路中的能量损失表现为压力损失，其损失不仅与流程的长度、流道的局部特性有关，还与液体的流动状态有关。

1. 液体的流态

19 世纪末，法国科学家雷诺通过观察水在圆管中的流动情况，发现液体有两种流动状态：层流和湍流。层流时，液体质点间互不干扰，液体的流动呈线性或层状；湍流时，液体质点间相互干扰，液体质点运动杂乱无章。当液体流速较低，粘性力起主导作用时流动呈层流状态；当液体流速较高，惯性力起主导作用时流动呈湍流状态。

液体在流动中的流态可以用雷诺数 Re 来判别。

$$Re = vd/\nu \quad (1-12)$$

式中 v ——平均流速；

d ——管径；

ν ——运动粘度。

雷诺数是一个无量纲数。液体的流态从湍流转为层流时的雷诺数称为临界雷诺数，用 Re_c 表示。常见液流管道的临界雷诺数见表 1-1。当 $Re < Re_c$ 时，流态为层流；当 $Re > Re_c$ 时，流态为湍流。

表 1-1 常见液流管道的临界雷诺数

管道形状	临界雷诺数 Re_c	管道形状	临界雷诺数 Re_c
光滑的金属圆管	2000 ~ 2300	带环槽的同心环状缝隙	700
橡胶软管	1600 ~ 2000	带环槽的偏心环状缝隙	400
光滑的同心环状缝隙	1100	圆柱形滑阀阀口	260
光滑的偏心环状缝隙	1000	锥阀阀口	20 ~ 100

2. 沿程压力损失

液体在等径直管中流动时，由于液体的内摩擦力的作用即粘性的作用而产生的压力损失称为沿程压力损失。沿程压力损失用 Δp_f 表示，其计算式为

$$\Delta p_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1-13)$$

式中 λ ——沿程阻力系数（与流态有关）；

l ——等径直管长度 (m);

d ——管道内径 (m);

ρ ——液体密度 (kg/m^3);

v ——液流平均流速 (m/s)。

对圆管层流而言, 金属管 $\lambda = 75/Re$, 橡胶管 $\lambda = 80/Re$ 。

对圆管湍流而言, $\lambda = f(Re, \Delta/d)$, 其中 Δ 为管壁的绝对粗糙度, Δ/d 为相对粗糙度。对于光滑管, 当 $2.3 \times 10^3 < Re < 1.0 \times 10^5$ 时, $\lambda = 0.3164Re^{-0.25}$; 对于粗糙管, λ 值可以根据不同的 Re 和 Δ/d 从相关设计手册中查到。

从式 (1-13) 可以看出, 沿程压力损失主要与液体的流速、粘性和管路的长度、管径以及管道内壁的粗糙度有关, 即流速越大, 液体的粘度越大, 管径越小, 油管的长度越长, 管道的粗糙度越大等, 沿程压力损失也越大。

3. 局部压力损失

液体流经管道的弯头、接头、突变截面、阀口和滤网等局部装置时, 由于液体流动速度的大小和方向的改变而产生的压力损失称为局部压力损失。局部压力损失用 Δp_r 表示, 其计算式为

$$\Delta p_r = \zeta \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1-14)$$

式中 ζ ——局部阻力系数, ζ 值可从相关设计手册中查到。

在管路系统的压力损失中, 液体的流速对其影响最大, 流速越高, 压力损失越大。但流速太低, 会增加管路和阀类元件的尺寸。合理选择液体在管路中的流速, 是液压系统设计中的一个重要问题。此外, 在选择安装液压系统管道时, 应尽量减少直角弯等流速急剧变化的部位, 从而减少局部压力损失。

九、液压冲击与气穴现象

1. 液压冲击

在液压系统中, 由于某些原因造成液体压力在瞬间突然升高, 产生很高的压力峰值, 这种现象称为液压冲击。当油液迅速换向或突然关闭油路, 运动部件突然制动或换向等都会导致液压冲击的产生。液压冲击会引起振动和噪声, 破坏密封装置、管道和液压元件, 有时还会使某些液压元件 (如压力继电器、顺序阀等) 产生误动作, 影响系统正常工作。

2. 气穴现象

在液压系统中, 由于压力降低导致油液中产生大量气泡, 使油液成为不连续状态的现象, 称为气穴现象。气泡来源有两个方面, 其一是油液中某处压力低于当时温度下的空气分离压时, 原来溶于油液中的空气分离出来, 形成气泡; 其二是油液中某处压力降低至该温度下的汽化压力 (饱和蒸气压) 时迅速汽化, 形成气泡。气穴多发生在阀口和液压泵的吸油口处。由于阀口通道狭窄, 液流速度增大, 压力很低, 容易产生气穴; 当液压泵的安装位置 (吸油口) 过高、吸油管直径过小时, 吸油阻力太大, 会造成进口处真空度过大而产生气穴。

当液压系统中出现气穴现象时, 大量气泡破坏了液流的连续性, 造成流量和压力的脉动, 气泡随液体进入高压区时会急剧破灭, 引起局部液压冲击, 发出噪声并引起振动。当气泡在金属表面破灭时, 产生的局部高温、高压会使金属产生疲劳, 长时间作用就会造成金属表面的剥蚀, 这种现象称为气蚀。气蚀会加大系统的压力损失和缩短液压元件的使用寿命。