



高职高专“十二五”规划教材

Y

E YA YU QI YA

C

HUAN DONG

液压与气压传动

张勤 徐钢涛 主编



航空工业出版社

高职高专“十二五”规划教材

液压与气压传动

主 编 张 勤 徐钢涛

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书是根据高等职业技术教育要求编写的。全书包括液压传动和气动传动两部分,共分 10 章,第 1~9 章为液压传动,第 10 章为气压传动技术。本书主要论述了液压传动的基础知识,液压与气动元件的结构原理及应用,液、气压传动的基本回路组成及功能,典型液压传动系统的组成与分析,液压伺服系统和液压传动系统设计的基本方法等内容。每章均有基本要求、重点学习提示小结和思考题与练习题。

本书在编写过程中注重基本概念与原理的讲解,突出实用性,力求章节层次清楚,内容简洁、通俗易懂。在元件的表达方式上,采用立体图等形式,直观形象,便于学习者理解元件的结构原理等。

本书适用于高职高专院校机电类专业教学,也可作为教师或企业生产技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动 / 张勤, 徐钢涛主编. — 北京 :
航空工业出版社, 2012. 7

ISBN 978-7-80243-982-5

I. ①液… II. ①张… ②徐… III. ①液压传动②气
压传动 IV. ①TH137②TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 106432 号

液压与气压传动 Yeya yu Qiya Chuandong

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010-64815615 010-64978486

北京市科星印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经售

2012 年 7 月第 1 版

2012 年 7 月第 1 次印刷

开本: 787×1092

1/16

印张: 16.5

字数: 412 千字

印数: 1—3000

定价: 35.00 元



本书根据高职高专教育教学改革要求,吸取作者多年的教学经验编写而成,适合作为高职高专院校及成人高等教育机电类专业的教学用书,也可作为有关专业和生产企业技术人员的参考用书。

在本书编写过程中,以机电类相关岗位技术能力要求为出发点,以液压传动为主线,力求理论联系实际,着重论述液压与气动技术课程的基本概念、基础知识、基本原理,突出理论知识的应用。本书章节层次清楚、内容简洁、通俗易懂、实用性强。在较全面阐述液压传动与气压传动基本内容的基础上,着重分析了各类元件的工作原理、结构特点及应用。在图形处理上,将元件的结构图以立体图的形式呈现,直观形象,易于学习者理解元件的结构原理,增强学习兴趣。

同时为了便于教学,作者提供了本书的习题答案相关教学资源,这些资源可以到航空工业出版社高等教育研究与出版中心网址(www.bjjqe.com)下载。

本书共有 10 章,由郑州铁路职业技术学院张勤、徐钢涛担任主编,岳丽敏、陈相志、赵晓担任副主编。参加各章编写的有郑州铁路职业技术学院张勤、徐钢涛、岳丽敏、河南机电职业学院赵晓、螺河职业技术学院陈相志等。全书由张勤统稿和审核,徐钢涛、岳丽敏老师一起参加审核,徐钢涛老师负责全书插图修描和立体图的制作。本书附录中的元件图形符号、回路以及系统原理图,全部按照最新国家标准推荐的图形符号绘制。

在编写本书过程中,得到了许多同志的帮助,在此表示感谢。限于编者水平和经验,书中难免存在不妥之处,肯请读者给予指正。

编 者
2012 年 6 月

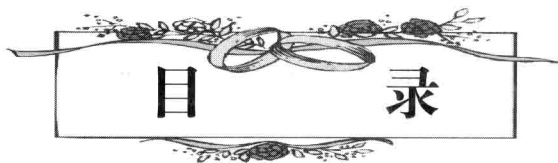
主要参数的符号与字母

1. 主要物理量符号

A -面积	t -时间
$B(b)$ -宽度	μ -流速
C_q -流量系数	V -体积; 排量
$D(d)$ -直径	v -平均流速
E_r 恩氏黏度	x -湿周
e -偏心距	Z -齿数; 叶片(柱塞)数
F -作用力	W -重力
f -摩擦系数	α -动能修正系数
g -重力加速度	β -动量修正系数
h -深度	Δ -粗糙度
h_w 单位体积的能量损失	δ -厚度; 节流缝隙
K -液体体积模量; 系数	ε -相对偏心率
$L(l)$ -长度	ξ -局部阻力系数
m -质量; 齿轮模数; 指数	η -效率
n -指数; 转速	μ -动力黏度
N -功率	θ -角度
p -压力	k -压缩率
q -流量(体积流量)	λ -沿程阻力系数
R -半径; 水力半径	ν -运动粘度
Re -雷诺数	ρ -密度
r -半径	τ -切应力
T -转矩	ω -角加速度

2. 主要下标符号

O-液面	S-弹簧
a-大气	t-理论
L-管路; 负载	V-容积
M-液压马达 或图中表示电机时用 M	n-公称
m-机械	p 泵
y 液压	



第1章 液压传动基础知识	1
1.1 液压传动的工作原理及系统组成	1
1.1.1 液压传动的工作原理	2
1.1.2 液压传动的实例	3
1.1.3 液压传动系统的组成	4
1.2 液压传动的优缺点及应用	4
1.2.1 液压传动的基本特点	4
1.2.2 液压传动的应用	5
1.3 液压油	5
1.3.1 液压油的物理性质	5
1.3.2 对液压油的要求及选用	8
1.3.3 液压油的污染、控制	9
1.4 液体静力学基础	10
1.4.1 液体静压力及其特性	10
1.4.2 液体静力学基本方程	10
1.4.3 压力的表示方法及单位	11
1.4.4 静止液体内部压力的传递	11
1.4.5 液体对固体壁面的作用力	12
1.5 液体动力学基础	13
1.5.1 基本概念	13
1.5.2 液体的流动状态	14
1.5.3 流动液体的连续性方程	16
1.5.4 伯努利方程	17
1.5.5 动量方程	19
1.6 液体流动时的压力损失	19
1.6.1 压力损失	19
1.6.2 管路系统的总压力损失	21
1.6.3 液压冲击	21
1.6.4 空穴现象	21
1.7 液体流经小孔及缝隙流量	22
1.7.1 液体流经小孔的流量	22
1.7.2 液体流经间隙的流量	24
本章小结	26



思考题与练习题	27
第2章 液压泵与液压马达	29
2.1 液压泵和液压马达的工作原理及参数	29
2.1.1 液压泵和液压马达的工作原理	29
2.1.2 液压泵和液压马达的压力和流量	30
2.1.3 液压泵的功率和效率	31
2.1.4 液压马达的功率和效率	32
2.1.5 液压泵和液压马达的图形符号	33
2.2 齿轮泵	33
2.2.1 渐开线齿轮传动的啮合过程	33
2.2.2 外啮合齿轮泵的工作原理	34
2.2.3 外啮合齿轮泵的排量和流量	35
2.2.4 齿轮泵的结构特性分析	37
2.2.5 内啮合齿轮泵	40
2.3 叶片泵	40
2.3.1 双作用叶片泵	41
2.3.2 单作用叶片泵	46
2.4 柱塞泵	48
2.4.1 斜盘式轴向柱塞泵	49
2.4.2 径向柱塞泵	52
2.5 液压马达	53
2.5.1 叶片式液压马达	53
2.5.2 轴向柱塞式液压马达	54
2.5.3 径向柱塞式液压马达	54
本章小结	56
思考题与练习题	57
第3章 液压缸	59
3.1 液压缸的类型和特点	59
3.1.1 活塞式液压缸	59
3.1.2 柱塞缸	63
3.1.3 摆动缸	64
3.1.4 组合式液压缸	64
3.2 液压缸的结构	65
3.2.1 液压缸的密封	65
3.2.2 液压缸的缓冲	67
3.2.3 排气装置	69
本章小结	71
思考题与练习题	71



第4章 液压控制阀	73
4.1 液压控制阀概述	73
4.1.1 液压控制阀的分类	73
4.1.2 对液压控制阀的基本要求	73
4.1.3 液压控制阀的结构原理与共性	74
4.2 方向控制阀	74
4.2.1 单向阀	74
4.2.2 换向阀	76
4.3 压力控制阀	86
4.3.1 溢流阀	86
4.3.2 减压阀	92
4.3.3 顺序阀	94
4.3.4 压力继电器	96
4.4 流量控制阀	98
4.4.1 节流阀的流量特性及节流口形式	98
4.4.2 节流阀的结构原理	99
4.4.3 调速阀	99
4.4.4 溢流节流阀(旁通型调速阀)	101
4.4.5 分流集流阀	102
4.5 其他液压控制阀	103
4.5.1 叠加式液压阀	103
4.5.2 插装式锥阀	104
4.5.3 电液比例控制阀	109
4.5.4 电液数字阀	110
本章小结	112
思考题与练习题	113
第5章 液压辅助装置	117
5.1 油管和管接头	117
5.1.1 油管	117
5.1.2 管接头	119
5.2 过滤器	121
5.2.1 过滤器的过滤精度	122
5.2.2 过滤器的类型及特点	122
5.2.3 过滤器的选择及使用注意事项	124
5.2.4 过滤器在系统中的安装与应用	125
5.3 油箱和热交换器	126
5.3.1 油箱	126
5.3.2 热交换器	127
5.4 蓄能器	129



5.4.1 蓄能器的类型、特点和用途	129
5.4.2 蓄能器在液压系统中的应用	131
5.4.3 蓄能器的安装与使用注意事项	131
5.5 压力表与压力表开关	132
5.5.1 压力表	132
5.5.2 压力表开关	132
本章小结	133
思考题与练习题	134
第6章 液压基本回路	135
6.1 速度控制回路	135
6.1.1 调速回路	135
6.1.2 快速运动回路	145
6.1.3 速度换接回路	146
6.2 压力控制回路	148
6.2.1 调压回路	148
6.2.2 卸荷回路	149
6.2.3 卸压回路	150
6.2.4 减压回路	151
6.2.5 增压回路	151
6.2.6 保压回路	152
6.2.7 平衡回路	153
6.3 方向控制回路	154
6.3.1 换向回路	154
6.3.2 锁紧回路	154
6.4 多缸工作控制回路	154
6.4.1 顺序动作回路	154
6.4.2 多缸同步动作回路	157
6.4.3 多缸快慢速互不干扰回路	157
6.5 液压马达制动回路	158
6.5.1 液压制动回路	158
6.5.2 机械制动回路	159
本章小结	163
思考题与练习题	164
第7章 典型液压系统	169
7.1 组合机床动力滑台液压系统	169
7.1.1 概述	169
7.1.2 液压系统工作原理	170
7.1.3 动力滑台液压系统的特点	172
7.2 YA32—200 型万能液压机液压系统	173

7.2.1 概述	173
7.2.2 YA32—200 型万能液压机液压系统工作原理	173
7.2.3 液压机液压系统特点	176
7.3 机械手液压系统	177
7.3.1 概述	177
7.3.2 机械手液压系统的工作原理	177
7.3.3 机械手液压系统的特点	182
7.4 Q2—8 型汽车起重机液压系统	182
7.4.1 概述	182
7.4.2 Q2—8 型汽车起重机液压系统工作原理	183
7.4.3 起重机液压系统的主要特点	185
本章小结	186
思考题与练习题	186
第 8 章 液压伺服系统	188
8.1 液压伺服系统概述	188
8.1.1 液压伺服系统的工作原理	188
8.1.2 液压伺服系统的基本特点	189
8.1.3 液压伺服系统的组成	189
8.2 液压伺服系统应用实例	190
8.2.1 汽车转向液压助力器	190
8.2.2 电液伺服系统	191
本章小结	193
思考题与练习题	193
第 9 章 液压系统设计计算	194
9.1 液压系统的设计	194
9.1.1 明确设计要求	194
9.1.2 工况分析	195
9.1.3 确定执行元件的主要参数	196
9.1.4 拟定液压系统原理图	198
9.1.5 选择液压元件	199
9.1.6 液压系统性能验算	199
9.1.7 绘制正式工作图和编制技术文件	200
9.2 液压系统设计计算实例	201
9.2.1 明确液压系统的设计要求	201
9.2.2 进行工况分析, 选择执行元件	201
9.2.3 确定系统的主要参数	202
9.2.4 拟定液压系统图	204
9.2.5 液压元件的计算和选择	206
本章小结	208



思考题与练习题	208
第 10 章 气压传动	210
10.1 气压传动概述	210
10.1.1 气压传动系统的工作原理及组成	210
10.1.2 气压传动的优缺点	212
10.2 气源装置及气动辅助元件	212
10.2.1 气源装置	212
10.2.2 气动辅助元件	218
10.3 气动执行元件	221
10.3.1 气缸	221
10.3.2 气动马达	223
10.4 气动控制元件	224
10.4.1 压力控制阀	225
10.4.2 流量控制阀	227
10.4.3 方向控制阀	229
10.5 气动逻辑元件	233
10.5.1 气动逻辑元件的分类	233
10.5.2 高压截止式逻辑元件	233
10.6 气动基本回路	236
10.6.1 压力回路	236
10.6.2 换向回路	237
10.6.3 速度回路	238
10.6.4 其他常用回路	240
10.7 典型气动系统实例	243
10.7.1 气动夹紧系统	243
10.7.2 气动机械手气压传动系统	244
本章小结	246
思考题与练习题	247
附录 常用液压与气动元件图形符号	248
参考文献	254

第 1 章 液压传动基础知识

【本章导读】

液压传动是以液压油为工作介质来实现各种机械传动与控制的。它利用各种元件组成基本控制回路,再由若干基本回路有机组合成能完成一定控制功能要求的传动系统,来进行能量的传递、转换和控制,以满足机电设备对各种运动和动力的需求。因此,了解液压传动的基本组成、液体的基本性质,掌握液体平衡和运动的主要力学规律,对于正确理解液压传动原理以及合理设计和使用液压系统都是非常必要的。

1.1 液压传动的工作原理及系统组成

一台完整的机械设备由原动机、传动与控制装置、工作机构三大部分组成。原动机是机械的动力源,主要为电动机或内燃机等;工作机构即指完成该机械工作任务是直接工作部分。由于原动机的功率和转速变化范围有限,为适应工作机构的负荷和工作速度的变化即工作性能的要求,在原动机和工作机构之间设置起着传递能量和控制作用的传动机构。

传动机构有机械传动、电传动和流体传动等多种形式。机械传动是通过齿轮齿条、蜗轮蜗杆、带、链轮等机件直接将动力传递到工作机构的传递形式。电传动是利用电气设备,通过调节电流、电压等参数来传递或控制动力的控制方式。流体传动是以有压流体(液压油)为传动介质来实现能量传递和控制的一种传动形式,它可分为液压传动和液力传动两种形式,液压传动主要是以液体压力能来传递动力,液力传动主要是以液体动能来传递动力,如图 1-1 所示。

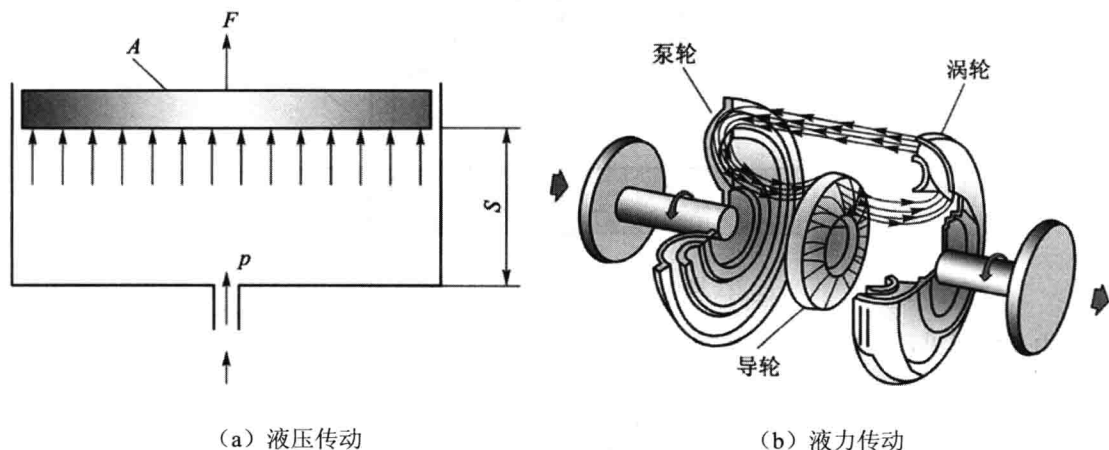


图 1-1 液体传动

液压传动技术是自动控制领域的一门重要学科。近年来，随着机电一体化技术的发展，液压传动技术向更广阔的领域深入，已经成为包括传动、控制、检测在内的一门完整的自动控制技术。它是实现工业自动化的一种重要手段，具有广阔的发展前景。

1.1.1 液压传动的工作原理

首先我们以液压千斤顶为例来了解液压传动的工作原理。

图 1-2 所示为液压千斤顶工作原理示意图。杠杆手柄、小缸体、小活塞、两个单向阀组成手动液压泵，大缸体和大活塞组成举升缸。当抬起手柄使小活塞向上移动时，小缸体下腔容积变大，产生一定的真空度，在大气压力作用下，油箱中的油液通过吸油管推开单向阀 1 进入小缸体下腔，而此时单向阀 2 也在真空度作用下处于关闭状态，完成手动液压泵吸油。当压下手柄时，小活塞下移，其下腔的密封容积变小，油压升高，使单向阀 1 关闭，单向阀 2 打开，小缸体下腔的油液经油管进入大缸体的下腔，迫使大活塞向上移动，抬高重物，即完成压油动作。如此反复地提、压手柄，就能不断地把油液压入大缸体的下腔，使重物逐渐升起，达到起升的目的。当工作完成，打开截止阀，大缸体下腔的油液经过油管、截止阀流回油箱，大活塞也在重物和自重作用下回落，到达起始位置。在这里，大、小缸体组成了最简单的液压传动系统，实现了运动和动力的传递。

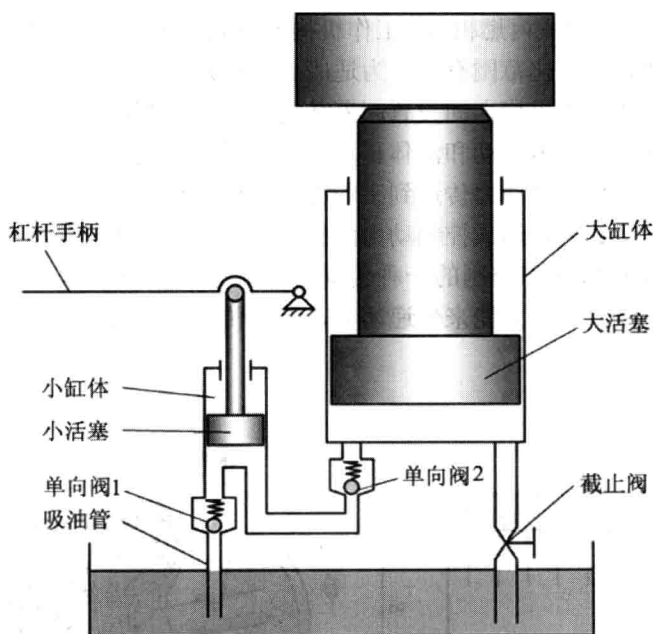


图 1-2 液压千斤顶工作原理

由上例可见，液压传动具有以下基本特点：

- ① 以液体为传动介质来传递运动和动力；
- ② 液压传动必须在密闭的容器内进行；
- ③ 依靠密闭容器的容积变化传递运动；

④ 依靠液体的静压力传递动力。

1.1.2 液压传动的实例

如图 1-3a 所示为机床工作台液压系统结构原理。它由油箱、过滤器、换向阀、溢流阀、节流阀、液压缸和液压泵及油管等组成。

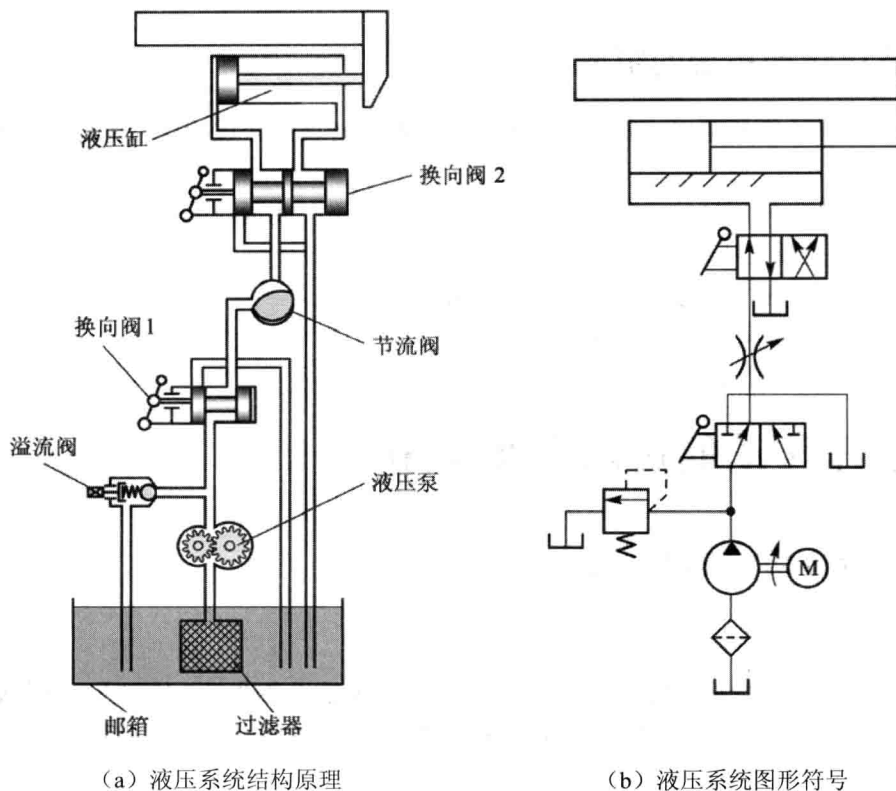


图 1-3 机床工作台液压系统结构原理图

该系统的工作原理是：液压泵由电动机带动旋转后，从油箱经过滤器吸油，由泵输出压力油→换向阀 1→节流阀→换向阀 2→液压缸左腔，推动活塞并带动工作台向右移动；此时，液压缸右腔的油液→换向阀 2→回油管→油箱。如果将上部换向阀 2 的手柄转换到右位，则经节流阀的压力油→换向阀 2→液压缸右腔，推动活塞并带动工作台向左移动；此时，液压缸左腔的油液→换向阀 2→回油管→油箱。工作台的运动速度由节流阀调节，并与溢流阀配合实现。改变节流阀的开口大小，可以改变进入液压缸的流量由此可控制液压缸活塞的运动速度，并使液压泵输出的多余流量经溢流阀流回油箱。节流阀的主要功用是控制进入液压缸的流量，进而控制液压缸活塞的运动速度。

工作台运动时还要克服所受到的各种阻力，如摩擦阻力、切削阻力等，这些阻力由液压泵输出油液的压力来克服。根据工作时阻力的不同，要求液压泵输出的油液压力能够进行调节，这个功能是由溢流阀实现的。当油液压力对溢流阀阀芯的作用力略大于溢流阀中弹簧对阀芯的作用力时，阀芯才能移动，使阀口打开，油液经溢流阀流回油箱，泵输出的压力将不



再升高。由此可知, 液压泵出口处的油液压力是由溢流阀决定的, 溢流阀在液压系统中的主要功用是调节和稳定系统的最大工作压力。

图 1-3b 所示为该液压系统的图形符号。结构原理图直观形象, 易于理解, 但图形复杂, 不便于绘制, 一般常用标准的元件图形符号来绘制液压和气压系统图。这些符号只表示元件的职能、控制方式及外部连接口, 不表示元件的具体结构、参数及连接口的实际位置和元件的安装位置。按照规定, 液压与气压元件符号均以元件的非工作位置(静止位置)或零位表示。

1.1.3 液压传动系统的组成

① 动力元件: 液压泵——将原动机输入的机械能转换为介质的压力能, 向系统提供压力介质。

② 执行元件: 液压缸——直线运动, 输出力、位移; 液压马达——回转运动, 输出转矩、转速; 是将介质的压力能转换成机械能的装置。

③ 控制元件: 压力、方向、流量控制的元件。

④ 辅助元件: 油箱、管路、压力表等。

⑤ 工作介质: 液压油。

1.2 液压传动的优缺点及应用

1.2.1 液压传动的基本特点

1. 液压传动的优点

① 单位功率的重量轻(比功率大), 即在相同功率输出条件下, 体积小、重量轻、惯性小、结构紧凑、动态特性好。如轴向柱塞泵的重量只是同功率直流发电机重量的 10%~20%, 前者的外形尺寸只有后者的 12%~13%。

② 可在较大范围内实现无级调速, 调速范围大。

③ 工作平稳、反应快、冲击小, 能快速起动、制动和频繁换向。

④ 容易获得很大的力和转矩, 可以使传动结构简单。

⑤ 操作控制方便, 调节简单, 易于实现自动化。当机、电、液配合使用时, 易于实现较复杂的自动工作循环和较远距离操控。

⑥ 易于实现过载保护, 安全性好。采用矿物油为工作介质, 相对运动表面间能自行润滑, 可以延长元件的使用寿命。

⑦ 液压元件已实现了标准化、系列化和通用化, 便于液压系统的设计、制造和使用, 且液压元件的排列布置具有较大的灵活性。

2. 液压传动的缺点

① 液压系统中存在着油液泄漏, 油液的可压缩性、油管的变形等都会影响运动传递的准确性, 故不宜用于对传动比要求精确的场合。

② 由于液压油对温度比较敏感, 油温变化, 容易引起工作性能的改变, 故液压传动系



统不宜用于温度变化范围较大的场合。此外，油液对污染较为敏感，故不宜用于环境差、粉尘多的场合。

③ 由于工作过程中有较多的能量损失，如摩擦损失、泄漏损失等，故此，液压传动的效率不高，不宜用于远距离传动。

④ 为减少泄漏，液压元件的制造精度高要求较高，其制造成本较大。液压系统的故障较难诊断排除。

1.2.2 液压传动的应用

液压传动因具有结构简单、体积小、重量轻、反应速度快、输出力大、可方便地实现无级调速、易实现频繁换向、易实现自动化等优点，所以在机床、工程机械、矿山机械、压力机械和航空工业等领域得到广泛应用。如图 1-4 所示为液压传动在汽车刹车系统中的应用。

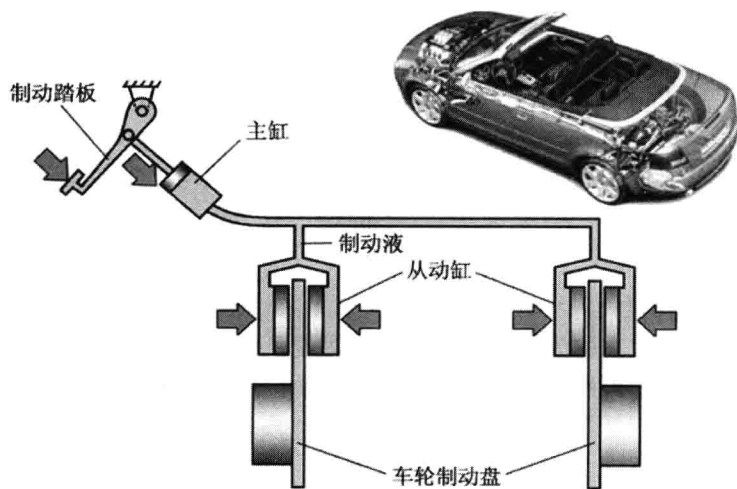


图 1-4 汽车制动系统示意图

1.3 液压油

液压油不仅是液压系统传递能量的工作介质，而且还对液压传动装置中的机构和零件起润滑、冷却和防锈等作用。液压油质量的优劣直接影响液压系统的工作性能，合理选用液压油是十分必要的。

1.3.1 液压油的物理性质

1. 液体的密度

单位体积的液体质量称为密度，通常用 ρ （单位 kg/m^3 ）表示：

$$\rho = m/V \quad (1-1)$$

式中 m ——液体质量（kg）；

V ——液体体积（ m^3 ）。



液压油的密度随压力的增加而加大, 随温度的升高而减小, 一般情况下, 由压力和温度引起的这种变化都较小, 可以忽略不计。一般液压油的密度为 900 (单位 kg/m^3)。

2. 液体的黏性

液体在外力作用下流动或有流动趋势时, 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, 这一特性称作液体的黏性。黏性是液体重要的物理特性, 也是选择液压油的主要依据。

黏性使流动液体内部各液层间的速度不等。如图 1-5 所示, 两平行平板间充满液体, 下平板不动, 而上平板以速度 u_0 向右平动。由于黏性, 紧贴于下平板的液体层速度为零, 紧贴于上平板的液体层速度为 u_0 , 而中间各液体层的速度按线性分布。因此, 不同速度层相互制约而产生内摩擦力, 该力对上层液体起阻滞作用, 而对下层液体起拖曳作用。

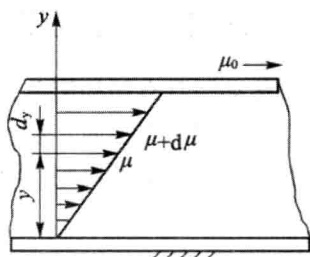


图 1-5 液体黏性示意图

实验测定结果表明, 液体流动时相邻液层间的内摩擦力 F 与液层间的接触面积 A 和液层间的相对运动速度 du 成正比, 而与液层间的距离 dy 成反比, 即

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

式中 du/dy ——速度梯度;

μ ——比例常数, 称为黏性系数或动力黏度。

如以 τ 表示液体的内摩擦切应力, 即液层间单位面积上的内摩擦力, 则有

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 表达的是牛顿的液体内摩擦定律。在液体静止时, 由于 $du/dy=0$, 液体内摩擦力 F 为零, 因此, 静止的液体不呈现黏性。

液体黏性的大小用黏度来表示。常用的液体黏度表示方法有三种, 即动力黏度、运动黏度和相对黏度。

(1) 动力黏度 μ

动力黏度可由式 (1-3) 导出, 即

$$\mu = \tau \frac{dy}{du} \quad (1-4)$$

由此可知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 μ 又称绝对黏度。动力黏度的法定计量单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ($1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 1 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)。

(2) 运动黏度 ν

液体的动力黏度 μ 与液体密度 ρ 的比值称做液体的运动黏度 ν , 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$