



国家卓越工程师教育培养计划——装甲车辆工程专业系列教材

Fundamentals of
Fluid Power
Transmission

流体传动 基础

荆崇波 魏 巍 周俊杰 编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

流体传动基础

荆崇波 魏 巍 周俊杰 编著

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

流体传动基础 / 荆崇波, 魏巍, 周俊杰编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2021. 4

ISBN 978 - 7 - 5682 - 8683 - 1

I. ①流… II. ①荆… ②魏… ③周… III. ①液压传动 - 控制系统 - 高等学校 - 教材 IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 123862 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 23.75

字 数 / 558 千字

版 次 / 2021 年 4 月第 1 版 2021 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 98.00 元

责任编辑 / 孙 澍

文案编辑 / 孙 澍

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

一部完整的机器通常由原动机、传动装置、工作机三部分组成。原动机包括电动机、内燃机、蒸汽机等，其作用是把其他形式的能量转换为机械能。工作机的功能是利用输入的机械能对外做功，完成工作任务。由于原动机输出的转矩和转速变化范围有限，而工作机所受负载和所需速度变化范围较宽，为了满足工作机的要求，在原动机和工作机之间设置了传动装置，起传递动力和控制调节的作用。

传动装置通常分为机械传动、电传动和流体传动等形式。流体传动是以流体为工作介质进行能量转换、传递和控制的传动形式，包括液压传动、气压传动和液力传动。

液压传动是以液体作为工作介质，利用液体的压力进行能量的转换和传递；气压传动简称气动，是指以压缩空气为工作介质来传递动力和控制信号，控制和驱动各种机械及设备，以实现生产过程机械化、自动化的一门技术；液力传动是利用液体的动能进行能量的转换和传递的技术。

液压、气压与液力传动被广泛应用于工程机械、交通运输、矿山机械、石油化工、冶金等各个领域，成为机械行业中发展速度较快的技术之一，在实现生产过程自动化、提高劳动生产率、改善劳动条件以及减轻劳动强度等方面具有重要作用。

液压、气压与液力传动是高等院校装甲车辆工程专业、车辆工程专业、工程机械专业、矿业机械专业、机械设计与制造以及相关专业的—门技术基础课。对于机械工程技术—人员来说，掌握液压、气压与液力传动的基本知识也是十分必要的。

作者在总结多年液压、气压与液力传动方面的教学经验和科研成果的基础上，编写了本书，希望对教学、科研和生产有所帮助。

本书主要介绍了液压、气压与液力传动的基本概念，各种液压元件的结构、工作原理和选用，常用液压回路和液压系统设计计算，各种气动元件的结构及工作原理，液力耦合器、液力减速器和液力变矩器的结构及工作原理，并介绍了流体传动技术在车辆领域的应用实例。其中，第1、2、3、6、7、8章由荆崇波编写，第4、5、9、10、11章由周俊杰编写，第12~16章由魏巍编写，全书由荆崇波统稿。

由于水平有限，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2021年4月1日

第一篇 液 压 传 动

第 1 章 液压传动基础知识	3
1.1 液压传动的工作原理及工作特性	3
1.1.1 液压传动的工作原理	3
1.1.2 液压传动的工作参数	5
1.1.3 液压传动的工作特性	5
1.1.4 液压传动与电传动及机械传动的比较	6
1.2 液压传动系统的基本组成及图形符号	6
1.2.1 液压传动系统的基本组成	6
1.2.2 液压传动系统的图形符号	8
1.3 液压传动的优缺点	8
1.4 液压传动的发展历史及其在各领域的应用	9
1.5 液压传动的工作介质	10
1.5.1 工作介质的种类	11
1.5.2 液压油的物理性质	12
1.5.3 液压油的选用	14
1.6 液压流体力学基础	15
1.6.1 流动液体的连续性方程	16
1.6.2 流动液体的伯努利方程	16
1.6.3 流动液体的动量方程	17
1.6.4 流动液体在孔口或缝隙的流动	18
1.6.5 液体流动的压力损失	18
1.6.6 液压冲击和空穴现象	19
思考与习题	20

第2章 液压动力元件	21
2.1 概述	21
2.1.1 液压泵的工作原理	21
2.1.2 容积式液压泵正常工作的条件	22
2.1.3 液压泵的主要特性参数	22
2.1.4 液压泵的特性曲线	27
2.1.5 液压泵的分类及图形符号	28
2.2 齿轮泵	29
2.2.1 外啮合齿轮泵	29
2.2.2 内啮合齿轮泵	35
2.2.3 齿轮泵的特点及应用	37
2.3 螺杆泵	39
2.4 叶片泵	40
2.4.1 单作用叶片泵	40
2.4.2 双作用叶片泵	44
2.4.3 叶片泵的特点及应用	45
2.5 柱塞泵	48
2.5.1 轴向柱塞泵	48
2.5.2 径向柱塞泵	59
2.6 液压泵的选用	61
2.7 液压泵的安装使用注意事项	64
思考与习题	65
第3章 液压执行元件	66
3.1 液压马达	66
3.1.1 液压马达的分类	66
3.1.2 液压马达的工作原理	66
3.1.3 液压马达的特性参数	67
3.1.4 液压马达的图形符号	69
3.1.5 齿轮马达	69
3.1.6 叶片马达	70
3.1.7 径向柱塞马达	71
3.1.8 液压马达与液压泵的比较	73
3.1.9 马达的选用	74
3.2 液压缸	75
3.2.1 活塞缸	75
3.2.2 柱塞缸	78
3.2.3 组合缸	78

3.2.4 摆动缸	80
3.2.5 液压缸的组成	80
3.2.6 常见液压缸的种类及特点	84
3.2.7 液压缸的设计	85
思考与习题	88
第4章 液压控制元件	90
4.1 液压阀的分类	90
4.2 方向控制阀	91
4.2.1 单向阀	91
4.2.2 换向阀	94
4.3 压力控制阀	103
4.3.1 溢流阀	103
4.3.2 减压阀	110
4.3.3 顺序阀	113
4.3.4 压力继电器	115
4.4 流量控制阀	115
4.4.1 节流阀	115
4.4.2 调速阀	117
4.4.3 溢流节流阀	118
4.4.4 分流集流阀	120
4.5 其他形式的液压阀	121
4.5.1 插装阀	121
4.5.2 叠加阀	124
4.5.3 多路换向阀	124
4.5.4 高速电磁开关阀	128
思考与习题	129
第5章 液压系统辅助元件	130
5.1 液压密封件	130
5.1.1 密封件的分类和要求	130
5.1.2 常用密封件	131
5.2 油液污染控制及过滤器	134
5.2.1 污染物的种类、来源及危害	134
5.2.2 油液污染度等级及其测定	135
5.2.3 过滤器	139
5.3 蓄能器	144
5.3.1 蓄能器的类型、结构及工作原理	144
5.3.2 蓄能器的功用	145

5.3.3 蓄能器的使用与安装	145
5.4 油箱及其附件	146
5.4.1 油箱的功能和结构	146
5.4.2 油箱设计时的注意事项	146
5.5 热交换器	147
5.5.1 冷却器	147
5.5.2 加热器	148
5.6 管件	148
5.6.1 油管	148
5.6.2 管接头	150
5.7 常用测试仪表	151
5.7.1 压力表和压力传感器	151
5.7.2 流量计	152
5.7.3 温度计	154
思考与习题	154
第6章 液压传动基本回路	155
6.1 压力控制回路	155
6.1.1 增压回路	155
6.1.2 卸荷回路	156
6.1.3 保压回路	157
6.1.4 平衡回路	158
6.2 方向控制回路	159
6.2.1 换向回路	159
6.2.2 锁紧回路	160
6.3 速度控制回路	160
6.3.1 调速回路	160
6.3.2 快速运动回路	166
6.3.3 速度换接回路	168
6.4 多执行元件控制回路	169
6.4.1 顺序动作回路	169
6.4.2 同步控制回路	171
思考与习题	173
第7章 车辆液压传动系统	174
7.1 液压传动系统的分类	175
7.1.1 开式系统和闭式系统	175
7.1.2 工业液压系统和移动液压系统	176
7.1.3 单泵系统和多泵系统	176

7.1.4 有级调速系统和无级调速系统	177
7.1.5 串联系统和并联系统	178
7.2 车辆液压驱动系统	179
7.2.1 轮式车辆液压驱动系统	179
7.2.2 履带式车辆液压驱动系统	181
7.3 车辆液压操纵系统	184
7.3.1 车辆液压助力转向系统	184
7.3.2 车辆 AT 变速器液压系统	186
7.3.3 车辆 CVT 变速箱液压操纵系统	189
7.3.4 车辆 AMT 变速箱液压操纵系统	191
7.3.5 车辆液压制动系统	192
7.4 车辆液压辅助系统	196
7.4.1 润滑散热系统	196
7.4.2 车辆液压悬架	197
7.5 车辆液压作业系统	198
7.5.1 汽车式起重机液压系统	198
7.5.2 导弹发射勤务塔架液压系统	201
7.6 液压传动系统设计计算	204
7.6.1 设计要求及工况分析	204
7.6.2 确定系统方案和拟定液压系统原理图	206
7.6.3 液压元件的计算和选择	208
7.6.4 液压系统性能的验算	211
7.6.5 绘制正式工作图和编写技术文件	213
思考与习题	213

第 8 章 液压控制技术简介

8.1 液压控制系统的工作原理及工作特性	215
8.1.1 液压传动系统和液压控制系统的比较	215
8.1.2 液压控制系统的工作原理	216
8.1.3 液压控制系统的分类	218
8.1.4 液压控制系统的组成	218
8.2 机液伺服控制系统	219
8.2.1 滑阀	219
8.2.2 喷嘴挡板阀	221
8.2.3 射流管阀	222
8.2.4 车床仿形刀架机液伺服系统	222
8.3 电液伺服控制系统	223
8.3.1 电液伺服阀	224
8.3.2 机械臂伸缩运动电液伺服系统	225

8.4 电液比例控制系统	226
8.4.1 电液比例阀	226
8.4.2 电液比例调速系统	232
思考与习题	233

第二篇 气压传动

第9章 气压传动概述	237
9.1 气压传动系统组成	237
9.2 气压传动的优、缺点	238
9.3 气动技术的发展和应⽤	239
思考与习题	239
第10章 气动元件	240
10.1 气源装置和辅助元件	240
10.1.1 气源装置	240
10.1.2 气动辅助元件	244
10.2 气动执行元件	246
10.2.1 气缸	246
10.2.2 气动马达	249
10.3 气动控制元件	250
思考与习题	252
第11章 气动回路及系统	253
11.1 气动回路	253
11.1.1 一次压力控制回路	253
11.1.2 快速往复动作回路	254
11.1.3 缓冲回路	254
11.1.4 冲击回路	254
11.1.5 气液转换速度控制回路	254
11.1.6 气液阻尼缸速度控制回路	255
11.2 典型气动系统	256
11.2.1 汽车气压制动防抱死系统	256
11.2.2 汽车主动空气动力悬架系统	258
11.2.3 车辆轮胎中央充放气系统	261
思考与习题	262

第三篇 液 力 传 动

第 12 章 液力传动基础知识	265
12.1 液力传动的定义	265
12.2 液力传动的发展与应用	266
12.2.1 液力传动的起源	266
12.2.2 液力传动的发展与应用	267
12.2.3 液力传动的优缺点	268
12.3 束流设计及假设	269
12.4 液力传动流体力学基础	271
12.4.1 速度三角形	271
12.4.2 动量矩方程	272
12.4.3 能量方程	274
12.5 能量损失与平衡	276
12.5.1 摩擦损失	279
12.5.2 冲击损失	280
12.5.3 能量平衡	281
12.6 相似原理	282
12.7 传动介质	285
思考与习题	286
第 13 章 液力变矩器	287
13.1 工作特性	287
13.1.1 基本结构	287
13.1.2 泵轮的工作特性	289
13.1.3 涡轮的工作特性	292
13.1.4 导轮的工作特性	295
13.1.5 无叶片区的流动特性	296
13.1.6 能头特性	297
13.2 变矩原理与自动适应性	298
13.2.1 变矩原理	298
13.2.2 自动适应性	300
13.3 原始特性及性能评价	302
13.3.1 外特性和通用特性	302
13.3.2 原始特性	303
13.3.3 全外特性	308
13.3.4 动态特性	309
13.3.5 性能及其评价指标	311

13.4 液力变矩器的分类及特性	315
13.4.1 液力变矩器的分类	315
13.4.2 B-T-D型和B-D-T型液力变矩器	315
13.4.3 向心、轴流与离心涡轮式的液力变矩器	317
13.4.4 单级和多级液力变矩器	320
13.4.5 单相和多相液力变矩器	321
13.4.6 闭锁式和非闭锁式液力变矩器	324
13.4.7 可调节的液力变矩器	324
13.4.8 液力变矩器的选型	326
13.5 液力变矩器与发动机共同工作	327
13.5.1 与发动机共同工作的输入特性	327
13.5.2 与发动机共同工作的输出特性	330
13.5.3 液力变矩器与发动机的匹配	331
思考与习题	334
第14章 液力耦合器和液力减速器	337
14.1 液力耦合器的工作原理和结构特点	337
14.1.1 基本结构	337
14.1.2 工作原理	337
14.2 液力耦合器的外特性、通用特性和原始特性	339
14.2.1 液力耦合器的外特性	339
14.2.2 液力耦合器的原始特性	341
14.2.3 液力耦合器的通用特性	342
14.2.4 液力耦合器在部分充液时的工作及特性	342
14.3 液力耦合器与异步电动机的匹配	344
14.4 液力耦合器的分类	345
14.4.1 牵引型耦合器	346
14.4.2 限矩型耦合器	347
14.4.3 调速型耦合器	348
14.5 液力减速器	349
思考与习题	352
第15章 液力元件试验	353
15.1 试验目的	353
15.2 液力元件试验设备与仪器	353
15.3 液力变矩器性能试验及方法	355
15.3.1 试验准备	355
15.3.2 试验内容	355
15.3.3 试验方法	355

15.4 试验数据处理	356
15.4.1 处理数据时应用的有关常数	356
15.4.2 数据记录和处理	356
15.4.3 原始特性曲线	357
15.4.4 外特性和通用特性曲线	357
思考与习题	358
 第 16 章 车辆液力传动装置	359
16.1 定轴式液力机械传动装置	359
16.2 行星式液力机械传动装置	361
思考与习题	365
 参考文献	366

第一篇

液 压 传 动

第 1 章

液压传动基础知识

本章的内容主要包括液压传动的基本原理、工作介质和液压流体力学基础。通过本章的学习，要求深入掌握以下内容：

- (1) 液压传动的概念及工作原理；
- (2) 液压传动的工作特性及其主要参数；
- (3) 液压传动系统的组成部分；
- (4) 液压流体力学的基本方程；
- (5) 液压传动工作介质的种类及液压油的物理特性。

1.1 液压传动的工作原理及工作特性

1.1.1 液压传动的工作原理

液压传动相对于机械传动是一种新的传动形式，其理论基础是帕斯卡原理，或称静压传递原理，即“封闭容器中静止液体的某一部分发生的压强变化，将大小不变地向各个方向传递”。液压传动就是以液体为工作介质，基于帕斯卡原理，利用液体的压力能来传递运动和动力的一种传动形式。

液压千斤顶就是一个简单而又比较完整的液压传动系统，分析它的工作过程，可以清楚地了解液压传动的基本原理。

图 1.1.1 所示为液压千斤顶的工作原理。大缸筒 9 和大活塞 8 组成举升液压缸。手柄 1、小缸筒 2、小活塞 3、单向阀 4 和 7 组成手动液压泵。如抬起手柄 1 使小活塞向上移动，小活塞下端容腔容积增大，形成局部真空，这时单向阀 4 打开，油箱 12 中的液压油在大气压的作用下，通过吸油管 5 进入手动液压泵活塞腔；用力压下手柄 1，单向阀 4 关闭，小活塞下移，小活塞下腔的油液压力升高，单向阀 7 打开，下腔的油液经管道 6 进入大缸筒 9 的下腔，迫使大活塞 8 向上移动，顶起重物。再次提起手柄 1 吸油时，单向阀 7 自动关闭，使油液不能倒流，从而保证了重物不会自行下落。不断地往复扳动手柄 1，就能不断地把油液压入举升缸下腔，使重物逐渐升起。如果打开截止阀 11，举升缸下腔的油液通过管道 10、截止阀 11 流回油箱 12，重物就向下移动，这就是液压千斤顶的工作原理。

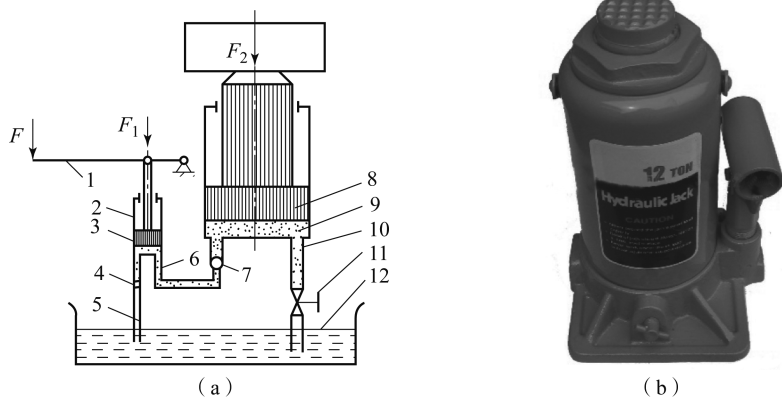


图 1.1.1 液压千斤顶的工作原理及实物图

(a) 工作原理图; (b) 实物图

1—手柄; 2—小缸筒; 3—小活塞; 4, 7—单向阀; 5—吸油管;
6, 10—管道; 8—大活塞; 9—大缸筒; 11—截止阀; 12—油箱

通过对液压千斤顶的工作过程分析, 可以初步了解液压传动的基本工作原理。压下手柄 1 时, 手动液压泵输出压力油, 将机械能转换成油液的压力能; 压力油经过管道 6 及单向阀 7, 推动大活塞 8 举起重物, 将油液的压力能又转换成机械能。大活塞 8 举升的速度取决于单位时间内流入举升缸的油液体积大小。由此可见, 液压传动是一个不同能量形式转换和传递的过程。

下面对大、小活塞进行运动学、动力学分析和功率分析, 暂不考虑该系统的摩擦损失、泄漏以及液压缸、油管等的弹性变形, 并假定油液不可压缩。

1. 运动学分析

当外力 F_1 加于小活塞上时, 由于大活塞上作用有负载 F_2 , 因而在 F_1 的作用下, 小活塞向下移动时, 大活塞推动负载向上移动。设小活塞的位移为 h_1 , 面积为 A_1 ; 大活塞的位移为 h_2 , 面积为 A_2 。基于以上假设, 从手动液压泵中被挤出的液体体积必然等于流进举升缸的液体体积, 即

$$A_1 h_1 = A_2 h_2$$

$$\text{所以} \quad \frac{h_1}{h_2} = \frac{A_2}{A_1} \quad (1.1.1)$$

设两活塞移动的时间为 t , 则活塞 1、2 的平均移动速度 v_1 和 v_2 分别为

$$v_1 = \frac{h_1}{t}, \quad v_2 = \frac{h_2}{t}$$

将它们代入式 (1.1.1), 可得

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1} \quad (1.1.2)$$

由式 (1.1.1)、式 (1.1.2) 可知, 大、小活塞移动的位移和速度均与活塞的面积成反比。

2. 动力学分析

根据帕斯卡原理, 在两个活塞的作用下, 两个液压缸的工作腔和油管中的油液具有相等的压强 p , 即