



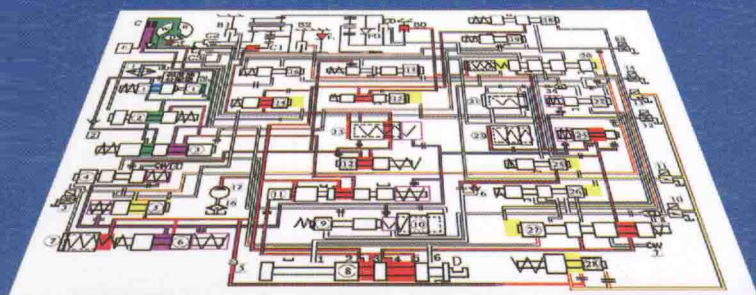
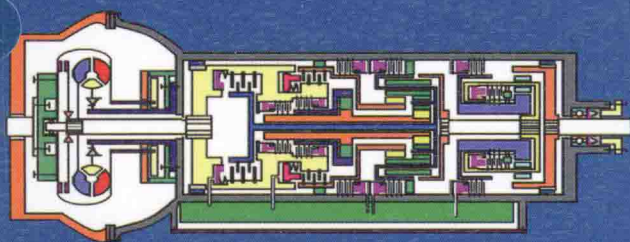
普通高等院校“十二五”规划教材——汽车专业

PUTONG GAODENG YUANXIAO SHIERWU GUIHUA JIAOCAI QICHE ZHUANYE

QICHE LIUTI CHUANDONG
YU KONGZHI JISHU

汽车流体传动与 控制技术

唐德修 袁新 编著
徐燕 主审



西南交通大学出版社

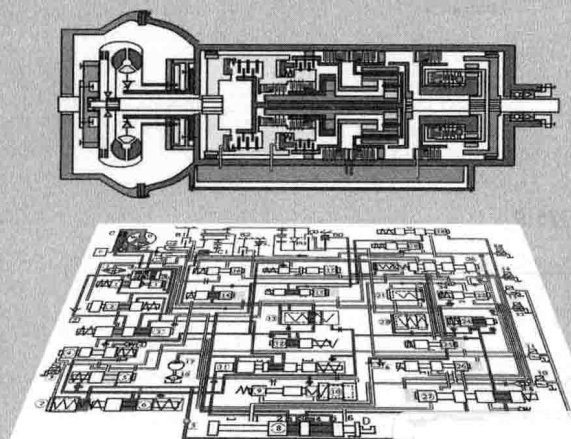


普通高等院校“十二五”规划教材——汽车专业
PUTONG GAODENG YUANXIAO SHIERWU GUIHUA JIAOCAI QICHE ZHUANYE

QICHE LIUTI CHUANDONG
YU KONGZHI JISHU

汽车流体传动与 控制技术

唐德修 袁新◎编著
徐燕◎主审



西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

汽车流体传动与控制技术 / 唐德修, 袁新编著. —
成都: 西南交通大学出版社, 2015.3
普通高等院校“十二五”规划教材. 汽车专业
ISBN 978-7-5643-3775-9

I. ①汽… II. ①唐… ②袁… III. ①汽车-液压传
动-高等学校-教材②汽车-气压传动-高等学校-教材
IV. ①U463.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 038520 号

普通高等院校“十二五”规划教材——汽车专业

汽车流体传动与控制技术

唐德修 袁 新 编著

责任编辑	孟苏成
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路 146 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都蓉军广告印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	22.5
字 数	563 千
版 次	2015 年 3 月第 1 版
印 次	2015 年 3 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-3775-9
定 价	48.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

这是一本学懂后,对无论多复杂的自动变速器液压系统都不会不知从何下手分析的教材。

现代汽车是集机、电、液、光于一体的高科技产物,自动变速器是现代汽车的关键技术之一,自动变速器的正常运作靠机械、电控和液压三大控制系统配合。目前自动变速器液压传动的资料相对比较匮乏,现代汽车要求自动变速器能够实现瞬态精细控制,故汽车自动变速器的液压系统复杂,理解、分析有一定难度,加之流行的换件维修,使得汽车维修业内少数人回避矛盾,有意无意宣传不懂液压系统照样可以修车,把弄懂液压系统原理的重要性掩盖起来了。

要从根本上解决“换件”维修汽车液压系统的技术问题,必须攻破汽车自动变速器液压系统原理这个瓶颈,也只有弄懂了别人的东西,才能超越别人的创新,这既是提高维修技术水平的需要,更是实现中国汽车强国梦的需要。要弄懂别人的东西,需要下功夫才行,没有技术资料的情况下,更需要有志气并下大功夫才行。为此 10 年前作者与刘晓东一段对话表达我们编著这样一本教材的力量来源:“垄断者可以封锁中国一时,绝不能封锁中国一世,中国一定会有人把这些技术攻破,现在这个机遇历史性地摆在了我们面前。”

这种信念化作一种担当,经过数年努力,2008 年出版了本教材的前身《汽车流体传动》,那本教材在国外提供的有限资料基础上,对有资料的几款车型的液压原理图补齐、分析、纠错,但遗憾的是对没有任何资料的 R 式两款车的液压原理只保留了刘晓东测绘的两张图,又经过这几年锲而不舍的坚持,新教材的亮点就是把这个遗憾补上了,并对前教材进行了勘误、补充与完善。

本教材分析、介绍了亚洲、美洲、欧洲三大车系中的共太阳轮式(S 式)、共架圈式(R 式)、对称式(D 式)自动变速器典型液压系统的原理,综合它们的共同点,找出规律性的东西,整理成业内人士容易掌握的模式,以利于读者学习、掌握基本思路与方法,进而可以举一反三、触类旁通,从容面对任何复杂自动变速器液压系统的挑战。

本教材还介绍了汽车在用的液体传动与气体传动两方面的基础知识,并围绕这个主线介绍了流体传动的基本原理。希望本教材能为中国汽车工业技术水平提高到汽车强国应有的水平起到抛砖引玉的作用,引出更多、更好、更与现代汽车最新液压技术接轨的好教材,本教材适合业内人士及本科、专科院校学生学习、使用。

第七章是重点,介绍了四款车的自动变速器液压系统工作原理。时间紧迫、有基础的读者可以直接阅读第七章(对学生还是适宜按顺序授课),第六章介绍汽车自动变速器液压系统的主要回路,是为阅读第七章作铺垫,第五章介绍阀体的工作原理,是为理解第六章做准备,

这三章都偏重介绍汽车专用液压系统，第一章至第四章及第七章第五节以介绍流体传动通用基础知识为主线。

本教材第七章第四节共架圈式（R 式）自动变速器的两张原始液压系统图由刘晓东测量并绘制，其余由作者根据相关资料整理及实物测绘而成，在力图与实物一致的前提下，作了适合我国读者阅读习惯的处理，本教材文中所涉及图中油路颜色以配套教学资源包中彩图为准。由于汽车自动变速器的液压系统结构紧凑，不利于测绘、分析，同时款式繁多，与电子控制密切相连，这些都增加了理解、分析的困难，加之条件限制，书中可能存在错误与不足，欢迎读者批评指正。

本教材由唐德修任第一主编，袁新任第二主编，徐燕主审，徐生明、陈清、黄明明、罗伟伟等朋友为本教材的成书做了大量工作，在此一并表示感谢。

作者（Email: 779480211@qq.com）

2015 年 1 月于成都

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 传动与流体传动	2
第二节 动力式流体传动与容积式流体传动的比较	12
第三节 汽车常用流体的性能指标	13
第四节 流体传动的主要计算	33
第二章 现代汽车流体动力传动	36
第一节 液力传动装置	36
第二节 液力传动装置工作原理	39
第三节 复合式液力变矩器的附属装置	48
第四节 液力变矩器的结构类型、使用与维护	52
第五节 液力机械变矩器类型简介	54
第六节 气体动力传动在发动机供气系统中的运用	58
第七节 空气动力车身设计对汽车性能的影响	67
第三章 现代汽车的流体泵与马达	71
第一节 汽车常用的流体泵与马达	72
第二节 齿轮泵与齿轮马达	74
第三节 叶片泵与叶片马达	78
第四节 柱塞泵与柱塞马达	82
第五节 其他类型的泵或马达	86
第六节 空气泵与气动马达	95
第四章 执行元件	98
第一节 直线往复式液压缸	98
第二节 液压马达	105
第三节 执行器在汽车上的运用	106
第四节 气动执行元件	113

第五章 控制元件	118
第一节 方向控制阀概述	118
第二节 汽车常用的方向控制阀	122
第三节 压力控制阀概述	145
第四节 汽车自动变速器液压系统的其他阀类	155
第五节 汽车液压系统常用辅助元件	160
第六节 气动控制元件	164
第六章 汽车典型的流体控制回路	174
第一节 常用的液压控制回路	174
第二节 汽车上常用的液压回路	188
第三节 常见的气动控制回路	206
第七章 自动变速器控制系统	216
第一节 亚洲某车型自动变速器液压系统分析	217
第二节 欧洲某车型自动变速器液压系统分析	238
第三节 美洲某车型自动变速器液压系统分析	258
第四节 与共架圈式轮系自动变速器配用的液压系统	279
第五节 其他液压系统工作原理分析	329
附录一 常用液压职能图形符号	334
附录二 液压专业名词中英对照	344
附录三 按字母顺序排列的常用液压专业英语单词	350
参考文献	354

第一章 绪 论

现代汽车在向安全型、经济型、舒适型、智能型发展的过程中，对自动控制的要求越来越高，现代汽车实际上已经变成一个高度自动化的、能行走的智能机器，其中，传动环节上的自动化主要是由机、电、液、光、磁等组成的智能系统来完成的。本章主要讨论流体传动的一般常识。

流体传动是研究以流体为介质实现各种机械的传动与控制的学科，现代设备广泛采用流体传动来实现自动控制。流体传动包括液体传动与气体传动两部分，流体传动中的动力传动在我国春秋战国时期就已经用于农业和手工业生产，例如，利用风推动帆船前进（见图 1-1），利用流水舂米（见图 1-2）都是流体动力传动的应用，这在《天工开物》中有图文并茂的介

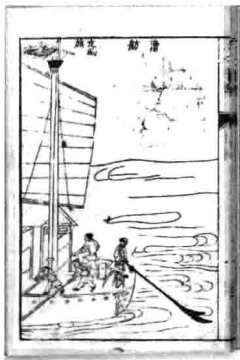
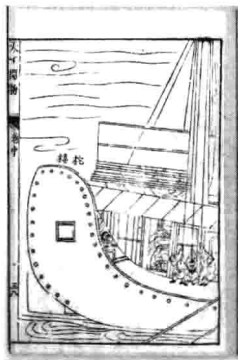
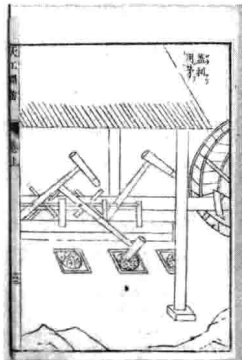


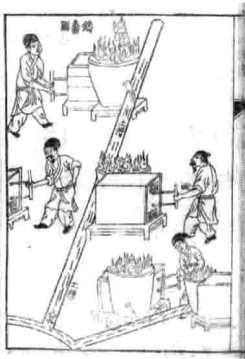
图 1-1 我国古代利用气体动能做功的例子（风推帆船）



(a) 舂米机做功 (工作机) (b) 水轮获取能源 (原动机)

图 1-2 我国古代利用液体动能（动力式流体传动）做功的例子

绍。流体压力传动必须在密封的条件下才能实现，在制造技术落后的古代仍有成功应用的例子，如图 1-3 所示。帕斯卡总结出帕斯卡定律，为流体压力传动奠定了理论基础；18 世纪末第一台水压机问世，近代液压技术才开始萌芽；第二次世界大战促进了液压技术的发展。战后，液压技术迅速转向民用。液压技术在 20 世纪中叶才得以蓬勃发展。在经历了标准化、精细化和智能化 3 个阶段后，液压技术在高压、高速、



(a) 风箱式气体压力传动 (b) 液体压力传动深井取卤水

图 1-3 我国古代利用流体压力（容积式流体）做功的例子

大功率、小型化、集成化等方面又取得了很大进展。20 世纪 60 年代，降噪、防漏、治污、节能等方面的研究成果引入液压传动，使液压技术走向航天、原子能等新的应用领域。20 世纪 80 年代，计算机技术、微电子技术的发展及比例控制、伺服控制、数字控制等技术上的新成就将液压技术推上新的台阶。液压技术发展成包括传动、控制、检测全过程的完整的自动化技术，成为交叉性学科，在国民经济的各个领域得到了广泛应用。液压技术的应用程度已成为衡量一个国家工业水平的重要标志之一。

第一节 传动与流体传动

一、传动常识

将原动机的动力和运动传递到工作机的过程，称为传动。

具备以下 3 个特征的组合体被称为机器：人为的实物组合体，各部件之间都有确定的相对运动，能进行有用的功能转换。任何一台机器都由原动机、工作机、传动机构和控制机构 4 大部分组成，1788 年，瓦特利用离心调速器对蒸汽机进行自动控制，如图 1-4 所示，这是近代工业中第一台利用负反馈进行控制的完整机器。

原动机将自然界的能量转换成机器可以利用的能量推动工作机做功；工作机完成设计者赋予它的功能，或减轻人的劳动强度，或提高工作效率，或提高工作精度，或兼而有之；传动机构将原动机的动力和运动（简称传递要素）传到工作机，使原动机与工作机相互匹配；控制机构是供人操纵与控制机器的装置，现代机器在控制机构上向着智能化、自动化、精细化方向发展，科技含量越来越高。

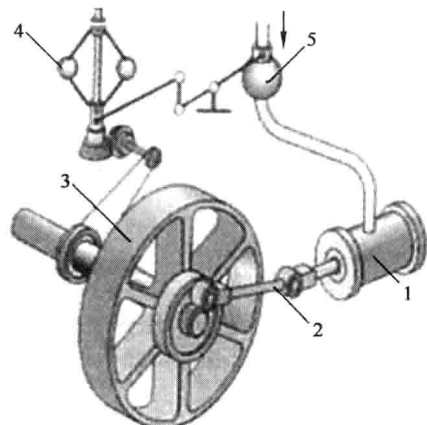


图 1-4 第一台完整的近代机器
1—原动机（蒸汽机）；2—传动装置；3—工作机；
4—离心调速器；5—负反馈控制装置

原动机以动力（常用力 F 或力矩 M 来描述）和运动（常用直线运动速度 v 或旋转运动角速度 ω 来描述）两种要素传给工作机，这种传动能够顺利进行的充要条件是有传动机构和传动介质。传动机构的主动元件（运动已知的元件，简称主动件）接受原动机的传递要素，通过介质，传给传动机构的被动元件（简称从动件），在这个过程中，对传递要素进行加工，把原动机的传递要素转换成工作机需要的传递要素。

传动机构常用介质有固体、流体、电力、场力等，因此传动可分为：

- （1）机械传动（由机器和机构组成的传动机构，以固体为工作介质）。
- （2）流体传动（流体传动机构，以液体或气体为工作介质）。
- （3）电力传动（电力传动机构，以电子运动为工作介质）。

(4) 场力传动(场力传动机构,以重力,磁力,万有引力等为工作介质,如潮汐发电)。不管是哪种传动,上述的充要条件总是不可少的。本书讨论流体传动。

二、流体传动

以流体作为传动介质的传动称为流体传动,流体传动可分为气体传动和液体传动。

1. 气体与液体

在压力和温度适度的条件下,没有固定的体积也没有固定形状的物体称为气体;有固定体积,没有固定形状的物体称为液体。气体和液体统称为流体。流体承受压应力的能力很强,承受拉应力和剪应力的能力很弱。依靠流体的动能实现传动的方式称为动力式流体传动,简称流体动力传动(液力传动或气动力传动);依靠流体的压力能(实质是流体的势能)实现传动的方式称为容积式流体传动,简称液压传动或气压传动。

2. 流体传动的基础力学常识

1) 液体传动遵循的力学基础规律

(1) 帕斯卡定理。

在密封容器内的静止液体中,任意一点的压强(在流体力学中称为压力)如有变化,这个变化值将以大小不变的方式传到容器内的所有点的所有方向上。

(2) 流体体积 V 、时间 t 、体积流量 q_V 、流速 v 与过流面积 A 的关系。

$$q_V = \frac{V}{t} = A \cdot v \quad (1-1)$$

(3) 伯努利方程(能量守恒定律)。

在密封管道内作恒定流动的理想液体具有压力能、位置能(势能)和动能三种能量形式,在任一截面上这三种能量形式之间可以相互转换,但三者之和为一定值,即能量守恒。

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + z_2 \quad (1-2)$$

如果要考虑损失,则变成实际液体的伯努利方程如下:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{损}} \quad (1-3)$$

上式中压力 p 、流速 u 和位置 z 的下标分别表示截面 1 和 2 上的值, ρ 为密度, g 为重力加速度。

(4) 连续性原理(质量守恒定律)。

内部是连续的、没有气泡造成空洞的液体在一个密封的管道内连续地流动时,通过管道

各截面的体积流量 q_v 是相等的，流速 v 与截面面积 A 成反比，连续性是流体传动正常进行的重要条件。

$$v = \frac{q_v}{A} \tag{1-4}$$

(5) 液体动量定理。

在某一时间间隔内，流出控制容积的液体所具有的动量与流入同一控制容积的液体所具有的动量之差等于同一时间间隔内作用于该控制容积液体上的外力的冲量。

$$\sum \vec{F} = \frac{d\vec{I}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \rho q_v (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) \tag{1-5}$$

(6) 流动液体内摩擦力。

液体流动起来，液体内部分子间会产生阻碍运动的力，这就是流动液体的内摩擦力 F_f ，这种特性称为液体的黏性，描述黏性大小的量称为黏度。通常用动力黏度 μ 来描述流动液体的内摩擦力

$$\tau_f = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \tag{1-6}$$

- 式中 A —— 液体层流间的接触面积；
 F —— 流动液体内部流层间的相互作用正压力；
 $\frac{du}{dy}$ —— 速度梯度；
 τ_f —— 流动液体内部流层间单位面积上的相互作用剪切力；
 μ —— 动力黏度。

动力黏度使用起来不方便，国际标准 ISO 用 40 °C 时的运动黏度 ν 来标注机械油的牌号，动力黏度 μ 除以液体密度 ρ 得到运动黏度 ν 。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1-7}$$

有些国家还广泛使用相对黏度，相对黏度也称为条件黏度。顾名思义，相对黏度是根据特定测量条件来制定的，各国的测定条件不同，相对黏度的定义也有差别。

我国用得最多的是运动黏度。需要强调指出：黏度是液体流动时才表现出的特性，不能与表示液体流动特性的稠度混淆。液体受到重力作用时，会向四面八方流动，这种因受力而流动的性质称为液体流动性，度量流动性大小的量称为稠度。流动性越好，稠度越小；流动性越差，稠度越大。由此可见，黏度与稠度是完全不同的两个概念。

2) 气体传动遵循的力学基础规律

气体与液体传动最大的区别在于气体的压缩性与膨胀性。压缩性是描述气体体积受压力影响的参数，膨胀性是描述气体体积受温度影响的参数，这两方面的问题在液体传动中尽管也存在，但由于变化量很小，一般情况下都忽略不计。如果要考虑它们的影响则要特别指出

并作特殊处理。在气体传动中这两个参数引起的问题必须要考虑，这就产生了气体传动的特殊性，气体传动是从以下方面考虑两参数对传动特性的影响并加以利用的。

(1) 气体状态方程及其变化。

不计黏性的气体称为理想气体，空气可近似为理想气体。一定质量的理想气体在状态变化的某一稳定瞬间，其状态方程为

$$\frac{pV}{T} = \text{常数} \quad (1-8)$$

式中 p —— 气体压力，Pa；

V —— 气体体积， m^3 ；

T —— 热力学温度，K。

① 等容状态过程：在气体体积不变的条件下，一定质量气体所进行的状态变化过程，称为等容过程。等容过程状态方程为

$$\frac{p}{T} = \text{常数} \quad \text{或} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (1-9)$$

② 等压状态过程：在气体压力保持不变的条件下，一定质量气体所进行的状态变化过程，称为等压过程。等压过程状态方程为

$$\frac{V}{T} = \text{常数} \quad \text{或} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (1-10)$$

式中 V_1, V_2 —— 初始状态和终止状态下的单位质量体积， m^3/kg 。

③ 等温状态过程：在气体温度保持不变的条件下，一定质量气体所进行的状态变化过程，称为等温过程。等温过程状态方程为

$$pV = \text{常数} \quad \text{或} \quad p_1V_1 = p_2V_2 \quad (1-11)$$

④ 绝热状态过程：气体与外界无热量交换条件下，一定质量气体所进行的状态变化过程，称为绝热过程。其状态方程为

$$p_1V_1^k = p_2V_2^k \quad (1-12)$$

式中 k —— 绝热指数，对于空气，取值为 1.4。

⑤ 多变状态过程：在没有任何制约条件下，一定质量气体所进行的状态变化过程，称为多变过程。其状态方程为

$$p_1V_1^n = p_2V_2^n \quad (1-13)$$

式中 n —— 多变指数， $1 < n < 1.4$ 。在研究气缸启动和活塞运动速度时，可取 $n = 1.2 \sim 1.25$ 。

单位质量气体所做的功为

$$W = \frac{R}{n-1}(T_2 - T_1) \quad (1-14)$$

式中 R —— 气体常数, 干空气 $R_g = 287.1 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 水蒸气 $R_s = 462.05 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

(2) 气体传动基本方程。

① 可压缩气体的流量方程。

根据质量守恒定律, 气体在管道内作恒定流动时, 单位时间内流过管道的气体质量都相等, 可得

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (1-15)$$

式中 ρ_1 、 ρ_2 , A_1 、 A_2 , v_1 、 v_2 —— 截面 1、2 处的气体密度、通流面积和平均流速。

② 可压缩气体的能量方程。

不计损失和位能变化, 多变过程下可压缩气体的能量方程为

$$\frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} \quad (1-16)$$

式中 n —— 多变指数。

③ 对气体做功时可压缩气体多变过程下的能量方程, 其全功 L_n 的计算公式如下:

$$L_n = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} - 1 \right] + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \quad (1-17)$$

3. 流体的物理性质

并不是所有的流体都适合作传动介质, 不同的传动场合对流体的物理性质有不同的要求, 选择流体作传动介质时要考虑流体的以下性质是否满足要求:

(1) 黏性: 抗温度变化干扰的重要指标, 黏温特性 (液体黏度随温度升降的变化而变化的特性称为黏温特性) 好, 黏度随温度升降的变化幅度小。

(2) 阻燃性: 阻燃性好的流体安全性好。

(3) 可压缩性: 对传动稳定性影响大的指标。

以上 3 个指标对流体传动而言是最重要的, 应当优先考虑。

(4) 润滑性: 影响元件寿命的指标。

(5) 膨胀性: 影响系统稳定性的指标。

(6) 安定性: 影响传动介质寿命的指标。

(7) 相容性: 抵抗其他流体混入的能力。

(8) 防锈性: 抵抗水对元件寿命影响的能力。

(9) 抗腐蚀性: 抵抗酸碱及电腐蚀的能力。

(10) 抗泡沫性: 抵抗搅动形成气泡的能力。

(11) 抗乳化性: 抵抗与水形成乳化液体的能力。

(12) 洁净性: 自除杂质的能力。

(13) 无毒性: 不对人体造成伤害的指标。

(14) 无异味性: 无不良气味的指标。

(15) 比热容大小：对热量吸收能力的指标。

(16) 热导率大小：热传导的能力。

流体的这些性质对流体传动影响大，但并不是选择指标越高越好，指标越高，价格越高，故应根据实际情况兼顾各方，适当选择。

三、流动流体的能量损失

实际气体和液体都有黏性，都可压缩，但由于气体的黏性和液体的可压缩性均小到可以忽略的程度，故本书都是在忽略二者的前提下讨论流体问题。

由于液体有黏性，因而流动时会产生阻力，为了克服阻力，就会造成一部分能量损失，液力传动表现为液体的动能损失，液压传动表现为液体的压力损失，损失了的能量大部分都转化为热能，导致系统的温度升高。因此，在设计流体传动系统时，要尽量减少能量损失或增设冷却装置。流动流体的能量损失可分为沿程能量损失和局部能量损失。

1. 沿程能量损失

液体在管道中流动时因黏性摩擦而产生的能量损失，称为沿程损失。它主要取决于液体的流速、黏性、管长以及油管的内径等，另外还与液体的流动状态有关。

液体流经等径为 d 的直管时，在管长 l 段上的能量损失计算公式为

$$\Delta p_\lambda = \Delta E_\lambda = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (\text{管道中的能量损失以压力损失的形式表现}) \quad (1-18)$$

式中 Δp_λ —— 液压传动的沿程压力损失；

ΔE_λ —— 液力传动的沿程动能损失；

v —— 液流的平均流速；

ρ —— 液体的密度；

λ —— 沿程阻力系数。

2. 局部能量损失

液体流经管道的弯头、管接头、突变截面以及阀口等处时，液体流速的方向和大小将发生剧烈变化，形成旋涡，并发生强烈的紊动现象，因而使液体质点相互撞击，造成能量损失，这种能量损失表现为局部能量损失。局部能量损失计算公式为：

$$\Delta p_\xi = \Delta E_\xi = \xi \frac{\rho v^2}{2} \quad (\text{管道中的能量损失以压力损失的形式表现}) \quad (1-19)$$

式中 ξ —— 局部阻力系数（ ξ 的值可通过查阅手册获得）。

其余参数意义对应沿程损失。

3. 管路系统的总能量损失

管路系统中总的能量损失等于所有沿程能量损失和所有局部能量损失之和，流体传动中的能量损失，会造成功率损耗、油液发热、泄漏增加，使元件因受热膨胀而“卡死”，以致影

响系统的工作性能。因此，应尽量减少能量损失。油液黏度适当，提高管道内壁的加工质量，尽量缩短管道长度，减少管道截面的突变及弯曲，均可减少能量损失。

四、流体流经孔口和缝隙的流量

流体传动中常利用流体流经阀的小孔或缝隙来控制流量和能量，达到调速和调压的目的。流体元件的泄漏也属于缝隙流动。

1. 流体流过小孔的流量

根据孔的长径比不同，通常将小孔分为 3 种：当小孔的长径比 $l/d \leq 0.5$ 时，称为薄壁小孔；当 $l/d > 4$ 时，称为细长孔；当 $0.5 < l/d \leq 4$ 时，称为短孔。

1) 流体流过薄壁孔的流量

图 1-5 所示为典型薄壁孔。由于惯性作用，液流通过小孔时要发生收缩现象，在靠近孔口后方出现收缩量最大的过流截面，而后再开始扩散，通过收缩和扩散过程，会造成很大的能量损失。

通过薄壁小孔的流量 q 公式为

$$q = cA\sqrt{\Delta p} \quad (1-20)$$

式中 c —— 与流体密度、小孔形状等因素有关的系数；

A —— 小孔过流面积；

Δp —— 小孔两边压力差。

2) 流体流过细长小孔的流量

如图 1-6 所示，流经细长小孔的流体流量

$$q = \frac{\pi d^4}{128\mu l} \Delta p \quad (1-21)$$

由式可知，细长孔的流量与油液的黏度有关，当油温度变化时，流量也随之发生变化，从而可知细长孔与薄壁小孔的流量特性是不同的。

可用通用公式来表示两类小孔流量，即

$$q = cA\Delta p^m \quad (1-22)$$

式中 c —— 由孔的形状、尺寸和液体性质决定的系数；

$A, \Delta p$ —— 小孔的通流截面面积和两端压力差；

m —— 小孔的长径比决定的系数， $0.5 \leq m \leq 1$ ，薄壁小孔 $m = 0.5$ 、细长小孔 $m = 1$ 、短孔 $m = 0.5 \sim 1$ 。

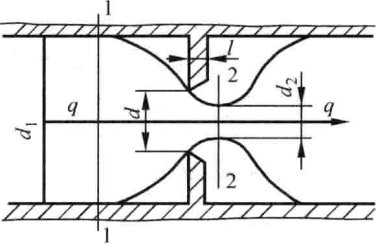


图 1-5 流体流过薄壁小孔

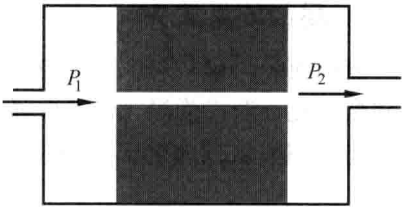


图 1-6 细长小孔

2. 流体流过缝隙的流量

流体传动装置的各零件之间,特别是有相对运动的各零件之间,都存在缝隙(或称间隙),流体流过缝隙就会产生泄漏,流体在系统内部从压力较高处向压力较低处泄漏称为内泄漏,如果向系统外泄漏称为外泄漏。泄漏量过大会影响流体元件和系统的正常工作,另外,泄漏也将使系统的效率降低,功率损失加大。因此,研究流体流经间隙的泄漏规律,对提高流体元件的性能和保证流体系统正常工作是十分重要的。

缝隙流动有两种状况:一种是由缝隙两端的压力差造成的流动,称为压差流动;另一种是形成缝隙的两壁面作相对运动所造成的流动,称为剪切流动。这两种流动经常会同时存在。

1) 流体流过平行平板缝隙的流量

(1) 流体流过固定平行平板缝隙的流量。

图 1-7 所示为流体在两固定平行平板缝隙内的流动状态,间隙两端有压力差 $\Delta p = p_1 - p_2$, 故属于压差流动。若其缝隙高度为 h , 宽度为 b , 长度为 l , 经理论推导可得

$$q = \frac{bh^3}{12\mu l} \Delta p \quad (1-23)$$

式中 μ —— 油液的动力黏度。

从上式可知,在压差作用下,流过固定平行平板缝隙的流量与缝隙 h 的三次方成正比,说明流体元件内缝隙的大小对泄漏量的影响是很大的。

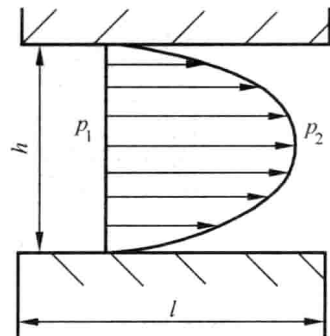


图 1-7 平行平板缝隙流量

(2) 流体流过相对运动平行平板缝隙的流量。

当一平板固定,另一平板以速度 u_0 作相对运动时,由于流体存在黏性,紧贴于动平板的油液以 u_0 运动,紧贴于固定平板的油液则保持静止,中间各层流体的流速呈线性分布,即流体作剪切流动。因为流体的平均流速 $v = \frac{u_0}{2}$, 故因平板有相对运动而使流体流过缝隙的流量为

$$q' \approx v \cdot A = \frac{u_0}{2} bh \quad (1-24)$$

一般情况下,相对运动平行平板缝隙中既有压差流动又有剪切流动,其流量为压差流量和剪切流量二者的代数和,即

$$q = \frac{bh^3}{12\mu l} \Delta p \pm \frac{u_0}{2} bh \quad (1-25)$$

当板的运动方向与流体流动方向相同时取正,相反时取负。

2) 流体流过圆环缝隙的流量

(1) 流体流过同心圆环缝隙的流量。

将图 1-8 所示的同心圆环展开就成了平行平板问题, 故可套用计算流量的公式

$$q = \frac{\pi d h^3}{12 \mu l} \Delta p \pm \frac{u_0 h \pi d}{2} = \frac{\pi d h^3}{12 \mu l} \Delta p \pm \frac{u_0 \pi d h}{2} \quad (1-26)$$

(2) 流体流过偏心圆环缝隙的流量。

图 1-9 表示了流体流过偏心圆时受偏心距 e 的影响, 流量变大, 这时流量的计算从上式 (1-26) 变为

$$q = \frac{\pi d h^3}{12 \mu l} \Delta p (1 + 1.5 e^2) \pm \frac{u_0 \pi d h}{2} \quad (1-27)$$

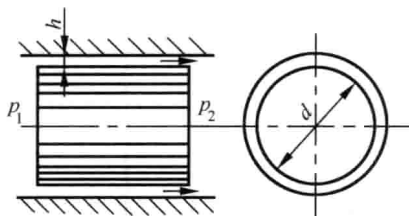


图 1-8 同心圆环缝隙

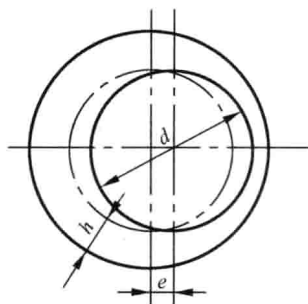


图 1-9 偏心圆环缝隙

五、流体冲击

在流体传动系统中, 由于某种原因引起流体流速急剧改变, 流体压力在瞬间急剧升高, 产生很高的压力峰, 又突然降低形成很低的压力谷, 这种峰谷交替出现形成压力波在管道内来回传播的现象称为流体冲击, 也称为流体锤或水锤, 在液压传动中称为液压冲击。流体冲击的压力峰值往往比正常工作压力高好几倍, 容易引发故障, 压力谷又比正常工作压力低很多倍, 容易造成系统进气, 故大多数场合都应避免。但有时也可以利用流体冲击突发载荷产生的巨大冲击达到某种工艺效果。气体质量小, 压缩性和膨胀性都大, 故气体冲击的影响往往被掩盖起来了。本书中主要涉及并讨论液体传动系统中的液压冲击及其危害。

1. 液压冲击产生的原因

(1) 当液体通道迅速关闭或液体迅速换向使液流速度的大小或方向发生突然变化时, 液流惯性引起液压冲击。

(2) 液压系统中的运动工作部件突然制动或换向时, 因工作部件惯性引起液压冲击。

(3) 当液压系统中的某些元件反应不灵敏时, 也可能造成液压冲击。如溢流阀不能在系统压力升高达到其调定压力时及时打开; 限压式变量泵不能在油压升高时自动减少输油量等, 都会出现压力超调现象而引起液压冲击。