



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

第二章 液压传动基础知识

2、1 液压油

2、2 液体静力学

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

目的任务

了解油液性质、静压特性、方程、传递规律

掌握静力学基本方程、压力表达式和结论

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

重点难点

液压油的粘性和粘度

粘温特性

静压特性

压力形成

静力学基本方程

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

提问作业

- 1、什么叫液压传动？液压传动的特点是什么？
- 2、液压传动系统的组成和作用各是什么？

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液压油

2、1、1 液压油的物理性质

2、1、2 对液压油的要求及选用



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

2、1、1 液压油的物理性质

- 一 液体的密度
- 二 液体的粘性
- 三 液体的可压缩
- 四 其他性质

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液体的密度

密度—单位体积液体的质量

$$\rho = m/v \quad \text{kg/m}^3$$

密度随着温度或压力的变化而变化，
但变化不大，通常忽略，一般取
 $\rho = 900 \text{kg/m}^3$ 的大小。

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

粘性的物理本质

液体在外力作用下流动时,由于液体分子间的内聚力和液体分子与壁面间的附着力,导致液体分子间相对运动而产生的内摩擦力,这种特性称为粘性。

或: 流动液体流层之间产生内部摩擦阻力的性质。

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

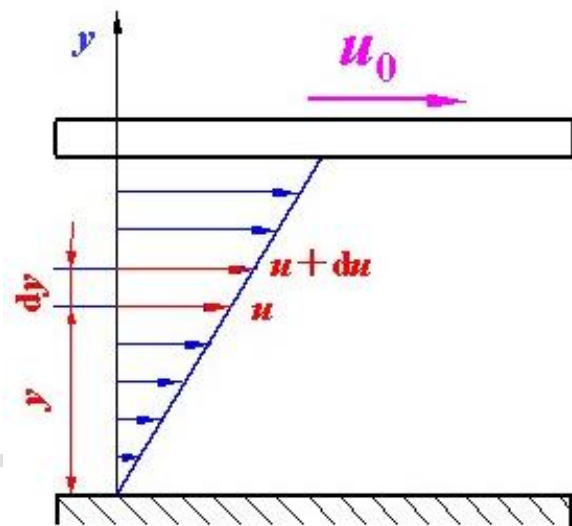
粘性的物理本质

内摩擦力表达式

$$F = \mu A \frac{du}{dy}$$

∴ 液体静止时 $\frac{du}{dy} = 0$

∴ 静止液体不呈现粘性



$$F = \mu A \frac{du}{dy}$$

动力粘度

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

牛顿液体内摩擦定律

液层间的内摩擦力与液层接触

面积及液层之间的速度成正比。



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

粘度

衡量粘性大小的物理量



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

粘度

动力粘度 μ

运动粘度 ν

相对粘度 ρ_E

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

动力粘度 μ

公式: $\because \tau = F/A = \mu \cdot du/dy \text{ (N/m}^2\text{)}$

$\therefore \mu = \tau \cdot dy/du \text{ (N}\cdot\text{s/m}^2\text{)}$



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

动力粘度物理意义

液体在单位速度梯度下流动时，

接触液层间单位面积上内摩擦力。



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

动力粘度单位

国际单位（**SI**制）中：

帕·秒（**Pa·S**）或牛顿·秒/米²（**N·S/m²**）；

以前沿用单位（**CGS**制）中：

泊（**P**）或厘泊（**CP**）达因·秒/cm²（**dyn·S/cm²**）

换算关系： **$1\text{Pa}\cdot\text{S} = 10\text{P} = 10^3\text{CP}$**



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

运动粘度 ν

动力粘度与液体密度之比值



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

运动粘度公式

$$\nu = \mu / \rho \quad (\text{m}^2/\text{s})$$



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

运动粘度物理意义

无

（只是因为 μ/ρ 在流体力学中经常出现

\therefore 用 ν 代替（ μ/ρ ）



运动粘度单位

SI制: m^2/S

CGS制: St (斯)、CSt (厘斯)
(Cm^2/S) (mm^2/S)

换算关系: $1\text{m}^2/\text{S} = 10^4\text{St} = 10^6 \text{CSt}$



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

运动粘度单位说明

∴单位中只有长度和时间量纲类似运动学量。

∴称运动粘度，常用于液压油牌号标注



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液压油牌号标注

老牌号——**20**号液压油，指这种油在**50° C**时的平均运动粘度为**20 cst**。

新牌号——**L—HL32**号液压油，指这种油在**40° C**时的平均运动粘度为**32cst**。

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

相对粘度^{0E}

∴ μ 、 ν 不易直接测量，只用于理论计算

∴ 常用相对粘度



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

相对粘度（条件粘度）

恩氏度^{°E} —— 中国、德国、前苏联等用

赛氏秒SSU —— 美国用

雷氏秒R —— 英国用

巴氏度^{°B} —— 法国用

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

换算关系

恩氏粘度与运动粘度之间的换算关系

$$\nu = (7.31^{\circ}\text{E} - 6.31/^{\circ}\text{E}) \times 10^{-6}$$

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液体的可压缩性定义

液体受压力作用而发生体积缩小性质。

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液体的体积压缩系数定义

定义： 体积为 v 的液体，当压力增大 Δp 时，体积减小 Δv ，则液体在单位压力变化下体积的相对变化量。

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液体的体积压缩系数公式

$$\kappa = - \Delta v / \Delta p v$$

$$\kappa = (5-7) \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$$



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液体的体积压缩系数物理意义

单位压力所引起液体体积的变化

$\therefore p \uparrow \quad v \downarrow$

\therefore 为保证 κ 为正值，式中须加负号



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液体的体积弹性模数定义

液体压缩系数的倒数

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液体的体积弹性模数公式

$$k = 1/\kappa = - \Delta p v / \Delta v$$



液体的体积弹性模数物理意义

表示单位体积相对变化量所需要的压力增量，也即液体抵抗压缩能力的大小。

一般认为油液不可压缩（因压缩性很小），

计算时取： $k = (1.4-1.9) \times 10^9 \text{ N/m}^2$

若分析动态特性或 p 变化很大的高压系统,则必须考虑。



液体的其它性质

1、粘度和压力的关系

$\therefore P \uparrow, F \uparrow, \mu \uparrow$

$\therefore \mu$ 随 $p \uparrow$ 而 \uparrow ，压力较小时
忽略，**32Mpa**以上才考虑



液体的其它性质

2、粘度和温度的关系

- ∴ 温度 \uparrow ，内聚力 \downarrow ， $\mu \downarrow$
- ∴ 粘度随温度变化的关系叫粘温特性，粘度随温度的变化较小，即粘温特性较好。



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件
第二章 液压传动基础知识
[首页](#) [网络课件](#)

2.1.2 对液压油的要求及选用

对液压油的要求
液压油的选择



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液压油的任 务

工作介质—传递运动和动力

润滑剂 —润滑运动部件

物流工程学院



对液压油的要求

- (1) 合适的粘度和良好的粘温特性;
- (2) 良好的润滑性;
- (3) 纯净度好, 杂质少;
- (4) 对系统所用金属及密封件材料有良好的相容性。



对液压油的要求

- (5) 对热、氧化水解都有良好稳定性，使用寿命长；
- (6) 抗泡沫性、抗乳化性和防锈性好，腐蚀性小；
- (7) 比热和传热系数大，体积膨胀系数小，闪点和燃点高，流动点和凝固点低。

(凝点——油液完全失去其流动性的最高温度)

- (8) 对人体无害，对环境污染小，成本低，价格便宜

总之：粘度是第一位的



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液压油的选择

1 选择液压油品种

2 选择液压油粘度



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液压油的类型

机械油

精密机床液压油

气轮机油

变压器油等

物流工程学院



液压油选择

首先根据工作条件 (v 、 p 、 T) 和元件类型
选择油液品种，然后根据粘度选择牌号

慢速、高压、高温： μ 大 (以 $\downarrow \Delta q$)

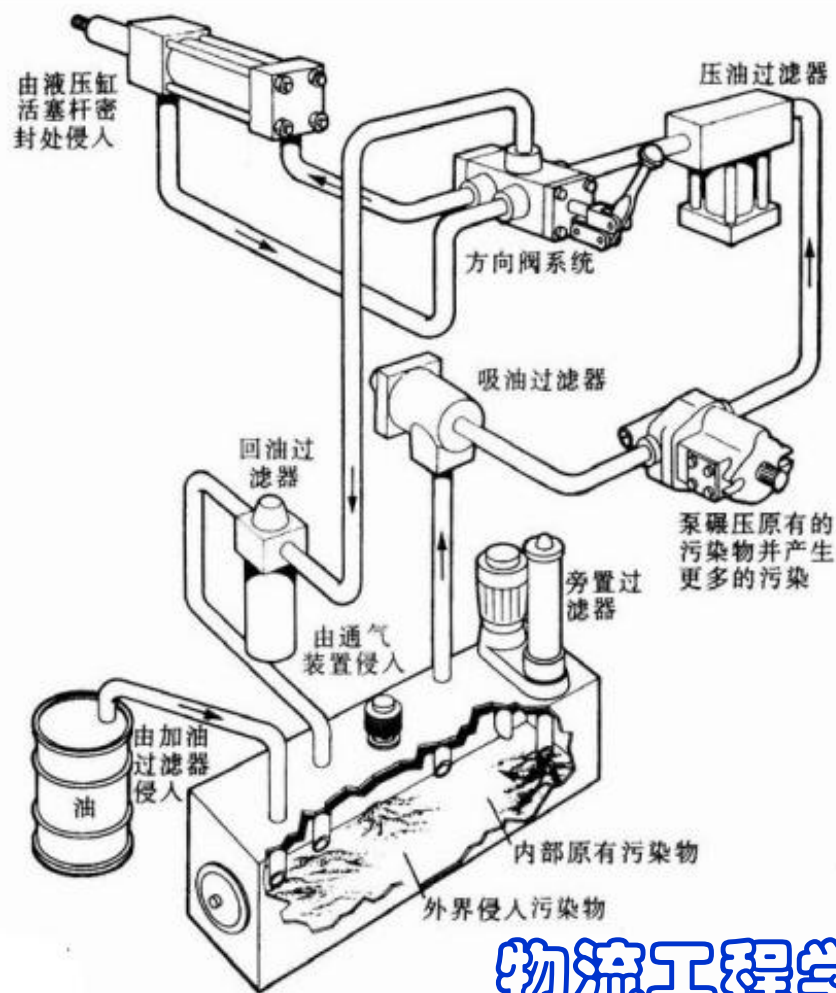
通常 $<$

快速、低压、低温： μ 小 (以 $\downarrow \Delta P$)



液压油的污染和维护

- **残留物污染**
 - 元件在制造，储存，运输，安装，维修中残留
- **侵入物污染**
 - 使用时周围环境中污染物侵入
- **生成物污染**
 - 系统工作过程中产生





武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

2、2 液体静力学

研究内容：研究液体处于静止状态的力

学规律和这些规律的实际应用。



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

静止液体

指液体内部质点之间没有相对运动，至于液体整体完全可以象刚体一样做各种运动。

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

2、2 液体静力学

2、2、1 液体的静压力及特性

2、2、2 液体静力学基本方程式

2、2、3 压力的表示方法及单位

2、2、4 静压传递原理

2、2、5 液体对固体壁面的作用力

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液体的静压力及特性

作用于液体上的力：

质量力（重力、惯性力）——作用于液体的所有质点；

表面力（法向力、切向力、其它物体或容器对液体、一部分液体作用于另一部分液体等）——作用于液体的表面；

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液体的静压力定义

液体单位面积上所受的法向力，物理学中称压强，液压传动中习惯称压力。

物流工程学院



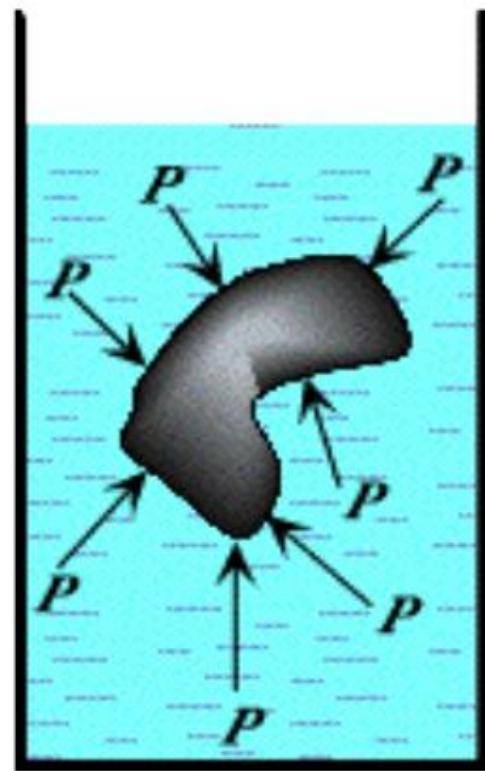
液体静压力特性

(1) 垂直并指向于承压表面

- ∴ 液体在静止状态下不呈现粘性
- ∴ 内部不存在切向剪应力而只有法向应力

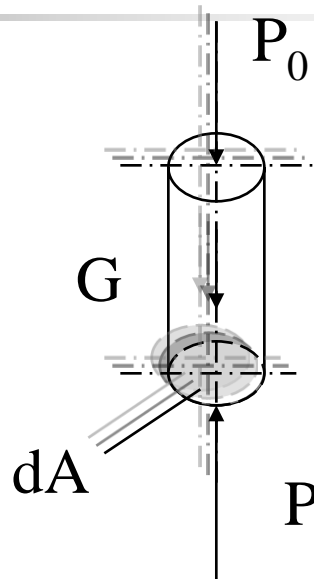
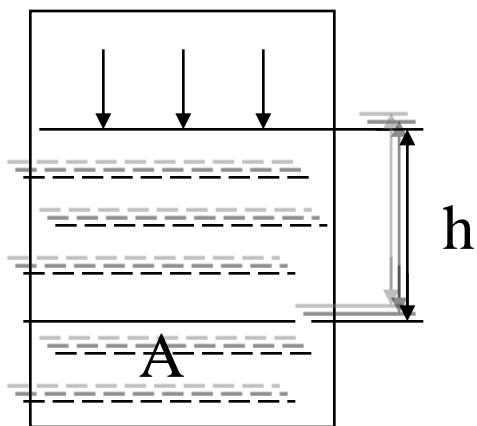
(2) 各向压力相等

- ∴ 有一向压力不等，液体就会流动
- ∴ 各向压力必须相等





液体静力学基本方程



例：计算静止液体内任意点**A**处的压力**p**

$$\therefore p dA = p_0 dA + G = p_0 dA + \rho g h dA$$

$$\therefore p = p_0 + \rho g h$$



重力作用下静止 液体压力分布特征

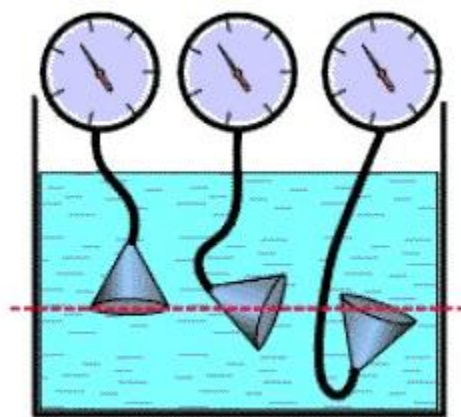
(1) 静止液体中任一点处的压力由两部分
液面压力 p_0

组成 <

液体自重所形成的压力 ρgh

(2) 静止液体内压力沿液深呈线性规律分布

(3) 离液面深度相同处各点的压力均相等，
压力相等的点组成的面叫等压面。





武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

2、2、3 压力的表示方法及单位

测压两基准

关系

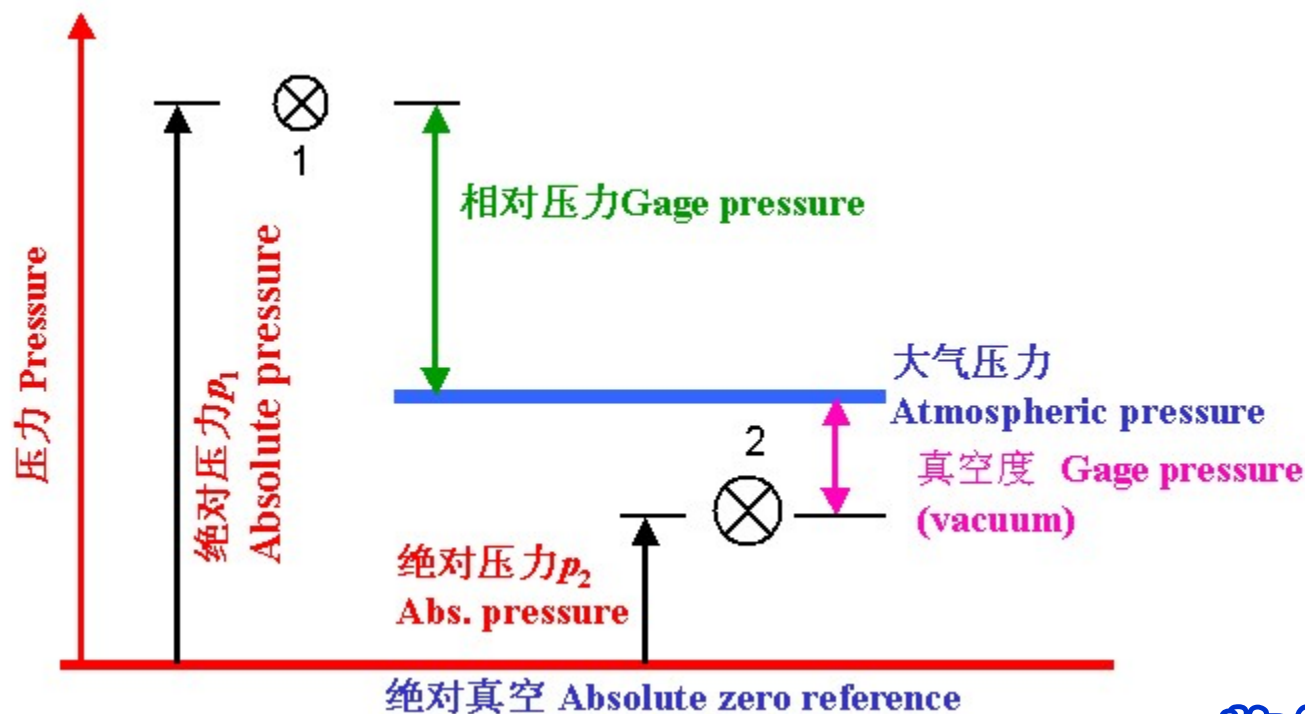
物流工程学院



测压两基准

绝对压力—以绝对零压为基准所测

相对压力*—以大气压力为基准所测





关系

绝对压力 = 大气压力 + 相对压力

或 相对压力（表压）= 绝对压力 - 大气压力

注 液压传动系统中所测压力均为相对压力即表压力

真空度 = 大气压力 - 绝对压力

$$p > p_a$$

$$p = p_a$$

$$p < p_a$$

$$p = 0$$



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

2、2、4 静压传递原理

帕斯卡原理（静压传递原理）

液压系统压力形成

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

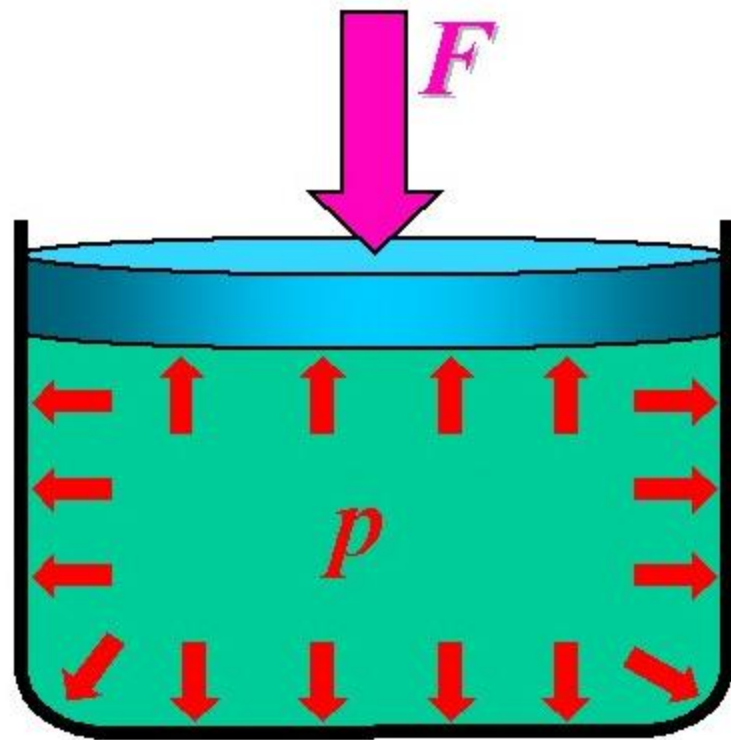
[网络课件](#)

帕斯卡原理（静压传递原理）

在密闭容器内，液体表面的压力可等值传递到液体内部所有各点。

根据帕斯卡原理：

$$p = F/A$$



物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液压系统压力形成

$$p = F/A \quad F = 0 \quad p = 0$$

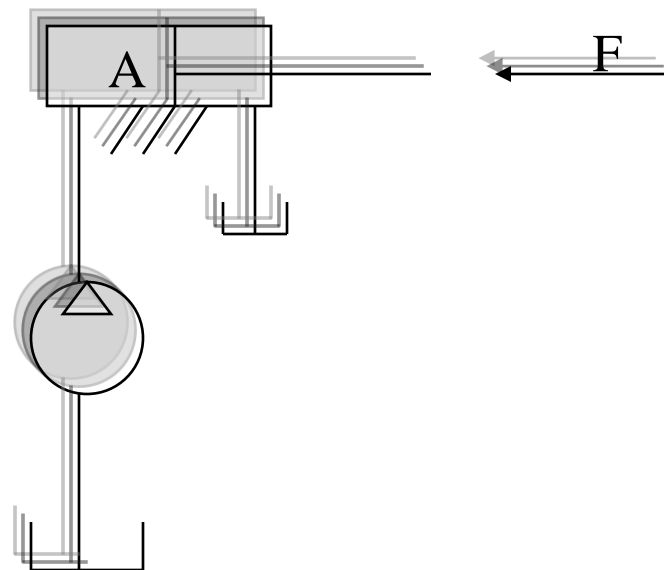
$F \uparrow$

$p \uparrow$

$F \downarrow$

$p \downarrow$

结论：液压系统的工作压力
取决于负载，并且随着负
载的变化而变化。





武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

2、2、5 液体对固体壁面的 作用力

作用在平面上的总作用力

作用在曲面上的总作用力

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

作用在平面上的总作用力

作用在平面上的总作用力

$$P = p \cdot A$$

如：液压缸，若设活塞直径为**D**,则

$$P = p \cdot A = p \cdot \pi D^2 / 4$$



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

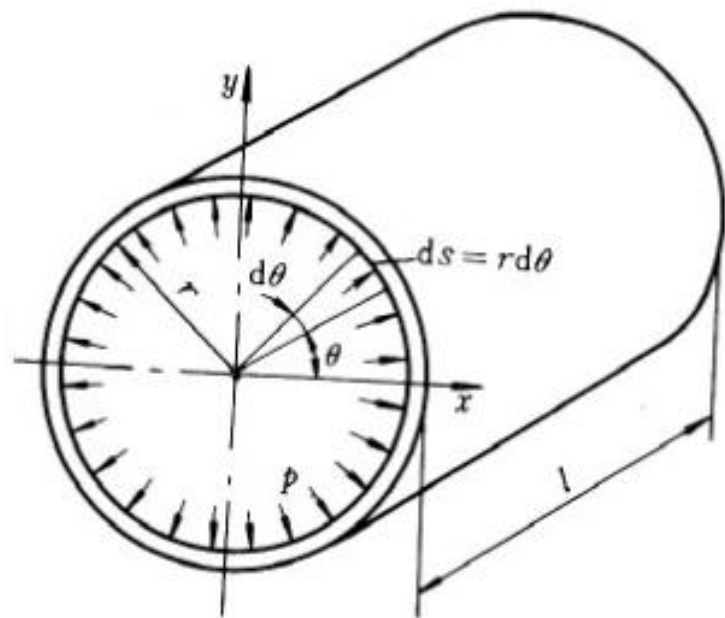
[网络课件](#)

作用在曲面上的总作用力

作用在曲面上的总作用力

$$F_x = p \cdot A_x$$

结论：曲面在某一方向上所受的作用力，等于液体压力与曲面在该方向的垂直投影面积之乘积。



物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液体动力学

目的任务： 了解流动液体特性、传递规律
掌握动力学三大方程、流量和
结论

重点难点： 流量与流速关系及结论三大方程
及结论、物理意义

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

2.3 液体动力学

研究内容： 研究液体运动和引起运动的原因，即研究液体流动时流速和压力之间的关系（或液压传动两个基本参数的变化规律）

主要讨论： 动力学三个基本方程



2.3.1、基本概念

理想液体、恒定流动

1, 理想液体: 既无粘性又不可压缩的液体

2, 恒定流动 (稳定流动、定常流动):

流动液体中任一点的 p 、 u 和
 ρ 都不随时间而变化流动.



基本概念

流线、流管和流束

- 1 流线：**某一瞬时液流中各处质点运动状态的一条条曲线
- 2 流束：**通过某截面上所有各点作出的流线集合构成流束
- 3 通流截面：**流束中所有与流线正交的截面
(垂直于液体流动方向的截面)



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

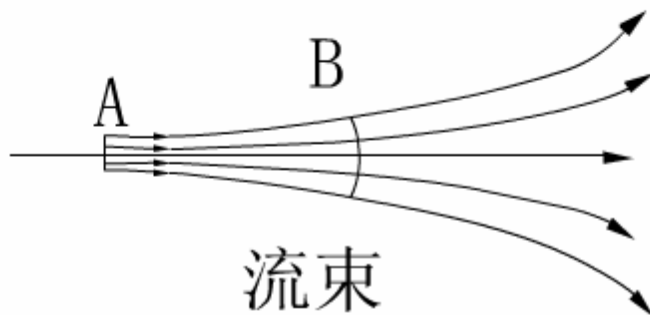
[网络课件](#)



流线



流管

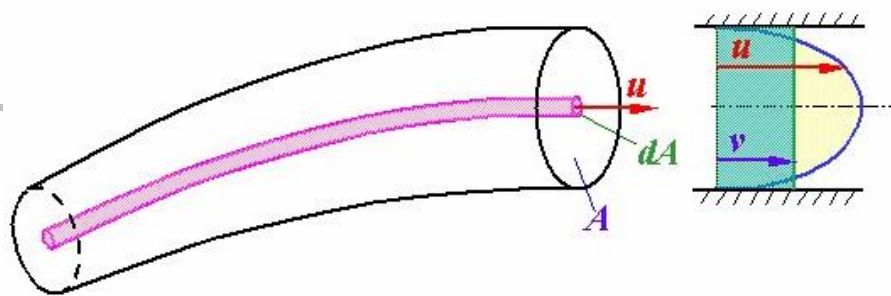


流束



2、3、1、基本概念

流量和平均流速



流量：单位时间内流过某通流截面液体体积 q

$$dq = v/t = u dA$$

整个过流断面的流量：

$$q = \int_A u dA$$

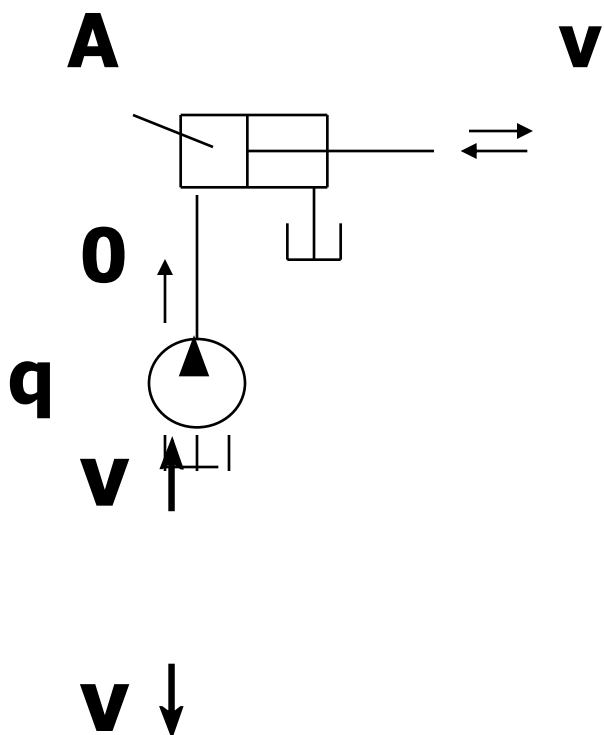
平均流速：通流截面上各点均匀分布假想流速

$$q = vA = \int_A u dA$$

$$v = q/A$$



液压缸的运动速度



$$v = q/A$$

$$q = 0 \quad v =$$

$$q \uparrow$$

$$q \downarrow$$

结论：液压缸的运动速度取决于进入



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

2.3.2 连续性方程

质量守恒定律在流体力学中的应用

1 连续性原理：理想液体在管道中恒定流动时，根据质量守恒定律，液体在管道内既不能增多，也不能减少，因此单位时间内流入液体的质量应恒等于流出液体的质量。

物流工程学院



连续性方程

2 连续性方程: $m_1 = m_2$

$$\rho_1 u_1 dA_1 dt = \rho_2 u_2 dA_2 dt$$

若忽略液体可压缩性 $\rho_1 = \rho_2 = \rho$

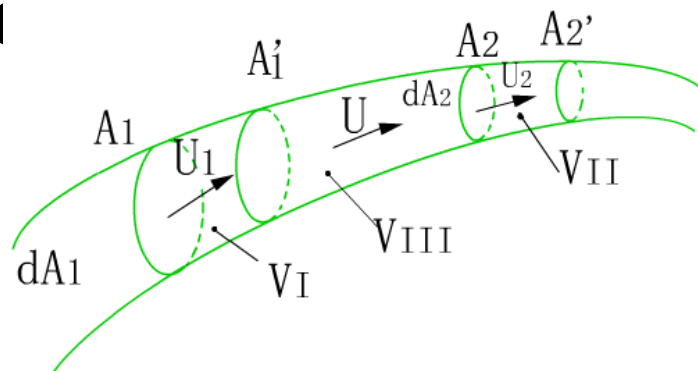
$$u_1 dA_1 = u_2 dA_2$$

$$\int_A u_1 dA_1 = \int_A u_2 dA_2$$

则 $v_1 A_1 = v_2 A_2$

或 $q = vA = \text{常数}$

结论: 液体在管道中流动时，流过各个断面的流量是相等的，因而流速和过流断面成反比。



连续方程推导



2.3.3 伯努利方程

能量守恒定律在流体力学中的应用

能量守恒定律：理想液体在管道中稳定流动时，根据能量守恒定律，同一管道内任一截面上的

总

能量应该相等。

或：外力对物体所做的功应该

等

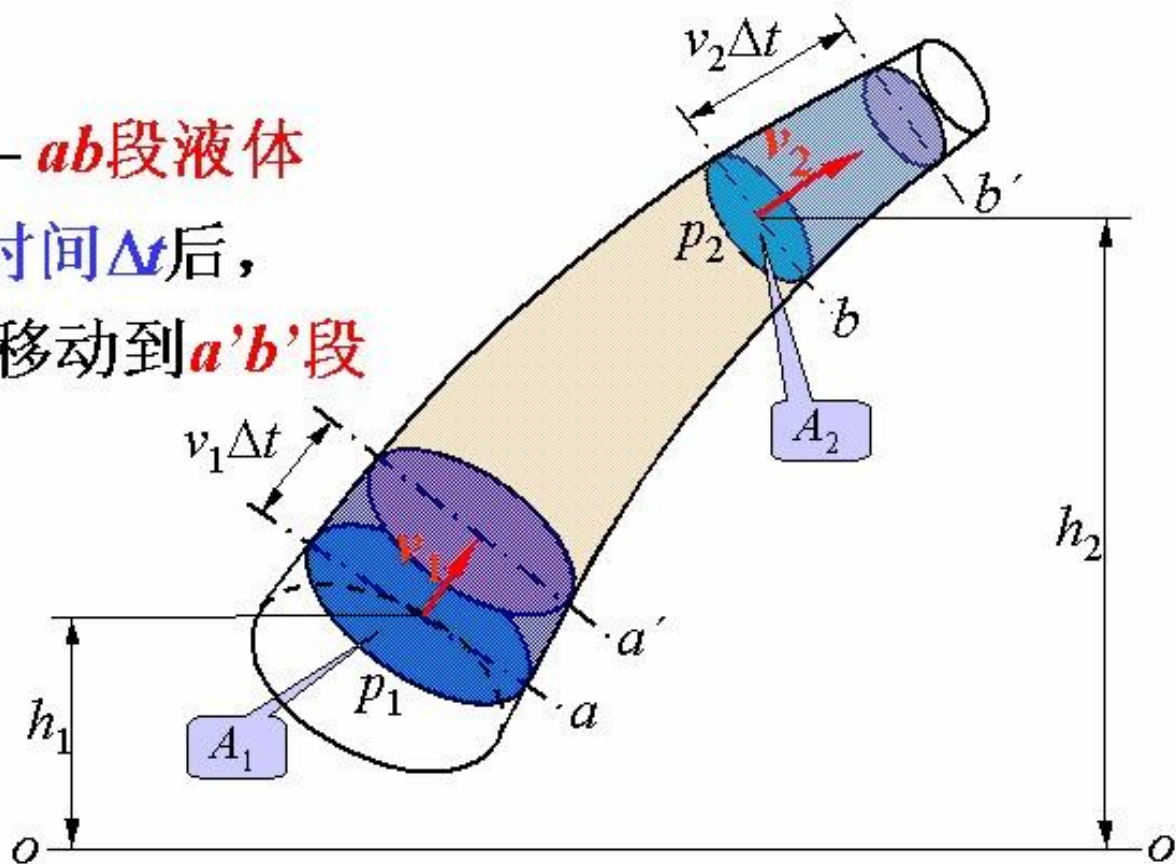
于该物体机械能的变化量。



理想液体伯努利方程的推导

研究模型

- 恒定流动
- 研究对象— ***ab***段液体
- 经过很短时间 Δt 后，
- ***ab***段液体移动到***a'b'***段





武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

理想液体伯努利方程

1 外力对液体所做的功

$$W = p_1 A_1 v_1 dt - p_2 A_2 v_2 dt = (p_1 - p_2) \Delta V$$

2 机械能的变化量

位能的变化量: $\Delta E_p = mg\Delta h = \rho g \Delta V (z_2 - z_1)$

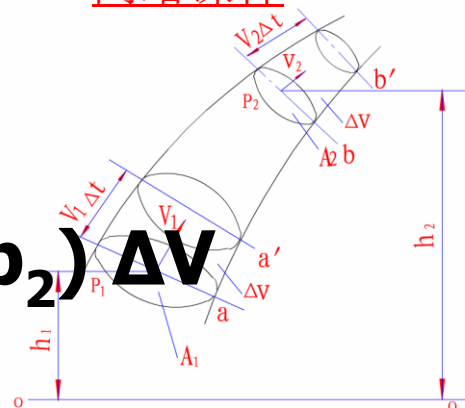
动能的变化量: $\Delta E_k = m\Delta v^2/2 = \rho\Delta V(v_2^2 - v_1^2)/2$

根据能量守恒定律, 则有: $W = \Delta E_p + \Delta E_k$

$$(p_1 - p_2) \Delta V = \rho g \Delta V (z_2 - z_1) + \rho\Delta V(v_2^2 - v_1^2)/2$$

整理后得单位重量理想液体伯努利方程为:

$$p_1 + \rho g z_1 + \rho v_1^2 / 2 = p_2 + \rho g z_2$$



理想流体伯努利方程的推导

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

理想液体伯努利方程的物理意义

在密闭管道内作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，三种能量之间可以互相转化，但各个过流断面上三种能量之和恒为定值。

物流工程学院



实际液体伯努利方程

- ∴ 实际液体具有粘性
 - ∴ 液体流动时会产生内摩擦力，从而损耗能量
- 故 应考虑能量损失 h_w ，并考虑动能修正系数

则实际液体伯努利方程为：

$$p_1/\rho g + Z_1 + \alpha_1 v_1^2 / 2g = p_2/\rho g + Z_2 + \alpha_2 v_2^2 / 2g + h_w$$

层流 $\alpha=2$

$\alpha \{$

紊流 $\alpha=1$

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \rho g h_w$$



伯努利方程应用举例

- 分析吸油高度 H 对泵工作性能影响
- 解：对油箱液面截面1-1和泵进口处管道截面2-2之间列伯努利方程

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

式中 $p_1 = 0$, $h_1 = 0$, $v_1 \approx 0$, $h_2 = H$ 代入得

$$p_2 = - \left(\rho gH + \frac{1}{2} \rho \alpha_2 v_2^2 + \Delta p_w \right)$$

由上式可知，

当 $H > 0$, $p_2 < 0$, 泵进口处的绝对压力小于大气压力，形成真空，油靠大气压力压入泵内。

当 $H < 0$, $p_2 > 0$, 泵进口处不形成真空，油自行灌入泵内。

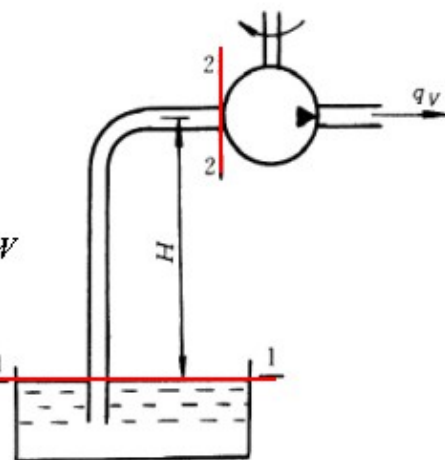


图 2-14 液压泵装置



应用伯努利方程时必须注意的问题

- (1) 断面**1**、**2**需顺流向选取（否则 h_w 为负值），且应选在缓变的过流断面上。
- (2) 断面中心在基准面以上时， z 取正值；反之取负值。通常选取特殊位置的水平面作为基准面。



2、3、4 动量方程

动量定理在流体力学中的应用

动量定理：作用在物体上的外力等于物体单位时间内动量的变化量。

即 $\Sigma \mathbf{F} = d(\mathbf{mv}) / dt$

考虑动量修正问题，则有：

$$\therefore \Sigma \mathbf{F} = \rho q (\beta_2 \mathbf{v}_2 - \beta_1 \mathbf{v}_1)$$

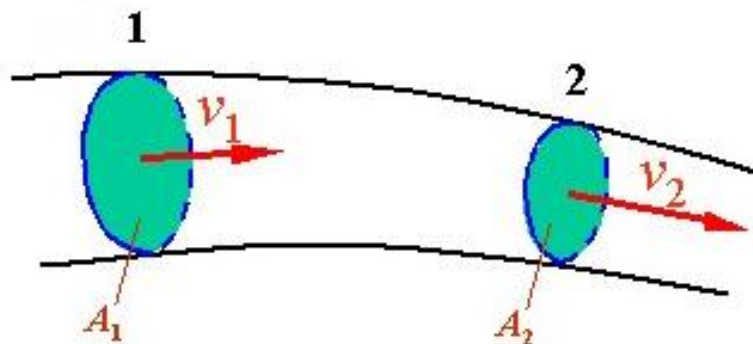
层流 $\beta = 1.33$

$$\beta <$$

紊流 $\beta = 1$



动量方程



X向动量方程:

$$\Sigma F_x = \rho q (\beta_2 v_{2x} - \beta_1 v_{1x})$$

X向稳态液动力 :

$$F'_x = -\Sigma F_x = \rho q (\beta_1 v_{1x} - \beta_2 v_{2x})$$

结论: 作用在滑阀阀芯上的稳态液动力总是力图使阀口关闭。



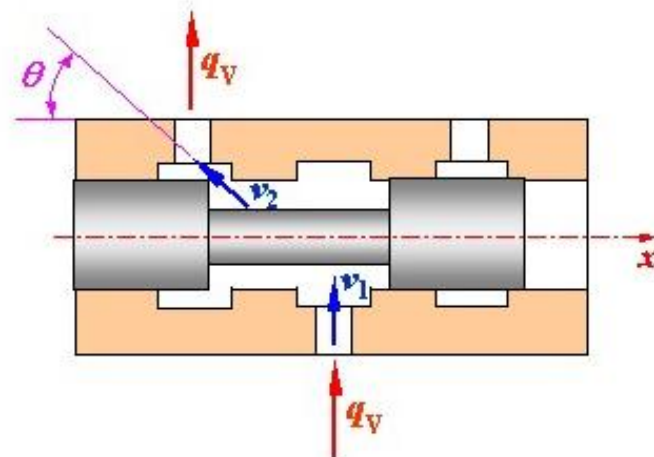
动量方程实例

- **求：**液流通过滑阀时，对阀芯的轴向作用力的大小

- **解：**液动力

$$\begin{aligned} F_x' &= \rho q_v [\beta_1 v_1 \cos 90^\circ - (-\beta_2 v_2 \cos \theta)] \\ &= \rho q_v \beta_2 v_2 \cos \theta \end{aligned}$$

- 流动液体存在一个液动力，这个力企图使阀口关闭。





武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

2、4 管路中液体的压力损失

目的任务： 了解损失的类型、原因

掌握损失定义减小措施

重点难点： 两种损失减小措施



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

管路中液体的压力损失

- ∴ 实际液体具有粘性
- ∴ 流动中必有阻力，为克服阻力，须消耗能量，造成能量损失(即压力损失)

分类：程压力损失、局部压力损失



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

2.4.1 液体的流动状态

层流和紊流

层流： 液体的流动是分层的，层与层之间互不干扰。

紊流（湍流）： 液体流动不分层，
做混杂紊乱流动。



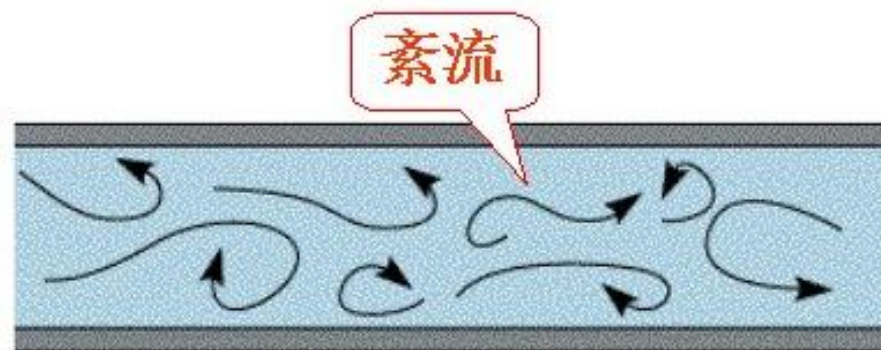
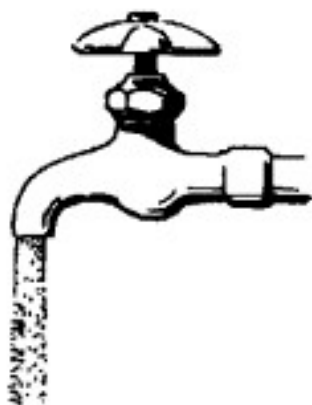
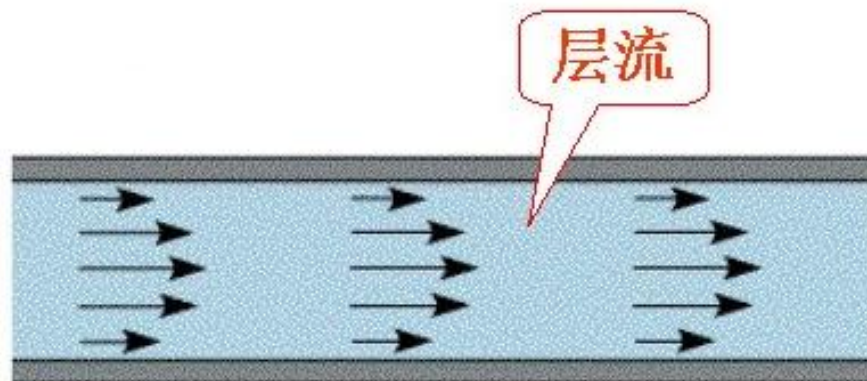
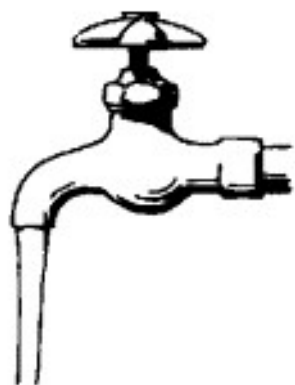
武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)



物流工程学院



武汉理工大学

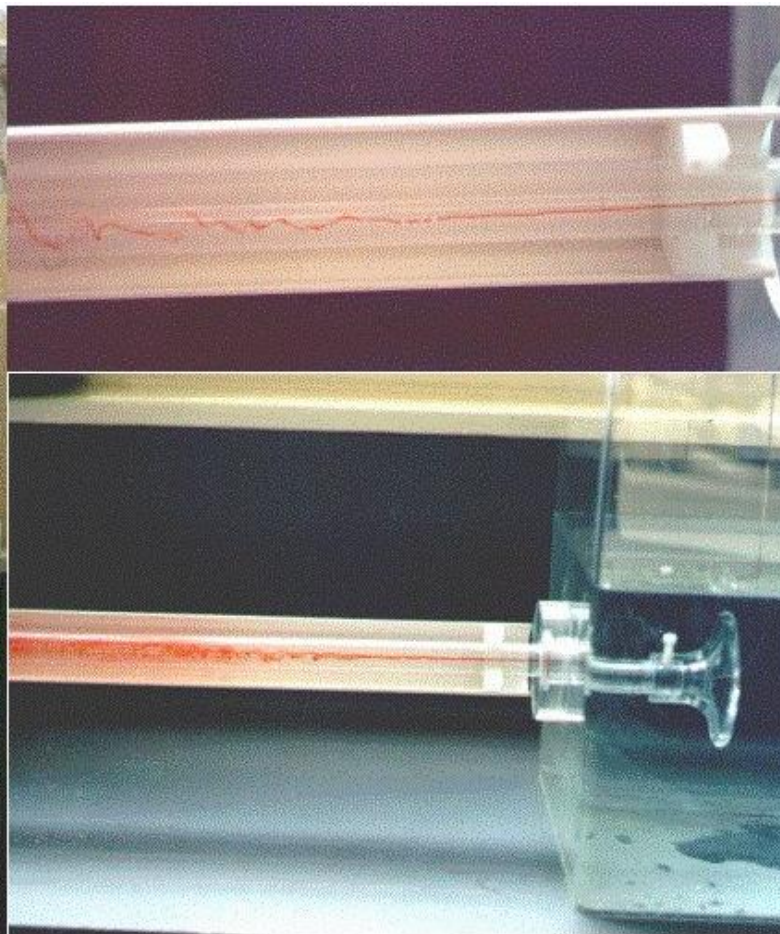
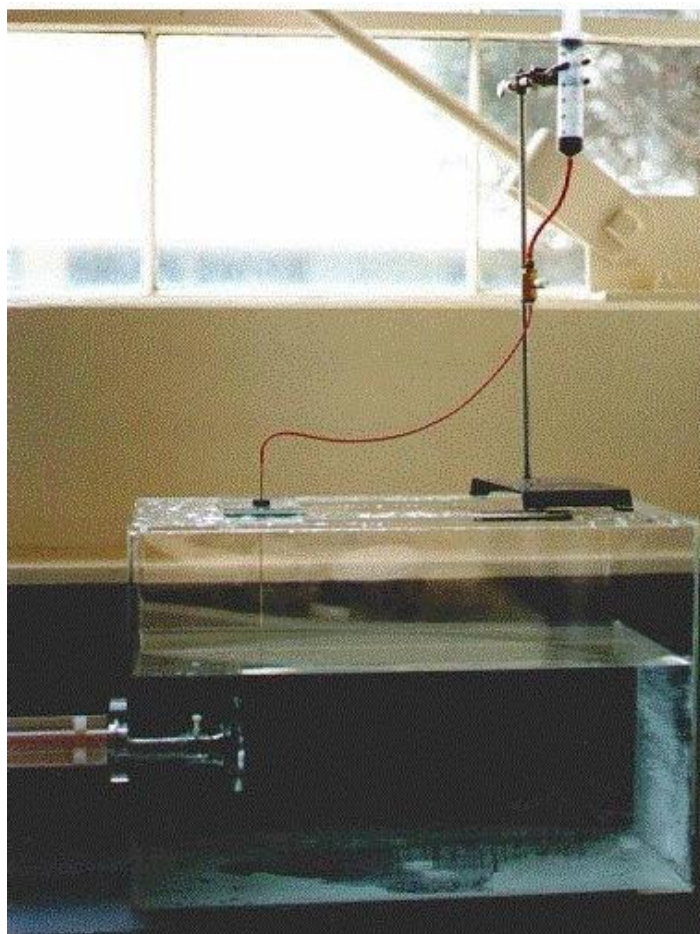
《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

雷诺数实验



物流工程学院



武汉理工大学

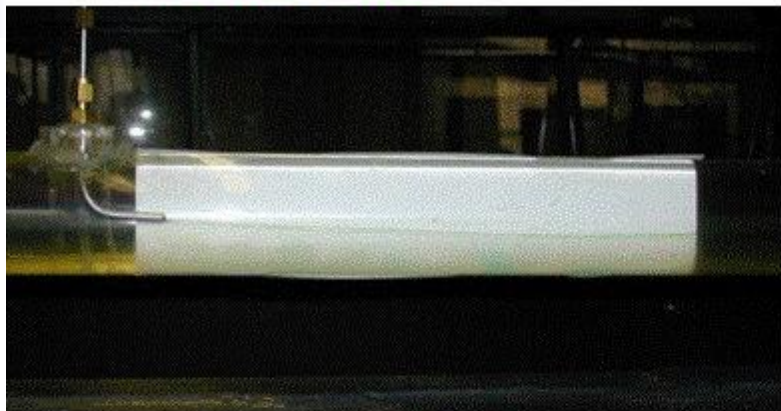
《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

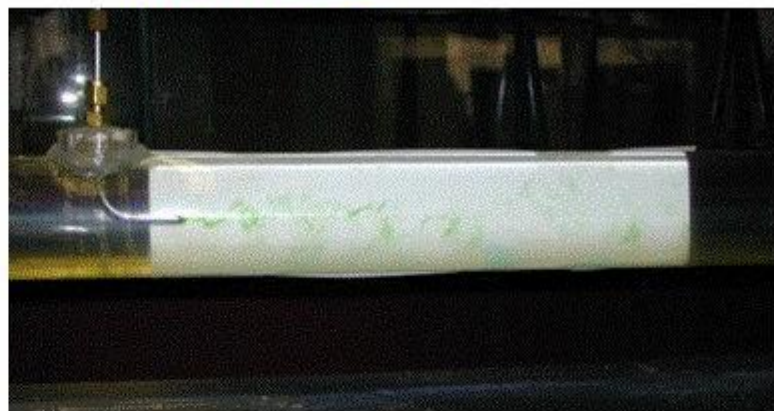
[首页](#)

[网络课件](#)

- 层流状态



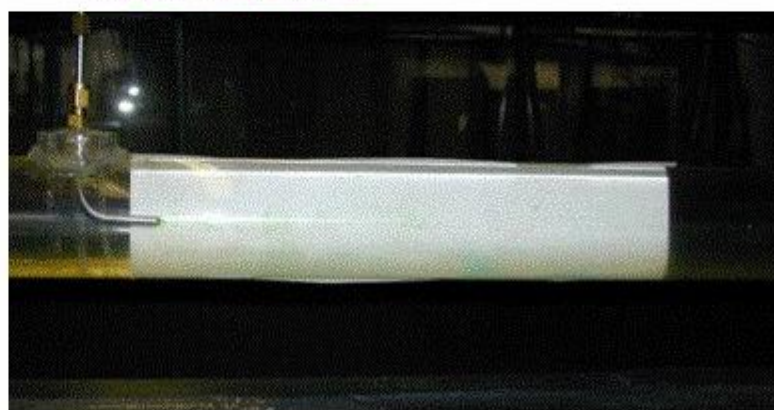
- 临界状态



- 临界状态



- 紊流状态



物流工程学院



雷诺数

圆形管道雷诺数: $Re = dv/v$

非圆管道截面雷诺数: $Re = d_H v/v$

过流断面水力直径: $d_H = 4A/\chi$

水力直径大，液流阻力小，通流能力大。

$Re < Re_c$ 为层流

临界雷诺数：判断液体流态依据 $< (Re_c \text{ 见表 } 2 \sim 4 \text{ 1})$

$Re > Re_c$ 为紊流

雷诺数物理意义：液流的惯性力对粘性力的无因次比



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

2.4.2 沿程压力损失（粘性损失）

定义：液体沿等径直管流动时，由于液体的粘性摩擦和质点的相互扰动作用，而产生的压力损失。



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

沿程压力损失产生原因

内摩擦—因粘性，液体分子间摩擦

摩擦 {

外摩擦—液体与管壁间

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

沿程压力损失（粘性损失）

流速分布规律

圆管层流的流量

圆管的平均流速

圆管沿程压力损失

圆管紊流的压力损失

物流工程学院



流速分布规律

液体在等径水平直管中作层流运动，沿管轴线取一半径为 r ，长度为 l 的小圆柱体两端面压力为 p_1 、 p_2 ，侧面的内摩擦力为 F ，匀速运动时，其受力平衡方程为：

$$(p_1 - p_2) \pi r^2 = F$$

$$\because F = -2\pi r l \mu du/dr \quad \Delta p = p_1 - p_2$$

$$\therefore du = -r dr \Delta p / 2\mu l$$

对上式积分，并应用边界条件 $r=R$ 时， $u=0$ ，得

$$u = (R^2 - r^2) \Delta p / 4\mu l$$



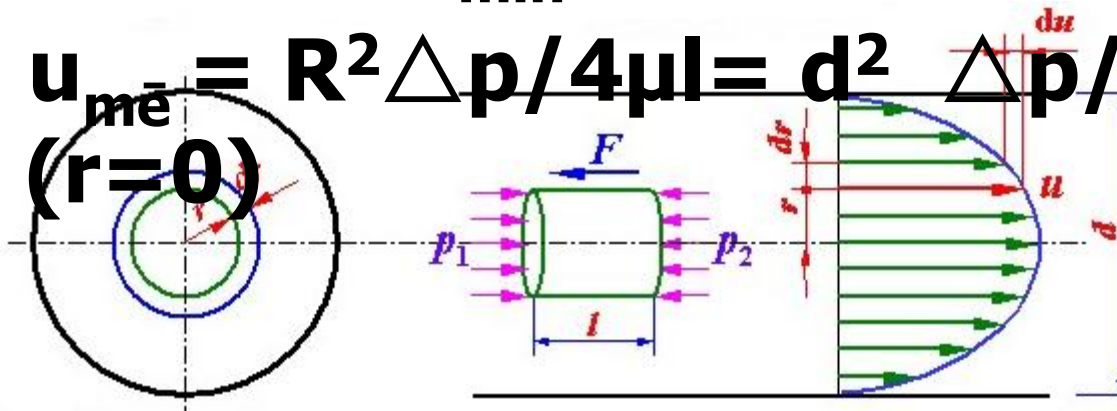
流速分布规律

结论：液体在圆管中作层流运动时，速度
对称于圆管中心线并按抛物线规
律
分布。

$$u_{\min} = 0 \quad (r=R)$$

$$u_{\max} = R^2 \Delta p / 4\mu l = d^2 \Delta p / 16\mu l$$

($r=0$)





圆管层流的流量

$$\therefore dA = 2\pi r dr$$

$$\therefore dq = u dA = 2\pi u r dr$$

$$= 2\pi(R^2 - r^2) \Delta p / 4\mu l$$

故 $q = \int_0^R 2\pi \Delta p / 4\mu l \cdot (R^2 - r^2) r dr$

$$= \Delta p \pi R^4 / 8\mu l$$

$$= \Delta p \pi d^4 / 128\mu l$$



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

圆管的平均流速

$$v = q / A$$

$$= \pi n d^4 / 128 \mu l \quad \pi n d^2 / 4$$

$$= \Delta p d^2 / 32 \mu l$$

$$v = u_{\max} / 2$$



圆管沿程压力损失

$$\Delta p_f = 128\mu l q / \pi d^4 = 8\mu l q / \pi R^4$$

将 $q = \pi R^2 v$, $\mu = \rho \nu$ 代入上式并简化得:

$$\Delta p_f = \Delta p = 32\mu l v / d^2$$

结论: 液流沿圆管作层流运动时, 其沿程压力损失与管长、流速、粘度成正比, 而与管径的平方成反比。



圆管沿程压力损失

$$\because \mu = \rho \nu \quad R_e = dv/\nu \quad \lambda = \frac{64}{R_e}$$

$$\therefore \Delta p_f = \frac{64\nu}{dv} l/d \rho v^2/2$$

$$= \frac{64}{R_e} \cdot l/d \rho v^2/2$$

故 $\Delta p_f = \lambda \cdot l/d \rho v^2/2$

理论值 $64 / R_e$

$$\lambda <$$

实际值 $75 / Re$



圆管紊流的压力损失

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda \quad l/d \quad \rho \quad v^2/2$$

$$\lambda = 0.3164 R_e^{-0.25} \quad (10^5 > R_e > 4000)$$

$$\lambda = 0.032 + 0.221 R_e^{-0.237} \quad (3 \times 10^6 > R_e > 10^5)$$

$$\lambda = [1.74 + 2 \lg (d/\Delta)]^{-2} \quad (R_e > 3 \times 10^6 \text{ 或 } R_e > 900d/\Delta)$$

∴ 紊流运动时， Δp_{λ} 比层流大

∴ 液压系统中液体在管道内应尽量作层流运动



2、4、3 局部压力损失

定义：液体流经管道的弯头、接头、突变截面以及阀口 滤网等局部装置时，液流会产生旋涡，并发生强烈的紊动现象，由此而产生的损失称为局部损失。



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

局部压力损失产生原因

产生原因：碰撞、旋涡（突变管、弯管）

产生附加摩擦

附加摩擦：只有紊流时才有，是由于分子作横向运动时产生的摩擦，

即

速度分布规律改变，造成液

体

的附加摩擦。

物流工程学院



局部压力损失公式

$$\Delta p_v = \zeta \rho v^2 / 2$$

— ζ — 局部阻力系数，具体数值可查有关手册

图例						
类型	管道缩小	T型三通	90°弯曲	双直角	90°直角	阀
ζ	0.5	1.3	0.5 ~ 1	2	1.2	5...15



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

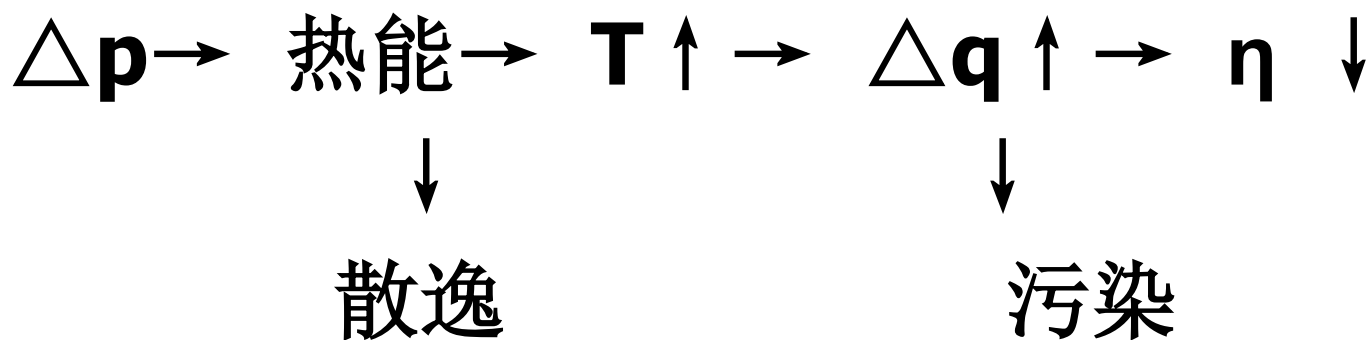
标准阀类元件局部压力损失

$$\Delta p_v = \Delta p_n (q_v / q_{vn})^2$$



2、4、4管路系统的总压力损失

$$\begin{aligned}\Sigma \Delta p &= \Sigma \Delta p_{\lambda} + \Sigma \Delta p_v \\ &= \Sigma \lambda \cdot l / d \cdot \rho v / 2 + \Sigma \zeta \rho v^2 / 2\end{aligned}$$





例

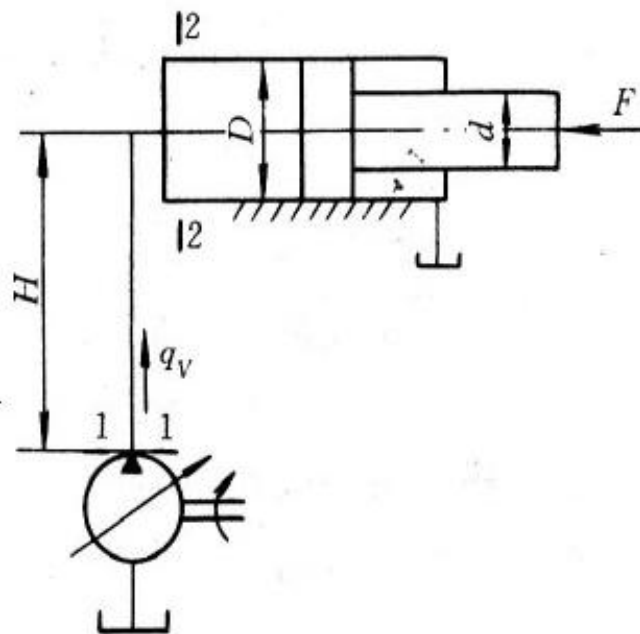
- 已知:

$$q_V = 1.5 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}, \quad D = 100 \text{mm}, \\ F = 30000 \text{N}, \quad d = 20 \text{mm} \text{ (管径)}, \\ H = 5 \text{m}, \quad \Sigma \zeta = 7.2, \quad \rho = 900 \text{kg/m}^3, \\ \nu = 46 \text{mm}^2/\text{s}$$

- 求: $\Sigma \Delta p_w$, p_1

- 解:

- 进油管内流速 $v_1 = q_V / (\pi d^2 / 4) = 4.77 \text{m/s}$
- 判断流态, $Re_1 = v_1 d / \nu = 2074 < 2320$ 为层流
- 压力损失 $\Sigma \Delta p_w = \Sigma \Delta p_\lambda + \Sigma \Delta p_\zeta = 0.166 \times 10^6 \text{Pa}$





例 (续)

- 对1—1和2—2之间列伯努利方程

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho \alpha_1 v_1^2 = p_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho \alpha_2 v_2^2 + \Delta p_w$$

其中 $p_2 = \frac{F}{\pi D^2/4} = 3.81 \times 10^6 \text{ Pa}$

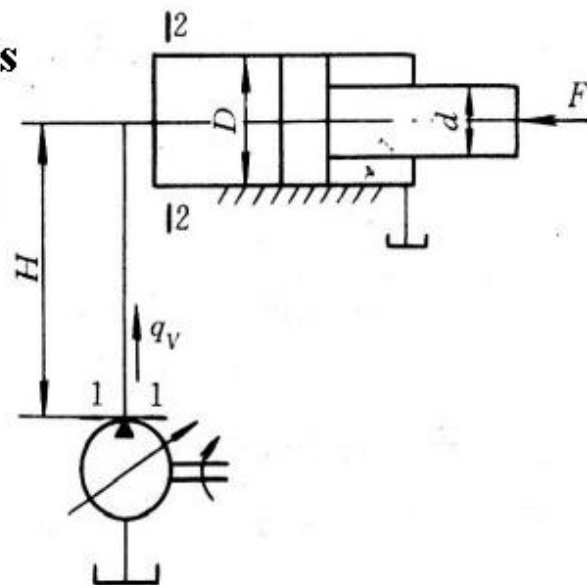
$$v_1 = 4.77 \text{ m/s}, \quad v_2 = \frac{q_V}{\pi D^2/4} = 0.19 \text{ m/s}$$

$$Re_2 = v_2 D / \nu = 413 < 2320 \text{ 为层流}$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 = 2, \quad h_1 = 0, \quad h_2 = 5 \text{ m},$$

$$\Sigma \Delta p_w = 0.166 \times 10^6 \text{ Pa}$$

计算出 $p_1 = 4 \times 10^6 \text{ Pa}$





减小 Δp 的措施

- 1 尽量 $\downarrow L$, \downarrow 突变
- 2 \uparrow 加工质量, 力求光滑, v 合适
- 3 $\uparrow A$, $\downarrow v$

过高 $\Delta p \uparrow \because \Delta p \propto v^2$

其中 v 的影响最大 $<$

过低 尺寸 \uparrow 成本 \uparrow

\therefore 一般有推荐流速可供参考, 见有关手册。一般在液压传动中, 可将压力损失写成如下形式:

$$\Sigma \Delta p = p_1 - p_2$$



2、5 液体流经孔口和缝隙流量——压力特性

2、6 液压冲击和气穴现象

目的任务:

- 了解流量公式、特点、两种现象 产生原因
- 掌握薄壁孔流量公式及通用方程、两种现象危害及消除



2、5 液体流经孔口和缝隙流量——压力特性

2、6 液压冲击和气穴现象

重点难点:

- 薄壁小孔流量公式及特点
- 流量通用方程及各项含义
- 平行平板缝隙和偏心圆环缝隙流量公式之结论
- 两种现象危害及消除方法



提问作业:

- 1 动力学三大方程各是什么？分别是刚体力学中哪些定律在流体力学中的具体应用？
- 2 液压传动中液体的流态和压力损失有哪几种？其判别方法和产生原因各是什么？
- 3 液压传动油管中为何种流态？产生什么损失？



2.5.1 流经孔口和缝隙的流量—压力特性

概述：孔口和缝隙流量在液压技术中占有很重要的地位，它涉及液压元件的密封性，系统的容积效率，更为重要的是它是设计计算的基础，因此：

小孔虽小（直径一般在**1mm**以内），
缝隙虽窄（宽度一般在**0、1mm** 以下），
但其作用却不可等闲视之。



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件
第二章 液压传动基础知识
[首页](#) [网络课件](#)

小孔流量—压力特性

- 薄壁小孔流量压力特性
- 短孔和细长孔的流量压力特性
- 流量通用方程



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

小孔流量—压力特性

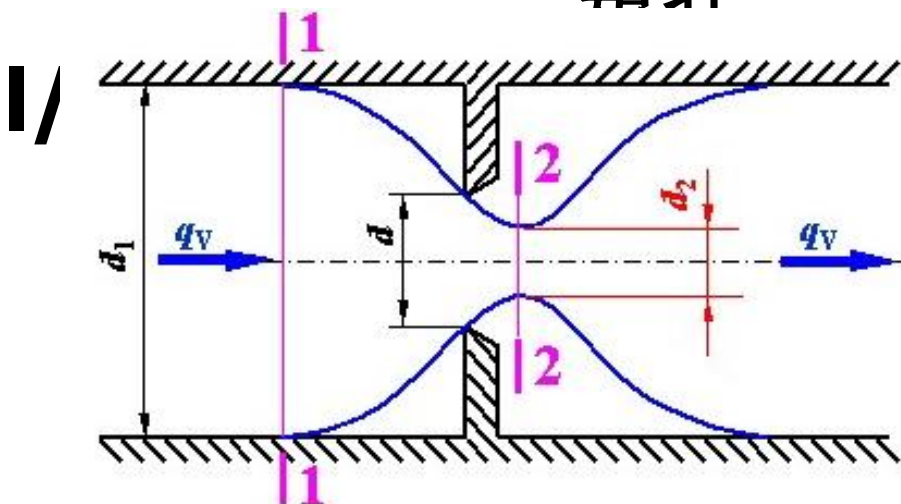
薄壁小孔 $l/d \leq$

0.5

孔口分类 { 细长小孔 $l/d > 4$

针孔

$0.5 <$



物流工程学院

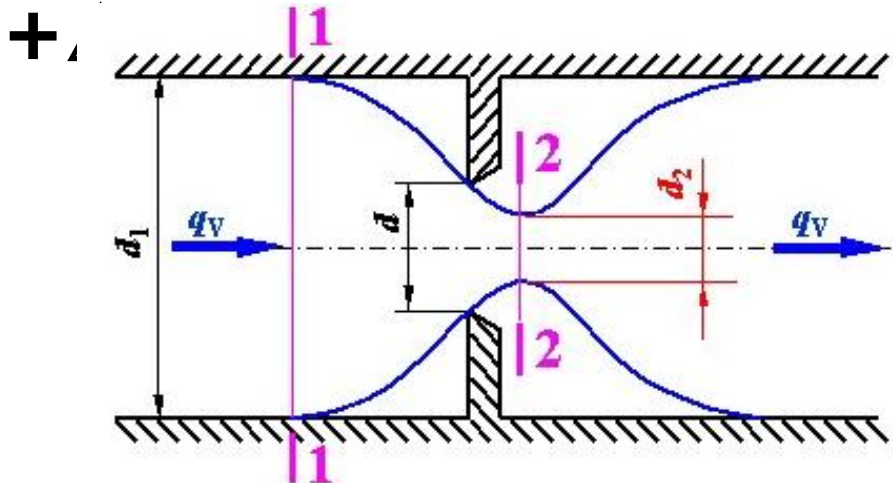


薄壁小孔流量压力特性

如图

取孔前通道断面为**1—1**断面，收缩断面为**2—2**断面，管道中心为基准面， $z_1 = z_2$ ，列伯努利方程如下：

$$p_1 + \rho \alpha_1 v_1^2 / 2 = p_2 + \rho \alpha_2 v_2^2 / 2$$





$v_1 \ll v_2$ v_1 可忽略不计，收缩断面流动是紊流 $\alpha_2=1$;

而 Δp_w 仅为局部损失 即 $\Delta p_w = \zeta \rho v_2^2 / 2$

$$\therefore v_2 = \sqrt{2 / \rho (p_1 - p_2) / \alpha_2 + \xi} = C_v \sqrt{2 \Delta p / \rho}$$

故 $q = A_2 v_2 = C_c A_T v_2 = C_v C_c A_T \sqrt{2 \Delta p / \rho} = C_q A_T \sqrt{2 \Delta p / \rho}$

$$C_q = C_v C_c \quad C_c = A_2 / A_T = d_2^2 / d^2 \quad A = \pi d^2 / 4$$

液流完全收缩情况下 ($D/d \geq 7$):

当 $Re \leq 10^5$ $C_q = 0.964 Re^{-0.05}$

当 $Re > 10^5$ $C_c = 0.61 \sim 0.63$

$$C_v = 0.97 \sim 0.98$$

$$C_q = 0.6 \sim 0.62$$

液流不完全收缩时 ($D/d < 7$),



结论： $\because q \propto \sqrt{\Delta p}$ ， 与 μ 无关。

\therefore 流过薄壁小孔的流量不受
油温变化的影响。



短孔和细长孔的流量压力特性

短孔: $q = C_q A_T \sqrt{2\Delta p / \rho}$ C_q 可查

细长孔: $q = \pi d^4 \Delta p / 128\mu l$

$$= \pi d^2 \Delta p / 32\mu l = CA\Delta p$$

结论: $\because q \propto \Delta p$ 反比于 μ

\therefore 流量受油温变化影响较大 ($T \uparrow \mu \downarrow q \uparrow$)



流量通用方程

∴ 薄壁孔: $q = C_q A_T \sqrt{2\Delta p / \rho} = C_q \sqrt{2/\rho} A_T \sqrt{\Delta p}$

短孔: $q = C_q A_T \sqrt{2\Delta p / \rho} = C_q \sqrt{2/\rho} A_T \sqrt{\Delta p}$

细长孔: $q = \pi d^4 \Delta p / 128\mu l = 1/32\mu l \pi d^4 / 4 \Delta p$

∴ 流量通用方程: $q = C A_T \Delta p^\phi$



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液体流经缝隙的流量—压力特性

平面缝隙

常见缝隙 <

环状缝隙

压差流动

缝隙流动状况 <

剪切流动

物流工程学院



武汉理工大学

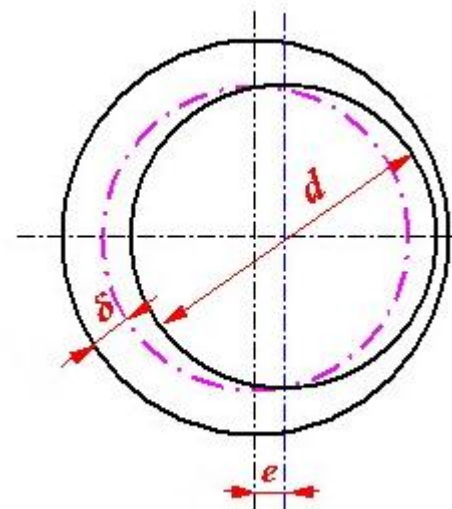
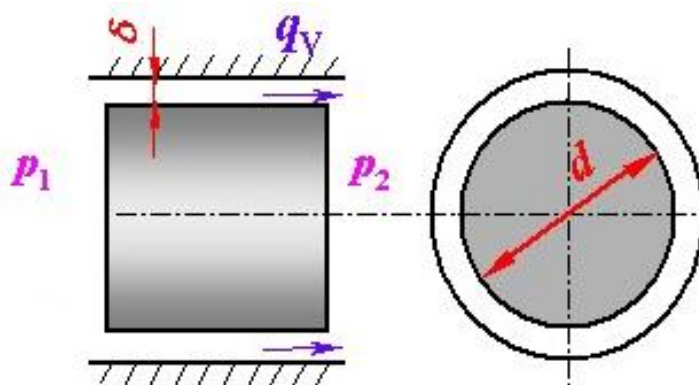
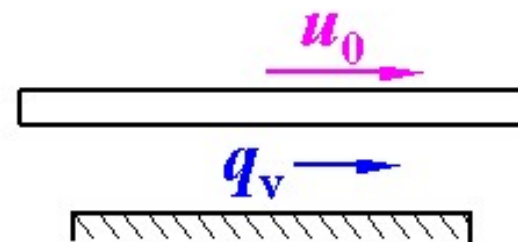
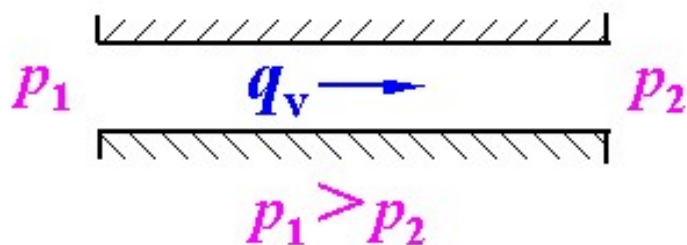
《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

缝隙流动的形式



物流工程学院



压差流动固定平行平板缝隙 流量压力特性

设缝隙度高为 δ ，宽度 b ，长为 l ，两端压力为 p_1 、 p_2 ，其压差为 ΔP ，从缝隙中取一微小六面体，左右两端所受压力为 p 和 $p+dp$ ，上下两侧面所受摩擦切应力为 $\tau + d\tau$ 和 τ ，则在水平方向受力平衡方程为：

$$p b dy + (\tau + d\tau) b dx = (p + dp) b dy + \tau b dx$$

整理后得： $d\tau/dy = dp/dx$



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件
第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

压差流动固定平行平板 缝隙的流量压力特性

$$\because \tau = \mu \, du/dy$$

$$\therefore d^2u/dy^2 = 1/\mu \cdot dp/dx$$

上式对 y 两次积分得： $u = dp/dx \cdot y^2/2\mu + C_1y + C_2$

由边界条件：当 $y = 0, u = 0$ $y = \delta, u = u_0$

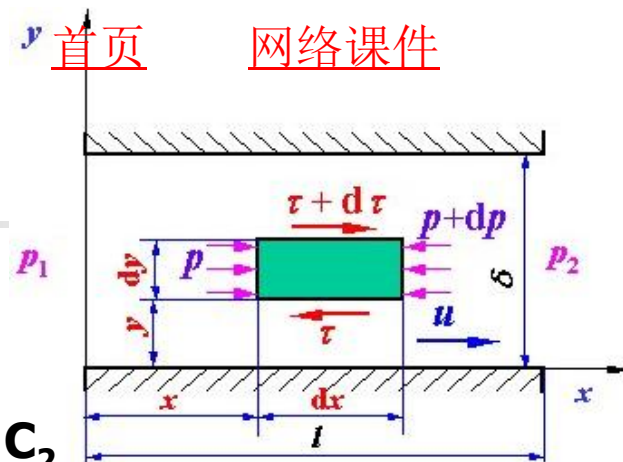
则有： $C_1 = -\delta \, dp/dx / 2\mu$, $C_2 = 0$

此外，在缝隙液流中，压力沿 x 方向变化率 dp/dx 是一常数，有：

$$dp/dx = p_2 - p_1 / l = -(p_1 - p_2) / l = -\Delta p / l$$

$$u = (\delta - y)y \cdot \Delta p / 2\mu l$$

$$\begin{aligned} \text{故 } q &= \int_0^h u b dy = b \int_0^h \Delta p (\delta - y)y dy / 2\mu l \\ &= b\delta^3 \Delta p / 12\mu l \end{aligned}$$



物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

压差流动固定平行平板缝隙 流量压力特性

结论：在压差作用下，通过固定平行平板缝隙的流量与缝隙高度的三次方成正比，这说明，液压元件内缝隙的大小对其泄漏量的影响是很大的。

物流工程学院



相对运动平行平板缝隙流量压力特性

相对运动平行平板缝隙
剪切流动时：

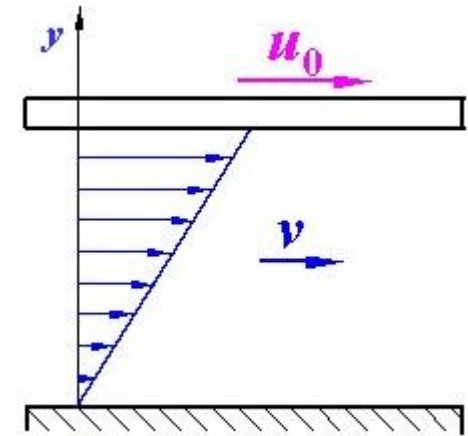
$$q = vb\delta / 2$$

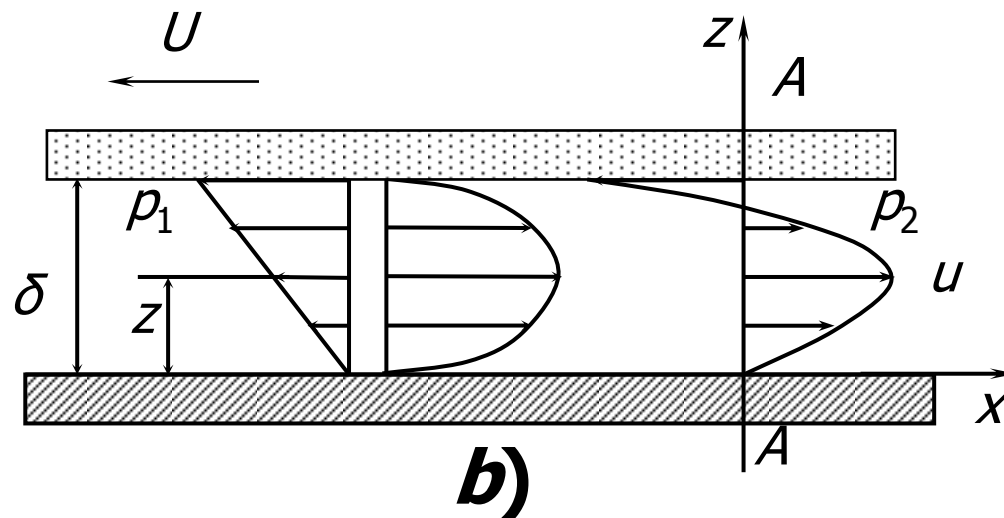
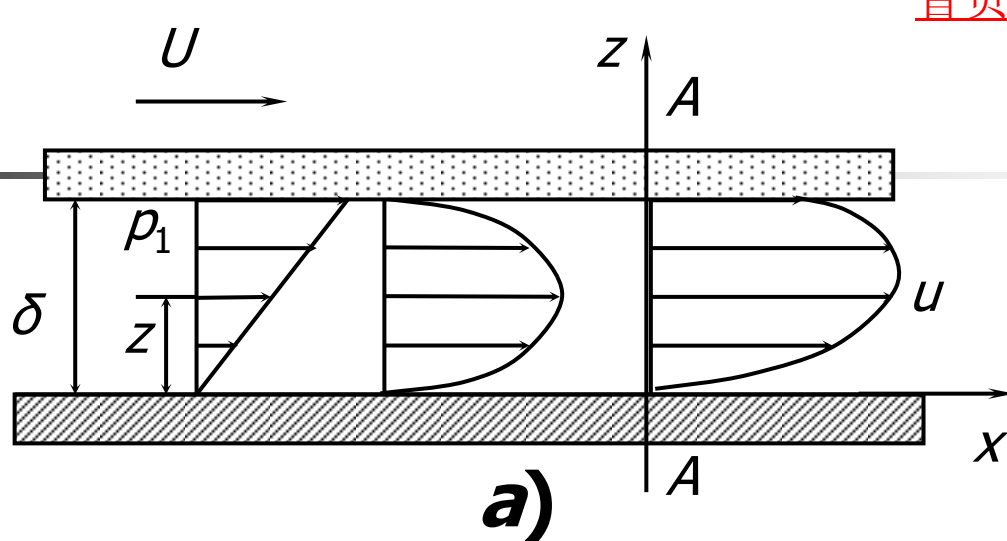
压差与剪切流动时：

$$q = b\delta^3 \Delta p / 12\mu l \pm vb\delta / 2$$

剪切与压差流动方向一致时，取正号

剪切与压差流动方向相反时，取负号







武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

液体流经环形缝隙的流量压力特性

液压缸缸筒与活

塞

环形缝隙 <

阀芯与阀孔

同心

分类 <

偏心

物流工程学院

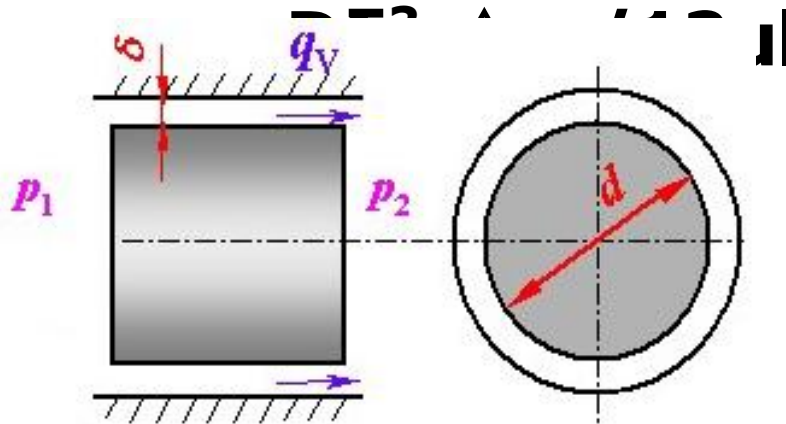


同心环形缝隙流量

设圆柱体直径为 **D** ，缝隙厚度为 **δ** ，缝隙长度为 **l** ，若沿圆周展开，相当于平行平板缝隙， **$b = \pi D$**

$$\therefore q = \pi D \delta^3 \Delta p / 12 \mu l \pm \pi D \delta v / 2$$

当相对速度 **$V = 0$** 时，其流量公式为：





偏心环形缝隙流量

设偏心距为 e ,则:

$$q = \pi D \delta^3 \Delta p (1 + 1.5 \varepsilon^2) / 12 \mu l \pm \pi D \delta v / 2$$

ε —相对偏心率 $\varepsilon = e / \delta$

当内外圆表面没有相对运动时:

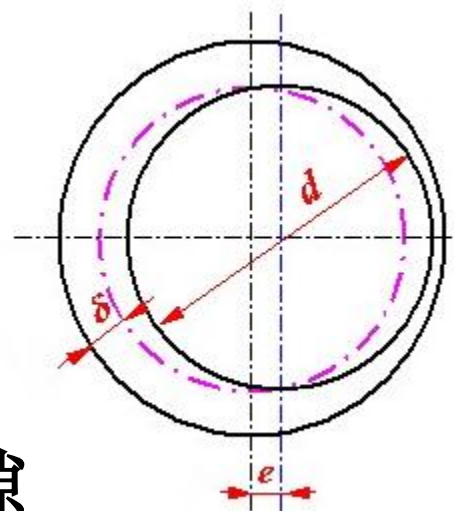
$$q = \pi D \delta^3 \Delta p (1 + 1.5 \varepsilon^2) / 12 \mu l$$

结论: 1) $\varepsilon = 1$ 时 $q_{\text{偏}} = 2.5 q_{\text{同}}$

2) $\varepsilon = 0$ 时 即同心圆环缝隙

3) $\because q$ 与 ε^2 成正比, $\varepsilon \uparrow \quad q \uparrow$

\therefore 应尽量做成同心, 以减小泄漏量。





武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

2.6 液压冲击和空穴现象

物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

2.6 液压冲击和气穴现象

液压冲击（水锤、水击）

气穴（空穴）现象

物流工程学院



液压冲击（水锤、水击）

液压冲击：液压系统中，由于某种原因（如速度急剧变化），引起压力突然急剧上升，形成很高压力峰值的现象。

如：急速关闭自来水管可能使水管发生振动，同时发出噪声。



液压冲击产生的原因

- 1) 迅速使油液换向或突然关闭油路，使液体受阻，动能转换为压力能，使压力升高。
- 2) 运动部件突然制动或换向，使压力升高。



液压冲击引起的结果

- ∴ 液压冲击峰值压力 \gg 工作压力
- ∴ 引起振动、噪声、导致某些元件如密封装置、管路等损坏；使某些元件（如压力继电器、顺序阀等）产生误动作，影响系统正常工作。



减小液压冲击的措施

- 1) 延长阀门关闭和运动部件制动换向的时间。
- 2) 限制管道流速及运动部件速度 $v_{\text{管}} < 5\text{m/s}$,
 $v_{\text{缸}} < 10\text{m/min}$ 。
- 3) 加大管道直径，尽量缩短管路长度。
- 4) 采用软管，以增加系统的弹性。



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

气穴（空穴）现象

气穴现象：液压系统中，由于某种原（如速度突变），使压力降低而使气泡

产生的现象。

物流工程学院



气穴现象产生原因

压力油流过节流口、阀口或管道狭缝时，速度升高，压力降低；液压泵吸油管道较小，吸油高度过大，阻力增大，压力降低；液压泵转速过高，吸油不充分，压力降低（如高空观缆）。



武汉理工大学

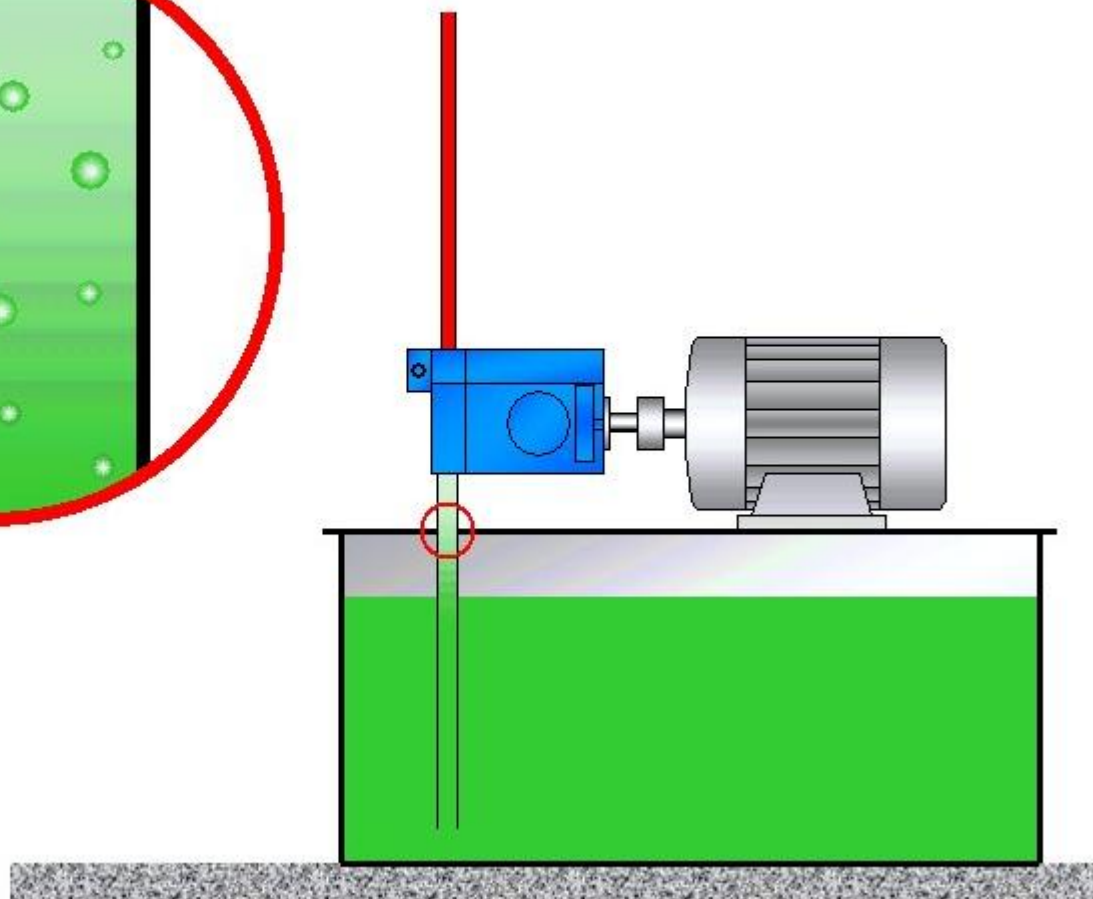
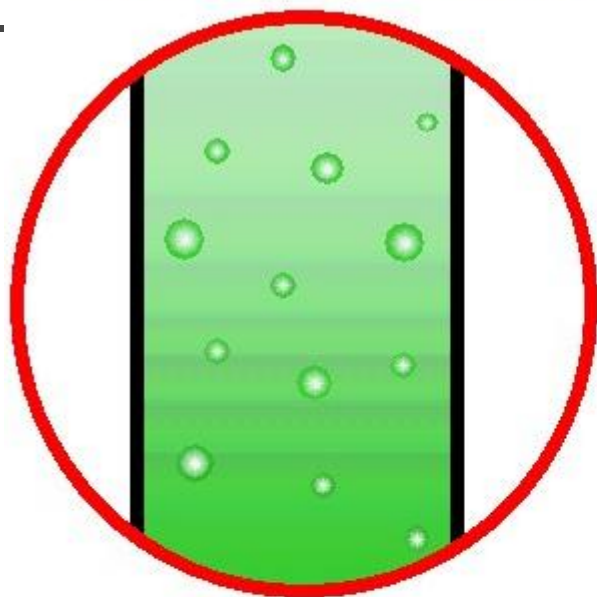
《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

泵吸油口处低压力形成气穴现象



物流工程学院



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件
第二章 液压传动基础知识
[首页](#) [网络课件](#)

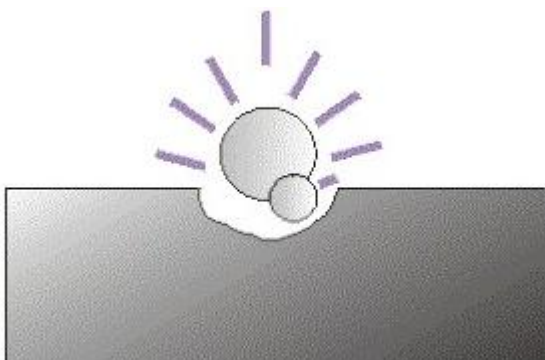
气体来源

穴	混入	气泡	轻微气
空气 <	溶入	气体分子	严重气穴
穴	蒸汽	汽泡	强烈气



气穴现象引起的结果

- 1 液流不连续，流量、压力脉动
- 2 系统发生强烈的振动和噪声
- 3 发生气蚀





减小气空穴的措施

- 1 减小小孔和缝隙前后压力降，希望 $p_1/p_2 < 3.5$ 。
- 2 增大直径、降低高度、限制流速。
- 3 管路要有良好密封性防止空气进入。
- 4 提高零件抗腐蚀能力，采用抗腐蚀能力强的金属材料，减小表面粗糙度。
- 5 整个管路尽可能平直，避免急转弯缝隙，合理配置。



武汉理工大学

《液压与气动》电子课件

第二章 液压传动基础知识

[首页](#)

[网络课件](#)

Thanks!

物流工程学院