液压与气压传动

主 讲：凌 杰

机械电子工程系

办公室：明故宫 17-423

Email: meejling@nuaa.edu.cn

PLC_NUAA

主讲教师

➢凌　杰 副教授，博士生导师，机械电子工程系

➢邮　箱：meejling@nuaa.edu.cn (课程问题优先联系邮箱)

➢办公室：明故宫17-423　　研究生工作室：17-612

先进液压与机电控制实验室

欢迎访问先进液压与机电控制实验室网站

网址：hydraulics.nuaa.edu.cn

或前往先进液压与机电控制实验室参观

地址：明故宫17-206

➢招 生：每年招收2~3名硕士生，1名博士生，本科大创欢迎咨询

PRC NUAA

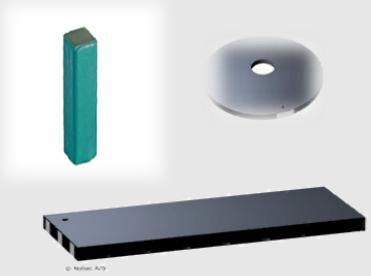
研究方向：精密驱动与控制

南京航空航天大学 NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

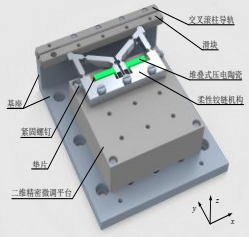
AHEC 先进液压与机电控制实验室 Advanced Hydraulic and Electromechanical Control

- **驱动层面**
  压电驱动器
  新原理与新构型
- **控制层面**
  智能机电液控制
- **系统层面**
  医疗手术机器人
  设计与控制

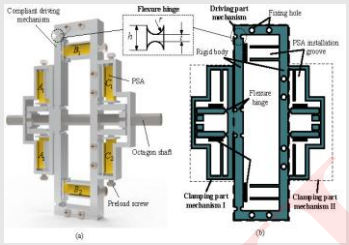
压电效应与压电智能材料



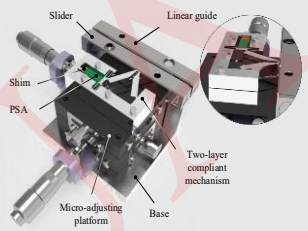
双向粘滑压电驱动新结构



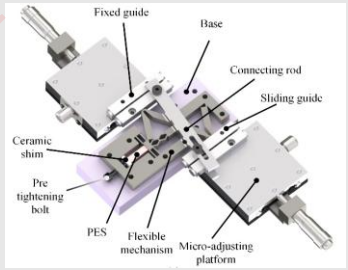
仿生尺蠖压电驱动新结构



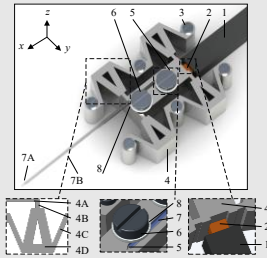
双层压电驱动新结构



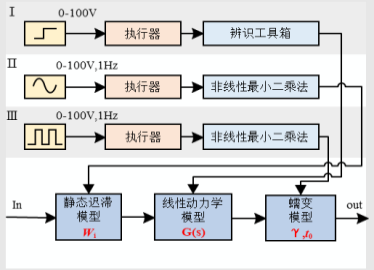
非对称压电驱动新结构



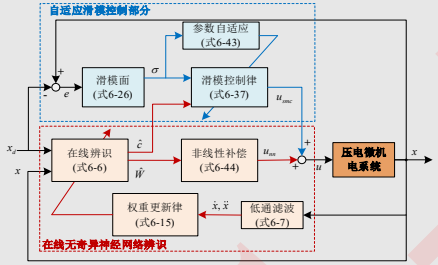
压电振动穿刺新结构



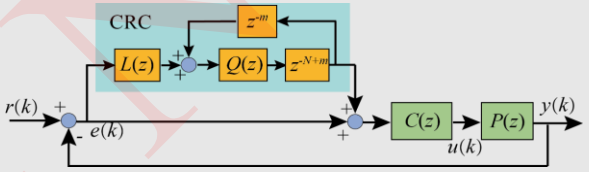
压电非线性建模



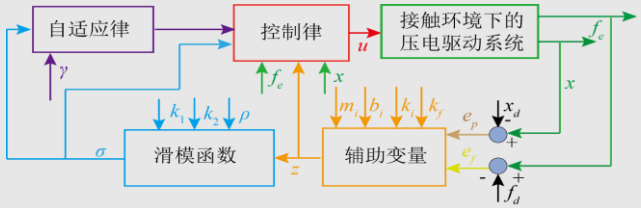
压电驱动器控制策略



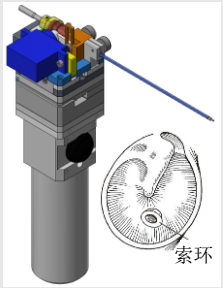
压电微动台扫描控制

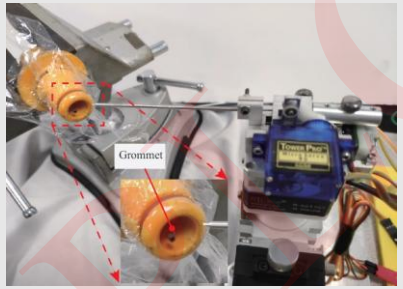


压电入耳手术器力位混合控制

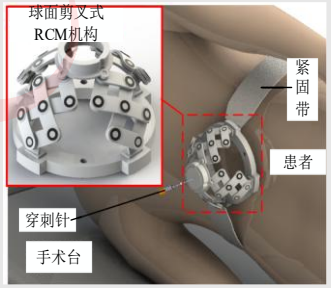


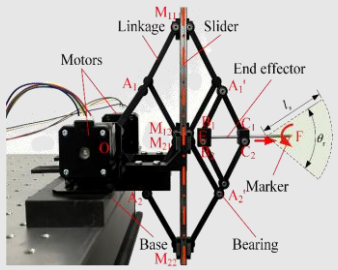
压电入耳手术器



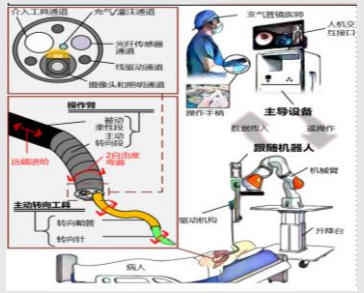


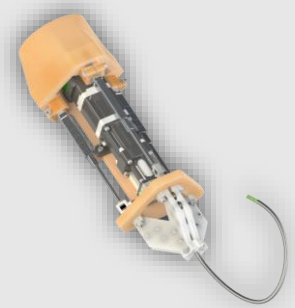
机器人辅助腰椎麻醉穿刺





支气管镜连续体机器人





FOR NUAA

课件下载

个人主页 https://mee-jieling.github.io/

→Teaching

→液压与气压传动

Teaching

Home | Detailed profile | Projects | Teaching | Publications | Students | Contact

Undergraduate Courses / 本科生课程

- **液压与气压传动**（专业必修课）
  - *Hydraulic and Pneumatic Transmission*
  - 课件下载链接（每章完成课堂教学后更新）：

基础知识：Ch1

液压部分：Ch2 | Ch3 | Ch4 | Ch5 | Ch6 | Ch7

气动部分：Ch10 | Ch11 | Ch12 | Ch13 | Ch14 | Ch15

教材：*《液压与气压传动（第 3 版）》，游有鹏、李成刚主编，科学出版社*

PLC - NUAA

课程的地位与特点

➢ **人类科学知识体系图**

马克思主义哲学——自然界、人类社会和思维发展的普遍规律													哲学
性智		量智											
…	美学	建筑哲学	人学	军事哲学	地理哲学	人天观	认识论	机械论	数学哲学	唯物史观	自然辩证法	…	桥梁
…	文艺理论	建筑	行为	军事	地理	人体	思维	机械学	数学	社会	自然	…	基础科学
…		科	科	科	科	科	科	液压与气压传动 机械原理	科	科	科		技术科学
…	文艺创作	学	学	学	学	学	学	工业自动化技术 机械制图	学	学	学		应用技术
实践感受和哲学思维													前科学

PLC-UAA

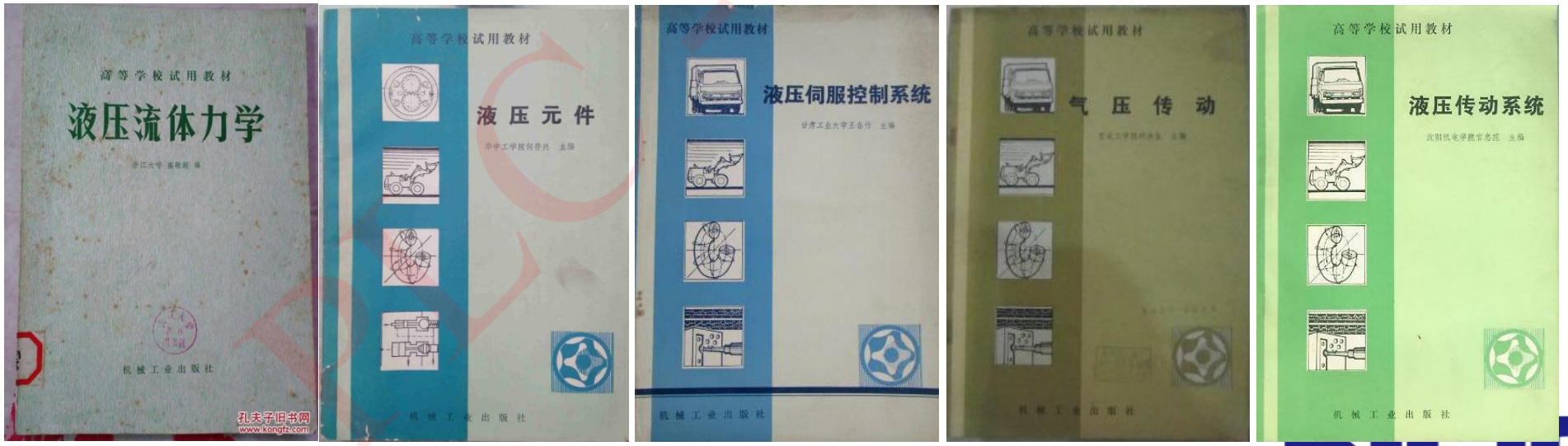
课程的历史与现状

国内液压方向的发展

哈尔滨工业大学，始建于1954年——水力机械专业（下设水轮机、水泵和液压传动三个方向）

为满足流体传动及控制学科教学需要，20世纪70年代末80年代初编写了多部统编教材。

盛敬超 (浙江大学) 《液压流体力学》 1980	何存兴 (华中工学院) 《液压元件》 1982	王春行 (甘肃工业大学) 《液压伺服控制》 1981	郑洪生 (东北工学院) 《气压传动》 1981	官忠范 (沈阳机电学院) 《液压传动系统》 1981



课程的历史与现状

- 1994年11月，机械电子工程（机电一体化）专业教学教材研讨会提出，组织编写机电一体化专业统编教材
- 1998年，教育部《普通高等学校本科专业目录》取消流体传动及控制专业

《液压流体力学》

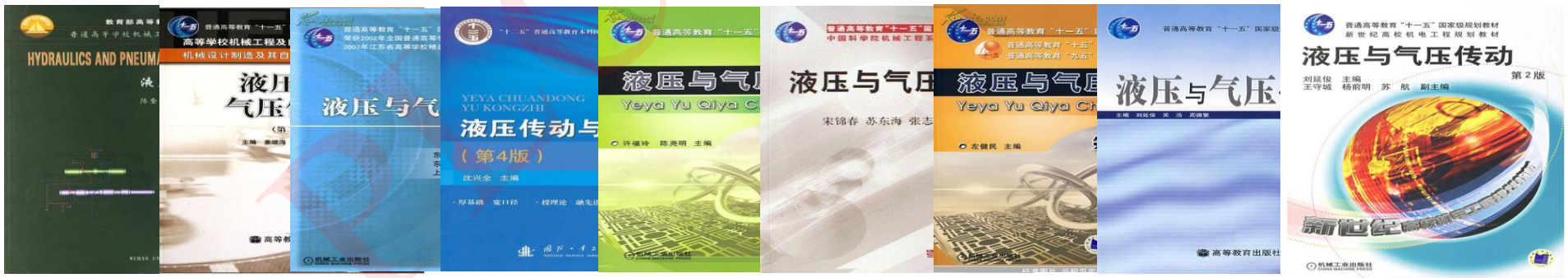
《液压元件》

《气压传动》

《液压传动系统》

《液压伺服控制》

《液压与气压传动》



课程介绍（南航）

❑课程性质

机械工程、飞行器制造工程专业必修课

❑前修课程

机械原理、流体力学、电工学和自动控制原理等

❑课程教材

液压与气压传动 科学出版社 2023. 3第3版

游有鹏 李成刚 主编

缪群华 朱玉川 副主编

❑课时分配

理论授课45学时（液压10周+气动2周）＋实验6学时

PLC-NUAA

课程介绍（南航）

❑讲授内容

绪论

液压（1、2、3、4、6、7章）

气压（11、12、13、14章）

❑课程学习目标

1. 掌握液压与气压传动技术的基础理论
2. 掌握液压与气动基本元件的结构、原理、性能及应用
3. 掌握液压与气动基本回路的组成、功能和应用
4. 掌握典型液压与气压传动系统的原理、组成及功能

PLC - NUAA

考核方式与纪律要求

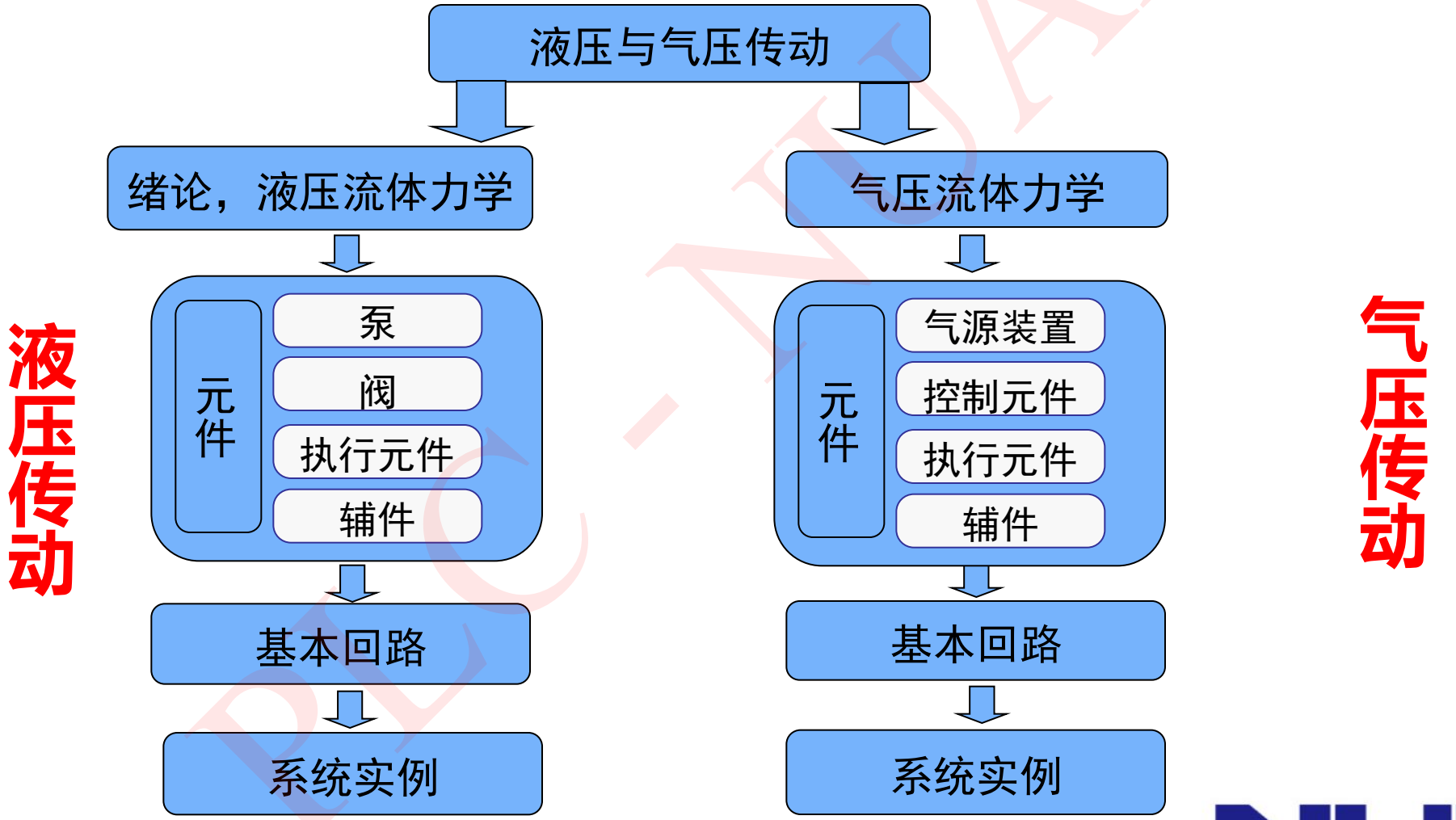
- **过程化考核(50%) + 期末半开卷考试(50%)**
  1. **平时作业，2次，占10%**
  2. **课程实验，2次，占10%**
  3. **课内测试，1次，占10%，开卷**
  4. **小组调研及课堂答辩，1次，占20%，**分组，给定题目小组抽取一个，课后完成调研报告，小组内每位同学必须对提交的报告学习理解，准备ppt答辩，课堂上教师提问:覆盖每位同学，打分分为报告基础分(小组内每位同学一样)+答辩表现分(小组内每位同学差别分)，占用1次课
  5. **期末考试，占50%，半开卷，可携带一页A4纸**
- **课内纪律：课前准备，上课不能迟到和随意离开，专注课堂，不使用手机、平板、电脑等电子设备**

BUAA

NUAA

知识体系和学时安排

先修课程：机械制图、理论力学、材料力学、机械原理、机械设计、电工电子



教学重点与难点

学时安排：总学时数51，课内讲授45学时，实验3+3学时；闭卷考试。

液压为主、气动为辅

教学重点

绪论、液压油液	2学时
液压传动基础知识	7学时
液压动力元件	8学时
液压执行元件	2学时
液压控制元件	8学时
液压基本回路	6学时
典型液压系统	4学时
气源装置及辅助元件	2学时
气动执行元件	1学时
气动控制元件	1学时
气动基本回路与常用回路	2学时
气压传动系统计算	2学时

PLC NUAA

NUAA

绪　　论

- 0.1 液压与气压传动定义 ★
- 0.2 工作原理及系统组成 ★★
- 0.3 液压与气压传动优缺点 ★★
- 0.4 液压与气压传动应用领域

PLC NUAA

0.1 液压与气压传动定义

什么是机器？机构？机械？

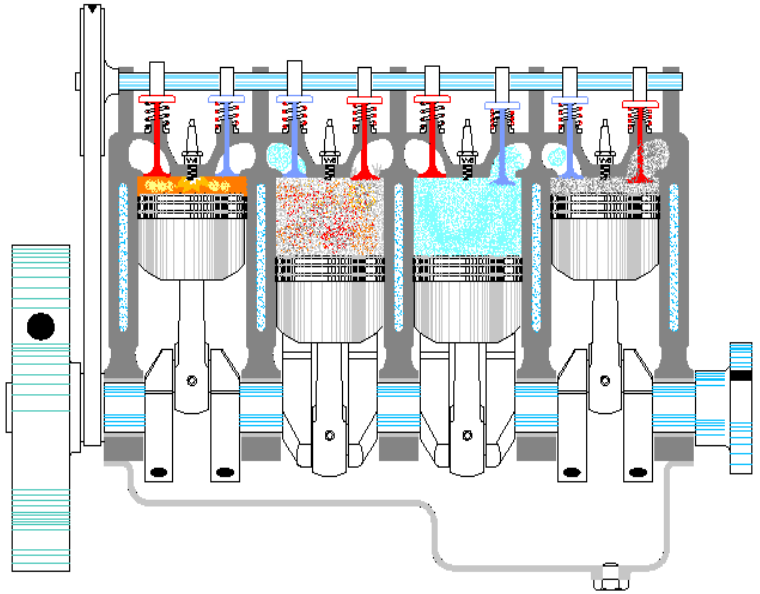
机器：机器是由各种金属和非金属部件组装成的装置，消耗能源，可以运转、做功。它是用来代替人的劳动、进行能量变换、以及产生有用功。

机构：由两个或两个以上构件通过活动联接形成的构件系统。四连杆机构，凸轮机构。

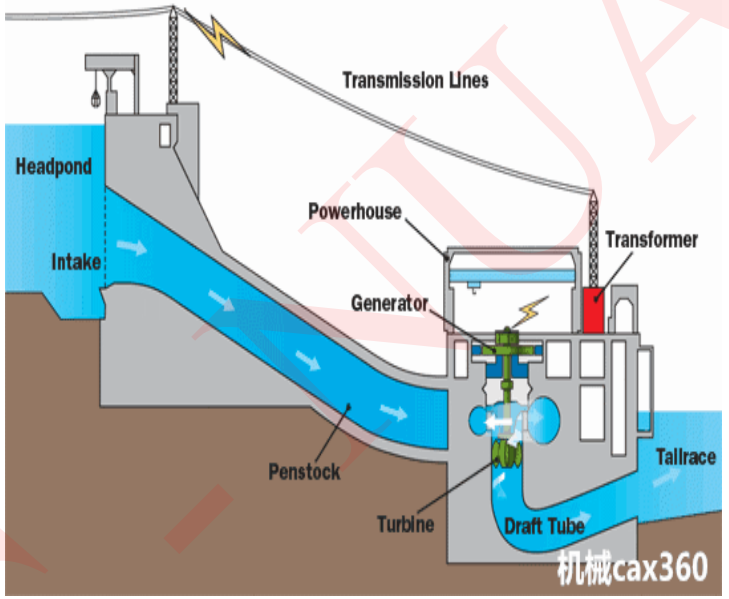
机械：**机器与机构的总称。**

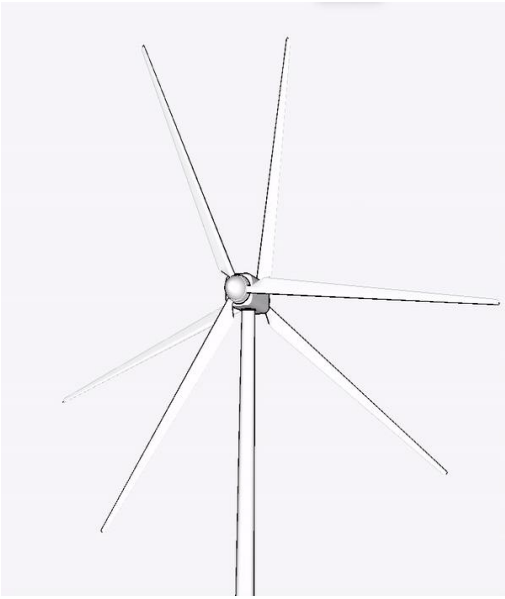
0.1 液压与气压传动定义

0.1.1机器的组成



什么是原动机？





原动机：泛指利用能源产生原动力的一切机械。

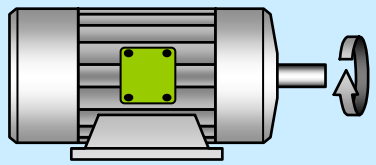
按利用的能源分，有**热力发动机**、**水力发动机**、**风力发动机**和**电动机**等。

原动机是现代生产、生活领域中所需动力的主要来源。

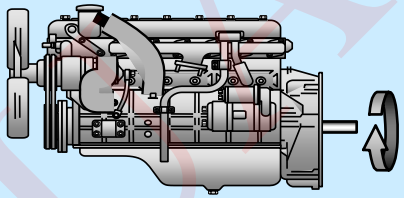
PLC NUAA

0.1液压与气压传动定义

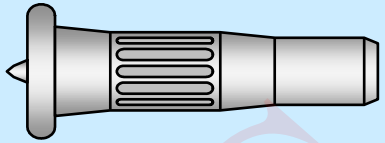
0.1.1机器的组成



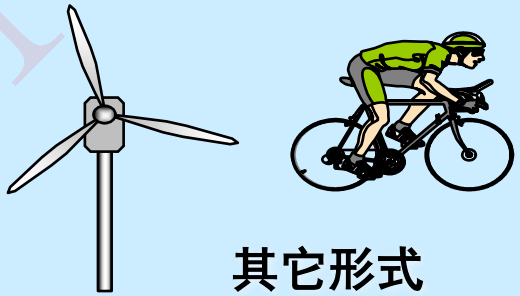
电动机



内燃机



燃气轮机



其它形式

原动机产生的动力如何输出到工作机构按照人类要求代替人力作有用动并可以控制？

——需要传递动力与控制动力的机构

PLC-NUAA

0.1 液压与气压传动定义

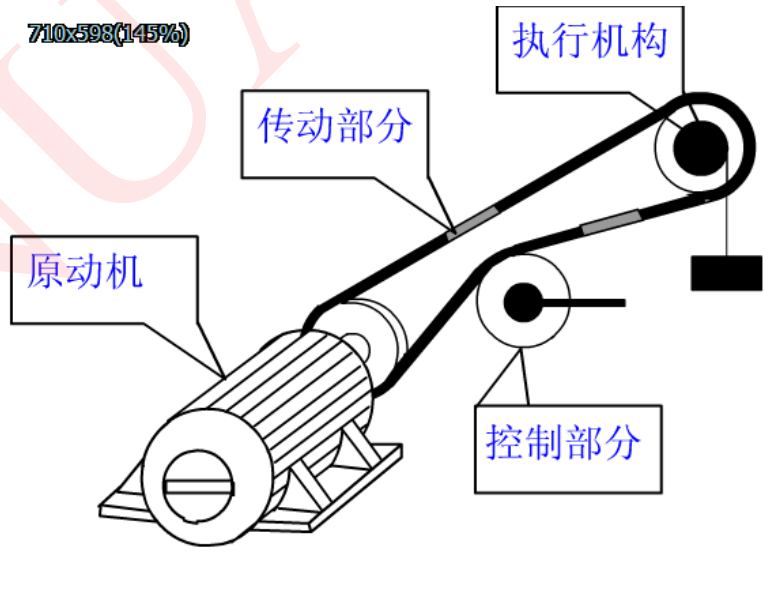
0.1.1机器的组成

- 原动机，**传动与控制装置**，工作机构

0.1 液压与气压传动定义

■为何需要传动与控制装置？

对于一部机器而言，其工作机构一般很难与原动机直接相连，且机器运行时需要根据要求不断调节运动状态。因此，其中间必须有传动与控制装置，以达到对动力和运动传递与控制的目的。



●电动机作为原动机输出功率，通过传动部分皮带把动力传递给执行机构，提升重物。控制部分可控制皮带的张紧力。

0.1.2传动装置的作用

- ➢传递功率
- ➢改变运动方向
- ➢改变运动参数

PLC - NUAA

0.1 液压与气压传动定义

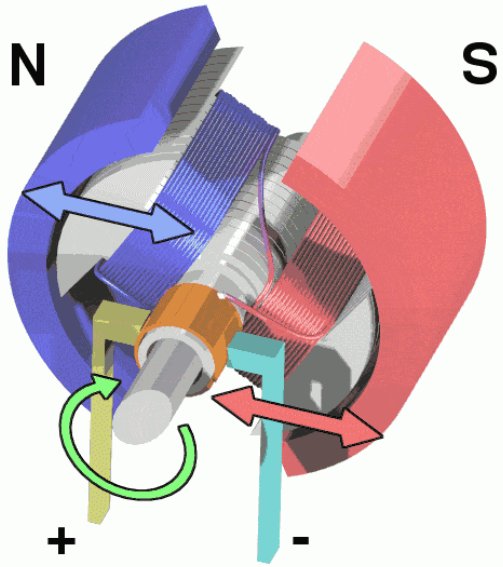
0.1.3传动机构的种类（三大传动方式）

➢**机械传动**

由齿轮、轴、丝杠螺母、曲柄连杆、带等传动件组成的传动。如齿轮传动、链传动、带传动。

➢**电力传动**

利用电能，通过调节电参数来传递或控制动力的传动方式 。常用直流电机、可控硅、交流电机和变频器等。



PLC - NUAA

0.1 液压与气压传动定义

➢流体传动

■液体传动：以液体作为工作介质来进行能量传递

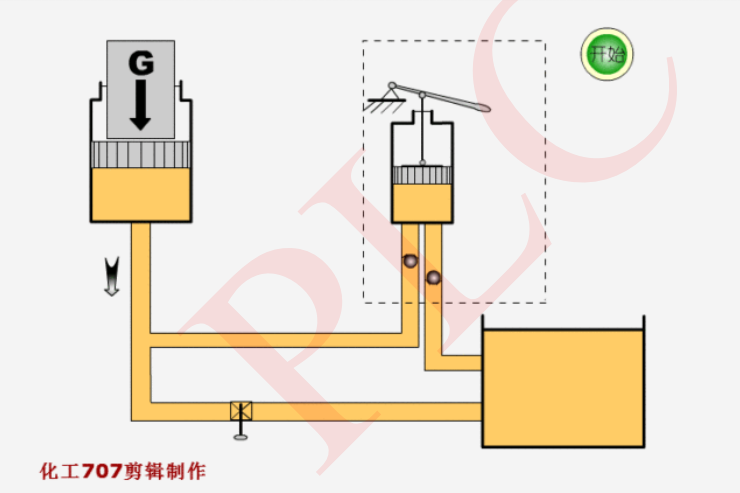
•液压传动：利用液体的压力能传递能量√

•液力传动：利用液体的动能传递能量

■气体传动：以气体作为工作介质来进行能量传递

•气压传动：利用气体的压力能传递能量√

•气力传动：利用气体的动能传递能量



0.1 液压与气压传动定义

0.1.4液压与气压传动定义

ISO-TC131-6403中定义：

利用有压液体的流动来实现功率(Power)传送及传递的一种传动方式。

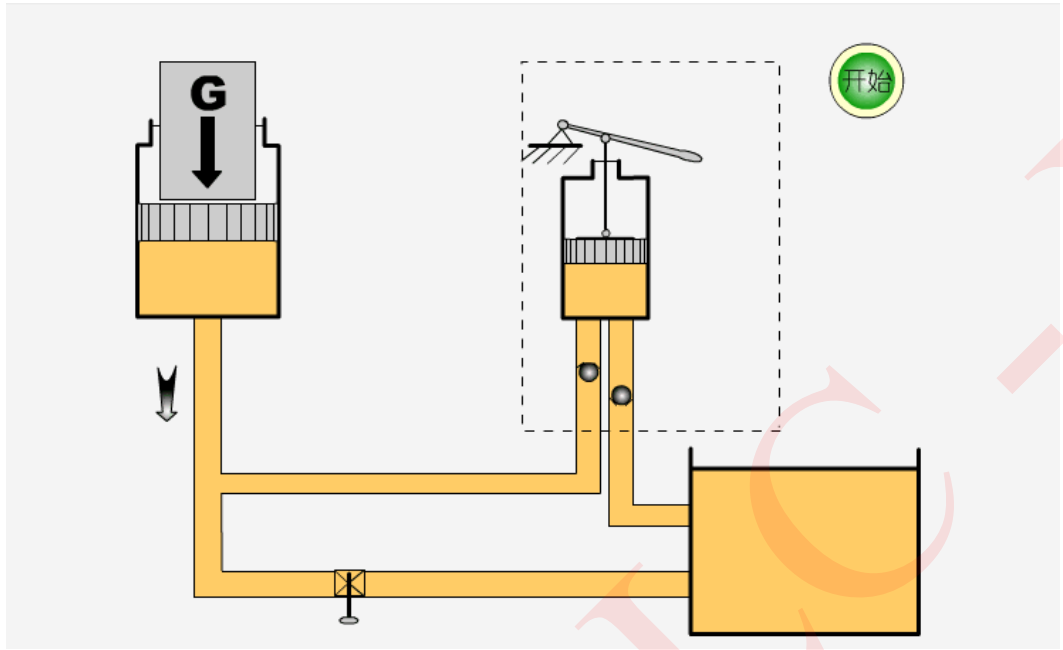
➢研究内容

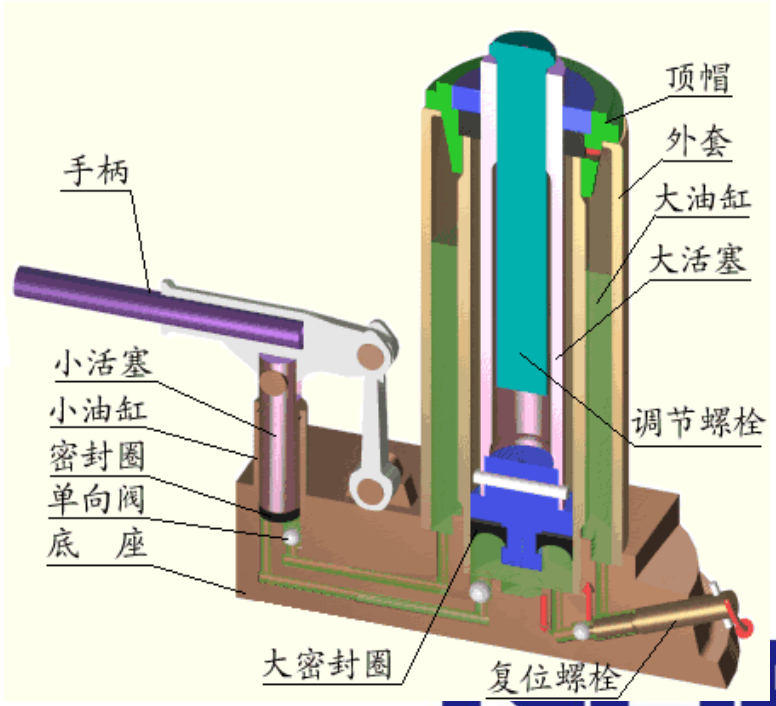
- ✓研究**传动介质**的基本物理性能及其静力学、运动学和动力学特性；
- ✓研究组成系统的各类**液压与气动元件**的结构、工作原理、工作性能；
- ✓由这些元件所组成的各种**回路**的性能和特点；
- ✓进行液压与气压**传动系统**的分析与设计。

PLC_NUAA

0.2 工作原理及系统组成

0.2.1工作原理

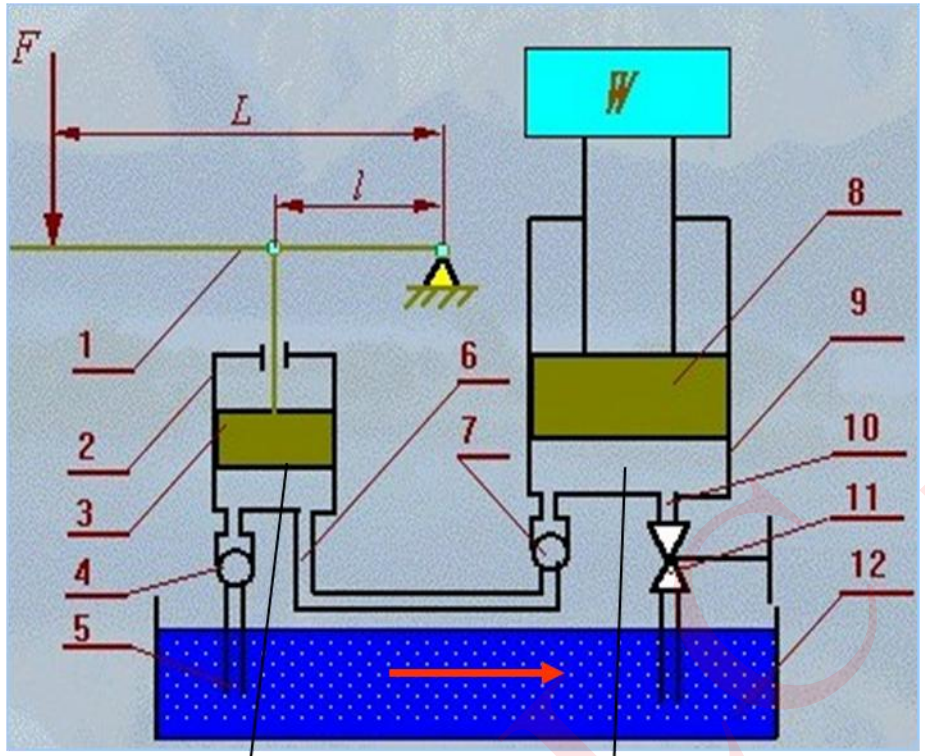




PLC - NUAA

0.2 工作原理及系统组成

0.2.1 工作原理



千斤顶中，小缸、小活塞以及单向阀4和7组合在一起，就可以不断从油箱中吸油和将油压入大缸，这个组合体的作用是向系统中提供一定量的压力油液，称为**液压泵(Hydraulic Pump)**。

大活塞和缸用于带动负载，使之获得所需运动及输出力，这个部分称为**执行机构(Actuator)**。

放油阀门11的启闭决定W是否向下运动，是一个**方向控制阀(Directional Control Valve)**。

另外，要进行动力传输必须借助**液压传动介质(Hydraulic Fluids)**。

PPT-NUAA

0.2 工作原理及系统组成

0.2.1工作原理

液压传动基本参数

- **（1） 力的传递关系**

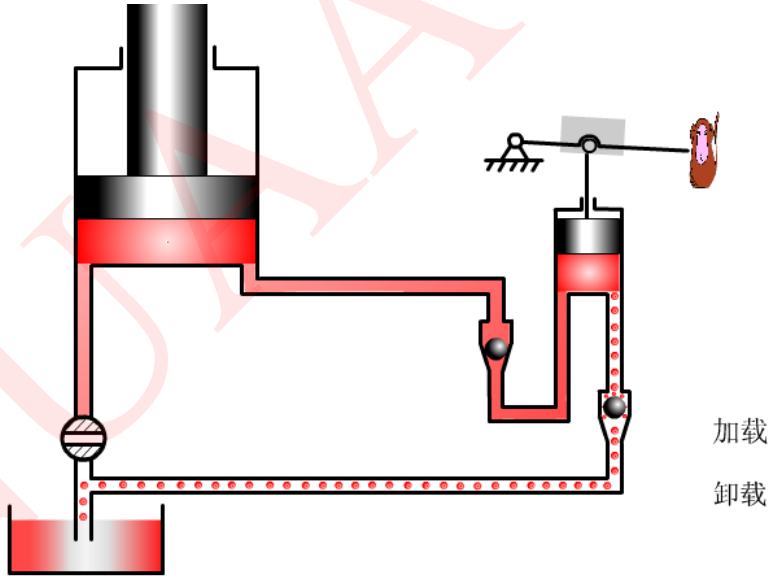
力的传递遵循帕斯卡原理

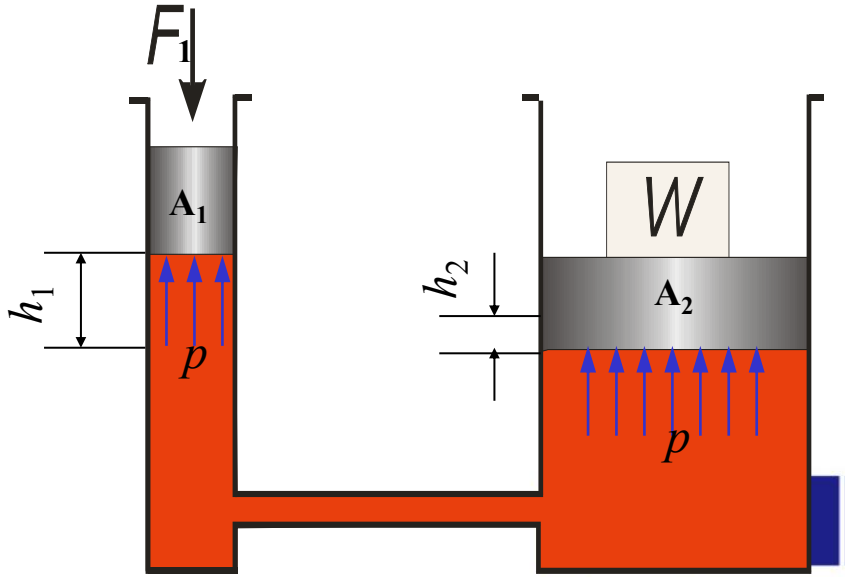
$$p=\frac{F_1}{A_1}=\frac{W}{A_2}$$

当W↑时，p↑，F_1↑

当W↓时，p↓，F_1↓

工作压力取决于负载



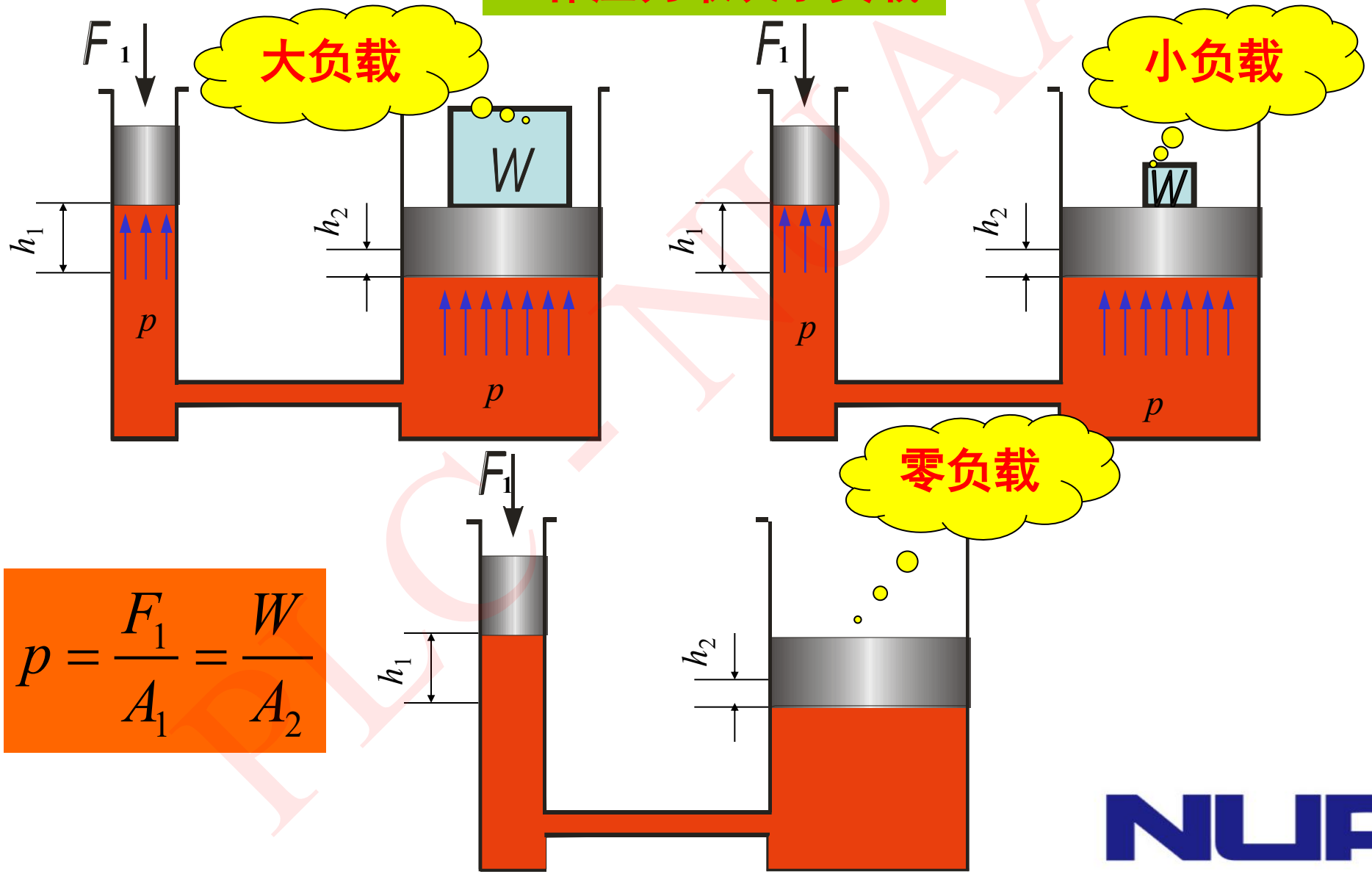


BUAA

0.2 工作原理及系统组成

- （1） 力的传递关系

工作压力取决于负载



$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{W}{A_2}$$

PLC-NUAA

0.2 工作原理及系统组成

➢（2） 运动的传递关系

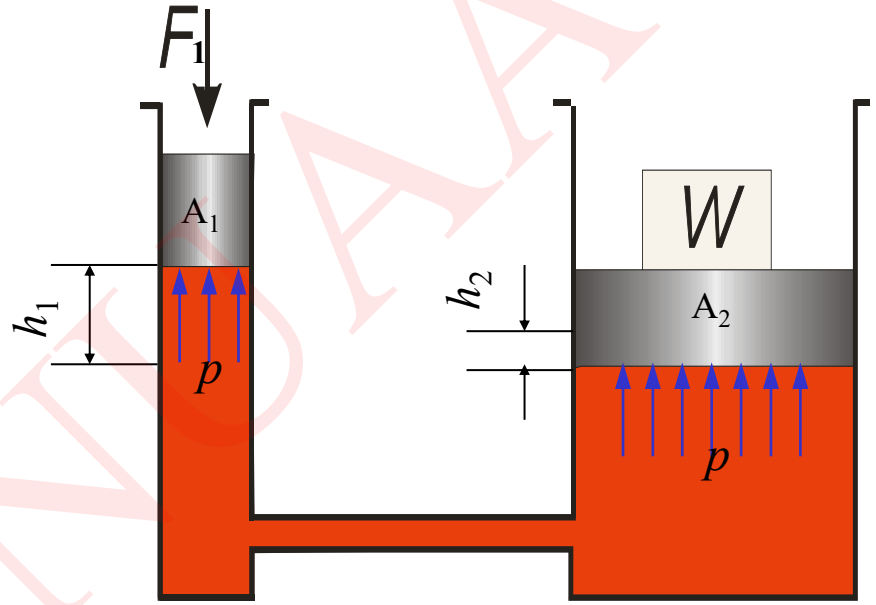
运动的传递遵照容积变化相等的原则，即：

$$h_1A_1=h_2A_2$$

则 $$A_1\frac{h_1}{t}=A_2\frac{h_2}{t}$$

$$q=v_1A_1=v_2A_2$$

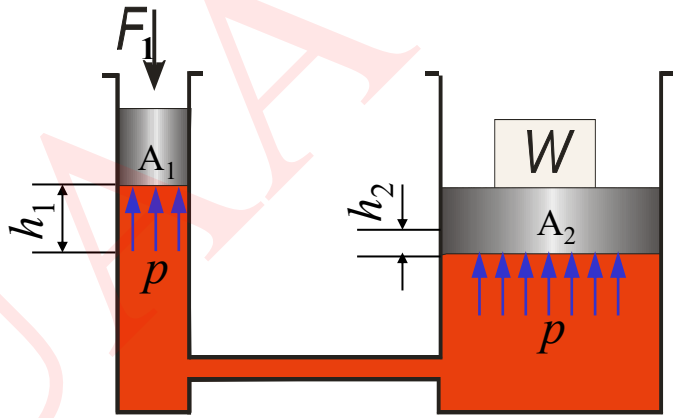
$$v=\frac{q}{A}$$



执行元件的运动速度取决于流量

PLC - NUAA

0.2 工作原理及系统组成



➢（3）功率关系

输入功率$P_1=F_1v_1$　　输出功率$P_2=Wv_2$

由力的传递关系 $p=\frac{F_1}{A_1}=\frac{W}{A_2}$ 及 运动的传递关系$q=v_1A_1=v_2A_2$

得：　$P=F_1v_1=Wv_2=pq$

（1）在不考虑任何损失情况下，液压系统满足能量守恒定律。

（2）压力和流量是液压与气压传动中的两个最基本的参数。

PLC NUAA

0.2 工作原理及系统组成

0.2.2系统组成

0.2.2.1磨床工作台液压传动系统

0.2 工作原理及系统组成

0.2.2系统组成

0.2.2.1磨床工作台液压传动系统

- **工作原理：**

- **功能：**

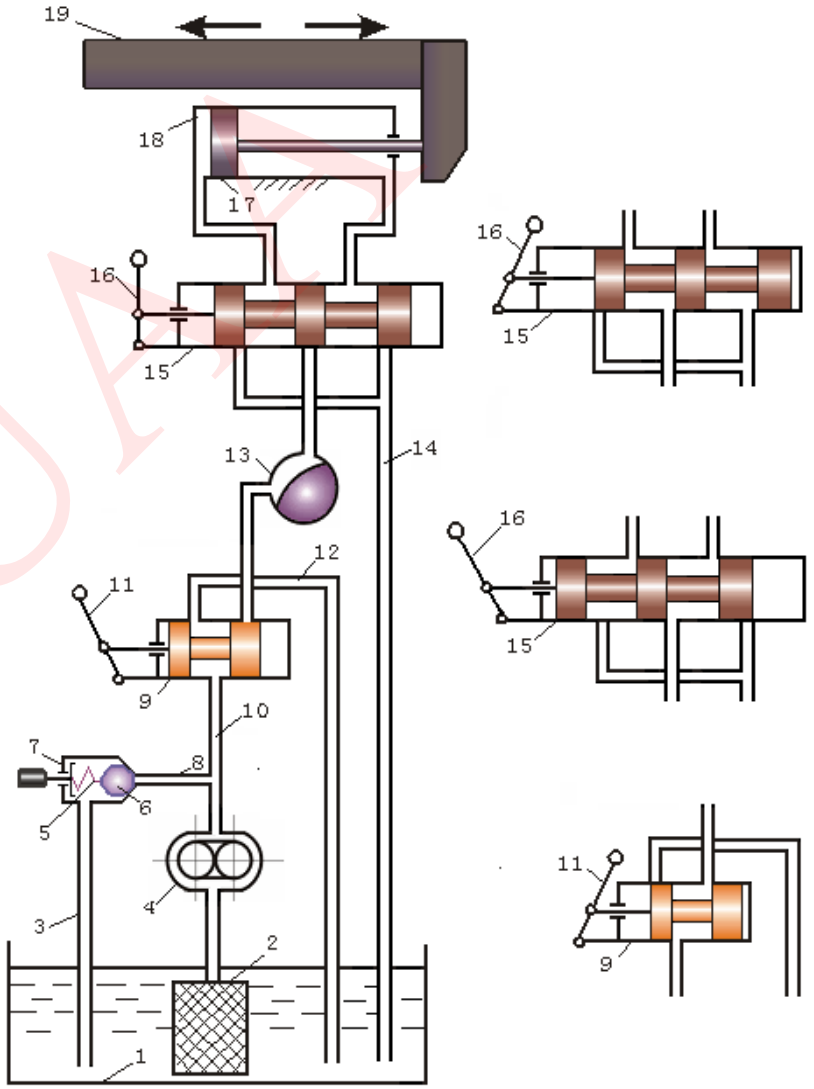
  进给——活塞右移

  退回——活塞左移

  节流调速

  卸荷

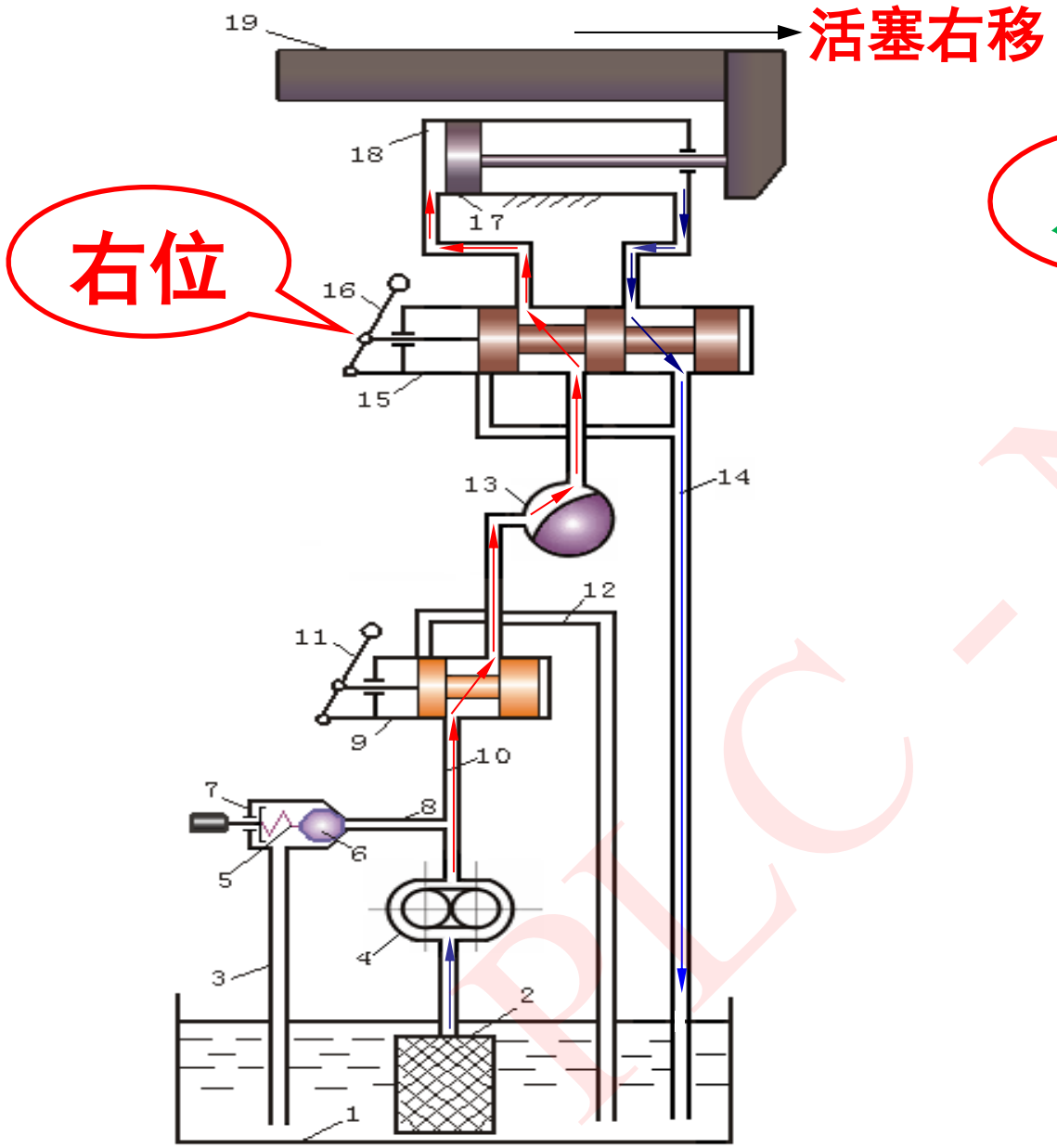
  溢流保护

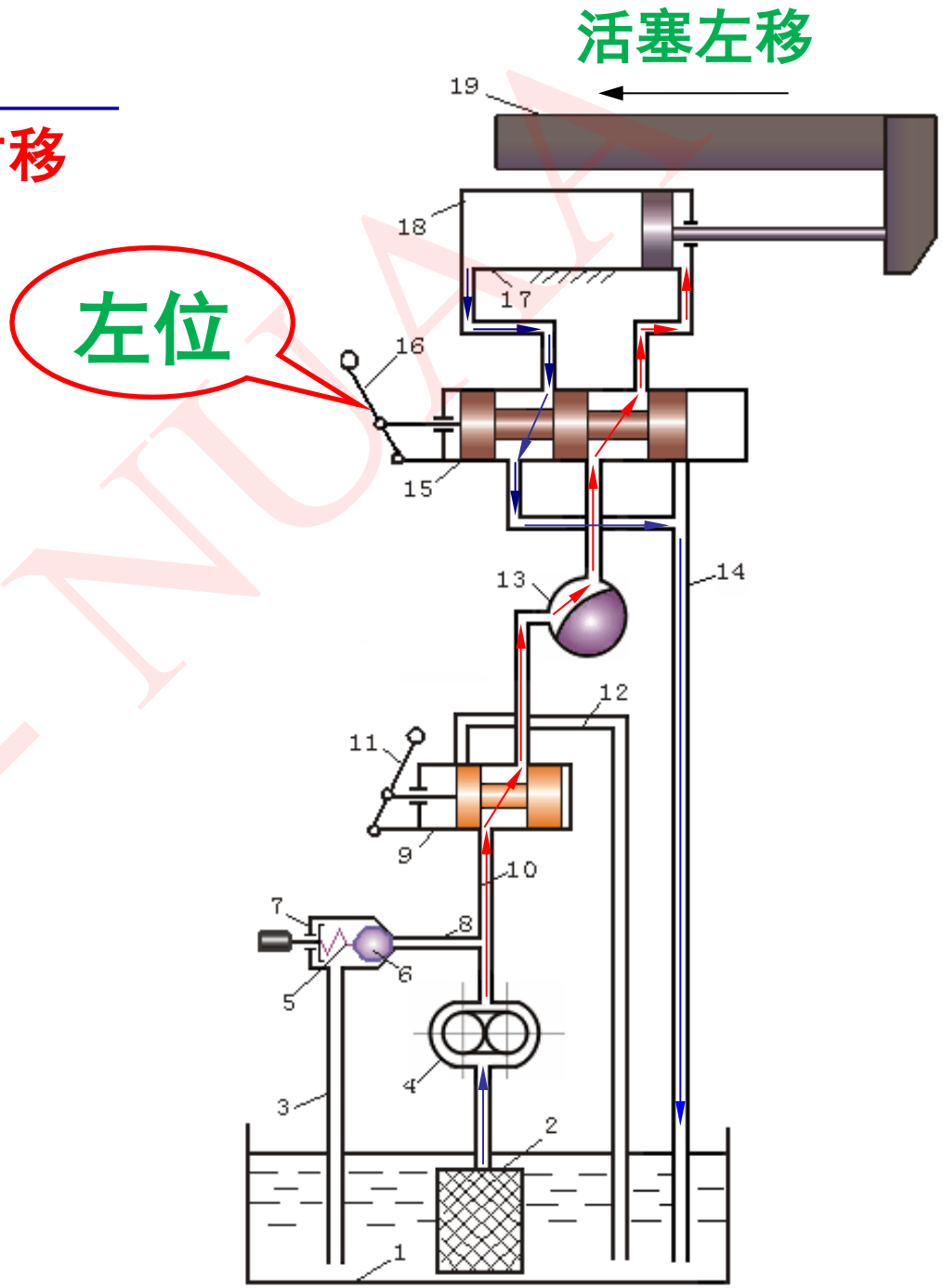


1-油箱；2-过滤器；3,12,14-回油管；4-液压泵；5-弹簧；6-钢球；7-溢流阀；8,10-压力油管；9-开停阀；11,16-换向手柄； 13-节流阀；15-换向阀；17-活塞；18-液压缸；19-工作台

PLC - NUAA

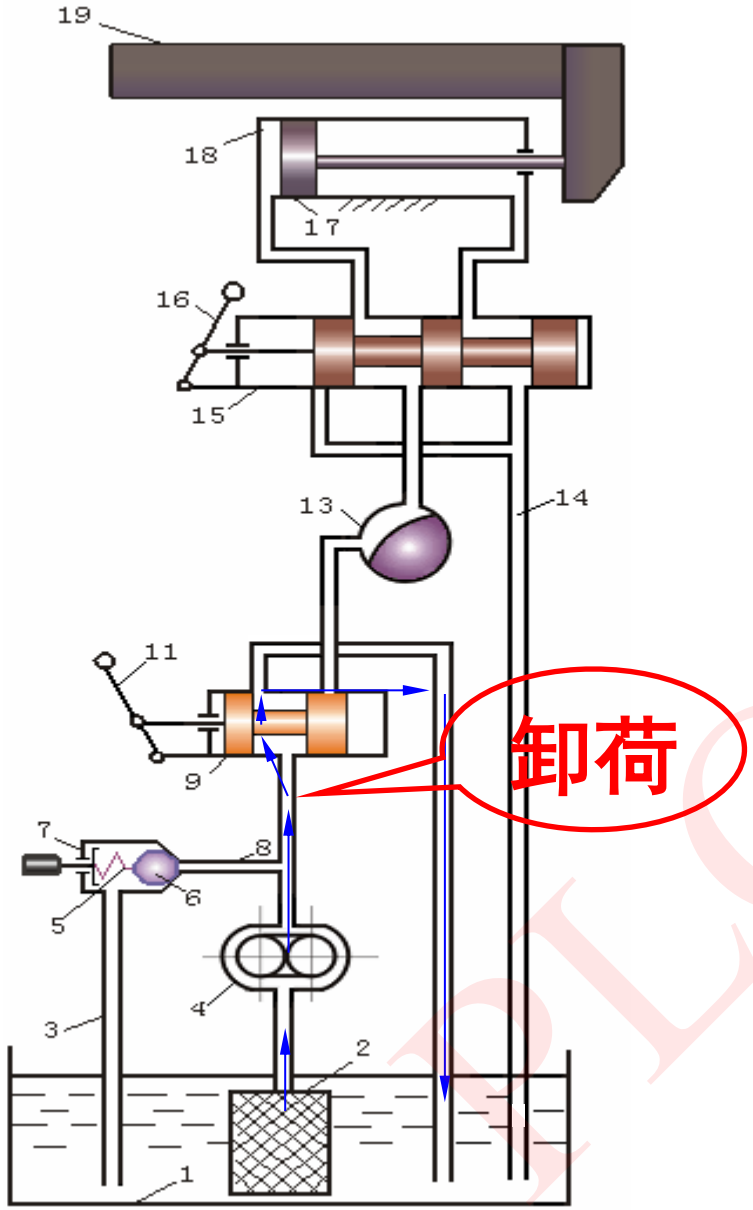
0.2 工作原理及系统组成

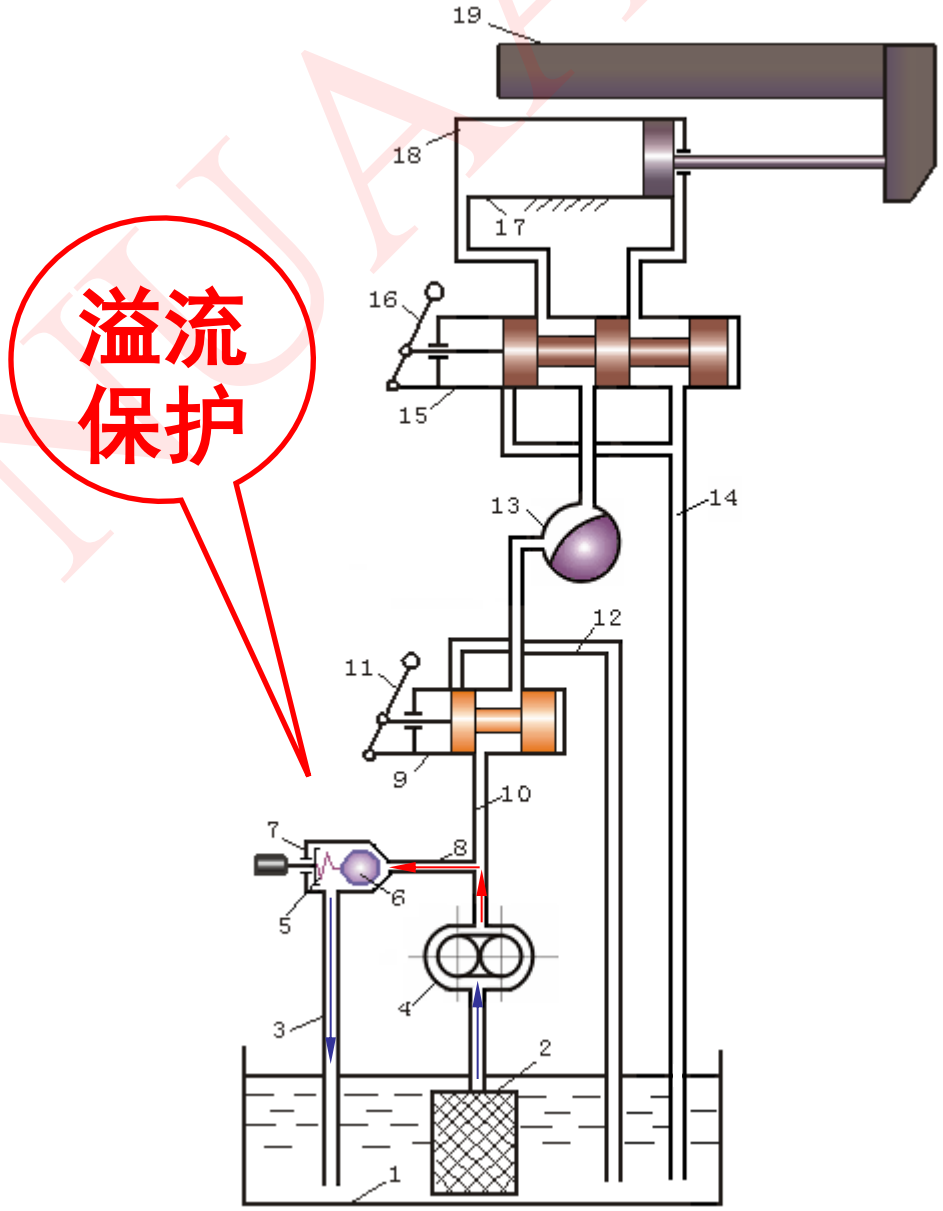




PLC - NUAA

0.2 工作原理及系统组成





PLC - NUAA

0.2 工作原理及系统组成

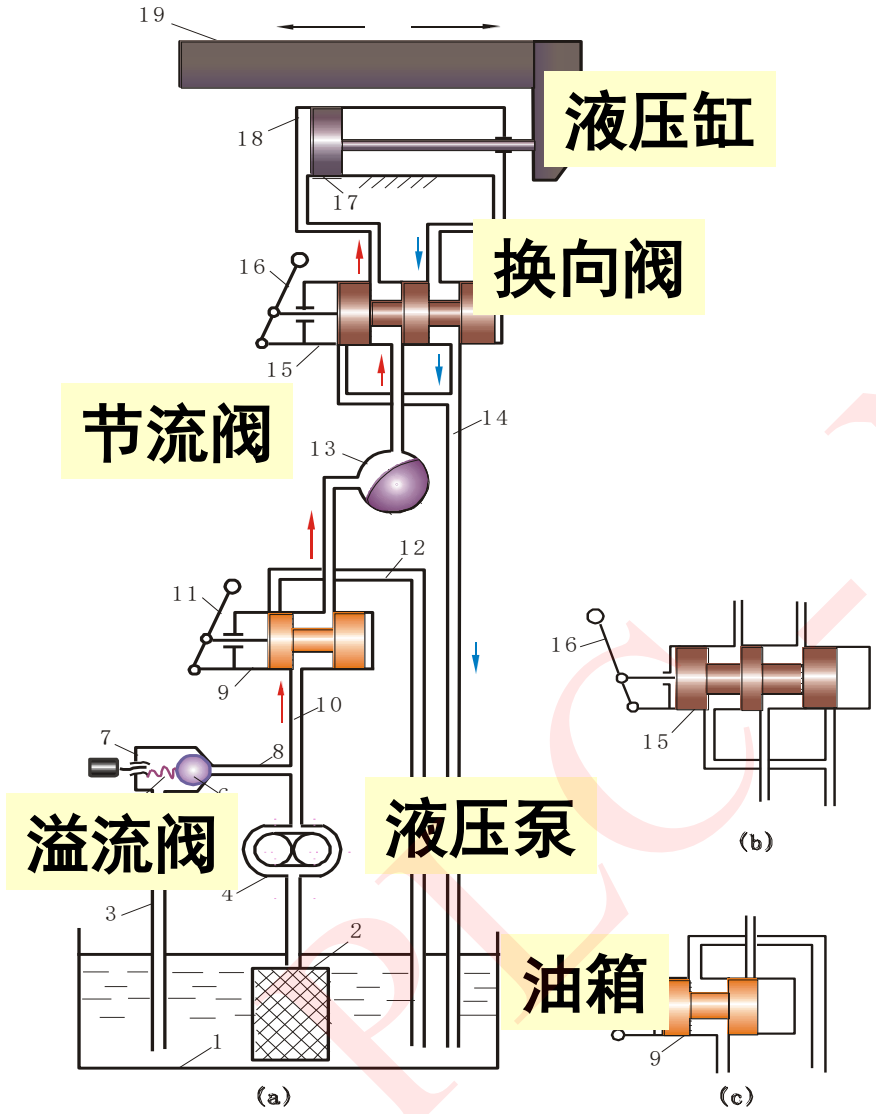
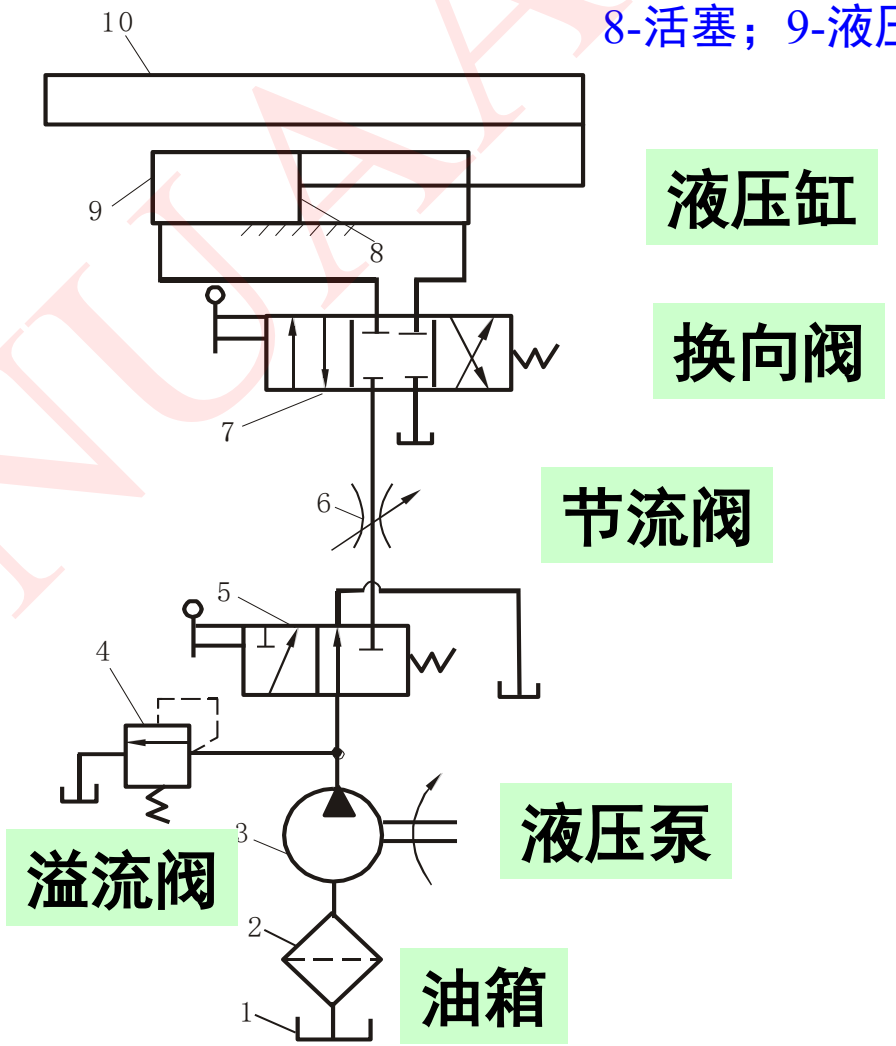


图1.1 磨床工作台液压传动系统工作原理

图1.2 用图形符号表示的磨床工作台液压系统
1-油箱；2-过滤器；3-液压泵； 4-溢流阀；
5-手动换向阀；6-节流阀；7-换向阀；
8-活塞；9-液压缸



PLC-NUAA

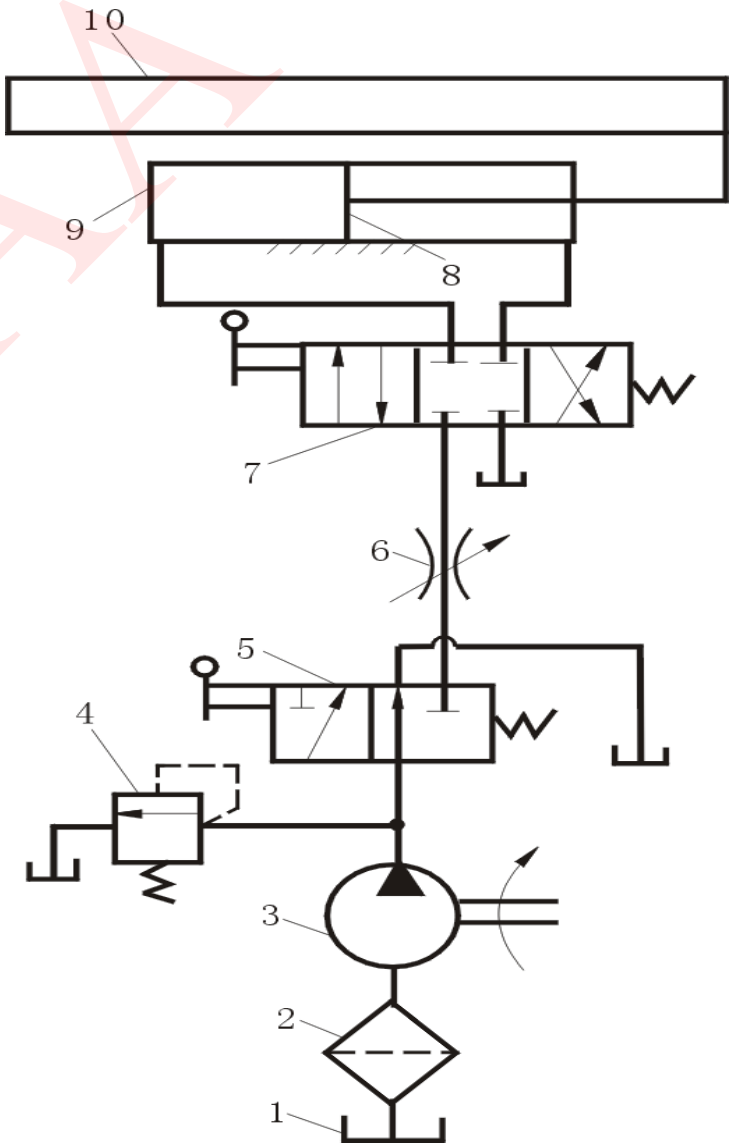
0.2 工作原理及系统组成

➢液压图形符号的特点：

（1）图形符号表示元件的功能，而**不表示元件的具体结构和参数**；

（2）反映各元件在油路连接上的相互关系，**不反映其空间安装位置**；

（3）只反映静止位置或初始位置的工作状态，**不反映其过渡过程**。



PLC - NUAA

0.2 工作原理及系统组成

从千斤顶和磨床的液压系统组成和工作原理可以看出，**液压系统**一般有以下几个部分组成：

PLC NUAA

0.2 工作原理及系统组成

0.2.2.3 液压与气压传动系统组成

（1）**液压泵** Hydraulic Pumps（动力元件）：是将原动机所输出的机械能转换成液体压力能的元件，其作用是向液压系统提供压力油，液压泵是液压系统的心脏。

（2）**执行元件** Actuators：把液体压力能转换成机械能以驱动工作机构的元件，执行元件包括液压缸和液压马达。

（3）**控制元件** Control Components：包括压力、方向、流量控制阀，是对系统中油液压力、流量、方向进行控制和调节的元件。

（4）**辅助元件** Accessories：上述三个组成部分以外的其它元件，如：管道、管接头、油箱、滤油器等为辅助元件。

（5）**传动介质** Hydraulic Fluids ：即液压油。

FLC NUAA

0.2 工作原理及系统组成

0.2.2.3 液压与气压传动系统组成

（1）**液压泵** Hydraulic Pumps（动力元件）：是将原动机所输出的机械能转换成液体压力能的元件，其作用是向液压系统提供压力油，液压泵是液压系统的心脏。

（2）**执行元件** Actuators：把液体压力能转换成机械能以驱动工作机构的元件，执行元件包括液压缸和液压马达。

（3）**控制元件** Control Components：包括压力、方向、流量控制阀，是对系统中油液压力、流量、方向进行控制和调节的元件。

（4）**辅助元件** Accessories：上述三个组成部分以外的其它元件，如：管道、管接头、油箱、滤油器等为辅助元件。

（5）**传动介质** Hydraulic Fluids ：即液压油。

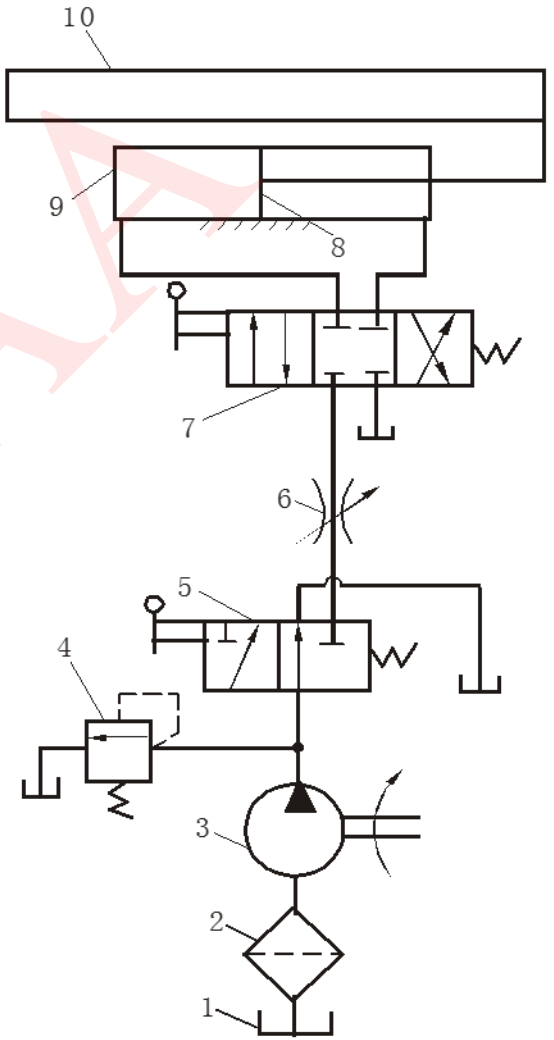
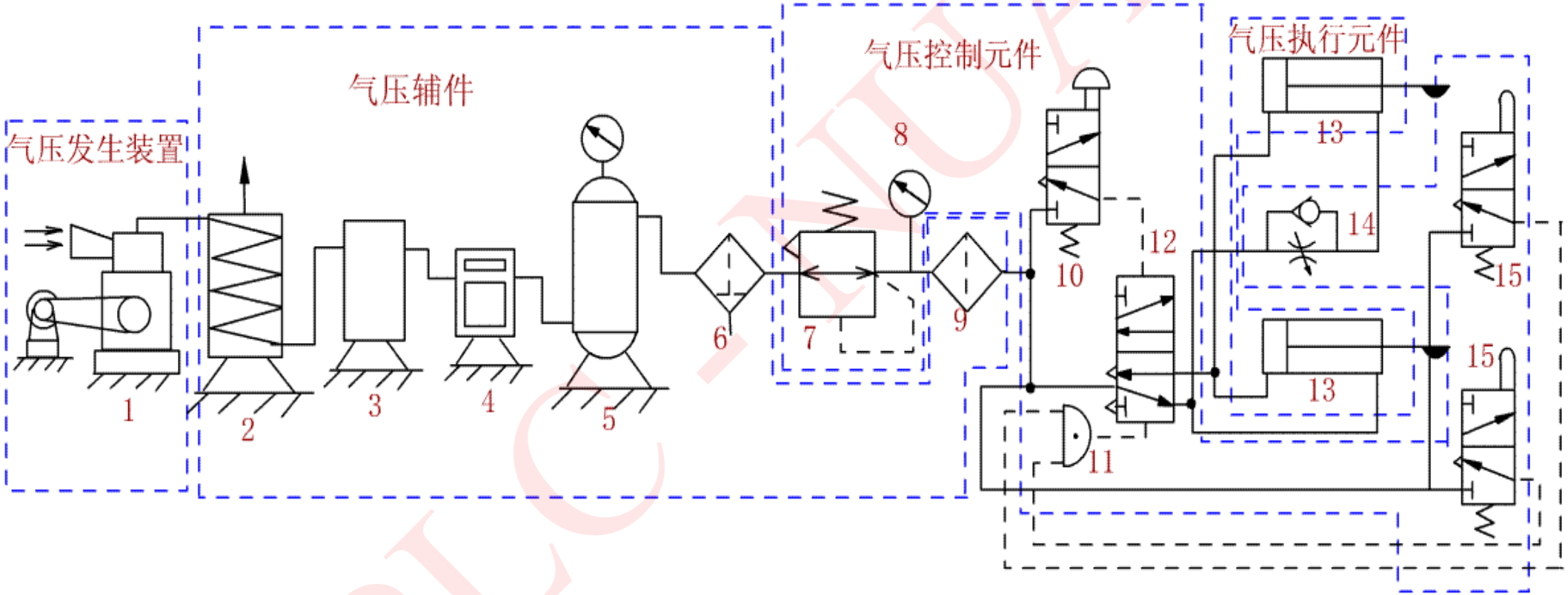


图1.2 用图形符号表示的磨床工作台液压系统
1-油箱；2-过滤器；3-液压泵；4-溢流阀；
5-手动换向阀；6-节流阀；7-换向阀；
8-活塞；9-液压缸

PLC-NUAA

0.2 工作原理及系统组成

0.2.2.2气压传动系统



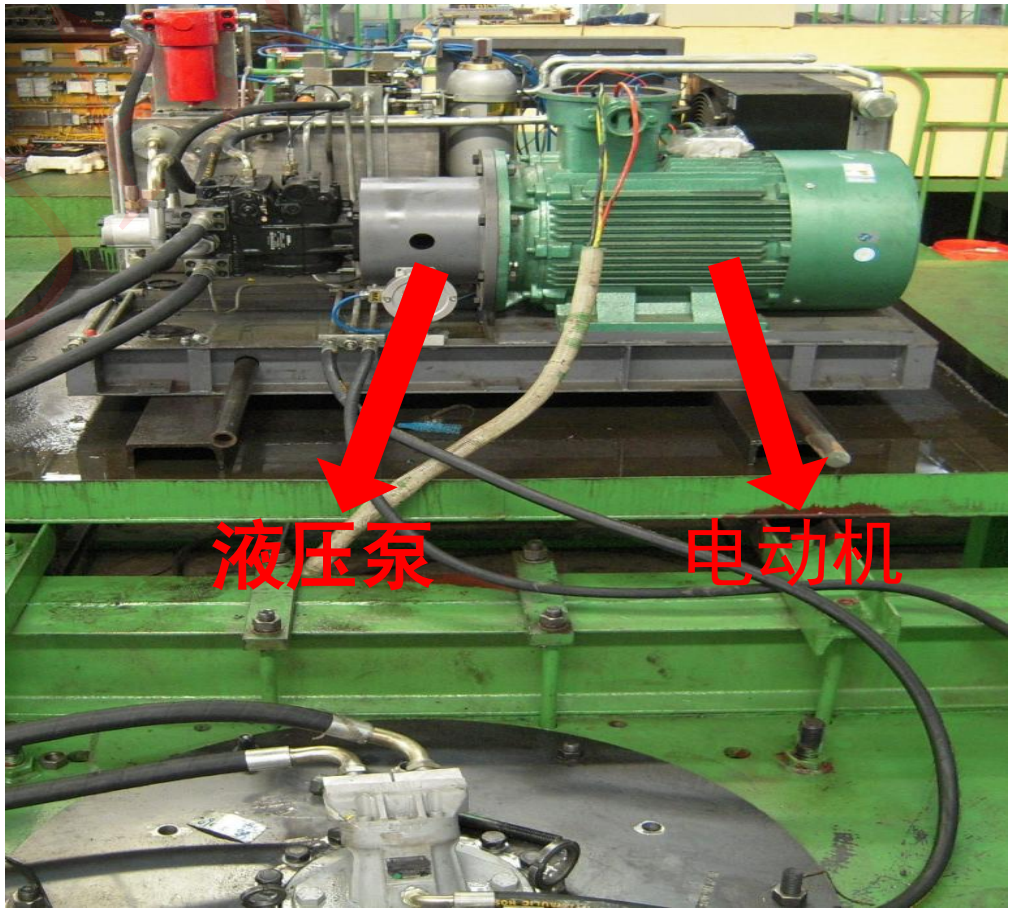
PLC-NUAA

0.3 液压与气压传动优缺点

0.3.1液压传动特点

0.3.1.1液压传动优点

液压传动与机械传动、电气传动相比有以下主要优点：



- **1.液压传动可以输出大的推力或大转矩，可实现低速大吨位运动，这是其它传动方式所不能比的突出优点。**
- **2.功率—质量比、力—质量比、力矩惯量比大；动态响应快，适于要求大功率、低质量、高响应的应用场合；**

PLC-NUAA

0.3 液压与气压传动优缺点

0.3.1.1液压传动优点

3.液压装置工作比较平稳,负载变化时速度较稳定；

4.元件布置灵活；——液压传动是油管连接，所以借助油管的连接可以方便灵活地布置传动机构，这是比机械传动优越的地方。

5.实现大范围的无级调速(调速范围达2000：1)，可在液压装置运行的过程中进行调速；

PLC - NUAA

0.3 液压与气压传动优缺点

0.3.1.2液压传动缺点

1、**发热：**由于传力介质（液压油）在流动过程中存在各部位流速的不同，导致液体内部存在一定的内摩擦，同时液体和管路内壁之间也存在摩擦，这些都是导致液压油温度升高的原因。温度升高将导致内外泄漏增大，降低其机械效率。同时由于较高的温度，液压油会发生膨胀，导致压缩性增大，使控制动作无法很好的传递。

2、**振动：**液压系统的振动也是其痼疾之一。由于液压油在管路中的高速流动而产生的冲击以及控制阀打开关闭过程中产生的冲击都是系统发生振动的原因。

3、**泄漏：**由于发生泄漏，既定的控制动作可能会受到影响，直至引起系统故障。液压油直接泄漏到环境中，除了会影响系统的工作环境外，还会导致系统压力不够引发故障。泄漏到环境中的液压油还有发生火灾的危险。

PLC NUAA

0.3 液压与气压传动优缺点

0.3.2气压传动特点

0.3.2.1气压传动优点

（1）空气取之不尽，处理方便，用过以后直接排入大气，不会污染环境，且可少设置或不必设置回气管道。

（2）空气的黏度很小，只有液压油的万分之一，流动阻力小，所以便于集中供气，中、远距离输送。

（3）气动控制动作迅速，反应快；维护简单，工作介质清洁，不存在介质变质和更换等问题。

（4）工作环境适应性好。适于在易燃、易爆、多尘埃、辐射、强磁、振动、冲击等恶劣的环境中。

（5）气动元件结构简单，便于加工制造。

PLC NUAA

0.3 液压与气压传动优缺点

0.3.2气压传动特点

0.3.2.2气压传动缺点

- 工作压力低，仅适用于小功率场合；
- 响应能力、平稳性、位置和速度控制精度等方面不如液压传动；
- 气压传动系统出力较小，且传动效率低；
- 气压传动系统的噪声大，尤其是排气时，须加消音器；

PLC NUAA

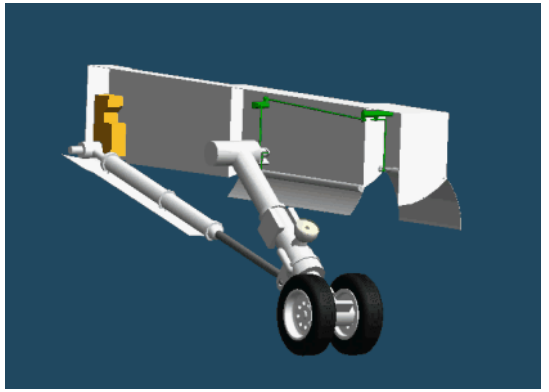
0.4 液压与气压传动技术应用领域

0.4.1液压传动技术应用

➢军事工业：火炮操纵装置，例如在坦克的炮架上，装了**液压伺服控制**的稳定器，使炮筒在车身上下颠簸时仍能**保持平稳**，保证坦克车在行进中能准确射击。

0.4液压与气压传动技术应用领域

➢航空航天工业：应用十分广泛，例如飞机的起落架收放装置、方向舵的控制装置和机场用的升降台。



PLC NUAA

0.4 液压与气压传动技术应用领域

➢船舶工业：船舶减摇装置、甲板起重机械（绞车）、船头门、舱壁阀、船尾推进器等。

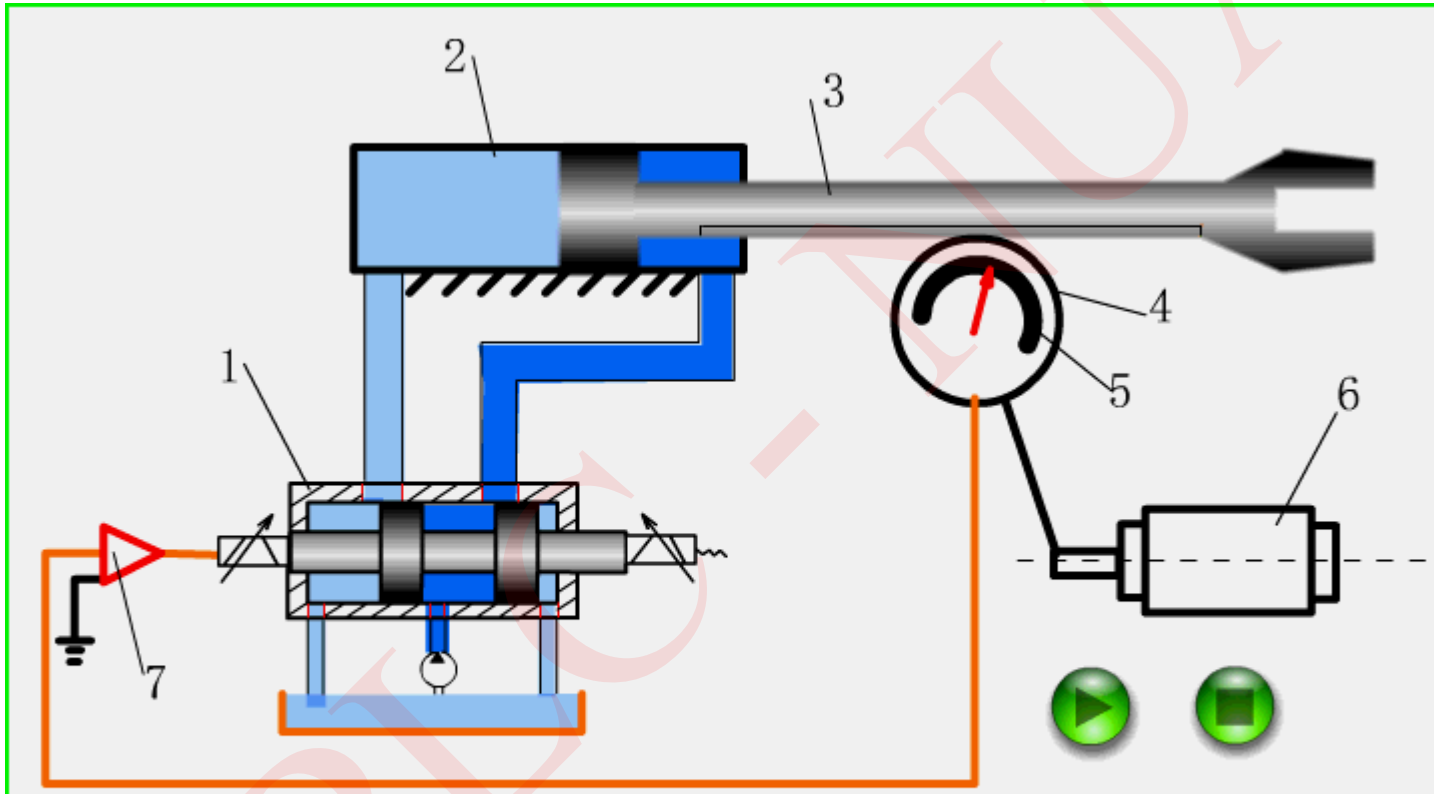
绞车

船舶减摇鳍

PLC - NUAA

0.4 液压与气压传动技术应用领域

➢工业机械人：如上料机械手，采用液压摆动油缸控制肘关节的运动，既能改变手臂的转动方向，还可伸展手臂来改变手臂高度，从而顺利完成高温液体的上料任务。

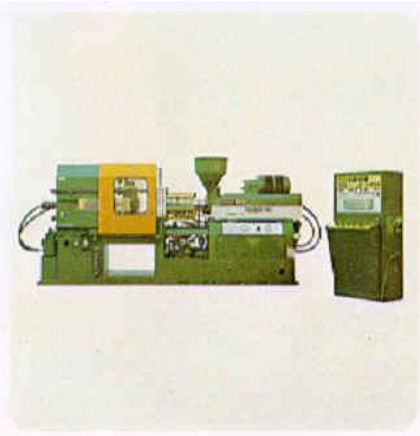


1-电液伺服阀；2-液压缸；3-机械手手臂；4-齿轮齿条机构；
5-电位器；6-步进电机；7-放大器

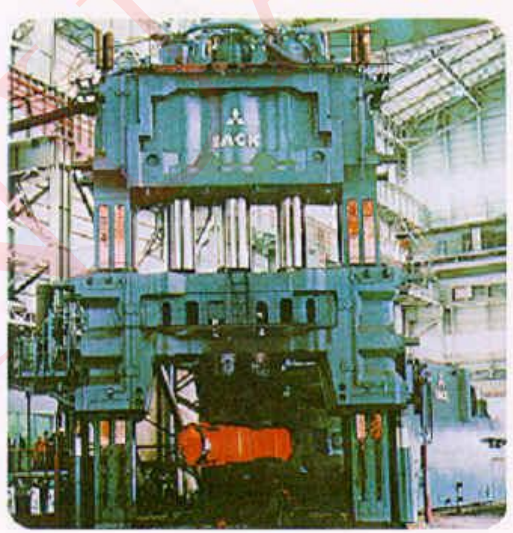
PLC-NUAA

0.4 液压与气压传动技术应用领域

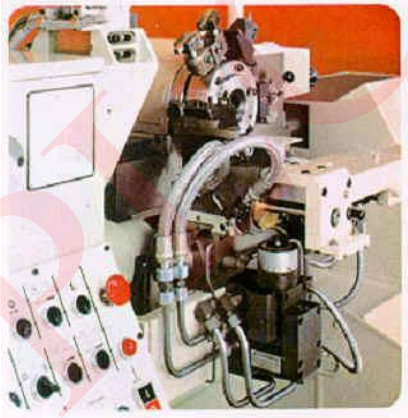
➢一般工业： 塑料加工机械（注塑机）、压力机械（锻压机）、重型机械（废钢压块机）、机床（全自动转塔车床、平面磨床）等。



注塑机



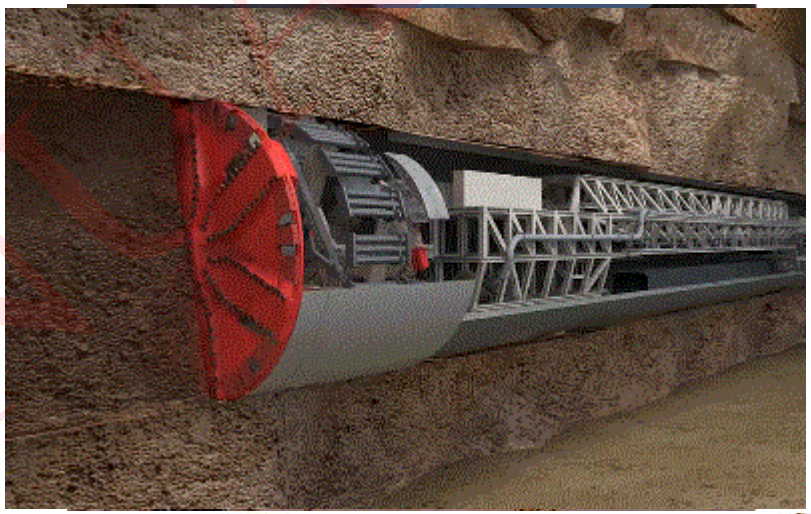
油压机



机床

0.4 液压与气压传动技术应用领域

➢行走机械： 工程机械（挖掘机，盾构）、起重机械（汽车吊）、建筑机械（混凝土泵车）等。



0.4 液压与气压传动技术应用领域

娱乐设施

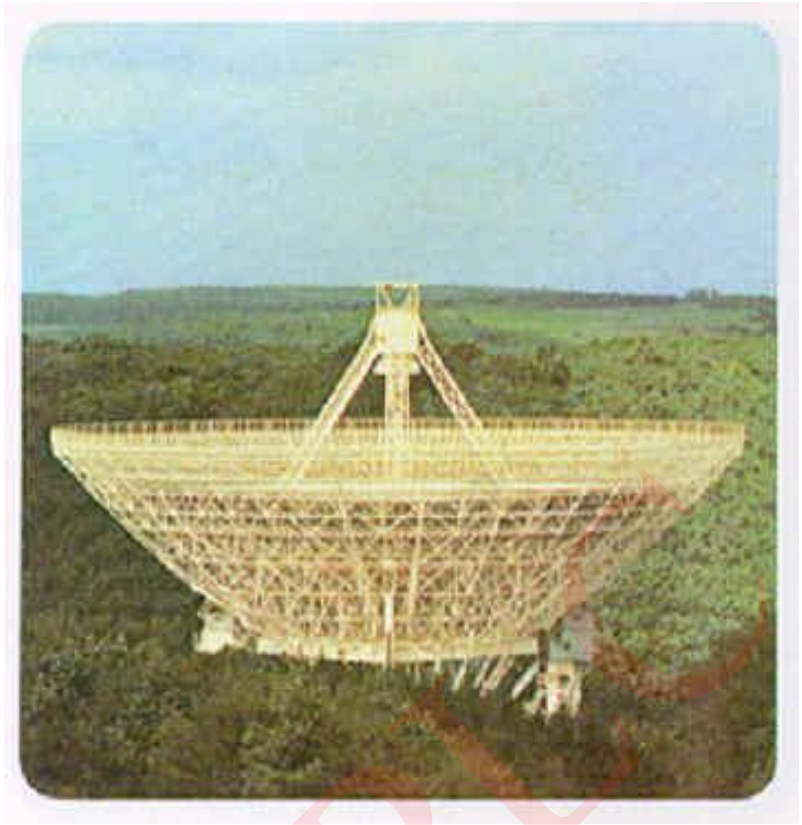
液压升降舞台

0.4 液压与气压传动技术应用领域

➢土木工程：防洪闸门及堤坝装置（浪潮防护挡板）、河床升降装置、桥梁操纵机构和矿山机械（凿岩机）等。

0.4 液压与气压传动技术应用领域

➢特殊技术：巨型天线控制装置、测量浮标、飞行器仿真台、升降旋转舞台等。



巨型天线

飞行模拟器

0.4 液压与气压传动技术应用领域

➢来自自然界的液压现象

含羞草的叶柄和小叶基部有较膨大的叶枕，中间有充满水分的薄壁细胞，它就像液压机里的油缸。叶枕里细胞间的空隙较大，一刺激叶子，在0.03秒钟内，叶枕上半部薄壁细胞里的水分即被排到细胞间隙去，细胞的膨压立即下降，两片小叶就闭合。所受的刺激能以每秒10厘米的速度沿着叶脉传到别处，从而使整个叶片下垂。

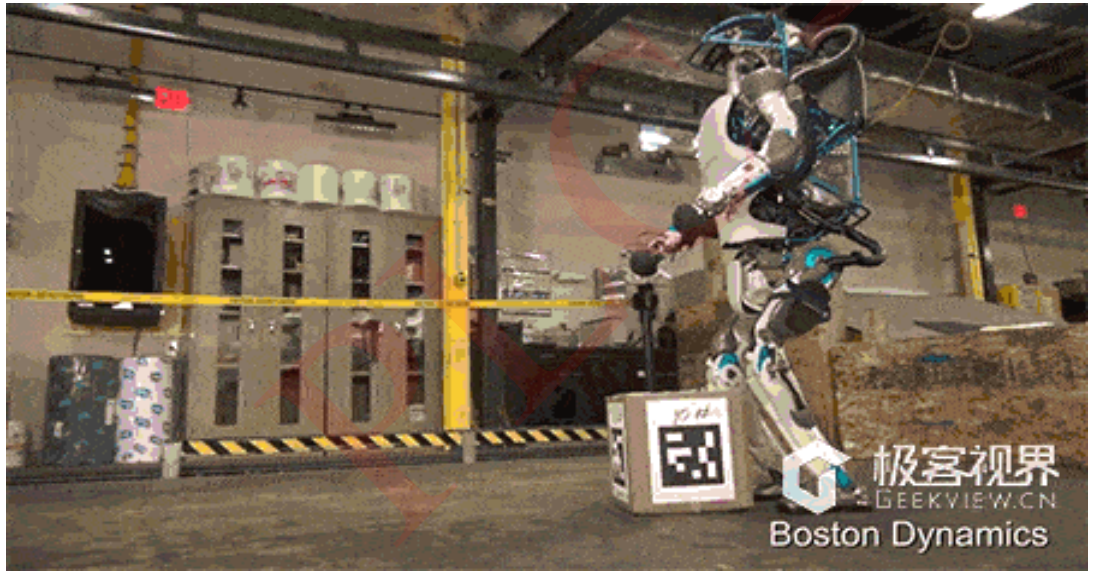
蜘蛛大腿内充满奇特的液体，相当于一个**液压**装置，可根据情况自行调节**液压**的强弱。一旦遇到紧急情况，**蜘蛛**大腿内就会充满液体而使腿由软变硬，爆发出力量一跃而起。仿生学家们模仿这种奇妙的**液压**腿，研制出一种步行机，行走弹跳灵活敏捷，用于机械手，机器人的“关节”中，更妙不可言。

生气了~气到炸的河豚！~

0.4 液压与气压传动技术应用领域

Boston Dynamics

Big Dog



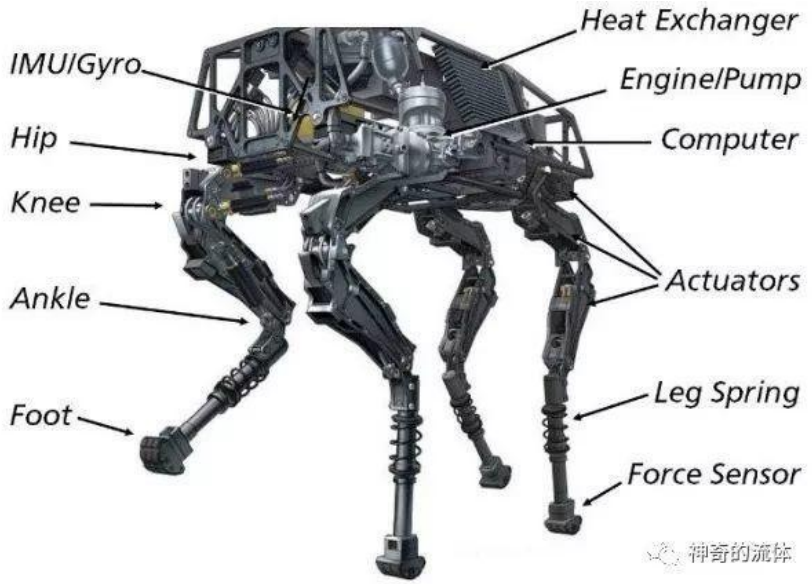
Atlas

0.4 液压与气压传动技术应用领域

Boston Dynamics

BigDog俗称“大狗”，是一款四足仿生机器人

- 爬行速度：10 km/h
- 最大可攀爬斜坡： 35度
- 能够适应各种不同地质环境
- 最大承载达50kg
- BigDog四肢均由液压驱动
- 每条腿有4个自由度：小腿和大腿各一个纵向自由度，分别由一个液压缸驱动；胯部有纵向和横向两个自由度，由两个液压缸驱动
- 全身共16个自由度



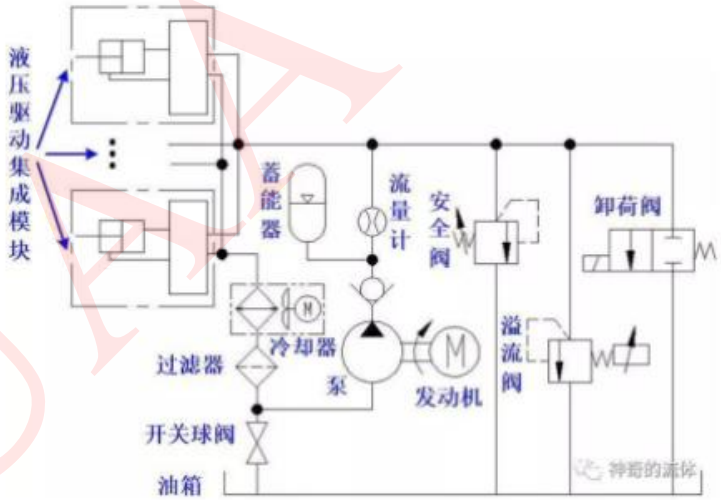
PLC-NIAA

0.4 液压与气压传动技术应用领域

BigDog液压原理

BigDog基本具备了液压系统的所有特征：

1. **缓冲补油**：蓄能器，吸收系统压力冲击和波动，补充瞬时流量提高频响
2. **回油冷却**：风冷机
3. **过滤**：过滤器，为伺服系统净化液压油
4. **安全保护**：安全阀，保护液压系统
5. **卸荷**：卸荷阀
6. **管路连接**：管路大量使用旋转接头
7. **压力调节**：插装溢流阀
8. **流量监测**：流量计，监测系统总流量
9. **液压力监测**：压力传感器
10. **油温监测**：温度传感器
11. **力反馈**：力传感器，监测液压缸驱动关节的力和脚部与地面的接触力



BigDog腿部液压驱动原理简图（此图根据BD官方报告绘制）

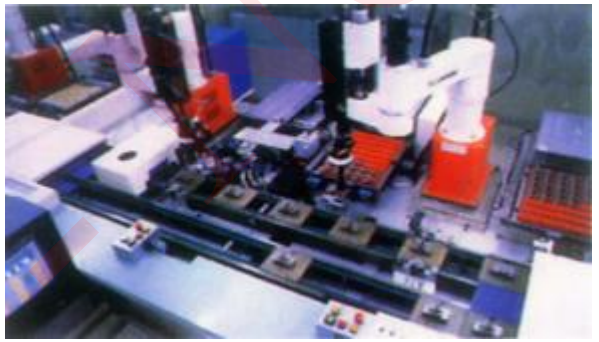
- **发动机**：卡丁车上的单缸双冲程发动机
- **液压驱动集成模块**：两级MOOG伺服阀和低摩擦密封油缸集成，油缸配有位移和力传感器，提高系统频响和减小占用空间
- **泵**：变量活塞泵，额定压力约为20.68MPa
- **其它传感器**:立体视觉传感器（多目识别），线性加速度计+激光陀螺仪（姿态控制），GPS导航（室内室外导航）+激光定位器（跟踪人），关节角度传感器（姿态反馈）+关节力传感器（力反馈），地面接触力传感器（力反馈），发动机温度和转速传感等

PLC - NUAA

0.4 液压与气压传动技术应用领域

0.4.2气压传动技术应用

气压传动的应用也相当普遍，许多机器设备中都装有气压传动系统，在工业各领域，如机械、电子、钢铁、运行车辆及制造、橡胶、纺织、化工、食品、包装、印刷和烟草机械等，气压传动技术不但在各工业领域应用广泛，而且，在尖端技术领域如核工业和宇航中，气压传动技术也占据着重要的地位。



PLC NUAA

0.4 液压与气压传动技术应用领域

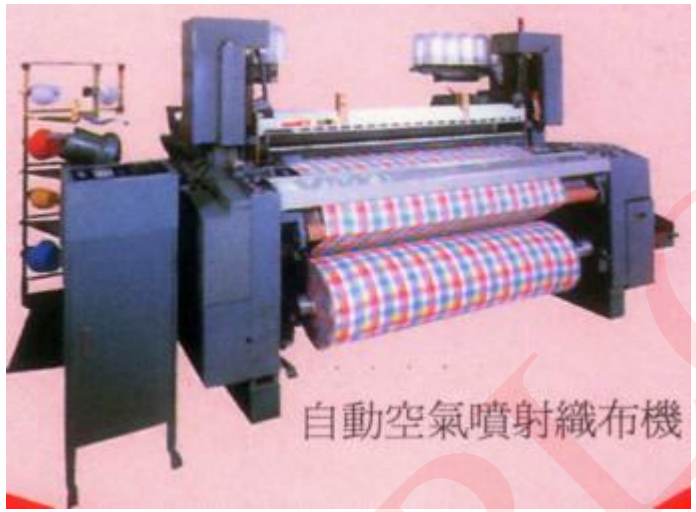
气动破碎机

PLC NUAA

0.4 液压与气压传动技术应用领域

牛奶包装机

自动水果分类机



自动空气喷射织布机

压烫机

PLC - NUAA

复　习

1. 什么是液压与气压传动？
2. 液压与气压传动的两个重要特征及参数？
3. 液压与气压传动的组成及各部分作用？
4. 液压与气压传动的优缺点？
5. 液压传动系统图形符号原理图的特点？

PLC NUAA

第一章
液压传动基础知识

PLC-NUAA

主要内容

- 1.1 液压油
- 1.2 液体静力学
- 1.3 液体动力学
- 1.4 管道中的液流特性
- 1.5 孔口和缝隙流动
- 1.6 空穴与液压冲击

PCL NUAA

1.1 液压油

1.1.1 液压油的性质

1.1.2 对液压油的要求与选用

1.1.3 液压系统的污染控制

PLC-NUAA

1.1 液压油

1.1.1 液压油的性质

➢可压缩性：液体受外力的作用而使其体积发生变化的性质。

◆体积压缩系数 $\kappa = -\frac{1}{\Delta p}\frac{\Delta V}{V}$

——物理意义：单位压力所引起液体体积的相对变化量；

◆体积弹性模量 $K = \frac{1}{\kappa} = -\frac{V}{\Delta V}\Delta p$

——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。

表 1-2 各种液压传动工作介质的体积模量(20℃,大气压)

液压传动工作介质种类	$K/(N \cdot m^2)$
石油型	$(1.4\sim2.0)\times10^9$
水包油乳化液(W/O 型)	1.95×10^9
水一乙二醇液	3.15×10^9
磷酸酯液	2.65×10^9

Q235钢的弹性模量为$2\times10^{11}N/m^2$

注意：油液中混有空气将使油液压缩性显著增加，其体积弹性模量将显著降低。例如混有1%空气，将降到纯油5%左右，混有5%空气时，将降到纯油1%左右。

1.1 液压油

1.1.1 液压油的性质

◆可压缩性的影响因素

✓压力： 压力增大，体积弹性模量增大；（3MPa以内）

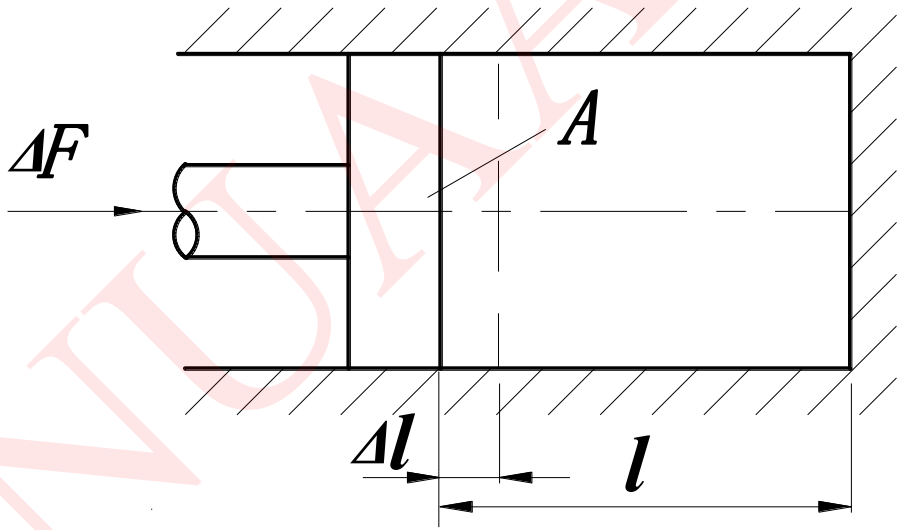
✓温度：温度升高，体积弹性模量减小；

PLC - NUAA

1.1 液压油

1.1.1 液压油的性质

◆液压弹簧效应



$$\Delta p = \Delta F / A$$

$$k_{hydraulic} = k_h = -\frac{\Delta F}{\Delta l} = -\frac{\Delta p \cdot A}{\Delta V / A} = \frac{A^2 K}{V}$$

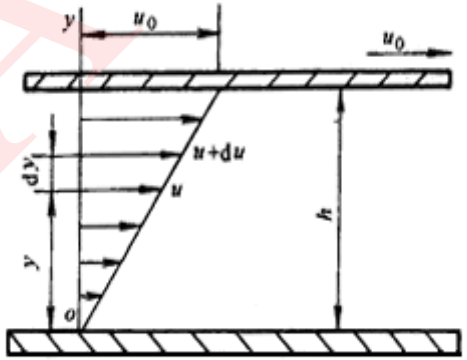
$$\Delta V = A\Delta l$$

$$K = -\frac{V}{\Delta V}\Delta p$$

PLC-NUAA

1.1 液压油

➢粘性：液体在外力作用流动（或有流动趋势）时，分子间的内聚力要阻止分子间的相对运动而产生一种内摩擦力 。

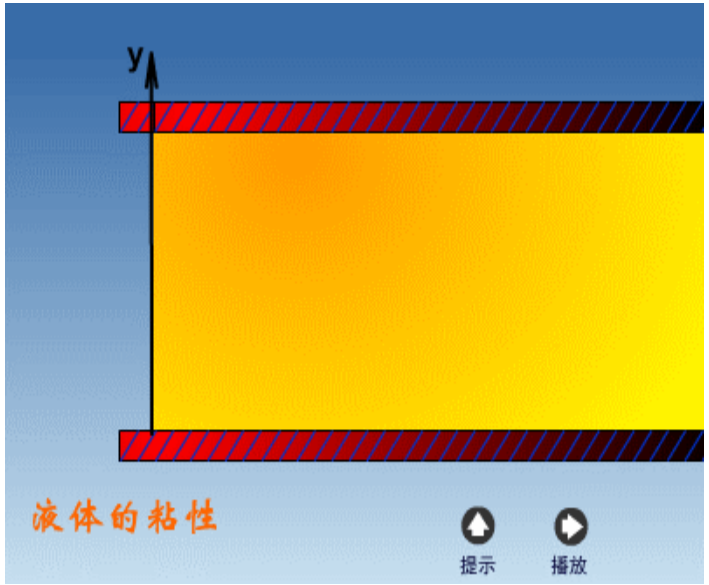


◆牛顿的液体内摩擦定律

内摩擦力：$$F_t = \mu A \frac{du}{dy}$$

切应力：$$\tau = \frac{F_t}{A} = \mu \frac{du}{dy}$$

液体在静止时是不呈现粘性的。



PLC-NUAA

1.1 液压油

◆粘度的度量

（1）动力粘度 μ（绝对粘度）　$F_t = \mu A \frac{du}{dy}$

（2）运动粘度 ν　$\nu = \mu / \rho$

单位：m^2/s或常用mm^2/s（cSt，厘斯）；

运动粘度没有明确的物理意义，因其量纲中只有运动学因子而得名，常用于液压油的牌号标注。如L-AN32液压油在40°C时运动粘度的平均值为32 mm^2/s。

（3）相对粘度（条件粘度）

$$°E_t = \frac{t_1}{t_2} \qquad \nu = \left(7.31°E_t - \frac{6.31}{°E_t}\right) \times 10^{-6}$$

BUAA

1.1 液压油

◆粘度的影响因素

✓压力（粘压特性）：压力增大，粘度增大

油液的粘度随压力的增加而增加，在压力小于20MPa时，油液的粘度变化不大；但当压力很高时，粘度将急剧增大。

✓温度（粘温特性）：温度升高，粘度下降

✓其它性质

稳定性、抗泡沫性、抗乳化性、防锈性、润滑性、相容性等

PLC - NUAA

1.1 液压油

✓其它性质

- **稳定性**：液压油在使用和储存过程中，抵抗自身发生化学或物理变化的能力。通常包括氧化稳定性（抵抗与空气接触发生氧化变质）、热稳定性（抵抗高温分解）和剪切稳定性（抵抗高压通过节流口时分子被切断导致粘度下降）
- **抗泡沫性**：迅速释放混入空气并消泡，保证压力传递平稳，防止气蚀与爬行。泡沫会大幅降低油液的体积弹性模量，导致系统压力传递不稳定（爬行、冲击）、产生气蚀现象，还会加剧油液氧化，甚至导致油箱溢油。
- **抗乳化性**：混入水分后能迅速油水分离，防止乳化变质，避免影响传动效率。液压系统常因冷凝、泄漏等原因混入水分。若抗乳化性差，油水混合会形成乳白色液体，破坏润滑油膜，导致金属生锈、加速油液氧化变质，并降低系统传动效率。
- **防锈性**：在金属表面形成保护膜，防止水分和酸性物质导致元件腐蚀卡滞。
- **润滑性**：在摩擦副表面形成强韧油膜，降低摩擦，减少泵、阀等元件的机械磨损。
- **相容性**：与密封件、软管等非金属材料及残留油液良好共存，防止密封失效漏油。

PPT-NUAA

1.1 液压油

1.1.2对液压油的要求与选用

要求：油液性能会直接影响液压传动的性能，如工作的可靠性、灵敏性、工况的稳定性、系统的效率及零件的寿命等。

- 合适的粘度，具有较好的粘温特性；
- 润滑性能好；
- 质地纯净、杂质少，并对金属和密封件有良好的相容性；
- 对热、氧化、水解和剪切有良好的稳定性；
- 抗泡沫性、抗乳化性和防锈性好，腐蚀性小；
- 体积膨胀系数小，比热容大；
- 对人体无害，对环境污染小，成本低，价格便宜。

FCU-NUAA

1.1 液压油

1.1.2 对液压油的要求与选用

选用：液压油的类型——根据工作环境和工作条件。

- **若系统靠近300 ℃以上的高温表面热源或有明火场所，要选择难燃型液压油；**
- **对液压油液用量大、工作压力不高的液压系统建议选用乳化型液压油；**
- **用量小的液压系统以及一些特殊设备中选用合成型液压油。**
- **对于食品、医药包装机械液压系统，应尽量采用无污染的水或少污染的HFA。**

注：HFA是国际标准（ISO 6743-4）中定义的一类高含水量液压液（High Water Content Fluid, HWCF）。它的核心特征是以水为主要成分，含水量通常高达 80% 至 95% 以上。

PLC NUAA

1.1 液压油

1.1.2 对液压油的要求与选用

选用：液压油的粘度——根据泵、温度、压力、速度等

- **液压泵：**压力大、转速和温度高，液压油液被泵吸入和被泵压出时要受到剪切作用，所以一般根据液压泵的要求来确定液压油液的粘度
- **温度：**环境温度高，则选用粘度高的液压油；环境温度低，则选用粘度低的液压油；环境温度变化较大需要粘温特性好的液压油
- **液压系统的工作压力：**工作压力较高的液压系统宜选用较大粘度的液压油，以减少系统泄漏
- **液压执行元件的速度：**运动速度较高时，为减少液流的功率损失，选用粘度较低的液压油液

FLCNUAA

1.1 液压油

1.1.3 液压系统的污染控制

液压系统污染来源

系统固有的污染物	油缸、管子、阀、泵、油箱及其它附件
系统产生的污染物	系统装配过程、系统运行过程、系统故障、流体变质
外界侵入的污染物	油箱通气孔、油缸轴封、泵的轴封
维修造成的污染物	系统拆装、油料补充

PLC NUAA

1.1 液压油

1.1.3 液压系统的污染控制

液压系统污染等级评定

美国国家宇航标准NAS1638 （100ml液体含颗粒数）

颗粒尺寸范围（微米）	等级						
	00	0	1	2	3	4	5
＞5－－15	125	250	500	1000	2000	4000	8000
＞15－－25	22	44	89	178	356	712	1425
＞25－－50	4	8	16	32	63	126	253
＞50－－100	1	2	3	6	11	22	45
＞100	0	0	1	1	2	4	8
颗粒尺寸范围（微米）	等级						
	6	7	8	9	10	11	12
＞5－－15	16000	32000	64000	128000	256000	512000	1024000
＞15－－25	2850	5700	11400	22800	45600	91200	182400
＞25－－50	506	1012	2025	4050	8100	16200	32400
＞50－－100	90	180	360	720	1440	2880	5760
＞100	16	32	64	128	256	512	1024

1.1 液压油

1.1.3 液压系统的污染控制

液压系统污染等级评定

国际标准ISO4406 （100ml液体含颗粒数）

大于	至	等级范围	大于	至	等级范围
8×10^6	16×10^6	24	1×10^3	2×10^3	11
4×10^6	8×10^6	23	500	1×10^3	10
2×10^6	4×10^6	22	250	500	9
1×10^6	2×10^6	21	130	250	8
500×10^3	1×10^6	20	64	130	7
250×10^3	500×10^3	19	32	64	6
130×10^3	250×10^3	18	16	32	5
64×10^3	130×10^3	17	8	16	4
32×10^3	64×10^3	16	4	8	3
16×10^3	32×10^3	15	2	4	2
8×10^3	16×10^3	14	1	2	1
4×10^3	8×10^3	13	0.5	1	0
2×10^3	4×10^3	12	0.25	0.5	0.9

1.1 液压油

1.1.3 液压系统的污染控制

液压系统污染等级评定

国际标准ISO4406 （100ml液体含颗粒数）

ISO4406固体颗粒污染度等级标准包括两个数量范围，以区别污染颗粒尺寸和分布,第一个范围是每100ml的液体中含5μm以上的颗粒数，第二个范围是每100ml的液体中含15μm以上的颗粒数。

如：ISO4406 18/13 表示：在100ml液体中大于5μm的颗粒数在130×1000和250×1000之间，大于15μm颗粒数在4×1000和8×1000之间。

PLC_BUAA

1.1 液压油

1.1.3 液压系统的污染控制

液压系统污染控制措施：

性质	污染源	控制措施
外部侵入	更换元件	对元件有清洁度要求
	补新油	预先过滤
	通气孔	加装空气呼吸过滤器
	环境	加强管理
内部产生	组装时带入	组装前有清洁度要求，组装后清洗到一定标准
	管道滞留	避免易滞留颗粒的设计
	工作状态	设计负荷恰当
	间隙	选择正确的动力间隙
	元件磨蚀	安装合适的过滤器防止连锁磨损

PLC-NUAA

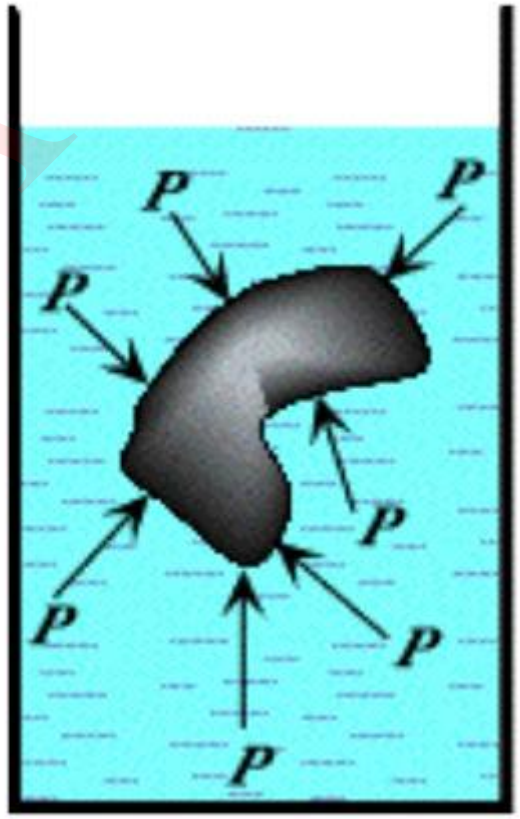
1.2 液体静力学

- 1.2.1 静压力及其特性
- 1.2.2 静压力基本方程
- 1.2.3 压力的表示方法与单位
- 1.2.4 静压传递原理(帕斯卡原理)
- 1.2.5 静压力对固体壁面的作用力

PLC-NUAA

1.2 液体静力学

1.2.1静压力及其特性



➢定义：静止液体在单位面积上所受到法向力；

➢计算：在液体内部某点处微小面积ΔA上作用有法向力ΔF，则静压力p为

$$p = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

➢特性：

✓ 液体静压力垂直于作用表面，其方向和该面的内法线方向一致；

✓静止液体内任一点所受的静压力在各个方向上都相等，由此可见，静止液体内部的任何质点都受平衡压力的作用。

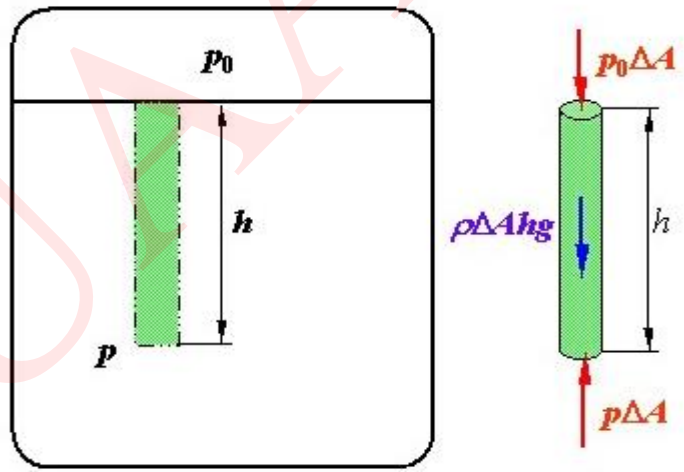
PIC-NUAA

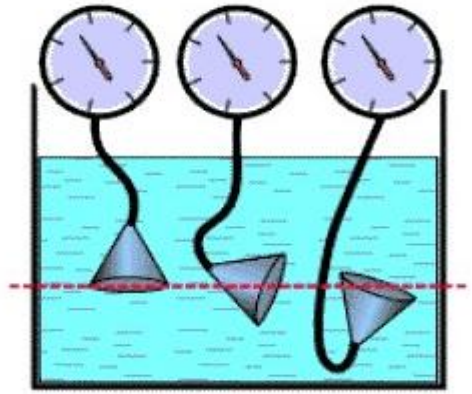
1.2 液体静力学

1.2.2静压力基本方程

➢**静压力基本方程：**

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





■ **特点：**

✓压力由两部分组成：

（1）液面压力 p_0

（2）液体自重形成的压力 $\rho g h$

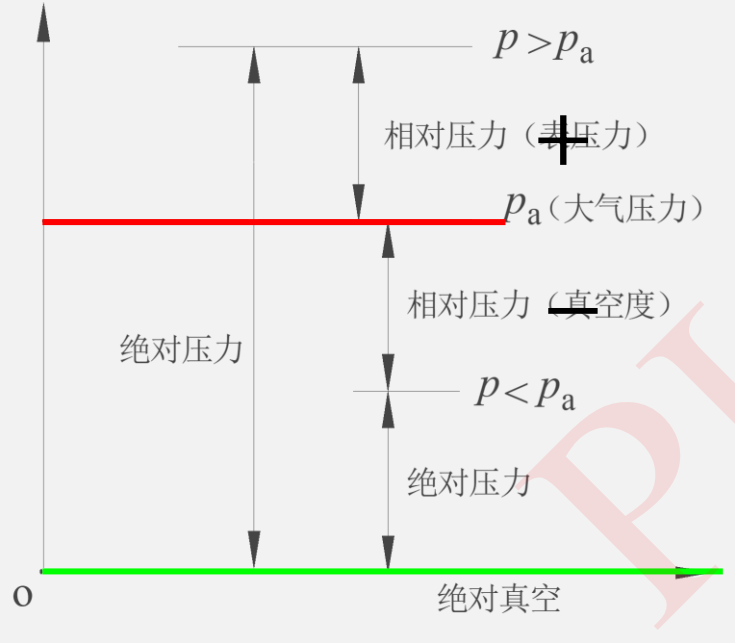
FEC - NUAA

1.2 液体静力学

1.2.3压力的表示方法与单位

- 绝对压力：以绝对真空为基准度量的压力叫做绝对压力
- 相对压力：以大气压为基准度量的压力叫做相对压力或表压力。

相对压力＝绝对压力－大气压力



- 真空度：如果液体中某点的绝对压力小于大气压力，比大气压力小的那部分数值叫做这点的真空度。

真空度＝大气压－绝对压力

注意：绝对压力是正值，相对压力有正有负，真空度一定是正值。

PLC-NUAA

1.2 液体静力学

➢单位：

- 1Pa=1N/m^2, 1MPa=10^6Pa
- 1at=1kgf/cm^2=9.8*10^4N/m^2
- 1mH_2O=9.8*10^3N/m^2
- 1mmHg=1.33*10^2N/m^2
- 1bar=10^5N/m^2

Pa	bar	at(kgf/cm^2)	lbf/in^2	atm	mmH_2O	mmHg
1×10^5	1	1.01972	1.45×10	0.986923	1.01972×10^4	7.50062×10^2

PLC - NUAA

1.2 液体静力学

■例题1：

已知：活塞：F=10000N，d=0.2m，H=0.05m，钢

油液：密度900kg/m^3

求：h=0.5m处的液体压力（绝对压力）

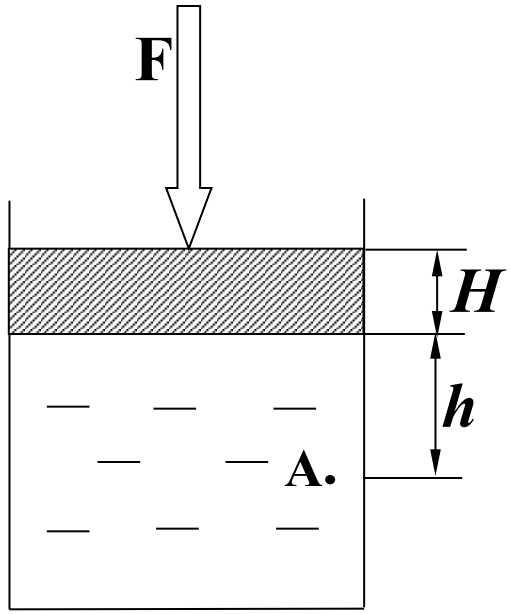
解：活塞重力产生的压力：

$$P_G = \frac{\rho_{活} g V}{A} = \rho_{活} g H = 3846 Pa$$

作用力F产生的压力：

$$P_F = \frac{F}{A} = 318471 Pa$$

A点压力为：



$$P = P_G + P_F + P_a + \rho_{液} g h = 3846 + 318471 + 101325 + 4410 = 428052 Pa$$

在液压传动系统中，液体重力引起的压力通常很小，可以忽略不计，液体静压力取决于外加压力。

BUAA-NUAA

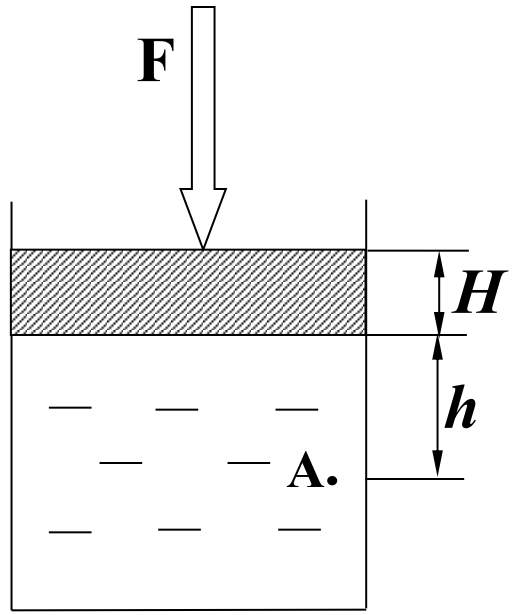
1.2 液体静力学

■例题1：

已知：活塞：F=10000N，d=0.2m，H=0.05m，钢

油液：密度900kg/m^3

求：h=0.5m处的液体压力（相对压力或表压力）



解： 活塞重力产生的压力：

$$P_G = \frac{\rho_{活} g V}{A} = \rho_{活} g H = 3846 Pa$$

作用力F产生的压力：

$$P_F = \frac{F}{A} = 318471 Pa$$

A点压力为：

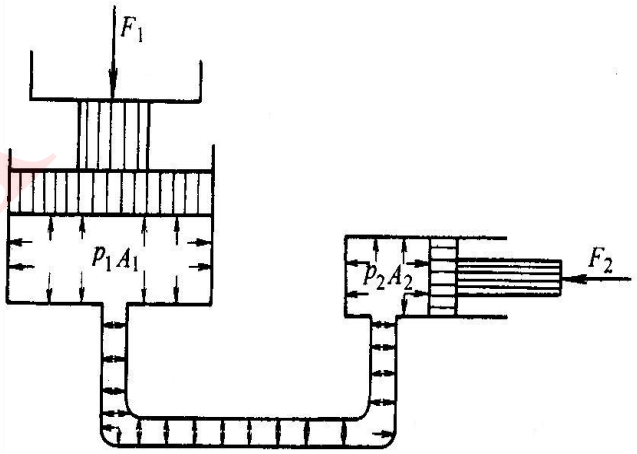
$$P = P_G + P_F + \rho_{液} g h = 3846 + 318471 + 4410 = 326727 Pa$$

在液压传动系统中，液体重力引起的压力通常很小，可以忽略不计，液体静压力取决于外加压力。

PLC - NUAA

1.2 液体静力学

1.2.4 帕斯卡原理 (静压传递原理)



➢在密封容器内，施加于静止液体上的压力可以等值传递到液体内各点。

➢力可以放大，可以缩小，可以改变方向。

如图一个密闭容器，按帕斯卡原理，液压缸内压力到处相等，$p_1 \approx p_2$，于是

$$F_2 = F_1 A_2 / A_1$$

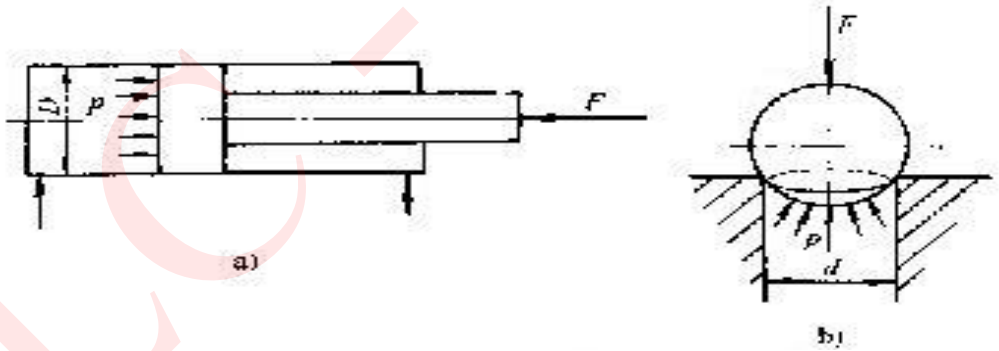
PLC NUAA

1.2 液体静力学

1.2.5 静压力对固体壁面的作用力

- 固体壁面为平面：液体压力作用在该平面上的力F等于静压力p与承压面积A的乘积；

- 固体壁面为曲面：液体对曲面在某方向上的作用力等于液体压力和曲面在该方向上投影面积的乘积。



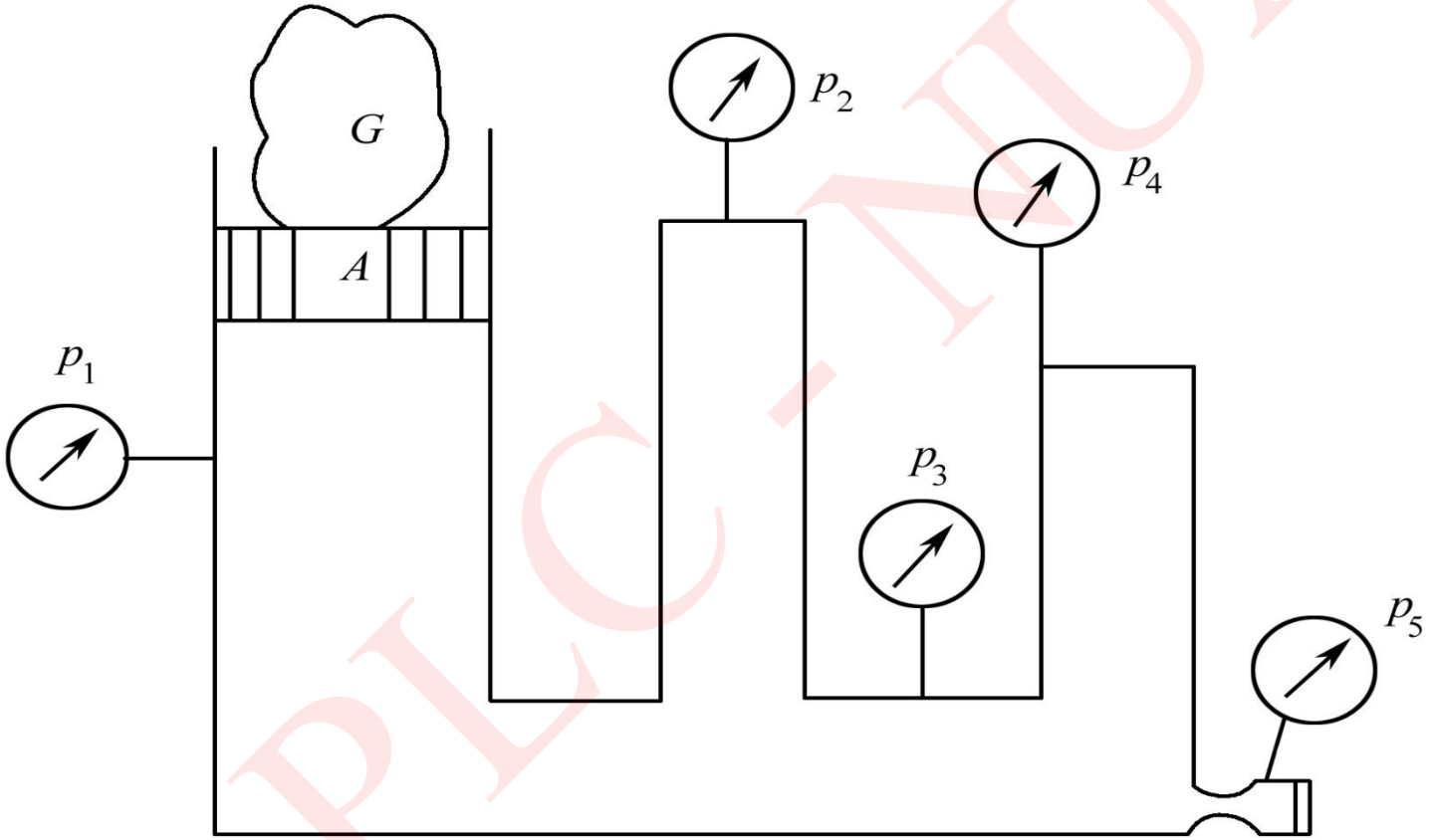
$$F = pA = \frac{\pi D^2}{4} p$$

$$F = pA = \frac{\pi d^2}{4} p$$

PLC NUAA

1.2 液体静力学

例题 2 ． 如题2图所示，已知活塞面积$A=10\times10^{-3}m^2$,包括活塞自在重内的总负重G=10kN,问从压力表上读出的压力P_1、P_2、P_3、P_4、P_5各是多少?



PLC - NUAA

1.2 液体静力学

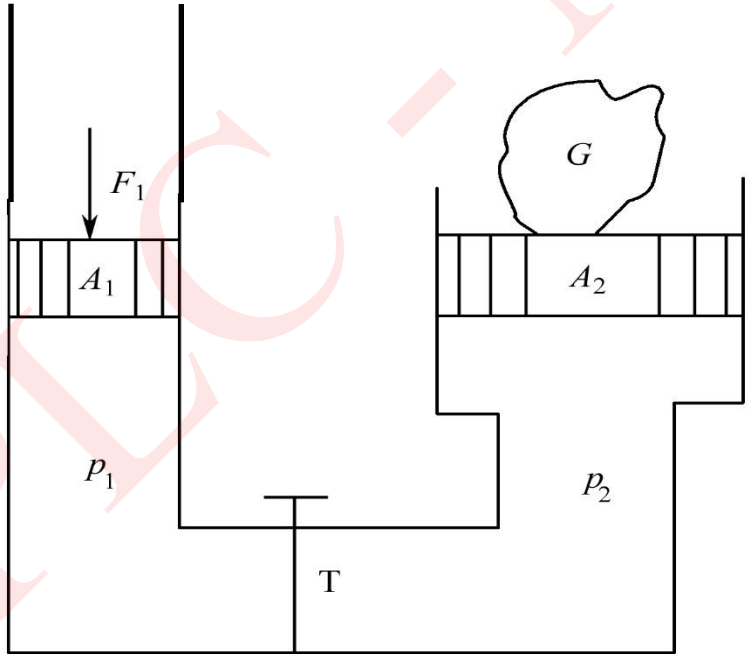
例题 3． 如题3图所示连通器，中间有一活动隔板T，已知活塞面积$A_1=1\times10^{-3}m^2$，$A_2=5\times10^{-3}m^2$，$F_1=200N$，$G=2500N$，活塞自重不计，问：

（1）当中间用隔板T隔断时，连通器两腔压力P_1、P_2各是多少？

（2）当把中间隔板抽去,使连通器连通时，两腔压力P_1、P_2各是多少?力F_1能否举起重物G？

（3）当抽去中间隔板T后若要使两活塞保持平衡,F_1应是多少？

（4）若G=0，其它已知条件都同前F_1 是多少？



PLC - NUAA

1.3 液体动力学

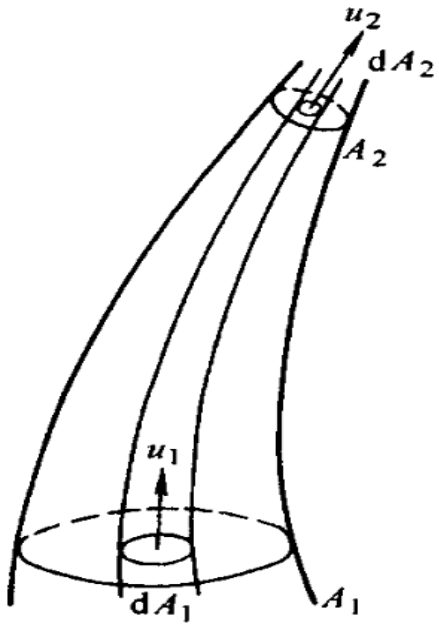
- 1.3.1 连续性方程—质量守恒定律
  （反映流速与流量之间的关系）
- 1.3.2 伯努利方程—能量守恒定律
  （反映压力、流速之间的关系）
- 1.3.3 动 量 方程—动 量 定 理
  （解决流动液体与固体壁面间的作用力问题）

PLC-NUAA

1.3 液体动力学

1.3.1 连续性方程—质量守恒定律

- 前提：**定常流动、不可压缩、平均流速流动**；
- 质量守恒定律：在 dt 时间内流入此微小流束的质量应等于从此微小流速流出的质量；



- 结果： $q_1 = q_2$

以平均流速表示： $u_1 A_1 = u_2 A_2$

故有： $q = uA = 常数$

理解：
- 通过流管任一通流截面的流量相等。
- 液体的流速与管道通流截面积成反比.
- 在具有分支的管路中具有$q_1=q_2+q_3$的关系.

1.3 液体动力学

1.3.2 伯努利方程—能量守恒定律

➢1 理想液体的伯努利方程 （既无粘性又不可压缩的液体）

前提：理想液体、定常流动、重力场；

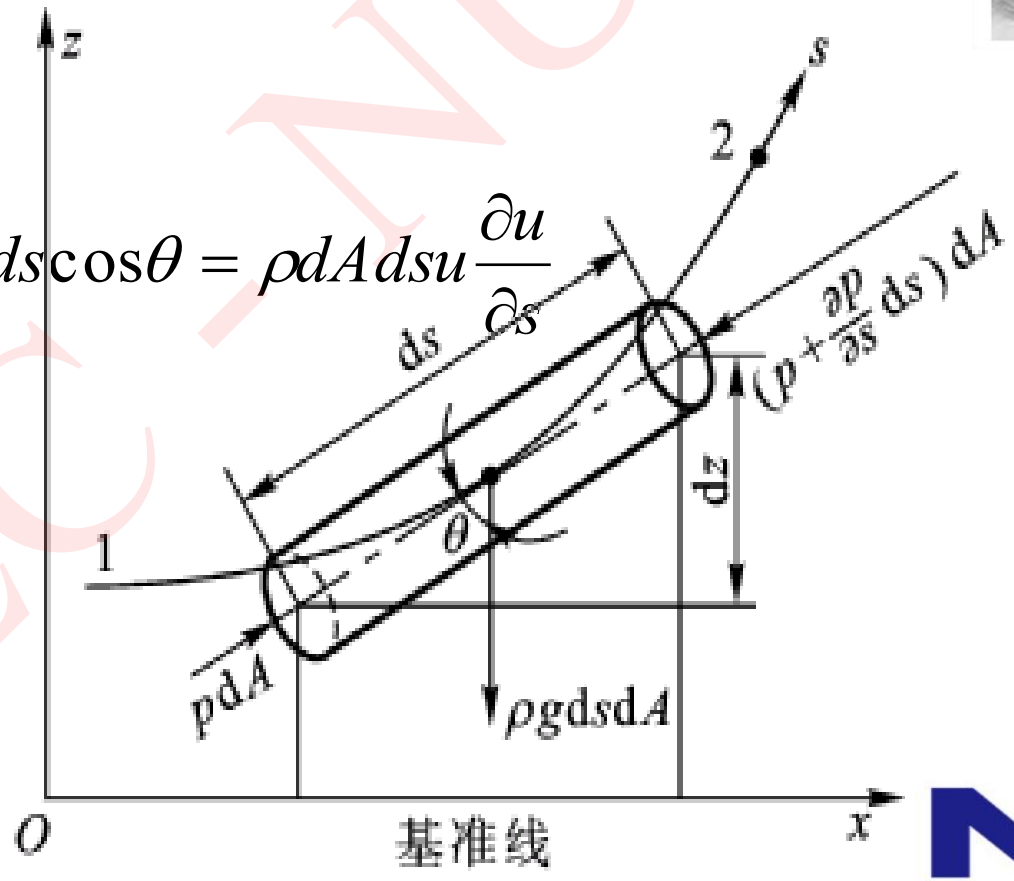
$$a=\frac{du}{dt}=\frac{\partial u}{\partial s}\cdot\frac{ds}{dt}=u\frac{\partial u}{\partial s}$$

$$pdA-(p+\frac{\partial p}{\partial s}ds)dA-\rho gdAds\cos\theta=\rho dAdsu\frac{\partial u}{\partial s}$$

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial s}+g\frac{\partial z}{\partial s}+u\frac{\partial u}{\partial s}=0$$

欧拉运动方程:

$$\frac{1}{\rho}dp+gdz+udu=0$$



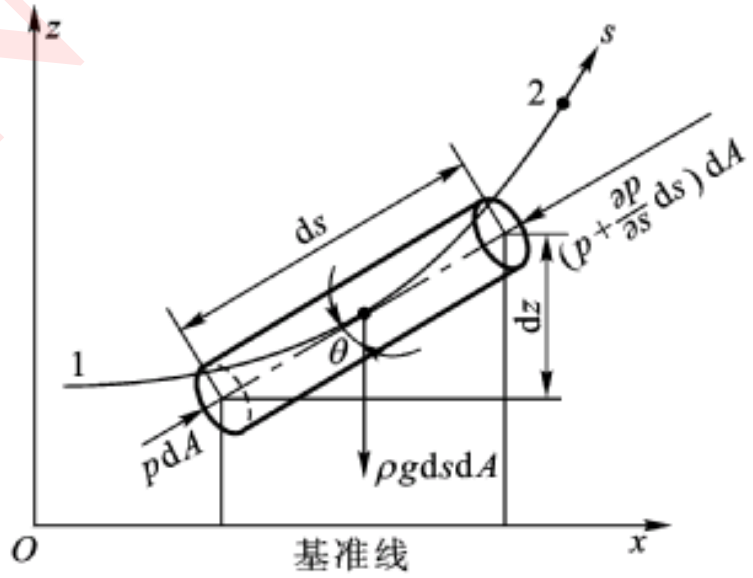
PLC-NUAA

1.3 液体动力学

沿流线积分，得：$\frac{1}{\rho}dp+gdz+udu=0 \Rightarrow \frac{p}{\rho}+gz+\frac{u^2}{2}=常数$

或对于流线上任意两点有如下形式：

$$\frac{p_1}{\rho g}+z_1+\frac{u_1^2}{2g}=\frac{p_2}{\rho g}+z_2+\frac{u_2^2}{2g}$$



PLC-NUAA

1.3 液体动力学

•物理意义：$$\frac{p_1}{\rho g}+z_1+\frac{u_1^2}{2g}=\frac{p_2}{\rho g}+z_2+\frac{u_2^2}{2g}$$

$\frac{p}{\rho g}$ 表示单位重量液体的压力能(比压能)

z 表示单位重量液体的位　能(比位能)

$\frac{u^2}{2g}$ 表示单位重量液体的动　能(比动能)

三者之和为单位重量液体的总比能。伯努利方程表明理想流体作定常流动时，液体任意截面处液体的总比能是由比压能、比位能和比动能组成，沿同一流线单位重量液体的能量守恒，所以又称为能量方程。

PC NUAA

1.3 液体动力学

如果流动在同一水平面内，或z可以忽略不计的情况下：

$$\frac{p_1}{\rho}+\frac{u_1^2}{2}=\frac{p_2}{\rho}+\frac{u_2^2}{2}$$

表明：沿流线速度越高，压力越低

➢伯努利现象举例：

◆火车站、地铁站的等候安全线；

◆船吸现象；

◆在水流湍急的江河里去游泳；

◆多管火箭发射时不可多枚火箭弹同时发射。

PLC - NUAA

1.3 液体动力学

实际液体具有粘性，在管内流动时需克服由于粘性所引起的摩擦力而消耗能量；此外由于管道形状和尺寸的变化，液流会产生扰动，也会消耗能量。

➢ 实际液体的伯努利方程

$$\frac{p_1}{\rho g}+z_1+\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}=\frac{p_2}{\rho g}+z_2+\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}+h_w$$

•物理意义和几何意义

$\frac{p}{\rho g}$ —流过过流截面上某点(计算点)单位重量液体的压力能，或压力水头；

Z —流过过流截面上某点(计算点)单位重量液体的位能，或位置水头；

$\frac{\alpha v^2}{2g}$ —流过过流截面上某点(计算点)单位重量液体的平均动能，或速度水头；

h_w —两断面间单位重量液体的平均能耗。

FLC-NUAA

1.3 液体动力学

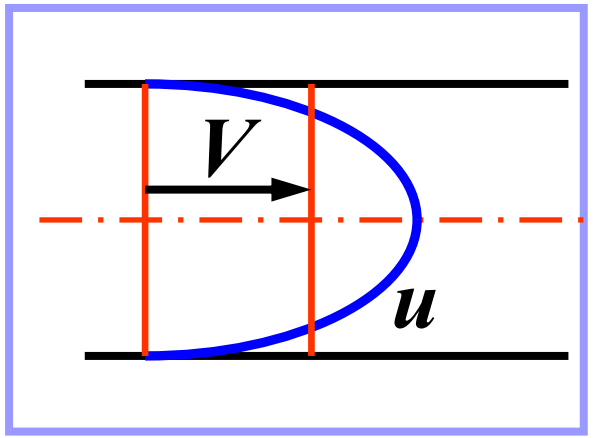
✓动能修正系数 α

因为总流有效断面上的速度u分布是不均匀的，以平均流速v代替计算动能时会产生误差，因此引入修正系数α 。

α 取值：层流时,$\alpha=2$，紊流时,$\alpha=1$

✓平均能耗 h_w

表示液体从A_1到A_2截面因粘性摩擦而损耗的能量;



PLC-NUAA

1.3 液体动力学

- 伯努利方程应用：

1）z和p是截面上同一计算点上的两个参数，计算点一般取在两截面的轴心处；

2）为计算方便，通流截面应取在渐变流动（流线近于平行直线的流动）处，但两截面之间的流动不受此限制；

3）为求解方便，通流截面应取已知量尽量多的断面，如果有自由液面，一般要取在自由液面处；

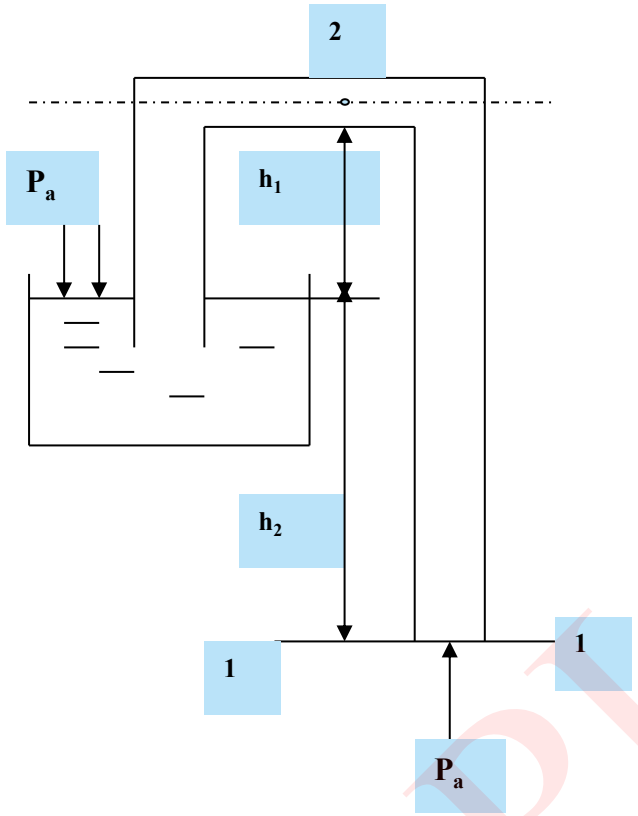
4）截面上的压力应取同一种表示法，都取相对压力，或都取绝对压力；

5）不要忘记动能修正系数。

PLC - NUAA

1.3 液体动力学

■例题4： 如图所示吸管自水池中吸水，若不计管路中流动的能量损失和动能修正，试求2点处的真空度？如2点处的真空度最大不得超过$7mH_2O$，试求h_1与h_2的值有何限制？



解 取两个过流断面1-1，2-2

$$\frac{p_1}{\rho g}+z_1+\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}=\frac{p_2}{\rho g}+z_2+\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}+h_w$$

条件 $p_1=p_a$ $z_1=0$ $v_1=?$ $h_w=0$

$p_2=?$ $z_2=h_1+h_2$ $v_2=?$ $\alpha_1=\alpha_2=1$

由流量连续性方程

$$q=v_1A_1=v_2A_2 \xrightarrow{A_1=A_2} v_1=v_2$$

则 $$\frac{p_a}{\rho g}=\frac{p_2}{\rho g}+h_1+h_2$$

真空度 $p_a-p_2=\rho g(h_1+h_2)$

若 $p_a-p_2=\rho g(h_1+h_2)\le 7mH_2O$

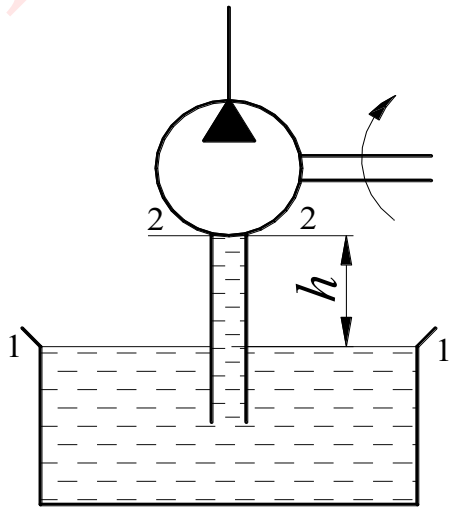
$$p_a-p_2=\rho g(h_1+h_2)\le 7\rho g$$

则 $h_1+h_2\le 7m$

PLC NUAA

1.3 液体动力学

■**例题5：** 如图所示，设液压泵的吸油口比油箱液面高h，吸油路的总能量损失为 h_w，计算液压泵的吸油腔的真空度。



解：以油箱液面为1-1截面，泵吸油口处为2-2截面，并取截面1-1为基准平面，列伯努利方程：

$$z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{a_1v_1^2}{2g}=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{a_2v_2^2}{2g}+h_w$$

式中：$z_1=0$　　$p_1=p_a$　　$v_1=0$

$z_2=h$　　$p_2=?$　　$v_2=4q/\pi d^2$

$$\Rightarrow \frac{p_a}{\rho g}=\frac{p_2}{\rho g}+h+\frac{a_2v_2^2}{2g}+h_w$$

$$\Rightarrow p_a-p_2=\rho gh+\rho\frac{a_2v_2^2}{2}+\rho gh_w=\rho gh+\rho\frac{a_2v_2^2}{2}+\Delta p_w$$

真空度由三部分组成：
①把油液提升到一定高度所需的压力；
②油液产生一定的流速所需的压力；
③吸油管内压力损失。

PLC-NUAA

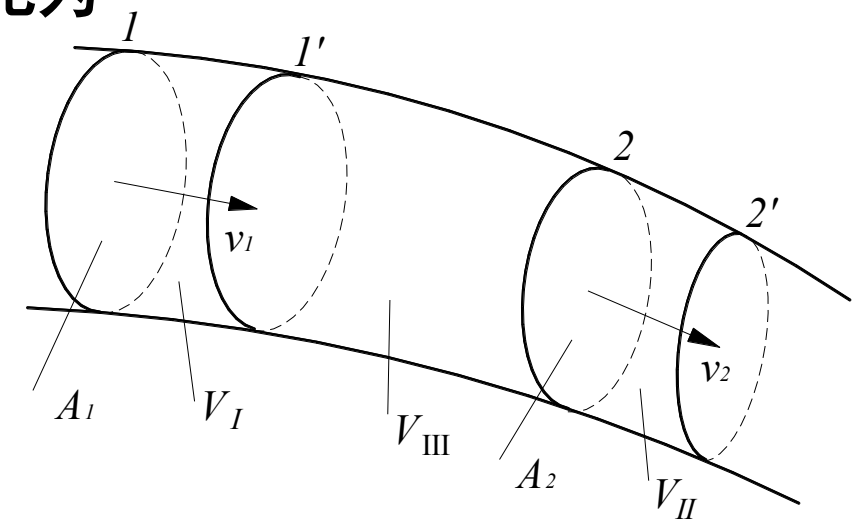
1.3 液体动力学

1.3.3 动量方程

- 前提：定常流动、不可压缩；
- 动量定理：作用在物体上的合外力等于物体在力作用方向上动量的变化率

$$\sum F = \frac{dI}{dt} = \frac{d(mv)}{dt}$$

- 任取由通流截面1、2及管壁所限制的液体作为控制体
- 控制体经dt后，从1-2运动到1’-2’，其动量变化为



$$d(\sum I) = I_{\mathrm{III}t+dt} + I_{\mathrm{II}\,t+dt} - (I_{\mathrm{III}t} + I_{\mathrm{I}\,t})$$

$$\Rightarrow\ d(\sum I) = I_{\mathrm{II}\,t+dt} - I_{\mathrm{I}\,t} = \rho q dt\left(v_2 - v_1\right)$$

$$\Rightarrow\ \sum F = \frac{d(\sum I)}{dt} = \rho q(v_2 - v_1)$$

PLC-NUAA

1.3 液体动力学

因面上各点速度u不同，以平均流速v代替有一定误差，
因此引入修正系数β，且液体在作定常流动时有：

$$\Sigma \boldsymbol{F} = \rho q \beta_2 v_2 - \rho q \beta_1 v_1$$

β 取值：层流时，β=1.33，紊流时，β=1

PLC NUAA

1.3 液体动力学

■**例题6：** 如图所示的圆柱形滑阀，流量为 q，压力为 p 的压力油以流速 v_1 流入滑阀，流出时的速度为 v_2，求图示两种情况下滑阀所受到的轴向力的大小和方向（取动量修正系数 $\beta_1=\beta_2=1$）

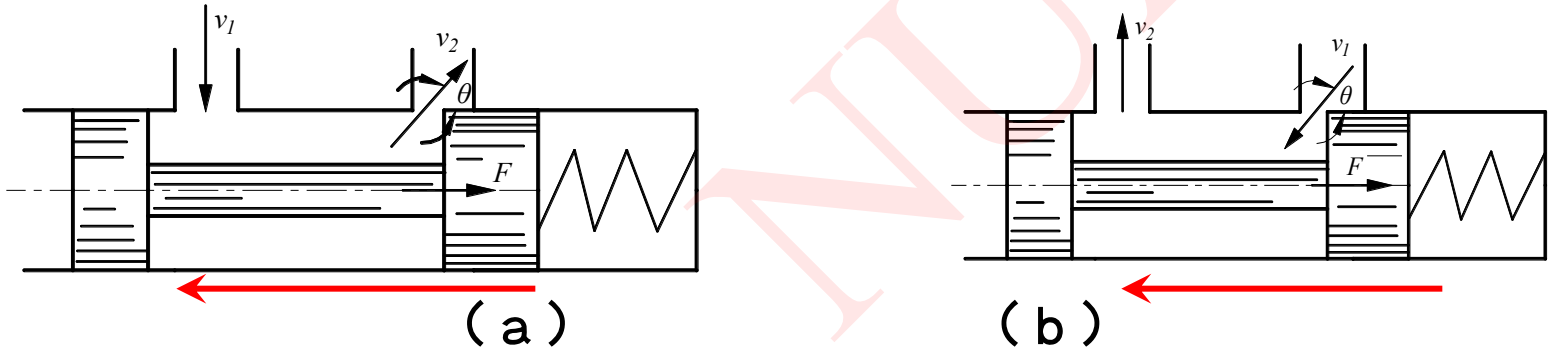


图1-13 液流作用在滑阀上轴向力

解：取阀芯中部的液体为控制体，设阀芯作用在被控制液体上的力为 F，沿水平方向列动量方程，滑阀所受到的轴向力 F' 为F的反作用力；

在图1-13（a）中，
$$F=\rho q(v_2\cos\theta-v_1\cos 90^\circ)=\rho q v_2\cos\theta$$

在图1-13（b）中，
$$F=\rho q(v_2\cos 90^\circ-v_1\cos\theta)=-\rho q v_1\cos\theta$$

滑阀阀芯所受的轴向力（液动力） $F'=-F$ 总有使阀口关闭的趋势，这是液动力的特点。

PLC NUAA

1.4 管道中的液流特性

实际流体的伯努利方程：

$$\frac{p_1}{\rho g}+z_1+\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}=\frac{p_2}{\rho g}+z_2+\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}+h_w$$

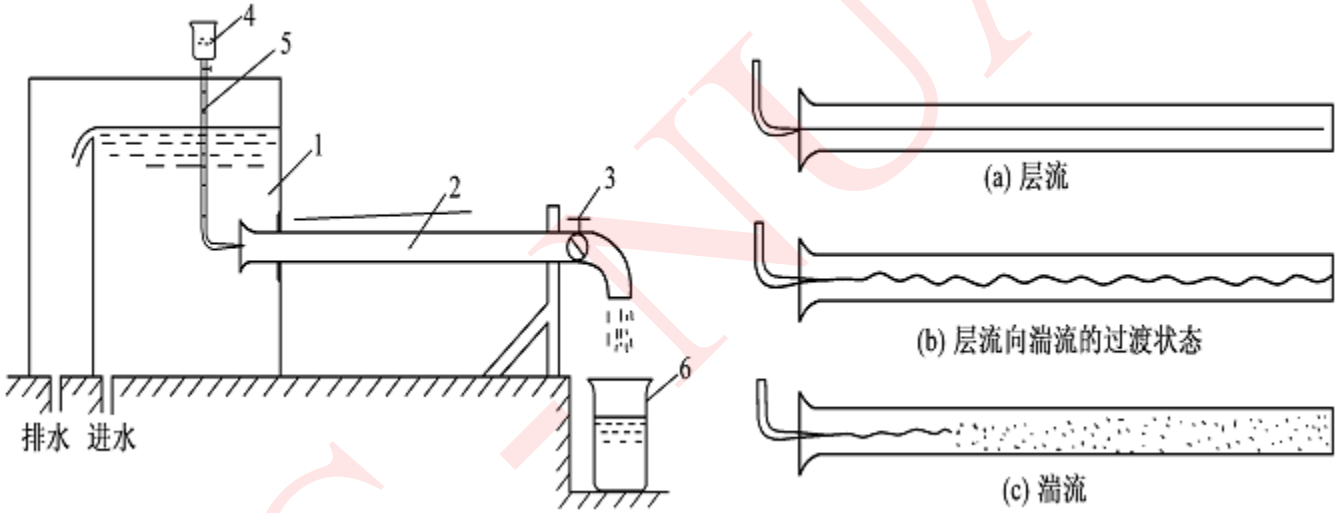
- 1.4.1 流态与雷诺数
- 1.4.2 沿程压力损失
- 1.4.3 局部压力损失
- 1.4.4 管路系统中总压力损失

PLC NUAA

1.4 管道中的液流特性

1.4.1流态与雷诺数

➢流态转化演示实验：雷诺实验



结果：速度小时，　色液直线前进

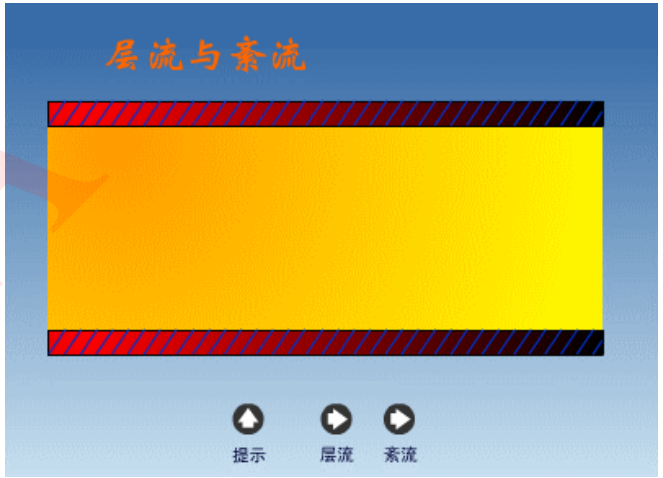
速度较大时，色液颤动

速度大时，　色液不连续，向四周紊乱扩散

由此引出以下三个概念：层流、紊流、过渡状态

PLC NUAA

1.4 管道中的液流特性



1.层流和紊流

（1）层流：

流体质点互不干扰，流动呈线状或层状，且平行于管道轴线。**流速低，黏性力起主导作用**，表现为质点的摩擦和变形,为第一种流动状态。

（2）紊流：

单个流体质点无规则的运动，不断混杂、碰撞，**整体以平均速度向前推进,主要以惯性力为主**，表现为质点的撞击，为第三种流动状态。

PLC - NUAA

1.4 管道中的液流特性

2. 判别流动状态的标准——雷诺数

➢圆形截面管道雷诺数：雷诺实验中所发生的现象与下列因素有关，流体密度ρ，粘性系数μ，平均流速v，管径d，即：

$$\mathrm{Re} = \rho v d / \mu = \frac{v d}{\upsilon}$$

即流动现象或流动状态只与雷诺数*Re*有关。

大量实验表明，不同流体通过不同管径流动时，尽管v不同，但Re_{cr}大致相同，并在*2000～2300*范围之内。

$Re > Re_{cr}$　紊流

$Re < Re_{cr}$　层流

PLC NUAA

1.4 管道中的液流特性

常见液流管道的临界雷诺数

管道的形状	Re_{cr}
光滑的金属圆管	2000～2320
橡胶软管	1600～2000
光滑的同心环状缝隙	1100
光滑的偏心环状缝隙	1100
带环槽的同心环状缝隙	700
带环槽的偏心环状缝隙	400
圆柱行滑阀阀口	260
锥阀阀口	20～100

FLC-NUAA

1.4 管道中的液流特性

➢非圆截面管道

$$\mathrm{Re}=\frac{4vR}{\upsilon}$$

水力半径：$R=\frac{A}{x}$

- 它等于液流的有效面积A和它的湿周（有效截面的周长）x之比；
- 水力半径大，表明液流与管壁接触少，通流能力大；
- 水力半径小，表明液流与管壁接触多，通流能力小，容易堵塞。

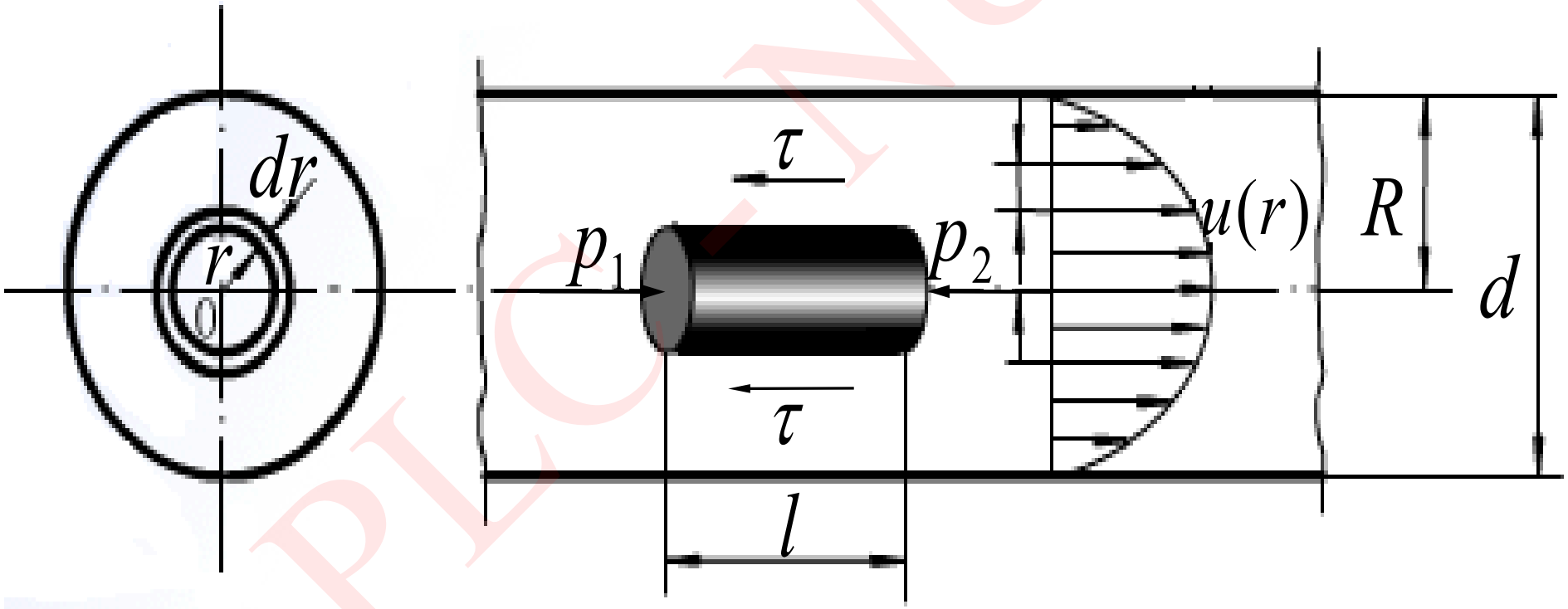
FCI-NUAA

1.4 管道中的液流特性

1.4.2沿程压力损失

➢1.层流时的沿程压力损失

✓流速分布规律



PLC-NUAA

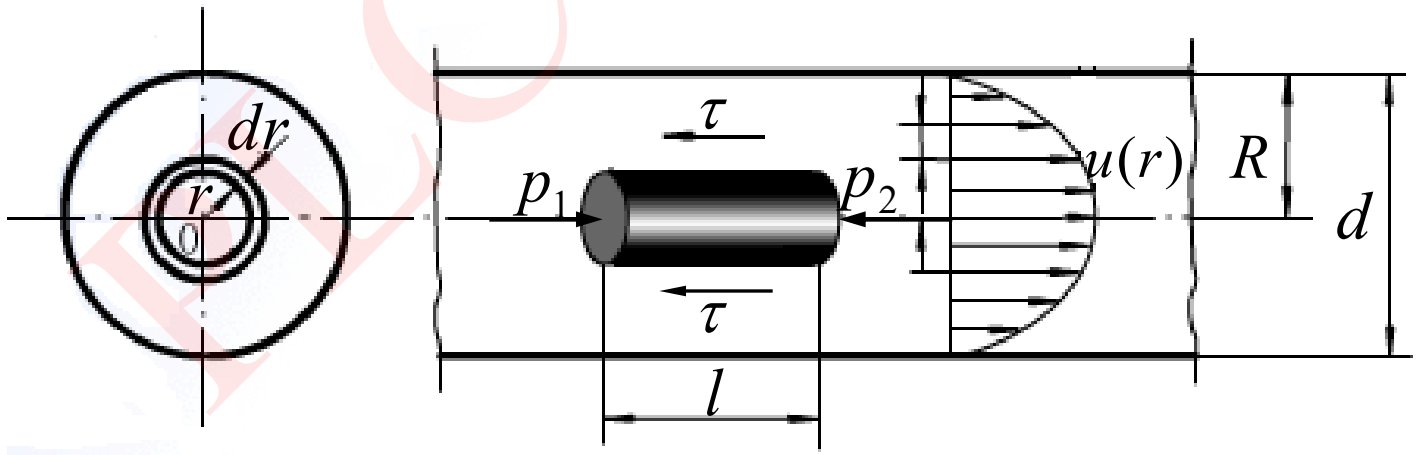
1.4 管道中的液流特性

1.4.2沿程压力损失

➢1.层流时的沿程压力损失

✓流速分布规律

$$\left.\begin{aligned}(p_1-p_2)\pi r^2-2\pi rl\tau=0\\ \tau=-\mu\frac{du}{dr}\end{aligned}\right\}\xrightarrow{\text{积分}}u=-\frac{p_1-p_2}{4\mu l}r^2+C$$



BUAA

1.4 管道中的液流特性

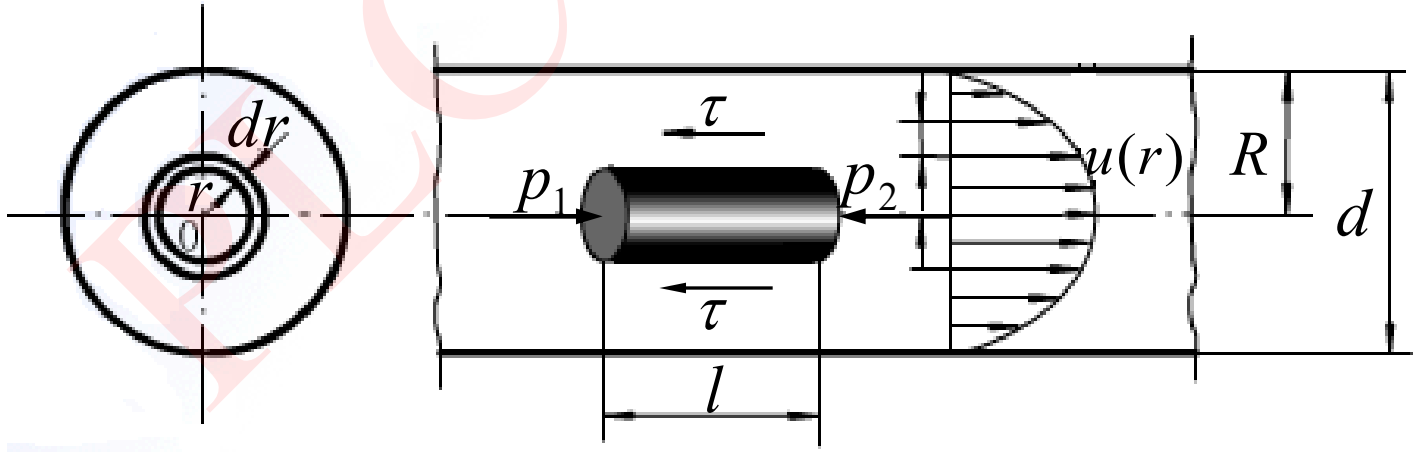
1.4.2 沿程压力损失

➢1.层流时的沿程压力损失

✓流速分布规律

边界条件

$$r = d/2, u = 0 \Longrightarrow C = -\frac{p_1 - p_2}{16\mu l} d^2 \Longrightarrow u = \frac{p_1 - p_2}{4\mu l}\left(\frac{d^2}{4} - r^2\right)$$



BUAA

1.4 管道中的液流特性

✓圆管中的流量 $u=\frac{p_1-p_2}{4\mu l}(\frac{d^2}{4}-r^2)$

$$q=\int_A u dA=\int_0^{d/2}\frac{(p_1-p_2)}{4\mu l}(\frac{d^2}{4}-r^2)2\pi r dr=\frac{\pi d^4}{128\mu l}\Delta p$$

特点：(1)管径d对q的影响最大

(2)q与△p成线性关系

圆管中的平均流速 $v=\frac{q}{A}=\frac{\frac{\pi d^4}{128\mu l}\Delta p}{\frac{\pi d^2}{4}}=\frac{d^2}{32\mu l}\Delta p$

PPT-NUAA

1.4 管道中的液流特性

$$\Delta p_f = \frac{32\mu l v}{d^2}$$

影响因素：(1)与液体性质μ成正比；

(2)与管道的几何尺寸有关，与管长度成正比，与管径平方成反比；

(3)与流速有线性关系。

$$\Delta p_f = \frac{32\mu l v}{d^2} \xrightarrow[\mathrm{Re} = dv/\upsilon]{\mu = \rho\nu} \Delta p_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2}$$

λ 为沿程阻力系数, 理论值λ＝64/Re

实际值:考虑实际流动中的油温变化不均等问题，光滑金属管取λ＝75/Re，对橡胶管取λ＝80/Re，计算时要按实际值。

BUAA

1.4 管道中的液流特性

➢2. 紊流时的沿程压力损失

$$\Delta p_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2}$$

λ与雷诺数及表面粗糙度有关。

PLC_NUAA

1.4 管道中的液流特性

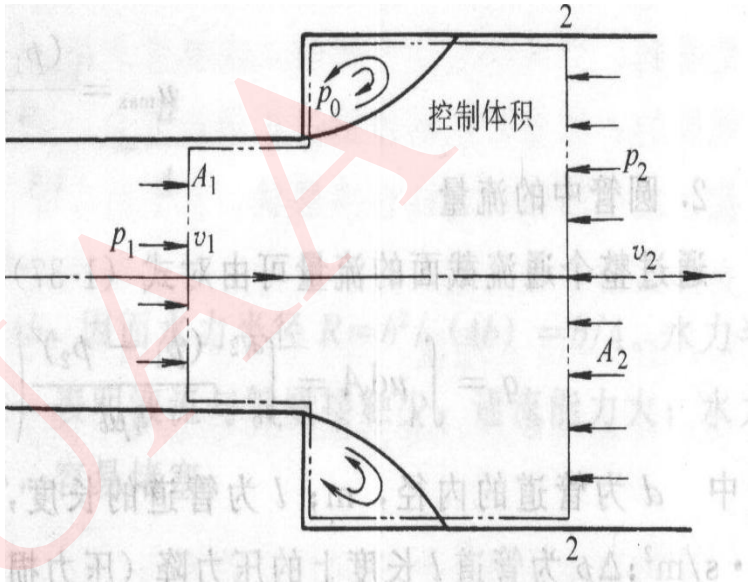
圆管紊流流动时的沿程阻力系数λ的计算公式

*Re*范围	λ 的计算公式
$2320<Re<10^5$	$\lambda=0.3164\ Re^{-0.25}$
$10^5<Re<3\times10^6$	$\lambda=0.032+0.221\ Re^{-0.237}$
$Re>900\ (d/\triangle)$	$\lambda=(2\lg(d/2\triangle)+1.74)^{-2}$

PLC - NUAA

1.4 管道中的液流特性

1.4.3局部压力损失



$$\Delta p_r = \xi \frac{\rho v^2}{2}$$

式中：ξ 为局部阻力系数，由试验确定；

v 为局部阻力后（局部阻力区下游）的平均流速。

特点：ζ仅与管道几何形状有关，而与液体性质无关；

局部压力损失与速度平方成正比。

PLC NUAA

1.4 管道中的液流特性

1.4.4总压力损失

管路系统中的总的压力损失等于所有直管中的沿程压力损失和局部压力损失之和:

$$\Sigma\Delta p = \Sigma\lambda\frac{l}{d}\frac{\rho v^2}{2} + \Sigma\zeta\frac{\rho v^2}{2}$$

应用条件：相邻局部损失之间的距离l>(10~20)d，保证经过l长的流动后，液流稳定，否则扰动更复杂，实际损失要大得多。

应用举例：考虑到管路中的压力损失，液压泵的工作压力p_p要比执行元件的工作压力p_1高 $\Sigma\Delta p$

$$p_p = p_1 + \Sigma\Delta p$$

PLC NUAA

1.4 管道中的液流特性

➢减小压力损失的途径 $\Delta p_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2}$ $\Delta p_r = \varsigma \frac{\rho v^2}{2}$

1)减小$\triangle p_f$：尽量减小长度，d不能太小，管壁应力求光滑，油液粘度适当；

2)减小$\triangle p_r$：减少管道的变化等；

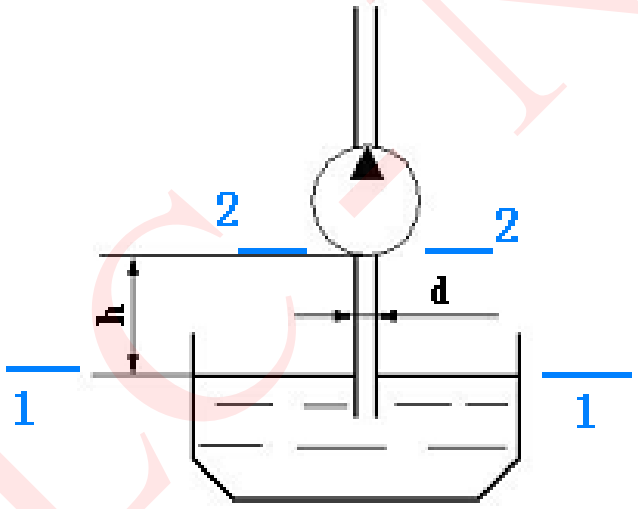
3)v的选择要适当：v的影响最大，v过高($\triangle p_f \propto v$ 、$\triangle p_r \propto v^2$)压力损失大；v过低，管、阀等元件尺寸增大，成本高。 所以一般有推荐流速可供参考，可查看有关产品手册。

PLC-NUAA

1.4 管道中的液流特性

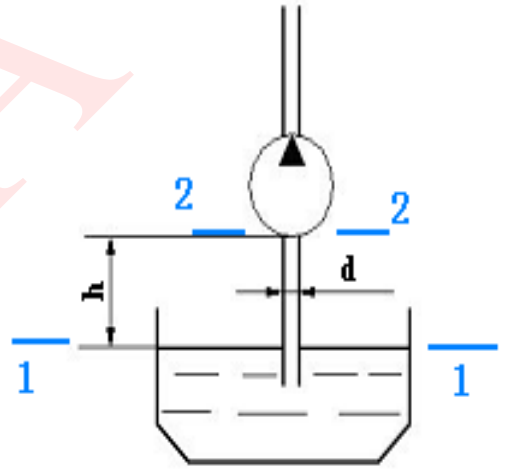
■例题5:

如图，液压泵从油箱吸油，吸油管直径$d=10cm$，泵的流量为$q=180l/\min$,油液的运动粘度$\nu=20\times10^{-6}m^2/s$，密度$\rho=900kg/m^3$，当泵入口处的真空度$p=0.9\times10^5Pa$时，求液压泵吸油高度h。



PLC NUAA

1.4 管道中的液流特性



解：取通流截面1—1，2—2，列伯努利方程：

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

$$Z_1=0 \quad Z_2=h \quad v_1=0 \quad v_2=\frac{Q}{\frac{\pi}{4}d^2}=\frac{180\times10^{-3}/60}{\frac{\pi}{4}\times(10\times10^{-2})^2}=0.382m/s$$

$$p_1=1\times10^5\,pa \quad p_2=1\times10^5-0.9\times10^5=0.1\times10^5\,pa$$

$$R_e=\frac{vd}{\upsilon}=\frac{0.382\times0.1}{20\times10^{-6}}=1910<2000$$，**故流动状态为层流，**$\alpha_1=\alpha_2=2$

$$h_w=\frac{\Delta p_f}{\rho g}=\frac{75}{R_e}\times\frac{l}{d}\times\frac{v_2^2}{2g}=\frac{75\times h\times0.382^2}{1910\times0.01\times2}=0.2865h$$

求得： $h=0.78m$

PLC NUAA

1.4 管道中的液流特性

小 结：

1.压力损失的类型；

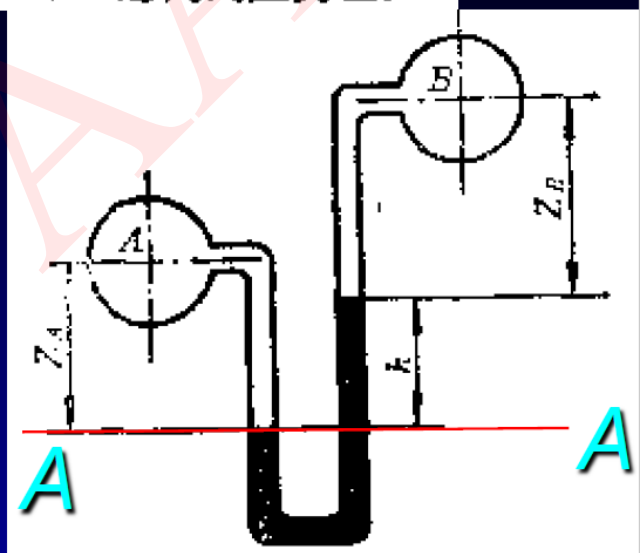
2.压力损失的成因；

3.压力损失的计算公式；

4.压力损失的影响因素。

PLC-NUAA

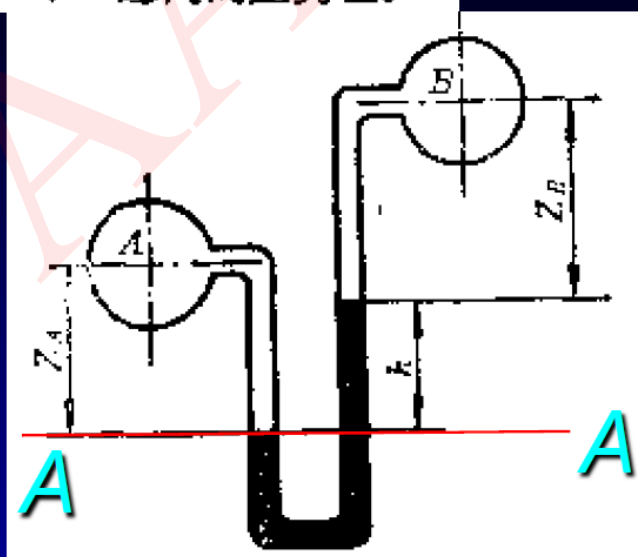
1-7 图示容器A中的液体的密度$\rho_A=900kg/m^3$，B中液体的密度为$\rho_B=1200kg/m^3$，$Z_A=200mm$，$Z_B=180mm$，$h=60mm$，U形管中的测压介质为汞，试求A、B之间的压力差。



题1-7 图

PLC-NUAA

1-7 图示容器A中的液体的密度$\rho_A=900kg/m^3$，B中液体的密度为$\rho_B=1200kg/m^3$，$Z_A=200mm$，$Z_B=180mm$，$h=60mm$，U形管中的测压介质为汞，试求A、B之间的压力差。



题1-7 图

解：以A—A为基准面，则有

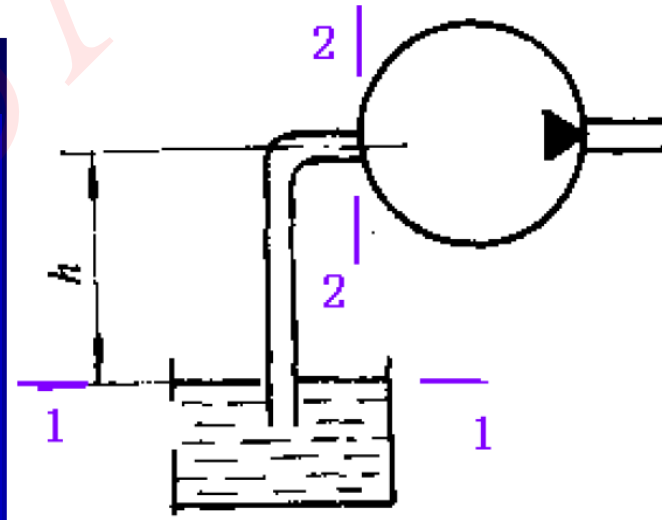
$$p_A+\rho_A g z_A = p_B+\rho_B g z_B+\rho_{汞} g h$$

$$p_A-p_B=(\rho_B z_B-\rho_A z_A+\rho_{汞} h)g$$

$$=(1200\times0.18-900\times0.2+13600\times0.06)\times9.8$$

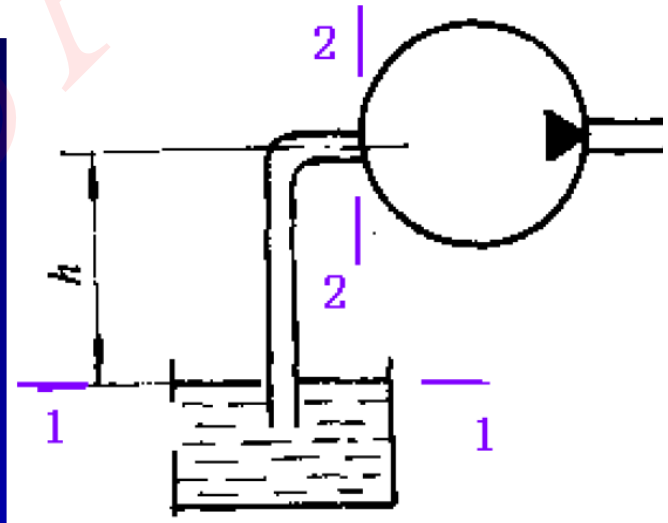
$$=8349.6Pa$$

1—4　如图 1—32 所示，液压泵从油箱吸油，吸油管直径 $d=6$ cm，流量 $Q=150$ L/min，液压泵入口处的真空度为 0.2×10^5 Pa，油液的运动粘度 $\nu=20\times10^{-6}$ m^2/s，油液的密度 $\rho=900$ kg/m^3，不计任何损失，求最大吸油高度。



PLC-NUAA

1—4　如图 1—32 所示，液压泵从油箱吸油，吸油管直径 $d=6$ cm，流量 $Q=150$ L/min，液压泵入口处的真空度为 0.2×10^5 Pa，油液的运动粘度 $\nu=20\times10^{-6}$ m²/s，油液的密度 $\rho=900$ kg/m³，不计任何损失，求最大吸油高度。



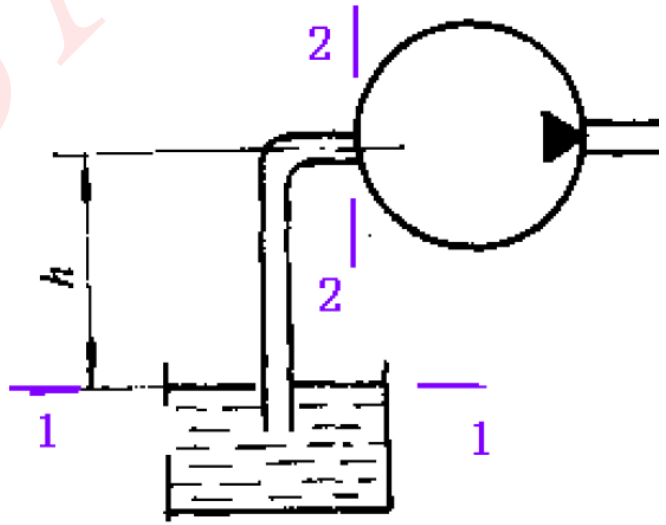
解：取1-1、2-2 截面，

列出伯努利方程：

已知：$p1=Pa=1\times10^5Pa$　　$V1=0$　　$Z1=0$

$p2=(1-0.2)\times10^5Pa=0.8\times10^5Pa$

1—4　如图 1—32 所示，液压泵从油箱吸油，吸油管直径 $d=6$ cm，流量 $Q=150$ L/min．液压泵入口处的真空度为 0.2×10^5 Pa，油液的运动粘度 $\nu=20\times10^{-6}$ m²/s，油液的密度 $\rho=900$ kg/m³，不计任何损失，求最大吸油高度。



$$\frac{p_1}{\rho g}+\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}+Z_1=\frac{p_2}{\rho g}+\frac{\alpha_1 v_2^2}{2g}+Z_2$$

另外：

$$v_2=\frac{q}{\frac{\pi}{4}d^2}=\frac{150\times10^{-3}/60}{\frac{\pi}{4}\times0.06^2}=0.8442m/s$$

1—4　如图 1—32 所示，液压泵从油箱吸油，吸油管直径 $d=6$ cm，流量 $Q=150$ L/min．液压泵入口处的真空度为 0.2×10^5 Pa，油液的运动粘度 $\nu=20\times10^{-6}$ m²/s，油液的密度 $\rho=900$ kg/m³，不计任何损失，求最大吸油高度。

判断吸油管中液压油的流动状态：

$$R_e=\frac{vd}{\nu}=\frac{0.8842\times0.06}{20\times10^{-6}}=2652.6>2000$$

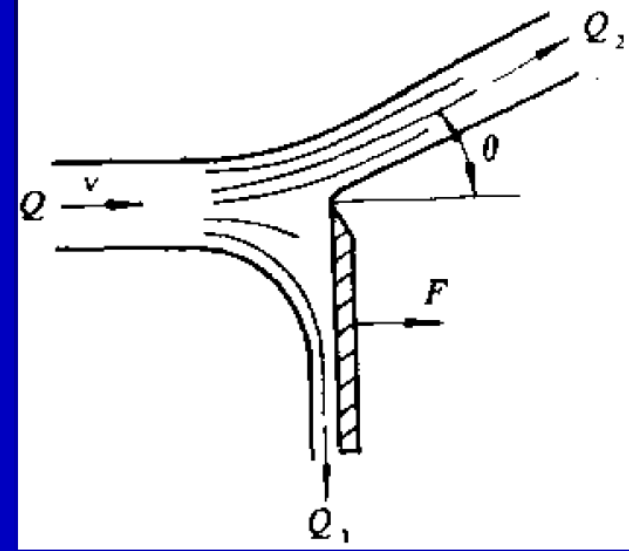
故流动状态为紊流，取 $\alpha_2=1$

所以：$h=Z_2=\frac{p_1}{\rho g}-\frac{p_2}{\rho g}-\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}$

$$=\frac{1\times10^5}{900\times9.81}-\frac{0.8\times10^5}{900\times9.81}-\frac{1\times0.8842^2}{2\times9.81}$$

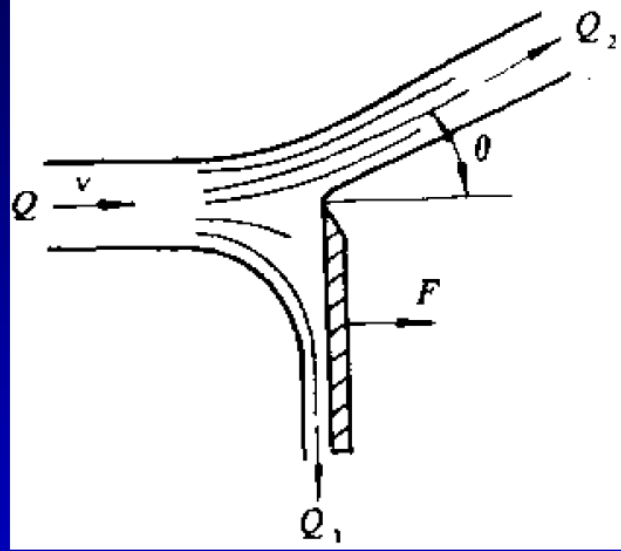
1—9　将一平板置于油液的自由射流之内，并垂直于射流轴线，设该平板截去射流流量的一部分Q_1，并使射流的其余部分偏转一个角度θ(见图1—37)。已知射流流速$v=30\ \mathrm{m/s}$，总流量$Q=30\ \mathrm{L/s}$，$Q_1=10\ \mathrm{L/s}$，若液体的重量和液体与平板间的摩擦可以忽略不计，油液的密度$\rho=900\ \mathrm{kg/m^3}$。试确定射流作用在平板上的力$F$及射流的偏转角$\theta$。

(提示：不计损失且忽略高度的影响可以证明$v=v_1=v_2$)



1—9　将一平板置于油液的自由射流之内，并垂直于射流轴线，设该平板截去射流流量的一部分Q_1，并使射流的其余部分偏转一个角度θ(见图1—37)。已知射流流速$v=30\ \mathrm{m/s}$，总流量$Q=30\ \mathrm{L/s}$，$Q_1=10\ \mathrm{L/s}$，若液体的重量和液体与平板间的摩擦可以忽略不计，油液的密度$\rho=900\ \mathrm{kg/m^3}$。试确定射流作用在平板上的力$F$及射流的偏转角θ。

（提示：不计损失且忽略高度的影响可以证明$v=v_1=v_2$）



解:用动量定理

设　v1=v2=30m/s

那么,在Y方向:

$$\rho_1 q_1 v_1 \beta_1 \cos\theta_1 = \rho_2 q_2 v_2 \beta_2 \sin\theta$$

$$\theta_1 = 0$$

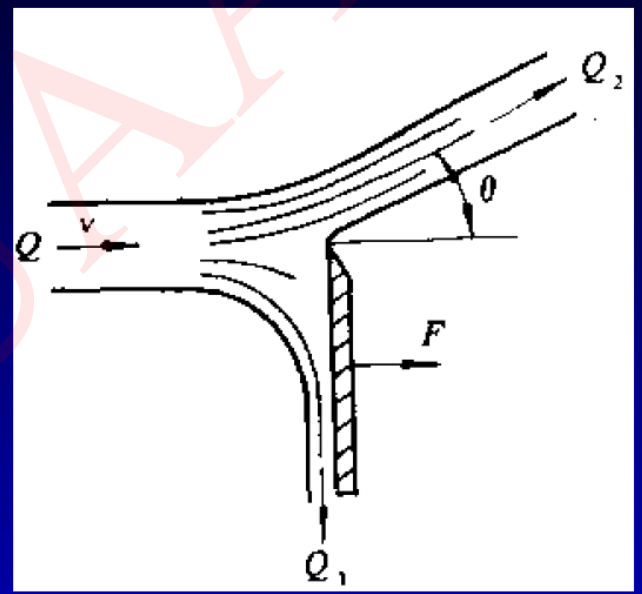
设　$\beta_1 = \beta_2 = 1$

$\rho_1 = \rho_2$

则　$\sin\theta = \dfrac{q_1}{q_2}$

$\theta = 30^\circ$

在X方向：



$$\sum F = \rho q v - \rho q_2 v_2 \cos\theta = F$$

$$F = 342.3N$$

PLC NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

- 1.5.1 孔口液流特性
- 1.5.2 缝隙液流特性

➢内容意义：

掌握孔口和缝隙的流动特性，对正确分析液压元件（液压阻尼孔、液压节流元件、液压控制阀）的工作原理、解决液压传动中具体问题（液压油缝隙泄漏）具有重要意义。

PLC - NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

目的：

液体流经孔口和小孔的流量公式，是研究节流调速和伺服系统的理论基础。

液体流经缝隙的流量公式，是分析计算液压元件和系统的泄漏的理论依据。

意义：

决定液压系统的性能和控制功能

影响液压元件的密封性

影响系统的容积效率

内容：

常见的孔口、小孔和缝隙的流量计算。

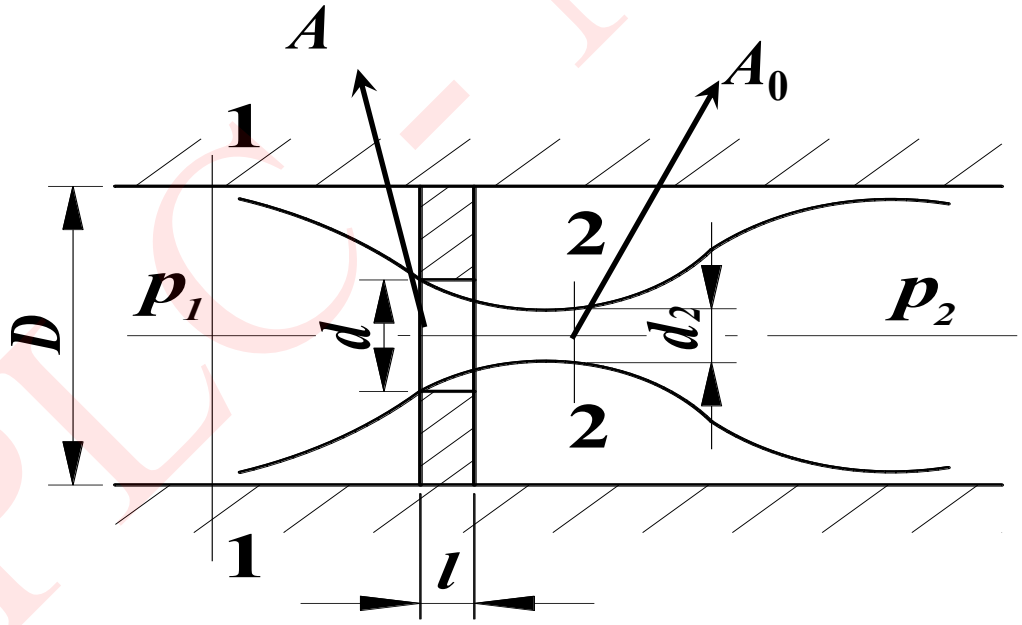
PLC NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

1.5.1 孔口液流特性

节流装置：在液压系统的管路中，装有控制阀，常通过**改变阀内的通流截面的面积**或**改变液流通道的长短**，来实现对流量、压力、方向的控制。一般为不同形式的**孔口**或**小孔**装置。

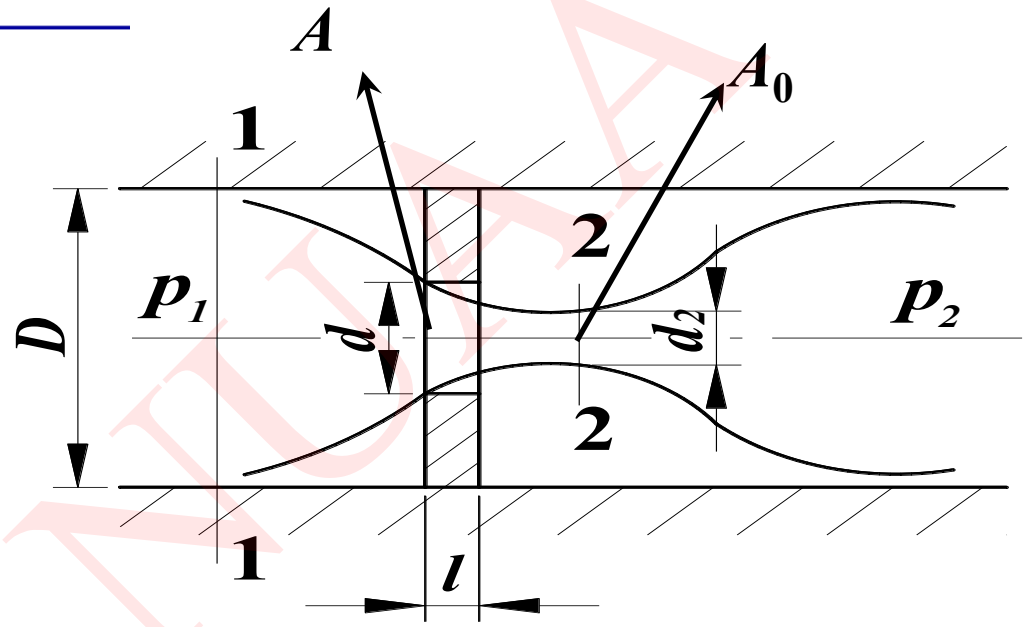
节流：节流装置内突然收缩处的液体流动。



PLC-NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

1.5.1 孔口液流特性



- 孔口分类—根据孔的长径比

✓薄壁小孔： $l/d \le 0.5$

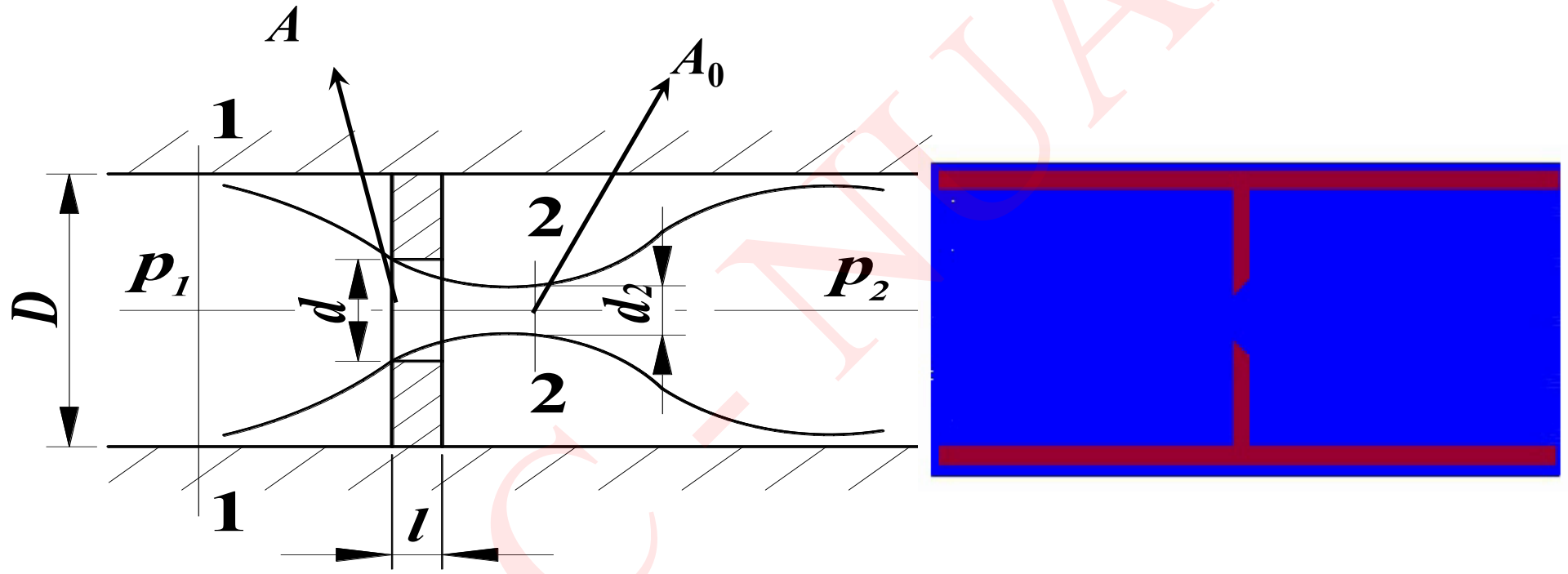
✓短　孔： $0.5 < l/d \le 4$

✓细长小孔： $l/d > 4$

PLC NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

1 薄壁小孔的流量—压力特性 $l/d \le 0.5$

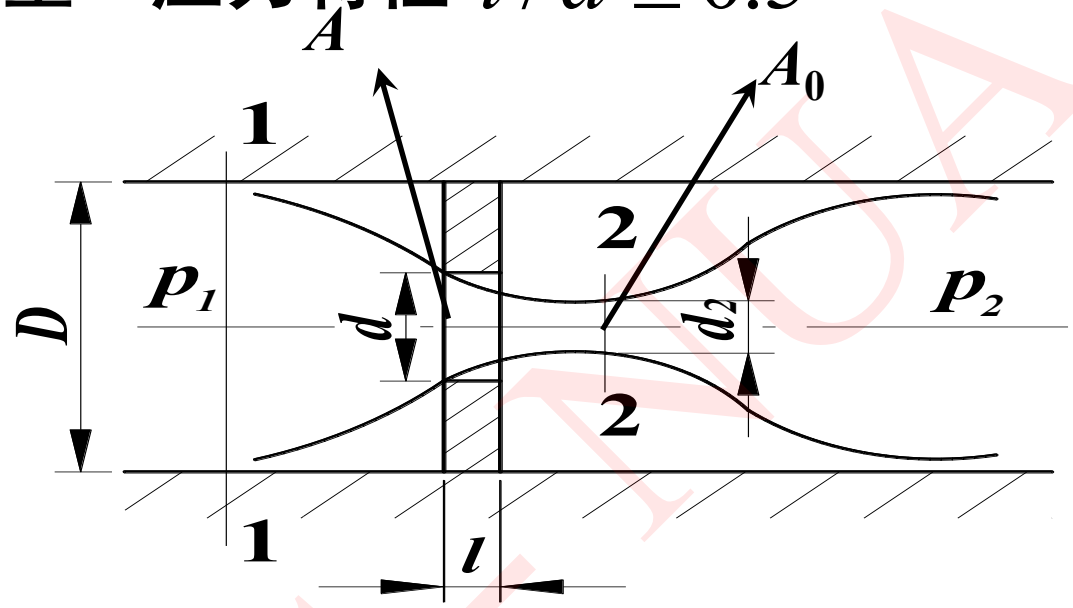


✓收缩截面：液体流经薄壁小孔时，由于惯性的作用，流过小孔后的液流形成一个收缩截面2-2，然后再扩散。一收一扩过程便产生局部能量损失。

BUCT-NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

1 薄壁小孔的流量—压力特性 $l/d \le 0.5$

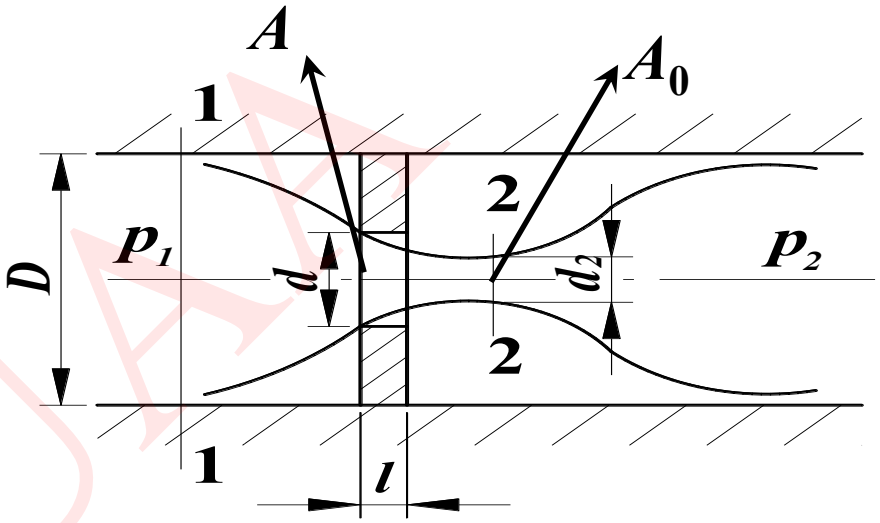


✓收缩系数：收缩截面面积A_0和孔口截面积A的比值 $C_c = \dfrac{A_0}{A}$

✓收缩系数影响因素：雷诺数、孔口及边缘形状、孔口离管道壁的距离；

✓完全收缩：管道直径D与小孔直径d的比值$D/d>7$时，收缩作用不受管道侧壁的影响，此时叫完全收缩；

1.5 孔口和缝隙流动



✓流量压力特性：

取截面1-1和收缩截面2-2，同时考虑到收缩截面的流动为紊流，取 $\alpha=1$

列伯努利方程 $\frac{p_1}{\rho}+\frac{v_1^2}{2}=\frac{p_2}{\rho}+\frac{v_2^2}{2}+\zeta\frac{v_2^2}{2}$

其中：1)小孔很薄，忽略了$\triangle p_f$

2)D>>d，所以$v_1<<v_2$，v_1可忽略

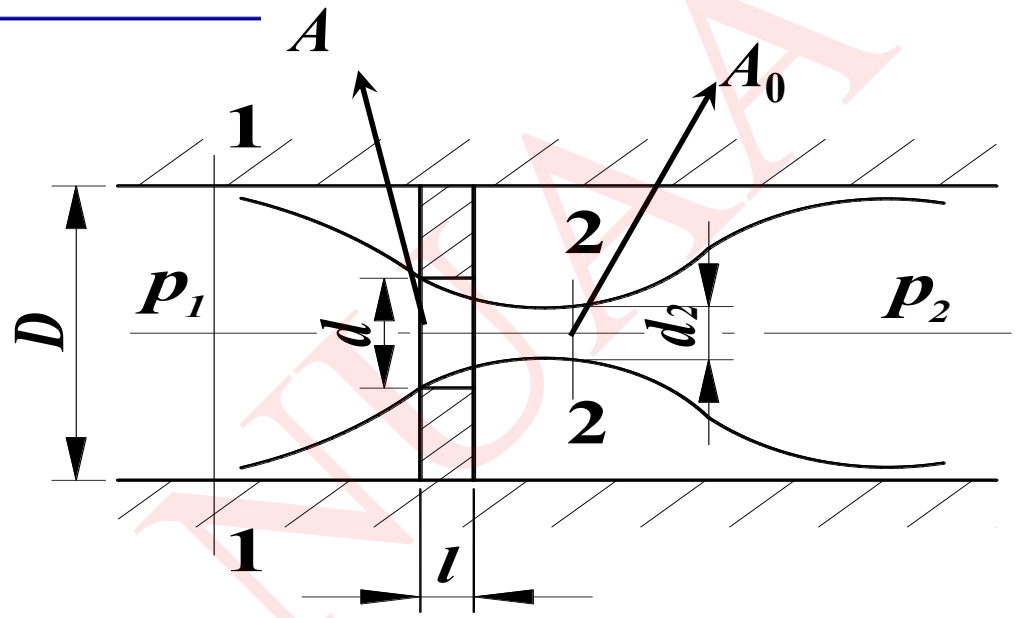
得到：$v_2=\frac{1}{\sqrt{1+\zeta}}\sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1-p_2)}=C_v\sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p}$

其中：$C_v=1/\sqrt{1+\zeta}$ 为速度系数

PLC NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

✓流量压力特性：



✓薄壁小孔流量：

$$q = v_2 A_0 = C_v C_c A\sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p} = C_d A\sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p}$$

其中：$C_d=C_vC_c$为小孔流量系数，由实验确定。

不同结构形式的阀口（滑阀、锥阀、喷嘴挡板等）流量系数的值有较大区别，分析后查表计算得到。

PLC NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

$$q = v_2 A_0 = C_v C_c A \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p} = C_d A \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p}$$

✓薄壁小孔流量的特点：

1) q ∝ $\sqrt{\Delta p}$

2) q与μ无关，说明q对粘度、温度不敏感。

PLC - NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

$$q = v_2 A_0 = C_v C_c A \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p} = C_d A \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p}$$

分析：

- **薄壁孔流量与液体粘度无关**，因而流量受液体温度影响较小。
- 当压差一定时，**薄壁孔流量与孔口面积成正比**。改变孔口面积，流量随之改变。这种特性用于流量控制阀。
- 当孔口面积一定时，**薄壁孔流量与孔口前后压差的平方根成正比**。改变流量，压差随之改变。这种特性用于压力控制阀。
- 当流经薄壁孔的流量一定时，**孔口面积与压差的平方根成反比**。改变孔口面积，压差随之改变。这种特性也用于压力控制阀。

PPT@NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

2 细长小孔的流量—压力特性　$l/d>4$

✓流量公式： 当液体流经细长小孔时，一般是层流状态，所以直接用圆管中层流的流量公式；

$$q=\frac{\pi d^4}{128\mu l}\Delta p=\frac{d^2}{32\mu l}A\Delta p=CA\Delta p$$

✓流量特点（与薄壁小孔相比）：

1) q ∝1/μ，受粘度、温度的影响较大，其稳定性差(缺点)；

2) q ∝ △p，呈线性关系（优点）。

✓应用：尽管其稳定性差，但由于特点2)，即通过细长孔的流量与其两端的压力差成线性关系，且与孔的长度、孔径等几何几寸有关，因此在某些液压元件中(如减压阀、溢流阀等)常用它作阻尼孔。

PLC-NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

3 短孔的流量—压力特性 $0.5 < l/d \leq 4$

✓流量公式：采用与薄壁小孔相似的办法，利用伯努利、连续性方程得出：

$$q = C_d A \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p}$$

形式上与薄壁小孔的流量公式相同，但是：

$$C_d = f(l, d, \mathrm{Re})$$

所以其稳定性较薄壁小孔要差些。但由于其加工较薄壁小孔容易，特别适合于作固定节流口用。

PLC NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

4 流量通用方程

薄壁小孔：$q = C_d A\sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p}$

短　孔：$q = C_d A\sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p}$

细长小孔：$q = \frac{\pi R^4}{8\mu l}\Delta p$

$CA\Delta p^{\frac{1}{2}}$

$CA\Delta p$

$$q = CA\Delta p^m$$

其中：A为孔口的截面面积；△p为孔口前后的压力差；m为孔口形状决定的指数；C为孔口的形状系数。

PLC - NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

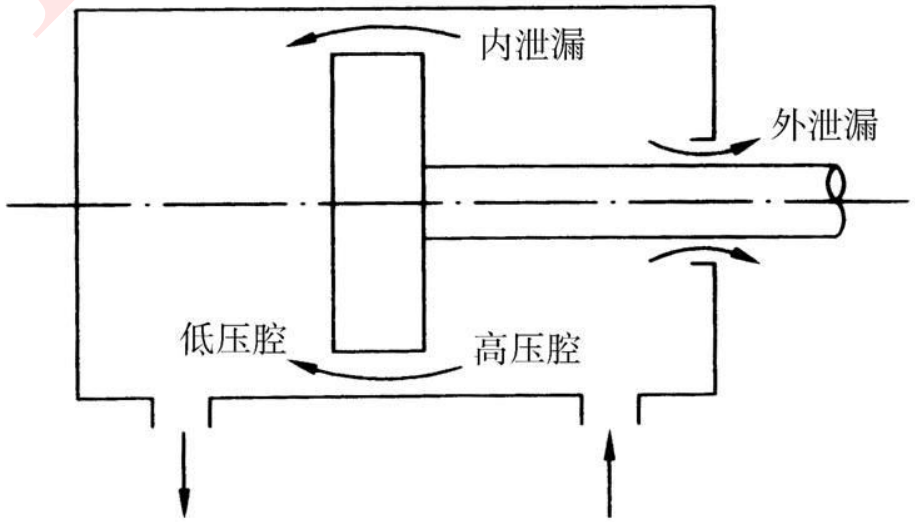
1.5.2 缝隙液流特性

配合间隙：液压元件各零件间如有相对运动，就必须有一定的配合间隙（缝隙）。间隙过小，会使零件卡死；间隙过大，会造成泄漏。

内泄漏：液体在系统内，从压力较高处流经缝隙到压力较低处。

外泄漏：液体从系统内流经缝隙直接到外部大气。

泄漏危害：能量损失主要转换为热能，使油温升高，影响系统的性能与效率。外泄漏还污染环境。



PLC - NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

缝隙流动和原因： 剪切流动—缝隙和相对运动
压差流动—缝隙和压力差

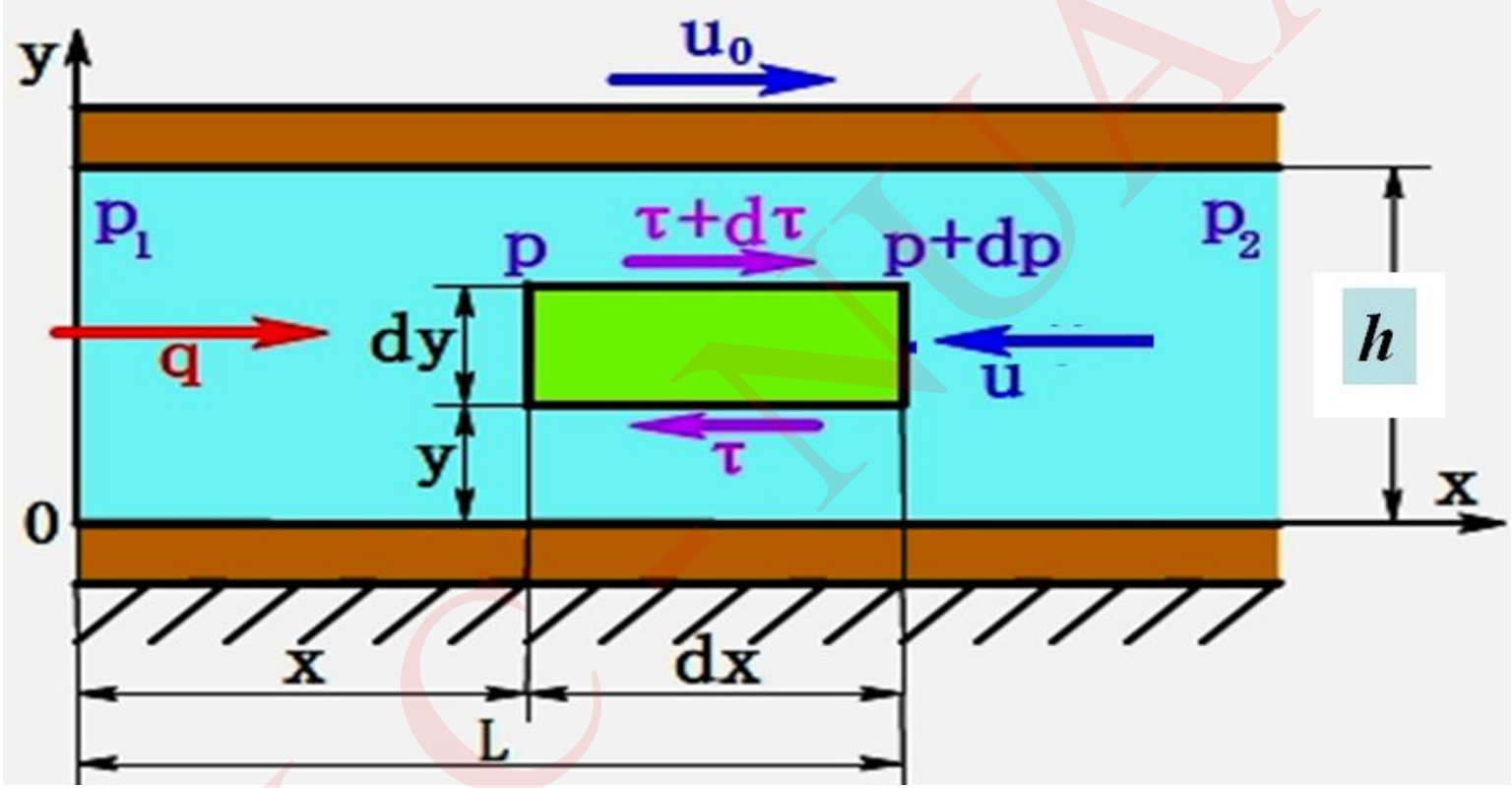
发生部位： 液压阀：阀芯、阀孔与阀座之间
液压缸：缸筒与活塞，活塞杆与缸头
泵和马达：相对运动的另部件之间
管接头等连接处

常见缝隙： 平板：固定的平行平板缝隙
相对运动的平行平板缝隙
圆环：同心的圆柱环形缝隙
偏心的圆柱环形缝隙
圆环的平面缝隙

PLC_NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

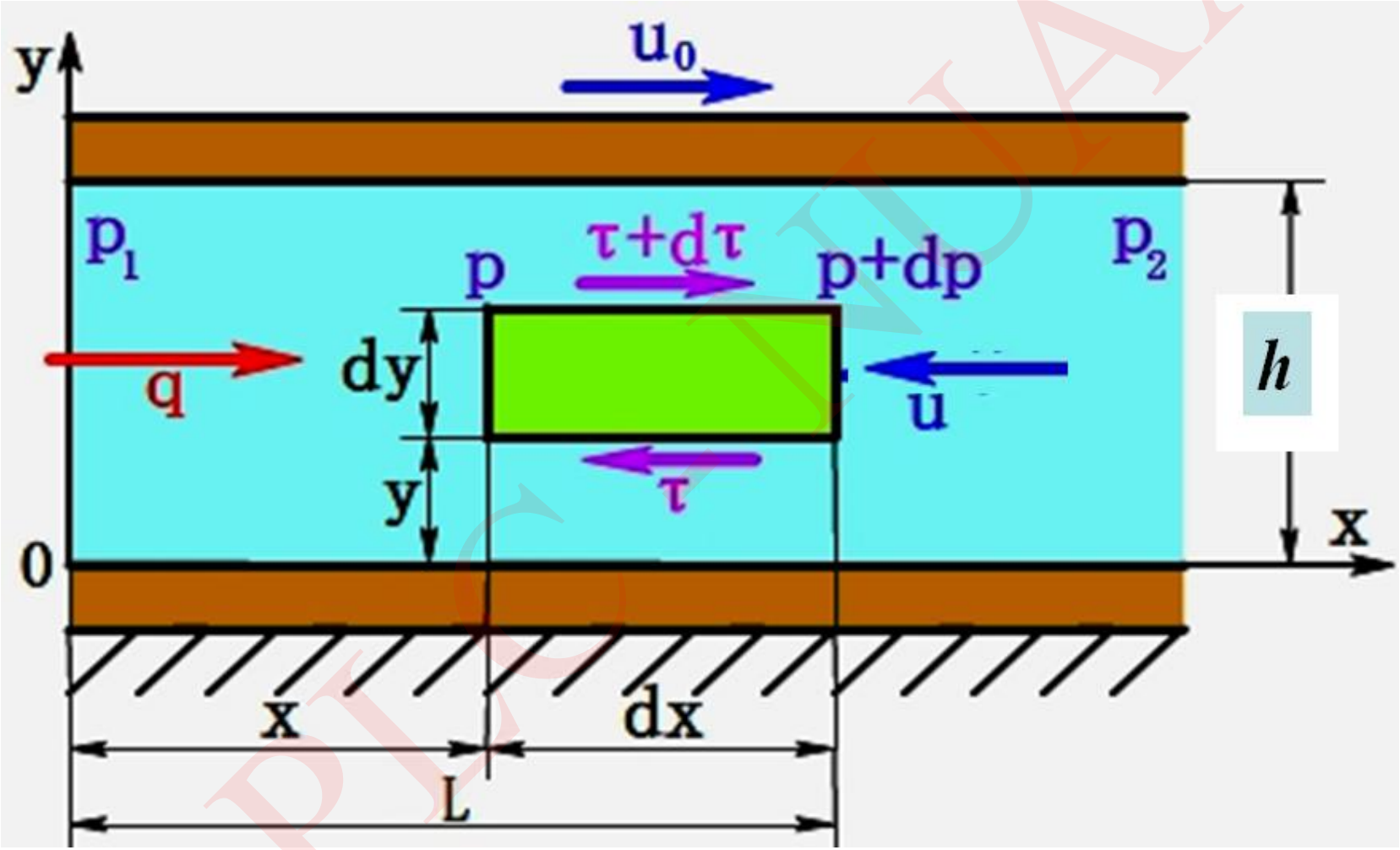
1、平行平板的间隙流动



➢参数：长度l，宽度b（图中未画出），间隙为h，并满足$l>>h$，$b>>h$；两端压差为$\Delta p=p_1-p_2$；上平板相对于下平板以速度u_0 向右运动。

1.5 孔口和缝隙流动

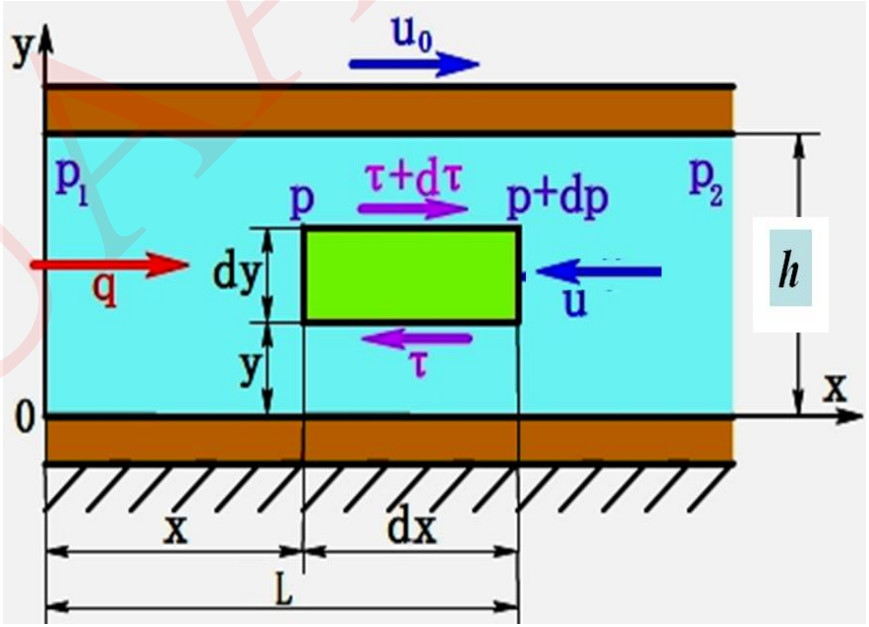
1、平行平板的间隙流动



1.5 孔口和缝隙流动

➢受力平衡方程（联合流动，宽 度方向取单位长）

$$p\mathrm{d}y+(\tau+\mathrm{d}\tau)\mathrm{d}x=(p+\mathrm{d}p)\mathrm{d}y+\tau\mathrm{d}x$$



➢流速分布特性：

将$\tau=\mu\cdot\mathrm{d}u/\mathrm{d}y$ 代入上式得：

$$\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}y^2}=\frac{1}{\mu}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}$$

对上式进行两次积分得：

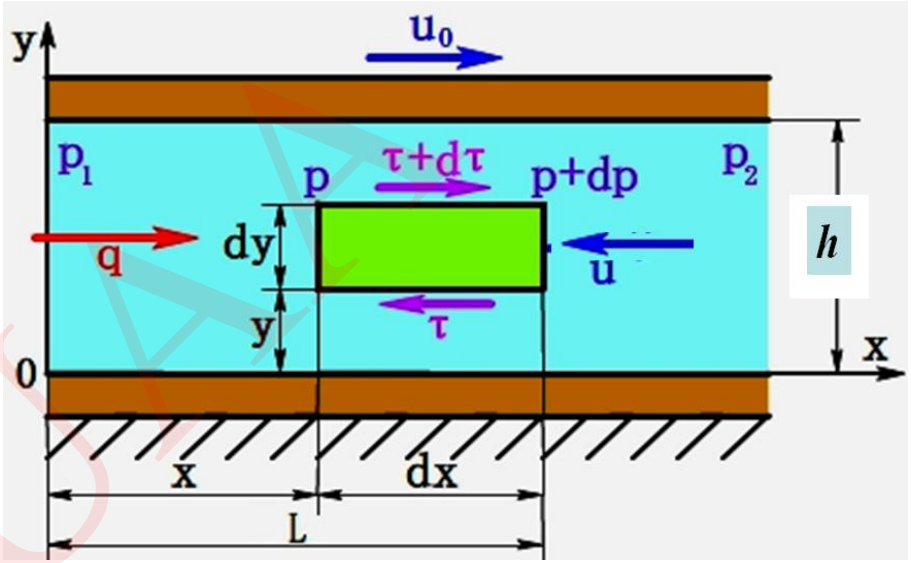
$$u=\mathrm{d}p/\mathrm{d}x\cdot y^2/2\mu+C_1y+C_2$$

式中：C_1，C_2由边界条件确定。

PLC NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

$$u=\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}\frac{y^2}{2\mu}+C_1y+C_2$$



由于:（1）缝隙中是层流运动，有：

$$\Delta p_f=\frac{128\mu l}{\pi d^4}q$$ **即*p* 是*x*的线性函数，**

$$\Rightarrow\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}=\frac{p_2-p_1}{l}=-\frac{p_1-p_2}{l}=\frac{-\Delta p}{l}$$

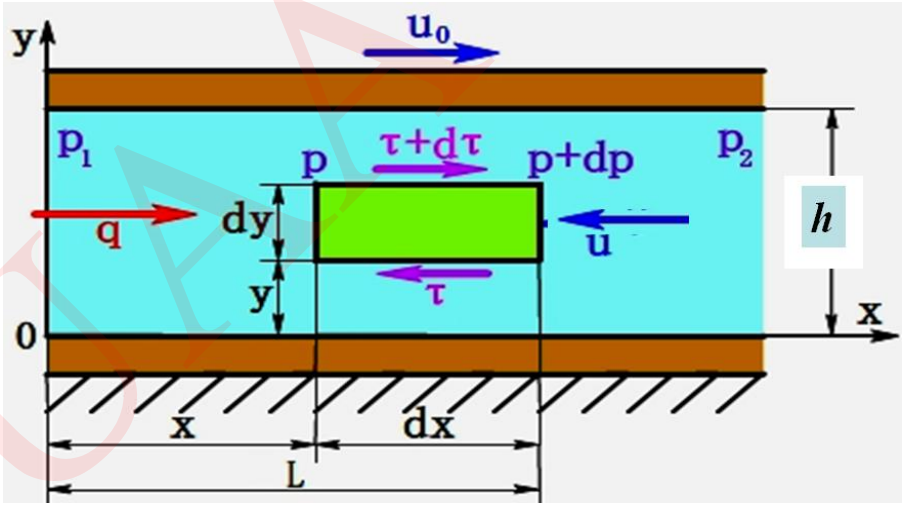
（2）利用边界条件： 当$y=0$时，$u=0\Rightarrow c_2=0$

当$y=h$ 时，$u=u_0\Rightarrow c_1=\frac{\Delta ph}{2\mu l}+\frac{\mu_0}{h}$

缝隙流的流速分布： $\Rightarrow u=\frac{\Delta p}{2\mu l}(h-y)y+\frac{u_0}{h}y$

PLC-NUAA

1.5 孔口和缝隙流动



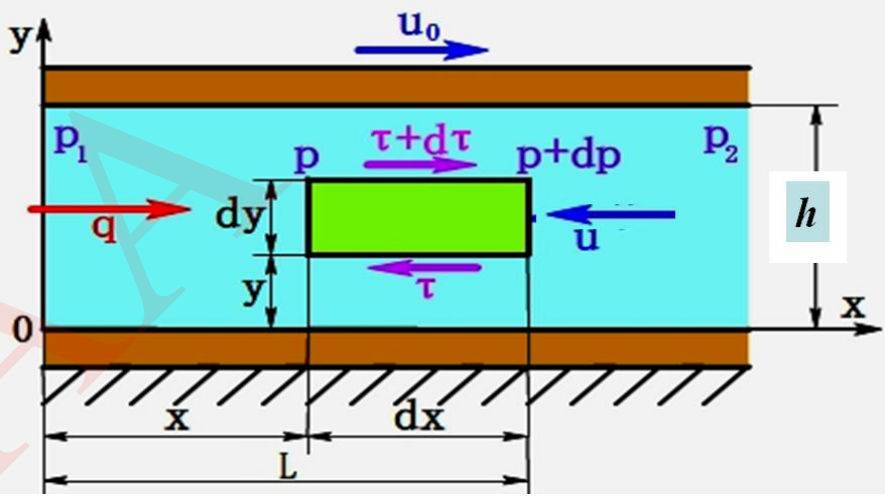
➢平行平板缝隙的流量为：

$$\Rightarrow u=\frac{\Delta p}{2\mu l}(h-y)y+\frac{u_0}{h}y$$

$$q=\int udA=\int_0^h ubdy=\int_0^h[\frac{b\Delta p}{2\mu l}(h-y)y+\frac{bu_0}{h}y]dy=\frac{bh^3}{12\mu l}\Delta p+\frac{bh}{2}u_0$$

PLC-NUAA

1.5 孔口和缝隙流动



➢平行平板缝隙的流量为：

$$q=\int udA=\int_0^h ubdy=\int_0^h[\frac{b\Delta p}{2\mu l}(h-y)y\pm\frac{bu_0}{h}y]dy=\frac{bh^3}{12\mu l}\Delta p\pm\frac{bh}{2}u_0$$

➢平行平板缝隙流动特点：

①第一项为压差流动引起流量（固定平行平板），第二项为剪切流动引起的流量（相对运动平行平板）。当剪切流方向和压差流方向一致时取“+”号；反之，取“—”号；

②压差作用下，通过固定平行平板缝隙的流量与缝隙量的三次方成正比。这说明液压元件内缝隙的大小对泄漏的影响是非常大的。

NUAA

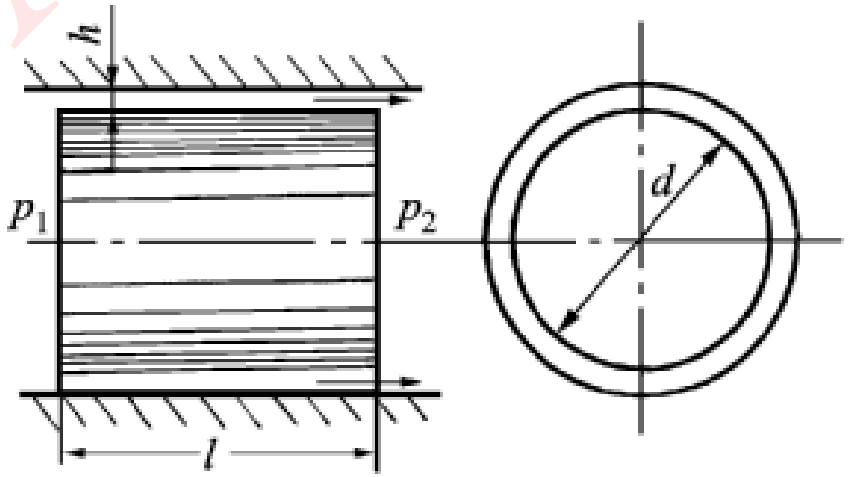
1.5 孔口和缝隙流动

2、圆柱环形的间隙流动

典型示例：(1)液压缸活塞与缸体；(2)滑阀阀芯与阀体

1) 同心环形缝隙联合流动液流特性

（1）当$h<<d$，$h<<l$时，将园环沿圆周展开，将环形缝隙间的流动，近似看成平行平板缝隙间的流动。



（2）将$b=\pi d$代入平板缝隙公式得：

$$q=\frac{bh^3}{12\mu l}\Delta p\pm\frac{bh}{2}u_0 \Rightarrow q=\frac{\pi dh^3}{12\mu l}\Delta p\pm\frac{\pi dh}{2}v$$

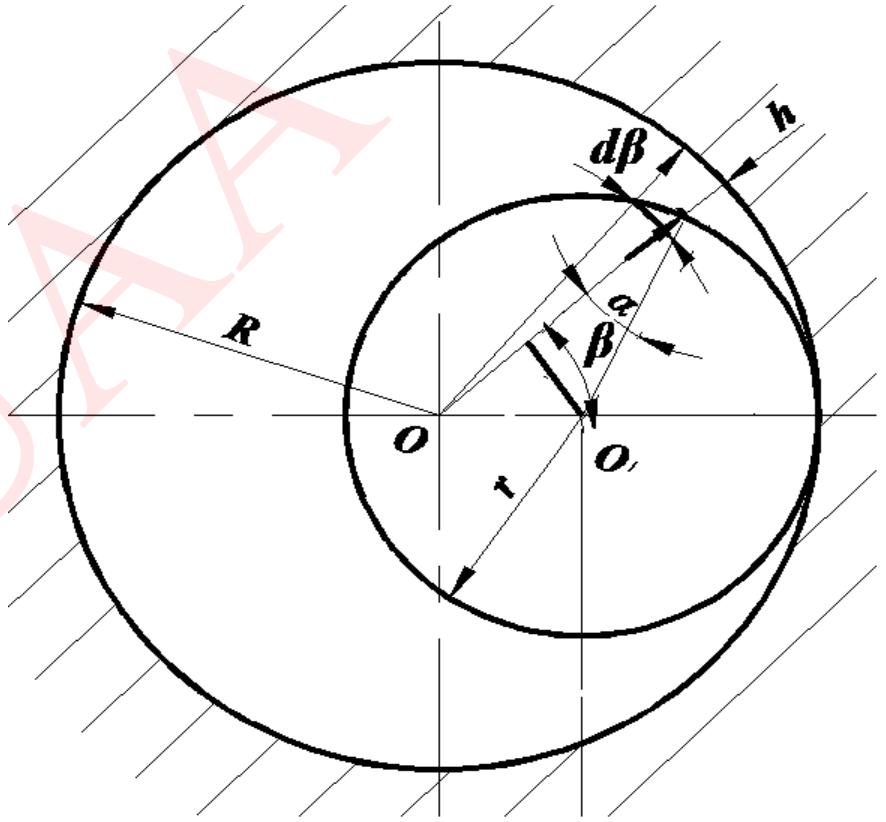
式中符号意义同前。

PLC - NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

2)偏心环形缝隙压差流动液流特性

应用平行平板间的间隙压差流动流量公式



$$\mathrm{d}q=\frac{bh^3}{12\mu l}\Delta p$$

$$b=R\mathrm{d}\beta$$

$$\Rightarrow \mathrm{d}q=\frac{bh^3}{12\mu l}\Delta p=\frac{\Delta p}{12\mu l}h^3R\mathrm{d}\beta$$

$$h=R-r\cos\alpha-e\cos\beta=R-r-e\cos\beta=h_0-e\cos\beta=h_0(1-\varepsilon\cos\beta)$$

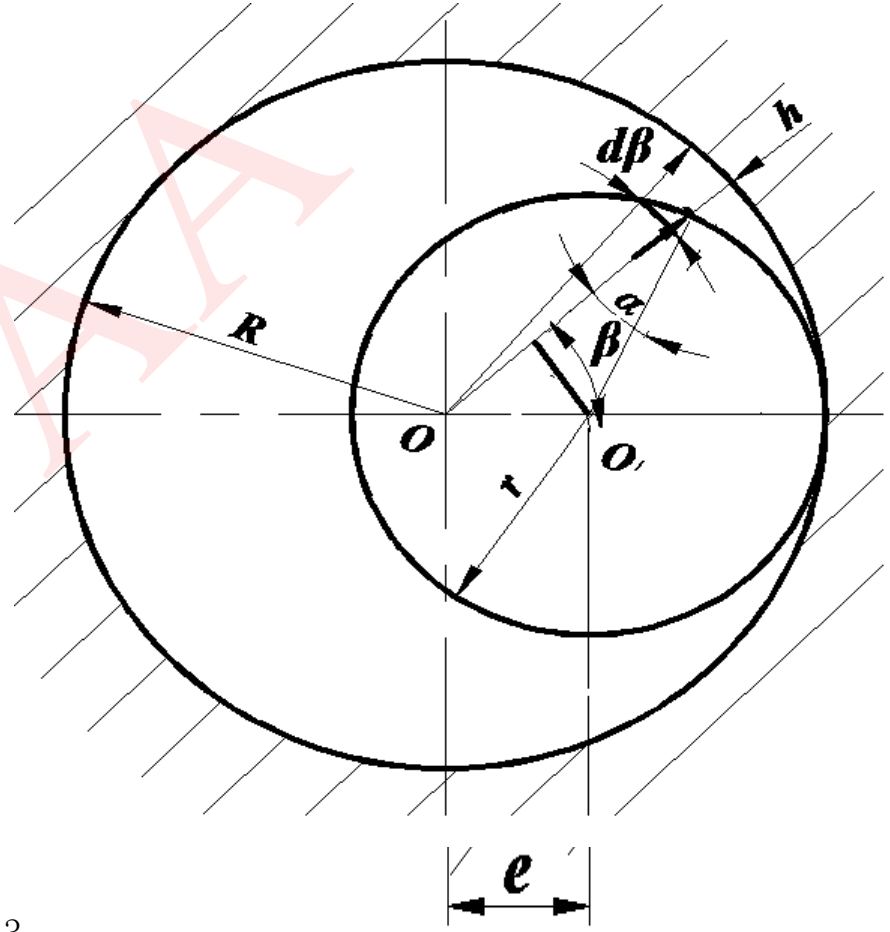
$$(h_0=R-r;\quad \varepsilon=\frac{e}{h_0})$$

$$\Rightarrow \mathrm{d}q=\frac{\Delta p}{12\mu l}h_0^3(1-\varepsilon\cos\beta)^3R\mathrm{d}\beta$$

PLC NUAA

1.5 孔口和缝隙流动

$$(h_0 = R - r;\quad \varepsilon = \frac{e}{h_0})$$



$$\Rightarrow \mathrm{d}q = \frac{\Delta p}{12\mu l} h_0^3 (1 - \varepsilon\cos\beta)^3 R\,\mathrm{d}\beta$$

$$\Rightarrow q = \int \mathrm{d}q = \int_0^{2\pi} \frac{\Delta p}{12\mu l} R h_0^3 (1 - \varepsilon\cos\beta)^3 \mathrm{d}\beta = \frac{\pi d h_0^3}{12\mu l} \Delta p (1 + 1.5\varepsilon^2)$$

当 $\varepsilon = 0$ 时，即为同心时压差作用下的流量公式；

当 $\varepsilon = 1$ 时，即处于完全偏心时的流量公式；

PLC-NUAA

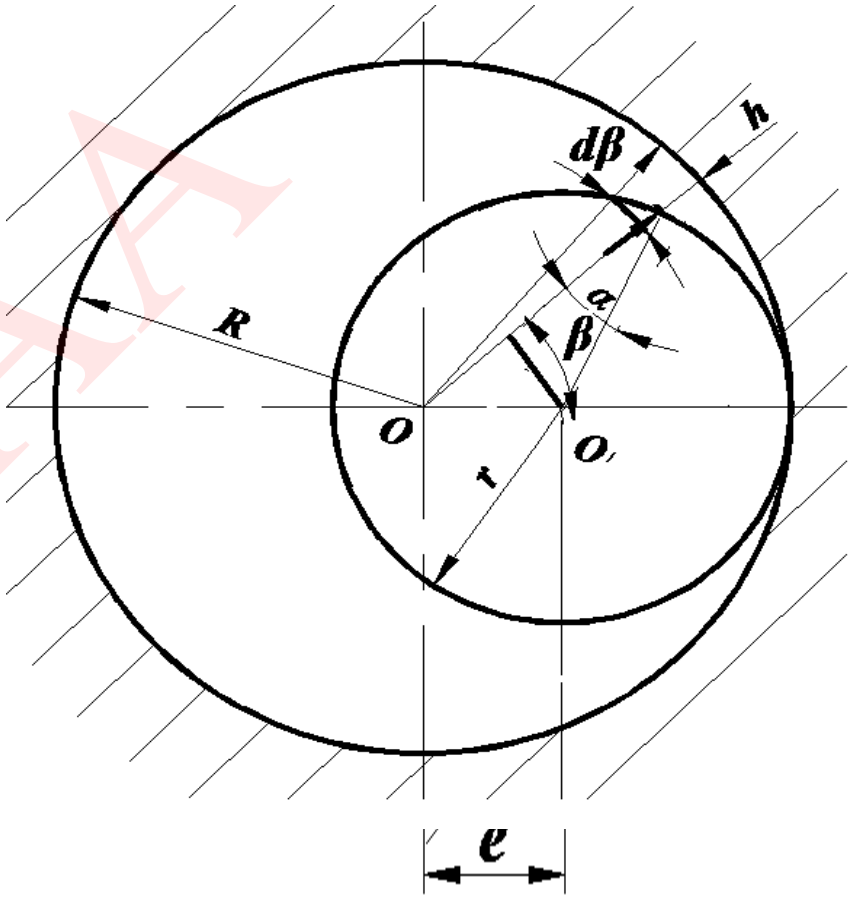
1.5 孔口和缝隙流动

3)、偏心环形缝隙压差与剪切联合作用液流特性

$$q=\frac{\pi d h_0^3}{12\mu l}\Delta p\left(1+1.5\varepsilon^2\right)$$ （偏心压差流动）

$$q=\pm\frac{\pi d h}{2}v$$ （同心剪切流动）

$$\Rightarrow q=\frac{\pi d h_0^3}{12\mu l}\Delta p\left(1+1.5\varepsilon^2\right)\pm\frac{\pi d h_0}{2}v$$ （偏心联合流动）



式中第一项为压差流动的流量，第二项为纯剪切流动的泄漏，正负号意义同前。

当 $\varepsilon=0$ 时，即为同心时压差作用下的流量公式；

当 $\varepsilon=1$ 时，即处于完全偏心时的流量公式；

FLC_NUAA

1.6 液压冲击与空穴

- 1.6.1 液压冲击（压力过高）
- 1.6.2 空　穴（压力过低）

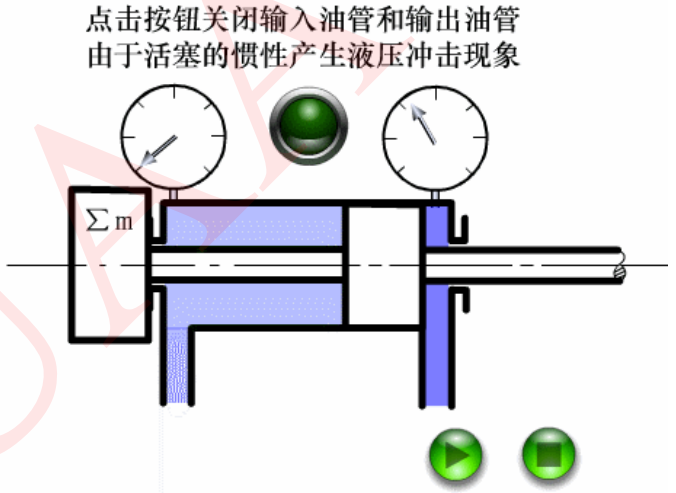
PLC-NUAA

1.6 液压冲击与空穴

1.6.1液压冲击

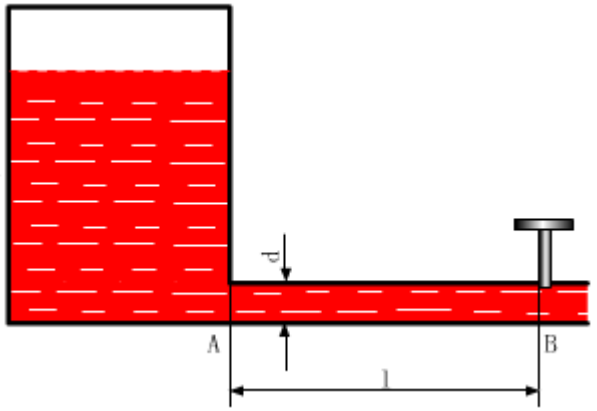
➢定义

在液压系统中，由于某种原因使液体压力在瞬间突然产生很高的峰值的现象。



➢原因

✓1. 因管道中阀门的突然关闭或液流迅速换向使液流速度的大小或方向发生突然变化时，流动液体的惯性导致的液压冲击；



✓2. 运动的工作部件突然制动或换向时，因工作部件的惯性而引起的液压冲击。

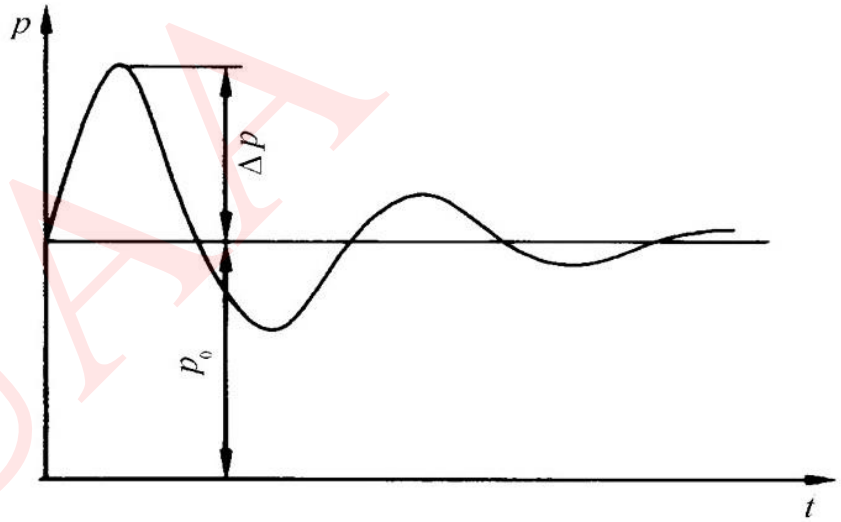
PLC - NUAA

1.6 液压冲击与空穴

1.6.1液压冲击

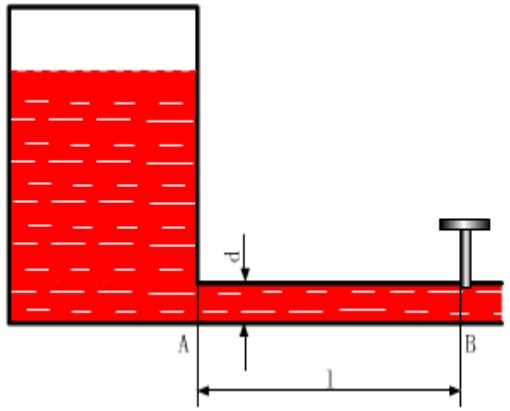
➢特征

峰值压力>>正常工作压力。
压力升降波动，变化极快。



➢危害

引起工作机械振动，产生噪声。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，甚至可能损毁设备。



PLC NUAA

1.6 液压冲击与空穴

1.液体突然停止运动时产生的液压冲击

液体的动能转化为液体的弹性能

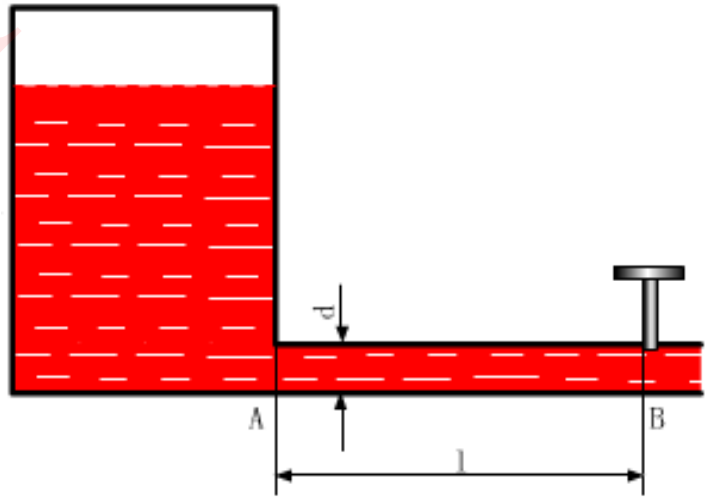
$$\frac{1}{2}\rho A l v^2 = \frac{1}{2}k_h \Delta l^2$$

$$\because k_h \Delta l = -\frac{\Delta F}{\Delta l}\Delta l = -\Delta F = -\Delta p \cdot A$$

$$K' = -\Delta p \cdot V / \Delta V$$

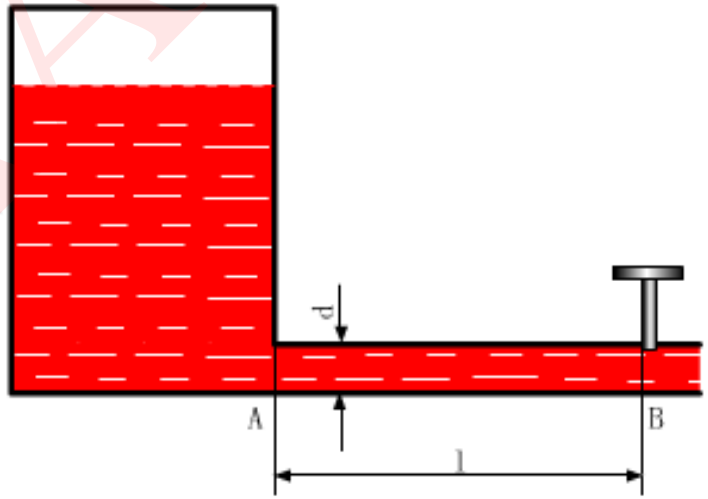
$$\therefore \frac{1}{2}\rho A l v^2 = -\frac{1}{2}\Delta p A \Delta l = -\frac{1}{2}\Delta p \Delta V = \frac{1}{2}\Delta p \frac{\Delta p \cdot V}{K'} = \frac{1}{2}\Delta p^2 \frac{Al}{K'}$$

$$\Delta p = \rho\sqrt{\frac{K'}{\rho}}v = \rho c v$$



PLC-NUAA

1.6 液压冲击与空穴



✓完全冲击

$t < t_c (t_c = 2l/c)$ $\Delta p = \rho \sqrt{\frac{K'}{\rho}} v = \rho c v$

✓非完全冲击

$t > t_c (t_c = 2l/c)$ $\Delta p = \rho c v \frac{t_c}{t}$

✓管道中的最大压力 $p_{\max} = p + \Delta p$

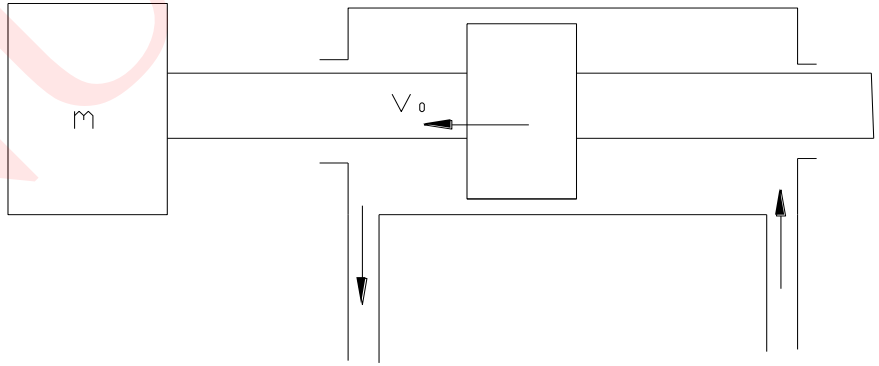
PLC-NUAA

1.6 液压冲击与空穴

2.运动部件制动时产生的液压冲击

动量定理：

$$\Delta pA\Delta t = \sum M\Delta v$$



$$\Rightarrow \Delta p = \frac{m\Delta v}{A\Delta t}$$

最大压力：

$$p_{\max} = p + \Delta p$$

PLC NUAA

1.6 液压冲击与空穴

- 危害：

✓对密封元件、管道和液压元件都有损坏作用；

✓引起设备振动，产生很大的噪声。

✓常使压力继电器、顺序阀等元件产生误动作。

PLC-NUAA

1.6 液压冲击与空穴

➢ 减小措施：

✓尽量延长阀门关闭和运动部件制动换向的时间；

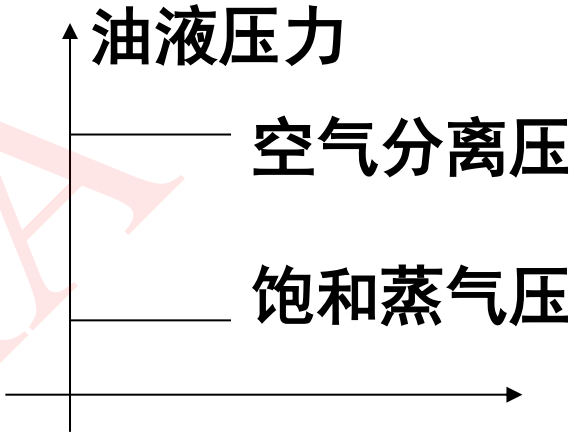
✓在冲击区附近安装安全阀、蓄能器等缓冲装置；

✓正确设计阀口，限制管道流速及运动部件速度，使运动部件制动时速度变化比较平稳；

✓如果换向精度要求不高，可使液压缸两腔油路在换向阀回到中位时瞬时互通。

NUAA

1.6 液压冲击与空穴



1.6.2 空穴

空气分离压：在一定的温度下，如压力降低到某一值时，过饱和的空气将从油液中分离出来形成气泡，这一压力值称为该温度下的空气分离压。

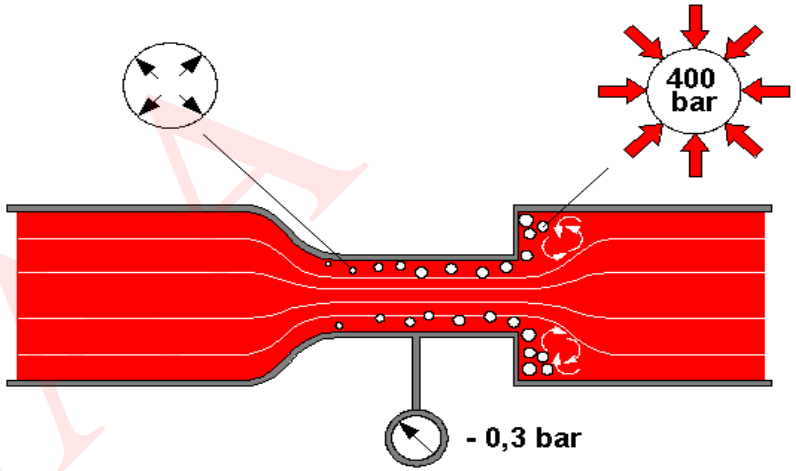
饱和蒸气压：当液压油在某温度下的压力继续降低于某一数值时，油液本身迅速汽化，产生大量蒸气气泡，这时的压力称为液压油在该温度下的饱和蒸气压。

- 定义 ——流动的液体，如果压力低于其空气分离压时，原先溶解在液体中的空气就会分离出来，从而导致液体中充满大量的气泡的现象。

BUAA

1.6 液压冲击与空穴

1.6.2 空穴



空穴现象：

在液压系统中，由于某种原因会在一些位置产生低气压，当压力低于液体的空气分离压时，液体中溶解的气体就会分离出来，以气泡的形式存在于液体中，使原来充满管道的液体出现了气体的空穴，这种现象称为空穴现象。

若压力再下降，当低于液体的饱和蒸气压时，液体中就会出现大量的蒸气气泡，同样使液体中出现了气体的空穴，这种现象也称为空穴现象。

PPT-NUAA

1.6 液压冲击与空穴

产生原因和位置：

压力油流过节流口、阀口或管道狭窄区时，速度升高，**压力降低**。

液压泵吸油高度过大，吸油管径较小、进油过滤网堵塞等使阻力太大，**压力降低**。

液压泵转速过高，吸油不充分，**压力降低**。

气体来源：

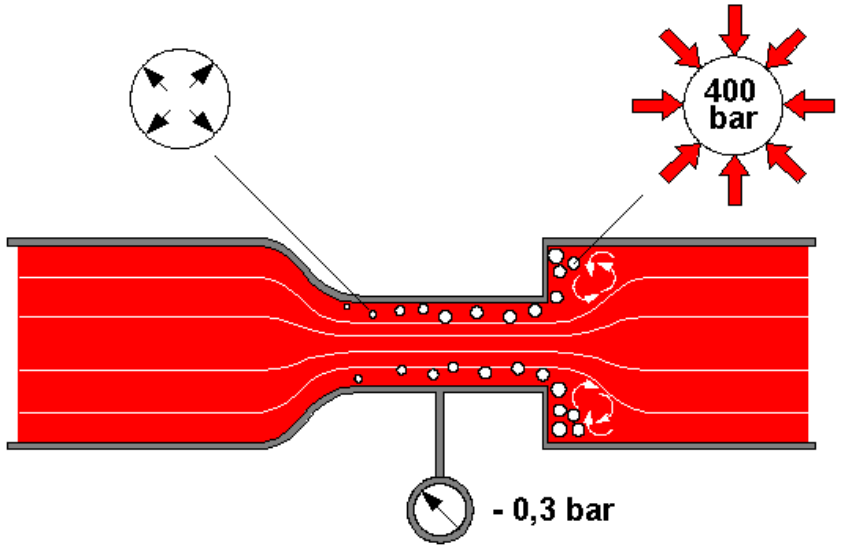
混入 → 气泡 → 轻微气穴

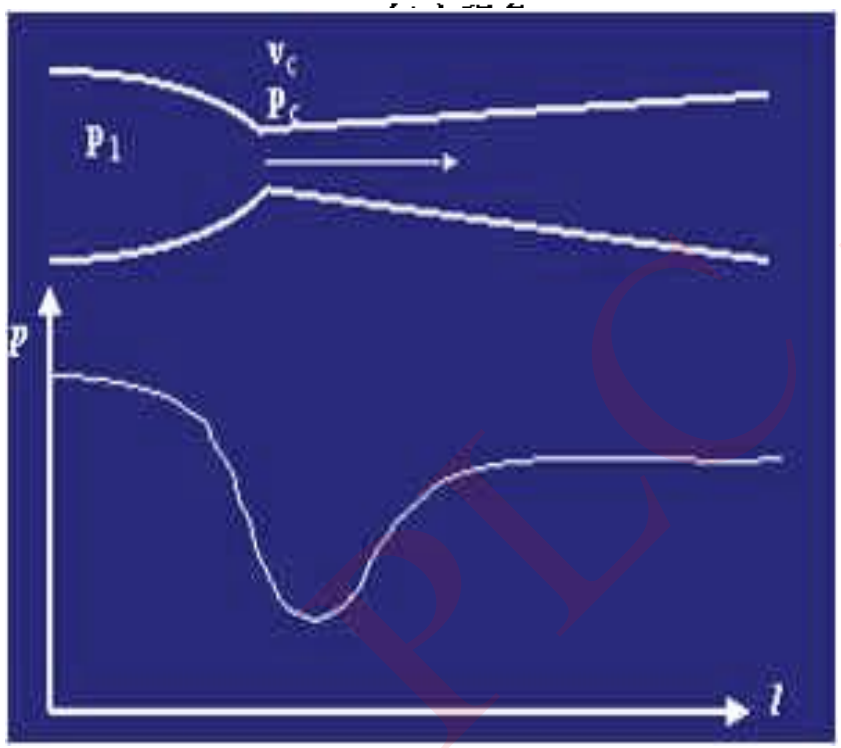
溶入 → 气体分子 → 严重气穴

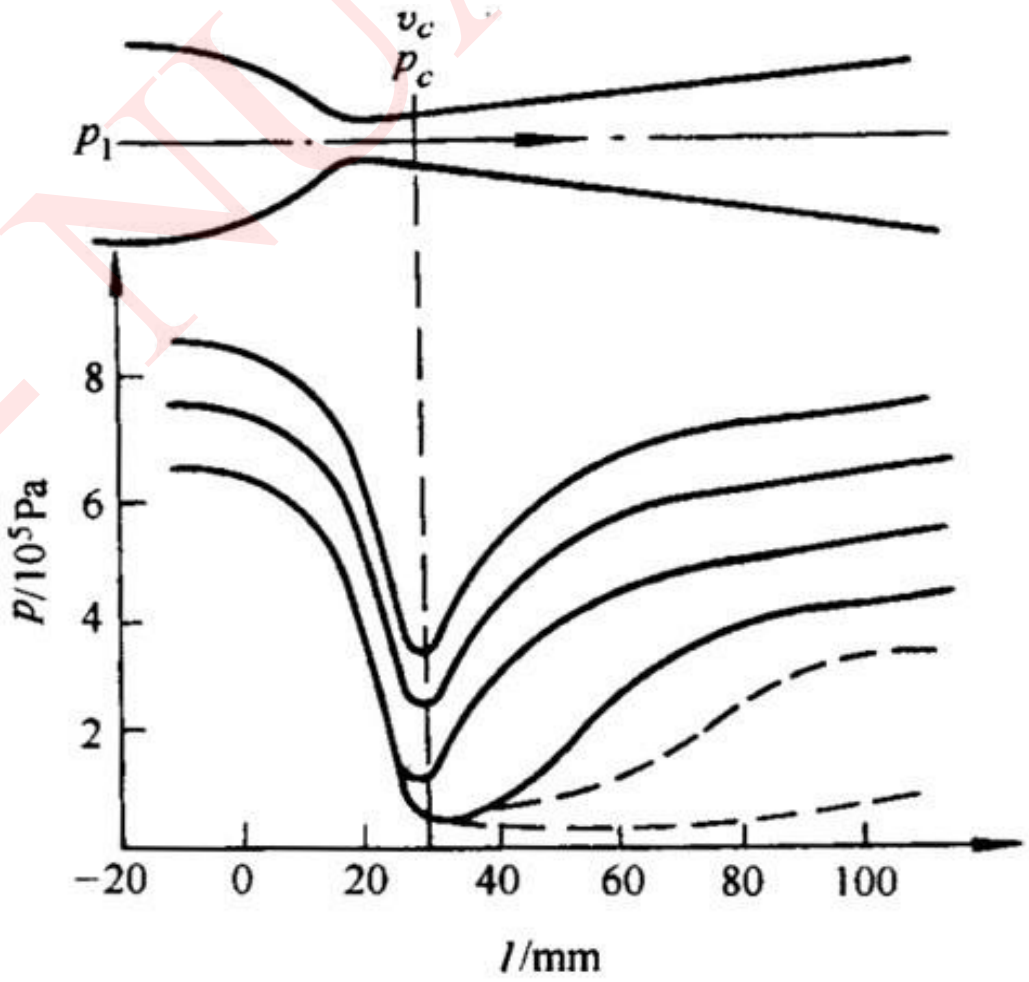
蒸气 → 气泡 → 强烈气穴

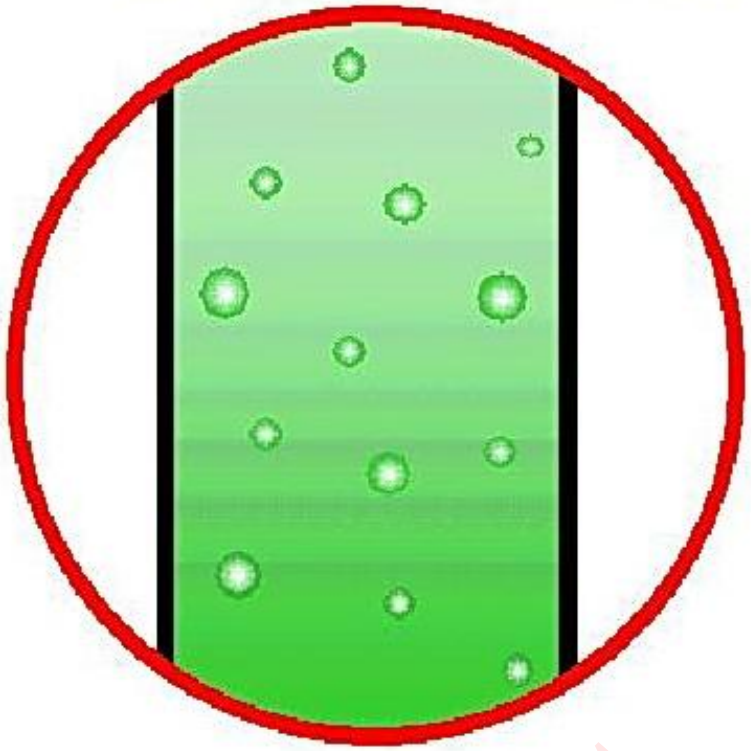
PLC - NUAA

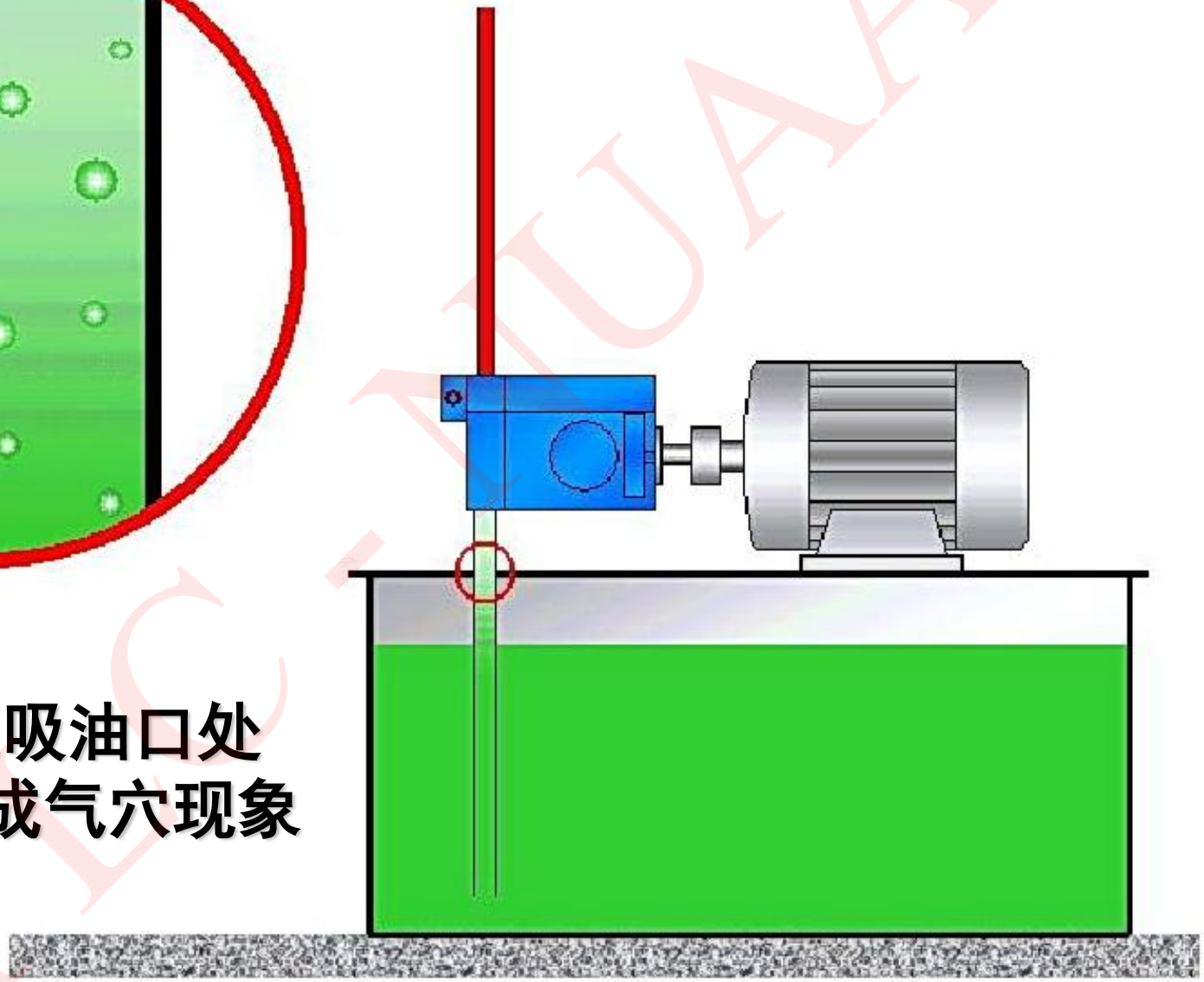
1.节流口处压力陡降
形成空穴现象











2.液压泵吸油口处低压力形成气穴现象

PLC-NUAA

1.6 液压冲击与空穴

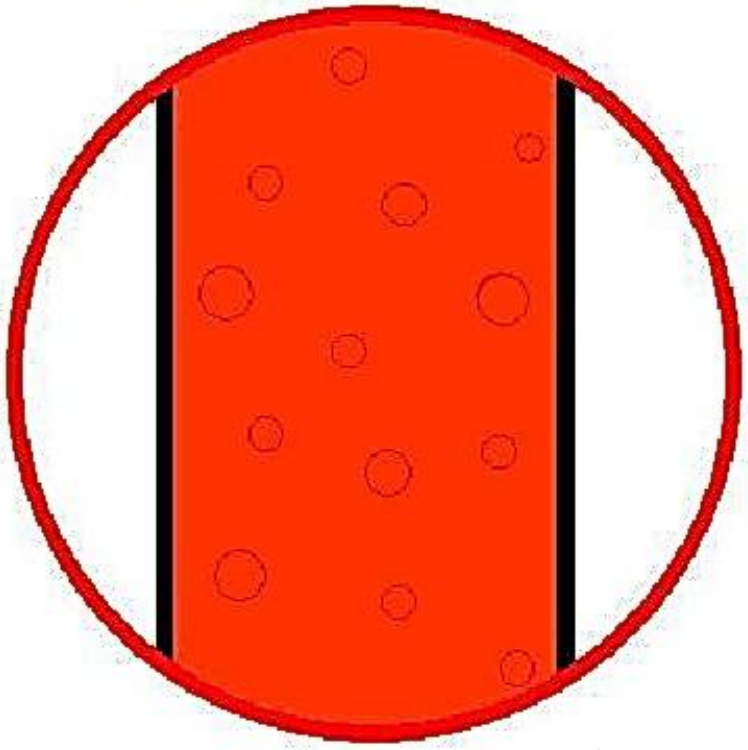
气蚀现象：

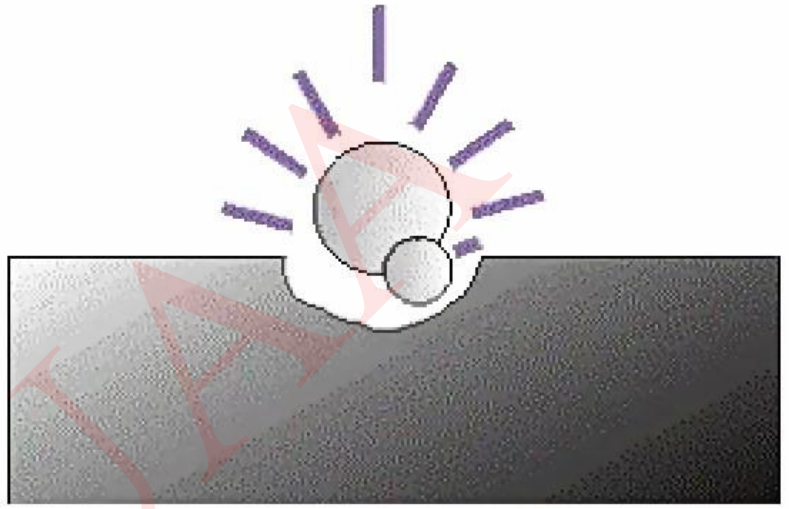
流动液体在低压区域发生了空穴后，气泡随着液体流动到下游的高压区域后，立即就**急剧溃灭**或**急剧缩小**。原来气泡所占有的空间形成了真空，周围的液体质点，将以极大的速度冲向溃灭或缩小的气泡中心，产生**局部冲击压力**（几百兆帕）和**局部极高温度**（上千度）。靠近金属表面的气泡破灭时，使金属表面局部疲劳和局部剥落，形成麻点或海绵状小洞穴，这种因空穴现象而加剧金属表面剥蚀的现象，称为气蚀。

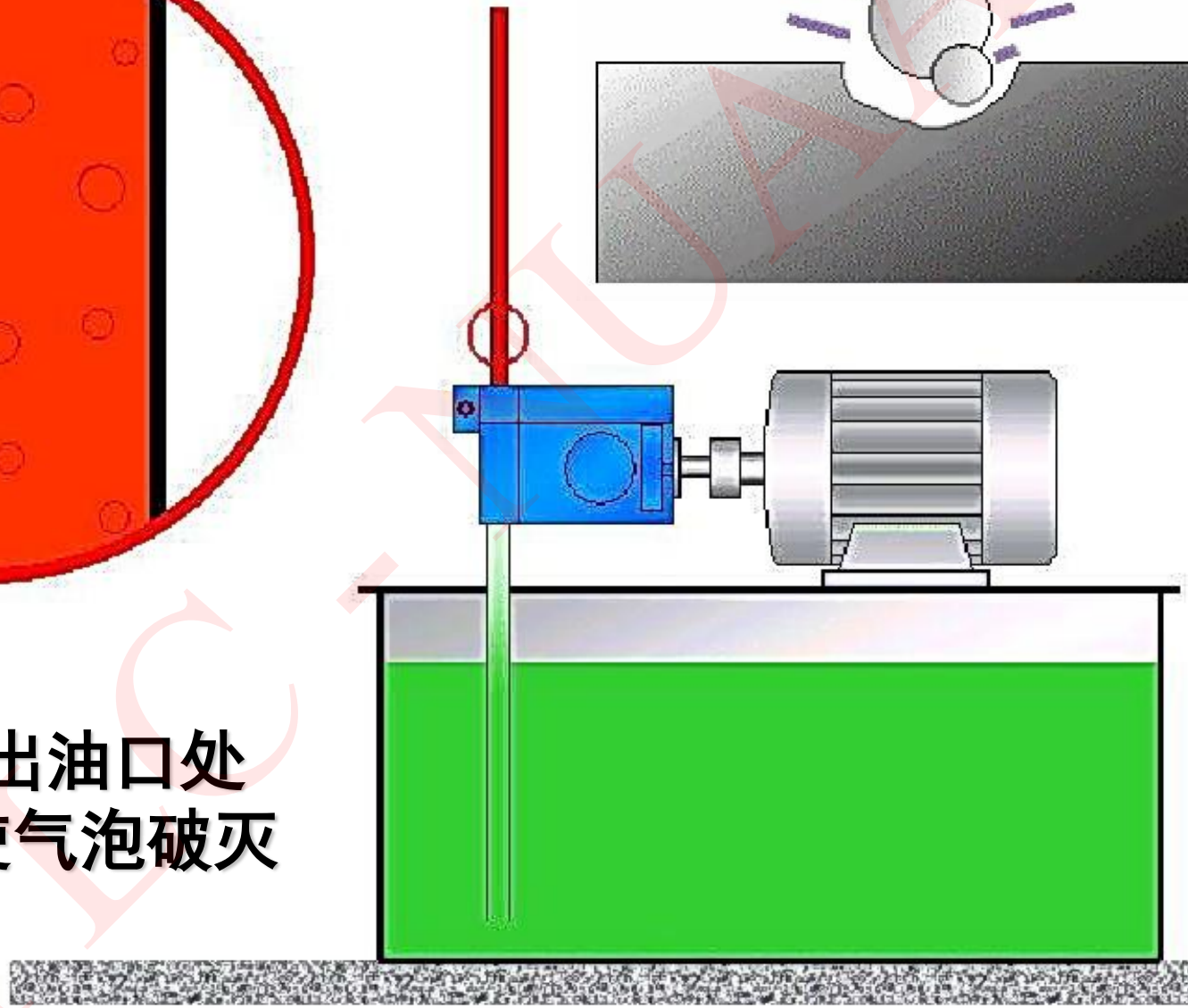
空穴现象发生在液流的低压区，

气蚀现象发生在液流的高压区。

PLC-NUAA







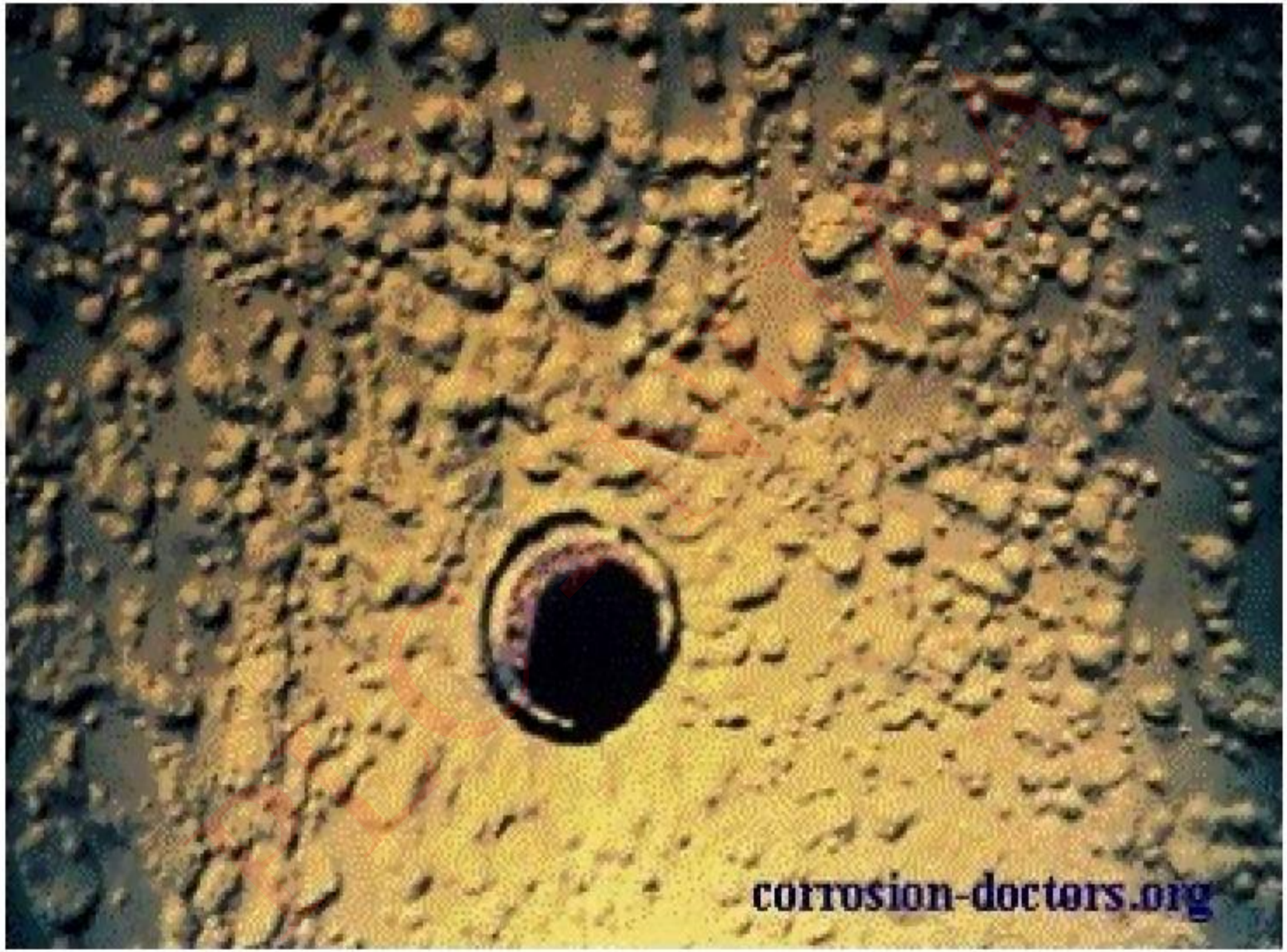
液压泵出油口处
高压力使气泡破灭

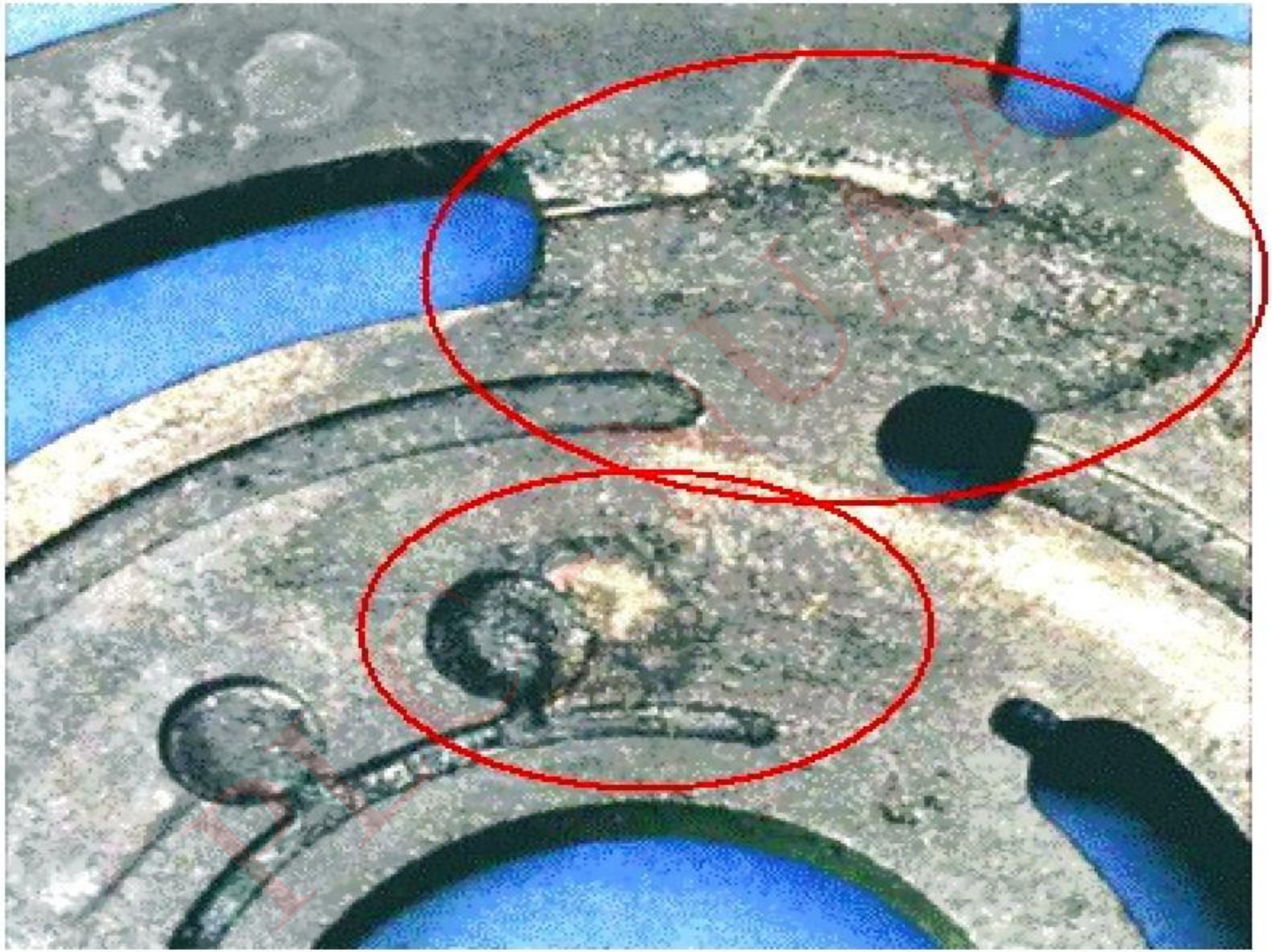
1.6 液压冲击与空穴

空穴危害：

- 含有气泡的液压油，其体积弹性模量明显降低。使一般认为液压油是不可压缩的性质，变为轻度可压缩。
- 含有气泡的液压油，其粘度略有增大。
- 破坏液流的连续性，产生流量和压力剧烈波动。
- 气泡破灭的冲击压力，引起振动和噪声。
- 气蚀现象造成局部金属疲劳和表面剥落，形成海绵状的小洞穴，严重缩短液压元件的使用寿命。

PCNUAA


corrosion-doctors.org



1.6 液压冲击与空穴

➢措施——防止液压系统中的压力过度降低

✓减小孔口或缝隙前后的压力降。一般希望相应的压力比$p_1/p_2<3.5$；

✓降低液压泵的吸油高度，适当加大吸油管直径。对于自吸能力差的液压泵要安装辅助泵供油；

✓管路要有良好的密封，防止空气进入；

✓对容易产生气蚀的元件，如泵的配油盘等，要采用抗腐蚀能力强的金属材料，提高零件的抗气蚀能力。

PLC - BUAA

复 习

1.油液的粘性

2.静力学基本方程及其物理意义

3.压力的表示方法

4.连续性方程、伯努利方程和动量方程（包括应用条件、意义等）

5.压力损失计算

6.孔口及缝隙流动的特点

7. 空穴现象与液压冲击

PLC - NUAA

复 习

1.国家标准规定的液压油液牌号是在多少温度下的哪种粘度的平均值？

答：我国液压油的牌号是用它在温度为40℃时的运动粘度平均值来表示的。例如32号液压油，就是指这种油在40℃时的运动粘度平均值为**32 mm^2/s** 。

PLC NUAA

复 习

2. 什么叫压力？压力有哪几种表示方法？液压系统的压力与外界负载有什么关系？

答：液体在单位面积上所受的内法线方向的法向应力称为压力。

压力有绝对压力和相对压力，绝对压力是以绝对真空为基准来度量的，而相对压力是以大气压为基准来进行度量的。

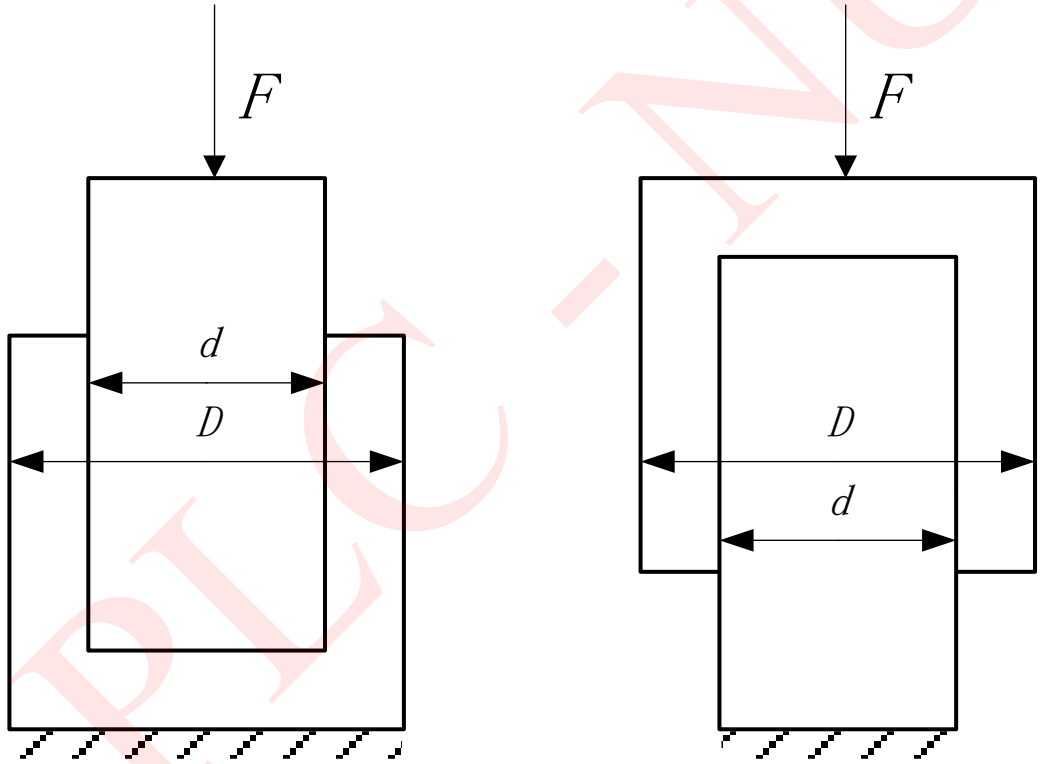
由公式 $p = \frac{F}{A}$

可知液压系统中的压力是由外界负载决定的。

PLC NUAA

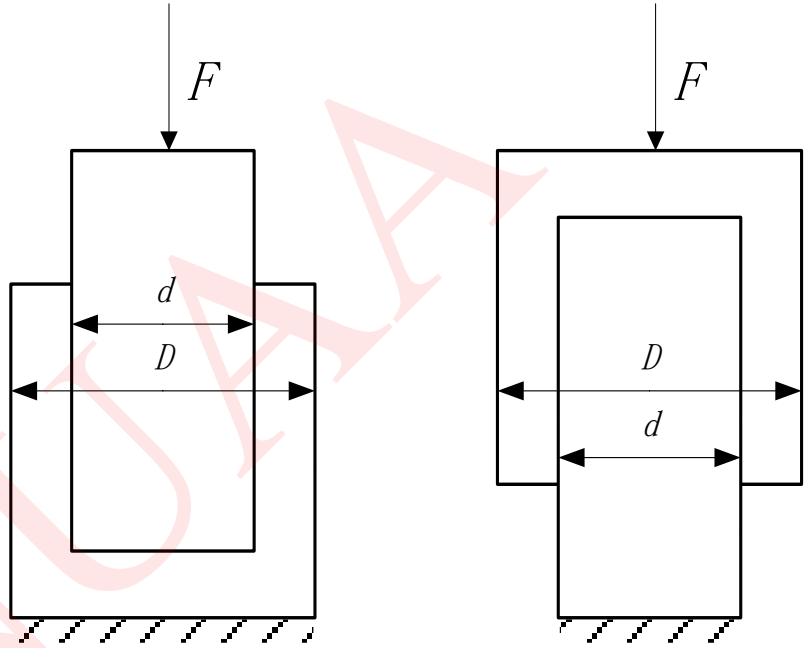
复 习

3.如图所示，液压缸直径$D = 150$ mm，柱塞直径$d = 100$ mm，负载$F = 5 \times 10$ N。若不计液压油自重及活塞或缸体重量，试求图示两种情况下液压缸内的液体压力是多少？



PLC - NUAA

复 习



解：两种情况下柱塞有效作用面积相等，即：

$A=\dfrac{\pi d^2}{4}$ **则其压力：** $p=\dfrac{4F}{\pi d^2}$

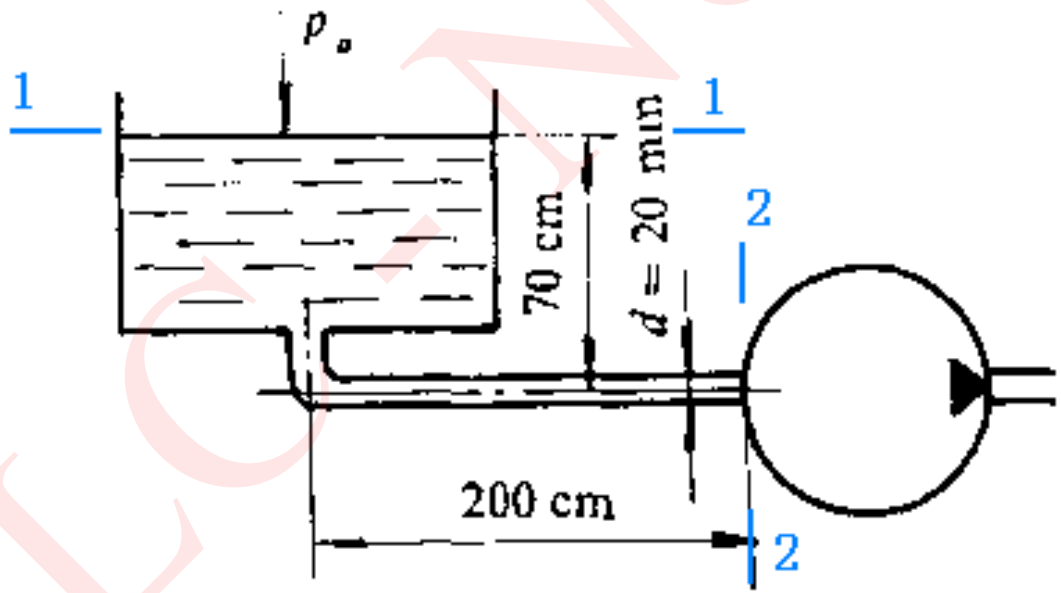
$$=\frac{4\times5\times10^4}{\pi\times\left(100\times10^{-3}\right)^2}$$

=6.37 MPa

PLC - NUAA

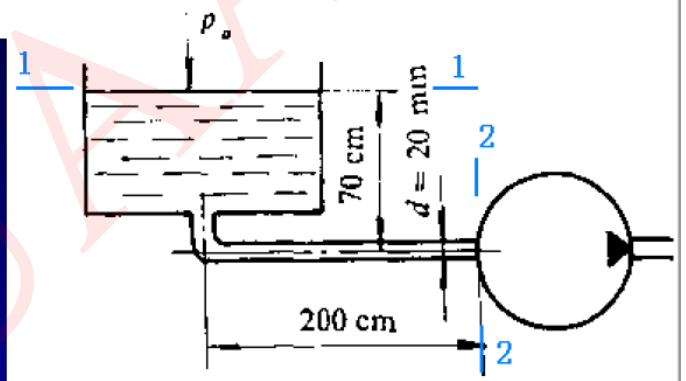
习题

1－5　将流量$Q=16\text{L/min}$的液压泵安装在油面以下，已知油的运动粘度$\nu=0.11\ \text{cm}^2/\text{s}$，油液的密度$\rho=880\ \text{kg/m}^3$，弯头处的局部阻力系数$\zeta=0.2$，其它尺寸如图1－33所示。求液压泵入口处的绝对压力。



PLC-NUAA

1－5　将流量$Q=16L/min$的液压泵安装在油面以下，已知油的运动粘度$\nu=0.11 cm^2/s$，油液的密度$\rho=880 kg/m^3$，弯头处的局部阻力系数$\zeta=0.2$，其它尺寸如图1－33所示。求液压泵入口处的绝对压力。



解：取1-1、2-2截面，

列出伯努利方程：

$$\frac{p_1}{\rho g}+\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}+Z1=\frac{p_2}{\rho g}+\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}+Z2+\xi\frac{v_2^2}{2g}+\lambda\frac{l}{d}\frac{v_2^2}{2g}$$

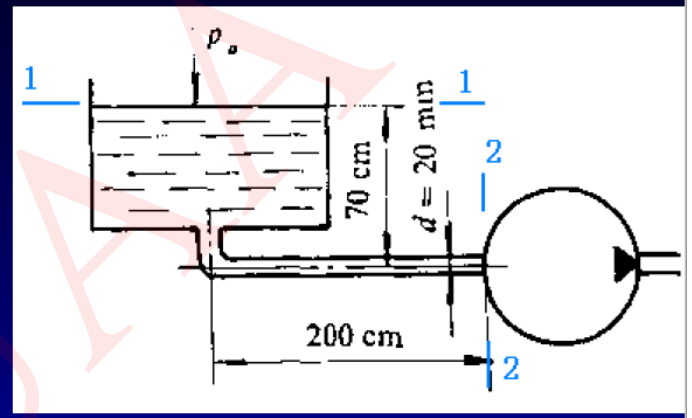
已知：p1=Pa=1×10^{5}Pa　V1=0

Z1=h=0.7m　Z2=0

求：p2=?

另外：$v2=\dfrac{q}{\frac{\pi}{4}d^2}=\dfrac{16\times10^{-3}/60}{\frac{\pi}{4}\times0.02^2}=0.849m/s$

判断吸油管中液压油的流动状态：



$$R_e = \frac{vd}{\nu} = \frac{0.849 \times 0.02}{11 \times 10^{-6}} = 1543 < 2000$$

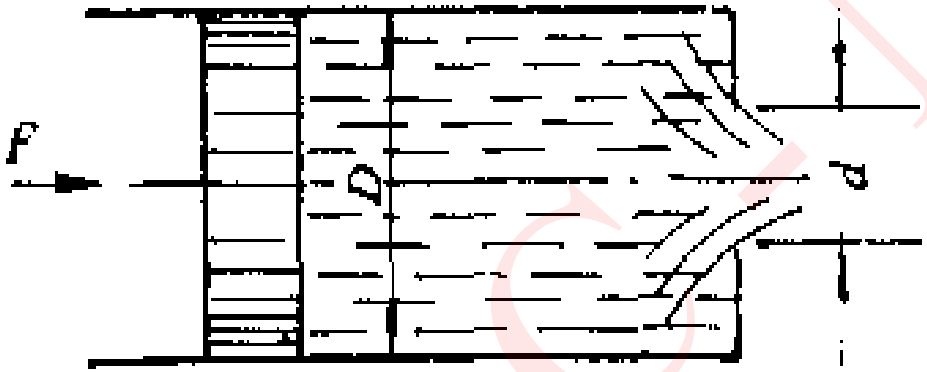
故流动状态为层流，$\alpha_2 = 2$　　$\lambda = \frac{75}{R_e} = 0.049$

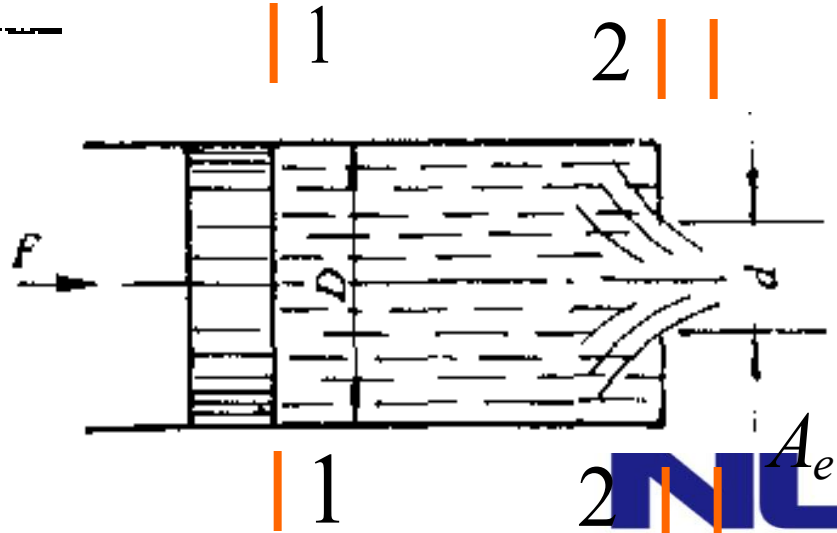
所以：$$p_2 = \rho g\left(\frac{p_1}{\rho g} + z_1 - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \xi\frac{v_2^2}{2g} - \lambda\frac{l}{d}\frac{v_2^2}{2g}\right)$$

$$= 1.0379 \times 10^5\, Pa$$

习题

1-7　如图1-35所示，活塞上作用有外力 $F=3\,000$ N，活塞直径 $D=50$ mm，若使油从液压缸底部的锐缘孔口流出，设孔口直径 $d=10$ mm，孔口速度系数 $C_v=0.97$，流量系数 $C_d=0.63$，油液的密度 $\rho=870$ kg/m^3，不计摩擦，试求作用在液压缸缸底壁面上的力。





PLC NUAA

1—7　如图 1—35 所示，活塞上作用有外力 $F=3\ 000$ N，活塞直径 $D=50$ mm，若使油从液压缸底部的锐缘孔口流出，设孔口直径 $d=10$ mm，孔口速度系数 $C_v=0.97$，流量系数 $C_d=0.63$，油液的密度 $\rho=870\ \mathrm{kg/m^3}$，不计摩擦，试求作用在液压缸缸底壁面上的力。

解：用动量方程求解。

$$\sum F=(F-F')=\rho q(\beta_2 v_2\cos\theta_2-\beta_1 v_1\cos\theta_1)$$

$$\Delta p=p_1-p_2=p_1=\frac{F}{\frac{\pi}{4}D^2}=\frac{3000}{\frac{\pi}{4}\times 0.05^2}=1.53(MPa)$$

$$V_e=C_v\sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p}=57.47(m/s)$$

$$q=C_d A\sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p}=C_d\frac{\pi}{4}d^2\sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p}=0.0029m^3/s$$

$$\because C_c = \frac{A_e}{A_0} = \frac{A_e}{A_2}$$

$$\therefore v_2 = C_c v_e = \frac{C_d}{C_v} v_e = \frac{0.63}{0.97} \times 57.47$$

或者（$v_2 = \frac{q}{A}$）

$$v_1 = \frac{A_2}{A_1} v_2 = 1.5 m/s$$

习题（1－7）

$$\sum F = (F - F') = \rho Q(\beta_2 v_2 \cos\theta_2 - \beta_1 v_1 \cos\theta_1)$$

$$= \rho Q(v_2 - v_1)$$

$$= 91.45N$$

$$\therefore F' = F - \sum F = 2908.6N$$