

高等工业学校教材



工 程 流 体 力 学

GONG
CENG
LIU TI
LI XUE

周士昌 编

东北工学院出版社

内 容 简 介

本书是按1983年机械工业部教材编审委员会审定的《工程流体力学教学大纲》编写的。全书分为八章，前六章流体的物理性质、流体静力学、流体动力学、阻力计算、缝隙流动、液压冲击及空穴现象，重点放在流体力学基本理论的概念和应用的阐述上，而没有泛泛地进行严密的数学推导。七、八两章在前六章的基础上系统和严格地介绍了粘性流体动力学和气体动力学的基本理论。

本书为机械类各专业技术基础课教材，亦可供从事机械设计、制造等行业的技术人员参考。

高等工业学校教材

工 程 流 体 力 学

周士昌 编

东北工学院出版社出版

(沈阳·南湖)

辽宁省新华书店发行

辽宁省情报研究所印刷厂印刷

责任编辑：战陟旻 责任校对：赫 明

开本 787×1092 1/16 印张 14 1/4 字数 376千字

1987年11月第一版第一次印刷

印数 1~1 500册 定价：2.78元

统一书号：15476·14 ISBN 7-81006-029-5/TH·9

前 言

工程流体力学是机械类各专业的一门技术基础课。流体分为液体和气体。气体的流体力学规律与液体的有共性的一面，又有特性的一面。本书以不可压缩的液体作为主线来叙述。但为了使同学掌握气体的力学特性，除在有关章节增加气体特性的叙述外，最后还专门有一章介绍气体动力学的基本概念。

在编写过程中，力图使本教材具有以下几方面的特点：

1. 加强基础理论。重点放在物理概念的阐述上，以便能用流体力学的基本概念来分析和解决工程中的一些流体力学问题。在叙述中不单纯追求数学推导的严密性，但为了使同学掌握结论的来龙去脉，以便更好地理解结论，本教材一般避免不加分析地直接引用结论，在得出结论时还是给出必要的数学分析。

2. 着重应用。一些主要的流体力学计算方法都尽量叙述清楚，同时通过相当数量的例题来说明其应用方法。

3. 在内容安排上按照循序渐进的原则分成两部分。前六章为第一部分，是工程中最常用的流体力学基本理论，叙述上着重概念和应用，内容力求深入浅出。第七、八两章则是在前六章的基础上提高一步，理论比较系统和严格。这种安排有利于学生学习前六章内容时把重点放在掌握常用的基本理论、基本概念和基本技能上，避免过去流体力学教学中常出现的严格的数学推导与重要的基本概念重合在一起，从而使学生把注意力过分集中于数学推导而冲淡了对基本理论基本概念的掌握。而最后学习七、八两章时，由于有了前六章的流体力学基础，因而更便于学生对七、八两章理论的理解，同时又使同学能把一些常用的流体力学理论提高到严格的数学基础上来。

4. 内容适当注意结合液压和气动对流体力学的要求来编。

本教材首先是在1978年编写的，先以讲义的形式印刷，1981年重印时作了局部文字上的修改。这次在内容上又作了一些变动，并全部使用国际单位制。由于编者水平所限，本教材可能有不少缺点和错误，欢迎广大读者批评指正。

我的研究生张健成同志帮助我抄写了全部底稿，李国康同志帮助我整理了全部图纸。对于他们出色的工作表示衷心的感谢。

周士昌

1987年元月

目 录

绪论

第一章 流体的物理性质及作用在流体上的力

§ 1—1 质量和重力	(3)
§ 1—2 压缩性和温度膨胀性	(4)
§ 1—3 比热、导热系数和散热系数	(13)
§ 1—4 粘性	(15)
§ 1—5 作用在流体上的力	(21)

第二章 流体静力学

§ 2—1 流体静压力及其特性	(23)
§ 2—2 压力的度量	(24)
§ 2—3 流体静力学基本方程	(26)
§ 2—4 液体式测压计	(31)
§ 2—5 巴斯加定理	(34)
§ 2—6 流体对平面和曲面的作用力	(37)
§ 2—7 旋转容器中液体的相对平衡	(42)
§ 2—8 液压和气动系统中压力的形成和功率的计算	(44)

第三章 流体动力学

§ 3—1 几个基本概念	(47)
§ 3—2 连续性方程	(49)
§ 3—3 理想流体伯努利方程式	(51)
§ 3—4 实际流体伯努利方程式	(56)
§ 3—5 系统中有流体机械的伯努利方程式	(61)
§ 3—6 稳定流的动量方程式	(65)
§ 3—7 稳定流的动量矩方程及叶轮式流体机械的基本方程式	(72)

第四章 阻力计算

§ 4—1 阻力损失的种类和流动类型	(74)
§ 4—2 沿程损失计算	(76)
§ 4—3 局部损失计算	(91)
§ 4—4 管路压力损失的近似计算	(102)
§ 4—5 管路(阻力)的串联和并联	(104)
§ 4—6 流体经薄壁小孔及管咀出流的流量计算	(118)

第五章 缝隙中的流体流动

§ 5—1	流体在壁面固定的平行缝隙中的流动	(124)
§ 5—2	流体在壁面相对移动的平行缝隙中的流动	(128)
§ 5—3	环形缝隙中的流体流动	(130)
§ 5—4	曲线型缝隙中的流体流动	(134)
§ 5—5	平行平板间的径向流动	(136)
§ 5—6	锥形园柱缝隙的压力和流量计算	(139)

第六章 液压冲击及空穴现象

§ 6—1	液压冲击	(145)
§ 6—2	空穴现象	(151)

第七章 粘性流体动力学

§ 7—1	连续性方程的微分方程形式	(153)
§ 7—2	理想流体运动的微分方程式及其解	(155)
§ 7—3	粘性流体运动的微分方程式及其解	(160)
§ 7—4	附面层理论基础	(174)
§ 7—5	油膜润滑的流体力学理论	(187)
§ 7—6	相似理论基础	(194)

第八章 气体动力学

§ 8—1	理想可压缩气体伯努利方程	(207)
§ 8—2	流体中的音速	(210)
§ 8—3	马赫数	(213)
§ 8—4	管咀中气流速度与断面积的关系	(213)
§ 8—5	高压气体经孔口、管咀（或拉伐尔管）的出流	(214)
§ 8—6	低压气体管路阻力计算	(218)
§ 8—7	高压气体管路阻力计算	(220)

参考文献

绪 论

工程流体力学是研究流体平衡和运动的规律，并用这些规律来分析工程中的实际问题。工程流体力学是机械类专业的一门重要的技术基础科学。

流体力学的研究对象——流体，与固体力学的研究对象——固体有什么区别？一般固体的特点是既能承受压力，又能承受拉力和剪力，而流体则不能承受拉力和剪力，它只能承受压力。

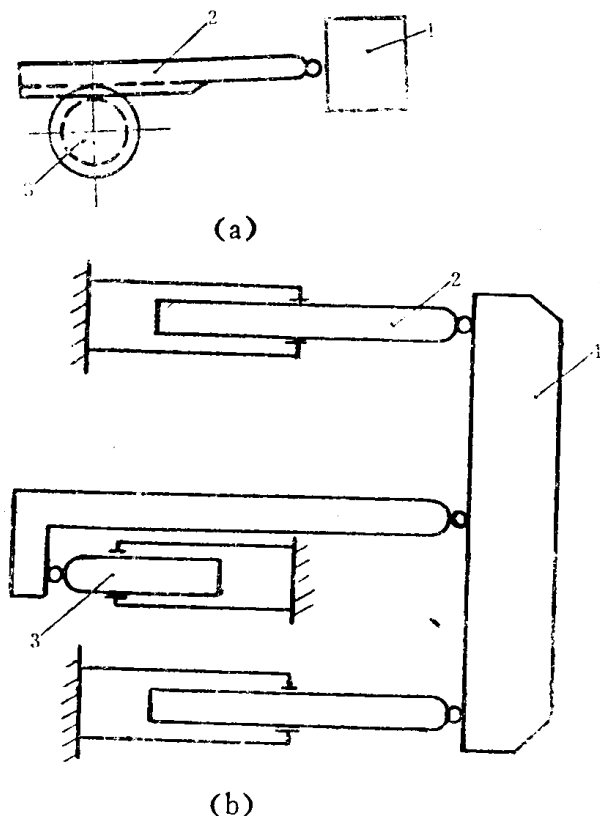


图 0-1

(a) 机械传动推钢机

1—推头 2—齿条 3—齿轮

(b) 液压推钢机

1—推头 2—推缸柱塞 3—回程柱塞

例如在图 0-1 (a) 所示的机械传动的推钢机中无论推钢或回程都可通 过 齿 条 2 来 传 动，在推钢时，齿条 2 受压力，而在回程时受拉力，每一个齿则还受剪力。但在液压传动的推钢机中，如图 0-1 (b)，液压油只能受压力。因此推钢时由压力油推动 柱 塞 2 向 右 运 动，使推头推钢，但在回程时，液压油就不能把柱塞 2 拉回来，而必须由压力油推动柱塞 3 向左运动而把推头拉回。又如斜面的倾角小于固体与该斜面的摩擦角时，固体可以静止不动地停在斜面上不下滑，但是任何微小的倾角，都能使液体沿着斜面向下流。这也是由于流体不能承受拉力和剪力，因此在重力沿斜面方向的分力的作用下，使液体流动，如图 0-2 所示。

从力学观点看，流体受拉力或剪力作用就要流动，从而使流体变形。而固体受拉力或剪力之后虽然也能产生一些变形，但这种变形是非常小的，而且变形到一定程度之后就停止了。我们正是从流体与固体这一主要区别的角度上来给流体下定义的：“流体是一种受任何微小拉力或剪力都能产生巨大变形的物体。”

流体分为液体和气体两种，气体的分子间距离较大，受压力作用后体积改变较大，即气体的主要特点是有压缩性，工程上称为可压缩流体；而液体分子间距较小，受压力作用后体积变化很小，这种体积变化在工程上一般可忽略不计。因此液体也称为不可压缩流体。但是在液压系统中压力变化较大（可达几十MPa气压），在有些问题的分析中液体的压缩性就不能忽略不计了。因此在分析工程问题时，我们必须辩证地看待液体，一般情况下可以看成是不可压缩的，但在有些特殊问题中压缩性上升为不可忽略的因素时，例如在液压系统的瞬态分析时，就应当把液体看成是可压缩的。

由于气体与液体的很多规律是类似的，我们这门课主要以液体为讨论对象。但是气体的平衡和运动规律又有其不同于液体的一面，因此，我们在讨论液体的平衡和运动规律的同时也

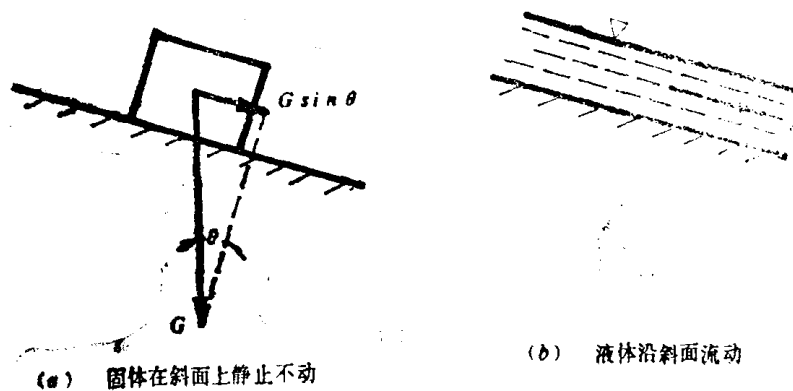


图 0-2

应对气体的有关特性作适当了解。

从微观的角度看，流体（包括液体和气体）是由无数分子组成的，分子与分子之间有空隙（分子距），而且分子是在永恒不息地运动着的。流体力学不研究微观的分子运动，而是从宏观的角度来研究流体的机械运动。因此，在流体力学中，把流体看成是由质点组成的连续介质，而质点与质点之间则没有空隙，质点本身的尺寸相对于流动空间的尺寸来说可以忽略不计，但每一质点又包含有大量分子，分子间的距离相对于质点尺寸来说则分子距离又是可以忽略不计的。如果说，质点尺寸相对于流动空间尺寸来说是一阶无穷小的话，那么分子距离就是二阶或更高阶的无穷小。这在工程上是完全可行的。例如 1 mm^3 的体积在工程上可以算是很小的体积了，但在 1 mm^3 的气体中仍有 2.7×10^{18} 个分子， 1 mm^3 的水中有 3×10^{21} 个分子。由此可见，分子距离在工程上完全可以忽略不计，分子运动当然也可忽略来计。因此在流体力学中，把质点看作是流体的最小单位，质点的尺寸相对于流动空间尺寸不说是无穷小量。在静止流体中，质点是完全静止的。

流体被看作连续介质，则反映流体运动的各种物理量（如速度、密度、压力等）也是空间坐标的连续函数。因此就可以用数学解析方法来分析流体力学问题。

第一章 流体的物理性质及作用在流体上的力

流体本身的物理性质是决定流体运动规律的内部原因，而外力对流体的作用则是外部原因。因此，要了解流体运动的规律，首先应当研究流体的物理性质。当然，流体的物理性质很多，我们这里只讨论几个最主要的。

§ 1-1 质量和重力

任何物质都有质量，在地心引力的作用下就能显示出重力。若质量以“ M ”表示，重力以“ G ”表示，则 M 与 G 之间有如下关系：

$$G = Mg \quad (1-1)$$

质量单位是“千克”(kg)，而重力单位是“牛顿”(N)。显然，质量为1 kg的流体，其重力为9.81N。

单位体积流体所具有的质量称为密度，以“ ρ ”表示。

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-2)$$

ρ 的量纲为 M/L^3 ，单位为 kg/m^3 。

定义单位体积流体所具有的重力为重度，以“ r ”表示。

$$r = \frac{G}{V} \quad (1-3)$$

r 的量纲为 M/L^2T^2 ，单位为 $kg/(m^2 \cdot s^2)$ 或 N/m^3 。

根据式(1-1)可知

$$r = \rho g \quad (1-4)$$

在液压技术中，有时会遇到由几种油组成的混合油，此时，混合油的密度可按百分比计算，即：

$$\rho = 0.01(\alpha_1\rho_1 + \alpha_2\rho_2 + \cdots + \alpha_n\rho_n) \quad (1-5)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ：混合油各成份的密度

$\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n$ ：混合油各成份所占的质量百分数

还应当注意区别密度和比重这两个概念。比重是物体重力与同体积的水(4℃)的重力之比，因此比重是没有量纲的。而密度则如前所述是有量纲的，而且数值也不尽相同。

油的比重是指20℃时的油液重力与同体积4℃的水的重力之比。在有的书中以 $\rho_{4^{\circ}}$ 表示，但一定注意这不是油液的密度。严格说，液压油的密度和重度是随温度和压力而变化的，关于这一点在下一节分析液体的压缩和温度膨胀时将详细讨论，在目前常用的压力和温度范围内，温度和压力引起液压油的密度或重度的变化不大。另外，不同种类液压油的密度也有些差别，但作为一般计算，可以认为液压油的密度近似为 $900kg/m^3$ ，水的密度为 $1000kg/m^3$ ，忽略压力及温度变化引起的密度变化。

空气的密度则随温度和压力的变化而变化。对于标准大气压(760mm水银柱)时，不同温度下的空气密度如下表所列。

表1-1

标准大气压时不同温度下空气的密度

温 度 °C	-50	-20	0	10	20	30	40	50
空气密度(kg/m ³)	1.585	1.397	1.293	1.249	1.206	1.166	1.129	1.094

§ 1-2 压缩性和温度膨胀性

任何流体在受压以后体积就要缩小, 受热以后体积就要膨胀, 即所谓压缩性和温度膨胀性。但是, 在这一方面液体和气体有着很大的区别, 因此要分别加以讨论。

一、气体的压缩性和温度膨胀性

气体重度与压力和温度的关系可用理想气体状态方程来表示, 即

$$\frac{p}{\gamma} = RT \quad (1-6)$$

或

$$\frac{p}{\rho} = gRT \quad (1-7)$$

其中

p ——绝对压力 (Pa)

γ ——气体重度 (N/m³)

ρ ——气体密度 (kg/m³)

T ——热力学温度 (也称绝对温度) (K)

R ——气体常数 (kg·m/kg·K), 不同气体有不同的 R 值, 空气的 $R = 29.27 \text{ kg·m/kgK}$

g ——重力加速度 (9.81m/s²)

从式 (1-6) 或 (1-7) 可见, 当压力 p 或者温度 T 改变时, 气体的重度 γ 或密度 ρ 都将改变。因此我们说气体是可压缩的。式 (1-6) 或 (1-7) 对气体的任何变化过程都适用。此外, 对不同的状态变化过程还有其特殊的规律, 最基本的有等温过程和绝热过程。

从热力学定理可知, 在等温过程 (即气体状态变化时其温度维持不变) 时, 有

$$\frac{p}{\rho} = \text{常数} \quad (1-8)$$

对绝热过程 (气体状态变化时与外界没有热量输入或输出), 则有

$$\frac{p}{\rho^k} = \text{常数} \quad (1-9)$$

其中 k ——绝热指数, 即定压比热 C_p 与定容比热 C_v 之比: $k = \frac{C_p}{C_v}$, k 值因气体种类不

同而异, 对空气来说, $k = 1.4$

在研究气体问题时, 由于气体的压缩性较大, 因此当气体的压力或温度变化较大时, 就

必须考虑气体压缩性的影响，而且不同的过程（等温或绝热）其规律也不同。

例 1-1 压气机将空气压入贮气罐内，当地大气压为 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，气温为 15°C 。压气机每分钟吸入的空气容积为 0.2 m^3 ，贮气罐容积为 9.5 m^3 。问经过多少时间后，贮气罐内空气的压力可升到 $7.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ （绝对压力），温度为 50°C 。在压气机工作之前，贮气罐中空气的绝对压力为 $1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，温度为 17°C 。

解：按式（1-7）有 $\rho = \frac{p}{gRT}$

而 $\rho = \frac{M}{V}$ ，其中 V 是贮气罐体积， M 为罐中空气质量。

$$\therefore \frac{M}{V} = \frac{p}{gRT} \quad \text{或} \quad M = \frac{pV}{gRT}$$

对充气前的情况，贮气罐中空气的质量为

$$M_1 = \frac{p_1 V}{gRT_1} = \frac{1.5 \times 10^5 \times 9.5}{9.81 \times 29.27(273 + 17)} = 17.113 \text{ kg}$$

对充气后的情况

$$M_2 = \frac{p_2 V}{gRT_2} = \frac{7.0 \times 10^5 \times 9.5}{9.81 \times 29.27(273 + 50)} = 71.701 \text{ kg}$$

$\therefore$ 需要由压气机充入的空气质量为

$$M = M_2 - M_1 = 71.701 - 17.113 = 54.588 \text{ kg}$$

而每分钟由压气机供给气罐的空气质量为

$$M_0 = \frac{p_0 V_0}{gRT_0} = \frac{1.0 \times 10^5 \times 0.2}{9.81 \times 29.27(273 + 15)} = 0.242 \text{ kg/min}$$

所需的充气时间为

$$t = \frac{M}{M_0} = \frac{54.588}{0.242} = 225.7 \text{ min}$$

例 1-2 某活塞式压气机气缸内有温度为 50°C ，压力为 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，体积为 $0.93 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 的空气。经活塞压缩后，压力增加为 1.0 MPa ，体积缩小为 $0.155 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ，此时空气温度是多少？

解：按式（1-6）有 $\frac{G}{V} = \gamma = \frac{p}{RT}$

$$\text{空气重} \quad G = \frac{pV}{RT}$$

在压缩过程中，空气的重力是不变的，所以

$$G = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{p_2 V_2}{RT_2}$$

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} T_1 = \frac{1.0 \times 10^6 \times 0.155 \times 10^{-3}}{1.0 \times 10^5 \times 0.93 \times 10^{-3}} (273 + 50) = 538 \text{ K}$$

压缩后空气温度为 $538 - 273 = 265^\circ\text{C}$

例 1-3 气液泵的排气口附近部件，在大热天也出现霜冻现象。气缸工作压力为 $6.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ （绝对压力），气温为 30°C ，若不考虑与外界的热交换（即按绝热过程考虑），则排气后的瞬间温度为若干（大气压力按 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 计）？

解：因为是绝热过程，故由式（1-9）有

$$\frac{p}{\gamma^k} = C$$

又由式（1-6）知 $\frac{p}{\gamma} = RT$

即 $\gamma = \frac{p}{RT},$

代入上式得 $\frac{T}{(\frac{p}{RT})^k} = C$

或 $\frac{(RT)^k}{p^{k-1}} = C$ 由于 $R = 29.27$ 是常数

即 $\frac{T^k}{p^{k-1}} = C'$

则 $\frac{T_1^k}{p_1^{k-1}} = \frac{T_2^k}{p_2^{k-1}}$

或 $T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \cdot T_1$
 $= \left(\frac{1.0}{6.0}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} \times (273 + 30) = 182 \text{ K}$

故排气口的瞬间温度为 $182 - 273 = -91^\circ\text{C}$ 这就是大热天产生霜冻的原因。

气体虽然是可压缩的，但是在不少工程问题中，其温度和压力的变化都不大，因此引起的气体重度变化也不大，可以忽略不计，而把气体看成是不可压缩的，这样就可以使问题大大简化而又不引起很大的误差。例如压力或温度变化不大时气体管路的阻力计算就常常把气体当作不可压缩流体处理。这种忽略次要矛盾的办法在解决工程问题时是常用的。但是，当气体的压缩性起着主要作用时，例如前面所述的气体温度或压力变化较大的情况，又如液压油中混入空气引起爬行、噪音等，就必须考虑气体的压缩性了。气压传动中的大部分气体流动压力变化较大，也不能忽略压缩性。

二、液体的压缩性和温度膨胀性

1. 液体的体积压缩系数和体积弹性模数

当压力变化时, 液体体积是要变化的, 由压力引起的液体压缩性可用体积压缩系数 β_p 来度量。

$$\beta_p = - \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} \quad \text{m}^2/\text{N} \quad (1-10)$$

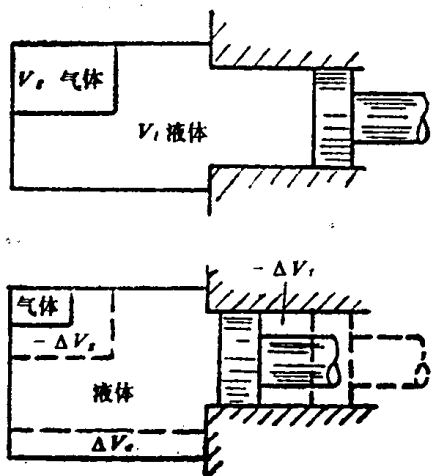
式中 Δp 是压力变化, $\Delta V/V$ 为体积变化率。由于压力增加时体积总是缩小的, 故 ΔV 为负值, 因此在式(1-10)中引入一个负号。由式(1-10)可看出 β_p 就表示单位压力变化引起的体积变化率。

体积压缩系数 β_p 的倒数称为体积弹性模数:

$$E_0 = \frac{1}{\beta_p} \quad \text{N/m}^2 \quad (1-11)$$

β_p 是由实验决定的, 水在 20°C , $p < 10.0\text{MPa}$ 时, $\beta_p = (4.49 \sim 4.79) \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{N}$; 不含气的液压油的 $\beta_p = (5.8 \sim 7.5) \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{N}$ 。显然, 水和油的体积压缩系数都是很小的, 可忽略不计, 其它液体也类似。因此, 在工程上一般认为液体是不可压缩的。只是在液体的压缩性起着不可忽略的作用时, 才把液体看成是可压缩的。

实际的液压油中是含有空气的, 油中含有空气对液压油的压缩性有很大的影响。液压油中的空气可分为两种类型: 一种是溶解空气, 它均匀分布在油中, 一般认为它对液压油的压缩性不起什么影响。另一种是混入空气, 这种混入空气一般是 $d = 0.25 \sim 0.5\text{mm}$ 的气泡, 油液中有混入空气存在将大大增加液压油的压缩性。另外, 当油液所受压力加大时, 容器壁受压膨胀也将使液压系统的有效 β_p 加大。下面我们来分析油中混入空气和容器膨胀对液压油 β_p 的影响。



(b)

图 1-1 含气液体受压缩后的体积变化

图1-1 示带有混入空气的液体, 总体积为 V_t , 其中空气体积为 V_g (为简化起见, 在图中将空气集中画在一起), 液体体积为 V_l , 则

$$V_t = V_g + V_l \quad (1-12)$$

当活塞向左移动, 使总体积减小 ΔV_t 时, 压力上升 Δp , 则其中气体受压缩后体积减小 ΔV_g , 液体体积减小 ΔV_l , 而容器受压后膨胀的体积以 ΔV_c 表示。这里的 Δ 都代表增量, 实际上 V_t 、 V_l 和 V_g 都缩小, 故 ΔV_t 、 ΔV_l 及 ΔV_g 都是负值, 只有 ΔV_c 为正值, 即

$$-\Delta V_t = -\Delta V_g - \Delta V_l + \Delta V_c$$

所以 $\Delta V_t = \Delta V_g + \Delta V_l - \Delta V_c$

(1-13)

将式(1-12)和(1-13)代入式(1-10)可得

$$\beta_p = \frac{\Delta V_t}{V_t \cdot \Delta p}$$

$$= \frac{V_g}{V_t} \left(-\frac{\Delta V_g}{V_g \cdot \Delta p} \right) + \frac{V_l}{V_t} \left(-\frac{\Delta V_l}{V_l \cdot \Delta p} \right) + \left(\frac{\Delta V_c}{V_p \cdot \Delta p} \right) \quad (1-14)$$

如果以 β_l 和 β_g 分别代表液体和气体的体积压缩系数, 即

$$\beta_l = -\frac{\Delta V_l / V_l}{\Delta p}$$

$$\beta_g = -\frac{\Delta V_g / V_g}{\Delta p} \quad (1-15)$$

并令 $\beta_c = \frac{\Delta V_c / V_t}{\Delta p} \quad (1-16)$

β_c 代表容器的体积膨胀系数。式(1-14)可以写成

$$\beta_p = \beta_c + \beta_l + \frac{V_g}{V_t} (\beta_g - \beta_l) \quad (1-17)$$

因 $\beta_g \gg \beta_l$, 所以式(1-17)可写成

$$\beta_p = \beta_c + \beta_l + \frac{V_g}{V_t} \beta_g \quad (1-18)$$

一般液压系统中容器膨胀主要来自连接管道, 对薄壁管道来说, 按材料力学可以证明

$$\beta_c = \frac{D}{Ee}^* \quad (1-19)$$

式中 E 为管壁材料的弹性模数, e 为管壁厚度, D 为管径。

* 设薄壁圆管压力增加 dp 时使管径膨胀 dD , 则此时管壁中的应力增加为 $d\sigma = \frac{D \cdot dp}{2e}$, 按弹性模数的定义有

$$E = \frac{d\sigma}{\frac{dD}{D}} = D^2 \frac{dp}{2e \cdot dD}$$

或 $dD = \frac{D^2}{2eE} dp$

所以, 管子断面面积膨胀为

$$\frac{\pi}{4} (D + dD)^2 - \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{2} D \cdot dD = \frac{\pi}{4} \frac{D^3}{eE} \cdot dp$$

$$\frac{\Delta V_g}{V_t} = \frac{\frac{\pi}{4} \frac{D^3}{eE} \cdot dp \cdot L}{\frac{\pi}{4} D^2 \cdot L} = \frac{D}{eE} \cdot dp$$

代入式(1-16)可得式(1-19)

至于 β_g 则与气体压缩过程有关, 如为等温过程, 则按式 (1-8) 有

$$\frac{p}{\rho} = \text{常数}$$

设混入液体中的气体质量为 M_g , 则 $\rho = \frac{M_g}{V_g}$ 有

$$\frac{p \cdot V_g}{M_g} = \text{常数}$$

在压缩过程中 M_g 是不变的, 故对上式微分可得

$$V_g \cdot dp + p \cdot dV_g = 0$$

或

$$\frac{dV_g}{V_g} = -\frac{dp}{p}$$

代入式 (1-15) 可得 $\beta_g = \frac{1}{p}$ (1-20)

同理, 按式 (1-9) 可导出对气体压缩过程为绝热过程时的 β_g 计算式为

$$\beta_g = \frac{1}{Rp} \quad (1-21)$$

如对一个 $\phi 25\text{mm}$, 壁厚为 3 mm 的钢管来说, 照式 (1-19) 可算得

$$\beta_c = \frac{2.5}{0.3 \times 2.1 \times 10^6 \times 9.81} = 4.05 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{N}$$

而在压力为 20 MPa 的液压系统中, 按式 (1-20) 有气体的体积压缩系数为

$$\beta_g = \frac{1}{2000} = 5 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{N}$$

如按式 (1-21) 计算, 则有

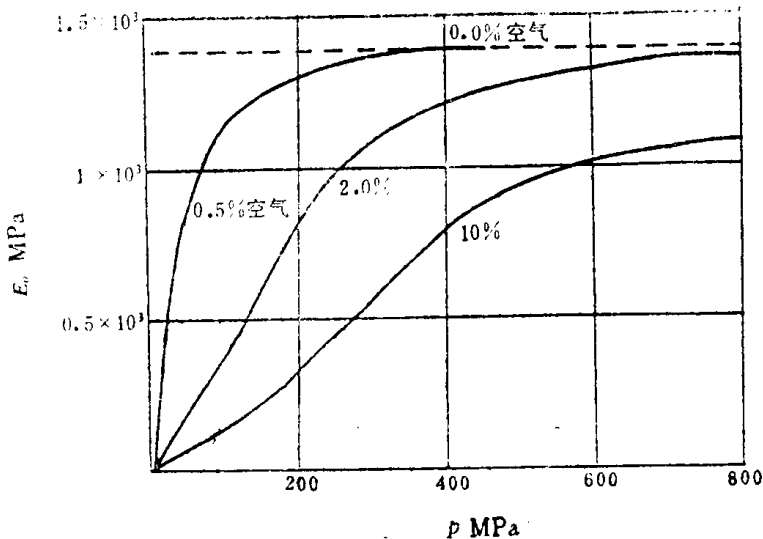


图 1-2 体积弹性系数随压力和气体含量的变化曲线

$$\beta_g = \frac{1}{1.4 \times 2000} = 3.57 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{N}$$

由于空气的 β_g 是与压力成反比的, 因此使系统的有效体积压缩系数就不是象单纯液体的体积压缩系数那样是一个常数, 而是压力的函数了, 而由式 (1-18) 还可以看出不仅与压力有关, 还与气体含量 $\frac{V_g}{V_t}$ 有关。图 1-2 给出了某种液压油的 E_v ($= \frac{1}{\beta_v}$) 随压力和气

体含量的变化曲线。

由此可见,在实际问题中,其有效体积压缩系数是很难确定的,因为空气含量难于准确得出。而且即使有了准确的空气含量,也由于 β_p 随压力变化而变化。因此 β_p 不能当作常量计算。但在实际的工程计算中,为简化起见往往就取 β_p 作为常量,对一般矿物油来说一些文献推荐 $\beta_p = 1.4 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{N}$,或取 $E_0 = 7 \times 10^4 \text{N}/\text{cm}^2$ 作为计算依据取。

例1-4 图1-3示一压力表校正器,校正器内油的体积压缩系数 $\beta_p = 1.4 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{N}$,它利用拧进活塞来造成压力。设活塞直径为10mm,螺距 t 为2mm,常压时校正器内的油体积为 $V = 200 \text{cm}^3$,空气全部排空,油缸密封良好。试问为造成 $20.0 \times 10^5 \text{Pa}$ 的压力,手柄需转几圈?

解: 由式(1-10)知油液的压缩量

$$\Delta V = -V \cdot \Delta p \cdot \beta_p$$

而

$$V = 200 \text{cm}^3, \Delta p = 20.0 \times 10^5 \text{Pa} = 200 \text{N}/\text{cm}^2$$

$$\beta_p = 1.4 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{N}$$

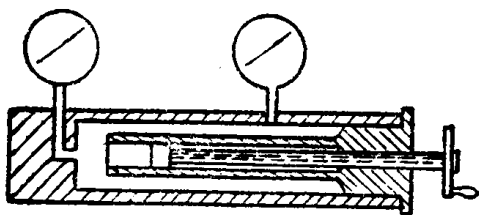


图1-3 压力表校正器

所以 $\Delta V = -200 \times 200 \times 1.4 \times 10^{-5} = -0.56 \text{cm}^3$
若手轮旋转圈数为 n , 则

$$\frac{\pi}{4} d^2 \cdot t \cdot n = -\Delta V$$

$$\text{则 } n = \frac{-\Delta V}{\frac{\pi}{4} d^2 \cdot t} = \frac{0.56}{\frac{\pi}{4} 1^2 \times 0.2} = 3.57 \text{圈}$$

例1-5 图1-4为一测定液压油体积压缩系数的测定装置。设柱塞杆直径 $d = 5 \text{mm}$,油腔容积为 500cm^3 ,加载 $W = 1.250 \text{kg}$ 后,柱塞杆下降20mm。忽略密封摩擦力,试求该液压油的体积压缩系数。

解: 按式(1-10)知

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

$$\text{而 } W = 1.250 \text{ 则 } \Delta p = \frac{W \times g}{\frac{\pi}{4} \times d^2}$$

$$\Delta V = -\frac{\pi}{4} d^2 \times l$$

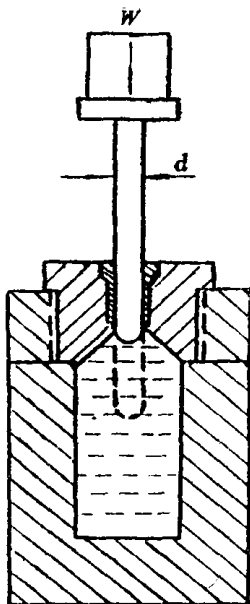


图 1-4

$$\beta_p = - \frac{\frac{\pi}{4} d^2 \times l}{\frac{\pi}{4} d^2} = - \frac{l \left(\frac{\pi}{4} d^2 \right)^2}{W \times g \times V}$$

$$= \frac{2.0 \left(\frac{\pi}{4} \times 0.5^2 \right)^2}{1.25 \times 500 \times 9.81} = 1.258 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{N}$$

2. 液体的温度膨胀系数

液体的温度膨胀特性由温度膨胀系数 β_t 表示。 β_t 是指温度升高 1°C 所引起的液体体积变化率。

$$\beta_t = \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta t} \quad (1-22)$$

式中 t 应当用摄氏温度。由于温度升高时体积膨胀，所以 Δt 与 ΔV 符号相同，故式（1-22）前是正号。

β_t 是压力和温度的函数，由实验决定。水的温度膨胀系数 β_t 如表1-2所示，矿物油的 β_t 如表1-3所示。由此可见，液体的温度膨胀系数是很小的，可忽略。因此在一般工程计算中都不考虑液体的温度膨胀问题。但是在密闭容器中，温度膨胀可能引起巨大的应力，故不能忽略，必须采取相应的措施，例如加安全阀等以防止温度膨胀引起容器的破坏。

表1-2 水的温度膨胀系数 $\beta_t \times 10^6$ ($1/^\circ\text{C}$) 值

压 力 MPa	温 度 °C				
	1—10	10—20	40—50	60—70	90—100
0.1	14	150	422	556	719
10	44	166	422	548	704
20	73	184	426	539	—
50	130	237	429	523	660
90	150	291	437	514	619

表1-3 常用矿物油的温度膨胀系数

15°C时的比重	0.70	0.80	0.85	0.90	0.92
β_t ($\frac{1}{^\circ\text{C}}$)	8.2×10^{-4}	7.7×10^{-4}	7.2×10^{-4}	6.4×10^{-4}	6.0×10^{-4}

例 1-6 图 1-5 示一油缸，密封严密。内径 $D = 100\text{mm}$ ，有效容积长 $H = 50\text{cm}$ ，缸

壁厚 $\delta = 5\text{mm}$, 充满液压油。试问温度上升 20°C 时, 内部压力增加多少? 缸筒的弹性系数为 $E = 2 \times 10^7 \text{N/cm}^2$, 泊松比 $\mu = 0.24$ 。

解: 假如没有密闭容器油缸的限制, 则由于温度升高在常压下所引起的体积膨胀可由式 (1-22) 计算, 即

$$\Delta V = V \cdot \beta_t \cdot \Delta t = \pi r^2 \cdot H \cdot \beta_t \cdot \Delta t$$

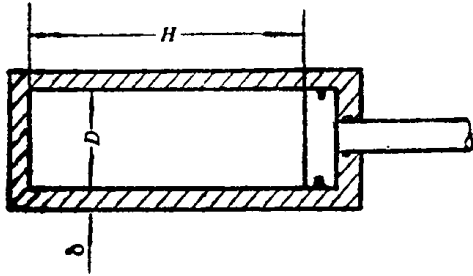


图1-5

而由于密闭容器的限制, ΔV 就不能全部得到膨胀了。 ΔV 可分为两部分。一部分是由于压力升高而引起油液的体积压缩 ΔV_1 , 另一部分是由于压力升高后引起油缸体积膨胀 ΔV_2 , 即

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2$$

设压力升高为 Δp , 则按式 (1-10) 可得

$$\Delta V_1 = V \cdot \beta_p \cdot \Delta p = \pi r^2 \cdot H \cdot \beta_p \cdot \Delta p$$

设在压力升高 Δp 的作用下油缸半径增加 Δr (忽略两端盖变形引起的体积膨胀), 则由材力公式可知

$$\Delta r = \frac{\Delta P \cdot r^2}{\delta \cdot E} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right)$$

所以油缸体积膨胀为

$$\Delta V_2 = [\pi(r + \Delta r)^2 - \pi r^2] H \quad \text{忽略高阶微量 } \Delta r^2$$

可得
$$\Delta V_2 = 2\pi r \Delta r H = 2\pi r \frac{\Delta p r^2}{\delta E} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) H$$

则:
$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 = \pi r^2 H \beta_p \cdot \Delta p + 2\pi r \frac{\Delta p r^2}{\delta E} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) H$$

$$= \Delta p \pi r^2 H \left[\frac{2r}{\delta E} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) + \beta_p \right]$$

$$\pi r^2 H \beta_t \Delta t = \Delta p \pi r^2 H \left[\frac{2r}{\delta E} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) + \beta_p \right]$$

$$\Delta p = \frac{\beta_t \cdot \Delta t}{\frac{2r}{\delta E} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) + \beta_p}$$

对液压油来说, 可取 $\beta_t = 6.4 \times 10^{-4} \text{1/}^\circ\text{C}$, $\beta_p = 1.4 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{N}$

$$\Delta p = \frac{6.4 \times 10^{-4} \times 20}{\frac{2 \times 5}{0.5 \times 2 \times 10^7} \left(1 - \frac{0.24}{2} \right) + 1.4 \times 10^{-5}} = 860 \text{ N/cm}^2$$

$$= 8.6 \text{ MPa}$$

由此可见, 在密闭容器中温升引起的应力可能是很大的。