

高等学校教学用书

工程流体力学

鞍山钢铁学院 程啸凡 编

冶金工业出版社

高等学校教学用书
工 程 流 体 力 学
鞍山钢铁学院 程啸凡 编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷38号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 8 7/8 字数 230 千字

1986年5月第一版 1986年5月第一次印刷

印数00,001~7,700册

统一书号: 15062·4420 定价1.50元

前 言

本书是根据冶金高等院校机械工程专业工程流体力学教学要求编写的。

全书共分十章。第一章介绍流体的主要物性，并着重阐述“粘度”的概念。第二章到第四章论述流体静力学、流体运动学和流体动力学的基本原理，特别介绍了能量方程和动量方程的实际应用。第五章重点介绍实际流体的运动规律和压强损失的计算方法。第六章到第八章讨论间隙流动、孔口(短管)液流及液压冲击现象。第九章介绍气体力学最基本知识。第十章简要论述相似原理。本书除可作为冶金机械和矿业机械专业的工程流体力学课程教材外，并可供有关工程技术人员参考。

本书经多次试用，征求使用院校意见，召开审稿会，最后修改定稿。在此谨向提供意见的同志表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在错误和缺点，请广大读者批评指正。

编 者

一九八五年十一月

目 录

第一章 流体的主要物理性质	1
第一节 工程流体力学的定义	1
第二节 流体的密度和重度	2
第三节 流体的粘度	5
第四节 流体的压缩性和膨胀性	15
第五节 流体的比热和导热系数	18
第二章 流体静力学	21
第一节 作用在流体上的力	21
第二节 流体静压强及其特性	22
第三节 欧拉静平衡方程	24
第四节 重力作用下的静止液体	26
第五节 压强的度量标准	31
第六节 液体的相对平衡	33
第七节 总压力	35
第八节 管道壁厚	44
第三章 流体运动学	50
第一节 基本概念	50
第二节 流量和平均速度	59
第三节 连续性方程	63
第四节 二维平面运动和流函数的概念	70
第五节 流体质点的旋转与变形运动	72
第六节 速度势	77
第四章 流体动力学基础	86
第一节 欧拉运动方程	86
第二节 柏努利方程	90
第三节 柏努利方程的意义	93
第四节 文德利管	94

第五节	动量方程	100
第六节	粘性流体运动微分方程	107
第七节	实际流体沿总流的柏努利方程	108
第五章	压强损失	119
第一节	雷诺实验	119
第二节	管中层流	122
第三节	层流起始段	130
第四节	管中紊流	135
第五节	局部压强损失	151
第六节	串联与并联管路	168
第六章	间隙流动	178
第一节	平面间隙	178
第二节	运用粘性流体运动微分方程求解平面间隙	181
第三节	环形间隙	185
第四节	两平行圆板间的放射流动	190
第七章	孔口液流	197
第一节	薄壁小孔口	197
第二节	压力容器壁上的孔口与管嘴	207
第三节	气穴现象	210
第八章	液压冲击	216
第一节	液压冲击现象概述	216
第二节	最大冲击压强	217
第三节	直接冲击和间接冲击	220
第九章	压缩性流体的稳定流	228
第一节	能量方程	228
第二节	压缩性的影响	231
第三节	气流速度沿导管的变化	234
第四节	经过孔口或管嘴的气流	235
第五节	拉瓦尔管	238
第六节	管中气流	242
第十章	相似原理	248
第一节	相似物理现象	248

第二节	相似准数	250
第三节	相似转换	254
第四节	完全相似和局部相似	259
第五节	π 定理	264
第六节	运动物体的阻力	267

第一章 流体的主要物理性质

由于流体处于平衡和运动时的力学规律，都与流体的物理性质有关，所以本章重点讨论流体的主要物理性质。

第一节 工程流体力学的定义

一、工程流体力学的定义

流体力学 (Fluid Mechanics) 是力学的一个分支。由于流体包括液体和气体两大部分，因而流体力学也包括两大部分：液体力学和气体力学。在液体力学中，通常以水来做为液体的代表，故液体力学有时又称之为水力学 (Hydraulics)。

流体力学是研究流体处于平衡和运动时的力学规律，以及这些规律在工程上的实际应用。早期水力学的研究方法多从工程实际出发，直接采用实验数据和经验公式。与此同时经典流体动力学则应用严格的数学推理方法，通常要在给定的边界条件和起始条件下来求解基本微分方程。这种纯理论得出的结果，有时与实际有很大的区别甚至会出现矛盾。工程流体力学从工程实际出发将早期水力学的研究方法和经典流体动力学的研究方法适当地结合起来，即既重视实验科学，也用数学分析方法。这样，实验研究就可以补助和充实基本分析的不足，从而取得良好的效果。

二、流体的概念

流体包括液体和气体两部分。它们共同的特性是易于流动。任何微小的剪力都可以使静止流体发生很大的变形。因此流体不可能有一定的形状。流体的这种性质称为流动性。流动性是流体区别于固体的性质。

液体与气体的特殊性表现在压缩性的概念上。按照流体的分子结构，液体分子的排列比较紧密，间隙小，分子力相对于气体而言要强得多，在极大的外力作用下其体积只有极微小的一点变

化，因此很难压缩。通常称这种液体为不可压缩流体。由于气体分子排列比较松散，间隙大，分子力比较弱，在较小的外力作用下，其体积可以发生明显的变化，因而易于压缩。通常称这种气体为可压缩流体。

当然，液压与气体的这种特殊性也并非绝对的。例如在低速、低压的通风机管道内，对于空气压缩性的影响，计算时总是忽略不计的，这时并不会引起太大误差。又例如在分析液流发生水力冲击现象时，我们又必须考虑液体本身的压缩性。

上面已经提到流体是由大量分子组成的，分子之间存在有一定的间隙。由于流体力学中所考察的现象都具有宏观性质，因此在流体力学中流体是作为连续性介质来处理的，即流体所占据的空间是看成连绵一片的，其中不再有空隙。这种处理是完全合理的，例如以海平面大气而言，当气压为760毫米汞柱，温度为15℃时，每一立方厘米中有空气分子 2.7×10^{19} 个；每一立方厘米水中，有水分子 3.4×10^{22} 个。就工程技术来说，即使是在最小的计算单位的流体任一微元体积（通常称为流体质点体积）内，都包含着为数极多的分子。这个微元体积与流体流过的管道相比或者和被流体绕过的物体相比都是足够小的。但与分子间的间隙相比却是足够大的。基于这种概念，流体的状态参数（例如密度和压强）都可写成空间坐标的连续函数。这样就可引用解析数学连续函数理论来研究流体处于平衡和运动状态下的状态参数问题。

第二节 流体的密度和重度

流体的第一个物理性质就是它具有质量和重量。

流体的质量通常用密度（density）这个量来表示。对均质流体来说，密度是指单位体积内所含有的流体质量。

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

式中 ρ ——流体密度 (kg/m^3)；
 m ——该均质流体的质量 (kg)；

V ——质量为 m 的流体体积 (m^3)。

流体的重量通常用重度 (Specific weight) 这个量来表示。
对于均质流体来说, 重度是指单位体积内所含有的流体重量。

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

式中 γ ——重度 (N/m^3) ;

G ——该均质流体的重量 (N) ;

V ——重量为 G 的流体体积 (m^3) 。

由于 $G = mg$, 故流体的重度和密度的关系为:

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中 g ——当地的重力加速度 (m/s^2) 。

液体的密度和重度通常都随温度和压力的改变而改变。但是在一般的温度和压力范围内, 这种改变的程度很小。因此, 在近似计算时, 对于水, 可取其密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$; 对于液压用矿物油, 可取其密度为 $900\text{kg}/\text{m}^3$ 。

应该指出, 重度与比重 (Specific gravity) 的概念是不相同的, 液体的比重定义为: 该液体的重量与温度为 4°C 时同体积蒸馏水的重量之比。或者说液体的比重是其密度与温度为 4°C 时蒸馏水的密度之比。由此可见, 比重是没有单位的。

表1-1列出几种常用液体在大气压下的密度和比重。

气体不同于液体。其压强和温度的改变都明显地影响气体密度或重度的变化。在热力学中是用气体状态方程来联系它们之间的关系的。完全气体状态方程为:

$$P = \rho RT \quad (1-4)$$

式中 P ——绝对压强 (N/m^2);

ρ ——气体密度 (kg/m^3);

T ——绝对温度 (K);

R ——气体常数 ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}$)。

气体常数 R 可以按照下列式子求出:

$$R = \frac{8312}{m} (\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (1-5)$$

表 1-1 几种常用液体的密度和比重

液体名称	温度 (°C)	密度(kg/m³)	比 重
蒸 馏 水	4	1000	1
海 水	15	1020~1030	1.02~1.03
普 通 汽 油	15	700~750	0.70~0.75
煤 油	15	760	0.76
酒 精	15	790~800	0.79~0.80
乙 醚	0	740	0.74
甲 醇	4	810	0.81
水 银	0	13600	13.60
铁 水	1200	7000	7
液压用矿物油	20	840~950	0.84~0.95

此处 m 代表气体的分子量。例如空气的分子量约为 28.97，则它的常数 $R = 8312/28.97 = 287$ (N·m/kg·K)；氧气的分子量为 32，其常数 R 为 260 (N·m/kg·K)；氮气的分子量为 28，其常数 R 为 297 (N·m/kg·K)。

例题1-1 某液体的重度为 9.02kN/m^3 ，试求它的密度为若干？

该液体的密度：

$$\rho = \frac{9020}{9.81} = 919.5\text{kg/m}^3$$

例题 1-2 计算氯气在 25°C 与绝对压强为 600kN/m^2 时的密度和重度。氯气的分子量为 71。氯气的气体常数为：

$$R = \frac{8312}{71} = 117\text{N} \cdot \text{m/kg} \cdot \text{K}$$

氯气的密度：

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{600 \times 10^3}{117 \times (25 + 273)} = 17.2\text{kg/m}^3$$

氯气的重度：

$$\gamma = \rho g = 17.2 \times 9.81 = 169\text{N/m}^3$$

第三节 流体的粘度

流体的第二个主要物性是它的粘度 (Viscosity)。粘度是衡量流体粘性大小的程度。一切流体都是有粘性的，不过有的大、有的小。水和空气的粘性都很小，液压传动中选用的矿物油、粘性却很大。

一、粘性定律、动力粘度

我们先观察一个实例，若将流体充满管道作稳定流动，用测速仪器来测量管道断面上各点速度，便会发现紧贴管壁流速为零，愈近轴心，流速愈大，轴心上的速度最大。在整个断面上，流速是按一定的曲线规律分布的 (图1-1)。图1-2为宽度 (同纸面垂直) 与长度都足够大的两平行平板间的流动。上平板以速度 v_0 相对于下平板平行运动，紧贴在上平板上的流体质点速度亦为 v_0 ；下平板不动，速度为零，紧贴于其上的流体速度亦为零。中间各点流速则按线性规律分布。

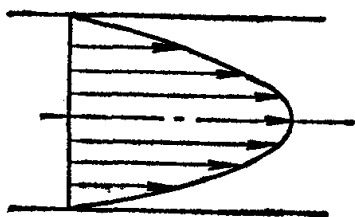


图 1-1 管流速度分布

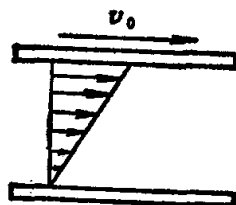


图 1-2 平行平板间的流速分布

上面这些现象都是流体粘性的表现。我们可以把其中的运动看成是许多无限薄的流体层在作相对运动。由于流体的任意两层间都有速度差，故速度快的层对速度慢的层会产生一个拖力使它加速，而速度慢的层对速度快的层则有一个阻力使它减速。拖力和阻力是大小相等而方向相反的一对作用力，特称做内摩擦力或剪力。所以流体粘性又可简单定义为流体中发生相对运动时，层与层之间产生内摩擦力的一种性质。流体粘性只有在流体层间有相对运动时才会呈现出来，静止的流体不会表现，因而也不存在内摩擦力。

根据大量的实验研究，牛顿（Newton）提出流体层的内摩擦力 T 与其接触面 A 和相对速度 du 成正比（图1-3），而与其间的距离 dy 成反比。即

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

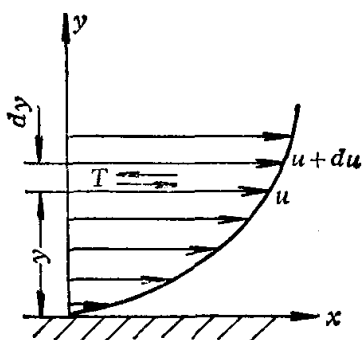


图 1-3 粘性定律

式中 $\frac{du}{dy}$ ——速度梯度 (Velocity gradient), 表示沿法线方向

速度增加或减少的程度;

μ ——比例系数, 决定于液体的种类和温度, 通常称做动力粘性系数, 或简称动力粘度 (dynamic viscosity)。

令 τ 为单位面积上的内摩擦力, 则

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

这个式子称做牛顿粘性定律 (Newton's law of viscosity)。

从式 (1-7) 可知动力粘度的物理意义是: 当速度梯度为 1 时, 它等于流体层单位面积上所产生的内摩擦力。动力粘度的单位, 在物理上是达因·秒/厘米², 一般称之为泊 (Poise)。泊的百分之一称为厘泊 (Centipoise)。在 SI 制中, 动力粘度的单位是 N·s/m², 1 泊等于 10⁻¹ N·s/m²。

二、运动粘度

在流体动力学内，我们常将流体的动力粘度 μ 与其密度 ρ 的比值，称做运动粘性系数或运动粘度（Kinematic viscosity），以 ν 表之

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu g}{\gamma} \quad (1-8)$$

运动粘度的单位为 m^2/s ，或 cm^2/s ， $1 \text{ cm}^2/\text{s}$ 称做托(Stoke)，百分之一托称做厘托 (Centistoke)， $1 \text{ m}^2/\text{s}$ 等于 $10^4 \text{ St}(\text{cm}^2/\text{s})$ 或 10^6 St 。

三、恩氏粘度

在工程实践或实验室中，常采用各种不同形式的仪器来测定液体的粘度。其中最普遍的是恩氏粘度计（图1-4）。恩氏粘度计是由两个处于同心的黄铜容器1和2所组成，容器1的底部呈球形，其上焊接有圆筒管3，而在圆筒管入口处插有略带锥形的白金短管4，其规格为：长20mm，上下端直径各为3 mm和2.8 mm。被试液体将从这里流出。容器2为一加热用水槽，能使容器1中的液体维持在测定时所需要的温度。

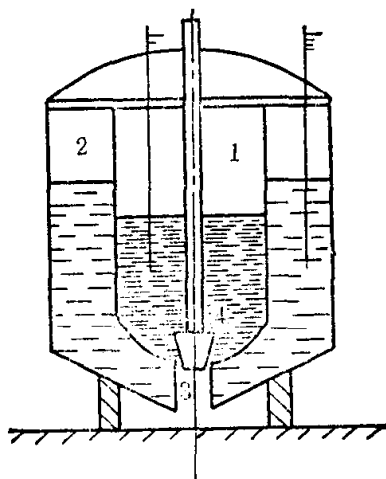


图 1-4 恩氏粘度计

1、2—黄铜容器；3—圆筒管；4—白金短管

测定时，首先记下 200cm^3 的被试液体在指定温度下通过短管所需用的时间 t_1 （以秒计），然后再用同样的方法求出 200cm^3 的蒸馏水在 20°C 时通过短管所需用的时间 t_2 ， t_1 与 t_2 的比值称做恩氏粘度。用符号 $^\circ E$ 表示：

$$^\circ E = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-9)$$

由于恩氏粘度是相对于被试液体粘度与水的粘度之比，所以恩氏粘度也称相对粘度。

温度 t 时的恩氏粘度用符号 $^\circ E_t$ 表示。在液压传动中，油液的粘度一般以 50°C 作为测定时的标准温度，并以 $^\circ E_{50}$ 表之。

应该指出， t_2 的值实际上是固定不变的，一般 $t_2 = 50 \sim 52$ 秒。平均值为51秒。所以 t_1 的值愈大，则表示被试液体的粘度愈大。

知道液体的恩氏粘度，就可用下列经验公式计算液体的运动粘度：

$$\nu = 7.31^\circ E - \frac{6.31}{^\circ E} \text{ (St)} \quad (1-10)$$

国外还有用国际赛氏秒（Saybolt Universal Second）和商用雷氏秒（Redwood Second）表示液体的相对粘度，其统一的换算关系如下：

$$\nu = At - \frac{B}{t} \text{ (csto)} \quad (1-11)$$

式中 A 、 B ——有关系数（见表1-2）；

表 1-2 有关粘度系数 A 和 B 的值

粘度单位名称	A	B
国际赛氏秒	0.22	180
商用雷氏秒	0.26	172
恩氏秒	0.143	322

t ——各种粘度秒数，例如国际赛氏秒（SUS或SSU）；商用雷氏秒（R或Rel[#]）和恩氏秒等。对于

恩氏秒，式中的 t 就等于(1-9) 式中的 t_1 ，并等于 $51^\circ E$ 。

例题 1-3 已知某油液在 $100^\circ F$ ($37.8^\circ C$) 的粘度为 400 SUS，求其运动粘度。

按 (1-11) 式和表 1-2，我们有：

$$\nu = 0.22 \times 400 - \frac{180}{400} = 87.6 \text{ St.}$$

例题 1-4 某液压油的密度为 850 kg/m^3 ，用恩氏粘度计测得其 200 cm^3 在 $20^\circ C$ 时从短管流尽的时间为 408 秒。求该油液的 动力粘度 ($20^\circ C$)。按照式 (1-11) 和表 1-2，可得：

$$\nu_{20} = 0.143 \times 408 - \frac{322}{408} = 57.6 \text{ cSt} = 0.576 \text{ St}$$

动力粘度：

$$\mu_{20} = \rho \nu_{20} = 850 \times 0.576 \times 10^{-4} = 489.6 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$$

或者

$$\mu_{20} = 0.49 \text{ poi (泊)}$$

四、流体的粘度与温度的关系

液体的粘度与温度有明显的变化关系。液层间的内摩擦力决定于分子间的内聚力。当温度升高时，液体的密度增大，分子间的内聚力就要减小。所以液体的粘度随温度的升高而明显的降低。

液体的粘温关系通常由经验公式来确定。对于水，可按式决定其运动粘度：

$$\nu_t = \frac{0.0178}{1 + 0.0337 + 0.00022t^2} (\text{cm}^2/\text{s}) \quad (1-12)$$

式中 t —— 温度 $^\circ C$ 。

对于液压用矿物油，当恩氏粘度 $^\circ E_{50}$ 不超过 10（或 ν_{50} 不超过 76 厘托），以及温度在 $30 \sim 150^\circ C$ 范围内时，可以用下列的近似公式计算其运动粘度：

$$\nu_t = \nu_{50} \left(\frac{50}{t} \right)^n \quad (1-13)$$

式中 ν_t ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 时油液的运动粘度 (St) ;

ν_{50} ——温度为 50°C 时油液的运动粘度 (St) ;

n ——指数, 随油液的粘度 $^\circ E_{50}$ (或 ν_{50}) 而变化, 其值见表1-3。

表 1-3 指数 n 随粘度变化的值

$^\circ E_{50}$	1.2	1.5	1.8	2.0	3.0	4.0
ν_{50} (St)	2.5	6.5	9.5	12	21	30
n	1.39	1.59	1.72	1.79	1.99	2.13
$^\circ E_{50}$	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10
ν_{50} (St)	38	45	52	60	68	76
n	2.24	2.32	2.42	2.49	2.52	2.56

我国常用粘温图来表示油液随温度的变化关系。图 1-5 为部分国产油的粘温图。

由于液体与气体分子间的性质不同, 所以温度对于气体粘性的影响和它对于液体粘性的影响恰好相反。气体分子间的内聚力很微小, 可以忽视不计。气体流动时, 在它各层间的剪应力 (单位面积上的内摩擦力), 起因于垂直流动方向的分子扰动所产生的各层间的动量互换。根据分子理论, 分子的活动性是随温度的增加而增大的。所以气体的剪应力和它的粘性系数是随温度的升高而增加的。

气体的粘度与温度的关系可按下列苏泽南公式 (Sutherland's formula) 确定之:

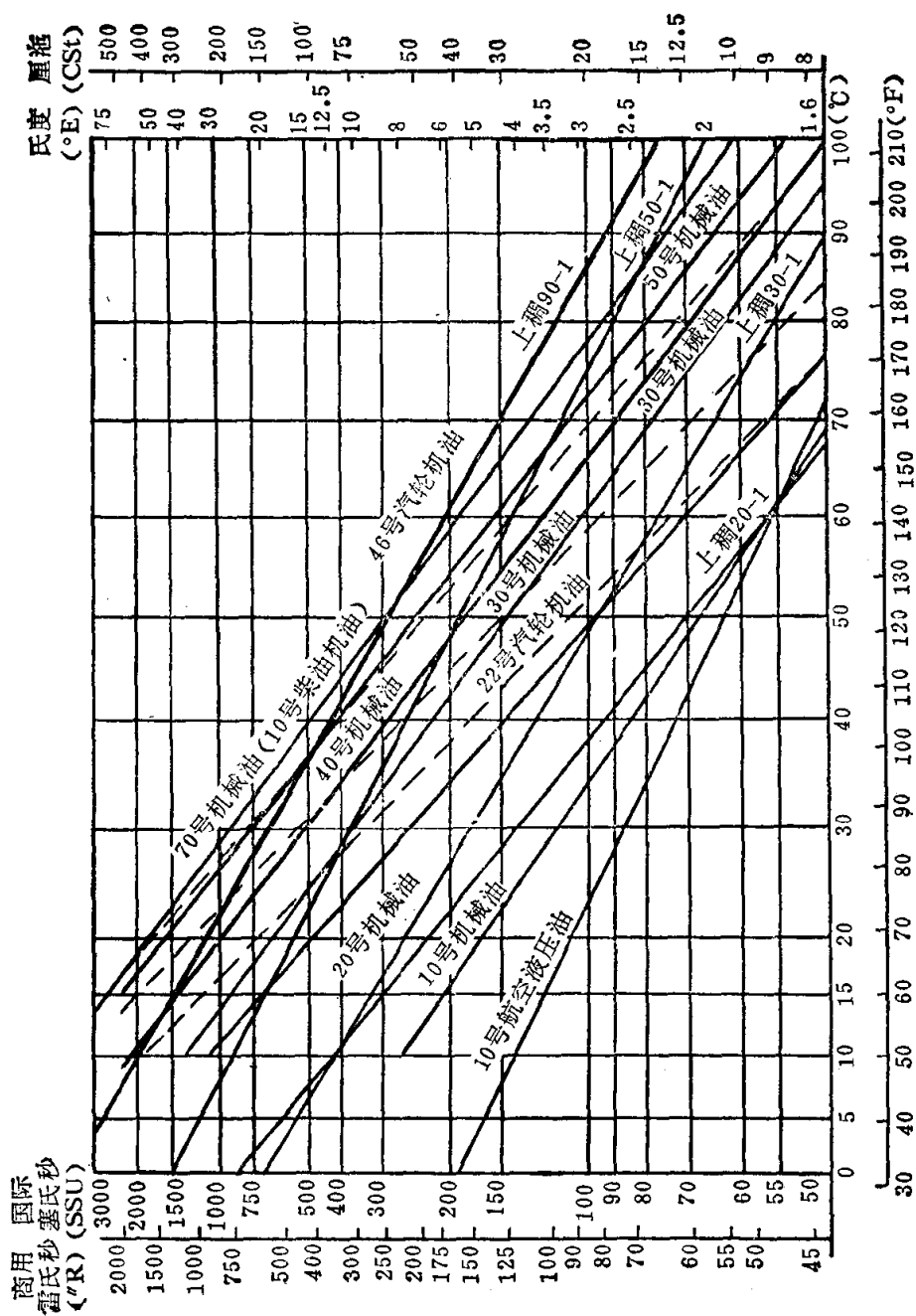


图 1-5 国产油
的粘温图