

水力摩阻手册

(上册)

金勇 丁冰洁 吕文舫 编写
陈雷 叶寿忠 黄文杰
陈肇和 审校

能源部
水利部 水利水电规划设计院

一九八九年五月

序 言

举凡水利水电工程、给水排水工程、石油及天然气工程、化学工程、航空工程、机械工程、采矿工程等等，无不应用各式各样的压力管道和流体机械，而其设计计算都与水力摩阻问题密切相关。因而，在设计中如何正确计算各种流体元件的水力摩阻，便成为至关重要的问题。本手册正是针对上述问题而编写的。

本手册系根据苏联 И. Е. Идельчик 的“Справочник по Гидравлическим Сопротивлениям”（1975年增订第二版）和英国 Miller 的“Internal Flow System”（1984年第二版）以及其他一些国内外有关资料编写而成的。本书具有以下几个特点。1. 实用性：为了便于查阅，本书不详述各流体元件水力摩阻的内部机理，只着重列举正确的计算公式和实用的损失系数，以供设计人员针对具体条件选用。2. 先进性：本书内容丰富，选材恰当，不仅吸收了国外权威著作的精华，而且广泛地参考了国内新近出版的文献资料；不仅查阅了60年代、70年代的实验资料，而且引用了国内外80年代的研究成果。3. 图表化：本书在列举计算公式的同时，尽可能做到数据图表化，以便读者迅捷查用，提高工作效率。4. 规范化：本书的行文格式、名词术语、计量单位、使用符号等，均力求规范、统一，以便读者应用。

参加本书编写工作和为本书提供翻译资料的同志计有：金勇高级工程师，丁冰洁高级工程师，吕文舫副教授，陈雷工程师，叶寿忠讲师，黄文杰讲师，陈琦工程师。北京水利电力经济管理学院的研究生部陈肇和教授在百忙中给予了热情的指导和帮助，并审阅了全稿，谨此致以衷心的感谢。

编者水平有限，疏漏与谬误之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

编 者

1988年10月

目 录

序 言

第一章 基础知识	1
第一节 流体特性	1
一、流体	1
二、密度	1
三、粘度	2
四、牛顿流体与非牛顿流体	3
第二节 流动特性	52
一、流动	52
二、管流	52
三、恒定流与非恒定流	52
四、均匀流与非均匀流	52
五、渐变流与急变流	52
六、单相流与多相流	52
七、流态	53
八、边界层与边界层分离	54
九、初始流段与恢复流段	55
十、管流参数	55
十一、一维管流基本方程	58
第三节 损失系数	59
一、能量损失	59
二、损失系数	60
三、损失系数分类	60
四、叠加原理	61
五、相邻干扰	61
六、影响因素	62
七、普遍适用性	62
八、计算裕量	62
第二章 直管损失	63
第一节 概述	63
一、定义	63
二、基本公式	63
三、摩擦系数	63
第二节 粗糙高度	64
一、新管的粗糙高度	64
二、粗糙高度 Δ 值与运行时间的关系	64

三、安全裕量	67
四、防止运行管道表面恶化的措施	67
第三节 圆管	67
一、层流圆管	67
二、紊流圆管	68
三、平焊圆管	68
四、对焊圆管	69
五、钢丝胶管	70
六、夹布胶管	71
七、光滑钢丝胶管	73
八、波形软管	74
九、涂胶料的帆布管	75
十、上水道钢管和铸铁管	76
十一、塑料管	77
十二、玻璃管	77
十三、石棉水泥管	78
十四、缸瓦管(陶土管)	78
十五、喇叭形进口后的短管	79
第四节 非圆断面管	80
一、近圆断面管	80
二、矩形断面管	81
三、椭圆断面管	81
四、同心环管	82
五、偏心环管	83
六、其他断面管	84
第五节 杆(或管)束管	85
一、杆束呈三角形布置,无套管	86
二、杆束呈矩形布置,无套管	86
三、杆束呈三角形布置,有套管	87
四、杆束呈矩形布置,有套管	87
第三章 进口损失	88
第一节 概述	88
一、定义	88
二、影响因素	88
第二节 行近流速 $v_{\infty} \approx 0$ 的正交进口	89
一、平头或探头的直管进口($Re > 10^4$)	89
二、平头或探头的喇叭形进口($Re \geq 10^4$)	91
三、无端壁的截锥进口($Re > 10^4$)	92
四、平头型截锥进口($Re > 10^4$)	93
五、矩形(圆形)渐变为圆形(矩形)的收缩进口($Re > 10^4$)	94

六、台阶形进口	94
七、设挡板的无端壁进口 ($Re > 10^4$)	95
八、设挡板的平头进口 ($Re > 10^4$)	97
九、带风帽的直管进口 ($Re > 10^4$)	98
十、设薄孔板或薄格栅的直管进口 ($Re \geq 10^5$)	99
十一、设厚孔板或厚格栅的直管进口 ($Re > 10^5$)	100
十二、孔口倒角的孔板与格栅进口 ($Re > 10^4$)	101
十三、孔口倒圆的孔板与格栅进口 ($Re > 10^4$)	102
十四、层流区或过渡区的直管进口 ($Re < 10^4 \sim 10^5$)	103
十五、层流区或过渡区, 设孔板或格栅的直管进口 ($Re < 10^4 \sim 10^5$)	103
十六、无端壁, 管口设金属丝网的直管进口	104
十七、探头型, 管口设金属丝网的直管进口	105
十八、无端壁, 管口设金属丝网的直管进口	106
十九、无端壁, 管口设金属丝网的截锥进口	106
二十、平头型, 管口设金属丝网的截锥进口	107
二十一、设固定百叶的直管进口 ($Re \approx 10^3$)	107
二十二、通风口	108
第三节 斜交进口	111
一、 $v_{\infty} = 0$, 平头型斜交直管进口 ($Re \geq 10^4$)	111
二、 $v_{\infty} > 0$, 平头型斜交直管进口 ($Re \geq 10^4$)	112
第四节 弯曲进口	115
一、轴流式涡轮机的钟型进口	115
二、轴流式涡轮机的蜗壳进口	116
第五节 有限容器的进口	116
一、有限容器的截锥进口 ($Re > 10^4$)	116
二、有限容器的曲母线截锥进口 ($Re > 10^4$)	117
三、有限容器的突缩进口 ($Re > 10^4$)	117
四、有限容器的倒圆突缩进口 ($Re > 10^4$)	118
五、有限容器的倒角突缩进口 ($Re > 10^4$)	118
六、有限容器的探头型直管进口 ($Re > 10^4$)	119
七、有限容器的喇叭形探头进口 ($Re > 10^4$)	119
八、有限容器的截锥型探头进口 ($Re > 10^4$)	120
九、有限容器的突缩进口 ($Re < 10^4$)	120
第六节 方断面直管进口 ($Re > 10^4$)	121
第四章 突变损失	124
第一节 概述	124
一、定义	124
二、类型	124
三、影响因素	124
第二节 突扩管	125

一、来流均匀分布的突扩管 ($Re > 10^4$)	125
二、来流均匀, 设导流片的突扩管 ($Re > 10^4$)	126
三、过渡区与层流区, 来流均匀的突扩管 ($Re < 10^4$)	127
四、来流呈指数函数分布的突扩管 ($Re > 3.5 \times 10^3$)	128
五、来流呈指数函数分布的突扩管 ($Re > 3.5 \times 10^3$) —— 突扩前为扁管	129
六、来流呈三角函数分布的突扩管 ($Re > 3.5 \times 10^3$) —— 突扩前为扁管	130
七、来流呈抛物线函数分布的突扩管 ($Re > 3.5 \times 10^3$) —— 突扩前为圆管或方管	132
八、来流呈非对称分布的突扩管 ($Re > 3.5 \times 10^3$) —— 突扩前为扁管	133
第三节 突缩管	134
一、锐边突缩管 ($Re > 10^4$)	134
二、圆边突缩管 ($Re > 10^4$)	135
三、倒角突缩管 ($Re > 10^4$)	136
四、层流区与过渡区的突缩管 ($Re < 10^4$)	136
第四节 孔板与孔口	137
一、逆流向倒角的薄孔板 ($l/D = 0 \sim 0.05$) ($Re > 10^3$)	137
二、逆流向倒角的薄孔板 ($l/D = 0 \sim 0.05$) ($Re < 10^3$)	139
三、厚孔板 ($l/D > 0.015$)	140
四、顺流向倒角的孔板 ($Re \geq 10^4$)	141
五、顺流向倒圆的孔板 ($Re \geq 10^4$)	142
六、无限面积, 逆流倒圆薄孔板	143
七、无限面积厚孔板 ($l/D > 0.015$) ($Re \geq 10^3$)	144
八、无限面积, 顺流向倒角的孔板 ($Re \geq 10^4$)	145
九、无限面积, 顺流向倒圆的孔板 ($Re \geq 10^4$)	146
十、无限面积, 带导流嘴的孔板 ($Re > 10^4$)	146
十一、孔口设上端铰支活门的无限面积孔板	148
十二、孔口设中间铰支活门的无限面积孔板	148
十三、设格栅与可动百叶的无限面积孔板	149
第五节 风洞的开敞工作段	150
第六节 马赫数对孔板、格栅及滤网损失系数的影响	151
第五章 渐变损失	152
第一节 概述	152
一、定义	152
二、类型	152
三、影响因素	153
第二节 渐扩管	154
一、进口速度均匀分布 ($l/D_0 \approx 0$) 的圆锥型渐扩管	154
二、进口速度非均匀分布 ($l/D_0 > 0$) 的圆锥渐扩管	157
三、风洞开敞工作段 (自由流) 后的圆锥渐扩管	159
四、各种异形元件后的圆锥渐扩管	160
五、进口速度均匀分布 ($l/D_0 \approx 0$) 的矩形渐扩管 (空间对称扩展)	161

六、进口速度非均匀分布 ($l_0/D_0 \geq 10$), 空间对称扩展的矩形渐扩管	164
七、圆锥渐扩管 ($Re \leq 50$)	166
八、高亚音速圆锥渐扩管	167
九、进口速度均匀分布 ($l_0/D_0 \approx 0$) 的矩形渐扩管 (平面对称扩展)	175
十、进口速度非均匀分布 ($l_0/D_0 \geq 10$) 的矩形渐扩管 (平面对称扩展)	177
十一、各种异形元件后的矩形渐扩管 (平面对称扩展)	178
十二、圆形或矩形的曲壁渐扩管 ($Re \geq 10^4$)	179
十三、圆断面截锥型渐扩管 ($Re > 10^4$)	181
十四、矩形断面截锥型渐扩管 ($Re > 10^4$)	183
十五、矩形断面, 平面对称扩展的截锥型渐扩管 ($Re \geq 10^4$)	185
十六、离心风机出口的平面对称渐扩管	188
十七、离心风机出口, 平面非对称 ($\alpha_1 = 0$) 渐扩管	189
十八、离心风机出口, 平面非对称 ($\alpha_1 = 10^\circ$) 渐扩管	189
十九、离心风机出口, 平面非对称 ($\alpha_1 = -10^\circ$) 渐扩管	190
二十、离心风机出口, 空间对称扩展 ($\alpha = \beta$) 的渐扩管	191
二十一、离心风机出口, 截锥型渐扩管	192
二十二、环形断面, 内部导流体沿流向扩展的渐扩管	194
二十三、环形断面, 内部导流体沿流向收缩的渐扩管	196
二十四、径向扩展的环形断面涡轮机渐扩管 ($d = 0.65 \sim 0.688$)	197
二十五、轴向—径向扩展的环形断面涡轮机渐扩管 ($d = 0.65 \sim 0.688$)	198
二十六、矩形断面, 平面扩展的弯曲轴线渐扩管 (多级泵中的弯曲渐扩管)	199
二十七、圆形断面, 平面弯曲轴线渐扩管	201
第三节 渐缩管	203
一、圆锥渐缩管 ($Re \geq 10^4$)	203
二、曲壁渐缩管	205
三、出口倒圆的圆锥渐缩管 ($Re \geq 10^4$)	206
四、双曲率母线的曲壁渐缩管 ($Re \geq 10^4$)	207
五、圆锥渐缩管 ($Re < 50$)	207
第四节 混合渐变管	209
一、圆形断面的渐缩—渐扩管	209
二、矩形断面的渐缩—渐扩管	211
三、矩形断面, 平面扩展的渐缩—渐扩管	211
四、矩形—圆形的混合渐变管 ($Re > 10^4$)	212
五、矩形 ($a_1/b_1 \leq 2.0$) 变圆形, 或圆形变矩形 ($a_1/b_1 \leq 2.0$) 的渐扩型混合渐变管	215
六、非对称扩展的圆形变矩形混合渐变管	215
第六章 弯管损失	217
第一节 概述	217
一、定义	217
二、分类	217
三、影响因素	218

第二节 标准弯管	219
一、 $l_0/D \geq 10$ 、圆断面或矩形断面标准弯管	219
二、 $l_0/D \geq 10$ 、 $r_0/D_0 \geq 3$ ，光滑标准弯管（任意弯角，含螺旋管）	223
三、螺纹接头的铸铁标准弯管（ $Re \geq 2 \times 10^4$ ，含其他商品弯管）	224
第三节 肘管	226
一、 $l_0/D_0 \geq 0$ 、矩形断面、 90° 折角肘管（ $Re \geq 10^4$ ）	226
二、 $l_0/D \geq 10$ 、任意弯角的圆形或矩形断面折角肘管（ $Re > 10^4$ ）	228
三、 $l_0/D \geq 10$ 、圆形断面或矩形断面的圆角肘管（ $Re \geq 10^4$ ）	230
四、 $l_0/D \geq 10$ 、渐缩或渐扩型圆角肘管（ $Re > 10^4$ ）	231
第四节 内、外壁不同形状、矩形断面的 90° 肘管（ $l_0/D = 0 \sim 2$ ）	233
一、内壁倒圆、外壁 90° 折角的肘管（ $Re > 10^4$ ）	233
二、内壁倒圆、外壁 45° 倒角的肘管（ $Re > 10^4$ ）	234
三、内壁 45° 倒角、外壁 90° 折角的肘管（ $Re > 10^4$ ）	235
四、内壁斜切成两个 30° 折角、外壁 90° 折角的肘管（ $Re > 10^4$ ）	235
五、内壁斜切成两个 30° 折角、外壁 45° 倒角的肘管（ $Re > 10^4$ ）	236
六、内壁 90° 折角、外壁圆弧的肘管（ $Re > 10^4$ ）	236
第五节 圆形断面的多节折管（ $l_0/D_0 \geq 10$ ）	237
一、折角 45° 的三节折管（ $Re \geq 10^4$ ）	237
二、折角 60° 的三节折管（ $Re \geq 10^4$ ）	237
三、折角 60° 的四节折管（ $Re \geq 10^4$ ）	238
四、折角 90° ，对接角为 60° 与 30° 的三节折管（ $Re \geq 10^4$ ）	238
五、折角 90° ，五节折管（ $Re \geq 10^4$ ）	239
六、折角 90° 的四节折管（ $Re \geq 10^4$ ）	240
七、折角 90° 的三节折管（ $Re \geq 10^4$ ）	241
八、折角 90° 的焊接三节折管（ $r_0/D_0 \approx 2.4$ ）（ $Re \geq 10^4$ ）	242
第六节 带导叶的矩形断面肘管	243
一、要则	243
二、弯角 90° 、带导叶的矩形断面肘管（ $Re \geq 10^4$ ）	243
三、弯角 90° 、内壁为 90° 折角的矩形断面肘管（ $Re \geq 10^4$ ）	244
四、弯角 90° 、内壁呈 45° 倒角（ $t_1 = 0.025b_1$ ）的矩形断面肘管（ $Re \geq 10^4$ ）	244
五、弯角 90° 、矩形断面扩展肘管（ $A_1/A_0 = 1.35$ ， $r_0/b_0 = 0.18$ ， $Re \geq 10^4$ ）	245
六、弯角 90° 、矩形断面收缩肘管（ $A_1/A_0 = 0.5$ ， $r_0/b_0 = 0.2$ ， $Re \geq 10^4$ ）	246
七、弯角 90° 、5个叶片的，矩形断面肘管（ $r_0/b_0 = 0.2$ ， $Re \geq 10^4$ ）	246
八、弯角 90° 、矩形断面扩展肘管（ $A_1/A_0 = 2.0$ ， $Re \geq 10^4$ ）	247
第七节 环形管	248
一、弯角 180° 的环形管（ $Re \geq 4 \times 10^4$ ）	248
二、平面对称的 180° 转向（ $Re \geq 0.8 \times 10^4$ ）	253

第一章 基础知识

第一节 流体特性

一、流体

流体是可以流动连续介质。实际流体分为两大类，即气体和液体。

质量均匀分布于体积内的流体，叫作均质流体；质量不均匀分布于体积内的流体，叫作非均质流体。单质流体总是均质流体。

服从牛顿粘性定律的流体，叫作牛顿流体；不服从牛顿粘性定律的流体，称为非牛顿流体。

本书所列损失系数，除特殊说明者外，均指压力管道内均质牛顿流体作单相流动时的损失系数。

二、密度

单位体积的质量叫作密度，符号为 ρ ，单位为 kg/m^3 。

1. 单质流体的密度

水和其他单质液体的密度与温度有关。水蒸汽和各类单质气体的密度，不仅与温度有关，而且与压强有关。

水的密度值列于表1-1中。干饱和水蒸汽的密度值，列于表1-2中。

各类单质流体（气体和液体）在101325Pa（即1个标准大气压）时的密度值，列于表1-3中。

氢气、氧气、一氧化碳气、乙炔气与氨气在各种压力与温度下的密度值，分别列于表1-4、表1-5、表1-6、表1-7与表1-8中。

2. 水溶液的密度

水溶液可视为均质流体。水溶液的密度取决于浓度和温度。各种水溶液的密度值，列于表1-9至表1-17中。

3. 混合气体的密度

混合气体的密度按下式计算：

$$\rho = \frac{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2 + \dots + \rho_n v_n}{100} \quad (1-1)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——组成混合气体的各单质气体的密度；

$v_1, v_2, \dots, v_n$ ——混合气体中，各单质气体成分的体积百分含量，%。

空气、各种煤气、天然气与烟气，都是混合气体。

干空气在101325Pa时的密度值，列于表1-18中。干空气在 98066.5 Pa（即1个

工程大气压)时的密度值,列于表1-19中。不同压力与温度下的干空气密度,列于表1-20中。

各种煤气与若干天然气的密度值,列于表1-21与表1-22中。

压强为101325 Pa时的烟气密度值,列于表1-23中。

三、粘度

流体抗拒变形的特性,叫作粘性。度量流体粘性的物理量,称为粘度。

1. 动力粘度

在普通状态下,水等流体的切应力 τ 与流速的法向梯度 du/dn 成正比。对于这类流体,此关系可表示为

$$\tau = \eta \frac{du}{dn} \quad (1-2)$$

式中比例常数 η 称为粘度,或动力粘度;式(1-2)表示的关系,称为牛顿粘性定律。

当 $\tau = 1 \text{ Pa}$ 和 $du/dn = 1 \text{ s}^{-1}$ 时,动力粘度为

$$\eta = \tau / \frac{du}{dn} = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

流体的动力粘度取决于温度与压力。水等液体的动力粘度随温度升高而减少;空气等气体的动力粘度随温度升高而增大。

2. 运动粘度

粘度 η 与该粘度状态下的流体密度 ρ 之比,称为运动粘度;其符号为 ν ,单位为 m^2/s ,即

$$\nu = \eta / \rho \quad (1-3)$$

式中 η ——动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

ρ ——相同状态下的流体密度, kg/m^3 。

运动粘度 ν 是研究流体运动及流体阻力的重要物理量。

水与水蒸汽的粘度值,分别列于表1-1与表1-2中。水在各种温度及各种压力下的粘度值,列于表1-24中。

空气在101325 Pa (1个标准大气压)及98066.5 Pa (1个工程大气压)下的粘度值,列于表1-18及表1-19中。不同压力与温度下的空气粘度,见表1-25。

煤气与天然气的粘度值,见表1-26与表1-27。烟气的粘度,见表1-23。

各种水溶液的动力粘度,见表1-28至表1-38。各种流体在101325 Pa时的动力粘度,列于表1-39。氨的粘度见表1-40。

3. 水蒸汽及各种气体的粘度对于温度的关系,除见于上述诸表以外,还可近似表示为

$$\eta = \eta_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad (1-4)$$

$$T = \theta + 273$$

式中 η_0 ——0℃时的气体动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

T ——绝对温度, °K;

θ ——摄氏温度, °C;

C——和气体种类有关的常数。各种气体的C值及由实验确定C值时的最高温度，
下表。

表1-41 在101325Pa时各种气体的C值及0°C时的动力粘度

气体名称	符号	0°C时的 动力粘度 (10^{-6} Pa·s)	C	温度范围 (°C)	气体名称	符号	0°C时的 动力粘度 (10^{-6} Pa·s)	C	温度范围 (°C)
氢	N ₂	16.60	104	23~280	甲烷	CH ₄	10.20	164	20~250
氮	NH ₃	9.30	503	20~300	一氧化氮	NO	17.90	128	20~250
氩	Ar	21.20	142	20~827	一氧化碳	CO	16.80	100	至135
乙炔	C ₂ H ₂	9.60	215	—	戊烷	C ₅ H ₁₂	6.20	383	—
苯	C ₆ H ₆	6.80	448	30~313	丙烷	C ₃ H ₈	7.50	278	20~250
丁烷	C ₄ H ₁₀	6.90	358	—	丙烯	C ₃ H ₆	7.80	487	—
氢	H ₂	8.40	71	20~100	硫化氢	H ₂ S	11.60	331	—
水蒸汽	H ₂ O	8.93	961	20~406	二氧化碳	CO ₂	13.80	254	—
空气	—	17.12	111	16~825	氧	O ₂	12.50	350	100~250
氦	He	18.60	0	21~100	氯甲烷	CH ₃ Cl	9.80	454	—
二氧化硫	SO ₂	11.60	306	300~825	氯乙烷	C ₂ H ₅ Cl	9.40	411	—
一氧化二氮	H ₂ O	13.70	260	25~280	氰化氢	HCN	—	901	—
氧	O ₂	19.20	125	20~280	乙烷	C ₂ H ₆	8.60	252	20~250
氟	Kr	23.30	188	—	乙烯	C ₂ H ₄	9.45	225	20~250
氙	Xe	21.10	252	—					

4. 混合气体的粘度

混合气体的动力粘度可按式近似确定：

$$\eta = \frac{100}{\frac{M_1}{\eta_1} + \frac{M_2}{\eta_2} + \dots + \frac{M_n}{\eta_n}} \quad (1-5)$$

式中 $M_1, M_2, \dots, M_n$ ——混合气体中，各单质气体的质量百分含量%；

$\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ ——各单质气体的动力粘度，Pa·s。

混合气体的运动粘度可按式(1-6)近似确定，即

$$\nu = \frac{100}{\frac{\nu_1}{\eta_1} + \frac{\nu_2}{\eta_2} + \dots + \frac{\nu_n}{\eta_n}} \quad (1-6)$$

式中 $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$ ——混合气体中，各单质气体的体积百分含量，%；

$\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$ ——各单质气体的运动粘度，m²/s。

四、牛顿流体与非牛顿流体

服从牛顿粘性定律的流体，叫作牛顿流体；不服从牛顿粘性定律的流体，叫作非牛顿流体。

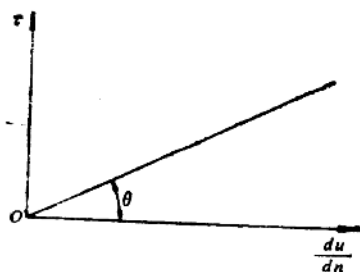


图 1-1 牛顿流体 τ 与 $\frac{du}{dn}$ 的关系

如图 1-1 所示, 在以切应力 τ 为纵轴, 流速梯度 $\frac{du}{dn}$ 为横轴的直角坐标系中, 牛顿粘性定律的表达式, 即式 (1-2) 的图象, 为一条通过坐标原点的直线, 其斜率为

$$\tan \theta = \frac{\tau}{\frac{du}{dn}} = \eta \quad (1-7)$$

表 1-1

饱和水的密度与粘度

温 度 θ (°C)	密 度 ρ (kg/m ³)	压 力 P (10 ⁵ Pa)	动力粘度 η (10 ⁻⁶ Pa·s)	运 动 粘 度 ν (10 ⁻⁶ m ² /s)
0.01	999.9	0.101	1788	1.789
10	999.7	0.101	1305	1.306
20	998.2	0.101	1004	1.006
30	995.7	0.101	801	0.805
40	992.2	0.101	653	0.659
50	983.1	0.101	549	0.556
60	983.2	0.101	470	0.478
70	977.8	0.101	406	0.415
80	971.8	0.101	355	0.365
90	965.3	0.101	315	0.326
100	958.4	0.101	282	0.305
110	951.0	0.143	259	0.272
120	943.1	0.198	237	0.252
130	934.8	0.270	218	0.233
140	926.1	0.360	201	0.217
150	917.0	0.476	186	0.203
160	907.4	0.618	174	0.191
170	897.3	0.792	163	0.181
180	886.9	1.003	153	0.173
190	876.0	1.225	144	0.165
200	863.0	1.555	136	0.158
210	852.8	1.908	130	0.153
220	840.3	2.300	124	0.148
230	827.3	2.798	120	0.145
240	813.6	3.348	115	0.141
250	799.0	3.980	110	0.137
260	784.0	4.690	106	0.135
270	767.9	5.500	102	0.133
280	750.7	6.400	98.1	0.131
290	732.3	7.400	94.1	0.129
300	712.5	8.600	91.2	0.128
310	691.1	9.870	88.3	0.128
320	667.1	11.30	85.3	0.128
330	640.2	12.85	81.4	0.127
340	610.1	14.70	77.5	0.127
350	574.4	16.50	72.6	0.126
360	528.0	18.70	66.7	0.126
370	450.5	21.10	56.9	0.126

直线与横轴之间的夹角越大, 则牛顿流体的粘性越高。与这类流体性质不同的另外的一些流体, 其 τ 与 $\frac{du}{dn}$ 的关系并非直线, 或者是不通过原点的直线; 这些流体, 统称为非牛顿流体。

大多数单质流体及真溶液流体是牛顿流体。实用上, 可把以下四类流体视为牛顿流体:

1. 浓度极稀的胶体溶液 (固体粒子的粒径为 $0.1 \sim 0.001\mu$);
2. 含少量微细固体粒子在悬浮液 (固体粒子的粒径为 $1 \sim 10\mu$);
3. 浓度极低的, 粒子微细的乳状液 (不相溶的液体粒子的粒径为小于 50μ);
4. 浓度极低的高分子溶液。

而浓度较大的胶体溶液、悬浮液、乳状液及高分子溶液, 均为非牛顿流体, 如液体塑料、油漆及其他粘度比较高的流体。

非牛顿流体的粘度随系统压力与温度的改变而急剧变化; 牛顿流体的粘度随温度升高而相当缓慢地减小。

本手册提供的损失系数, 不能用于非牛顿流体在管道中的流动。

表 1-2 干饱和和水蒸汽的密度与粘度

温 度 θ ($^{\circ}\text{C}$)	饱和压力 P (10.1325Pa^*)	饱和汽密度 ρ (kg/m^3)	动力粘度 η ($10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	运动粘度 ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
100	1.0	0.5977	11.96	20.02
110	1.414	0.8265	12.45	15.07
120	1.959	1.122	12.85	11.46
130	2.666	1.497	13.24	8.85
140	3.576	1.987	13.53	6.89
150	4.698	2.548	13.93	5.47
160	6.100	3.260	14.32	4.39
170	7.817	4.123	14.71	3.57
180	9.895	5.160	15.10	2.93
190	12.39	6.397	15.59	2.44
200	15.34	7.864	15.99	2.03
210	18.82	9.593	16.38	1.71
220	22.89	11.62	16.87	1.45
230	27.60	14.00	17.36	1.24
240	33.03	16.76	17.75	1.06
250	39.23	19.99	18.24	0.913
260	46.30	23.73	18.83	0.794
270	54.29	28.10	19.32	0.688
280	63.30	33.19	19.90	0.600
290	73.42	39.16	20.59	0.526
300	84.78	46.19	21.28	0.461
310	97.40	54.54	21.97	0.403
320	111.4	64.60	22.85	0.353
330	127.0	76.99	23.93	0.310
340	144.2	92.76	25.20	0.272

* $101325\text{Pa} = 1\text{atm}$ (标准大气压)。

表 1-3

各种单质液体在101325Pa*时的密度

名 称	分 子 式	温 度 (°C)	状 态	密 度 ρ
汞	Hg	-39.2	液	13690.1
		20	液	13546.2
		50	液	13472.9
		100	液	13351.8
		200	液	13114.8
		300	液	12886.5
氮	N ₂	-173	气	3.480
		-123	气	2.289
		-73	气	1.7104
		-23	气	1.3667
		0	气	1.250
		100	气	0.916
		200	气	0.723
		300	气	0.597
		400	气	0.508
		500	气	0.442
		600	气	0.392
		700	气	0.352
		800	气	0.318
		900	气	0.291
		1000	气	0.268
氧	O ₂	-173.0	气	3.9906
		-123	气	2.6186
		-73	气	1.9557
		-23	气	1.5620
		0	气	1.429
		100	气	1.050
		200	气	0.826
		300	气	0.682
		400	气	0.580
		500	气	0.504
		600	气	0.447
		700	气	0.402
		800	气	0.363
		900	气	0.333
		1000	气	0.306
氦	He	0	气	0.1785
		100	气	0.1305
		200	气	0.1030
		300	气	0.0850
		500	气	0.0627
		600	气	0.0558
氖	Ne	0	气	0.900
		100	气	0.659
		200	气	0.519

续表

名 称	分 子 式	温 度 (°C)	状 态	密 度 ρ (kg/m ³)
氖	Ne	300	气	0.429
		400	气	0.365
		500	气	0.318
		600	气	0.231
氩	Ar	0	气	1.784
		100	气	1.305
		200	气	1.030
		300	气	0.850
		400	气	0.724
		500	气	0.627
		600	气	0.558
		0	气	3.74
氪	Kr	100	气	2.74
		200	气	2.16
		300	气	1.78
		400	气	1.52
		500	气	1.32
		600	气	1.17
		0	气	5.89
		100	气	4.31
氙	Xe	200	气	3.40
		300	气	2.81
		400	气	2.39
		500	气	2.08
		600	气	1.84
		-23.83	气	3.68
		0.0	气	3.217
		10.0	气	3.15
氯	Cl ₂	54.44	气	2.72
		104.44	气	2.35
		154.44	气	2.07
		204.44	气	1.87
		248.89	气	1.69
		232.22	气	1.59
		-173	气	0.2457
		-123	气	0.1636
氢	H ₂	-73	气	0.1127
		-23	气	0.0982
		0	气	0.0899
		100	气	0.0657
		200	气	0.0519
		300	气	0.0428
		400	气	0.0364
		500	气	0.0317
		600	气	0.0281

续表

名 称	分 子 式	温 度 (°C)	状 态	密 度 ρ (kg/m ³)
氢	H ₂	700	气	0.0252
		800	气	0.0228
		900	气	0.0209
		1000	气	0.0192
溴	Br	15	液	31.90
臭氧	O ₃	-5	液	537
		0	气	2.22
一氧化碳	CO	-73	气	1.7114
		0	气	1.250
		100	气	0.916
		200	气	0.723
		300	气	0.596
		400	气	0.508
		500	气	0.442
		600	气	0.392
		700	气	0.351
		800	气	0.317
		900	气	0.291
		1000	气	0.268
		1523	气	0.1896
		2027	气	0.1486
		2523	气	0.1219
二氧化碳	CO ₂	-33	气	2.258
		-13	气	2.080
		0	气	1.986
		100	气	1.447
		200	气	1.143
		300	气	0.944
		400	气	0.802
		500	气	0.698
		600	气	0.618
		700	气	0.555
		800	气	0.502
		900	气	0.460
		1000	气	0.423
		0	气	0.7774
		100	气	0.5610
		200	气	0.4450
一氧化氮	NO	400	气	0.3130
		600	气	0.2410
		0	气	1.340
		20	气	1.249
二氧化硫	SO ₂	-10	液	1472
		0	气	2.927
		20	气	2.716

续表

名 称	分 子 式	温 度 (°C)	状 态	密 度 ρ (kg/m ³)
四氯化碳	CCl ₄	20	液	1594
		25	液	1587
硫氧化碳	COS	0	气	1.073
氯化氢	HCl	20	气	1.526
氰化氢	HCN	0	液	715
		25	气	0.901
碘化氢	HI	20	气	5.37
双氧水	H ₂ O ₂	0	液	1465
磷化氢	H ₃ P ₂	25	气	1.529
硫化氢	H ₂ S	0	气	1.539
		25	气	1.191
氧化亚氮	N ₂ O	20	气	1.843
一氧化氮	NO	20	气	1.249
二氧化氮	NO ₂	3.2	液	1484
甲 烷	CH ₄	0	气	0.717
乙 烷	C ₂ H ₆	0	气	1.375
丙 烷	C ₃ H ₈	-33	气	2.31
		-13	气	2.116
		0	气	2.005
		107	气	1.425
		207	气	1.123
		307	气	0.9283
丁 烷	C ₄ H ₁₀	-0.5	液	601
		0	气	2.673
戊 烷	C ₅ H ₁₂	-10	液	655.0
		0	液	645.5
		10	液	636.0
		20	液	626.2
		30	液	616.3
己 烷	C ₆ H ₁₄	-50	液	719.9
		0	液	677.2
		50	液	631.5
庚 烷	C ₇ H ₁₆	-90	液	773.1
		0	液	700.5
		50	液	657.9
辛 烷	C ₈ H ₁₈	0	液	718.5
		50	液	677.8
		100	液	635.2
壬 烷	C ₉ H ₂₀	-50	液	771.6
		-30	液	756.3
		0	液	733.2
		25	液	713.7
		50	液	693.6
		100	液	652.2
		150	液	608.4