

第 5 篇 流 体 力 学

(试 用 本)

机械工程手册

电机工程手册

编辑委员会



机 械 工 业 出 版 社

2

机械工程师手册

第 5 篇 流 体 力 学

(试 用 本)

机械工程手册 编辑委员会
电机工程手册



机械工业出版社

本书主要介绍流体的物理性质、静止液体、流动阻力、
缝隙流动、出流、射流、水锤、低速和高超音速流、平面流
动、边界层内的流动以及叶栅绕流等的基本概念、定律、
方法、公式和数据。

机械 工 程 手 册
第 5 篇 流 体 力 学
(试 用 本)
浙 江 大 学 主 编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)
机械工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $9 \frac{3}{4}$ · 字数 270 千字
1980 年 6 月北京第一版·1980 年 6 月北京第一次印刷
印数 00,001—25,400 · 定价 0.74 元

*

统一书号: 15033 · 4667

编辑说明

(一) 我国自建国以来，机械工业在毛主席的革命路线指引下，贯彻“独立自主、自力更生”和“洋为中用”的方针，取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学研究方面的经验，同时采用国外先进技术，加强机械工业科学技术的基础建设，适应实现“四个现代化”的需要，我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用，也可供教学及其他有关人员参考。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书，着重介绍各专业的理论基础，常用计算公式，数据、资料，关键问题以及发展趋向。在编写中，力求做到立足全局，勾划概貌，反映共性，突出重点。在内容和表达方式上，力求做到深入浅出，简明扼要，直观易懂，归类便查。读者在综合研究和处理技术问题时，《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成，构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分，共七十九篇；《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分，共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的，有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员，更为广泛。许多地区

的科技交流部门，为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中，广泛征求意见，发挥了广大群众的智慧和力量。

(五) 为了使手册早日与读者见面，广泛征求意见，先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验，试用本在内容和形式方面，一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证，提出批评和建议，以便今后出版合订本时加以修订。

(六) 本书是《机械工程手册》第5篇，由浙江大学主编，参加编写的有华中工学院。上海机械学院对全篇进行了认真的审查，并参加了定稿工作。许多有关单位对编审工作给予大力支持和帮助，在此一并致谢。

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会编辑组

常用符号表

| | |
|---|--|
| A ——面积 m^2 | H_0 ——单位重量流体的总水头 m 流体柱 |
| A^* ——临界断面积 m^2 | h ——淹深 m (第4章) |
| a ——加速度 m/s^2 | h ——液面高度差 m (第4章) |
| \dot{B} ——复常数 m | h ——高度 m |
| B_c ——激波强度 | h_y ——单位重量流体的沿程水头损失 m 流体柱 |
| b ——宽度 m | h_j ——单位重量流体的局部水头损失 m 流体柱 |
| C_D ——阻力系数 | h_s ——单位重量流体的总水头损失 m 流体柱 |
| C_{Df} ——总摩擦阻力系数 | I ——单位重量流体的相对滞止转子焓 $kcal/kgf$ |
| C_d ——翼型阻力系数 | i ——单位重量流体的焓 $kcal/kgf$ |
| C_L ——升力系数 | i ——冲角 $^\circ$ (第10章) |
| C_l ——翼型升力系数 | i_j ——基准最小损失冲角 $^\circ$ |
| C_{l_s} ——叶栅的翼型升力系数 | i_0 ——单位重量流体的绝对滞止焓 $kcal/kgf$ |
| C_M ——力矩系数 | J ——热功当量 $J = 427 \text{ kgf}\cdot m/kcal$ |
| C_m ——翼型力矩系数 | K ——流量模数 m^3/s |
| C_p ——压力系数 | k ——绝热指数 |
| c ——声速 m/s | k ——升力修正系数(第10章) |
| c ——翼弦长 m (第8、10章) | k_0 ——平板叶栅的升力修正系数 |
| c^* ——临界声速 m/s | k_1 ——圆弧板叶栅的升力修正系数 |
| c_f ——局部摩擦阻力系数 | L ——升力 kgf |
| c_p ——定压比热 $kcal/(kgf\cdot^\circ C)$ | L_1 ——单位长度叶片上的升力 kgf/m |
| c_v ——定容比热 $kcal/(kgf\cdot^\circ C)$ | l ——长度 m |
| D ——阻力 kgf | M ——力矩矢量 $kgf\cdot m$ |
| D_1 ——单位长度叶片的阻力 kgf/m | M ——马赫数 |
| D_f ——摩擦阻力 kgf | M ——力矩 $kgf\cdot m$ |
| D_p ——压差阻力 kgf | \dot{M} ——平面偶极子矩 m^3/s |
| d ——直径 m | m ——流体质量 $kgf\cdot s^2/m$ |
| d_s ——水力直径 m | m ——平面偶极子强度 m^3/s |
| E ——流体的体积弹性模量 kgf/m^2 | N ——功率 $kgf\cdot m/s$ |
| E ——单位重量流体的机械能 $kgf\cdot m/kgf$ (第3章) | Nu ——努赛尔数 |
| E_g ——管道材料的纵向弹性模量 kgf/m^2 | n ——单位法线矢量 m |
| e ——自然对数的底 | n ——多变指数 |
| e ——偏心距 m | n ——粘度的温度指数 (第1、9章) |
| F ——合力矢量 kgf | P ——总压力矢量 kgf |
| F_m ——单位质量流体的质量力矢量 $kgf/(kgf\cdot s^2/m)$ | P ——总压力 kgf |
| f ——表面张力 kgf (第1章) | Pr ——普朗特数 |
| f ——翼型弯度 m | p ——流体压力 kgf/m^2 |
| \bar{f} ——翼型相对弯度 | \bar{p} ——时均压力 kgf/m^2 |
| G ——重量 kgf | p^* ——临界压力 kgf/m^2 |
| g ——重力加速度 $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ | p_a ——大气压力 kgf/m^2 |
| H ——单位重量流体的水头 m 流体柱 | p_b ——背压 kgf/m^2 |

| | |
|--|---|
| p_0 ——滞止压力 kgf/m^2 | W ——平均相对流速矢量 m/s |
| p_0 ——液面上的压力 kgf/m^2 (第4、6章) | W_1 ——叶栅相对进流速度矢量 m/s |
| p_r ——对比压力 | W_2 ——叶栅相对出流速度矢量 m/s |
| Q ——体积流量 m^3/s | W_m ——几何平均相对流速矢量 m/s |
| Q ——平面源汇强度 m^2/s (第8章) | \bar{W} ——平均相对流速 m/s |
| Q_m ——质量流量 $\text{kgf}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ | \dot{W} ——复势 m^2/s |
| Q_c ——重量流量 kgf/s | W_1 ——叶栅相对进流速度 m/s |
| q ——比体积流量 $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ | W_2 ——叶栅相对出流速度 m/s |
| q ——单位时间内通过单位面积的热量 $\text{kcal}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (第9、10章) | W_m ——几何平均相对流速 m/s |
| q_m ——比质量流量 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ | w ——任一点的相对流速矢量 m/s |
| q_c ——比重量流量 $\text{kgf}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ | w ——任一点的相对流速 m/s |
| R ——气体常数 $\text{kgf}\cdot\text{m}/(\text{kgf}\cdot\text{K})$ | Z ——气体的压缩因子 (第1章) |
| R ——半径 m | Z ——叶片数 |
| Re ——雷诺数 | z ——流体的位置高 m |
| Re_c ——临界雷诺数 | \bar{z} ——复座标 |
| Re_x ——局部雷诺数 | |
| R_s ——水力半径 m | α ——攻角 $^\circ$ |
| r ——变动半径 m | α ——体积膨胀系数 $1/^\circ\text{C}$ (第1章) |
| r_c ——曲率半径 m | α ——动能修正系数 (第3章) |
| S ——栅距 m | α ——热交换系数 $\text{kcal}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$ (第9章) |
| \bar{S} ——相对栅距 | α_0 ——零攻角 $^\circ$ |
| S_t ——史坦顿数 | α_1 ——叶栅的绝对进流角 $^\circ$ |
| s ——单位重量流体的熵 $\text{kcal}/(\text{kgf}\cdot\text{K})$ | α_2 ——叶栅的绝对出流角 $^\circ$ |
| s_0 ——单位重量流体的滞止熵 $\text{kcal}/(\text{kgf}\cdot\text{K})$ | α_s ——失速角 $^\circ$ |
| T ——绝对温度 K | β ——角度 $^\circ$ |
| T^* ——临界温度 K | β ——体积压缩系数 m^2/kgf (第1章) |
| T_0 ——滞止温度 K | β ——动量修正系数 (第3章) |
| T_r ——对比温度 | β_1 ——叶栅的相对进流角 $^\circ$ |
| t ——摄氏温度 $^\circ\text{C}$ (第1章) | β_2 ——叶栅的相对出流角 $^\circ$ |
| t ——翼型厚度 m (第8、10章) | β_0 ——叶片安装角 $^\circ$ |
| t ——时间 s | β_{01} ——叶片进口安装角 $^\circ$ |
| \bar{t} ——翼型相对厚度 | β_{02} ——叶片出口安装角 $^\circ$ |
| U ——物体的平移速度 m/s | Γ ——速度环量 m^2/s |
| U_e ——速度边界层外边界上的 x 向流速 m/s | Γ ——平面点涡强度 m^2/s (第8章) |
| u ——牵连速度 m/s | γ ——流体重度 kgf/m^3 |
| V ——平均流速矢量 m/s | Δ ——绝对粗糙高度 m |
| V_1 ——叶栅绝对进流速度矢量 m/s | δ ——缝隙宽度 m (第6章) |
| V_2 ——叶栅绝对出流速度矢量 m/s | δ ——速度边界层厚度 m (第9章) |
| V_m ——几何平均绝对流速矢量 m/s | δ^* ——位移厚度 m |
| \bar{V} ——平均流速 m/s | δ^{**} ——动量厚度 m |
| V^* ——临界流速 m/s | δ_E ——能量厚度 m |
| \dot{V} ——复速度 m/s | δ_i ——热焓厚度 m |
| \bar{V} ——共轭速度 m/s | δ_T ——温度边界层厚度 m |
| V_1 ——叶栅绝对进流速度 m/s | e ——流束断面收缩系数 (第6章) |
| V_2 ——叶栅绝对出流速度 m/s | e ——湍流动量交换系数 m^2/s (第9章) |
| V_m ——几何平均绝对流速 m/s | ξ ——局部阻力系数 |
| v ——任一点的流速矢量 m/s | $\bar{\xi}$ ——复座标 m |
| v ——任一点的流速 m/s | η ——动力粘度 $\text{kgf}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ |
| \bar{v} ——任一点的时均流速 m/s | η_r ——对比动力粘度 |
| | θ ——角度 $^\circ$ |

5-X 常用符号表

| |
|---|
| λ ——沿程阻力系数 (第5章) |
| λ ——速度系数 (第7、10章) |
| λ ——导热系数 $\text{kcal}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$ (第9章) |
| μ ——流量系数 |
| ν ——运动粘度 m^2/s |
| π ——圆周率 |
| ρ ——流体密度 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ |
| ρ^* ——临界密度 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ |
| ρ_0 ——滞止密度 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ |
| σ ——表面张力系数 kgf/m (第1章) |
| σ ——子午流线与 z 轴的夹角 $^\circ$ (第10章) |
| τ ——摩擦应力、切应力 kgf/m^2 |
| τ ——叶栅稠度 (第10章) |
| Φ ——复温系数 (第9章) |
| φ ——速度势 m^2/s |
| χ ——湿周长 m |
| ψ ——流函数 m^2/s (第8章) |
| ψ ——两类流面理论中的流函数 $\text{kgf}\cdot\text{s}/\text{m}$ (第10章) |
| Ω ——速度旋度 $1/\text{s}$ |
| Ω ——松弛因子 |
| ω ——旋转角速度矢量 $^\circ/\text{s}$ 、 rad/s |
| ω ——旋转角速度 $^\circ/\text{s}$ 、 rad/s |

下角标

| |
|---------------|
| a ——翼型凹面的 |
| b ——不可压缩流动的 |

| |
|-------------------------------------|
| c ——临界的、出口的 |
| e ——边界层外边界上的 |
| k ——可压缩的 |
| m ——平均的 |
| m ——子午流线上的分量 (第10章7、8、9) |
| max——最大的 |
| min——最小的 |
| p ——任一压力下的 |
| s ——外势流的 |
| t ——任一温度下的 (第1章) |
| t ——翼型凸面的 |
| w ——物面上的 |
| x 、 y 、 z ——直角坐标系中的分量 |
| r 、 θ 、 z ——静止圆柱坐标系中的分量 |
| r 、 φ 、 z ——转动圆柱坐标系中的分量 |
| 1——上流的、进口的 |
| 2——下流的、出口的 |
| ∞ ——来流的 |

说明:

(1) 本篇各公式中的符号, 凡不予以说明的, 都代表上述意义。

(2) 本篇采用 MKfS 单位制。公式中各量的单位, 凡不予以说明的, 可采用上述单位或相应的换算单位; 凡已注明的, 不能采用别的单位, 否则得根据量纲分析和所采用的单位改变公式中的常数值。

目 录

编辑说明

常用符号表

第 1 章 流体的物理性质

| | |
|----------------|------|
| 1 流体的重度和密度 | 5-1 |
| 1.1 气体的重度和密度 | 5-1 |
| 1.2 液体的重度和密度 | 5-3 |
| 1.3 混合流体的重度和密度 | 5-6 |
| 2 流体的压缩性和膨胀性 | 5-6 |
| 2.1 压缩性 | 5-6 |
| 2.2 膨胀性 | 5-6 |
| 3 流体的粘性 | 5-6 |
| 3.1 常用的几种流体粘度 | 5-7 |
| 3.2 气体的粘度 | 5-7 |
| 3.3 液体的粘度 | 5-9 |
| 3.4 混合流体的粘度 | 5-11 |
| 4 表面张力和毛细现象 | 5-12 |
| 4.1 表面张力 | 5-12 |
| 4.2 毛细现象 | 5-13 |

第 2 章 基本概念

| | |
|--------------------|------|
| 1 作用于流体的力和应力 | 5-13 |
| 1.1 质量力和表面力 | 5-13 |
| 1.2 应力 | 5-13 |
| 1.3 流体的压力、静压、动压和总压 | 5-14 |
| 1.4 绝对压力、表压力和真空压力 | 5-14 |
| 1.5 流体压力的单位 | 5-14 |
| 2 流 场 | 5-15 |
| 2.1 研究流动的两种方法 | 5-15 |
| 2.2 迹线、流线、流谱和流管 | 5-15 |
| 2.3 流体的速度和加速度 | 5-15 |
| 2.4 平均流速和流量 | 5-16 |
| 3 粘性流体和理想流体 | 5-16 |
| 3.1 粘性流体和内摩擦定律 | 5-16 |
| 3.2 理想流体 | 5-17 |

| | |
|----------------------------|------|
| 4 可压缩流体和不可压缩流体 | 5-17 |
| 5 一元、二元和三元流动 | 5-17 |
| 6 定常流动和非定常流动 | 5-18 |
| 7 有旋流动和无旋流动 | 5-18 |
| 7.1 概述 | 5-18 |
| 7.2 涡线、涡管和涡管强度 | 5-18 |
| 7.3 涡街 | 5-19 |
| 7.4 速度环量 | 5-19 |
| 8 层流、湍流和雷诺数 | 5-19 |
| 8.1 层流和湍流 | 5-19 |
| 8.2 雷诺数和临界雷诺数 | 5-20 |
| 8.3 水力直径 | 5-21 |
| 9 声速和马赫数 | 5-21 |
| 9.1 声速 | 5-21 |
| 9.2 几种气体的绝热指数、气体常数、声速及声速常数 | 5-22 |
| 9.3 马赫数 | 5-22 |
| 9.4 亚声速流与超声速流的根本差别、马赫锥 | 5-22 |

第 3 章 基本方程

| | |
|-----------------------|------|
| 1 连续性方程 | 5-23 |
| 2 运动方程 | 5-23 |
| 2.1 欧拉运动方程 | 5-23 |
| 2.2 纳维尔-斯托克斯方程 | 5-24 |
| 3 伯努利方程 | 5-25 |
| 3.1 动能修正系数 | 5-25 |
| 3.2 不可压缩流体的伯努利方程 | 5-25 |
| 3.3 可压缩流体的伯努利方程 | 5-27 |
| 3.4 相对定常流的伯努利方程 | 5-27 |
| 3.5 非定常粘性不可压缩流体的伯努利方程 | 5-27 |
| 4 状态方程和过程方程 | 5-28 |
| 5 动量方程 | 5-28 |
| 5.1 一般流动的动量方程 | 5-28 |

5-VI 目 录

| | |
|-----------------------|------|
| 5.2 定常管流的动量方程 | 5-29 |
| 6 动量矩方程 | 5-29 |
| 6.1 一般流动的动量矩方程 | 5-29 |
| 6.2 定常管流的动量矩方程 | 5-29 |
| 6.3 相对定常流的动量矩方程 | 5-30 |

第4章 静止液体

| | |
|-----------------------|------|
| 1 流体平衡微分方程 | 5-30 |
| 2 静止液体内的压力 | 5-30 |
| 2.1 压力特性 | 5-30 |
| 2.2 压力计算公式 | 5-31 |
| 2.3 帕斯卡定律 | 5-31 |
| 2.4 等压面和连通器 | 5-31 |
| 2.5 液柱式测压计 | 5-31 |
| 3 静止液体作用在壁面上的力 | 5-32 |
| 3.1 作用在平面壁上的力 | 5-32 |
| 3.2 作用在柱形曲面壁上的力 | 5-34 |
| 4 阿基米德原理 | 5-35 |
| 5 相对静止液体的压力 | 5-35 |

第5章 流动阻力和低速管流

| | |
|-------------------------|------|
| 1 流动阻力 | 5-36 |
| 2 管内流动的阻力计算 | 5-37 |
| 2.1 水头损失及其计算公式 | 5-37 |
| 2.2 流动光滑管和粗糙管 | 5-37 |
| 2.3 沿程阻力系数 | 5-37 |
| 2.4 局部阻力系数 | 5-40 |
| 2.5 流动起始段的阻力系数 | 5-48 |
| 2.6 压缩性对阻力损失的影响 | 5-49 |
| 3 管路的设计计算 | 5-51 |
| 3.1 概述 | 5-51 |
| 3.2 管径的确定和允许流速 | 5-52 |
| 3.3 简单管路的计算 | 5-52 |
| 3.4 复杂管路的计算 | 5-53 |
| 4 绕流物体的阻力 | 5-54 |
| 4.1 阻力系数 | 5-54 |
| 4.2 几种不同形状物体的阻力系数 | 5-55 |
| 5 高分子减阻 | 5-59 |

第6章 缝隙流动、出流、射流和水锤

| | |
|--------------|------|
| 1 缝隙流动 | 5-60 |
|--------------|------|

| | |
|----------------------|------|
| 1.1 平行板间的缝隙流动 | 5-60 |
| 1.2 倾斜板间的缝隙流动 | 5-60 |
| 1.3 平行圆盘间的缝隙流动 | 5-60 |
| 1.4 环形缝隙流动 | 5-60 |
| 1.5 夹缝出流 | 5-60 |
| 1.6 细长圆管内的层流流动 | 5-60 |
| 2 出流 | 5-65 |
| 2.1 薄壁小孔口出流 | 5-65 |
| 2.2 管嘴出流 | 5-66 |
| 3 自由射流 | 5-67 |
| 3.1 作用在壁面上的力 | 5-67 |
| 3.2 射程 | 5-67 |
| 4 水锤 | 5-69 |
| 4.1 水锤现象 | 5-69 |
| 4.2 水锤压力波的传播速度 | 5-70 |
| 4.3 水锤压力 | 5-70 |
| 4.4 防止或减弱水锤的措施 | 5-71 |

第7章 管内高速气体流动

| | |
|------------------------|------|
| 1 管内等熵流动 | 5-71 |
| 1.1 基本方程 | 5-71 |
| 1.2 流速随管道断面的变化规律 | 5-72 |
| 1.3 壅塞 | 5-72 |
| 1.4 流动特性 | 5-72 |
| 1.5 滞止参数和临界参数 | 5-73 |
| 1.6 计算公式和图表 | 5-73 |
| 1.7 摩擦的影响 | 5-74 |
| 2 喷管内的等熵流动 | 5-75 |
| 2.1 渐缩喷管 | 5-75 |
| 2.2 缩放喷管 | 5-77 |
| 3 斜切口内的流动 | 5-80 |
| 3.1 流动分析 | 5-80 |
| 3.2 气流偏转角的计算 | 5-80 |
| 3.3 最大膨胀能力 | 5-80 |
| 4 激波 | 5-80 |
| 4.1 正激波 | 5-81 |
| 4.2 斜激波 | 5-82 |
| 4.3 脱体激波 | 5-84 |

第8章 平面流动

| | |
|--------------------|------|
| 1 速度势、流函数和流网 | 5-85 |
|--------------------|------|

| | |
|--------------------------|------|
| 1.1 速度势 | 5-85 |
| 1.2 流函数 | 5-85 |
| 1.3 流网 | 5-86 |
| 2 复势和复速度 | 5-87 |
| 2.1 复势、复速度和共轭速度 | 5-87 |
| 2.2 几种简单流动的复势 | 5-87 |
| 2.3 几种复合流动的复势 | 5-90 |
| 3 圆柱绕流 | 5-91 |
| 4 保角变换法原理 | 5-92 |
| 4.1 概述 | 5-92 |
| 4.2 变换函数 | 5-92 |
| 4.3 作用在物体上的力和力矩 | 5-93 |
| 5 库塔-儒可夫斯基升力定理 | 5-93 |
| 5.1 升力定理 | 5-93 |
| 5.2 库塔-儒可夫斯基条件 | 5-93 |
| 6 翼型绕流 | 5-94 |
| 6.1 基本参数 | 5-94 |
| 6.2 几何参数对气动性能的影响 | 5-95 |
| 6.3 几种翼型的气动性能 | 5-95 |
| 7 亚声速流的近似法则 | 5-96 |
| 7.1 戈泰法则 | 5-96 |
| 7.2 普朗特-葛劳渥特法则 | 5-96 |
| 7.3 卡门-钱学森压力系数修正公式 | 5-96 |
| 8 临界马赫数 | 5-98 |

第 9 章 边界层内的流动

| | |
|-------------------|-------|
| 1 概 述 | 5-98 |
| 1.1 边界层的特性 | 5-98 |
| 1.2 边界层的转捩 | 5-99 |
| 1.3 边界层的分离 | 5-99 |
| 2 边界层的几种厚度 | 5-100 |
| 3 边界层方程 | 5-101 |
| 3.1 层流边界层方程 | 5-101 |
| 3.2 湍流边界层方程 | 5-101 |
| 4 边界层积分关系式 | 5-101 |
| 4.1 动量积分关系式 | 5-102 |
| 4.2 能量积分关系式 | 5-102 |
| 5 不可压缩平板边界层 | 5-102 |
| 6 可压缩平板边界层 | 5-103 |
| 6.1 层流边界层 | 5-104 |

| | |
|-------------------------------|-------|
| 6.2 湍流边界层 | 5-105 |
| 7 温度边界层 | 5-105 |
| 7.1 普朗特数、复温系数、努赛尔数和史坦顿数 | 5-105 |
| 7.2 温度边界层的厚度和特性 | 5-106 |
| 7.3 平板温度边界层 | 5-107 |

第 10 章 叶栅绕流

| | |
|----------------------------|-------|
| 1 概 述 | 5-108 |
| 1.1 叶栅类型 | 5-108 |
| 1.2 叶栅绕流的基本参数 | 5-109 |
| 1.3 叶栅绕流问题的类型 | 5-111 |
| 1.4 等价叶栅 | 5-111 |
| 2 平面叶栅绕流分析 | 5-111 |
| 2.1 基本流动特性 | 5-111 |
| 2.2 叶栅参数变化对流动的影响 | 5-112 |
| 2.3 最小损失进流角 | 5-113 |
| 3 作用在平面叶栅上的力和叶栅功率 | 5-114 |
| 3.1 作用在平面叶栅上的力 | 5-114 |
| 3.2 广义库塔-儒可夫斯基条件 | 5-114 |
| 3.3 叶栅的功率 | 5-115 |
| 4 平面叶栅绕流的升力修正系数 | 5-115 |
| 4.1 平板叶栅的升力修正系数 | 5-115 |
| 4.2 圆弧板叶栅的升力修正系数 | 5-115 |
| 5 平面叶栅绕流的几种解法 | 5-116 |
| 5.1 升力法 | 5-116 |
| 5.2 流道法 | 5-116 |
| 5.3 平均流动法 | 5-118 |
| 5.4 奇点法 | 5-119 |
| 6 空间叶栅绕流的基本方程 | 5-120 |
| 6.1 空间叶栅绕流的特点 | 5-120 |
| 6.2 实际叶栅绕流的简化 | 5-121 |
| 6.3 空间叶栅绕流的简化基本方程 | 5-121 |
| 6.4 几点结论 | 5-122 |
| 7 两类相对流面理论 | 5-123 |
| 7.1 概述 | 5-123 |
| 7.2 两类相对流面的简化理论 | 5-123 |
| 7.3 S_2 相对流面上的主要方程 | 5-124 |
| 7.4 S_1 相对流面上的主要方程 | 5-126 |
| 8 径向平衡方程和间隙站内的流动方程 | 5-128 |

5-Ⅶ 常用符号表

| | | | |
|-----------------------|-------|-----------------------------------|-------|
| 8·1 径向平衡方程..... | 5-128 | 9·4 选定流线法..... | 5-131 |
| 8·2 叶栅间隙站内的流动方程..... | 5-129 | 9·5 有限元法..... | 5-133 |
| 9 空间叶栅绕流问题的几种解法 | 5-129 | 附表 I 等熵流气动函数表($k = 1.4$)..... | 5-134 |
| 9·1 概述..... | 5-129 | 附表 II 有关 k 的各项计算值 | 5-140 |
| 9·2 有限差分法..... | 5-129 | 附表 III 正激波气动函数表($k = 1.4$)..... | 5-141 |
| 9·3 流线迭代法..... | 5-130 | 参考文献 | 5-145 |

第1章 流体的物理性质

气体和液体通称流体。流体在切向力作用下，将产生连续变形。本篇把流体作为连续介质处理。

重度和密度的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (5.1-1)$$

流体的重度或密度，随流体所受的压力和温度而变化。液体和气体相比，液体的变化比气体要小，其中特别是随压力的变化更小。

1 流体的重度和密度

流体单位体积的重量，称为流体的重度，以 γ 表示，其单位为 kgf/m^3 。

流体单位体积的质量，称为流体的密度，以 ρ 表示，其单位为 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ 。

1.1 气体的重度和密度

a. 温度为 0°C ，压力为 760mmHg 和 $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 时，几种气体的重度和密度（表 5.1-1）

表5.1-1 几种气体在 0°C 时的重度和密度

| 气 体 | $p = 760\text{mmHg}$ | | $p = 1\text{kgf}/\text{cm}^2$ | | 气 体 | $p = 760\text{mmHg}$ | | $p = 1\text{kgf}/\text{cm}^2$ | |
|-----|--------------------------------|---|--------------------------------|---|-------|--------------------------------|---|--------------------------------|---|
| | 重 度 kgf/m^3 | 密 度 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ | 重 度 kgf/m^3 | 密 度 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ | | 重 度 kgf/m^3 | 密 度 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ | 重 度 kgf/m^3 | 密 度 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ |
| 空气 | 1.2916 | 0.1318 | 1.2505 | 0.1276 | 丙烯 | 1.9130 | 0.1952 | 1.8512 | 0.1889 |
| 氮 | 1.2495 | 0.1275 | 1.2093 | 0.1234 | 乙炔 | 1.1740 | 0.1198 | 1.1358 | 0.1159 |
| 氧 | 1.4279 | 0.1457 | 1.3818 | 0.1410 | 一氧化碳 | 1.2495 | 0.1275 | 1.2093 | 0.1234 |
| 氩 | 1.7826 | 0.1819 | 1.7248 | 0.1760 | 二氧化碳 | 1.9757 | 0.2016 | 1.9120 | 0.1951 |
| 氦 | 0.8707 | 0.08885 | 0.8427 | 0.08599 | 一氧化氮 | 1.3397 | 0.1367 | 1.2965 | 0.1323 |
| 氖 | 0.1345 | 0.01372 | 0.1301 | 0.01328 | 一氧化二氮 | 1.9767 | 0.2017 | 1.9130 | 0.1952 |
| 氢 | 0.08982 | 0.009165 | 0.08693 | 0.008870 | 硫化氢 | 1.5376 | 0.1569 | 0.14876 | 0.1518 |
| 甲烷 | 0.7162 | 0.07308 | 0.6932 | 0.07073 | 二氧化硫 | 2.9253 | 0.2985 | 2.8312 | 0.2889 |
| 乙烷 | 1.3553 | 0.1383 | 1.3112 | 0.1338 | 氟 | 1.6934 | 0.1728 | 1.6386 | 0.1672 |
| 丙烷 | 2.0041 | 0.2045 | 1.9394 | 0.1979 | 氯 | 3.2115 | 0.3277 | 3.1076 | 0.3171 |
| 乙烯 | 1.2063 | 0.1286 | 1.2201 | 0.1245 | 氟甲烷 | 2.3030 | 0.2350 | 2.2285 | 0.2274 |
| 氨 | 0.7705 | 0.07862 | 0.7457 | 0.07609 | | | | | |

b. 不同温度下，压力为 $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 时的空气重度（表 5.1-2）

表5.1-2 压力为 $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 时，不同温度下的空气重度

| 温 度 $^\circ\text{C}$ | 重 度 kgf/m^3 | 温 度 $^\circ\text{C}$ | 重 度 kgf/m^3 | 温 度 $^\circ\text{C}$ | 重 度 kgf/m^3 | 温 度 $^\circ\text{C}$ | 重 度 kgf/m^3 |
|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| -180 | 3.681 | 20 | 1.163 | 90 | 0.941 | 350 | 0.548 |
| -150 | 2.814 | 25 | 1.145 | 100 | 0.915 | 400 | 0.507 |
| -100 | 1.982 | 30 | 1.126 | 120 | 0.869 | 500 | 0.450 |
| -50 | 1.532 | 35 | 1.109 | 140 | 0.826 | 600 | 0.400 |
| -20 | 1.364 | 40 | 1.091 | 160 | 0.788 | 800 | 0.325 |
| 0 | 1.251 | 50 | 1.055 | 180 | 0.754 | 1000 | 0.268 |
| 5 | 1.229 | 60 | 1.024 | 200 | 0.732 | 1200 | 0.238 |
| 10 | 1.206 | 70 | 0.995 | 250 | 0.652 | 1400 | 0.204 |
| 15 | 1.184 | 80 | 0.967 | 300 | 0.595 | 1600 | 0.182 |

5-2 第5篇 流体力学

c. 任一温度和压力时的实际气体的重度和密度

$$\gamma = \rho g = \frac{p}{ZRT} \quad (5.3-2)$$

式中 Z —— 气体的压缩因子。 Z 值可根据气体的

对比温度 $T_r = \frac{T}{T_c}$ 和对比压力 $p_r =$

$\frac{p}{p_c}$ 由图5.1-1查得。几种气体的临界温度 T_c 和临界压力 p_c 值见表5.1-3。

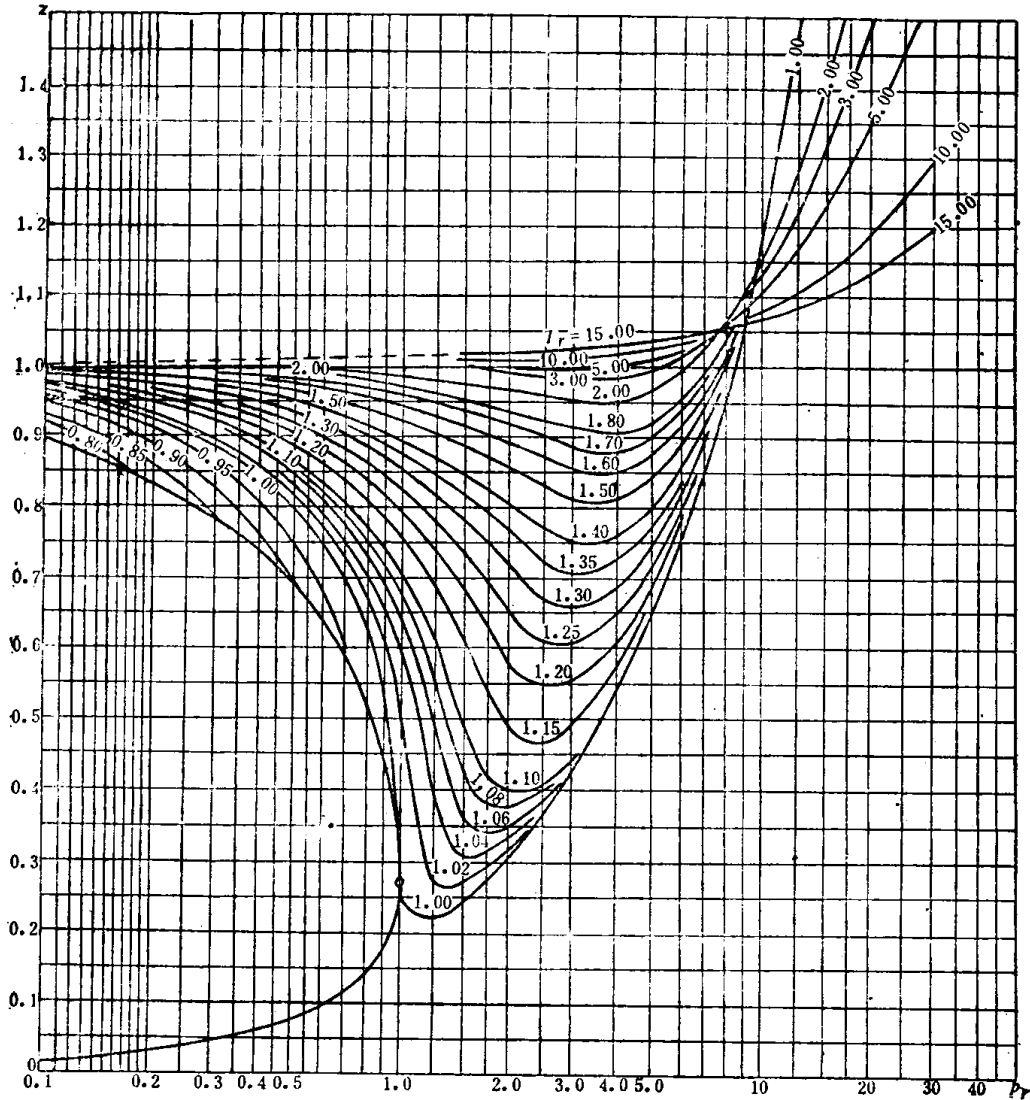


图5.1-1 气体的压缩因子 Z 随对比压力 p_r 和对比温度 T_r 的变化

表5.1-3 几种气体的临界温度和临界压力

| 气 体 | 临界温度 T_c K | 临界压力 p_c atm | 气 体 | 临界温度 T_c K | 临界压力 p_c atm |
|-----|-----------------|-------------------|-------|-----------------|-------------------|
| 空气 | 132.42~132.52 | 37.25~37.17 | 一氧化碳 | 132.92 | 34.53 |
| 氮 | 126.1 | 33.5 | 二氧化碳 | 304.19 | 72.85 |
| 氧 | 154.78 | 50.14 | 一氧化氮 | 179.15 | 65 |
| 氩 | 150.7 | 48 | 二氧化氮 | 431.35 | 100 |
| 氦 | 44.4 | 26.19 | 一氧化二氮 | 309.71 | 71.8 |
| 氢 | 32.976 | 12.76 | 硫化氢 | 373.55 | 88.9 |
| 甲烷 | 190.7 | 45.8 | 二氧化硫 | 430.65 | 77.79 |
| 乙烷 | 305.45 | 48.3 | 氟 | 143.96 | 55 |
| 丙烷 | 369.95 | 42.01 | 氯 | 417.15 | 76.1 |
| 乙烯 | 283.05 | 50.49 | 氯甲烷 | 416.15 | 65.9 |
| 丙烯 | 365.05 | 45.39 | 氯乙烷 | 455.95 | 52 |
| 乙炔 | 309.15 | 61.58 | 氮 | 405.65 | 111.5 |
| 苯 | 562.15 | 48.58 | 氟里昂12 | 385.15 | 40.62 |

表5-1-7 不同温度下压力为760mmHg时, 水的密度 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$

| 温度 $^{\circ}\text{C}$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0 | 101.958 | 101.964 | 101.968 | 101.971 | 101.972 | 101.970 | 101.968 | 101.964 | 101.959 | 101.592 |
| 10 | 101.944 | 101.934 | 101.923 | 101.911 | 101.897 | 101.883 | 101.866 | 101.849 | 101.831 | 101.812 |
| 20 | 101.791 | 101.769 | 101.747 | 101.724 | 101.699 | 101.673 | 101.646 | 101.619 | 101.590 | 101.561 |
| 30 | 101.531 | 101.499 | 101.467 | 101.435 | 101.401 | 101.366 | 101.330 | 101.295 | 101.257 | 101.219 |
| 40 | 101.182 | 101.142 | 101.102 | 101.061 | 101.019 | 100.977 | 100.934 | 100.891 | 100.846 | 100.801 |
| 50 | 100.755 | 100.709 | 100.662 | 100.614 | 100.566 | 100.517 | 100.467 | 100.417 | 100.366 | 100.314 |
| 60 | 100.263 | 100.210 | 100.157 | 100.103 | 100.048 | 99.993 | 99.938 | 99.881 | 99.824 | 99.767 |
| 70 | 99.709 | 99.650 | 99.592 | 99.532 | 99.472 | 99.411 | 99.350 | 99.288 | 99.226 | 99.163 |
| 80 | 99.099 | 99.036 | 98.971 | 98.907 | 98.841 | 98.775 | 98.709 | 98.641 | 98.574 | 98.506 |
| 90 | 98.438 | 98.369 | 98.300 | 98.230 | 98.159 | 98.089 | 98.017 | 97.945 | 97.874 | 97.800 |
| 100 | 97.728 | | | | | | | | | |

表5-1-8 不同温度下压力为760mmHg时, 水银的重度和密度

| 温度 $^{\circ}\text{C}$ | 重度 kgf/m^3 | 密度 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ | 温度 $^{\circ}\text{C}$ | 重度 kgf/m^3 | 密度 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ |
|-----------------------|----------------------------|---|-----------------------|----------------------------|---|
| -10 | 13610.9 | 1388.87 | 90 | 13366.9 | 1363.97 |
| 0 | 13586.2 | 1386.35 | 100 | 13342.7 | 1361.50 |
| 10 | 13561.6 | 1383.84 | 120 | 13295.4 | 1356.67 |
| 20 | 13537.0 | 1381.33 | 150 | 13224.0 | 1349.39 |
| 30 | 13512.5 | 1378.83 | 200 | 13105.9 | 1337.34 |
| 40 | 13488.1 | 1376.34 | 250 | 12988.7 | 1325.38 |
| 50 | 13463.7 | 1373.85 | 300 | 12871.9 | 1313.46 |
| 60 | 13439.5 | 1371.38 | 350 | 12755.2 | 1301.55 |
| 70 | 13415.2 | 1368.90 | 360 | 12731.9 | 1299.17 |
| 80 | 13400.1 | 1366.43 | | | |

c. 压力不变时, 不同温度下的各种液体 重度

$$\gamma_t = \frac{\gamma_{t_1}}{1 + \alpha(t - t_1)} \quad (5.1-4)$$

式中 α —— 液体的体积膨胀系数 (详见本章 2.2);

γ_{t_1} —— 温度为 $t_1^{\circ}\text{C}$ 时的液体重度。

不同温度时, 石油产品的重度可用图 5.1-2 查算。如已知 γ_4^{20} 时, 可在图 5.1-2 中找到给定温度 t 值, 并作 t 值点与 γ_4^{20} 值点的连线, 它与 γ_4^t 或 γ_{20}^t 线相交, 从而得 γ_4^t 或 γ_{20}^t 的值, 则任一温度时的石油产品的重度为

$$\gamma_t = \gamma_4 \gamma_4^t = \gamma_{20} \gamma_{20}^t$$

式中 γ_4 —— 4 $^{\circ}\text{C}$ 时水的重度;

γ_{20} —— 20 $^{\circ}\text{C}$ 时水的重度。

当已知某一温度 t_1 下的石油产品的重度 γ_{t_1} 时, 可先算得 $\gamma_4^{t_1}$ (或 $\gamma_{20}^{t_1}$) 值, 再作 t_1 与 $\gamma_4^{t_1}$ (或 $\gamma_{20}^{t_1}$)

的连线, 它与 γ_4^{20} 线相交而得 γ_4^{20} 的值, 然后再按前一种情况进行计算。

图 5.1-2 也可用于求不同温度时石油产品的密度 ρ , 只要用 ρ_4^t 、 ρ_{20}^t 和 ρ_4^{20} 分别替代 γ_4^t 、 γ_{20}^t 和 γ_4^{20} , 再按上述方法计算即可。

d. 温度不变时, 不同压力下的液体重度

$$\gamma_p = \frac{\gamma_{p_1}}{1 - \beta(p - p_1)} \quad (5.1-5)$$

式中 β —— 液体的体积压缩系数 (详见本章 2.1);

γ_{p_1} —— 压力为 p_1 时的液体重度。

通常, 当压力变化小于 50 大气压时, 可不计液体重度的变化。

不同压力下, 水和水银的重度和密度见表 5.1-

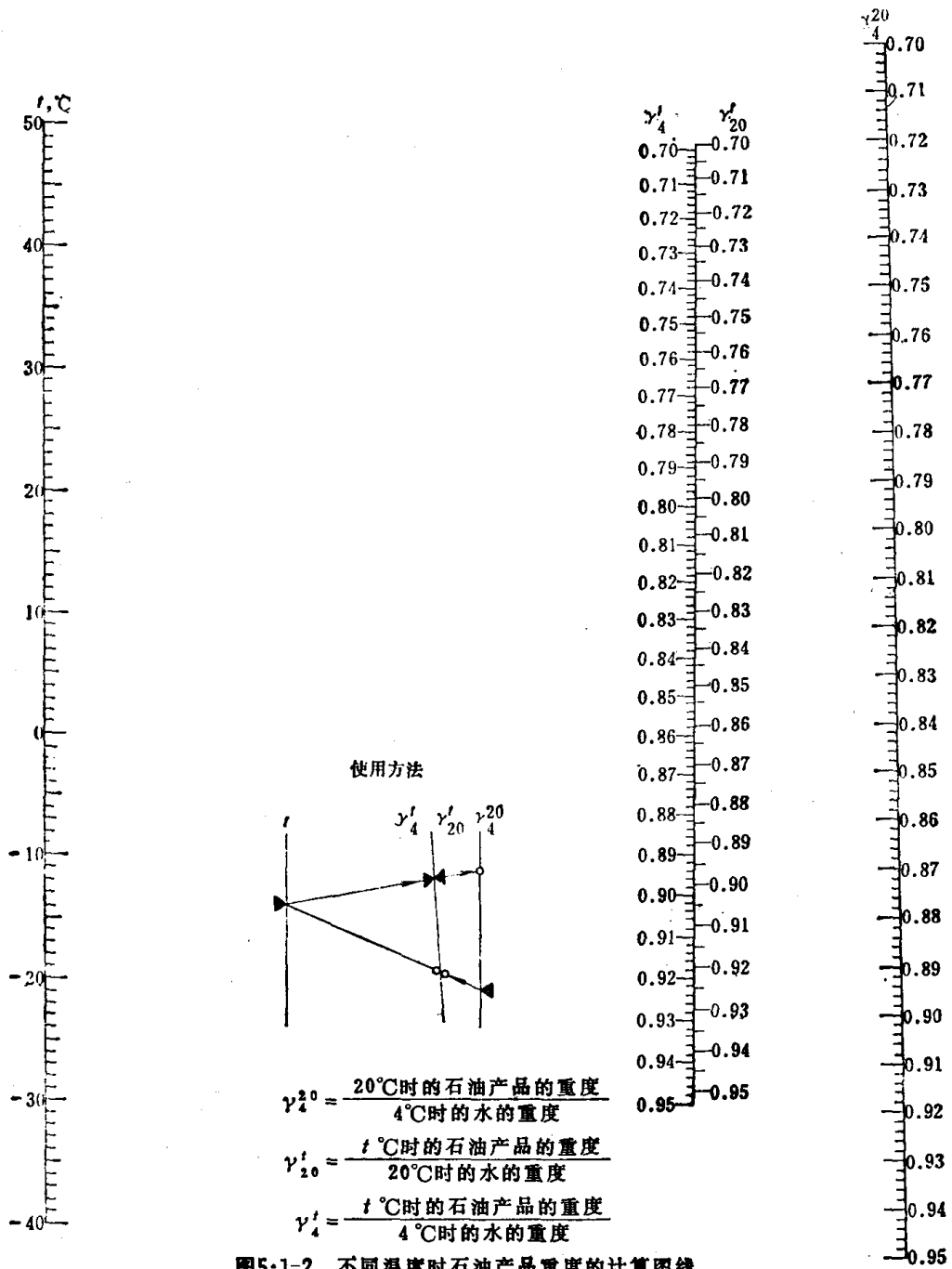


图5-1-2 不同温度时石油产品重度的计算图线

表5-1-9 不同压力下水和水银的重度和密度

| 表 压 力 kgf/cm ² | 水 | | | | 水 银 | | | |
|------------------------------|-----------------------|-------|---------------------------------------|--------|-----------------------|-------|---------------------------------------|--------|
| | 重度 kgf/m ³ | | 密度 kgf·s ² /m ⁴ | | 重度 kgf/m ³ | | 密度 kgf·s ² /m ⁴ | |
| | 0 °C | 40 °C | 0 °C | 40 °C | 0 °C | 40 °C | 0 °C | 40 °C |
| 0 | 999.2 | 991.6 | 101.96 | 101.18 | 13586 | 13537 | 1386.3 | 1381.3 |
| 500 | 1023 | 1013 | 104.39 | 103.37 | — | — | — | — |
| 1000 | 1045 | 1031 | 106.63 | 105.20 | 13651 | 13591 | 1413.4 | 1386.8 |
| 2000 | 1083 | 1065 | 110.51 | 108.67 | 13681 | 13691 | 1356.0 | 1397.0 |
| 4000 | 1145 | 1119 | 116.84 | 114.18 | 13791 | 13741 | 1407.2 | 1402.1 |
| 8000 | — | 1200 | — | 122.45 | — | 13921 | — | 1420.5 |
| 12000 | — | 1260 | — | 128.57 | — | 14070 | — | 1435.7 |