

机械技术手册

中

机械工业出版社

机械技术手册

中

〔日〕日本机械学会编



机械工业出版社

这部手册是根据日本机械学会编辑出版的《机械技术手册》1977年修订第6版翻译的。译本分上、中、下三卷出版。第1篇至第7篇为上卷，第8篇至第15篇为中卷，第16篇至第22篇为下卷。

本书为中卷，包括：水力学与流体力学，水力机械与液压传动，空气机械，热与热力学，燃料、燃烧与燃烧炉，蒸汽动力，内燃机，交通运输。内容广泛，可供广大工程技术人员参考使用。

機 械 工 学 便 覧

日本機械学会 編

日本機械学会改訂第6版昭和50年

* * *

机 械 技 术 手 册

中

日本机械学会 編

*

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 70 · 插页 2 · 字数 2107 千字

1984年12月北京第一版·1984年12月北京第一次印刷

印数 00,001—45,500 · 定价 12.75 元

*

统一书号：15033·5465

修 订 经 过 报 告

《机械技术手册》修订第5版发行到现在已为时7年了,在本会第50届第三出版部会议上征求了包括规划部委员会等许多有关方面的意见后,拟定了进一步充实手册内容的修订方案,并上报第50届理事会,理事会对上报修订方案作了进一步审议,确定了下述修订方案及出版计划:

(1) 修订原手册中分类重叠的部分,使其更加完善而简明。

(2) 在方针(1)的范围内,根据工程学科和工业的发展,对内容进行修改和补充:

a. 尽量删除陈旧的内容;

b. 重点放在预计长期不变,而且利用率较高的通用性、基础性、定论性内容及资料上;

c. 考虑多数使用者的方便,手册应编得通俗易懂;

d. 单位方面适当考虑国际单位制(SI);

e. 除特别指定者外,对原有篇章等不作大幅度变动。

(3) 合订本采用全书一册(现行)的形式,但注意不要使其过厚,总页数的增加量不宜超过10%(约2200页)。

(4) 修订本先以分册形式出版,出齐后再出版合订本。合订本完成日期定为1976年底。

按照上述方针成立了机械技术手册第6版修订分科委员会,并委托下列各位分工负责:

主任审查委员 竹中規雄

干 事 益子正巳

委 员 井田富夫 石川二郎 石原智男 植田辰洋 浦田 星 塩崎 進

芹沢良夫 寺野寿郎 丸山弘志 水野正夫 山家讓二

分科委员会于1973年6月召开第一次会议,以后又通过几次会议,按照修订方针制定了审查大纲和编写日程等。

之后,该委员会为每篇的修改均委任了几名(全书共134名)审查委员,到1973年9月收到了具体修订事项的审查报告,根据这份报告,委员会调整了各篇的编写项目,确定了承担页数的比例及执笔人员,整理出编写期限、编写提纲、编写内容等资料,1974年4月向全体执笔人员委托编写原稿。在此期间,为了密切各篇章之间的关系,各篇的审查委员与分科委员会委员进行了充分研究,有时还根据需要邀请委员以外的人士协助,力求把修订工作做好。

要求执笔人员在分配的篇幅内,遵照讨论结果编入丰富的内容。依据对原稿的审阅,找出各篇章之间的重复内容,再对原稿进行补充、修改和删节等繁重的加工。

第6版,由于进行了上述的充分讨论和审议,采取了通篇修改二分之一的方针,详细内

容以方针(2)为准则,某些篇甚至作了全面修改,从而更新了旧版的面貌。关于篇名,这次只作了使其符合内容的变更。此外,关于SI单位,则与现在惯用单位一并列入。考虑到不久即将普及国际单位制(SI),因而在各分册中均列入了全书通用的SI单位换算表。

这次修订是从谷口 修任第50届会长时开始的,以后又经过第51届会长藤木俊三、第52届会长鹈户口英善,直到曾田範宗任第53届会长时才得以出版,在此期间,由于各位主编的及时指导,以及审查委员、执笔人员、审校人员、分科委员会委员和学会工作人员共同努力,才使修订版得以顺利完成。借此机会,表示深切谢意。

森

第53届第三出版部 会长 佐藤 豪

机械技术手册第6版修订分科委员会

主任审查委员 竹中規雄

1975年9月

序

本会发行的《机械技术手册》修订第6版，终于从第1分册开始出版了，对此不胜喜悦。大型合订本的完成之日也为期不远了。

本手册的初版是在1934年2月以32开版本发行的。从初版到现在，每次修订无论其内容的质量和数量都得到了补充和提高。在此期间，本手册对日本机械工程学科和机械工业的发展所起的作用，是难以用语言表达的，本书从初版到现在已销售20万册这一事实就是最有说服力的证明。

这次发行的第6版，正如修订经过报告中所指出的，对全书内容的二分之一进行了修订，其中某些篇甚至作了全面修改，版面也改成了16开的大开本，从而更新了第5版的面貌，使之成为一部崭新的手册。在内容上，既保持了手册无遗漏地记载最新工业技术和设计资料的固有特点，同时在阐述有关专业基础知识方面，又具有教科书的特色。这是本手册历次修订中锤炼出来的传统特色，因此，受到工厂、研究部门、设计部门和学校等的广泛欢迎。

我们深信，这次竭尽全力修订的第6版，一定能满足读者的希望。在此，首先向本会会员，并向广大的机械工程界及其他工业界的有关人员推荐，衷心希望这部手册能作为各位身边的工具书，在日常业务工作中得到运用。

最后，值此修订版发行之际，对各位主编及时提供的建议，以及改编工作以来，历届会长和各位负责人，出版部会长，修订分科委员会主任审查委员和其他各位委员，各位编写人员等的辛勤工作，深表敬意和感谢。此外，对本会事务局的各位为完成本手册付出的辛苦劳动，以及各位会员有形无形地给予的巨大支援，在此一并表示谢意。

社团法人 日本机械学会

第53届会长 曾田範宗

1975年9月

第8篇 水力学与流体力学

执笔者

有石 小高 西宫 石富
江原 宫田 山代 原田
幹智 勤浩 哲智 幸
男男 一之 男裕 男雄
安市 白竹 平村 田松
藤川 倉中山 井古 木
常常 昌利 直哲 正
世雄 明夫 道等 夫勝
伊神 妹田 藤村 田
藤山 尾古 本上 島
英新 泰哲 哲光 清
觉一 利夫 夫清 瀬
生小 田富 松森 竹
井竹 島田 木川 中
武清 幸正 敬利
文進 瀬雄 勝信 夫

审查委员

译者 者 连桂森 吴松盛
校者 者 李诗久

目 录

第1章 水力学基础8-1

1.1 主要流体的物理性质8-1

1.1.1 重度 (单位体积流体的重量)

γ 和密度 $\rho (= \gamma / g)$ 8-1

1.1.2 压缩率 β 和比容 v8-2

1.1.3 流体中压力波的传播速度

(声速) a 8-2

1.1.4 动力粘度 μ 与运动粘度 ν8-3

1.1.5 表面张力 H8-4

1.1.6 水的饱和蒸汽压 p_s8-5

1.1.7 气体对于水的溶解度8-5

1.2 水静力学8-5

1.2.1 压力8-5

1.2.2 压力的单位8-6

1.2.3 深度压力的大小与方向8-6

1.2.4 水头8-6

1.2.5 压力的传递 (帕斯卡原理)8-6

1.2.6 深度压力与压力中心

(平面)8-7

1.2.7 深度压力与压力中心

(曲面)8-8

1.2.8 均匀压力的合力8-8

1.2.9 浮力8-9

1.2.10 浮体8-9

1.2.11 浮体的稳定性8-9

1.2.12 流体静力学的基本方程式8-9

1.2.13 等压面8-10

1.2.14 力线8-10

1.2.15 相对静止 (相对平衡)8-10

1.3 一般水动力学8-10

1.3.1 层流与湍流8-10

1.3.2 流线, 定常流8-12

1.3.3 流量, 连续性定理8-13

1.3.4 伯努利定理8-13

1.3.5 动压和总压 (滞止压力)8-14

1.3.6 两流线间的总水头差8-14

第2章 流道与流体阻力8-14

2.1 流体的摩擦8-14

2.1.1 流体的摩擦与切应力8-14

2.1.2 圆管的管摩擦8-15

2.1.3 铁管的老化效应8-17

2.1.4 非圆形断面管8-18

2.1.5 组合管8-18

2.2 管路8-19

2.2.1 管路的损失水头8-19

2.2.2 起始段内的流动8-19

2.2.3 管路进口8-19

2.2.4 管路出口8-20

2.2.5 扩散管与收缩管8-20

2.2.6 弯管8-21

2.2.7 肘形弯管8-22

2.2.8 分流管 (分枝管)8-22

2.2.9 汇流管8-23

2.2.10 管接头8-24

2.2.11 阀和旋塞8-24

2.2.12 孔口、喷嘴和文丘里管8-24

2.2.13 管路的总损失和流量8-25

2.2.14 管道输送流体的动力8-25

2.2.15 管路流速8-26

2.3 明渠8-26

2.3.1 明渠断面和流速不变时的流

动8-26

2.3.2 明渠的最佳断面形状8-27

2.3.3 明渠的适宜流速8-27

2.3.4 流速分布8-27

2.3.5 流速变化时的流动8-27

2.4 流体中的物体阻力8-27

2.4.1 阻力系数8-27

2.4.2 球的阻力8-28

2.4.3 圆柱阻力8-29

2.4.4 各种物体的阻力系数8-30

2.4.5 圆管束的阻力8-31

2.4.6 卡门涡列8-32

2.5 两相流动8-33

2.5.1 固气两相流动	8-33	3.4.7 蒸汽的流量测定	8-57
2.5.2 固液两相流动	8-35	3.5 流动的可视化	8-57
2.5.3 气液两相流动	8-36	3.5.1 涂敷法	8-57
2.6 动量定理	8-37	3.5.2 贴附法	8-57
2.6.1 动量守恒和物体所受的力	8-37	3.5.3 示迹法	8-57
2.6.2 动量矩守恒和物体所受的力	8-38	3.5.4 化学反应法	8-58
2.7 管内非定常流,水击	8-38	3.5.5 电控法	8-58
2.7.1 水击作用	8-38	3.5.6 光学法	8-58
2.7.2 管内压力波的传播速度	8-38	第4章 流体力学	8-59
2.7.3 水击的基本方程式	8-39	4.1 流体力学基础	8-59
2.7.4 水击的图解法	8-40	4.1.1 符号	8-59
2.7.5 水击特征线法	8-42	4.1.2 运动方程式(直角坐标)	8-59
2.7.6 油压管路的非定常流动	8-42	4.1.3 运动方程式(圆柱坐标)	8-59
2.7.7 流体系统中的特殊振动	8-44	4.1.4 运动方程式(球面坐标)	8-59
第3章 压力、流速与流量测定	8-45	4.1.5 连续性方程式(直角坐标)	8-60
3.1 压力测定	8-45	4.1.6 连续性方程式(圆柱坐标)	8-60
3.1.1 各种液柱压力计	8-45	4.1.7 连续性方程式(球面坐标)	8-60
3.2 流速测定	8-46	4.1.8 能量方程式	8-60
3.2.1 流速计	8-46	4.1.9 状态方程式	8-61
3.2.2 皮托管	8-47	4.1.10 涡量,环量	8-61
3.2.3 热线流速仪	8-48	4.1.11 斯托克斯定理	8-61
3.2.4 其他测定法	8-48	4.1.12 旋涡性质	8-61
3.3 流体的流量测定	8-49	4.1.13 涡丝的诱导速度	8-61
3.3.1 容器法	8-49	4.1.14 流函数	8-61
3.3.2 翼式流量计	8-49	4.2 理想、不可压流体的流动	8-62
3.3.3 速度分布法	8-49	4.2.1 无旋流动,速度势	8-62
3.3.4 节流装置	8-49	4.2.2 复变函数的应用、复势、复速 度	8-62
3.3.5 堰	8-52	4.2.3 简单势流举例	8-62
3.3.6 盐水速度法	8-54	4.2.4 保角变换	8-63
3.3.7 盐水浓度法	8-54	4.2.5 保角变换举例	8-63
3.3.8 吉布生法	8-54	4.2.6 布拉修斯公式	8-63
3.3.9 指数法(弯管流量计的应用)	8-55	4.2.7 不连续流动,瑞利公式	8-64
3.3.10 电磁流量计	8-55	4.2.8 射流	8-64
3.3.11 超声波流量计	8-55	4.2.9 表观质量	8-64
3.3.12 油的流量测定法	8-55	4.3 流体的振动,波动	8-65
3.4 气体流量的测定	8-55	4.3.1 长波,重力波	8-65
3.4.1 容器法	8-55	4.3.2 满槽水的固有频率	8-65
3.4.2 容积式流量计	8-56	4.3.3 水滴的振动	8-65
3.4.3 面积式流量计	8-56	4.3.4 流体中物体振动的表观质量	8-66
3.4.4 速度分布法	8-56	4.4 小雷诺数的流动	8-66
3.4.5 节流法	8-56	4.4.1 斯托克斯近似	8-66
3.4.6 托马氏计	8-57		

4.4.2 奥森近似	8-66	5.3 激波	8-79
4.4.3 数值解	8-66	5.3.1 激波的发生	8-79
4.5 边界层	8-67	5.3.2 正激波	8-79
4.5.1 边界层	8-67	5.3.3 斜激波	8-79
4.5.2 层流边界层方程式	8-67	5.4 二元流动	8-80
4.5.3 湍流边界层方程式	8-67	5.4.1 凹面中的压缩波	8-80
4.5.4 边界层的动量方程式	8-68	5.4.2 凸面上的膨胀波	8-80
4.5.5 边界层理论应用举例	8-68	5.4.3 特征线法	8-81
4.5.6 边界层的分离	8-69	5.5 细长体绕流	8-81
4.5.7 边界层的控制	8-69	5.6 空气动力加热	8-82
4.6 油膜润滑	8-70	5.7 边界层与激波的干扰	8-82
4.7 相似律	8-71	5.7.1 边界层与激波的干扰	8-82
4.7.1 相似条件	8-71	5.7.2 模拟激波	8-82
4.7.2 雷诺数	8-71	第6章 翼型, 叶栅和螺旋桨	8-83
4.7.3 马赫数	8-71	6.1 翼型	8-83
4.7.4 弗劳德数, 格腊晓夫数, 韦伯 数	8-72	6.1.1 翼型的命名法	8-83
4.7.5 斯特劳哈尔数	8-72	6.1.2 翼型的各种系数	8-83
4.7.6 普朗特数, 派克勒数, 厄加特 数	8-72	6.1.3 性能曲线	8-83
4.7.7 模型实验	8-72	6.1.4 跨声速翼型	8-83
4.7.8 风洞实验	8-72	6.1.5 超声速翼型	8-84
4.8 湍流	8-72	6.1.6 超气蚀(SC)翼型	8-84
4.8.1 湍流	8-72	6.2 叶栅	8-85
4.8.2 运动方程式, 连续性方程式	8-73	6.2.1 关于叶栅的名称与符号	8-86
4.8.3 传递理论	8-73	6.2.2 二元叶栅的性能	8-86
4.8.4 统计理论	8-73	6.2.3 叶栅的临界负荷	8-88
4.8.5 射流, 尾流	8-74	6.3 回转流面的径向平衡	8-88
4.8.6 扩散现象	8-75	6.3.1 轴流式回转机械的内部流动	8-88
4.8.7 湍流噪声	8-76	6.3.2 流线分析	8-89
第5章 可压缩流体	8-76	6.3.3 作动圆盘理论	8-89
5.1 可压缩流体的流动	8-76	6.4 翼型和叶栅的气蚀性能	8-89
5.1.1 状态方程式	8-76	6.5 翼和叶栅的振动与噪声	8-90
5.1.2 马赫数	8-76	6.5.1 振动	8-90
5.2 一元流动	8-77	6.5.2 噪声	8-90
5.2.1 可压缩流体一元流动的基本 方程式	8-77	6.6 螺旋桨	8-91
5.2.2 基准状态	8-78	6.6.1 动量理论	8-91
5.2.3 亚声速流动与超声速流动的 差别	8-78	6.6.2 简单叶素理论	8-91
5.2.4 喷嘴与喉管的流动	8-78	6.6.3 无限叶片旋涡理论	8-91
5.2.5 范诺线和瑞利线	8-79	6.6.4 升力线理论	8-91
		6.6.5 升力面理论	8-91
		第7章 非牛顿流体, 电磁流体, 稀薄气体, 其他	8-91
		7.1 非牛顿流体	8-91

7.1.1	按流型分的流体分类	8-91	7.3	稀薄流体	8-96
7.1.2	基本方程组	8-92	7.3.1	稀薄化的影响	8-96
7.1.3	纯粘性流体	8-92	7.3.2	努森数	8-96
7.1.4	塑性流体	8-93	7.3.3	稀薄流体的流动分类	8-96
7.1.5	时间相关流体(时间依存 流体)	8-93	7.3.4	分子速度分布函数和玻耳兹 曼方程式	8-96
7.1.6	粘弹性流体	8-93	7.3.5	适应系数	8-97
7.2	电磁流体	8-94	7.3.6	作用于自由分子流中的物 体上的力	8-97
7.2.1	电磁流体力学的基本方程式	8-94	7.3.7	圆管内的流动	8-98
7.2.2	相似律	8-95			
7.2.3	哈特曼流动	8-95			

第1章 水力学基础

1.1 主要流体的物理性质⁽¹⁾

1.1.1 重度 (单位体积流体的重量) $\gamma^{(2)}$ 和密度 $\rho (= \gamma/g)$

a. 水 1 atm (大气压)、4°C 纯净的水, $\gamma = 1000 \text{ kgf/m}^3 (= 9806.65 \text{ N/m}^3)$, $\rho = 101.97 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 (= 1000 \text{ kg/m}^3)$ 。不同温度下的 ρ 、 γ 列在表 1 中。

b. 空气 干燥空气一般为

式中 t —— 温度°C;

$$\gamma = \frac{1.293}{1 + 0.00367 t} \frac{h}{760} \text{ kgf/m}^3$$

h —— 以 0°C 水银柱高度 mm 表示的压力值。

湿空气的 γ (以 γ_w 表示), 若设饱和水蒸汽在 $t^\circ\text{C}$ 时的压力为 $F \text{ mm Hg}$, 相对湿度为 φ , 则可由同温同压下干燥空气的 γ 求得:

$$\gamma_w = \gamma [1 - (0.377 \varphi F/h)]$$

$F = p_s/s_m$ (p_s —— 见表 1, s_m —— 水银的比重, 见

表 1 1 atm 下水的 $\gamma \text{ kgf/m}^3$, $\rho \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$, $\mu \text{ kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, $\nu \text{ m}^2/\text{s}$ 和饱和蒸汽压 $p_s \text{ kgf/m}^2$

(表中 μ , ν 的值均需乘上 10^{-6})

温度°C	0	5	10	15	20	25	30	40
γ	999.8	1000.0	999.7	999.1	998.2	997.1	995.7	992.2
ρ	101.96	101.97	101.94	101.88	101.79	101.67	101.53	101.18
μ	182.7×10^{-6}	155.0	133.3	116.0	102.2	90.8	81.3	66.6
ν	1.792×10^{-6}	1.520	1.307	1.139	1.004	0.893	0.801	0.658
p_s	62	89	125	174	238	323	432	752

温度°C	50	60	70	80	90	100	温度°C	p_s
γ	988.1	983.2	977.8	971.8	965.3	958.4	110	14609
ρ	100.75	100.26	99.71	99.10	98.44	97.72	120	20245
μ	55.9×10^{-6}	47.6	41.2	36.2	32.1	28.8	140	36848
ν	0.554×10^{-6}	0.475	0.413	0.365	0.326	0.295	180	102240
p_s	1257	2031	3177	4829	7149	10332	250	405600

表 2 干燥空气的 $\gamma \text{ kgf/m}^3$, $\rho \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$, $\nu \text{ m}^2/\text{s}$ (表中 ν 值均需乘上 10^{-5})

$t^\circ\text{C}$	$\gamma \text{ kgf/m}^3$				$\rho \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$				$\nu \text{ m}^2/\text{s}$			
	720	740	760	780	720	740	760	780	720	740	760	780
-10	1.271	1.307	1.342	1.377	0.1297	0.1333	0.1369	0.1405	1.317	1.281	1.247	1.215
0	1.225	1.259	1.293	1.327	0.1249	0.1284	0.1318	0.1353	1.407	1.369	1.333	1.299
10	1.182	1.215	1.247	1.280	0.1205	0.1238	0.1272	0.1305	1.500	1.460	1.421	1.385
20	1.141	1.173	1.205	1.237	0.1164	0.1196	0.1229	0.1261	1.595	1.552	1.512	1.473
30	1.104	1.134	1.165	1.196	0.1126	0.1157	0.1188	0.1219	1.693	1.647	1.604	1.563
40	1.069	1.098	1.128	1.158	0.1090	0.1120	0.1150	0.1180	1.792	1.744	1.698	1.654

(1) 主として Landolt-Börnstein, Physikalisch-Chemische Tabellen, (1923~1935), Springer-Verlag, International Critical Tables, (1928), McGraw-Hill, Kiesskalt, S., Forsch. Geb. Ing.-Wesen., 291, (1927); 芝 亀吉, 物理常数表, (昭23), 岩波書店, 東京天文台, 理科年表, 丸 善, JIS Z 8803-1965.

(2) 在表 1 和表 2 中, 欲求以 N/m^3 为单位的 γ 、以 kg/m^3 为单位的 ρ 时, 只要把表中的 γ , ρ 值乘以 9.80665 m/s^2 即可。

表3)。干燥空气的 γ 、 ρ 分别列于表2中。

表3 1 atm时压力计用液体的比重
(以4°C的水作为基准值)

温度°C	0	10	15	20	30
水银	13.5955	13.5708	13.5585	13.5462	13.5216
酒精					
100%	0.8063	0.7978	0.7936	0.7893	0.7808
90%	0.8354	0.8267	0.8224	0.8180	0.8093
80%	0.8606	0.8520	0.8477	0.8434	0.8348
甲醇					
100%	0.8102	0.8009	0.7958	0.7917	
90%	0.8374	0.8287	0.8240	0.8202	
80%	0.8634	0.8551	0.8505	0.7469	
四氯化碳	1.6326	1.6135	1.6039	1.5944	1.5754
四氯乙烷	1.6360	1.6200	1.6120	1.6040	1.5880

c. 水银 设温度为 t °C, 在1 atm、 $t > 0$ °C的范围内

$$\gamma = 13595.46 / [1 + (18.182 t + 0.00078 t^2) 10^{-5}] \text{ kgf/m}^3 \text{ (表3)}$$

d. 其他流体 (表3、表4) 以1 atm为基准, 对20°C以上的油, 大体上

$$\gamma_t = \gamma_{20} [1 - 0.00065 (t - 20)]$$

式中, γ_t 、 γ_{20} 分别表示 t °C和20°C时的 γ 。

表4 1 atm时液体的比重
(以4°C的水作为基准值)

物 质	温度°C	比 重	物 质	温度°C	比 重
海水	15	1.01~1.05	汽油	15	0.66~0.75
10%食盐水	20	1.0707	原油	15	0.7~1.0
20%食盐水	20	1.1478	植物性油	15	0.91~0.97
甘油	15	1.264	动物性油	15	0.86~0.94
甘油	20	1.261	纯硫酸	20	1.831
苯	15	0.884	纯硝酸	20	1.513
苯	20	0.879	纯醋酸	20	1.049

1.1.2 压缩率 β 和比容 v

若作用于体积为 V 的液体上的压力增大 Δp 时, 其体积就减少 ΔV , 则

$$\beta = \Delta V / (V \Delta p) \\ = \Delta v / (v \Delta p) \rightarrow - (1/v) (dv/dp)$$

式中, v 为比容 (单位重量的体积), $v = 1/\gamma$ 。各

种液体的 β 值列于表5、表6中; 而水的 v 值列于表7中⁽³⁾。

表5 水的压缩率 $\times 10^8 \text{ m}^2/\text{kgf} \ominus$

压力范围 atm	温度°C	0	10	20	50
1~25		0.508	0.484	0.475	
25~50		0.499	0.476	0.461	
50~75		0.493	0.458	0.441	
75~100		0.486	0.455	0.438	
1~500		0.460	0.433	0.420	0.403
500~1000		0.403	0.382	0.368	0.354
1000~1500		0.346	0.337	0.327	0.315

表6 液体的压缩率 $\beta \times 10^8 \text{ m}^2/\text{kgf} \ominus$

物 质	温 度 °C	压力范围 kgf/cm ²	压 缩 率
海水	10	1~150	0.44
水银	20	1~100	0.0393
甘油	14.8	1~10	0.221
酒精	14	9~38	1.01
甲醇	14.7	8~37	1.04
苯	16	8~37	0.9
橄榄油	20	1~10	0.6

表7 水的比容 v

(单位: 1 atm 4°C的水为1)

压力 kgf/cm ²	温度°C	0	20	50	100	200	300
50		0.9977	0.9995	1.0099	1.0409	1.1532	
100		0.9952	0.9973	1.0077	1.0385	1.1485	1.3979
200		0.9905	0.9929	1.0035	1.0337	1.1395	1.3612
500		0.9774	0.9815	0.9921			
1000		0.9579	0.9631	0.9744			
2000		0.9261	0.9328	0.9446			
4000		0.8808	0.8881	0.8997			

1.1.3 流体中压力波的传播速度 (声速) a

流体中压力波的传播速度为

$$a = \sqrt{dp/d\rho} = \sqrt{g/(\gamma\beta)}$$

式中 p —— 压力,

(3) 蒸汽骨组表, (1935), 1359, VDI, Bridgman und Trantz, Forsch. Geb. Ing. - Wesen., 2 (1931), 45, Amagatの表。

⊖、⊕ 原文误漏 $\times 10^8$ ——译者。

ρ ——密度。

对于 $t^\circ\text{C}$ 的纯水

$$a = 1404.4 + 4.8215t - 0.047562t^2 + 0.00013541t^3 \text{ m/s}$$

对于干燥空气

$$a = 331.68 \left(\frac{273 + t}{273} \right)^{1/2} \text{ m/s}$$

各种流体中的 a 值列在表 8 中。

表 8 流体中压力波的传播速度 $a/\text{m/s}$

物质	温度 $^\circ\text{C}$	0	20	50
干燥空气		331.7	343.6	360.8
水		1404	1483	1544
水 银		1460	1451	1437
甘 油			1923	1869
酒 精		1242	1168	1067
甲 醇		1187	1121	1024
苯			1324	1184

1.1.4 动力粘度 μ 与运动粘度 ν

当流体作层状流动时，设平行于流线的两平行平面间的距离为 dy ，速度差为 du ，则在两侧流面上作用着与流动平行的剪应力（单位面积的粘性阻力） τ 与 du/dy 成正比，即

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

比例常数 μ 称为流体的动力粘度（动力粘性系数）。

液体的 μ 随温度的上升而减小，随着压力的增加而增大。但 30°C 以下水的 μ 值，在定温下，以压力为 1000kgf/cm^2 左右时为最小。对于水，麦耶（Meyer）给出 $\mu = \mu_0 / (1 + c_1t + c_2t^2)$ 。气体的 μ 值随温度的上升而增加，萨瑟朗（Sutherland）给出

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + c}{273 + t + c} \left(\frac{273 + t}{273} \right)^{3/2}$$

式中 μ_0 —— 0°C 时的 μ ；

t ——温度 $^\circ\text{C}$ ；

c_1, c_2, c ——实验常数⁽⁴⁾。

再者，对于油类，大致为

$$\mu_p = \mu_1 e^{\alpha p}$$

式中 μ_p ——压力为 $p\text{kgf/cm}^2$ 时的 μ ；

μ_1 ——在 1atm 时的 μ ；

α ——油的种类常数，约为 $0.002 \sim 0.003\text{cm}^2/\text{kgf}$ 。

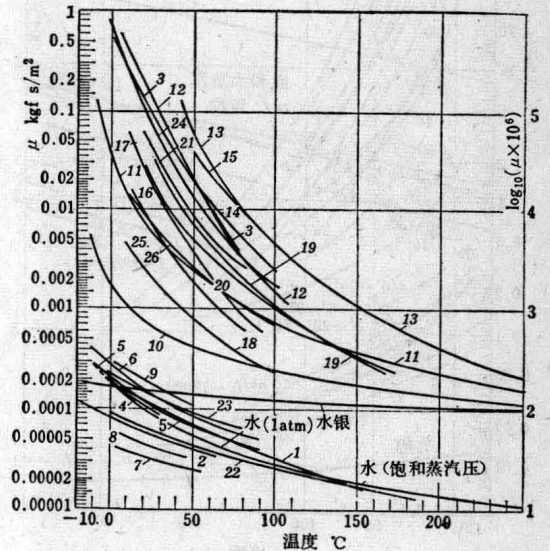


图 1 粘度与温度的关系(液体)

1—酒精 2—甲醇 3—甘油 4—海水(1.025) 5—10% 食盐水 6—20% 食盐水 7—汽油(0.694) 8—汽油(0.717) 9—煤油(0.813) 10—原油(0.855) 11—原油(0.925) 12—原油(0.96) 13—燃料油(0.984) 14—汽缸油(0.89) 15—汽缸油(0.928) 16—机械油(0.904) 17—机械油(0.91) 18—锭子油(0.88) 19—西方润滑油 SAE30 20—东方润滑油 SAE30 21—ガールモビル油 BB 22—苯 23—松节油 24—蓖麻油(0.964) 25—花生油 26—橄榄油(0.913) 括弧内的值是相对于 4°C 水的比重

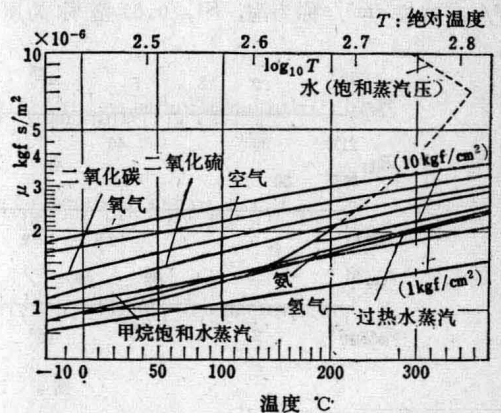


图 2 动力粘度与温度的关系(气体)

(4) 常数数值因适用的温度范围和实验公式的作者的不同而多少有所差异。表 1、表 2 中不用此值。

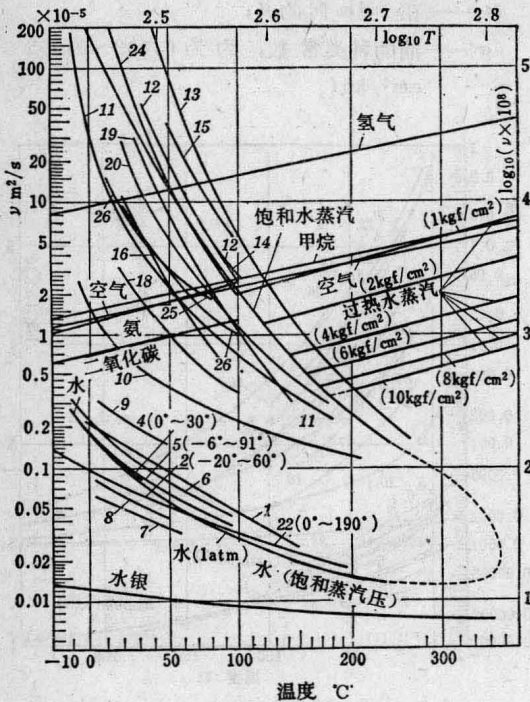


图3 运动粘度与温度的关系(图中符号与图1同)

μ 的工程单位为 $\text{kgf}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, 在 SI 单位制中为 NS/m^2 , 在 CGS 单位制中为泊 (P)

$$\begin{aligned} 1 \text{ P} &= 1 \text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{s}) \\ &= 1 \text{ dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2 \\ &= 100 \text{ 厘泊 (cP)} \\ &= 0.1 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2 \text{ (Pas)} \\ &= 1/98.1 \text{ kgf}\cdot\text{s}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

运动粘度 (运动粘性系数) $\nu = \mu/\rho$ 的单位为 m^2/s , 单位 cm^2/s 称为 沱, St, 0.01 沱 称为 厘沱

(cSt)。

各种流体的 μ 、 ν 值见表 1、表 2 和图 1 ~ 图 4⁽⁵⁾。图中未特别注明的系 1 atm 时的值。

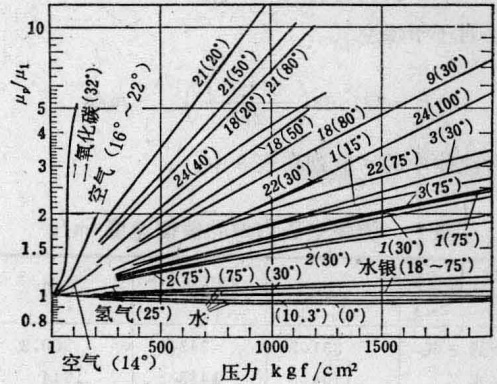


图4 动力粘度与压力的关系[图中符号与图 1 同, () 中的值为温度 °C]

若用工业粘度计测定液体的粘性, 则工业粘度数与 ν 之间大体上有如图 5 所示的关系。

商用雷氏秒 R, 恩氏粘度 °E, 国际赛氏秒 S, 其数值间有如下的近似关系式:

$$\begin{aligned} \nu \text{ (m}^2/\text{s)} &= 0.245 \times 10^{-6} R \\ &= 7.60 \times 10^{-6} \text{ °E} \\ &= 0.220 \times 10^{-6} S \end{aligned}$$

1.1.5 表面张力 H

液体的表面由于分子引力作用而收缩呈张紧的薄膜, 设想将此膜切开时, 则作用在单位长度上的牵引力称为表面张力。各种液体的 H 值列在表 9⁽⁶⁾ 和表 10 中。H 值随温度的上升而减少, 在临界温度时为零。而且随表面生成后的时间而减少。在内半

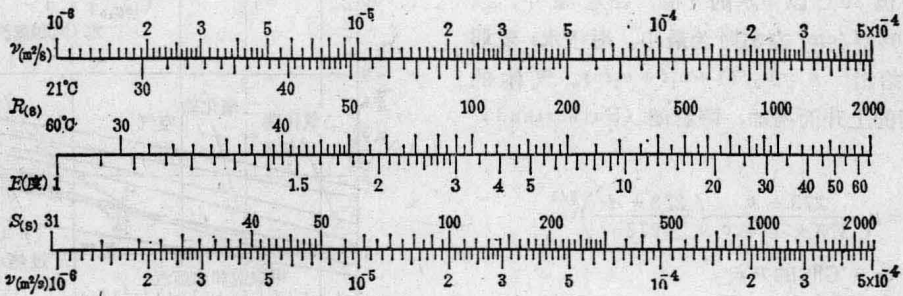


图5 工业粘度与 ν 的关系

(5) 脚注(1)および Trans. ASME, 57(1935), 193, 399, Wien, W. und Harms, F., Handbuch der Experimentalphysik, IV, 4 Teil(1932), Akademische Verlagsgesellschaft.

(6) 脚注(5)および Wien, W. und Harms, F., Handbuch der Experimentalphysik, VI (1928), Akademische Verlagsgesellschaft.

表9 液体的表面张力 N/m

物质	表面流体	0℃	10℃	20℃	40℃	70℃	100℃
水	空气	0.0756	0.0742	0.0728	0.0695	0.0644	0.0588
	饱和蒸汽	0.0733	0.0720	0.0706	0.0675	0.0626	0.0572
水银	真空	0.474	0.473	0.472	0.468	0.463	0.456
酒精	空气	0.0240	0.0231	0.0223	0.0206	0.0182	
	酒精蒸汽		0.0236	0.0228	0.0210	0.0183	0.0155

表10 20℃时表面与空气接触的液体
表面张力H N/m

水 银	0.476	乙 醚	0.0165
水银(水)	0.373	苯	0.0289
甲 醇	0.0226	橄 榄 油	0.032
煤 油	0.023~0.032	10%食盐水	0.0754
原 油	0.023~0.038	锭 子 油	0.0311

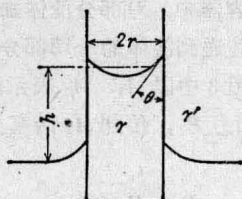


图6 毛细管现象

径为 r 的毛细管中的液体，因表面张力而如图6那样上升（或下降），其平均高度 h 为

$$h = 2H \cos \theta / [(\gamma - \gamma') r]$$

式中 γ ——液体的重度；

γ' ——覆盖于表面上的流体重度；

θ ——接触角。

a. 接触角 θ 的大小

水、盐类水溶液，有机液体等在常温大气下，与精磨光的玻璃壁接触时（液体完全湿润壁面时）， $\theta \approx 0$ ，而水银与玻璃壁在常温大气中 $\theta = 130^\circ \sim 150^\circ$ 。接触角因接触面状态（固体壁面和覆盖在表面液体的种类和状态）的不同而有很大的差异。

b. 毛细管高度 h 和比凝聚力 $a^2 = hr$ 当 $\theta = 0$ 时，

$$h = 2H / [(\gamma - \gamma') r] = a^2 / r \ominus$$

在 20°C 时，表面接触于空气的二、三种液体的 a^2 值，以 mm^2 表示之：水为 14.88，酒精为 5.763，甲醇为 5.81。因而 h 的近似值为

$$h \approx \frac{15}{r} \text{—水}$$

$$h \approx \frac{5.8}{r} \text{—酒精}$$

式中 h 、 r 的单位为 mm 。

1.1.6 水的饱和蒸汽压 p_s (表1)

1.1.7 气体对于水的溶解度

溶解于水的气体的体积与水的体积之比称为溶解度，1 atm 下的气体溶解度分列于表 11 中。其中气体体积已换算成 0°C 时的体积。并且，溶解度大体上与压力的上升成比例地增加。

表11 气体对于水的溶解度

气体 \ 温度℃	0	20	40	60	80	100
空气	0.0288	0.0187	0.0142	0.0122	0.0113	0.0111
氮气	0.0235	0.0155	0.0118	0.0102	0.0096	0.0095
氧气	0.0489	0.0310	0.0230	0.0195	0.0176	0.0170
二氧化碳	1.701	0.878	0.530	0.359		
氨气	1299	710				

1.2 水静力学

1.2.1 压力

在流体内部设想一个面，当该面两侧的流体不存在相对运动时，则作用于该面上任一点的力，通常是垂直于该面的。这个力就称为压力（或压力强度）。就是说，如果作用于微元面积 ΔA 上的总压力为 ΔP ，则压力强度 P 为

$$P = (\Delta P / \Delta A)_{\Delta A \rightarrow 0} = dP / dA$$

当压力 P 是均匀地作用于总面积 A 上时， $P = P / A$ 。以上关系即使在容器内壁面上也是如此。

把压力强度称为压力，而把遍及面上的压力总和称为总压力，以资区别。

⊖ 原文误为 $h = 2H / (\gamma - \gamma') = a^2$ ——译者。

1.2.2 压力的单位⁽⁷⁾

在 SI 单位制中,压力的单位用 N/m^2 ($=\text{kg/ms}^2$), 此处 $1\text{ N/m}^2 = 10\text{ dyn/cm}^2$, $1\text{ bar} = 10^5\text{ N/m}^2$, N/m^2 (牛顿/米²) 称为帕斯卡, 常用代号 Pa 表示。在工程单位制中, 压力单位通常用 kgf/cm^2 或 kgf/m^2 。工程大气压一般比标准大气压小。

$$\begin{aligned}\text{标准大气压 } atm &= 760\text{ mmHg} (273.15\text{ K}, \\ &g = 980.665\text{ cm/s}^2) \\ &= 1.01325\text{ bar} \\ &= 1.03323\text{ kgf/cm}^2 \\ &= 101325\text{ N/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{工程大气压 } at &= 735.52\text{ mmHg} (273.15\text{ K}) \\ &= 0.980665\text{ bar} \\ &= 1\text{ kgf/cm}^2 \\ &= 10\text{ mH}_2\text{O} (277.15\text{ K}) \\ &= 98066.5\text{ N/m}^2\end{aligned}$$

测定压力用的仪表, 通常显示的是与大气压的差值 (压力表显示超过大气压的数值, 真空表显示低于大气压的数值)。这种以大气压为基准而计量的压力, 称为计示压力 (表压)。以绝对零压力为基准而计量的压力称为绝对压力, 即

$$\text{计示压力} = (\text{绝对压力}) - (\text{大气压})$$

1.2.3 深度压力[⊖]的大小与方向

静止流体中深度为 z 的一点上的压力 p (图 7) 为

$$p = p_0 + \gamma z$$

式中 γ ——流体的重度;

p_0 ——表面压力, 即相同深度处的压力相等。

由上式得

$$dp/dz = \gamma$$

即对应于单位深度增加的压力增量, 等于流体的重度。而且, 作用于一点的压力, 不管在什么方向, 其大小均相等。深度压力, 与容器的形状和大小无关, 它等于流体的重度 γ 和深度 z 的乘积。因而, 深度和面积相等的各种底面 (图 7) 上的总压力 P , 若流体重度相同, 则上述任何情况下都相等, 而

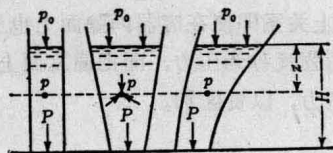


图 7 静压大小与容器的关系图

其上方所存在的流体量的多少无关。

1.2.4 水头

液体的深度或高度的量纲为 $[L]$ 。但它是沿重力方向的“高度”[⊖], 并指定了液体种类, 而不是单纯的长度, 在水力学中采用如下的物理量尺度。

a. 用作压力尺度的水头 H

若以离液面为 H 的深度处的水平单位面积作为底面, 则水头 H 就等于该底面至液面的液柱重量的压力。因而, 当给定了水头和流体种类时, 压力自然就可以确定, 即

$$H = p / \gamma$$

将水柱高 H mm 写成 H mm H_2O (或 Ag [⊖]), 例如

$$1\text{ mmH}_2\text{O} = 1\text{ kgf/m}^2$$

b. 用作能量尺度的水头 H 它表示单位重量液体改变高度 H 时的位能变化。如果考虑的是液体的单位重量, 就应采用水头 H , 直接作为能量的方便尺度。

1.2.5 压力的传递 (帕斯卡原理)

在密闭的容器中, 对部分流体加压, 则此压力就毫不改变地传递到流体的一切部分, 此即所谓帕斯卡原理。在图 8 中以 A_1 , A_2 表示活塞截面积, 在 A_1 活塞上加力 P_1 , 传到 A_2 活塞上的力 P_2 , 根据上述原理为

$$P_2 = P_1 A_2 / A_1$$

若 A_1 比 A_2 小, 就可得到比 P_1 大得多的力 P_2 。水压

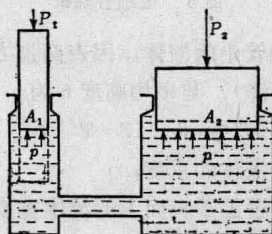


图 8 水压机原理

- (7) Wien, W. und Harms, F., Handbuch der Experimentalphysik, I (1931), 58, IV, 1 Teil (1931), 489, Akademische Verlagsgesellschaft, Geiger, H. und Scheel, K., Handbuch der Physik, II (1926), 327, Springer, Int. J. Heat & Mass Transfer, 9-9 (1966-9), 837.

⊖ 决定于深度的压力, 简称为深度压力——译者。

⊖ 指压力高度——译者。

⊖ 原文误为 A_0 ——译者。