

[美] Jamal Mohammed Saleh 编

流体流动

手册

邓敦夏 译 贺礼清 审

FLUID FLOW
HANDBOOK



中国石化出版社

流体流动手册

【美】Jamal Mohammed Saleh 编

邓敦夏 译 贺礼清 审

中国石化出版社

内 容 提 要

本书对流体流动的基本概念、流体力学、应用方程等流体力学方面的基础知识作了系统介绍。对工程中常见流体(多相流、摩尔流、管道等)的流动理论及计算、流量计量、流体流量控制、纳米流动理论等进行了研究。是从事油气田开发、石油化工的流体计算以及水利水电、给排水、流体集输工程等等工作人员的参考书。

本书读者对象:从事水利、石油工程、给排水等工程技术人员和大专院校师生等。

著作权合同登记 图字:01-2003-2116号

Original edition Copyright (2002) by McGraw-Hill. All rights reserved

中文版权(2003)为中国石化出版社所有。版权所有,不得翻印。

图书在版编目(CIP)数据

流体流动手册/(美)塞埃(Saleh, J. M.)编;邓敦夏译.
—北京:中国石化出版社,2004
ISBN 7-80164-213-9

I. 流… II. ①塞…②邓… III. 流体流动—手册
IV. 0351.2-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 044779 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

北京大地印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 16 开本 40.25 印张 1029 千字
2004 年月第 7 版第 1 版 2004 年 7 月第 1 次印刷

定价:98.00 元

序 言

此书是为在需要流体力学知识帮助的众多科学领域中提供专业技术指导而编撰的。我非常感谢参与编写此书的 26 位专家及教授,他们为出版此书而耗费了大量的时间并提供了专业理论技术指导。我从事有关石油与化工的流体力学计算机模拟软件的研制与集输工业开发已有数年。虽然作为一个此专业的工程师数年来一直从事油气开发与储运的流体工程研究,但是,我深知如果没有大家对我的帮助与支持的话,我是不可能单独完成如此艰巨的科研项目的。我非常高兴在编写此书的过程中得到了在流体力学方面有深入研究的专家教授的指导。我也在校对不同章节的同时学习到了更多的专业知识,而且我深信具有不同知识基础的读者都将会喜爱并且会细心的阅读此书。

在此特别感谢 Lone Wolf 企业的全体员工、Roger Woodson, Barb kang 和 Rick Sutherland 以及他们在我编写此书过程对我耐心的指导。此书的出版与我的家人为我所做出的牺牲也起着重要的作用。在我刚开始编写此书时,我的女儿 Huda 刚出生一周,我那时多数时间会感到心烦意乱,但她的微笑与啼哭却日夜陪伴着我。我在 18 个月后写下了这篇“序言”,此时的我又感到心烦意乱,但这次是因为女儿的粉笔画。我还要感谢我其他几个孩子在我写书之初就给予我的关爱和为此做出的牺牲,他们伴着我的写作中成长,他们分别是 Sondoss, Yahya 和 Heba。我的妻子更是不断地帮助我打字并且为此书排版制表。当我感到无助和迷茫时她就像暗夜中的明星一样给我以克服困难的信心。我深深的感谢我父母在我编写此书时给我的不断的鼓励与支持。

编 者

Jamal Mohammed Saleh

译 者 的 话

《流体流动手册》《Fluid Flow Handbook》是由 Jamal M Saleh 编,各章节分别由美国、加拿大和新加坡等国 26 位专家撰写的。其内容既有流体力学的基础,同时又涉及众多学科领域,其内容之丰富,范围之广泛,对从事油气田开发、石油化工的流体计算以及流体集输工程、水利水电、给排水等涉及流体力学应用与研究,甚至对纳米流动理论研究,都具有极其重要的参考价值。由于编者众多、涉及专业较广,其专业术语表达和用词都有一定的差异,加之受翻译时间和译者的水平所限,译文中一定会存在一些疏漏和错误,敬请读者不吝赐教,以便再版时予以更正。

参加本书翻译的还有石油大学付静、仇玲英、贺芳同志、中国石化刘志波同志、中国石油管道储运公司卫延龙、王喜成同志。本书在翻译过程中还得到了石油大学石油工程学院的部分研究生的大力支持,在此表示感谢。

译 者

第一章	引言	(1)
第二章	流体的性质	(3)
第三章	流体流动和热力学	(22)
第四章	流体静力学	(40)
第五章	流体流动:基本概念	(52)
第六章	一般方程	(66)
第七章	连续性方程的应用	(78)
第八章	不可压缩流动	(88)
第九章	气体在管路与管道中的流动	(111)
第十章	流动的局部损失	(139)
第十一章	气液两相流动的流体力学	(159)
第十二章	非牛顿流体	(191)
第十三章	两相流动:液固和气固流动	(210)
第十四章	分子流	(226)
第十五章	流动计量	(251)
第十六章	流量控制	(272)
第十七章	流体机械	(288)
第十八章	流体流动网络	(303)
第十九章	流体在明渠中的流动	(334)
第二十章	浸入物体面上的流体流动	(362)
第二十一章	多孔介质中的输送现象	(391)
第二十二章	流场的瞬变	(419)
第二十三章	化学反应装置中的流体动力学因素	(444)
第二十四章	计算流体动力学简介	(469)
第二十五章	管内腐蚀和侵蚀	(497)
第二十六章	血液流动动力学	(522)
第二十七章	管内流动的热传递	(538)
第二十八章	纳米流动	(546)
第二十九章	流动安全	(576)
第三十章	紊流体系通过添加聚合物减阻	(594)
第三十一章	紊流	(616)

第一章 引言

工程上,在绝大多数物体内部或周围都存在着流体流动。气体或流体通常存在于许多类型的机械装置内,如泵、风扇、压缩机、管线、热交换器,通常也绕流许多物体,如建筑物、坝体、汽车、飞机。为避免健康、安全、环境危害或经济灾难,必须适当地设计气体或液体与其周围物体(内流或绕流)的相互作用力。流体流动应用于许多的工程和科学领域,如海洋工程、气象学、生物科学、航天工程、化学、制药、石化工业、陆上或海上流体输送工程。对所有涉及流体在物体内部流动或外部绕流的工程学科,学习流体流动是很重要的。

尽管在人类历史上人们何时开始研究流体流动是非常模糊的,许多古代文明证实人们很早已开始使用流体力学的原理来开发供水和灌溉系统,建造大小船只。阿基米德(Archimedes, 287~212 BC)的著作是关于流体力学的最早知识之一。在15~16世纪,关于流体力学的一系列贡献(如达芬奇, Leonardo da Vinci; 伽利略, Galileo Galilei)标志着实验流体力学的开始。帕斯卡(Blaise Pascal, 1623~1662)的工作阐明了压力概念和压力测量装置的许多原理。牛顿(Isaac Newton, 1642~1727)讨论了流体阻力和粘性流体。伯努力(Daniel Bernoulli, 1700~1782)阐明了伯努力原理,后来发展为欧拉(Leonhard Euler, 1707~1783)公式。目前理论和实验流体力学仍在向前发展。鼓励读者参阅引言后的参考文献来探索流体力学发展的详细历史。流体力学可以分为许多类,如:

- 层流和湍流;
- 牛顿流和非牛顿流;
- 可压缩流和不可压缩流;
- 均匀流和非均匀流;
- 稳定流和非稳定流;
- 管道流和明渠流;
- 等温流和非等温流。

在书中,读者可以找到有关章节讨论以上分类,甚至更多。这本书的目的是为读者提供关于流体流动许多领域一个便捷的参考。除了涵盖流体流动的传统领域,如管和管网中的压降、泵、流量计、不可压缩流动、可压缩流动、多相流、由于管道接头引起的压力损失,我还尽力增加了一些流体流动非传统领域和新发展起来的领域,如纳米、微米尺度的槽道流、天然气、石油管线在深水中的安全问题,真空中的流动、血液动力学、与管道流动有关的腐蚀、瞬态流等。

通过定义、分类和工业应用,读者将对每一个专题有一个广泛的理解,同时,方程、表格和插图可以使读者分析、评价和解决流体力学问题。不追求每一个专题都详尽,而是提供一个理论和估算方法平衡的切入点,使读者可以轻松学习,应用理论去解决实际问题。每章后的参考文献是某个特定专题的很好的资源。

虽然小部分章节涉及流体流动方程的推导,如第6章,一般方程;第7章,方程变化的应用和第31章,湍流,手册的绝大部分提供方程、插图和建议来分析和解决问题。很有必要增加流体静力学章节(第4章)以阐明许多的概念,如压头。第2、3、27章分别讨论流体

性质、流体流动和热力学，管流中的传热。这些是很必要的，因为流体流动受流体性质、流动过程的热力学和流体与周围物体之间热传递的直接影响。

第 8、9、11、12、13 和 14 章包括各种管流的原理和特征。当考虑管道中的流动时，必须包含管道和其他控制流体流动因素对流动行为的影响。流体流动、管道，流动的配件，如接头、流量计，流动控制和流体机械分别在第 10 章，流动局部损失；第 15 章，流动计量；第 16 章，流量控制和第 17 章，流体机械中讨论。在现实生活中流体在复杂的管网中流动。第 18 章，讨论管网的分析和设计。

明渠中的流动、流体绕流掩体、流体在多孔介质中的流动在市政和工业部分有广泛的应用，因此在第 19、20 和 21 章分别讨论。许多关于流体流动的应用必须作为瞬态流动，而不是稳定流动，来解释压力、温度、流速和其他变量随时间的变化趋势。这些变化可能非常剧烈，以至损害输送管线。第 22 章，讨论非稳定流。第 23 章，讨论处理设备如混合器、反应器、接触器和热交换器流体动力学。处理器的效率强烈依赖于其内的流体动力学行为。严重的故障，如串孔、死区等，可能是由于没有合适地设计设备内的流体动力学行为。第 24 章，计算流体动力学包含了迅速发展的计算流体动力学科学。这一章讨论流体控制方程的数值近似和解方程组的直接或迭代算法。流体诱导的管道腐蚀是工业中常遇到的问题，并可能损坏操作系统。第 25 章，讨论流体诱导的腐蚀问题。

第 26 章，血液动力学，讨论生物流体力学或流体在我们体内的流动，这对医学界是个重要的课题。微米和纳米尺度的装置是新兴的技术，在生物医药工程、信息技术、材料工程、能源和环境工程领域有许多的应用。第 28 章，讨论微米和纳米尺度槽道中的流动。

从西非海岸的深水油藏和墨西哥湾深处地层开发和输送石油和天然气遇到许多挑战，如水合物的形成和石蜡的沉积。第 29 章，讨论石油和天然气的输送。节省能源已经、必将继续引起世界文明的关注，因为流体的输送需要泵的能量。第 30 章，讨论流体流动和减阻。

参 考 文 献

1. Rouse, H. and Ince, S. 1963. "History of Hydraulics." Iowa Institute of Hydraulic Research, Iowa City, Dover, New York
2. Tokaty, G. A. 1971. "History and Philosophy of Fluidmechanics." G.T. Foulis and Co., Ltd., Oxfordshire, Great Britain.

第二章 流体的性质

为了很好地完成工程设计和分析流体流动问题，很有必要知道和理解流体的物理和输运性质。与流体流动分析和设计最密切相关的物理和输运性质是密度和粘度。大多数流体动力学函数和压降函数是密度和粘度的某一函数。表面张力是液相的一种输运性质，在两相流中起作用。精确的流体流动设计需要准确的方法预测流体的密度、粘度和表面张力。尽管有关流体物理和输运性质的主题非常复杂和冗长，可能需要一本像本书厚度的书来讨论，流体性质对流体动力学计算有重要的影响，对它们作一个简单介绍是很必要的。下面各部分简单介绍与流体流动有关的流体性质的定义、单位和预测方法。

2.1 流体密度

流体密度定义为单位体积内流体的质量。流体密度的性质对流体动力学和压降计算有敏感的作用。对给定的质量流率，流体速度和压降是流体密度的函数。下面的算例说明密度对气体摩擦压降计算的影响。

例 2.1

在一个 4in(101.6 mm)、40 型管内的气体流率为 5000lb/h(2267.96kg/h)。为说明密度对单位管长摩擦压降(表示为损失压头)的影响，使用下面的例子。

工况 1

压力：14.7psia(101.35kPa)

温度：60°F(15.55°C)

管横截面积：0.0884ft²(8.212 × 10⁻³m²)

流体密度：0.07634lb/ft³(1.222kg/m³)

流体速度定义为：

$$V = m/\rho A \quad (2.1)$$

式中 V ——速度，ft/s(m/s)；

m ——质量流率，lb/s(kg/s)；

ρ ——流体密度，lb/ft³(kg/m³)；

A ——管横截面积，ft²(m²)。

由式(2.1)可以计算速度为 41.16ft/s(12.54m/s)。

假设摩擦因子是常数，为 0.016，使用达西方程来计算单位管长的摩擦压头

$$h = \frac{fL}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.2)$$

式中 f ——Moody 摩擦因子；

D ——管径，ft(m)；

L ——等效长度，ft(m)；

h ——压头损失，ft(m)；

g ——重力加速度常数(32.174ft/s^2 , 9.81m/s^2)。

从式(2.2)可以计算出: 摩擦压头损失 $h = 1.255\text{ft}(0.382\text{m})$

工况 2

压力: $50\text{psia}(344.74\text{kPa})$

温度: $360^\circ\text{F}(182.22^\circ\text{C})$

流体密度(PPDS2™): $0.16445\text{lb/ft}^3(2.634\text{kg/m}^3)$

流体速度 $\approx 95.53\text{ft/s}(29.12\text{m/s})$

假设摩擦因子是常数, 为 0.016, 使用方程(2.2)来计算单位管长的摩擦压头为 $13.52\text{ft}(4.123\text{m})$ 。

上面的例子说明了密度对摩擦压降计算结果的影响。工况 1 和工况 2 之间的惟一差异是密度的不同。密度值的变化影响流体的速度, 进而影响最终的压降值。许多流体动力学参数, 如雷诺数、压降和两相流中的流型图是速度的非线性函数。例如, 预测均质流体中摩擦压降的达西方程(2.2)是速度的非线性函数。对于不可压缩流体(如液体), 密度强烈依赖于温度, 而液体密度微弱依赖压强。然而, 如果流体是气体, 密度强烈依赖于温度和压力。液体密度随温度的增加而降低, 而气体密度随温度的增加而降低, 随压力的增加而增加。图 2.1 表明空气密度是温度和压力的函数。密度的单位是单位体积内的质量, 如, 磅每立方英尺, 千克每立方米, 克每立方厘米。下面介绍预测纯气体和纯液体及混合物密度的方法和资料。

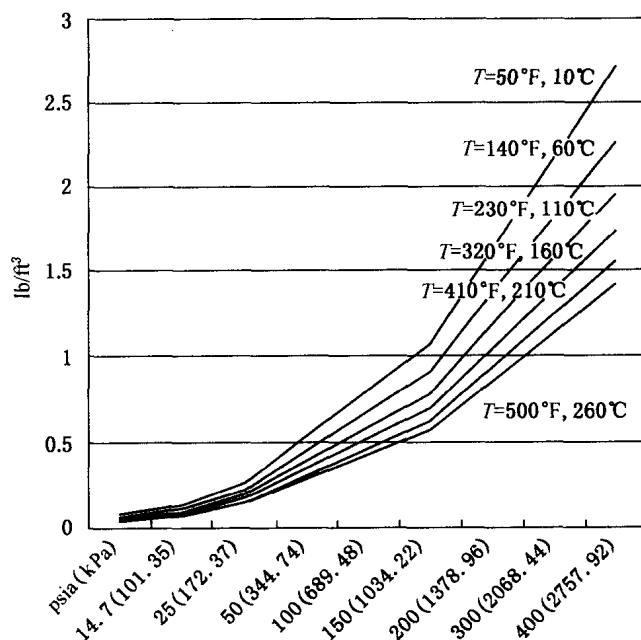


图 2.1 空气密度是温度和压力的函数

(为把图中的值转变为 kg/m^3 , 把图中的值乘 16.018)

2.1.1 纯组分液体密度

许多化学和研究组织编辑了几百种纯组分有机和无机液体的实验资料。下列的参考文献提供了一个很好的有关纯组分液体密度的资料:

(1) 物理性质资料设计协会(DIPPR), 是美国化学工程师协会(AIChE)的一个组织, 提

供了大量的, 超过 1500 种液体密度的实验数据。数据被拟合系数依赖于温度的多项式曲线。通过许多软件的用户界面, 这些数据可以买到。

(2) 化学性质手册(Yaws 编)列出了 1700 多种有机和无机化合物的 20 种依赖于温度的液体和蒸气性质, 如粘度、密度、蒸气压力和热容。

(3) 在德克萨斯 A&M 大学的热力学研究中心也编纂了上千种物质在很宽范围内的数据。详细的信息可通过他们的网址 <http://www.tcreweb.tamu.edu> 得到。

图 2.2 表示几种选择的纯组分液体密度。

饱和液密度也可由修正的 Rackett 方程估计, 修正的 Rackett 方程可以表示为

$$V_s = \frac{RT_c}{P_c} Z_{RA}^{[1+(1-T_r)^{2/7}]} \quad (2.3)$$

式中 T_c ——临界温度;

P_c ——临界压力;

R ——通用气体常数;

Z_{RA} ——对每一组分的特定常数;

V_s ——饱和液摩尔体积。

Z_{RA} 的值可以参考 Reid, Rackett 和 Spencer 和 Danner 的著作, 或由 Yamada 推荐的下列关系式估计。

$$Z_{RA} = 0.29056 - 0.08775\omega \quad (2.4)$$

式中 ω ——离心因子。

例 2.2

用修正的 Rackett 方程估计水的饱和液在 176°F (80°C) 时的密度, 并与实验值 60.667 lb/ft³ (971.79 kg/m³) 比较。

解:

由表 2.1 查到水的临界值如下:

$$T_c = 1165.14^\circ\text{R} (647.3\text{K})$$

$$P_c = 3208.23\text{psia} (22120.15\text{kPa})$$

$$\omega = 0.344 (\text{离心因子})$$

水的 $Z_{RA} = 0.2338$ (表 3.10, Reid)

代入方程(2.3), 其中 $T_r = 0.5455$

$$V_s = \frac{10.73 \times 705.47}{3208.23} 0.2338^{[1+(1-0.5455)^{2/7}]}$$

$$V_s = 0.28559\text{ft}^3/\text{lbmol} (0.0178\text{m}^3/\text{kmol})$$

$$\rho_s = (1/V_s) \times Mw = (1/0.28559) \times 18 = 63.027\text{lb}/\text{ft}^3 (1009.56\text{kg}/\text{m}^3)$$

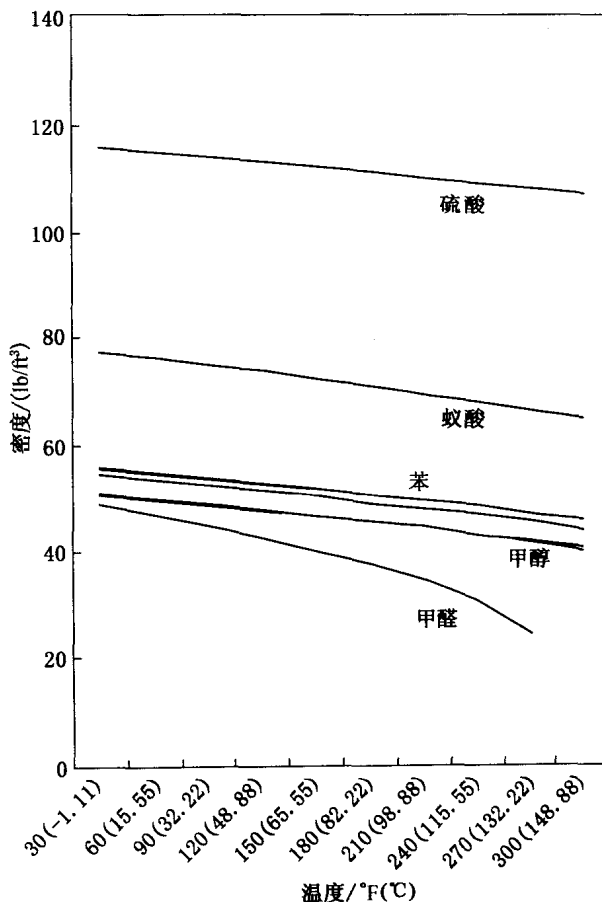


图 2.2 几种选择的纯组分液体是温度的函数
(为把图中的值转变为 kg/m³, 把图中的值乘 16.018)

表 2.1 一些工业常用气体的临界值

气 体	方 式	分子量	临界压力/ psia(kPa)	临界温度/ °R(K)	临界体积/ (ft ³ /lbmol) (cm ³ /gmol)	离心因子
甲 烷	CH ₄	16.043	667.38 (4601.45)	343.08 (190.6)	1.587 (99.2)	0.008
乙 烷	C ₂ H ₆	30.07	708.5 (4884.9)	549.72 (305.4)	2.368 (148.0)	0.098
丙 烷	C ₃ H ₈	44.097	615.93 (4246.7)	665.64 (369.8)	3.248 (203.0)	0.152
<i>n</i> -丁烷	C ₄ H ₁₀	58.124	551.25 (3800.75)	765.36 (425.2)	4.08 (255.0)	0.193
<i>n</i> -戊烷	C ₅ H ₁₂	72.151	489.51 (3375.07)	845.28 (469.6)	4.864 (304.0)	0.251
<i>n</i> -己烷	C ₆ H ₁₄	86.178	430.71 (2969.66)	913.32 (507.4)	5.92 (370.0)	0.296
<i>n</i> -辛烷	C ₈ H ₁₈	114.232	360.15 (2483.16)	1023.84 (568.8)	7.872 (492.0)	0.394
<i>n</i> -庚烷	C ₇ H ₁₆	100.205	396.9 (2736.54)	972.36 (540.2)	6.912 (432.0)	0.351
氢	H ₂	2.016	188.16 (1297.32)	59.76 (33.2)	1.04 (65.0)	0.0
氮	N ₂	28.013	492.45 (3395.34)	227.16 (126.2)	1.432 (89.5)	0.04
乙 炔	C ₂ H ₂	26.04	890.4 (6139.7)	556.4 (309.1)	1.803 (112.7)	0.190
气/水	H ₂ O	18.015	3208.0 (22118.5)	1165.14 (647.3)	0.9136 (57.1)	0.344
二氧化碳	CO ₂	44.01	1070.16 (7378.54)	547.56 (304.2)	1.504 (94.0)	0.225
氧	O ₂	31.999	732.06 (5047.4)	278.28 (154.6)	1.1744 (73.4)	0.021

水的密度是 63.027lb/ft³(1009.56kg/m³), 比实验值约高 3.89%。在高压下的液体密度, 压缩液体密度, 也可由状态方程计算。状态方程的应用在气体密度部分详细讨论。

2.1.2 混合物液体密度

混合物液体密度通过下面的纯组分摩尔体积混合法计算。当混合物各组分差异不是太大时, 混合法可以给出很好的近似。

$$\frac{1}{\rho_m} = V_m^L = \sum_i^N x_i V_i^L \quad (2.5)$$

式中 N ——混合物纯组分数目;

V_m^L ——混合物摩尔体积, ft³/lbmol(m³/kmol);

V_i^L ——纯组分摩尔体积, ft³/lbmol(m³/kmol);

x_i ——组分 i 的摩尔分数;

ρ_m ——混合物摩尔密度, lbmol/ft³(kmol/m³)。

例 2.3

n -己烷和 n -庚烷组成的混合物(摩尔组成 50%), 求其在 77°F(25°C)和 14.7psia(101.326kPa)下流体的密度, 并与报告值 41.565lb/ft³(665.807kg/m³)比较。

解:

纯组分 n -己烷和 n -庚烷的密度分别为 40.957lb/ft³(656.068kg/m³)和 42.54lb/ft³

(681.425 kg/m³), 由式 2.5, 混合物的密度计算为

	$\rho_i / (\text{lb}/\text{ft}^3) (\text{kg}/\text{m}^3)$	Mw_i	$V_i^L / (\text{ft}^3/\text{lbmol}) (\text{m}^3/\text{kmol})$
n -己烷	40.957(565.068)	86.178	2.104(0.1312)
n -庚烷	42.54(681.425)	100.205	2.355(0.1468)
$V_i^m = 0.5 \times 2.104 + 0.5 \times 2.355 = 2.229 \text{ft}^3/\text{lbmol} (0.139 \text{m}^3/\text{kmol})$			
$\rho_m = 1/2.229(0.5 \times 86.178 + 0.5 \times 100.205) = 41.79 \text{lb}/\text{ft}^3 (669.477 \text{kg}/\text{m}^3)$			

混合物液体密度的计算值比实验值高 0.54%。

修正的 Rackett 方程式 2.3, 也可以用来计算混合物液体密度。为了与混合物临界值对应, 方程中的一些相必须修改。用于混合物修正的 Rackett 方程为

$$V_m = R \left(\sum \frac{x_i T_{ci}}{P_{ci}} \right) Z_{RAm}^{[1+(1-T_r)^{2.7}]} \quad (2.6)$$

式中 V_m ——混合物液体摩尔体积。

$$Z_{RAm} = \sum x_i Z_{RAi}$$

有许多混合法则用来计算混合物的折合温度。一个简单的表达式为

$$T_r = \frac{T}{\sum x_i T_{ci}}$$

例 2.4

用修正的 Rackett 方程解例 2.3。

解:

n -己烷和 n -庚烷的 Z_{RA} 值分别是 2.635 和 2.604(表 3.10, Reid)。

	Mw	$T_c / ^\circ\text{R} (\text{K})$	$P_c / \text{psia} (\text{kPa})$
n -己烷	86.178	913.5(507.5)	436.54(3009.85)
n -庚烷	100.205	972.54(540.3)	397.38(2739.8)
$T_r = 630.27 / (0.5 \times 913.5 + 0.5 \times 972.54) = 0.668$			
$Z_{RAm} = 0.5 \times 0.2635 + 0.5 \times 0.2604 = 0.2619$			

把上述混合物数据代入方程(2.6), 得到

$$\begin{aligned} V_m &= 10.73 \times (0.5 \times 913.5/436.54 + 0.5 \times 972.54/397.38) \times 0.2619^{[1+(1-T_r)^{2.7}]} \\ &= 2.398 \text{ft}^3/\text{lbmol} (0.1495 \text{m}^3/\text{kmol}) \end{aligned}$$

$$\rho_m = (1/V_m) \times Mw(\text{平均}) = 38.84 \text{lb}/\text{ft}^3 (622.28 \text{kg}/\text{m}^3)$$

2.1.3 气体密度

气体密度由下列修正的理想气体方程估计,

$$\rho = \frac{PMw}{ZTR} \quad (2.7)$$

式中 P ——绝对压力;

Mw ——气体分子量;

T ——绝对温度;

Z ——压缩因子;

R ——通用气体常数。

任何一致单位系统都可以应用。表 2.2 列出了不同单位制的通用气体常数数值。压缩因子 Z 指气体在高温高压下偏离理想气体行为。在标准条件下(1 大气压, 60°F), Z 趋近于 1.0。随着气体温度和压力的增加, 压缩因子减少。然而, 在非常高的压力下, $P_r > 5$ 时, 压缩因子可能超过 1。有许多的关系式和方法可以预测气体压缩因子。这些方法可以分为:

表 2.2 气体常数

R 单位	R 值	R 单位	R 值
$\text{psia} \cdot \text{ft}^3 / (\text{lbmol} \cdot ^{\circ}\text{R})$	10.732	$\text{kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kmol} \cdot \text{K})$	8.3145
$\text{Atm} \cdot \text{cm}^3 / (\text{mol} \cdot \text{K})$	82.057	$\text{BTU} / (\text{lbmol} \cdot ^{\circ}\text{R})$	1.987
$\text{Bar} \cdot \text{cm}^3 / (\text{mol} \cdot \text{K})$	83.144	$\text{cal} / (\text{gmol} \cdot \text{K})$	1.987
$\text{J} / (\text{kmol} \cdot \text{K})$	8314.3		

(1) 实验表格和图, 压缩因子是折算温度和压力的函数。

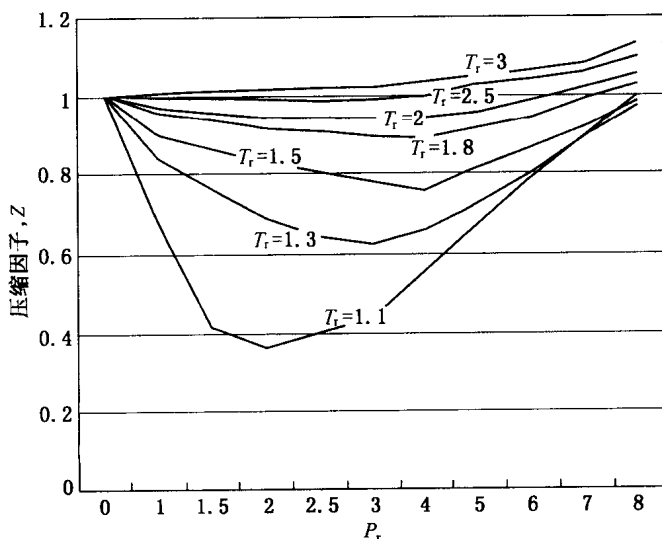
(2) 实验表格和图的解析拟合式 $Z = f(T_r, P_r)$ 。

(3) 状态方程。

下面通过例子对上面的分类进行简单的讨论。

2.1.3.1 从图获得压缩因子

从实验图、表获得压缩因子 Z , 是最早估计压缩性的方法之一。对纯组分气体, 压缩因子是折算温度和折算压力的函数, 对混合气体来说, 压缩因子是混合物拟折算温度和拟折算压力的函数。压缩性表格的例子由 Standing、Kata、Nelson 和 Obert 绘制, 图由气体供应商协会绘制。图 2.3 表示一个广义压缩因子图是折算温度和折算压力的函数。这些图的差异在于作者对实验数据的选择和绘图方法的不同。对不同 T_r 、 P_r 范围的压缩因子, 可由其他的图获得。这些图被称为两参数图, 因为只需两个参数来估计压缩因子 Z 。两参数图表可对非极性气体的压缩因子提供一个近似的估计。它们不被推荐为对氢气、强极性分子气体的压缩性进行估计。对这些图表, 只需要折算温度和折算压力来读取压缩因子 Z 。对单组分气体, 折算压力和折算温度分别定义为

图 2.3 压缩因子 Z 与降低温度和降低压力的关系

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad (2.8)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (2.9)$$

式中 T_c ——绝对临界温度；

P_c ——绝对临界压力；

T, P ——和临界温度和临界压力单位一致的气体绝对温度和压力；

T_r, P_r ——折算温度和压力，无量纲。

纯组分气体的临界值可由临界值表[Reid; Yaws]得到。表 2.1 列出了一些最常用工业气体的临界值和分子量。

对已知组分的混合气体，混合物的折算温度和折算压力由方程 2.8~2.9 和混合物的拟临界数据而不是真实临界数据计算。拟临界数据有下列方程组获得

$$T_c = \sum_{i=1}^N x_i T_{ci} \quad (2.10)$$

$$P_c = \sum_{i=1}^N x_i P_{ci} \quad (2.11)$$

式中 T_{ci} ——混合物 i 组分的绝对临界温度；

P_{ci} ——混合物 i 组分的绝对临界压力；

x_i ——混合物 i 组分的摩尔分数；

N ——混合物中组分总量；

T_c ——混合物拟临界温度；

P_c ——混合物拟临界压力。

当相对密度或分子量是气体惟一已知的参数，也就是气体的组成未知时，例如许多的天然气井的情况，拟临界值可由美国气体协会的公式估计

$$P_c = 690 - 31S_g \quad (2.12)$$

$$T_c = 157.5 + 336.1S_g \quad (2.13)$$

式中 S_g ——标准条件下气体相对密度，无量纲；

P_c ——混合物拟临界压力，psia；

T_c ——混合物拟临界温度，°R。

标准状况下气体的相对密度定义为气体标准状况下的密度与空气标准状况下密度的比值。

$$S_g = \frac{\rho_{\text{Gas}}}{\rho_{\text{Air}}} = \frac{Mw_{\text{Gas}}}{Mw_{\text{Air}}} \quad (2.14)$$

式中 Mw ——分子量。

方程 2.12 和 2.13 适用于相对密度小于 0.7 的碳氢化合物。Hankinsin 等提出下列的方程组来估计相对密度在 0.55~1.7 之间的天然气的拟临界值

$$P_c = 709.64 - 58.718S_g \quad (2.15)$$

$$T_c = 170.491 + 307.344S_g \quad (2.16)$$

式中 S_g ——标准条件下气体相对密度，无量纲；

P_c ——混合物拟临界压力，psia；

T_c ——混合物拟临界温度, °R。

方程 2.15 和 2.16 适用于杂质含量小于 7% 的情况。

例 2.5

估计天然气在 110°F (43.3°C) 和 270psia (1861.6kPa) 条件下的压缩因子和密度。天然气的平均分子量为 31.8。

解:

用方程 2.14 估算气体的相对密度

$$S_g = 31.8/29 = 1.09$$

用方程 2.15 和 2.16 分别算气体的临界压力和临界温度。

$$P_c = 709.64 + 58.718S_g = 773.6\text{psia}(5334.11\text{kPa})$$

$$T_c = 170.491 + 307.344S_g = 505.5^\circ\text{R}(280.8\text{K})$$

气体的折算压力和折算温度可分别由方程 2.8 和 2.9 估算。

$$T_r = (110 + 459.69)/505.5 = 1.127$$

$$P_r = 270/773.6 = 0.34$$

由图 2.3 读得压缩因子 $Z = 0.94$

气体密度由方程 2.7 计算

$$\rho = \frac{MwP}{ZRT} = \frac{31.8 \times 270}{0.94 \times 10.73 \times 569.69} = 1.494\text{lb}/\text{ft}^3(23.93\text{kg}/\text{m}^3)$$

为提高两参数方法的精确性, 建议使用第三个参数来考虑气体极性效应。Lee 和 Kesler, 美国石油协会在 6B1.1 推荐的方法是三参数方法近似计算压缩因子 Z 是临界值函数的例子。三参数方法可近似为:

$$Z = Z^{(0)} + \omega Z^{(1)} \quad (2.17)$$

式中 Z ——系统压力和温度下的压缩因子;

ω ——离心因子;

$Z^{(0)}$ ——一个无极性简单流体的压缩因子;

$Z^{(1)}$ ——偏差项。

由 Lee 和 Kesler 推荐的 $Z^{(0)}$ 和 $Z^{(1)}$ 值的一部分列于表 2.3 和表 2.4 中。关于 $Z^{(0)}$ 和 $Z^{(1)}$ 值的完全列表请参考 Reid, Lee 和 Kesler。

表 2.3 $Z^{(0)}$ 值

$T_r \downarrow \quad P_r \rightarrow$	0.010	0.10	0.40	0.80	1.20	1.50	2.00	5.00	10.0
0.30	0.0029	0.0290	0.1158	0.2315	0.3470	0.4335	0.5775	1.4366	2.8507
0.55	0.9804	0.0195	0.0778	0.1553	0.2323	0.2899	0.3853	0.9475	1.8520
0.80	0.9935	0.9319	0.0661	0.1307	0.1942	0.2411	0.3182	0.7598	1.4456
0.97	0.9963	0.9625	0.8338	0.5580	0.2055	0.2474	0.3164	0.7052	1.2968
1.02	0.9969	0.9679	0.8610	0.6710	0.2629	0.2715	0.3297	0.6980	1.2650
1.30	0.9985	0.9852	0.9396	0.8764	0.8111	0.7624	0.6908	0.7358	1.1580
1.80	0.9995	0.9955	0.9823	0.9659	0.9511	0.9413	0.9275	0.9297	1.1391
2.00	0.9997	0.9972	0.9892	0.9796	0.9715	0.9664	0.9599	0.9772	1.1516
2.20	0.9998	0.9983	0.9937	0.9886	0.9847	0.9826	0.9806	1.0094	1.1635
2.40	0.9999	0.9991	0.9969	0.9948	0.9936	0.9935	0.9945	1.0313	1.1728
2.80	1.0000	1.0001	1.0007	1.0021	1.0042	1.0063	1.0106	1.0565	1.1830
3.00	1.0000	1.0004	1.0018	1.0043	1.0074	1.0101	1.0153	1.0635	1.1848
3.50	1.0001	1.0008	1.0035	1.0075	1.0120	1.0156	1.0221	1.0723	1.1834
4.00	1.0001	1.0010	1.0043	1.0090	1.0140	1.0179	1.0249	1.0747	1.1773

表 2.4 $Z^{(1)}$ 值

$T_r \downarrow P_r \rightarrow$	0.010	0.10	0.40	0.80	1.20	1.50	2.00	5.00	10.0
0.30	-.0008	-.0081	-.0323	-.0645	-.0966	-.1207	-.1608	-.3996	-.7915
0.55	-.0314	-.0086	-.0343	-.0682	-.1015	-.1263	-.1669	-.3991	-.7521
0.80	-.0044	-.0487	-.0272	-.0526	-.0767	-.0940	-.1217	-.2682	-.4740
0.97	-.0010	-.0101	-.0450	-.1647	-.0669	-.0759	-.0921	-.1837	-.3163
1.02	-.0005	-.0051	-.0198	-.0303	.0227	-.0524	-.0722	-.1156	-.2731
1.30	.0006	.0061	.0267	.0612	.1048	.1420	.1991	.0875	-.0423
1.80	.0008	.0081	.0325	.0652	.0978	.1216	.1593	.2846	.2576
2.00	.0008	.0078	.0310	.0617	.0916	.1133	.1476	.2819	.3096
2.20	.0007	.0074	.0293	.0579	.0857	.1057	.1374	.2720	.3355
2.40	.0007	.0070	.0276	.0544	.0803	.0989	.1285	.2602	.3459
2.80	.0006	.0062	.0245	.0483	.0711	.0876	.1138	.2372	.3443
3.00	.0006	.0059	.0232	.0456	.0672	.0828	.1076	.2268	.3385
3.50	.0005	.0052	.0204	.0401	.0591	.0728	.0946	.2042	.3194
4.00	.0005	.0046	.0182	.0357	.0527	.0651	.0849	.1857	.2994

例 2.6

估计空气在 210°F (98.88°C) 和 500psia (3447.4kPa) 条件下的压缩因子和密度。

解：

临界值和离心因子可由临界值表 2.1 得到

$$T_c = -221.26^\circ\text{F} (-140.7^\circ\text{C})$$

$$P_c = 547.3724\text{psia} (3774.02\text{kPa})$$

$$\omega (\text{离心因子}) = 0.0$$

$$Mw = 28.95$$

$$T_r = (210 + 459.69) / (-221.26 + 459.69) = 2.808$$

$$P_r = (500/547.3724) = 0.913$$

$Z^{(0)}$ 和 $Z^{(1)}$ 的值由表 2.3 和 2.4 得到

$$Z^{(0)} = 1.0025$$

$$Z^{(1)} = 0.053$$

$$Z = 1.0025 + 0.053 \times (0.0) = 1.0025$$

$$\text{空气密度} = 500 \times 28.95 / ((210 + 459.69) \times 10.73 \times 1.0025) = 2.009\text{lb/ft}^3 (32.186\text{kg/m}^3)$$

2.1.3.2 压缩因子关系式

为了简化压缩因子图表的使用，同时生成一个易于估算压缩因子的方程，研究者把表中的数据拟合合成多项式。用于描述 Standing - Katz 图的 13 种方法的小结和比较可由 Takacs 给出。下面三种方法选自上面同一篇论文。

2.1.3.2.1 Drancuk - Kassem 模型

作者使用 Starling - Carnahan 状态方程模型，通过对 Standing - Katz 压缩因子图进行曲面拟合，重新得到方程的系数。有 11 个系数的混合指数多项式用来估计压缩因子

$$Z = 1 + \left(A_1 + \frac{A_2}{T_r} + \frac{A_3}{T_r^3} + \frac{A_4}{T_r^4} + \frac{A_5}{T_r^5} \right) \rho_r + \left(A_6 + \frac{A_7}{T_r} + \frac{A_8}{T_r^2} \right) \rho_r^2 - A_9 \left(\frac{A_7}{T_r} + \frac{A_8}{T_r^2} \right) \rho_r^3 + A_{10} (1 + A_{11} \rho_r^2) \left(\frac{\rho_r^2}{T_r^3} \right) \text{Exp}(-A_{11} \rho_r^2) \quad (2.18)$$