



稳态流管网理论

王树刚 孙多斌 著

煤炭工业出版社

稳态流体管网理论

王树刚 孙多斌 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

稳态流体管网理论/王树刚, 孙多斌著. —北京: 煤炭工业出版社, 2007

ISBN 978 - 7 - 5020 - 2853 - 4

I. 稳… II. ①王…②孙… III. 流体输送 - 管网
IV. U173.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 146750 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 11 插页 1
字数 251 千字 印数 1—1,100
2007 年 5 月第 1 版 2007 年 5 月第 1 次印刷
社内编号 5637 定价 27.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

前言

网络不是一个新的学科领域，但是近年来网络的研究取得了新的进展。有学者已宣称复杂网络已渗透到所有的科学领域。流体管网理论的研究同样越来越受到相关领域科技人员的重视。流体管网理论方面的同类书籍主要有：罗南昌编著的《流体网络理论》，侧重于论述发生在工业动力装置和生物医学工程等流体网络系统中的功率与信息的传输过程；刘剑等人编著的《流体网络理论》，侧重于论述网络图论知识及其在矿井通风中的应用；赵洪宾编著的《给水管网系统理论与分析》主要涉及给水管网的设计计算理论和优化方法；Osiadacz AJ 编著的“Simulation and Analysis of Gas Network”论述燃气管网的模拟方法。

流体管网理论涉及的研究及应用领域较广。本书试图从流体输配管网系统的共性出发，论述稳态流体管网的原理和方法，重点放在用计算机求解实际问题的数值方法上。全书共分为8章。第1章介绍了流体管网中常用的物理参量、气体状态方程和管流的阻力特性与流动阻力定律。第2章从管流流动的普遍原理出发推导出通用的管流微分方程，其独到之处在于基本微分方程既可以用于刚性管又可用于柔性管；既适用于定常管流，也适用于非定常管流。连续方程分为管流沿线有、无流体分出（或流入）两种情况；运动方程中应用 Dirac 函数，将风机或水泵等动力装置产生的压头和管流中可能存在的局部阻力有机地引入到方程中；能量方程可应用于可压缩气体，但略去了剪切力功的变化。第3章讲述网络图论的基本知识，侧重于关联矩阵和基尔霍夫定律。第4章从分析管路内压力损失表达式入手，建立适合电算求解的管网方程组，论述了管网分析数学模型求解的回路法、节点法、混合法等三种主要方法，针对管网中含有非管元件和具有分支区间流出型两种情况给出了相应的计算模型与算法。这一章体现了本书的核心，其显著特点是用矩阵方程组和代数方程组两种形式推导分析模型的数值求解方法，管网中的流量分配即可进行自然分配又可实现按需分配，满足用户流量的不同需求。第5章阐述管网综合的问题。选取几个典型目标函数详细分析管网的优化过程；应用灵敏度分析原理，特别是大变化灵敏度原理，初步探讨它在管网故障分析、动力源工况分析、容差分配问题以及最佳调节顺序等方面的应用；定量地分析了平衡阀在管网调节中的应用。这一章的不平常之处是把大变化灵敏度原理引入

管网研究中,清楚地阐明当管段参数从零到无穷大之间任意变化时管网的实际响应特性。第6章和第7章描述了矿井通风网络中的局部风量优化调节和井下空气温度与湿度的模拟计算。第8章推导了可压缩流体管网的压力方程和标况条件下的流量求解公式,讨论了中低压燃气管网的水力计算模型及其独特的解算方法。

希望本书可以用作有关专业的高年级本科生和研究生课程的教材或参考书,也希望对从事暖通空调、燃气输配、矿山通风、建筑给水等领域的科研与设计人员有所帮助。

作者愿借本书出版的机会向辽宁工程技术大学安全工程学院的刘剑教授致谢,他为本书的撰写提供了大量素材,同时也向大连理工大学能源与动力学院李维仲教授致谢,他审阅了本书并提出了许多宝贵的意见。

我们也愿在此感谢我们的研究生徐楠、金余、蒋爽、田洪建和孙金鹏,他们参与了部分研究和许多必要的编程计算工作,并对本书的原文做了校对工作。

作 者

2007年4月

主要符号表

拉丁字母

A	基本节点 - 分支关联矩阵或降阶节点 - 分支关联矩阵
A_M	A 矩阵中和余支有关的子矩阵
A_T	A 矩阵中和树支有关的子矩阵
A_0	地表年平均气温的季节性振幅, $^{\circ}\text{C}$
a	声波在弹性体 (包括流体) 中的传播速度, m/s ; 岩石的热扩散系数, m^2/s
B	基本割集 - 分支关联矩阵
B_T	B 矩阵中和余支有关的子矩阵
B_M	B 矩阵中和余支有关的子矩阵
Bi	毕渥数
b_{ij}	B 矩阵的元素
C	基本回路 - 分支关联矩阵
C_M	C 矩阵中和余支有关的子矩阵
C_T	C 矩阵中和树支有关的子矩阵
C_m	摩尔比热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
C'	容积比热容, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
c	质量比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_{ij}	C 矩阵的元素
c_s	声速, m/s ; 岩石比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$
c_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
D	圆管直径, m
D_h	水力直径, m
D_w	围岩中水分的扩散系数, m^2/s
d	含湿量, g/kgDA
E	体积弹性模数, N/m^2
F	管道截面积或过流断面, m^2
Fo	傅立叶数
G_w	单位时间单位面积湿交换量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
g	重力加速度, 等于 9.80665 m/s^2
H_L	沿程能头损失, m
h_N	割集压降列矢量
h_b	分支压降列矢量

h	比焓, kJ/kg
h_F	分支内由泵或风机造成的动力压头, Pa
h_N	重力作用压头或附加压力, Pa
h_p	两节点标高差引起的位压差, Pa
h_r	管路内单位容积流体的压力损失, Pa
h_{rf}	管流的摩擦阻力或沿程阻力, Pa
h_{rx}	局部阻力, Pa
$\tilde{h}$	滞止焓或总焓
i	管道中单位长度的能头损失, m/m
i_L	局部能量损失, m
$J_0(u), J_1(u)$	贝塞尔函数
k	比热比或称绝热指数
k_L	管道周围土壤的传热系数, W/(m · K)
L	管道内两个截面之间的长度, m; 水蒸气的潜热, kJ/kg
M	相对分子量或摩尔质量, kg/kmol; 气流的马赫数
m_v	湿空气中水蒸气的质量, g
m_g	湿空气中干空气的质量, kg
$N_1(\bar{r})$	1 阶 Kelvin 函数的模
n	气体的摩尔数, mol
n_q	固定流量分支数
n_f	有源分支数
P	管道周长或湿周长, m
$\mathbf{p}_N$	节点压力列矢量
p	流体压力, Pa
p_b	实际的大气压力, Pa
p_{sv}	饱和水蒸气分压力, Pa
p_v	湿空气中水蒸气的分压力, Pa
$\mathbf{Q}_b$	分支流量列矢量
$\mathbf{Q}_M$	对应于某棵树所有余支流量的列矩阵
Q	管内流体的体积流量, m ³ /s; 单位时间内加于单位质量上的热量, J/(kg · s)
Q_0	输配管线起始截面处的流体体积流量, m ³ /s
Q_m	管内流体的质量流量, kg/s
Q_{m0}	输配管线起始截面处的流体质量流量, kg/s
q_d	单位时间单位长度巷道内来自局部热源的附加热流量, W/m
q_k	压缩机等产热源地点所生成的热量, W
q_m	单位管长分流量, kg/ms
q_s	单位时间单位长度从围岩到井巷风流内的热流量, W/m
R	气体常数, J/(kg · K); 管道阻抗, N · s ² /m ⁸

Re	雷诺数
R_m	通用气体常数, $8314 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
R_{rf}	沿程或摩擦阻力特性系数, $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$
R_{rx}	局部阻力特性系数, $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$
$\bar{r}$	无量纲半径
S	灵敏度; 气体的相对密度;
S_N	节点净出流量列矢量
S_k	节点 k 的净出流量
s	从任意起点开始的沿管轴的空间位置坐标
$\bar{S}$	无量纲巷道长度
T	流体绝对温度, K
T_{soil}	管道周围土壤的温度, K
t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
t_w	湿球温度, $^{\circ}\text{C}$
t_d	干球温度, $^{\circ}\text{C}$
t_e	等效温度, $^{\circ}\text{C}$
$\bar{t}_{\text{os}}$	地表年平均气温, $^{\circ}\text{C}$
U	流体的内能, J
u	比内能, J/kg ; 管壁速率, m/s
V	气体的容积, m^3
V_m	摩尔容积, m^3/kmol
v	流体速度, m/s ; 流体的比容, m^3/kg
W	岩石湿度, kg/kg 岩石
x, y, z	流体质点坐标
x_0	地表大气含湿量的振幅, kg/kgDA
x_{os}	地表大气多年平均含湿量, kg/kgDA
$Y_0(u), Y_1(u)$	贝塞尔函数
Z	气体压缩系数

希腊字母

$\Phi_1(r)$	1 阶 Kelvin 函数的辐角
Δp	管道中动力装置的动力压头, Pa
Ω	地表气温变化年周期中的角速度, rad/s ; 通过巷帮表面的质流量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
α	管道中微元控制体与水平线的夹角; 动能修正系数; 通过巷道侧帮的空气热交换系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$
β	水表面的质流量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
β_T	等温压缩性系数, m^2/N
β_p	定压热膨胀系数, $1/\text{K}$

γ	流体的重率, N/m^3
$\delta(s - s_j)$	Dirac 函数
δ_{ij}	Kronecker 符号
ε	集中浓度变化过程的动力学系数
ε_0	地面气温变化的初相位, rad
ε'_0	地面气温变化时含湿量变化的初相位, rad
ϑ	岩石温度分布, $^{\circ}\text{C}$
ϑ_{00}	巷道进风端断面的岩石原始温度, $^{\circ}\text{C}$
λ	无量纲沿程阻力系数
λ_s	岩石的热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$
μ	动力粘性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
ν	运动粘性系数, m^2/s
ρ	流体密度, kg/m^3
ρ_s	滞止状态下的流体密度; kg/m^3 ; 岩石的密度, kg/m^3
ρ_{sv}	饱和空气绝对湿度, g/m^3
ρ_v	湿空气的绝对湿度, g/m^3
ζ	局部损失系数
σ	岩层原始温度梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{m}$
σ_0	切应力, Pa
τ	时间坐标; τ - 巷道通风时间, s
τ'	井下受季节影响的年周期中的任意时刻, s
ϕ	相对湿度
ω	混合气体中某种组元气体的质量成分
$1(s - s_j)$	Heaviside 函数
$\text{sgn}(x)$	符号函数
DA	干空气

目 录

主要符号表	I
1 流体的常用物理参量和管流的阻力定律	1
1.1 流体的力学性质	1
1.2 流体的常用物理参量	3
1.3 气体的状态方程与湿空气的性质	4
1.4 管流的流动损失	7
1.5 管流的阻力特性与阻力定律	8
1.6 流体管网中流量和压力的电学比拟	10
2 管流流动的基本微分方程	12
2.1 管流的连续方程	12
2.2 管流的运动方程	15
2.3 管流的能量方程	17
3 网络图论的基本知识	19
3.1 基本术语	19
3.2 关联矩阵和关联矢量	21
3.3 独立回路的选择与示例	25
3.4 管网基尔霍夫定律	28
4 流体管网中不可压缩定常流的计算与分析	32
4.1 管路内压力损失	32
4.2 管网方程	34
4.3 管网模型及其算法的收敛性	36
4.4 回路法解算管网的模型及其数值解法	38
4.5 节点法解算流体管网	50
4.6 混合法解算流体管网	56
4.7 含有非管元件的流体管网解算方法	59
4.8 一般流出型环状管网的解算方法	65
5 稳态流体管网的综合	68
5.1 流体管网综合的数学模型	68
5.2 生命周期费用最小的管网设计的优化过程	69
5.3 投资费用最小的管网优化过程	73
5.4 改进节点压力法	76
5.5 具有流量约束的分支参数确定问题	77
5.6 管网漏水最小化问题	78

5.7	含有非线性反馈装置的水头损失问题	81
5.8	模拟分析调节法	82
5.9	流体管网中的灵敏度分析	84
5.10	大变化灵敏度的原理与计算	91
5.11	灵敏度分析的应用	99
5.12	管网的可及性分析	105
5.13	管网调节的回路优化原理及环路阻力分析	106
5.14	管网中的平衡阀应用	108
6	矿井通风网络中的局部风量优化调节	114
6.1	增阻和增压调节法	114
6.2	关键路径法和节点压力分析调节法	118
6.3	通路调节法与通路公共分支法	120
6.4	增阻调节的最佳调节位置	122
6.5	借助运筹学方法的优化调节	123
6.6	非线性控制	124
7	矿井通风网络中的空气温度和湿度	129
7.1	围岩的温度方程和湿度方程	129
7.2	通风网络内空气流动的能量方程和湿度平衡方程	131
7.3	干燥矿井内的空气温度	132
7.4	矿内空气的温度和湿度	137
8	可压缩定常流动的管网计算	146
8.1	管网中可压缩流体定常流动的压力方程	146
8.2	可压缩流体管网的分支流量计算	148
8.3	燃气管道的热力计算	152
8.4	燃气管网的水力计算	155
	参考文献	163

1 流体的常用物理参量和管流的阻力定律

在研究流体的宏观状态时，即从宏观尺度来研究它的物理性质时（相当于分子水平的统计平均），可以忽略流体的分子特性，将流体看作连续介质，于是可将流体的物理性质假定为空间和时间的连续函数。本书遵从这种连续性假设。

1.1 流体的力学性质

流体包括液体和气体。它与固体的最直观的差别在于，固体具有确定的形状，而流体的形状取决于与流体相接触的边界。流体作为连续介质，在任意时刻，流体空间任意点（流体质点）上的流体物理量（如密度、温度、压力、速度等）都具有确定的数值，因此它们是空间坐标 (x, y, z) 及时间 τ 的函数：

$$\rho = \rho(x, y, z, \tau)$$

$$T = T(x, y, z, \tau)$$

$$p = p(x, y, z, \tau)$$

$$v = v(x, y, z, \tau)$$

从场的观点看，密度场、温度场和压力场是标量场，速度场是向量场。

流体具有易流动性、粘性和可压缩性等^[1]重要物理力学性质。在研究流体管网理论问题时必须对流体的这些性质有正确的了解。

(1) 流体的易流动性。处于静止状态的流体不能抵抗剪应力，即流体在很小的剪应力作用下将发生连续不断的变形，直到剪应力消失为止。流体的这种性质称为易流动性（或称易变形性）。由于流体的易流动性，所以流体并没有固定的形状。

(2) 流体的粘性。粘性是流体的固有属性之一，不论是静止流体还是运动流体都具有粘性。流体在剪应力的作用下，将产生连续不断的变形以抵抗外力，这就是流体粘性的表现。粘性系数 μ （或称绝对粘性系数）是流体粘性大小的一种度量，是流体的一种物性参数，它的国际单位制单位是 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ （或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ）。粘性系数实际上是牛顿摩擦定律的比例常数，与流体的物理状态（温度、压力）有关，但是对大多数流体来说，粘性系数与压力的关系不大，而主要与温度有关。气体与液体的粘性系数随温度的变化规律并不一样，气体的 μ 值随温度升高而增加，液体的 μ 值随温度升高而减小。流体的粘性系数 μ ，由于具有动力学问题的量纲，故又称作动力粘性系数。在流体力学中，将粘性系数 μ 与流体密度 ρ 的比值定义为运动粘性系数，并用 ν 表示之：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

(1-1)

运动粘性系数的单位是 m^2/s 。表 1-1 和表 1-2 分别是水和空气的粘性系数。

粘性系数等于零（即无粘性阻力或剪应力为零）的流体称作理想流体，或只传输正应力的流体称作理想流体。理想流体是人们为了解决实际问题对于真实流体所作的一种抽

象模型。真实流体都是有粘性的（既传输正应力又传输剪应力），粘性的存在给流体运动的数学描述和处理带来很大困难。此外，本书所研究的流体均属于牛顿流体。

表1-1 水的粘性系数

温度/℃	$\mu \times 10^3 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$\nu \times 10^6 / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	温度/℃	$\mu \times 10^3 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$\nu \times 10^6 / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556
15	1.140	1.141	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296

表1-2 空气的粘性系数

温度/℃	$\mu \times 10^3 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$\nu \times 10^6 / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	温度/℃	$\mu \times 10^3 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$\nu \times 10^6 / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
0	17.09	13.20	60	19.97	18.80
20	18.08	15.00	80	20.88	20.90
40	19.04	16.90	100	21.75	23.00

(3) 流体的可压缩性。流体的压缩性是指流体的体积在外力作用下可以改变的特性。当质量不变时，体积的缩小意味着密度的增加。

流体的压缩性用一定温度下升高单位压力所引起的流体密度变化率来表示，即：

$$\beta_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \quad (1-2)$$

式中 β_T 为等温压缩性系数， m^2/N 。

可将压缩性系数的倒数称作体积弹性模数：

$$E = \frac{1}{\beta_T} = \rho \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T \quad (1-3)$$

式中 E 的单位为 N/m^2 。体积弹性模数越大的流体越难压缩。声波在弹性体（其中包括流体）中的传播速度 a 可用 E 表示为：

$$a = \sqrt{\partial p / \partial \rho} = \sqrt{E / \rho} \quad (1-4)$$

可见， β_T 、 E 和 a 都可用来度量流体的可压缩性。

密度为常数的流体称作不可压缩流体，显然它的压缩性系数等于零或弹性模数为无穷大。严格说来，真实流体都是可压缩的。对于气体，它比液体易于压缩得多，一般不能当作不可压缩流体处理。但是，如果在所研究的具体问题中，流场中各点的密度差只是由速度差引起的压力差所造成的，而速度差又不大的条件下，则相应的密度差也不会大。此时可以认为整个流场中气体密度为常数，可使问题大为简化。

在通常条件下，如压力变化不是很大，水或其他液体可被认为是不可压缩介质。气体密度随压力的变化是和热力过程紧密相关的，对于许多气体来说，在等温条件下，满足

$$\frac{p}{\rho} = \text{const} \quad (1-5)$$

(4) 流体的热膨胀性。流体温度升高时体积增大密度减小的性质称为流体的热膨胀性，用定压下单位温升所引起的密度变化率来表示，即：

$$\beta_p = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (1-6)$$

式中 β_p 为定压热膨胀系数， $1/K$ ；式中的负号表示密度与温度的变化方向相反，以确保 β_p 为正值。

1.2 流体的常用物理参量

(1) 密度与比容。密度在数值上等于单位容积内所包含的流体的质量，属于热力学中的强度量。密度用符号 ρ 表示，国际单位是 kg/m^3 。

比容是密度的倒数，用符号 v 表示，国际单位是 m^3/kg 。比容不是容积的概念，而是描绘分子聚集疏密程度的比参数。密度与比容不是互相独立的参量，见式 (1-7)。

$$v = 1/\rho \quad (1-7)$$

表 1-3 列出了几种常见流体的密度，表 1-4 列出了不同温度下水和空气的密度。

表 1-3 几种常见流体的密度

流体名称	温度/ $^{\circ}C$	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	流体名称	温度/ $^{\circ}C$	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$
水	4	1000	酒精	15	790 ~ 800
矿井地下水	15	1050	水银	0	13600
海水	15	1020 ~ 1030	一氧化碳	0	1.251
普通汽油	15	700 ~ 750	空气	0	1.293

表 1-4 不同温度下水和空气的密度

流体名称	温度/ $^{\circ}C$						
	0	10	20	40	60	80	100
水/ $(kg \cdot m^{-3})$	999.87	999.73	998.23	992.24	983.24	971.83	958.38
空气/ $(kg \cdot m^{-3})$	1.29	1.24	1.20	1.12	1.06	0.99	0.94

(2) 重率。流体的重率（又名容重或重度）是指单位容积的流体的重力，即：

$$\gamma = \rho g \quad (1-8)$$

式中 γ 为重率， N/m^3 ； g 为重力加速度，等于 $9.80665m/s^2$ 。

(3) 压力。流体压力通常指流体静压力，用符号 p 表示。静止流体内任意点的压力值，在各个方向是相同的，并且永远为正值。

流体压力分为绝对压力与相对压力。作为流体状态参量的压力是绝对压力。绝对压力是从零值压力算起的流体压力，相对压力是从当地当时大气压力算起的流体（主要指气体）压力。

在湿空气中，常常用到水蒸气的分压力和饱和水蒸气分压力。水蒸气的分压力是指湿空气中含有的水蒸气在同温下单独占有湿空气容积时所产生的压力，饱和水蒸气分压力是指一定温度下，湿空气中含有最大水蒸气质量时（饱和空气）的相应水蒸气分压力。

压力的国际单位制单位是帕斯卡，用符号 Pa 表示， $1Pa = 1N/m^2$ 。工程上常用的压力单位及它们的换算关系如表 1-5 所示。

表1-5 压力单位表

单 位 名 称	单 位 符 号	与帕的换算关系
兆帕	MPa	1 MPa = 10 ⁶ Pa
巴	bar	1 bar = 10 ⁵ Pa
标准大气压	atm	1 atm = 1.01325 × 10 ⁵ Pa
工程大气压	at	1 at = 9.80665 × 10 ⁴ Pa
毫米汞柱	mmHg	1 mmHg = 133.3224 Pa
毫米水柱	mmH ₂ O	1 mmH ₂ O = 9.80665 Pa

(4) 温度。温度的数值表示方法称为温标。常用的温标有摄氏温标 $t(^{\circ}\text{C})$ 和热力学温标 (亦称绝对温标) $T(\text{K})$ ，二者的换算关系为：

$$T = t + 273.15 \tag{1-9}$$

上式表明，摄氏温度 t 是 0°C 和 -273°C 时，分别相当于绝对温度 T 是 273K 和 0K 。

(5) 内能。内能就是系统内部大量分子运动的内动能 (包括移动、转动和振动动能) 和由于分子之间的吸引力所形成分子位能的总和 (本文讨论不涉及化学反应和核反应)。分子的内动能决定于内部粒子的微观运动，它是温度的函数。分子之间的相互作用力所形成的位能与分子之间的空间位置有关，这样内能就是比容和温度的函数。所以内能是温度和比容的函数，即 $u = f(T, v)$ 。

单位质量流体所具有的内能叫比内能 (简称内能)，用 u 表示，单位为 J/kg 。 m 千克物质具有的总内能用 U 表示，单位为 J 。因此，

$$u = \frac{U}{m} \tag{1-10}$$

(6) 比热容。根据计量物质质量的单位的不同，如果对应的物质质量的单位是千克、摩尔和立方米 (标况)，则分别有质量比热容 c 、摩尔比热容 C_m 和容积比热容 C' 。它们的单位分别为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、 $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 、 $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。三者之间的换算关系为：

$$C_m = Mc = 22.414 C' \tag{1-11}$$

式中 M 为相对分子量。

对应于热力过程中的定容过程和定压过程，常用的比热容就有比定容热容和比定压热容，分别用 c_v 和 c_p 表示，单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。对于理想气体来说，存在迈耶方程：

$$c_p - c_v = R \tag{1-12}$$

对于空气，在温度 $-50 \sim +50^{\circ}\text{C}$ 范围内， $c_p = 1004.8 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ， $c_v = 717.7 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ， $c_p/c_v = k = 1.4$ 。其中 k 称为比热比 (或称绝热指数)，即定压比热容与定容比热容的比值。干空气的 k 值为 1.402 ，饱和空气的最小 k 值为 1.362 ；相应的 $(k-1)/k$ 值 (常被作为指数) 分别是 0.287 和 0.266 。

1.3 气体的状态方程与湿空气的性质

1.3.1 气体的状态方程

理想气体的状态方程又称为克拉贝龙方程，对于不同物量的气体，它有下列几种形式：

$$Pv = RT \quad (\text{对 } 1\text{ kg 气体}) \quad (1-13a)$$

$$pV_m = R_m T \quad (\text{对 } 1\text{ mol 气体}) \quad (1-13b)$$

$$PV = mRT = nR_m T \quad (\text{对 } m\text{ kg 或 } n\text{ kmol 气体}) \quad (1-13c)$$

式中 R 为气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; V_m 为摩尔容积, m^3/kmol ; R_m 为摩尔气体常数或通用气体常数, $8314\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$; V 是 $m\text{ kg}$ 气体的容积, $V = mv$, m^3 ; n 是气体的摩尔数, mol 或 kmol 。

对于同一种气体, R 是一个不变的常数。对于不同的气体, 具有不同的气体常数。气体常数 R 与通用气体常数 R_m 的关系为:

$$R_m = R \cdot M \quad (1-14)$$

式中 M 为摩尔质量 (其数值等于相对分子量), kg/kmol 。例如, 氧、氮和空气的 M 值分别为 $32.00\text{kg}/\text{kmol}$ 、 $28.02\text{kg}/\text{kmol}$ 和 $28.97\text{kg}/\text{kmol}$, 则氧、氮和空气的 R 值分别为 $259.8\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、 $296.8\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 和 $287.1\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

由式 (1-13) 可以得出气体密度的计算式:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (1-15)$$

当计算空气密度时, p 对应大气压力; T 对应空气的绝对干球温度; 空气的气体常数可以根据其成分的不同, 按下式计算:

$$R = \sum_{i=1}^k \omega_i R_i \quad (1-16)$$

式中 ω_i 代表空气 (或混合气体) 中第 i 种组元气体的质量成分 (组元气体质量与混合气体总质量之比值), k 代表混合气体含有成分的种类。

从式 (1-15) 可知, 对于一定温度的气体, $p/\rho = \text{const}$; 当气体压力一定时, $\rho T = \text{const}$ 。当大气压力 p 取 101325Pa , 温度 T 取 273.15K 时, 即在标准大气状况下, 空气密度 $\rho_0 = 1.292\text{kg}/\text{m}^3$; 由 $\rho T = \rho_0 T_0$ 得出在标准大气压力下, 对应某一温度 T 的空气密度为:

$$\rho_T = \frac{273.15}{T} \rho_0 = \frac{352.91}{T} \quad (1-17)$$

1.3.2 湿空气的性质

在自然界中, 由于江河湖海里水的蒸发, 使空气中总含有一些水蒸气。这种含有水蒸气的空气称为湿空气。完全不含水蒸气的空气称为干空气。由于湿空气中水蒸气的分压力很低, 可视水蒸气为理想气体, 所以, 一般情况下湿空气可以看作理想混合气体。湿度主要是针对湿空气而言, 它是用来衡量湿空气中水蒸气含量多少的物理量, 一般有三种表示方法, 即绝对湿度、相对湿度和含湿量。

湿空气的绝对湿度是指单位容积的湿空气中含有水蒸气质量的多少 (g/m^3), 用符号 ρ_v 表示。含一定量水蒸气的空气, 当其温度升高时, 容积增大, ρ_v 值变小。单位容积湿空气中所含水蒸气质量的饱和值或水蒸气最大质量称为饱和绝对湿度, 用符号 ρ_{sv} 表示。

相对湿度是指在同温同压下, 空气的 ρ_v 值和 ρ_{sv} 值的百分比, 用符号 ϕ 表示, 即:

$$\phi = \frac{\rho_v}{\rho_{sv}} \times 100\% \quad (1-18)$$

根据理想气体状态方程可得出另一表达式:

$$\phi = \frac{p_v}{p_{sv}} \times 100\% \quad (1-19)$$

式中 p_v 为湿空气中水蒸气的分压力, Pa; p_{sv} 为同温度下的饱和水蒸气分压力, Pa。

含湿量是指在湿空气中与 1kg 干空气并存的水蒸气质量, 即:

$$d = \frac{m_v}{m_g} = \frac{m_v/V}{m_g/V} = \frac{\rho_v}{\rho_{sv}} \quad (1-20)$$

式中 d 为含湿量, g/kgDA; m_v 为湿空气中水蒸气的质量, g; m_g 为湿空气中干空气的质量, kg; V 是湿空气占有的容积, m^3 ; DA 表示干空气。

根据道尔顿定律, 湿空气的总压力 p_b 等于水蒸气的分压力 p_v 与干空气的分压力 p_{DA} 之和, 即:

$$p_b = p_v + p_{DA} \quad (1-21)$$

饱和水蒸气压取决于温度。对于水蒸气, $R = 461.5 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $c_p = 1925.9 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 当给定温度计算 p_{sv} 时, 可根据 Magnus 公式由式 (1-22) 算得:

$$p_{sv} = 603.79 \exp \left[\frac{7.447(T - 273.15)}{T - 38.33} \right] \quad (1-22)$$

水蒸气的分压力 p_v 按下式计算:

$$p_v = 610.5 \exp \left[\frac{17.27 t_w}{t_w + 273.15} \right] - 0.000644 p_b (t_d - t_w) \quad (1-23)$$

式中 t_w 和 t_d 分别为湿球温度和干球温度。

由此可导出湿空气的密度和含湿量的计算公式:

$$\rho = \frac{p_b - p_v}{287.1T} + \frac{p_v}{461.5T} = \frac{0.0034843}{t + 273.15} (p_b - 0.3779 p_v) \quad (1-24)$$

$$d \approx 0.622 \frac{\phi p_{sv}}{p_b - \phi p_{sv}}, \text{ kg/kgDA} \quad (1-25)$$

同时可得出湿空气的密度和含湿量之间的关系式:

$$\rho = \frac{0.00216723(1 + d)p_b}{T(d + 0.622)} \quad (1-26)$$

考虑到湿空气中水蒸气的质量在热力过程中常常是变化的, 而干空气的质量往往是恒定的, 所以湿空气的比焓 h 通常以单位质量的干空气为基准计算, 湿空气的比焓值等于干空气的比焓 h_{DA} 与水蒸气的比焓 h_v 之和, 即:

$$h = h_{DA} + h_v = 1.005t + d(2.5016 + 0.001884t), \text{ kJ/kgDA} \quad (1-27)$$

其中最后一项 $0.001884t$ 是液体热。这里按工程上取 0°C 时干空气的焓值为零。

在湿空气中, 如果所含水蒸气的分压力 p_v 低于湿空气温度 T 所对应的水蒸气的饱和压力 $p_{sv}(T)$, 则此时的湿空气为未饱和湿空气, 其中的水蒸气处于过热状态, 湿空气中的液态水还可以蒸发, 或者说湿空气还具有吸收水分的能力。这时空气与水之间的单位时间单位面积湿交换量可按式 (1-28) 计算:

$$G_w = \beta_w (p_{sv} - p_v) \frac{101.325}{p_b}, \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \quad (1-28)$$

式中 $\beta_w = (4.78 + 3.62v) \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s})$, 当空气温度小于 30°C 时;