

工质热物理性质计算程序的 编制及应用

刘志刚 刘咸定 赵冠春 编著

科学出版社

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是作者在长期从事工程热力学计算机辅助教学及科研的基础上编写而成的。书中详细介绍了工程中常用的气体和液体热物理性质计算的理论、数学模型和计算程序,系统阐述了热工计算程序化的基本知识和方法。

全书共十章。前五章以工程应用中常见的工质(包括各种常见的理想气体、水蒸气、常用制冷剂、湿空气和燃气)为主,介绍了工质热力性质和迁移性质计算程序的编制方法及这些计算程序在热工计算中的应用,并附有一定数量的习题;后五章以工程中常用的推算方法为主,介绍了流体及其混合物的热物理性质推算程序的编制,并通过例题列举这些程序在氟氯烃(CFC)替代物研究等新技术领域中的应用。

各章提供的典型程序可在热工计算中直接或作为子程序使用,精度能满足一般工程计算的要求。

本书可作为能源工程、动力机械、工程热物理、制冷及低温工程、空调与采暖工程、化学工程和轻工等各类专业的教学用书,也可供从事上述各专业的工程技术人员参考。

工质热物理性质计算程序的 编制及应用

刘志刚 刘威定 赵冠春 编著

责任编辑 陈文芳 童安齐

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1992 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1992 年 6 月第一次印刷 印张: 24

印数: 1—2 500 字数: 557 000

ISBN 7-03-002782-5/TB·94

定 价: 18.00 元

前 言

工程中常用的工作介质简称为工质。工质通常处于气态或液态,故可统称为流体。工质的热物理性质(简称热物性)一般可以分成两大类:平衡态的热力性质和非平衡态的迁移性质。热力性质主要包括 PVT 参数、定压比热容、定容比热容、内能、焓、熵、绝热指数、音速和表面张力等;迁移性质主要包括粘度、导热系数、扩散系数和它们的导出量。

工质热物性数据是进行热力计算、气动计算、流体力学计算和传热传质计算时的必不可少的基础数据。由于流体热物性计算相当复杂,而且种类繁多,因此长期以来工程技术人员都借助于各种热物性图表来完成设计或校核计算。随着科学技术的发展,工程中经常需要对热力系统、化工流程和单元设备进行计算机模拟、仿真及优化设计等,以提高设计水平和产品质量,这种情况下,图表法已不能满足计算要求。另一方面,由于各种微型和袖珍型计算机在各个领域的普及,广大技术人员对摆脱繁复费时的查图、查表的手工操作,实现热工计算程序化的要求愈益迫切。同时,热工计算程序化又对工程热力学教学提出了新的要求。众所周知,在用图表法进行热工计算的阶段,图表应用方法的讲授在工程热力学教学中占有重要的地位;不言而喻,为了实现热工计算程序化,在教学中对工质热物性程序的编制和应用也必须给予足够的重视,它必将成为工程热力学的重要组成部分之一。

本书正是为了满足上述需要,在作者编写的多种工程热力学计算机辅助教学讲义的基础上修改、补充而写成的。本书参考了许多国外书籍和文献,在内容选择上兼顾了教学和应用两方面的要求,立足于实用,侧重于热力工程中的常见工质。在本书撰写中,注意理论、模型和程序的结合,重视方法的阐述。在提供典型程序的同时,对程序的编制方法作了必要而简明的介绍,读者不难在典型程序的基础上,举一反三,扩大应用领域。书中提供的程序一般在 IBM/PC 型微机上调试通过,大部分程序用 BASIC 和 FORTRAN 两种语言同时给出。还有一些程序是专门为袖珍机编写的。

全书共十章。前五章重点介绍常见工质的热物性计算程序,涉及的工质有理想气体(空气、氮气、氧气、氢气、氦气、氙气、二氧化碳、一氧化碳、甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷和二氧化硫)、水蒸气、常用制冷剂(R717, R12, R22, R11, R502, R13B1, R13, R12B1 和 R142b)、湿空气和燃气等 25 种。后五章侧重介绍常用的流体热物性推算方法,如第六章介绍常用的通用状态方程,包括 RK, RKS, PR, MH 和 BWR 方程和应用状态方程推算热力性质的方法;第七章介绍 Antoine, Riedel, FKT, RPM, LK 和徐忠方程等蒸气压方程;第八章介绍迁移性质的推算方法,此方法适用于一般流体;第九章以 PR 方程为例,介绍混合工质气液相平衡和焓、熵的推算;第十章介绍一套适用于推算新工质热物性的方法及一般工质平衡性质之一的表面张力的推算方法,其成功地用于氟氯烃(CFC)替代物和低品位热能利用系统新工质的筛选等重要技术领域。附录 1 介绍几种常用的数值计算方法,可供初学者参考。

为方便读者及与书中的程序统一,书中出现的“打印机输出的计算结果”中的计量单位全部为正体、大写。

本书可与现有有关工程热力学或化工热力学方面的教材配套使用。限于篇幅,在上述教材中介绍过的内容,本书一般不再提及。书中各章内容具有相对的独立性,在教学中可根据不同专业的要求选用。例如,对于70学时左右的工程热力学课程,一般可选择其中的一章,安排10机时的实践时间。

本书采用我国法定计量单位,附录2中列出了常见非法定单位的换算系数。

本书由西安交通大学刘志刚(第一、三、四、八、十章)、刘咸定(第六、七章)和赵冠春(第二、五、九章)撰写。刘志刚对全书进行了整理和审订。谭周芳、焦平坤、何雅玲、薄涵亮同志参加了本书大部分程序的调试、翻译及部分程序的编制,全部程序由谭周芳同志最后汇总并规格化。本书由清华大学朱明善教授审阅,并提出了许多宝贵意见,在本书编写过程中还得到了西安交通大学动力系热工教研室的热情支持,在此一并致以衷心的感谢。

由于作者水平有限,缺点和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 著 者

1991年2月于西安交通大学

主要符号表

A	截面积	q_v	单位容积制冷量
a	比自由能;音速;热扩散率	q_0	(公斤)制冷量
a_r	余自由能	R	气体常数
C	摩尔热容	r	气化潜热
c	质量比热容;流速	R_i	Riedel 准则数
COP	工作系数;制冷系数	r_i	燃气的摩尔成分
D	扩散系数	R_m	通用气体常数
d	含湿量;空气的氮氧比	S, s	熵,比熵
d_s'	绝热饱和温度下的饱和空气的含湿量	Sc	施密特数
e	比熵函数	s_r	余熵
e_l	焓损失	T	开尔文温度
e_{lc}	焓损系数	t	摄氏温度
e_q	冷量焓	t_d	露点温度
f	逸度	t_w	湿球温度
H, h	焓,比焓	T_w'	绝热饱和温度
h_r	余焓	U, u	内能,比内能
I_p	定熵压力函数	V, v	容积,比容
I_v	定熵比容函数	V_b	液体在正常沸点或泡点下的摩尔容积
K	气液平衡比	v_r	相对比容;对比容积
k	玻耳兹曼常量	W, w	功,比功
k_{ij}	组分 i 和 j 的相互作用系数	x	干度
Le	刘易斯数	x_i	质量成分;液相的摩尔成分
m	质量	Y	粘度或导热系数
N	功率	y_i	摩尔成分
n	摩尔数	Z	压缩因子
n_t	理论摩尔数	Z_R	Rackett 修正的临界压缩因子
p	绝对压力		
p_b	大气环境压力;背压	α	过量空气系数;抽气量
Pr	普朗特数	β	燃料系数;水蒸气的对比压力
p_r	相对压力;对比压力	γ	比热容比
P_a	准则数	ΔT_B	过冷度
[P]	等张比容	ΔT_p	过热度
Q, q	热量,比热量		

• • •

ε	制冷系数;热湿变化比;压缩比;对比焓;势能参数
ε'	供热系数
η	粘度;效率
η_b	燃烧效率
η_c	压气机绝热效率
η_e	炯效率
η_i	循环的内部效率
η_{oi}	透平(燃气轮机, 蒸汽轮机)的内部相对效率
η_P	工质泵效率;水泵效率
η_r	循环热效率
θ	水蒸气的对比温度
λ	导热系数;升压比
μ	分子量;摩尔质量
μ_p	偶极矩
ν	运动粘度
π	压力比;增压比;燃气的相对压力
ρ	密度;预胀比
σ	对比焓;回热度;表面张力;势能参数
τ	升温比
ϕ	相对湿度;逸度系数;速度系数;溶剂的缔合因子
ϕ_i	容积成分
χ	Stiel 极性因子;水蒸气的对比比容
ψ	饱和度(对比湿度)
ω	偏心因子
Q_D	推算扩散系数的碰撞积分
Q_v	推算粘度的碰撞积分

下角标符号

a	干空气的参数
as	干空气与饱和空气参数值之差
B	燃烧室
b	正常沸点下的参数
C	卡诺循环;逆卡诺循环

c	临界点参数
cal	计算值
COM	压气机
E, EV	蒸发器
f	燃料
i, j, k	第 i, j, k 组分
ij	组分 i 和 j 的混合物的参数
K	冷凝器
L	液体的参数
m	混合物的参数;摩尔量
max	最大;最高
np	非极性物质的参数
P	工质泵;水泵
p	定压过程物理量;极性物质的参数
R	冷室;回热器
r	对比参数
s	定熵过程物理量;饱和状态参数
T	透平;大气压或低压下的参数
TC	在临界温度和常压下的参数
THR	节流阀
TOT	总量
TU	吸气管
v	定容过程物理量;水蒸气的参数
w	水的参数
Y	粘度或导热系数
0	理想气体状态下的参数;滞止参数;循环量;低压下的参数;环境的参数

上角标符号

l	液相
v	气相
0	基准态参数
'	饱和液体的参数;导数
"	饱和蒸气的参数

顶标符号

$\cdot$	流率
---------	----

目 录

前言	i
主要符号表	v
第一章 理想气体	1
§ 1.1 空气的热物性及理想气体模型的适用范围	1
§ 1.2 空气热物性的计算公式	3
§ 1.3 空气热物性 BASIC 程序的编制及应用	5
§ 1.4 空气热物性 FORTRAN 程序的编制及应用	8
§ 1.5 其它常见气体热物性计算程序的编制	15
习题	23
参考文献	24
第二章 水和水蒸气	25
§ 2.1 热力性质计算公式及适用范围	25
§ 2.2 热力性质计算程序的编制	30
§ 2.3 热力性质计算程序的应用	48
§ 2.4 迁移性质计算公式和 FORTRAN 程序	55
习题	59
参考文献	59
第三章 常用制冷剂	60
§ 3.1 计算制冷剂热力性质的基本方程	60
§ 3.2 制冷剂热力性质的计算方法和公式	64
§ 3.3 蒸气压缩制冷循环的热力计算	67
§ 3.4 常用制冷剂热力性质及其应用的 BASIC 计算程序	71
§ 3.5 常用制冷剂热力性质及其应用的 FORTRAN 计算程序	86
习题	96
参考文献	96
第四章 湿空气	97
§ 4.1 状态参数	97
§ 4.2 热力性质的计算公式	99
§ 4.3 计算中的数值方法及其公式	106
§ 4.4 热力性质的数值计算步骤	109
§ 4.5 热力性质计算的 BASIC 程序	111
§ 4.6 热力性质计算的 FORTRAN 程序	120
习题	129
参考文献	129
第五章 燃气	131

§ 5.1 热力性质计算公式	132
§ 5.2 热力性质计算程序的编制	136
§ 5.3 热力性质计算程序的应用	140
习题	158
参考文献	159
第六章 通用状态方程及其应用	160
§ 6.1 基本术语	160
§ 6.2 通用状态方程	163
§ 6.3 实际气体焓和熵的计算	170
§ 6.4 通用状态方程计算热力性质的 FORTRAN 程序简介	177
参考文献	199
第七章 通用蒸气压方程及其应用	200
§ 7.1 蒸气压与克拉珀龙方程	200
§ 7.2 通用蒸气压方程	200
§ 7.3 计算饱和压力或温度的 FORTRAN 程序简介	205
参考文献	223
第八章 流体迁移性质的推算	225
§ 8.1 粘度的推算法	225
§ 8.2 导热系数的推算法	241
§ 8.3 扩散系数的推算法	249
参考文献	255
第九章 混合工质相平衡和热力性质的推算	256
§ 9.1 热力性质计算公式	256
§ 9.2 气液相平衡计算公式	258
§ 9.3 气液相平衡计算程序的编制及应用	259
§ 9.4 热力性质计算程序的编制及应用	274
参考文献	296
第十章 新工质热物性的推算	297
§ 10.1 热力性质的推算法	297
§ 10.2 蒸气循环的热力计算	306
§ 10.3 工质表面张力的推算法	307
§ 10.4 迁移性质的推算法	312
§ 10.5 热物性推算的 BASIC 程序	315
§ 10.6 热物性推算的 FORTRAN 程序	351
参考文献	370
附录	371
1. 几种常用的数值计算方法	371
2. 常见非法定单位的换算系数表	372
3. 程序目录索引	375

第一章 理想气体

理想气体的状态方程,即压力 p 、比容 v 和温度 T 之间的关系可写成 $pv = RT$ (R 为气体常数),其定压比热容 c_p 和定容比热容 c_v 仅仅是温度的函数。由于理想气体是描述实际气体的一种最理想化的模型,而且在相当广的实用压力和温度范围内具有足够的代表性,因此它被广泛用于各种工程设计和分析计算。考虑到理想气体比热容随温度的变化,在计算时通常要查气体平均比热表或空气热力性质表等,而要查找此类表格,既费时又费力。为解决这一问题,就要编制一套计算热物性的子程序,把热物性表程序化。

本章将主要以空气为例,介绍理想气体热物性计算程序的编制及应用。此外,还将给出编制氮气、氧气、氢气、氦气、氩气、二氧化碳、一氧化碳、甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷和二氧化硫等 12 种常用气体热物性计算程序所需的计算公式和常数,并对程序编制中的一些特殊问题作简要的说明。

§ 1.1 空气的热物性及理想气体模型的适用范围

在一般工程计算中,空气可按变值比热容的理想气体处理。当考虑到温度对比热容的影响后,经常用到的空气热物性参数包括:

定压比热容: $c_p(T)$;

定容比热容: $c_v(T) = c_p(T) - R$;

比焓: $h(T) = \int_{T_0}^T c_p(T) dT$;

比内能: $u(T) = h(T) - RT$;

比熵函数: $e(T)^0 = \int_{T_0}^T c_p(T) dT/T$;

相对压力: $p_r(T) = \exp[e(T)/R]$;

定熵压力函数: $I_p(T) = e(T)/R$;

定熵比容函数: $I_v(T) = \ln(RT) - I_p(T)$;

温度(以 I_p 为自变量的函数): $T(I_p)$;

比热容比: $\gamma(T) = c_p(T)/c_v(T)$
 $= 1/[1 - R/c_p(T)]$;

音速: $a(T) = [\gamma(T)RT]^{1/2}$;

粘度: $\eta(T)$;

导热系数: $\lambda(T)$ 。

1) 比熵函数 $e(T)$ 即文献 [1] 中的 $\phi(T)$ 函数。

上述各种热物性参数的定义,除新定义的 $I_p(T)$ 和 $I_v(T)$ 外,均已在一般的教科书中给出。下面将简单介绍一下引入 $I_p(T)$ 和 $I_v(T)$ 的目的。

相对压力是温度 T 的指数函数,即

$$p_r(T) = \exp[e(T)/R] \quad (1.1)$$

由上式可知,比熵函数 $e(T)$ 的少量变动会引起相对压力 $p_r(T)$ 的很大变化,这会给拟合 $p_r(T)$ 的表达式带来许多困难。为此,只要定义定熵压力函数

$$I_p(T) = \ln(P_r) = e(T)/R \quad (1.2)$$

问题就可以得到解决。由文献 [1] 可知,对于变比热容定熵过程,初终态压力之比可写成

$$\ln(p_1/p_2)_s = \ln(p_r(T_1)/p_r(T_2))$$

即

$$\ln(p_1/p_2)_s = I_p(T_1) - I_p(T_2) \quad (1.3)$$

同理,由相对比容

$$v_r(T) = \exp\left[-(1/R) \int_{T_0}^T c_v dT/T\right] \quad (1.4)$$

可进一步定义定熵比容函数

$$I_v(T) = \ln(v_r) \quad (1.5)$$

从而类似于 (1.3) 式,变比热容定熵过程的初终态比容之比可写成

$$\ln(v_1/v_2)_s = I_v(T_1) - I_v(T_2) \quad (1.6)$$

在求解变比热容定熵过程问题时,一般已知初压 p_1 、初温 T_1 和终压 p_2 ,由 (1.3) 式可先求得 $I_p(T_2)$ 的值,然后再根据 I_p 的值求出 T_2 。所以,在上面列出的空气热力性质中包括了以 I_p 为自变量的函数 $T(I_p)$ 。有了函数 $T(I_p)$ 的具体形式(一般仍为多项式),只要将 I_p 的值代入即可直接求出相应的温度 T 。显然,引入函数 $T(I_p)$ 可以简化根据空气热力性质表中相对压力 p_r 值逆算相应温度的运算。

空气可作理想气体处理的压力和温度范围,如图 1.1 所示。由图可知,在高压区域存在实际气体效应,在低压高温区域存在离解效应,这时空气将明显偏离理想气体模型。

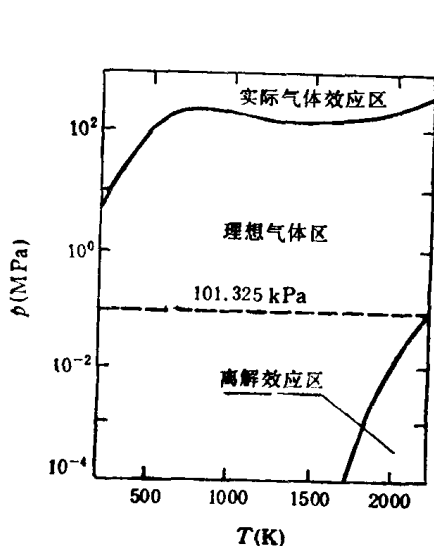


图 1.1 空气(焓)的理想气体范围

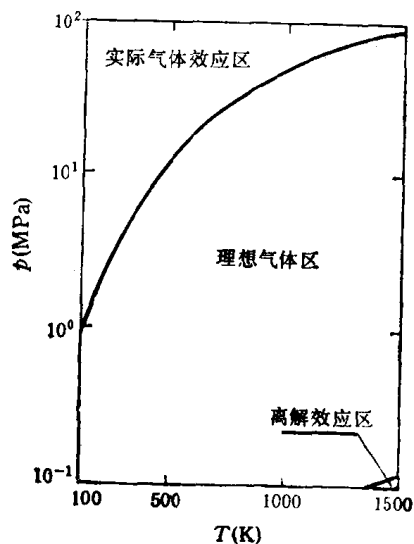


图 1.2 非理想效应对空气迁移性质的影响

在中间区域,将空气作理想气体处理,其焓值的偏差小于1%。

非理想效应对空气迁移性质(例如粘度、导热系数等)的影响,如图1.2所示。图中示出的理想气体区域,可以认为空气的迁移性质仅是温度的函数,而不必计及压力的影响。这样处理的误差不超过1%。

对于大量的工程应用,空气的状态都处于图1.1和1.2中的理想气体区域,由此也可看出理想气体是一种简单而有用的模型。

§ 1.2 空气热物性的计算公式

为编制空气热物性计算程序的需要,文献[2]通过数据拟合已给出了下列计算公式:

(1) 定压比热容 $c_p(T)$

$$c_p(T) = \sum_{N=0}^4 A(N)T^N [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$$

$$A(0) = 0.103409\text{E} + 1 \quad A(1) = -0.2848870\text{E} - 3$$

$$A(2) = 0.7816818\text{E} - 6 \quad A(3) = -0.4970786\text{E} - 9$$

$$A(4) = 0.1077024\text{E} - 12$$

(2) 比焓 $h(T)$

$$h(T) = \sum_{N=0}^3 B(N)T^N (\text{kJ}/\text{kg})$$

$$B(0) = 0.120740\text{E} + 2 \quad B(1) = 0.924502$$

$$B(2) = 0.115984\text{E} - 3 \quad B(3) = -0.563568\text{E} - 8$$

(3) 比熵函数 $e(T)$

$$e(T) = \sum_{N=0}^1 C(N)T^N + C(2)\ln(T) [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$$

$$C(0) = 0.1386989\text{E} + 1 \quad C(1) = 0.184930\text{E} - 3$$

$$C(2) = 0.95$$

(4) 温度 $T(I_p)$

$$T(I_p) = \sum_{N=0}^3 D(N)(I_p)^N (\text{K})$$

$$D(0) = -0.880092\text{E} + 4 \quad D(1) = 0.126974\text{E} + 4$$

$$D(2) = -0.619391\text{E} + 2 \quad D(3) = 0.103530\text{E} + 1$$

以上热力性质计算公式的适用范围为 $250 \leq T \leq 2000\text{K}$ 。空气的千摩尔质量 $\mu = 28.9645\text{kg}/\text{kmol}$, 气体常数 $R = 0.287055\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 临界压力 $p_c = 3.77\text{MPa}$, 临界温度 $T_c = 132.6\text{K}$ 。

(5) 粘度 $\eta(T)$

1) $250 \leq T < 600\text{K}$

$$\eta(T) = \sum_{N=0}^6 X(N)T^N (\text{Pa} \cdot \text{s})$$

$$\begin{aligned}
X(0) &= -9.8601E-1 & X(1) &= 9.080125E-2 \\
X(2) &= -1.17635575E-4 & X(3) &= 1.2349703E-7 \\
X(4) &= -5.7971299E-11 & X(5) &= 0.0 \\
X(6) &= 0.0
\end{aligned}$$

$$2) 600 \leq T \leq 1050K$$

$$\eta(T) = \sum_{N=0}^6 Y(N)T^N (\text{Pa} \cdot \text{s})$$

$$\begin{aligned}
Y(0) &= 4.8856745 & Y(1) &= 5.43232E-2 \\
Y(2) &= -2.4261775E-5 & Y(3) &= 7.9306E-9 \\
Y(4) &= -1.10398E-12 & Y(5) &= 0.0 \\
Y(6) &= 0.0
\end{aligned}$$

$$(6) \text{ 导热系数 } \lambda(T)$$

$$\lambda(T) = \sum_{N=0}^6 Z(N)T^N [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$$

$$\text{适用范围: } 250 \leq T \leq 1050K$$

$$\begin{aligned}
Z(0) &= -2.276501E-3 & Z(1) &= 1.2598485E-4 \\
Z(2) &= -1.4815235E-7 & Z(3) &= 1.73550646E-10 \\
Z(4) &= -1.066657E-13 & Z(5) &= 2.47663035E-17 \\
Z(6) &= 0.0
\end{aligned}$$

空气热物性的数值可由上列公式及其定义计算,计算求得的部分数据列于表 1.1, 可供调试程序时参考。

本节所列公式的计算精度受两方面因素的影响。首先是在拟合上列各公式时所采用的基础数据的误差;其次是公式计算值与基础数据之间的偏差。对于热力性质,采用文献 [3] 的数据作为基础数据。以比焓为例,当 $T < 1300K$ 时,文献 [3] 的数据与其它一些被公认的数据之间的偏差小于 0.1%。当 $1300 < T < 2000K$ 时,如果考虑离解效应,

表 1.1 空气的热物理性质表

T (K)	c_p ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$)	c_v ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$)	h (kJ/kg)	μ (kJ/kg)	c ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$)	I_p	I_o	γ	a (m/s)	$\eta \times 10^6$ (Pa · s)	$\lambda \times 10^4$ ($\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$)
250	1.0044	0.71733	250.36	178.60	6.6786	23.267	-18.994	1.4001	316.98	16.07	22.28
300	1.0064	0.71938	299.71	213.60	6.8611	23.903	-19.447	1.3990	347.09	18.53	26.07
400	1.0161	0.72910	400.07	285.26	7.1529	24.919	-20.176	1.3937	400.02	22.93	33.04
500	1.0317	0.74461	502.62	359.10	7.3833	25.722	-20.756	1.3855	445.92	26.82	39.48
600	1.0512	0.76410	607.31	435.09	7.5750	26.390	-21.241	1.3757	486.74	30.31	45.57
700	1.0731	0.78600	714.12	513.20	7.7399	26.965	-21.662	1.3652	523.74	33.48	51.40
800	1.0961	0.80902	823.02	593.39	7.8853	27.471	-22.035	1.3548	557.77	36.42	56.98
900	1.1191	0.83210	933.96	675.63	8.0157	27.925	-22.371	1.3450	589.45	39.18	62.27
1000	1.1415	0.85446	1046.9	759.88	8.1343	28.339	-22.679	1.3359	619.25	41.77	67.21
1050	1.1522	0.86520	1104.1	802.76	8.1899	28.532	-22.824	1.3318	633.55	43.02	69.53
1500	1.2331	0.94610	1640.8	1210.2	8.6119	30.003	-23.938	1.3034	749.12	—	—
2000	1.3377	1.0506	2279.9	1705.8	8.9777	31.277	-24.924	1.2732	854.94	—	—

则偏差小于 0.05%。可见,文献 [3] 的数据是比较可靠的。此外,用上面给出的比焓计算公式求得的值与基础数据的最大相对偏差为 0.27%,但一般情况下都小于 0.1%。其它热力性质的计算偏差也大致相同,具体数据列于表 1.2。

表 1.2 空气热力性质的计算值与基础数据的偏差

热力性质参数	基础数据来源	最大相对偏差的绝对值 (%)	平均相对偏差的绝对值 (%)
u	文献 [3]	0.40	0.10
h	$u + RT$	0.27	0.07
c_p	文献 [3]	0.25	0.13
c_v	文献 [3]	0.31	0.17
e	文献 [3]	0.06	0.02
l_p	由 e 计算	0.06	0.02
l_v	由 e 计算	0.06	0.02
$T(l_p)$	由 l_p 计算	0.08	0.03
γ	文献 [3]	0.28	0.09
a	文献 [3]	0.12	0.05

对于迁移性质,采用文献 [4] 的数据作为基础数据。基础数据的相对误差和计算值的最大相对偏差列于表 1.3。

表 1.3 空气迁移性质的计算精度

迁移性质参数	适用温度范围 (K)	计算值的最大相对偏差 (%)	基础数据的相对误差 (%)
η	200—600	1.25	1(<1500K)
	600—1000	0.17	2(>1500K)
λ	200—1000	0.28	1(<500K)
			5(1000K)

§ 1.3 空气热物性 BASIC 程序的编制及应用

空气热物性的计算比较简单,在算法上并无困难。为了便于实际应用,可将各种热物性数值的计算先编成子程序,以备调用。

程序 1.1 是计算空气热物性的一个 BASIC 程序,程序中包含了计算各种热物性数值所需的子程序。应用程序 1.1 可计算某一温度 $T(K)$ 时的各种热物性数值或由给定的定熵压力函数 l_p 值计算相应的温度 T 。程序由 1 个主程序和 12 个子程序构成。程序的第 1 部分是计算时用到的变量赋值。第 2 部分通过控制参数 I 决定计算内容并调用子程序进行计算。当在键盘上输入 $I = 2$ 时,程序执行求 $T(l_p)$ 的运算。这时只要通过键盘给自变量 l_p 赋一定值 ($23.267 \leq l_p \leq 31.277$),即可求出相应的温度 $T(K)$ 。当 $I \neq 2$ (给定 $I = 1$ 或其它任意整数)时,只要给自变量 T 赋一定值 ($250 \leq T \leq 2000K$),即可求出各种热力性质的数值。对迁移性质,自变量的范围为 $250 \leq T \leq 1050K$ 。第 3 部分输出计算的结果。当温度超出 $250 \leq T \leq 2000K$ 时,程序将给出超限信息。对迁移

性质,当 $T > 1050$ 时,一律给出零值,表示超限。第4部分是12个子程序,分别计算 $c_p, c_v, h, u, E, I_p, I_v, \gamma, a, \eta, \lambda$ 和 $T(I_p)$ 。

由 § 1.2 节所列公式可知,对于热力性质计算公式,其系数有效数字不大于7位,所以在计算时只要采用单精度实数即可。但是,对于迁移性质计算公式,其系数有效数字最多达9位,因此必须采用双精度实数才能满足要求,不过由于计算公式的运算仅限于算术运算,故不要求函数双精度。由于上述理由,空气热物性数值的计算采用一般的微型计算机(例如,NEC-PC8000 系列)即可满足要求。此外,一般的袖珍计算机都具有10位有效数字,对变量无需作精度指定,使用起来会更加方便。

程序 1.1 已在 PC-1401 型袖珍计算机中调试通过,程序长度约为 2700 字节。该程序可适用于目前国内较多的 PC-1500, PC-1251 和 PC-1255 等袖珍机型,稍作修改即可用于 PC-8000, Apple II 等微型计算机。

程序 1.1 中列出的 12 个子程序,可供编制空气的各种实际应用程序时选用。

程序 1.1 空气热物性的 BASIC 程序

```

10:"PR1.1":REM * TPP OF      270:FOR N=0 TO 6
    AIR *                     280:READ Z(N)
20:DIM A(4),B(3),C(2),D      290:NEXT N
    (3),X(6),Y(6),Z(6)       300:DATA -2.276501E-03,1
30:FOR N=0 TO 4               .2598485E-4,-1.48152
40:READ A(N)                  35E-7,1.73550646E-10
50:NEXT N                      ,-1.066657E-13
60:DATA .103409E1,-2.84
    887E-4,7.816818E-7,-
    4.970786E-10,1.07702
    4E-13
70:FOR N=0 TO 3              310:DATA 2.47663035E-17,
80:READ B(N)                  .0
90:NEXT N                     320:R=.287055
100:DATA .12074E2,.92450      330:INPUT "I=";I
    2,1.15984E-4,-5.6356      340:IF I=2 THEN 640
    8E-9                        350:INPUT "T(K)=";T
110:FOR N=0 TO 2              360:TW=T
120:READ C(N)                  370:IF T<=2000 AND 250<=
130:NEXT N                     T THEN 390
140:DATA .1386989E1,.184      380:PRINT "--OUT OF RANG
    930E-3,.95                  E--":GOTO 700
150:FOR N=0 TO 3              390:GOSUB "CP"
160:READ D(N)                  400:GOSUB "CV"
170:NEXT N                     410:GOSUB "H"
180:DATA -.880092E4,.126      420:GOSUB "U"
    974E4,-.619391E2,.10      430:GOSUB "E"
    3530E1                      440:GOSUB "IP"
190:FOR N=0 TO 6              450:GOSUB "IV"
200:READ X(N)                  460:GOSUB "GA"
210:NEXT N                     470:GOSUB "A"
220:DATA -9.8601E-1,9.08      480:GOSUB "ET"
    0125E-2,1.17635575E-      490:GOSUB "LA"
    4,1.2349703E-7,-5.79      500:LPRINT "T      =";
    71299E-11,0.0,0.          USING "#####.###";T;"
230:FOR N=0 TO 6              (K)"
240:READ Y(N)                  510:USING "##.####^"
250:NEXT N                      520:LPRINT "CP      =";CP;"
260:DATA 4.8856745,5.432      (KJ/(KG      .K))"
    32E-2,-2.4261775E-5,      530:LPRINT "CV      =";CV;"
    7.9306E-9,-1.10398E-      (KJ/(KG      .K))"
    12,.0,.0                  540:LPRINT "H      =";H;"(
                                KJ/KG)"
                                550:LPRINT "U      =";U;"(
                                KJ/KG)"

```

```

560:LPRINT "E    =" ; E ; "("
      KJ/(KG    .K))"
570:LPRINT "IP    =" ; IP
580:LPRINT "IV    =" ; IV
590:LPRINT "GA    =" ; GA
600:LPRINT "A      =" ; A ; "("
      M/S)"
610:LPRINT "ET*E6=" ; ET ; "("
      (PA.S)"
620:LPRINT "LA*E3=" ; LA ; "("
      (W/(M.K    ))"
630:GOTO 700
640:INPUT "IP=" ; IP
650:IF 23.267<=IP AND IP
      <=31.277 THEN 670
660:PRINT "--OUT OF RANG
      E--":GOTO 700

670:GOSUB "TIP"
680:LPRINT "IP=" ; USING
      "###.###" ; IP
690:LPRINT "T =" ; USING
      "#####.##" ; TIP ; "(K)"
700:END
710:"CP":REM --CP(T)--
720:S=0
730:FOR N=0 TO 4
740:S=S+A(N)*TW^N
750:NEXT N
760:CP=S
770:RETURN
780:"CV":REM --CV(T)--
790:CV=CP-R
800:RETURN
810:"H":REM --H(T)--
820:S=0
830:FOR N=0 TO 3
840:S=S+B(N)*TW^N
850:NEXT N
860:H=S
870:RETURN
880:"U":REM --U(T)--
890:U=H-R*TW
900:RETURN
910:"E":REM --E(T)--
920:S=0
930:FOR N=0 TO 1
940:S=S+C(N)*TW^N
950:NEXT N
960:E=C(2)*LN (TW)+S
970:RETURN

980:"IP":REM --IP(T)--
990:IP=E/R
1000:RETURN
1010:"IV":REM --IV(T)--
1020:IV=LN (R*TW)-IP
1030:RETURN
1040:"GA":REM --GA(T)--
1050:W=R/CP
1060:GA=1/(1-W)
1070:RETURN
1080:"A":REM --A(T)--
1090:A=(GA*R*TW*1000)^(
      1/2)
1100:RETURN
1110:"ET":REM --ET(T)--
1120:IF TW>=600 THEN 11
      80
1130:S=0
1140:FOR N=0 TO 6
1150:S=S+X(N)*TW^N
1160:NEXT N
1170:GOTO 1240
1180:IF TW<=1050 THEN 1
      200
1190:ET=0:GOTO 1250
1200:S=0
1210:FOR N=0 TO 6
1220:S=S+Y(N)*TW^N
1230:NEXT N
1240:ET=S
1250:RETURN
1260:"LA":REM --LA(T)--
1270:IF TW<=1050 THEN 1
      290
1280:LA=0:GOTO 1340
1290:S=0
1300:FOR N=0 TO 6
1310:S=S+Z(N)*TW^N
1320:NEXT N
1330:LA=S*1000
1340:RETURN
1350:"TIP":REM --T(IP)-
      -
1360:S=0
1370:FOR N=0 TO 3
1380:S=S+D(N)*(IP)^N
1390:NEXT N
1400:TIP=S
1410:RETURN

```

例 1.1 试求 $T = 293.15\text{K}$ 时空气的热物性数值。

解 应用程序 1.1, 从键盘输入 $I = 1, T = 293.15$, 打印机即输出如下计算结果:

```

T = 293.15(K)
CP = 1.0060E + 00(KJ/(KG.K))
CV = 7.1896E - 01(KJ/(KG.K))
H  = 2.9291E + 02(KJ/KG)

```

```

U = 2.0876E + 02(KJ/KG)
E = 6.8378E + 00(KJ/(KG.K))

IP = 2.3820E + 01
IV = -1.9388E + 01
GA = 1.3992E + 00
A = 3.4314E + 02(M/S)
ET*E6 = 1.8206E + 01(PA .S)
LA*E3 = 2.5562E + 01(W/(M. K))

```

例 1.2 试编写一个 BASIC 程序, 精确计算 $m(\text{kg})$ 空气在定容下从 $t_1(^{\circ}\text{C})$ 被加热到 $t_2(^{\circ}\text{C})$ 时加入的热量 Q 。设 $m = 2\text{kg}$, $t_1 = 100^{\circ}\text{C}$, $t_2 = 310^{\circ}\text{C}$, 试打印出计算结果。

解 (1)按题意, 加热量 $Q = m(u_2 - u_1)$, 参考程序 1.1, 先编写一个计算 $h(T)$ 的子程序, 然后调用该子程序即可编成符合本题要求的程序 1.2。

(2) 从键盘输入 $T1 = 100, T2 = 310, M = 2$, 打印机即输出计算结果如下:

```

T1 = 100.00(C)
T2 = 310.00(C)
M = 2.000E + 00(KG)
QV = 3.126E + 02(KJ)

```

程序 1.2 计算空气定容加热量 Q 的 BASIC 程序

```

10:"PR1.2":REM * QV OF
    AIR *
20:DIM B(3)
30:FOR N=0 TO 3
40:READ B(N)
50:NEXT N
60:DATA .120740E2,.9245
    02,.115984E-3,-.5635
    68E-8
70:R=.287055
80:INPUT "T1(C)=";T1
90:INPUT "T2(C)=";T2
100:INPUT "M(KG)=";M
110:T3=T1+273.15
120:T4=T2+273.15
130:TW=T3
140:GOSUB "H"
150:H1=H
160:U1=H1-R*TW
170:TW=T4
180:GOSUB "H"
190:H2=H
200:U2=H2-R*TW
210:QV=M*(U2-U1)
220:LPRINT "T1="; USING
    "#####.##";T1;"(C)"
230:LPRINT "T2="; USING
    "#####.##";T2;"(C)"
240:LPRINT "M = ";
    USING "###.###^";M;"(
    KG)"
250:LPRINT "QV= ";
    USING "###.###^";QV;"
    (KJ)"
260:END
270:"H":REM --H(T)--
280:W=0
290:FOR N=0 TO 3
300:W=W+B(N)*TW^N
310:NEXT N
320:H=W
330:RETURN

```

§ 1.4 空气热物性 FORTRAN 程序的编制及应用

程序 1.3 是根据程序 1.1 译出的计算空气热物性数值的 FORTRAN 程序, 已在 IBM/PC

机上调试通过。为使程序更为紧凑,各种热物性的计算没有采用子程序形式而是在一个程序中完成的。程序 1.3 与程序 1.1 具有相同的功能,可计算某一温度 $T(K)$ 时空气的各种热物性数值或根据给定的定熵压力函数 I_p 的数值计算温度 T 。当 $I = 2$ 时执行后一种运算;当 $I \neq 2$ 时执行前一种运算。程序当前执行的是计算温度 $T = 250K$ 时空气的热物性数值或定熵压力函数 $I_p = 23.267$ 时的温度 T 的数值。根据实际需要, T 或 I_p 的具体数值可通过程序中相应的赋值语句输入。

程序 1.3 可直接应用,也可经适当修改后用于各种实际计算。例如,为了打印一张以

程序 1.3 空气热物性的 FORTRAN 程序

```

C      ***** PR1.3 FOR *****
C      THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF AIR
      DOUBLE PRECISION A(5),B(4),C(3),
&      D(4),X(7),Y(7),Z(7),T,
&      R,CP,CV,H,U,E,IP,IV,GA,
&      AA,ET,LA,TIP,EW,LAW,KTW
      DATA A,B,C,D,X,Y,Z,R/0.103409D1,-0.2848870D-3,
&      0.7816818D-6,-0.4970786D-9,0.1077024D-12,0.120740D2,
&      0.924502D0,0.115984D-3,-0.563568D-8,0.1386989D1,
&      0.184930D-3,0.95D0,-0.880092D4,0.126974D4,
&      -0.619391D2,0.103530D1,-9.8601D-1,9.080125D-2,
&      -1.17635575D-4,1.2349703D-7,-5.7971299D-11,0.0D0,
&      0.0D0,4.8856745D0,5.43232D-2,-2.4261775D-5,
&      7.9306D-9,-1.10398D-12,0.0D0,0.0D0,
&      -2.276501D-3,1.2598485D-4,-1.4815235D-7,
&      1.73550646D-10,-1.066657D-13,2.47663035D-17,
&      0.0D0,0.287055D0/
      I=1
      WRITE(*,10)
10     FORMAT(/4X,20H*** TPP OF AIR ***)
      IF(I.EQ.2) GOTO 230
      T=250.00D0
      IF(250.0D0.LE.T.AND.T.LE.2000.0D0) GOTO 30
      WRITE(*,20)
20     FORMAT(/3X,22H-----OUT OF RANGE-----)
      GOTO 280
30     CP=0.0D0
      DO 40 N=1,5
      CP=CP+A(N)*T**(N-1)
40     CONTINUE
      CV=CP-R
      WRITE(*,50) CP,CV
50     FORMAT(/2X,6HCP      =,F11.5, 9H(KJ/KG.K),
&           //2X,6HCV      =,
&           F11.5,9H(KJ/KG.K))
      H=0.0D0
      DO 60 N=1,4
      H=H+B(N)*T**(N-1)
60     CONTINUE
      U=H-R*T
      WRITE(*,70)H,U
70     FORMAT(/2X,6HH      =, F11.5,
&           7H(KJ/KG)//2X,6HU      =,
&           F11.5,7H(KJ/KG))
      EW=0.0D0
      DO 80 N=1,2
      EW=EW+C(N)*T**(N-1)
80     CONTINUE
      E=C(3)*DLOG(T)+EW
      IP=E/R
      IV=OLOG(R*T)-IP
      WRITE(*,90)E,IP,IV
90     FORMAT(/2X,6HE      =,F11.5,
&           9H(KJ/KG.K)//2X,6HIP      =,
&           F11.5//2X,6HIV      =,F11.5)

```