

143

热力过程计算与燃气表

RELIGUOCHENG JISUAN YU RANQIBIAO

下 卷

范作民 傅巽权 著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了采用喷气燃料的空气喷气发动机和燃气轮机热力过程计算以及喷气燃料-空气系统燃气表。全书分成上、下两卷，上卷为热力过程计算，下卷为燃气表。

本书下卷给出了一套全面而完整的喷气燃料-空气系统燃气表。这些表包括：1. C_nH_m -空气系统化学平衡状态燃气热力性质表；2. $C_nH_mO_l$ -空气系统完全燃烧产物热力性质表；3. C_nH_m -空气系统变成分气功函数表；4. C_nH_m -空气系统燃烧过程理论温升表。书中各表的适用参数范围十分宽广，其中压力范围为0.01~50atm(或kg/cm²)，温度范围为100~3000K，当量比范围为0~2.0，空气含湿量范围为0~0.02。这些表可以满足喷气发动机和燃气轮机热力过程变热容问题和变成分问题计算的各种需要。

本书可供喷气发动机和燃气轮机的设计和研究人员以及高等院校师生参考。

热力过程计算与燃气表

下 卷

范作民 傅巽权 著

责任编辑 阎瑞琪

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₁₆ 印张35 插页2 818千字

1987年4月第一版 1987年4月第一次印刷 印数：0001—770册

统一书号：15034·2919 定价：9.60元

前 言

本书系统而详尽地介绍了采用喷气燃料的空气喷气发动机和燃气轮机热力过程计算以及喷气燃料-空气系统燃气表。全书分成上、下两卷，上卷为热力过程计算，下卷为燃气表。

喷气发动机热力过程的计算应当属于变热容问题或变热容变成分问题(后者简称变成分问题)的范畴。但是，目前仍然广泛采用定热容问题的计算方法。即使考虑了热容的变化，也往往采用定热容的计算公式如定热容气体动力学函数进行计算。这种状况已经不能满足现代喷气发动机热力过程计算的要求。可是，关于变热容和变成分问题的系统研究工作又极为薄弱。热力学教科书中所研究的主要是静止气体，而且重点放在热力过程的基本原理方面，对具体计算方法很少注意。在气体动力学教科书中虽然研究了流动气体热力过程的计算，但完全是建立在定热容问题的基础上的。本书的主要目的就是给出喷气发动机热力过程变热容和变成分问题的比较完整的计算系统以及提供一整套计算方法和计算手段(计算机程序和燃气表)，以使喷气发动机热力过程的变热容和变成分问题的计算方法能够得到推广和应用。

本书上卷的主要内容包括喷气燃料-空气系统热力过程的计算方法、对喷气发动机和燃气轮机中的一些重要热力过程的讨论、 $C_{12}H_{22}O_4$ -空气系统典型热力过程变热容问题和变成分问题的计算机程序等；下卷给出了一套全面而完整的喷气燃料-空气系统燃气表，这些表可以满足喷气发动机和燃气轮机热力过程变热容问题和变成分问题计算的各种需要。

本书燃气表的计算工作始于1979年。根据国务院1977年5月颁发的《中华人民共和国计量管理条例(试行)》的规定，并征求了有关方面的意见，决定全书采用工程单位制。后又根据1981年7月14日国务院批准的《中华人民共和国计量单位名称与符号方案(试行)》的规定，作了一些调整，计算中所采用的工程单位制单位都是该方案中规定可与国际单位制单位并用的单位。1984年2月27日国务院发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》。这时，全书数据表已全部制成待印，要在短期内按法定计量单位重算全部数据表已无可能。在这种情况下，又考虑到有关部门对数据表的急切需要，本书暂按工程单位制单位出版。我国的法定计量单位以国际单位制单位为基础，为方便读者，在本书的附录中给出了“燃气表表列参数的工程单位制单位与国际单位制单位的换算关系表”。

在本书的编写过程中，赵清杰、巢志方和王冬坚等同志参加了数据表的计算工作，甄淑敏同志为全书描绘了插图。作者谨对这些同志的热忱帮助表示感谢。

由于作者水平有限，书中缺点错误在所难免，欢迎广大读者批评指正。

作 者

1984年4月

目 录

符号	1
绪言	4

燃气表制表说明

一、 C_nH_m -空气系统化学平衡状态燃气热力性质表制表说明	8
1.1 C_nH_{2n} -空气系统化学平衡状态燃气热力性质表	8
1.1.1 表的内容	8
1.1.2 插值方法和插值误差	8
1.1.2.1 对于自变量 T 的插值	8
1.1.2.2 对于自变量 p 的插值	8
1.1.2.3 对于自变量 ϕ 的插值	11
1.1.3 表的用法	11
1.2 $(CH_x)_n$ -空气系统化学平衡状态燃气热力性质差值表	15
1.2.1 表的内容	15
1.2.2 插值方法和插值误差	15
1.2.3 表的用法	16
1.3 C_nH_m -湿空气系统化学平衡状态燃气热力性质差值表	17
1.3.1 表的内容	17
1.3.2 插值方法和插值误差	17
二、 $C_nH_mO_r$ -空气系统完全燃烧产物热力性质表制表说明	19
2.1 $C_nH_mO_r$ -空气系统 θ 函数表	19
2.1.1 θ 函数、 δ 函数和定温燃烧焓差	19
2.1.2 表的内容	21
2.1.3 表的用法	22
2.1.3.1 由燃气温度和油气比求燃气热力性质	22
2.1.3.2 由燃气温度和燃气的某一种热力性质求燃气油气比	24
2.1.3.3 由燃气油气比和燃气的某一种热力性质求燃气温度	24
2.1.3.4 定嫡指数的计算	25
2.1.3.5 湿空气燃烧产物热力性质的计算	25
2.2 C_nH_{2m} -空气系统 π 函数表	26
2.2.1 表的内容	26
2.2.2 表的用法	27
2.2.2.1 已知过程起点温度和过程中嫡的变化求过程的压力比	27
2.2.2.2 已知过程起点温度、过程中的压力比以及过程中嫡的变化求过程终点温度	27
2.3 $(CH_x)_n$ -空气系统定嫡指数 k 表	27
2.4 C_nH_m -空气系统 $f/(1+f)$ 表	27
2.5 C_nH_m -空气系统 C 值表	27
2.6 C_nH_m -空气系统基本热力性质表	27
2.7 C_nH_m -空气系统燃气摩尔重量 M_R 表	28
2.8 C_nH_m -空气系统 R/M_R 表	28
2.9 C_nH_m -空气系统 R'/M_R 表	29
2.10 C_nH_m -干空气系统比混合嫡 s_m 表	29

2.11 C_nH_m -湿空气系统比混合熵 s_m' 表	29
三、 C_nH_m -空气系统变成分气动函数表制表说明	30
3.1 C_nH_{2n} -空气系统变成分气动函数表	30
3.1.1 变成分气动函数的 β 系数和特性温度	30
3.1.2 表的内容	31
3.1.3 气动参数和 β 系数随自变量的变化关系	32
3.1.4 插值方法和插值误差	38
3.1.4.1 对于自变量 T 的插值	38
3.1.4.2 对于自变量 ϕ 的插值	38
3.1.4.3 对于自变量 T^* 的插值	39
3.1.4.4 对于自变量 p^* 的插值	40
3.1.5 表的用法	40
3.1.5.1 已知有关气流参数求 β 系数	41
3.1.5.2 已知 β 系数和有关气流参数求未知气流参数	42
3.1.5.3 变成分气动函数表应用举例	44
3.1.6 变成分气动函数表对非绝能流的应用	46
3.2 空气含湿量影响修正系数表	46
3.3 燃料成分影响修正系数表	48
四、 C_nH_m -空气系统燃烧过程理论温升表制表说明	50
4.1 表的基本结构	50
4.2 C_nH_{2n} -空气系统定压绝热燃烧过程理论温升表	51
4.2.1 表的内容	51
4.2.2 表的特点	51
4.2.3 插值方法和插值误差	52
4.2.4 表的应用	52
4.2.5 定压燃烧过程理论温升表对非定压燃烧过程的适用性	53
4.2.6 理论温升表对于进气油气比不等于零的情况的应用	53
4.2.6.1 燃烧过程起点的燃气成分为化学平衡成分	53
4.2.6.2 燃烧过程起点的燃气成分不是化学平衡成分	54
4.2.7 C_nH_{2n} -空气系统定压绝热完全燃烧过程理论温升详表	56
4.2.8 ω 表	57
4.3 燃料折合热值影响修正系数表	57
4.3.1 表的内容	57
4.3.2 表的应用	59
4.4 进气油气比影响修正系数表	60
4.4.1 进气油气比影响修正系数的两种定义	60
4.4.2 表的内容	60
4.4.3 表的应用	62
4.5 空气含湿量影响修正系数表	63
4.5.1 含湿量影响修正系数的两种定义	63
4.5.2 大气含湿量的计算	65
4.5.3 表的内容	67
4.5.4 表的应用	68
4.6 燃料成分影响修正系数表	69
4.7 理论温升修正系数表在多种因素交叉影响下的应用	73
附录 燃气表列参数的工程单位制单位与国际单位制单位的换算关系表	75
参考文献	78

燃 气 表

第 1 表	C_nH_m -空气系统化学平衡状态燃气热力性质表	80
第 1.1 表	C_nH_{2n} -空气系统化学平衡状态燃气热力性质表	80
第 1.2 表	$(CH_x)_n$ -空气系统化学平衡状态燃气热力性质差值表	210
第 1.3 表	C_nH_{2n} -湿空气系统化学平衡状态燃气热力性质差值表	229
第 2 表	$C_nH_mO_l$ -空气系统完全燃烧产物热力性质表	245
第 2.1 表	$C_nH_mO_l$ -空气系统 θ 函数表	245
第 2.2 表	C_nH_{2n} -空气系统 π 函数表	320
第 2.3 表	$(CH_x)_n$ -空气系统定熵指数 k 表	352
第 2.4 表	C_nH_m -空气系统 $f/(1+f)$ 表	359
第 2.5 表	C_nH_m -空气系统 C 值表	369
第 2.6 表	C_nH_m -空气系统基本热力性质表	379
第 2.7 表	C_nH_m -空气系统燃气摩尔重量 M_R 表	385
第 2.8 表	C_nH_m -空气系统 R/M_R 表	386
第 2.9 表	C_nH_m -空气系统 R'/M_R 表	387
第 2.10 表	C_nH_m -干空气系统比混合熵 s_m 表	388
第 2.11 表	C_nH_m -湿空气系统比混合熵 s'_m 表 ($w = 0.01$)	389
第 3 表	C_nH_m -空气系统变成分气动函数表	390
第 3.1 表	C_nH_{2n} -空气系统变成分气动函数表	390
第 3.2 表	空气含湿量影响修正系数表 ($x = 2.0, w = 0.01$)	457
第 3.3 表	燃料成分影响修正系数表 ($x = 3.0, w = 0$)	461
第 4 表	C_nH_m -空气系统燃烧过程理论温升表	465
第 4.1 表	C_nH_{2n} -空气系统定压绝热燃烧过程理论温升表	465
第 4.2 表	C_nH_{2n} -空气系统定压绝热完全燃烧过程理论温升详表	517
第 4.3 表	C_nH_{2n} -空气系统 ω 表	537
第 4.4 表	折合热值影响修正系数 K_q 表	540
第 4.5 表	进气油气比影响修正系数 K_f 表	542
第 4.6 表	进气油气比影响修正系数 K'_f 表	544
第 4.7 表	空气含湿量影响修正系数 K_w 表	546
第 4.8 表	空气含湿量影响修正系数 K'_w 表	548
第 4.9 表	燃料成分影响修正系数 K_x 表	550

符 号

A	面积, m^2
a	音速, m/s
C	$=M_g f/[M_{s,i}(1+f)]$, $\ominus$ 前面的系数
C_f	燃料中碳的重量成分
C_p	定压摩尔热容, $\text{kcal}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
c_p	定压比热容, $\text{kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
D	$=G/A$, 密流, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$
	摩尔定温燃烧焓差, kcal/kmol
d	比定温燃烧焓差, kcal/kg
F	$=I/A$, 单位面积的气流冲量, kg/m^2
f	油气比
f_1	进气油气比 (预燃过程燃烧产物的油气比)
G	重量流量, kg/s
g	重力加速度, 9.80665m/s^2
H	摩尔绝对焓, kcal/kmol
h	比绝对焓, kcal/kg
h_f	燃料的比绝对焓, kcal/kg
Δh_f°	$=h_f - h_f^\circ$, kcal/kg
I	$=pA + Gv/g$, 气流冲量, kg
J	热功当量, $426.935\text{kg} \cdot \text{m}/\text{kcal}$
K	燃烧方程中的系数 [见(4.4.6)和(4.4.8)式]
K_f	进气油气比影响修正系数
K_f'	进气油气比影响修正系数
K_q	燃料折合热值影响修正系数
K_w	空气含湿量影响修正系数
K_w'	空气含湿量影响修正系数
K_x	燃料成分影响修正系数
k	定熵指数
l	燃料的氧原子数
M	摩尔重量, kg/kmol
Ma	$=v/a$, 马赫数
M_f	$=nM_c + mM_H + lM_O$, 燃料的摩尔重量, kg/kmol
m	燃料的氢原子数
n	燃料的碳原子数
p	压力, atm 或 kg/cm^2

- q 燃料的低热值, kcal/kg
 q' $=q^\circ + \Delta h_f^\circ$, 燃料的折合热值, kcal/kg
 R 摩尔气体常数, 1.985836 kcal/(kmol·K)
 R' 摩尔气体常数, 847.8229 kg·m/(kmol·K)
 r 混合气体中某种气体组分的容积分数 (相对摩尔数)
 S 摩尔熵, kcal/(kmol·K)
 s 比熵, kcal/(kg·K)
 $s_m = -(R/M) \sum_i r_i \ln r_i$, 比混合熵, kcal/(kg·K)
 T 热力学温度, K
 $T_s = (T + T^*)/2 + 0.1T$, 变成分气动函数表中的特性温度, K
 $\Delta T_i = T_{2,i}^* - T_{1,i}^*$, 燃烧过程的理论温升, K
 u 比内能, kcal/kg
 v 气流速度, m/s
 w 空气中的含湿量 (湿空气中水蒸气与干空气重量之比)
 $x = m/n$, 燃料氢碳比 (碳氢燃料的氢与碳原子数之比)
 Y C_p , H 或 Ψ 中的任何一个, kcal/kmol 或 kcal/(kmol·K)
 y 任何一种燃气热力性质
 c_p , h 或 ψ 中的任何一个, kcal/kg 或 kcal/(kg·K)
 $\Delta y = \ln y - \ln y^\circ$, 牛顿法修正量
 $\delta y = y - y^\circ$, 牛顿法修正量

希腊字母

- $\alpha = \left(\frac{\partial \ln M}{\partial \ln T} \right)_p$
 $\beta = \left(\frac{\partial \ln M}{\partial \ln p} \right)_T$
 $\beta_a = \sqrt{kg R' / M}$, 音速方程的 β 系数, $m/(s \cdot \sqrt{K})$
 $\beta_G = G \sqrt{T} (p A M a) = \beta_a / \beta_R$, 流量方程的 β 系数, $\sqrt{K} / s$
 $\beta_h = (T^* / T - 1) / M a^2$, 能量方程的 β 系数
 $\beta_R = R' / M$, 状态方程的 β 系数, $kg \cdot m / (kg \cdot K)$
 γ 重度, kg/m^3
 $\Delta_i = \Theta_i - \Theta_1$, 燃气热力性质的摩尔 δ 函数, kcal/kmol 或 kcal/(kmol·K)
 $\bar{\Delta}_i = \Delta_i / R$, 熵函数的无量纲 δ 函数
 $\delta_i = \theta_i - \theta_1$, 燃气热力性质的比 δ 函数, kcal/kg 或 kcal/(kg·K)
 η_v 按当量放热量定义的燃烧效率
 η_T 按温升定义的燃烧效率
 $\Theta = \frac{M_{s,i}}{M_{s,i}} \frac{1 + f_{s,i}}{f_{s,i}} (Y_{s,i} - Y_a)$, 燃气热力性质的摩尔 θ 函数, kcal/kmol 或 kcal/(kmol·K)
 $\bar{\Theta}_i = \Theta_i / R$, 熵函数的无量纲 θ 函数

$\theta = \frac{1+f_{ss}}{f_{ss}}(y_{ss}-y_s)$, 燃气热力性质的比 θ 函数, kcal/kg 或 kcal/(kg·K)

ξ 燃烧过程的放热系数

$\pi = e^{(\bar{\Psi}-\bar{\Psi}_0)} = e^{\frac{M}{R}(\psi-\psi_0)}$, π 函数

ρ 密度, kg·s²/m⁴

$\phi = f/f_{ss}$, 当量比

φ 空气的相对湿度

$\Psi = \int_0^T \frac{C_p dT}{T} = \sum_i r_i S^*$, 摩尔熵函数, kcal/(kmol·K)

$\bar{\Psi} = \Psi/R$, 无量纲熵函数

$\psi = \int_0^T \frac{c_p dT}{T} = \left(\sum_i r_i S^* \right) / M$, 比熵函数, kcal/(kg·K)

上 标

- 纯空气(用于 r)
- 测定燃料热值时的温度(用于 h 、 d 、 q)
- 标准状态(1atm)(用于 H 、 S)
- 利用迭代法求解方程式时的初值
- ※ 滞止状态(用于 p 、 T 和 h 等)

下 标

- 0 预燃过程起点
- 参考温度
- 1 过程起点
- 2 过程终点
- 298 温度为 298.15K
- a 空气
- c_p 定压比热容(用于 θ 函数和 δ 函数)
- e 化学平衡过程
- eq 折合系统
- 当量燃烧过程
- f 燃料
- 冻结过程
- g 燃气(通常情况下略去不写)
- h 焓(用于 θ 函数和 δ 函数)
- m 平均值
- ref 参考工况
- st 化学恰当油气比
- t 对应于完全燃烧产物或化学平衡状态的理论值
- Σ 包括预燃过程在内
- ψ 熵函数(用于 θ 函数和 δ 函数)

绪 言

本书下卷给出了以下四种燃气表:

1. C_nH_m -空气系统化学平衡状态燃气热力性质表;
2. $C_nH_mO_l$ -空气系统完全燃烧产物热力性质表;
3. C_nH_m -空气系统变成分气动函数表;
4. C_nH_m -空气系统燃烧过程理论温升表。

燃气表主要用于喷气发动机和燃气轮机热力过程的计算。现在,虽然电子计算机已经得到了广泛的应用,但是燃气表并没有丧失其重要性。

到目前为止,文献〔1〕和文献〔2〕是最有影响的两份完全燃烧产物热力性质表。但是,这两份表只适用于燃料氢碳比为一定值的情况(文献〔1〕可近似地用于一定的燃料氢碳比范围)。本书给出的 $C_nH_mO_l$ -空气系统完全燃烧产物热力性质表,可以适用于任意 n 、 m 和 l 值的 $C_nH_mO_l$ 型燃料以及湿空气的通用燃气热力性质表。这个表的特点是建立在 θ 函数和 δ 函数的基础上,可以十分简单而又准确地计算 $C_nH_mO_l$ -空气系统完全燃烧产物的热力性质。此外,表中给出的定温燃烧焓差可以简化燃烧方程的计算。

至于化学平衡状态燃气热力性质表,目前最完善的表是众所周知的GE表^{〔3〕}。但是,GE表出版年代较早,计算此表所用的气体组分热力性质的某些原始数据现在已经过时;表中没有给出空气的热力性质和平衡定熵指数及冻结定熵指数,使用起来不够方便;并且,此表只适用于 C_nH_{2n} -空气系统。本书给出的化学平衡状态燃气热力性质表采用了较新的原始数据,表中还给出了空气的热力性质和平衡定熵指数及冻结定熵指数,并计入了燃料氢碳比和空气含湿量的影响。

除上述燃气热力性质表外,还可以采用另外一类计算用表,即气动参数表(包括变热容变成分气动函数表和燃烧过程理论温升表两种计算用表)来进行喷气发动机热力过程变热容问题和变成分问题的计算;前者适用于定熵流,后者适用于燃烧过程。这类表的特点是直接给出热力过程中气流参数的变化关系,在大多数情况下可以简化热力过程的计算。编制气动参数表的主要困难在于所需计入的气流参数自变量数目较多,因而表的结构比较复杂,所需篇幅较多。正因为如此,这类计算用表目前尚不多见。就作者所知,只有文献〔4〕给出了比较详细但只适用于干空气的变成分气动函数表。在本书给出的变成分气动函数表和燃烧过程理论温升表中,分别引入了 β 系数和影响因素修正系数的概念,使我们能在有限的篇幅内计入多种因素的影响。

本书下卷给出的燃气表所采用的计算方法、原始数据以及对于计算结果的误差分析详见本书上卷。现仅就与燃气表直接有关的问题作简要说明。

燃气表制表计算中所用到的一个基本假设是认为混合气体(在成分不变的条件下)及其中每一种气体组分都是理想气体。

原始反应系统由 $C_nH_mO_l$ 型燃料(包括碳C和 H_2 两种极端情况)和“标准”空气(可以计入含湿量)组成。“标准”干空气的容积成分为

$$r_{N_2}^\circ = 0.780881$$

$$r_{O_2}^\circ = 0.209495$$

$$r_{Ar}^\circ = 0.009324$$

$$r_{CO_2}^\circ = 0.000300$$

标准干空气的摩尔重量为 $M_a=28.96440\text{kg/kmol}$ 。

水蒸气的摩尔重量为 $M_w=18.01534\text{kg/kmol}$ 。

此反应系统涉及碳、氢、氧、氮和氩五种元素，它们的摩尔重量分别为

$$M_C=12.01115\text{kg/kmol}$$

$$M_H=1.00797\text{kg/kmol}$$

$$M_O=15.9994\text{kg/kmol}$$

$$M_N=14.0067\text{kg/kmol}$$

$$M_{Ar}=39.948\text{kg/kmol}$$

燃气成分能够满足压力方程、物质守恒方程以及化学平衡方程的燃烧产物称为**化学平衡状态燃烧产物**。在本书中，化学平衡状态燃烧产物包含 N_2 、 CO_2 、Ar、 H_2O 、 O_2 、CO、 H_2 、OH、NO、H、O和N共12种气体组分。仅包含 N_2 、 CO_2 、Ar、 H_2O 和 O_2 5种气体组分，并且其成分能满足物质守恒方程的燃烧产物称为**完全燃烧产物**。按照完全燃烧的化学反应方程式，燃料刚好把空气中的氧全部消耗完毕，这时的反应混合物称为**化学恰当混合物**，其油气比称为**化学恰当油气比** f_{st} 。此时的燃烧产物称为**理论完全燃烧产物**。

反应混合物中的实际油气比 f 与化学恰当油气比 f_{st} 之比称为**当量比** ϕ 。

在燃烧产物中，除氩气外，其余各气体组分的热力性质数据取自文献〔5〕，氩气的的数据取自文献〔6〕。原始数据的函数逼近方法按直接插值方案或插值积分组合方案。插值点数 $n=6$ 。

本卷采用工程单位制，并采用国际代号作为计量单位的代号。书中涉及的国际代号的涵义见表0.1。

表0.1 计量单位的国际代号

量的名称	单位名称	国际代号
长度	米	m
重量	千克	kg
时间	秒	s
热力学温度	开尔文	K
摄氏温度	摄氏度	°C
物质的量	摩尔	mol
能、功	千 克 米	kg·m
热 量	卡 (或千卡)	cal (或kcal)
压力(压强)	(物理) 大气压	atm

书中用到的重要常数有

热功当量 $J=426.935\text{kg}\cdot\text{m/kcal}$

摩尔气体常数 $R=1.985836\text{kcal}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$

$$=847.8229\text{kg}\cdot\text{m}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$$

物理大气压 $1\text{atm}=10332.276\text{kg}/\text{m}^2$

重力加速度 $g=9.80665\text{m}/\text{s}^2$

表 0.2 中给出了本书中常用的工程单位制单位与国际单位制单位之间的换算关系。

表 0.2 常用工程单位制单位与国际单位制单位之间的换算关系

量 的 名 称	换 算 关 系
能、功、热量	$1\text{cal}(\text{国际蒸汽表卡}) = 4.1868\text{ J}(\text{焦耳})(\text{准确值})$ $1\text{cal}_{TH}(\text{热化学卡}) = 4.1840\text{ J}(\text{焦耳})(\text{准确值})$ $1\text{kg}\cdot\text{m}(\text{千克力}\cdot\text{米}) = 9.80665\text{ J}(\text{焦耳})(\text{准确值})$
力、重力	$1\text{kg}(\text{千克力}) = 9.80665\text{ N}(\text{牛顿})(\text{准确值})$
压力(压强)	$1\text{atm}(\text{物理大气压}) = 101325\text{ Pa}(\text{帕斯卡})(\text{准确值})$ $1\text{kg}/\text{cm}^2 = 1\text{ at}(\text{工程大气压}) = 98066.5\text{ Pa}(\text{帕斯卡})(\text{准确值})$

本卷只给出燃气表及燃气表本身的使用法。至于燃气表在喷气发动机和燃气轮机热力过程计算中的应用请参看本书上卷。

燃气表制表说明

一、 C_nH_m -空气系统化学平衡状态 燃气热力性质表制表说明

1.1 C_nH_{2n} -空气系统化学平衡状态燃气热力性质表

1.1.1 表的内容

第1.1表给出了11种燃气热力性质与压力 p 、温度 T 和当量比 ϕ 的关系。这11种燃气热力性质为：比绝对焓 h 、比熵 s 、摩尔重量 M 、平衡定压比热容 $c_{p,e}$ 、冻结定压比热容 $c_{p,f}$ 、平衡定熵指数 k_e 、冻结定熵指数 k_f 、平衡音速 a_e 、冻结音速 a_f 、 $\alpha = \left(\frac{\partial \ln M}{\partial \ln T} \right)_p$ 以及 $\beta = \left(-\frac{\partial \ln M}{\partial \ln p} \right)_T$ 。

全表分成两部分，即低温部分表（ $T=100\sim 1000\text{K}$ ）和高温部分表（ $T=1000\sim 3000\text{K}$ ）。

低温部分表的自变量（ p 、 T 和 ϕ ）的数值范围如下：

压力 $p=1.00\text{atm}$ ；

温度 $T=100\sim 1000\text{K}$ ， $\Delta T=50\text{K}$ ；

当量比 $\phi=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.5, 2.0$ 。

高温部分表的自变量数值范围如下：

贫油区域（ $\phi \leq 1.0$ ）：

$p=0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.50, 1.00, 2.00, 3.00, 5.00, 10.00,$
 $20.00, 30.00, 50.00\text{atm}$ ；

$T=1000\sim 3000\text{K}$ ， $\Delta T=50\text{K}$ ；

$\phi=0\sim 1.0$ ， $\Delta \phi=0.1$ 。

富油区域（ $\phi > 1.0$ ）：

$p=0.01, 0.10, 1.00, 50.00\text{atm}$ ；

$T=1000\sim 3000\text{K}$ ， $\Delta T=100\text{K}$ ；

$\phi=1.1, 1.2, 1.5, 2.0$ 。

1.1.2 插值方法和插值误差

第1.1表在贫油区域自变量间隔较小，通常可以采用线性插值（对于压力是指对 $\ln p$ 或 $\lg p$ 的线性插值，下同）；在富油区域自变量间隔较大，可能需要采用三点插值。下面主要讨论贫油的情况。

1.1.2.1 对于自变量 T 的插值

对于表列的11种燃气热力性质，都可以采用线性插值。采用线性插值所引起的误差见表1.1.1。表中所给出的误差有的是绝对误差（对于 α 和 β ），有的是相对误差（对于 M 、 $c_{p,e}$ 、 $c_{p,f}$ 、 k_e 、 k_f 、 a_e 和 a_f ），有的则是所引起的温度误差（对于 h 和 s ）。

1.1.2.2 对于自变量 p 的插值

建议对于 $\ln p$ 或 $\lg p$ 进行线性插值，即

表1.1.1.1 C_nH_{2m}-空气系统燃气热力性质表对于温度的插值误差

P, atm	ϕ	T, K	$\frac{\Delta h}{c_{p,e}}, \text{K}$	$\frac{T\Delta s}{c_{p,e}}, \text{K}$	$\frac{\Delta M}{M}, \%$	$\frac{\Delta c_{p,e}}{c_{p,e}}, \%$	$\frac{\Delta c_{p,i}}{c_{p,i}}, \%$	$\frac{\Delta k_e}{k_e}, \%$	$\frac{\Delta k_f}{k_f}, \%$	$\frac{\Delta a_e}{a_e}, \%$	$\frac{\Delta a_f}{a_f}, \%$	$\Delta \alpha$	$\Delta \beta$
0.01	0	1000	+0.07	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00000	0.00000
		2000	+0.39	+0.67	0.00	+0.15	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.00031	+0.00001
		3000	-0.47	-0.48	+0.02	-0.19	0.00	+0.02	0.00	0.00	-0.01	-0.00160	-0.00009
	1.0	1000	+0.07	0.00	0.00	-0.02	-0.01	+0.01	+0.01	-0.01	-0.01	0.00000	0.00000
		2000	+0.67	+1.18	-0.01	+0.20	0.00	+0.01	0.00	+0.01	+0.01	-0.00076	+0.00003
		3000	-0.60	-0.79	+0.03	+0.10	0.00	+0.02	0.00	0.00	-0.02	-0.00071	+0.00001
50	0	1000	+0.07	-0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	+0.01	-0.01	-0.01	0.00000	0.00000
		2000	+0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	+0.01	0.00	0.00	0.00	0.00000	0.00000
		3000	+0.13	0.00	0.00	+0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00007	+0.00001
	1.0	1000	+0.07	0.00	0.00	+0.01	-0.01	+0.01	+0.01	-0.01	-0.01	0.00000	0.00000
		2000	+0.08	0.00	0.00	+0.03	0.00	0.00	+0.01	0.00	0.00	-0.00005	+0.00001
		3000	+0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	+0.01	0.00	0.00	-0.00005	+0.00001

表1.1.1.2 C_nH_{2n} -空气系统燃气热力性质表对于压力的插值误差 ($p=0.015\text{atm}$)

T, K	ϕ	$\frac{\Delta h}{c_{p,e}}, K$	$\frac{T\Delta s}{c_{p,e}}, K$	$\frac{\Delta M}{M}, \%$	$\frac{\Delta c_{p,e}}{c_{p,e}}, \%$	$\frac{\Delta c_{p,f}}{c_{p,f}}, \%$	$\frac{\Delta k_e}{k_e}, \%$	$\frac{\Delta k_f}{k_f}, \%$	$\frac{\Delta a_e}{a_e}, \%$	$\frac{\Delta a_f}{a_f}, \%$	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$
2000	0	+0.22	0.00	0.00	+0.16	0.00	-0.02	0.00	-0.01	0.00	-0.00027	+0.00001
	1.0	+0.53	+0.43	-0.01	+0.29	0.00	0.00	+0.01	0.00	0.00	-0.00080	+0.00003
3000	0	-0.48	-0.12	+0.02	-1.17	0.00	+0.05	0.00	+0.02	-0.01	+0.00050	-0.00047
	1.0	-2.3	-1.9	+0.09	-0.85	-0.01	+0.06	-0.02	-0.01	-0.05	+0.00704	-0.00039

表1.1.1.3 C_nH_{2n} -空气系统燃气热力性质表对于当量比的插值误差

p, atm	ϕ	T, K	$\frac{\Delta h}{c_{p,e}}, K$	$\frac{T\Delta s}{c_{p,e}}, K$	$\frac{\Delta M}{M}, \%$	$\frac{\Delta c_{p,e}}{c_{p,e}}, \%$	$\frac{\Delta c_{p,f}}{c_{p,f}}, \%$	$\frac{\Delta k_e}{k_e}, \%$	$\frac{\Delta k_f}{k_f}, \%$	$\frac{\Delta a_e}{a_e}, \%$	$\frac{\Delta a_f}{a_f}, \%$	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$
0.01	0.15	2000	+0.14	-1.0	0.00	-0.07	0.00	+0.02	0.00	+0.01	0.00	+0.00010	0.00000
		3000	-0.16	-0.83	+0.01	+0.08	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.00064	+0.00003
	0.95	2000	+4.0	+3.4	-0.05	-0.78	-0.01	+0.10	+0.02	+0.08	+0.04	+0.00227	-0.00007
		3000	-0.017	-0.30	+0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	+0.00015	-0.00002
50.0	0.95	2000	+2.6	-2.9	-0.02	+1.2	-0.01	-0.20	+0.01	-0.09	+0.02	-0.00203	+0.00006
		3000	+2.6	+1.9	-0.03	-0.46	-0.01	+0.04	+0.01	+0.04	+0.02	+0.00199	-0.00010

$$y = y_1 + (y_2 - y_1) \frac{\lg p - \lg p_1}{\lg p_2 - \lg p_1} \quad (1.1.1)$$

式中 y ——表中所列出的任意一种燃气热力性质。

利用 (1.1.1) 式进行插值计算所引起的误差见表 1.1.2。各种误差的涵义同前。一般说来, $p = 0.015 \text{ atm}$ 时插值误差最大, 因此在表 1.1.2 中只给出 $p = 0.015 \text{ atm}$ 时的数据。

1.1.2.3 对于自变量 ϕ 的插值

对于自变量 ϕ 可以采用线性插值。对于 ϕ 值的线性插值误差见表 1.1.3。

1.1.3 表的用法

第 1.1 表的基本用途可分为两种典型情况。第一种典型情况是已知 p 、 T 和 ϕ , 求有关的热力性质; 第二种典型情况是已知 ϕ 、 h 和 s , 求 p 和 T 。前面已经指出, 一般说来, 对于第 1.1 表的变量间隔, 可以采用线性插值。但是, 对于 p 、 T 、 h 、 s 和 M 这几个变量来说, 还可以给出更为简单的求解方法, 即利用函数的全微分近似地代替函数的全改变量, 因为有关的偏导数或者可以直接由第 1.1 表中查出, 或者可以通过极其简单的方法算出。下面就来讨论上述两种基本问题的这一种求解方法。

1. 已知 p 和 T , 求 h 、 s 和 M

令 y 代表 h 、 s 或 M 值, 并用上标 “ $\circ$ ” 表示初值, 则有

$$\delta y = \left(\frac{\partial y}{\partial \ln p} \right)_T \Delta p + \left(\frac{\partial y}{\partial T} \right)_p \delta T \quad (1.1.2)$$

式中

$$\delta y = y - y^\circ$$

$$\delta T = T - T^\circ$$

$$\Delta p = \ln p - \ln p^\circ = \ln \frac{p}{p^\circ}$$

或

$$y = y^\circ + \left(\frac{\partial y}{\partial \ln p} \right)_T \ln \frac{p}{p^\circ} + \left(\frac{\partial y}{\partial T} \right)_p (T - T^\circ) \quad (1.1.3)$$

(1.1.3) 式中的有关偏导数数值如下 (见本书上卷第三章):

$$\left(\frac{\partial h}{\partial \ln p} \right)_T = \frac{\alpha RT}{M}, \quad \left(\frac{\partial s}{\partial \ln p} \right)_T = -\frac{R(1-\alpha)}{M}, \quad \left(\frac{\partial M}{\partial \ln p} \right)_T = M\beta$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = c_{pe}, \quad \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_p = \frac{c_{pe}}{T}, \quad \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_p = \alpha \frac{M}{T}$$

由此可见, 已知 p 和 T 时, (1.1.3) 式中的有关偏导数的数值都可由第 1.1 表中所列的相应热力性质计算得到。

2. 已知 h 和 s , 求 p 和 T

由 (1.1.2) 式可得

$$\delta h = \left(\frac{\partial h}{\partial \ln p} \right)_T \Delta p + \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \delta T \quad (1.1.4)$$

$$\delta s = \left(\frac{\partial s}{\partial \ln p} \right)_T \Delta p + \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_p \delta T \quad (1.1.5)$$

由以上两式消去 δT , 得