

热力过程计算与燃气表

RELIGUOCHENG JISUAN YU RANQIBIAO

上 卷

范作民 傅巽权 著

690464

国防工业出版社

690464

TK123
09
V1

热力过程计算与燃气表

上 卷

范作民 傅巽权 著

国防工业出版社

序

热力过程的计算是燃气轮机和喷气发动机设计和研究工作的基础。工质热力性质和燃气成分随温度和压力的变化使得热力过程的计算相当复杂。因此，一般教科书上主要讨论定热容热力过程的计算，工质热力性质随温度变化的影响用平均热力性质来计入。这种方法是近似的。随着燃气轮机和喷气发动机工质温度的提高以及随着计算机技术的发展，变热容和变成分热力过程的计算日益受到重视。然而有关变热容和变成分热力过程计算方面的系统文献甚少，国内尚无专著，国外也不多见。本书的两位作者在长期从事燃气涡轮发动机热力过程计算方面的研究工作的基础上，写出了这部著作，这一工作无疑是很有实际意义的。

本书的特点在于它的创造性、完整性、实用性和精确性。书中对各种热力过程的原理及计算方法的介绍，内容丰富、概念清晰、文理通顺。本书不是一般的资料汇编，书中有相当一部分内容是作者自己的研究成果，有不少创新的观点和处理问题的方法，从而使计算更为简便、更为通用、更为准确。书中的材料十分全面和详尽，力求包括实际工作中可能会遇到的各类问题及各类计算方法和各类计算手段。因此，读者通过本书不仅可以全面而深入地了解变热容和变成分热力过程的计算，而且能够利用书中的材料有效地解决燃气轮机和喷气发动机设计和研究中的实际问题。书中提出的一些观点和处理问题的方法也会给读者以有益的启示。

总之，本书对从事燃气轮机和喷气发动机设计和研究工作的人员来说，是一本不可缺少的参考书和工具书，对于有关专业的教学人员来说，也是开卷有益的。

曾 求 凡

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的热力过程计算。全书分成上、下两卷，上卷讨论喷气发动机热力过程计算，下卷给出一套全面而完整的喷气燃料-空气系统燃气表。

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进行喷气发动机和燃气轮机热力过程的计算。即使考虑热容的变化，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，关于变热容问题和变成分问题计算的有系统的工作极为缺乏。热力学教科书中所研究的主要是静止气体，而且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问题和变成分问题的计算方法能够得到推广和应用。

全书包括四部分内容。

第一部分内容讨论喷气燃料-空气系统热力过程的计算方法（上卷第一章至第七章）。第一章介绍了喷气发动机热力过程计算所需要的全部基本原始数据和12种气体组分热力性质的函数逼近方法及拟合多项式系数。书中所研究的化学反应系统计入了燃料成分、空气含湿量以及进气油气比等因素的影响。第二章讨论了三种最有代表性的化学平衡状态燃气成分的计算方法，即简单迭代法（包括瓦尼切夫法和本书作者提出的双变量迭代法）、赫夫法和最小自由能法。赫夫法的功能最完善，而简单迭代法的计算机程序最简单，所需的机时最少。简单迭代法的这些优点在实际应用中具有重要意义。第二章的内容是全书的核心部分。第三章和第四章讨论了燃气热力性质的计算方法，其中第四章专门讨论了变热容燃气热力性质的第二套计算系统。变热容的燃气热力性质表就是建立在第二套计算系统基础上的。在现有文献的基础上，本书提出了一个新的热力性质—— δ 函数，从而把与燃料成分有关的 θ 函数表示成与燃料成分无关的几种基准热力性质的函数关系。利用 δ 函数可以简单而准确地计算任意成分的燃料在任意当量比下的燃气热力性质。第四章所给出的空气热力性质、 θ 函数及 δ 函数的拟合多项式系数可以简化变热容问题的计算机程序。此外，本章还给出了定温燃烧焓差的普遍定义及通用关系式。利用定温燃烧焓差可以大大简化燃烧方程的计算。第五章讨论了喷气发动机热力过程计算所需要的基本方程及相应的牛顿法修正量方程。这些方程是喷气发动机热力过程计算的基础。此外，第五章还给出了变成分气体动力学函数。变成分气体动力学函数具有两方面的意义：其一是根据变成分气体动力学函数的关系式可以合理地选择易于计算的近似平均定熵指数，以便利用定热容气体动力学函数简化热力过程的计算；其二是根据变成分气体动力学函数可以导出变成分气体动力学函数的 β 系数，而利用 β 系数可以使变成分气

函数表大为简化。第六章和第七章给出了11种典型热力过程的求解方法。这些典型热力过程基本上包括了喷气发动机热力过程计算中可能遇到的各种一元流问题。对于每一种典型热力过程都讨论了定热容问题、变热容问题以及变成分问题三种问题的各种求解方法。其中,在利用变成分燃气热力性质表进行计算时,作者提出的切线插值法比常规的线性插值法简单得多。

上述几章的一部分基本材料(主要是第三章)虽然利用了前人的成果,但都经过本书作者的进一步工作,而大部分材料则是作者自己的研究结果。书中给出的材料介绍得十分详细,读者在应用这些材料时将不会遇到什么困难。

本书第二部分内容是在典型热力过程计算方法的基础上,对喷气发动机和燃气轮机中的一些重要热力过程的讨论(上卷第八章和第九章)。这不仅是为了说明典型热力过程计算方法在发动机热力过程计算中的具体应用,而且也希望通过这些例子阐明变热容或变成分问题的某些特点。第九章专门研究了在燃烧过程中占有重要地位的燃烧效率的定义及计算问题。

本书的第三部分内容是给出 $C_nH_mO_lN_k$ -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(上卷第十章)。喷气发动机和燃气轮机热力过程的具体计算任务可能是多种多样的,但是它们都可以归结为这些典型热力过程计算的组合。书中给出的计算机程序可以直接计入空气成分、燃料热值、空气含湿量以及进气油气比等因素的影响,并且对于每一种问题都提供了不同的计算方案,以供使用者根据具体要求进行选择。一般说来,使用者可以直接使用本书提供的这些程序而不需作任何变动。

本书的第四部分内容是一套全面而完整的喷气燃料-空气系统的燃气表(下卷),包括燃气热力性质表及气动参数表两类计算用表。燃气表有两方面的用途:1. 提供气动热力计算和传热计算中所需要的热力性质和气动参数;2. 据以进行热力过程的计算。虽然对于大量的、复杂的计算任务来说,电子计算机是强有力的手段,然而,当计算任务不很复杂而计算工作量又不很大时,利用燃气表进行手算仍然是可取的,特别是它的灵活性是前者所不及的。实际上,目前仍然不断有各种新的燃气表问世^[1,2],燃气表在实际工作中至今仍然得到了频繁而广泛的应用。

书中给出的化学平衡状态燃气热力性质表与众所周知的GE表^[3]的区别在于:1. 本书采用的气体组分的原始热力性质数据较新,而GE表中的某些原始数据已经过时;2. 本书给出了GE表所没有给出的空气的热力性质;3. 本书还给出了冻结定熵指数和平衡定熵指数;4. 本书给出了计入空气含湿量影响的燃气热力性质(即湿空气燃烧产物的热力性质);5. 本书除了给出 C_nH_m -空气系统的燃气热力性质表外,还给出了燃料氢碳比从1.0到4.0的碳氢燃料-空气系统的燃气热力性质表。书中没有给出化学平衡状态的燃气成分表。这是因为,一方面给出这样一份表需要相当大的篇幅,而它所能解决的问题却是有限的,例如,燃气成分表的一个主要用途就是用来对冻结过程进行手算,然而,即使知道了燃气成分,冻结过程的手算工作量仍然是很大的,因此,最好还是用计算机进行计算;另一方面,本书给出了一种极为简单的计算方法,可以在不知道燃气成分的情况下对冻结过程进行近似计算,并能得到相当满意的结果。

书中给出的 $C_nH_mO_l$ -空气系统完全燃烧产物热力性质表与文献[4]和文献[5]的一个重要区别在于,除了 θ 函数外本书还给出了 δ 函数。利用 θ 函数和 δ 函数可以极其方

便地确定任意成分的燃料在任意当量比下的燃气热力性质。

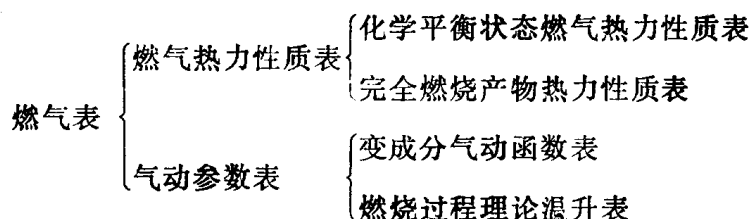
喷气发动机和燃气轮机的热力过程还可以用与燃气热力性质表不同的另一类表即所谓的气动参数表进行计算。气动参数表包括变成分气动函数表和燃烧过程理论温升表两种计算用表(注意本书中气动函数表与气动参数表的不同涵义)。

在燃烧过程理论温升表(包括变热容和变成分两种理论温升表)中,除了给出 C_2H_2 -空气系统的燃烧过程理论温升表外,还给出了燃料热值、进气油气比、空气含湿量以及燃料成分等影响因素的理论温升修正系数表。

至于变成分气动函数表,据作者了解,到目前为止只有文献[6]给出的干空气表比较详细。本书给出的则是燃气当量比 $\phi = 0 \sim 1.0$ 的燃气用表以及空气含湿量和燃料成分影响的修正系数表。在本书的变成分气动函数表中引入了 β 系数和特性温度的概念,可以在保证计算精度的前提下有效地压缩表的篇幅并减少插值计算工作量。

在某些情况下,利用气动参数表进行计算比利用燃气热力性质表方便一些。这是变热容问题或变成分问题计算的一种较新的方法。

书中给出的燃气表的全貌如下:



化学平衡状态下燃气成分和燃气热力性质的计算以及平衡和冻结过程的计算是十分复杂的。这类计算可以通过两种方法来解决,即利用电子计算机进行计算或利用燃气表进行计算。对于后者又存在三种不同的具体作法:1. 直接利用燃气表进行计算。这种方法的优点是准确度较高,其缺点是需要进行插值及迭代计算。2. 利用燃气热力性质或气动参数的曲线图进行计算。这种方法的优点是计算过程简单清楚,其缺点是准确度较低。此外,这种方法还存在一个问题,就是要给出参数变化范围很大而又能保证较高准确度的图线是相当困难的。因此,书中没有给出这类图线。但是,作者建议读者根据具体的计算任务利用本书给出的有关数据表自己绘制所需的图线。由于对于某一项具体任务,其参数变化范围总是比较有限的,因而不难作出比较准确而又便于查阅的图线。3. 根据某一个具体的计算题目,利用燃气表作出临时使用的图线,并据以进行计算。这种方法是前两种方法的折衷方案。总之,对于一项计算任务,应当根据实际情况采用恰当的计算方法。而书中所提供的计算方法、计算机程序以及燃气表可以满足实际工作中可能遇到的各种需要。

本书是作者根据长期以来的科研成果和实际工作经验编写的。我们希望本书能够为空气喷气发动机和燃气轮机中各种热力过程的计算提供各种切实可用的计算方法、尽可能详细而准确的计算用表及简单可靠而通用的计算机程序。

书中对于工程热力学、化学热力学及气体动力学中的有关基本知识没有进行详细介绍。读者在阅读本书之前应对上述三方面学科的基本问题有所了解。

南京航空学院曾求凡教授对本书进行了审阅,并提出了许多宝贵意见。此外,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，杜声桐和谢启明等同志热情地为作者提供了许多宝贵资料，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

目 录

符号	1
绪论	5
第一章 基本假设和原始数据	8
1.1 基本假设	8
1.2 $C_nH_mO_lN_k$ -空气系统简介	10
1.3 基本常数、计量单位及单位换算关系	12
1.4 气体组分热力性质的原始数据	13
1.5 绝对焓的读数制	14
1.6 原始数据的函数逼近	17
1.6.1 拉格朗日多项式插值	17
1.6.2 三次样条函数插值	19
1.6.3 多项式拟合	19
1.7 原始数据的精度	29
第二章 $C_nH_mO_lN_k$-空气系统化学平衡状态燃气成分的计算	32
2.1 物质守恒方程、压力方程和解离方程	32
2.1.1 物质守恒方程	32
2.1.2 压力方程	34
2.1.3 解离方程	34
2.2 简单迭代法	35
2.2.1 瓦尼切夫法	35
2.2.2 双变量迭代法	37
2.3 赫夫法	40
2.4 最小自由能法	44
2.5 贫油完全燃烧产物成分的计算	49
2.6 富油弱解离产物成分的计算	51
第三章 $C_nH_mO_lN_k$-空气系统化学平衡状态燃气热力性质的计算	53
3.1 燃气的摩尔质量和密度	53
3.2 燃气的绝对焓、熵和内能	54
3.3 定压过程的偏导数	61
3.4 定温过程的偏导数	65
3.5 定容过程的偏导数	67
3.6 定焓过程的偏导数	69
3.7 定熵过程的偏导数	69
3.8 燃气的定压热容和定容热容	72
3.9 燃气的声速和定熵指数	78

3.10 C_nH_m -空气系统化学平衡状态燃气热力性质表	85
第四章 $C_nH_mO_lN_k$-空气系统贫油完全燃烧产物热力性质的第二种计算系统	87
4.1 熵函数	87
4.2 π 函数	88
4.3 θ 函数	89
4.4 δ 函数	94
4.4.1 C_nH_m -空气系统的 δ 函数	94
4.4.2 θ 函数和 δ 函数的通用关系式	100
4.4.3 $C_nH_mO_lN_k$ -空气系统燃气热力性质的折合计算方法	103
4.5 定温燃烧焓差	104
4.5.1 燃料的热值	104
4.5.2 比定温燃烧焓差	104
4.5.3 摩尔定温燃烧焓差	107
4.6 湿空气燃烧产物热力性质的计算	107
4.6.1 摩尔质量	108
4.6.2 定压比热容、比焓和比熵函数	108
4.6.3 定熵指数	108
4.7 空气热力性质、 θ 函数和 δ 函数的拟合多项式	108
4.8 $C_nH_mO_l$ -空气系统完全燃烧产物热力性质表	111
第五章 热力过程的基本方程	113
5.1 连续方程	114
5.2 焓方程	114
5.2.1 焓方程的基本形式	114
5.2.2 第一种计算途径的牛顿法修正量方程	114
5.2.3 第二种计算途径的牛顿法修正量方程	116
5.2.3.1 已知气流的比滞止焓 h_0^* 和气流的马赫数 Ma	116
5.2.3.2 已知气流的比静焓 h_2	117
5.2.3.3 已知气流的比滞止焓 h_0^* 和密流 D	117
5.3 熵方程	118
5.3.1 熵方程的基本形式	118
5.3.1.1 变成分问题的熵方程	118
5.3.1.2 变热容问题的熵方程	118
5.3.1.3 定热容问题的熵方程	120
5.3.2 第一种计算途径的牛顿法修正量方程	122
5.3.3 第二种计算途径的牛顿法修正量方程	122
5.4 冲量方程	123
5.4.1 冲量方程的基本形式	123
5.4.2 第一种计算途径的牛顿法修正量方程	124
5.4.3 第二种计算途径的牛顿法修正量方程	125
5.5 燃烧方程	126
5.5.1 燃烧方程的基本形式	126
5.5.2 燃料的绝对焓和燃料的热值	127

5.5.3 燃烧效率的计入	130
5.5.4 变热容问题燃烧方程的其他形式	134
5.6 能量方程、定熵方程、流量方程和冲量方程的气体动力学函数	134
5.6.1 变成分问题的定熵流气体动力学函数	135
5.6.2 变热容问题的气体动力学函数	138
5.6.3 定热容问题的气体动力学函数	139
5.7 气体动力学函数中的 β 系数和特性温度 T_0	142
5.7.1 状态方程的 β 系数 β_R	142
5.7.2 声速方程的 β 系数 β_a	142
5.7.3 流量方程的 β 系数 β_G	143
5.7.4 能量方程的 β 系数 β_h	143
5.7.5 定熵方程的 β 系数 β_r	144
5.7.6 冲量方程的 β 系数 β_I	145
5.7.7 特性温度 T_0	145
5.8 变成分气动参数表	145
第六章 已知熵值的热力过程的计算	146
6.1 定熵平衡膨胀(压缩)到给定的温度	147
6.1.1 计算任务及应用	147
6.1.2 第一种计算途径	147
6.1.3 第二种计算途径	147
6.1.4 利用变成分燃气热力性质表求解	148
6.1.5 利用变热容燃气热力性质表或 π 函数表求解	148
6.1.6 利用变成分气动函数表求解	149
6.1.7 利用平均定熵指数 k_m 求解	150
6.2 定熵平衡膨胀(压缩)到给定的压力	150
6.2.1 计算任务及应用	150
6.2.2 第一种计算途径	152
6.2.3 第二种计算途径	153
6.2.4 利用变成分燃气热力性质表求解	153
6.2.5 利用变热容燃气热力性质表或 π 函数表求解	154
6.2.6 利用变成分气动函数表求解	154
6.2.7 利用平均定熵指数 k_m 求解	155
6.3 定熵平衡膨胀(压缩)到给定的速度	156
6.3.1 计算任务及应用	156
6.3.2 第一种计算途径	157
6.3.3 第二种计算途径	157
6.3.3.1 压力和温度同时进行迭代	157
6.3.3.2 压力和温度分别进行迭代	157
6.3.4 利用变成分燃气热力性质表求解	157
6.3.5 利用变热容燃气热力性质表求解	158
6.3.6 利用变成分气动函数表求解	158
6.3.7 利用平均定熵指数 k_m 求解	159

6.4 定熵平衡膨胀(压缩)到给定的密流	160
6.4.1 计算任务及应用	161
6.4.2 第一种计算途径	160
6.4.3 第二种计算途径	160
6.4.3.1 压力和温度同时进行迭代	160
6.4.3.2 压力和温度分别进行迭代	160
6.4.4 利用变成分燃气热力性质表求解	161
6.4.5 利用变热容燃气热力性质表求解	162
6.4.6 利用变成分气动函数表求解	162
6.4.7 利用平均定熵指数 k_m 求解	164
6.5 定熵平衡膨胀(压缩)到给定的马赫数	164
6.5.1 计算任务及应用	164
6.5.2 第一种计算途径	164
6.5.3 第二种计算途径	165
6.5.3.1 压力和温度同时进行迭代	165
6.5.3.2 压力和温度分别进行迭代	165
6.5.4 利用变成分燃气热力性质表求解	166
6.5.5 利用变热容燃气热力性质表求解	166
6.5.6 利用变成分气动函数表求解	167
6.5.7 利用平均定熵指数 k_m 求解	167
6.6 定熵冻结膨胀(压缩)到给定的压力	168
6.6.1 计算任务及应用	168
6.6.2 计算特点	168
6.6.3 准确解法	169
6.6.4 利用变热容燃气热力性质表进行近似计算	170
6.6.5 利用定热容气动函数求解	171
第七章 已知焓值的热力过程的计算	173
7.1 由燃气焓值求燃气温度	173
7.1.1 计算任务及应用	173
7.1.2 第一种计算途径	174
7.1.3 第二种计算途径	174
7.1.4 利用变成分燃气热力性质表求解	174
7.1.5 利用变热容燃气热力性质表求解	174
7.2 给定燃气压力下燃烧温度的计算	174
7.2.1 计算任务及应用	174
7.2.2 基本解法	174
7.2.3 利用变成分燃气热力性质表求解	175
7.2.4 利用变热容燃气热力性质表求解	175
7.2.5 利用燃烧过程理论温升表求解	176
7.3 燃烧过程所需油气比的计算	176
7.3.1 计算任务及应用	176
7.3.2 第二种计算途径	176
7.3.3 利用变成分燃气热力性质表求解	177

7.3.4 利用变热容燃气热力性质表求解	177
7.4 非定压燃烧过程、混合过程和激波过程的计算	178
7.4.1 计算任务及应用	178
7.4.2 第一种计算途径	178
7.4.3 第二种计算途径	179
7.4.4 利用变成分燃气热力性质表求解	180
7.4.5 利用变热容燃气热力性质表求解	181
7.4.6 利用焓-熵图求解	182
7.4.7 利用变成分气动参数表求解	183
7.4.8 利用定热容气动函数求解	183
7.4.8.1 等截面一元加热管流	184
7.4.8.2 正激波	185
7.5 给定燃烧温度下非定压燃烧过程的计算	187
7.5.1 计算任务及应用	187
7.5.2 变成分问题的计算	187
7.5.3 利用变成分气动参数表求解	188
7.5.4 变热容问题的计算	189
7.6 燃烧过程燃烧效率的计算	189
7.6.1 变成分问题的计算	189
7.6.2 变热容问题的计算	190
7.6.3 空气含湿量对燃烧效率的影响	191
第八章 典型热力过程应用举例	194
8.1 非均匀流平均气流参数的计算	194
8.1.1 按照定熵条件定义的平均滞止参数	194
8.1.2 按照作功能力相等条件定义的平均滞止参数	195
8.1.2.1 变成分问题的计算	195
8.1.2.2 变热容问题的计算	197
8.1.2.3 定热容问题的计算	197
8.1.3 按照气流动量相等条件定义的平均滞止参数	198
8.1.4 按流量加权平均值或通道面积加权平均值定义的平均滞止压力	198
8.2 燃烧过程效率系数的计算	199
8.3 涡轮风扇发动机混合排气推力增益的计算	200
8.3.1 变成分问题和变热容问题的计算	200
8.3.2 定热容问题的计算	202
8.4 涡轮风扇发动机加力燃烧室的热力计算	204
第九章 燃烧效率的定义和计算	209
9.1 燃烧效率定义的分类	209
9.1.1 表征燃烧过程完全程度的性能参数	210
9.1.2 理论燃烧性能	210
9.2 按实际放热量定义的燃烧效率 η_o	211
9.2.1 η_o 的基本定义	211
9.2.2 η_o 的第一种表示式	211

9.2.3	η_Q 的第二种表示式	215
9.2.4	η_Q 的第三种表示式	213
9.2.5	对 η_Q 的评论	216
9.3	按当量放热量定义的燃烧效率 η_q	216
9.3.1	η_q^* 的第一种表示式	217
9.3.2	η_q^* 的第二种表示式	217
9.3.3	$\tilde{\eta}_q$ 的表示式	217
9.3.4	对 η_q 的评论	218
9.3.5	η_q 与 η_Q 之间的关系	218
9.4	按燃烧过程的燃气焓差定义的燃烧效率 η_h	219
9.4.1	η_h^* 和 $\tilde{\eta}_h$ 的表示式	219
9.4.2	对 η_h 的评论	220
9.5	按燃烧温升定义的燃烧效率 η_T	220
9.5.1	η_T^* 和 $\tilde{\eta}_T$ 的表示式	220
9.5.2	对 η_T 的评论	221
9.6	按燃烧过程所需油气比定义的燃烧效率 η_f	221
9.6.1	η_f^* 和 $\tilde{\eta}_f$ 的表示式	221
9.6.2	对 η_f 的评论	222
9.7	按燃烧过程所需油气比定义的燃烧效率 η_F	222
9.7.1	η_F^* 和 $\tilde{\eta}_F$ 的表示式	222
9.7.2	对 η_F 的评论	222
9.8	各种燃烧效率之间的数值关系	223
9.8.1	燃烧过程典型不完全燃烧产物成分的计算模型	224
9.8.2	典型不完全燃烧产物成分的计算	225
9.8.3	高碳数碳氢化合物焓值的确定	229
9.8.4	各种燃烧效率之间数值关系的计算结果	231
9.8.5	不完全燃烧产物成分对各种燃烧效率之间数值关系的影响	235
9.9	对选择燃烧效率定义的建议	235
9.10	不完全燃烧产物定压热容的计算	236
第十章	$C_nH_mO_lN_k$ -空气系统典型热力过程的计算机程序	237
10.1	$C_nH_mO_lN_k$ -空气系统典型热力过程变成分问题计算机程序说明	238
10.1.1	公用区元素	238
10.1.2	计算结果	240
10.1.3	BLOCK DATA	240
10.1.4	SUBROUTINE GS(A, N, M)	240
10.1.5	SUBROUTINE XR(XA, X, YA, YB, XMIN, XMAX)	240
10.1.6	SUBROUTINE XI(T, M)	240
10.1.7	SUBROUTINE XCQ(F, F1, W, C, QI, MG, RK)	241
10.1.8	SUBROUTINE XA(P, AS, PS, A, PI, K, LP, QI)	241
10.1.9	SUBROUTINE XPI(N, PX, TX, F, F1, W)	241
10.1.10	SUBROUTINE XPT(N, PX, TX, F, F1, W, HP, ST, DMV, D2)	241

10.1.11	SUBROUTINE XP(N, PX, TX, F, F1, W, HS)	243
10.1.12	SUBROUTINE X9(PTX, TT2, TTT, SIG, F, F1, W, HT1, G1, XJ, A1, A2, PT2, V2, G2)	243
10.1.13	SUBROUTINE XAE(PX, TX, F, F1, W)	243
10.2	$C_nH_mO_lN_k$ -空气系统典型热力过程变热容问题计算机程序说明	243
10.2.1	公用区元素	243
10.2.2	计算结果	244
10.2.3	BLOCK DATA	244
10.2.4	SUBROUTINE YR(XA, X, YA, YB, XMIN, XMAX)	245
10.2.5	SUBROUTINE Y1(T, F, F1, W)	245
10.2.6	SUBROUTINE YPT(N, PDE1, T1D2, PHMF2, T2D2, F, F1, W)	245
10.3	$C_nH_mO_lN_k$ -空气系统典型热力过程变成分问题计算机程序	246
10.4	$C_nH_mO_lN_k$ -空气系统典型热力过程变热容问题计算机程序	270
参考文献		276
附表		279
表 1	水蒸气的饱和蒸气压力 p_s	281
表 2	大气中的含湿量 w 与大气温度 t 和大气相对湿度 φ 的关系 ($p =$ $0.980665 \times 10^5 \text{Pa}$)	282
表 3	12种气体组分的热力性质	283
表 4	12种气体组分热力性质的拟合多项式系数	286
表 5	空气热力性质、 θ 函数和 δ 函数的拟合多项式系数	287

符 号

A	面积, m^2	H_f	燃料中氢的质量分数
A_s	$=Mp$, $\text{kg} \cdot \text{Pa}/\text{mol}$	ΔH_f°	摩尔生成焓, J/mol
$\bar{A}_s$	$=A_s/p^\circ$ kg/mol (p° $=101325\text{Pa}$)	h	比绝对焓, J/kg
a	声速, m/s	h_f	燃料的比绝对焓, J/kg
a_*	临界声速, m/s	Δh_f°	$=h_f-h_{f_i}^\circ$, J/kg
B	$=(k-1)/(k+1)$	I	$=PA+q_m v$, 气流冲量, N
C	$=M_g f/[M_{g,i}(1+f)]$, $\oplus$ 前 面的系数	K	燃烧方程中的系数(见5.5.33式) 对应于气体分压的化学反应平衡 常数(见2.1.12式, 下标“ p ” 在本书中略去不写)
C_f	燃料中碳的质量分数		可燃组分的蕴藏热系数(见 9.2.19式)
C_p	定压摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$		流量方程气体动力学函数中的系 数(见5.6.38式)
c_p	定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	k	定熵指数
C_v	定容摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$		燃料的氮原子数
c_v	定容比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	k'	热容比
C_w	空气含湿量对燃烧效率 η_b 影响的 修正系数	L	单位质量燃料完全燃烧所需理论 空气的质量, 即化学恰当空 气量
D	$=M_d d$, 摩尔定温燃烧焓差, J/mol (用于第四章) $=q_m/A$, 密流, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 松弛因子	l	燃料的氧原子数
d	比定温燃烧焓差, J/kg	M	摩尔质量, kg/mol
E	$=1+f+f_i+w$ (用于第二章) $=v^2/2$, J/kg (见6.4.3式)	Ma	$=v/a$, 马赫数
F	$=I/A$, 单位面积的气流冲量, Pa	M_f	$=nM_C+mM_H+lM_O+kM_N$, 燃 料的摩尔质量, kg/mol
f	$=u-Ts$, 比亥姆霍兹自由能, J/kg 油气质量比, 简称油气比	m	质量, kg 系统所含化学元素数 燃料的氢原子数
f_1	进气油气比(预燃过程燃烧产物 的油气比)	N	物质的量, mol
$f(\lambda)$	冲量方程的气体动力学函数	N_f	燃料中氮的质量分数 燃料的物质的量, mol
G	$=H-TS$, 摩尔吉布斯自由能, J/mol	n	系统所含组分数 燃料的碳原子数 多项式次数
g	$=h-Ts$, 比吉布斯自由能, J/kg		
H	摩尔绝对焓, J/mol		

- O. 燃料中氧的质量分数
- p 压力 (带有表示气体组分下标时表示该气体组分的分压, 否则表示混合气体的全压), Pa
- $\bar{p} = p/p^\circ$ ($p^\circ = 101325\text{Pa}$), 对比压力
- Q 燃料或可燃组分的摩尔发热量, J/mol
- q 燃料的比低热值 (低发热量), J/kg
- q_0 燃料的比平衡发热量, J/kg
- q_m 质量流量, kg/s
- $q(\lambda)$ 流量方程的气体动力学函数
- $q' = q^\circ + \Delta h_f$, 燃料的比折合热值, J/kg
- Δq 散热损失, J/kg
- R 摩尔气体常数, $8.314298\text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
- R_m R/M , 比气体常数, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- r 混合气体中某种气体组分的容积分数 (与摩尔分数即物质的量分数相等, 本书中对两者采用相同的符号, 见 1.1 节)
- $= M_C/M_H = 11.9162$, 碳氢摩尔质量之比
- $r(\lambda)$ 冲量方程的气体动力学函数
- S 摩尔熵, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
- s 比熵, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- $s_m = -(R/M) \sum_i r_i \ln r_i$, 比混合熵, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- T 热力学温度, K
- $T_c = (T + T^*)/2 + 0.1T$, 变成分气动函数表中的特性温度, K
- t 摄氏温度, $^\circ\text{C}$
- U 摩尔内能, J/mol
- u 比内能, J/kg
- V 气体的容积, m^3 (见 1.1.2 式)
- v 气流速度, m/s
- 比容, m^3/kg
- w 空气中的含湿量 (湿空气中水蒸气与干空气质量之比)
- $x = m/n$, 碳氢燃料的氢原子数与碳原子数之比, 简称燃料氢碳比
- $\Delta x = \ln x - \ln x^\circ$, 牛顿法修正量
- $\delta x = x - x^\circ$, 牛顿法修正量
- Y C_p, h 或 ψ 中的任何一个, J/mol 或 $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
- y c_p, h 或 ψ 中的任何一个, J/kg 或 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- $y(\lambda)$ 流量方程的气体动力学函数
- 希腊字母**
- $\alpha = f_{r,i}/f = 1/\phi = m_a/(L m_f)$, 余气系数 (见 1.2.2 式)
- $= \left(\frac{\partial \ln M}{\partial \ln T} \right)_p$
- $\beta = \left(\frac{\partial \ln M}{\partial \ln p} \right)_T$
- $\beta_s = \sqrt{kR/M}$, 声速方程的 β 系数, $\text{m}/(\text{s}\cdot\sqrt{\text{K}})$
- $\beta_a = (T^*/T - 1)/Ma^2$, 能量方程的 β 系数
- $\beta_o = qm\sqrt{T}/(pAMa) = \beta_s/\beta_k$, 流量方程的 β 系数, $\text{s}\cdot\sqrt{\text{K}}/\text{m}$
- $\beta_k = R/M$, 状态方程的 β 系数, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- $\beta_r = \ln(T/T^*)/\ln(p/p^*)$, 定熵方程的 β 系数
- $\Delta = \Theta_2 - \Theta_1$, 燃气热力性质的摩尔 δ 函数, J/mol 或 $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
- $\bar{\Delta}_s = \Delta_s/R$, 熵函数的无量纲 δ 函数
- $\delta = \Theta_2 - \Theta_1$, 燃气热力性质的比 δ 函数, J/kg 或 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- $\delta_i = \left(\frac{\partial \ln p_i}{\partial \ln T} \right)_p$
- $\delta_A = \left(\frac{\partial \ln A_i}{\partial \ln T} \right)_p$

- $\varepsilon(\lambda)$ 密度比的气体动力学函数
- η 燃烧效率
- η_G^* 压气机效率
- η_F 按油气比定义的燃烧效率
- η_f 按油气比定义的燃烧效率
- η_h 按焓差定义的燃烧效率
- η_Q 按实际放热量定义的燃烧效率
- η_q 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
- η_T^* 涡轮效率
- $\tilde{\eta}$ 按化学平衡产物性能定义的燃烧效率
- η^* 按完全燃烧产物性能定义的燃烧效率
- $\Theta = M_{s,1}(1+f_{s,1})(Y_{s,1}-Y_s)/$
 $(M_{s,1}f_{s,1})$, 燃气热力性质的摩尔 θ 函数, J/mol 或 J/(mol·K)
- $\bar{\Theta}_s = \Theta_s/R$, 熵函数的无量纲 θ 函数
- $\theta = (1+f_{s,1})(y_{s,1}-y_s)/f_{s,1}$, 燃气热力性质的比 θ 函数, J/kg 或 J/(kg·K)
- $\lambda = \Delta H_T^\circ/RT = -\frac{\partial \ln K}{\partial \ln T}$ (见 2.3.14 和 2.3.16 式)
- $= v/a_*$, 折合速度
- ξ 燃烧过程的放热系数
- $\pi = e^{\frac{M}{R}(\psi - \psi_{298})}$, π 函数
- $\pi(\lambda)$ 压力比的气体动力学函数
- ρ 密度, kg/m³
- σ 总压恢复系数
- $\tau = T/10^3$, K
- $\tau(\lambda)$ 温度比的气体动力学函数
- $\phi = f_{s,1}/f$, 当量比
- φ 燃烧过程的燃烧不完全度 (用于第九章)
- 燃烧室的效率系数 (用于第八章)
- 湿空气的相对湿度 (用于附表的表 2)
- φ_i 喷管速度系数
- $\Psi = \int_0^T \frac{C_p dT}{T} = \sum_i r_i S_i^\circ$, 摩尔熵函数, J/(mol·K)
- $\bar{\Psi} = \Psi/R$, 无量纲熵函数
- $\psi = \int_0^T \frac{C_p dT}{T} = \left(\sum_i r_i S_i^\circ \right) / M$, 比熵函数, J/(kg·K)
- 上标**
- 纯空气 (用于 N 和 r)
 - 测定燃料热值时的温度 (用于 h 、 d 、 q 、 Q 和 K , 这里 K 为蕴藏热系数)
 - 标准状态 (101325 Pa) (用于 p 、 G 、 H 和 S)
 - 利用迭代法求解时的初值
 - * 滞止状态 (用于 p 、 T 和 h 等)
 - 完全燃烧产物 (用于 r 和 η)
- 下标**
- 0 预燃过程起点
 - 参考温度
 - 1 过程起点
 - 第一种基准燃料
 - 2 过程终点
 - 第二种基准燃料
 - 3 第三种基准燃料
 - 4 第四种基准燃料
 - 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 化学平衡状态
 - 化学平衡过程
 - eq 折合系统
 - 当量燃烧过程
 - f 燃料
 - 冻结状态
 - 冻结过程