

高等学校教材

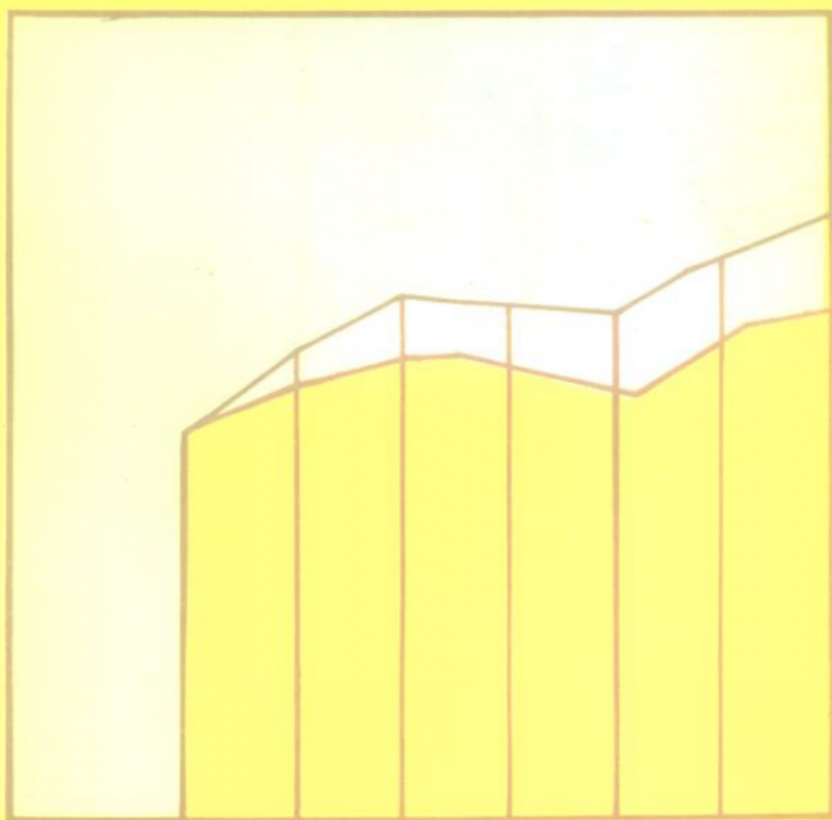
CHAIYOUJI
GONGZUOGUOCHENG
SHUZHISUAN

CGS

柴油机工作过程 数值计算

周俊杰 邱 东 编
解茂昭 陈白欣

大连理工大学出版社

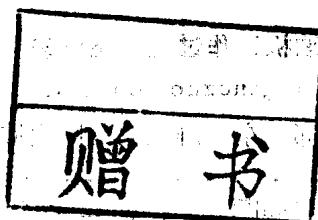


Tk422
281

425260

柴油机工作过程数值计算

周俊杰 邱 东 编
解茂昭 陈白欣



00425280

大连理工大学出版社

田宝葵

内 容 简 介

本书主要介绍了柴油机工作过程数值计算的零维模型、计算燃烧过程的准维模型和多维模型；进、排气系统的一维非定常流动的计算方法及涡轮增压发动机瞬态特性的模拟计算等，是一本柴油机工作过程数值计算较系统的教材。

本书可作为内燃机专业本科生和硕士生的选修或必修课教材，也可供有关科技人员参考。

柴油机工作过程数值计算

Chaiyouji Gongzuoguo Cheng Shuhsijisuan

周俊杰 邱 东 解茂昭 陈白欣 编

大连理工大学出版社出版
(大连市凌水河)

辽宁省新华书店经销
大连凌山印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 14.75 字数: 337千字
1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷
印数: 0001—1000册

责任编辑: 韩 露

封面设计: 羊 戈

责任校对: 杨 明

ISBN 7-5611-0260-7/TK·5

定价: 3.30元

出版说明

根据国务院国发〔1978〕23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”，中国船舶工业总公司承担了全国高等学校船舶类专业教材的编审、出版的组织工作。自1978年以来，完成了两轮教材的编审、出版任务，共出版船舶类专业教材116种，对解决教学急需，稳定教学秩序，提高教学质量起到了积极作用。

为了进一步做好这一工作，中国船舶工业总公司成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”四个教材小组。船舶类教材委员会（小组）是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的业务指导机构，其任务是为作好高校船舶类教材的编审工作，并为提高教材质量而努力。

中国船舶工业总公司在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1986年制订了《1986年—1990年全国高等学校船舶类专业教材选题规划》。列入规划的教材、教学参考书等共166种。本规划在教材的种类和数量上有了很大增长，以适应多层次多规格办学形式的需要。在教材内容方面力求做到两个相适应：一是与教学改革相适应；二是与现代科学技术发展相适应。为此，教材编审除贯彻“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则以外，还注意了加强实践性教学环节，拓宽知识面，注重能力的培养，以适应社会主义现代化建设的需要。

这些教材由各有关院校推荐，同行专家评阅，教材委员会（小组）评议，完稿后又经主审人审阅，教材委员会（小组）复审。本规划所属教材分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及各有关高等学校的出版社出版。

限于水平和经验，这批教材的编审出版工作还会有许多缺点和不足，希望使用教材的单位和广大师生积极提出宝贵意见，以便改进工作。

中国船舶工业总公司教材编审室

1988年3月

前 言

《柴油机工作过程数值计算》一书是根据中国船舶工业总公司船舶动力教材委员会对该教材提出的基本要求而编写的。可作为内燃机专业本科生和硕士生的必修和选修课教材，也可供从事柴油机工作过程研究的科技人员参考。

本书参考国内外有关资料，较系统地论述了柴油机工作过程的计算方法及数值解法，介绍了目前常用的零维模型、计算燃烧过程的准维和多维模型及进、排气系统的一维非定常流动的特征线解法及涡轮增压发动机瞬态特性的数学模拟。全书共分八章，由周俊杰同志担任主编，并编写了第一、二、三、五、六章；第四、八章由邱东同志编写；第七章由解茂昭、陈白欣同志编写；董惠新同志参加了本书的描图工作。

本书由上海交通大学邬静川同志主审。大连理工大学王荣生教授为本书的初稿做了仔细审阅，在此谨致衷心感谢。由于作者水平有限，编写时间仓促，错误在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

1989年10月

目 录

第一章 绪论	
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 柴油机热力系统的划分	3
§ 1-3 工作过程数值计算的数学模型	3
第二章 气缸内的热力过程	
§ 2-1 工质热力学性质	6
§ 2-2 气缸内的热力过程	10
§ 2-3 分隔式燃烧室缸内热力过程	14
§ 2-4 二冲程柴油机气缸扫气模型	19
思考题	30
第三章 进、排气系统内的热力过程	
§ 3-1 排气系统内的热力过程	33
§ 3-2 排气阀温度的计算	36
§ 3-3 排气温度的计算	41
§ 3-4 进气系统的计算	43
§ 3-5 中冷器的计算	44
§ 3-6 几种增压系统排气管热力过程计算	47
思考题	51
第四章 进、排气系统的非定常流动	
§ 4-1 等截面管一维不定常等熵流动	52
§ 4-2 一维变截面管非等熵流动	59
§ 4-3 特征方程的数值解法	72
§ 4-4 管系边界条件的处理	81
§ 4-5 排气管压力波的计算	104
思考题	108
第五章 缸内过程计算的边界条件	
§ 5-1 代用燃烧放热规律	110
§ 5-2 滞燃期的计算	114
§ 5-3 传热率的计算	116
§ 5-4 气缸工作容积	119
§ 5-5 进、排气阀(口)的流量计算	119
§ 5-6 平均机械损失压力	124

§ 5-7 常微分方程的数值解	125
思考题与作业	130
第六章 燃油燃烧放热规律的计算	
§ 6-1 示功图的数据采集及处理	131
§ 6-2 燃烧放热率的计算	133
§ 6-3 影响放热率计算误差的分析	137
附录 柴油机燃烧放热率计算程序	141
思考题与作业	148
第七章 燃烧模型	
§ 7-1 概述	149
§ 7-2 柴油机零维燃烧模型	150
§ 7-3 柴油机燃烧的准维模型	158
§ 7-4 柴油机燃烧的多维模型	174
思考题	196
第八章 柴油机与涡轮增压器的配合	
§ 8-1 涡轮增压器性能参数计算	198
§ 8-2 柴油机与涡轮增压器的匹配	206
§ 8-3 涡轮增压柴油机的瞬态过程	219
思考题	226
参考文献	226

第一章 绪 论

§ 1-1 概 述

内燃机是实现热能转变成机械能而循环工作的发动机。自内燃机诞生以来,由于其热效率高,功率范围广及结构紧凑等特点,所以一直被广泛应用于国民经济的各个部门,至今在中、小功率发动机中,内燃机的应用仍占绝对优势,就大功率而言,柴油机也不失为主要动力源。

长期以来,内燃机主要是依靠经验设计,这种方法一般都是根据传统的设计程序,结合理论计算和必要的实验手段进行的,常规的热力计算,由于对实际过程进行了大量的简化,所以只能是一种粗略的估算,对发动机的研制所起的指导作用也十分有限。而柴油机大量的研究工作大多是建立在与实际过程相似的物理模型基础上,借助先进的仪器设备,对实际过程进行定性的分析研究或利用台架实验对发动机进行性能调试研究。这种“形成技术系统、控制系统或复合系统的模型称为物质模型”〔1〕。例如,用于进气和扫气过程的立体模型气缸装置;用“燃烧弹”再现发动机气缸内过程的燃油喷注扩散动力学等项的研究等等,均属这种模型。

现代科学技术以及柴油机增压技术的发展,发动机品种的增多,结构的复杂化和用户对产品质量要求的不断提高,特别自70年代以来世界能源的短缺和对发动机排放要求的严格限制,都对研制现代发动机提出了新的要求。

随着计算技术的蓬勃发展,应用数学的巨大成就及电子计算机在柴油机设计中的应用,才有可能把研究实际过程的物质模型转化为用数学语言表达的数学模型——抽象模型,并借助计算机把描述实际过程的微分方程快速求解出来,从而可以较具体地揭示过程的物理本质及系统各因素间的数量关系。这种把对实际过程的实验研究和理论分析搬到计算机上来实现的方法,就是目前风行于世的计算机辅助设计。它在极大程度上改变了柴油机理论计算的内容和作用,不仅可以降低研究费用、节省人力、物力、缩短研制周期,而且能加速数据处理,使发动机类型、结构参数和性能参数达到优化,解决传统方法所不能解决的问题,并把柴油机的设计方法和理论研究带入了一个新阶段。事实表明:实验、理论、计算已成为科学方法上相辅相成,可以相互补充替代而又彼此不可缺少的三个主要环节。

柴油机工作过程的数学模拟,是对柴油机这个复杂系统的功能(性能)描述,它描述了系统状态在母系统(以发动机或发动机组为动力的装置称为发动机的母系统)或外界影响下变化的情况。通过这种功能的描述可以解决发动机设计方案论证、性能预测和诊断、寻求最优解及对样机的研究改进等项工作,具体来说就是:

1. 选型论证计算。在设计的前期阶段用来论证、比较发动机的循环方案,以确定

发动机最佳设计参数或方案（例如发动机缸径、转速、平均有效压力和增压方式等）。

2. 预测发动机性能。包括预测发动机标定工况性能、变工况性能，增压发动机的瞬时动态特性、特殊环境条件下（高原、热带、严寒地区、水下等）发动机的性能等等，以寻求改进发动机性能的途径。显然，若单靠实验，不仅工作量大、周期长、实验费用昂贵，且有时受条件限制，很难研究某个因素的变化规律。由于模拟计算具有模拟理想条件的能力，可以忽略次要因素，突出某个因素，或人为地使参数在很大范围内变化进行研究，从而能提供更多的信息。

3. 设计参数的优化。研究各种热力参数（如增压压力、排气背压、进气温度等）、结构参数（如配气正时、排气管尺寸及布置、增压器特性等）对发动机性能的影响，以寻求最佳值。

4. 诊断型计算。利用实验结果，通过计算揭示实验中没有测量或无法测量的物理量和信息量，例如将测得柴油机燃烧过程的气缸压力示功图，利用热力学基本原理，计算出燃烧放热规律，从而可以进一步了解滞燃期、预混合和扩散烧燃的情况，这样可以大大加深对过程物理本质的理解。

5. 预测发动机可靠性。利用工作过程模拟计算，可以得到受热零件的温度场、热应力和机械应力，由此可以预测零件的可靠性。

6. 利用准维多区模型可以计算出燃烧室内各区在各曲轴转角下的成分及温度，并预测污染排放规律。

此外利用多维模型可以预测发动机缸内气流运动的规律，揭示燃烧室内结构参数与空气运动之间的相互联系等等。

柴油机工作过程数值计算的上述功能，体现了它在柴油机设计 and 研究中的重要地位和作用。尽管它有许多长处，但仍存在一些不足。首先，目前它仍离不开物理模型，因为一般要借助于物理模型或相似模型的研究来建立和检查数学模型，并需要通过实验来确定一些边界条件和系数，因此它还并不是一种独立的研究手段。

其次，由于柴油机工作过程的复杂性，因此它还不能准确、详尽地描述出实际过程各阶段的物理现象和本质。由于对某些复杂过程还不够了解，因此建立数学模型之前首先要对实际系统进行概括和抽象，引用已知的物理定律，通过某些假设略去次要因素以突出主要过程。计算中有的还须借助经验或半经验公式，以使计算得以进行（例如，流量系数、传热系统、放热规律模型等），这些都使计算结果与实验结果有一定偏差，从而也增加了数值解法带来的误差。

再有，有些计算所采用的经验公式（例如滞燃期、传热系数等）都是来自不同条件和不同类型发动机的实验结果，还不能通用，使用时要恰当选择，否则将得不到好的结果。

总之，尽管柴油机工作过程数值计算目前仍存在某些不足，但是由于它在柴油机研究中的特殊地位和广泛用途，仍使其不失为柴油机性能和实验研究的一个有力工具。随着计算技术的发展，大容量高速计算机的不断更新换代，特别是实验测量技术和手段的不断改进及“内燃机系统工程”的出现，必将使这一方法日益完善和广泛应用，从而逐步形成一个能用数学方法进行柴油机整机设计和研究的完整体系。

§ 1-2 柴油机热力系统的划分

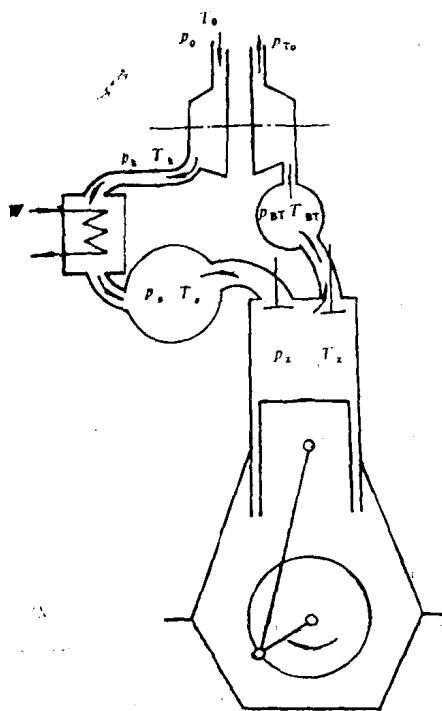


图1.2.1 涡轮增压柴油机工作原理图

根据增压柴油机工作过程的特点，为了对这个复杂的热力系统进行数学描述，首先要将其划分为若干易于处理的子系统。这种划分要求各子系统均有自己的边界和边界条件，各自构成一个物理模型，且具有自己的物理特点；系统与系统之间通过热量与质量的传递相互联系。它们之间在结构上或完成功能的过程中形成一个整体，并按相互间的制约关系有机地联系起来。对一台单级废气涡轮增压柴油机（图1.2.1），这些子系统包括：

1. 涡轮增压器的压气机；
2. 中间冷却器；
3. 进气管或扫气箱；
4. 气缸；
5. 排气管；
6. 涡轮增压器的废气涡轮。

对于不同类型和不同增压方式的发动机，划分的子系统可能有所增减。根据计算模型的需要（如缸内过程的计算），子系统同样可以再划分为更小的新的子系统，这种划分法可以进行到必要的程度。对任一子系统的描述，都可以把它从系统中分离出来，而赋予其外部约束，其内部过程用相应的子模型进行数学描述，所有各子系统的数学描述，构成了整个工作过程的数学模型。

§ 1-3 工作过程数值计算的数学模型

一、基本热力学模型

柴油机工作过程的数学模型，以缸内燃烧过程的描述最为复杂，它是内燃机工作过程循环模拟的重要环节，而工作循环中的其它过程（如进气、压缩、膨胀、排气）的细节，都直接影响燃烧过程。根据对缸内空间场的假设条件不同可分为：

1. 零维模型

所谓零维模型就是把所研究的系统视为均匀场，系统内各参数不随任何空间位置变化，而只随时间变化。其控制方程是以时间为唯一自变量的常微分方程。由于这类模型方法简单，计算成本低，所以很容易被纳入工作循环的全面模拟中去，应用比较广泛。

它适用于发动机变参数的计算,整机综合性能预测,研究设计和运行参数对柴油机动力性和经济性的影响。其主要缺点是需要预先指定一种燃烧放热规律,不能建立起燃烧过程和燃烧室几何形状间的明显关系。

2. 准维模型

与零维模型没有本质的区别,对系统作空间分区处理,每个区域仍采用零维假设,从而能在一定程度上反映系统内参数随空间的变化。因此,除具有零维模型的功能外,尚能近似地预测发动机的排放,近似地预测发动机燃烧室几何形状的变化对燃烧过程的影响。这类模型的求解仍属常微分方程问题,应用亦较多。如 Lyn 等人的油汽射流模型^[2],广安博之^[3]等的油滴模型等。

3. 多维模型

也称全模拟模型,它是用理论方法来描述系统内物理过程的细节,过程参数随时间和空间的变化,是用数值方法求解燃烧过程的质量、动量、能量和化学组分的守恒方程,是一组多自变量的偏微分方程。根据空间坐标数目又可分为一维、二维和三维模型。多维模型一般由模拟缸内各个物理化学过程的子模型组成。这类模型比较复杂,计算工作量很大,其明显优点是可以提供前两类模型不能处理的宝贵信息,即燃烧室几何关系与流体流动相互作用细节。因此是柴油机工作过程数值计算理论研究的一个重要分支。

根据对过程平衡性的假设可分为:

1. 准定常流动模型

柴油机的工作过程是间歇的、不稳定的。精确求解不稳定过程极为复杂,故一般采用简化的计算模型。即模型略去达到平衡所需的驰豫时间,而将整个时间区域分成一系列的微小时间间隔,在每一微小间隔中,参数可视为不变,作为稳定流动来处理。这样可用准稳定流动的计算公式进行计算。例如用开口热力学系统的准定常流动公式计算进、排气阀(口)的流动。

2. 非定常流动模型

与准定常流动过程相反,认为过程中的参数不仅随时间变化,而且随地点变化,例如排气管压力波计算的一维非定常流动模型(详见第四章)。

二、建立数学模型的要求

1. 模型应当能够满足在各种构成方案及外界对系统的各种作用下确定系统的过程。例如上一节我们把涡轮增压柴油机划分为若干热力学系统,对应每个热力系统都可以建立起相应的数学模型,该模型应当满足各种构成方案及外界对系统的作用下系统执行其功能的要求,从而系统的热力过程也就能够由描述它的数学模型确定下来。

2. 模型的建立取决于计算的目的和任务,即模型的准确性和与其有关的复杂程度应与建立模型的目的相适应。也就是说,一个模型不可能也不应该包罗过程的每一个细节,同时一个模型不可能预测它自身没有正确表达的物理现象,一切与计算目的相违背的假设条件和简化都是不合理的。例如,计算的目的是为了获得柴油机的一般性能指标,则可采用简单的零维模型;若需预测柴油机的排放,则必须用较为复杂的准维模型。因此,在满足计算目的和要求的前提下,模型愈简单,计算费用愈低,也就是模型愈好。

3. 准备原始数据和分析计算研究应在时间和经费耗费最少的条件下进行。如果为了应用某种数学模型, 需要另外进行复杂的计算或实验才能得到必要的数据, 那么这样的模型是不可取的。

4. 模型计算结果与输入参数的准确性有关, 若某一输入参数对计算结果敏感, 则该输入参数的取值就应力求精确。

三、工作过程数值计算的步骤

1. 简化实际系统, 建立物理模型;
2. 建立数学模型;
3. 选用数值解法, 设计和编制计算程序;
4. 分析验证计算结果。

分析实际系统的特点, 确定工作过程的物理本质, 简化实际系统, 划定模型所研究问题的范围, 提出基本假设, 引入相应的物理定律是建立数学模型的前提和基础。

根据系统边界和边界条件建立数学模型是对实际系统的高度概括和抽象, 是数值计算最重要的阶段, 它直接关系到研究问题的深度和计算的成败。

设计和编制计算程序, 然后利用计算机求出结果是数值计算的执行过程, 它可以充分发挥研究者的创造力, 利用现有设备, 以达到节省人力、物力之目的。

通过实验来检验计算结果, 可以对模型中的不足部分进行修正, 以期达到实用目的。这是对模型进一步完善的过程, 也是数学模型所追求的目标。

在其后的章节中, 将遵循上述步骤, 分别介绍各种模型, 其中多维模型以二维模型为主。

第二章 气缸内的热力过程

§ 2-1 工质热力学性质

一、工质的成分

进行柴油机工作过程的模拟计算, 必须掌握工质的热力性质, 它与工质的组成成分有关。在实际工作过程中, 柴油机将空气吸入缸内并与残余废气混合, 经压缩、燃烧、膨胀及排气过程, 然后以废气的形式排出缸外, 其间经历了一系列的物理化学变化过程, 所以工质的成分是随时间变化的。一般说来, 柴油机的工质是多种化学成分组成的混合气, 其性质非常接近理想气体。由于柴油机的燃烧过量空气系数总是大于1的, 可以认为是完全燃烧, 其燃烧产物是由 CO_2 、 H_2O 、 N_2 和 O_2 组成。若以上述四种成分来计算气体的热力学性质, 将带来很多不便, 故一般采用简单的计算方法, 即把工质看成是由纯空气和纯燃烧产物两部分组成。这种处理方法, 就使计算变得较为简单。因为任意时刻均可把工质视为由这两种成分组成的混合气, 只要知道该瞬时纯空气和纯燃气的成分含量和各自的热力学性质, 则系统内工质的热力学性质就可得到。

所谓纯燃烧产物就是指燃烧过量空气系数 $\alpha=1$ 时的燃烧产物。通常采用两种方法来表示气体成分的组成。

一种是用瞬时废气系数来表示气体的成分, 其定义是: 某一瞬时气缸内气体中纯燃烧产物的质量与纯空气质量之比。即

$$\gamma_z = \frac{G_z - G_A}{G_A} \quad (2.1.1)$$

式中 G_z ——该瞬时气缸内气体总质量;

G_A ——该瞬时气缸内纯空气质量。

$$\frac{d\gamma_z}{d\varphi} = \frac{G_A \frac{dG_z}{d\varphi} - G_z \frac{dG_A}{d\varphi}}{G_A^2} \quad (2.1.2)$$

另一种气体成分的表示方法是用瞬时(广义的)过量空气系数 α_z 来表示, 其定义为: 某一瞬时气缸内存在的空气量(相当于燃烧以前的)与缸内气体所含有的燃烧产物所相当的燃油量理论上完全燃烧所需的空气量之比。即

$$\alpha_z = \frac{G_z - g_{B0} \cdot x_z}{L'_0 \cdot g_{B0} \cdot x_z} \quad (2.1.3)$$

$$\frac{d\alpha_z}{d\varphi} = \frac{1}{L'_0 \cdot g_{B0} \cdot x_z} \left(\frac{dG_z}{d\varphi} - \frac{G_z}{L'_0 \cdot g_{B0} \cdot x_z} \frac{dx_z}{d\varphi} \right) \quad (2.1.4)$$

式中 g_{BO} ——每循环每缸喷入的燃油重量, kg;

L'_0 ——1 公斤燃油理论上完全燃烧所需的空气量, $L'_0 = 14.3 \text{ kg/kg}$;

x_r ——某瞬时气缸内气体所含有的燃烧产物所相当的燃油量占每循环喷入气缸油量 g_{BO} 的分数。

以上两种表示方法给气体组分计算带来很大方便。例如可用瞬时废气系数表示缸内气体中纯空气和纯燃烧产物的重量成分:

$$g_a = \frac{G_A}{G_A + G_c} = \frac{1}{1 + \gamma_r}$$

$$g_r = \frac{G_c}{G_A + G_c} = \frac{\gamma_r}{1 + \gamma_r}$$

式中 G_c ——纯燃烧产物的质量。

二、内能、焓、比热

根据柴油机中工质的组成及特点, 其比内能、比焓、比热的计算公式如下:

$$u = \sum_i g_i u_i \quad \text{kJ/kg} \quad \text{或} \quad u = \sum_i x_i u_i \quad \text{kJ/kmol} \quad (2.1.5)$$

$$h = \sum_i g_i h_i \quad \text{kJ/kg} \quad \text{或} \quad h = \sum_i x_i h_i \quad \text{kJ/kmol} \quad (2.1.6)$$

$$c = \sum_i g_i c_i \quad \text{kJ/kg} \quad \text{或} \quad c = \sum_i x_i c_i \quad \text{kJ/kmol} \quad (2.1.7)$$

式中 u_i 、 h_i 、 c_i ——分别为第 i 种气体的比内能、比焓和比热;

g_i 、 x_i ——分别为第 i 种气体的质量成分 ($g_i = \frac{G_i}{G}$) 和摩尔成分

$$(x_i = \frac{M_i}{M}).$$

使用上述公式时要注意单位, 用质量成分 g_i 计算时, u_i 、 h_i 的单位为 kJ/kg, c_i 的单位为 kJ/kg·K; 而用摩尔成分 x_i 计算时 u_i 、 h_i 的单位为 kJ/kmol, c_i 的单位为 kJ/kmol·K。

理想气体的比内能、比焓、比热及比热比存在如下关系:

$$u = h - RT \quad (2.1.8)$$

$$C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (2.1.9)$$

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (2.1.10)$$

$$C_p - C_v = R \quad (2.1.11)$$

$$K = \frac{C_p}{C_v} \quad (2.1.12)$$

应用上述各式时同样要注意单位。例如在式 (2.1.7) 中, 如果 u 、 h 的单位是 kJ/kmol, 则式中的 R 要用通用气体常数 R_M (kJ/kmol·K) 的值代入计算。

$$R_M = 8.314 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

计算中只要给出某一参数的函数, 就可根据上述关系式求得其它函数。应该指出的是: 对于一个具有化学反应的热力学系统来说, 其相应的热力学函数也应把化学能包括在内。把物质化学能也包括在内的内能称为总内能, 记作 u_t 。

$$u_t = u_s + E_0 \quad (2.1.13)$$

相应地, 总焓为

$$h_t = h_s + E_0 \quad (2.1.14)$$

式中 E_0 ——物质的化学能 (对某一物质而言, 是一常数)。

u_s 、 h_s ——分别为工质的显内能和显焓。

显内能通常是指工质内部分子运动所具有的能量, 对于理想气体, 这部分能量只随温度而变化。对多种化学组分气体而言:

$$E_0 = \sum_i x_i E_{0i} \quad \text{J/mol} \quad (2.1.15)$$

$$u_t = \sum_i x_i u_{ti}$$

$$h_t = \sum_i x_i h_{ti}$$

在工作过程计算中, 比内能、比热等多种表达形式, 下面介绍两种在一般零维模型中常用的简化计算方法。

假定工质为理想混合气体, 其组分可用瞬时过量空气系数 α_k 表示, 则比内能为温度和瞬时过量空气系数的函数

$$u = u(T, \alpha_k)$$

根据Justi 的比热数据, 将比内能整理成下列解析式

$$u = 0.14455 \left[- \left(0.0975 + \frac{0.0485}{\alpha_k^{0.75}} \right) (T-273)^3 \times 10^{-6} + \left(7.768 + \frac{3.36}{\alpha_k^{0.8}} \right) (T-273)^2 \times 10^{-4} + \left(489.6 + \frac{46.4}{\alpha_k^{0.93}} \right) \times (T-273) \times 10^{-3} + 1356.8 \right] \text{ kJ/kg} \quad (2.1.16)$$

将上式对 T 求导, 得定容比热解析式为

$$C_{v,} = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = 0.14455 \left[-3 \times \left(0.0975 + \frac{0.0485}{\alpha_k^{0.75}} \right) (T-273)^2 \times 10^{-6} + 2 \times \left(7.768 + \frac{3.36}{\alpha_k^{0.8}} \right) (T-273) \times 10^{-4} + \left(489.6 + \frac{46.4}{\alpha_k^{0.93}} \right) \times 10^{-3} \right] \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \quad (2.1.17)$$

比焓、定压比热和比热比可分别由式(2.1.8)、(2.1.11)和(2.1.12)求得。

比较简便的方法是把混合气体分成纯燃烧产物及纯空气, 再引入瞬时废气系数 γ , 先计算出混合气体的定容平均比热,

$$C_{v,mz} = \frac{(\mu C_{v,ma})}{\mu_a(1+\gamma_z)} + \frac{\gamma_z(\mu C_{v,mc})}{\mu_c(1+\gamma_z)} \quad \text{kJ/kg} \cdot \text{K} \quad (2.1.18)$$

式中 $(\mu C_{v,ma})$ ——纯空气比热, $\text{kJ/mol} \cdot \text{K}$;

$(\mu C_{v,m,c})$ ——纯燃烧产物比热, $\text{kJ/mol}\cdot\text{K}$ 。

$(\mu C_{v,m,a})$ 与 $(\mu C_{v,m,c})$ 是温度 T 的函数, 通常用一个温度的二次三项式表示, 它在柴油机常用温度范围内, 最大误差小于0.6%, 其表达式为:

$$(\mu C_{v,m,a}) = 4.187(a_0 + b_0 T + c_0 T^2) \text{ kJ/mol}\cdot\text{K} \quad (2.1.19)$$

$$(\mu C_{v,m,c}) = 4.187(a_r + b_r T + c_r T^2) \text{ kJ/mol}\cdot\text{K} \quad (2.1.20)$$

式中 $a_0 = 4.678$ $b_0 = 6.8723 \times 10^{-4}$, $c_0 = -6.0683 \times 10^{-8}$

$a_r = 4.7513$ $b_r = 1.199 \times 10^{-3}$, $c_r = -1.4232 \times 10^{-7}$

气体的瞬时比热可由它的平均比热近似公式转化求得, 按定义

$$(\mu C_{v,m}) \cdot T = \int_0^T (\mu C_{v,m}) \cdot dT$$

则瞬时比热为

$$(\mu C_{v,m}) = \frac{d[(\mu C_{v,m}) \cdot T]}{dT} = \frac{d(A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3)}{dT} = A + 2B \cdot T + 3C \cdot T^2$$

因此混合气体的瞬时定容比热为

$$(\mu C_{v,m}) = \frac{1}{1+\gamma'_z} (A_0 + 2B_0 \cdot T + 3C_0 \cdot T^2) + \frac{\gamma'_z}{1+\gamma'_z} (A_r + 2B_r \cdot T + 3C_r \cdot T^2)$$

式中 γ'_z 是以摩尔为单位的纯燃烧产物与纯空气量之比,

$$\gamma'_z = \frac{G_c/\mu_c}{G_a/\mu_a} = \gamma_z \times \frac{\mu_a}{\mu_c}$$

代入上式得

$$\begin{aligned} (\mu C_{v,m}) &= \frac{1}{1 + \frac{\mu_a}{\mu_c} \gamma_z} (A_0 + 2B_0 T + 3C_0 T^2) + \frac{\frac{\mu_a}{\mu_c} \gamma_z}{1 + \frac{\mu_a}{\mu_c} \gamma_z} \\ &\quad \times (A_r + 2B_r T + 3C_r T^2) \text{ kJ/mol}\cdot\text{K} \end{aligned} \quad (2.1.21)$$

三、气体常数与分子量

单元气体的气体常数只随气体的种类而异, 而与状态无关。混合气体的气体常数与混合气体的成分有关, 其值等于各组分气体常数与其质量成分之积的代数和, 即

$$R_z = \sum_i g_i R_i \quad (2.1.22)$$

若把缸内工质视为由纯燃烧产物和纯空气两种成分组成, 则

$$R_z = \frac{8.314}{\mu_a(1+\gamma_z)} + \frac{8.314\gamma_z}{\mu_c(1+\gamma_z)} \quad (2.1.23)$$

对一般柴油机燃料, 其成分按 $C=0.87$, $H=0.126$, $O=0.004$ 计算, 这时纯燃烧产物分子量 $\mu_c=29.133$, 若为其它燃料, 则根据其燃料的成分组成来计算其纯燃烧产物分子量。

若已知混合气体的摩尔成分时, 可先求出混合气体分子量, 然后再求出气体常数。

设混合气体的总摩尔数为 M , 第 i 种组分的摩尔数为 M_i , 则第 i 种组分的摩尔分数为

$$x_i = \frac{M_i}{M} \quad (2.1.24)$$

混合气体的分子量为

$$\mu_z = \sum_i x_i \cdot \mu_i \quad (2.1.25)$$

单位质量混合气体的气体常数为

$$R_z = 8.314/\mu_z \quad (2.1.26)$$

当燃烧重油时, 燃料中 $H/C=0.1577$, 由 Keenan & Kaye 气体表, 用最小二乘法求出以 α_k 为参变量的 R_z 及 μ_z 的计算式为:

$$R_z = 29.2647 - 0.0402/\alpha_k \quad (2.1.27)$$

$$\mu_z = 28.975 + 0.0403/\alpha_k \quad (2.1.28)$$

若 H/C 在 $0.15 \sim 0.16$ 范围内, 则 R_z 的计算误差在 0.1% 以内, 一般柴油机与此值相近, 故用上述两式计算 R_z 与 μ_z 时不致带来太大误差。

§ 2-2 气缸内的热力过程

本节主要介绍四冲程直喷式柴油机气缸内工作过程的零维热力学模型。这种模型把气缸视为一个(对分隔式燃烧室来说分为两个)零维系统, 系统的边界由活塞顶、气缸盖及气缸套壁面组成。通过某些假定并根据能量守恒定律、质量守恒定律及气体的状态方程, 建立起描述缸内热力过程的微分方程式。它是研究柴油机工作过程宏观特性的一种最常用、最简明的方法, 描述这样一个零维系统, 通常作如下假定:

1. 气缸内的状态是均匀的, 也就是不考虑气缸内各点的压力、温度和组分的差异, 并认为在进气期间, 流入气缸内的空气与缸内残余废气实现瞬时的完全混合;
2. 工质为理想气体, 其比热、内能仅与气体温度和气体成分有关;
3. 气体流入或流出气缸为稳定流动;
4. 把燃料燃烧化学能的释放过程, 看作是外界按已知的表观放热规律向系统内工质加热的热力学过程。

一、直喷式四冲程柴油机缸内热力过程

尽管柴油机缸内工作过程是很复杂的, 它包括了物理、化学及机械等方面的综合过程。但根据上述假设条件, 总可以用三个基本参数($P \cdot T \cdot G$)来表示缸内的气体状态, 并可用能量守恒方程、质量守恒方程及状态方程把整个工作过程联系起来, 即

$$\frac{d(G_z U_z)}{d\varphi} = \frac{dQ_b}{d\varphi} + \frac{dG_s}{d\varphi} \cdot h_s - \frac{dG_e}{d\varphi} h_e - \frac{dQ_w}{d\varphi} - P_z \frac{dV_z}{d\varphi} \quad (2.2.1)$$

$$\frac{dG_z}{d\varphi} = \frac{dG_s}{d\varphi} - \frac{dG_e}{d\varphi} + g_{B0} \frac{dx}{d\varphi} \quad (2.2.2)$$

$$p_z V_z = G_z R_z T_z \quad (2.2.3)$$

式中 g_{B0} ——每缸每循环供油量;

x ——到某一时刻, 已烧掉的燃油占循环供油量的分数。