

# 内燃机工作过程 数值计算及其优化

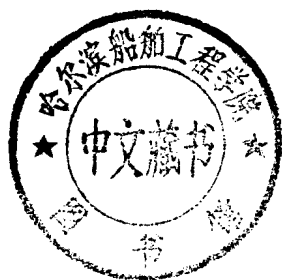
---

朱幼君 吴 坚 编著

国防工业出版社

# 内燃机工作过程 数值计算及其优化

朱访君 吴 坚 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

内燃机工作过程数值计算及其优化/朱访君,吴坚编  
著. —北京:国防工业出版社,1997.7

ISBN 7-118-01668-3

I. 内… II. ①朱… ②吴… III. 内燃机-燃烧过程-数值计算-最佳化 IV. TK402

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 19135 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 11¼ 292 千字

1997 年 7 月第 1 版 1997 年 7 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:17.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于 1988 年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

## 国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

|           |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|
| 名誉主任委员    | 怀国模 |     |     |
| 主任委员      | 黄 宁 |     |     |
| 副主任委员     | 殷鹤龄 | 高景德 | 陈芳允 |
|           | 曾 铎 |     |     |
| 秘 书 长     | 刘琯德 |     |     |
| 委 员       | 尤子平 | 朱森元 | 朵英贤 |
| (按姓氏笔划为序) | 刘 仁 | 何庆芝 | 何国伟 |
|           | 何新贵 | 宋家树 | 张汝果 |
|           | 范学虹 | 胡万忱 | 柯有安 |
|           | 侯 迁 | 侯正明 | 莫梧生 |
|           | 崔尔杰 |     |     |

## 前 言

内燃机工作过程数值计算及其优化设计等方面的研究进展迅速,公开发表的文献很多。本书着重介绍这些方面的新的科技成果,同时重点突出废气涡轮增压柴油机工作过程数值计算、汽油机工作过程数值计算、内燃机燃烧过程的准维计算模型、内燃机工作过程优化设计等方面的内容。由于本书涉及的数学方法十分繁琐,故从实用角度出发处理有关的数值计算、最优化技术基础等内容,并附上计算程序及算例。书中所列的程序都经编著者在 IBM 微机上调试通过,读者可直接调用。

在编著本书过程中引用了国内外同行们公开发表的文献资料,编著者致以深切的感谢。华南理工大学余乃彪教授仔细审阅了全书,编著者表示深切的感谢。

由于本书涉及面较广,作者水平有限,书中存在缺点错误在所难免,谨请读者及同行们批评指正。

**编著者**

# 目 录

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 第一章 绪论 .....                         | 1   |
| § 1-1 概述 .....                       | 1   |
| § 1-2 内燃机数值计算的数学模型 .....             | 3   |
| § 1-3 废气涡轮增压柴油机工作过程数值计算中热力系统划分 ..... | 6   |
| § 1-4 微型计算机在内燃机中的应用举例 .....          | 9   |
| 第二章 数值计算 .....                       | 15  |
| § 2-1 常微分方程数值解法 .....                | 15  |
| § 2-2 插值法 .....                      | 29  |
| § 2-3 五点三次平滑 .....                   | 42  |
| § 2-4 样条函数分段拟合 .....                 | 45  |
| 第三章 工作介质特性计算 .....                   | 56  |
| § 3-1 工质特性参数计算 .....                 | 56  |
| § 3-2 化学平衡时燃烧产物特性参数计算 .....          | 62  |
| 第四章 气缸内热力过程计算 .....                  | 89  |
| § 4-1 气缸内热力过程的基本微分方程 .....           | 89  |
| § 4-2 气缸内各阶段的热力过程分析 .....            | 93  |
| § 4-3 气缸工作容积 .....                   | 97  |
| § 4-4 气缸周壁的传热 .....                  | 98  |
| § 4-5 燃烧放热率计算 .....                  | 104 |
| § 4-6 进、排气流量计算 .....                 | 118 |
| § 4-7 发动机性能参数计算 .....                | 121 |
| 第五章 进、排气系统热力过程计算 .....               | 125 |
| § 5-1 概述 .....                       | 125 |

|            |                       |            |
|------------|-----------------------|------------|
| § 5-2      | 排气管内的热力过程计算(容积法)      | 127        |
| § 5-3      | 排气系统中的散热              | 130        |
| § 5-4      | 排气温度计算                | 134        |
| § 5-5      | 进气系统参数计算              | 136        |
| § 5-6      | 中冷器的计算                | 139        |
| <b>第六章</b> | <b>废气涡轮增压器计算</b>      | <b>144</b> |
| § 6-1      | 涡轮增压器中的能量传递           | 144        |
| § 6-2      | 压气机特性参数计算             | 146        |
| § 6-3      | 轴流涡轮特性计算              | 151        |
| § 6-4      | 径流涡轮特性计算              | 157        |
| § 6-5      | 废气涡轮增压柴油机工作过程计算举例     | 161        |
| <b>第七章</b> | <b>柴油机准维燃烧模型和多维模型</b> | <b>170</b> |
| § 7-1      | 柴油机准维燃烧模型问题的提出        | 170        |
| § 7-2      | 气相喷注燃烧模型              | 175        |
| § 7-3      | 油滴蒸发燃烧模型              | 192        |
| § 7-4      | 多维模型                  | 202        |
| <b>第八章</b> | <b>汽油机工作过程数值计算</b>    | <b>215</b> |
| § 8-1      | 概述                    | 215        |
| § 8-2      | 汽油机零维燃烧模型             | 216        |
| § 8-3      | 汽油机准维燃烧模型             | 223        |
| § 8-4      | 汽油机 NO 生成量计算          | 231        |
| <b>第九章</b> | <b>最优化技术基础</b>        | <b>236</b> |
| § 9-1      | 最优化技术基本概念             | 236        |
| § 9-2      | 线性规划                  | 246        |
| § 9-3      | 非线性规划                 | 251        |
| § 9-4      | 多目标函数优化方法             | 304        |
| <b>第十章</b> | <b>内燃机工作过程优化</b>      | <b>311</b> |

|              |                        |     |
|--------------|------------------------|-----|
| § 10-1       | 内燃机工作过程优化概况 .....      | 311 |
| § 10-2       | 内燃机气缸直径和行程的最优化设计 ..... | 312 |
| § 10-3       | 内燃机气缸内工作过程的优化设计 .....  | 319 |
| § 10-4       | 双目标函数优化的选好解法 .....     | 330 |
| § 10-5       | 内燃机工作过程的多目标优化 .....    | 335 |
| 主要参考文献 ..... |                        | 346 |

# 第一章 绪 论

## § 1-1 概 述

### 一、计算机在内燃机领域中的应用

计算机的应用领域非常广泛,据粗略统计约有三千多种。在内燃机领域中,计算机的主要应用是:数值计算、数据处理及自动控制等三个方面。

#### 1. 内燃机数值计算

应用计算机进行内燃机方面的数值计算,现在已经非常普遍,内燃机各种重要计算都已经有了实用程序,诸如:工作过程数值计算、工作过程参数最优化计算、涡轮增压柴油机配合计算、燃烧放热率计算、燃油系统计算、排气污染预测计算、结构强度计算、轴系扭振计算、温度场计算及热应力计算等。

#### 2. 内燃机计算机辅助设计

计算机辅助设计(Computer Aided Design),简称 CAD。自 1963 年美国 MIT(麻省理工学院)提出 CAD 以后,发展异常迅速,应用非常广泛。计算机辅助设计是计算机图学、数值计算及数据处理等诸方面结合的产物。内燃机设计中应用 CAD 的比重逐年迅速增加。国内内燃机设计中应用 CAD 较早的是上海内燃机研究所,该所研制的“连杆设计系统”只要求输入若干个基本参数,该系统便自动完成全部设计计算工作,并绘制出连杆零件图。

#### 3. 内燃机计算机自动控制

内燃机全自动试验台是应用计算机实现内燃机试验的全自动化控制,其工作原理如图 1-1 所示。试验台可对内燃机进行多种测试,并将测试中采集的数据由计算机进行分析、计算,最后绘制

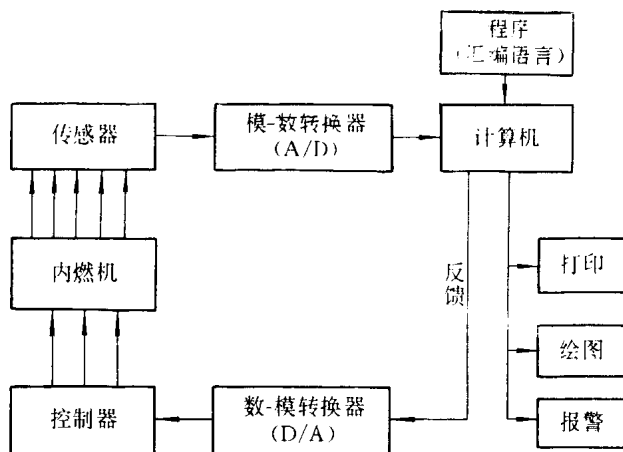


图 1-1 内燃机全自动试验台示意框图

出曲线及图表。由图 1-1 可见,模-数转换器(又称 A/D 卡)将传感器送来的连续量离散化成不连续的数据量送进计算机,计算机由装入的程序控制,对采集的数据进行分析、计算及输出计算结果。同时通过数-模转换器(又称 D/A 卡)将计算机送来的数据量转换成模拟量,对内燃机进行控制。奥地利 AVL-646 全自动试验台、日本 CB-566 全自动试验台都是按上述原理工作的。

## 二、内燃机数值计算的用途

内燃机设计及研制过程的各个阶段都应用数值计算,具体来说主要应用在设计计算和诊断计算这两个方面。

### 1. 内燃机设计计算

内燃机设计过程中,从最初的选型论证及方案论证到系统设计、整机设计的各个阶段中都应用数值计算。由于各阶段计算目标不同,故计算模型也不同。内燃机选型论证计算中,计算目标是确定发动机的基本参数,由于设计初期许多细节尚未最后确定,许多参数还未知,这时需采用简化计算模型,要求计算中输入少量参数而能算出各项所需结果。

内燃机燃油系统计算、进排气系统计算、动力学计算、各零部件应力计算等,这类计算其目标是要较精确地确定各项参数,故计算中需采用精确模型,要求能算出较精确结果,以完成各系统的设计。

内燃机工作循环模拟计算中,如:内燃机性能参数计算、增压柴油机配合计算、变工况计算、瞬态特性计算等。这类计算将发动机及其装置组成完整系统,分别建立各系统的微分方程,然后联合求解这些微分方程组,获得精度较高的数值解。

## 2. 内燃机诊断计算及预测计算

内燃机的诊断计算是将某些实测参数值作为输入参数,应用诊断计算程序,经计算后输出另外一些参数,并用这些参数对内燃机进行诊断或预测。换句话说,内燃机的诊断计算是将试验中测量到的物理量通过计算机加工成更基本的物理量,甚至是加工成在通常试验中难于直接测量的物理量。例如将试验中直接检测到的  $p-\varphi$  图信号输入计算机,应用燃烧放热率程序计算后输出放热率、滞燃期、燃烧始点、燃烧终点等参数,用这些输出参数诊断燃烧放热过程的状况。类似于燃烧放热率、滞燃期等很有诊断价值的参数,在试验中通常是难于直接测量的,应用诊断计算程序却能计算出来了。

内燃机性能预测计算中,如应用经验公式、半经验公式或理论模型等,通过计算预测发动机各项性能。目前经常应用准维理论模型计算燃烧过程中  $\text{NO}_x$  的生成状况,预测排气污染。随着预测计算精度的提高,其应用范围将进一步扩大。

## § 1-2 内燃机数值计算的数学模型

内燃机数值计算中常见的数学模型有:单区模型、双区模型、多区模型,一维模型、二维模型、三维模型。

### 1. 单区模型

单区模型(Single-Zone)又称零维模型。单区模型是在下述基

本假定中建立的：系统内各点的热力状态相同、各点的化学成分相同；即系统内各参数不随空间坐标而变化，只随时间  $\tau$  (或曲轴转角  $\varphi$ ) 而变化。这一单区模型假设通常又称之为零维假设。显然，单区模型中系统内参数的变化关系可用常微分方程组表达：

$$\frac{dT}{d\tau} = f(\tau, T)$$

或

$$\frac{dT}{d\varphi} = f(\varphi, T) \quad (1.2.1)$$

求解常微分方程，可得到系统内温度  $T$  的变化规律， $T=T(\varphi)$ 。当系统内温度  $T$  随  $\varphi$  的变化规律解到后，代入理想气体状态方程进而可求得压力  $p$  的变化规律， $p=p(\varphi)$ 。由于常微分方程的数值解较容易，故工作过程模拟计算采用单区模型很方便。

## 2. 双区模型

双区模型(Two-Zone)又称准维模型。双区模型是将所研究的系统划分为两个相对独立的子区，而在每个子区内各自满足零维假设。故各子区内的参数变化仍然用常微分方程表达。可见准维模型实际上是对零维模型的一种修正。目前常见的(美国)Cummins 模型、(日本)廣安-角田模型就是属于准维模型。这两个模型主要用于排气污染的预测。

## 3. 多区模型

多区模型(Multi-Zone)又称多维模型。目前使用中的 KIVA 程序是多维模型的典型例子。单区模型、双区模型发展的结果出现多区模型，多区模型把系统划分成多个互相独立的子区，每个子区内各自满足零维假设。按多区模型的一种逻辑推理，便提出无限多区模型。无限多区模型是将内燃机燃烧室空间人为地划分成成千上万个方格，这些方格可随活塞运动而不断“压缩”、“膨胀”，如图 1-2 所示。在每一个方格内都建立与之对应的 Navier-Stokes 方程，求解这些成千上万个微分方程的方程组，就可以获得燃烧室内各参数的精度极高的数值解。然而，由于受计算机容量和运算速度

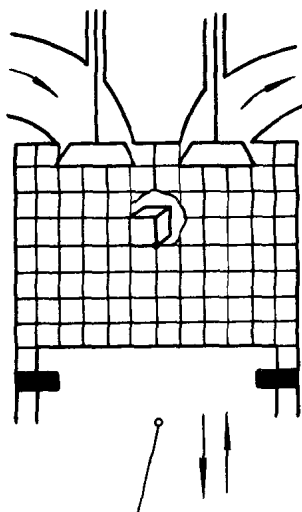


图 1-2 无限多区模型示意图

等客观条件限制,目前国内外都还无法完成这么大型的微分方程组的数值解,当前无限多区模型只具有理论指导意义。

#### 4. 一维模型

系统内参数除了随时间  $\tau$  (或曲轴转角  $\varphi$ ) 而变化之外,还随一维坐标  $x$  而变化,这种模型称为一维模型。如图 1-3 所示的排气管

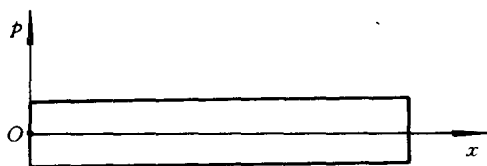


图 1-3 排气管压力波计算用的一维模型

管压力波计算模型,或柴油机高压油管压力波计算模型都属一维模型。例如排气管内压力  $p$  随时间  $\tau$  及一维坐标  $x$  而变化。一维模型中系统内参数随  $x$  和  $\tau$  (或  $\varphi$ ) 的变化规律可用偏微分方程来表达,如压力  $p=f(x,\varphi)$ ,故  $p$  的变化规律可写成:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = f(x, \varphi, p)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \varphi} = f(x, \varphi, p) \quad (1.2.2)$$

偏微分方程求解比较麻烦,比常微分方程求解困难得多。对于内燃机排气管压力波计算、高压油管压力波计算等类型的一维模型,一般采用“特征线法”求解。

## 5. 二维模型、三维模型

内燃机结构强度计算问题,如零件的应力计算、温度场计算及热应力计算等,经常采用有限元法进行计算。内燃机中的活塞几何形状属轴对称平面回转体,用有限元法计算时可视为轴对称问题处理。用有限元法计算时也可视活塞为平面问题(二维模型)进行处理,这是因为通过轴线剖面上的应力变化、温度变化代表了活塞应力、温度变化情况。几何形状复杂的零件如气缸盖的应力计算、温度场计算等只能用三维有限元法计算,这种计算模型属于三维模型。

上述的一维模型、二维模型、三维模型、零维模型、准维模型、多维模型等,目前均有实用程序可供参考和使用。现阶段不论哪种实用模型都还是处在不断完善的过程之中,一般的做法是将实验结果反馈到计算模型中去,用实验结果检验、修改计算模型,进而发展新的计算模型。基于这点可以说:数值计算和实验研究是当今内燃机研究发展的两大支柱。

## § 1-3 废气涡轮增压柴油机工作过程数值 计算中热力系统划分

在柴油机工作过程数值计算中,将废气涡轮增压柴油机作为一个完整的系统。为了方便建立计算模型,又将这个系统划分成若干个互相独立又以某种形式互相联系的子系统,其热力系统划分如图 1-4 所示。为了简化计算,若不考虑空气滤清器子系统和消声器子系统时,一般将增压柴油机热力系统划分成下列五个子系统:废气涡轮增压器、空气中间冷却器、进气管、排气管和气缸等子

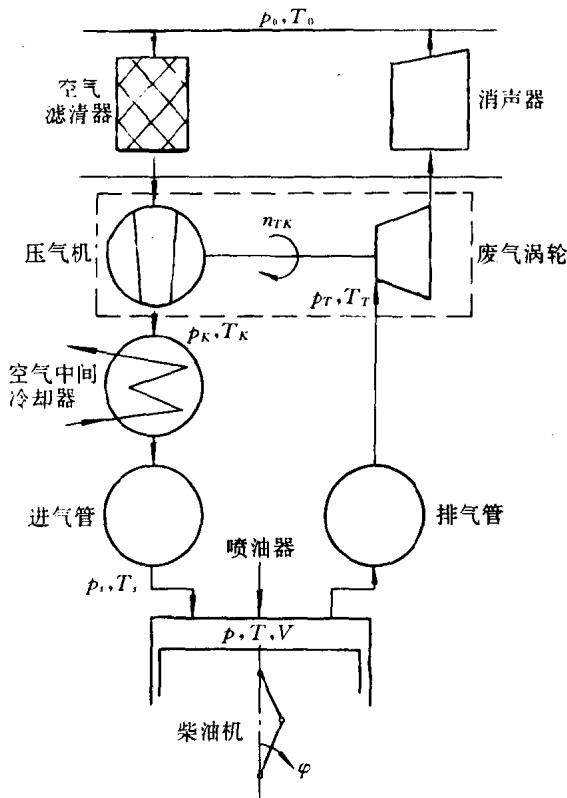


图 1—4 废气涡轮增压柴油机热力系统划分示意图

系统。

### 1. 废气涡轮增压器子系统

由压气机、废气涡轮共同组成一个子系统。这个子系统是基于下列假设条件下确立的：在这个子系统内每一工作循环中废气涡轮输出功正好等于压气机消耗功，即功量保持平衡；流过压气机的空气流量和流过废气涡轮的燃气流量相等；压气机和废气涡轮转速相等，且在一个循环内转速稳定不变。

### 2. 空气中间冷却器子系统

增压柴油机大多数都设置有空气中间冷却器，在热力系统划