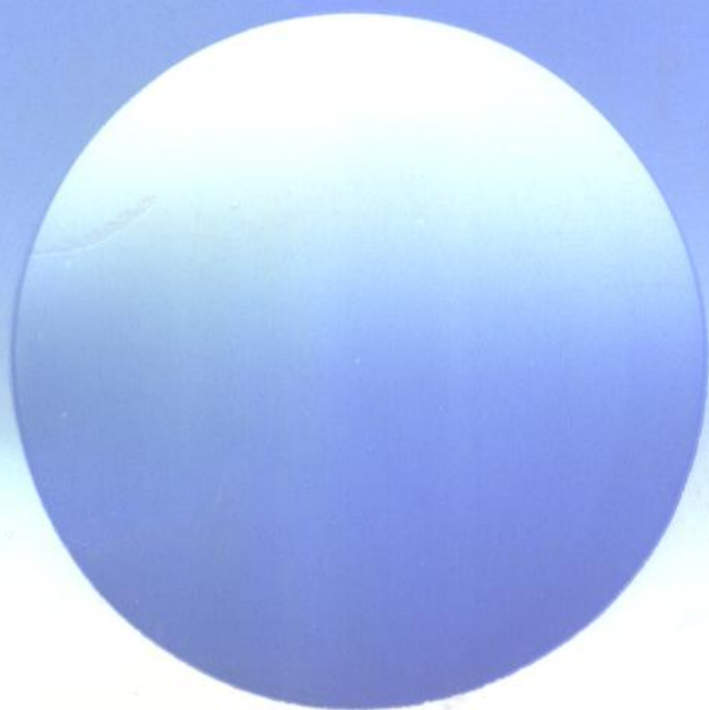


● 研 究 生 用 书 ●

WORKING PROCESS
SIMULATION OF
INTERNAL COMBUSTION
ENGINES

华中理工大学出版社



刘永长

07
3
内 燃 机 工 作 过 程 模 拟

(鄂)新登字第 10 号

图书在版编目(CIP)数据

内燃机工作过程模拟/刘永长
武汉:华中理工大学出版社,1996年12月
ISBN 7-5609-1303-2
I. 内…
II. 刘…
III. 内燃机-工作过程-模拟
IV. TK407

内燃机工作过程模拟

刘永长

责任编辑 易秋明

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编:430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社照排室照排

华中理工大学出版社印刷厂印刷

(邮编:430074)

*

开本:850×1168 1/32 印张:9.75 插页:2 字数:237 000

1996年12月第1版 1996年12月第1次印刷

印数:1-2 000

ISBN 7-5609-1303-2/TK·35

定价:12.00元

(本书若有印装质量问题,请向承印厂调换)

内 容 简 介

本书较为系统地介绍了内燃机工作过程模拟的有关理论和方法,全书共分8章,其中包括:稳态过程模拟、瞬态过程模拟、进排气管内的气体流动模拟、燃烧模拟、燃烧放热率分析、二冲程柴油机工质更换模拟以及内燃机工作过程模拟优化等。为使内容较为充实、新颖,并能符合教学要求,在编写过程中,吸取了国内外有关教材的有益经验,反映了国内外近期研究的一些进展,也包含了作者本人的部分研究工作。

本书主要作为内燃机专业研究生的教学用书,也可作为内燃机专业本科生和相近专业本科生、研究生的教学参考书,对从事内燃机研究的工程技术人员也有参考价值。

Abstract

In this work, the basic theories and methods relevant to working process simulation of I. C. Engine are systematically described. The work consists of eight chapters including: stable working process simulation, transient process simulation, gasflowing in intake manifolds and exhaust manifolds, combustion modeling, heat release rate analysis, simulation of exchange process in a 2-stroke diesel engine and optimization of working process simulation, etc. It features up-to-date, substantial content and teachability. The work has incorporated the advantageous experiences in relevant Chinese and foreign textbooks. It also reflects the latest research progress in the world, some of which come from the research achievement obtained by the author.

It can serve as a textbook for graduates of I. C. Engine specialty, or as a reference textbook for university students of I. C. Engine specialty and graduates or university students of other relevant majors. It can also be a valuable reference for engineers and researchers working in I. C. Engine.

“研究生用书”总序

研究生教材建设是提高研究生教学质量的重要环节,是具有战略性的基本建设。各门课程必须有高质量的教材,才能使学生通过学习掌握各门学科的坚实的基础理论和系统的专门知识,为从事科学研究工作或独立担负专门技术工作打下良好的基础。

我校各专业自 1978 年招收研究生以来,组织了一批学术水平较高,教学经验丰富的教师,先后编写了公共课、学位课所需的多种教材和教学用书。有的教材和教学用书已正式出版发行,更多则采用讲义的形式逐年印发。这些讲义经过任课教师多年教学实践,不断修改、补充、完善,已达到出书的要求。因此,我校决定出版“研究生用书”,以满足本校各专业研究生教学需要,并与校外单位交流,征求有关专家学者和读者的意见,以促进我校研究生教材建设工作,提高教学质量。

“研究生用书”以公共课和若干门学位课教材为主,还有教学参考书和学术专著,涉及的面较广,数量较多,准备在今后数年内分批出版。编写“研究生用书”总的要求是从研究生的教学需要出发,根据各门课程在教学过程中的地位和作用,在内容上求新、求深、求精,每本教材均应包括本门课程的基本内容,使学生能掌握必需的基础理论和专门知识;学位课教材还应接触该学科的发展前沿,反映国内外的最新研究成果,以适应目前科学技术知识更新很快的形势;学术专著则应充分反映作者的科

研硕果和学术水平,阐述自己的学术见解。在结构和阐述方法上,应条理清楚,论证严谨,文字简炼,符合人们的认识规律。总之,要力求使“研究生用书”具有科学性、系统性和先进性。

我们的主观愿望虽然希望“研究生用书”的质量尽可能高一些,但由于研究生的培养工作为时尚短,水平和经验都不够,其中缺点、错误在所难免,尚望校内外专家学者及读者不吝指教,我们将非常感谢。

华中理工大学研究生院院长

陳 珽 黃樹槐

1989. 11.

写在 1995 年

在今天,国家之间的竞争是国家综合实力的竞争,国家综合实力的竞争关键是经济实力的竞争,而经济实力的竞争关键又在于科技(特别是高科技)的竞争,科技(特别是高科技)的竞争归根结底是人才(特别是高层次人才)的竞争,而人才(特别是高层次人才)的竞争基础又在于教育。“百年大计,教育为本;国家兴亡,人才为基。”十六个字、四句话,确是极其深刻的论断。

显然,作为高层次人才培养的研究生教育就在一个国家的方方面面的工作中,占有十分重要的战略地位。可以说,没有研究生教育,就没有伟威雄壮的科技局面,就没有国家的强大实力,就没有国家在国际上的位置,就会挨打,就会受压,就会被淘汰。

“工欲善其事,必先利其器。”教学用书是教学的重要基本工具与条件。这是所有从事教育的专家所熟知的事实。所以,正如许多专家所知,也正是原来的《“研究生用书”总序》中所指出,研究生教材建设是保证与提高研究生教学质量的重要环节,是一项具有战略性的基本建设。没有研究生的质量,就没有研究生教育的一切。

我校从 1978 年招收研究生以来,即着力从事于研究生教材与教学用书的建设。积十多年建设与实践的经验,我校从 1989 年起,正式分批出版“研究生用书”。第一任

研究生院院长陈珽教授就为之写了《“研究生用书”总序》，表达了我校编写这套用书的指导思想与具体要求，“要力求‘研究生用书’具备科学性、系统性、先进性”。第二任研究生院院长，也就是当时我校的校长黄树槐教授完全赞同这一指导思想与具体要求，从多方面对这套用书加以关心与支持。

我是十分支持出版“研究生用书”的。早在1988年我在为列入这套书中的第一本，即《机械工程测试·信息·信号分析》写“代序”时就提出：一个研究生应该博览群书，博采百家，思路开阔，有所创见。但这不等于他在一切方面均能如此，有所不为才能有所为。如果一个研究生的主要兴趣与工作不在“这一特定方面”，他也可以选择一本有关的书作为了解与学习这方面专业知识的参考；如果一个研究生的主要兴趣在“这一特定方面”，他更应选择一本有关的书作为主要学习用书，寻觅主要学习线索，并缘此展开，博览群书。这就是我赞成为研究生编写系列教学用书的原因。

目前，这套用书已出版了6批共30种，初步形成规模，逐渐为更多读者所认可。在已出版的书中，有8种分获国家级、部省级图书奖，有13种一再重印，久销不衰，有的印刷总数已近万册。采用此套书的一些兄弟院校教师纷纷来信，赞誉此书为研究生培养与学科建设作出了贡献，解决了他们的“燃眉之急”。我们感谢这些赞誉与鼓励，并将这些作为对我们的鞭策与鼓励，“衷心藏之，何日忘之？！”

现在，正是江南初春，“最是一年春好处”。华工园内，

红梅怒放，迎春盛开，柳枝抽绿，梧叶含苞，松柏青翠，樟桂换新，如同我们的国家正在迅猛发展，欣欣向荣一样，一派盎然生机。尽管春天还有乍寒时候，我们国家在前进中还有种种困难与险阻，有的还很严峻，但是，潮流是不可阻挡的，春意会越来越浓，国家发展会越来越好。我们教师所编的、所著的、所编著的这套教学用书，也会在解决前进中的种种问题中继续发展。然而，我们十分明白，这套书尽管饱含了我们教师的辛勤的长期的教学与科研工作的劳动结晶，作为教学用书百花园中的一丛鲜花正在怒放，然而总会有这种或那种的不妥、错误与不足，我衷心希望在这美好的春日，广大的专家与读者，不吝拔冗相助，对这套教学用书提出批评建议，予以指教启迪，为这丛鲜花除害灭病，抗风防寒，以进一步提高质量，提高水平，更上一层楼，我们不胜感激。我们深知，“一个篱笆三个桩”，没有专家的指导与支持，没有读者的关心与帮助，也就没有这套教学用书的今天。

诗云：“嘤其鸣矣，求其友声。”这是我们的心声。

中国科学院院士
华中理工大学校长
兼研究生院院长

杨叔子
于华工园内
1995年3月7日

前 言

自 80 年代初以来,内燃机工作过程模拟的研究在国内外都有很大的发展,成为十分活跃的研究领域,成绩斐然,取得了一些有理论意义的研究成果,推出了一批有实用价值的计算软件,发表了大量的研究论文,呈现出一派繁荣的研究景象。与此相应,内燃机工作过程模拟作为一门课程,相继被列入我国各高等学校研究生或本科生教育的教学计划,陆续出版了一批教材,推动和促进了学校教学改革的发展。

我以本书的内容为研究生进行教学始于 1982 年,历时 13 个寒暑。最初的课程名称为《涡轮增压柴油机工作过程数值计算》,涉及的面比较窄,只讲柴油机。主要内容为:气缸内的热力过程、进排气管内的热力过程、缸内过程计算的边界条件、涡轮增压器内的热力过程、柴油机与涡轮增压器的匹配等。随着时间的推移,课程内容逐渐有所变化,以便及时吸取相继出版的同类教材有益的编写经验和恰当反映国内外近期研究工作的进展,也是为了适应当前教学改革发展的需要,最后形成现在这样一个版本。为与内容相符,定名为《内燃机工作过程模拟》。

本书的原稿,是 1979 年 1 月至 1981 年 5 月我在原联邦德国慕尼黑技术大学机械系作访问学者期间听 G. 沃希尼(G. Woschni)教授讲课的笔记整理而成的。在此基础上,十多年来不断增添、删节、调整,内容和编写体系已有了很大的变动,原稿内容的部分仅压缩成本书的第二章,其他诸章都是我回国后在研究生教学和科研中逐渐积累的资料成稿的,其中,注意吸收了我国教材中的精华,反映了我国相应研究工作的成果,也包含有本人的部分研究工作,使本书具有我们自己的特色。特别值得一提的是,也纳入了我的学生答军工学硕士、文立恒工学硕士、王德山工学硕士以

及万本华工学博士在校期间富有成效的研究工作。

本书的出版得到华中理工大学研究生院的大力支持与资助，华中理工大学出版社也给予了大力的支持与帮助，在此，谨向 G. 沃希尼教授、上述单位和诸位同志表示衷心的感谢！

限于作者的水平，错误在所难免，敬请批评指正。

刘永长

1995 年 9 月于武汉

主要符号说明

a	声速
A	无量纲声速, 赫森矩阵
A_f	火焰前峰面面积
AF	空燃比
b	燃油雾束的半宽
c	速度
c_m	活塞平均速度
C	燃油-空气混合气燃油浓度
c_v	定容比热
c_p	定压比热
d	喷油嘴喷孔直径
E	能量
F	面积
FA	燃空比
FSR	燃烧速度比
F_T	当量喷嘴有效流通面积
H	汽化潜热
H_u	燃油低发热值
i	比焓
I	总焓
J	转动惯量
L	积分长度尺度
L_0	燃烧所需理论空气量
m	质量
m_f	燃油质量
m_L	空气质量

m_K	压气机提供的空气质量
m_T	流过涡轮的燃气质量
M_A	燃气混合因子
M_L	空气混合因子
n	发动机转速, 频率
N_e	有效功率
N_K	压气机功率
N_T	透平功率
Nu	努塞尔数
p	压力
p_0	环境压力
p_{inj}	燃油喷注压力
Pr	普朗特数
Q	热量
Q_f	燃油燃烧释放的热量
q	比热量
R	通用气体常数
R_a	空气气体常数
Re	雷诺数
R_f	燃油蒸气气体常数
R_A	燃气气体常数
S	熵
Sc	斯密特数
S_F	比例因子
Sh	谢伍德数
S_L	层流燃烧速度
SMD	索特平均直径
S_T	湍流燃烧速度
t	时间

T	温度
T_0	环境温度
u	比内能, 流速的脉动分量
u'	湍流强度
U	总内能
v	比容积, 速度
V	容积
x	燃油燃烧百分率, 距离, 位移
x_t	雾束贯穿度
α_m	瞬时过量空气系数
α_{qn}	平均传热系数
β	黎曼变量
λ	黎曼变量, 导热系数, 泰勒微长度尺度
ψ	通流系数
μ	流量系数
μ_a	空气粘度
μ_T	湍流粘度, 涡轮流量系数
ν	运动粘度
δ_L	层流火焰厚度
η	科尔莫果诺夫长度尺度, 效率
η_e	有效效率
η_{KS}	压气机等熵效率
η_m	机械效率
η_{TK}	涡轮增压器总效率
η_{TS}	涡轮等熵效率
η_{ZK}	中冷器冷却效率
φ	曲轴角度
ϕ	当量燃空比
θ	雾束锥角

Ω	缸内气流的涡流比
π_K	压气机压比
π_T	涡轮膨胀比
ρ	密度
ρ_f	燃油密度
ρ_a	空气密度
ρ_{atm}	大气密度
ρ_m	混合气密度
τ_i	滞燃期
τ_I	积分时间尺度
τ_K	科尔莫果诺夫时间尺度
τ_M	泰勒微时间尺度
κ	比热比
ξ	中冷器阻力系数

目 录

主要符号说明	(1)
第一章 绪论	(1)
§ 1-1 概述	(1)
§ 1-2 几个典型的理想热力系统	(3)
§ 1-3 内燃机热力系统划分	(14)
§ 1-4 燃油燃烧反应的计算	(15)
§ 1-5 内燃机的工质	(20)
思考题	(22)
第二章 内燃机稳态过程模拟	(23)
§ 2-1 气缸内的热力过程	(23)
§ 2-2 进排气系统内的热力过程	(31)
§ 2-3 缸内过程计算的边界条件	(35)
§ 2-4 柴油机与涡轮增压器的匹配	(57)
思考题	(65)
第三章 内燃机瞬态过程模拟	(66)
§ 3-1 内燃机的瞬态特性	(66)
§ 3-2 瞬态特性研究	(69)
§ 3-3 瞬态过程模拟	(74)
§ 3-4 影响瞬态特性的因素分析	(83)
§ 3-5 改善瞬态特性的技术措施	(90)
思考题	(91)
第四章 内燃机进排气管内流动模拟	(93)
§ 4-1 管内一维非定常流动	(93)
§ 4-2 小扰动法	(97)
§ 4-3 特征线法	(105)
§ 4-4 系统边界的处理	(120)

思考题	(138)
第五章 内燃机燃烧放热规律	(139)
§ 5-1 燃烧放热率计算	(139)
§ 5-2 示功图测录及数据处理	(143)
§ 5-3 误差分析及其修正	(147)
§ 5-4 不同放热规律的比较与分析	(152)
思考题	(161)
第六章 内燃机燃烧过程模拟	(162)
§ 6-1 概述	(162)
§ 6-2 柴油机准维燃烧模型	(165)
§ 6-3 汽油机准维燃烧模型	(192)
§ 6-4 内燃机多维燃烧模型的研究	(206)
思考题	(209)
第七章 内燃机工作过程模拟优化	(210)
§ 7-1 概述	(210)
§ 7-2 优化模型的建立	(214)
§ 7-3 优化方法的选择	(220)
§ 7-4 优化计算举例	(233)
思考题	(239)
第八章 二冲程内燃机工质更换模拟	(240)
§ 8-1 概述	(240)
§ 8-2 “混合-分层”组合换气模型	(241)
§ 8-3 三区换气模型	(252)
思考题	(263)
附录	(265)
主要参考文献	(292)

第一章 绪 论

§ 1-1 概 述

在电子计算机用于内燃机研究以前,为了从定性上对内燃机性能作出估计,并进行有限的定量估算,不得不对内燃机的实际工作过程作出一些简化的假定,其中认为内燃机的正常运行工况一般是稳态的,将工质的状态参数看成是一个循环的算术平均值等。而在设计中则根据经验和类比,在大量选取参数的基础上,对工作循环中的几个特征点进行计算,以便作出数量上的估计。这种简单的热力计算虽然能够得出比较直观的、可作定性分析的数据,但却十分粗略,不能全面地反映内燃机燃烧放热过程、缸内工质的流动及传热过程、进排气系统中热力学和气体动力学过程以及与涡轮增压器的配合性能等,更不能对变工况性能进行预算。随着内燃机性能的不断提高,产品更新的周期不断缩短,采用常规热力计算进行这种经验设计,已远远满足不了现代高性能内燃机研制工作的需要。事实上,内燃机实际运行工况每瞬时并不是稳态的,各状态参数应是一个循环的积分值。

自 70 年代以来,由于快速、大容量电子计算机和数据处理系统在内燃机研究中的应用,加上实验技术和测量仪器以及测试装备的改进,使内燃机在实验和理论研究上有了一个较大的发展,使内燃机工作过程模拟成为可能,使内燃机设计由过去比较粗糙的经验、半经验设计正向模拟计算、优化设计和内燃机 CAD 方面过渡,取得了令人耳目一新的进展。具体表现在:为描述内燃机内部过程和与涡轮增压器匹配的一系列不受简化条件限制的微分方