

当代科技重要著作·交通领域

内燃机的热力学 和空气动力学

卷 2

〔英〕J.H. 郝洛克

主编

D.E. 温特伯恩

机械工业出版社



T1K4
H19
2

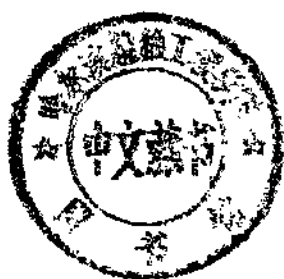
330035

内燃机的热力学和 空气动力学

卷 2

〔英〕 J. H. 郝洛克 主编
D. E. 温特伯恩

程宏 吴大昌 等译校



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书第1卷为英国本森所著,内容为波动法的理论基础,译本已于1986年由机械工业出版社出版。第2卷为英国9位专家所著,由第十章到第二十章共十一章,其中仅第十五,十六,十九三章与第1卷有联系。

本卷全面介绍内燃机工作过程(包括缸内过程)各种类型模拟技术的研究、发展及应用现况,并作出评价。本书在内燃机性能设计CAD方面,是一本权威性著作。

本书不仅便于研究人员了解循环模拟技术发展的全面情况,也适于内燃机性能设计工程师阅读,以便正确选择和运用既有的计算机辅助设计(CAD)程序。

The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal Combustion Engines
Volume 2

J. H. Horlock and D. E. Winterbone Oxford University Press

1986

内燃机的热力学和空气动力学

卷 2

〔英〕J. H. 赫洛克 主编

D. E. 温特伯恩

程宏 奥大昌 等译校

责任编辑:钱既佳 责任校对:丁丽丽

版式设计:冉晓华

责任印制:王国光

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本787×1092¹/₁₆·印张27¹/₄·字数652千字

1992年4月北京第1版·1992年4月北京第1次印刷

印数 001—660·定价:22.50元

ISBN 7-111-02795-7/TK·108

《当代科技重要著作丛书》

总 序

科学技术作为生产力，在人类社会的发展过程中，越来越发挥着日益重要的作用。而作为人类生产实践、科学实验的积累和结晶的现代科学技术著作，则是科学技术知识的潜在的社会生产力。它们所传播的正确的、先进的科学技术内容，一旦为人们所掌握，并运用到社会生产实践中去，便会物化成现实的、巨大的社会生产力，起着推动社会的物质文明和精神文明迅猛发展的重大作用。

在当今世界新技术革命迅速发展的形势下，要振兴我国的国民经济，缩短我们在经济技术上同发达国家之间的差距，促进我国经济向前发展，就必须积极引进、吸收国外的先进科学技术，并使之同国内的科学研究和生产实践密切结合起来。而在我国及时翻译出版世界重要科技著作，并使之在国内广为传播，就是其中一个重要方面。

有鉴于此，中国出版工作者协会科技出版工作委员会，本着科技出版工作要面向世界、面向未来、面向现代化的方针，为使科技出版工作在吸收引进外国先进科学技术方面作出应有的贡献。于1986年在全国科技出版社社长总编辑第四届年会上发出倡议，要求发挥科技出版社的优势，协作出版《当代科技重要著作丛书》，在国内系统地翻译出版当代世界有重大影响的科技著作。这一有建设性的倡议，得到全国各家科技出版社的大力支持。在中国出版工作者协会科技工作委员会和各科技出版社的共同努力下，这一工作得到了国内科技界专家、学者的广泛注意和热情支持，各项工作正在逐步开展。

根据我国科学研究和发展的总体规划，考虑到国家的现行体制和专业门类，经统筹安排，该套大型丛书划分为两大类共三十六个单元。第一类为高科技领域图书，主要包括的学科有生物技术、信息工程、航天航空、自动化、能源、激光、新材料等；第二类为应用科学领域图书，主要包括的学科有地质、煤炭、石油、冶金、机械、化工、建筑、水利、电力、交通、铁道、邮电、轻工、纺织、农业、林业、医学、海洋科学、气象学、环境学、国防科学、数学、力学、物理、化学、天文、地理、生物学、交叉科学、培训图书等。

《当代科技重要著作丛书》的出版工作，数量大，时间长，涉及面广，是一项非常复杂而又艰巨的工作，需要国内科技界的专家、学者以及全国各科技出版社的共同努力，并且需要有志于祖国建设的海外侨胞和人类共同进步事业的外国学者的大力支持。中国出版工作者协会科技工作委员会，为此专门成立了《当代科技重要著作丛书》总编委员会和各单元编委会，负责协调丛书的出版工作和各单元出版计划的具体实施。

尽管丛书的出版工作是非常艰巨的，但我们相信，为了祖国的科技进步，为了中华民族的繁荣昌盛，经广大同仁的携手努力，丛书必定陆续付梓，以滋国内读者。

中国出版工作者协会
科技出版工作委员会

当代科技重要著作丛书(交通领域)

序 言

为了及时总结、推广国内专家、学者的科研成果，系统地引进吸收国外先进科学技术，遵照中国出版工作者协会科技出版工作委员会的工作部署，由人民交通出版社和机械工业出版社牵头，联系大连海运学院出版社、大连理工大学出版社、天津大学出版社、同济大学出版社、上海交通大学出版社、天津科技出版社、安徽科技出版社、广东科技出版社、四川科技出版社等十一家出版社，于1988年6月在京共同组成了《当代科技重要著作丛书(交通领域)》出版工作协调小组，以统筹规划实施该套丛书的出版工作。由于丛书涉及的专业面广，而每一出版社又具有不同专业的出版优势，为了充分发挥各出版社的特长，经出席协调小组成立大会的代表共同商议，决定按照学科专业优势将交通领域当代科技重要著作丛书划分为六个单元，分别组成相应的六个评委会，具体负责选题评定和出版工作。六个评委会及其分工如下：

一、公路、桥梁工程和工程机械单元评委会，由同济大学出版社牵头，四川科技出版社和安徽科技出版社参加，共同负责；

二、港口、航道工程单元评委会，由天津大学出版社牵头，大连理工大学出版社和天津科技出版社参加，共同负责；

三、船舶设计、制造单元评委会，由上海交通大学出版社牵头，大连理工大学出版社和天津大学出版社参加，共同负责；

四、船舶运输和营运管理单元评委会，由大连海运学院出版社牵头，广东科技出版社和人民交通出版社参加，共同负责；

五、汽车、起重搬运和港口装卸机械单元评委会，由机械工业出版社牵头，天津大学出版社和人民交通出版社参加，共同负责；

六、交通运输管理和交通工程单元评委会，由人民交通出版社牵头，安徽科技出版社和同济大学出版社参加，共同负责。

出版这套丛书是一项艰巨复杂的系统工程，需要广大专家学者和十一家出版社同仁持续不断的共同努力。为了我国交通运输业的发展，为了我国科技出版事业的繁荣兴旺，我们深信这一工作将会得到社会各界的大力支持，这套丛书必将融入发展我国交通运输业的同一范畴，对我国交通运输科学技术的发展起到积极的推动作用。

《当代科技重要著作丛书(交通领域)》

出版协调小组

本书著者

W. J. D. 恩纳特 (Annand) 曼彻斯特大学工程系
P. C. 巴鲁阿 (Baruah) 曼彻斯特大学理工学院机械工程系^①
A. D. 戈斯曼 (Gosman) 伦敦帝国学院机械工程系
J. H. 郝洛克 (Herlock) 米尔顿凯恩斯^②沃尔顿厅公开大学
R. D. 皮尔逊 (Pearson) 巴斯大学工程学院
F. J. 华莱士 (Wallace) 巴斯大学工程学院
N. D. 怀特豪斯 (Whitehouse) 曼彻斯特大学理工学院机械工程系
D. E. 温特伯恩 (Winterbone) 曼彻斯特大学理工学院机械工程系
W. A. 伍德斯 (Woods) 伦敦大学玛丽皇后学院机械工程系

本书译校者

吴大昌 北京理工大学车辆工程系
沈祖京 北京清华大学汽车工程系
秦有方 北京理工大学车辆工程系
程昌圻 北京理工大学车辆工程系
程 宏 北京清华大学汽车工程系
蔡祖安 北京清华大学汽车工程系

^① 目前在英国密执安州底特律通用汽车公司研究试验中心。

^② 伦敦西北一新兴城市。——译者

编者前言

“内燃机的热力学和气体动力学”两卷,是已故R.S.本森(Rowland S. Benson)教授在70年代初规划的,但是他在1978年只完成了第1卷初稿后便去世,遗留下该书其余部分的大纲。我们着手使第1卷出版,并决定请R.S.本森的同事们,就各所专长的领域编写第2卷诸章。由于全体作者的努力,综合写成的书严格符合R.S.本森的规划和愿望;作者们作出如此贡献的事实,反映了本森的许多同事对他的尊敬。于是,第1卷实质上是本森本人所著;而第2卷是纪念著作,是为纪念他而作的贡献。

R.S.本森于53岁去世时,是曼彻斯特大学理工学院(UMIST)机械工程系教授,他自1962年起就担任此职。在这16年间,他将该系的热力学与流体力学部门建成为内燃机领域中闻名世界的单位。

R.S.本森经历了艰苦的历程。他最先在Birkenhead^①的Cammell Laird作了5年学徒,后于1946年到Sulzer Bros^②(伦敦)工作。两年后到英国造船研究所(BSRA)担任研究职务,工作了5年,获得很多内燃机的实际经验,这成为他后来求学生涯和研究工作的基础。在此期间他还是Northampton^③综合工业学校(现为市立大学)的非全日制学生,从伦敦大学得到一级荣誉学位,并获多项重要奖励。随后他提出关于二冲程机的论文,获科学硕士学位。

1953年他回到莫西湖畔(Merseyside),在利物浦大学担任机械工程讲员,后升为讲师,而后又升为高级讲师。在此期间,本森在内燃机气体动力学研究中取得了一些重要进展,这形成他以后工作的基础,这些工作的成果最后写在本书中。

开始,德·海勒(de Haller)用特征线描述不稳定气体流动的文章使他印象很深,他以旺盛的精力将特征线图解法用于许多内燃机问题。

这种图解法日益复杂,导致本森应用计算机法。他执着热诚地工作,迅速成为优秀的计算机程序编者,并在1964年与加格(Garg)和吴赖特(Woollatt)发表了不稳定流动问题数值解法的经典论文,仍然是用基本特征线法。这样他和他的同事们就有了更有效的工具,用于此后的内燃机方面的工作。

在这些研究工作的同时,本森对旋转机械中的流动发生了兴趣,这主要是由于BSRA的一项内容丰富的研究合同,由利物浦大学、Brush及Napier^④合作,发展大型船用柴油机的高性能涡轮增压器。他决定致力于径流式压气机和涡轮的研究。

在1960~1961年于麻省理工学院(MIT)担任客籍教授一年之后,他到了UMIST。在1962~1978年期间,于利物浦开始的研究主流发展而形成学术体系,这使R.S.本森和UMIST获得世界名望。这主要是预计内燃机全面性能的模拟技术,还有径流式旋转机械中稳定及不

① 英格兰西北部一城市。——译者

② 一公司名。——译者

③ 伦敦西北一城市。——译者

④ 公司名。——译者

稳定流动的分析,前者构成了本书的内容。UMIST的计算机程序正用于全世界的工业和大学中。本森研究结果的论文发表于许多国际期刊,总共约130篇。几项主要贡献获得机械工程学会和汽车工程学会(美国)的奖励。1968年他得到伦敦大学科学博士学位,1977年Gent大学^①授予他荣誉博士衔,他曾与该校合作一项研究计划。

本森工程生涯的特色,就我们与他在利物浦和UMIST密切合作时所深知,他精力极其充沛而且工作热诚,他以这些精神感染了他的学生。很少人能够承担像R.S.本森所担负的极其繁重的工作。但他仍然慷慨花费时间致力于曼彻斯特犹太人协会的工作。他深深感谢他妻子和家庭的支持。

1975年本森认识到自己的生命可能将在几年之内结束,他开始集中编写,形成本书的基础。他临去世时仍智力高超,深知即将到来的命运。他坚定地面对死亡,在生命的最后期间仍不断工作,以保证他的工作将继续发展,他的书将得以出版,作为他工作的完整记载,此书是对一位即使面对死亡时仍纯朴坚毅的人物的颂扬。

编 者

^① 比利时一大学,该校学生在万人以上。——译者

符 号

许多辅助的参数在应用的地方说明, 不列在本表内。

a 音速
 a 传热式中的经验常数
 a 焓系数
 a 燃烧方程中空气摩尔数
 $a \frac{(3-k)}{2(k-1)}$
 a 恩纳特式中的系数
 a_A 参考压强时的音速
 A 无量纲音速 $= a/a_{ref}$
 A 一般化的反应中成份
 A_A 焓值——不等焓流
 A_{chem} 催化反应常数
 a 传热式中的经验常数
 $b \frac{(k+1)}{2(k-1)}$
 a 恩纳特式中的系数
 B 一般化的反应中成份
 B_n 谐量系数
 c 恩纳特传热系数
 c_1 沃希尼速度系数
 c_2 沃希尼速度系数
 c_3 霍亨勃格传热参数
 c_4 霍亨勃格传热参数
 c 比热容
 C 表面粗糙度常数
 C 一般化的反应中成份
 $C_{1,}$ 涡轮处“等熵气流速”
 C_d 流量系数
 C_i 成份 i 的摩尔密度
 C_n 谐量系数
 c_p 定压比热容
 c_v 定容比热容
 D 缸径
 D 一般化的反应中成份
 D 扩散系数

D_0 当量直径 (水力学平均直径)
 dQ 传热增量
 d_v 气门直径
 e 比内能
 e_0 绝对零度时比内能
 e_T 因状态所致比内能
 E 内能
 E 辐射系数
 E_a 活化能
 E_k 缸内工质内能
 f 燃空比
 f 辐射形状因数
 f 摩擦因数
 f^* 管道流的摩擦因数
 f_{co} CO形成的因数
 F_n 脉冲转换器中喷嘴的面积
 f_t 火焰因子
 f_i 成份 i 的质量分数
 F 面积
 F_f 层流火焰面积
 F_M 脉冲转换器中混合面积
 F_n $n\omega/2a$
 F_p 管道面积
 f_s 加强摩擦系数
 F_t 湍流火焰面积
 F_T 脉冲转换器的涡轮端面积
 g 比纪伯函数
 $G \frac{fu^2}{2} \frac{u}{|u|} \frac{4}{D}$
 G 气塞顶间隙
 g 单位面积流量
 h 比焓
 h 转子槽高
 H 活塞凹坑深度
 h_k 传热系数
 I 惯量矩

i_{λ}	辐射强度	$(Q_v)_r$	反应内能
k	湍流动能	Q'_v	定容低热值
k^*	有效湍流导热系数	Q'_p	定压低热值
k_b	逆向反应速率	r	气缸半径
k_{chem}	化学反应速率常数	r	压强比
k_f	正向反应速率	r	半径
K_p	平衡常数	r	压缩比
K_q	导热系数	r_f	火焰半径
K_{λ}	单色吸收系数	r_s	$\frac{\text{涡轮平均有效压强}}{\text{压气机平均有效压强}}$
k_m	传质系数	R	比气体常数
k_s	总速率常数	$\mathcal{R}$	反应速率
l	湍流长度积分尺度	$\bar{R}$	通用气体常数
L	长度	Re	雷诺数, $\frac{\rho u x}{\mu}$
L	扭矩	R_s	自相关系数
L_t	入射冲击损失系数	s	比熵
l_t	湍流时间积分尺度	S	活塞冲程
m	质量	S	湍流式中代表源的项
m	辐射式中的指数	Sc	施米特数, $\mu/\rho D$
$\dot{m}$	质量流量	Sh	舍伍德数, $k_m D_s/\mathcal{D}$
m_w	分子量	S_r	洞流比
M	摩尔数	t	时间
M	摩尔质量	t	压强转换装置的转子槽壁厚
M_0	角动量	T	温度
n	谐量数	u	速度
n	多变指数	u	湍流中轴向速度波动分量
N	发动机转速	u	速度 (转子通路中)
N	转子转速, r/s	u	涡轮叶片速度
n_c	缸数	u'	轴向湍流绝对强度
n_o	转子槽数	u_g	催化剂中气体速度
N_f	工作冲程数/min	u_l	层流火焰速度
N_w	旋流速度	u_t	湍流火焰速度
Nu	努谢尔特数, $h_0 x/k_f$	U	瞬时轴向速度
O_p	轴向气口开度	U	无量纲速度, $u/a_{r,0}$
p	压强	$\bar{U}$	时间平均轴向速度
$\bar{p}$	平均有效压力	u_n	能量相当速度
$\mathcal{P}$	功率	v	比容
$\mathcal{P}$	燃烧方程中的准备速率	v	压强转换器中的速度
p_{O_2}	氧的分压强	v	湍流中径向速度的波动分量
Pr	普朗特数, $\mu c_p/k_f$	V	容积
q	单位质量传递或产生的热量	V	无量纲速度, $v/a_{r,0}$
q	燃油泵齿杆位置	V	时间平均轴向速度
Q	传递或产生的热量		
$\dot{Q}$	传热率		

- V_{ov} 催化反应器容积
 V_p 平均活塞速度
 V_s 排量
 W 湍流中切向速度的波动分量
 W 功
 W 时间平均切向速度
 W_o 压气机所需能量
 W_T 涡轮所用能量
 W_{TT} 涡轮处可用能量
 x 距离
 x 空气的质量分数
 x 音速比
 x 纯空气与缸内质量之比
 X 无量纲距离, x/L_{ref}
 X_{ov} 催化反应器长度
 x_i 摩尔分数
 y 离壁距离
 y 压强转换装置转子圆周距离
 y 摩尔密度
 y 通用化参数
 y 压气机功率参数
 Y 压强转换装置转子无量纲圆周距离,
 y/δ
 y 残余气与缸内质量之比
 z 区域数
 z 涡轮功率参数
 Z 无量纲时间, a_{ref}/L_{ref}
 Z 粘性系数
 z_p 瞬时活塞位置

希腊字母

- α 温度比, T_a/T_{o0}
 α 散热系数
 α 曲轴转角
 α 辐射形状系数
 α A/A_o
 α 压强转换装置转子入口角
 α 压强比——复合燃烧循环
 $\ddot{\alpha}$ 加速速率
 β 压强比, p_a/p_{o0}
 β 传热关系中的速比
 β 黎曼变量——特征线值
 β B/B_o
 β 压强转换装置转子出口角

- β 初膨胀比——复合燃烧循环
 δ 边界层厚
 δ 增量
 δ D/D_o
 δ 压强转换装置转子槽节矩
 δ 放(废)气门比
 Δ 增量
 ε 湍流耗散率
 ε 方程式中误差项
 ε 催化床无效分数
 ε 中冷器效率
 ε 空燃比
 ε 湍流耗散率
 ε_o 最小引力能
 ε_o 总空燃比
 ε_λ 波长 λ 的辐射系数
 ε_g 涡旋散热系数
 ε_{ov} 缸内空燃比
 η 克莫格罗夫微尺度
 η 扫气效率
 η 效率
 η_A 无脉冲转换器时排气歧管效率
 η_o 充气效率
 η_o 压气机等熵效率
 η_d 图形系数
 η_m 机械效率
 η_{PO} 脉冲转换器效率
 η_i 克莫格罗夫时间尺度
 η_T 涡轮等熵效率
 η_{TO} 涡轮增压器效率
 η_v 容积效率
 γ 燃料相对密度
 γ C/C_o
 γ 发动机旁通比
 κ 比热容比, C_p/C_v
 λ 扫气比
 λ 湍流微尺度
 λ 辐射波长
 λ 黎曼变量——特征线值
 Λ 涡轮反动度
 λ_t 时间微尺度
 μ 扫气系数
 μ 动力粘度

ν 运动粘度	c 气缸
ν_i 气体 <i>i</i> 的当量系数	c 压缩
ω 频率	C 压气机
ω 压强转换装置的切向速度	cbn 燃烧
Ω 无量纲切向速度	cc 曲轴箱
Ω_D 压强转换装置 Θ 的碰撞积分	cd 压缩供气
ϕ 喷嘴面积比, F_1/F	cl 封闭期
ϕ 扫气系数	d 图示
ϕ 当量比	d 所需值
π 压强比函数, $(p/p_{ref})^{(\kappa-1)/\kappa}$	dyn 瞬态时的值
π 脉冲转换器分析用参数	e 残余气或排气
Π 产物	e 平衡
ψ 气门与管道面积比	e 排出
ψ 辐射式中的因子	e 膨胀
ψ 扫气系数	E 发动机
ψ_D 扩散管面积比	em 排气歧管
ψ_N 喷射器喷嘴面积比	et 排气门喉口
ρ 密度	ev 排气门 (几何的)
σ 玻耳兹曼常数	evc 排气门或气门闭
σ 伦纳德-琼斯扩散势	f 燃料
σ 存留容积与工作容积之比	f 摩擦
θ 相位角	F 因面积改变所致变化
τ 放气时间	F 終了
τ 剪应力	g 残余气
τ 时间常数	HR 产生的热量
ξ 压强转换装置的叶片前伸角	i 成份 <i>i</i> 的
ξ 无量纲质量流量参数	ig 点火
下角标	i 指示
a 空气, 或进入的气体	i 流入
a 轴向分量——压强转换装置	in 走向边界的特征线
a 空气歧管	in 入流
a 气门或气口	int 中冷器
A_s 因熵改变所致的变化	is 等熵过程
am 空气歧管	ivo 进气门或气口开
amb 环境	I 特征线标志
at 空气门喉口	I 特征线标志
av 进气门 (几何的)	I 负荷
b 燃烧过的气体	lim 极限值 (如舍伍德数的)
b 制动	m 歧管
b 背压	m 机械的
BB 黑体	m 未燃混合气
bf 轴承摩擦	max 最大

Θ 原文如此, 似应为催化反应器。——译者

n	区域数	u	未燃气
N	N 次放气步长	v	气门几何面积
out	离开边界的特征线	w	壁
out	出流	w	旋转分量——压强转换装置
o	总的	w	水
op	打开期	x	位置
ou	重叠	0	滞止状态
P	生成物	0	在绝对零度的参考温度下
q	因传热所致变化	1	步长开始
r	相对分量——压强转换装置	1	静子与转子中间——压强转换装置
ref	特征线计算的参考值	1	环境
R	放气状态 (排气门开时)	2	步长末
R	反应物	2	转子槽入口状态——压强转换装置
R	相对热 (效率)	2	进气歧管——充气冷却器前
s	表面	3	转子槽出口状态——压强转换装置
s	等熵膨胀后所得状态	3	进气歧管——充气冷却器后
sc	扫气	4	转子出口后中间区状态——压强转换装置
st	化学当量	4	排气歧管——废气门前
S	开始	5	转子出口后静子状态——压强转换装置
t	气门喉口面积	5	排气歧管——废气门后
T	涡轮	6	涡轮后
T_a	表观涡轮效率	$1\sim 6$	发动机循环中的热力状态
TA	表观涡轮相对效率		
th	热的		
tot	复合式机总的		
tr	存留的		
		上角标	
		r	反流

目 录

总序

序言

本书著者和译校者

编者前言

符号

引言

第四篇 缸内过程

第十章 用充排法及拟稳定模型计算

不稳定流动 7

10.1 引言 7

10.2 通用方程式 8

10.2.1 质量流量 ($\dot{m}_a$ 和 $\dot{m}_e$) 9

10.2.2 传热率 ($\dot{Q}$) 10

10.2.3 活塞运动和容积变化 (δV_e) 11

10.2.4 气体性质 11

10.2.5 滞止焓 (h_a, h_e) 11

10.2.6 缸内状态 11

10.3 分开的充气和排气过程 11

10.3.1 充气过程 12

10.3.1.1 由大容器绝热充气 13

10.3.1.2 由压气机充气 13

10.3.2 排气过程 14

10.4 同时充排气 (扫气过程): 近似但

精确的解法 15

10.5 同时充排气 (扫气过程): 其他近

似解法 16

10.5.1 连续扫气 17

10.5.1.1 连续扫气 (不混合)

——情形 (a) 18

10.5.1.2 置换扫气 (不混合)

——情形 (b) 19

10.5.1.3 置换扫气 (完全混合)

——情形 (c) 20

10.5.1.4 在完全混合情况 (c)

的缸内温度 (T_e) 21

10.6.2 非连续扫气 (依次充气和排

气) 22

10.5.3 简评 23

10.6 充气和排气方程式的确切解 24

10.6.1 由气缸通过喷嘴定容等熵

放气 24

10.6.1.1 亚音速放气 24

10.6.1.2 壅塞放气情形 26

10.7 综述 27

参考文献 27

第十一章 缸内的流动过程 28

11.1 引言 28

11.1.1 背景及重要性 28

11.1.2 本章的目的和内容 32

11.2 缸内流动的特征 33

11.2.1 平均流和湍流运动的区分 33

11.2.2 其他重要参数的定义 36

11.2.2.1 长度尺度 36

(i) 长度积分尺度 l 37

(ii) 泰勒 (Taylor) 微尺度 λ 37

(iii) 克莫格罗夫 (Kolmogorov)

微尺度 η 37

11.2.2.2 时间尺度 38

(i) 时间积分尺度 t_i 38

(ii) 时间微尺度 λ_t 38

(iii) 克莫格罗夫时间微尺度 η_t 38

11.2.2.3 能量谱 38

11.2.3 数量级 39

11.3 测量技术 40

11.3.1 引言 40

11.3.2 热线风速仪 40

11.3.3 激光多普勒风速仪 42

11.4 分析技术 43

11.4.1 引言 43

11.4.2 简单模型 44

11.4.2.1 一维压缩或膨胀 44

11.4.2.2 轴对称挤流理论 44

11.4.2.3 简单的旋流理论 46

11.4.3 多维技术 49

11.4.3.1 背景	49	11.7 排气过程	121
11.4.3.2 守恒方程	49	11.8 燃料喷射和燃烧的影响	122
11.4.3.3 湍流模型方程	51	11.8.1 燃料喷射	122
11.4.3.4 边界条件及辅助方程	52	11.8.2 燃烧	123
11.4.3.5 数值解的步骤	53	11.9 总结与展望	124
11.4.3.6 多维方法的现状	55	11.9.1 总结	124
11.5 进气行程	58	11.9.2 展望未来	125
11.5.1 引言	58	参考文献	126
11.5.2 进气道流动的本质和作用	58	第十二章 气缸和气道内的传热	132
11.5.2.1 通过进气道的质量流	59	12.1 引言	132
11.5.2.2 进气产生的旋流	62	12.2 传热的主要方式	132
11.5.2.3 气道出口处的流动特性	62	12.3 可用的测试技术	132
11.5.3 缸内流动的结构	63	12.3.1 对冷却剂总传热量的测量方 法分析	132
11.5.3.1 轴对称布置	64	12.3.2 直接测量沿壁厚的温度梯度	133
(i) 进气旋流的影响	65	12.3.3 由零件内部的等温线确定热 流量	133
(ii) 气门座角度和气门最大升程 的影响	71	12.3.4 表面温度测量的用途	135
(iii) 行程 S 和余隙间隙 G 的影响	74	12.3.5 热流量的辐射分量的测量	137
(iv) 活塞几何形状的影响	76	12.4 缸内的对流传热	137
(V) 发动机转速的影响	76	12.4.1 瞬时对流传热流量的测量	137
11.5.3.2 非轴对称结构	76	12.4.2 理论的方法	139
(i) 总的特征	76	12.4.3 经验的相互关系	140
(ii) 偏心的轴对称气道	78	12.5 缸内的辐射热通量	144
(iii) 实际气道	80	12.5.1 基本理论	144
(iv) 湍流特性	83	12.5.2 气相燃烧产物的辐射	145
(V) 发动机参数的影响	84	12.5.3 碳粒云团的辐射	146
11.6 压缩和膨胀过程	86	12.6 换气过程的传热	148
11.6.1 引言	86	12.6.1 气缸内	148
11.6.2 轴对称结构	86	12.6.2 进气阀和流入充量间的传 热	148
11.6.2.1 盘形燃烧室	86	12.6.3 流出充量和排气阀间的 传热	149
(i) 旋流和转速的影响	88	12.6.4 流出充量和排气道间的 传热	149
(ii) 压缩比的影响	92	参考文献	150
(iii) 气门座角度的影响	92	第十三章 压燃式发动机中的燃烧 和循环计算	153
(iv) 气门最高升程的影响	94	13.1 引言	153
11.6.2.2 活塞和缸盖上有凹坑的 结构	94	13.2 热力学	153
(i) 旋流的影响	99	13.3 简单单区模型的动力循环计算	156
(ii) 盆形坑形状的影响	104	13.3.1 能量平衡方程	156
11.6.3 非轴对称燃烧室结构	105		
11.6.3.1 引言	105		
11.6.3.2 盘形燃烧室	108		
11.6.3.3 活塞上盆形坑结构	113		
11.6.3.4 其他形状	119		

13.3.2 单区模型的动力过程计算	157
13.4 多区模型的动力循环计算	158
13.4.1 多区模型的热力学	158
13.4.2 多区模型的动力过程计算	160
13.5 压燃式发动机中的燃烧	160
13.5.1 概述	160
13.5.2 多区燃烧模型	161
参考文献	162

第十四章 火花点火发动机的燃烧

和循环计算	164
14.1 前言	164
14.2 动力循环模型的组成	164
14.2.1 火焰传播的机理	164
14.2.2 燃烧的热力学	167
14.2.2.1 热力学平衡	167
14.2.2.2 解平衡方程的数值过程	169
14.2.3 污染物的形成	171
14.2.4 氧化氮的生成和分解	172
14.2.4.1 基本的反应速率动力学	172
14.2.4.2 NO的动力学	174
14.2.4.3 氧化氮的反应速率方程	175
14.2.5 一氧化碳——经验的计算方法	176
14.3 动力循环的计算	176
14.3.1 压缩行程	177
14.3.2 点火和燃烧空间中双区的形成	177
14.3.2.1 迟延时间	177
14.3.2.2 双区计算的开端	178
14.3.3 火焰前锋的传播	181
14.3.4 有两个区的膨胀	181
14.3.5 时间步长	183
14.3.6 燃烧的终结	183
14.3.7 完全是燃烧产物情况下的膨胀	183
14.4 换气时期的计算	184
14.4.1 缸内的热力学	184
14.5 单缸发动机上的试验	186
参考文献	190

第五篇 不稳定有反应流动

第十五章 变比热容和有化学反应(包括有排放控制)的不稳定流动的数值解法

15.1 引言	193
15.2 基本方程	194
15.2.1 λ 特征线	195
15.2.2 β 特征线	195
15.2.3 轨迹线	195
15.3 温度和气体组成变化所致比热容改变的影响	196
15.3.1 轨迹线计算	198
15.3.2 特征线计算	199
15.4 催化反应器——控制排放的装置	202
15.4.1 催化反应器说明	203
15.4.2 理论考虑	204
15.4.3 转变过程的机理	205
15.4.3.1 反应速率	205
15.4.3.2 化学速率常数 k_{chem}	206
15.4.3.3 传质速率系数 k_m	206
15.4.3.4 扩散系数(扩散率) D	208
15.4.3.5 由于反应热而沿轨迹线的焓值变化 $(dA_A)_{RR}$	209
15.4.3.6 由于反应热而沿波动特征线的黎曼变量变化 $(d\lambda)_{RB}$	210
15.4.3.7 催化剂表面温度 T_s	210
15.4.3.8 管壁摩擦系数 f'	211
15.4.4 在火花点火发动机所用催化反应器上的理论与实验对比	211
参考文献	213

第十六章 压强转换器和压强转换发动机

16.1 引言	215
16.2 压强转换器(用于发动机增压)	216
16.3 压强转换发动机	217
16.4 压强转换器和压强转换发动机的设计方法	221
16.4.1 状态、极点和位置图	221
16.5 边界条件曲线	224
16.5.1 局部的槽端和状态边界曲线	225

16.5.1.1 转子入口	225
16.5.1.2 转子出口	226
16.5.2 平均槽端和状态边界曲线	227
16.5.2.1 转子入口(对于大而“无叶片”的静子气口)	227
16.5.2.2 转子出口(对于大而“无叶片”的静子气口)	228
16.5.3 槽通道部分打开的影响	228
16.5.3.1 入口端	228
16.5.3.2 出口端	229
16.6 设计特点	230
16.6.1 理想气口定时	230
16.6.2 转子最有长宽比	231
16.6.3 疲劳应力计算	232
16.6.4 应用凹囊以扩大转速范围	232
16.6.5 能量损失及其恢复	233
16.6.6 抗谐凹囊的计算	233
16.7 整机	234
16.8 应用	234
16.8.1 气流增压器(Comprex)	235
参考文献	237
附录1 一维有摩擦可压缩流动的动量式	237

第六篇 整机模拟模型

第十七章 准稳态模型	240
17.1 引言	240
17.2 准稳态模型的定义	241
17.3 模型1	242
17.3.1 柴油机循环	243
17.3.2 压气机与中冷器	247
17.3.3 涡轮	248
17.3.4 发动机、涡轮与压气机的组合	249
17.3.5 涡轮增压柴油机	249
17.3.5.1 例1:涡轮增压柴油机设计点的计算	251
17.3.5.2 例2:涡轮增压柴油机部分负荷计算	253
17.3.6 复合发动机	255
17.3.7 燃气发生器装置	256
17.3.8 发动机、压气机与涡轮复合机的性能	256

17.3.9 对模型1总的评价	257
17.3.10 模型1的改进	257
17.4 模型2	261
17.4.1 压气机与中冷器	263
17.4.2 发动机模型	263
17.4.3 涡轮模型	266
17.4.4 匹配实例	267
17.4.4.1 例3:低海拔发动机性能	267
17.4.4.2 例4:高海拔发动机性能	268
17.5 模型2的计算机程序	268
17.5.1 压气机	268
17.5.2 发动机功率输出	270
17.5.2.1 发动机温升	271
17.5.3 涡轮模型	271
17.5.3.1 质量流量	271
17.5.3.2 涡轮效率	272
17.5.3.3 涡轮功率	272
17.5.4 计算机程序	273
17.5.4.1 数字模拟程序标志符	273
17.5.5 对程序预测的评价	274
17.5.6 修改程序用于其它型号的发动机	275

参考文献	277
------	-----

附录17.1 模型1的公式推导	277
A17.1.1 柴油机工作循环	277
A17.1.1.1 发动机前后温升	282
A17.1.1.2 发动机前后压降	282
A17.1.2 涡轮增压器模型	283
A17.1.2.1 涡轮进口温度 T_5	283
A17.1.2.2 涡轮功率 $\dot{Q}_T$	283
A17.1.2.3 压气机功率 $\dot{Q}_C$	284
附录17.2 模型2的说明	284
A17.2.1 发动机当量孔 F_{eq}	284
A17.2.2 气阀重叠期内排气管中平均压力 p_{av}	285
A17.2.3 相对涡轮表观效率 $\eta_{A,r}$	285

第十八章 充排法发动机模拟模型	287
18.1 引言	287
18.2 基本考虑	287
18.2.1 用于单缸的通用方程式	287
18.2.1.1 流入和流出过程	287