



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

清华大学汽车工程系列教材

汽车发动机原理

Automotive Engine Fundamentals

主编 王建昕 帅石金

Wang Jianxin Shuai Shijin

参编 张俊智 杨福源 王志 张云龙 马凡华

Zhang Junzhi Yang Fuyuan Wang Zhi Zhang Yunlong Ma Fanhua

主审 刘峥

Liu Zheng

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

清华大学汽车工程系列教材

汽车发动机原理

Automotive Engine Fundamentals

主编 王建昕 帅石金

Wang Jianxin Shuai Shijin

参编 张俊智 杨福源 王志 张云龙 马凡华

Zhang Junzhi Yang Fuyuan Wang Zhi Zhang Yunlong Ma Fanhua

主审 刘峥

Liu Zheng

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍了汽车最常用的汽油和柴油发动机动力装置的工作原理,包括主要性能指标与运行特性、燃料理化特性与热化学、热功转换与能量利用、换气过程与进气充量、混合气形成与燃烧过程、有害排放物生成机理与控制等内容。根据近年来汽车节能减排技术的进步,加强了发动机燃料、缸内直喷汽油机、发动机电控以及柴油机排气后处理等内容的介绍,同时简要介绍了混合动力系统基本概念、均质混合气压缩着火等新燃烧方法以及各种代用燃料的燃烧与排放特性。

本书可用作汽车专业及内燃机专业的本科生教材(有配套课件),也可供从事汽车发动机研究和开发工作的工程技术人员及研究生参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

汽车发动机原理 / 王建昕,帅石金主编. --北京:清华大学出版社,2011.3

(清华大学汽车工程系列教材)

ISBN 978-7-302-22029-9

I. ①汽… II. ①王… ②帅… III. ①汽车—发动机—原理 IV. ①U464

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 025023 号

责任编辑:庄红权

责任校对:刘玉霞

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:24.75 插 页:2 字 数:592 千字

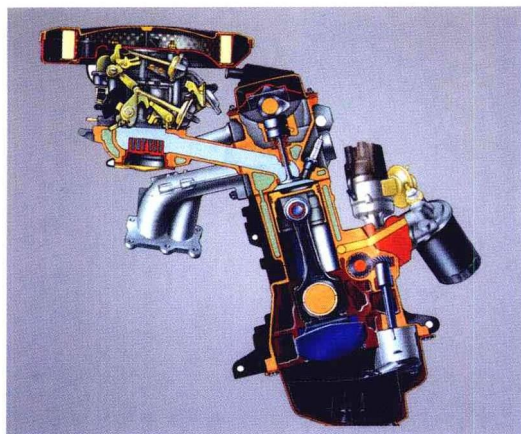
版 次:2011 年 3 月第 1 版

印 次:2011 年 7 月第 2 次印刷

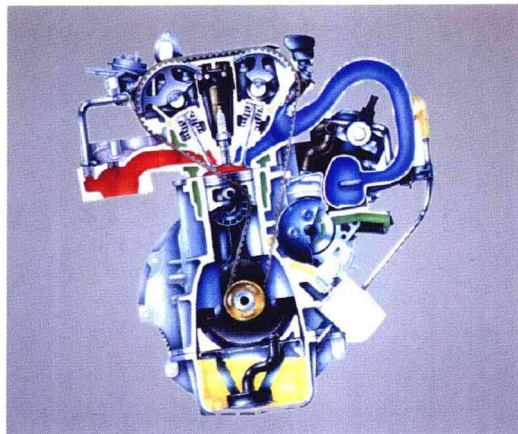
印 数:101~4100

定 价:37.00 元

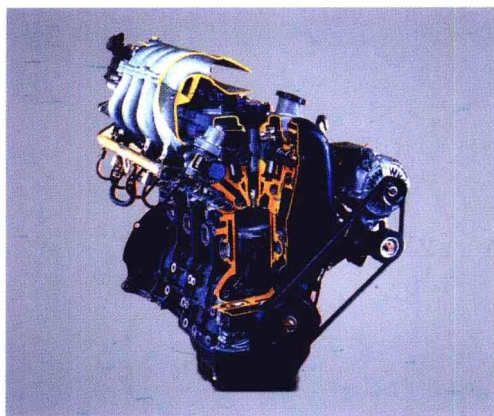
产品编号:021170-02



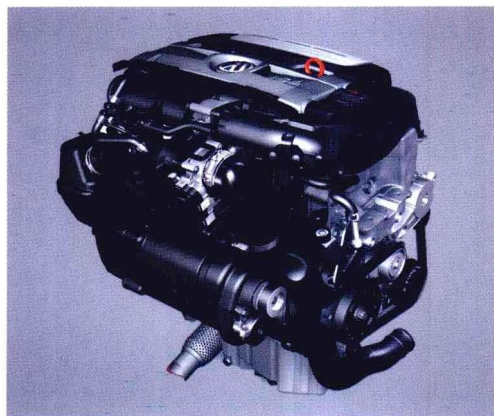
典型化油器汽油机



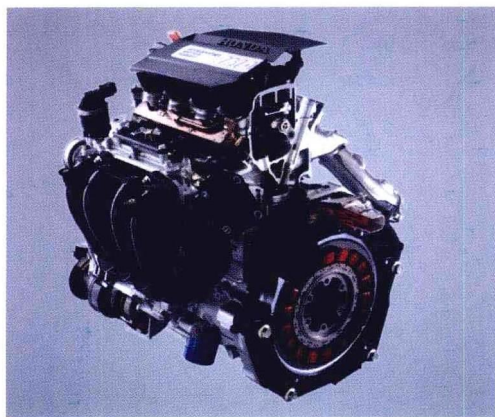
典型进气道多点电喷汽油机



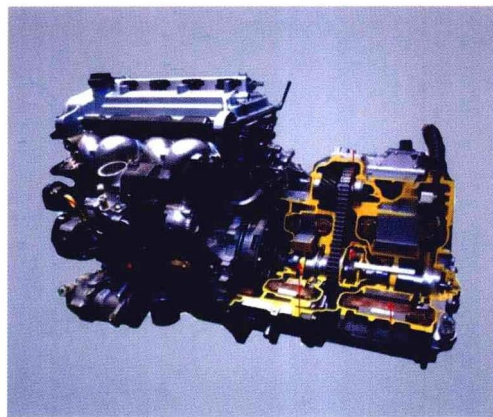
丰田 2.0 升 D4 缸内直喷汽油机



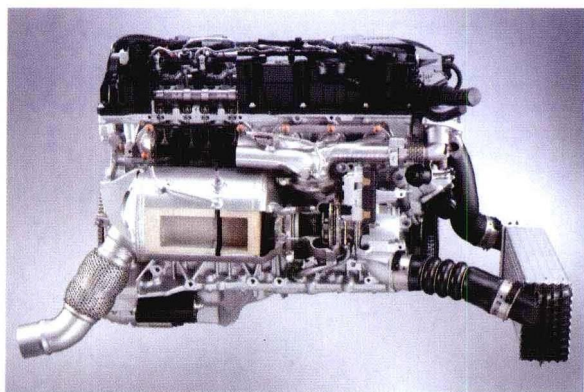
大众 1.4 升 TSI 双增压缸内直喷汽油机



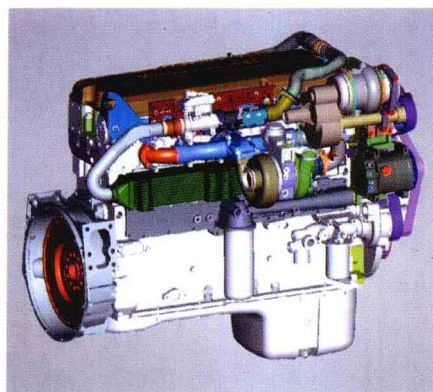
本田 IMA 混合动力发动机(图 5-38)



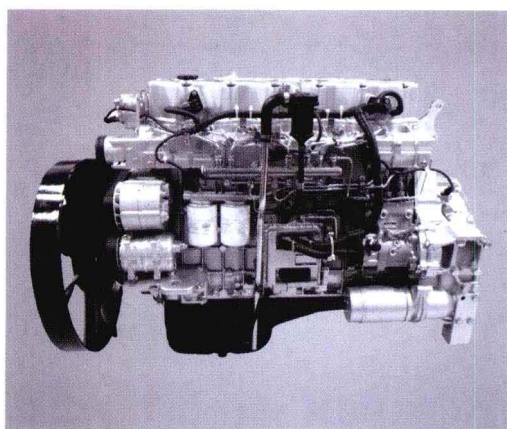
丰田 Prius 混合动力系统



宝马 3 升高压共轨增压柴油机
(带 DOC+DPF)



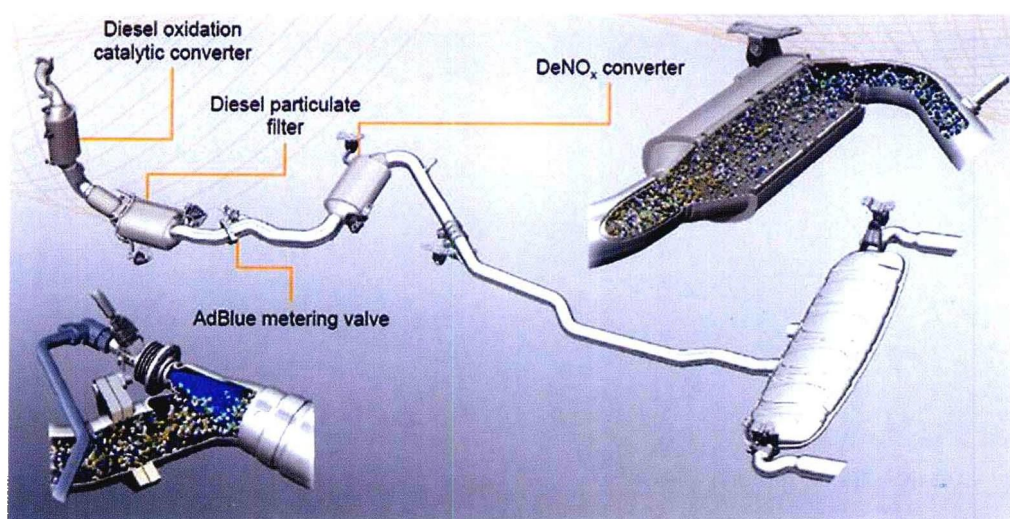
康明斯 ISX 15 升高压共轨增压柴油机
(带余热利用系统)



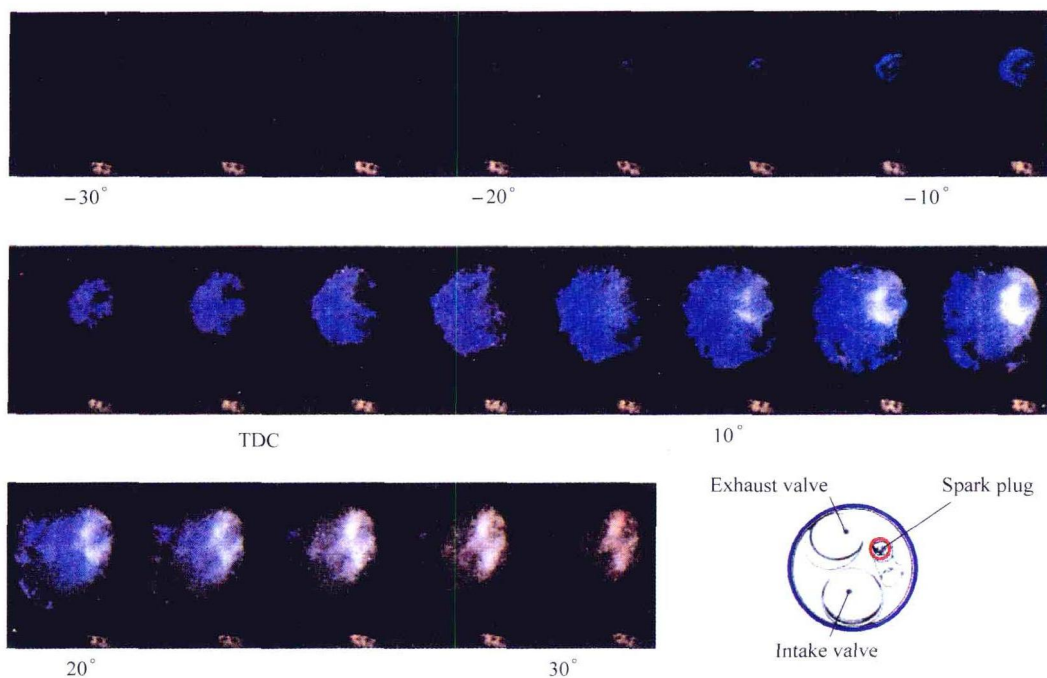
一汽 CA6DL 8.6 升高压共轨增压柴油机



东风 DCI 11 升高压共轨增压柴油机

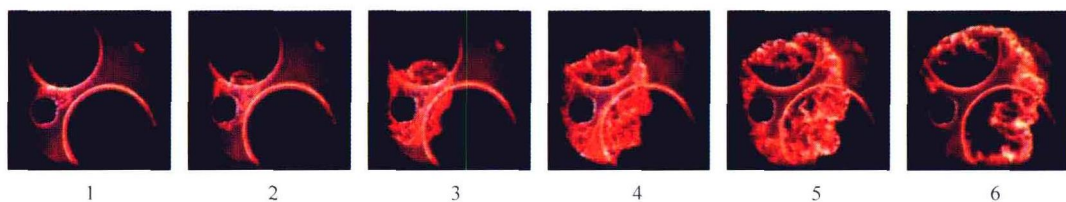


奥迪 TDI 柴油车超低排放后处理(DOC+DPF+SCR)系统

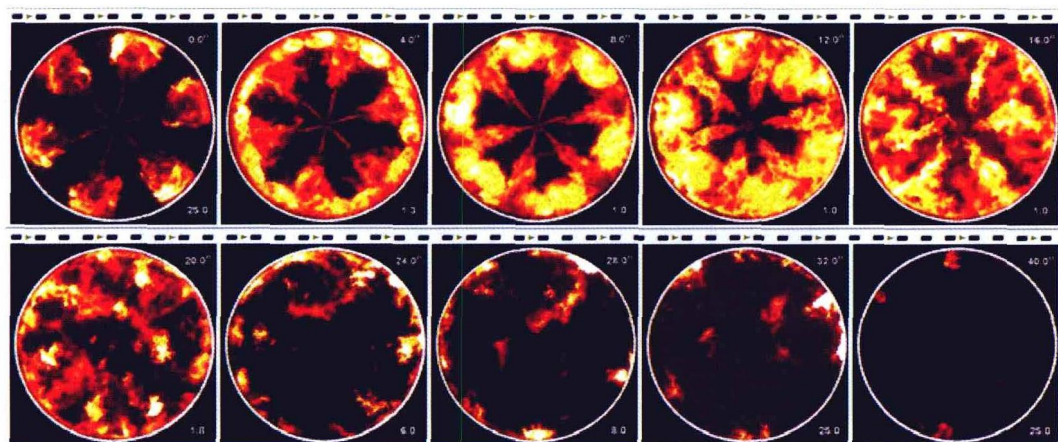


汽油机燃烧过程高速摄影

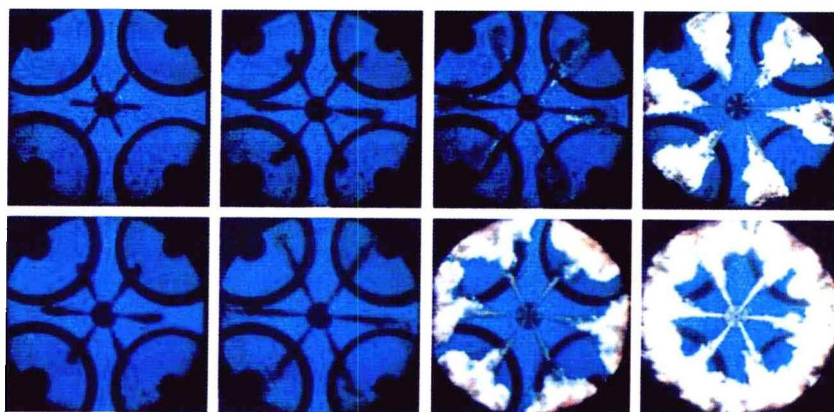
(摘自 John B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, 1988)



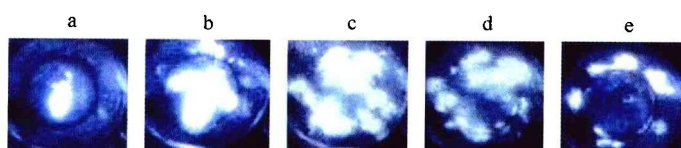
汽油机火焰传播高速纹影摄影(来源：宝马公司)



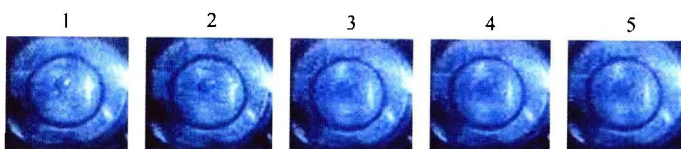
柴油机燃烧过程高速摄影(来源：美国 Sandia 国家实验室)



高压喷射对柴油机燃烧过程的影响(图 9-54)

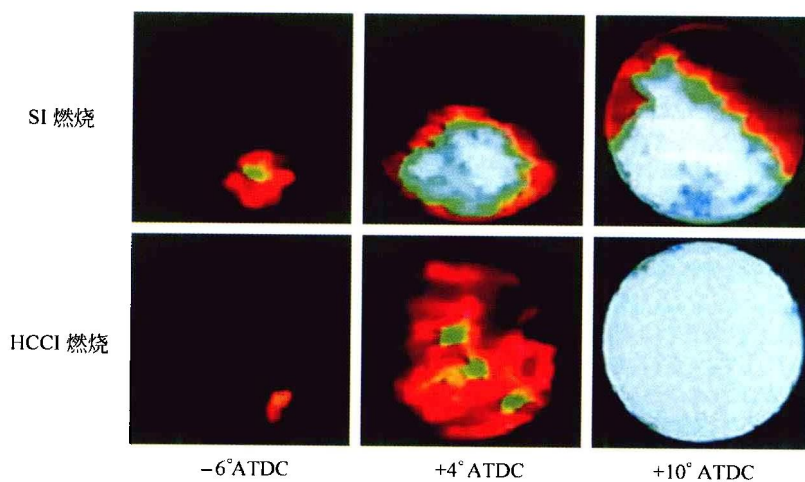


传统柴油机燃烧



MK 燃烧

MK 燃烧与传统柴油机燃烧过程的对比(图 10-13)



HCCI 燃烧与传统汽油机燃烧过程的对比(来源: 本田公司)

前 言

清华大学于 2001 年出版《汽车发动机原理教程》，作为汽车工程专业及内燃机专业的本科生教材已使用了整 10 年，得到了校内外本科生和研究生以及许多工程技术人员的好评。但随着国内外汽车发动机技术的快速发展，许多内容需要更新和补充。

在“普通高等教育‘十一五’国家级教材规划”项目的支持下，编者认真总结近年来的课堂教学经验，合理筛选当代国内外汽车发动机在理论方面的新概念和在工程实践方面的新技术，并结合编者在研究工作中的实际案例分析，进行了改编。考虑到本次改编的幅度较大，因此书名改为《汽车发动机原理》。

本书继承了《汽车发动机原理教程》的经典理论内容，保持了该教程深受好评的一些特点。这些特点是：将汽油机与柴油机的对比分析贯穿于各章节，以利于读者对内燃机工作原理的融会贯通且容易记忆；注意将基础理论知识应用于发动机实际使用过程中的性能分析中，以利于读者加深理解。同时，本书注意在系统地介绍发动机经典的和最基本的工作原理的基础上，努力反映当代汽车发动机科技进步的最新成果。这主要包括：更新了有关炭烟和微粒生成机理、代用燃料理化特性、燃料品质对排放影响等基本理论内容；加强了汽油机混合气形成、缸内直喷汽油机、发动机电控、柴油机排气后处理以及发动机与整车的匹配特性等当前工程实际中急需的内容；同时增加了简要介绍汽油均质混合气压缩着火等新燃烧方法、各种代用燃料的燃烧与排放特性以及混合动力系统及其运行特性等国内外研究前沿的内容。此外，在每章后面新增思考与练习题。

本书由王建昕教授规划统括，并负责第 6~10 章主要内容的编写，帅石金教授负责 1~5 章主要内容的编写。参编者有张俊智教授(5.5 节)、杨福源副研究员(4.4 节和 7.5 节)、王志副研究员(8.3 节和 8.6 节)、张云龙高级工程师(8.5 节)、马凡华副研究员(10.3 节)。

刘峥教授既是《汽车发动机原理教程》的主编，也作为本书的主审对全书做了认真的审阅，并提出了许多宝贵建议。对于刘峥教授多年来在汽车发动机原理教材及课程建设方面的重要贡献，在此深表感谢。

另外，在资料收集和图表绘制等方面，陈文森、张凡、阳冬波、白云龙、于超、杨洪强和王真等研究生做了大量辅助工作，在此表示谢意。

编 者

2011 年 2 月于清华园

主要符号表

A_a ——整机新鲜空气流量	$dQ_w/d\varphi$ ——散热速率
A/F ——空燃比	d_s ——进气门盘直径
A_i ——抗爆指数	dv_L ——左行速度扰动
A ——管道截面积, 导热系数	dv_R ——右行速度扰动
a ——加速度, 音速	dv ——速度扰动
b_{emin} ——最低有效燃料(油)消耗率	d ——管道直径
b_e ——有效燃料(油)消耗率	$d\rho$ ——密度扰动
b_i ——指示燃料(油)消耗率	D ——气缸直径, 管径, 不均匀度
BPW——基本喷油脉宽	E_{100} ——100 °C 燃料蒸发百分比
BSU——波许烟度单位	E_{140} ——140 °C 燃料蒸发百分比
B ——整机燃料(油)消耗率	E_{70} ——70 °C 燃料蒸发百分比
C_F ——流通系数	E_b ——最小点火能量
c_f ——燃油浓度	EDI——蒸发驾驶性指数
CI——十六烷指数	EP——终馏点, 干点
CN——十六烷值	E ——分子活化能
c_O ——氧气浓度	F_a ——化油器喉口截面积
c_{pm} ——定压摩尔比热容	f_a ——进气门开启流通面积
c_p ——定压比热容	F_f ——化油器燃油喷管喉口截面积
c_{vm} ——定容摩尔比热容	F_k ——主、副燃烧室通道截面积
c_v ——定容比热容	F_L ——层流火焰前锋面表面积
C ——排气污染物浓度	F_p ——活塞面积
c ——压力波传播速度	F_R ——汽车行驶阻力
d_0 ——气门阀杆直径, 喷孔直径, 液滴直径	F_t ——汽车驱动力
DI——驾驶性指数	F_T ——湍流火焰前锋面表面积
d_k ——燃烧室凹坑入口直径	F/V ——燃烧室面容比
dm/dt ——燃烧速率	F_w ——燃烧室壁表面积
$dp/d\varphi$ ——压力升高率	F ——表面积
dp_L ——左行压力单波扰动	f ——频率, 燃油凝结系数
dp_R ——右行压力单波扰动	g_{100} ——百公里行驶油耗
d_p ——喷油泵柱塞直径	g_{bn} ——标定循环供油量
D_p ——微粒直径	g_{bs} ——冒烟限制循环供油量
dp ——压力扰动	g_b ——单缸每循环燃料消耗量, 循环供油量
dq_1/dt ——放热速率	g_C ——1 kg 燃料中 C 的质量
dq_2/dt ——散热速率	g_H ——1 kg 燃料中 H 的质量
$dQ_B/d\varphi$ ——放热速率	G_m ——可燃混合气流量
$dQ/d\varphi$ ——加热速率	g_O ——1 kg 燃料中 O 的质量

g ——重力加速度	$m_{a'}$ ——进气门关闭时缸内工质质量
h_i^0 ——标准生成焓	$\dot{m}_D$ ——直接进入气缸的燃油流率
h_1 ——进气孔高度	m_e ——比质量
H/C——氢碳原子数之比或质量比	m_F ——壁面油膜质量
h_e ——排气孔高度	$\dot{m}_{K, cyl}$ ——进入气缸的燃油流率
h_n ——针阀升程	m_k ——单缸每循环扫气新鲜充量
h_{prod} ——燃烧产物比焓	$\dot{m}_K$ ——燃油喷射质量流率
H_{prod} ——燃烧产物绝对焓	$\dot{m}_N$ ——燃油凝结率
h_p ——喷油泵柱塞行程	MON——马达法辛烷值
h_{reac} ——反应物比焓	M_{prod} ——燃烧产物分子量
H_{reac} ——反应物绝对焓	M_{reac} ——反应物分子量
h_s ——扫气孔高度	m_r ——单缸每循环残余废气质量
$(H_{um})_m$ ——可燃混合气摩尔热值	m'_r ——单缸每循环废气再循环质量
$(H_{um})_v$ ——可燃混合气体积热值	$m_{r'}$ ——排气门关闭时缸内工质质量
H_{um} ——可燃混合气质量热值	M_r ——相对分子质量
H_u ——燃料低热值	m'_s ——单缸每循环理论扫气量
h_v ——气门升程	$\dot{m}_v$ ——燃油蒸发率
h ——比焓, 燃烧室凹坑深度	m ——燃料质量, 发动机干质量, 混合气质量
H ——总焓, 气化潜热, 高度	n_d ——柴油机最高稳定转速
i_0 ——汽车主减速器传动比	n_g ——汽油机最高稳定转速
i_g ——汽车变速器传动比	n_{Ma} ——平均马赫数大于 0.5 对应转速
i ——气缸数	n_m ——最大转矩点转速
K_a ——混合气的空气质量比例系数	n_n ——额定转速
K_n ——转速适应系数	n_{opt} ——最佳进气晚关角对应转速
K_T ——转矩适应系数	n_{sw} ——缸内旋流转速
K ——综合常数	n_{tq} ——最大转矩转速
L_0 ——1 kg 燃料完全燃烧所需空气的 kmol 数	n ——发动机转速, 多变指数, 摩尔数
l_0 ——化学计量空燃比, 1 kg 燃料完全燃烧所需空气的 kg 数	ON——辛烷值
L_p ——喷注贯穿距离, 声压级	p_0 ——大气压力, 初始压力
l ——单位质量燃料实际供给的空气质量单位数, 管道长度	p_a ——环境压力, 压缩始点压力
L ——进气管长	$p_{a'}$ ——进气门关闭时缸内压力
m_0 ——进气终了缸内工质总质量	p_B ——曲轴箱内新鲜充量压力
m_1 ——单缸每循环新鲜混合气质量	p_b ——压气机后压力, 膨胀终点压力
Ma_m ——平均进气马赫数	p_c ——压缩终点压力, 缸内压力
MAP——进气歧管绝对压力	p_d ——缸内进气压力
m_a ——单缸每循环新鲜空气质量	P_{emax} ——最大有效功率
	P_{en} ——标定功率

P_{es} ——冒烟限制功率	R_u ——通用气体常数
p_e ——缸内排气压力,排气门端压力	r ——驱动车轮半径,液滴半径
P_e ——有效功率	R ——特种气体常数,油量调节杆位移
p_t ——等容绝热燃烧后混合物压力	S_a ——燃料灵敏度
p_H ——喷油泵端压力	s_c ——剩余行程
P_i ——指示功率	s/D ——行程缸径比
p_j ——喷油压力	SMD——索特平均直径
p_k ——涡轮机前压力,扫气压力	s_o ——燃烧室余隙高度
P_L ——升功率	s ——比熵,活塞冲程
p_{max} ——最大燃烧爆发压力	s' ——真实封闭行程
p_{me} ——有效平均压力	S ——总熵
p_{mi} ——指示平均压力	T_0 ——大气温度,初始温度,未燃混合气温度
p_{mm} ——机械损失平均压力	T_{10} ——10%馏出温度
P_m ——机械损失功率	T_{50} ——50%馏出温度
p_n ——喷油器端压力,化油器喉口压力	t_{50} ——催化剂起燃温度
p_{ref} ——参考压力	T_{90} ——90%馏出温度
p_r ——排气门关闭时缸内压力	T_{95} ——95%馏出温度
P_R ——汽车总阻力功率	T_{ad} ——绝对燃烧温度
p_s ——进气状态空气压力,进气门端静压力,饱和蒸气压	T_a ——环境温度,压缩始点温度
p_i ——循环平均压力	$T_{s'}$ ——进气门关闭时缸内工质温度
p_z, p_r ——缸内最大峰值压力	t_b ——液柱分裂时间
P_r ——汽车驱动功率	T_b ——增压器出口温度,膨胀终点温度
p ——压力,气缸压力	T_c ——压缩终点温度,着火临界温度
Q_{1A} ——单缸每循环燃料定容燃烧的加热量	T_{iv} ——液滴完全蒸发所需时间
Q_{1p} ——单缸每循环燃料定压燃烧的加热量	T_{ref} ——参考温度
Q_1 ——单缸每循环燃料燃烧的加热量	T_r ——排气门关闭时缸内工质温度
Q_2 ——单缸每循环热力系统的放热量	T_R ——汽车阻力转矩
Q_B ——燃烧放热量	T_s ——进气状态空气温度
q_m ——燃油蒸气向外对流量	T_{tqd} ——动态转矩
q_n ——喷嘴循环喷油量	T_{tqmax} ——最大转矩
q_p ——油泵循环供油量	T_{tqn} ——标定转矩
Q_w ——燃烧散热量	T_{tqs} ——冒烟限制转矩
q ——单位质量热量,频率比	T_{tq} ——转矩
Q ——热量,工质吸热量	T_w ——燃烧室壁面温度
R_s ——进气门关闭时缸内工质气体常数	T_z, T_z' ——最高压力点温度
RON——研究法辛烷值	T ——热力学温度,工质温度
R_r ——排气门关闭时缸内工质气体常数	t ——循环时间
R_s ——空气气体常数	u_{ab} ——最低车速

u_{amax} ——最高车速	W_{pr} ——实际泵气功
u_a ——车速	W_{pt} ——理论泵气功
U_{EA} ——气流集总平均速度	W_i ——动力循环功, 动力过程功
u_{jo} ——燃料喷射出口速度	W ——功, 容积功
U_{prod} ——燃烧产物绝对内能	X_Q ——累积放热率
U_{reac} ——反应物绝对内能	X ——累积放热量
u_T ——气流脉动速度	α ——空燃比
u ——比内能, 瞬时速度	α_t ——传热系数
U ——气流平均速度	β ——喷雾锥角, 导气屏包角
V_1 ——进气当量体积	$\Delta\varphi_{eo}$ ——排气早开角
v_a ——化油器喉口气流速度	$\Delta\varphi_{ac}$ ——进气晚关角
V_a' ——进气门关时气缸总容积	$\Delta\varphi_{ao}$ ——进气早开角
V_a ——气缸总容积	$\Delta\varphi_{ec}$ ——排气晚关角
V_{ci} ——第 i 个微循环气缸剩余容积	Δh_R ——标准反应焓, 燃烧焓
V_c ——气缸剩余容积	Δh_s ——显焓
VE ——气缸充气效率	$\Delta T_{s'}$ ——进气工质的温升
V_e ——比体积	ΔT_w ——壁面传热引起的温升
v_f ——化油器燃油喷管喉口燃油速度	ΔT_L ——摩擦热引起的温升
V_k ——副燃烧室或预燃烧室容积	ΔT_r ——残余废气引起的温升
v_L ——层流火焰传播速度	ΔT_g ——燃料气化引起的温升
v_m ——活塞平均流速	Δt ——压力波往返时间, 节气门开启所需时间
V_f' ——排气门关时气缸容积	Δt_s ——气门开启时间
V_s ——Miller 循环发动机气缸工作容积	Δp_a ——进气系统总压力损失
v_s ——进气门管端速度	Δp_s ——进气压力波幅值
V_s ——气缸工作容积, 气缸排量	Δp_j ——局部流动阻力
V_s' ——扫气容积	Δp_{air} ——空滤器局部流动阻力
v_{tm} ——进气门喉口平均流速	Δp_n ——化油器喉口压差
V_T ——火焰传播速度	Δp_{thr} ——节气门局部流动阻力
v_T ——湍流火焰传播速度	Δp_{valve} ——进气门局部流动阻力
V_z, V_z' ——最高压力点气缸容积	Δp_y ——沿程流动阻力
v ——气流速度, 热力学比质量体积	Δp_{ζ} ——进气门晚关的压力升高值
V ——体积, 发动机所占体积, 气缸容积	Δu ——气液两相相对速度
W_e ——有效功	ΔU ——工质内能变化
W_{in} ——净指示功	$\Delta\theta_{\bar{t}}$ ——喷油持续角
W_i ——指示功, 总指示功	$\Delta\theta_{is}$ ——供油持续角
W_{me} ——附件消耗功	ϵ ——压缩比
W_{mf} ——机械摩擦损失功	ϵ_e ——膨胀比
W_m ——机械损失功	ϵ_i ——实际压缩比
W_p ——泵气损失功	

ϵ_m ——平均压缩比	ϕ_c ——充量系数
ζ ——进气门晚关系数	ϕ_r ——残余废气系数
η_c ——燃烧效率	ϕ_s ——扫气系数
η_c ——排气污染物转化效率	ϕ_b ——过量扫气系数(给气比)
η_m ——机械效率	ϕ_E ——废气再循环率
η_i ——循环热效率	φ ——曲轴转角,增压度
η_T ——汽车动力传动系的机械效率	φ_i ——滞燃期转角(着火落后角)
η_i ——指示效率	φ_{PA} ——油泵凸轮轴转角
η_{et} ——有效效率	φ_{ac} ——进气门关闭角
η_{ii} ——微循环热效率	φ_{ao} ——进气门开启角
η_{iv} ——定容循环热效率	ψ ——排气门晚关系数
η_{ip} ——定压循环热效率	Ω ——进气涡流比
η_{im} ——混合循环热效率	Ω_c ——燃烧室凹坑内涡流比
η_{rel} ——相对热效率	σ ——液体表面张力
η_{dt} ——理想循环热效率	σ_p ——最大缸压标准偏差值
η_{ct} ——卡诺循环热效率	δ_{MTBE} ——添加 MTBE 时的驾驶性指数计算因子
θ ——气门座面锥角	δ_{EtOH} ——添加乙醇时的驾驶性指数计算因子
θ_{ij} ——喷油提前角	δ_{imep} ——循环波动率
θ_{is} ——供油提前角	δ_c ——火焰反应区厚度
θ_{ig} ——点火提前角	δ_p ——火焰预热区厚度,循环波动率
κ ——等熵指数,绝热指数,比热比	δ ——火焰前锋面厚度
π_k ——增压比	λ_g ——热导率
ρ ——密度,容积预膨胀比	λ ——压力升高比,沿程阻力系数,过量空气系数
ρ_f ——燃料密度	$\lambda_p(d\rho/d\varphi)$ ——压力升高率
ρ_s ——进气状态空气密度	μ ——分子变化系数,动力黏度
ρ_a ——空气密度	μ_a ——空气黏度,化油器喉口流量系数
ρ_a' ——进气门关闭时缸内工质密度	μ_f ——量孔流量系数
ρ_r' ——排气门关闭时缸内工质密度	μ_s ——气门口流量系数
ρ_m ——混合气密度	μ_{sm} ——气门口流量系数平均值
τ ——冲程系数,时间	μ_T ——转矩储备系数
τ_i ——滞燃期(着火落后期)	ν ——运动黏度
τ_{50} ——催化剂起燃时间	ξ_b ——蒸发百分比
ϕ ——燃空当量比	
ϕ_a ——过量空气系数	
ϕ_{an} ——标定过量空气系数	
ϕ_{as} ——冒烟限制过量空气系数	

目 录

主要符号表	XI
第 1 章 动力、经济性能指标与影响因素	1
1.1 工质对活塞做功及示功图	1
1.1.1 工质对活塞做功	1
1.1.2 自然吸气四冲程发动机的示功图	2
1.1.3 增压四冲程发动机的示功图	3
1.1.4 泵气过程功	3
1.1.5 二冲程发动机的示功图与曲轴箱换气功	3
1.2 动力、经济性能指标	5
1.2.1 指示性能指标与有效性能指标	5
1.2.2 主要指示指标及有效指标的定义与换算	5
1.2.3 动力性能速度指标	9
1.3 影响动力、经济性能指标的环节与因素	10
1.3.1 决定动力输出的“量”与“质”两大环节	10
1.3.2 燃料及可燃混合气的热值	11
1.3.3 整机燃料消耗率与可燃混合气流量	12
1.3.4 燃料的能量转换效率	13
1.3.5 有效输出功率及燃料消耗率的综合表达式	14
思考与练习题	15
参考文献	17
第 2 章 燃料、工质与热化学	18
2.1 燃料及其理化特性	18
2.1.1 车用燃料的要求及分类	18
2.1.2 车用燃料的主要理化特性及评定	20
2.1.3 烃燃料的成分与结构	26
2.1.4 单烃的理化特性及其变化规律	28
2.1.5 含氧燃料的结构与理化特性	30
2.2 汽油、柴油的质量标准	34
2.2.1 对汽油质量的要求	35
2.2.2 对柴油质量的要求	36
2.2.3 中国汽油质量标准	37
2.2.4 中国柴油质量标准	37

2.3	燃料特性对汽、柴油机工作模式的影响	38
2.3.1	对混合气形成方式的影响	38
2.3.2	对着火、燃烧模式的影响	38
2.3.3	对负荷调节方式的影响	38
2.4	工质的主要热力参数	39
2.4.1	气体常数与摩尔质量单位	39
2.4.2	比热容与等熵指数	40
2.5	燃烧热化学	41
2.5.1	燃料完全燃烧所需的空气量	41
2.5.2	残余废气系数与废气再循环	43
2.5.3	燃料燃烧的分子变化系数	44
2.5.4	化学反应的热效应与燃料热值	44
2.5.5	可燃混合气热值	45
2.5.6	绝热燃烧温度	46
2.5.7	化学平衡与燃烧平衡产物	47
	思考与练习题	48
	参考文献	49

第3章	工作循环与能量利用	51
3.1	发动机的热力过程与热机循环	51
3.1.1	热力系统的简化	51
3.1.2	热机循环与热效率	52
3.1.3	热力过程的简化	53
3.2	理想工质的理想循环	53
3.2.1	模型的基本假设	53
3.2.2	理论循环的类型及参数表达式	54
3.2.3	循环参数对循环热效率的影响	57
3.2.4	理论循环对改善动力、经济性的指导意义	60
3.3	真实工质的理想循环	62
3.3.1	模型的构成、特点与意义	62
3.3.2	工质特性及其对热效率的影响	62
3.3.3	理想循环条件下汽、柴油机热效率的对比	64
3.4	真实工质的真实循环	64
3.4.1	工质向外传热的损失	64
3.4.2	燃烧提前的时间损失及后燃损失	66
3.4.3	换气损失	66
3.4.4	不完全燃烧损失	66
3.4.5	缸内流动损失	66
3.4.6	工质泄漏损失	67

3.5	机械损失与机械效率	67
3.5.1	机械损失的组成	67
3.5.2	机械损失各部分所占份额	68
3.5.3	机械损失的测量方法	69
3.5.4	影响机械效率的主要因素	71
3.6	发动机的能量分配与合理利用	73
3.6.1	发动机的能量平衡	73
3.6.2	发动机的能量合理利用	74
	思考与练习题	82
	参考文献	84
第4章	换气过程与进气充量	85
4.1	四冲程发动机的换气过程	85
4.1.1	换气过程与换气系统	85
4.1.2	换气过程的分期	87
4.1.3	进、排气相位角及其对性能的影响	88
4.2	充量系数及其影响因素	90
4.2.1	充量系数的解析式	90
4.2.2	影响充量系数的主要因素	91
4.2.3	稳态条件下充量系数随转速变化的规律	97
4.3	进、排气系统的动态效应	102
4.3.1	管道中压力波传播的基础知识	103
4.3.2	单缸机进气管中动态效应的利用	105
4.3.3	单缸机排气管中动态效应的利用	108
4.3.4	多缸机的动态效应与各缸进气不均匀	108
4.4	发动机增压	109
4.4.1	增压度与增压比	110
4.4.2	增压方式与增压系统简介	110
4.4.3	涡轮增压系统的两种基本形式	113
4.4.4	涡轮增压柴油机性能分析	115
4.4.5	汽油机涡轮增压技术的难点及解决措施	118
4.5	二冲程发动机的换气问题	119
4.5.1	换气过程与性能特点	119
4.5.2	扫气基本形式	120
4.5.3	换气质量指标及其影响因素	121
	思考与练习题	123
	参考文献	125

第 5 章 运行特性与整车匹配	126
5.1 工况与功率标定	126
5.1.1 发动机运行工况	126
5.1.2 工况平面与发动机的工作区域	127
5.1.3 发动机的功率标定	128
5.2 发动机特性的分类及运行特性的分析方法	128
5.2.1 发动机特性的分类	128
5.2.2 运行特性及其分析方法	130
5.3 速度特性与配套汽车的动力性	131
5.3.1 汽油机的速度特性	131
5.3.2 柴油机的速度特性	132
5.3.3 汽、柴油机速度特性曲线的对比	134
5.3.4 发动机外特性曲线对汽车动力性的影响	134
5.3.5 外特性曲线的运行稳定性与柴油机的调速特性	138
5.3.6 提高汽车动力性的措施	141
5.4 负荷特性、全特性与配套汽车的燃油经济性	143
5.4.1 汽油机的负荷特性	144
5.4.2 柴油机的负荷特性	144
5.4.3 汽、柴油机负荷特性曲线的对比	146
5.4.4 发动机的全特性	146
5.4.5 提高汽车燃油经济性的措施	148
5.5 混合动力系统及其运行特性	152
5.5.1 车用混合动力系统概述	152
5.5.2 不同构型分类及能量流动分析	153
5.5.3 按混合比例分类	159
5.5.4 典型的混合动力系统	159
思考与练习题	161
参考文献	164
第 6 章 燃烧的基础知识	165
6.1 燃烧现象及其分类	165
6.1.1 燃烧现象	165
6.1.2 燃烧分类及其特征	165
6.2 可燃混合气的着火与着火理论	166
6.2.1 热着火理论	166
6.2.2 链式着火理论	168
6.3 湍流及其在燃烧中的作用	169
6.4 均质混合气中的火焰传播	170
6.4.1 层流火焰传播	171