

内燃机先进技术译丛

内燃机原理 (下)

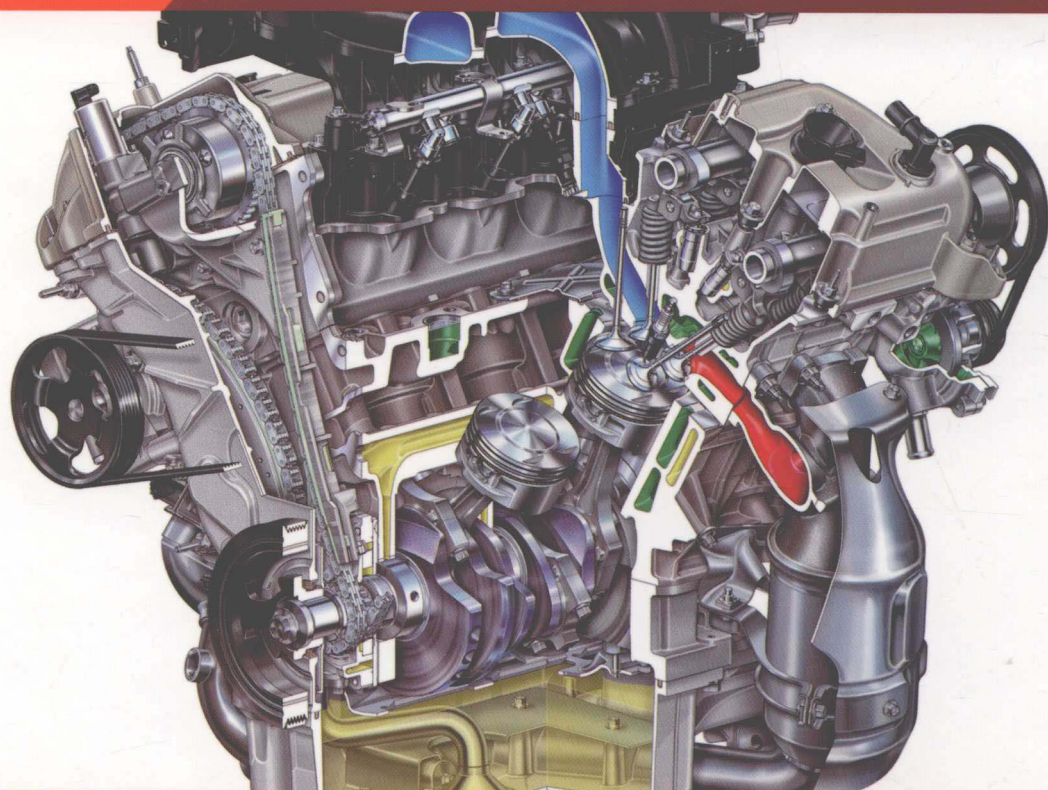
、数值模拟与测量技术

Grundlagen Verbrennungsmotoren
(7., vollst. überarb. Aufl.)

原书第7版

[德] 京特·P.默克 (Günter P. Merker) 主编
吕迪格·泰希曼 (Rüdiger Teichmann)

高宗英 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

译丛

内燃机原理（下）

——工作原理、数值模拟与测量技术

（原书第7版）

[德] 京特·P. 默克（Günter P. Merker） 主编
吕迪格·泰希曼（Rüdiger Teichmann）
高宗英 等译



机械工业出版社

Translation from German language edition:

Grundlagen Verbrennungsmotoren (7., vollst. überarb. Aufl.)

by Günter P. Merker and Rüdiger Teichmann

Copyright © 2014 Springer Springer Fachmedien Wiesbaden

Springer Fachmedien Wiesbaden is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

版权所有，侵权必究。

This title is published in China by China Machine Press with license from Springer. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体版由 **Springer** 授权机械工业出版社在中国境内（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2015-1285 号。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机原理. 下, 工作原理、数值模拟与测量技术/(德) 京特·P. 默克,
(德) 吕迪格·泰希曼主编; 高宗英等译. —北京: 机械工业出版社, 2018. 11
(内燃机先进技术译丛)

书名原文: Grundlagen Verbrennungsmotoren

ISBN 978-7-111-61435-7

I. ①内… II. ①京… ②吕… ③高… III. ①内燃机—理论 IV. ①TK401

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 267263 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 孙 鹏 责任编辑: 孙 鹏

责任校对: 王明欣 封面设计: 鞠 杨

责任印制: 张 博

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 26 印张 · 6 插页 · 529 千字

0 001—2 500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-61435-7

定价: 199.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
电话服务 网络服务

服务咨询热线: 010-88361066 机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294 机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com



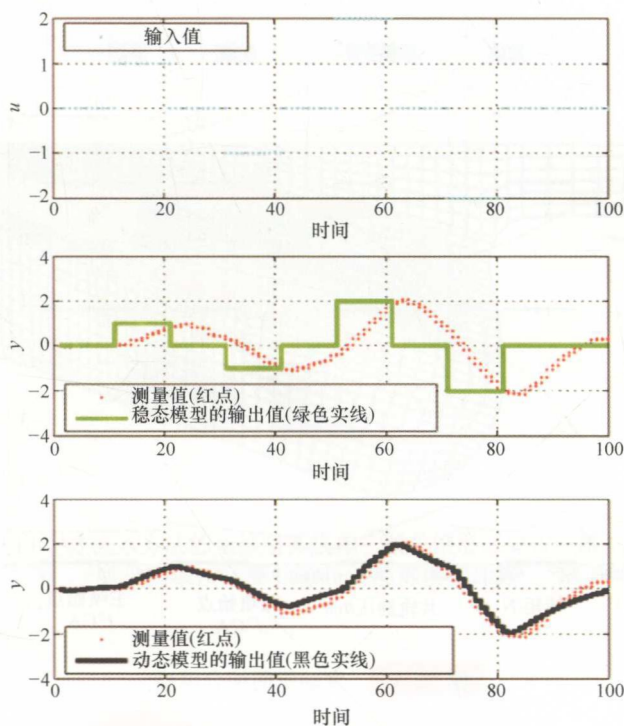


图 13.4 稳态和动态模型工作原理的比较

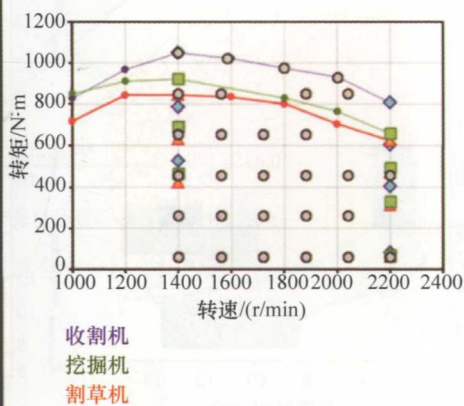
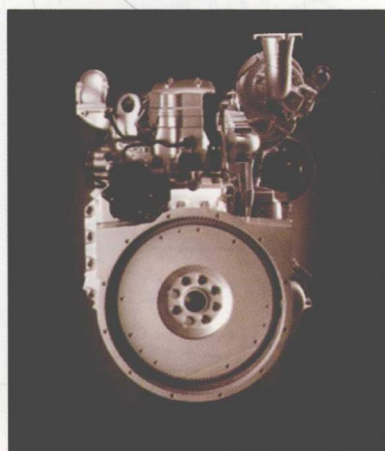


图 13.15 以 6.7L 的 6 缸高压共轨柴油机为例,说明它与各种工作机械匹配时的全负荷特性

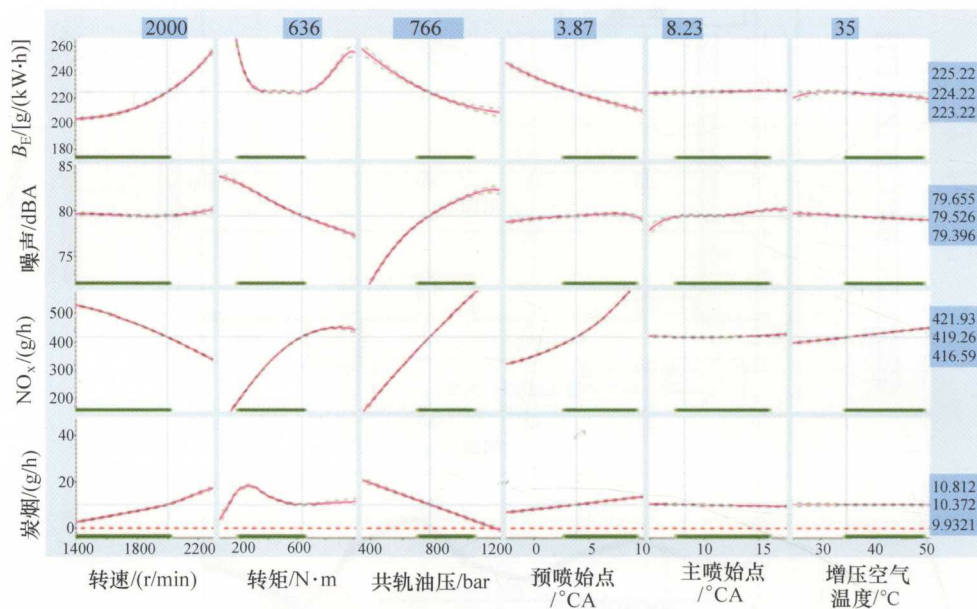


图 13.17 发动机的综合模型

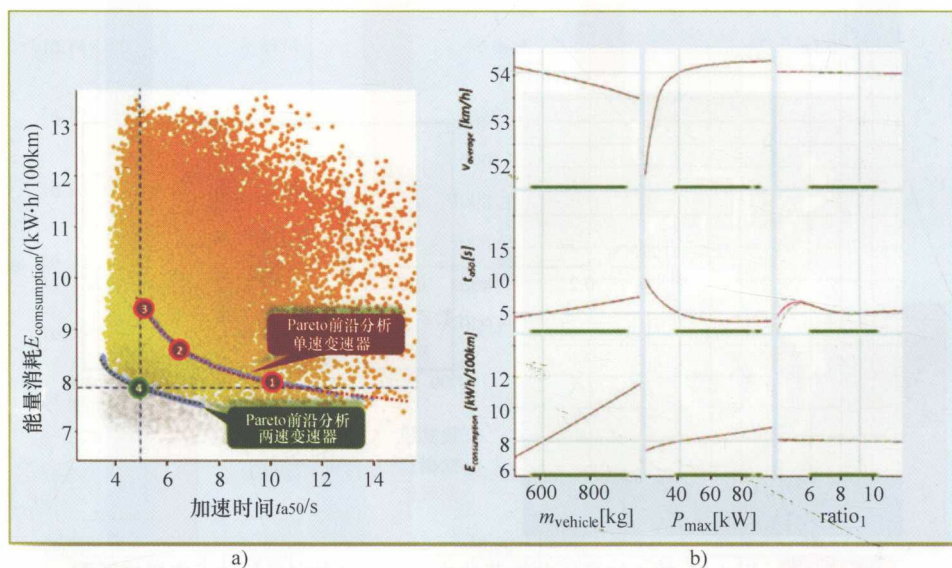


图 13.32 目标指标空间的 4 个 Pareto 优化结果及其在变量空间的位置
a) 对独立目标的权衡 b) 模型截面的位置

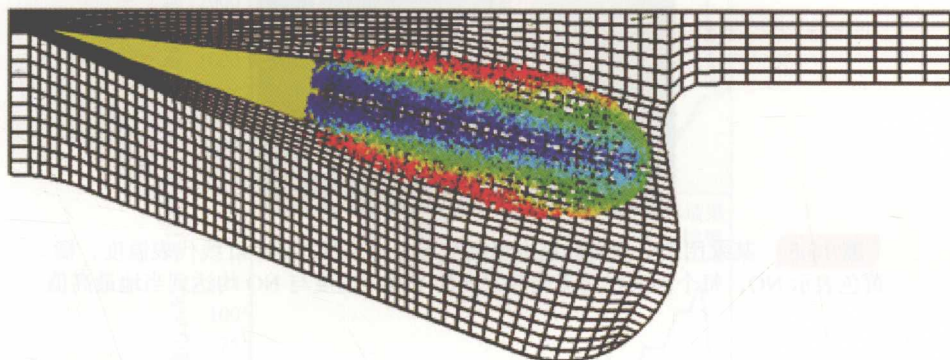


图 15.11 采用 ICAS 嵌入方法的柴油喷雾模拟：黄色锥形区域按一维 Euler 模型计算，其他区域按标准 Lagrange 喷雾模型计算

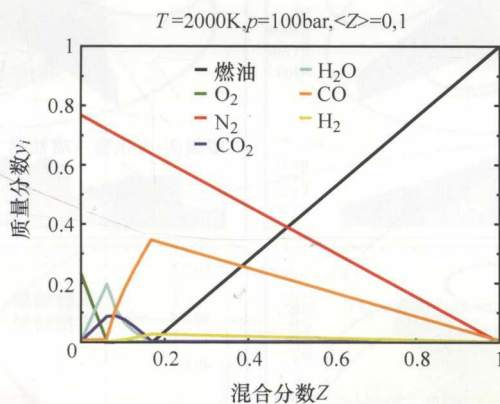


图 16.3 随燃油质量分数或混合物分数变化的七种组分的分布

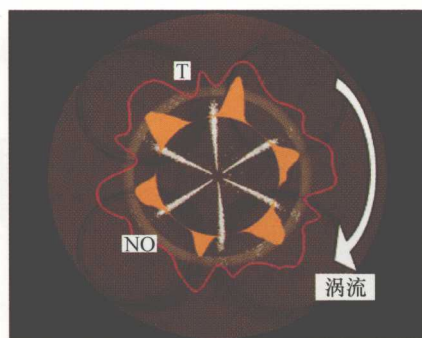


图 16.5 某乘用车柴油机的缸内温度与 NO 的分布，其中红线代表温度，橘黄色表示 NO，每个油束在涡流旋转方向的下风处温度与 NO 均达到当地最高值

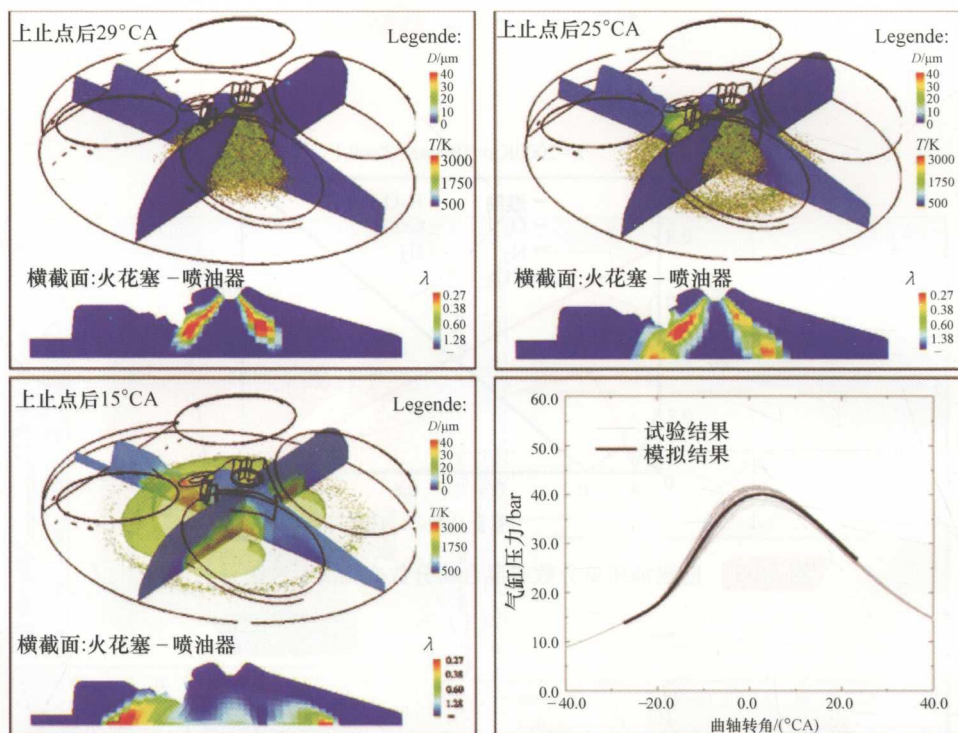


图 16.15 左上、左下和右上：带喷雾导向的充量分层直喷式汽油机燃烧的模拟图形 ($n=2000\text{r/min}$, $p_{\text{me}}=2\text{bar}$)；右下：气缸内压力的模拟与试验结果的对比（不同循环）

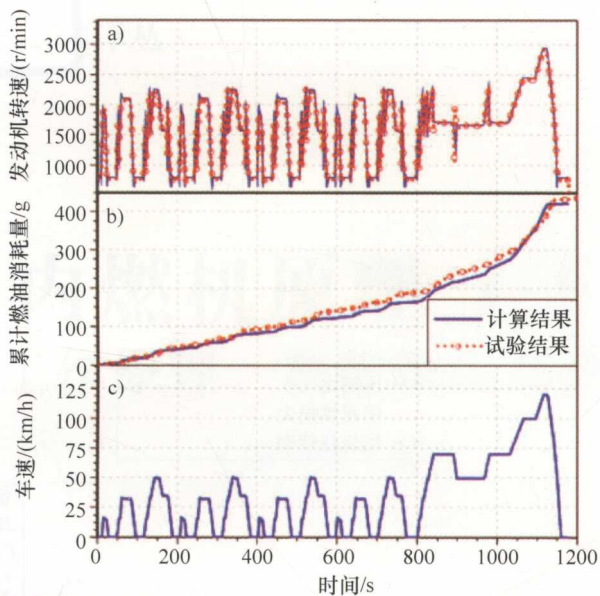


图 18.28 按行驶循环的数值模拟与试验结果的比较 (Wurzenberger 等, 2010)

a) 发动机转速 b) 累计燃油消耗量 c) 按 NEDC 循环工况运行时的车速

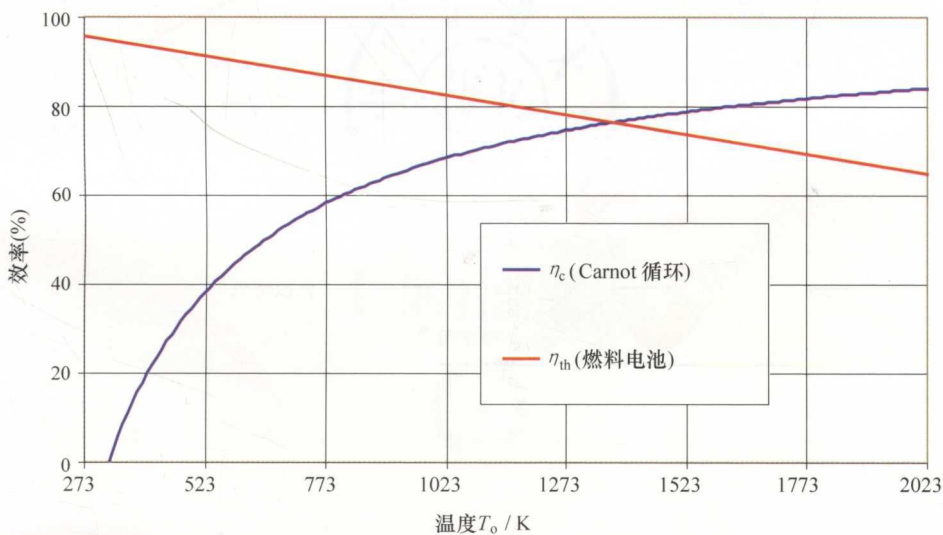


图 19.25 燃料电池 (红线) 和 Carnot 循环 (蓝线) 理想热力学效率与温度关系的对比 (Eichseder 和 Klell, 2010)

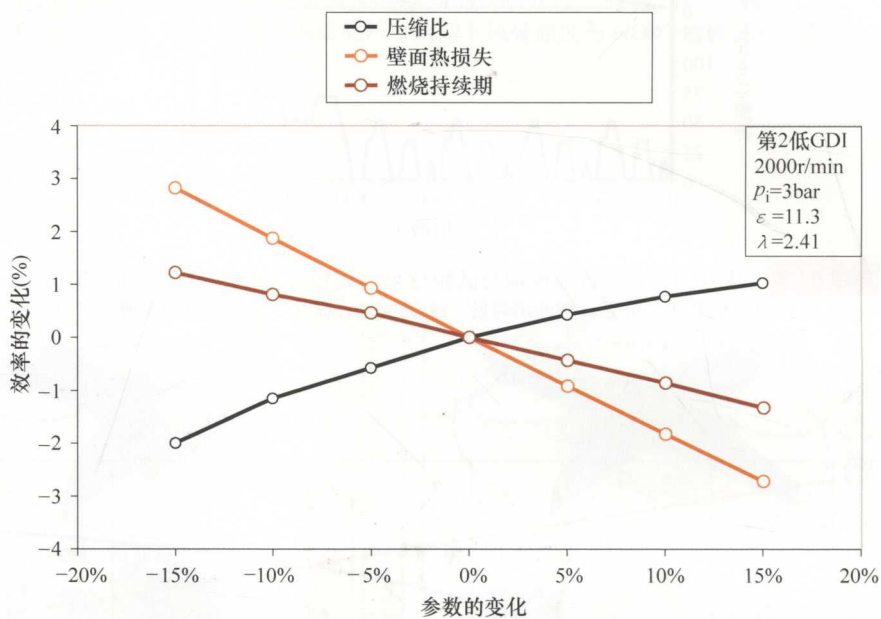


图 19.37 重要燃烧参数对效率的影响

本书分上下两卷，涵盖了内燃机从工作原理、工作模拟流程到测试技术等主要领域。尽管覆盖面很广，但在某些章节中还是针对有关内容做了比较深入的阐述，这对读者综合理解问题有较大的帮助。本书除分析了整个动力总成系统以外，还从技术的角度对发动机的优化进行了探讨和评估，从而使读者可以根据自己的条件有目标地做出相应的决定。本书适合内燃机及汽车动力专业技术人员阅读使用，是专业读者案头必备的工具书。

丛书序

我国的内燃机工业在几代人前仆后继的努力下,已经取得了辉煌的成绩。从1908年中国内燃机工业诞生至今的一百多年里,中国内燃机工业从无到有,从弱到强,走出了一条自强自立、奋发有为的发展道路。2017年,我国内燃机产量已突破8000万台,总功率突破26.6亿千瓦,我国已是世界内燃机第一生产大国,产量约占世界总产量的三分之一。

内燃机是人类历史上目前已知的效率最高的动力机械之一。到目前为止,内燃机是包括汽车、工程机械、农业机械、船舶、军用装备在内的所有行走机械中的主流动力传统装置,但内燃机目前仍主要依靠石油燃料工作,每年所消耗的石油占全国总耗油量的60%以上。目前,我国一半以上的石油是靠进口,国家每年在石油进口上花费超万亿美元。国务院关于《“十三五”节能减排综合工作方案》的通知已经印发,明确表明将继续狠抓节能减排和环境保护。内燃机是目前和今后实现节能减排最具潜力、效果最为直观明显的产品,为实现我国2030年左右二氧化碳排放达到峰值且将努力早日达峰的总目标,内燃机行业节能减排的责任重大。

如何推进我国内燃机工业由大变强?开源、节流、高效!“开源”就是要寻求石油替代燃料,实现能源多元化发展。“节流”应该以降低油耗为中心,开展新技术的研究和应用。“高效”是指从技术、关联部件、总成系统的角度出发,用智能模式全方位提高内燃机的热效率。我国内燃机的热效率从过去不到20%提升至汽油机超30%、柴油机超40%、先进柴油机超50%,得益于包括燃油喷射系统、电控、高压共轨、汽油机缸内直喷、增压系统、废气再循环等在内的先进技术的研究和应用。除此之外,降低发动机本身的重量,提高功率密度和体积密度也应得到重视。完全掌握以上技术对我国自主开发能力具有重要意义,也是实现我国由内燃机制造大国向强国迈进的基础。

技术进步和技术人员队伍的培养不能缺少高水平技术图书的知识传播作用。但遗憾的是,近十几年,国内高水平的内燃机技术图书品种较少,不能满足广大内燃机技术人员日益增长的知识需求。为此,机械工业出版社以服务行业发展为使命,针对行业需求规划出版“内燃机先进技术译丛”,下大力气,花大成本,组织行业内的专家,引进翻译了一批高水平的国外内燃机经典著作,涵盖了技术手册、整机技术、设计技术、测试技术、控制技术、关键零部件技术、内燃机管理技术、流程管理技术等。从规划的图书看,都是国外著名出版社多次再版的经典图书,这对于我国内燃机行业技术的发展颇具借鉴意义。

据我了解,“内燃机先进技术译丛”的翻译出版组织工作中,特别注重专业

性。参与翻译工作的译者均为在内燃机专业浸淫多年的专家学者，其中不乏知名的行业领军人物和学界泰斗。正是他们的辛勤工作，成就了这套丛书的专业品质。年过8旬的高宗英教授认真组织、批阅删改，反复修改的稿件超过半米高；75岁的范明强教授翻译3本，参与翻译1本；倪计民教授在繁重的教学、科研、产业服务之余，组织翻译6本德文著作。翻译人员对于行业的热爱，对知识传播和人才培养的重视，体现出了我国内燃机专家乐于奉献、重视知识传承的行业作风！

祝陆续出版的“内燃机先进技术译丛”取得行业认可，并为行业技术发展起到推动作用！

何光素

序

由 G. P. Merker 教授主编的《内燃机》一书，在过去主要针对计算模拟部门的工程人员并成为他们公认的信息来源。今天人们几乎可以说，模拟和实验两者之间的交流比以往任何时候都顺畅。不少工程人员都会做些少量的模拟计算工作或必须将他们的实验结果通过计算来评估。但是由于各人的知识和经验基础不尽相同，有时也难于做出正确的判断，为了在各种不同的观点之间建立桥梁，本书的内容不断地扩展和完善，书名也相应地改为《内燃机原理》。

全书经过扩编后形成的现在的版本涵盖了内燃机从工作原理、工作模拟流程到测试技术等主要领域。尽管覆盖面很广，但在某些章节中还是针对有关内容做了比较深入的阐述，这对读者综合理解问题有较大的帮助。

但我个人今天特别要强调的则是这本专业著作的作用还不仅于此，它除了考虑与分析了整个动力总成系统以外，还从技术的角度对发动机的优化进行了探讨和评估，从而使读者可以根据自己的条件有目标地做出相应的决定。此外，该书也是理论和实践相结合的典范，适合用作大学生的教科书和工程技术人员继续提高的教材，或者简单的一句话，它就是本专业读者有问题时每天需要翻阅的工具书。而且我也知道，主编和作者们花费了很多心血和宝贵的自由时间才完成这部很有价值的专著，为此，我在此要特别感谢为促成此书成功出版而做出贡献的所有同仁。

Helmut List (AVL 总裁)
于 格拉茨 (Graz)，奥地利

中文版序

德国是内燃机的故乡，逾百年来内燃机工业在德国兴盛不衰。德国的内燃机产品以性能优异、可靠性高、寿命长而著称于世，引领着内燃机技术的发展方向，是我国内燃机工业界学习的榜样和赶超的对象。

随着科学技术的进步，许多新的设计思想、设计方法、计算机软件以及测量技术和实验方法等纷纷引进到我国内燃机工业中来。特别是近几十年来，内燃机从产品的外观到内部结构设计，各项性能指标都发生了重大变化，推动内燃机工业又进入一个繁荣发展的新时期。同样，在新时期里，也必然会出现反映总结技术进步和创新的代表性著作。

《内燃机原理》一书的主编是 G. P. Merker 教授和 R. Teichmann 博士，他们两人曾长期在德国和奥地利大学任教，并在著名内燃机公司中担任科技研发部门的领导人，积累了丰富的理论知识和实践经验。他们的著作在世界著名的 AVL 研究所的大力赞助和支持下，作为德国汽车技术杂志 (ATZ) 和德国发动机技术杂志 (MTZ) 的专业丛书出版，并经过多次反复补充和修改，至今已经发行到第 7 版。这是一本为发动机和汽车专业科技工作者提供了大量信息和现代化综合技术讨论的优秀图书，它具有以下特点。

1. 详细地叙述了与汽车、内燃机紧密有关的数值模拟技术

在现代内燃机和整车设计或样机调试改进过程中，数值模拟技术所起的作用越来越大，几乎从内燃机到整车的各个系统都用它来预测性能，调整参数，以达到优化性能以及对比实验结果的目的。目前有不少相应的商用软件在使用，但本书的重点是对内燃机的进排气系统中的流动、涡轮增压系统、燃油喷射、缸内气体流动、燃烧和有害排放物的形成，直至排气后处理系统中有害排放物变迁过程的模拟，其中包括模拟难度较大的全部动力系统中的瞬态过程和内燃机燃烧室内高度不稳定的燃烧过程的模拟。以内燃机燃烧过程的模拟为例，本书作者为了便于初学者容易入门，从热力学、传热传质学、流体动力学和化学反应动力学基本方程出发，分别对均质混合气燃烧和喷雾燃烧的各种燃烧模型或火焰传播模型，以及在零维、准维和三维模拟计算中的应用做了详细介绍，这样就帮助读者对各种商业计算软件增加理性认识，从而具备可以针对具体的研究对象、计算要求对程序做出适当修改，判断计算结果与实验结果不一致原因的能力。

2. 燃烧诊断技术

本书还重点介绍了内燃机示功图测量及分析技术，以及燃烧诊断技术，特别是最新发展的激光诊断技术。

3. 涡轮增压技术

由于涡轮增压技术对降低燃油消耗率、减少污染、减轻重量、提高功率、降低转速、减小尺寸等的明显效果,以及各类内燃机上的普遍应用,因此,本书很重视对涡轮增压技术的论述,包括单级涡轮增压以及各种可变装置,两级涡轮增压和双涡轮增压等的介绍,并且对叶轮和涡轮壳内的气体流动,涡轮机叶栅设计等均有论述。

总之,本书的内容十分充实,将近十年来内燃机科技进展的主要方面均收入其中,并且理论联系实际,特别注意模拟计算和实验数据的相互验证,指导读者根据具体条件,有目的地进行选择 and 修正。因此本书受到现任 AVL 研究所总裁 Helmut List 教授的高度评价,认为:“本书是工程技术人员在有问题时,每天需要翻阅的工具书。”

2014 年,本书主译人,我国著名内燃机专家、江苏大学前校长高宗英博士在去奥地利交流时发现此书。回国后,在德国 Springer-vieweg 出版社和中国机械工业出版社的大力支持下,迅速组织一支以上海、无锡、镇江等地的知名高校和研究单位相关人员为主的翻译队伍,共同开展本书的翻译工作。特别是高宗英教授虽近八旬高龄,但为了我国内燃机工业的繁荣和赶超世界先进水平,勇挑重担,重整书桌,挑灯夜战,加上各位参与人员的共同努力,确保了我国这支翻译队伍在专业水平、文笔流畅方面能够与原书的高水平相得益彰。

本书是一本优秀的内燃机原理著作,它特别适合内燃机、汽车、拖拉机、工程机械等行业的工程技术人员阅读、自修和提高使用,并且可供有关从事技术开发、鉴定、产品服务的技术人员作为实用手册使用。同样也可作为高校内燃机专业的研究生参考教材。在此,我谨代表中国内燃机学会专家咨询委员会向中国内燃机界的有关同志郑重推荐此书。

中国内燃机学会名誉理事长
兼专家咨询委员会主席
西安交通大学教授
蒋德明
于西安

第 7 版前言

当今在内燃机和汽车领域的研发工作中，已广泛采用各种商业化的标准计算程序，应用这些程序可以模拟整车和全部动力系统中的瞬态过程，也包括内燃机燃烧室内高度不稳定的瞬态燃烧过程。但在这些计算程序中，照例不会给出源代码，而在有关文献中也缺少相互参照的说明，而用户渴望知悉更多有关这些程序中物理和化学模型的信息。因此，本书编者特别希望尽可能阐明这些程序中各个项目物理和化学方程式的含义，并指明应用有关程序时的可能性与条件。

由于信息来源过于丰富，本书只能将重点局限于阐明内燃机的内部过程，着重介绍建模过程中有关热力学、流体动力学和化学反应方面的机理。

对于目前出版的第 7 版而言，是将与工作原理、数值模拟和测量技术相关的内容分别在五篇中加以介绍，其中所有章节均有独立性，也有拓展的可能。

第一篇在第 2 章中介绍热力学的基本知识；第 3 章则完全改写并由于增添了载货车用发动机、内燃机小型化、复合动力驱动和增程器等内容而使其篇幅大为增加；第 4 章燃油喷射系统是全新的内容；第 5 章增压系统也是重新改写过的。

第二篇介绍内燃机燃烧、有害物形成的物理和化学机理以及排放测量分析技术，其中第 7 章增加了降低有害排放物方面的内容；

第三篇介绍内燃机整个或部分过程的零维和准维数值模拟，优先考虑与此相关的计算和测试任务。

第四篇介绍内燃机的三维数值模拟，其中第 17 章增压的数值模拟是新增补的。

第五篇介绍内燃机在整个动力系统中的地位 and 今后的发展前景。

在附录中专门介绍了一款附有 FIRE 源代码的商业三维模拟程序。

我们希望通过本书能使读者对内燃机的数值模拟方面有一个清晰与明确的了解，使其对于读者在科学研究与工程技术工作方面有较大的帮助。

我们感谢所有作者在完成本书编写过程中建设性地合作与贡献。特别感谢 AVL LIST（李斯特）公司对于本书编写在专业咨询和提供材料方面的支持。对于本书的章节组织和内容安排我们也与多方面同行进行过讨论，其中特别感谢 Springer - Vieweg 出版社的 Gerhard Haußmann 硕士、Ewald Schmitt 先生以及 Elisabeth Lange 女士与我们之间的良好与建设性的合作。

Günter P. Merker

Rüdiger Teichmann

于德国泰特拉克（Tetttag）和

奥地利格拉茨（Graz）