

内燃机先进技术译丛

 Springer

内燃机系统建模 与控制导论

Introduction to Modeling and Control
of Internal Combustion Engine Systems

原书第2版

[瑞] 莱诺·古泽拉 (Lino Guzzella) 著
克里斯托弗 H.翁德尔 (Christopher H. Onder)

陈汉玉 滕勤 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

内燃机先进技术

内燃机系统建模与控制导论

Introduction to Modeling and Control of Internal
Combustion Engine Systems

原书第2版

[瑞] 莱诺·古泽拉 (Lino Guzzella) 著
克里斯托弗 H. 翁德尔 (Christopher H. Onder)
陈汉玉 滕 勤 译



机械工业出版社

本书在国外是内燃机及控制领域非常有影响的畅销书,书中内容大多来源于作者多年的教学实践和研究成果。本书从基本概念和被控对象的特性出发,全面系统地介绍了内燃机控制系统的基本结构、面向控制的内燃机系统平均值模型与离散事件建模原理,详细阐述了基于模型的内燃机控制系统设计、分析和优化方法,并引用了作者及其团队的研究成果和应用实例,内容具体翔实,深入浅出,分析透彻。

本书可作为高等学校车辆工程、动力机械及工程和控制科学与技术等专业硕士研究生和高年级本科生的教材,也可供从事内燃机控制系统研究、开发、匹配和标定等方面工作的高校教师、研究人员和企业工程技术人员参考。

Translation from English language edition: Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems by Lino Guzzella and Christopher Onder
Copyright© 2010 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg 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、澳门特别行政区以及台湾地区)独家出版与发行。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:01-2014-2867 号。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机系统建模与控制导论/(瑞士)莱诺古泽拉,(瑞士)翁德尔著;陈汉玉译;滕勤译. —北京:机械工业出版社,2016.2

(内燃机先进技术译丛)

书名原文: Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems

ISBN 978-7-111-52724-4

I. ①内… II. ①莱…②翁…③陈…④滕… III. ①内燃机—系统建模
②内燃机—控制系统 IV. ①TK4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 016207 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:张 薇 封面设计:鞠 杨

责任印制:李 洋

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·19 印张·2 插页·370 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-52724-4

定价:149.00 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

译者序

当今的车用内燃机管理系统普遍采用基于模型的控制方法。然而，从控制工程的角度来看，内燃机是一个动态、多变量、高度非线性且具有延迟的时变系统，其工作过程涉及热力学、流体力学、空气动力学、燃烧学和化学反应动力学等多门学科。因此，内燃机的建模与控制并非易事。迄今为止，国内还没有一本关于内燃机系统建模与控制的专著。鉴于此，我们真诚地向国内读者推荐并翻译了由莱诺·古泽拉教授和克里斯托弗 H. 翁德尔博士合作撰写的著作，希望更多的人通过阅读本书得到启迪和收获。

本书第一作者莱诺·古泽拉是瑞士联邦理工学院的资深教授、瑞士工程科学院院士，在控制领域颇有建树并享有盛誉。莱诺·古泽拉教授长期从事系统动力学与能量转换系统控制等方面的研究，主要研究领域包括面向控制的系统建模、动态优化和反馈控制设计方法。近年来的研究项目主要围绕两个方面：一是内燃机的建模、控制与优化，致力于降低内燃机的燃油消耗和污染物排放；二是非因果与因果监控系统基于模型的优化，主要是解决混合动力汽车的能量消耗最小化的问题。莱诺·古泽拉教授目前担任多家期刊的编委，出版了1本教材和3本专著，发表学术论文100余篇，拥有多项汽车控制系统的专利，并先后获得众多荣誉和奖项，包括国际电气电子工程师学会（IEEE）控制系统委员会行业奖和《控制系统杂志》优秀论文奖，美国汽车工程师协会（SAE）Arch T. Colwell 优异奖和 Ralph R. Teetor 教育奖，英国机械工程师协会（IMechE）Clifford S. Steadman 奖、Thomas Hawksley 奖章和 Crompton Lancaster 奖章，全球能源奖等。2009年和2011年，他被评选为IFAC Fellow（国际自动控制联合会会士）和IEEE Fellow（国际电气电子工程师协会会士）。

本书是作者多年教学实践的结晶和研究成果的总结。2004年本书第1版发行后，很快成为一本畅销书并售罄。经原作者修订和增补，于2009年推出了第2版，至今仍然深受国外广大高校师生的欢迎，在工程技术人员中也有很大影响。由于节能与环保是当今世界上广泛关注的两大主题，因此，本书从第1版到第2版一直在强调关于车用内燃机污染物排放和燃料经济性方面的控制问题。书中的重点内容在于面向控制的内燃机相关物理过程的数学描述和基于模型的控制系统设计及优化，作者的本意是，希望读者既能深入掌握被控对象的特性，又能领悟控制理论的精髓。该书将内燃机系统理论与自

动控制理论有机结合, 紧密联系工程实际, 内容具体翔实, 公式推导严谨, 论述清晰而不繁杂。从书名可以看出, 作者的初衷是为初次涉足内燃机系统建模与控制的读者编写一本入门参考书。因此, 为了加强读者对有关内容的理解, 书中给出了3个附录, 供阅读正文时对照使用。

本书可作为高等学校车辆工程、动力机械及工程和控制科学与技术专业研究生或高年级本科生相关课程的教材, 也可供从事内燃机控制系统研究、开发、匹配和标定等方面工作的高校教师、研究人员和企业工程技术人员参考。毫无疑问, 本书对于国内汽车企业自主开发内燃机控制系统具有重要的借鉴价值, 对于提高国内相关研究人员内燃机控制方面的技术水平也非常有帮助。

本书的第2章和第3章由陈汉玉翻译。滕勤翻译了第1章、第4章、前言和附录, 并负责全书的统稿。在原文翻译、校对和整理过程中, 得到了很多老师和硕士研究生的帮助。例如: 唐景春副教授帮助校对了第1章、附录A和附录C的部分内容, 张耀同学帮助翻译了所有插图中的文字部分, 在此对他们表示衷心的感谢。

为了与原著保持一致, 译文中的部分变量符号并不符合国内习惯, 恳请读者朋友们谅解。译者力图保持英文版中的原汁原味, 翻译时字斟句酌, 但由于水平有限, 译文中的不当之处在所难免, 恳请读者不吝赐教!

本书的翻译和出版工作得到了湖南大学刘敬平教授, 汽车分社徐巍女士的大力支持, 在此对他们表示衷心的感谢。

陈汉玉

于武汉理工大学

滕勤

于合肥工业大学

2015年9月

原书第2版序

为什么会有第2版?

自从本书第1版出版以来,关于汽车污染物排放和燃油经济性的讨论不断深化。对空气质量、有限的化石燃料资源和温室气体不利影响的关注,进一步推动了工业界和学术界致力于车用内燃机的改进。这本专著的第1版迅速售罄不足为奇。当出版商询问第2版时,我们决定抓住这个机会修订本书,更正一些错误并添加一些新的素材。第2版中最重要的修改和补充包括:

- 重新组织和略微充实了增压器部分,增强了可理解性。
- 删减了旋转振荡及其在发动机试验台上的处理,这是与安全性相关的方面。
- 改进了三元催化器的物理和化学模型,简化了下游空燃比控制的概念和实现。
- 完善了发动机爆燃的建模、检测和控制部分。
- 呈现优于传统的 H_2 方法的空燃比控制器设计的新方法。
- 压缩了发动机热力循环计算和相应的面向控制方面的介绍。

在第1版中,本书侧重于ETH团队正在(或仍在)研究的问题,虽然其他团队已经提出了许多令人振奋的新思想(HCCI燃烧、可变压缩比发动机、高辛烷值燃料发动机等),但是简单转述而不能通过切身体验来全面阐述这些概念,不会给现有著作带来任何好处。因此,本书未包含这些内容,本书应该仍然作为新入门的学生和工程师们关于内燃机专题的初步参考书。

致谢

我们对指出本书第1版中错误和疏漏的同事和学生表示感谢。一些人帮助我们修改了这本著作,尤其是 Daniel Rupp、Roman Möller 和 Jonas Asprion 帮助整理了文稿。

莱诺·古泽拉
克里斯托弗 H. 翁德尔
苏黎世
2009年9月

原 书 序

谁应该阅读本书?

本书专门为对传统和新型内燃机控制系统设计感兴趣的学生而编写。重点在于面向控制的物理过程数学描述和基于模型的控制系统设计与优化。

本书由瑞士联邦理工学院机械工程系过去几年举办的系列讲座逐渐形成,对象是完全了解内燃机热力学和流体动力学基本过程的机械工程专业研究生。其他必要条件是掌握机械工程的常识(微积分、力学等)和学过控制系统的基础课程。没有内燃机建模与设计基础的学生可以参阅文献[64]、[97]、[194]和[206]。

为什么要写本书?

内燃机是过去100年里最重要的技术成果之一。这些系统已成为乘用车最常用的动力源。一个主要原因是液体碳氢燃料具有非常高的能量密度。只要化石燃料用作汽车燃料,依据成本、安全性、污染物排放和燃油经济性[通常在整个循环或油井到车轮(well-to-wheel)的意义上,见文献[5]和[68]],没有可预见的替代燃料能够产生相同的效益。

内燃机仍具有改进的巨大潜力;柴油(压燃式)发动机可以变得更清洁,奥托(点燃式)发动机可以具有更高的燃油效率。只有借助于控制系统,这些目标才能实现。此外,随着系统变得越来越复杂,系统化和高效的系统设计方法已经成为技术和面向市场的必然选择。本书通过介绍基于模型的内燃机控制系统设计入门知识,阐述了这些问题。

从本书中可以学到什么?

本书主要侧重于内燃机(转矩产生、污染物形成等)及其辅助装置(空气充量控制、混合气形成、排放处理系统等)。下面将建立这些过程的数学模型,然后利用这些模型,讨论选择的前馈和反馈控制问题。

选择基于模型的方法,虽然一开始比较繁琐,但之后被证明,从长远来看其成本效益最高。尤其是在项目早期阶段,控制系统的开发和标定过程极大地得益于数学模型。

附录包含了最重要的控制器分析与设计方法的简要总结,以及一个分析简化的怠速控制问题的实例研究,包括实验参数辨识和模型验证的一些内容。

从本书中不能学到什么?

本书主要针对内燃机系统,即假设作用在发动机上的负载转矩是已知

的，不讨论传动系统和底盘问题。

此外，本书重点是作者在早期项目中研究的一些问题，对内燃机系统中的其他控制回路不再赘述。

致谢

本书编写过程中得到很多人无私的帮助。尤其是准备写这本书时，我们的老师、同事和学生帮助构思写作要点。一些人毫无保留地提供素材：特别是 Alois Amstutz 与我们一起从事柴油机的研究，我们的几位博士研究生的学位论文作为一些章节的核心（在适当的地方引用了他们的工作），Simon Frei、Marzio Locatelli 和 David Germann 从事怠速专题研究，并帮助整理了文稿，最后，Brigitte Rohrbach 和 Darla Peelle 将原稿由德文翻译成英文。

莱诺·古泽拉

克里斯托弗 H. 翁德尔

苏黎世

2004 年 5 月

目 录

译者序	
原书第2版序	
原书序	
第1章 绪论	1
1.1 符号	1
1.2 内燃机控制系统	4
1.2.1 发动机控制系统的 关联性	4
1.2.2 电控发动机的硬件 和软件	5
1.3 点燃式发动机控制 问题概述	6
1.3.1 总论	6
1.3.2 点燃式发动机的主要控制 回路	8
1.3.3 未来的发展	9
1.4 压燃式发动机控制 问题概述	11
1.4.1 总论	11
1.4.2 柴油机的主要控制 回路	13
1.4.3 未来的发展	16
1.5 本书的结构	17
第2章 平均值模型	18
2.1 引言	18
2.2 因果图	21
2.2.1 点燃式发动机	22
2.2.2 柴油机	24
2.3 空气系统	26
2.3.1 储气室	26
2.3.2 节气门的质量流量	27
2.3.3 发动机的质量流量	30
2.3.4 废气再循环	32
2.3.5 增压器	34
2.4 燃油系统	45
2.4.1 引言	45
2.4.2 湿壁动态	46
2.4.3 气体混合与传输 延迟	53
2.5 机械系统	55
2.5.1 转矩产生	55
2.5.2 发动机转速	64
2.5.3 旋转振动阻尼器	69
2.6 热系统	72
2.6.1 引言	72
2.6.2 发动机废气焓	73
2.6.3 排气歧管的热模型	75
2.6.4 简化的热模型	76
2.6.5 详细的热模型	77
2.7 污染物的形成	83
2.7.1 引言	83
2.7.2 化学计量燃烧	83
2.7.3 非化学计量燃烧	84
2.7.4 点燃式发动机污染物的 形成	86
2.7.5 柴油机污染物的 形成	91
2.7.6 面向控制的	

NO 模型	92	3.3.2 已燃质量分数的 估计	151
2.8 污染物净化系统	95	3.3.3 气缸充量估计	153
2.8.1 引言	95	3.3.4 压力波动引起的 转矩变化	156
2.8.2 三元催化转化器的 基本原理	97	第4章 发动机系统的控制	159
2.8.3 三元催化转化器的 建模	99	4.1 引言	159
2.9 柴油机污染物净化系统 ..	114	4.1.1 总论	159
第3章 离散事件模型 (DEM)	123	4.1.2 软件结构	161
3.1 DEM 介绍	124	4.1.3 发动机工作点	162
3.1.1 何时需要 DEM?	124	4.1.4 发动机标定	164
3.1.2 燃烧的离散时间 效应	124	4.2 发动机爆燃	166
3.1.3 ECU 的离散行为	126	4.2.1 自燃过程	167
3.1.4 喷油和点火的 DEM	128	4.2.2 爆燃准则	168
3.2 发动机系统最重要 的 DEM	130	4.2.3 爆燃检测	169
3.2.1 平均转矩产生的 DEM	130	4.2.4 爆燃控制器	172
3.2.2 空气流量动态 的 DEM	134	4.3 空燃比控制	174
3.2.3 燃油流量动态 的 DEM	136	4.3.1 前馈控制系统	174
3.2.4 CNG 发动机回流动态 的 DEM	144	4.3.2 反馈控制: 传统 的方法	179
3.2.5 残余气体动态的 DEM	146	4.3.3 反馈控制: H_{∞}	180
3.2.6 排气系统的 DEM	149	4.3.4 反馈控制: 内模控制	190
3.3 基于缸内压力信息 的 DEM	150	4.3.5 空燃比和发动机转速的 多变量控制	199
3.3.1 总论	150	4.4 SCR 系统的控制	204
		4.5 发动机热管理	208
		4.5.1 引言	208
		4.5.2 控制问题的形成	209
		4.5.3 前馈控制系统	210
		4.5.4 实验结果	213
		附录	218
		附录 A 建模基础与控制	

系统理论	218	B. 1.3 子系统描述	257
A. 1 动态系统的建模	218	B. 2 参数辨识和	
A. 2 系统描述和		模型验证	260
系统特性	225	B. 2.1 静态特性	261
A. 3 模型不确定性	230	B. 2.2 动态特性	264
A. 4 名义对象的控制		B. 2.3 模型参数的	
系统设计	233	数值	267
A. 5 不确定对象的控制		B. 3 线性系统描述	269
系统设计	240	B. 4 控制系统的设计	
A. 6 控制器的离散化	243	与实现	271
A. 7 控制器的实现	251	附录 C 内燃机的燃烧与	
A. 7.1 增益调度	251	热力循环计算	274
A. 7.2 抗积分饱和 (Anti -		C. 1 燃料	274
Reset Windup) ...	252	C. 2 热力循环	275
A. 8 进一步阅读	252	C. 2.1 实际发动机	
附录 B 实例研究: 怠速		循环	276
控制	253	C. 2.2 放热的近似	278
B. 1 怠速系统的建模	253	C. 2.3 Vibe 参数的变化:	
B. 1.1 引言	253	Csallner 函数	280
B. 1.2 系统结构	254	参考文献	283

第1章 绪 论

本章首先定义了书中所使用的符号。随后包含了发动机电子控制系统的概述,介绍了在点燃式(奥托或汽油)发动机和压燃式(柴油)发动机系统中遇到的最常见的控制问题。目的是说明采用控制系统的原因,使读者了解 SI 和 CI 发动机前馈与反馈控制系统能够解决的问题。

本章着重于定性说明,精确的数学公式参见后续章节。不熟悉当代汽车中传感器、执行器和控制硬件的读者可以查阅文献 [7]、[108] 或 [125]。

1.1 符号

本书所用的符号比较规范。变量 $x(t)$ 对自变量 t 的导数表示为

$$\frac{d}{dt}x(t)$$

而符号 $\dot{x}(t)$ 用于表示质量流、能量流等。变量 $\frac{d}{dt}x(t)$ 和 $\dot{x}(t)$ 具有相同的单位,但它们是不同的对象。没有专门区分标量、矢量和矩阵。如果一个变量不是标量,那么其维数会在上下文明确定义。输入信号通常用 u 表示,输出信号用 y 表示,而下标指明激励或测量的物理量。

化学物质 C 的浓度用 $[C]$ 表示,是一个以参照物质为基准的相对量,单位是 mol/mol ,因此浓度限于 $[0, 1]$ 。图形和表格中的污染物浓度单位通常是 $\times 10^{-6}$ (俗用 ppm)。质量存储和传输模型使用质量分数更便利,质量分数用 ξ 表示,单位是 kg/kg 。

通常,所有变量在书中第一次使用时定义。为了便于阅读,一些符号专供特定的物理量使用:

α	传热系数 ($\text{W/m}^2\text{K}$)
A	面积 (m^2)
c_x	比热容 ($x=p, v$) (J/kgK), x 的浓度 (-)

ε	压缩比, 体积分数 (容积率) (-)
η	效率 (-)
ϕ	曲轴转角 (°, rad)
γ	齿数比 (传动比) (-)
H	焓 (J)
κ	比热比 (绝热指数) (-)
λ	空燃比, 容积效率, 拉格朗日乘子 (-)
m	质量 (kg)
M	摩尔质量 (kg/mol)
N	发动机每循环转数 (对于四冲程 $N=2$, 二冲程 $N=1$)
ν	化学当量系数 (-)
p	压力 (Pa, bar [⊖])
P	功率 (W)
Π	压比 (-)
Q	热量 (J)
r	半径 (m), 反应速率 (mol/s)
ρ	密度 (kg/m ³)
R	气体常数 (J/kgK)
$\Re$	通用气体常数 (J/molK)
σ_0	化学当量空燃比 (理论空燃比) (-)
t	时间 (自变量) (s)
τ	时间 (间隔或常数) (s)
ϑ	温度 (K, °C)
θ	占有率 (-)
T	转矩 (N · m)
Θ	转动惯量 (m ² kg)
u, y	控制输入, 系统输出 (均归一化) (-)
V	容积 (m ³ , L)
ζ	点火提前角 (°)
ω	转速或角频率 (rad/s)
ξ	质量分数 (-)。

同样, 一些下标为特殊用途而保留, 它们所代表的含义是:

⊖ 汽车行业习惯以 bar 作为压力单位, 因此虽然它不是国际标准单位, 但本书仍然使用
1 bar = 0.1 MPa。

α, a, β	大气
c	压气机或气缸
e	发动机
eg	废气
egr, ε	废气再循环
f, φ, ψ	燃料
γ	发动机排气口
l	负载
m	歧管或平均值
seg	段 (segment) [译者注: 指发动机连续两次点火 (或做功间隔) 对应的曲轴转角, 4 缸机是 180°CA , 6 缸机是 120°CA]
t	涡轮
ξ	燃烧
ζ	正时 (如点火正时、喷射正时)。

在涡轮增压发动机系统中, 用序号表示 4 个最重要的位置: 1 表示“压气机前”; 2 表示“压气机后”; 3 表示“发动机后”; 4 表示“涡轮后”。

通常, 本书中所列举的数值均采用国际单位制。但有一些例外, 采用的是被广泛接受的非国际单位制, 这些个别情况在书中会明确说明。

最常用的缩写词有:

BDC (TDC)	下 (上) 止点 [活塞在最低 (最高) 位置]
BMEP 或 p_{me}	平均有效 (制动) 压力
BSFC	制动马力燃油消耗率 (比油耗)
CA	曲轴转角
CI	压燃式发动机 (柴油机)
CNG	压缩天然气
COM	面向控制的模型
DEM	离散事件模型
DPF	柴油机颗粒过滤器
ECU	电子 (或发动机) 控制单元
IEG	吸气到排气的延迟
IPS	吸气到做功行程的延迟
IVC (IVO)	进气门关闭 (开启)
EVC (EVO)	排气门关闭 (开启)
MBT	最大制动转矩 (点火正时或喷射正时)
OC	氧化催化剂

ODE	常微分方程
ON	辛烷值
PDE	偏微分方程
PM	颗粒物
SCR	选择性催化还原
SI	点燃式发动机（奥托/汽油/气体发动机）
TPU	时间处理单元
TWC	三元催化转化器
VNT	可变截面涡轮增压器
WOT	节气门全开

1.2 内燃机控制系统

1.2.1 发动机控制系统的关联性

预计在将来的汽车上，电气和电子部件占其部件数量的 1/3 左右。这些装置有助于减少燃油消耗和污染物排放，提高安全性，改善乘用车的驾驶性能和舒适性。由于电控系统变得更加复杂和功能强大，越来越多的机械功能被电气和电子装置所取代。这样一款先进汽车的例子如图 1.1 所示。

V240最高配置的完整网络结构

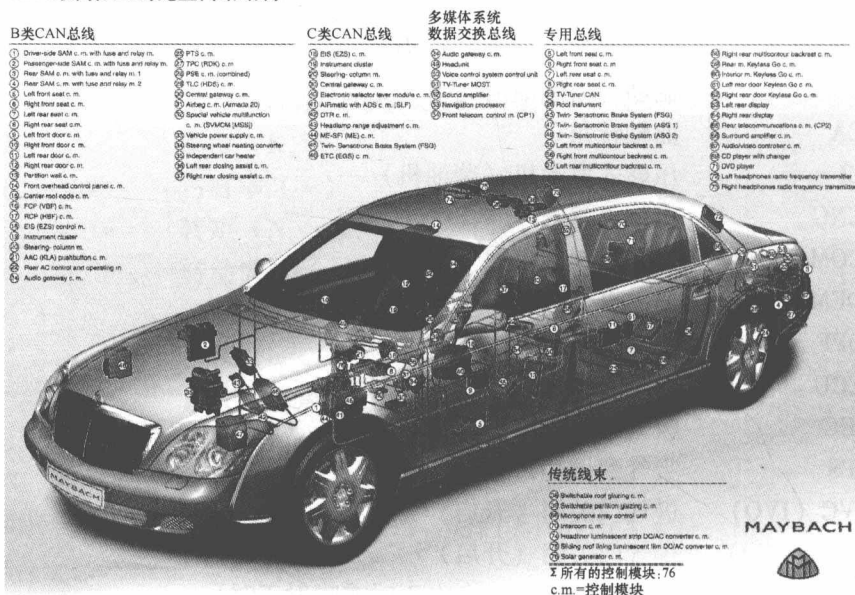


图 1.1 现代汽车（迈巴赫）的线束（经 Daimler AG 许可转载）

在这样一个系统中，发动机仅仅是更大结构中的一部分。其主要输入和输出信号是由电控单元（ECU）或直接由驾驶人发出的指令，负载转矩通过离合器传递到发动机的飞轮。图 1.2 给出了车辆控制系统一个可能的基本结构。本书只讨论“内燃机（ICE）”（即发动机和控制发动机所需的相应硬件和软件）。

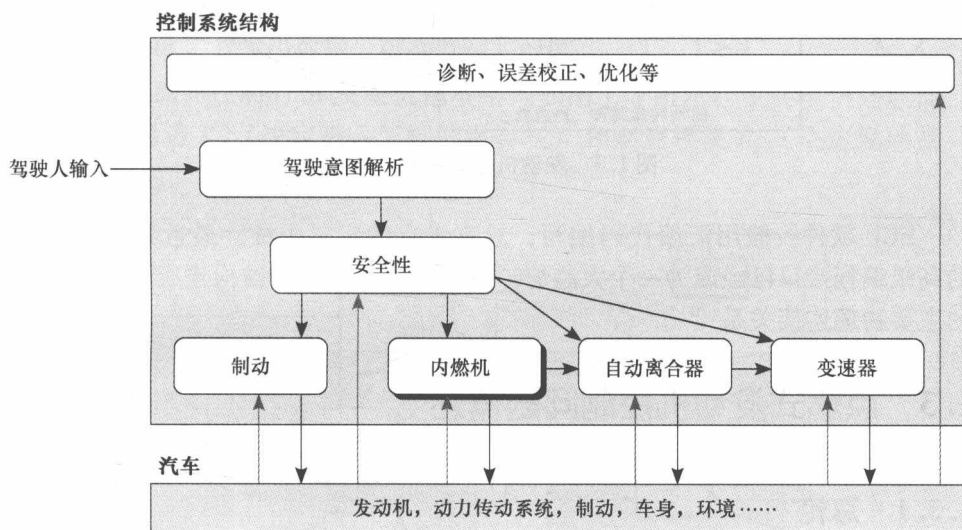


图 1.2 完整的车辆控制系统基本结构

随着用于降低 SI 发动机排放的三元催化转化器（TWC）的出现，在 ICE 上大规模地采用了控制系统。使用这些系统的成熟经验和微电子元件（性能和成本）的巨大进步，为在 ICE 的许多其他方面应用电控系统开辟了道路。显然，没有先进的控制系统，将来更复杂的发动机系统（如混合动力传动系统和均质充气压缩燃烧发动机，简称 HCCI 发动机）不可能实现。

1.2.2 电控发动机的硬件和软件

如图 1.3 所示，典型的发动机电控单元（ECU）包含标准的微控制器硬件（处理接口、RAM/ROM、CPU 等）和至少一片通常称为时间处理单元（TPU）的附加硬件。这个 TPU 使发动机控制命令与发动机的往复运动同步。3.1.3 小节将更详细地分析 ECU 与发动机的同步^①。还应注意，出于电磁兼容性的考虑，通常 ECU 微处理器的时钟频率远远低于台式计算机的时钟频率。

① 所有 ICE 往复或基于事件的特性还对控制器设计过程有着重要影响，这些问题将在第 3 章和第 4 章讨论。

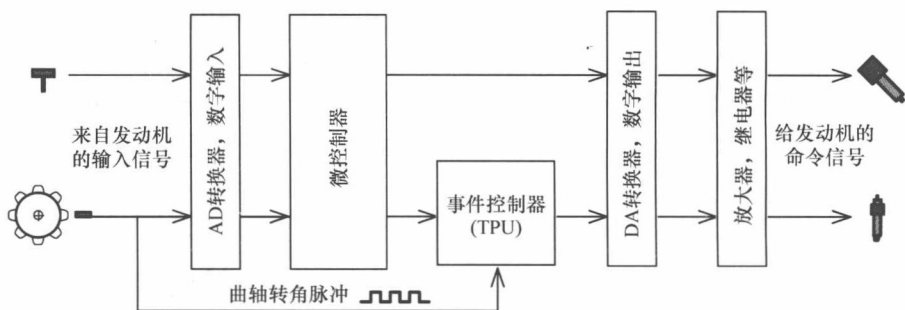


图 1.3 发动机电控单元内部机构

ECU 软件一般用汇编代码编写，具有专有的实时内核。最近几年，标准化的高级编程接口已经成为一个大趋势。有意思的是，软件被构建成反映被控对象的主要物理连接关系^[70]。

1.3 点燃式发动机控制问题概述

1.3.1 总论

当代大多数乘用车仍然配置进气口（间接）喷射点燃式（SI）汽油机。奥托（Otto）过程的预混合和当量空燃比燃烧使得用三元催化转化器（TWC）可以进行极为有效的废气净化，而且产生很少的颗粒物（PM）。这样一种发动机的标准配置如图 1.4 所示。

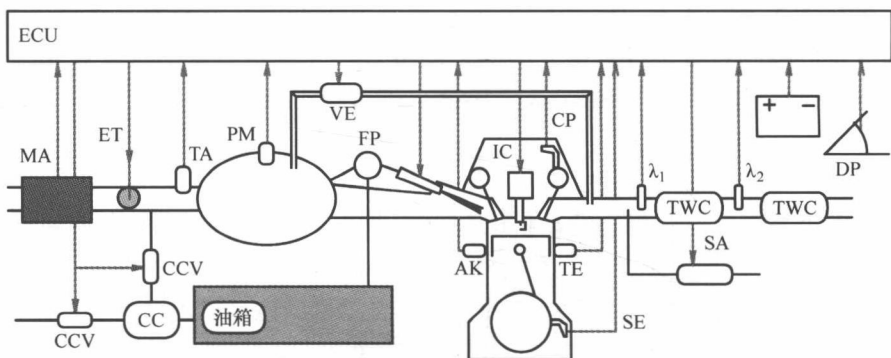


图 1.4 典型的点燃式发动机系统结构

AK—爆燃传感器 PM—歧管压力传感器 VE—EGR 阀 CP—凸轮轴传感器 ET—电子节气门
SA—二次空气阀 IC—点火命令 TA—进气温度传感器 TWC—三元催化转化器
MA—空气质量流量传感器 TE—冷却液温度传感器 ECU—控制器 SE—发动机转速传感器
CC—活性炭罐 CCV—活性炭罐控制阀 FP—燃油压力控制 $\lambda_{1,2}$ —氧传感器 DP—加速踏板