



汽车先进技术译丛  
汽车创新与开发系列

WILEY

# 汽车动力总成系统



## Vehicle Powertrain Systems

[伊朗] 贝赫鲁兹·马沙迪 (Behrooz Mashadi) 著  
[英] 戴维·克罗拉 (David Crolla) 译  
白先旭 刘勇强 严正峰 译



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

汽车先进技术译丛 汽车创新与开发系列

# 汽车动力总成系统

[伊朗] 贝赫鲁兹·马沙迪 (Behrooz Mashadi)

[英] 戴维·克罗拉 (David Crolla)

白先旭 刘勇强 严正峰

著

译



机械工业出版社

本书可满足学生和汽车行业的实践工程师们的需要。对于工科学生，希望能为他们提供汽车动力总成系统设计原则的完善解释。对于实践工程师，本书尝试提供一个对更加专业的主题领域的全面介绍，如在发动机、变速器或混合电动汽车部件。本书结合了两个重要主题：汇集了各种工作案例并提供了许多问题的 MATLAB 程序代码，以及分析动力总成系统的方法，专注于集成化和所有组件的相互作用（如发动机、变速器、主减速器、车轮和轮胎）来分析车辆的总体性能。

本书适合研发工程师阅读使用，也适合车辆工程专业的学生阅读参考。

Copyright © 2012 John Wiley & Sons, Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Vehicle Powertrain Systems, ISBN 978 - 0 - 470 - 66602 - 9, by Behrooz Mashadi, David Crolla. Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 独家授权机械工业出版社出版。未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有，翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01 - 2016 - 3037。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

汽车动力总成系统/(伊朗)贝赫鲁兹·马沙迪,(英)戴维·克罗拉著;白先旭,刘勇强,严正峰译. —北京:机械工业出版社,2018.6

(汽车先进技术译丛·汽车创新与开发系列)

书名原文: Vehicle Powertrain Systems

ISBN 978-7-111-60005-3

I. ①汽… II. ①贝… ②戴… ③白… ④刘…⑤严… III. ①汽车-动力总成-动力系统 IV. ①U463.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 103632 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: 刘志文

封面设计: 鞠杨 责任印制: 常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2018 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 29.25 印张 · 2 插页 · 599 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-60005-3

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](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 前言

我们写这本书是为了满足学生和在汽车行业的实践工程师的需要。对于工科学生，希望能为他们提供汽车动力总成系统设计原则的完善解释。对于实践工程师，我们尝试提供一个对更加专业的主题领域的全面介绍，如发动机、变速器和混合动力汽车部件。

本书结合了许多机构的教学经验并得以改进，包括伊朗科学与技术大学、利兹大学、桑德兰大学和格兰菲尔德大学。本书和其他图书的区别是，我们结合了两个重要主题：

- 1) 汇集了各种工作案例，并提供了许多案例计算用的 MATLAB 代码。
- 2) 讲述动力总成设计的系统方法——专注于集成化和所有组件的相互作用，如发动机、变速器、主减速器、车轮和轮胎——分析车辆的总体性能。

基于我们教授工科学生的经验，学习工程原理最有效的方式之一就是自己解决问题。因此，我们尝试提供许多案例，并给出解决方案以及相应的 MATLAB 程序代码。希望读者能够自己运行这些简短程序，并对其进行修改从而能够检验其他性能问题。

术语“系统方法”广泛应用于工程中，但在特定的背景中却总是解释不清楚。为了了解车辆的性能，有必要对所有的动力总成部件进行分析并研究它们之间如何相互作用，以及设计师如何以协调的方式来整合它们。根据我们的经验，几乎找不到全面研究集成这一重要方面的图书。

在写这本书时，汽车行业正承受着最小化能源消耗和减少全球排放的巨大压力。这也导致了关于研究传统动力系统的替代系统的巨大热潮——发展电动汽车和混合动力汽车。然而，消费者似乎并不愿意在加速度、速度等传统车辆性能方面和总体能量消耗方面做出妥协和让步。驾驶性能仍然是一个关键的商业问题，而且具有驾驶乐趣的车辆也有特定要求。因此，关于车辆性能和能量消耗之间的协调设计仍然充满挑战。我们尝试通过本书提供一个通常相互矛盾的车辆设计要求方面的全面介绍。

本书专门有一个网站 ([www.wiley.com/go/mashadi](http://www.wiley.com/go/mashadi))，网站中囊括了本书中一百多道习题的解决方案和详细解释。大多数问题的解决方案是在 MATLAB 软件环境中进行的，并且提供了程序目录。该网站除了提供各种案例外，还有对学生的宝贵指导和解释。

最后，感谢所有的同事和朋友，感谢他们这么多年以各种方式在我们写这本书时给予的帮助。

# 目 录

## 前言

<b>1 汽车动力总成基本概念</b> ..... 1	2.4.3 准稳态发动机转矩 ..... 67
1.1 动力总成 ..... 1	2.5 发动机转矩脉谱图 ..... 71
1.1.1 研究体系 ..... 1	2.5.1 发动机测功机 ..... 71
1.1.2 发展历史 ..... 2	2.5.2 底盘测功机 ..... 73
1.1.3 传统动力总成系统 ..... 3	2.5.3 发动机转矩-转速特性 ..... 74
1.1.4 混合动力总成系统 ..... 3	2.6 发动机转矩的 MT 公式 ..... 80
1.2 动力总成的组成 ..... 5	2.6.1 不同形式的部分负荷特性 曲线 ..... 80
1.2.1 发动机 ..... 5	2.6.2 MT 公式 ..... 81
1.2.2 变速器 ..... 5	2.6.3 注释 ..... 81
1.2.3 汽车结构框架 ..... 5	2.7 发动机管理系统 ..... 82
1.2.4 操作系统 ..... 5	2.7.1 基本组成 ..... 83
1.3 汽车性能 ..... 6	2.7.2 传感器 ..... 83
1.4 驾驶行为 ..... 8	2.7.3 脉谱图和查询表 ..... 84
1.5 建模准则 ..... 9	2.7.4 校正 ..... 86
1.6 本书的目的与意义 ..... 10	2.8 净输出功率 ..... 86
扩展阅读 ..... 11	2.8.1 发动机机械效率 ..... 87
参考文献 ..... 11	2.8.2 附件驱动 ..... 87
<b>2 内燃机动力特性</b> ..... 12	2.8.3 环境影响 ..... 88
2.1 概述 ..... 12	2.9 本章小结 ..... 96
2.2 发动机转矩产生原理 ..... 12	2.10 复习题 ..... 96
2.2.1 发动机运行模式 ..... 13	2.11 练习题 ..... 97
2.2.2 发动机燃烧 ..... 15	扩展阅读 ..... 99
2.2.3 发动机热力循环 ..... 17	参考文献 ..... 100
2.2.4 发动机输出特性 ..... 30	<b>3 汽车纵向动力学特性</b> ..... 101
2.2.5 缸内压力变化情况 ..... 31	3.1 简介 ..... 101
2.3 发动机模型 ..... 35	3.2 转矩发生器 ..... 101
2.3.1 发动机运动学 ..... 36	3.2.1 内燃机 ..... 101
2.3.2 发动机转矩 ..... 43	3.2.2 电机 ..... 103
2.3.3 简化模型 ..... 52	3.3 牵引力 ..... 104
2.3.4 飞轮 ..... 58	3.3.1 轮胎摩擦力的产生 ..... 104
2.4 多缸发动机 ..... 61	3.3.2 牵引力的数学推导 ..... 107
2.4.1 点火顺序 ..... 61	3.3.3 牵引力特征图 ..... 111
2.4.2 发动机转矩 ..... 64	3.4 行驶阻力 ..... 113

3.4.1 滚动阻力 .....	113	3.13 传动功率损失 .....	186
3.4.2 汽车空气动力学 .....	117	3.13.1 传动效率 .....	186
3.4.3 爬坡度 .....	120	3.13.2 转矩流 .....	189
3.4.4 行驶阻力示意图 .....	121	3.13.3 滚动阻力的影响 .....	189
3.4.5 滑行试验 .....	121	3.14 总结 .....	190
3.5 恒功率工况下的汽车动力性 .....	122	3.15 复习题 .....	191
3.5.1 最大输出功率 .....	122	3.16 练习题 .....	191
3.5.2 连续传动比假设 .....	124	扩展阅读 .....	199
3.5.3 动力学方程 .....	125	参考文献 .....	199
3.5.4 方程解析解 .....	128	<b>4 变速器</b> .....	200
3.5.5 方程数值解 .....	129	4.1 引言 .....	200
3.5.6 功率需求 .....	133	4.2 变速器的作用 .....	200
3.5.7 加速时间与加速距离 .....	134	4.3 变速器传动比的设计 .....	202
3.5.8 最大速度 .....	138	4.3.1 最低档 .....	202
3.6 恒转矩工况下的汽车动力性 .....	140	4.3.2 最高档 .....	207
3.6.1 方程解析解 .....	141	4.3.3 中间档 .....	213
3.6.2 方程数值解 .....	146	4.3.4 其他影响因素 .....	222
3.7 固定节气门开度工况下的 汽车动力性 .....	148	4.4 变速器运动学关系及齿轮齿数 .....	224
3.7.1 换挡与牵引力 .....	148	4.4.1 标准齿轮 .....	226
3.7.2 汽车加速度、车速和 行驶距离 .....	150	4.4.2 行星齿轮组 .....	228
3.7.3 换挡时机 .....	154	4.5 手动变速器 .....	231
3.7.4 不同档位时的最大速度 .....	156	4.5.1 构造和操作 .....	231
3.7.5 最佳加速性能 .....	159	4.5.2 摩擦式离合器 .....	233
3.7.6 能量消耗 .....	159	4.5.3 膜片弹簧 .....	242
3.8 加速踏板循环性能 .....	163	4.5.4 离合器接合动力学 .....	250
3.9 旋转质量的影响 .....	166	4.6 自动变速器 .....	264
3.10 轮胎滑移现象 .....	172	4.6.1 传统自动变速器 .....	265
3.11 爬坡性能 .....	174	4.6.2 AMT .....	267
3.11.1 恒功率工况 .....	175	4.6.3 DCT .....	268
3.11.2 恒转矩输出工况 .....	175	4.7 CVT .....	272
3.11.3 恒定节气门工况 .....	177	4.7.1 无级变速器的分类 .....	273
3.11.4 变坡度工况 .....	178	4.7.2 摩擦式无级变速器 .....	274
3.12 滑行 .....	179	4.7.3 棘轮式无级变速器 .....	276
3.12.1 恒值滚动阻力假设 .....	180	4.7.4 非机械式无级变速器 .....	278
3.12.2 滚动阻力为速度 函数的假设 .....	184	4.7.5 怠速和起动 .....	279
3.12.3 旋转质量转动惯量的影响 .....	184	4.8 总结 .....	280
		4.9 复习题 .....	280
		4.10 练习题 .....	281
		扩展阅读 .....	288

参考文献 .....	288	6.2.1 建模方法 .....	330
<b>5 燃油消耗</b> .....	289	6.2.2 线性和非线性模型对比 .....	331
5.1 引言 .....	289	6.2.3 软件的运用 .....	332
5.2 发动机的能耗 .....	290	6.3 传动系统部件的键合图模型 .....	333
5.2.1 BSFC 脉谱图 .....	290	6.3.1 发动机 .....	333
5.2.2 BSFC 和发动机效率 .....	291	6.3.2 离合器 .....	333
5.3 驾驶循环 .....	293	6.3.3 变速器 .....	335
5.3.1 典型的驾驶循环 .....	293	6.3.4 传动轴和驱动轴 .....	335
5.3.2 计算 .....	294	6.3.5 差速器 .....	336
5.3.3 汽车试验 .....	297	6.3.6 车轮 .....	337
5.4 汽车的油耗 .....	297	6.3.7 车身 .....	337
5.4.1 油耗估算 .....	299	6.4 传动系统模型 .....	337
5.4.2 基于脉谱图的油耗 .....	301	6.4.1 完整的传动系统模型 .....	338
5.4.3 旋转质量的影响 .....	304	6.4.2 直行 .....	338
5.5 换挡的影响 .....	305	6.4.3 刚体模型 .....	339
5.5.1 换挡对 EOP 的影响 .....	305	6.4.4 离合器为柔体的动力 传动系统 .....	340
5.5.2 EOP .....	309	6.4.5 传动轴为柔体的动力 传动系统 .....	341
5.6 软件 .....	312	6.4.6 离合器和传动轴为柔体的动力 传动系统 .....	342
5.6.1 解决方法 .....	312	6.5 分析 .....	343
5.6.2 ADVISOR .....	314	6.5.1 离合器为柔体的影响 .....	343
5.7 自动变速器 .....	315	6.5.2 传动轴为柔体的影响 .....	347
5.7.1 发动机状态 .....	315	6.5.3 离合器和传动轴为柔体的 影响 .....	350
5.7.2 驾驶人的意图 .....	315	6.5.4 频率响应 .....	351
5.7.3 换挡依据 .....	316	6.5.5 改进 .....	358
5.7.4 控制器 .....	316	6.6 总结 .....	358
5.7.5 多档传动理论 .....	317	6.7 复习题 .....	358
5.8 提高燃油效率的其他措施 .....	318	6.8 练习题 .....	359
5.8.1 动力系统零部件的改进 .....	318	扩展阅读 .....	362
5.8.2 汽车轻量化 .....	319	参考文献 .....	362
5.8.3 发动机 .....	320	<b>7 混合动力汽车</b> .....	363
5.8.4 变速器 .....	321	7.1 引言 .....	363
5.9 结论 .....	322	7.2 混合动力汽车的类型 .....	363
5.10 复习题 .....	322	7.2.1 基本分类 .....	364
5.11 练习题 .....	323	7.2.2 基本操作模式 .....	365
扩展阅读 .....	327	7.2.3 其他衍生类 .....	366
参考文献 .....	328		
<b>6 传动系统动力学</b> .....	329		
6.1 引言 .....	329		
6.2 传动系统动力学建模 .....	330		

7.2.4 混合程度 .....	370	7.9 复习题 .....	442
7.3 动力分流装置 .....	372	7.10 练习题 .....	443
7.3.1 简单动力分流设备 .....	372	扩展阅读 .....	444
7.3.2 基于能量管理的复合功率 分流设备 .....	384	参考文献 .....	445
7.4 混合动力汽车组件特性 .....	389	<b>附录 键合图建模介绍</b> .....	446
7.4.1 内燃机 .....	389	A.1 基本概念 .....	446
7.4.2 电机 .....	389	A.2 标准元件 .....	446
7.4.3 电池 .....	394	A.2.1 源 .....	446
7.5 混合动力汽车性能分析 .....	402	A.2.2 被动元件 .....	447
7.5.1 串联式混合动力汽车 .....	402	A.2.3 二端口元件 .....	448
7.5.2 并联式混合动力汽车 .....	407	A.2.4 连接结 .....	450
7.6 混合动力汽车组件尺寸 .....	410	A.3 构建键合图 .....	451
7.6.1 设计总则 .....	411	A.4 运动方程 .....	453
7.6.2 基于性能的尺寸设计 .....	412	A.4.1 因果关系 .....	453
7.6.3 尺寸优化设计 .....	433	A.4.2 分配过程 .....	454
7.7 能量管理 .....	435	A.4.3 键合图编号 .....	455
7.7.1 控制潜能 .....	436	A.4.4 组分方程 .....	456
7.7.2 控制 .....	440	A.4.5 键合图简化 .....	456
7.8 结论 .....	442	A.4.6 运动方程的推导 .....	457

# 1 汽车动力总成基本概念

## 1.1 动力总成

当前汽车主要以内燃机为动力源，通过传动系统和动力传动装置传递给驱动车。这些组件都属于动力总成，并由驾驶人操控。驾驶人，即被汽车制造商视为“挑剔”的顾客，有他们一系列的汽车性能标准：加速度、最高车速、燃油经济性、爬坡度和牵引力等比较明显的质量评价特征。像汽车的操作稳定性、舒适性、美观和驾驶人的驾驶乐趣这样的主观评价，在汽车的成功商业化进程中也扮演着重要的角色。另一方面，社会对汽车废气排放和 CO<sub>2</sub> 排放等特别关注并有不同的要求，政府部门为汽车制造商设定了控制汽车碳排放总量的目标。

为了达标，汽车工程师需要掌握整套动力总成系统技术。本书的根本主题就是为了理解汽车的机动性而分析整个动力总成系统，包括驾驶人、发动机、变速器、行驶工况等。本章将只介绍背景。

### 1.1.1 研究体系

本书的核心就是采用系统的方法了解汽车动力总成设计。简而言之，就是将汽车中相应的所有单个组件集中到动力总成，然后分析它们之间相互连接、相互作用的关系。最终的目的是根据最高车速、加速度、爬坡度、燃油经济性等来预测整车性能。

首先，分析动力总成元件的工作原理，然后将这些元件组合到一起成为一个完整的系统，即整车动力总成。动力通常由内燃机产生，再通过传动装置（离合器、变速器、主减速器和差速器等）传递到车轮。最重要的一方面是汽车设计者能够从系统的角度出发完成汽车性能的设计目标。用系统方法解决任何问题，首先最重要的是定义系统的界限。例如，如果希望研究乘用车能量的整体使用情况，整车能量流动系统示意图如图 1.1 所示，图中表述了从能量产生到最后运用到汽车中整个过程的能量流动情况。本节对于动力总成设计的描述至关重要，通常称之为能源消耗周期分析。

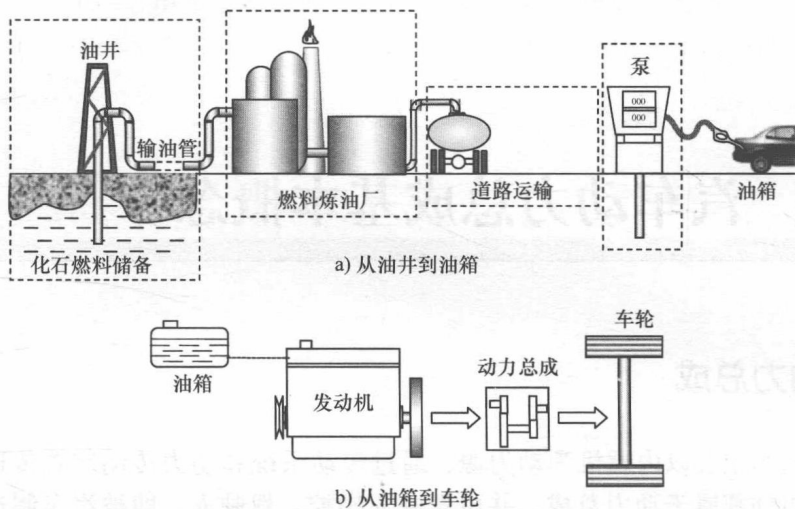


图 1.1 整车能量流动系统示意图

## 1.1.2 发展历史

目前有大量描述汽车发展史的图书。深究汽车工程历史并不是本书的目的，然而分析动力总成需要了解这些发展历史。

在 1997 年，美国汽车工程学会在一百周年庆时出版了一本关于汽车史的书籍。该书由美国专家编写，包含了各种发动机、变速器和轮胎等动力总成元件的历史。从工程创新的角度来看，从 19 世纪后期到 20 世纪初，已发布的创新设计过剩，但是在数十载之后，当材料特性和批量生产技术有所提升时实际产品的开发才得以实现。例如，对于很多类似于自动变速器和无级变速器等相对复杂的工程组件在这一阶段有大量的发明专利可查，但是实现产品商业化需要几十年。Eckerman 在他的书中描述了汽车工程制造、大批量生产和经济背景的发展史。

对于汽车动力总成系统，可从历史角度回顾内燃机和变速器这两个主要组件。Daniel 的《Driving Force》将内燃机作为 20 世纪汽车的主要动力源，他描述了发动机从 1876 年固定的四冲程发动机，到目前具有先进控制系统发动机的有关工程开发的全面概述。

在 20 世纪，一些工程师认为变速器的发展也是十分重要的。有一个观点值得认可，就是内燃机功率决定了车速的范围，而将动力传递到驱动轮的过程中变速器发挥了很重要的作用。Gott 描述了变速器的发展历史，虽然偏向于美国人对自动变速器的喜爱，但是由于变速器控制应该与发动机控制协调，本文需要运用系统方法进行说明。

在这种整体方法中，所有动力总成相互作用的部分都被整合到一起考虑以实现

系统的最优化。例如，完善每个组件的设计显然很重要，就像发动机和变速器，最终目的就是将它们匹配起来组成一个综合系统。

### 1.1.3 传统动力总成系统

本书主要描述传统的汽车动力总成。内燃机产生的动力通过传动装置（变速器和最终传动单元的组合）驱动车轮转动，图 1.2 就是一个典型的前置后驱汽车的模型，本书每章所讲述的内容也在动力总成视图中标出。小型乘用车最常用的布局形式是前置前驱，但是动力总成的原理完全一样。

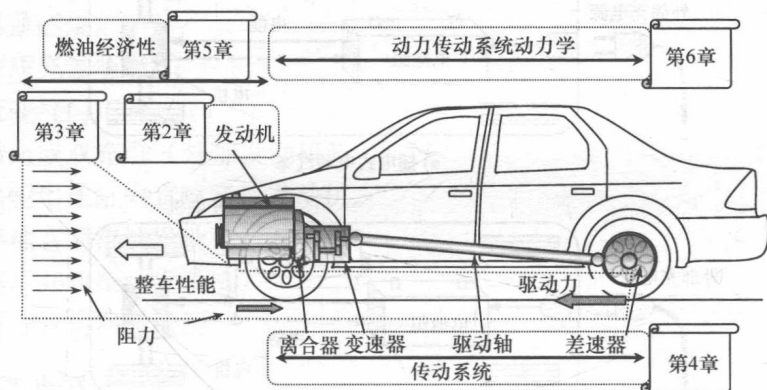


图 1.2 汽车动力总成相关章节概况

从 2000 年起就有人对替换现有的动力总成产生了极大的兴趣，想方设法生产低碳汽车。显然，本书所述的对传统动力总成的分析和理解，在未来几十年依然会受到人们的关注。

### 1.1.4 混合动力总成系统

在 19 世纪末到 20 世纪初，工程师们热衷于独立研发电动汽车。当时有三种汽车动力装置同时受到瞩目：蒸汽机、电动机和内燃机。这三种技术都有自己的优点与不足，当时人们并不知道哪种技术会长期占据主导地位。

蒸汽机拥有很长的发展历史并且能够提供足够的动力，但是煤炭的经济性差，水蒸发需要一定的时间，并且水的储存和使用问题也未能充分解决。电动汽车由于噪声小、清洁、容易操作等优点，发展前景很好，然而电池容量到目前为止依然是主要问题。在此期间，燃油汽车的发展并不好并且出现一些麻烦，例如燃油汽车很难起动并且在运行时噪声大、污染严重、不稳定。但是它的优势（目前也存在）是燃油的能量密度高，约是铅酸电池的 300 倍，这就意味着燃油动力总成在工程优化上是值得投资的，这种方法的持续发展和燃油提纯技术研究一直延续到今天。

对于汽车动力总成用什么作为动力源的讨论，一些有远见的工程师建议结合两

种动力总成的优点，因此在 19 世纪混合动力汽车应运而生。它们当时并不叫“混合动力”，但是混合动力十分引人注目，例如 1902 年 Woods 的油电汽车就满足现在混合动力汽车的设计。由发动机驱动的汽车，发动机可以替代电动机，汽车也能够仅靠电池供电维持汽车的低速运行，发动机可以为电池充电，也可以实现再生制动。

混合动力汽车有多种动力总成结构，但是所有的结构都与经过商业化的可靠汽车模型相似。图 1.3 将混合动力汽车概括为三种类型：

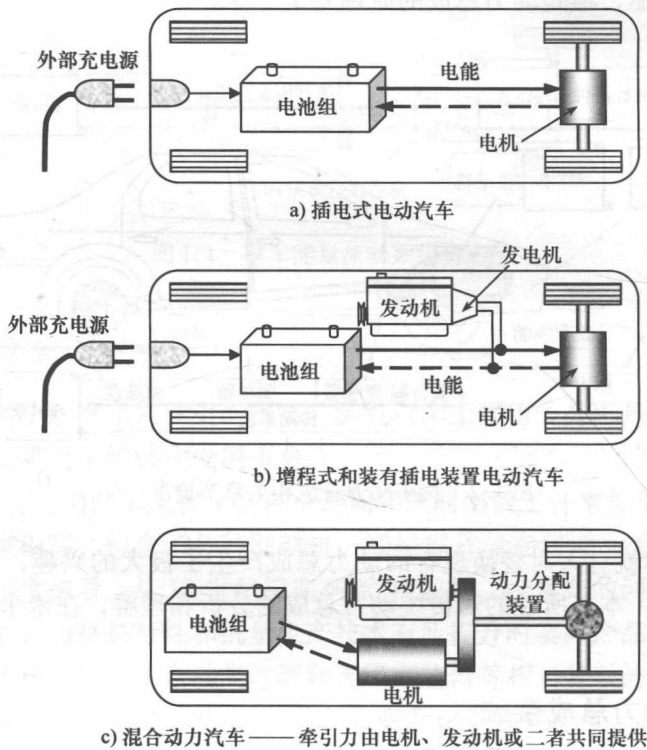


图 1.3 三种典型的混合动力/电动汽车结构图

- 1) 插电式电动汽车，如日产聆风。
- 2) 增程式电动汽车，如雪佛兰沃特。
- 3) 混合动力汽车，如丰田普锐斯。

本书第 7 章将介绍混合动力汽车动力总成的有关问题，对于迅速推广混合动力汽车技术，目前并没有综合处理方法，很多书都提到了这个问题。本章以描述动力总成系统分析的工作原理作为本书的核心，并能够将其运用到不同的技术中，主要目的是运用系统方法分析如何能够将由电池、电动机/发电机、燃料电池和超级电容器等组件建立的动力总成应用到传统的系统总成组件中。

## 1.2 动力总成的组成

通过参考一些优秀的图书，在后续章节将会详细地描述动力总成的组件，并通过不断努力提高所有组件的性能（包括效率、排放控制和优化）和整体成本效益，目前使用最广泛的动力总成组件如下所述。

### 1.2.1 发动机

- 1) 分层燃烧。
- 2) 稀薄燃烧。
- 3) 均质充量压燃。
- 4) 可变气门正时。
- 5) 增压或双充电（外加发动机）。
- 6) 涡轮增压缸内直喷柴油发动机。
- 7) 燃油直喷汽油发动机。
- 8) 高压共轨柴油发动机。
- 9) 可变几何涡轮增压。

### 1.2.2 变速器

- 1) 低摩擦的润滑油（变速器油）。
- 2) 锁定自动变速器转矩，减小转换器滑动和能耗。
- 3) 无级变速器。
- 4) 手自一体变速器。
- 5) 双离合变速器。
- 6) 增加手动或自动变速器传动比的数量。

### 1.2.3 汽车结构框架

- 1) 通过利用铝、玻璃纤维、塑料、高强度钢和碳纤维代替低碳钢和铁来减轻汽车的重量。
- 2) 像活塞、曲轴、齿轮和合金轮毂这样的活动件可使用轻质材料。
- 3) 利用低滚动阻力轮胎。

### 1.2.4 操作系统

- 1) 当汽车停止时自动关闭发动机。
- 2) 制动时回收能量（再生制动）。
- 3) 增加一个带有电动驱动系统和电池的小型发动机（轻度混合动力汽车）。



20世纪70年代,汽车燃油经济性的计算方法发生了巨大的转变,它由1975年美国根据平均燃油经济性公司法规最先提出并由美国国会颁布。这是在1973年石油危机时为了提升所销售乘用车和轻型货车的平均燃油经济性所颁布的联邦法规。实际上,就是美国制造商生产销售的乘用车和轻型货车燃油经济性的加权平均值,这标志着燃油经济性和排放相关话题在全世界范围内开始引起广泛的关注,各国政府纷纷制定法律测量和控制与这两个方面有关的汽车性能。

近几十年来,汽车销售竞争十分激烈,客户要求了解相关汽车性能并与不同的汽车模型进行对比,纵向性能(最高车速、加速度、爬坡度和牵引力等)是对比汽车性能比较直白并且没有任何争议的方法。相反,对比燃油经济性和排放验证汽车性能是比较有争议的方法。

通过测功机测量汽车的一个循环工况可确定所建立的量化汽车燃油经济性模型。循环工况包括所指定的速度-位移数据所形成的一系列的数据点,模拟不同的循环工况需要不同的汽车操作,例如市郊循环、市区循环、高速公路循环和综合循环。

尽管这些方法被国际所接受,但是不同国家和地区之间存在差异。因此,对不同国家之间的汽车的燃油经济性进行对比十分困难!一般来说,循环工况目前出现在欧洲、美洲和亚洲这三个较大的汽车市场,循环工况的差异在某种程度上反映了不同地区的驾驶模式。实际情况更加复杂,不同国家和地区对燃油经济性和汽车排放有不同的目标,这对于在全球范围内生产销售汽车的制造商来说,满足不同地区市场的不同标准非常困难。

由于地区之间的差异,循环工况测试在本行业中具有很大的争议。但是从消费者的角度来看,这是极具争议的,因为在实际驾驶情况下,汽车几乎不可能完全达到循环工况下的理想性能。在工程领域,通过重复循环工况的试验条件测试和测量得到期望的结果,这样的试验条件只是无数实际驾驶工况中比较典型的一部分。然而,最主要的优势是,汽车在一般工况和重复工况下是可以对比的。不过,消费者和流行的汽车杂志都认可销售汽车时标记在汽车车窗玻璃上的数据,并将其作为评判标准。

在欧盟,乘用车的燃油经济性测试可通过两个循环工况得到,一个是市区循环工况,另一个是市郊循环工况。市区循环工况测试(ECE-15)在1999年开始使用,它模拟汽车在平均车速为18.7km/h,最高车速为50km/h行驶4km时的循环工况;而市郊循环工况(EUDC)模拟的是汽车在市内公路和高速公路混合行驶的循环工况,它在平均车速为62.6km/h,最高车速为120km/h的路况下持续400s行驶。在美国,测试程序是由美国环境保护局(EPA)管理,2008年进行了改善,将测试分为五个独立部分,然后引用汽车销售信息加权给环境保护局的城市和公路图,得到的实际燃油经济性的数据比欧盟的数据更可信。

让人困惑的是,燃油经济性在全世界仍然使用不同的单位。例如,尽管美国 and 英国都使用英里每加仑(mpg)作为单位,但是仍然无法比较,因为美国的1加仑

相当于英国的 0.83 加仑！在欧洲和亚洲，耗油量使用的单位是 L/100km。耗油量与 mpg 是成反比的，mpg 越大，耗油量越小（30mpg = 9.4L/100km，50mpg = 5.6L/100km）。

然而，大多数汽车分析师都认为典型的实际驾驶工况比循环工况更有说服力。实际上，这意味着循环工况中的加速度和减速度比实际驾驶工况中的加速度和减速度小。在 21 世纪初，混合动力总成受到人们的青睐，这迫使人们去关注混合动力的燃油经济性。业内一直有个争论，混合动力汽车的动力总成是否比内燃机发动机总成更加适合在循环工况下运行。例如，混合动力汽车在拥挤的城市公路上启动和停车的驾驶工况下能够提供最大范围的改进。因此，有人认为大多数的驾驶工况都倾向于市内运行工况和怠速工况，还有人忽视混合动力潜在的价值，但是各有各的观点！

关于排放问题有两个方面，都被称为尾气排放，这样称呼的原因很明显就是因为尾气是燃烧过程的产物通过排气管排放出来的。第一种是污染物的排放，污染物包括一氧化碳（CO）、碳氢化合物（HC）和氮氧化物（NO<sub>x</sub>）。欧洲在 20 世纪 90 年代初最先颁布发动机污染物排放标准来减少汽车污染，这使得乘用车污染物排放得到改善。2011 年欧洲对乘用车制定了更严格的欧洲 5 号尾气排放标准法规，欧洲 6 号尾气排放标准适用于所有的商用车和乘用车。

第二种是汽车二氧化碳（CO<sub>2</sub>）排放水平。进入 21 世纪环境问题引起了全世界的广泛关注，当时建立了一种计算碳排放的方法，这个方法目前已经深入我们生活的方方面面。从 2001 年开始，英国的汽车税收已经与新车 CO<sub>2</sub> 排放量建立一定的关系，对于排放不超过 100g/km 的汽车免除公路税收。在 2008 年通过了更加严厉的法案，要求到 2015 年欧洲汽车制造商将新车平均的 CO<sub>2</sub> 排放量削减到 130g/km。

## 1.4 驾驶行为

尽管本书的重点是汽车或发动机的动力总成，但是了解汽车在公路上的行驶状况也很重要，完整的汽车驾驶系统应该包括汽车和驾驶人。图 1.5 描述了完整的汽车驾驶系统，图中显示驾驶人作为反馈的控制者监控汽车的性能，将反馈的这些信息与他所需要的加速踏板、制动踏板和档位选择等信号进行对比。从动态角度来说，实际上相当于一个控制系统。因此，在设计汽车工程系统时，必须考虑驾驶人作为一个控制者的情况。

从主观的角度来说，驾驶人的特点是：

- 1) 敏感。
- 2) 可控。
- 3) 可重复。

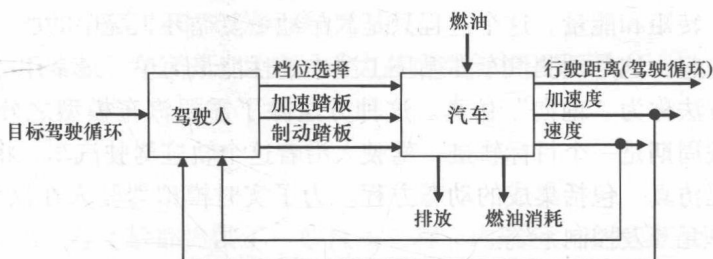


图 1.5 驾驶人-汽车系统中汽车纵向性能示意图

- 4) 稳定。
- 5) 有较小的时间滞后。
- 6) 线性。
- 7) 无突然变化。

关于驾驶人对汽车纵向控制的研究被称为“操纵性能”，这种性能可作为客户评论新型动力总成组件的重要部分。它从 2000 年起投入工业应用，作为评价如双离合变速器 and 无级变速器等新型变速器换档稳定性的标准。驾驶人主观感觉的评判步骤已经被纳入专业汽车工具软件包中，如 AVL-DRIVE。这种方法已经成为一种客观测量方法，它基于驾驶人通过一系列词汇进行客观评价，如颠簸、急加速、急减速、反冲、反应延迟、振荡、波动和后冲等，其中一些词描述得更直白。

汽车性能计算和模拟时需要如图 1.5 所示的完整系统中驾驶人的数学模型。下一节将会讨论“前向”仿真建模，需要一个驾驶人模型在指定循环工况下合理地控制加速踏板和制动踏板。这种方法经常使用简单的 PID 控制器模型，这种模型很适合记录车速，但并不代表实际的驾驶人行为，因为它可能包含一种可预见性因素。

## 1.5 建模准则

本书的理念是基于模型方法分析和理解动力系统的设计，根本目的是解释组件的功能，基于组件的性能通过数学模型描述组件的运行状况。然后将组件组合成一个构成完整的动力系统，模型结果可以作为汽车设计的重要工具。因此，通过分析法了解动力系统基本的运行状况，其分析结果对汽车工程师非常具有实际意义。

书中使用的模型十分简单，并提供一些例子在 MATLAB/Simulink 环境中计算，利用得到的结果来描述模型。因此，很容易通过 MATLAB/Simulink 推导控制方程，对计算结果编程得到完整的步骤。由于本书讲述的都是基本问题，因此无论对学生或工程师来说都需要自己尝试完成所有步骤，因此本书具有指导意义。

在指定的循环工况中计算汽车的性能有两种方法，通常新手很难掌握这两种方法。最常用的模拟是“后向”计算，这就意味着知道并使用速度-位移数据中的每个点得到汽车速度和加速度，也可以通过动力总成的逆向操作计算所有组件的速