



国际电气工程先进技术译丛



Springer

车辆驱动系统 建模与优化(原书第3版)

**Vehicle Propulsion Systems Introduction to
Modeling and Optimization (Third Edition)**

[瑞士] Lino Guzzella

[法] Antonio Sciarretta

邹渊 胡晓松

著
译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

车辆驱动系统建模 与优化 (原书第3版)

Vehicle Propulsion Systems
Introduction to Modeling
and Optimization
(Third Edition)

[瑞士] Lino Guzzella 著
[法] Antonio Sciarretta
邹 渊 胡晓松 译



机械工业出版社

0463218

02

本书介绍了车辆驱动系统的数学建模、后续的系统优化及其控制算法。车辆消耗着世界上数量可观的一次能源，其中多数为石化液态碳氢化合物。降低车辆的燃油消耗刻不容缓。车辆的石化燃料消耗及其对环境的影响引发的世界关注日益增长，激励着工业界和学术界许多团队研发新的车辆驱动系统并探索其系统优化的新方法。作为原书第3版，本书包括了許多新的进展和内容，同时在每章结尾附有习题并在网站上提供答案。

本书可作为车辆工程专业高年级本科生、研究生课程的教材，也可作为机械设计、电气工程和计算机科学等专业学生以及汽车工业设计师和工程师的参考书。

Translation from German language edition:
Vehicle Propulsion Systems by Lino Guzzella
and Antonio Sciarretta

Copyright © 2013 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media

All Right Reserved

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

版权所有，侵权必究。

本书北京市版权局著作权合同登记图字：01-2014-1300 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

车辆驱动系统建模与优化：原书第3版/(瑞士)古
泽拉 (Guzzella, L.) 等著；邹渊，胡晓松译. —北京：
机械工业出版社，2015.2

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文：Vehicle Propulsion Systems
Introduction to Modeling and Optimization
ISBN 978-7-111-49160-6

I. ①车… II. ①古…②邹…③胡… III. ①汽车 -
驱动机构 - 系统建模②汽车 - 驱动机构 - 最佳化
IV. ①U463.218

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 006902 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：赵玲丽 责任编辑：赵玲丽

版式设计：霍永明 责任校对：陈秀丽 李锦莉

责任印制：刘 岚

北京京丰印刷厂印刷

2015 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm × 239mm · 19.75 印张 · 423 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-49160-6

定价：80.00 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

社服务中心：(010)88361066

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

译者序

系统建模及其控制优化是车辆动力驱动系统设计的基础理论和技术,尤其是混合动力驱动系统,存在多个动力源而导致系统构型与工作过程复杂多变,增加了系统与控制设计的难度。本书重点针对上述问题展开,系统地讲述了面向控制的车辆动力驱动系统建模、基于模型的控制设计以及车辆动力驱动系统优化的理论和方法。

在建模方面,依据准静态和动态建模方法讲述了车辆动力驱动系统中各类部件的模型、参数和特性。在控制方面,以最优控制理论为基础,重点探讨了离线最优控制(非因果方法)和在线次优控制(因果方法)及其技术应用途径。

理论和实践相结合是本书一大特点,书中提供了不少工程应用分析与设计的实例,并在每章后附有习题,必将对读者深入理解车辆动力驱动系统建模与控制技术有所裨益。

翻译本书也是自我学习和认识深化的过程。译者曾在瑞士联邦理工大学动态系统与控制研究所与 Lino Guzzella 教授合作研究,并与 Antonio Sciarretta 博士相识,得以全面了解他们的工作并知晓这本著作。欣闻本书将出中文版,主动承担翻译工作。

本书可作为车辆工程专业高年级本科生、研究生课程的教材,也可作为机械设计、电气工程和计算机科学等专业学生以及汽车工业设计师和工程师的参考书。

本书由胡晓松承担 1、2、3、7 章、附录 B 和附录 C 的翻译工作,邹渊承担 4、5、6 章和附录 A 的翻译工作。全书由邹渊定稿。研究生邵冰、刘腾、高玮、魏守洋、张雷和孙超承担部分文字整理工作,在此致谢。

由于译者水平所限,不当之处欢迎批评指正。

译者

原书第3版序言

为什么出第3版?

在过去5年中车辆驱动系统研究领域更加活跃。人们对石化燃料消耗和环境影响的关注日益增加,激发了工业界和学术界许多研究团队提出新的车辆驱动系统并探索新的优化方法。本书第3版增加了这方面的新进展。当然,对所有发现的错误和不当之处也进行了修正。

尤其是:

- 1) 介绍了理解车辆能量消耗的新概念;
- 2) 更新了行驶循环工况章节;
- 3) 扩展了电池驱动纯电动车辆章节,同时增加了当前常用定义以对混合动力车辆分类;
- 4) 扩展了电机、电池模型以及控制的章节;
- 5) 重写并扩展气动混合动力系统章节,更新了相关实例研究;
- 6) 重写并扩展监督控制算法章节。

最重要的增加是在章节后附有习题。这些习题都为最近开发,用于瑞士联邦理工大学车辆动力驱动系统分析课程。希望能对读者有用。答案见网址 <http://www.idsc.ethz.ch>。

致谢

感谢许多同事和学生指出第1版的错误和不妥之处。几位人士帮助我们提高这本专著,尤其是 Philipp Elbert, Christopher Onder, Tobias Ott 和 Christoph Voser 积极参与了修订工作。

2012年7月 Lino Guzzella 和 Antonio Sciarretta

原书第2版序言

为什么出第2版?

在本书第1版出版后有关乘用车燃油经济性的讨论更多了。石化燃料的匮乏以及温室气体有害效应激发了工业界和学术界许多人开展降低汽车油耗的工作。第1版很快售罄也在意料之中。当出版商询问我们是否再版时,我们决定利用该机会来修订本书,以改正几个错误并增加新的内容。

以下列出重要的内容修改和扩展:

- 1) 电池模型的章节被扩展;
- 2) 增加了功率分流装置章节;
- 3) 增加了气动混合系统章节;
- 4) 重写并扩展了控制算法章节;
- 5) 增加两个案例研究;
- 6) 增加动态规划主要内容章节。

致谢

感谢许多同仁和学生指出第1版的错误和不妥之处。几位人士帮助我们提高这本专著,尤其是 Christopher Onder 积极参与了修订工作。

2007年6月 Lino Guzzella 和 Antonio Sciarretta

原书第1版序言

谁应该读这本书？

本书适用于对车辆驱动系统分析和优化感兴趣的人士。其着眼点在于对物理过程采用面向控制的数学描述以及基于模型的系统构型与控制算法的优化设计方法。

本书源于瑞士联邦理工大学机械工程系近年的系列课程，主要针对机械工程或电气工程研究生。先修课是工程类基础课程以及最优控制理论的基础知识。缺乏相关知识的读者建议参看参考文献 [41]。参数优化和最优控制理论的重要结论见附录 B。

为什么写这本书？

个人移动很大程度上依赖于乘用车。这些车辆消耗了世界上多数的一次能源载体，主要为石化液体碳氢燃料。这些车辆的应用，同时伴随着移动需求不可控制地增长，导致降低燃油消耗已经成为社会和经济要优先解决的重大问题。

目前已经提出了降低乘用车燃油消耗的多种方法，在常规办法的基础上也有新的想法。多数（如果不是全部）设想的新系统都比传统方法要复杂。一般需要额外的电机、储能装置和转矩转化装置等以提高系统性能。对于如此复杂的系统，传统的基于经验的设计方法已难奏效。解决该复杂性的唯一办法是采用相关过程的数学模型并系统地应用这些模型（故称为“基于模型”）完成系统设计。本书着眼于该方法并且重点介绍乘用车新型驱动系统设计中常遇到的建模与控制及其系统优化问题。

通过本书可以学到什么？

本书仅分析路面车辆纵向动力学。主要强调能耗分析及能耗最小化，也讨论可驾驶性以及其它性能。首先重在推导简单实用的数学模型来描述车辆、主动力源、能量转化装置和储能系统的动力学行为。通常这些模型用在后续优化中以获得最优的车辆构型和能量管理策略。附录 A 包含建模与优化问题的实例。这些研究案例重在让读者熟悉驱动系优化中所用的方法和工具。

从这本书学不到什么？

本书不考虑不同动力驱动系统的污染排放，因为污染物形成的相关机制过程比燃油消耗的时间尺度更短。此外，一些主动力源污染物排放为零，或者配备尾气处理净化系统后可以接近零目标。对排放感兴趣读者请参见参考文献 [128]。

本书忽略了舒适性相关话题（如 NVH 话题，即噪声、声振粗糙度和振动），但会简单涉及对车辆能耗有影响的侧向和垂向动力学，而忽略垂向和侧向动力学的其他方面，如车辆稳定性和侧翻动力学等。

致谢

在形成书稿的过程中许多人提供了帮助，尤其是老师、同事和学生们促使我们感到有能力写成这本书。几位人士在我们准备书稿中提供直接的帮助：HanSueli Horler 教给我们内燃机热力学基本定律；Alois Amstutz 和 Chris Onder 为系列课程的开发做出贡献；部分博士生的论文被用作几个章节的核心内容（在合适地方引用了该著作）；Brigitte Rohrbach 把我的“意大利式英语”翻译为英语。

2005 年 6 月 Lino Guzzella 和 Antonio Sciarretta

目 录

译者序

原书第3版序言

原书第2版序言

原书第1版序言

第1章 引言	1
1.1 动机	1
1.2 目的	2
1.3 上游过程	3
1.4 车载能量载体的能量密度	7
1.5 获得更好燃料经济性的途径	9
第2章 车辆能量和燃油消耗基本概念	10
2.1 车辆能量损失和性能分析	10
2.1.1 能量损失	10
2.1.2 车辆性能和驾驶性	13
2.1.3 车辆运行模式	15
2.2 循环工况中的机械能需求	16
2.2.1 测试循环工况	16
2.2.2 机械能需求	18
2.2.3 能量消耗的一些讨论	21
2.3 燃油消耗的预测方法和工具	25
2.3.1 平均运行点法	25
2.3.2 准静态法	28
2.3.3 动态法	30
2.3.4 优化问题	31
2.3.5 软件工具	32
2.4 习题	34
第3章 基于内燃机的动力驱动系统	36
3.1 内燃机模型	36
3.1.1 绪论	36

3.1.2	归一化的发动机变量	37
3.1.3	发动机效率的表示	37
3.2	变速器模型	39
3.2.1	绪论	39
3.2.2	传动比的选择	39
3.2.3	变速器效率	41
3.2.4	摩擦离合器和变矩器的损耗	42
3.3	基于内燃机的动力驱动系统的燃油消耗	44
3.3.1	绪论	44
3.3.2	平均工作点法	44
3.3.3	准静态法	46
3.3.4	提高基于内燃机的动力总成单元燃油经济性的措施	48
3.4	习题	50
第4章	电动和混合电动推进系统	51
4.1	电动推进系统	51
4.1.1	已有的概念	51
4.1.2	电动汽车建模	52
4.2	混合电动推进系统	52
4.2.1	介绍	52
4.2.2	系统配置	53
4.2.3	功率流	55
4.2.4	功能分类	57
4.2.5	现有车辆情况	60
4.2.6	混合动力车辆建模	61
4.3	电动机	62
4.3.1	介绍	62
4.3.2	电动机的准静态模型	65
4.3.3	电机动态模型	69
4.4	增程器	78
4.5	电池	79
4.5.1	介绍	79
4.5.2	电池的准静态模型	83
4.5.3	电池的动态建模	91
4.6	超级电容	97
4.6.1	介绍	97
4.6.2	超级电容的准静态模型	98
4.6.3	超级电容的动态建模	101

4.7 电功率链	102
4.7.1 介绍	102
4.7.2 电功率链准静态建模	102
4.7.3 电功率链动态建模	103
4.8 转矩耦合器	104
4.8.1 介绍	104
4.8.2 转矩耦合器的准静态建模	105
4.8.3 转矩耦合器的动态建模	105
4.9 功率分配装置	106
4.9.1 介绍	106
4.9.2 功率分配装置的准静态建模	106
4.9.3 功率分配装置的动态建模	110
4.10 习题	113
第5章 非电混合驱动系统	121
5.1 短期存储系统	121
5.2 飞轮	123
5.2.1 简介	123
5.2.2 飞轮储能器的准静态建模	126
5.2.3 飞轮储能器的动态建模	128
5.3 无级变速器	129
5.3.1 简介	129
5.3.2 无级变速器的准静态建模	130
5.3.3 无级变速器的动态建模	132
5.4 液压储能器	133
5.4.1 简介	133
5.4.2 液压储能器的准静态建模	134
5.4.3 液压储能器的动态建模	138
5.5 液压泵/马达	139
5.5.1 简介	139
5.5.2 液压泵/马达的准静态建模	140
5.5.3 液压泵/马达的动态建模	141
5.6 气动混合发动机系统	142
5.6.1 简介	142
5.6.2 运行模式	143
5.7 问题	147
第6章 燃料电池推进系统	148
6.1 燃料电池电动车辆和燃料电池混合动力车辆	148

6.1.1 简介	148
6.1.2 概念车发展现状	149
6.2 燃料电池	150
6.2.1 简介	150
6.2.2 燃料电池的准静态建模	158
6.2.3 燃料电池的动态建模	169
6.3 重整器	171
6.3.1 介绍	171
6.3.2 燃料重整器的准静态建模	173
6.3.3 燃料重整器的动态建模	176
6.4 习题	176
第7章 监督控制算法	178
7.1 动力总成单元控制	178
7.2 启发式能量管理策略	180
7.3 最优能量管理策略	183
7.3.1 最优控制问题的形成	183
7.3.2 非因果控制方法(离线优化)	185
7.3.3 因果控制方法(在线次优控制器)	190
7.4 习题	197
附录	204
附录A 实例研究	204
A.1 实例学习1:传动比优化	204
A.1.1 介绍	204
A.1.2 软件结构	204
A.1.3 结果	205
A.2 实例学习2:双离合系统——换挡策略	207
A.2.1 介绍	207
A.2.2 模型描述和问题的公式化	207
A.2.3 结论	209
A.3 实例学习3:内燃机和飞轮动力系统	209
A.3.1 介绍	209
A.3.2 建模和试验验证	210
A.3.3 数值优化	211
A.3.4 结论	212
A.4 实例学习4:并联式混合动力车辆优化控制	213
A.4.1 简介	214
A.4.2 建模和试验验证	214

XII 车辆驱动系统建模与优化 (原书第3版)

A. 4.3	控制策略	215
A. 4.4	结果	217
A. 5	实例研究 5: 最优车辆跟随策略	222
A. 5.1	建模和问题描述	222
A. 5.2	指定最终距离的最优控制	223
A. 5.3	不指定最终距离的最优控制	226
A. 6	实例研究 6: 用于竞赛的燃料电池电动汽车的燃料最优轨迹	229
A. 6.1	建模	230
A. 6.2	最优控制	233
A. 6.3	结果	235
A. 7	案例研究 7: 串联混合动力公交车最优控制	236
A. 7.1	建模和验证	237
A. 7.2	最优控制	240
A. 7.3	结果	242
A. 8	实例研究 8: 气动混合发动机	244
A. 8.1	面向控制的模型	245
A. 8.2	最优控制策略	249
A. 8.3	仿真结果	251
A. 8.4	试验验证	253
附录 B	最优控制理论	256
B. 1	参数优化问题	256
B. 1.1	无约束问题	256
B. 1.2	数值解法	257
B. 1.3	等式约束极值问题	259
B. 1.4	不等式约束极值问题	261
B. 2	最优控制	262
B. 2.1	引言	262
B. 2.2	基本问题的最优控制	263
B. 2.3	哈密尔顿一次积分	267
B. 2.4	最终状态确定的最优控制	267
B. 2.5	不定最终时间最优控制	268
B. 2.6	输入带边界的最优控制	268
附录 C	动态规划	271
C. 1	引言	271
C. 2	原理	272
C. 2.1	问题定义	272
C. 2.2	最优性原理	272
C. 2.3	确定性动态规划	273
C. 2.4	随机动态规划	273

C.2.5 复杂程度	274
C.3 算法实现的问题	274
C.3.1 网格选择	274
C.3.2 最近邻点或插值	275
C.3.3 标量或集的执行	276
C.3.4 实例：中度并联混合动力汽车的转矩分配	277
参考文献	281

第 1 章 引 言

引言部分展示了如何将本书中所讨论的问题嵌入到一个更广泛的背景中。首先,介绍了后续分析的动机和目标。之后,本章描述了完整的能量转换链,即从可用的一次能量源开始到行驶距离结束。通过采用能量转换效率平均值,对比了一些可用选项。这些分析也展示了“上游”过程的重要性。同时也强调了所选择的车载能源载体(燃料)的重要性。特别强调的是,“燃料”的能量密度和“燃料”补给过程中所涉及的安全问题。第 1 章最后一节列出了用于降低乘用车辆能源消耗的最主要的可用选项。

1.1 动机

编写本书最主要的动机是全球范围内乘用车数量不可抑制的快速增长。如图 1.1 所示,今天有 8 亿辆乘用车在运营。比这些数字更有意思的是图例中所示的在美国的数字趋势(在日本和欧洲可以看到同样的趋势):在富裕阶层中汽车密度在每 1000 居民拥有约 400~800 辆汽车的比例上达到了饱和。经验证明,个人交通需求会随着社会经济的可能性而提高。因此,如果上述提到汽车的密度是世界其他区域可能的未来状况,可以预想到会发生很多严重的问题。在 2007 年,像中国(13 亿居民)和印度(11 亿居民)这样的国家,1000 个居民拥有约 30 辆汽车的密度。相应地,在未来 20 年,这些国家的汽车密度将有大幅度提高,从而会进一步增加燃料价格,并导致严重的环境问题。

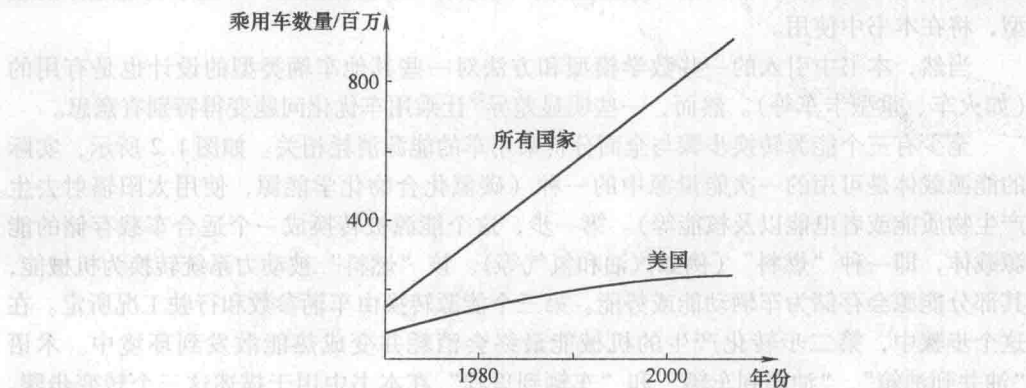


图 1.1 世界范围内的乘用车运营数量发展示意图

面对这些趋势,很显然,必须开发新的燃料源并大幅降低乘用车燃料消耗量。本书的重点在于第二个途径。

1.2 目的

本书最主要的目的是介绍数学模型和优化方法,以系统地最小化车辆动力系统的能量消耗。分析的主体是乘用车,即拥有以下性质的车辆:

- 1) 能源自主,不依赖固有能源(电网)供给;
- 2) 燃料补给时间(相比两次添加燃料之间的行车时间)可以忽略不计;
- 3) 可运输2~6个人,及一些有效载荷;
- 4) 0~100km/h加速约10~15s,或者在法定最高速度下能在5%斜坡上行驶^①。

这些要求,在过去100年已经发展成为一种准标准,大幅减少了可用的选项。特别是第一个和第二个要求仅能有少数的车载能源存储系统能满足;性能的要求则限制车辆的最大功率必须远大于常用驾驶条件下所需的功率。

所有考虑的一个关键因素是车载能源系统。这个因素必须:

- 1) 尽可能提供最高能量密度^②;
- 2) 允许尽可能使用最短的加油时间;
- 3) 在生产、经营和回收中使其安全,并不会导致环境危害。

用于实现现代化尤其是未来推进系统的部件数会极大增加。改善性能和燃料经济性仅能通过使用复杂部件来实现。当然,这些子系统相互影响。从而,可能的最好结果不能从每个单独部件的独立优化中获取。然而,由于“指数增长曲线”,全局系统优化是不可能用启发式的方法实现的。唯一可行的应对这种困境的途径是开发部件的数学模型和使用基于模型的数值方法去优化系统结构和必要的控制算法。这些模型必须能推断系统的特性。事实上,这样的优化方法经常发生在实际部件可得之前,或者要求部件在不可预料条件的情况中工作。基于这些理由,只有第一原理性模型,即基于物理定律的模型,将在本书中使用。

当然,本书中引入的一些数学模型和方法对一些其他车辆类型的设计也是有用的(如火车、重型卡车等)。然而,一些明显差异^③让乘用车优化问题变得特别有意思。

至少有三个能源转换步骤与全面分析乘用车的能源消耗相关。如图1.2所示,实际的能源载体是可用的一次能源中的一种(碳氢化合物化学能源,使用太阳辐射去生产生物质能或者电能以及核能等)。第一步,这个能源被转换成一个适合车载存储的能源载体,即一种“燃料”(例如汽油和氢气等)。该“燃料”被动力系统转换为机械能,其部分能源会存储为车辆动能或势能。第三个能源转换由车辆参数和行驶工况所定。在这个步骤中,第二步转化产生的机械能最终会消耗并变成热能散发到环境中。术语“油井到油箱”、“油箱到车辆”和“车辆到里程”在本书中用于描述这三个转变步骤。

① 这些数值是象征性的。不言而喻的是所研究车辆的行驶性能范围是很宽的。

② 能量密度为:推进系统净需求能量/推进系统所需能源载体质量,其中后者不包含车载能量转换设备。

③ 如对自主性的要求和以部分载荷运行状况为主直接与优化问题相关。

不幸的是所有转化过程都会导致许多能量损耗。

本书不解决任何与“从油井到油箱”能源转换相关的控制问题。用于该转换的系统是非常大的发电厂、炼油厂或者其他过程工程系统。当然，它们的平均效率值和污染排放对经济和生态有重要的影响。然而，这个领域出现的问题和用于解决这些问题的方法属于不同类型。

下一节介绍了最重要的能源转换方法。有了这些信息，初步估计总的能耗是可能的。需要注意的是，即使所有可能的情况下^①，也不容易进行正确的对比。有兴趣的读者可以参考文献[44]进行更广泛的探讨。

影响“车辆到里程”能源转换的最主要的物理现象将在第2章讨论，主要引入准静态描述（本术语的精确定义见后），但动态模型也会进行介绍。在此背景下，理解车辆所跟随的行驶工况所产生的影响是很重要的。如上所述，只有那些对能量消耗有很大影响的效应会在本书中考虑。

本书的重点在于“油箱到车辆”的能源转换系统的建模和优化。对于该问题，最重要部件的数学模型在第3章~第6章中介绍。第7章介绍能源消耗最小化的方法。所有的这些方法都是基于模型的，即它们依赖于前述章节所引入的数学模型，及系统的优化过程用于寻找精确定义优化问题的（局部）最小值。附录A中包括了8个案例研究；附录B总结了参数优化和最优控制理论重要结果；附录C介绍了动态规划的主要理念。

1.3 上游过程

如上所述，对“从油井到油箱”能量转换过程的详细分析不在本书范围之内。然而从综合分析的角度来看，这些转换系统的效率和经济性又是十分重要的组成部分。鉴于此，本节将针对主要的能量转换系统进行初步但十分有指导意义的分析。

图1.3展示了复杂能量转换网络的一部分。图中的效率估计得出，且对现有技术有效。CO₂因子表示燃烧单位天然气或煤等排放的二氧化碳量与燃烧单位石油所排放的二

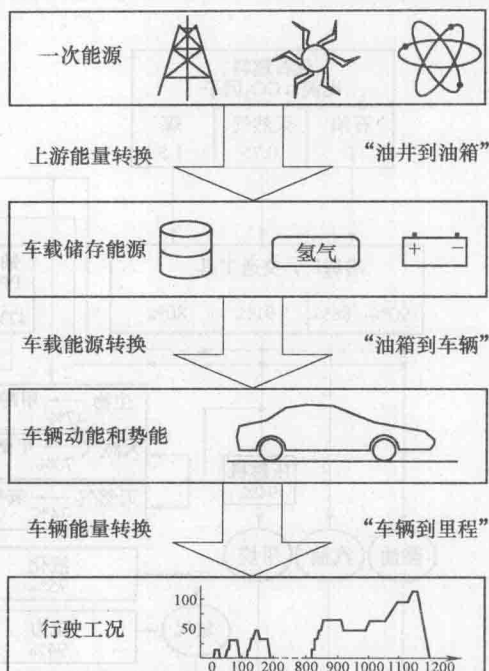


图 1.2 能量转换过程的主要元素

① 如“油井到里程”的总二氧化碳排放会经常用于两种竞争方法的对比中。然而，这样的讨论是不完整的，除非在车辆、电厂、炼油厂中涉及的“灰色”能量被考虑到。更困难的是，如何考虑与核废料存储、风车带来的土地退化或燃煤发电氮氧化物排放相关的问题？