



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

插电式混合动力 与纯电动汽车的 能量管理策略

Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles

[加拿大] 谢尔顿 S. 威廉森 (Sheldon S. Williamson) 著

王典 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

插电式混合动力与纯电动 汽车的能量管理策略

[加拿大] 谢尔顿 S. 威廉森 (Sheldon S. Williamson) 著
王 典 等译



机械工业出版社

Translation from English language edition:

Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles by Sheldon S. Williamson.

Copyright © 2013 Springer New York. Springer New York is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由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: 01-2014-4452 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

插电式混合动力与纯电动汽车的能量管理策略/(加) 威廉森 (Williamson, S. S.) 著; 王典等译. —北京: 机械工业出版社, 2015. 12

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles

ISBN 978-7-111-52395-6

I. ①插… II. ①威… ②王… III. ①电动汽车—能量管理系统
IV. ①U469.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 301117 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: 顾 谦 责任编辑: 阎洪庆

版式设计: 霍永明 责任校对: 肖 琳

封面设计: 马精明 责任印制: 乔 宇

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2016 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 14.25 印张 · 277 千字

0001—2600 册

标准书号: ISBN 978-7-111-52395-6

定价: 69.00 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

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

为找到一种在车辆上安全、可持续、环保，并且可以商业化运用电能的方法，本书针对电动汽车和插电式混合动力电动汽车传动系的拓扑结构和能量存储系统，混合动力和燃料电池混合动力电动汽车及其电池技术，车载电源的电池管理、充电以及电网和可再生能源接口，为电动汽车/插电式混合动力电动汽车充电的电力电子变换器拓扑结构以及其在智能电网中的应用、效率分析等方面进行了阐述。

本书使用了大量具体的实例，论述生动形象，易于被读者接受。

本书可供从事电动汽车和插电式混合动力电动汽车的工程师及相关研究的技术人员、研究生参考阅读。

译 者 序

能源短缺和环境污染是当今世界面临的两大难题，可商业化的、可持续的电动汽车和插电式混合动力电动汽车是汽车工业发展过程中出现的一种有别于传统燃油汽车的新型汽车。由于其在经济和环境等方面的综合优势，发展电动汽车和插电式混合动力电动汽车被认为是当前解决这两大难题的有效途径。

能源管理策略是电动汽车和插电式混合动力电动汽车控制系统的核心，基于特定的能量管理策略，根据不同的行驶工况，采用不同的动力系统工作模式，可获得传统汽车所不能达到的优化控制目标。

本书由北京林业大学车辆工程系王典博士组织翻译，李佳子、李泽慧、周汀、潘林俊、周兆辉、陈静谊、程伟、杜倩、丁小康、冯二萍、韩东涛、黄青青、郝亦荣、孔建磊、蒲帅、石晟、孙治博、王璐、魏超、王建利等人共同参与了本书的翻译工作。由于书中涉及的领域和专业术语较多，限于译者的水平，译文可能存在不妥或失当之处，敬请读者批评指正。

译 者

原 书 前 言

在不久的将来，交通电气化一定会成为现实。当前，汽车制造商以及交通运输业零部件制造商正投入巨资研究开发清洁和高效的电力生产、电力能源存储系统，先进的电力电子和电动机驱动器设备。所有主要的运输工业部门，比如汽车，铁路/地铁/电车，航空、太空、海洋以及深海潜水器都在朝着电力驱动系统架构的方向发展。此外，世界各国政府都在大力支持可商业化的、可持续的电动汽车和插电式混合动力电动汽车（EV/PHEV）的使用。除了以上激励措施，由于智能电网的应用，可再生能源系统正变得越来越受欢迎。纯粹的可再生能源（太阳能光伏、风能）与现有的交流电网和未来 EV/PHEV 的集成融合正成为一个流行趋势。纯粹的可再生能源也被视为承担 EV/PHEV 大量涌入、发展前进的唯一能源供应。因此，这样一个简单的完全可持续的方法将确保未来的 EV/PHEV 电池充电基础设施完全独立于交流电网（化石燃料）。写作本书的目的在于为当前和未来的 EV/PHEV 的商业化解决实际问题。本书的一些章节主要集中讨论对于当前以及未来的 EV/PHEV 动力传动系的电力电子设备和电动机驱动器的解决方案。EV/PHEV 的动力传动系架构，会被详细讨论并强调组件级的设计细节。EV/PHEV 电池技术关键是解释相应的车载能源管理问题。对于当前和未来的电池充电基础设施的电力电子变换器拓扑也会被详细讨论。最后，EV/PHEV 电池与可再生能源以及交流电网相连也会结合具体实例被详细讨论。最后，本书给读者提供了一个在现有和未来更多的电力传动系拓扑的“油井到车轮”效率分析的想法。本书对于工程师和掌握入门级 EV/PHEV 知识的研究人员是有用的，对于大学教师、研究生和工作中的行业研究人员应该也是很有意义的。

原书致谢

我要向我的妻子 Smitha 所给予我不断的鼓励和爱的支持，表达衷心的感谢。我也要向我的父母和家人给予我的无尽的支持和祝福表达我的感激。同样，我也要衷心地感谢我的研究生 Rabbani Basha。没有 Rabbani 的帮助，本书不可能完成。我还要感谢我的研究生 Florence Berthold, Giampaolo Carli, Pablo Cassani, Arash Shafiei。由于他们出色的工作和奉献精神，本书的内容可以保持在一个高质量的水平上。

目 录

译者序

原书前言

原书致谢

第 1 章 概述	1
1.1 背景	1
1.2 混合动力电动汽车基础知识	2
1.2.1 混合动力电动汽车基本概念	2
1.2.2 混合动力电动汽车传动系的工作原理	2
1.3 仿真平台: 高级车辆仿真器 (ADVISOR) 软件	3
参考文献	5
第 2 章 电动汽车和插电式混合动力电动汽车传动系的拓扑结构	6
2.1 电动汽车、混合动力电动汽车和插电式混合动力电动汽车的概念	6
2.1.1 电动汽车	6
2.1.2 混合动力电动汽车	6
2.1.3 插电式混合动力电动汽车	7
2.2 混合动力电动汽车传动系的拓扑结构	7
2.2.1 基本的混合动力电动汽车传动系配置	7
2.2.2 当前和未来的混合动力电动汽车的拓扑结构	9
2.3 插电式混合动力电动汽车传动系的拓扑结构	9
2.4 纯电动汽车传动系的拓扑结构	11
参考文献	12
第 3 章 电动汽车和插电式混合动力电动汽车能量存储系统	13
3.1 简介	13
3.2 电池	13
3.2.1 理想模型	14
3.2.2 线性模型	14
3.2.3 戴维南模型	15
3.3 超级电容器的电气模型	16
3.3.1 双层超级电容器模型	16

3.3.2 电池/超级电容器混合模型	17
3.4 飞轮储能系统的电气模型	19
3.5 燃料电池的工作原理	21
3.5.1 可再生燃料电池电源的详细电气模型	23
参考文献	25
第4章 混合动力和燃料电池混合动力电动汽车	26
4.1 混合动力电动汽车的基本原理和概念	26
4.1.1 混合动力电动汽车的概念	26
4.1.2 混合动力电动汽车传动系的工作原理	26
4.2 串联式与并联式混合动力电动汽车传动系的效率	27
4.2.1 简介	27
4.2.2 基于部件级的效率分析	28
4.3 不同的行驶模式和再生制动效率分析	29
4.3.1 简介	29
4.3.2 车辆的规格及建模	31
4.3.3 基于多样化行驶模式的总效率比较	33
4.4 再生制动效率分析	35
4.5 总电气传动系效率分析	36
4.6 燃料电池混合动力电动汽车: 建模与控制	38
4.6.1 建模环境	38
4.6.2 功率组件的建模与选择	38
4.6.3 燃料电池系统	39
4.6.4 电池系统	39
4.6.5 电动机-控制器系统	41
4.6.6 基准车辆	42
4.6.7 小结	43
4.6.8 控制燃料电池混合动力电动汽车	43
4.7 燃料电池和牵引系统的电力电子接口	47
4.7.1 简介	47
4.7.2 动力传动系配置	47
4.7.3 功率部件建模	49
4.8 燃料电池插电式混合动力电动汽车的概念	51
4.8.1 燃料电池混合动力电动汽车架构	51
参考文献	52
第5章 电动汽车和插电式混合动力电动汽车的电池技术	55
5.1 电动汽车和插电式混合动力电动汽车的能量存储问题	55

5.1.1 电池类型	56
5.1.2 电池模型与仿真	58
5.1.3 锂离子电池	68
5.1.4 锂离子电池的特性	70
5.1.5 循环寿命与荷电状态	70
5.1.6 关键问题的解决方案	71
参考文献	73
第6章 车载电源电池管理	76
6.1 电池组电压均衡的问题	76
6.1.1 简介	76
6.2 传统和先进均衡器介绍	76
6.2.1 电阻式均衡器	76
6.2.2 电容式均衡器	77
6.2.3 电感式均衡器	78
6.2.4 Cuk 均衡器	78
6.2.5 基于变压器的均衡器	79
6.2.6 新型电池电压均衡器	80
6.2.7 小结	81
6.3 电池电压均衡的经济性	82
6.3.1 简介	82
6.3.2 电池均衡器的重要性	82
6.3.3 插电式混合动力电动汽车/电动汽车电池均衡器	83
6.3.4 电池均衡器的成本分析	84
6.3.5 插电式混合动力电动汽车的经济性分析	85
6.3.6 小结	88
6.4 新型电池均衡器的设计和性能	89
6.4.1 简介	89
6.4.2 设计规格	89
6.4.3 新型电池电压均衡器的电路分析	91
6.4.4 新型电池电压均衡器的数学模型	93
6.4.5 仿真与实验结果的对比分析	97
6.4.6 典型均衡器与样机之间的实验结果比较	102
6.4.7 均衡器连接方式	103
6.4.8 小结	104
6.5 电池均衡器的控制电路设计	105
6.5.1 简介	105
6.5.2 控制器功能	105

6.5.3 锂离子电池的等效电路模型	106
6.5.4 V_{oc} 的确定	107
6.5.5 V_{oc} 的估计方法	108
6.5.6 电池均衡器控制策略	109
6.5.7 新型电池均衡器控制器建模	111
6.5.8 电池均衡器控制系统简化	111
6.5.9 电池均衡器控制器的数学推导	113
6.5.10 频域下的电池均衡器控制器稳定性分析	117
6.5.11 时域下的电池均衡器控制器稳定性分析	120
6.5.12 新型电池均衡器实验结果分析	122
6.5.13 理论和实验结果比较	123
6.5.14 小结	125
参考文献	125

第7章 电动汽车/插电式混合动力电动汽车的电池充电：电网和可再生 能源接口

127

7.1 简介	127
7.2 电池的充电方式	128
7.2.1 电池参数	128
7.2.2 充电方式	129
7.2.3 充电的终止方式	131
7.2.4 充电的程序设定	132
7.3 电网充电	134
7.3.1 线路的稳定问题	135
7.3.2 逆变器畸变和直流电的接入	135
7.3.3 本地的分布配置	136
7.4 可再生能源充电	136
7.4.1 光伏系统成为电池充电的基本组成部分	136
7.4.2 光伏阵列模型	137
7.4.3 控制系统的设计	138
7.4.4 仿真结果	143
7.4.5 小结	144
7.5 为电动汽车和插电式混合动力电动汽车充电的电力电子技术	145
7.5.1 插电式混合动力电动汽车应用所需的电力电子技术	145
7.5.2 光伏系统的传统结构	145
7.5.3 中央逆变器	146
7.5.4 串联式逆变器	146
7.5.5 模块式逆变器	147

7.6 光伏逆变器的拓扑结构	147
7.6.1 配有 DC-DC 变换器和隔离器的光伏逆变器	148
7.6.2 只配有 DC-DC 变换器的光伏逆变器	149
7.6.3 只配有隔离器的光伏逆变器	149
7.6.4 无 DC-DC 变换器和隔离器配置的光伏逆变器	149
7.6.5 可能的光伏互连方案	150
7.6.6 推荐的结构	150
7.7 功率变换器的拓扑结构	153
7.7.1 最大功率点跟踪器环节	153
7.7.2 整流器/逆变器环节	153
7.7.3 充电器环节	153
参考文献	154

第 8 章 为电动汽车/插电式混合动力电动汽车充电的电力电子变换器拓扑结构

157

8.1 为电动汽车/插电式混合动力电动汽车充电的电网和光伏系统	157
8.1.1 电力电子逆变器的拓扑结构	157
8.1.2 推荐的功率变换拓扑结构	158
8.1.3 Z 型变换器	159
8.2 用于电网和光伏系统互连的 DC-DC 变换器和 DC-AC 逆变器	164
8.2.1 双向隔离 DC-DC 变换器的设计	164
8.2.2 匝数比的计算	165
8.2.3 DC-DC 变换器的等效平均电路的演变	165
8.2.4 Z 型电路的设计: 电容	166
8.2.5 Z 型电路的设计: 电感	167
8.2.6 Z 型变换器的交流分析	167
8.2.7 备注	168
8.2.8 成本	168
8.2.9 可靠性	169
8.2.10 与光伏电源和电网交互的动态性能	169
8.2.11 设计的灵活性	170
8.3 为电动汽车/插电式混合动力电动汽车充电的新型集成式 DC-AC-DC 变换器	170
8.4 基于高频变压器的隔离式充电器的拓扑结构	170
8.4.1 背景	170
8.4.2 隔离器和直流环节	170
8.5 组件的设计	171
8.5.1 隔离变压器匝数比的计算	171
8.5.2 直流环节滤波器	171

8.5.3 逆变器桥和 DC-DC 变换器的功率器件	171
8.6 评估	172
8.6.1 成本	172
8.6.2 可靠性	173
8.6.3 与光伏电源和电网交互的动态性能	173
8.6.4 设计的灵活性	173
8.7 无变压器的充电器拓扑结构	173
8.7.1 背景	173
8.7.2 组件的设计	175
8.8 评估	176
8.8.1 成本	176
8.8.2 可靠性	176
8.8.3 与光伏电源和电网交互的动态性能	177
8.8.4 设计的灵活性	177
8.9 测试系统的建模与仿真结果	177
8.9.1 Z 型变换器	177
8.9.2 无电池系统 (方案 1)	178
8.9.3 带电池系统 (方案 1)	178
8.9.4 带电池系统 (方案 2)	180
8.9.5 I_{PV} 纹波、光伏利用率、最大功率点跟踪器	182
8.9.6 功率损耗 (效率)	185
8.9.7 基于可替代 Z 型变换器中拓扑结构的效率结果	190
8.10 结论	191
8.11 配置直流环节的高频隔离式拓扑结构	191
8.12 无变压器的拓扑结构	192
8.12.1 动态性能	192
8.13 效率	192
参考文献	194
第 9 章 电动汽车/插电式混合动力电动汽车在智能电网中的应用	196
9.1 简介	196
9.2 车辆到电网与电网到车辆的能量传输问题	196
9.3 车辆到电网的辅助服务	197
9.4 车辆到家庭和从家庭到车辆的概念	197
9.5 互连条件	198
9.5.1 变换器损耗的计算	198
9.5.2 变换器的拓扑结构	199
9.6 案例分析	201

XII 插电式混合动力与纯电动汽车的能量管理策略

9.6.1 方案	201
9.6.2 小结	202
9.7 结论	204
参考文献	205
第 10 章 电动汽车和插电式混合动力电动汽车油井到车轮的效率分析	206
10.1 油井到车轮的效率分析	206
10.2 先进车辆传动系的理论效率计算	207
10.3 研究车辆的仿真设定	209
10.4 基于混合动力电动汽车和燃料电池汽车传动系仿真结果的总效率分析	210
10.5 混合动力电动汽车和燃料电池汽车传动系的加速性能和油井到车轮的温室气体排放	212
10.6 未来的研究工作	213
参考文献	214

第 1 章 概 述

1.1 背景

现今社会存在的最主要的汽车形式为传统汽车（CV），即以石油作为唯一能量来源的汽车。然而石油短缺这一引起世界范围关注的关键问题，使得昂贵的石油价格成了传统汽车使用者所面临的挑战。此外，传统汽车排放的温室气体（GHG）导致其难以满足严格的环境法规。作为世界经济的主要构成之一，交通运输行业在日常生活中起着不可或缺的作用。它对于全球环境问题、全球温室气体排放问题、娱乐和生活方式问题有着一定的影响，但不仅仅局限于它们。自 20 世纪初期，现代化交通的基本模式改变了世界。众所周知，交通运输是以石油为基础的人类活动，大约消耗了使用总能源的 21% 以上。自 1998 年以来，相比之下在交通运输中对石油的使用超过了其他行业。例如图 1.1 和图 1.2 所示，交通运输消耗了将近 2/3 在北美使用的石油，同样的从二氧化碳排放量的角度分析，交通部门占到了总排放量的一半以上。此外，假设在未来的十年中，一些发展中国家在此行业变得成熟，那么车辆带来的总污染将在 15~20 年内惊人地增长，达到现在车辆污染量的 5 倍^[1-8]。严重的环境问题已经引起了公众的关注。近几十年，汽车制造商和研究人员的注意力都集中在开发能够有效利用能源且安全无污染的陆地车辆上，而电动汽车（EV）被认为是先进车辆（AV）的最终类别。然而，由于未成熟的电池技术，电动汽车的性能在很大程度上受到其搭载的电池的限制。因此，至少在未来的几年内，混合动力电动汽车（HEV）是替代当前广泛应用的传统汽车的一种实际的选择。

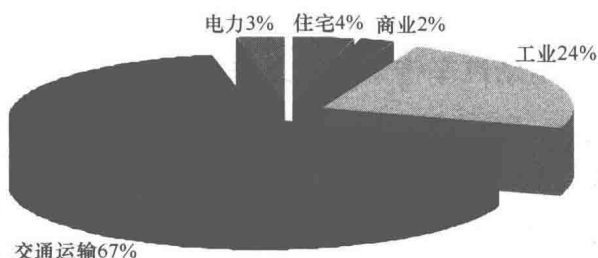


图 1.1 2006 年石油使用量（按行业分）

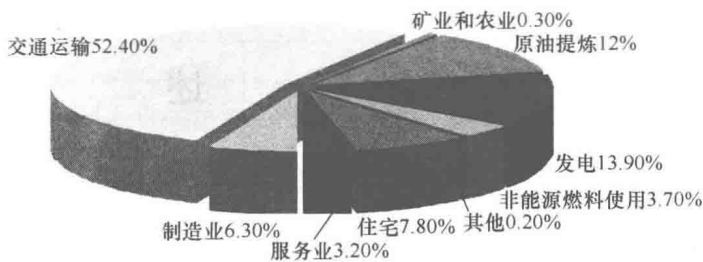


图 1.2 2006 年二氧化碳排放量

1.2 混合动力电动汽车基础知识

1.2.1 混合动力电动汽车基本概念

尽管有很多不同种类的可替代车辆（AV）存在，如 EV、HEV 和燃料电池汽车（FCV），HEV 被认为是传统汽车在不久的将来最实际有效的替代品。这是因为相比于内燃机（ICE）的特性，电动机的特性更加出色。同样，尽管有不同形式的能源组合，如电气与机械的能源组合（如飞轮）、电气与化学的能源组合（如燃料电池），燃料能源与电气能源的组合被认为是最可接受的，这基于成熟的内燃机技术和完善的现代电力电子技术的结合使用。

HEV 的定义是，一辆汽车的驱动力通常是由两种或两种以上的能源提供，且其中一种是电能。除此之外，HEV 传动系采用双向功率，以重新利用在制动过程中损失的热量，这在传统汽车中是直接损失掉的。令人惊奇的是，HEV 的历史和汽车本身一样悠久。然而最初采用电动机并不是为了减少燃料消耗，而仅仅是为了帮助内燃机驱动车辆。最近，采用混合动力驱动系统的目的更加多样：

- 提供充足的动力，以满足驱动范围的需求。
- 提供足够的转矩，以满足车辆的性能需求。
- 与传统汽车相比实现更高的效率，同时尽可能地降低燃料消耗量以及温室气体的排放量。

1.2.2 混合动力电动汽车传动系的工作原理

如前所述，HEV 的电力传动系通常图解表示成双向功率流。图 1.3 描述了一种典型 HEV 功率流的概念。十分清楚的是，HEV 可以选择一个特定的路径，以便自由地结合功率流来满足负载需求。HEV 控制策略可以依据功率流为不同的目的设计不同的组合。

如图 1.3 所示，考虑到传动系是燃料能量和电能的组合，HEV 可以在以下 9

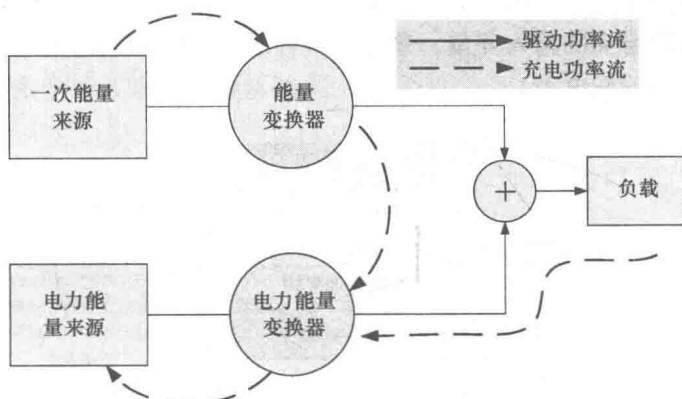


图 1.3 混合动力传动系的功率流示意图

个模式下工作^[9]：

- 仅燃料传动系驱动负载。
- 仅电力传动系驱动负载。
- 燃料和电力传动系同时驱动负载。
- 电力传动系从负载处充电（再生制动）。
- 电力传动系从燃料传动系获得动力（内燃机充电电池）。
- 电力传动系由内燃机和再生制动充电。
- 内燃机提供动力给电力传动系，为电池充电并同时驱动车辆。
- 燃料传动系提供动力给电力传动系，电力传动系驱动车辆（串联式 HEV）。
- 燃料传动系驱动负载，负载将能量传回电力传动系。

相比于目前使用在传统汽车上的单一传动系，这种自由选择合适的功率流组合创造了极大的灵活性。然而，这种运行特性引入了一系列有趣的效率问题，即需要适当地设计燃料传动系及电力驱动系统。从本质上说，对整个系统的控制策略最合适以及有利的设计是至关重要的。

1.3 仿真平台：高级车辆仿真器（ADVISOR）软件

现在存在很多软件包来为 HEV 传动系建模。这些软件包大多数存在于 Matlab/Simulink 环境下，具备正向或逆向的动态解算能力。而高级车辆仿真器（ADVISOR）结合了正向或逆向的建模能力，使之能够运用相当精确的动态解决方案来监管不同传动系部件的性能^[10-12]。

ADVISOR 通过整合物理结构模型和传动系部件模型来为车辆建模，如图 1.4