

混合动力汽车 能量管理策略与群智能优化

Energy Management Strategy
and Swarm Intelligence Optimization
for Hybrid Electric Vehicles

陈泽宇 周楠 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书总结了作者团队近年来在混合动力汽车能量管理策略领域的研究成果,共分8章:第1章介绍新能源汽车发展背景及现状;第2章介绍混合动力汽车的系统结构及控制原理;第3章介绍电动汽车城市运行工况的构建方法;第4章介绍混合动力能量管理策略全生命周期设计框架;第5章介绍能量管理策略的粒子群优化方法;第6章介绍能源价格波动情况下的模拟退火粒子群优化策略;第7章介绍基于粒子群算法的短时预测能量管理策略设计方法;第8章介绍考虑电池安全性的庞特里亚金极小值原理优化算法。

本书可作为从事新能源汽车领域的技术人员提供参考,也可作为高校车辆工程、自动化类等专业的研究生课程教材。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

混合动力汽车能量管理策略与群智能优化/陈泽宇,周楠著. —北京:清华大学出版社,2023.8
ISBN 978-7-302-64141-4

I. ①混… II. ①陈… ②周… III. ①混合动力汽车—能量管理系统 IV. ①U469.7

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第131898号

责任编辑:许 龙

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:曹婉颖

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市君旺印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm 印 张:9

字 数:196千字

版 次:2023年8月第1版

印 次:2023年8月第1次印刷

定 价:56.00元

产品编号:079924-01

前言

发展节能与新能源汽车关乎国家能源安全与经济命脉,是实现“碳达峰、碳中和”目标的重要举措。在此背景下,混合动力与电动汽车已经成为当前汽车工业发展的重要方向。能量管理策略是混合动力汽车关键技术之一,本书总结了作者团队近年来在该领域的研究成果,阐述了行驶工况构建方法、混合动力系统能量管理策略以及群智能优化方法,希望能为从事新能源汽车领域的技术人员提供参考,也可作为高校研究生相关课程的教材。

本书分 8 章:第 1 章介绍新能源汽车发展背景及现状;第 2 章介绍混合动力汽车的系统结构及控制原理;第 3 章介绍电动汽车城市运行工况的构建方法,并给出了沈阳城市工况构建实例;第 4 章介绍混合动力能量管理策略全生命周期设计框架;第 5 章介绍能量管理策略的粒子群优化方法;第 6 章介绍能源价格波动情况下的模拟退火粒子群优化策略;第 7 章介绍基于粒子群算法的短时预测能量管理策略设计方法;第 8 章介绍考虑电池安全性的庞特里亚金极小值原理优化算法。

本书由东北大学陈泽宇、周楠撰写,参加撰写的还有张渤、张浩、张清、刘博、方志远、王子荣等。本书的出版得到了国家自然科学基金项目(51977029)与东北大学 PBL 教学法研究与应用项目(NEUJX04224)的资助,谨在此表示衷心感谢!

受作者水平所限,书稿内容难免存在不当之处,敬请谅解。书中算法代码核心部分已开放至附录中,并配有电子版的完整代码,如有需要可下载。希望以此书为交流平台,共同促进新能源汽车控制技术的发展进步。

作 者

2022 年 12 月

清华大学出版社

目录

第 1 章	绪论	1
1.1	新能源汽车的分类	2
1.1.1	纯电动汽车	2
1.1.2	混合动力汽车	2
1.1.3	燃料电池汽车	3
1.2	新能源汽车的发展现状	3
1.2.1	国内发展概述	3
1.2.2	国外发展概述	5
1.3	混合动力系统与能量管理技术	6
1.4	本章小结	7
第 2 章	混合动力汽车结构与原理	8
2.1	混合动力系统结构	8
2.1.1	串联式混合动力系统	8
2.1.2	并联式混合动力系统	9
2.1.3	混联式混合动力系统	10
2.2	串联式混合动力系统控制模式	11
2.3	并联式混合动力系统控制模式	13
2.4	混联式混合动力系统控制模式	14
2.5	本章小结	19
第 3 章	行驶工况构建方法	20
3.1	行驶工况概述	20
3.1.1	行驶工况的概念	20

3.1.2	国外典型行驶工况	20
3.1.3	国内典型行驶工况	23
3.2	行驶工况构建算法	23
3.2.1	工况构建步骤	23
3.2.2	数据采集	24
3.2.3	特征解析	24
3.2.4	片段最优选取策略	25
3.2.5	工况构建及验证分析	27
3.3	行驶工况实例	28
3.3.1	实验数据的采集、处理及特征参数提取	28
3.3.2	工况构建过程	29
3.3.3	结果分析	32
3.4	本章小结	34
第4章	混合动力系统最优能量管理策略设计框架	35
4.1	系统模型	35
4.1.1	动力系统总成	35
4.1.2	动力电池模型	37
4.1.3	APU 模型	38
4.1.4	驱动电机模型	38
4.2	能量管理策略设计	39
4.2.1	模式控制	39
4.2.2	优化模型	41
4.3	全寿命周期能量管理策略设计及优化方法	42
4.3.1	全寿命周期能量管理策略	42
4.3.2	粒子群优化算法框架	43
4.3.3	电池老化影响特性	44
4.4	仿真结果	47
4.5	本章小结	48
第5章	能量管理策略的粒子群优化方法	49
5.1	粒子群优化算法原理	49
5.2	粒子群优化算法在能量管理策略中的应用	52
5.2.1	基本控制模式	52

5.2.2	粒子群优化算法的实施步骤	53
5.3	仿真结果	54
5.4	本章小结	58
第 6 章	考虑能源价格波动的模拟退火粒子群能量管理策略	59
6.1	模拟退火算法原理及其与粒子群优化算法的融合方法	59
6.1.1	模拟退火算法基本原理	59
6.1.2	模拟退火粒子群优化算法	61
6.2	能源价格波动统计分析	63
6.2.1	电价波动统计	63
6.2.2	燃油价格波动统计	66
6.3	考虑价格波动的能量管理策略设计	67
6.3.1	基于模拟退火粒子群算法的能量管理策略	67
6.3.2	参数优化结果	70
6.4	仿真结果与分析	72
6.5	本章小结	76
第 7 章	基于短时工况预测的粒子群优化能量管理策略	77
7.1	工况预测及能量管理策略	77
7.1.1	基于 BP 神经网络的工况预测方法	77
7.1.2	基于工况预测的粒子群优化能量管理策略	79
7.2	仿真结果与分析	81
7.2.1	算法有效性的仿真验证	81
7.2.2	具有工况差异性时的结果分析	83
7.3	本章小结	84
第 8 章	考虑电池寿命与安全性的 PMP 能量管理策略	85
8.1	电池热安全与耐久性模型	85
8.1.1	电池耐久性模型	85
8.1.2	电池热模型	86
8.1.3	冷却系统模型	87
8.2	基于 PMP 算法的能量管理策略	88
8.2.1	能量管理策略设计思路	88
8.2.2	PMP 算法	89
8.2.3	优化结果	90

8.3 仿真结果与分析	92
8.3.1 行驶工况及温度数据	92
8.3.2 冷却系统正常情况仿真分析	93
8.3.3 冷却系统异常情况仿真分析	94
8.4 本章小结	97
参考文献	98
附录	100
附录一 行驶工况构建算法代码	100
附录二 粒子群优化算法代码	107
附录三 模拟退火粒子群优化算法代码	117
附录四 遗传算法代码	123
附录五 PMP 能量管理优化算法代码	126

第1章

绪论

近年来随着环境与能源问题的日益严重,传统内燃机汽车的可持续性发展受到了严重质疑,大力发展节能、环保的新能源汽车已是国际共识,也是我国推动绿色交通体系、实现“双碳”目标的重要战略举措。根据美国能源信息管理局预测,伴随全球的能源消耗持续增加,以现有的探测与生产速度,石油储量将在 2062—2094 年耗尽,当前世界的主要汽车大国纷纷加强战略谋划、完善产业布局。石油资源短缺不仅影响能源和交通领域,还会造成严重的经济和社会问题,在我国,石油消耗结构中车用消费占比在 50%左右,新能源汽车技术的发展对于我国能源安全与国民经济发展都具有重要影响。在此驱动下,内燃机汽车向新能源汽车的转型成为了必然趋势。当前新能源汽车市场发展极为迅速,除了比亚迪汽车等行业引领者之外,还诞生了众多新能源汽车新兴企业,例如蔚来汽车、小鹏汽车、威马汽车和理想汽车等;与此同时,特斯拉自 2019 年正式在上海建立工厂以来,在中国的发展步伐逐步加快。国际上,德国、英国、荷兰、挪威以及美国等国家组成了“零排放车辆同盟”,陆续公布禁售燃油车法令或议案。随着排放规定的日益苛刻,加上欧洲各国禁售燃油车的时间表制定、中国“双积分”政策的落地实施,也从主观上迫使各汽车企业思考停售燃油车、加速向电动化转型的规划。除此之外,诸多新能源、新材料和物联网、大数据技术、人工智能等变革性技术的交叉融合,进一步带动了能源、交通、信息等系统的全面发展,这也推动了汽车从交通工具向移动智能终端、储能单元和数字空间转变,促进运行智能化水平的全面提升。本章主要介绍新能源汽车的基本概念、发展政策及现状。全球各国燃油车禁售计划如表 1-1 所示。

表 1-1 全球各国燃油车禁售计划

“禁燃”国家和地区	提出时间	提出方式	实施时间	禁售范围
挪威	2016 年	国家计划	2025 年	汽油/柴油车
荷兰	2016 年	国会议案	2030 年	汽油/柴油乘用车
德国	2016 年	国会议案	2030 年	内燃机车
英国苏格兰	2017 年	政府文件	2032 年	汽油/柴油车
美国加州	2018 年	政府法令	2029 年	燃油公交车
中国海南省	2018 年	政府规划	2030 年	汽油/柴油车

1.1 新能源汽车的分类

新能源汽车是指采用非常规的车用燃料作为动力来源(或使用常规的车用燃料、采用新型车载动力装置),综合车辆动力控制和驱动方面的先进技术,形成技术原理先进、具有新技术、新结构的汽车(工业和信息化部 2017 年《新能源汽车生产企业及产品准入管理规定》)。新能源汽车的种类很多,但是在各类新能源汽车的发展路线中,以纯电动汽车(battery electric vehicle, BEV)、混合动力电动汽车(hybrid electric vehicle, HEV)和燃料电池电动汽车(fuel cell electric vehicle, FCEV)为代表的电动汽车被普遍认为是汽车能源动力系统转型的主流趋势和当前最具备商业化应用潜力的发展方向。

1.1.1 纯电动汽车

纯电动汽车是以电能为车载能源、以电机驱动系统推动车轮行驶且没有搭载其他能量源的车辆形式,目前车载电源普遍采用能量密度和功率密度都比较高的锂离子二次动力电池。由于电池与电机之间为柔性连接,所以可以灵活布置于整车底盘中,电机驱动系统由电机本体、功率转换器、控制器及各类传感器组成,其作用是将动力电池的电能转化为机械能并通过传动装置按照驾驶员的需求实现车轮驱动。由于电动机自身具备宽的调速区间且具备低速大转矩的技术优势,所以纯电动汽车理论上可以不需要配置离合器和变速器,整车结构简单、使用过程节能环保、维护容易。发展初期受限于技术成熟度,纯电动汽车主要应用于小型特种车辆,例如场区摆渡车、垃圾清除车、观光车、仓储物流车等,随着大功率电驱动技术与高能量车载储能系统等技术的迅速发展,如今电动汽车已经成为城市交通系统中的重要构成元素。但是,当前纯电动汽车仍然存在一些亟须解决的技术或者商业化问题,例如成本高、电池充电时间长、工作性能受温度影响显著以及动力电池存在安全隐患等。

1.1.2 混合动力汽车

混合动力系统是指存在两种或以上的能源类型协同工作的动力驱动系统,目前商业化应用的混合动力汽车形式主要是油、电混合动力汽车,即采用燃油与电能两种形式共同作为车载能量源来满足车辆行驶时的能量需求,而对应的动力单元则为内燃机和电动机。与纯电动汽车类似,混合动力汽车中的电能也是存储在锂离子电池中,根据电池是否具备外接充电功能,可以分为插电式混合动力汽车与普通混合动力汽车。插电式混合动力汽车中的电池可以外接电网充电,因此其工作模式与纯电动汽车非常类似,可以视作在纯电动汽车的基础上保留了部分内燃机汽车功能,用于弥补纯电动汽车的里程不足等问题;而普通混合动力汽车中电能大部分来自于车内的发动机发电、少部分来自于制动时的能量回收,从整车能量转换的角度而言,与内燃机汽车一样仍然是燃油的化学能转化为机械能,电能的参与仅仅是中间过程,其作用是调节发动机工作状态、优化发动机的燃油经济性。由于多个能量源并

存,混合动力汽车控制过程存在优化问题,不论是插电式还是普通混合动力汽车,电力与发动机并存增加了能量转换的自由度,其能量优化管理对于提高整车性能十分关键。

1.1.3 燃料电池汽车

燃料电池汽车也是一种纯电驱动的车辆形式,但是与普通纯电动汽车通过锂离子二次电池来存储电能的方式不同,燃料电池电动汽车是利用氢气等车载燃料与氧气在催化剂的作用下于燃料电池中经过电化学反应来产生电能、通过电机系统实现驱动的汽车形式。燃料电池是其核心,在车辆运行过程中充当车载的高效“发电机”,高纯度氢气中的氢分子在阳极催化剂作用下被离解成氢离子和电子,而注入的氧气则在阴极离解为氧原子,与穿过电解质的氢离子结合形成结构稳定的水,而在这个过程中电子不断通过外部电路流动,产生电流向汽车提供电力。与其他电源相比,燃料电池具备能量转换效率高、噪声低、洁净无污染、工作寿命长的独特技术优势,因此燃料电池电动汽车也被广泛视为一种理想的零排放车辆发展方向。但是仅仅依靠燃料电池独立工作往往不能满足车辆所有工况需求,所以燃料电池需配备锂离子电池共同工作,另外燃料电池的高成本、纯氢获取方式、加氢供氢等基础设施建设也是制约当前燃料电池汽车发展的因素。

1.2 新能源汽车的发展现状

1.2.1 国内发展概述

我国新能源汽车发展势头迅猛,2012年国务院正式发布《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)》,极力推进新能源汽车产业化发展,2020年中央经济工作会议明确“碳达峰、碳中和”为重点任务,工信部等围绕“双碳”目标制定了新能源汽车产业的实施路线,发布了新能源汽车产业发展规划(2021—2035年),坚持以纯电驱动为战略举措,提高核心技术创新的能力(图1-1),以“三纵三横”研发布局作为新阶段的重要发展方向(图1-2)。

国内各类新能源汽车相关企业响应政策号召,积极进行新能源乘用车与商用车的研发,目前,我国新能源汽车推广水平居全球前列,保有量和产销量持续高速增长。据汽车工业协会发布的汽车工业经济运行情况显示,近年来新能源汽车的产量和销量逐年增长,2014—2018年新能源汽车、纯电动汽车和插电式混合动力汽车的产销呈现了非常迅猛的发展态势,2018年我国电动汽车市场销量的全球份额占比已增长到43%,成为全球最大电动汽车市场。根据《节能与新能源汽车技术路线图2.0》,2025年新能源汽车新车销量占比预期达到20%左右,2035年新能源汽车销量占比预期达到50%以上。可以预料,未来我国的绿色可持续化交通体系(包括电动汽车、电动汽车充电基础设施和公共交通)建设将继续加速,新能源汽车与能源、交通、信息通信的全面深度融合也将全面展开。当前国内部分重要新能源汽车企业及其代表车型技术特点如表1-2所示。



图 1-1 近年主要新能源产业政策

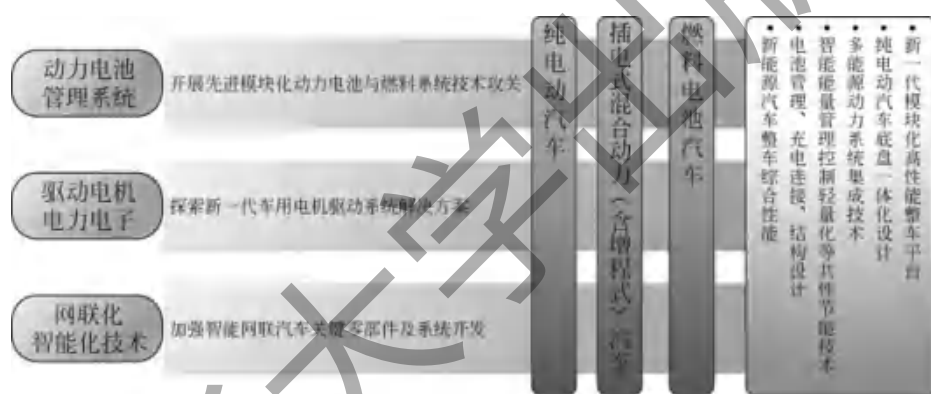


图 1-2 “三纵三横”研发布局

表 1-2 我国主要车企情况介绍

公司名称	上市代表车型及外观		发展趋势及特点
比亚迪	唐 DM 宋 Pro		国内乃至全球的新能源汽车引领者之一，率先提出“公交电动化”战略，其磷酸铁锂电池技术已经申请了 20 余项国家专利；推出包括电动公交大客车 K9 在内的多款新能源汽车，加速替换传统燃油车的步伐。
北汽	EV150 EU7		辐射全国的产业布局，有较强的技术研发实力，布局智能制造、能源管理、智慧出行、互联网+等多个战略新兴产业。

续表

公司名称	上市代表车型及外观		发展趋势及特点
理想	ONE		采用自建智能制造基地作为唯一生产模式,专注于提供智能交通工具研发,通过搭载大容量电池组和高功率增程发电系统解决现阶段纯电动汽车的续航里程焦虑,实现里程 800km 的长续航能力。
威马	EX5 EX6 Plus		明确发展“三步走”战略:做智能电动汽车的普及者、成为数据驱动的智能硬件公司、成长为智慧出行新生态服务商。
小鹏	G3 P7		首家进入乘联会新能源车销量榜的互联网造车企业,专注于针对一线城市年轻人的互联网电动汽车研发,拥有较为成熟的车辆智能控制技术。
蔚来	ES8 EC6		涵盖包括“三电”系统的电机、电控、电池包,“三智”系统的智能网关、智能座舱、自动辅助驾驶系统,蔚来通过独立正向研发,全部拥有自主知识产权。
广汽	传祺 GA6 传祺 GA8		具备正向开发能力,混动系统已经量产第二代。掌握自主电池包技术,并攻关电芯研发。

1.2.2 国外发展概述

日本、美国和德国等发达国家在新能源汽车领域的发展都非常成熟,在全球市场也各自占有较大的份额。其中,日本在新能源汽车领域的发展初期主要是关注于混合动力汽车,但如今也开始着手研发短途行驶的小型家庭用纯电动汽车以及用于长途运输的燃料电池汽车;德国、法国和英国等欧洲国家则明显侧重于纯电动汽车的技术路线,纯电动车型产销量近年来持续上升,尤其是伴随着欧洲各国在新能源车消费及使用环节补贴力度的加大,各大厂商积极布局新能源汽车(尤其是纯电动汽车)的商业化发展。根据英国政府发布的“零排放之路”战略规划,到 2030 年,英国预计至少要有 50% 的汽车和 40% 的货车将达到超低排放标准,并且在 2040 年前禁售传统内燃机汽车。据不完全统计,2021 年英国电动汽车新车注册量已经超过 19 万辆。但是由于内燃机汽车的产业惯性,加之新能源汽车续航里程仍有不足,在欧洲大部分国家和地区新能源汽车的发展仍显迟缓,例如法国 2022 年前两个月电

动汽车销量仅 5000 余辆；德国作为欧洲最大的汽车市场，2022 年新注册轿车中电动汽车占比仅为 0.1%。相比于欧洲，美国的电动汽车发展迅速，纯电动汽车与插电式混合动力汽车年销量在 2019 年超过 32 万辆，电动汽车年销量仅次于中国而稳居世界第二位。美国电动汽车最活跃的地区是加利福尼亚州，早在 20 世纪 70 年代加州政府就开始实行严格的机动车排放和燃油经济性相关标准，将开发清洁燃油、低排放、零排放汽车作为重要发展策略。当前，特斯拉汽车公司是美国电动汽车市场的主要引领者。国外部分主要新能源汽车企业和技术特点如表 1-3 所示。

表 1-3 国外部分主要车企情况介绍

公司名称	部分代表车型及外观		发展趋势及特点
丰田	Prius 凯美瑞双擎		公司着眼于汽车产业的未来，不断在环保和新能源领域投资。短期目标是提高内燃机效率和推广混合动力车型；中期目标是推广插电式混合动力车型；长期目标是 2050 年消除内燃机车型。
本田	INSIGHT 锐·混动		致力于新能源汽车研究，重视驱动单元高功率、小型化及高效化；致力于燃料电池系统研究；提出到 2030 年混合动力车、插电式混合动力车、纯电动车和燃料电池车占比 2/3 以上。
特斯拉	Roadster Model S		美国顶级电动汽车及能源公司，新能源汽车的引领者，陆续推出 Model S、Model X、Model 3 等车型，均配备具有全自动驾驶功能的硬件。提出到 2020 年实现 50 万辆年销量目标，布局汽车能源变革、智能交通，推出电动重型卡车和高载客密度的城市交通工具。
奥迪	e-tron A3 · Sportback		传统内燃机汽车顶级公司新增新能源汽车业务的代表之一，主要瞄准高端市场竞争中的豪华电动车型。

1.3 混合动力系统与能量管理技术

由于当前燃料电池汽车技术尚不成熟，目前新能源汽车产业发展大多集中在混合动力汽车、插电式混合动力汽车和纯电动汽车。对于新能源汽车而言，多能源协同与集成是其重要的技术特点之一。混合动力汽车或插电式混合动力汽车中存在油、电多种能量源并存，而纯电动汽车与燃料电池电动汽车中也存在功率型电池与容量型电池或超级电容、锂离子电

池与燃料电池等的集成应用。多源系统的能量管理与优化对于提高能量转化效率、改善能量经济性具有重要作用。未来,基于物联网技术及大数据信息系统,能量管理系统也有望实现在线学习和预测、识别能力,例如识别驾驶员驾驶习惯和控制意图、预测未来路况等,从而实现更为智能、高效的控制效果。

能量管理是混合动力汽车的核心技术之一。由于混合动力汽车配置有多种动力源,不同动力源的高效率区域和工作特性差异很大。想要提高整个系统的性能,就必须使得多种能量单元之间协同配合,发挥各自优势、弥补劣势,为了达到上述目的,就必须有一套精心设计的能量管理策略来实现多源协同控制。具体来说,能量管理策略是根据车辆在不同的行驶工况下的车辆需求功率,根据各个动力和能源系统的特性,按照预先设计的控制逻辑和算法对车载能源进行功率流分配控制,优化整车的运行效率且兼顾电池系统的健康及寿命状态。本书主要以插电式混合动力汽车为例,重点阐述混合动力汽车能量管理策略的设计和群智能优化方法。

1.4 本章小结

本章主要介绍了新能源汽车的基本概念和当前几种主要新能源汽车形式,包括纯电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车等;进而阐述了我国发展新能源汽车的背景、政策以及国内外新能源汽车产业发展现状和趋势;最后介绍了能量管理策略的基本概念。

第2章

混合动力汽车结构与原理

混合动力汽车兼具传统内燃机汽车与纯电动汽车的技术特点,可以有效地使发动机处于高效区域,降低发动机油耗、减少排放,同时解决纯电动汽车的里程焦虑问题,本章主要介绍混合动力汽车的结构、分类及其工作原理。

2.1 混合动力系统结构

混合动力汽车的类型及定义在 QC/T 837—2010 标准中给出了较为明确的定义。混合动力系统的分类方法很多,早期应用中通常按照混合度进行划分,混合度是指电力驱动系统的功率占总功率的百分比,汽车根据混合度的不同,可以分为微型混合动力汽车、轻度混合动力汽车、中度混合动力汽车及重度混合动力汽车。当前较常采用的分类方式是按照动力系统的结构形式划分,分为串联式混合动力汽车、并联式混合动力汽车与混联式混合动力汽车。此外,根据是否可以从外接电网中充电,又可以分为插电式混合动力汽车与普通混合动力汽车。接下来按照系统结构形式的分类方式进行介绍。

2.1.1 串联式混合动力系统

1. 系统结构

串联式混合动力汽车的结构较为简单,主要由两个能量源(电池组和发动机)、功率转换器、传动装置和两个电机组成,如图 2-1 所示。车辆驱动力来源于电机驱动系统,动力电池组负责向电机驱动系统提供电能,同时在制动过程中可以实现能量回收,发动机与发电机组成辅助能量源,当电池组容量不足或功率不足时,发动机发电机组与电池共同输出。由于发动机只是用来发电而不直接参与驱动,因此发动机与车速之间不存在耦合关系,这样发动机工作点可以灵活控制在效率最优区域。变换器主要包括直流/直流(DC/DC)变换、直流/交流(DC/AC)变换和交流/直流(AC/DC)变换,实现变换与汇流,并用来驱动交流电机。另外,对于插电式混合动力系统,电池组还会配置外接充电设备。

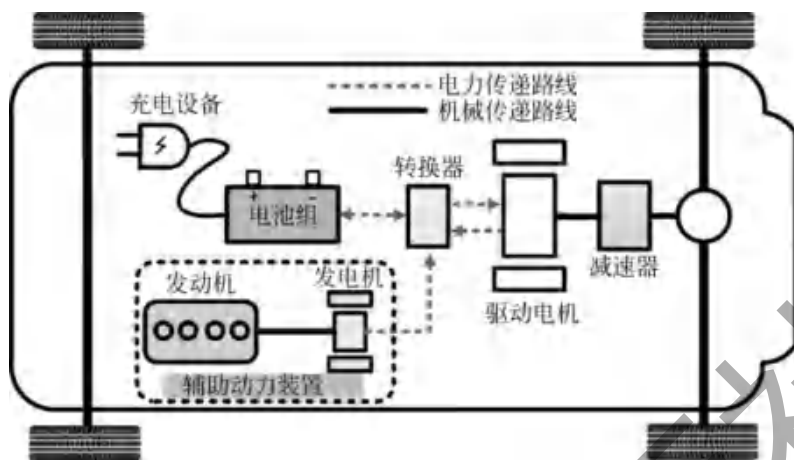


图 2-1 串联式混合动力汽车的结构示意图

2. 技术特点

(1) 串联式混合动力系统的优点：①排放污染小。串联式混合动力系统中,由于发动机可以灵活控制在效率最优区域,减少了有害气体的排放。另外,还可以在纯电动驱动时关闭发动机,只用动力电池组提供驱动汽车所需能量,实现“零排放”行驶。②柔性连接、布置方便。串联式混合动力汽车只有电动机驱动系统,不需要复杂的机械耦合装置,动力装置之间柔性连接,结构布置较为灵活。

(2) 串联式混合动力系统的缺点：①对核心部件的要求较高。串联式混合动力汽车中驱动电动机的功率需要满足汽车在行驶中的最大功率需求,因此驱动电动机的功率要求较大,使得电动机的体积和质量都较大。②局部能量转换效率低。串联式混合动力系统中的发动机不直接输出机械能,而是先将燃料化学能转化为机械能,再通过发电机将机械能转化为电能,最后经电动机将电能转化为机械能,尽管可以将发动机控制在最优效率点,但是这个过程存在多次能量转换,存在能量损失较大的问题。

2.1.2 并联式混合动力系统

1. 系统结构

并联式混合动力汽车的动力系统主要由发动机、动力电池组和驱动电机等部件构成,如图 2-2 所示(图中省略了离合器)。与串联式不同,并联式混合动力系统中发动机直接参与驱动,因此发动机与传动装置之间存在直接的机械连接,发动机的转速与车速存在耦合关系,这导致发动机工作点无法控制在最优工作区域,但是发动机的力矩可以灵活控制,因此可以使发动机控制在最优功率曲线上,即每个转速点对应一个效率最高的功率点。在并联式混合动力汽车中,车辆驱动力来自于发动机动力系统和电机动力系统之和,结构中没有了发动机—发电机—驱动电机这条电能传输路线。

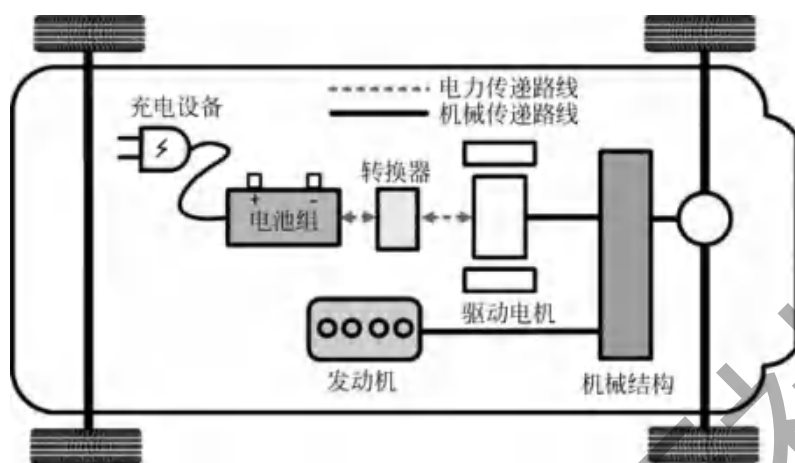


图 2-2 并联式混合动力汽车结构简图

2. 技术特点

(1) 并联式混合动力系统的优点：①易于提升动力性。并联式混合动力汽车同时拥有发动机与驱动电机两套动力系统，发动机具有中高转速大扭矩的特性，驱动电机具有低速大扭矩、高速恒功率的特性，优势互补、协同工作，可以实现优越的动力性。②能量转化效率高。发动机直接参与动力输出，省去了机械能—电能—机械能的转换过程，效率高于串联式混合动力系统。③核心部件尺寸较小。发动机与驱动电机共同满足车辆最大需求功率，因此两者的功率等级与尺寸相比串联式混合动力系统中的可以适当降低。

(2) 并联式混合动力系统的缺点：①发动机转速点不能灵活控制。由于发动机直接参与驱动，因此发动机转速与车速之间存在耦合关系，发动机的工作状态会受到汽车行驶工况的影响，无法一直运行在全局最优工作点，因此发动机排放性能劣于串联式混合动力系统。②结构略微复杂。发动机参与驱动的过程中需要配备与传统内燃机汽车相类似的传动系统，例如离合器、变速器等，另外还需要给驱动电机设置扭矩耦合装置，使系统结构复杂。

2.1.3 混联式混合动力系统

1. 系统结构

混联式混合动力系统在串联式混合动力系统的基础上增加了发动机参与驱动的分支，因此可以同时具备串联式和并联式混合动力系统的特点，如图 2-3 所示，驱动电机与发动机可以同时向行驶系统提供动力，发动机在驱动车辆行驶的同时带动发电机发电，实现了功率的分流，而电机系统的电能供应相应地也来自于两条分支，即动力电池组和发动机-发电机组。还可以在上述结构上进一步增加一个驱动电机实现更复杂的控制模式，部分文献中称之为复合式混合动力系统，但其本质上仍是混联式结构的一种，本书不再另做介绍。在混联式系统中，发动机、发电机、驱动电机等的动力存在耦合关系，由于动力耦合方式不尽相同，

图中统称为机械结构。当前,实现功率分流与耦合的机械结构较多采用的是行星齿轮系,例如丰田 THS 系统是典型的混联式混合动力系统。

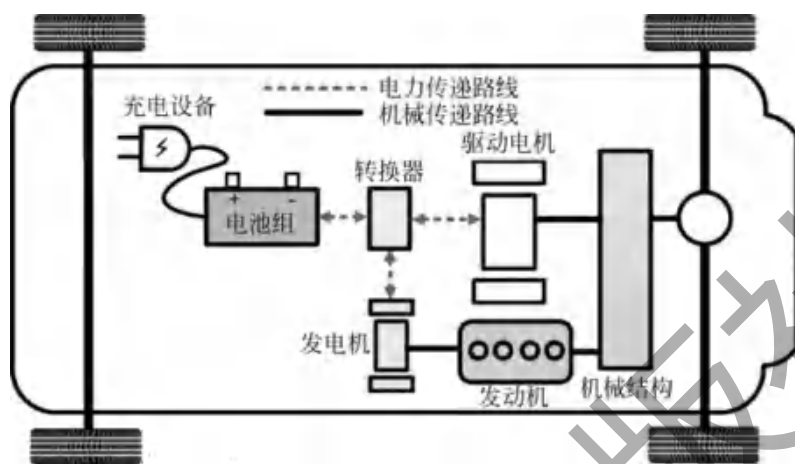


图 2-3 混联式混合动力汽车结构简图

2. 技术特点

(1) 混联式混合动力系统的优点：兼具串联式与并联式的技术优点,可以实现更多的控制模式与更优的控制效果,可以更加灵活地根据工况对内燃机和电动机进行控制,有利于在更复杂的工况下实现系统的优化匹配,获得较低的排放和油耗,提高整体性能。

(2) 混联式混合动力系统的缺点：系统结构复杂,成本高,控制系统设计难度大。

2.2 串联式混合动力系统控制模式

串联式混合动力系统控制模式分为 6 种,见图 2-4。

1. 纯电驱动模式

车辆从车载电池组中获得电能,驱动车辆前进,纯电驱动模式下只有电池工作,发动机和发电机不工作,这时的工作状态与纯电动汽车是一致的,对于插电式混合动力汽车而言,在电池能量与功率充足的情况下,纯电驱动模式是优先采用的控制模式。

2. 纯发动机驱动模式

电机驱动车辆行驶所需的电能完全来自于发动机-发电机组,这时动力电池组既不供电也不从发电单元获取电能,这是当电池电量低于某设定下界时所采用的控制模式,通常,受限于发动机的功率参数,这种模式下车辆的动力性会受到限制。

3. 混合驱动模式

当电池功率不足时或者预知电量无法满足里程需求的情况下,动力电池组和发动机-发电机以一个最优的比例共同为驱动电机提供电能,满足动力需求或延长行驶里程。

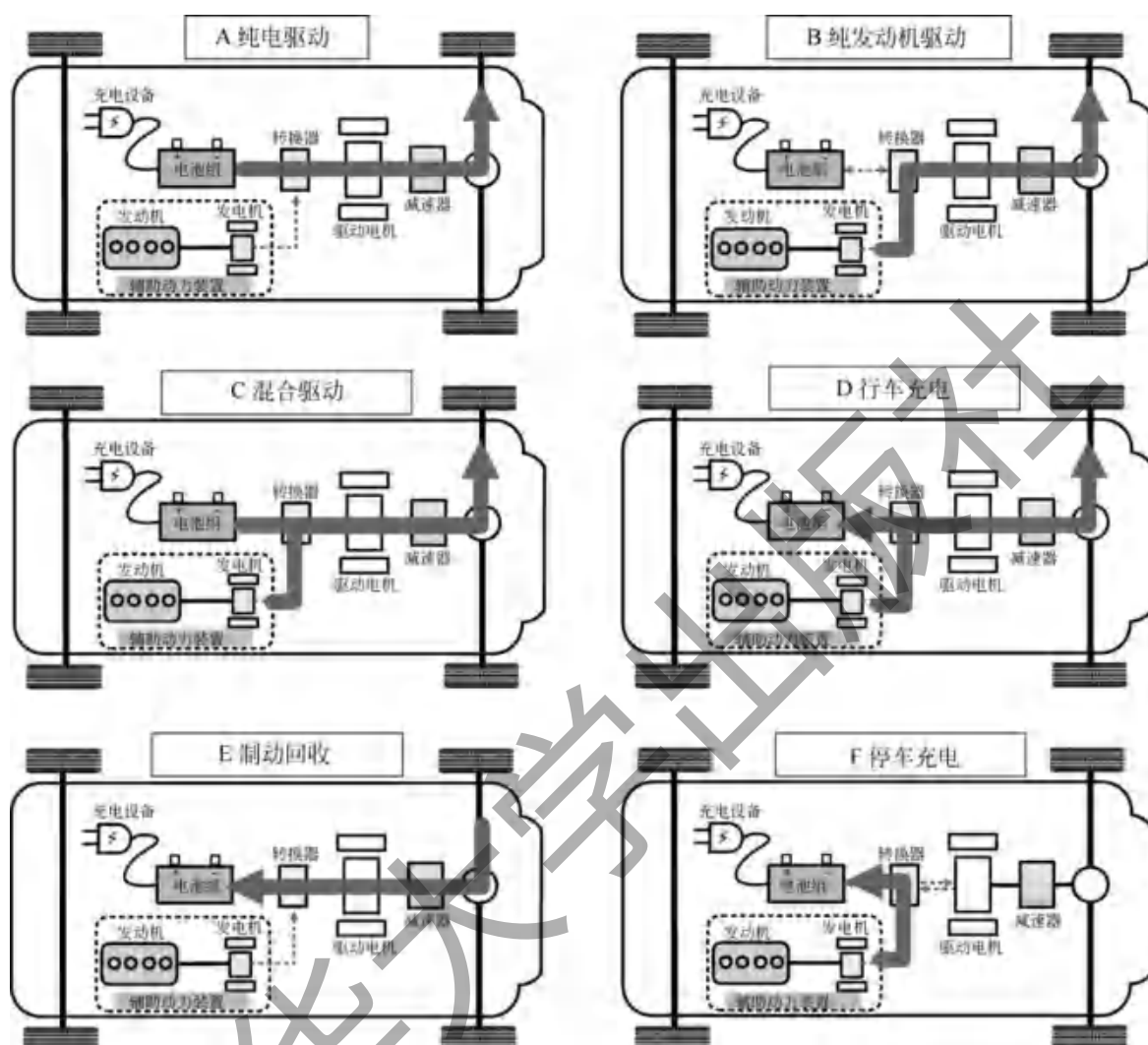


图 2-4 串联式混合动力汽车的工作模式

4. 行车充电模式

发动机-发电机组在满足驱动电机的功率需求之外,同时向动力电池组充电。

5. 制动回收模式

当车辆减速制动时,驱动电机作为发电机将制动过程的动能转换为电能,并通过功率转换器储存到电池中。

6. 停车充电模式

车辆停车状态下发动机-发电机组向电池组充电,对于插电式混合动力系统而言,车辆可以通过外接电源来进行充电。

2.3 并联式混合动力系统控制模式

对于并联式混合动力汽车,由于发动机和电机的高效工作区域并不相同,为了发挥并联式混合动力系统的优势,汽车应根据不同运行工况,采取与之相适应的工作模式,以提高车辆整体的动力性、经济性及排放性。根据不同的负载功率与能量分配方案可将并联式混合动力汽车工作模式分为6种基本模式:纯电驱动模式、纯发动机驱动模式、混合驱动模式、行车充电模式、再生制动回收模式和停车充电模式见图2-5。

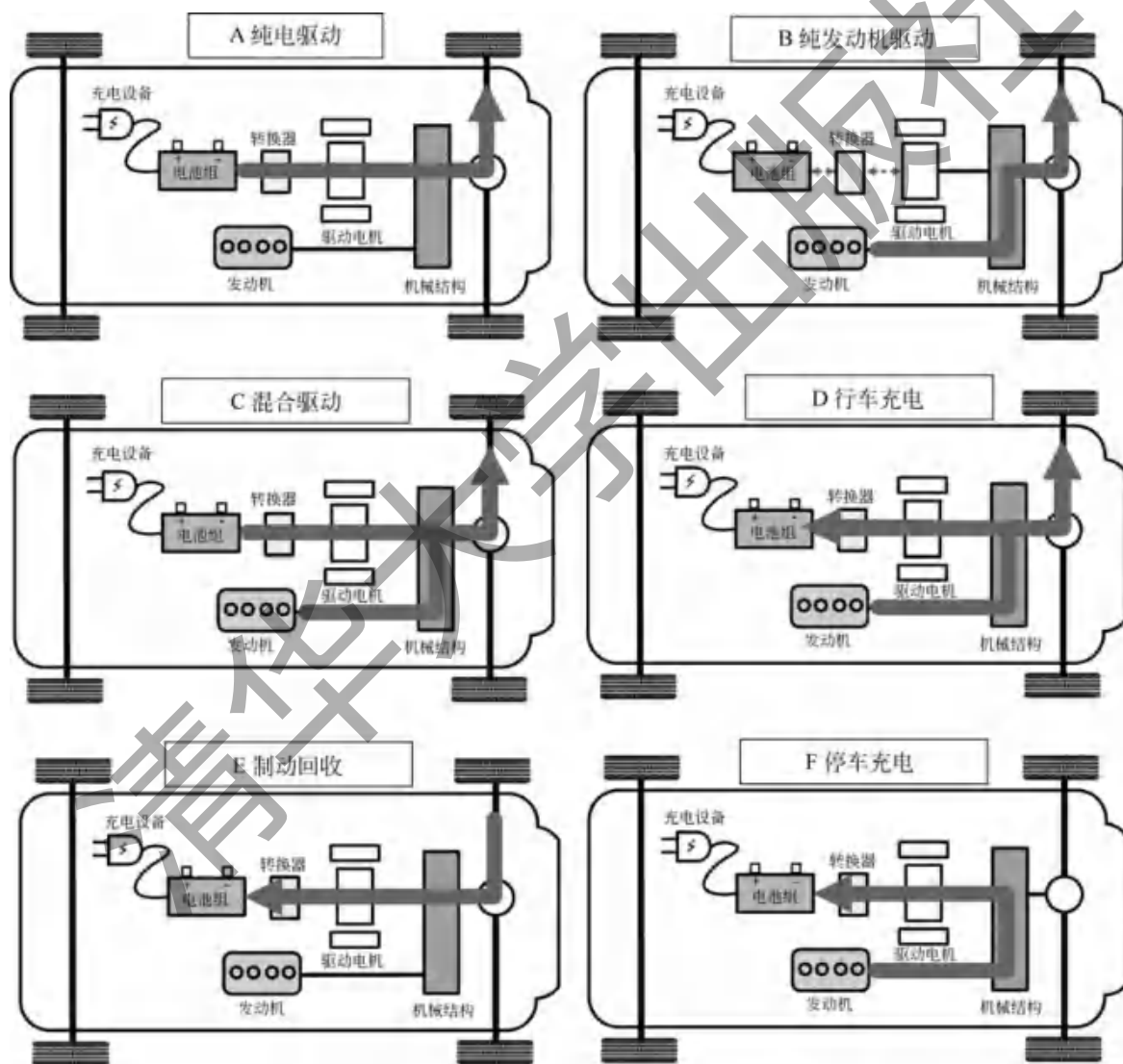


图 2-5 并联式混合动力汽车的工作模式

1. 纯电驱动模式

纯电驱动模式与串联式系统相类似,发动机不参与工作,但是由于电机功率较低,该模式适用于低速工况和启车阶段。

2. 纯发动机驱动模式

当电池电量较低或者当前工况满足发动机高效工作区域状态时,动力电池组及驱动电机不输出,采用发动机单独驱动。

3. 混合驱动模式

在较高需求功率情况下,发动机和驱动电机同时提供动力,满足动力要求。

4. 行车充电模式

当车辆正常行驶在中低负荷下时,发动机输出功率大于车辆负荷,若这时电池的 SOC (荷电状态)较低,发动机除了要提供驱动车辆所需的动力外,发动机多余能量用来带动发电机给电池组充电。

5. 制动回收模式

车辆减速制动时电动机作为发电机使用,提供制动力矩,同时回收电能给电池组充电。

6. 停车充电模式

当动力电池组电量不足时,可以在停车时利用发动机给电池组充电,但是对于插电式混合动力系统而言可以通过外接电源直接充电。

2.4 混联式混合动力系统控制模式

混联式混合动力系统结构复杂,但可以实现更为优越的控制性能,当前已有多种成功商业化应用的形式,此处以两类最具代表性的结构进行介绍。首先是本田 i-MMD 系统,其原理示意图如图 2-6 所示,该系统采用减速齿轮组的机械耦合方式,配合离合器来控制发动机功率流。整个系统可视为一个串联式、并联式系统的直接组合。

结合图 2-6,该系统主要有以下三种工作模式:纯电模式下电池给电机供电,电机单独驱动车辆行驶,发动机、发电机不工作,离合器也处于断开状态;串联模式下驱动电机单独驱动车辆行驶,发动机仅带动发电机工作发电,离合器处于断开状态,动力电池、发电机共同给驱动电机供电(发动机处于最优工作区域,动力电池组填补或吸收负载功率与发动机最优功率之间的偏差);并联模式下离合器处于接合状态,发动机在发电的同时,扭矩也可以通过离合器传递至轮端,与电机一起驱动车辆行驶。

混联式混合动力系统中存在复杂的功率分流与耦合,一种常用的耦合机构是行星齿轮系,即通过改变行星齿轮的元件锁止关系来操作模式切换,其中最具代表性的是丰田 THS 混联式混合动力系统,至今已发展到第三代。其基本结构如图 2-7 所示,动力总成主要由发动机、双驱动电机、行星齿轮系等构成,为了便于描述,图中用字母 A 代表离合器,B 和 C 分

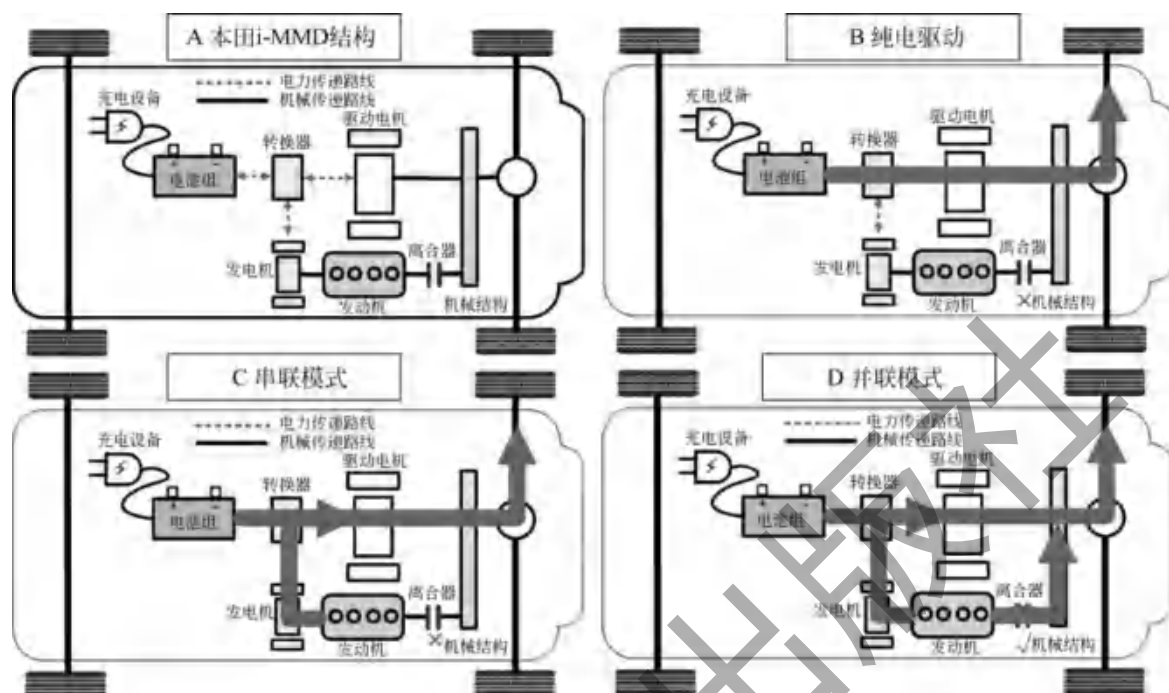


图 2-6 本田 i-MMD 结构示意图及工作模式

别代表齿圈和太阳轮上的锁止装置。系统中共有两套行星齿轮系,其中右侧的行星齿轮系负责发动机的功率分流,发动机连接该行星齿轮系中的行星架,发电机连接行星齿轮系中的太阳轮,这样发动机的功率被齿圈和太阳轮分流,一部分功率可以通过齿圈输出,另一部分功率通过太阳轮带动发电机发电,并与来自动力电池的电能汇合共同驱动另一侧的电机 2;左侧的行星齿轮系的行星架固定,电机 2 驱动其中的太阳轮,齿圈作为输出,两侧行星齿轮系的齿圈输出力矩耦合之后通过齿轮减速机构驱动车辆行驶。

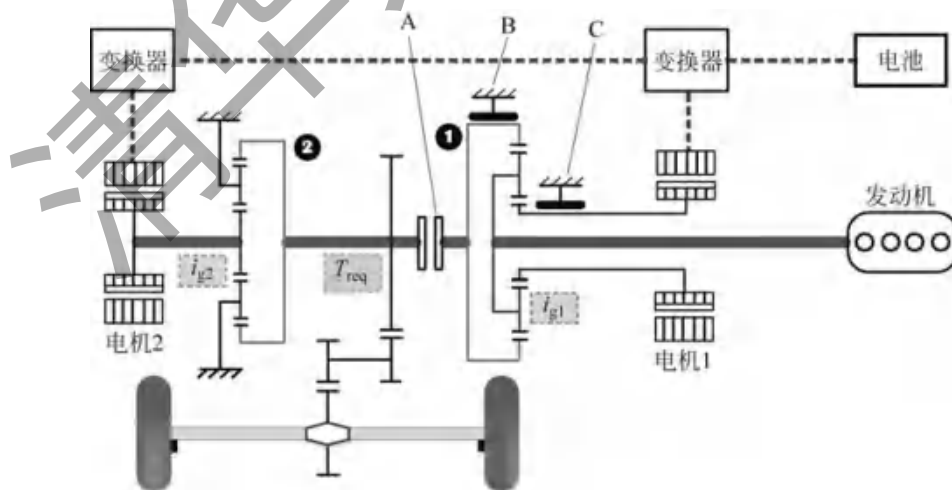


图 2-7 混联式混合动力汽车结构

通过设置离合器及行星齿轮系锁止关系,可以实现不同的工作模式。具体地,各模式下系统组件的控制状态如表 2-1 所示。

表 2-1 控制模式对应的组件运行状态

工作模式	发动机	电池	电机 1	电机 2	A	B	C
纯电驱动(模式 1)	关闭	运行	关闭	运行	✓	×	×
混联驱动(模式 2)	运行	运行	运行	运行	×	✓	✓
串联驱动(模式 3)	运行	关闭	运行	运行	✓	×	✓
再生制动(模式 4)	关闭	运行	关闭	运行	✓	×	×

注: ✓ 表示打开, × 表示锁止。

1. 纯电驱动工作模式

当车辆处在纯电驱动工作模式下时,所有电能都由电池提供,此时车辆由电机 2 单独驱动,离合器 A 处于打开状态,锁止器 B 和 C 处于锁止状态,纯电驱动工作模式下的功率流如图 2-8 所示。

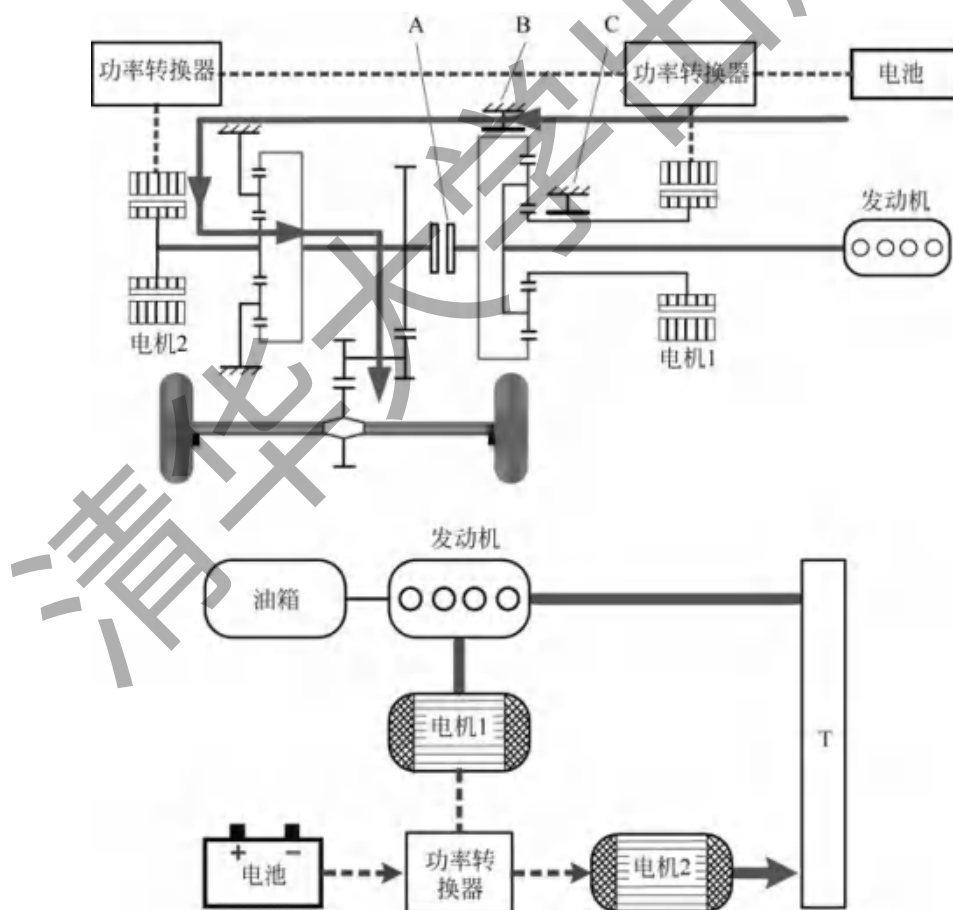


图 2-8 插电式混合动力汽车工作模式: 纯电驱动模式

2. 混联驱动工作模式

混联驱动工作模式是常用的模式,可以满足较大的需求转矩和需求功率要求,该模式下,离合器 A 处于闭合状态,锁止器 B 和 C 处于打开状态,混联驱动工作模式下的功率流如图 2-9 所示。在该模式下,发动机和电池同时工作,发动机的功率被分流,一条分支带动电机 1 进行发电,与电池共同为电机 2 提供电能;同时另一条分支与电机 2 的力矩汇合,共同实现车辆驱动。

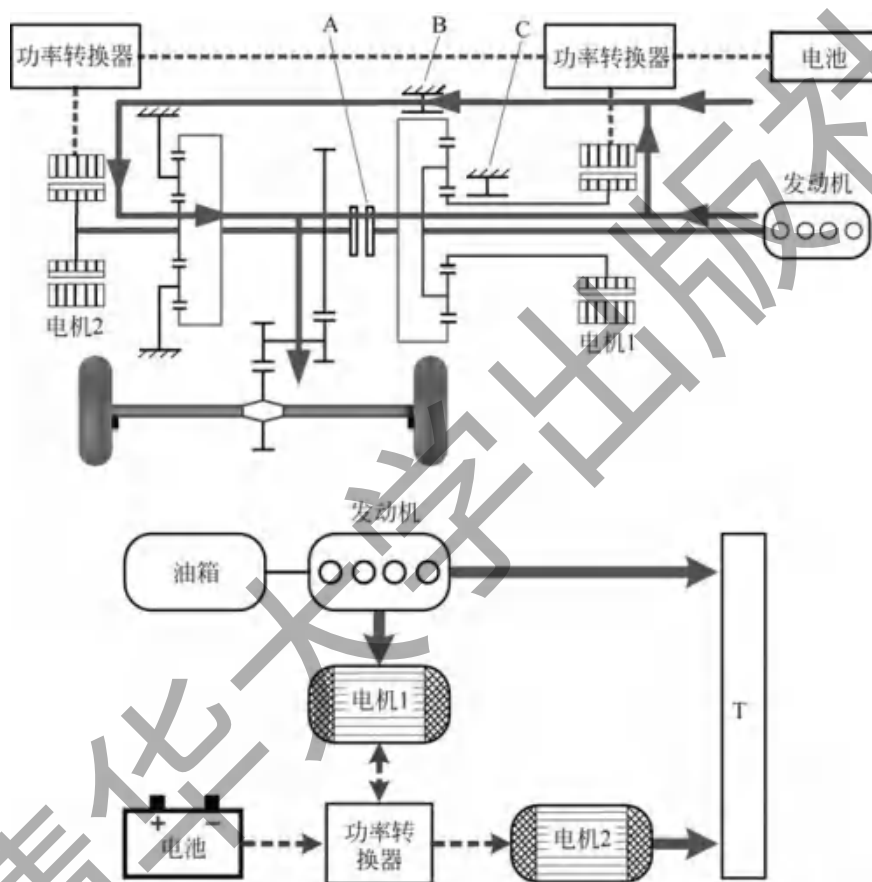


图 2-9 插电式混合动力汽车工作模式：混联驱动模式

3. 串联驱动工作模式

串联驱动工作模式下,离合器 A 处于打开状态,并锁止右侧行星齿轮的齿圈,系统的功率流如图 2-10 所示。在这种模式下,发动机不参与驱动,而是带动电机 1 产生电能,电能传输到电机 2,最终由电机 2 驱动车辆,此时与串联式混合动力系统的工作模式一致,发动机的转速与车速之间不存在耦合关系,因此可以灵活控制在最优效率点或者最优效率曲线上。

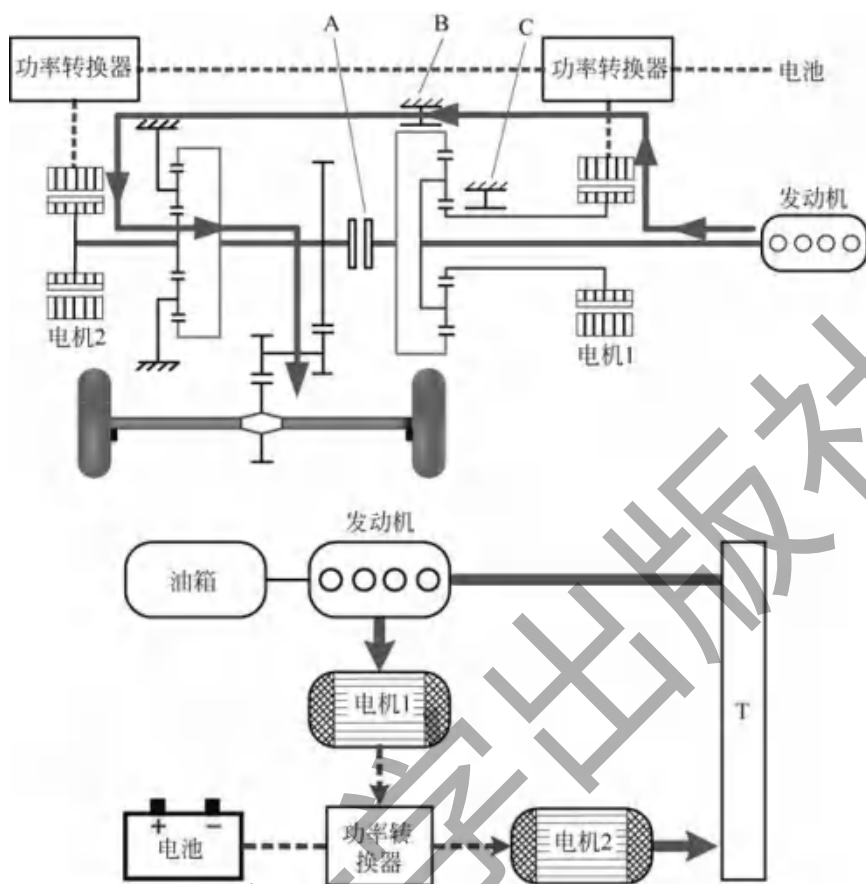


图 2-10 插电式混合动力汽车工作模式：串联驱动模式

4. 再生制动工作模式

当车辆减速或者制动时,此时电机 2 由驱动电机变为发电机,制动能量由电机 2 回收并储存在蓄电池中,可以有效地节省和利用能源。具体的功率流如图 2-11 所示。

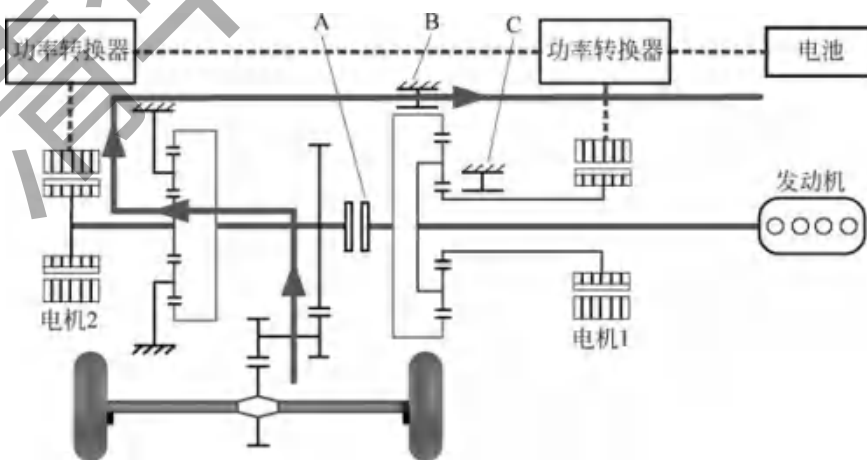


图 2-11 插电式混合动力汽车工作模式：再生制动模式

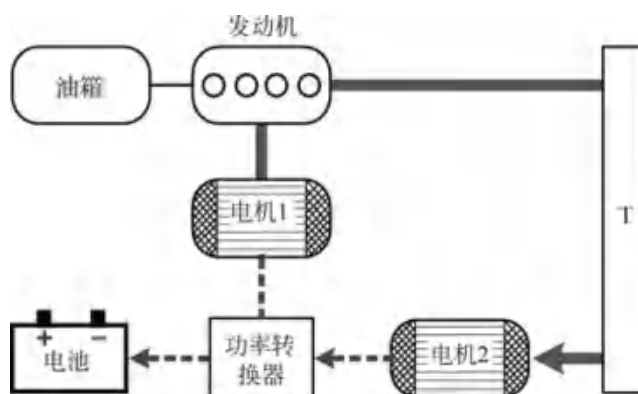


图 2-11 (续)

2.5 本章小结

本章重点介绍了混合动力汽车的概念、分类及当前常见的几种车用混合动力系统类型，分析了串联式混合动力系统、并联式混合动力系统、混联式混合动力系统的结构及原理，阐述了各类混合动力系统的控制模式和各个模式下的工作特点及功率流路线。

第 3 章

行驶工况构建方法

汽车的功率需求特性受工况影响显著。行驶工况的构建对于车辆能量管理策略的研究及评价都具有重要作用。电动汽车多用于城市交通,行驶环境较为明确和固定,针对所在城市的交通信息特征建立具有代表性的行驶工况是能量管理策略研究的首要工作。

3.1 行驶工况概述

3.1.1 行驶工况的概念

行驶工况是指用一段有限长度的速度曲线来表征某一区域或者某一城市的交通信息特征,按行驶工况的构建形式分为稳态工况和瞬态工况,其中,稳态工况是由怠速、恒加速、减速和稳定转速段相结合而成的简易驾驶循环,例如常用的稳态行驶工况有 ECE、EUDC、JP10-15;瞬态工况则是根据所采集的数据(速度和加速度)信息进行处理后合成的速度曲线,瞬态工况的加速度变化比稳态工况的加速度变化剧烈,例如 UDDS、FTP-75、香港工况等。从行驶工况的构建机构及使用目的又可以分为标准工况(又称认证工况)和非标工况(又称研究工况),其中,标准工况一般是由国家或者地区权威部门,例如交通部、行业管理机构、运营处等政府部门,通过法规形式确立的用于认证、检测等用途的行驶工况。比较有代表性的是美国联邦测试循环 FTP-75、新欧洲行驶工况 NEDC、日本的 JP10-15 和我国的客车四工况循环,都是标准行驶工况。非标工况则是汽车制造商或者科研机构用于产品开发或者研究等目的所构建的行驶工况。标准工况通常需要面向更广泛的群体发放,因此一般具备较强的通用性;而非标工况则是直接面向某产品研发用途,所以其区域针对性和准确性要求更高。为了推进电动汽车商业化的快速发展,已有企业和研究机构在越来越多的区域和城市有针对性地建立了非标工况。

3.1.2 国外典型行驶工况

1. 美国行驶工况

美国在行驶工况构建方面起步较早,所建立的工况种类繁多、用途各异,如图 3-1 所示。

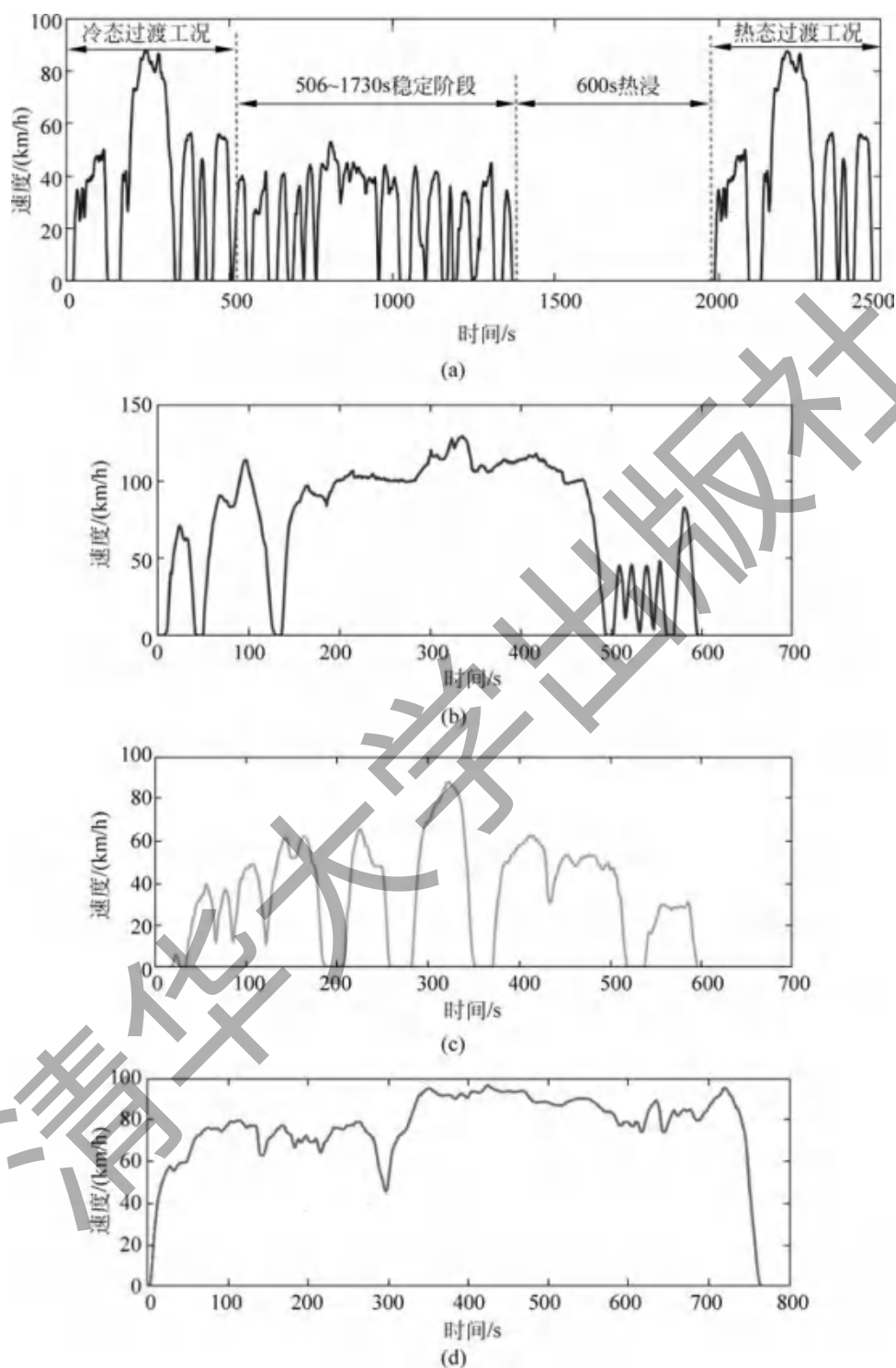


图 3-1 部分美国代表性行驶工况

(a) 美国联邦测试循环 FTP-75 工况；(b) 美国联邦测试循环 US06 工况；
(c) 美国联邦测试循环补充 SC03 工况；(d) 高速公路燃油经济性测试的循环 HWFET 工况

其中,较具有代表性的是 1972 年美国环保局所建立的认证车辆排放的标准工况 FTP-72,由冷态过渡工况(0~505s)和稳态工况(506~1370s)构成,1975 年在 FTP-72 基础上加上 600s 热浸车和热态过渡工况,构成持续时间 2475s、理论行驶路程 17.77km 的 FTP-75 工况,后来此工况更名为 UDDS 工况。

此外,还有考虑道路变化的 US06 工况、用于分析车辆空调满负荷运行状态的 SC03 工况、用于乘用车高速公路燃油经济性测试的循环 HWFET 工况等。

2. 欧洲行驶工况

欧洲行驶工况最具代表性的是用于底盘测功机上认证轻型车排放的 EDC,后来发展成新 EDC,即 NEDC 工况,在该循环里局部循环速度是恒定的,是一种稳态工况,整个 NEDC 工况时长为 1180s,共计 10.93km,包括市内(ECE)、市郊(EUDC)两个组成部分,其中 ECE 部分由 4 个传统的城市道路行驶工况 ECE 构成,是城市行驶过程的一个简化代表,主要反映了机动车在欧洲城市内的行驶特征。为了反映市郊高速运行时的排放情况,从 1992 年 7 月起,在欧盟各国规定的标准测试工况后面又补充了郊外公路上的行驶工况 EUDC 部分,形成了最终的 NEDC 工况,如图 3-2 所示。

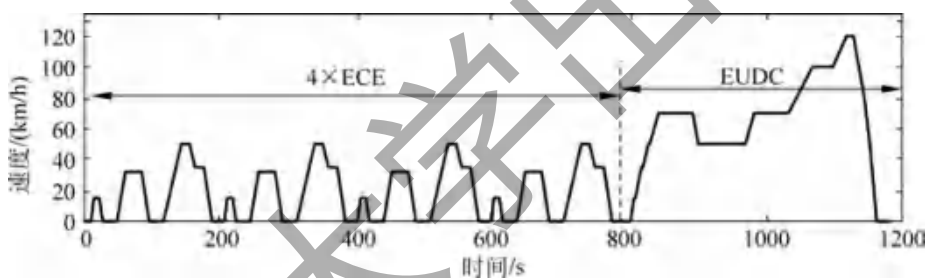


图 3-2 欧洲工况 NEDC

3. 日本行驶工况

日本的典型工况是 JP10-15 工况,是经 Japan10 工况改造后的循环工况,JP10-15 工况由 3 个 Japan10 工况和 1 个 Japan15 工况循环构成,它的平均行驶速度为 22.92km/h,最高速度为 70.74km/h,运行时间为 660s,行驶里程为 4.20km,其中怠速段 154s,如图 3-3 所示。

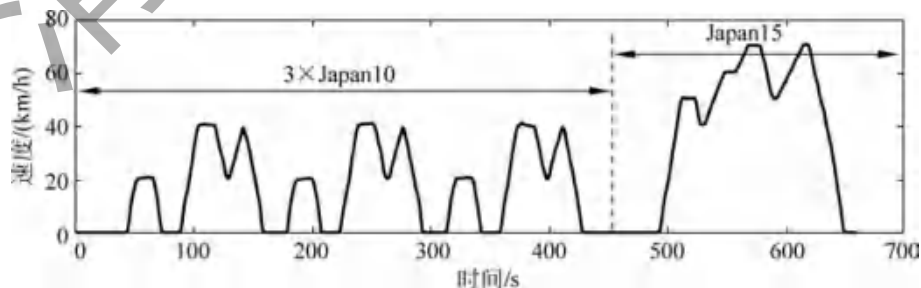


图 3-3 新日本工况 JP10-15