

电动汽车新型电机 驱动与能量管理控制技术

DIANDONG QICHE XINXING DIANJI QUDONG YU NENGLIANG GUANLI KONGZHI JISHU

张细政 著



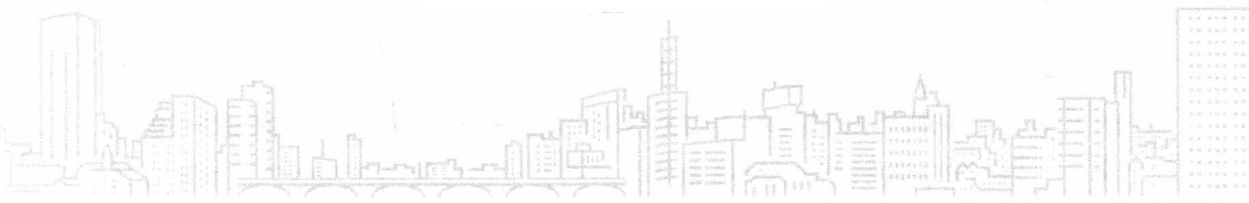
张外借

电子科技大学出版社

电动汽车新型电机 驱动与能量管理控制技术

DIANDONG QICHE XINXING DIANJI QUDONG YU NENGLIANG GUANLI KONGZHI JISHU

张细政 著



电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电动汽车新型电机驱动与能量管理控制技术 / 张细政
著. -- 成都: 电子科技大学出版社, 2017. 11
ISBN 978-7-5647-5251-4

I. ①电… II. ①张… III. ①电动汽车—电机—控制系统②电动汽车—能量管理系统—控制系统 IV. ①U469.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 274615 号

电动汽车新型电机驱动与能量管理控制技术
张细政 著

策划编辑 谭炜麟
责任编辑 谭炜麟

出版发行 电子科技大学出版社
成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051
主 页 www.uestcp.com.cn
服务电话 028 - 83203399
邮购电话 028 - 83201495

印 刷 河南承创印务有限公司
成品尺寸 170mm × 240mm
印 张 16.5
字 数 264 千字
版 次 2017 年 11 月第一版
印 次 2017 年 11 月第一次印刷
书 号 ISBN 978-7-5647-5251-4
定 价 50.00 元

版权所有,侵权必究

前 言

能源可持续发展与环境保护是 21 世纪全球面临的重大挑战,节约能源和保护环境两大战略极大地促进了新型汽车技术的迅速发展。新型节能环保型汽车的研发得到了各国政府和汽车公司的高度关注和大力支持,电动汽车(Electric Vehicle, EV)已成为汽车能源动力转型的优先选择。近年来在各个国家的车展上,汽车的动力装置从以燃油发动机、混合动力为主,逐渐开始向燃料电池、里程延长式和纯电动式转变;开始从单电机集中式驱动的统一结构,向多电机、分布式驱动的新型驱动结构发展。电动汽车除了机械系统本体外,还涉及电力电子、电机、储能和控制等电气系统,它本质上是一个跨学科的系统,是一门超越了传统汽车工程的工程科学。

电动汽车的三大关键技术之一——电机及其驱动控制技术作为执行层的底层控制,一直是业界和学者的研究热点。其控制策略与控制效果直接影响到整个电动汽车的安全性、稳定性和经济性等各项性能指标。目前来看,随着电力电子技术的飞速发展,交流电机驱动的电动汽车具有越来越广泛的应用前景。电动汽车性能的高低取决于交流驱动系统控制技术的先进或落后。

混合动力电动汽车中存在着电能、热能、机械能等之间能量相互转换的关系,能量管理控制策略通过不同能量源之间的优化分配、协调控制,可在保证车辆动力性、安全性及舒适性的前提下,改善燃油经济性和汽车排放性。通过使用先进的控制方法和控制系统设计实现车辆的能量优化流动,从而达到改善 10%~30% 的燃油经济性的目的。采用有物理意义的目标函数并基于系统模型的优化方法设计能量管理控制策略,能够实现车辆能量管理的近似最优控制。

本书结合汽车动力学理论、现代控制理论和电力电子技术进行电机驱动和能量管理控制策略的研究,共四部分,分十三章进行论述。

全书的结构安排如下。

第一部分为电动汽车基础知识和工作原理。该部分包括第 1 章绪论,第 2

章电动汽车电机驱动系统模型。

第二部分为电动汽车电机驱动控制技术。该部分包括第3章电动汽车电机驱动的自适应滑模控制,第4章基于模糊逻辑的电动汽车电机驱动鲁棒控制方法,第5章电动汽车电机驱动的T-S模型变结构控制方法,第6章电动汽车电机驱动系统的滑模观测器设计。

第三部分为电动汽车驱动与稳定性控制。该部分包括第7章基于纵向力优化分配的电动汽车稳定性控制,第8章混合终端滑模鲁棒控制在电动汽车中的应用,第9章一种电动汽车用双向AC-DC变换器的T-S模糊变结构回馈充电控制方法。

第四部分为电动汽车能量管理控制技术。该部分包括第10章混合动力电动汽车的能量管理与动态规划优化,第11章基于PMP的混合动力电动汽车能量管理与优化,第12章基于ECMS的混合动力电动汽车能量管理与优化,第13章混合动力电动汽车的能量管理与优化实例。

本书由张细政撰写并进行统稿。在撰写过程中,作者在湖南大学从事博士后研究工作,得到了合作导师湖南省自动化学会理事长、湖南大学电气与信息工程学院院长王耀南教授的指导,在此表示衷心的感谢。本书得到了以下项目的资助:国家自然科学基金项目“轮式驱动增程式电动汽车的功率优化与协调控制”(No. 61673164)和“分布式驱动电动汽车多电机的协调控制与优化”(No. 61203019),国家“863计划”项目“电动汽车整车智能控制”(No. 2012AA111004),湖南省高校科技创新团队“混合动力系统设计与控制”,湖南省教育厅科学研究重点项目分布式“驱动电动汽车多电机的动态Multi-Agent协调稳定控制方法”(No. 14A032)。本书的研究内容集中体现了以上科研项目的最新研究成果。

限于作者水平,书中难免存在疏漏之处,敬请广大读者和专家学者批评指正。(作者电子邮箱:zxz@ieee.org)

作者

2017年5月

目 录

第1章 绪 论

1.1 电动汽车发展概述	1
1.2 混合动力电动汽车结构	3
1.3 混合动力电动汽车的跨学科特性	7
1.4 电动汽车电机驱动控制技术	8
1.5 电动汽车能量管理策略	10
1.6 电动汽车常用仿真软件	11
1.6.1 ADVISOR 软件	12
1.6.2 CarSim 软件	16
1.6.3 AVL Cruise 软件	18
1.7 本章小结	19
◎参考文献	19

第2章 电动汽车电机驱动系统模型

2.1 驱动系统概述	24
2.2 车辆模型	25
2.3 感应电机基本动态数学模型	26
2.3.1 电压方程	27
2.3.2 磁链方程	27
2.3.3 转矩方程	28
2.3.4 运动方程	28
2.4 永磁同步电机基本动态数学模型	29
2.5 交流电机系统的状态方程	30
2.5.1 状态方程基础知识	30

2.5.2 感应电机状态方程	31
2.5.3 永磁同步电机状态方程	33
2.6 电池模型	34
2.7 本章小结	37
◎参考文献	37

第3章 电动汽车电机驱动自适应滑模控制

3.1 引言	39
3.2 永磁同步电机自适应反步滑模驱动控制	41
3.2.1 自适应反步滑模控制器设计	42
3.2.2 仿真分析	45
3.3 基于滑模与自适应观测器的感应电机驱动控制	48
3.3.1 非线性滑模变结构控制器设计	49
3.3.2 模型参考自适应观测器设计	54
3.3.3 仿真分析	57
3.3.4 实验结果	61
3.4 本章小结	62
◎参考文献	63

第4章 基于模糊逻辑的电动汽车电机驱动鲁棒控制方法

4.1 引言	65
4.2 感应电机间接自适应模糊滑模控制	66
4.2.1 感应电机模型	66
4.2.2 间接自适应模糊滑模控制器设计	68
4.2.3 仿真结果	72
4.3 本章小结	75
◎参考文献	75

第5章 电动汽车电机驱动的 T-S 模型变结构控制方法

5.1 引言	77
5.2 复杂非线性系统的 T-S 模糊建模	78
5.2.1 T-S 模型基础	78
5.2.2 T-S 模糊建模	79
5.2.3 单级倒立摆的 T-S 模型	80
5.3 永磁同步电机 T-S 模型模糊变结构控制	82
5.3.1 PMSM 电机模型	82
5.3.2 模糊变结构控制器设计	83
5.3.3 控制器实现及试验结果	89
5.4 感应电机 T-S 模型模糊变结构 H_∞ 鲁棒控制	94
5.4.1 感应电机 T-S 模型及输出跟踪控制	95
5.4.2 H_∞ 变结构控制器设计及稳定性分析	98
5.4.3 仿真分析	102
5.5 本章小结	104
◎参考文献	105

第6章 电动汽车电机驱动系统的滑模观测器设计

6.1 引言	107
6.2 基于滑模观测器的永磁同步电机变结构鲁棒控制	108
6.2.1 永磁同步电机模型	108
6.2.2 滑模观测器设计	109
6.2.3 变结构速度控制器设计	112
6.2.4 仿真分析	113
6.3 感应电机间接磁场定向矢量控制系统的滑模观测器设计	116
6.3.1 滑模电流与磁链观测器设计	116
6.3.2 仿真分析	119
6.4 新型电动汽车车用感应电机状态 - 滑模自适应观测器设计	121
6.4.1 感应电机模型	121
6.4.2 状态滑模观测器设计	122

6.4.3 仿真与试验	126
6.5 本章小结	129
◎参考文献	129

第7章 基于纵向力优化分配的电动汽车稳定性控制

7.1 引言	131
7.2 车辆稳定控制模型	132
7.2.1 车体模型	132
7.2.2 非线性轮胎模型	133
7.3 车辆稳定的分层控制器设计	135
7.3.1 车辆控制参考模型	135
7.3.2 上层横摆力矩 LQR 控制器	136
7.3.3 控制分配器	136
7.3.4 车轮滑模滑移率控制器	139
7.4 仿真分析与验证	141
7.4.1 仿真分析	141
7.4.2 CarSim 实车验证	150
7.5 本章小结	159
◎参考文献	159

第8章 混合终端滑模鲁棒控制在电动汽车中的应用

8.1 引言	161
8.2 EV 系统控制模型	162
8.2.1 驱动模型	165
8.2.2 再生制动模型	167
8.3 混合非奇异终端滑模控制	170
8.3.1 系统描述	170
8.3.2 HTSM 控制目标	171
8.3.3 控制律设计及稳定性分析	172
8.4 试验结果	175

8.4.1 电机效率	176
8.4.2 控制性能	178
8.4.3 续航能力	181
8.5 本章小结	182
◎参考文献	182

第9章 一种电动汽车用双向 AC-DC 变换器的 T-S 模糊变结构回馈充电控制方法

9.1 引言	185
9.2 电动汽车回馈充电控制系统的建模	187
9.2.1 无刷直流电机模型	187
9.2.2 能量再生制动过程	187
9.2.3 积分控制模型	191
9.3 电动汽车回馈充电的 T-S 模糊动态建模	192
9.3.1 T-S 模糊技术	192
9.3.2 回馈充电系统的 T-S 模糊动态建模	193
9.4 电动汽车回馈充电的 T-S 模糊滑模控制	195
9.4.1 模糊滑模面设计及稳定性分析	195
9.4.2 模糊滑模控制律设计	199
9.5 系统实现和仿真实验	201
9.5.1 系统结构和实现	201
9.5.2 仿真结果	203
9.5.3 实验结果	208
9.6 本章小结	212
◎参考文献	213

第10章 混合动力电动汽车的能量管理与动态规划优化

10.1 引言	216
10.2 能源管理策略的分类	217

10.3 混合动力汽车中的最优控制问题	218
10.4 动态规划的基本概念	220
10.5 基于 DP 算法的能量管理控制实例	221
10.6 本章小结	225
◎参考文献	226
第 11 章 基于 PMP 的混合动力电动汽车能量管理与优化	
11.1 引 言	229
11.2 带状态约束的最小化问题	229
11.3 基于 PMP 优化的能量管理控制	231
11.4 基于功率的 PMP 优化模型	234
11.5 本章小结	236
◎参考文献	237
第 12 章 基于 ECMS 的混合动力电动汽车能量管理与优化	
12.1 引 言	238
12.2 考虑状态约束的等效燃油消耗	241
12.3 PMP 极值原理与 ECMS 间的等效性	242
12.4 本章小结	243
◎参考文献	243
第 13 章 混合动力电动汽车的能量管理与优化实例	
13.1 并联型 HEV 动力系结构与建模	245
13.2 最优控制问题	246
13.3 等效因子的确定	248
13.4 优化结果	251
13.5 本章小结	254
◎参考文献	254

第 1 章 绪 论

1.1 电动汽车发展概述

电动汽车(Electric Vehicels, EVs)使用一个或多个牵引电机驱动车辆,其电力能量来源于车用蓄电池、太阳能电池板、燃料电池、发电机或由电力网络充电。电动汽车在 19 世纪中期首次出现,当时电力是驱动机动车辆的首选能量来源,具有汽油车无法实现的舒适度和易操作性。第一辆电动汽车是由电池供电的三轮车,由托马斯·达文波特于 1834 年发明出来。1890 年,在全世界 4200 辆汽车中,有 38% 是电动汽车,22% 是内燃机汽车,40% 是蒸汽车。那时候电动汽车是富裕的精英在道路交通中的首选,它们的成本相当于今天的劳斯莱斯。近一百年来内燃机(ICE)一直是机动车辆的主要驱动方式,但在其他车辆类型中,如火车和各类小型特种车辆,电力驱动依然普遍使用^[1,2]。

电动汽车早在 1878 年前就被发明出来了,但在与内燃机车(ICEV)的竞争中失去了技术和市场优势。到 20 世纪 30 年代,电动汽车几乎从市场上消失。电动汽车的重新兴起是在能源危机和石油短缺爆发后的 20 世纪 70 年代。随着现代社会人们对日益加重的大气污染、愈演愈烈的全球变暖及迫在眉睫的石油资源匮乏的担忧,电动汽车因具有零排放、低污染等方面的优势,无论在学术领域还是在商业领域又重新得到了广泛的关注。自 1980 年以来,节约能源和保护环境两大战略极大地促进了新型汽车技术的迅速发展。如何成功经受住商用汽车的市场化竞争,电动汽车面临着众多挑战和发展机会。

电动汽车包括纯电动汽车(PEV)、混合动力汽车(HEV)和燃料电池电动汽车(FEV)^[3,4]。从驱动车辆的动力源形式来看,PEV 是纯粹依靠电力能量给电机供电,从而驱动车辆,其最大优点为零排放。HEV 的动力源来自电力和汽、柴油两者,分别驱动电机和发动机运转,能实现比常规车辆更好的燃料经济性和更好的行驶性能。FEV 则直接或间接由车用氢氧混合燃料电池装置产生的电力作为动力驱动发动机。此外,为了区分加油装置,可以将 HEV 进一步分为常规 HEV 和可充电 HEV。常规 HEV 使用电机与发动机两种动力源驱动,依据动



力总成的方式可进一步细分为轻度混合 HEV、重度混合 HEV 和全混合 HEV,在不同工况下按照控制器的指令实现电机和发动机之间的出力协调。而可充电 HEV 则可以通过充电端口连接电网或者发动机-发电机组,其进一步分为插电式混合动力汽车(Plug-in HEV, PHEV)和增程式电动汽车(Rang Extended EV, REEV)。混合动力或插电式电动汽车的关键优点是具有再生制动能力,即它们在制动期间能够回收部分机械动能并将其转化为电能存储在车用电池中。表 1.1 给出了电动汽车的分类结果。

表 1.1 各类型电动汽车能量源及动力装置比较

车辆类型	能量源	动力装置
ICEV	汽油机/柴油机	发动机/电机
混合 HEV	汽油机/柴油机	发动机/电机
PHEV	汽油机/柴油机/电能	发动机/电机
REEV	汽油机/柴油机/电能	电机
PEV	电能	电机
FEV	氢能	电机

目前世界上畅销的纯电动汽车首推日产聆风(Leaf),截至 2016 年,全球销量达到 24 万台;其次是特斯拉 Model S,截至 2016 年 11 月,共超过 15 万辆。其他的包括三菱 i-MiEV、福特福克斯电气、宝马 ActiveE、本田 Fit EV、丰田 RAV4 EV、雷诺 Zoe、荣威 E50、Mahindra e2o、雪佛兰 Spark EV、菲亚特 500e、大众 e-Up、宝马 i3、起亚灵力 EV、比亚迪 e5 以及比亚迪 Qin EV300^[5-8]。

虽然费迪南德保时捷在 1901 年开发了 Lohner-Porsche,但混合动力电动汽车在 1997 年日本丰田普锐斯上市前并没有得到广泛使用,除此之外还有 1999 年的本田 Insight。这是因为汽油成本最初被认为较高,但世界范围内石油价格的上涨导致许多汽车制造商在 20 世纪 20 年代后期开始生产混合动力电动汽车。截至 2017 年 1 月,已有超过 1200 万辆混合动力电动汽车销往全球,主要市场是日本、美国和欧洲。在日本,2016 年混合动力汽车的市场份额占新车销售额的 38%。目前世界上畅销的混合动力电动汽车首推丰田普锐斯和雷克萨斯,截至 2017 年 1 月,普锐斯在日本的销量超过 180 万辆,在美国的销量达 175 万辆。

自2008年以来,全球销售了大约85万辆插电式电动汽车。由于强大的公共政策提供了多方面条件,截至2015年5月,美国拥有世界上规模最大的高速公路插电式电动车队,加利福尼亚州是该国最大的插电式汽车区域市场,2010年12月至2015年3月期间插电式汽车销售量近14.3万台,占美国销售的所有插电式汽车总量的46%以上。挪威是世界人均市场渗透率最高的国家,2013年每1000个居民有4部插电式电动汽车。据估计,截至2030年年底,电动车销售量可能约占新车销量的三分之一。

1.2 混合动力电动汽车结构

按照动力技术和能量传递方式可将电动汽车划分为两大类:一类是由内燃发动机(ICE)提供主要驱动功率、电池动力辅助的传统混合动力汽车(HEV);另一类是电池容量较大、具有纯电驱动能力的电动汽车,主要有PHEV、REEV和BEV。由于电池技术的不够成熟等原因,EV性能受到车用电池组容量、体积、成本和安全性等因素的极大限制。因此,至少在未来的一段时间里,混合动力汽车(HEV)仍是目前电动汽车市场的主导类型结构。HEV是常规ICE动力汽车和PEV的组合,它使用ICE、电机/发电机组为动力源。在HEV中,燃油仍然是能源的来源。ICE是主能源转换器并为车辆提供所需的全部能量。电机/发电机组通过在再生制动期间回收动能来降低燃料消耗,并通过调整发动机工作曲线来优化ICE的运行转矩和转速。

(1) 串联式电动汽车(SHEV)

串联式HEV的结构如图1.1所示。在串联式HEV中,ICE是主要的能量转换器,将原来汽油中的能量转化为机械功率。结构上,串联式HEV在传统燃油汽车上增加了发电机/整流器(Generator/Rectifier)、电池组、驱动电机(Traction Motor)和逆变器(Inverter)及其控制系统等器件。从燃油箱、发动机、发电机、整流器流出的能量是电能,一方面由电机控制器、牵引电机输出到机械传动装置,以提供车辆行驶所需的主要能量;另一方面由DC-DC变换器存储在电池组中,以维持电池组的荷电状态(State of Charge, SOC)。其中,从电池组、DC-DC变换器、电机控制器、驱动电机到机械传动装置的能量流动是双向的,



控制策略根据路况信息控制电机在驱动模式下或发电模式下工作,即在驱动时作为电动机使用,以提供整车行驶所需要的动力;在制动减速时,作为发电机使用,将整车动能的一部分转化为电能,并经 DC - DC 变换器对电池充电,从而实现能量的双向流动。由于发动机与车轮分离,发动机转速可以独立于车速控制。这不仅简化了发动机的控制,而且可以允许发动机以最佳转速工作,以达到最佳燃油经济性。

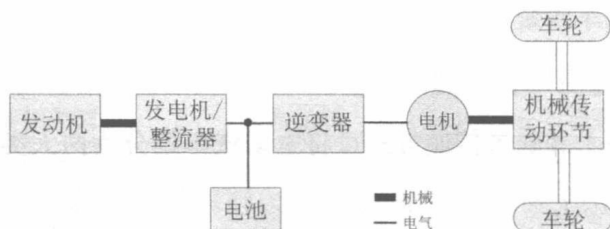


图 1.1 串联式电动汽车 (SHEV) 结构

根据车辆运行状况,串联式 HEV 可以运行于不同的工作模式。

纯电驱动模式:当电池有足够的能量且车辆的能量需求较低时,ICE 关闭,此时车辆仅由电池供电驱动。

混合驱动模式:在高功率需求状况下,启动 ICE 和发电机/整流器组合,提供车辆功率需求的主要部分;同时,电池提供车辆功率需求的剩余部分。

发动机驱动模式:在高速巡航和恒定高功率需求下,启动 ICE 和发电机/整流器组合,提供车辆功率需求的全部。依据电池 SOC 状态,电池可工作于充电状态或关闭状态。

再生制动模式:电机工作于发电模式,将车辆的制动动能转化为电能并为电池充电。

可以与传统车辆相同的配置方式配置串联式 HEV,即电机代替发动机。如果驱动电机类型为内置在驱动轮的轮毂电机,如图 1.2 所示,每个电机安装在每个车轮内,共有四个电机。由于取消了机械传动环节,车辆驱动系统的效率可以显著增加,且具有全轮驱动(AWD)功能。但是,独立控制四台电机是一个挑战。

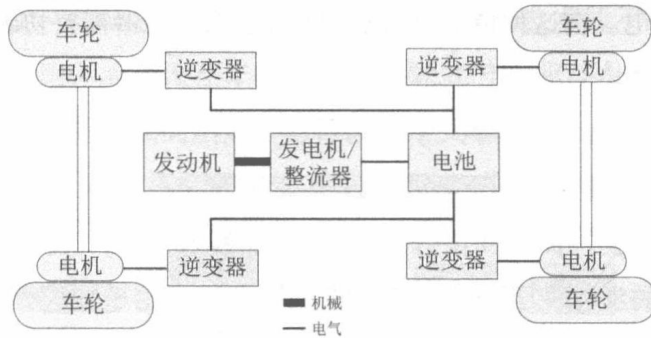


图 1.2 基于轮毂电机的 SHEV 结构

(2) 并联式电动汽车 (PHEV)

并联式 HEV 的结构如图 1.3 所示。并联式 HEV 使用牵引电机和发动机两种动力来驱动车辆,同时也可用发动机给电池组充电。其基本结构是由电机、发动机、电池、变压器和变速器组成。在这种结构下,ICE 和电机分属两套动力系统,可以分别独立地向车轮传递动力转矩,在不同的行驶工况下既可以独立驱动,又可以联合驱动。ICE 和电机通过离合器、分接器、皮带机构和齿轮箱等将转矩输出至驱动装置。电机也可以用作发电机,在制动期间回收动能,或从 ICE 吸收一部分动力。由于 ICE 直接通过传动机构驱动车辆,这种动力系统结构更接近传统的汽车驱动系统,能量损耗和燃料效率与普通汽车差不多,所以得到比较广泛的应用。

并联式 HEV 需要两个推进装置,即 ICE 和电机,可以运行以下工作模式。

电机独立模式:当电池有足够的能量且车辆动力需求低时,发动机关闭,车辆由电池供电和电机驱动。

组合功率模式:在车辆加速爬坡等高功率需求下,发动机和电机均开启,同时为传动机构提供扭矩。

发动机独立模式:在高速公路巡航和恒定的高功率需求下,发动机提供驱动车辆所需的所有动力。当电池 SOC 已经处于高水平,电机保持空转。

动力分配模式:发动机打开,当车辆动力需求低且电池 SOC 也较低时,则将发动机功率的一部分转换成电能,由发电机给电池充电。

再生制动模式:电机工作在发电模式,将车辆动能转化为电能并将其存储在电池中。在再生模式下,原则上发动机也可以开启,以提供额外的电流来更

快地对电池充电。在这种情况下,发动机和电机控制器需要协调控制,以匹配电池的总电量输入。

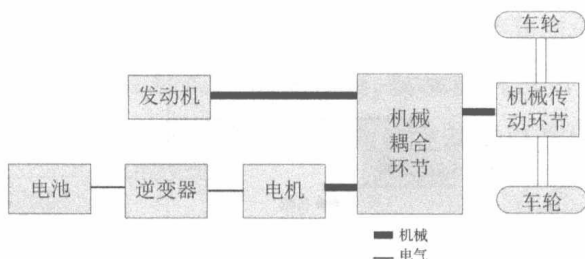


图 1.3 并联式电动汽车 (PHEV) 结构

(3) 混联式电动汽车 (PSHEV)

混联式 HEV 的结构如图 1.4 所示,包含了串联式和并联式的特点,因而也称为串并联式 HEV。结构上由牵引电机、发动机、电池、发电机、动力分离装置、变压器和变流器等组成。其动力系统又包括发动机、发电机和牵引电机,既能以发动机动力为主,也能以牵引电机动力为主来驱动车辆。

混联式 HEV 既可作为串联式 HEV 运行,也可作为并联式 HEV 运行。相比较于串联式 HEV,混联式 HEV 在发动机和车轮之间增加了机械连杆,所以发动机可以直接驱动车轮。相比较于并联式 HEV,混联式 HEV 增加了一个用作电池发电的发电机。混联式 HEV 可以用并联或串联模式运行,可以根据车辆的运行状况来优化燃油效率和驾驶性能。该控制自由度的提高使混联式 HEV 得到了广泛的应用。然而,由于组件和复杂性的增加,混联式 HEV 通常更加昂贵。

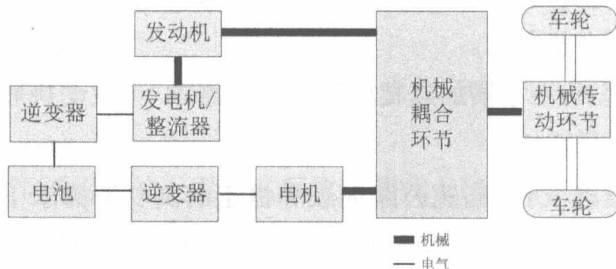


图 1.4 混联式电动汽车 (PSHEV) 结构

(4) 轮式分布驱动电动汽车 (In wheel EV, IEV)

复杂的 HEV 通常涉及使用行星齿轮系统和多电动机(在四轮/四轮驱动