

新能源汽车 动力电池产业 发展及趋势

闻人红雁 王秀丽◎著

DEVELOPMENT AND TREND
OF BATTERY INDUSTRY
FOR ELECTRIC VEHICLES



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

新能源汽车 动力电池产业 发展及趋势

闻人红雁 王秀丽◎著

DEVELOPMENT AND TREND OF
BATTERY INDUSTRY FOR ELECTRIC VEHICLES



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

新能源汽车动力电池产业发展及趋势 / 闻人红雁, 王秀丽著. — 杭州: 浙江大学出版社, 2019. 10

ISBN 978-7-308-18018-4

I. ①新… II. ①闻… ②王… III. ①新能源—汽车—蓄电池—产业发展—研究—中国 IV. ① F426.471

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 038307 号

新能源汽车动力电池产业发展及趋势

闻人红雁 王秀丽 著

责任编辑 张凌静

责任校对 黄梦瑶 杨利军

封面设计 续设计

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排版 杭州兴邦电子印务有限公司

印刷 虎彩印艺股份有限公司

开本 710 mm × 1000 mm 1/16

印张 21

字数 330 千

版印次 2019 年 10 月第 1 版 2019 年 10 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-308-18018-4

定价 98.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社市场运营中心电话 (0571) 88925591 ; <http://zjdxcs.tmall.com>

前 言

汽车作为 21 世纪民众出行的一种便利的交通工具，在人类社会中发挥着越来越重要的作用。回顾汽车发展史，1769 年，法国人 N. J. 居纽（Cugnot）制造了世界上第一辆蒸汽驱动的三轮汽车；1830 年，苏格拉人罗伯特·安德森（Robert Anderson）与托马斯·戴文波特（Thomas Davenport）打造出世界上第一部以电池为动力的电动汽车，以燃油驱动和电力驱动为主的两种动力技术一直在不断发展。1973 年，举世震惊的第一次石油危机爆发后，以日本主导的小型、省油、价廉的汽车技术备受青睐，引领各国技术以此为目标发展。20 世纪 80 年代，汽车开始普及起来，90 年代后汽车各项技术发展已相对成熟。进入 21 世纪，随着石油资源的枯竭和价格高涨以及环境污染问题的日益突出，电动汽车包括纯电动、混合动力汽车受到世界各国的广泛重视，电动汽车技术获得强劲发展动力。20 世纪九十年代末，日本丰田、本田等公司率先在美国市场推出混合动力汽车，揭开了电动汽车的新时代。如今，环保理念的纯电动车已走向市场，而高性能的动力电池是电动汽车的核心技术之一。本书首先回顾了电动汽车用动力电池的几个发展阶段，然后详细阐述了当前电动汽车市场主要的动力电池——锂离子电池技术的发展。

目前，我国无论是政府的政策引导和资金支持、高等院校和科研结构基础研究的不断深入，还是企业在汽车用动力电池领域的研发和投入，都形成了一个良好的发展环境。新能源汽车用动力电池产业作为一个蓬勃向上的朝阳产业已经形成。1991 年，日本索尼（Sony）公司率先开始销售锂离子电池，在电子业领域引发了一场革命。因为锂离子电池这种高效电池，研究人员得以发明更清洁的能源技术和电动汽车，从而有力地减少了温室气体和颗粒物的排放。2019 年，诺贝

尔化学奖授予约翰·B. 古迪纳夫 (John B. Goodenough)、M. 斯坦利·威廷汉 (M. Stanley Whittingham) 和吉野彰 (Akira Yoshino), 以表彰他们对锂离子电池的研究。目前, 液态锂离子电池已经进入第三代。正极材料的发展从 LiCoO_2 、 LiMn_2O_4 到基于安全性和价格而发展的 LiFePO_4 、三元 $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ 材料, 到目前已经实现产业化的高容量 811 高镍正极材料以及正在开发的层状结构富锂锰材料, 其电压和容量不断提高。负极材料的发展则从碳材料逐渐转向高容量硅基负极材料。电解液进一步功能化、高安全和高电压化。为了提高电池的安全性和循环性能, 陶瓷隔膜已经实现批量化生产。锂离子电池产业化技术及相关装备日趋成熟, 行业标准已基本形成。目前针对新能源汽车的发展要求, 提出了 300 Wh/kg 的锂离子动力电池目标。要实现这个比能量密度目标, 最为可行的方案是采用高镍正极和硅碳负极。从目前的研究进展来看, 电芯能量密度的实现没有问题, 关键是如何在此基础上兼顾电池安全性、循环性、倍率特性, 才能满足电动汽车的实际要求。现阶段, 日本、韩国、美国等国引领锂离子动力电池技术的发展。日本的行业水平具有领先优势, 韩国的动力电池制造能力处于领先地位, 美国则具有引领前沿的科研能力。中国经过十几年的发展, 在锂离子电池技术领域从电池正负极材料、隔膜、电解液及电池装备技术方面开展了全方位的布局, 所涉及的相关技术均已实现国产化。目前, 锂离子动力电池出货量以及市场消费量均居于世界首位。

可以说, 动力电池技术的发展是新能源汽车技术进步的关键因素之一, 他的研究开发与生产技术水平决定和制约着电动汽车的品质。因此, 现阶段迫切需要一本有关新能源汽车动力电池的专著, 以满足广大电动汽车汽车用户、电池生产企业、电动车企业以及科研院所应用研究的需求。作者力图通过对各类汽车用电池尤其是锂离子电池的发展作深入浅出的阐述, 使读者既能了解世界电动汽车用动力电池的发展状况, 又能掌握新能源汽车用动力电池未来的发展趋势。希望本书的出版能对我国电池工业的发展起到积极的促进作用。

浙江大学涂江平教授、夏新辉研究员对本书提出了不少修改意见, 作者在此对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢。在本书的编写过程中, 王子冬、闻人红权、干玲敏、毛松科、田德祥、汪东煌、张晟昭、张序清、陆迪、王敏雅、刘苏辐等

给予了很大的帮助，在此一并表示感谢。作者在编写本书的过程中参考了国内外有关电池的专著和近年来电池和材料相关的期刊文献，引用了所列参考文献的部分内容、图表和数据，在此向他们表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限，谬误和疏漏在所难免，敬请读者批评指正。

第1章 动力电池及其驱动的电动车辆

- 1.1 新能源汽车的定义和分类 / 1
 - 1.1.1 纯电动汽车 / 1
 - 1.1.2 混合动力汽车 / 7
 - 1.1.3 燃料电池电动汽车 / 12
- 1.2 发展新能源汽车的必要性 / 14
 - 1.2.1 石油短缺 / 14
 - 1.2.2 环境污染 / 15
 - 1.2.3 气候变暖 / 17
- 1.3 新能源汽车的发展简史及现状 / 18
 - 1.3.1 新能源汽车的发展简史 / 18
 - 1.3.2 新能源汽车的发展现状 / 22
- 1.4 动力电池的国内外技术现状 / 30
- 1.5 动力电池及电动汽车发展趋势 / 34
 - 1.5.1 对动力电池的要求 / 34
 - 1.5.2 产业化发展趋势 / 35

第2章 锂离子电池概述

- 2.1 锂离子电池工作原理 / 37
- 2.2 锂离子电池的基本构成 / 38
- 2.3 电池及电池组 / 41
- 2.4 锂离子电池的基本参数 / 41
 - 2.4.1 电压 / 41
 - 2.4.2 容量 / 43
 - 2.4.3 内阻 / 45
 - 2.4.4 能量与能量密度 / 46

- 2.4.5 功率与功率密度 / 48
- 2.4.6 荷电状态 / 48
- 2.4.7 放电深度 / 49
- 2.4.8 使用寿命 / 50
- 2.4.9 自放电率 / 50
- 2.4.10 不一致性 / 50
- 2.4.11 成本 / 51
- 2.4.12 放电制度 / 51
- 2.5 锂离子电池充电方法 / 52
 - 2.5.1 常规充电方法 / 53
 - 2.5.2 快速充电方法 / 54
- 2.6 锂离子电池的特性 / 59
 - 2.6.1 锂离子电池的充电特性 / 59
 - 2.6.2 锂离子电池放电特性 / 61
 - 2.6.3 锂离子电池的容量及影响因素 / 62
 - 2.6.4 锂离子电池的内阻及影响因素 / 63
 - 2.6.5 锂离子电池自放电速率与电池存储性能 / 64
- 2.7 锂离子电池的特点 / 66
 - 2.7.1 锂离子电池的优点 / 66
 - 2.7.2 锂离子电池的不足 / 66
 - 2.7.3 锂离子电池的失效机理 / 67
- 2.8 锂离子电池的应用 / 69

第3章 锂离子动力电池

- 3.1 锂离子动力电池的重要参数及计算方法 / 72
 - 3.1.1 电池荷电状态及估算方法 / 72
 - 3.1.2 电池健康状态的定义与估算方法 / 75
 - 3.1.3 电池内阻 R 及其测量方法 / 77
 - 3.1.4 动力电池自放电率及测试方法 / 78
- 3.2 锂离子动力电池整体评价的7大要素 / 79
- 3.3 新能源汽车对动力电池能量密度和功率密度的要求 / 81

- 3.3.1 纯电动场地车辆 / 81
- 3.3.2 纯电动道路车辆 / 82
- 3.3.3 混合动力电动车辆 / 82
- 3.4 锂离子动力电池正极材料 / 83
 - 3.4.1 层状化合物 / 84
 - 3.4.2 橄榄石型结构 / 96
 - 3.4.3 尖晶石型结构 / 102
- 3.5 负极材料 / 104
 - 3.5.1 插入反应负极材料 / 104
 - 3.5.2 合金反应负极材料 / 113
 - 3.5.3 转换反应负极材料 / 115
- 3.6 电解液 / 117
 - 3.6.1 溶剂 / 117
 - 3.6.2 锂盐 / 120
- 3.7 隔膜与黏结剂 / 123
 - 3.7.1 隔膜 / 123
 - 3.7.2 黏结剂 / 130
- 3.8 锂离子动力电池制造工艺 / 136
 - 3.8.1 电池设计 / 137
 - 3.8.2 锂电池主要制造工艺 / 138
 - 3.8.3 电池的安全性 / 148
 - 3.8.4 圆柱 / 方形 / 软包动力电池的比较 / 152

第4章 新能源汽车用动力电池发展遇到的问题

- 4.1 新能源汽车锂离子动力电池成本分析 / 160
 - 4.1.1 锂离子动力电池价值链分析 / 160
 - 4.1.2 锂离子动力电池成本分析 / 161
 - 4.1.3 锂离子动力电池成本降低途径 / 165
- 4.2 新能源汽车锂离子动力电池 BMS 产业发展分析 / 167
 - 4.2.1 锂离子动力电池 BMS 产业发展政策分析 / 167
 - 4.2.2 锂离子动力电池 BMS 技术进展分析 / 167

- 4.2.3 锂离子动力电池 BMS 行业现状分析 / 173
- 4.3 新能源汽车锂离子动力电池充电桩行业发展分析 / 174
 - 4.3.1 锂离子动力电池充电桩行业的基本情况 / 174
 - 4.3.2 锂离子动力电池充电桩行业商业模式 / 177
 - 4.3.3 锂离子动力电池充电桩行业未来趋势 / 179
- 4.4 废旧锂离子动力电池回收利用现状分析 / 182
 - 4.4.1 废旧锂离子动力电池回收利用政策分析 / 182
 - 4.4.2 废旧锂离子动力电池回收利用工艺分析 / 185
 - 4.4.3 废旧锂离子动力电池回收利用模式分析 / 187
 - 4.4.4 废旧锂离子动力电池回收利用未来趋势 / 190

第 5 章 新能源汽车用动力电池发展趋势

- 5.1 下一代高比容量动力电池 / 192
 - 5.1.1 正极材料 / 193
 - 5.1.2 负极材料 / 203
- 5.2 锂硫电池 / 232
 - 5.2.1 锂硫电池概述 / 232
 - 5.2.2 锂硫电池正极材料的研究进展 / 237
 - 5.2.3 锂硫电池产业化现状 / 246
- 5.3 固态电池 / 247
 - 5.3.1 固态电池概述 / 247
 - 5.3.2 无机固态电解质 / 249
 - 5.3.3 聚合物电解质 / 253
 - 5.3.4 复合固态电解质 / 256
 - 5.3.5 固态电池产业化发展及趋势 / 259

第 6 章 未来新能源汽车及动力电池行业的思考

- 6.1 未来新能源汽车及动力电池发展方向 / 272
 - 6.1.1 电池组能量密度的提升 / 272
 - 6.1.2 模块化和标准化 / 274

- 6.2 新能源汽车用动力电池开发和生产过程中需解决的关键问题 / 278
 - 6.2.1 生产过程中的加工一致性问题 / 278
 - 6.2.2 快充电池设计、工艺匹配问题 / 279
 - 6.2.3 动力电池梯次利用的瓶颈 / 280
 - 6.2.4 动力电池作为刚性配角须进一步发展 / 281
- 6.3 新能源汽车和动力电池发展的思考 / 282
 - 6.3.1 补贴政策日趋成熟，由政策驱动转变为需求驱动 / 282
 - 6.3.2 动力锂电结构性产能过剩，行业集中度在竞争中提升 / 285
 - 6.3.3 上游材料成为关键因素，三元电池占据乘用车统治地位 / 286
 - 6.3.4 新能源车性能提升显著，盈亏平衡有望提前实现 / 288
 - 6.3.5 前瞻性电池技术路线清晰，全固态电池成为关注焦点 / 289
 - 6.3.6 回收路线渐趋清晰，商业体系仍待健全 / 290

参考文献 / 292

附录 新能源汽车动力电池相关政策 / 308

第 1 章

动力电池及其驱动的电动车辆

1.1 新能源汽车的定义和分类

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，综合车辆的动力控制和驱动方面的先进技术，形成的技术原理先进、具有新技术和新结构的汽车。

从全球新能源汽车的发展来看，其动力电源主要包括锂离子电池、镍氢电池、燃料电池、铅酸电池、超级电容器，其中超级电容器大多以辅助动力源的形式出现，主要原因是电池技术还不完全成熟或缺点明显。新能源汽车与传统汽车相比，不管是成本、动力还是续航里程，都还有不小差距。这也是制约新能源汽车发展的重要原因。新能源汽车包括纯电动汽车、增程式电动汽车、混合动力汽车、燃料电池电动汽车和其他新能源汽车等^[1]。

1.1.1 纯电动汽车

纯电动汽车 (battery electric vehicle, BEV) 是指以车载电源为动力，用电机驱动车轮行驶，符合道路交通、安全法规各项要求的车辆。它是完全由可充电电池 (如铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池或锂离子电池) 提供动力源的汽车^[2]。

1.1.1.1 纯电动汽车的分类及构成

1. 纯电动汽车的构成

纯电动汽车的总体构成可分为主能源子系统、电力驱动子系统和辅助控制子系统三部分，如图 1.1 所示。

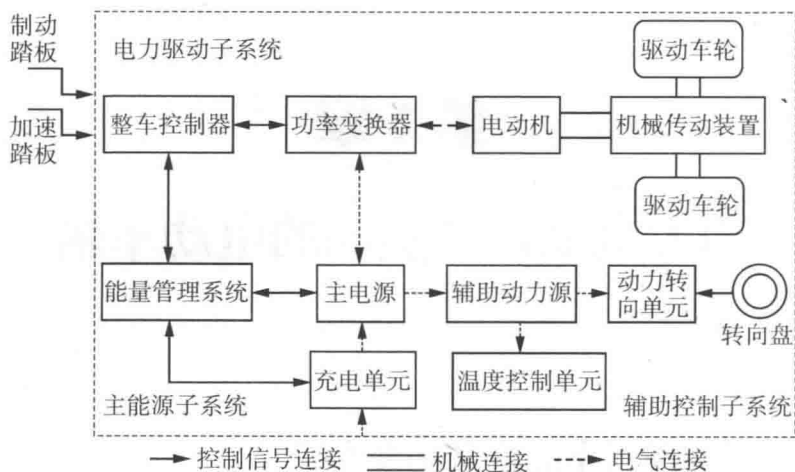


图 1.1 纯电动汽车的结构

(1) 主能源子系统

主能源子系统包括主电源（蓄电池）和能量管理系统，带有车载充电设备的纯电动汽车还应包括充电单元。

1) 主电源。蓄电池是纯电动汽车的能量来源，其主要作用是通过功率变换器向电动机提供能量。电动汽车的驱动电动机获得电能后，将电源的电能转化为机械能。应用最广泛的电源是铅酸蓄电池，但随着电动汽车技术的发展，铅酸蓄电池由于能量低、充电速度慢、寿命短，逐渐被其他蓄电池所取代。正在发展的电源主要有钠硫电池、镍镉电池、锂电池、燃料电池等，这些新型电源的应用，为电动汽车的发展开辟了广阔的前景。

2) 能量管理系统。纯电动汽车能量管理系统作为电池系统的重要组成部分，具有实时监控电池状态、优化使用电池能量、延长电池寿命和保证电池的使用安全等重要作用。能量管理系统对整车的安全运行、整车控制策略的选择、充电模式的选择以及运营成本都有很大影响。能量管理系统无论在车辆运行还是在充电过程中都要可靠地完成电池状态的实时监控和故障诊断，并通过总线的方式告知车辆集成控制器或充电机，以便采用更加合理的控制策略，达到有效且高效使用电池的目的。

3) 车载充电设备。车载充电设备用于向主电源充电，充电的电源为工业或民用电力电网的电源插座。因此，车载充电设备应具有变压、调压、整流、滤波

等基本功能。功能较为完备的车载充电设备还接受能量管理系统的控制，可自动进行充电方式选择（定压、定流、均衡充电等）、充电终了判别和自动停充保护控制等。

（2）电力驱动子系统

电动汽车的结构布置各式各样，比较灵活，概括起来分为纯电动汽车电动机中央驱动和电动轮驱动两种形式。

1) 纯电动汽车采用电动机中央驱动形式，直接借用了内燃机汽车的驱动方案，由发动机前置前驱发展而来，由电动机、离合器、变速箱和差速器组成。用电驱动装置替代了内燃机，通过离合器将电动机动力与驱动轮进行连接或动力切断，变速箱提供不同的传动比以变更转速—功率曲线匹配的需要，差速器实现转弯时两车轮不同车速的行驶。

2) 纯电动汽车采用双电动机电动轮驱动方式，机械差速器被两个牵引电动机所代替，两个电动机分别驱动各自车轮，转弯时通过电子差速控制以不同车速行驶，省掉了机械变速器。

（3）辅助控制子系统

辅助控制子系统包括辅助动力源和车载用电设备两部分。

1) 辅助动力源。辅助动力源用于向电动汽车上的电器和电子控制装置提供电力。辅助动力源通常配备直流电压（DC/DC）转换器，以便将主电源的电压转换为车载用电设备所需的电压。

2) 车载用电设备。车载用电设备除了照明、信号、仪表等汽车必须装备的电器外，还包括刮水器、电动车窗、电动门锁、收放机等辅助电器。现在的纯电动汽车，其安全性和舒适性能可与燃油汽车相媲美，因此，汽车空调装置、动力转向系统、防抱死制动装置等也构成了车载用电设备的一部分。

2. 纯电动汽车的类型

纯电动汽车发展至今，种类较多，按不同的分类方法分类，可分为以下几类（见图 1.2）^[2]。

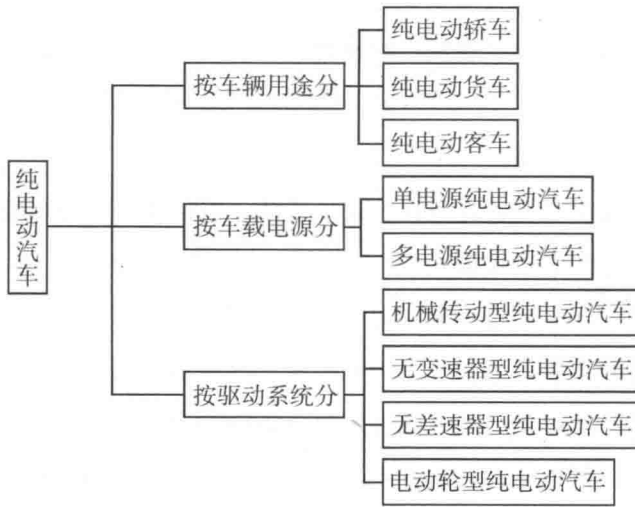


图 1.2 纯电动汽车的分类

(1) 按纯电动汽车的用途不同分类

1) 纯电动轿车。纯电动轿车是目前最多见的纯电动汽车，除了一些概念车，已经有了批量生产，并已进入汽车市场。

2) 纯电动货车。用于公路运输的纯电动货车，目前还比较少。在矿山工地等一些特殊场地则早已出现过一些大吨位的纯电动载货汽车。

3) 纯电动客车。目前，纯电动的小型客车较少见，纯电动大客车多用作公共汽车。在一些城市的公交线路及世界博览会、世界性的运动会上，纯电动大客车已经有了良好的表现。

(2) 按纯电动汽车车载电源数不同分类

1) 单电源纯电动汽车。单电源纯电动汽车的主电源就是蓄电池，蓄电池可选择铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池等不同类型单电源，单电源纯电动汽车的结构较为简单，控制也较简便。主要缺点是主电源的瞬时输出功率易受蓄电池性能的影响，制动能量的回收效率也会受制于蓄电池的最大可接受电流及蓄电池的荷电状态。

2) 多电源纯电动汽车。多电源纯电动汽车采用蓄电池加辅助储能装置的电源组合，在汽车起步、加速、爬坡等行驶工况下，利用超级电容和飞轮电池可在

短时间内输出大功率的特点协助蓄电池供电, 可使电动汽车的动力性大为提高, 并且可以降低对蓄电池的容量、比能量、比功率等的要求。此外, 在汽车制动时则利用辅助储能装置, 可接受大电流充电的特点, 可提高制动能量回收的效率。

(3) 按纯电动汽车的驱动系统组成和布置形式分类

1) 机械传动型纯电动汽车。机械传动型纯电动汽车大都由发动机前置、后轮驱动的燃油车发展而来。这种纯电动汽车 [见图 1.3 (a)] 保留了内燃机汽车的传动系统, 只是把内燃机换成了电动机。此种结构形式可以提高纯电动汽车的启动转矩及低速时的后备功率。对驱动电动机要求低, 可选择功率较小的电动机。

2) 无变速器型纯电动汽车。无变速器型纯电动汽车的驱动系统取消了离合器和变速器, 采用固定速比的减速器, 通过电动机的控制, 实现变速功能。这种结构形式 [见图 1.3 (b)] 的优点是机械传动装置的质量较轻, 体积较小, 但对电动机的要求较高, 不仅要求有较高的启动转矩, 而且要求较大的后备功率, 以保证纯电动汽车在起步、爬坡、加速时的动力性能。无变速器型纯电动汽车的另外一种结构如图 1.3 (c) 所示, 这种结构与发动机横向前置前轮驱动的燃油汽车的布置方式类似, 它把电动机、固定速比减速器和差速器集成为一个整体, 两根半轴连接驱动车轮, 这种结构在小型电动汽车上应用很普遍。

3) 无差速器型纯电动汽车。无差速器型纯电动汽车如图 1.3 (d) 所示, 这种结构形式采用两个电动机, 通过固定速比的减速器分别驱动两个车轮, 每个电动机的转速可以独立调节。汽车转向时, 由电子控制系统实现电子差速, 因而此类纯电动汽车的电动机控制系统比较复杂。

4) 电动轮型纯电动汽车。电动轮型纯电动汽车如图 1.3 (e) 所示, 将电动机直接装在驱动轮内, 可进一步缩短电动机到驱动车轮之间的动力传递路径, 但需要增设减速比较大的行星齿轮减速器, 以便将电动机转速降低到理想的车轮转速。这种结构形式对控制系统的控制精度和可靠性要求较高。电动轮型纯电动汽车的另一种结构形式如图 1.3 (f) 所示, 这种结构形式采用低速外转子电动机, 去掉了减速齿轮, 将电动机的外转子直接安装在车轮的轮缘上, 该结构形式电动机与驱动车轮之间无任何机械传动装置, 无机械传动损失, 空间利用率最大。这种由电动机直接驱动车轮的纯电动汽车对电动机的性能要求最高, 要求电动机有较高的启动转矩和较大的后备功率。

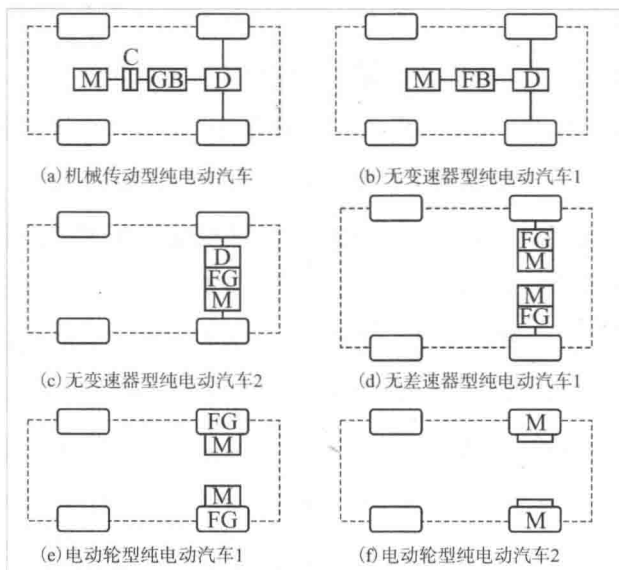


图 1.3 纯电动汽车电力驱动系统的结构形式

1.1.1.2 纯电动的优点

1. 工作时无污染且噪声低

纯电动汽车具有环保、噪声低、经济易保养的优点。由于电动汽车采用动力电池组及电机驱动动力，它工作时不会产生废气，不排放尾气，对环境保护和空气的洁净是十分有益的，可以说几乎是“零污染”，相对传统汽车而言，对环境影响较小，其前景被广泛看好。

2. 能源效率高且多样化

总体上，纯电动汽车的能源效率要高于汽油机汽车，尤其是在城市街道运行、汽车走走停停、行驶工况变化频繁的情况下，纯电动汽车优势更加明显。因为低速状态下电动机的效率比小负荷下的发动机效率高，而且纯电动车停驶时不消耗电能，在车辆制动过程中还可以实现制动能量回收利用。

3. 结构简单且使用维修方便

纯电动汽车结构简单，而且操作驾驶也较为简单。此外，纯动力汽车的动力传动部件较少，维护和保养工作量小，电动机本身以及动力驱动系统、电子控制系统的故障检修比传统发动机及其电子控制系统简单得多。