"十四五"职业教育国家规划教材

新能源汽车技术

（第三版）

主编　陈　新　潘天堂

双色印刷　移动终端　完美匹配

精品资源　互动教学　即扫即看

以书会友　教学相长

南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

新能源汽车技术 / 陈新，潘天堂主编. — 3 版.
南京 ：南京大学出版社，2025. 5. — ISBN 978 - 7 - 305 - 29268 - 2

Ⅰ. U469.7

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025J67P47 号

出版发行　南京大学出版社
社　　址　南京市汉口路 22 号　　邮　　编　210093

书　　名　新能源汽车技术
XINNENGYUAN QICHE JISHU
主　　编　陈　新　潘天堂
责任编辑　吴　华　　编辑热线　025 - 83596997

照　　排　南京开卷文化传媒有限公司
印　　刷　南京新世纪联盟印务有限公司
开　　本　787 mm×1092 mm　1/16 开　　印张 15.25　字数 390 千
版　　次　2025 年 5 月第 3 版
印　　次　2025 年 5 月第 1 次印刷
ISBN　978 - 7 - 305 - 29268 - 2
定　　价　49.80 元

网　　址：http://www.njupco.com
官方微博：http://weibo.com/njupco
微信公众号：njupress
销售咨询：(025)83594756

前　言

当前，全球能源结构正经历深刻转型，环境保护意识日益深入人心。在这一大背景下，新能源汽车产业以前所未有的速度蓬勃发展，已成为推动全球汽车产业革命性变革的核心引擎，更是我国构建现代化产业体系、实现高质量发展的重要着力点。党的二十大报告明确提出“推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展的关键环节”，并强调要“加快规划建设新型能源体系”，同时将教育、科技、人才作为“全面建设社会主义现代化国家的基础性、战略性支撑”。培养掌握新能源汽车核心技术、具备创新能力和工匠精神的高素质技术技能人才，对于落实国家“双碳”战略目标、推动产业转型升级、实现科技自立自强具有至关重要的战略意义。

《新能源汽车技术》教材的编写，正是基于这样的时代背景、国家战略和行业迫切需求。职业教育作为连接教育与产业的桥梁，必须紧密对接国家重大战略部署和产业发展前沿，精准把握企业职业岗位的核心能力要求，以培养服务高质量发展、适应产业变革的实战型、创新型人才为根本目标。

本书严格遵循职业教育规律，深入调研汽车服务行业、企业的真实职业岗位能力需求，采用任务引领、项目驱动的教学模式，贯彻理论与实践一体化的教学理念，始终突出以能力为本位、以学生为中心的原则。我们对新能源汽车的核心知识体系进行了科学整合，设立了清晰的学习目标。通过本书的学习与实践，学生能够自主完成学习任务，逐步掌握新能源汽车技术的精髓，为投身制造强国、交通强国建设打下坚实基础。

全书共设置 4 个学习单元，系统涵盖：新能源汽车概况、新能源汽车主要类型（纯电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车）、新能源汽车关键技术以及其他新能源汽车（如空气动力汽车、太阳能汽车）。教材重点介绍了新能源汽车的核心技术，包括动力电池技术（涵盖固态电池、钠离子电池等前沿方向）、驱动电机技术、电控技术、充电技术以及智能网联技术；详细解析了纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车的结构组成与工作原理；同时对空气动力汽车和太阳能汽车的特点、发展现状及未来趋势进行了介绍。通过学习，学生能够深入理解新能源汽车各系统的结构特点、工作原理及其相互关系。本书第一版于 2020 年入选“十三五”职业教育国家规划教材，第二版于 2023 年入选“十四五”职业教育国家规划教

材，第三版于2025年通过了“十四五”职业教育国家规划教材的修订备案，这既是对教材质量的肯定，也体现了其在服务国家战略需求、助力高素质技术技能人才培养方面的价值。

本书在编写过程中参阅了大量国内外文献资料和行业标准，在此，编者向所有原作者致以最诚挚的谢意。由于编者水平所限，加之新能源汽车技术日新月异，书中难免存在疏漏与不足之处，恳请广大师生、行业专家和读者朋友不吝批评指正，我们将持续改进，力求完善。

编　者

目　录

扫码可见本单元视频及拓展阅读资料

单元一 新能源汽车概况

知识目标

1. 掌握新能源汽车的概念及种类；
2. 了解发展新能源汽车的必要性；
3. 熟悉国内外新能源汽车的发展现状；
4. 对新能源汽车的发展趋势有明确的认识。

技能目标

1. 能根据驱动汽车的能量不同，掌握新能源汽车的类型；
2. 了解石油短缺、环境污染、气候变暖是发展新能源汽车的根本原因；
3. 会分析新能源汽车产业政策，明确发展新能源汽车的方向。

素质目标

1. 认同绿色低碳理念，理解新能源汽车对可持续发展的重要意义；
2. 关注技术革新，主动思考新能源汽车对未来能源与交通的影响；
3. 能在团队中高效协作完成调研或方案设计，持续跟踪行业动态更新知识。

单元导读

能源消费高碳攀升，气候警钟长鸣

2024 年《BP 世界能源统计年鉴》数据显示，全球能源消费总量较 2022 年增长 2.7%，化石能源占比仍高达 82%，导致二氧化碳排放量同比增加 1.8%，突破 370 亿吨历史峰值。这一趋势与《巴黎协定》控温目标严重背离，全球变暖警报再度拉响。

报告指出，2023 年极端天气频发背景下，能源需求出现结构性矛盾：地缘冲突与能源安全焦虑导致煤炭消费量逆势反弹 3.1%，印度、东南亚国家煤炭进口量创十年新高。美国页

岩气产量攀升 4.2%，天然气消费占比持续扩大，其全生命周期碳排放被严重低估。

气候科学家警告，当前碳排放轨迹将使 21 世纪末温升突破 2.7℃。北极海冰面积已缩减至 1980 年的 40%，格陵兰冰盖消融速度较 20 年前加快 5 倍。BP 首席经济学家坦言："能源转型速度落后于气候恶化速度，需每年投入 3 万亿美元清洁能源资金，而目前缺口达 47%。"

图 1-1　全球变暖

联合国气候小组强调，若 2030 年前无法实现碳排放量减半，临界点事件将不可逆转。能源转型已从技术竞赛升级为文明存续之战，人类亟需重构能源政治与经济逻辑。

模块一　新能源汽车基础认知

【知识点 1】　新能源汽车的定义及分类

1. 新能源汽车定义

新能源汽车英文为 New Energy Vehicles，我国 2009 年 7 月 1 日正式实施了《新能源汽车生产企业及产品准入管理规则》，此规则明确指出：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，但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，生产出来的技术原理先进，具有新技术、新结构的汽车。

2. 新能源汽车分类

2020 年 7 月 24 日修订的《新能源汽车生产企业及产品准入管理规定》中新能源汽车包括三大类型：插电式混合动力汽车（PHEV，含增程式）、纯电动汽车（BEV）、燃料电池汽车（FCEV）。

除此，还有其他新能源汽车如太阳能汽车，空气动力汽车等。非常规的车用燃料指除汽油、柴油、天然气（NG）、液化石油气（LPG）、乙醇汽油（EG）、甲醇、二甲醚之外的燃料，因此人们熟知的天然气汽车、液化石油气汽车、甲醇汽车都不属于新能源汽车，而属于节能汽车。

纯电动汽车：驱动能量完全由电能提供，由电机驱动的汽车，电机的驱动电能来源于车载可充电储能系统或其他能量储存装置。

插电式混合动力汽车：混合动力电动汽车是指同时装备两种动力源——热动力源（由传统的汽油机或者柴油机产生）与电动力源（电池与电动机）的汽车。插电式混合动力汽车是指可以使用电力网对车载可充电动力蓄电池进行充电的混合动力汽车。增程式汽车是以电能为主要驱动能源、发动机为辅助动力源，兼有外接电源充电和车载自供电功能的一种特殊混合动力汽车。

燃料电池电动汽车：动力系统主要由燃料电池发动机、燃料箱（氢瓶）、电机和动力蓄电池等组成，采用燃料电池发电作为主要能量源，通过电机驱动的汽车。

【知识点 2】　新能源汽车发展的必要性认知

石油短缺、环境污染、气候变暖是全球汽车产业面对的共同挑战，各国政府及产业界纷纷提出各自的发展战略，积极应对，以保持其汽车产业的可持续发展，并提高未来的国际竞争力。新能源汽车已成为汽车工业的发展热点。

1. 石油短缺

世界能源主要包括石油、天然气、煤炭等，目前汽车的燃料主要是来自石油的汽油和柴油。2020 年 6 月 17 日，《BP 世界能源统计年鉴》第 69 版发布对 2019 年能源数据的收集和分析。据预测，目前全球已探明的石油储量可开采不到 40 年，已探明天然气储量可开采约 60 年，已探明煤炭储备量可开采约 150 年，世界能源危机日益突出。

2020 年，在世界能源消耗总量中，石油占 31.2%，煤炭占 27.2%，天然气占 24.7%，其他占 16.9%。中长期角度来看，在碳中和背景下，一次性能源需求将不断降低，新能源新业务实现清洁替代是未来能源发展的大方向。

截至 2019 年底，全球前 10 大探明石油储量国排名见表 1－1，石油储量总共为 17 339 亿桶，占世界石油储量的 86.7%。

表 1－1　全球前十大探明石油储量国排名

排　名	1	2	3	4	5
国家	沙特阿拉伯	加拿大	伊朗	伊拉克	科威特
储量/亿桶	2 599	1 752	1 376	1 150	1 015
所占比例	21.8%	14.69%	11.54%	9.65%	8.51%
排　名	6	7	8	9	10
国家	委内瑞拉	阿联酋	俄罗斯	利比亚	尼日利亚
储量/亿桶	994	978	600	443	372
所占比例	8.34%	8.2%	5.03%	3.72%	3.12%

石油在交通运输行业的消费占比非常大，近 60%。美国能源部预测，2020 年以后，全球石油需求与常规石油供给之间将出现净缺口，2050 年的供需缺口几乎相当于 2000 年世界石油总产量的两倍。

我国是一个能源短缺的国家，已探明石油储量约 256 亿桶，约占世界储量的 1.50%，却是一个能源消费大国。我国的石油消耗量仅次于美国，位居世界第 2 位，国际能源机构预测，随着中国汽车购买量的增加，到 2030 年，我国石油消耗量的 80%需要依靠进口。

目前世界汽车保有量约 8 亿辆，预计到 2030 年全球汽车保有量将突破 20 亿辆，主要增量来自发展中国家。至 2021 年年底，我国汽车保有量已达 3.95 亿辆，由此带来的能源安全问题将更加突出。

汽车消费的快速增长导致石油消耗加速增长。我国机动车燃油消耗量约占全国总油耗

的 1/3，这也使得我国石油对外依存度每年都在不断攀升，2021 年我国石油对外依存度已达 70%，其中汽车的石油消耗占国内石油总需求的 70%。

表 1-2　汽车占全国汽油和柴油消耗的比例

年　份	汽　油			柴　油		
	汽油消耗量/万吨	汽车消耗量/万吨	汽车消耗比例(%)	柴油消耗量/万吨	汽车消耗量/万吨	汽车消耗比例(%)
2005	4 816	4 193	86.7	10 967	3 971	36.2
2006	5 209	4 547	87	11 600	4 469	38.5
2007	5 606	4 894	87	12 422	5 050	40.7

2. 环境污染

燃油汽车在行驶过程中会产生大量的有害气体，不但污染环境，而且大大地影响人类健康。汽车尾气排放的主要污染物为一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO_x)、铅(Pb)、细微颗粒物及硫化物等。这些一次污染物还会通过大气化学反应生成光化学烟雾、酸沉降等二次污染物。全球大气污染的 42%源于交通车辆产生的污染。随着城市机动车数量的快速增长，机动车排气污染已成为城市大气污染的主要贡献者。一些城市机动车排放的污染物对多项大气污染指标的贡献率已达到 70%。机动车排放污染已对城市大气污染构成了严重威胁。因此，必须研究改善城市机动车排放污染的对策和措施。

即使每一辆机动车都达到了国家规定的排放法规要求，也不能保证城市的交通污染就一定可以达到环保标准要求。这是由于大量机动车在一定时间、空间内的相对集中，从而造成城市的某一地区在排放污染物总量上超标。因此，从机动车管理的角度来考虑，减轻环境污染就要疏导交通，提高机动车运行速度，优化路网布局，合理分配车流，减少城市中心区的车流密度，改善汽车运行工况，降低机动车污染物排放。

欧洲制订了旨在限制汽车污染物排放的欧Ⅴ和欧Ⅵ标准。根据新标准，未来欧盟国家本地生产及进口汽车的污染物排放量，特别是氮氧化物和颗粒物排放量的控制将日益严格。

欧Ⅴ标准于 2009 年 9 月 1 日开始实施。根据这一标准，柴油轿车的氮氧化物排放量不应超过 180 mg/100 km，比欧Ⅳ标准规定的排放量减少了 28%；颗粒物排放量则比欧Ⅳ标准规定的减少了 80%，所有柴油轿车必须配备颗粒物滤网。柴油 SUV 执行欧Ⅴ标准的时间是 2012 年 9 月。

相对于欧Ⅴ标准，于 2014 年 9 月实施的欧Ⅵ标准则更加严格。根据欧Ⅵ标准，柴油轿车的氮氧化物排放量不应超过 80 mg/100 km，与欧Ⅴ标准相比，欧Ⅵ标准对人体健康的益处将增加 60%～90%。

柴油面包车和 7 座以下载客车实施欧Ⅴ和欧Ⅵ标准的时间分别比轿车晚 1 年。2010 年 9 月，面包车等实施欧Ⅴ标准，面包车的氮氧化物排放量不应超过 280 mg/100 km；2015 年 9 月实施欧Ⅵ标准后，新款面包车的氮氧化物排放量不应超过 125 mg/100 km。

欧洲标准是我国借鉴的汽车排放标准，目前国产新车都会标明发动机废气排放达到的欧洲标准。2020 年 7 月 1 日起，我国汽车尾气排放标准全面迈进国六时代，与国五标准相

比，重型车国六标准要求进一步加严，NO_x 和颗粒物限值分别减低 77%和 67%，本次“国六”标准是目前世界上尾气排放最严标准之一，甚至超过了“欧六”标准。

3. 气候变暖

能源的大量消耗会带来温室气体排放问题。二氧化碳是全球最重要的温室气体，是造成气候变化的主要原因，而它主要来自石化燃料的燃烧。

据世界上许多科学家预测，未来 50～100 年人类将完全进入一个变暖的世界。由于人类活动的影响，温室气体和硫化物气溶胶的浓度增加过快，未来 100 年全球平均地表温度将上升 1.4℃～5.8℃，到 2050 年我国平均气温将上升 2.2℃。

越来越多的证据证明，人类活动是造成气候变暖的原因，而气候变暖又是由于大气中聚集了大量温室气体，主要是二氧化碳。

气候变化风险加剧，交通领域二氧化碳排放成为关注焦点，据 IEA 估计，汽车二氧化碳总排放量将从 1990 年的 29 亿吨增加到 2020 年的 60 亿吨。汽车排放对地球环境造成了巨大的影响。

模块二　新能源汽车发展趋势认知

新一轮科技革命正在全球范围内兴起，新能源、互联网、大数据、人工智能等新技术创新加速、跨产业深度融合，新产业、新模式、新业态孕育发展。汽车产业具有产业链长、高度集成化的特点，是历次科技革命和产业变革的先导产业，正在向绿色化、智能化发展，全球汽车产业迎来百年未有之大变革。传统内燃机汽车通过协同发展碳中和燃料与零碳内燃机技术，加速混动技术升级与市场化，积极转型应对碳中和目标；当前，全面电动化已成为全球共识，我国引领电动化转型，美国和欧洲等汽车强国均加快电动化转型；智能驾驶、智能座舱等技术水平快速提升，智能网联汽车正逐步成为智能移动空间应用终端；新一代信息技术与汽车制造技术深度融合，贯穿于设计、生产、管理、服务等制造活动各个环节，推动汽车产业由传统机械制造向智能制造转型。

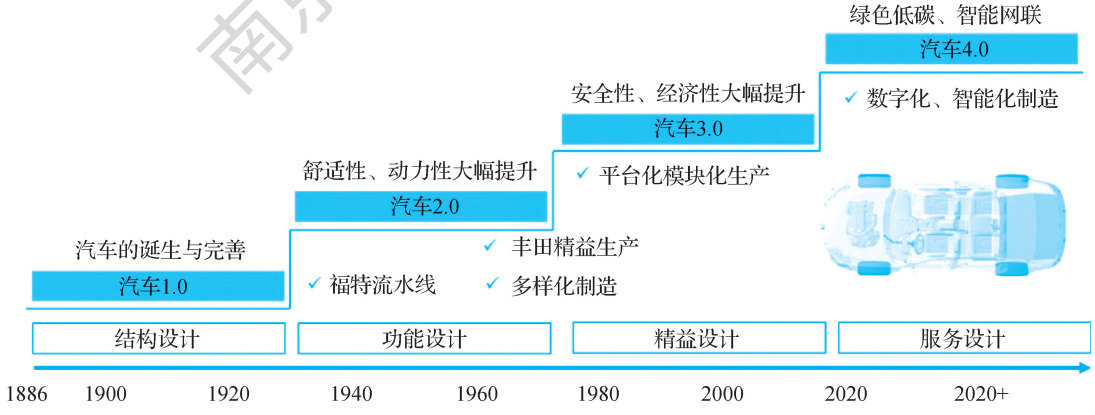


图 1－2　汽车技术的发展历程

【知识点 1】 全球汽车发展现状

一、各国政府积极推动传统内燃机低碳化和零碳内燃机发展

节能低碳化是传统内燃机汽车的主要发展方向，各汽车强国积极出台政策推动传统内燃机汽车高效、清洁发展。美国 EPA 与 NHTSA 先后发布新的碳减排和燃油经济性标准提案，NHTSA 提议方案到 2032 年，乘用车与轻型卡车行业平均燃油经济性为 58 mpg (4.06 L/100 km)；2023 年欧洲议会和理事会发布(EU)2023/851 号条例，进一步加严新车碳排放要求，2025 年乘用车和轻型商用车碳排放较 2021 年目标值各减少 15%，2030 年乘用车和轻型商用车碳排放较 2021 年目标值分别减少 55%和 50%，2035 年实现乘用车和轻型商用车零碳排放。

碳中和愿景下，碳中和燃料和零碳内燃机技术协同发展成为各国政府重要选项，中、美、欧、日等国家和地区已进行碳中和燃料及零碳内燃机的战略布局和基础研发。中国发布《内燃机产业高质量发展规划(2021—2035)》，提出开展氨、氢等可再生燃料发动机关键技术研究，实现合成燃料、生物燃料和氢等碳中和燃料规模化应用；《美国长期战略：2050 年实现净零温室气体排放的路径》提出加速研发和推广生物质燃料、氢基燃料等替代低碳技术；欧盟《战略交通研究与创新议程 STRIA》提出推动醇/醚/酯类生物质燃料和电力合成燃料的研发和降本，并开发适合生物质燃料、氢/氨燃料的内燃机；《日本 2050 年碳中和绿色增长战略》提出支持电力合成燃料规模化降本和效率提升，支持藻类生物质燃料、氢/氨内燃机核心技术研发。

二、各主要汽车强国进一步强化汽车产业电动化转型战略

美国和欧盟等全球汽车强国争抢战略竞争优势，大力推动本土新能源汽车产业快速发展。美国发布《美国就业计划》《建立弹性供应链，振兴美国制造业，促进基础广泛增长》《总统行政命令》《两党基础设施协议》，提出重启汽车电动化战略，将新能源汽车作为战略必争领域，提出到 2030 年新能源汽车销售份额达到 50%的目标；欧盟发布 *Fit for55*、*Horizon Europe*、《轻型车排放法规》修正案等，提出加快推进汽车产业持续脱碳，要求 2035 年新售轻型车达成零排放，致力于在 2050 年前实现汽车产业完全脱碳；日本发布《绿色成长战略》《2050 碳中和绿色增长战略》《蓄电池产业战略》《燃料电池与氢能技术路线图》等，提出支持多种能源、多技术路径协同发展，实现 2035 年新售乘用车 100%电动化目标，提出 2050 年实现零排放目标。

动力电池作为新能源汽车的核心，是各国电动化转型关注的焦点，以全固态电池为代表的下一代能源动力技术成为各国竞相布局的战略重点，各个国家和地区通过战略规划、技术研发、标准专利等多层面进行布局，力争抢占下一轮产业发展制高点。日本蓄电池产业战略研究公私理事会于 2022 年 9 月发布《蓄电池产业战略》，提出到 2030 年左右实现全固态锂电池的正式商业化应用；德国系统与创新研究所于 2022 年 5 月发布了《固态电池路线图 2035＋》；韩国政府于 2022 年 11 月发布《二次电池产业创新战略》，将推进车用全固态电池技术的开发，目标是到 2026 年实现商用化；美国能源部于 2023 年 10 月资助多个全固态电池技术研发项目。

三、全球各国加快推动氢能与燃料电池汽车协同发展

全球氢能社会建设加快，各国加大战略部署和政策支持力度，以终端应用为牵引，加快

氢能在交通运输、工业和家庭用能等终端领域的示范应用，带动氢能的制-储-输-用全链条快速协调发展，并通过加强研发投入、加快基础设施建设打通产业链薄弱环节。美国 2023 年 6 月发布《国家清洁氢能战略和路线图》，到 2030 年、2040 年、2050 年，清洁氢生产能力分别达到 1 000 万吨、2 000 万吨和 5 000 万吨；日本 2023 年 6 月发布《氢能基本战略（修订版）》明确中远期氢能供应目标，重点发展燃料电池乘用车和商用车，计划到 2030 年推广乘用车 80 万台，建设 1 000 个加氢站；德国 2023 年 8 月发布新版《国家氢能战略》，2030 年前打通氢能生产、储运、进口和消费各环节，到 2030 年德国氢能技术进一步提高，产品供应将覆盖从生产（如电解槽）到各类应用（如燃料电池技术）的氢能技术全价值链；韩国 2022 年 11 月发布《氢经济发展战略》提出 2030 年实现普及 3 万辆氢能商用车的目标，建造年产量 4 万吨的液化氢成套设备、年进口 400 万吨氨进口终端等基础设施。我国发布《氢能产业发展中长期规划（2021—2035 年）》，提出到 2025 年，形成较为完善的氢能产业发展制度政策环境，产业创新能力显著提高，基本掌握核心技术和制造工艺，初步建立较为完整的供应链和产业体系。燃料电池车辆保有量约 5 万辆，部署建设一批加氢站。可再生能源制氢量达到 10—20 万吨/年，成为新增氢能消费的重要组成部分，实现二氧化碳减排 100—200 万吨/年；我国设立“氢进万家”科技示范工程，推动氢能创新链与产业链融合发展，加快氢能在交通运输、工业和家庭用能等终端领域应用，引导氢能进入居民能源消费终端，为打造“氢能社会”奠定基础带动氢能产业发展。

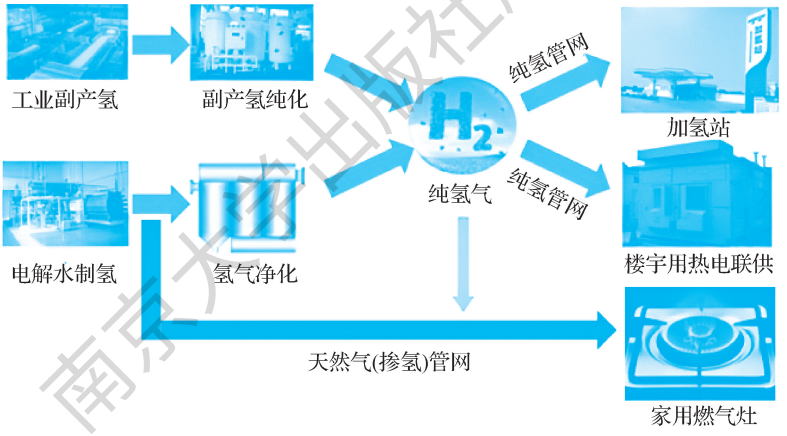


图 1－3　“氢进万家”科技示范工程示意图

四、各国加大支持力度，L3 级自动驾驶即将实现商业化应用

全球以 L3 级量产应用和 L4 级特定场景应用为目标，通过政策创新不断完善法律法规环境、设立重大项目支持技术水平提升、加快测试与示范应用，推动高级别自动驾驶落地应用。我国工业和信息化部等四部门于 2023 年 11 月联合发布《关于开展智能网联汽车准入和上路通行试点工作的通知》，首次为开展智能网联汽车准入和上路通行试点工作提供政策依据，将促进智能网联汽车产业向着 L3 级和 L4 级自动驾驶发展迈出坚实步伐；日本警察厅于 2022 年 10 月公布《道路交通法》修正案，并于 2023 年 4 月 1 日起正式实施，该法案允许特定条件下 L4 级别自动驾驶上路，以及无人配送机器人在人行道行驶，要求提供自动驾驶车辆服务的经营者有义务配置“特定自动运行负责人”，并规定了经营者和负责人在发生交

通事故时相应的法律义务与责任；欧盟委员会于 2022 年 8 月发布自动驾驶车辆型式认证法规 Regulation(EU)2022/1426—L4 级/L5 级自动驾驶系统(ADS)型式认证的统一程序和技术规范，涉及特定区域内的载客或载货，预定路线上运送乘客或货物的点对点接驳以及在预定停车设施内的自主泊车。2023 年 8 月，美国加州公用事业委员会(CPUC)批准 Waymo 和 Cruise 在旧金山提供全天候无人驾驶出租车收费服务，这一决定意味着旧金山将成为美国第一个实现无人驾驶出租车全面商业化的城市。梅赛德斯-奔驰 L3 级自动驾驶系统已获批加州机动车辆管理局(DMV)上路行驶申请，装备该系统的奔驰车型可以在指定公路上开启自动驾驶功能。

五、全球汽车市场加速向绿色低碳升级

1. 节能汽车

全球传统燃油车加快转型。油价高企和碳排放税等推动欧洲 HEV 销量快速提升，中国和美国由于缺乏政策支持 HEV 销量增长相对较慢；替代燃料汽车全球范围内仍限于小规模市场应用，国内市场渗透率几乎为零，氢/氨内燃机汽车目前主要处于技术研发阶段。全球主要车企燃油经济性持续提升，单位里程 CO_2 排放量不断下降。

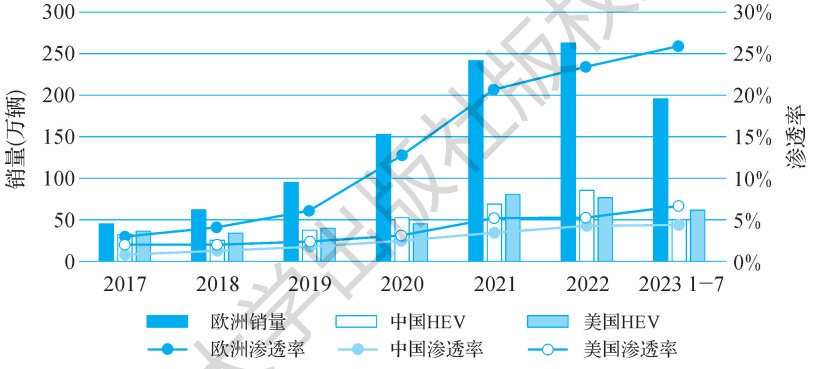


图 1－4　全球主要汽车市场混合动力 HEV 销售情况

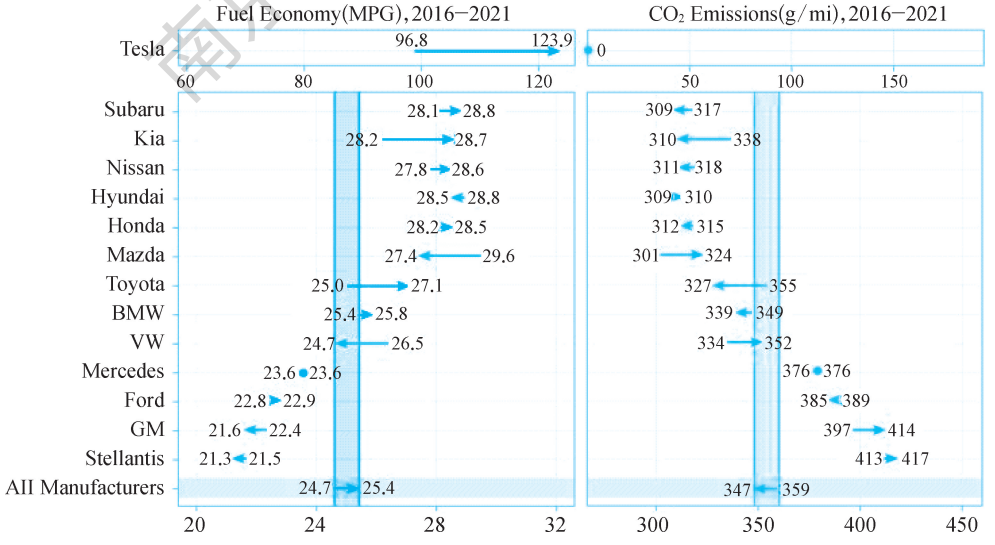


图 1－5　主要车企燃油经济性和单位里程 CO_2 排放量

2. 新能源汽车

全球新能源汽车快速发展，已进入高速发展窗口期。2022 年销量突破千万大关，市场渗透率快速增长达到 13.4%，2023 年 1—11 月份销量达 1267 万辆，市场渗透率达 15.7%，已启动全面市场化进程。

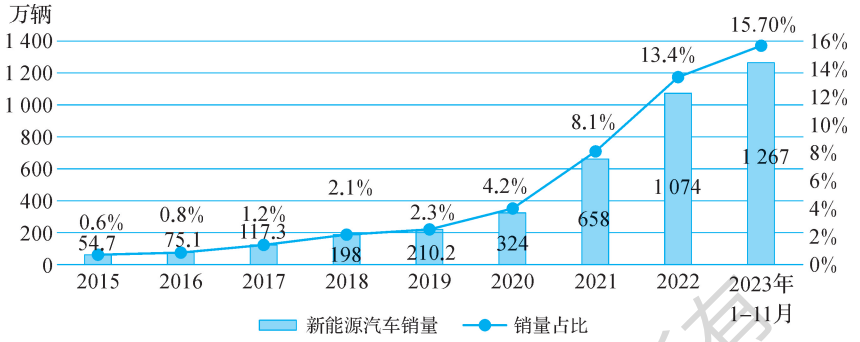


图 1－6　2015—2023 年全球新能源汽车销量及渗透率

全球新能源汽车进入高速发展窗口期、中欧美三足鼎立的新能源汽车市场格局逐步形成。2023 年 1—11 月，我国新能源汽车销量达 830.4 万辆，全球占比约 65.5%，市场渗透率达 30.8%，我国新能源汽车进入全面市场化拓展期；欧洲 2023 年 1—11 月新能源汽车销量达到 265.9 万辆，全球占比约 21%，市场渗透率达 17.2%；美国 2023 年 1—11 月新能源汽车销量达到 134.1 万辆，全球占比约 10.6%，市场渗透率达 9.2%。中、欧、美新能源汽车销量合计占全球销量的 97.1%。

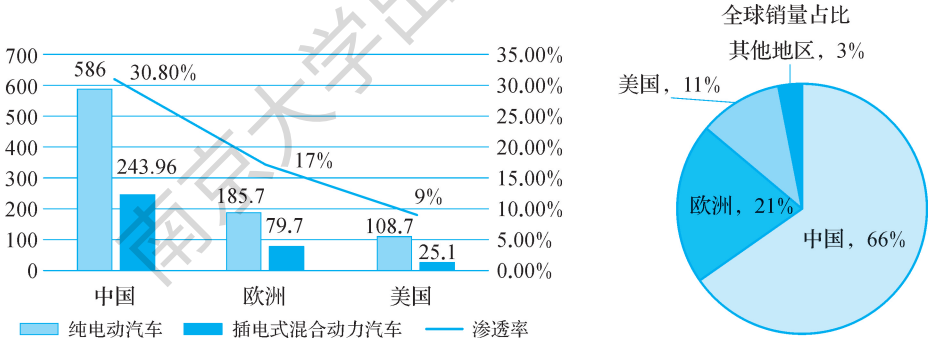


图 1－7　2023 年（1—11 月）中美欧新能源汽车销量情况（单位：万辆）

3. 燃料电池汽车

全球氢燃料电池汽车保有量持续提升，我国燃料电池汽车加速区域示范。截至 2022 年底，全球燃料电池汽车总保有量达到 6.7 万辆，同比增长 36%；在营加氢站数量达到 727 座，同比增长 22%。我国燃料电池汽车推广应用形成了京津冀、上海、广州、河南、河北等五大示范城市群，推动燃料电池汽车在港口、矿山、环卫、城建、公交、城际物流等多种场景的示范应用，并加快加氢站建设，燃料电池汽车成为商用车绿色低碳转型的重要技术路径。

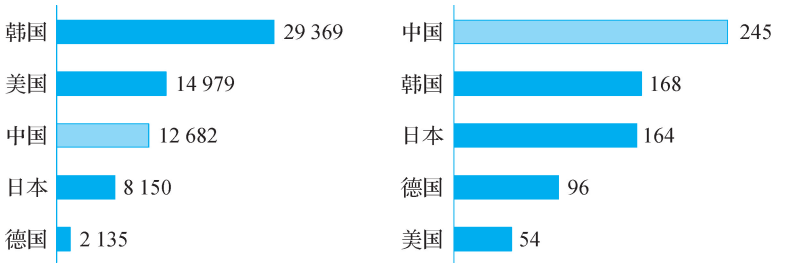


图 1－8　2022 年全球主要国家氢燃料电池汽车保有量、2022 年全球主要国家在营加氢站数量

六、全球汽车技术发展动向和趋势

通过系统梳理主要国家和地区的汽车产业战略规划、各领域重要技术动向，我们认为全球汽车产业重要进展和趋势如下：

1. 节能汽车

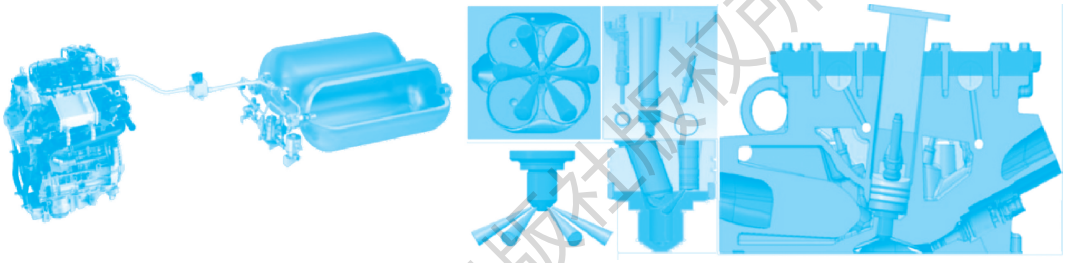


图 1－9　热效率 46%氢动力系统、氨气燃料喷射系统

零碳内燃机技术持续革新，热效率突破 45%。2023 年，吉利将自研的 2.0L 直喷增压氢内燃机热效率提升至 46.11%，氧气消耗量降至 65 g/kW·h，可有效降低氮氧化物的排放，同时最大功率接近 110 kW，最大扭矩可达 230 N·m。广汽、东风等企业也已实现了 44%～45%热效率氢气发动机的研制。氨气内燃机方面，广汽发布了首款乘用车用氨发动机，功率达到 120 kW，采用了进气歧管喷射氨气，预燃室射流点火技术引燃主燃烧室氨气混合气的着火模式，实现氨占氨油总比超 90%的稳定着火。

混合动力架构进一步向多挡多模发展，混动专用发动机热效率向 50%热效率冲击。截至 2023 年，比亚迪、长城、吉利、广汽、奇瑞、五菱、东风、一汽等企业陆续发布全新混动技术，架构形式上均为串并联方案，并且最多挡位和模式数量纪录被持续打破。东风于 2023 年 4 月发布融合串并联和功率分流的四挡智能混动变速箱(4HD)，可实现 EV、串联、发动机四挡直驱、并联、功率分流、制动能量回收、驻车发电等多种模式；本田先后在北美市场的 C－RV 和国内市场的皓影产品上换装了新的具有两挡的 DHT 混动系统，允许发动机在城市工况车速下介入驱动。混动专用发动机方面，一汽、东风发布的混动专用发动机热效率均已突破 45%，东风等企业规划混动专用发动机热效率目标达到 50%。

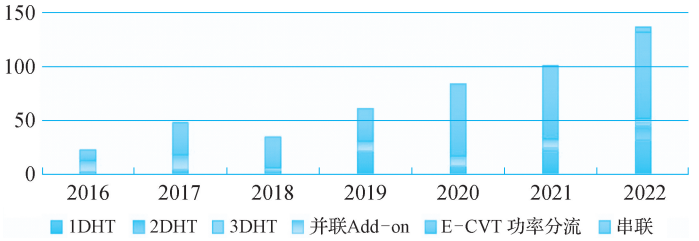


图 1－10　混合动力架构方案新车应用数量趋势

2. 新能源整车

乘用车电动化扩散到越野/高性能轿跑等领域，促进分布式驱动技术量产。国内自主品牌车企不断提升整车性能集成设计能力，叠加在电动化领域的技术积累和先发优势，率先将电动化技术量产在非城市运行工况的高性能产品领域。东风、比亚迪、极氪的四电机分布式驱动技术纷纷应用于乘用车高性能越野和超跑车型。其中，东风猛士 917 四电机分布式驱动已经量产，风神 E70 分布式轮毂驱动乘用车进入 2022 年工业和信息化部第 365 批次公告，分布式轮毂电驱动整车多目标协调控制能力和可靠性快速提升，逐步进入小规模应用阶段。

图 1－11　高性能越野四电机分布式驱动构型、超跑车型四电机驱动构型

纯电动商用车平台逐步量产，底部换电应用于电动重卡。2023 年，奔驰、三一、远程、时代新安、悠跑科技、前晨商用车、LightningeMotors、LEVC、WEVC 等国内外新旧势力企业纷纷发布基于滑板底盘的轻型商用车平台战略和产品。4.5 吨以下 VAN 产品滑板底盘化开发主要是将同轴式驱动桥和电池与底盘进行 CTC 方式集成，并去除中央驱动轴，通过最小改动达到改善整车运力空间和性能，可实现体积减少 25%，重量减少 15%。

图 1－12　轻型商用车滑板底盘平台、重型商用车纯电平台发展

3. 动力电池

日韩欧美企业加大对全固态电池的研发投入，抢占未来产业发展优势。丰田宣布在固态电池技术上取得了重大突破，计划于 2027—2028 年在纯电动汽车实现装车应用。韩国 LG、SKon、三星 SDI 等电池企业积极推动固态电池产业化，LG 预计 2026 年可量产固态电池，三星 SDI 已建成全固态电池试验生产线，计划于 2027 年实现全固态电池大规模量产。美国 SolidPower 公司宣称开发出的全固态电池单体能量密度达到 390 Wh/kg，循环寿命超 1 000 次，已通过针刺、过充等安全性测试，并建立了中试线，宝马与 SolidPower 合作，计划推出固态电池原型车；QuantumScape 公司开发的 2.2Ah 实验室原型全固态电池推算能量密度超过 400 Wh/kg，1 C 充放电循环 580 次容量保持率达到 90%，大众与 QuantumScape 公司合作，计划量产固态电池。

对比指标		SES	Solid Power	卫蓝新能源	清陶能源	浙江锋锂	辉能科技
化学体系	正极	NCM、钴酸锂、磷酸铁锂	三元NCM	三元NCM	未公开	三元NCM	NCM811
	负极	锂金属	高硅负极(Si>50%)	预锂化硅碳/锂金属	未公开	石墨/锂金属	高硅负极/锂金属
	电解质	混合固液电解质	硫化物	氧化物、聚合物	氧化物/聚合物复合电解质、凝胶	氧化物	氧化物、胶态电解质
能量密度		370–400 Wh/kg (实验室)	320 Wh/kg (Prototype)	270 Wh/kg (量产) >400 Wh/kg (实验室)	260–300 Wh/kg (量产)	240–270 Wh/kg (量产) 320–420 Wh/kg (实验室)	242 Wh/kg (量产) 270–350 Wh/kg (实验室)
核心技术		锂负极聚合物涂层超薄宽幅锂箔	高电导硫化物电解质	原位固态化固态包覆正极复合锂金属	氧化物固态电解质材料制备技术	原位聚合胶态电解质涂布极片	双极耳技术主动安全系统

图 1－13　部分固态电池企业技术布局及研发进展

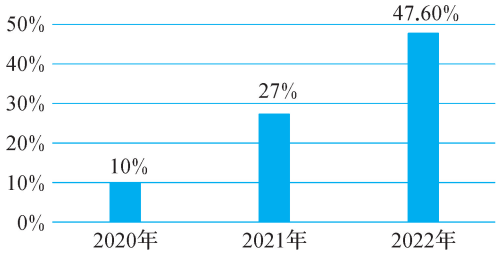
我国持续加大动力电池技术研发，钠离子电池、磷酸锰铁锂电池等新体系电池已迎来小规模量产。2023 年中科海钠等多家企业实现钠离子电池量产，并在两轮车、低速四轮车、储能等场景获得应用。宁德时代、比亚迪、亿纬锂能、欣旺达、国轩高科等多家头部电池厂积极布局磷酸锰铁锂电池，预计逐步量产。盟维科技推出的锂金属电池产品能量密度已达 530 Wh/kg，300 次循环后仍可保持超过 90%的容量，已应用于航空航天等特定场景，针对新能源车的样品，已完成验证并发布 A 样，经过 500 次深度充放电循环，容量保持率仍高于 80%以上。

材料、结构和软件电控等多方面取得突破，动力电池安全性进一步提升。2023 年以来，多个整车厂及电池厂发布动力电池系统方案，安全性得到普遍提高，广汽的弹匣电池 2.0 可实现整包枪击不起火，巨湾技研的凤凰电池在热失控实验中实现 48 小时不起火，蜂巢能源龙鳞甲电池通过优化防爆阀泄压、热防护、冷却抑制等技术来解决安全问题。

4. 电驱动系统

扁线电机市场渗透率不断提高，X－Pin 电机、不等槽宽等新型扁线电机实现应用。2022 年新能源车扁线电机出货量达 276.2 万套，市场占比飙升至 47.6%，同比增长约 28%，随着技术的不断进步，以及更多主机厂的布局研发，2025 年左右渗透率将超过 90%。新型扁线电机方面，2023 年 6 月联合电子的 X－pin 扁线电机率先实现批产应用，2023 年 1 月博

格华纳开发并试制出了 X－pin 工艺的扁线工程样机，2023 年 3 月广汽埃安电驱发布了采用 X－pin 工艺的全新一代高性能集成电驱技术夸克电驱，上海 EVK 公司采用阶梯槽设计、单槽双拼导体、多并联支路紧凑出线绕组拓扑等技术，实现了功率密度再提升 20%，并于 2023 年在吉利 E51、哪吒电动跑车、上通五菱 HIT151 等车型上实现量产应用。



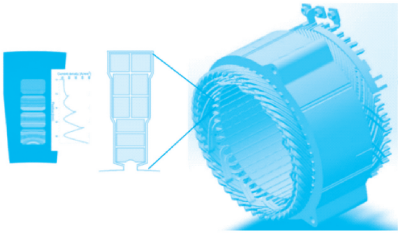


图 1－14　我国扁线电机渗透率、第三代扁线电机

多合一总成的渗透率快速提升，产品形态由机械结构集成向多电力电子深度集成转变。2023 年上半年多合一总成渗透率突破 10%，弗迪动力、长安新能源、英搏尔、华为数字能源是主要的四家供应商，主要在比亚迪海豚、海豹、元 PLUS、深蓝 SL03、腾势 D9、帝豪 EVPRO 等搭载。另外，2023 年华为数字能源发布了面向 A 级 BEV 市场的 150 kW 超融合十合一动力域模块，通过首创芯片融合、功率融合、功能融合、域控融合，实现 BOM 数量降低 40%，芯片数量降低 60%。同年，东风发布量子架构 3 号平台首款车型纳米 01，搭载 70 kW的 800 V SiC 十合一总成，集成了电机、减速器、MCU、DCDC、PDU、OBC、VCU、BMS、TMCU、PTC，将系统体积减小 18%，重量减轻 15%以上，功率密度达到 7 kW/kg 以上，系统最高效率 94.5%，CLTC 综合效率 89%。

5. 燃料电池汽车

燃料电池汽车关键零部件自主化程度持续提升，但较国外先进水平仍有较大差距。国内燃料电池质子交换膜处于产业化应用初期，东岳公司生产的厚度 15 μm 的 DMR 系列复合增强全氟质子膜具有优异的性能和寿命：氢气透过率≤0.01 ml/(min×cm^2)，OCV 循环测试超过 1 000 h，短堆循环寿命测试超过 6 000 h，通过了奔驰公司的技术考核，干湿循环测试的循环次数超过 2 万次，但在产品可靠性、寿命方面还需进一步提高。国产车用炭纸正处于量产前的产品验证阶段，国产车用炭纸主要在透气率性能方面与国外知名产品具有显著差异性，还存在工艺链条长、装备要求多、中间品多、特性不一、原丝原纸难控制、炭纸和涂层影响因素多、不易平衡等难点。

国内燃料电池催化剂产品处于小规模应用阶段，大部分企业已实现氢燃料电池用铂碳催化剂公斤级批量生产能力，部分产品已进行小规模装车应用，国氢科技 Pt 基多元合金催化剂技术，氧化还原催化活性≥0.75 A/mg·Pt，电化学活性面积≥50 m^2/g，高电位耐久性≥20 万循环，氢电中科、济平新能源的合金催化剂产品质量活性为 0.30—0.45 A/mg·Pt，耐久性为 8—10 万循环，而现阶段国际先进催化剂商业产品如日本田中贵金属，同类型催化剂氧化还原活性为 0.5 A/mg·Pt，高电位耐久性约为 15 万循环。我国膜电极单片有效面积和功率密度等膜电极性能不断提升，鸿基创能目前批量出货的膜电极产品功率密度达到 1.3 W/cm^2，寿命 2 万小时以上，唐锋能源自主开发的产品功率密度超过 1.5W/cm^2，并通过

了车规级严苛工况的性能和稳定性验证，国外巴拉德、Gore、Johnson Matthey 的膜电极功率密度达 2W/cm²@0.65 V。

表 1-3　国内外燃料电池关键零部件技术对比

关键零部件	我国技术水平	国际先进技术水平
质子交换膜	国内先进水平为厚度 15 μm，电导率为 0.03 S/cm(85℃，50%RH)，化学机械耐久性为 15 000 循环次数(≤20%@开路电压)	戈尔等国际先进水平为厚度 8.5 μm，电导率为 0.106 S/cm(80℃，80%RH)，化学机械耐久性为 20 000 循环次数(≤20%@开路电压)
炭纸	0.1 bar 压力下厚度 125±10 μm，体电阻≤5 mΩ·cm²，0.1 bar 压力下气通量 1 300 m³/(m² h)，拉升强度 10 MPa	德国 SGL 产品 0.1 bar 压力下气通量为 1 000 m³/(m²h)，体电阻(10±1)mΩ·cm²，拉升强度(10±2)MPa；美国 Avcarb 产品 0.1 bar压力下气通量为 900 m³/(m²h)，拉升强度 12±2 MPa，体电阻(8±1)mΩ·cm²
催化剂	Pt 基多元合金催化剂技术，氧化还原催化活性≥0.75 A/mg·Pt，电化学活性面积≥50 m²/g，高电位耐久性≥20 万循环	现阶段国际先进催化剂商业产品如日本田中贵金属，同类型催化剂氧化还原活性为 0.5 A/mg·Pt，高电位耐久性约为 15 万循环
膜电极	国内膜电极企业最新发布的产品功率密度大多在 1.2 W/cm²@0.6V—1.6 W/cm²@0.6 V、1 W/cm²@0.6 V—1.4 W/cm²@0.65 V	国外巴拉德、Gore、JohnsonMatthey 的膜电极功率密度达 2 W/cm²@0.65 V

管道输氢发展迅速，我国仍处于起步阶段。北美已建成输氢管道 2 850 公里，其中美国建成 6.9 MPa 管网共 2700 公里；欧洲已建成 1 770 公里输氢管道，并启动了跨国包含海底输氢管道的建设；我国研究起步相对较晚，输氢管道规模较小，总里程约 450 公里，在用管道仅有百公里左右，输送压力 2.5～4 MPa，我国正在加快输氢管道建设，已公布规划的氢气管道建设项目有 10 个，规划总长度将超 1 500 km，拟运行压力≤6.3 MPa，均为陆地敷设，尚未开展管网连接计划。

6. 智能网联汽车

自动驾驶芯片性能提升，支持跨域融合功能实现。高通推出 Snapdragon Ride Flex SoC，以单颗 SoC 同时支持数字座舱、ADAS 和 AD 功能，硬件架构层面达到 ASIL-D 级，2024 年开始量产；安霸宣布推出基于 CVflow3.0AI 架构的 SoCCV72AQ，在同等功耗下性能比上一代产品 CV22AQ 提高 6 倍，可高效运行基于 Transformer 神经网络的深度学习算法，可支持前视 ADAS 一体机、单芯片 6V5R 行泊一体等解决方案；日本丰田、索尼等 8 家公司以合资形式共同成立新公司以研发和生产高端芯片，目标在 2027 年量产 2 纳米或者更高制程芯片以实现国产化。

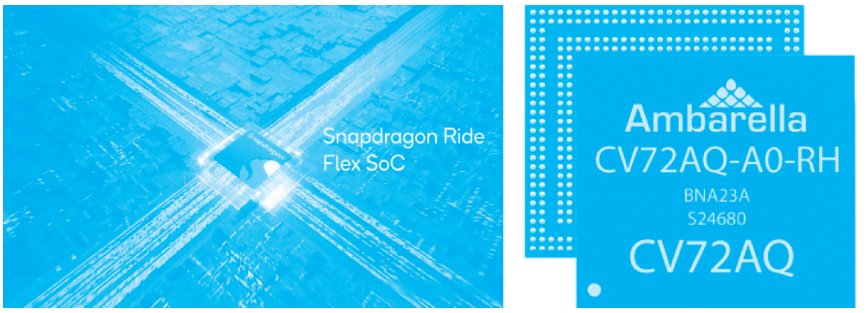


图 1－15　高通 SnapdragonRideFlexSoC、安霸基于 CVflow3.0AI 架构的 SoCCV72AQ

整车自动驾驶功能提升，高级别自动驾驶落地应用。美国加州机动车辆管理局（DMV）于 2023 年 6 月批准了梅赛德斯-奔驰的 L3 级自动驾驶系统的上路行驶申请，装备该系统的奔驰车型可以在指定公路开启自动驾驶功能。L4 方面，加州公用事业委员会（CPUC）已批准 Cruise 和 Waymo 在旧金山提供全天候 Robo Taxi 收费服务，Cruise Origin 豁免请愿书已递交 NHTSA，如获批将寻求每年部署多达 2 500 辆无需人工控制装置的自动驾驶车辆。宝马新纯电动轿车 i5 搭载系统集成高速公路辅助功能 Highway Assistant，支持脱手驾驶，跟车的车速限制将从 60 km/h 以内提升至 130 km/h 以内。福特野马 Mach－E 车型辅助驾驶脱手功能在英国和德国先后获批，被允许将在高速公路特定地理围栏使用。梅赛德斯-奔驰获得 KBA 的首个 AVP 系统的通用运营许可证，配备 INTELLIGENTPARKPILOT 的某些 S 级或 EQS 车辆将可以使用该功能，并被应用于斯图加特机场 APCOA 运营的 P6 停车场。

【知识点 2】　国内新能源汽车发展现状

2020 年 11 月份，在国务院办公厅印发的《新能源汽车产业发展规划（2021～2035 年）》指出（如图 1－16）：到 2025 年，新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量的 20％左右；到 2035 年，纯电动汽车成为新销售车辆的主力，公共领域用车全面电动化，发展新能源是我国从汽车大国走向汽车强国的必由之路。

虽然欧盟美国的很多汽车生产技术领先于我们，但是我国的电池生产技术在世界范围内占有一定的领先地位，因此，目前在世界新能源汽车领域出现了三座大山：中国、美国、欧盟。全世界 88％的新能源汽车是由中国、美国和欧盟生产的，其中中国市场的销售量占比最大，高达 34％。由此看来，我国新能源汽车行业的发展势态良好。

早在 2001 年根据“863”计划建立了“三横三纵”的开发布局（三纵指的是混合动力、纯电动和燃料电池汽车；三横指的是多能源动力总成控制、驱动电机和动力蓄电池），随后在“十五”期间、“十一五”期间等相继提出一系列的鼓励扶持政策，推动着新能源汽车行业的快速发展。相关数据显示，2021 年我国新能源汽车产量达 354.5 万辆，同比增长 145.6％；同时，新能源汽车的销售量为 352.1 万辆，同比增长 1.6 倍，连续 7 年位居全球第一。其中，纯电动汽车产销分别完成 294.2 万辆和 291.6 万辆，同比分别增长 1.7 倍和 1.6 倍；插电式混合动力汽车产销分别完成 60.1 万辆和 60.3 万辆，同比分别增长 1.3 倍和 1.4 倍；燃料电池汽车产销完成 0.2 万辆，同比呈现增长。

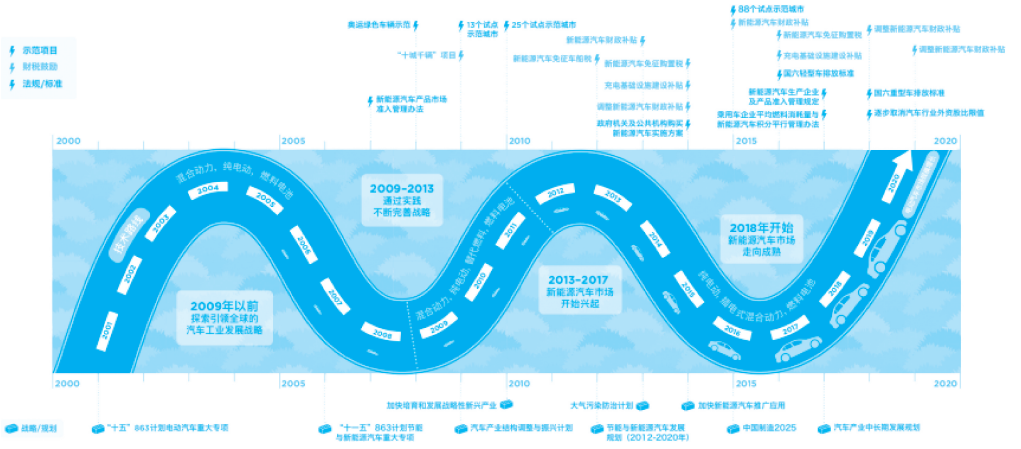


图 1－16　中国电动汽车的发展历程图

在新能源汽车产销两旺的背景下，中国品牌新能源乘用车也借势急追，实现"弯道超车"。2021 年，中国品牌新能源乘用车销售 247.6 万辆，同比增长 1.7 倍，占新能源乘用车销售总量的 74.3%。

中国新能源汽车行业已完成转型，政策端激励逐渐退潮，市场内生需求开始接力。未来整个行业料将完全进入市场化竞争状态，To C 端将成为未来增长的主要动力，丰富的车型结构或将刺激消费端需求持续发力，如图 1－17 所示。

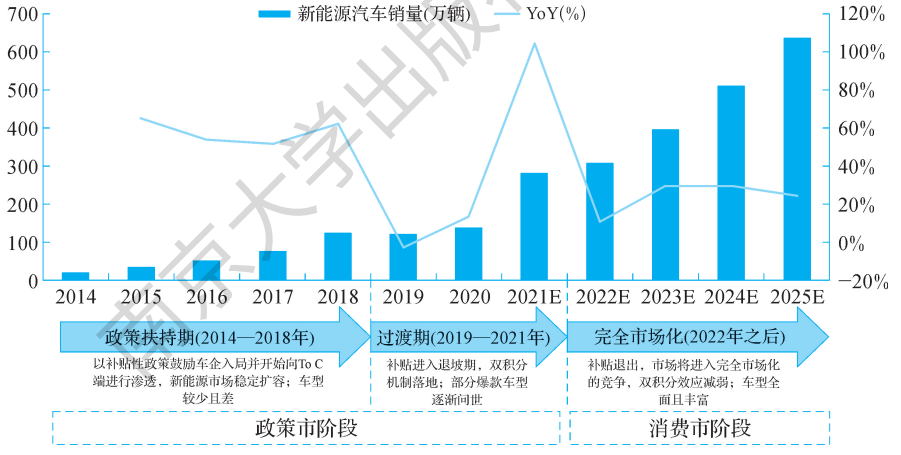


图 1－17　中国新能源汽车市场阶段发展

1. 政策端："1＋N 双碳"顶层政策布局，双积分政策引领

"1＋N 双碳"顶层政策发布助力实现"碳中和、碳达峰"。2021 年 10 月 24 日，中共中央、国务院印发了《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》；10 月 26 日，发布《2030 年前碳达峰行动方案》，其中《意见》在双碳政策体系中发挥统领作用，是"1＋N"中的"1"，而《方案》则是"N"中为首的政策文件，除此之外，"N"还包括重点领域、具体行业的碳达峰实施方案以及各种保障政策，后续也陆续出台。

国补政策持续支撑。新能源车的补贴延长两年至 2022 年，原则上 2021～2022 年补贴标准分别在上一年基础上下降 20%、30%；公用领域用车 2021～2022 年补贴标准分别在上

一年基础上下降 10%、20%，奠定今后两年相对稳定的政策环境。

地方政策频繁刺激需求。各省市包括一线城市深圳、上海、广州、北京以及杭州、长沙、武汉等皆通过一系列地方政策刺激新能源车销量增长。上海于 2020 年 10 月 24 日发布了更加严苛的外地牌照机动车限行政策，在沪牌月度中标率仅为 10%的情况下，部分潜在购车者势必会将注意力转移到绿牌上，而随着政策的进一步收紧，后续上海对绿牌需求或将持续高增。

2. 车企端：2022 年新车型周期爆发

自主品牌向上，合资外资品牌电动化加速，带动高端品牌车型持续放量。见表 1－4 所示，2021 年大量新电动化平台和新车型上市，且 2021 年新车投放继续加速，优良车型的供给将刺激需求提升，2021～2022 年有超 40 款车型上市，涵盖多个车型级别，车型丰富度和产品力将进一步提升。

表 1－4　2021～2022 年国内自主品牌、合资品牌上市

车企	品牌	品牌分类	车型	动力类型	上市时间
小鹏汽车	小鹏	自主品牌	P5 G3i	EV EV	2021 年 9 月 2021 年 7 月
蔚来汽车	蔚来	自主品牌	ET7 ET5 EF9	EV EV EV	2022Q1 2022 2022
理想汽车	理想	自主品牌	X01	PHEV(增程式)	2022
威马汽车	威马	自主品牌	M7 E5	EV EV	2021H2 2021Q4
上汽集团	智已 R	自主品牌 自主品牌	L7 LS7 ES33	EV EV EV	2022 2022 2022
哪吒汽车	哪吒	自主品牌	Eureka 03	EV	2022
吉利集团	沃尔沃 路特斯 极氪	合资/外资 合资/外资 自主品牌	极星 3 极星 4 路特斯 Lambda 路特斯 Sigma 路特斯 Alpha ZEEKR 001	EV EV EV/PHEV EV EV EV	2022 2022 2022 2023 2024 2021Q4
宝马集团	宝马	合资/外资	3 系 EV X2 PHEV ix1	EV PHEV EV	2022 2022 2023
戴姆勒集团	梅赛德斯-奔驰 Smart	合资/外资 合资/外资	EQA EQE EQS Smart	EV EV EV EV	2021Q4 2022 2022 2022

（续表）

车企	品牌	品牌分类	车型	动力类型	上市时间
比亚迪汽车	比亚迪	自主品牌	元 PLUS EV 汉 EV 海豚	EV EV EV	2021H2 2021H2 2021H2
大众集团	大众 奥迪	合资/外资 合资/外资	ID.6 X/CROZZ ID.3 Q4 e-tron	EV EV EV	2021Q3 2022 2022
通用集团	凯迪拉克 五菱	合资/外资 自主品牌	Lyriq 宏光 Mini 敞篷版	EV EV	2022 2022
丰田集团	丰田	合资/外资	bZ4X	EV	2022
长城汽车	长城	自主品牌	C30－C01 沙龙 SUV 车型	EV EV	2022 2022

自主品牌引领市场，新势力发展势头强劲，特斯拉地位稳固，豪华车亟待发力。从国内新能源乘用车市场结构来看，自主品牌转型加速占据较大的市场份额，成为国内市场中流砥柱，新势力“蔚小理”等凭借优质的车型及较好的市场口碑，市场占有率稳步提升，特斯拉自2020年进入国内市场后鲶鱼效应显著，倒逼国内企业不断创新，同时自身占据近20%市场份额，豪华品牌渗透率亟待提升（如图1－18、图1－19）。

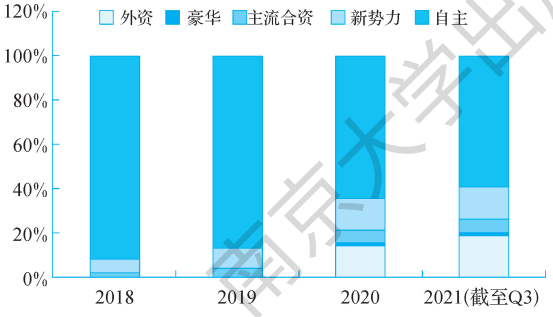


图1－18　纯电动车型销量占比情况

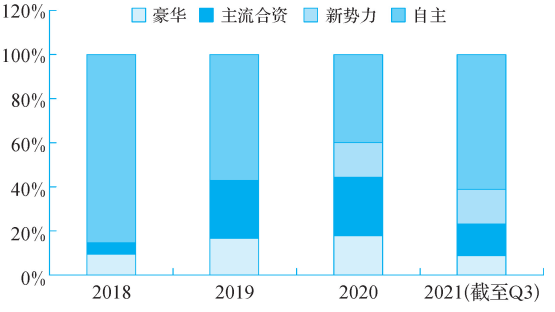


图1－19　插混车型销量占比情况

【知识点3】　新能源汽车发展趋势

根据目前新能源汽车的发展状况，新能源汽车主要有以下发展趋势。

1. 动力深度电气化

现如今，第三次工业革命推动能源动力电气化转型升级，从全球范围看，纯电驱动正成为主流的技术路线，纯电驱动汽车的大规模市场正在形成。

相关的动力蓄电池、氢燃料电池、太阳能电池（转化效率高达30%）等能源技术突飞猛进，各类电动动力系统的技术已经全面开始商业化，被业界认为很难的燃料电池汽车也进入市场，因此，可以说电动汽车的技术全方位产业化已经开始。

动力深度电气化的表现：

首先，插电式混合动力汽车。机电混合装置也已经成熟，尤其值得一提的是比亚迪“秦”成为全球最畅销的插电式车型之一，总体上达到了国际先进水平。

第二，动力电池与纯电动汽车的技术。动力电池的综合性能总体趋势在今后10年比能量会有大幅度增长，成本也将会随着比能量的提升大幅下降，但是安全性和耐久性的问题会进一步凸显。

第三，燃料电池汽车。燃料电池发动机技术在不断进步，燃料电池的波载量已经从每千瓦1克下降到目前像丰田轿车到0.3克以下，实验室已经到0.1克，在未来会接近于现在燃油汽车催化剂的波载量，而且燃料电池发动机逐步在成熟。

2. 车身底盘轻量化

在车身底盘轻量化方面，电动汽车比传统汽车更需要轻量化，更能平衡轻量化材料导致成本上升，更能够带动轻量化的规模应用。为提升电动汽车能效和续驶里程，国际上先进的轻量化材料与技术呈现广泛应用到电动汽车上的趋势。

轻量化材料与车身电池相结合是理想化目标，特斯拉电动汽车是汽车轻量化的典型。因为要放电池，所以形成了真正的电池车身底盘，除了这个车身之外，还要承载底盘的框架，而且全采用了铝合金。

宝马i3的轻量化技术也是这样，采用一个独立的底盘平台，车身全部采用碳纤维。

车身底盘轻量化设计使新能源汽车在保证强度和安全性能的前提下，降低了整车的整备质量、减少了燃料消耗、降低了排气污染，使新能源汽车的节能效果更佳。

3. 整车智能网联化

在整车智能网联化方面，电动汽车是实现智能化技术的最佳移动平台，整车智能网联化技术的应用必将推动电动汽车产业和技术的大发展。除了传统汽车企业在开发自动驾驶技术，像谷歌等互联网公司也纷纷借助车辆智能，开始介入智能驾驶、自动驾驶的研究开发。

整车智能网联化技术变革包含了三个阶段。目前是以驾驶员为中心的主动安全辅助系统，接着会进入以网络为中心的网联汽车的阶段，再到以车辆为中心的自动驾驶汽车。目前，智能驾驶辅助系统(ADAS)系统已是欧美争相进行市场普及化的热点。

整车智能网联化技术在产业化方面，美、德两国走在前列。美国交通运输部于2016年9月发布联邦《自动驾驶汽车政策指南》，持续推进自动驾驶汽车的安全监管与测试，并于2018年10月发布《为未来交通做准备：自动驾驶汽车3.0》，加强自动驾驶汽车与整个交通出行体系的安全融合。德国联邦参议院在2017年通过法律，允许汽车自动驾驶系统未来在特定条件下代替人类驾驶。

在欧美车企加快民用自动驾驶技术应用的同时，中国自主车企也已开始涉足这一领域。现阶段国内已有一汽、上汽、长安、广汽、比亚迪和吉利等多家自主车企开始相继研发自动驾驶技术；另外我国一些大学和多家科研院所也相继投入自动驾驶技术的研发，并取得了不错的成果。

以电动汽车为储能终端的能源互联网、汽车物联网、信息互联网将会相互融合，也就是说在人类历史上第一次将能源、信息、物质这三个基本元素全部连接起来，这也要靠电动汽车，因为电动汽车跟智能电网的互动是双向的，既可以储能作为分布式的能源，也可以往电

网回馈电，这是第三次工业革命的一个核心支柱。

另外，政府对加快新能源汽车的发展起着至关重要的作用，政府要加大资金投入和政策引导，企业要加大对新能源汽车研发的力度；同时要加大示范运行范围和力度，为新能源汽车规模化、产业化发展做准备。

课后拓展阅读

能源革命重塑全球格局：中国绿色转型见证能源安全与气候治理突破

中国从“石油依赖”向“双碳驱动”的战略转型，是全球能源革命的里程碑，标志着中国在应对气候变化与保障能源安全中的创新与担当。2020 年“双碳”目标承诺开启新纪元，2025 年可再生能源装机占比突破 45%，印证制度与产业升级的同频共振。

政策演进贯穿系统性重构：从 2015 年巴黎协定自主贡献，到 2022 年《氢能产业发展中长期规划》出台，通过全国碳排放权交易市场、气候投融资试点、“可再生能源＋储能”协同机制，构建起覆盖研发、转化、交易的绿色网络，破解传统能源转型“锁定效应”，为全球提供“中国方案”。

技术与制度融合重塑价值链：西北戈壁光伏矩阵年发电量 3 000 亿千瓦时，通过“绿电入欧”特高压通道输向欧洲；南海漂浮式风电平台技术达国际领先。“一带一路”绿色能源合作使中国新能源装备出口覆盖 80 国，光伏组件全球市占率超 70%，推动全球能源价值链重构。

当中国新能源汽车保有量突破 2 000 万辆，沙漠光伏年减排二氧化碳 2.5 亿吨，我们见证的不仅是能源消费强度年均下降 3.3%的数字跃升，更是从能源进口大国向绿色技术输出大国的转变。这种转型为破解“石油困局”提供中国智慧，为全球气候治理贡献东方方案，彰显社会主义市场经济体制在应对全球性挑战中的独特优势。

思考与练习

一、填空题

1. 新能源汽车的英文全称是_____。

2. 我国于_____年正式实施了《新能源汽车生产企业及产品准入管理规则》，该规则对新能源汽车的定义进行了明确规定。

3. 新能源汽车包括三大类型，_____（BEV）、_____（FCEV）以及_____汽车（FCEV）。

4. _____、环境污染、_____是新能源汽车发展的必要性。

二、选择题

1. 以下哪种汽车不属于新能源汽车？（　　）

A. 插电式混合动力汽车（PHEV）

B. 纯电动汽车（BEV）

C. 燃料电池汽车（FCEV）

D. 天然气汽车(NGV)

2. 根据《BP 世界能源统计年鉴》第 69 版,以下哪种能源的已探明储量可开采时间最长?(　　)

A. 石油　　B. 天然气

C. 煤炭　　D. 核能

3. 以下哪项是新能源汽车发展的主要原因之一?(　　)

A. 提高传统燃油车的销量

B. 减少对石油的依赖

C. 增加城市交通拥堵

D. 降低汽车制造成本

三、简答题

1. 国内外新能源汽车发展现状如何?

2. 全球新能源汽车的发展趋势是什么?

扫码可见本单元视频及拓展阅读资料

单元二 新能源汽车类型

知识目标

1. 掌握纯电动汽车的结构原理、驱动布置形式和特点，了解关键技术和主要车型特点；
2. 掌握混合动力电动汽车的定义与分类、结构原理和特点；
3. 掌握燃料电池电动汽车的类型、结构原理和特点，了解主要车型特点。

技能目标

1. 熟悉目前主流纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车车型；
2. 会正确提取出纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车技术参数；
3. 会对比分析不同品牌同类车型在结构与技术上的优劣。

素质目标

1. 养成对技术参数、性能指标的严谨分析习惯，能够客观、精准地提取和对比车型数据；
2. 主动关注不同品牌车型的技术差异，敢于质疑现有设计缺陷，探索优化方向；
3. 主动跟踪新能源汽车技术迭代与市场动态，灵活适应行业变化，养成通过手册、数据库等渠道自主学习新技术的习惯。

项目导读

北京冬奥会氢燃料电池车的“高光时刻”

2022 年 2 月 4 日北京冬奥会隆重开幕。本届冬奥会新能源车辆的使用比例为历届冬奥会之最，在全部车辆中占比高达 85%左右。冬奥会期间使用清洁能源车辆将实现减排约

1.1 万吨二氧化碳，相当于 5 万余亩森林一年的碳汇蓄积量。

根据北京冬奥组委公布的数据，本届冬奥会示范运行超 1 000 辆氢能源汽车，并配备 30 多个加氢站，是全球最大的一次燃料电池汽车示范。这也使得氢燃料电池汽车成为绿色冬奥中一抹亮色，来自丰田汽车、北汽集团、宇通客车、福田汽车等车企的氢燃料电池汽车均积极投入到北京冬奥会之中。

据了解，本次冬奥会示范运营车型包括氢燃料电池大巴、氢燃料电池小轿车、氢燃料电池特种车等。其中，福田汽车提供了 515 辆氢燃料客车，在为本次冬奥会提供保障的氢燃料大客车中占比高达 80%，创下有史以来氢燃料客车服务国际级运动赛事规模最大、车型数量最多的纪录；宇通 185 辆氢燃料客车（北京 100 辆，张家口 85 辆）服务北京、延庆、张家口全赛区（如图 2－1）；吉利星际提供了 80 辆氢燃料城市客车，丰田提供了 107 辆氢燃料中巴车；在小轿车车型方面，丰田提供了 140 辆第二代 MIRAI。

图 2－1　助力冬奥会的宇通氢燃料电池客车

值得一提的是从 2008 年北京奥运会的 3 辆氢燃料电池大巴，到 2010 年上海世博会的 196 辆氢燃料电池车，再到 2022 年北京冬奥会的上千辆氢燃料电池车示范运行，经过十几年发展，我国氢能和燃料电池汽车正迎来新的发展机遇。

在“双碳”目标的指引下，以绿色冬奥为契机，氢燃料电池汽车产业也将步入新的发展阶段。

模块一　纯电动汽车

纯电动汽车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，一般采用高效率充电蓄电池作为动力源。纯电动汽车不需要使用内燃机，因此，纯电动汽车的电动机相当于传统汽车的发动机，蓄电池相当于原来的油箱，电能是二次能源，可以来源于风能、水能、热能、太阳能等多种方式。

【知识点 1】　纯电动汽车的类型

纯电动汽车可分为 2 种类型，即用纯蓄电池作为动力源的纯电动汽车和装有辅助动力源的纯电动汽车。

1. 用纯蓄电池作为动力源的纯电动汽车

用单一蓄电池作为动力源的纯电动汽车，只装置了蓄电池组，它的电力和动力传输系统

如图 2－2 所示。

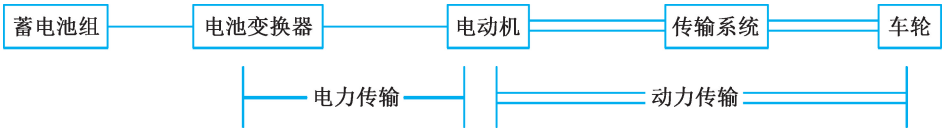


图 2－2　用单一蓄电池作为动力源的纯电动汽车的电力和动力传输系统

2. 装有辅助动力源的纯电动汽车

用单一蓄电池作为动力源的纯电动汽车，蓄电池的比能量和比功率较低，蓄电池组的质量和体积较大。因此，在某些纯电动汽车上增加辅助动力源，如超级电容器、发电机组、太阳能等，由此改善纯电动汽车的启动性能和增加续驶里程。装有辅助动力源的纯电动汽车的电力和动力传输系统如图 2－3 所示。

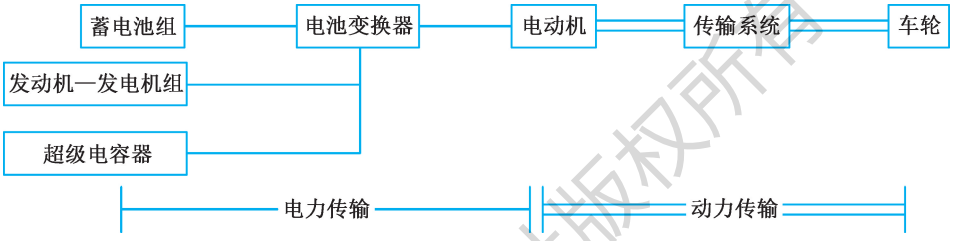


图 2－3　装有辅助动力源的纯电动汽车的电力和动力传输系统

【知识点 2】　纯电动汽车的结构原理

燃油汽车主要由发动机、底盘、车身和电气 4 大部分组成，纯电动汽车的结构与燃油汽车相比，主要增加了电力驱动控制系统并取消了发动机。电力驱动控制系统的组成与工作原理如图 2－4 所示，它由电力驱动主模块、车载电源模块和辅助模块 3 大部分组成。

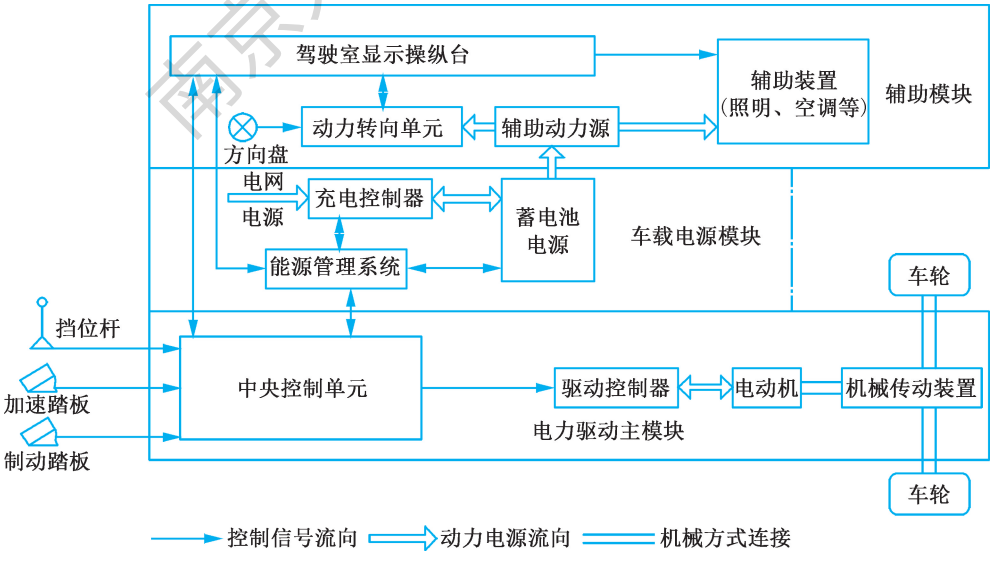


图 2－4　电力驱动控制系统的组成与工作原理图

当汽车行驶时，由蓄电池输出电能（电流）通过控制器驱动电动机运转，电动机输出的转矩经传动系统带动车轮前进或后退。电动汽车续驶里程与蓄电池容量有关，蓄电池容量受诸多因素限制。要提高一次充电续驶里程，必须尽可能地节省蓄电池的能量。

1. 电力驱动主模块

电力驱动主模块主要包括中央控制单元、驱动控制器、电动机、机械传动装置和车轮等。它的功用是将存储在蓄电池中的电能高效地转化为车轮的动能，并能够在汽车减速制动时，将车轮的动能转化为电能充入蓄电池。

中央控制单元根据加速踏板和制动踏板的输入信号，向驱动控制器发出相应的控制指令，对电动机进行启动、加速、减速、制动控制。

驱动控制器是按中央控制单元的指令、电动机的速度和电流反馈信号，对电动机的速度、驱动转矩和旋转方向进行控制。驱动控制器必须和电动机配套使用。

电动机在电动汽车中被要求承担电动和发电的双重功能，即在正常行驶时发挥其主要的电动机功能，将电能转化为机械能；在减速和下坡滑行时又被要求进行发电，将车轮的惯性动能转化为电能。

机械传动装置是将电动机的驱动转矩传输给汽车的驱动轴，从而带动汽车车轮行驶。

2. 车载电源模块

车载电源模块主要包括蓄电池电源、能量管理系统和充电控制器等。它的功用是向电动机提供驱动电能、监测电源使用情况以及控制充电机向蓄电池充电。

纯电动汽车的常用蓄电池电源有镍氢电池、锂离子电池、铅酸电池和燃料电池等。

纯电动汽车的能量管理主要是指电池管理系统，它的主要功用是对电动汽车用电池单体及整组进行实时监控、充放电、巡检、温度监测等。

充电控制器是把交流电转化为相应电压的直流电，并按要求控制其电流。

3. 辅助模块

辅助模块主要包括辅助动力源、动力转向系统、驾驶室显示操纵台和辅助装置等。辅助模块除辅助动力源外，依据不同车型而不同。

辅助动力源主要由辅助电源和 DC/DC 功率转换器组成，其功用是供给电动汽车其他各种辅助装置所需要的动力电源，一般为 12 V 或 24 V 的直流低压电源。它主要给动力转向单元、制动力调节控制、照明、空调、电动窗门等各种辅助装置提供所需的能源。

动力转向单元是为实现汽车的转弯而设置的，它由转向盘、转向器、转向机构和转向轮等组成。作用在转向盘上的控制力，通过转向器和转向机构使转向轮偏转一定的角度，实现汽车的转向。

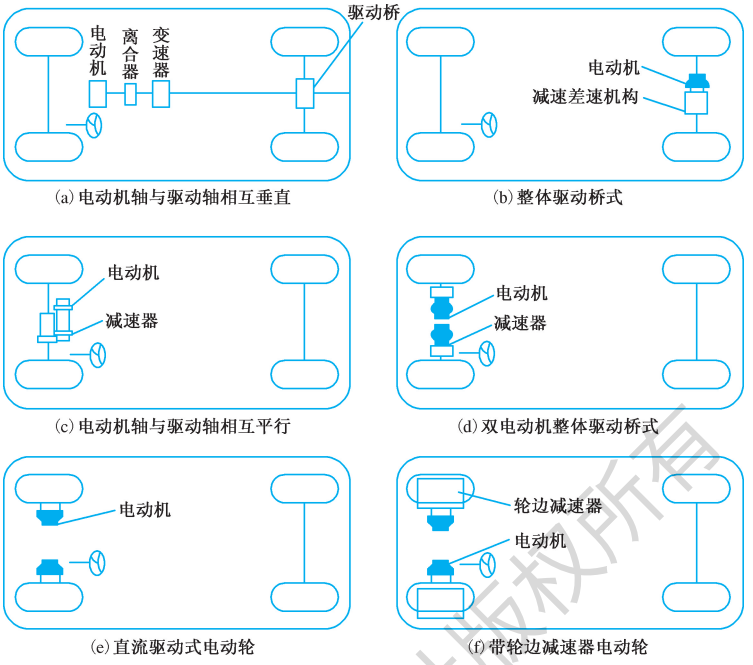
驾驶室显示操纵台类似于传统汽车驾驶室的仪表盘，不过其功能根据电动汽车驱动的控制特点有所增减，其信息指示更多地选用数字或液晶屏幕显示。

辅助装置主要有照明、各种声光信号装置、车载音箱设备、空调、刮水器、风窗除霜清洗器、电动门窗、电控玻璃升降器、电控后视镜调节器、电动座椅调节器、车身安全防护装置控制器等。它们主要是为提高汽车的操控性、舒适性、安全性而设置的，可根据需要进行选用。

【知识点 3】　纯电动汽车驱动系统布置形式

电动汽车的驱动系统是电动汽车的核心部分，其性能决定着电动汽车运行性能的好坏。电

动汽车的驱动系统布置取决于电机驱动系统的方式。常见的驱动系统布置形式如图 2－5 所示。



(a) 电动机轴与驱动轴相互垂直　(b) 整体驱动桥式

(c) 电动机轴与驱动轴相互平行　(d) 双电动机整体驱动桥式

(e) 直流驱动式电动轮　(f) 带轮边减速器电动轮

图 2－5　纯电动汽车驱动系统布置方案

1. 传统的驱动模式

图 2－5(a)与传统汽车驱动系统的布置方式一致，带有变速器和离合器，只是将发动机换成电动机，属于改造型电动汽车。这种布置可以提高电动汽车的起动转矩，增加低速时电动汽车的后备功率。

2. 电动机—驱动桥组合式驱动模式

图 2－5(b)和(c)取消了离合器和变速器，但具有减速差速机构，由一台电动机驱动两车轮旋转。优点是可以继续沿用当前发动机汽车中的动力传动装置，只需要一组电动机和逆变器。这种方式对电动机的要求较高，不但要求电动机具有较高的起动转矩，而且要求具有较大的后备功率，以保证电动汽车的起动、爬坡、加速超车等动力性能。

3. 电动机—驱动桥整体式驱动模式

图 2－5(d)是将电动机装到驱动轴上，直接由电动机实现变速和差速转换。这种传动方式同样对电动机有较高的要求，要求有大的起动转矩和后备功率，同时不但要求控制系统有较高的控制精度，而且要具备良好的可靠性，从而保证电动汽车安全、平稳行驶。

4. 轮毂电机驱动模式

图 2－5(e)、(f)同图 2－5(d)布置方式比较接近，将电动机直接装到了驱动轮上，由电动机直接驱动车轮行驶。

目前，我国的电动汽车大都建立在改装车的基础上，其设计是一项机电一体化的综合工程。改装后高性能的获得并不是简单地将内燃机汽车的发动机和油箱换成电动机和蓄电池便可以实现的，它必须对蓄电池、电动机、变速器、减速器和控制系统等参数进行合理匹配，而且在总体方案布置时必须保证连接可靠、轴荷分配合理等才能获得。

【知识点 4】　纯电动汽车的特点

纯电动汽车与燃油汽车相比，具有以下特点。

1. 无污染，噪声低

纯电动汽车无内燃机汽车工作时产生的废气，不产生排气污染，对环境保护和空气的洁净是十分有益的，有“零污染”的美称；电动汽车无内燃机产生的噪声，电动机的噪声也较内燃机小。

2. 能源效率高、多样化

电动汽车的能源效率已超过汽油机汽车，特别是在城市运行、汽车走走停停、行驶速度不高时，电动汽车更加适宜。电动汽车停止时不消耗电量，在制动过程中，电动机可自动转化为发电机，实现制动减速时能量的再利用。

另一方面，电动汽车的应用可有效地减少对石油资源的依赖，可将有限的石油资源用于更重要的方面。向蓄电池充电的电力可以由煤炭、天然气、水力、核能、太阳能、风力、潮汐等能源转化。除此之外，如果夜间向蓄电池充电，还可以避开用电高峰，有利于电网均衡负荷，减少费用。

3. 结构简单、使用维修方便

电动汽车较内燃机汽车结构简单，运转、传动部件少，维修保养工作量小。当采用交流感应电动机时，电动机不用保养维护，更重要的是电动汽车易操纵。

4. 动力电源使用成本高、续驶里程短

目前电动汽车技术尚不如内燃机汽车技术完善，尤其是动力电池的寿命短、使用成本高。电池的储能量小，一次充电后行驶里程不理想，且电动车的价格较贵。但随着电动汽车技术的发展，电动汽车存在的缺点会逐步得到解决。

【知识点 5】　电动汽车的关键技术

发展电动汽车必须解决好 4 个方面的关键技术：电池及管理技术、电机及控制技术、整车控制技术以及整车轻量化技术。

1. 电池及管理技术

电池是电动汽车的动力源，也是一直制约电动汽车发展的关键因素。要使电动汽车能与燃油汽车相竞争，关键就是要开发出比能量高、比功率大、使用寿命长、成本低的高效电池，但目前还没有任何一种电池能达到纯电动汽车普及的要求。

电池组性能直接影响整车的加速性能、续驶里程以及制动能量回收的效率等。电池的成本和循环寿命直接影响车辆的成本和可靠性，所有影响电池性能的参数必须得到优化。

电动汽车的电池在使用中发热量很大，电池温度影响电池的电化学系统的运行、循环寿命和充电可接受性、功率和能量、安全性和可靠性等。所以，为了达到最佳的性能和寿命，需将电池包的温度控制在一定范围内，减小包内不均匀的温度分布以避免模块间的不平衡，以此避免电池性能下降，且可以消除相关的潜在危险。

2. 电机及控制技术

电动汽车的驱动电机属于特种电机，是电动汽车的关键部件。要使电动汽车有良好的

使用性能，驱动电机应具有较宽的调速范围及较高的转速，足够大的起动转矩，体积小、质量轻、效率高，且有动态制动强和能量回馈的性能。电动汽车所用的电机正在向大功率、高转速、高效率和小型化方向发展。

随着电机及驱动系统的发展，控制系统趋于智能化和数字化。变结构控制、模糊控制、神经网络、自适应控制、专家系统、遗传算法等非线性智能控制技术，都将各自或结合应用于电动汽车的电动机控制系统。它们的应用将使系统结构简单，呼应迅速，抗干扰能力强，参数变化具有鲁棒性，可大大提高整个系统的综合性能。

3. 整车控制技术

新型纯电动汽车整车控制系统是两条总线网络结构，即驱动系统的高速 CAN 总线和车身系统的低速总线，高速 CAN 总线每个节点为各子系统的 ECU，低速总线按物理位置设置节点，基本原则是基于空间位置的区域自治。

实现整车网络化控制，其意义不只是解决汽车电子化中出现的线路复杂和线束增加问题，网络化实现的通信和资源共享能力成为新的电子与计算机技术在汽车上应用的一个基础，同时也为 X-by-Wire 技术提供有力的支撑。

4. 整车轻量化技术

整车轻量化技术始终是汽车技术重要的研究内容。纯电动汽车由于布置了电池组，整车重量增加较多，轻量化问题更加突出，可以采用以下措施减轻整车质量。

(1) 通过对整车实际使用工况和使用要求的分析，对电池的电压、容量，驱动电机功率、转速和转矩，整车性能等车辆参数的整体优化，合理选择电池和电动机参数。

(2) 通过结构优化和集成化、模块化优化设计，减轻动力总成、车载能源系统的重量，这里包括对电动机及驱动器、传动系、冷却系统、空调和制动真空系统的集成和模块化设计，使系统得到优化；通过电池、电池箱、电池管理系统、车载充电机组成的车载能源系统的合理集成和分散，实现系统优化。

(3) 积极采用轻质材料，如电池箱的结构框架、箱体封皮、轮毂等采用轻质合金材料。

(4) 利用 CAD 技术对车身承载结构件(如前后桥、新增的边梁、横梁等)进行有限元分析研究，用计算和试验相结合的方式，实现结构最优化。

【知识点 6】纯电动汽车车型性能分析

一、比亚迪纯电动汽车

1. 一家做车的科技企业

比亚迪是全球范围内唯一的同时掌握 IGBT 芯片、SiC 全产业链核心技术、三电技术、太阳能和储能解决方案的整车企业。2020 年，比亚迪动力电池装机量全国第二、全球第四，电机、电控装机量均位居全国第一，2019 年 IGBT 模块出货量全国第二，目前公司已经是全国最大的 IGBT 制造商，在汽车市场占比接近 20%(如图 2-6)。全产业链协同发展赋予公司明显的成本优势和技术壁垒。

2. 纯电平台：发布 e3.0 平台，加速车型迭代

2021 年 9 月 8 日，比亚迪发布了 e 平台 3.0 版，在“安全、高效、智能、美学”四大方面实现突破，进一步释放电动汽车潜能，化解电动车发展痛点。

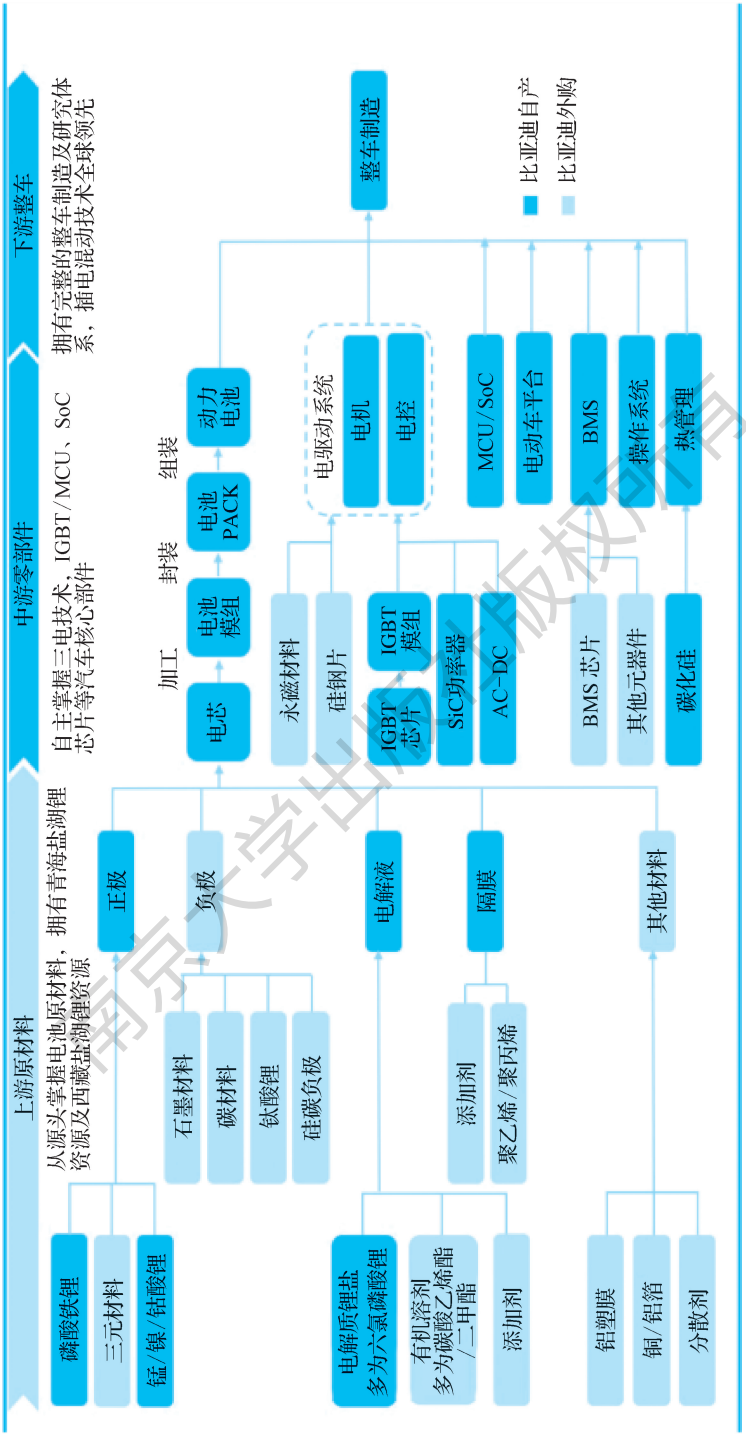


图 2－6　比亚迪产业布局

e3.0 平台在此前 e2.0 平台的基础上进一步实现了整车核心模块的集成化，同时构建了全新的车身结构、电子电器架构以及车用操作系统。从 e2.0 平台高低压双层架构扩展至3.0 时代底盘层、动力层、智能层、车身层的四层架构，如图 2－7 所示。

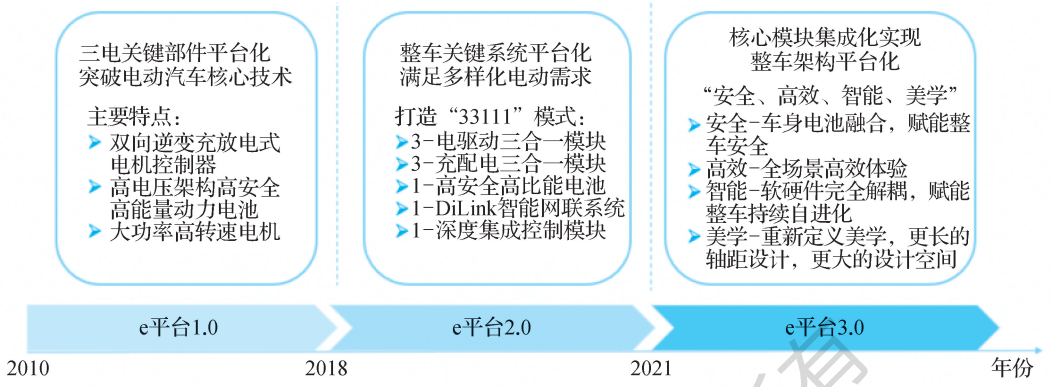


图 2－7　e 平台发展历程及亮点

（1）在安全方面，e3.0 平台标配刀片电池（如图 2－8），电芯到整包的直接集成，大幅提升电池系统能量密度，三明治结构有效提升电池系统的结构强度。比亚迪的刀片电池可安全通过严苛的针刺测试，杜绝电池爆燃问题，相比三元锂电池和磷酸铁锂块状电池更为安全。此外，e3.0 平台为纯电平台打造专属的传力结构，正面传力路径方面，缩小了纵梁高度差，可顺畅传力，标配的全框式副车架，可分散传力；侧面传力路径方面，采用全平地板设计，使侧面传力结构稳定连贯。刀片电池与纯电专属传力结构的搭配，使车身与电池更好地融合，形成完整的传力结构，赋能整车安全。

图 2－8　e3.0 平台打造纯电平台专属传力结构

（2）在高效方面，在零部件层级，e3.0 平台搭载了高性能发卡式扁线电机，最高效率达到了 97.5%，高性能电机控制器的模块最大效率达到了 99.7%。e3.0 平台搭载了全球首款深度集成的八合一电动力总成，将电驱动、充配电、VCU、BMS 集成在一起，最大功率达到了 270 kW，综合效率达到了全球顶级的 89%。e3.0 平台采用异步电机加永磁同步电机的高性能四驱架构，加速工况双电机最大输出，日常行驶以永磁同步电机驱动为主，兼顾不同使用场景，既可实现四驱的动力，又能兼顾两驱的能耗（如图 2－9）。

图 2－9　高性能四驱架构

e3.0 平台同时实现了三次首创，各是动力总成多模式热量补偿技术、动力电池直冷直热技术、驱动电机升压充电架构（如图 2－10）。e3.0 平台的宽温域高效热泵系统（如图 2－11），使整车热量综合利用，打破传统乘员舱电池驱动总成、热管理系统分裂的边界，通过热泵将各个系统深度融合。

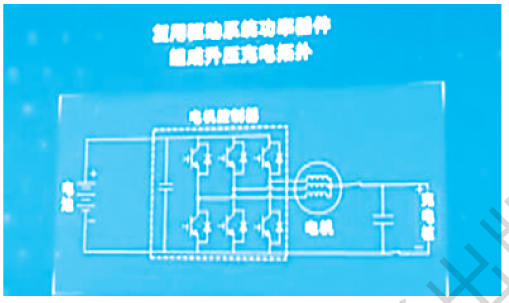


图 2－10　驱动电机升压拓扑架构

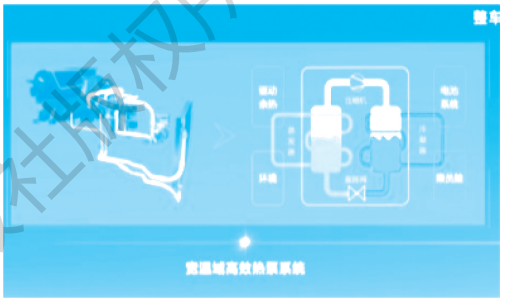


图 2－11　高温域高效热泵系统

在极端低温环境下，动力总成多模式热量补偿技术，通过系统的融合设计，开源和节流并重，热泵系统可实现－30 ℃～60 ℃的宽域工作温度；动力电池直冷直热技术，使热效率最大提升 20%；驱动电机升压充电架构，复用大功率驱动系统，实现宽域大功率充电。

基于刀片电池、八合一电动力总成、宽温域高效热泵系统融合创新，搭载全新 e 平台的高端车型可实现最大续航 1 000 公里，百公里加速 2.9s，百公里电耗比同级别车型降低 10%，低温续航提升最大 20%，充电 5 分钟，最大行驶 150 公里等突破。

（3）在智能方面，e3.0 平台实现硬件与软件的双向智能化。

在硬件层面，开发行业首个动力域控制器（如图 2－12），将整车的驱动、制动、转向等功能深度融合，充分发挥电机快速响应的优势。以驱动防滑控制（如图 2－13）为例，通过动力域功能集成，响应时间缩短至 10 毫秒，而传统的分散控制架构则需要 100 毫秒以上。整车的域控制融合使车辆在冰雪路面等低负荷工况的响应更快，稳定性更好，为智能驾驶提供安全基础。动力域控制器由智能动力域、智能车控域、智能座舱域和智能驾驶域四部分组成，将算力分散的分布式控制器融合为高性能域控制器，算力提升 30%。功能融合，交互效率提升 50%，支持高等级自智能驾驶。

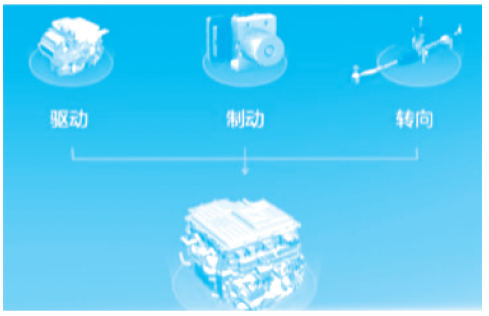


图 2－12　动力域控制器

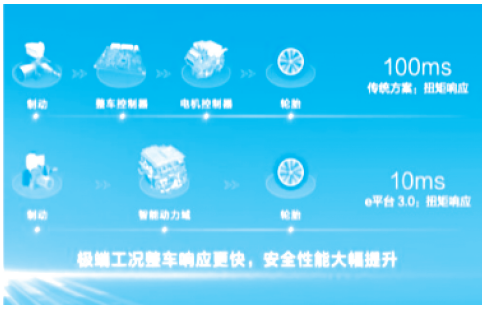


图 2－13　驱动防滑控制

在软件层面，比亚迪自主研发了国内首个车控操作系统，通过构建通用的硬件驱动层、操作系统层、系统服务层和功能服务层，实现了应用软件和整车硬件的完全解耦，应用程序跨平台复用不再受制于硬件差异。即插即用的硬件设计也为架构的持续升级提供了有力保障。后续搭载 e3.0 平台的电动汽车，支持软件 OTA 和硬件升级，电动汽车将持续进化，持续智能。

（4）在美学方面，e3.0 平台重新定义整车美学，扁平化的刀片电池、深度集成的动力总成使得整车的前后悬更短，轴距更大，乘坐空间大幅提升。例如，基于 e3.0 平台推出的首款车型“海豚”，其车身长度与 A0 级小型车尺寸相当，但内部空间比 B 级轿车更大（如图 2－14），后续推出的“元 Plus”也是基于紧凑平台打造。整车架构关键节点的模块化设计，使 e3.0 平台拥有优异的带宽特性，为整车空气动力学设计提供更多发挥空间。基于该平台，车辆可跨越 A～C 级，轴距可涵盖 2.5～3.5 米，从紧凑型到大中型轿车、SUV、MPV 以及未来新物种等（如图 2－15）。

图 2－14　“海豚”车内空间

图 2－15　e 平台后续车型规划

3. 纯电品牌向上，成功攻入豪华轿车市场腹地

（1）比亚迪汉成功引领公司品牌向上。2021 年 5 月，比亚迪汉单月销量达到 8 214 辆，其中汉 EV 销量为 5 763 辆，汉 DM 销量为 2 451 辆（如图 2－16）。截至 5 月底，比亚迪汉累计销量达到 84 401 辆，实现了中国品牌中大型轿车市场销量第一，填补了中国品牌在中大型 C 级轿车市场热销车型的空白。作为一款中国品牌的中大型 C 级轿车，比亚迪汉全系车型售价区间为 21.98 万元～27.95 万元，销量最大的汉 EV 平均销售价格达到 26 万元以上，汉顶配车型销量占到整体销量的 60%，成功突入主流豪华轿车市场的“腹地”，在由 BBA 燃

油车把持的高端市场站住脚。汉车主中，有 67%已经是豪华或超豪华品牌车主，高学历、高职阶、高收入人群占比较大，有 72%分布在北京、上海、广州、深圳、杭州、西安等一、二线城市。而唐系列的性价比也超过理想 ONE、蔚来 ES6、EC6、ES8 等新势力畅销 SUV，在高端车市场占据一席之地。

图 2－16(a)　汉 EV 外观(侧面)

图 2－16(b)　汉 EV 内饰

图 2－16(c)　汉 EV 主动安全

图 2－16(d)　汉 EV 5G 速联

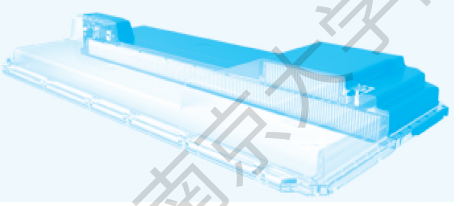


图 2－16(e)　汉 EV 刀片电池

图 2－16(f)　汉 EV 智能辅助系统

(2) 深化高端布局，全面提升品牌价值。

① 布局高端品牌，公司于 2023 年推出高端品牌，价格区间在 30 万～50 万元，高端品牌的智能化以及产品性能将会有大幅度提升，并且该品牌拥有独立品牌、独立团队、独立销售网络。

② 智能化加持，比亚迪汉(见表 2－1)已经具备基于鸿蒙系统的 HiCar 系统、NFC 车钥匙、HiCar、DiPilotL2 的智能驾驶辅助系统，高端品牌车型将在此基础上再度提升智能化水平，目前比亚迪在搭建 L3 以上自动驾驶团队，进行算法融合和 OTA 开发，基于华为自动驾驶解决方案的路测也已开展。

表 2－1　汉 EV 电动车技术参数

电动机	交流永磁同步电机
电机功率	前电机最大功率 163 kW；后电机最大功率 200 kW
蓄电池	刀片电池电池容量分别为 64.8 kWh/76.9 kWh
续航里程	续航里程分别为 506 km/605 km/550 km
百公里加速时间	7.9 s/3.9 s
充电时间	25 min 可充电完成 80%

二、特斯拉纯电动汽车

1. 以智能电动车业务为核心

特斯拉成立于 2003 年，受马斯克主导。公司于 2003 年由马丁·艾伯哈德和马克·塔彭宁共同创办，埃隆·马斯克 2004 年进入公司并领投了 750 万美元的 A 轮融资，马斯克持股约 22%并拥有最终控制权，此后他持续跟投注资并保持住控制权。2010 年公司在美国纳斯达克上市。

目前公司以汽车业务为核心（如图 2－17）。特斯拉已覆盖 Master plan 提出的汽车和能源业务，包括汽车生产销售/租赁、能源生产及储存、其他相关服务。其中汽车业务位居核心，2021 年 1 季度汽车业务营收占比高达 86.6%。

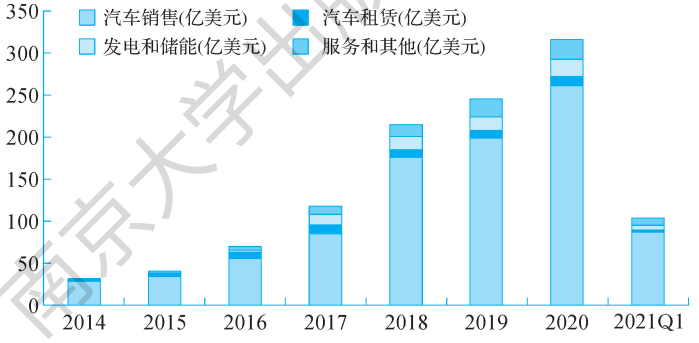


图 2－17　特斯拉以汽车业务为核心

特斯拉车型发展历程（如图 2－18 所示）。按照 Master Plan 的计划，特斯拉于 2006 年与莲花跑车合作打造电动超跑 Roadster，由莲花 Elise 改装而来，搭载性能强悍的电动系统，售价 10 万美元。之后于 2008 年和 2012 年分别推出轿车 Model S、SUV Model X，定位豪华车，售价 7.5 万美元以上，克服了量产过程中的各种难题并成功上市。在 2016 年、2019 年又分别推出 Model 3、Model Y，定位消费级爆款车型，售价 3.4 万美元起。

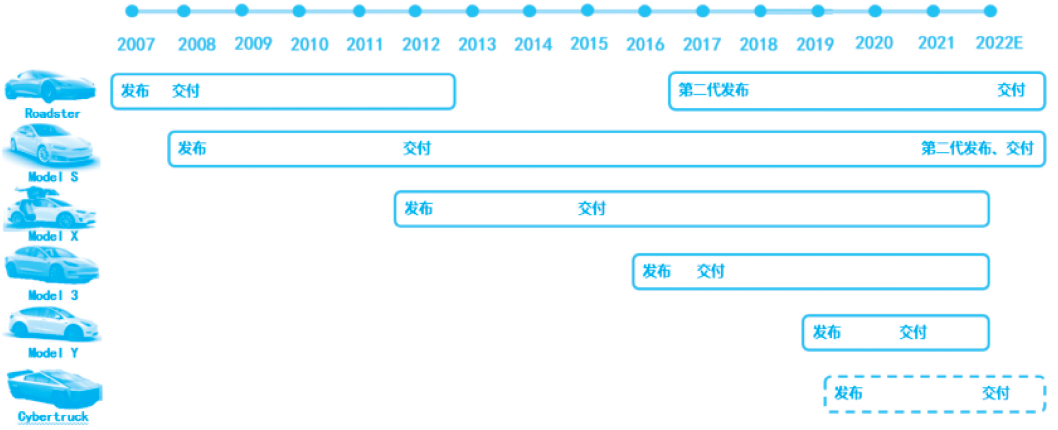


图 2－18　特斯拉产品发展进程

2. 特斯拉电动汽车特点

(1) 三电系统

① 电池保持高能量密度、低成本、低衰减技术趋势

依靠 18650 电池率先实现商业化。特斯拉在 2008 年即开始在 Roadster 和 Model S 车型上应用松下的 18650 圆柱形动力电池。

21700 电池在能量密度和降低成本方面成效明显，见表 2－2 所示。Model 3/Y 车型开始应用松下的 21700 电池，21700 电池尺寸更大、单体电芯能量密度更高，同等带电量下电池的数量大幅减少，LFP 电池进一步拉低成本。国产 Model 3 车型采用宁德时代提供的磷酸铁锂电池（LFP），结合宁德时代特有的 CTP 电池组装技术，电池成本降至约 100 美元/kWh。

表 2－2　特斯拉电池发展历程

时间	2008—2016	2016—2018		2018—2020	
车型	Roadster、Model S	Model S、Model X		Model 3、Model Y	
电池型号	18650	18650	21700	21700	方形
正极类型	LCO	NCA	NCA	NCM811	LEP
负极材料	石墨	硅碳	硅碳	石墨	石墨
电池组能量密度	120 Wh/kg	150 Wh/kg	160 Wh/kg	125 Wh/kg	
成本	190＋美元/kWh	190～160美元/kWh	160～120美元/kWh	153～114美元/kWh	约 100美元/kWh
供应商	松下	松下	松下	LG	宁德时代

② 电机持续升级（如图 2－19～图 2－22）

2012 与 2015 年推出的 Model S 与 Model X 受永磁材料供应链的限制，从性能考虑选

择了感应电机。随着大功率永磁电机技术成熟、供应链成熟，2017 年上市的 Model 3 开始转向永磁电机。在双电机车型方面，从最早 Model S 采用的双感应电机方案，到 Model 3 转向感应＋永磁双电机方案，两类电机优势结合形成互补，同时兼顾了性能与成本。2021 年 Model Y/3 开始换装扁线电机，比圆线电机槽满率高 20%～30%，有效绕组电阻降低，进而降低铜损耗，宽截面又提升了输出功率，进一步提升电机效率，减小电机体积，并能降低成本。

应用车型	Model S/Model X	Model 3/Model Y
电机	异部感应交流电机	永磁同步交流电机
转速范围(r/min)	9000-15000	4000-10000
过载能力%	300-500	300
峰值效率%	94-95	95-97
结构坚固性	好	一般
成本	低	高
可靠性	好	较好
电机外形尺寸	中	小
控制操作性能	好	好

图 2－19　特斯拉两种电机参数对比

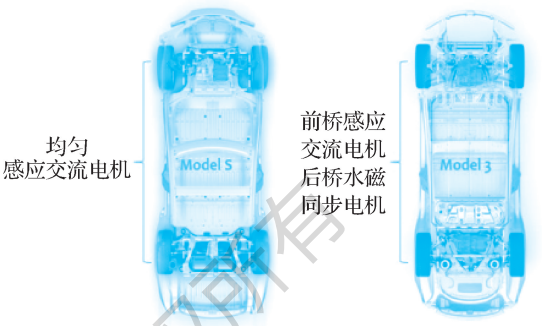


图 2－20　特斯拉电机升级历程

图 2－21　特斯拉采用扁线电机功率密度高，体积小

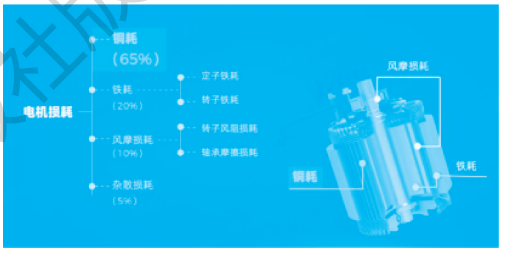


图 2－22　扁线电阻小以降低铜耗

③ 电控技术

率先使用新一代 SiC 功率器件。特斯拉是第一家集成全碳化硅 SiC 功率模块的车企，如图 2－23 所示。Model 3 逆变器由 24 个功率模块组成，为达到更好的连接效果，特斯拉采用了大量的激光焊接工艺。与特斯拉 Model S 相比，Model 3 逆变器效率从 82%提升至 90%，对续航里程数提升显著，同时可降低传导损耗和开关损耗。

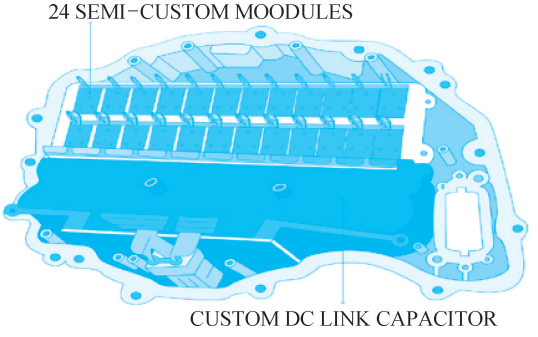


图 2－23　Model 3 采用全 SiC 逆变器

自主研发的 BMS 系统实现精确控制，如图 2－24 所示。特斯拉 2008～2015 年间的核心知识产权大多与 BMS 相关，特斯拉在每个电池片、电池组整体及整车层面均设置有监控板，以监控电池电压和温度，已经实现了对超过 7 000 节电池单体的有效管理，电池的可靠性与安全性得到充分认证。另外，特斯拉 BMS 电池管理系统中包含 4 个核心芯片，其中两个 38 针芯片是特斯拉自研，独有的技术可对电池单体的荷电状态进行精准的估测和一致性控制。

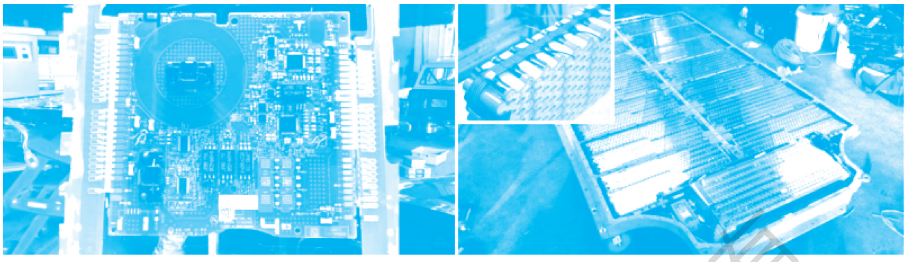


图 2－24　特斯拉 BMS 系统及控制单元

④ 超充桩布局

充电桩分布密集。2012 年特斯拉在美国为 Model S 配套了第一批超级充电桩，之后在全球范围拓展充电网络，如图 2－25 所示。而在国内，特斯拉超级充电站数量突破 900 座，超级充电桩超过 6 900 桩，搭配 700 多个目的地充电站、1 700 多个目的地充电桩，特斯拉充电网络已覆盖中国 320 个以上的城市。

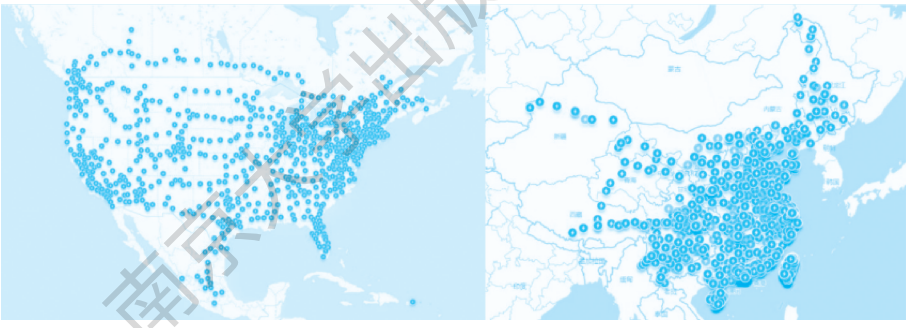


图 2－25　特斯拉全球充电站布局

(2) 汽车底层架构设计

特斯拉重构 EEA 架构(如图 2－26)，是真正的汽车底层革命。传统汽车的每项功能都由独立的 ECU 进行控制，随着车辆电子化程度越来越高，汽车 ECU 的应用数量急速增加，增加成本与能耗，造成算力的冗余浪费；大量分离的嵌入式 OS 和应用程序 Firmware，由不同 Tier1 提供，软、硬件强耦合，语言和编程风格迥异，功能更新需同步升级软、硬件，导致没法统一维护和 OTA 升级。特斯拉对 EEA 架构进行了全面彻底的自主研发，率先定义了下一代电子电气架构的形态。在 Model 3 中，整个 EEA 架构被整合为非常简洁的三大部分(如图 2－27)：中央计算模块(CCM)、左车身控制模块(BCMLH)和右车身控制模块(BCMRH)。其中中央计算模块完全整合了 ADAS 域、信息娱乐系统域和通信系统域，左车身和右车身控制模块分别整合了车身与便利域、底盘与安全域和动力总成域。域

控制器尽可能集中，EEA 架构更抽象化、标准化，实现了软硬件的解耦。电子电气架构的改变，是真正底层的革命。其带来最重要的改变，就是智能汽车可以实现 OTA（Over-the-Air）升级。

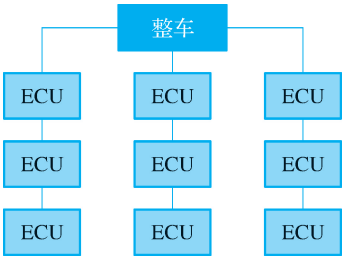


图 2－26　传统分布式 EEA 架构

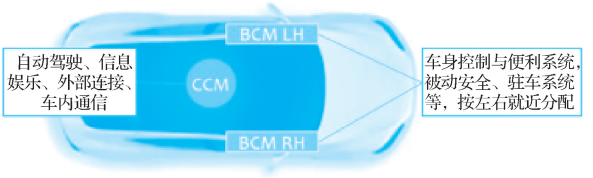


图 2－27　特斯拉域集中式 EEA 架构

（3）特斯拉 Autopilot 系统

特斯拉是全球第一家具备自研芯片能力的车企。特斯拉是全球最早推出自动驾驶的车企（见表 2－3）。

表 2－3　特斯拉 Autopilot 系统演进历程

时间	2014 年 1 月	2016 年 1 月	2017 年 8 月	2019 年 4 月
系统版本	Autopilot 1.0	Autopilot 2.0	Autopilot 2.5	Autopilot 3.0
硬件版本	HW1.0	HW2.0	HW2.5	HW3.0
决策控制冗余	无	部分	完整	完整
毫米波雷达	1 个	1 个	1 个	1 个
后视摄像头	1 个	1 个	1 个	1 个
侧后摄像头	无	2 个	2 个	2 个
侧前摄像头	无	2 个	2 个	2 个
前置摄像头	1 个	1 个	1 个	1 个
超声波雷达	12 个	12 个	12 个	12 个
计算平台	MobileEye EyeQ3	Nvidia drive PX2	Nvidia drive PX2＋	Tesla FSD
定位模块	/	/	有	有
性能（TOPS）	36	24	24	144

其自动驾驶系统 Autopilot 自推出至今历经四代，2014 年推出 Autopilot 1.0，搭载 Mobileye Q3 芯片，实现全速自适应巡航、车道保持、紧急制动、变道辅助、自动泊车等 L2 级别功能；2016 年推出 Autopilot 2.0，增加传感器数量，搭载英伟达 Drive PX2 芯片，实现 L2＋级功能。2019 年推出 Autopilot 3.0 时，即开始使用自研芯片 FSD 替代英伟达 Drive PX2，拥有每秒可处理 2300 帧的图像处理能力，是 HW2.5 版本的 21 倍，可实现 L2＋＋级自动驾驶功能，而算力 216TOPS 的 HW4.0 芯片也在 2022 年投入量产，继续保持领先地位。

（4）“硬件预埋＋软件收费”商业模式

“硬件预埋＋软件收费”的商业模式将成主流。智能化时代，消费者的驾驶将变得更加简单，增加了用户在车内的“剩余时间”，进而具备将时间变现的可能，车企后端的软件服务收费业务潜力巨大。特斯拉正在利用其在电动汽车方面的成本领先优势，积极扩大用户群。随着特斯拉销量的上涨，“硬件预埋＋软件收费”的商业模式，将为特斯拉的营收贡献重要力量。

特斯拉的软件收入由 3 块业务组成，分别是车联网功能、OTA 付费升级和 FSD 自动驾驶功能，如图 2－28 所示。

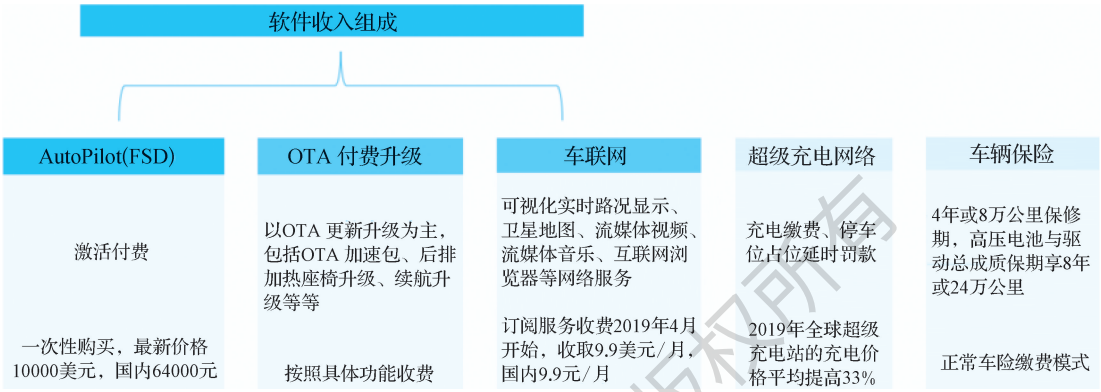


图 2－28　特斯拉软件收费构成

（5）一体压铸技术

压铸是将熔化状态金属在模具内加压冷却成型的精密铸造方法，相比传统的冲压-焊装工艺，具备高效、高精度的优势。大众、宝马等车企已逐步应用压铸件替代传统钣金件，但受固有工艺流程及压铸机规格限制，冲压-焊接仍是白车身的主流制造工艺。

特斯拉率先采用一体压铸技术。特斯拉在 2019 年申请了“汽车车架的多向车身一体成型铸造机和相关铸造方法”的技术专利，并开发出独家的适用于一体压铸的铝合金配方，稳定性强，成型效果好，为一体压铸做好技术储备。随后联合大型压铸设备头部供应商力劲科技，研发出 6 000 吨级压铸设备 Giga Press，在四座超级工厂都进行了布局。2020 年开始采用一体压铸成型的工艺生产 Model Y 的整个后部车体，如图 2－29 所示。

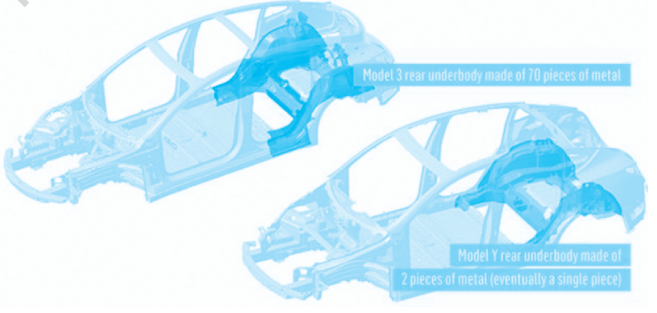


图 2－29　Model Y 采用一体压铸后零件数大幅减少

3. Model Y 加速替代燃油车

Model Y 是特斯拉第四款大规模量产车型。特斯拉 Model Y 是基于 Model 3 研发的

一款中型5座SUV(可选装7座),如图2-30所示,于北京时间2019年3月15日在洛杉矶发布,2020年一季度开始在美国交付,目前在美国有标准续航版(3.4万美元)、长续航版(4.4万美元)以及高性能版(5.1万美元)三种版型。2021年1月1日在国内发售国产的长续航版和高性能版,7月8日发售标准续航版。

Model Y有望成为特斯拉销量最多的车型。Model Y基于Model 3打造,有75%~80%的组件可共用,拥有同样的外观和内饰设计,智能化和驾驶体验一致。且Model Y将大规模采用一体式压铸工艺,提高产品质量的同时节约生产成本,可让利给用户,增强车型售价吸引力。标续版Model Y的上市直接将价格打入25万~30万元区间,空间实用性高于Model 3,见表2-4所示,潜在市场大于Model 3,有望成为特斯拉最走量的车型。

图2-30 Model Y与Model 3造型风格一致

表2-4 Model Y与Model 3配置对比

	Model 3标准续航版改款	Model Y标准续航版
指导价(万元)	25.174	29.2
补贴后售价(万元)	23.59	27.6
上市时间	2021年1月	2021年7月
交付时间	2021年1月	2021年8月
尺寸(mm)	4 694×1 850×1 443	4 750×1 921×1 624
轴距(mm)	2 875	2 890
驱动方式	后驱	后驱
总功率/kW	220	220
总扭矩/N·m	440	440
续航里程/km	468	525
电池类型	磷酸铁锂	磷酸铁锂
带电量/kWh	55	60
最高时速(kW/h)	225	217
百公里加速时间/s	5.6	5.6

三、大众纯电动汽车

1. MEB是大众转型新能源的重要平台

大众电动化战略:大众汽车截至2020年基于现有车型推出10款新能源车型版本,到2022年底,大众汽车旗下所有子品牌VW、奥迪、斯柯达、西雅特等累计发布27款基于MEB

平台生产的车型。至 2023 年大众推出 10 款纯电动 ID 家族车型，截至 2025 年大众汽车计划达到每年销售 100 万电动车的目标，在中国市场销售车型将有 25%～30%为纯电动车型。截至 2028 年将推出 70 款电动车，并将计划销量由 1 500 万提升至 2 200 万辆。大众集团首席执行官表示，2020 年起大众后期基于 MEB 平台打造的电动车累计产量将达到5 000 万辆。

大众的 MEB 平台是模块化电气化工具 Modular Electrification Toolkit 的缩写，MEB 平台是大众首个模块化传统车平台 MQB 向电动化进化的平台，结构层面来看，与大众传统燃油车模块化平台 MQB 相比，MEB 去除了传统燃油车底盘需要的横向设计、前置发动机、前轮驱动的布局，将电池以及电机融入底盘架构，采取平板式电池模组布置于车轴两侧，其外观类似于一块“巧克力”，位于底盘中央，前桥与后桥之间，一方面可实现载荷的均匀分布，同时电池可实现前驱、后驱以及四驱，此外，由于省略了前置发动机、复杂的变速箱以及配套的传动系统，因此，车身在相同的车长情况下可以拥有更长的轴距和更短的前后悬挂。

MEB 平台模块化程度较高，动力层面，后期所有基于 MEB 生产的车型根据车型是后驱还是四驱可提供两套标准的动力传统系统，但是仅采用一款通用的动力电子系统，且所有车型仅配备一款永磁同步电机，如图 2－31 所示。

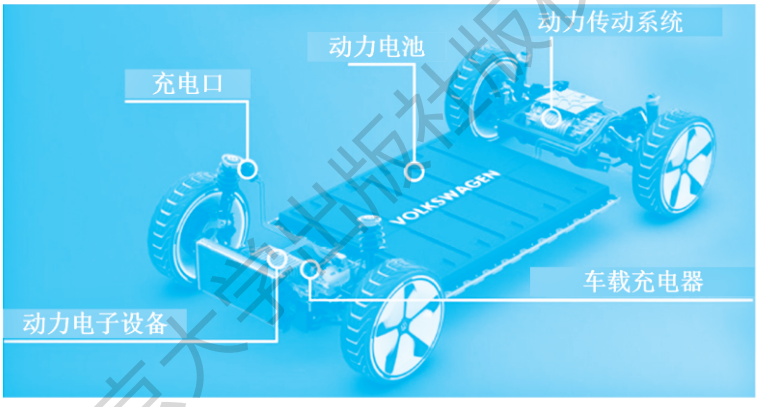


图 2－31　大众 MEB 平台示意图

MEB 采用 3 区域的域控 EEA 架构，从目前披露的大众 MEB 的 EEA 架构来看，大众主要是基于 3 个 ICAS 域控系统：

ICAS1：主要是车内应用服务，依靠网关进行传递的 ECU，包括车身控制、电动系统、高压驱动系统、舒适系统、灯具系统，全部引入车身应用的服务单元里；

ICAS2：支持高级自动驾驶功能，有单独的自动驾驶域控制器；

ICAS3：娱乐系统的域控制器，把导航系统、仪表系统、抬头显示、智能座舱，即所有算法和硬件放入第三个域控制器。

2. MEB 延续性强，产品外观改善，成本下降，续航里程提升

MEB 平台因其模块化能力较强而具备较好的延展性，目前发布的基于 MEB 平台打造的新能源车型其最高续航里程将达到 550 多公里，并且全部搭载 vw.OS 操作系统。MEB 平台车型包括轿车、SUV、MPV 以及部分商用车，可实现紧凑型到中大型的跨越，同时不局限于大众品牌，还将涵盖斯柯达、西雅特以及奥迪等高端品牌。首批车型主要包括奥迪

Q4e-tron，大众 ID. CROZZ、ID. 3，西雅特 EL - BORN，斯柯达 Vision E、ID. BUZZ、ID.BIZZION等。

通过对大众 MEB2020～2022 年上市部分车型的分析（见表 2 - 5），我们认为这些车型具备以下共性：

表 2 - 5　大众 MEB 平台新能源车型与竞品续航里程对标分析

品牌	子品牌	车型						
特斯拉	—	Model S 660（国际工况法）	Model X 575（国际工况法）	Model 3 445/590/595（国际工况法）	Model Y 480/505（WLTP 标准）	皮卡 403/483/805（EPA 标准）		
蔚来	—	EST 610（NEDC 标准）	ES8 580（NEDC 标准）	EC6 615（NEDC 标准）				
大众	VW	ID.3 330/420/550（WLTP 标准）	ID.4（ID. CROZZ）500（NEDC 标准）	ID.BUZZ Concept 600（NEDC 标准）/435（EPA 标准）	ID.Vizzion Concept 665（NEDC 标准）	ID.ROOMZZ（ID.Lounge）450（WLTP 标准）	ID.SPACE VIZZION 590（WLTP 标准）	BUDD-e 533（NEDC 标准）
	斯柯达	VISION E Concept 500	VISION iV 500（WLTP 标准）	CITIGO-e iV 260（WLTP 标准）				
	奥迪	Q4 e-tron 450（WLTP 标准）	e-tron Sback 347/446（WLTP 标准）					
	西雅特	el-born 420（WLTP 标准）						
比亚迪	—	唐 EV600 600（等速法）	秦 Pro - EV500 420（工况法）	e1 305（工况法）	e2 305/405（工况法）	e3 305/405（工况法）	s2 305（工况法）	

第一，续航里程大幅度提升，普遍达到 500 km 以上。大众推出的国产纯电动车型续航里程均低于 300 km（上汽大众朗逸续航里程为 278 km，一汽大众纯电动高尔夫续航里程为 270 km），后续车型高配版本的续航里程普遍达到 450～600 km。与对标车型特斯拉、蔚来、比亚迪的核心车型相当。MEB 平台车型的续航里程大幅度显著提升主要由于 MEB 是专门针对新能源汽车的独立平台，而且之前大众国产车型的新能源均是基于原传统车平台打造，由于新能源独立平台的结构有所差异，车身搭载的电池数量大幅度提升。基于 MEB 平台打造的 ID 车型的基本续航里程是 350 km，最高可提升至 665 km。

第二，外观内饰相较传统车改动较大，更加具备科技感，如图 2 - 32 和图 2 - 33 所示。基于 MEB 的新能源车型外观普遍更加具有运动感和科技感，体现在造型上，整体偏圆润，前脸均取消原传统燃油车使用的横拉式进气格栅而采用封闭式进气格栅，车身流线感加强，前后均大部分采用贯穿式大灯等设计，采用五辐式轮毂。内饰层面则普遍做了较大简化，整体设计理念更加向造车新势力靠拢。

图 2－32　ID.3 外观(侧面)

图 2－33　ID.3 内饰

第三,成本显著下降。纵向比较来看,以车型类似的 ID.3(基于 MEB 平台)与纯电动版高尔夫(基于 MQB 平台)进行比较,据大众 CEO Herbert Diess 表示,ID.3 成本比纯电动版高尔夫大约便宜 40%。成本大幅度下降主要由于 MQB 平台虽然能够兼容新能源车型,但是重心仍是传统燃油车系统的平台架构,而 MEB 由于专门为新能源车型打造,结构布局等更加合理化,同时模块化研发、采购、设计也使得 MEB 平台具备横向比较的成本相对优势,见表 2－6 所示。

表 2－6　近期大众车型规划及对应产品性能参数

品牌	车型	级别	长宽高(mm)	轴距(mm)	续航里程(km)	电池功率(kWh)	充电时间(min)
VW	ID.3	紧凑级两厢车	4 260/1 810/1 550	2 765	330/420/550(WLTP 标准)	45/58/77	30(290 公里)
VW	ID.4(ID.CROZZ)	紧凑级 SUV	4 625/1 890/1 608	2 774	500(NEDC 标准)	83	30(80%,快速充电)
VW	ID.BUZZ Concept	紧凑级 MPV(4～8 座小型客车)	4 941/1 979/1 963	3 300	600(NEDC 标准)/435(EPA 标准)	111	30(80%,快速充电)
VW	ID.Vizzion Concept	全尺三厢车	5 163/1 947/1 506	3 100	665(NEDC 标准)	111	—
VW	ID.ROOMZZ	全尺寸跨界 SUV	4 930/1 903/1 675	2 965	450/600(WLTP 标准)	77/111	30(80%,快速充电)
VW	ID.SPACE VIZZION	紧凑级跨界 SUV	4 958/1 897/1 529	2 964	590(WLTP 标准)	82	30(80%,快速充电)
VW	BUDD-e	MPV	4 597/1 938/1 834	3 152	533(NEDC 标准)	101	30(80%,快速充电)
奥迪	Q4 e-tron	紧凑级跨界 SUV	4 590/1 900/1 610	2 770	450(WLTP 标准)	82	30(80%,快速充电)
斯柯达	CITIGO-e iV	次紧凑级两厢车	3 597/1 926/1 645	2 765	260(WLTP 标准)	32.2	1 小时(80%,40 kW,快速充电)

ID.3 是大众基于 MEB 平台打造的首款车型，定位紧凑型纯电动轿车，车型长宽高分别为 4 261 mm、1 809 mm、1 552 mm，轴距为 2 765 mm，整体车长与 Golf 相近，但得益于纯电动平台带来优势，其轴距更大，且车内无中央通道，内部空间显著提升，见表 2－7 所示，如图 2－34、图 2－35 所示。

表 2－7　ID.3 电动车技术参数

电动机	后置永磁单电动机　最大功率：150 kW
蓄电池	锂离子蓄电池电池容量分别为 45 kWh/58 kWh/77 kWh
续航里程	续航里程分别为 330 km/420 km/550 km
充电时间	直流快充时 30 分钟便可充入续航 290 公里所需的电量

图 2－34　ID.4 外观（正面）

图 2－35　ID.4 外观（侧面）

ID.4 基于 ID.CROZZ Concept 打造，该车型同样基于 MEB 平台，ID.4 比 ID.3 尺寸更大，定位紧凑型 SUV，车型长宽高分别为 4 565 mm、1 845 mm、1 621 mm，轴距为 2 765 mm，见表 2－8所示，如图 2－36、图 2－37 所示。

表 2－8　ID.4 电动车技术参数

电动机	前、后轴搭载两台电机　224 kW
蓄电池	锂离子蓄电池电池容量分别为 58 kWh/83 kWh
续航里程	续航里程分别为 330 km/500 km
充电时间	30 min 可充电完成 80%

图 2－36　Q4 e-tron 外观（正面）

图 2－37　Q4 e-tron 外观（侧面）

Q4 e-tron 是奥迪首款基于 MEB 平台打造的车型，相对于由保时捷纯电平台（J1）打造的 e-tron 车型更加平民化。Q4 e-tron 定位紧凑型跨界 SUV，车身介于 Q3 和 Q5 之间，车

型长宽高分别为 4 590 mm、1 900 mm、1 610 mm，轴距为 2 770 mm，尺寸与 Q5 相当，见表 2－9所示，如图 2－38、图 2－39 所示。

表 2－9　Q4 e-tron 电动车技术参数

电动机	搭载 quattro 电动四驱系统，前后分别配备一台感应异步电机和一台永磁同步电机，综合输出功率 225 kW
蓄电池	锂离子蓄电池　电池容量：82 kWh
续航里程	续航里程最大为 450 km
充电时间	直流快充时 30 分钟可充电完成 80%

图 2－38　斯柯达 CITIGOe iV 外观（正面）

图 2－39　斯柯达 CITIGOe iV 外观（侧面）

斯柯达 CITIGOe iV 是大众旗下 e-Up 车和未来的 eMii 的姊妹款，为 MEB 平台产品，定位次紧凑型微型车，车型长宽高分别为 3 597 mm、1 926 mm、1 645 mm，轴距为 2 765 mm，见表 2－10 所示。

表 2－10　斯柯达 CITIGOe iV 电动车技术参数

电动机	搭载 quattro 电动四驱系统，前后分别配备一台感应异步电机和一台永磁同步电机，综合输出功率 225 kW
蓄电池	锂离子蓄电池　电池容量：82 kWh
续航里程	续航里程最大为 450 km
充电时间	直流快充时 30 分钟可充电完成 80%

模块二　混合动力电动汽车

混合动力电动汽车是燃油汽车向纯电动汽车发展过程中的过渡车型，目前技术相对成熟，其中丰田、比亚迪和本田混合动力电动汽车为市场主流品牌。

【知识点 1】　混合动力电动汽车的定义与分析

一、混合动力电动汽车的定义

国际电子技术委员会对混合动力车辆的定义为：在特定的工作条件下，可以从两种或两种以上的能量存储器、能量源或能量转化器中获取驱动能量的汽车，其中至少一种存储器或

转化器要安装在汽车上。混合动力电动汽车至少有一种能量存储器、能量源或能量转化器可以传递电能。串联式混合动力车辆只有一种能量转化器可以提供驱动力，并联式混合车辆则不止由一种能量转化器提供驱动力。

二、混合动力电动汽车的分类

混合动力电动汽车分类方法较多，这里主要介绍以下 6 种分类方法。

1. 按照动力系统结构形式划分

根据混合动力电动汽车零部件的种类、数量和连接关系，可以将其分为串联式混合动力电动汽车（SHEV）、并联式混合动力电动汽车（PHEV）和混联式混合动力电动汽车（PSHEV）。

串联式混合动力电动汽车是指车辆行驶系统的驱动力只来源于电动机的混合动力电动汽车。它的结构特点是发动机带动发电机发电，电能通过电机控制器输送给电动机，由电动机驱动汽车行驶。另外，动力电池也可以单独向电动机提供电能驱动汽车行驶。

并联式混合动力电动汽车是指车辆行驶系统的驱动力由电动机及发动机同时或单独供给的混合动力电动汽车。它的结构特点是并联式驱动系统可以单独使用发动机或电动机作为动力源，也可以同时使用电动机和发动机作为动力源驱动汽车行驶。

混联式混合动力电动汽车是指具备串联式和并联式两种混合动力系统结构的混合动力电动汽车。它的结构特点是可以在串联混合模式下工作，也可以在并联混合模式下工作，兼顾了串联式和并联式的特点。

2. 按照混合度划分

按照电动机相对于燃油发动机的功率比大小，可以将其分为微混合型混合动力电动汽车、轻度混合（弱混合）型混合动力电动汽车、中度混合型混合动力电动汽车和重度混合（强混合）型混合动力电动汽车。

微混合型混合动力电动汽车是以发动机为主要动力源，不具备纯电动行驶模式的混合动力电动汽车。只具备停车怠速停机功能的混合动力电动汽车是一种典型的微混合模式。一般情况下，电动机的峰值功率和发动机的额定功率比≤5%。

轻度混合（弱混合）型混合动力电动汽车是以发动机为主要动力源，电动机作为辅助动力，在车辆加速和爬坡时，电动机可向车辆行驶系统提供辅助驱动力矩，但不能单独驱动车辆行驶的混合动力电动汽车。一般情况下，电动机的峰值功率和发动机的额定功率比为5%～15%。

中度混合型混合动力电动汽车是以发动机和/或电动机为动力源的混合动力电动汽车。一般情况下，电动机的峰值功率和发动机的额定功率比为 15%～40%。

重度混合（强混合）型混合动力电动汽车是以发动机和/或电动机为动力源，且电动机可以独立驱动车辆行驶的混合动力电动汽车。一般情况下，电动机的峰值功率和发动机的额定功率比＞40%。

3. 按照外接充电能力划分

按照是否能够外接充电，可分为可外接充电型混合动力电动汽车和不可外接充电型混合动力电动汽车。

可外接充电型混合动力电动汽车是一种被设计成可以在正常使用情况下从非车载装置

中获取能量的混合动力电动汽车。不可外接充电型混合动力电动汽车是一种被设计成在正常使用情况下从车载燃料中获取全部能量的混合动力电动汽车。

4. 按照行驶模式的选择方式划分

按照行驶模式的选择方式划分，可分为有手动选择功能的混合动力电动汽车和无手动选择功能的混合动力电动汽车。

有手动选择功能的混合动力电动汽车是指具备行驶模式手动选择功能的混合动力电动汽车，车辆可选择的行驶模式包括热机模式、纯电动模式和混合动力模式三种。

无手动选择功能的混合动力电动汽车是指不具备行驶模式手动选择功能的混合动力电动汽车，车辆的行驶模式根据不同工况自动切换。

5. 按照车辆用途划分

按照车辆用途划分，可以分为混合动力电动乘用车、混合动力电动客车和混合动力电动货车。

6. 按照与发动机混合的可再充电能量储存系统划分

按照与发动机混合的可再充电能量储存系统不同，可以划分为动力蓄电池式混合动力电动汽车、超级电容器式混合动力电动汽车、机电飞轮式混合动力电动汽车和动力蓄电池与超级电容器组合式混合动力电动汽车。

【知识点 2】　混合动力电动汽车的结构原理

一、串联式混合动力电动汽车

1. 串联式混合动力汽车结构

串联式混合动力电动汽车系统结构如图 2－40 所示，它主要由发动机、发电机、电动机和蓄电池组等部件组成。发动机仅用于发电，发电机发出的电能通过电动机控制器直接输送到电动机，由电动机产生的电磁力矩驱动汽车行驶。发电机发出的部分电能向蓄电池充电，以延长混合动力电动汽车的行驶里程。另外蓄电池还可以单独向电动机提供电能驱动电动汽车，使混合动力电动汽车在零污染状态下行驶。

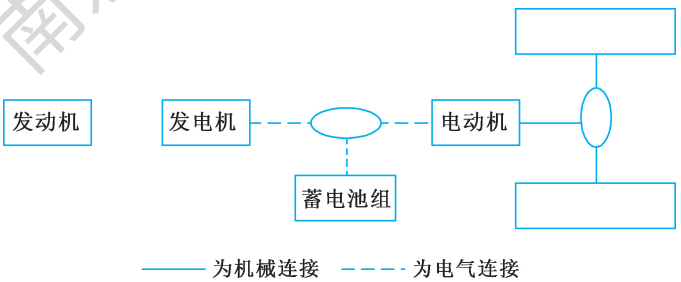


图 2－40　串联式混合动力电动汽车系统结构

在串联式混合动力电动汽车上，由发动机带动发电机所产生的电能和蓄电池输出的电能，共同输出到电动机来驱动汽车行驶，电力驱动是唯一的驱动模式。动力流程图如图 2－41所示。电动机直接与驱动桥相连，发动机与发电机直接连接产生电能，来驱动电动机或者给蓄电池充电，汽车行驶时的驱动力由电动机输出，将存储在蓄电池中的电能转化为车

轮上的机械能。当蓄电池的荷电状态 SOC 降到一个预定值时，发动机即开始对蓄电池进行充电。发动机与驱动系统并没有机械地连接在一起，这种方式可以很大程度地减少发动机所受到的车辆瞬态响应。瞬态响应的减少可以使发动机进行最优的喷油和点火控制，使其在最佳工况点附近工作。

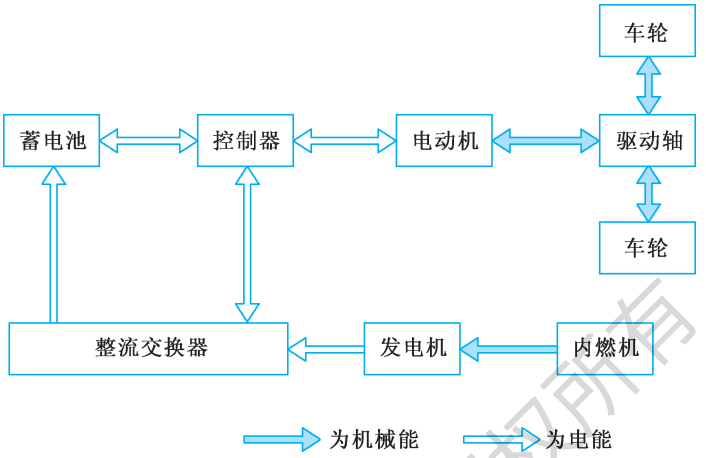


图 2－41　串联式混合动力电动汽车动力流程图

2. 串联式混合动力电动汽车的工作模式（见表 2－11，如图 2－42）

（1）当动力电池组具有较高的电量且动力电池组输出功率满足整车行驶功率需求时，串联混合动力电动汽车以纯电池组驱动模式工作，此时发动机—发电机组处于关机状态；

（2）当汽车以纯电池组驱动行驶时，若汽车减速制动，电动/发电机工作于发电模式，实施再生制动，汽车制动能量通过再生发电回收到动力电池组中，即工作于再生制动充电模式；

（3）当汽车加速或爬坡需要更大的功率输出且超出了动力电池组的输出功率限制时，发动机—发电机组启动发电，并同动力电池组一起输出电功率，实施混合动力驱动工作模式；

（4）当动力电池组的电量不足且发动机—发电机组输出功率在驱动车辆的同时有富裕时，实施动力电池组强制补充充电工作模式；

（5）当动力电池组的电量不足且发动机—发电机组处于发电状态时，若汽车减速制动，电动/发电机工作于再生制动状态，汽车制动能量通过再生发电与发动机—发电机组输出功率一起为动力电池组充电，实施动力电池组的混合补充充电；

（6）当动力电池组的电量在目标范围内，且发动机—发电机组输出功率满足汽车行驶功率需求时，为提高串联混合动力系统的能量利用效率，采用纯发动机驱动工作模式，此时发动机—发电机组输出功率与汽车行驶功率需求相等；

（7）若动力电池组的电量过低，为保证整车行驶的综合性能，需要对动力电池组进行停车补充充电，此时发动机—发电机组输出的电功率全部用于为动力电池组进行补充充电。

表 2－11　串联式混合动力汽车工作模式表

工作模式	发动机-发电机组	动力电池组	电机驱动系统
纯电池组驱动	关机	放电	电动
再生制动充电	关机	充电	发电
混合动力驱动	发电	放电	电动
强制补充充电	发电	充电	电动
混合补充充电	发电	充电	发电
纯发动机驱动	发电	—	电动
停车补充充电	发电	充电	停机

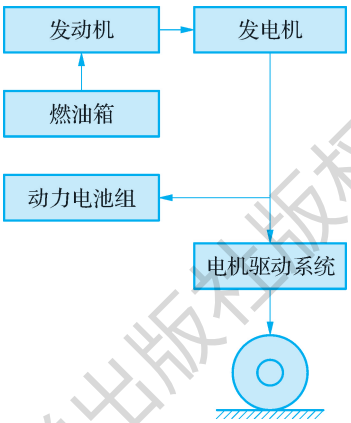


图 2－42　串联式混合动力汽车工作模式图

二、并联式混合动力电动汽车

1. 并联式混合动力汽车结构原理

并联式混合动力电动汽车系统结构如图 2－43 所示，它主要是由发动机、电动机/发电机和蓄电池等部件组成，有多种组合形式，可以根据使用要求选用。并联式混合动力系统采用发动机和电动机两套独立的驱动系统驱动车轮。发动机和电动机通常通过不同的离合器来驱动车轮，可以采用发动机单独驱动、电动机单独驱动或者发动机和电动机混合驱动三种工作模式。当发动机提供的功率大于车辆所需驱动功率时或者当车辆制动时，电动机工作于发电机状态，给蓄电池充电。发动机和电动机的功率可以互相叠加，发动机功率和电动机/发电机功率为电动汽车所需最大驱动功率的 50%～100%，因此，可以采用小功率的发动机与电动/发电机，使得整个动力系统的装配尺寸、质量都较小，造价也更低，行程也可以比串联式混合动力电动汽车的长一些，其特点更加趋近于内燃机汽车。并联式混合动力驱动系统通常被应用在小型混合动力电动汽车上。

并联式驱动系统的动力流程图如图 2－44 所示。发动机和电动机通过某种变速装置同时与驱动桥直接相连接。电动机可以用来平衡发动机所受的载荷，使其能在高效率区域工

作，因为通常发动机工作在满负荷（中等转速）下燃油经济性最好。当车辆在较小的路面载荷下工作时，内燃机车辆的发动机燃油经济性比较差，而并联式混合动力电动汽车的发动机此时可以被关闭掉而只用电动机来驱动汽车，或者增加发动机的负荷使电动机作为发电机，给蓄电池充电以备后用（即一边驱动汽车，一边充电）。由于并联式混合动力电动汽车在稳定的高速下，发动机具有比较高的效率和相对较小的质量，因此，它在高速公路上行驶具有比较好的燃油经济性。

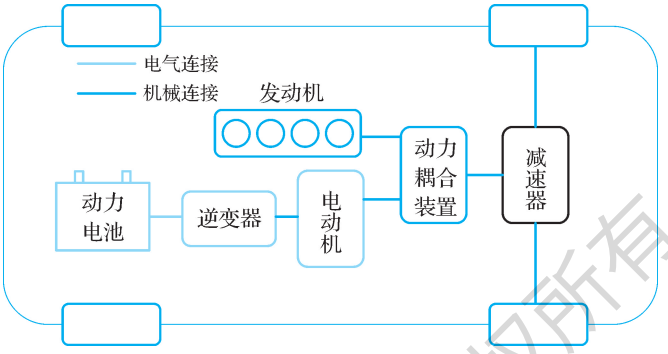


图 2－43　并联式混合动力电动汽车系统结构

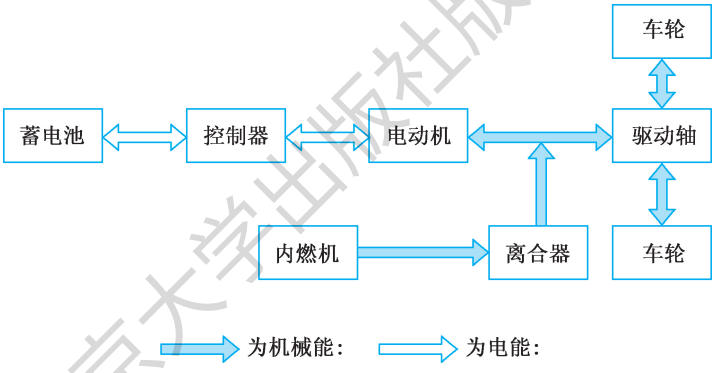


图 2－44　并联式混合动力电动汽车动力流程图

并联式驱动系统有两条能量传输路线，可以同时使用电动机和发动机作为动力源来驱动汽车，这种设计方式可以使其以纯电动汽车或低排放汽车的状态运行，但是此时不能提供全部的动力能源。

2. 并联式混合动力电动汽车工作模式（见表 2－12，如图 2－45）

（1）当动力电池组具有较高的电量且动力电池组输出功率满足整车行驶功率需求或整车需求功率较小时，为避免发动机工作于低负荷和低效率区，并联式混合动力电动汽车以纯电动机驱动模式工作，此时发动机处于关机状态；

（2）当汽车以纯电动机驱动行驶时，若汽车减速制动，电动/发电机工作于再生制动状态，汽车制动能量通过再生发电回收到动力电池组中，即工作于再生制动充电模式；

（3）当汽车加速或爬坡需要更大的功率输出时，发动机启动工作，并同电动机一起输出机械功率，经机电耦合装置后联合驱动汽车行驶，实施混合动力驱动工作模式；

（4）当动力电池组的电量不足且发动机输出功率在驱动汽车的同时并有富余时，电动/

发电机工作于发电模式，实施动力电池组强制补充充电工作模式；

（5）当动力电池组的电量在目标范围内，且发动机输出功率满足汽车行驶功率需求时，为提高并联混合动力系统的能量利用效率，采用纯发动机驱动工作模式，此时发动机输出功率与汽车行驶功率需求相等；

（6）若动力电池组的电量过低，为保证整车行驶的综合性能，需要对动力电池组进行停车补充充电，此时发动机输出的电功率全部用于为动力电池组进行补充充电，电动/发电机工作于发电模式。

表 2－12　并联式混合动力汽车工作模式分析表

工作模式	发动机	动力电池组	电机驱动系统
纯电动机驱动	关机	放电	电动
再生制动充电	—	充电	发电
混合动力驱动	机械动力输出	放电	电动
强制补充充电	机械动力输出	充电	发电
纯发动机驱动	机械动力输出	—	—
停车补充充电	机械动力输出	充电	发电

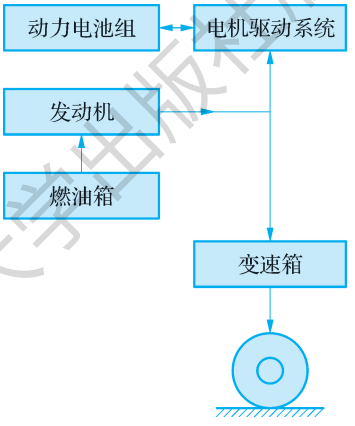


图 2－45　并联式混合动力汽车工作模式图

3. 并联式驱动系统动力合成装置

并联式驱动系统的主要元件为动力合成装置，由于动力合成的实现方法具有多样性，相应的动力传动系统结构也多种多样，通常可归类为驱动力合成式、转矩合成式和转速合成式。

（1）驱动力合成式。驱动力合成式并联混合动力电动汽车示意图，如图 2－46(a)所示。其采用一个小功率的发动机，单独地驱动汽车的前轮。另外一套电动机驱动系统单独地驱动汽车的后轮，可以在汽车起动、爬坡或加速时增加混合动力电动汽车的驱动力。两套驱动系统可以独立驱动汽车，也可以联合驱动汽车，使汽车变成四轮驱动的电动汽车。此种混合动力电动汽车具有四轮驱动汽车的特性。

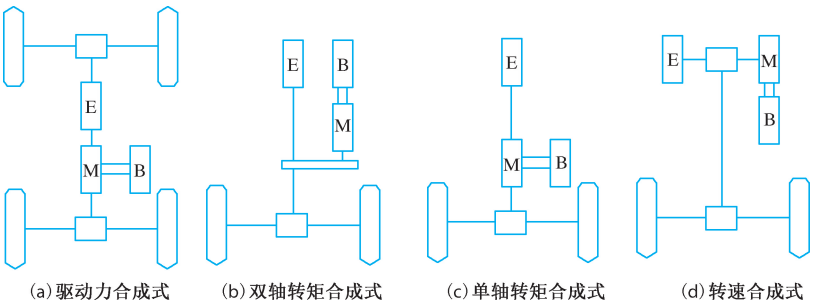


图 2－46　并联式混合动力电动汽车的驱动方式

E－发动机；M－电动机；B－蓄电池。

（2）转矩合成式（双轴式和单轴式）。转矩合成式并联混合动力电动汽车示意图，如图 2－46(b)、2－46(c)所示。发动机通过传动系统直接驱动混合动力电动汽车，并直接（单轴式）或间接（双轴式）带动电动机/发电机转动，向蓄电池充电。蓄电池也可以向电动机/发电机提供电能，此时电动机/发电机转换成电动机，可以用来起动发动机或驱动汽车。

（3）转速合成式。转速合成式并联混合动力汽车示意图，如图 2－46(d)所示。发动机通过离合器和一个“动力组合器”来驱动汽车，电动机也是通过“动力组合器”来驱动汽车，可以利用普通内燃机汽车的大部分传动系统的总成。电动机只需通过“动力组合器”与传动系统连接，结构简单、改制容易、维修方便。通常“动力组合器”就是一个行星齿轮机构，这种装置可以使发动机或电动机之间的转速灵活分配，但它们组合在特定的“动力组合器”中，因为“动力组合器”使它们的转矩固定在电动汽车行驶时的转矩上，调节发动机节气门的开度来与电动机的转速相互配合，才能获得最佳传动效果，从而使得控制装备变得十分复杂。

三、混联式混合动力电动汽车

1. 混联式混合动力汽车结构原理

混联式驱动系统是串联式与并联式的综合，其系统结构如图 2－47 所示，它主要由发动机、发电机、电动机、行星齿轮机构和蓄电池组等部件组成。发动机发出的功率一部分通过机械传动输送给驱动桥，另一部分则驱动发电机发电。发电机发出的电能输送给电动机或蓄电池，电动机产生的驱动力矩通过动力复合装置传送给驱动桥。混联式驱动系统的控制策略是：在汽车低速行驶时，驱动系统主要以串联方式工作；当汽车高速稳定行驶时，则以并联工作方式为主。

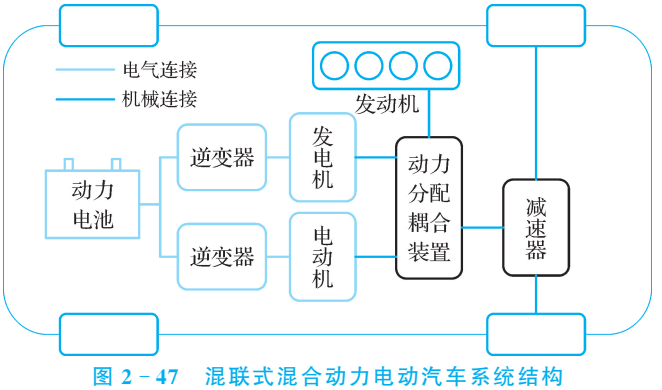


图 2－47　混联式混合动力电动汽车系统结构

目前，混联式混合动力结构一般采用行星齿轮机构作为动力分配装置。有一种最佳的混联式结构是将发动机、发电机和电动机通过一个行星齿轮装置连接起来，动力从发动机输出到与其相连的行星架，行星架将一部分转矩传送到发电机，另一部分传送到传动轴，同时发电机也可以驱动电动机来驱动传动轴。这种机构有两个自由度，可以自由地控制两个不同的速度。此时车辆并不是串联式或并联式，而是两种驱动形式同时存在，充分利用两种驱动形式的优点，其动力流程图如图 2－48 所示。

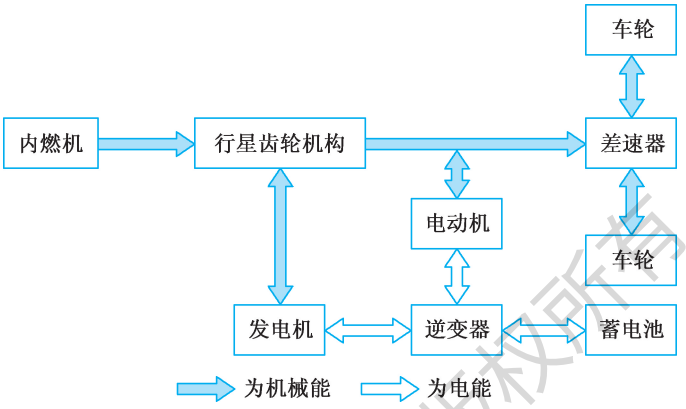


图 2－48　混联式混合动力电动汽车动力流程图

混联式驱动系统充分发挥了串联式和并联式的优点，能够使发动机、发电机、电动机等部件进行更多的优化匹配，从而在结构上保证了在更复杂的工况下使系统在最优状态下工作，所以更容易实现排放和油耗的控制目标，因此，是最具影响力的混合动力电动汽车。

与并联式相比，混联式的动力复合形式更复杂，因此，对动力复合装置的要求更高。目前的混联式结构一般以行星齿轮作为动力复合装置的基本构架。

2. 混联式混合动力汽车工作模式（见表 2－13，如图 2－49）

（1）当动力电池组具有较高的电量且动力电池组输出功率满足整车行驶功率需求或整车需求功率较小时，为避免发动机工作于低负荷和低效率区，混联混合动力电动汽车以纯电动机驱动模式工作，发动机关机；

（2）当汽车以纯电动机驱动行驶时，若汽车减速制动，电动/发电机工作于再生制动状态，汽车制动能量通过再生发电回收到动力电池组中，即工作于再生制动充电模式；

（3）当汽车需求功率增加或动力电池组电量偏低时，发动机启动工作，若发动机输出功率满足汽车行驶功率且动力电池组不需要充电时，整车以纯发动机驱动模式工作，此时动力电池组既不充电也不放电，发动机输出的功率分两部分，一部分直接输出到驱动轮，一部分经过发电机、电动机转化后输出到驱动轮；

（4）当汽车急加速需要更大的功率输出时，整车以混合动力驱动模式工作，此时发动机工作，动力电池组放电，发动机输出的功率分两部分，一部分直接输出到驱动轮，一部分经过发电机、电动机转化后输出到驱动轮，另外，动力电池组放电输出额外的电功率到电机控制器，使得电动机输出更大的功率，满足汽车总功率需求；

（5）当动力电池组的电量不足且发动机输出功率在驱动汽车的同时并有富余时，实施动力电池组强制补充充电工作模式，此时，发动机工作，发动机输出的功率分两部分，一部分

直接输出到驱动轮，一部分经过发电机、电动机转化后输出到驱动轮，一部分经过发电机后为动力电池组进行充电。

表 2－13　混联式混合动力工作模式分析表

工作模式	发动机	发电机	动力电池组	电动/发电机	整车状态
纯电动机驱动	关机	关机	放电	电动	驱动
再生制动充电	关机	关机	充电	发电	制动
纯发动机驱动	启动	发电	既不充也不放	电动	驱动
混合动力驱动	启动	发电	放电	电动	驱动
强制补充充电	启动	发电	充电	电动	驱动

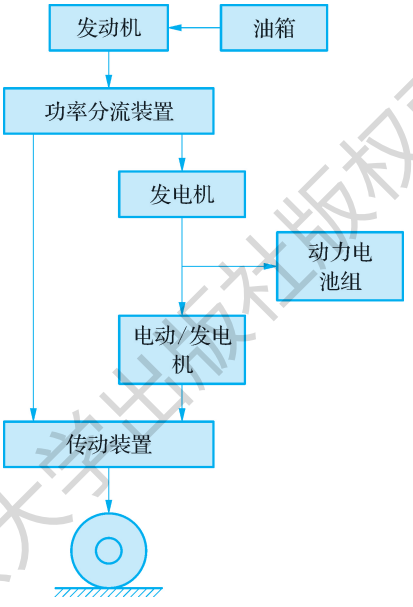


图 2－49　混联式混合动力工作模式图

【知识点 3】　混合动力电动汽车的特点

混合动力电动汽车是将原动机、电动机、能量存储装置（蓄电池）等组合在一起，它们之间的良好匹配和优化控制可充分发挥内燃机汽车和电动汽车的优点，避免各自的不足，混合动力电动汽车是当今最具实际开发意义的低排放和低油耗汽车。较之纯电动汽车，混合动力电动汽车具有如下优点。

（1）由于有原动机作为辅助动力，蓄电池的数量和质量可减少，因此，汽车自身重量可以减小。

（2）汽车的续驶里程和动力性可达到内燃机的水平。

（3）借助原动机的动力，可带动空调、真空助力、转向助力及其他辅助电器，不用消耗蓄电池组有限的电能，从而保证了驾车和乘坐的舒适性。

较之内燃机汽车，混合动力电动汽车具有如下优点。

（1）可使原动机在最佳的工况区域稳定运行，避免或减少了发动机变工况下的不良运行，使发动机的排污和油耗大为降低。

（2）在人口密集的商业区、居民区等地可用纯电动方式驱动车辆，实现零排放。

（3）可通过电动机提供动力，因此，可配备功率较小的发动机，并可通过电动机回收汽车减速和制动时的能量，进一步降低汽车的能量消耗和排污。

显然，混合动力电动汽车研究开发的主要目的就是要减少石油能源的消耗，减少汽车尾气中的有害气体量，降低大气污染。

表 2－14 对不同类型的混合动力电动汽车在燃油经济性、尾气排放和控制难易程度等方面做了比较。表 2－15 对不同类型的混合动力电动汽车在驱动模式、传动效率、整车布置、适用条件等方面进行了比较。

表 2－14　不同类型的混合动力电动汽车类型的比较

项　目	串联式	并联式	混联式
公路行驶燃油经济性	较优	优	优
城市行驶燃油经济性	优	较优	优
无路行驶燃油经济性	较优	优	优
低排放性能	优	较优	较优
成本	低	较低	较低
复杂程度	简单	较复杂	复杂
控制难易程度	简单	较复杂	复杂

表 2－15　不同类型的混合动力电动汽车特点的比较

结构模型	串联式	并联式	混联式
动力总成	发动机、发电机、驱动电动机等三大动力总成	发动机、电动/发电机或电动机两大动力总成	发动机、电动/发电机、电动机等三大动力总成
驱动模式	电动机是唯一的驱动模式	发动机驱动模式、电动机驱动模式、发动机—电动机混合驱动模式	发动机驱动模式、电动机驱动模式、发动机—电动机混合驱动模式
传动效率	能量转换效率较低	传动效率较高	传动效率较高
制动能量回收	能够回收制动能量	能够回收制动能量	能够回收制动能量
整车总布置	三大动力总成之间没有机械式连接装置，结构布置的自由度较大，但三大动力总成的质量、尺寸都较大，一般在大型车辆上采用	发动机驱动系统保持机械式传动系统，发动机与电动机两大动力总成之间被不同的机械装置连接起来，结构复杂，使布置受到一定的限制	三大动力总成之间采用机械装置连接，三大动力总成的质量、尺寸都较小，能够在小型车辆上布置，但结构更加紧凑
适用条件	适用于大型客车或货车，适应在路况较复杂的城市道路和普通公路上行驶，更加接近电动汽车性能	适用于中小型汽车，适应在城市道路和高速公路上行驶，接近普通的内燃机汽车性能	适用于各种类型的汽车，适应在各种道路上行驶，更加接近普通的内燃机汽车性能

【知识点 4】 混合动力电动汽车车型性能分析

一、比亚迪汽车混合动力车型

截至 2023 年，比亚迪插电式混合动力（PHEV）车型全球累计销量突破 600 万辆，连续三年稳居中国混动市场占有率第一（占比超 40%）。其第四代 DM（Dual Mode）技术通过骁云高效发动机、刀片电池与 EHS 电混系统，实现 NEDC 工况亏电油耗 2.9 L/100 km，纯电续航最高达 250 km（CLTC），重新定义插混技术标杆。

DM 技术即 Dual Mode 技术，是比亚迪双模混合动力技术的简称，是一种开创性的插电混合动力技术。经过十余年经验积累、技术不断升级，比亚迪打造出了动力性能和经济性能同样出色的双模混合动力技术平台。

1. DM-i＋DM-p 双平台战略，覆盖多重场景

比亚迪在混动技术方面拥有丰富的研究经验，其混动技术于 2004 年启动研发，2008 年推出第一款 DM 车型，DM 混动技术发展至今，先后历经 4 次迭代。2021 年 1 月，比亚迪发布了主打超低油耗的新一代混动系统——比亚迪 DM-i 混动系统，配合之前发布的主打超强动力的双擎四驱 DM-p 混动系统，构成了目前的“DM 技术双平台战略”。

比亚迪是国内在混动系统研发方向起步较早的主机厂，自 2008 年发布第一代 DM 混动技术开始，其混动系统已经先后经历 4 轮迭代。此前，比亚迪的新一代混动系统已经发布了 DM-p 平台，DM-p 延续了前三代混动系统的构型，主打“超强动力”，是对 DM3 的传承，如图 2－50 所示。

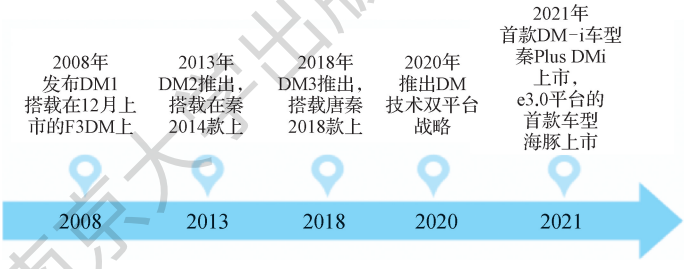


图 2－50 比亚迪 DM 技术发展历程

DM-p 技术成熟，性能强，已搭载量产新车汉 DM 上。而 2021 年 1 月最新发布的 DM-i 平台，采用新的双电机 EHS 混动结构，主打“超低油耗”，经济性更好，成本低。双平台优势互补，覆盖不同需求场景（见表 2－16）。

表 2－16 DM-p 与 DM-i 比较

混动系统	DM-p	DM-i
构型亮点	动力强劲、四驱高性能	能耗表现好、价格低
0～100 kph 加速时间	4.7 s（汉 DM）	7.3 s（秦 Plus DM-i）
亏电油耗	5.8 L/100 km（汉 DM）	3.8 L/100 km（秦 Plus DM-i）
混动构型	双擎四驱	双电机 EHS 电混

（续表）

混动系统	DM-p	DM-i
发动机	普通发动机	混动专用发动机
混动系统特点	多次迭代，技术成熟 支持燃油车、PHEV、EV 车型 同平台开发	新技术路线 构型具备同时覆盖 PHEV、HEV 的能力

2. DM-i：主打超低油耗

DM-i 平台，i 即 intelligent，指智慧、节能、高效、主打超低油耗，满足“追求极致的行车能耗”的用户。DM-i 创造性地定义了以电为主的混动技术，围绕着大功率电机驱动和大容量动力电池供能为主，发动机为辅的电混架构。

DM-i 平台实现五大核心系统的超越：

（1）全球量产最高热效率 43.04%的发动机：DM-i 混动系统配备了两款发动机，骁云插混专用 1.5 升高效发动机和覆盖 C 级车的骁云插混专用涡轮增压 1.5Ti 高效发动机。

骁云插混专用 1.5 升高效发动机：拥有全球领先的 43.04%热效率。运用六大技术分别为：阿特金森循环、15.5 超高压缩比、超低摩擦技术、EGR 废气再循环技术、分体冷却技术以及无轮系设计，实现热效率 43.04%，峰值功率 81 kW，峰值扭矩 135 N·m。

骁云插混专用涡轮增压 1.5Ti 高效发动机：运用 12.5 高压缩比、米勒循环、可变截面涡轮增压器以及超低摩擦等技术，实现热效率超 40%，峰值功率 102 kW/5 300 rpm，峰值扭矩 231 N·m/(1 350～4 000)rpm。

（2）EHS 电混系统（如图 2－51 和图 2－52）：高度集成化，由双电机、双电控、直驱离合器、电机油冷系统、单挡减速器组成，其构型上与本田 i-MMD 类似，结构简化，集成度高。双电机可根据需求以串联或并联模式行驶，经济性好。EHS 电混系统的工作原理传承 DM1 双电机总成，但相比第一代体积减小 30%，重量也减轻 30%。EHS 电混系统以功率划分为三款，适配 A～C 级全部车型，采用扁线电机、油冷技术以及自主 IGBT4.0 技术。

图 2－51　比亚迪 DM-i 超级混动专用发动机

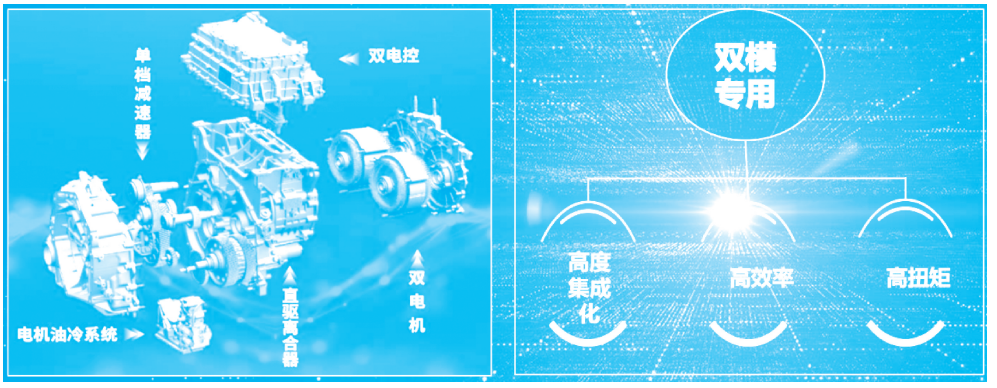


图 2－52　比亚迪 DM-iEHS 电混构模型

(3) 功率型刀片电池(如图 2－53):采用串联式电芯设计,提高体积利用率;电池卷芯采用软铝包装、刀片电池采用硬铝外壳包装,形成二次密封,提升安全等级;电池的单节电压高过 20V,单节电量 1.53 kWh;整个电池包内有 10～20 节刀片电池,电池包结构简化,零部件减少 35%。根据车型不同,搭载电池的电池电量 8.3 kWh～21.5 kWh,纯电续航里程 50～120 km;磷酸铁锂更好的稳定性与刀片电池的结构设计保障电池整体的安全性;磷酸铁锂稳定的材料晶体结构搭配先进的热管理系统使刀片电池的寿命提升。

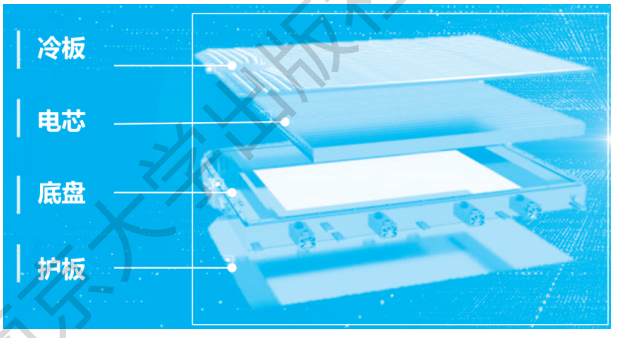


图 2－53　比亚迪 DM-i 搭载的专用刀片电池

(4) 电池热管理系统:动力电池搭载脉冲自加热技术和冷媒直冷技术两项技术,脉冲自加热技术通过电池高频地充放电,使电池内部生热,从而达到电芯自加热效果,相比水加热,加热效率提升 10%,电池均温性更好,可适应更加寒冷的气候条件。冷媒直冷技术是指直接将冷媒通入电池包的冷却板上对电芯进行冷却,相比水冷,冷媒直冷技术的热交换率提升 20%。

(5) 无铅化 12 V 磷酸铁锂小电池:拥有独立的 BMS 系统,可实现充放电智能控制,系统效率相比铅酸电池提升 13%。

DM-i 超级混动系统在不同工况下的驱动模式(如图 2－54)如下:

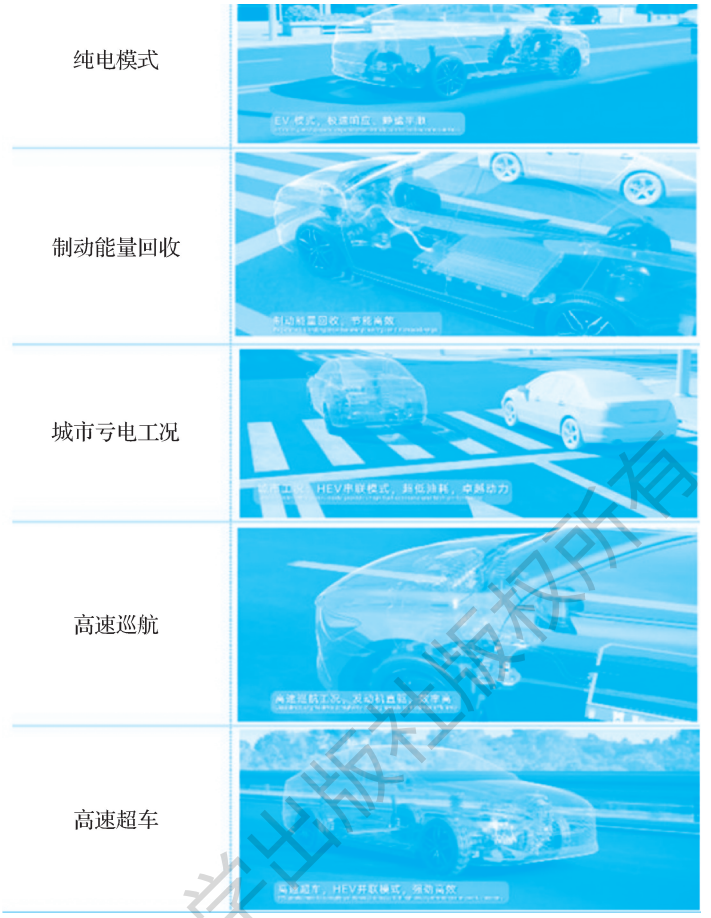


图 2－54　DM-i 超级混动系统在不同工况下的驱动模式

纯电模式：当电量充足时，车辆纯电行驶，具有纯电动车静谧、平顺、零油耗的优点。

制动能量回收：减速制动时，能量回收，节能高效。

高速巡航：发动机直驱车辆，效率高。

高速超车：高负载工况时，并联模式，发动机和电机共同工作，加速性能更好。

通过五大核心系统的突破，DM-i 超级混动系统实现百公里亏电油耗 3.8 L 的超低油耗、零百加速超过同级燃油车 2～3 秒、综合续航里程超过 1 000 km 的成绩，可实现超低油耗、静谧平顺、卓越动力的近乎完美的整车表现。

目前搭载 DM-i 超级混动系统的车型有：2022 款宋 Pro DM-i、唐 DM-i、宋 Plus DM-i、秦 PlusDM-i 等，可以在享受免购置税及补贴后达到与燃油车相比有竞争力的售价，如图 2－55 所示。

车型	图片	简介	推出年份	动力类型	售价（万元）
秦 PLUS DM－i		百公里加速度 7.3 秒、创新 DM－i 超级混动技术、百公里油耗降至 3.8 L，颠覆轿车油耗标准、实现 1 245 km超长续航、EHS 电混系统	2021	油电混动	10.58—14.58
唐 DM－i		DM－i 超级混动专用功率型刀片电池、7 座大空间、智能音乐座舱；DiPilot 智能辅助驾驶、DiLink 3.0 智能网联、手机 NFC 车钥匙	2021	油电混动	18.98—21.68
宋 PLUS DM－i		晶钻龙眼 LED 前大灯、一体贯穿式 LED 尾灯；1 890 mm超长车宽，2 765 mm 跨级别轴距，超大五座空间；手机 NFC 车钥匙、DiLink 智能网联系统、DiPilot 智能驾驶辅助系统	2021	油电混动	14.68—19.98
2022 款宋 Pro DM－i		龙爪之痕贯穿式尾灯、DiLink 4.0(4G)智能网联系统，内置自主研发深度优化的 Android 系统、OTA 远程升级、手机 NFC 钥匙、360°环绕影像	2021	油电混动	1 348

图 2－55　比亚迪目前搭载 DM-i 的在售车型

3. DM-p：主打超强动力

DM-p 平台，p 即 powerful，指动力强劲、极速，主打超强动力，是 DM3 的延续，满足“追求更好驾驶乐趣”的用户。

相较于 DM-i，DM-p 更加强调动力的性能优势，追求加速感，定位相对较高。性能方面，DM-p 系统可以实现零百加速 4 秒级，其动力可以碾压大排量燃油车。DM-p 平台最大特点在于发动机加入了 BSG 电机，既可以作为发动机，又可以作为动力的辅助电机。

DM-p 混动系统采用双擎四驱的结构（如图 2－56 和图 2－57），发动机通过双离合变速箱驱动前轴，并通过 BSG 电机向电池充电，主驱动电机则直接驱动后轴。DM-p 系统技术相对成熟，且由于发动机和电机独立驱动两根轴，仅保留前轴发动机部分即可成为传统燃油车，仅保留后轴电机部分即可成为纯电动车，因此，DM-p 系统非常便于对传统车型、PHEV 车型和 EV 车型进行同平台开发。

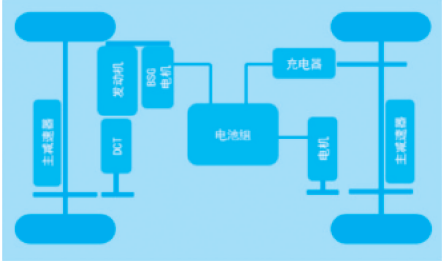


图 2－56　比亚迪 DM-p 双擎四驱原理

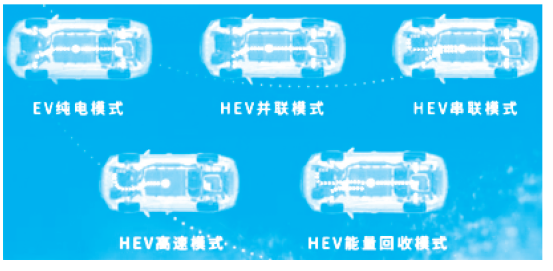


图 2－57　比亚迪 DM-p 双擎四驱工作模式

目前搭载 DM-p 的车型主要包括：21 款唐 DM、汉 DM、宋 Pro DM、全新宋 MAX DM、秦 Pro 超能版 DM 等。

比亚迪是新能源汽车的领军者，经过多年的积累，在 PHEV 领域已经积累了大量的经

验和口碑。DM-p 平台巩固了追求高性能表现的用户，DM-i 平台满足了追求高性价比的用户，双平台战略共同发力，助力比亚迪进一步巩固自己在新能源市场上的龙头地位。

根据比亚迪发布的 2021 年 12 月销量数据（如图 2－58），新能源乘用车中插电式混合动力车型 12 月销量 44 506 辆，同比增长 448.64%，全年累计 272 935 辆，同比增长 467.62%。插混车型的强力增长，主要得益于 DM-i 车型的产能爬坡带来的交付支撑。

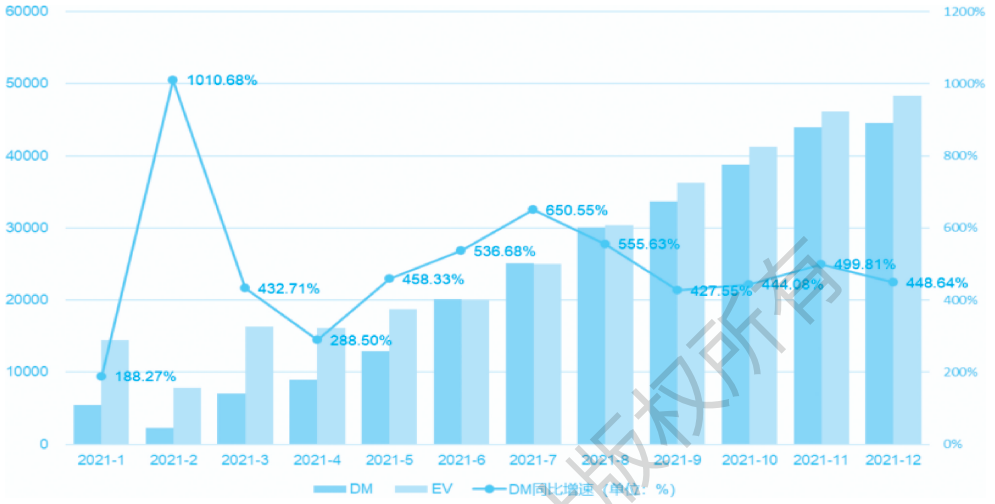


图 2－58　比亚迪 2021 年新能源乘用车销量构成（单位：辆）及 DM 车型增速（单位：%）

二、丰田混合动力车型

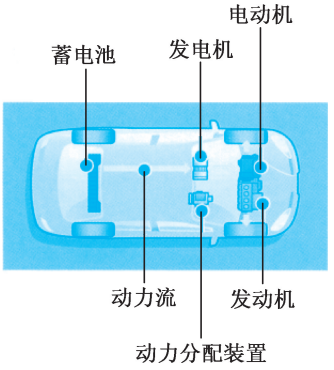
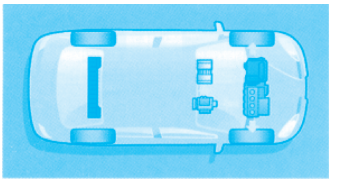
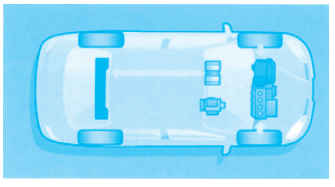
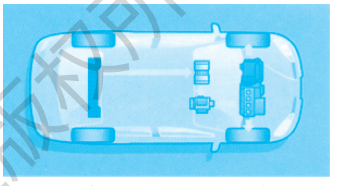
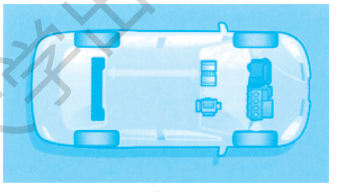
截至 2023 年，丰田混合动力车型全球累计销量突破 2300 万辆，覆盖 90 余个国家，占据全球混动市场 65%的份额。第五代 THS 系统通过热效率 41%的发动机、高密度锂电池与 AI 电控技术，将综合油耗降至 2.5L/100km（WLTC 标准）。

1. THS 的工作模式

丰田混合动力系统（Toyota Hybrid System，THS），它利用汽油发动机和电动机两种动力系统，通过串联和并联相结合的形式进行工作。THS 是世界上最早商业化量产的混合动力系统，目前该系统装备于丰田的多款混合动力车型上。

图 2－59　THS 丰田混合动力系统

表 2－2－17　THS 的工作模式

	
当车辆处于起步或中低速运转时，发动机不用于驱动车辆，而由蓄电池供电给电动机，电动机直接驱动车辆，此时车辆不排放废气	当车辆处于普通行驶状态时，车辆的行驶动力以发动机为主，发动机驱动车轮，同时也带动电动机工作
 当车辆减速、制动时，车轮驱动电动机，电动机起到发电机的作用，再生制动将动能转变为电能，并储存于镍氢蓄电池	 车辆瞬间加速时，车辆蓄电池会提供额外的动力给电动机，电动机会辅助发动机来提高整车动力，改善整车加速性能，此时发动机瞬态加速性能大幅提高
 当系统检测到蓄电池电量低时，发动机可以在驱动车辆的同时，随时带动发电机运转，给蓄电池充电	

2. 第一代 THS(1997—2003)

技术架构：串联＋并联双模混动，镍氢电池＋1.5 L 发动机，综合油耗 5.74 L/100 km。历史意义：全球首款量产混动车型，碳排放较同级燃油车降低 50%。

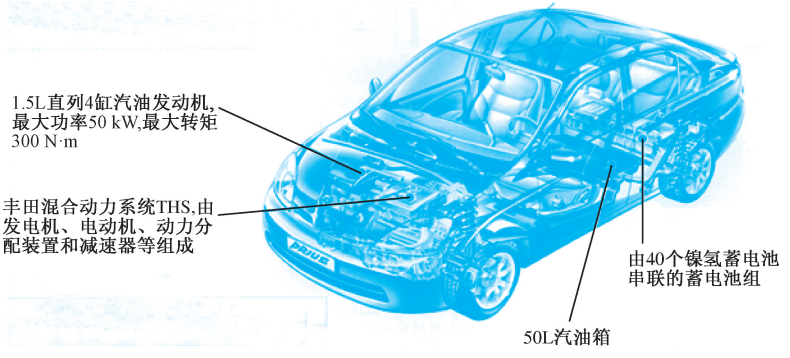


图 2－60　第一代丰田普锐斯透视图

表 2－18　丰田第一代普锐斯技术参数

动力源	类　型	最大功率	最大转矩
发动机	1.5 L 直列 4 缸汽油内燃机	120 kW	240 N・m
电动机	274 永磁同步交流型	30 kW	165 N・m
蓄电池	6.5 Ah，40 个镍氢电池串联		

3. 第二代 THS－Ⅱ(2003—2009)

2003 年 9 月，丰田在日本首先上市了全新第二代普锐斯，除了外表的改进外，最重要的是引入了第二代丰田混合动力系统 THS－Ⅱ。

图 2－61　2003～2009 年第二代丰田普锐斯

THS－Ⅱ最大的改进在于使用了高电压线路——发动机、电动机和蓄电池之间的电压高达 500 V，而上一代 THS 的电压只有 274 V。

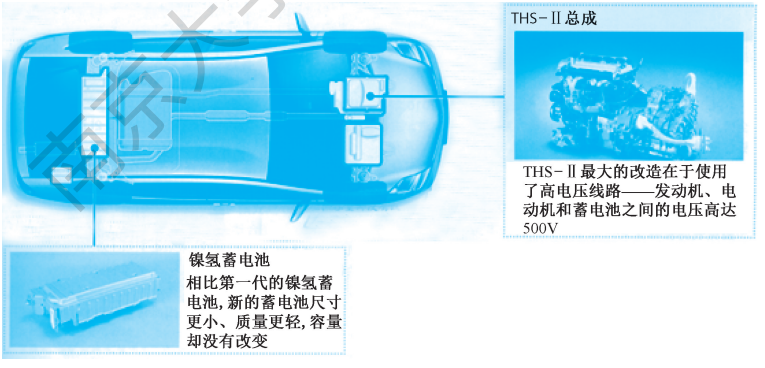


图 2－62　THS Ⅱ透视图

表 2－19　丰田第二代普锐斯技术参数

动力源	类　型	排量/电压/容量	最大功率	最大转矩
发动机	直列 4 缸汽油内燃机	1.5 L	57 kW	115 N・m
电动机	永磁同步交流型	500 V	50 kW	400 N・m
蓄电池	28 个镍氢电池串联	6.5 Ah	—	—

4. 第三代 THS(2009—2016)

图 2－63　2009 年第三代丰田普锐斯

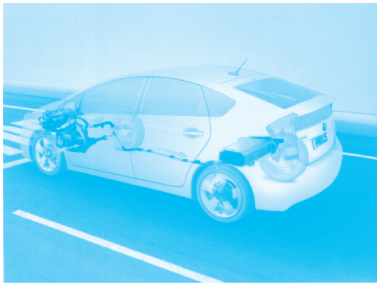


图 2－64　第三代丰田普锐斯制动能量回收

2009 年，丰田推出了全新第三代普锐斯，并于 2010 年全面上市。新一代的普锐斯对混合动力系统进行了改进，主要包括两个方面：一个是使用全新的 1.8 L 阿特金森循环发动机代替原有的 1.5 L 发动机；另外一个是对 HSD 混合动力协同驱动系统进行重新设计。发动机加上电动机动力整车最大功率为 100 kW，低速转矩进一步提升，这也意味着低速时能够获得更好的燃油经济性。0～100 km/h 加速时间比老款提高 1 s，仅需 9.8s。

第三代普锐斯提供 4 种不同的驾驶模式：Normal 为正常模式；EV Drive 模式允许驾驶人在低速状态下单纯依靠电力行驶约 1.6 km；Power 模式提高加速灵敏度，以提升运动性能；Eco 模式则可以帮助驾驶人获得最佳的燃油经济性能。

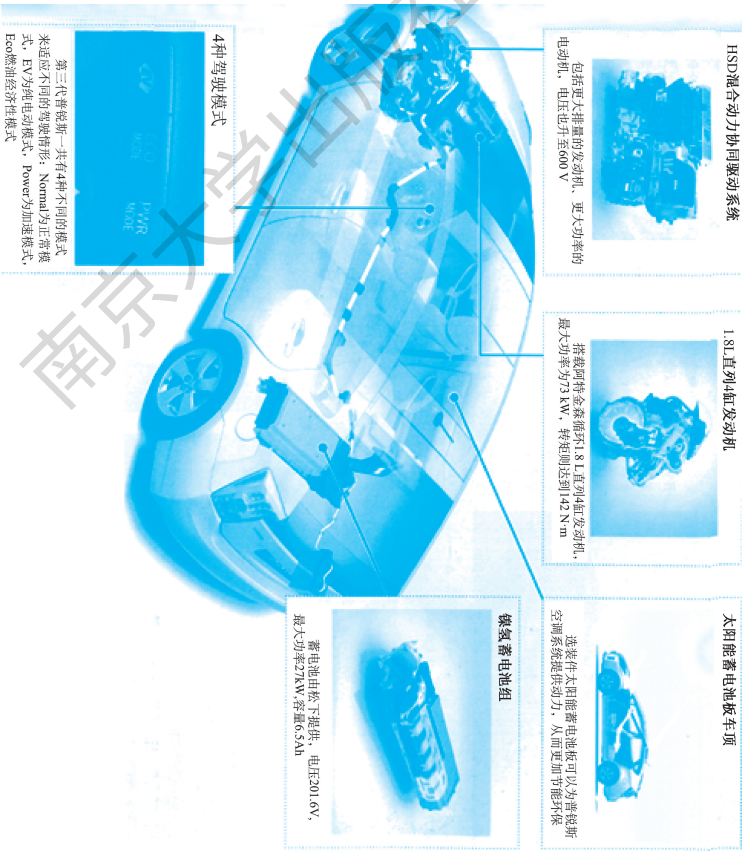


图 2－65　丰田第三代普锐斯透视图

表 2－20　丰田第三代普锐斯技术参数

动力源	类　型	排量/电压/容量	最大功率	最大转矩
发动机	直列 4 缸汽油内燃机	1.8 L	73 kW	142 N·m
电动机	永磁同步交流型	600 V	60 kW	207 N·m
蓄电池	镍氢电池串联	6.5 Ah	27 kW	—

5. 第四代 THS(2016—2023)

随着第三代普锐斯的上市，基于新车型的插电型混合动力车也从实验阶段进入准商业化运作阶段。普锐斯插电型混合动力汽车以锂离子电池作为驱动蓄电池，可使用 3.3 kW 家用电源进行外部充电。

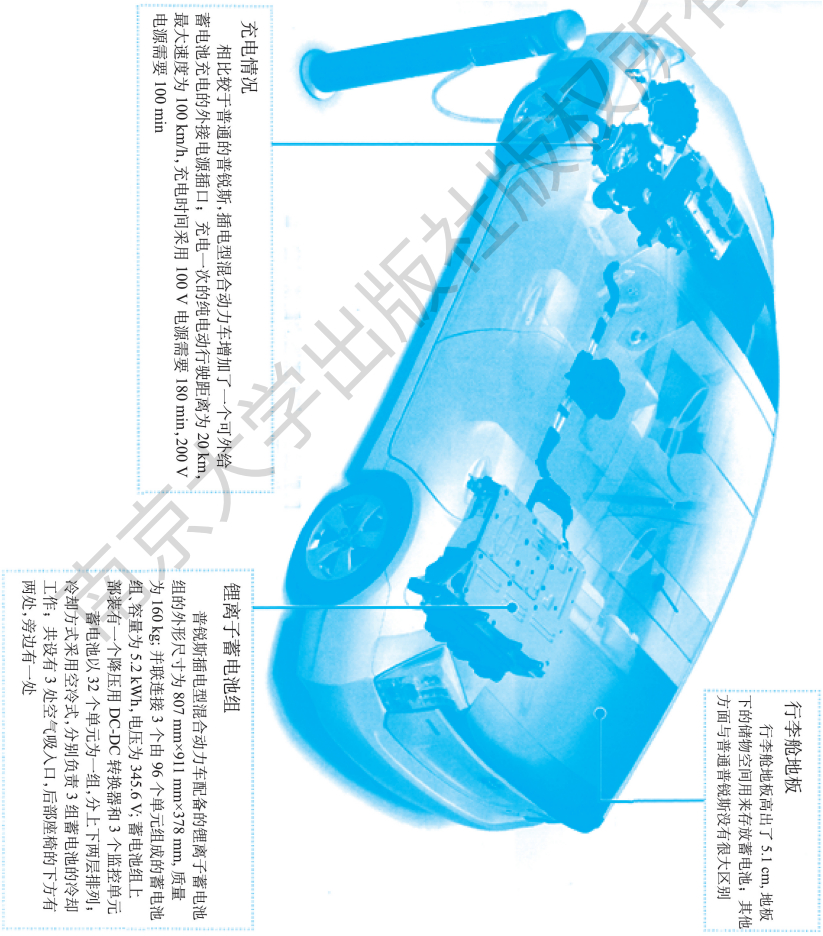


图 2－66　普锐斯插电型混合动力车透视图

普锐斯插电型混合动力汽车每升汽油可以行驶 55 km，在充满电的情况下，纯电动模式续驶里程为 20 km。充电时间方面，100 V 电源需要 180 min，200 V 电源需要 100 min。

表 2－21　丰田第三代插电型普锐斯技术参数

动力源	类　型	排量/电压/容量	最大功率	最大转矩
发动机	直列 4 缸汽油内燃机	1.8 L	73 kW	142 N・m
电动机	永磁同步交流型	600 V	60 kW	207 N・m
蓄电池	锂离子蓄电池串联	6.5 Ah	—	—

6. 第五代 THS(2023—至今)

2023 年 1 月上市的新一代普锐斯，为插电混动版，采用 2.0 L 发动机＋电机的组合，系统总输出功率约 167 kW，0—100 km/h 加速时间缩短至 6.7 秒；电池容量为 13.6 kWh，可提供超过 94 km 的纯电续航。混动版车型则提供 1.8 L 和 2.0 L 两种发动机，其中 2.0 L 版本的系统最大功率 146 kW，并配备 E－Four 四驱系统。

设计上使用太阳能车顶，年发电量达 860 kWh，可供行驶 1 250 km。智能驾驶采用了 T－Pilot智能辅助系统，支持 L2＋级自动驾驶。

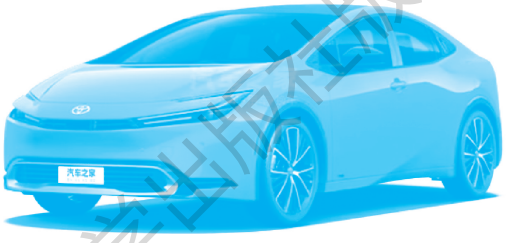


图 2－67　2023 款全新普锐斯 Hybrid

第五代 THS 系统电动化升级：电池用锂离子电池，其能量密度提升至 250 Wh/kg，插混版纯电续航 95 km(WLTC)，支持 150 kW 快充。热管理方面，热泵空调降低冬季能耗 50%，－30℃低温续航衰减减少至 15%。

模块三　燃料电池电动汽车

采用燃料电池作为电源的电动汽车称为燃料电池电动汽车(Fuel Cell Electric Vehicle，FCEV)。FCEV 一般以质子交换膜燃料电池(PEMFC)作为车载能量源。

【知识点 1】　燃料电池电动汽车的类型

FCEV 按燃料特点可分为直接燃料电池电动汽车和重整燃料电池电动汽车。

直接燃料电池电动汽车的燃料主要是氢气；重整燃料电池电动汽车的燃料主要有汽油、天然气、甲醇、甲烷、液化石油气等。直接燃料电池电动汽车排放无污染，被认为是最理想的汽车，但存在氢的制取和存储困难等缺点；重整燃料电池电动汽车的结构比氢燃料电池电动

汽车复杂得多。

FCEV 按燃料氢的存储方式可分为压缩氢燃料电池电动汽车、液氢燃料电池电动汽车和合金(碳纳米管)吸附氢燃料电池电动汽车。

FCEV 按“多电源”的配置不同,可分为纯燃料电池驱动(PFC)的 FCEV、燃料电池与辅助蓄电池联合驱动(FC+B)的 FCEV、燃料电池与超级电容联合驱动(FC+C)的 FCEV 以及燃料电池与辅助蓄电池和超级电容联合驱动(FC+B+C)的 FCEV。

1. 纯燃料电池驱动(PFC)的 FCEV

纯燃料电池驱动的电动汽车只有燃料电池一个动力源,汽车的所有功率负荷由燃料电池承担。纯燃料电池驱动的电动汽车的动力系统如图 2-68 所示。

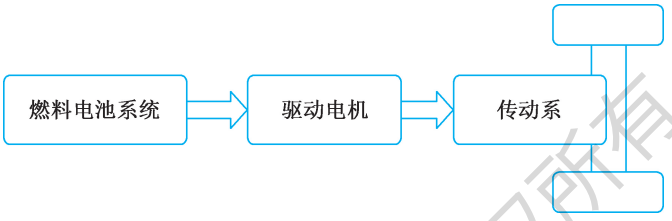


图 2-68　纯燃料电池驱动动力系统结构

纯燃料电池驱动系统将氢气与氧气反应产生的电能通过总线传给驱动电机,驱动电机将电能转化为机械能再传给传动系,从而驱动汽车行驶。这种系统结构简单,系统控制和整体布置容易;系统部件少,有利于整车的轻量化;整体的能量传递效率高,从而提高了整车的燃料经济性。但燃料电池功率大、成本高,对燃料电池系统的动态性能和可靠性提出了很高的要求,不能进行制动能量回收。

因此,为了有效解决上述问题,必须使用辅助能量存储系统作为燃料电池系统的辅助动力源和燃料电池联合工作,组成混合驱动系统共同驱动汽车。从本质上来讲,这种结构的燃料电池电动汽车采用的是混合动力结构。它与传统意义上的混合动力结构的差别仅在于发动机是燃料电池而不是内燃机。在燃料电池混合动力结构汽车中,燃料电池和辅助能量存储装置共同向电动机提供电能,通过变速机构来驱动汽车。

2. 燃料电池与辅助蓄电池联合驱动(FC+B)的 FCEV

燃料电池+辅助蓄电池联合驱动的燃料电池电动汽车的动力系统如图 2-69 所示。该结构是一个典型的串联式混合动力结构。在该动力系统结构中,燃料电池和蓄电池一起为驱动电机提供能量,驱动电机将电能转化成机械能传给传动系,从而驱动汽车行驶;在汽车制动时,驱动电机变成发电机,蓄电池将储存回馈的能量。在燃料电池和蓄电池联合供能时,燃料电池的能量输出变化较为平缓,随时间变化波动较小,而能量需求变化的高频部分由蓄电池分担。

这种结构由于增加了比功率价格相对低廉得多的蓄电池组,系统对燃料电池的功率要求较纯燃料电池结构形式有很大的降低,从而大大地降低了整车成本;燃料电池可以在比较好的设定工作条件下工作,工作时燃料电池的效率较高;系统对燃料电池的动态响应性能要求较低;汽车的冷起动性能较好;制动能量回馈采用可以回收汽车制动时的部分动能,该措施可能会增加整车的能量效率。但这种结构形式由于蓄电池的使用使得整车的质量增加,动力性和经济性受到影响,这一点在能量复合型混合动力汽车上表现更为明显;蓄电池充放

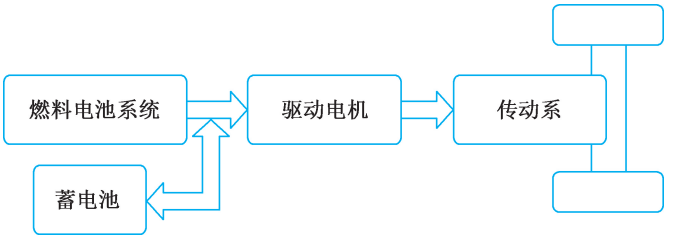


图 2－69　燃料电池＋辅助蓄电池形式动力系统结构

电过程会有能量损耗；系统变得复杂，系统控制和整体布置难度增加。

3. 燃料电池与超级电容联合驱动(FC＋C)的 FCEV

燃料电池＋超级电容的结构与燃料电池＋蓄电池的结构相似，只是把蓄电池换成超级电容。相对于蓄电池，超级电容充放电效率高，能量损失小，功率密度大，在回收制动能量方面比蓄电池有优势，循环寿命长，但是超级电容的能量密度较小。随着超级电容技术的不断进步，这种结构将成为一种新的重要研究方向。

4. 燃料电池与辅助蓄电池和超级电容联合驱动(FC＋B＋C)的 FCEV

燃料电池与蓄电池和超级电容联合驱动的电动汽车的动力系统如图 2－70 所示，该结构也为串联式混合动力结构。在该动力系统结构中，燃料电池、蓄电池和超级电容一起为驱动电机提供能量，驱动电机将电能转化成机械能传给传动系，从而驱动汽车行驶；在汽车制动时，驱动电机变成发电机，蓄电池和超级电容将储存回馈的能量。在燃料电池、蓄电池和超级电容联合供能时，燃料电池的能量输出较为平缓，随时间变化波动较小，而能量需求变化的低频部分由蓄电池承担，能量需求变化的高频部分由超级电容承担。在这种结构中，各动力源的分工更加明晰，因此，它们的优势也得到更好的发挥。

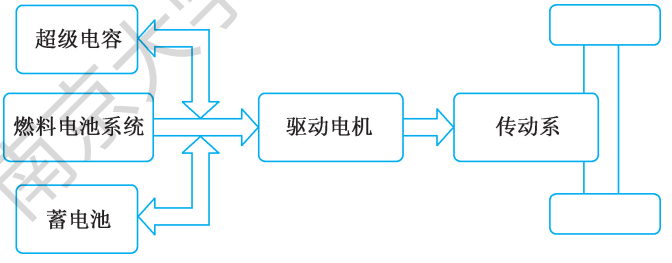


图 2－70　燃料电池＋蓄电池＋超级电容形式动力系统结构

这种结构的优点相比燃料电池＋蓄电池的结构形式，优点更加明显，尤其是在部件效率、动态特性、制动能量回馈等方面。缺点也一样更加明显，增加了超级电容，整个系统的质量将可能增加；系统更加复杂化，系统控制和整体布置的难度也随之增大。

总的来说，如果能够对系统进行很好的匹配和优化，这种结构带来的汽车良好性能具有很大的吸引力。

在 3 种混合驱动中，FC＋B＋C 组合被认为能够最大限度满足整车的起动、加速、制动的动力和效率需求，但成本最高，结构和控制也最为复杂。目前燃料电池电动汽车动力系统的一般结构是 FC＋B 组合，这是因为它具有以下特点。

（1）燃料电池单独或与动力电池共同提供持续功率，且在车辆起动、爬坡和加速等峰值功率需求时，动力电池提供峰值功率。

（2）在车辆起步时和功率需求量不大时，蓄电池可以单独输出能量。

（3）蓄电池技术比较成熟，可以在一定程度上弥补燃料电池技术上的不足。

可用于电动汽车的蓄电池包括锂离子电池、锂聚合物电池、镍氢电池、铅酸电池、镍镉电池、锌空气电池和铝空气电池等多种类型。

目前，FC＋B 混合驱动系统主要有两种结构形式：燃料电池直接混合系统和动力电池直接混合系统。

燃料电池直接混合系统是燃料电池直接接入直流母线，所以驱动系统的电压必须设计在燃料电池可以调节的范围内，由于动力电池需要向驱动系统传输能量和从燃料电池与车辆系统取得能量，所以必须安装双向 DC/DC，且必须有响应速度快的特点。燃料电池和动力蓄电池之间的功率平衡由 DC/DC 和燃料电池管理系统共同实现。该结构形式对于燃料电池的输出电压达到了最优化设计。但是对燃料电池的要求比较高，同时 DC/DC 要实现双向快速控制，双向 DC/DC 的成本较高，整个系统的控制也比较复杂。

动力电池直接混合系统中，DC/DC 变换器将燃料电池的输出电压和系统电压分开，驱动系统电压可以设计得比较高，这样可以降低驱动系统的电流值，有利于延长各电器元件的寿命，同时高的系统电压可以充分满足动力电池的需要。DC/DC 还负责燃料电池和动力蓄电池之间的功率平衡。但是燃料电池的能量输出需要通过 DC/DC 才能进入直流母线，导致系统的效率比较低，特别是对于连续负载来说不是最优化设计。例如，匀速工况下，系统功率需求较小，由燃料电池单独提供车辆行驶所需的功率。

两种结构形式的主要差别在于 DC/DC 变换器的使用上。DC/DC 的位置和结构决定了动力系统的构型。DC/DC 的位置主要取决于电机及其控制器特性和燃料电池特性，另一个重要的因素是混合度。

【知识点 2】　燃料电池电动汽车的结构原理

目前燃料电池电动汽车绝大多数采用的是混合式燃料电池驱动系统，将燃料电池与辅助动力源相结合，燃料电池可以只满足持续功率需求，借助辅助动力源提供加速、爬坡等所需的峰值功率，而且在制动时可以将回馈的能量存储在辅助动力源中。混合式燃料电池驱动系统有并联式和串联式两种，如图 2－71 所示，原理图如图 2－72 所示。

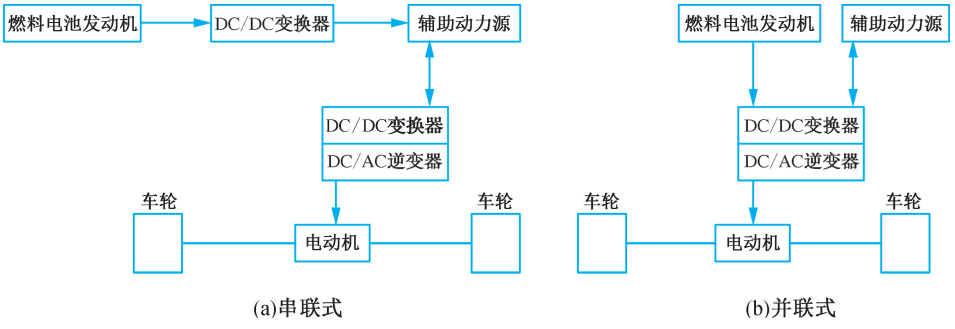


图 2－71　混合式燃料电池电动汽车驱动系统框图

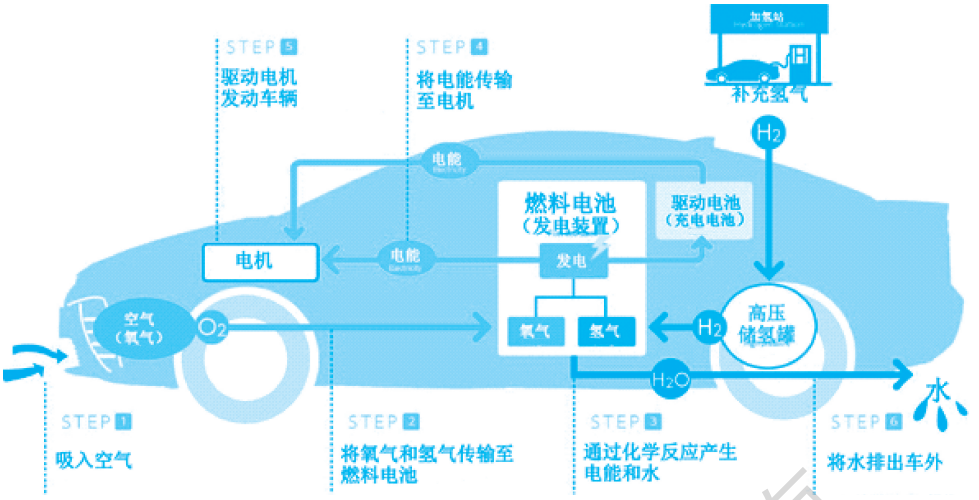


图 2－72　燃料电池电动汽车工作原理图

混合式燃料电池电动汽车的动力系统主要由燃料电池发动机、辅助动力源、DC/DC 变换器、DC/AC 逆变器、电动机和动力电控系统等组成。

1. 燃料电池发动机

在 FCEV 所采用的燃料电池发动机中，为保证 PEMFC 组的正常工作，除以 PEMFC 作为核心外，还装有氢气供给系统、氧气供给系统、气体加湿系统、反应生成物的处理系统、冷却系统和电能转换系统等。只有这些辅助系统匹配恰当并正常运转，才能保证燃料电池发动机正常运转。

图 2－73 所示是以氢为燃料的燃料电池发动机系统，图 2－74 所示是以氢气为燃料的 FCEV 的总布置基本结构模型。

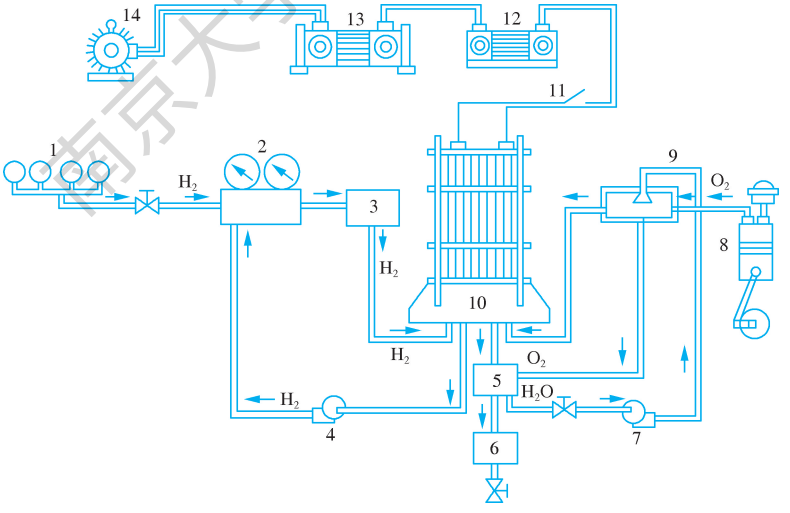
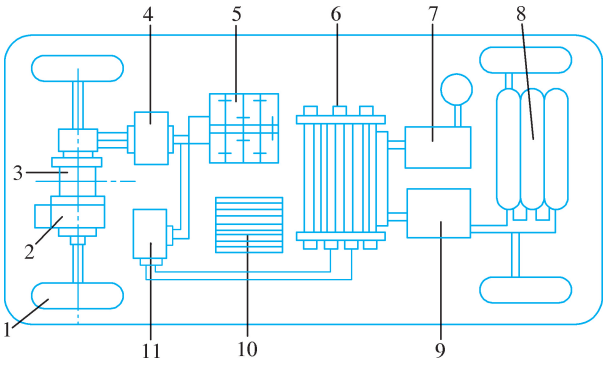


图 2－73　以氢为燃料的燃料电池发动机系统

1－氢气储存罐；2－氢气压力调节仪表；3－热交换器；4－氢气循环泵；
5－冷凝器及气水分离器；6－散热器；7－水泵；8－空气压缩机（或氧气罐）；
9－加湿器及去离子过滤装置；10－燃料电池组；11－电源开关；12－DC/DC 变换器；
13－逆变器；14－驱动电动机。



1－驱动轮；2－驱动系统；3－驱动电动机；4－逆变器；5－辅助电源装置（动力电池组＋飞轮储能器或动力电池组＋超级电容）；6－燃料电池发动机；7－空气压缩机及空气供应系统辅助装置；8－氢气储存罐；9－氢气供应系统辅助装置；10－中央控制器；11－动力 DC/DC 变换器。

图 2－74　以氢气为燃料的 FCEV 的总布置基本结构模型

（1）氢气供应、管理和回收系统。气态氢的储存装置通常用高压储气瓶来装载，对高压储气瓶的品质要求很高，为保证燃料电池电动汽车一次充气有足够的行驶里程，就需要多个高压储气瓶来储存气态氢气。一般轿车需要 2～4 个高压储气瓶，大客车上需要 5～10 个高压储气瓶。

液态氢气虽然比能量高于气态氢，但由于液态氢气处于高压状态，它不仅需要用高压储气瓶储存，还要用低温保温装置来保持低温，且低温的保温装置是一套复杂的系统。

在使用不同压力的氢气（高压气态氢气和高压低温液态氢气）时，就需要用不同的氢气储存容器，不同的减压阀、调压阀、安全阀、压力表、流量表、热量交换器和传感器等来进行控制，并对各种管道、阀和仪表等的接头采取严格的防泄漏措施。从燃料电池中排出的水，含有未发生反应的少量的氢气。正常情况下，从燃料电池中排出的少量的氢气应低于 1%，应用氢气循环泵将这些少量的氢气回收。

（2）氧气供应和管理系统。氧气的来源有从空气中获取氧气或从氧气罐中获取氧气，空气需要用压缩机来提高压力，以增加燃料电池反应的速度。在燃料电池系统中，配套压缩机的性能有特定的要求，压缩机质量和体积会增加燃料电池发动机系统的质量、体积和成本，压缩机所消耗的功率会使燃料电池的效率降低。空气供应系统的各种阀、压力表、流量表等的接头要采取防泄漏措施。在空气供应系统中还要对空气进行加湿处理，保证空气有一定的湿度。

（3）水循环系统。燃料电池发动机在反应过程中将产生水和热量，在水循环系统中用冷凝器、气水分离器和水泵等对反应生成的水和热量进行处理，其中一部分水可以用于空气的加湿。另外还需要装置一套冷却系统，以保证燃料电池的正常运作。

（4）电力管理系统。燃料电池所产生的是直流电，需要经过 DC/DC 变换器进行调压，在采用交流电动机的驱动系统中，还需要用逆变器将直流电转换为三相交流电。

以氢气为燃料的燃料电池发动机的各种外围装置的体积和质量占燃料电池发动机总体积和质量的 1/3～1/2。

图 2－75 所示是以甲醇为燃料的燃料电池发动机系统。在以甲醇为燃料的燃料电池发动机系统中，用甲醇供应系统代替了上述的氢气供应系统。它包括甲醇储存装置、甲醇供应系统的泵、管道、阀门、加热器及控制装置等。图 2－76 所示是以甲醇为燃料的 FCEV 的总

布置基本模型。

(1) 甲醇储存装置。甲醇可以用普通容器储存,不需要加压或冷藏,可以部分利用内燃机汽车的供应系统,有利于降低 FCEV 的使用费用。

(2) 燃烧器、加热器和蒸发器。甲醇进入改质器之前,要用加热器加热甲醇和纯水的混合物,使甲醇和纯水的混合物一起受高温(621℃)热量的作用,蒸发成甲醇和纯水的混合气,然后进入改质器。

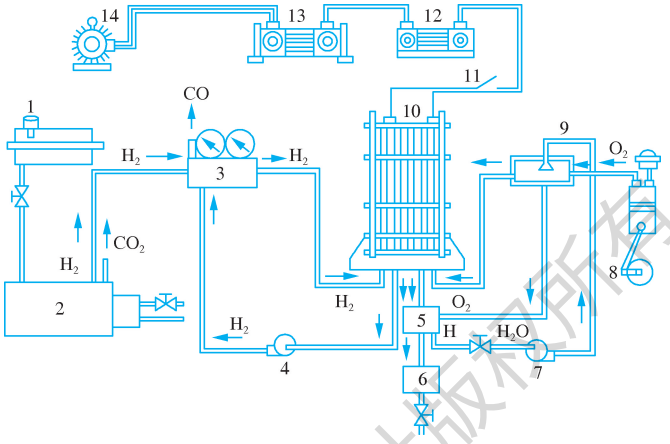


图 2-75　以甲醇为燃料的燃料电池发动机系统

1-甲醇储存罐;2-带燃烧器的改质器;3-H_2 净化装置;4-氢气循环泵水循环系统;5-冷凝器及气水分离器;6-散热器;7-水泵;8-空气压缩机(或氧气罐);9-加湿器及去离子过滤装置;10-燃料电池组;11-电源开关;12-DC/DC 变换器;13-逆变器;14-驱动电动机。

(3) 重整器。重整器是将甲醇用改质技术转化为氢气的关键设备。不同的碳氢化合物采用不同的重整技术,在重整过程中的温度、压力会有所不同,例如,甲醇用水蒸气重整法的温度为 621℃,用部分氧化重整法的温度为 985℃,用废气重整法的第一阶段温度为 985℃,第二阶段温度为 250℃。在 FCEV 用甲醇经过重整产生的氢气作燃料时,就需要对各种重整方法进行分析,选择最佳重整技术和最适合 FCEV 配套的重整器。

(4) 氢气净化器。改质器所产生的 H_2 因为含有少量的 CO,因此,必须对 H_2 进行净化处理。净化器中用催化剂来控制,使 H_2 中所含的 CO 被氧化成 CO_2 后排出,最终进入 PEMFC 的 H_2 中的 CO 的含量不超过规定的 10×10^{-6}。甲醇经过改质后所获得的氢气作为燃料时,燃料电池的效率为 40%～42%。以甲醇为燃料的燃料电池系统中的氧气供应、管理系统,反应生成的水和热量的处理系统和电力管理系统与以氢为燃料的燃料电池系统基本相同。燃料电池发动机的运作一般采用计算机进行控制,根据 FCEV 的运行工况,通过 CAN 总线系统进行信息传递和反馈,并经过计算机的处理,以保证燃料电池正常运行。

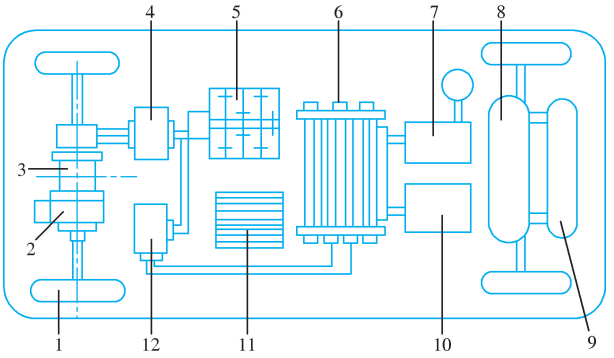


图 2－76　以甲醇为燃料的 FCEV 的总布置基本模型

1－驱动轮；2－驱动系统；3－驱动电动机；4－逆变器；
5－辅助电源装置（动力电池组＋飞轮储能器，或动力电池组＋超级电容器）；
6－燃料电池发动机；7－空气压缩机及空气供应系统辅助装置；8－重整器；9－甲醇罐；
10－氢气供应系统辅助装置；11－中央控制器；12－动力 DC/DC 变换器。

2. 辅助动力源

在 FCEV 上燃料电池发动机是主要电源，另外还配备有辅助动力源。根据 FCEV 的设计方案不同，其所采用的辅助动力源也有所不同，可以用蓄电池组、飞轮储能器或超大容量电容器等共同组成双电源系统。在具有双电源系统的 FCEV 上，驱动电动机的电源可以出现以下驱动模式。

（1）在 FCEV 起动时，由辅助动力源提供电能带动燃料电池发动机起动，或带动车辆起步。

（2）车辆行驶时，由燃料电池发动机提供驱动所需的全部电能，剩余的电能储存到辅助动力源装置中。

（3）在加速和爬坡时，若燃料电池发动机提供的电能还不足以满足 FCEV 驱动功率要求，则由辅助动力源提供额外的电能，使驱动电动机的功率或转矩达到最大，形成燃料电池发动机与辅助动力源同时供电的双电源的供电模式。

（4）储存制动时反馈的电能，以及向车辆的各种电子、电器设备提供所需要的电能。

由于燃料电池发动机的比功率和比能量在不断改进和提高，现代燃料电池电动汽车逐步向加大燃料电池发动机功率的方向发展，可以由燃料电池发动机提供驱动所需的全部电能。

另外采用 42 V 蓄电池来储存制动时反馈的电能，并为车载电子电器系统提供电能，可以取消用于辅助驱动的动力电池组，减轻辅助电池组和整车的质量。

3. DC/DC 变换器

FCEV 采用的电源有各自的特性，燃料电池只提供直流电，电压和电流随输出电流的变化而变化。燃料电池不可能接受外电源充电，电流的方向只是单向流动。FCEV 采用的辅助电源（蓄电池和超级电容）在充电和放电时，也是以直流电的形式流动，但电流的方向是可逆性流动。FCEV 上的各种电源的电压和电流受工况变化的影响呈不稳定状态。为了满足驱动电机对电压和电流的要求及对多电源电力系统的控制，在电源与驱动电机之间，用计算机控制实现对 FCEV 的多电源的综合控制，保证 FCEV 正常运行。FCEV 的

燃料电池需要装置单向 DC/DC 变换器，蓄电池和超级电容器需要装置双向 DC/DC 变换器。

燃料电池轿车中的 DC/DC 变换器的主要功能概括起来包括以下 3 点。

(1) 调节燃料电池的输出电压。燃料电池的输出特性较软，输出电压随负载的变化而变化，轻载时输出电压偏高，重载时输出电压偏低，难以满足驱动电机控制器的需求，所以借助 DC/DC 变换器对燃料电池的输出电压进行调节。

(2) 调节整车能量分配。燃料电池轿车是一种混合动力轿车，具有燃料电池和动力蓄电池两种能源，控制燃料电池的输出能量就可以控制整车能量的分配。如果燃料电池的输出能量不足以驱动电机，缺口能量就由动力蓄电池来补充；当燃料电池输出的能量超出电机的需求时，多余的能量可以进入蓄电池中，补充蓄电池的能量。DC/DC 变换器用于控制燃料电池的能量输出。

(3) 稳定整车直流母线电压。燃料电池的输出电压经过 DC/DC 变换器后能稳定整车直流母线电压。

DC/DC 变换器在燃料电池电动汽车中起着重要的作用，它的性能必须满足以下要求。

(1) 变换器是能量传递部件，因此，需要高转换效率，以便提高能源的利用率。

(2) 为了降低对燃料电池的输出电压要求，变换器应具有升压功能。

(3) 由于燃料电池输出不稳定，需要变换器闭环运行进行稳压，为了给驱动器稳定的输入，需要变换器有较好的动态调节能力。

(4) 体积小、重量轻。

4. 驱动电机

燃料电池电动汽车用的驱动电机主要有直流电动机、交流电动机、永磁电动机和开关磁阻电动机等。燃料电池汽车驱动电机的选型必须结合整车开发目标，综合考虑电动机的特点。

5. 动力电控系统

燃料电池汽车的动力电控系统主要由燃料电池发动机管理系统(FCE－ECU)、蓄电池管理系统(BMS)、动力控制系统(PCU)及整车控制系统(VMS)组成，而原型车的变速器系统会简化很多，其系统结构框图如图 2－77 所示。

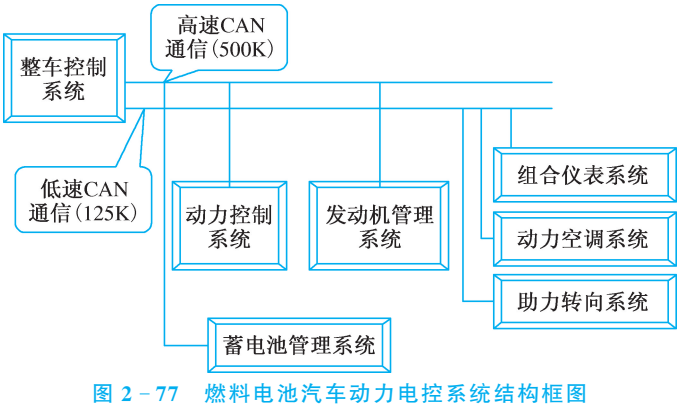


图 2－77　燃料电池汽车动力电控系统结构框图

（1）发动机管理系统。燃料电池发动机管理系统按整车控制器的功率设定值控制燃料电池发动机的功率输出，监测发动机的工作状态，保证发动机稳定可靠地运行，同时进行故障诊断及管理。其具体组成包括供氢系统、供氧系统、水循环及冷却系统。

（2）蓄电池管理系统。蓄电池管理系统分上、下两级，下级 LECU 负责蓄电池组电压、温度等物理参数的测量，进行过充过放保护及组内组间均衡；上级 CECU 负责动力蓄电池组的电流检测及 SOC 估算，以及相关的故障诊断，同时采用高压漏电保护策略。

（3）动力控制系统。动力控制系统包含 DC/DC 变换器、DC/AC 逆变器、DCL 和空调控制器及空调压缩机变频器，以及电动机冷却系统控制器。DC/DC 逆变器和 DC/AC 逆变器的作用如前所述，DCL 负责将高压电源转换为系统零部件所需的 12 V/24 V 低压电源，电动机冷却系统控制器负责电动机及 PCU 的水冷却系统控制。

（4）整车控制系统。整车控制系统的核心是多能源控制策略（包括制动能量回馈功能），它一方面接收来自驾驶员的需求信息（如点火开关、节气门踏板、制动踏板、变速信息等）实现整车工况控制；另一方面基于反馈的实际工况（如车速、制动、电动机转速等）以及动力系统的状况（燃料电池及动力蓄电池的电压、电流等），根据预先匹配好的多能源控制策略进行能量分配调节控制。当然，整车的故障诊断及管理也由它负责。

上述各系统都通过高速 CAN—Bus 进行信息交换。在上述基本动力系统架构基础上，可以根据混合度的不同，把燃料电池混合动力汽车分为电量消耗型和电量维持型。所谓混合度，是指燃料电池额定输出功率与驱动电机额定功率之比。前者的混合度较低，蓄电池是主要的能量源，燃料电池只作为里程延长器来使用；后者的混合度较高，在行驶过程中蓄电池的荷电状态基本保持在一个合理的范围，目前国外大部分国家及我国采用该方案。

【知识点 3】　燃料电池电动汽车的特点

1. 燃料电池汽车的优势

① 效率高：直接将氢化学能转化为电能，热电理论效率可达 85%，实际效率在 45%～60%；

② 能量密度高：加氢 3～5 min，续航 500～700 km；

③ 冷启动：燃料电池汽车可以在－30℃的环境下启动；

④ 环境友好：以氢氧为燃料，反应物仅为水，零排放；

⑤ 可靠性高：模块化结构，维修方便。

燃料电池汽车主要应用场景：燃料电池弥补了动力电池的不足，主要替代的是高纬度、中长距离运输，高负荷运输需求，对应重卡、叉车、客车、城市环卫车等。

2. 燃料电池发展的主要挑战

① 燃料电池汽车的性能（效率、成本、寿命）离商业化依然存在差距。主要挑战：核心原材料国产化、催化剂贵金属载量等。

② 国产性能和海外龙头有差距：因为载重、响应速度、怠速等问题，配备高功率锂电池是当前重卡的必需选项。

③ 燃料电池汽车和加氢站的匹配问题：行业陷入先有鸡还是先有蛋的问题，加氢需求不足导致加氢站建设缓慢，没有加氢站导致燃料电池加氢难、加氢贵。

【知识点 4】 燃料电池电动汽车车型性能分析

一、本田 FCX 燃料电池汽车车型

原型车阶段(1999—2002 年):首款试验车 FCX－V1/V2 搭载巴拉德公司石墨极板电堆(49 kW),验证技术可行性;2000 年 FCX－V3/V4 改用自研金属极板电堆,功率提升至 86 kW,突破－20℃低温启动。

商品化突破(2002—2008 年):2002 年第五代 FCX 量产交付,首创双电堆模块设计,续航 430 km(LA4 标准),获美国 EPA 零污染认证;2008 年第六代 FCX Clarity 应用垂直流道(V Flow)电堆,体积缩小 33%,续航增至 620 km(JPN10－15 标准),实现电堆全舱内集成。

图 2－78 本田燃料电池发展历程

技术升级与市场扩展(2016 年至今):2016 年第七代 Clarity Fuel Cell 上市,电堆功率 100 kW,匹配 70 MPa 高压储氢罐,续航达 750 km(JC08 工况),加氢仅 3 分钟;2020 年与通用联合开发新一代系统,计划 2025 年推出兼容插电混动平台,目标续航超 800 km。

表 2－22　本田燃料电池汽车关键技术创新对比

参数	第五代 FCX（2002）	第七代 Clarity（2016）	2025 年规划
燃料电池堆功率	86 kW	100 kW	120 kW
续航里程	430 km	750 km	800 km＋
储氢罐压力	35 MPa	70 MPa	70 MPa
低温启动温度	－20℃	－30℃	－40℃
车身材料	钢铝混合	全铝合金＋生物纤维	碳纤维复合材料

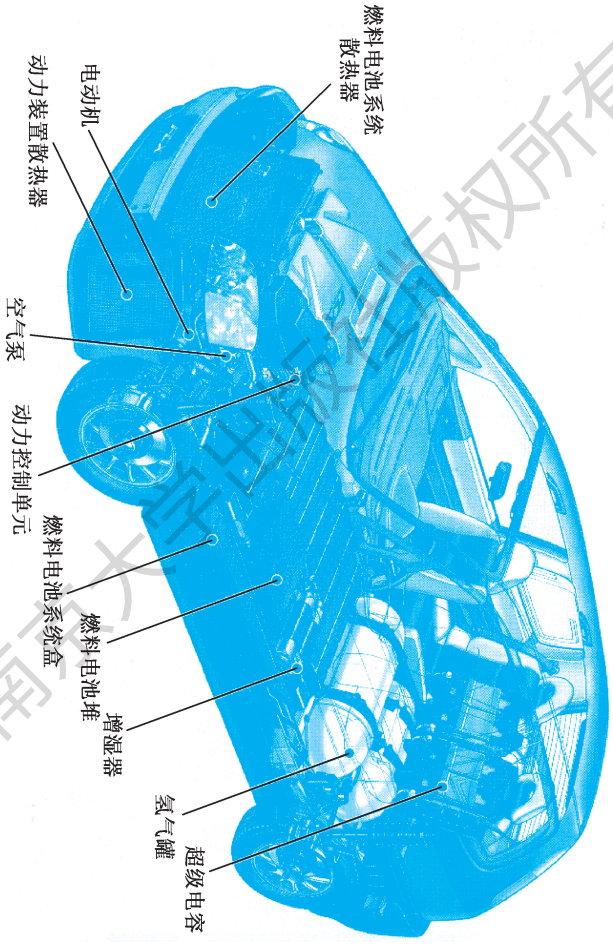


图 2－79　本田 FCX 透视图

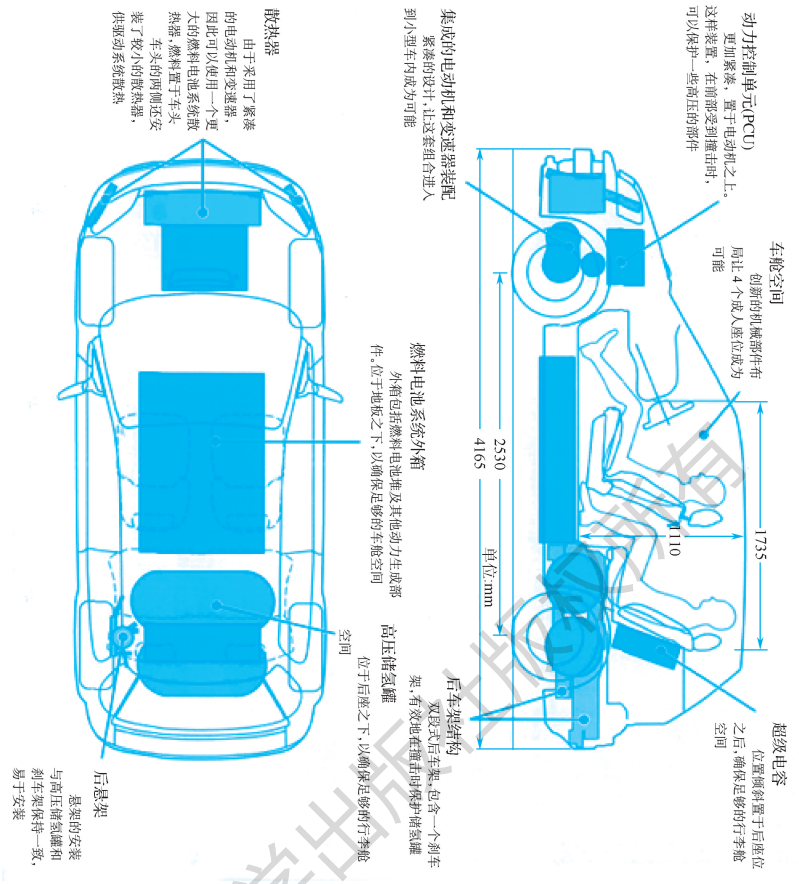


图 2－80　FCX 重要部件分解侧视和俯视图

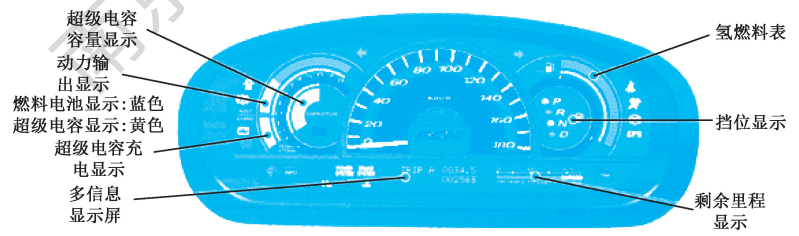


图 2－81　本田 FCX 仪表功能分解图

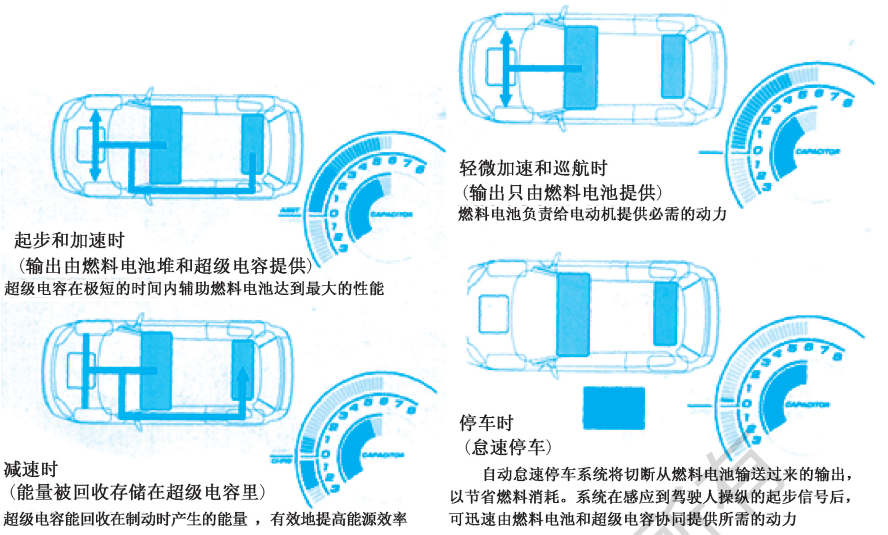


图 2－82　本田 FCX 燃料汽车工作过程

（1）本田 FCX 的能量管理

本田一直认为以氢为燃料，具备出色的续航性能和行驶性能，排放物只有水的燃料电池电动车，是未来社会终极的环保汽车。因此，本田从 FCX 一路研发，直到现在已经开始量产的 FCX Clarity 具有零下 30℃的低温起动功能，续航能力达至 620 km。如今 FCX Clarity 已在日本和美国市场进行租赁销售，是一款具有真正实用价值的环保车型。

FCX Clarity 以本田独创的燃料电池堆“V Flow FC Stack”技术为核心，实现了燃料电池电动车特有的未来感设计、先进的整体封装布局以及出色的驾驭感受。不仅具备不排放 CO_2 的清洁性，还赋予汽车独特的新价值和新魅力。

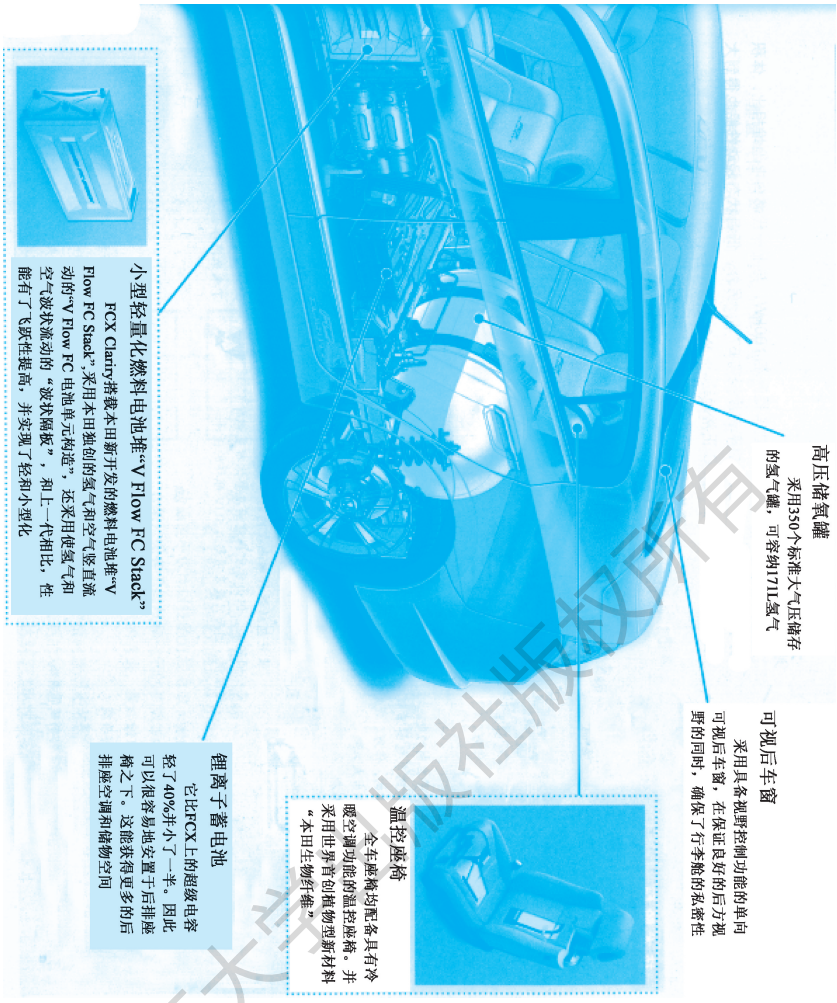
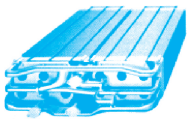


图 2－83　本田 FCX Clarity 透视图

（2）本田新型燃料电池堆

新型燃料电池堆的最高功率提升至 100 kW，与上一代燃料电池堆相比，体积功率密度提高 50%，质量功率密度提高 67%。另外，低温状态起动性能也得到大幅度提高，最低可在 －300℃正常起动。

表 2－23　本田新型燃料电池堆技术参数

技术阶段	1999 年	2003 年	2006 年
燃料电池堆外形			

（续表）

技术阶段	1999 年	2003 年	2006 年
特　点	本田最早自制的电池堆，采用了当时流行的氯电解质膜和切削碳隔离板结构，作为车载用电池堆，其体积相当大	燃料电池堆在世界上首次实现零下 20℃ 以下可正常起动，具有划时代意义，采用芳香型电解质膜以及冲压金属隔离板	将双盒型电池堆改造为单盒型电池堆结构，体积的变小使电池堆可以纵向装置，有效地提高了排水性能，而且稳定了电压
	传统电池堆布局： 氢气和生成的水横向流动 装置包括燃料电池在内的动力总成，所需空间较大，但由于室内空间及整体布置都有所限制，只能采用类似 SUV 那样的设计		传统电池堆布局： 氢气和生成的水纵向流动 采用将小型化的燃料电池堆纵向装置在中央通道内的设计，满足了未来汽车设计的需求
输出功率	60 kW	86 kW	100 kW
尺　寸	134 L	66 L	52 L
质　量	202 kg	96 kg	67 kg
电解质膜	氯电解质膜 最高工作温度：80℃	芳香型电解质膜 最高工作温度：95℃	芳香型电解质膜 最高工作温度：95℃
堆结构/电池结构	螺栓紧固，切削碳隔离板 单独密封	嵌板箱形结构，冲压金属隔离板，成组密封	单箱堆结构，V Flow 结构 波浪流体隔离板

（3）垂直气体流动（V Flow）单元结构

氢气和空气（氧气）纵向流动，生成的水在重力作用下可更顺畅地排出，由此可以防止生成的水停留在发电层面上，确保发电的持续稳定性。另外，纵向流动还可使流动通道更畅通，通道深度减少 17%，电池单元更薄、体积更小。

燃料电池是由膜电极组件（MEA）组成，它依次地包含在有氢气、空气和冷媒气流通道的隔离板之间，是一个由氢气和空气电极形成的一对电极层和扩散层之间的夹层。

垂直气体流动（V Flow）燃料电池堆由波浪形的垂直气流通道组成，这些气流通道负责氢气和空气的导向，在它们之前，还有水平的冷媒流动通道。

氢气和空气的流动通道呈波浪形状，冷媒则沿横向流动。波浪形流动通道不但比以往的直线通道长出一条通道的长度，而且可改变流动方向，提高了氢气和空气的扩散性。同时，冷媒出入口的横向布置可以扩大氢气和空气的通道，最终使发电能力比以往的本田燃料电池堆提高 10%。

另外，冷媒的横向流动还可以保持很好的冷却效果，避免了以往电池单元之间所必需的冷却层，使燃料电池堆质量减小约 30%，积层长度缩短约 20%，达到了飞跃性的轻量化和小型化。

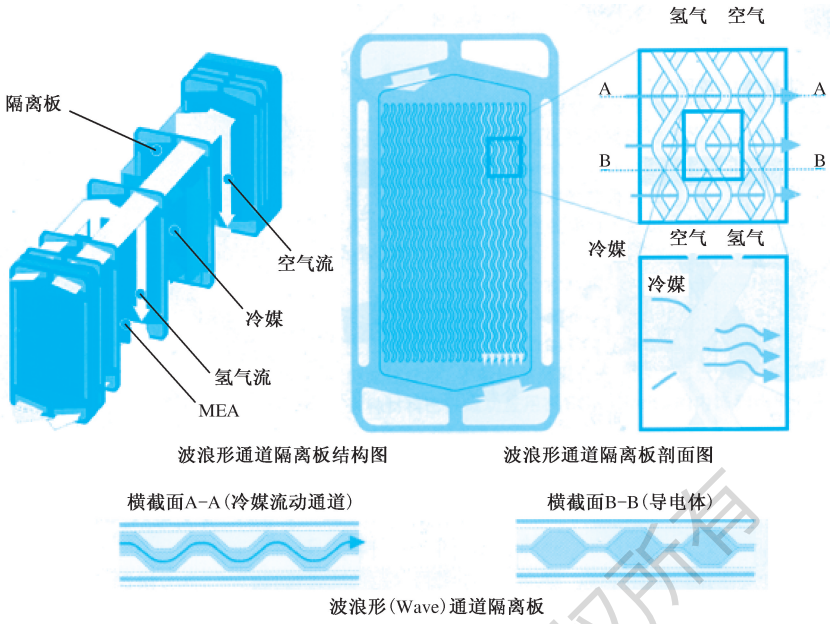


图 2－84 燃料电池结构图

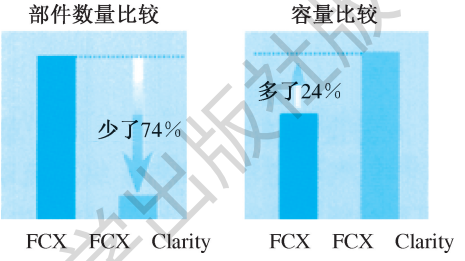


图 2－85 功能高度整合的储氢罐

FCX 采用了两个储氢罐的设计，而 FCX Clarity 则只有一个。这能给后座乘客提供更多的空间，包括储物空间。补给系统中的截流阀、调节阀、压力感应器和其他部件都集成在一个罐内模块中，部件减少 74%，这样可以让储氢罐的容量更大，让汽车行驶得更远。

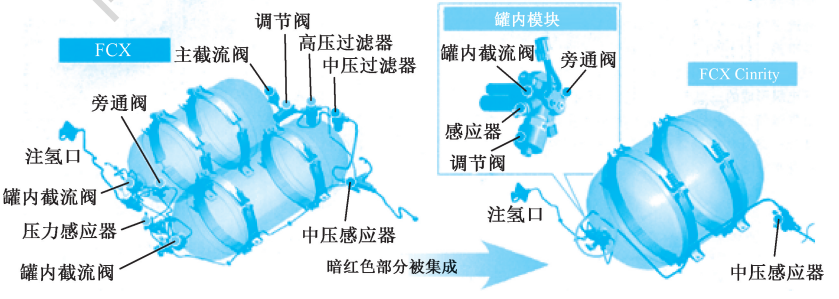


图 2－86 FCX 与 FCX Clarity 储氢罐比较图

（4）紧凑高效的锂离子蓄电池占用极小空间

车辆的补充动力源和全新的锂离子蓄电池，能在必要时提供额外的动力辅助并能回收能量。它比 FCX 上的超级电容轻了 40%，体积小了一半，因此，可以很容易地安置于后排座

椅之下，这能获得更大的后排座空间和储物空间。

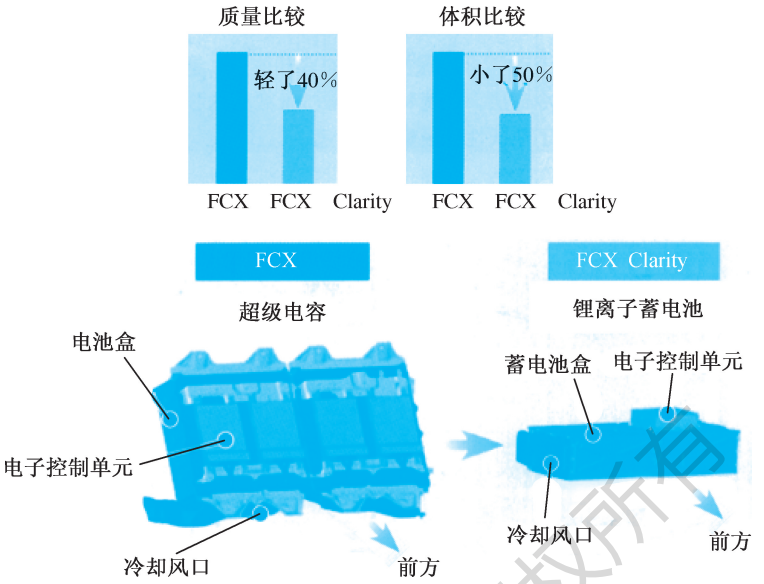


图 2－87　超级电容和锂离子蓄电池比较图

（5）线传操控技术

FCX Clarity 的固定齿轮比让操作变得更简单：只需要选择前进、后退和停车即可。紧凑的换挡装置完全电子控制，非常特别地安装在仪表台上。换挡装置、起动按钮和驻车按钮都非常容易操作。其他的操控系统同样布局合理，符合人体工程学。

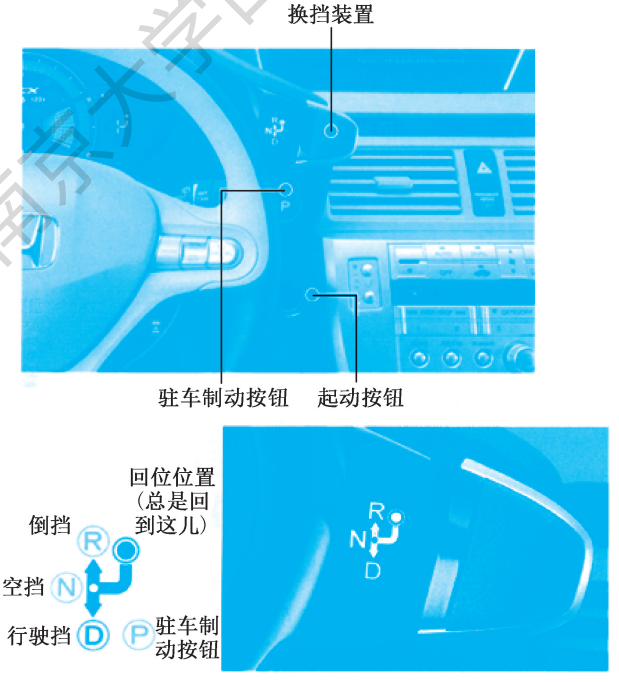


图 2－88　FCX Clarity 的线传操控技术

FCX Clarity 的主要动力源是燃料电池，由氢气产生电力。随着驾驶人的各种驾驶需求，动力驱动单元(PDU)将统管电动机、蓄电池、燃料电池和储氢罐，进行协同工作。

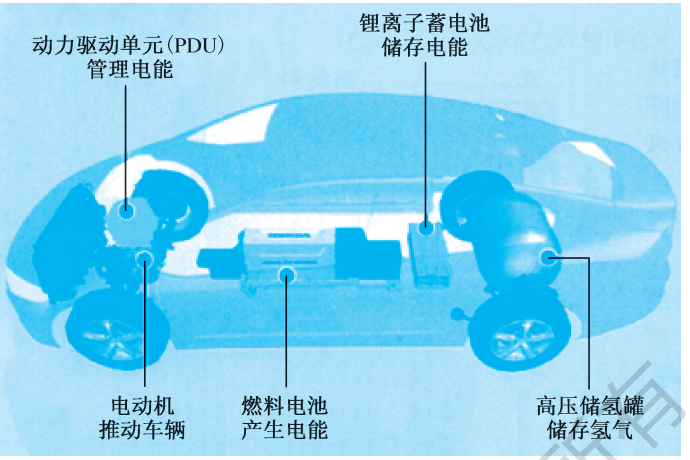
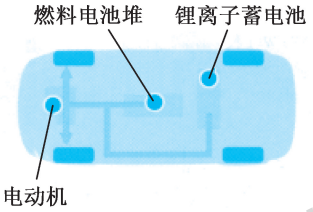
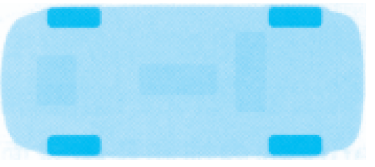


图 2－89　FCX Clarity 的主要部件

表 2－24　FCX Clarity 工作过程

	
起步及加速 动力由燃料电池提供，在有需要的时候，蓄电池加入以获得良好的加速性能	轻微加速及巡航 仅由燃料电池提供动力，以节省能耗
	
减速 电动机作为发电机的角色，将动能转化为电能储存于蓄电池中，同时也可以储存燃料电池产生的额外电能	怠速 自动怠速系统切断燃料电池的电能产生，锂离子电池补给空调或其他设备所需的电能

(6) FCX Clarity 的能量管理

变速器与电动机同轴设计：电动机的转子轴采用中空设计，而驱动轴则从中间穿过形成同轴构造。这样的布局可以让电动机和变速器结合成为一个紧凑的整体，同时也能提高效率。更独特的轴承和更少的转子油封设计，能有效地降低摩擦，提高变速器效率，产生更直接的驾驶感觉。

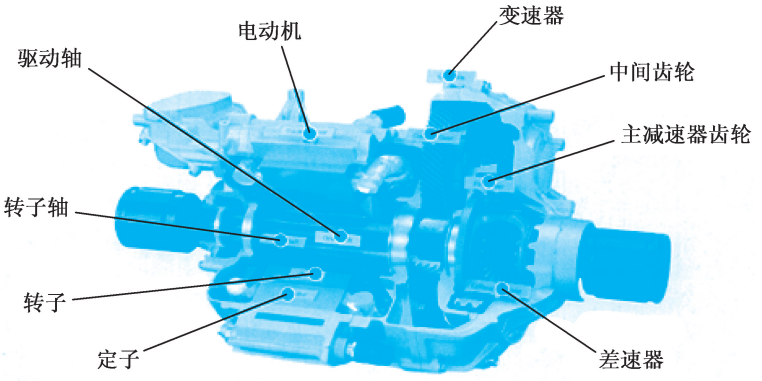


图 2－90　FCX Clarity 电动机分解图

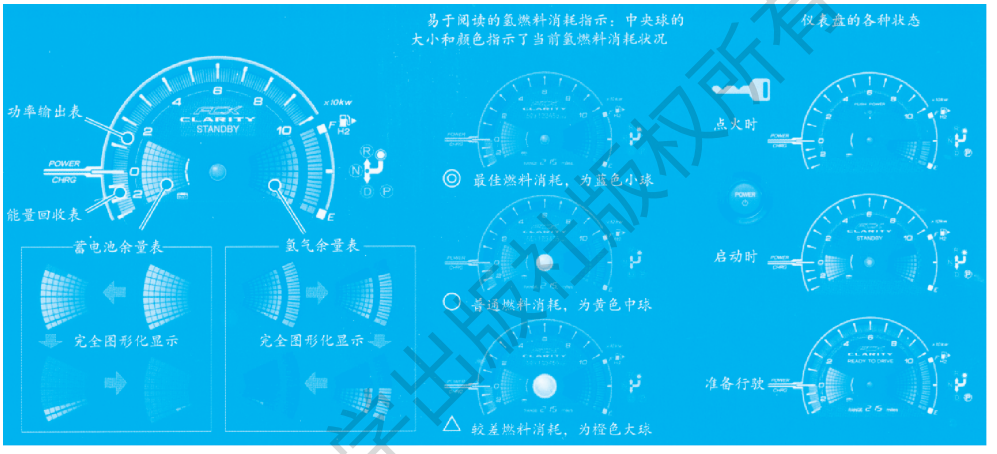


图 2－91　本田 FCX Clarity 仪表盘

二、奔驰燃料电池汽车车型

奔驰是全球燃料电池汽车研发的“元老级”车企，自 1994 年推出首款燃料电池概念车 NECAR 1 以来，累计投入超 20 亿欧元。2023 年，其新一代燃料电池系统功率密度突破 4.2 kW/L，搭载于 GenH2 氢能重卡，续航达 1 000 公里，重载性能对标柴油车，标志着燃料电池技术从实验走向商业化。奔驰燃料电池技术历经 30 年四代革新。

第一代(1994—2002)：推出全球首款燃料电池车 NECAR 1，搭载 50 kW 系统，液态储氢验证可行，但成本超百万欧元/辆，储氢占车身 2/3 空间。

第二代(2003—2017)：量产首款乘用车 B 级 F－CELL(续航 400 km/700 bar 储氢)与 Citaro 氢能巴士(氢耗 12 kg/100 km)，开启商业化试水。

第三代(2018—2022)：发布插电式燃料电池车 GLC F－CELL(续航 478 km/外放电 3.7 kW)，联合沃尔沃开发标准化电堆，成本降至 300 欧元/kW。

第四代(2023 至今)：推出 GenH2 重卡系统，双电堆并联功率 300 kW，－25℃冷启动 5 分钟，寿命 25 000 小时，非贵金属催化剂实现铂载量 0.1 g/kW，液氢重卡续航突破 1 000 km。技术路径从实验验证迈向重载商用，奠定氢能长途运输领导地位。

1. 奔驰 B 级 F－Cell 燃料电池车

2005 年日内瓦车展，戴姆勒·克莱斯勒发布奔驰 B 级燃料电池车，拓展燃料电池汽车车型范围。该车采用夹层式车身结构，电动机功率超 100 kW。减少燃料消耗、提高存储容量后，续航约 400 km，2009 年底量产，2010 年初交付欧美消费者。

表 2－25　奔驰 B 级燃料电池车技术参数

电动机	最大功率：100 kW 最大转矩：290 N·m
燃料电池	锂离子蓄电池 最大容量：1.4 kW·h 最大输出：35 kW
续航里程	纯电动模式：385 km
性能	0～100 km/h 加速 4.8 s 最高时速限速 170 km/h
燃料消耗	等同于柴油 3 L/100 km
低温起动	－25℃以下

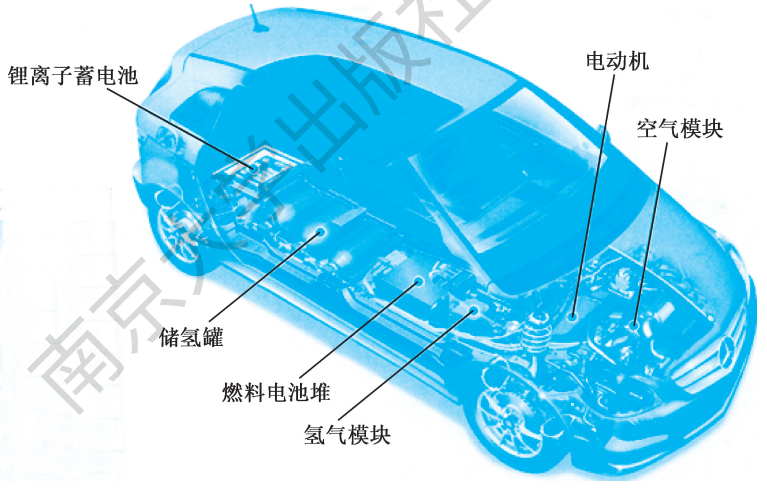
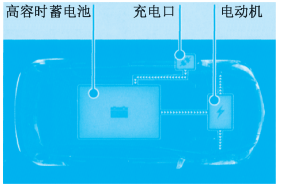
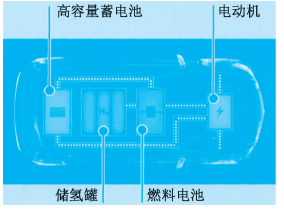
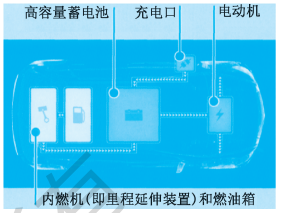


图 2－92　奔驰 B 级 F Cell 透视图

2. 奔驰 Blue ZERO 燃料电池概念车

奔驰在 2009 年的北美车展上，发布了三款 Blue ZERO 电动概念车。它们虽然都采用相同的外观设计，总长也同为 4.22 m，但动力驱动系统却截然不同。

表 2－26　奔驰 Blue ZERO 燃料电池概念车原理及特点对比

		
BlueZERO E CELL 概念车 大容量锂离子蓄电池可储存足以供日驾车所需的能量。	BlueZERO F CELL 概念车 燃料电池从氢气和氧气的化学反应中产生所需的能量。	BlueZERO E CELLPLUS 概念车 3 缸汽油发动机驱动发电机不断发电并储存在锂离子蓄电池中。
		
工作原理：在静态起动时即可提供全部动力；使用单速变速器，即产生持续驱动。	工作原理：氢气在燃料电池中与氧气发生反应，由此产生电流，这些电能被储存在电池中，再由发动机驱动车辆，它能实现零排放，排放出的仅仅是水。	工作原理：通过正常的电源插座从外部为锂离子蓄电池充电，充电一次足以供车辆行驶 50 km。
特点：近乎无噪声的驱动系统，带来全新的驾驶感受，它能在行驶过程中实现能量恢复/回收，即在制动和下坡行驶时将动能转化成电能，增加可行驶里程。蓄电池组件置于车辆地板之下，不影响车内舒适性，拥有正常大容量存储空间。	特点：在制动和下坡行驶时进行能量恢复，恢复的能量储存于锂离子蓄电池中。以 70 MPa (700 bar)的气压储存的氢气可供车辆行驶的里程长达 400 km。 以此燃料电池系统驱动的奔驰 B 级车已经在 2010 年实现小批量投产。	在制动和下坡行驶时将动能转化成电能。当蓄电池电量较低时，位于车辆尾部的三缸汽油发动机将自动起动并通过发电机为蓄电池充电。3 500 r/min 的发动机恒定转速，确保 CO_2 的低排放量。 电力驱动和汽油驱动模式组合使用时，最大行驶里程可达 600 km。

3. 奔驰 GLCF－Cell 燃料电池车

作为奔驰旗下第一款量产燃料电池汽车，GLC F－CELL 燃料电池插电混动 SUV 早在 2017 法兰克福车展发布。近日，梅赛德斯-奔驰已向德国铁路运营商交付了 GLC F－CELL 的首批示范车型。

动力方面，奔驰 GLC F－CELL 燃料电池 SUV 搭载了氢燃料电池和锂离子电池的插电式混动系统。由 400 片燃料电池单体组成的金属极电堆峰值功率 75 kW，锂离子电池组容量 13.5 kW·h。与奔驰上一代燃料电池汽车相比，新一代燃料电池系统体积减少约 30%，贵金属铂催化剂使用率降低 90%。基于全球标准化的 70 Mpa 储氢瓶技术，奔驰 GLC F－CELL 搭载的 2 个氢瓶分别位于底盘和后排座椅下方，储氢容量达到 4.4 kg。新车采用后轮驱动，位于后轴的异步电机最大功率达 160 kW(217 hp)，峰值扭矩 375 N·m。在锂离子电池组满电情况下，NEDC 循环工况续航里程达到 487 km，其中纯电续航里程 50 km，纯氢续航里程 437 km。此外，插电混动系统配备了 7.4 kW 功率充电器，可在 1.5 小时内将电池容量从 10%充至 100%。

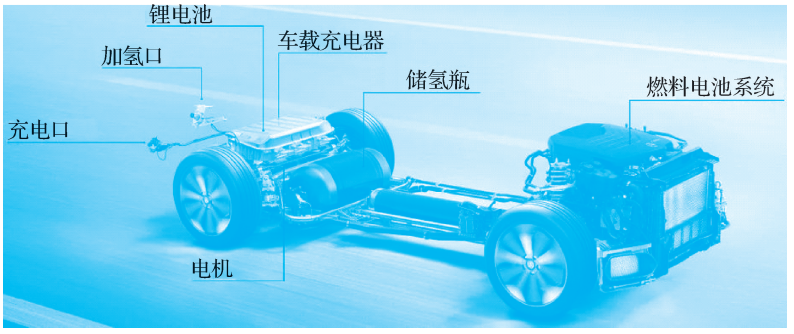


图 2－93　奔驰 GLCF－Cell 燃料电池—插电式混合动力总成系统总布置

奔驰 GLC F－CELL 燃料电池 SUV 有多种运行模式和驾驶模式。运行模式包括 4 种：混动模式、燃料电池(纯氢)模式、锂电池(纯电)模式和充电模式；驾驶模式包括 3 种：经济模式、舒适模式和运动模式。混动模式中，燃料电池组工作在最佳效率区间，功率峰值由锂离子电池组提供；燃料电池模式下，车辆行驶动力仅依赖氢气，锂离子电池组通过从燃料电池获取能量保持 SOC 不变，该模式适用于长距离稳态巡航；锂电池模式适用于短距行程，动力仅靠锂电池组提供；高压锂电池组充电享有优先权，氢气容量耗至限值前优先给锂电池组充电至满电。

课后拓展阅读

绿色革命的破局者：中国新能源汽车的全球使命与技术担当

中国新能源汽车从政策孵化到全球领跑，是国家生态文明建设的战略实践。2009 年“十城千辆”工程启动技术破冰，2025 年新能源渗透率目标超 50%的规划，标志着产业从政策驱动迈向市场驱动的成熟跃迁。其背后是国家破解能源安全困局、实现“双碳”承诺的深远布局——以电动化转型重构汽车产业链，对内推动能源结构优化，对外输出绿色技术标准，形成“中国技术赋能全球减排”的新范式。

政策突破不仅在于产销规模全球第一(2023 年产销 950 万辆)，更体现于全链条生态构建。从补贴退坡倒逼技术自立，到“双积分”政策强化企业责任；从充换电网络纳入新基建，到车用氢能产业顶层设计，彰显中国对可持续发展路径的系统性掌控。而“电池护照”溯源体系、碳足迹核算规则的先行探索，更将绿色话语权嵌入全球产业治理。

当中国新能源车占全球市场份额超 60%，比亚迪、蔚来等品牌登陆欧美日市场时，世界看到的不仅是“三电”技术的成本优势，更是“人与自然和谐共生”的中国方案落地。这种绿色革命与产业升级的共振，赋予从业者“推动地球降温”的时代使命，激励我们以技术为刃，为人类命运共同体开辟低碳未来。

思考与练习

一、填空题

1. 纯电动汽车可分为 2 种类型，即用纯蓄电池作为动力源的_____和_____。

2. 纯电动汽车的结构与燃油汽车相比，主要增加了_____，而取消了_____。

3. 纯电动汽车电力驱动控制系统由电力驱动主模块、_____和_____三大部分组成。

4. 纯电力驱动主模块主要包括_____、驱动控制器、_____、机械传动装置和车轮等。

5. 车载电源模块主要包括_____、能量管理系统和_____等。

6. 辅助模块主要包括_____、动力转向系统、_____和辅助装置等。

7. 串联式混合动力电动汽车系统结构主要由发动机、_____、电动机和_____等部件组成。

8. 并联式混合动力电动汽车系统结构主要是由发动机、_____和蓄电池等部件组成。

9. 并联式驱动系统的主要元件为_____，通常可归类为_____、转矩合成式和转速合成式三种形式。

10. 直接燃料电池电动汽车的燃料主要是_____；重整燃料电池电动汽车的燃料主要有汽油、_____、甲醇、_____、_____等。

11. 混合式燃料电池电动汽车的动力系统主要由_____、辅助动力源、DC/DC 变换器、_____、电动机和_____等组成。

二、简答分析题

1. 纯电动汽车驱动系统布置形式有几种？它们的布置特点分别是什么？
2. 简述纯电动汽车的特点。
3. 发展电动汽车的关键技术有哪四点？
4. 国际电子技术委员会对混合动力车辆的定义是什么？
5. 简述串联式混合动力汽车的工作模式。
6. 简述并联式混合动力汽车的工作模式。
7. 简述混联式混合动力汽车的工作模式。
8. 和纯电动汽车相比，混合动力汽车的优点是什么？
9. 燃料电池电动汽车技术与传统汽车、纯电动汽车技术相比，具有的优点有哪些？
10. 简述 THS 的工作模式。