

文章编号:1001-7372(2018)08-0001-19

中国新能源汽车产业与技术发展现状及对策

马建¹, 刘晓东¹, 陈轶嵩¹, 汪贵平², 赵轩¹, 贺伊琳¹,
许世维¹, 张凯¹, 张一西¹

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为促进中国新能源汽车产业与技术的发展,首先从中国新能源汽车发展现状出发,对现阶段中国新能源汽车整体产业、关键零部件产业及基础配套设施等产业链重点环节发展现状进行系统的梳理,并对中国新能源汽车整车技术、动力电池技术、驱动电机技术、燃料电池技术等核心技术取得的进展进行总结。然后,通过对标国外纯电动汽车、插电式混合动力汽车、燃料电池汽车、动力电池及驱动系统的技术前沿,分析中国新能源汽车与国际先进水平之间存在的差距与不足。基于现状分析,从战略政策、核心技术、研发生产、产业体系、示范推广、产品销售6个方面对目前中国新能源汽车发展存在的问题进行深度剖析,并进一步从顶层设计、自主创新、基础支撑、产业生态、配套体系以及商业模式6个方面为中国新能源汽车未来的产业发展路径和技术突破方向提供对策建议。最后,对中国未来新能源汽车产业与技术的发展路径进行思考。研究结果表明:产业布局方面,应合理布局整车及零部件配套企业,推进企业集群化,产业集聚化;纯电动汽车应着重发展一体化电动底盘,加大新体系动力电池的研发力度;插电式混合动力汽车应重点发展高性能混合动力总成与专用发动机,以及动态协调控制技术;燃料电池汽车应以发展燃料电池电堆及关键材料为重点,同时兼顾燃料电池系统及核心部件的开发。

关键词:汽车工程;新能源汽车;综述;发展现状;对策建议;发展路径

中图分类号:U46 **文献标志码:**A

Current Status and Countermeasures for China's New Energy Automobile Industry and Technology Development

MA Jian¹, LIU Xiao-dong¹, CHEN Yi-song¹, WANG Gui-ping², ZHAO Xuan¹,
HE Yi-lin¹, XU Shi-wei¹, ZHANG Kai¹, ZHANG Yi-xi¹

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To promote the development of China's new energy automobile industry and technology, the current status of several key links in China's new energy automobile industrial chain, including the integrated industry of new energy vehicles, key components, and infrastructures were systematically reviewed in this article, starting from the development status of domestic new energy vehicles. In addition to the progress made in domestic new energy vehicle technology, progress in power battery technology, driving motor technology, and fuel cell

收稿日期:2018-03-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0803904);国家自然科学基金项目(51507013);陕西省重点产业创新链(群)项目(2018ZDCXL-GY-05-03-01);陕西省重点研发计划项目(重点项目)(2018ZDXM-GY-082);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310822173201)

作者简介:马建(1957-),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:majian@chd.edu.cn。

通讯作者:刘晓东(1984-),男,内蒙古呼和浩特人,工学博士研究生,E-mail:15020616886@126.com。

technology were summarized. Next, the gaps and deficiencies in the development of new energy vehicles in China were analyzed and summarized by benchmarking the technological frontiers of international pure electric vehicles, plug-in hybrid electric vehicles, fuel cell vehicles, power battery, and driving system. Based on the analysis of the current status, the existing problems in the development of new energy vehicles in China were extensively analyzed from six different aspects, namely strategic policy, core technology, research and development production, industrial system, demonstration and promotion, and product sales. Furthermore, the countermeasures and suggestions for the future industrial development of China's new energy vehicles and directions for technological breakthroughs were provided from six different aspects, namely top layer design, independent innovation, basic support, industrial ecology, support system, and business model. Finally, the development paths of domestic new energy automobile industry and technology for the future were discussed. In terms of industrial layout, enterprises dealing with vehicles and their related parts should be rationally arranged to promote enterprise clustering and industrial agglomeration. For pure electric vehicles, the development of an integrated electric chassis and the new power battery system should be prioritized. For plug-in hybrid electric vehicles, attention should be focused on high-performance hybrid powertrains and the dedicated engines and dynamic coordinated control technologies. For fuel cell vehicles, the development of fuel cell stacks and key materials should be the focus while considering the development of fuel cell systems and core components.

Key words: automotive engineering; new energy vehicle; review; development status; counter-measure and suggestion; development path

0 引言

随着经济建设进程的快速推进,中国汽车工业得到了迅猛的发展。2009年以来,中国持续稳居全球汽车产销第一大国,2017年汽车产销量分别为2 901.5万辆和2 887.9万辆,预计在2020年前产销规模均将突破3 000万辆大关^[1]。与此同时,汽车保有量也呈逐年上升趋势,截至2017年底,中国汽车保有量已达21 700万辆,预计在2020年将突破25 000万辆大关。由汽车保有量增长所带来的一系列社会问题也日益凸显,特别是来自能源安全与环境污染的压力,对中国未来汽车工业的发展提出了新的挑战^[2]。

从能源安全来看,截至2016年底,全球已探明的石油和天然气分别可供消费50.6年与52.5年,未来全球能源需求将持续增长,能源供应压力进一步增大^[3]。从中国能源情况来看,2016年,中国石油对外依存度已升至65.4%,远超50%的安全警戒线^[4],2018年石油对外依存度将突破70%,汽车成品油巨额消耗已成为中国石油对外依存度持续攀升的主力推手之一,严重影响国家的能源安全。

从环境方面来看,汽车尾气排放已成为环境污染的主要元凶之一。联合国环境署最新报告《迈向

零污染地球》指出,全球范围内每年约有650万人因空气污染而死亡。另外,汽车能耗的增加使温室气体二氧化碳的排放量逐年增多,全球变暖趋势明显^[5-6],2017年中国平均气温较常年高出0.84℃。

在未来技术进步及对能源与环境关注的驱动下,能源需求将不断变化,全球主要能源结构将发生重大调整,汽车的生态模式也将发生深刻转变,低碳化和可再生化将成为汽车工业发展的必然趋势^[7-8]。发展新能源汽车成为缓解石油资源短缺,解决环境污染问题,实现汽车产业结构调整和转型升级的重要手段。

新能源汽车作为中国战略性新兴产业之一,产业规模和技术水平发展迅速,从2015年产销量跃居全球首位开始,产销规模连续3年蝉联全球第一。截至2017年底,中国新能源汽车保有量已超160万辆,占全球新能源汽车保有总量的50%。

总体来讲,中国新能源汽车发展形势良好,产销规模持续增长,技术水平不断进步。但是,在产业规模效益、关键技术水平、基础设施建设等方面与国外仍有差距。本文从中国新能源汽车产业与技术发展现状出发,通过与国外技术前沿的对比,分析目前中国新能源汽车发展存在的不足,并从多角度出发对中国新能源汽车产业与技术发展存在的问题进行深度剖析。在此基础上,为今后中国新能源汽车发展

提出相应对策,并就未来新能源汽车的发展路径给出相关建议。

1 中国新能源汽车发展现状

1.1 新能源汽车产业发展现状

中国政府高度重视新能源汽车的发展,2009

年以来,陆续出台一系列新能源汽车产业政策,已逐步形成较为完善的政策体系,从宏观统筹、推广应用、行业管理、财税优惠、技术创新、基础设施等方面全面推动了中国新能源产业的快速发展,并初步实现了引领全球的龙头作用。中国新能源汽车产业政策体系如表 1 所示^[9-10]。

表 1 中国新能源汽车产业政策体系

Table 1 Domestic New Energy Automobile Industry Policy System	
宏观统筹	汽车产业振兴规划;战略新兴产业发展规划;工业转型升级规划;中国制造 2025;节能与新能源汽车产业发展规划;汽车产业中长期规划;……
推广应用	十城千辆推广工程;新能源公交运营补贴办法;扩大混合动力城市公交示范推广范围;关于继续开展新能源汽车推广应用工作的通知;新能源汽车政府采购方案;京津冀公务领域示范推广方案;加强示范推广管理;……
行业管理	新能源汽车生产企业产品准入管理规定;新建纯电动乘用车企业管理规定;积分并行管理办法;汽车动力电池行业规范条件;关于完善汽车投资项目管理的意见;外商投资管理目录;……
财税优惠	私人购买新能源汽车补贴试点的通知;四部委关于继续开展新能源汽车推广应用工作的通知;关于 2016~2020 年新能源汽车推广应用财政支持政策的通知;关于免征新能源汽车购置税的公告;关于新能源汽车免车船税的通知;……
技术创新	电动汽车十二五科技发展规划;技术创新财政奖励资金管理暂行办法;电动客车安全技术条件;关于开展新能源汽车技术创新工程的通知;燃料电池技术战略方向规划目标;国家“八六三”/“九七三”计划;新能源汽车重大专项试点;……
基础设施	电动汽车充电基础设施发展指南(2015~2020 年);关于新能源汽车充电设施建设奖励的通知;电动汽车用电价格政策;关于十三五新能源汽车充电基础设施奖励政策及加强新能源汽车推广应用的通知;关于加快充电基础设施建设的指导意见;住建部关于加强充电设施规划建设工作的通知;……

1.1.1 整体产业概况

受国家政策支持和支持和引导,中国新能源汽车产业得到了快速发展。2015 年产销量分别达到 34.05 万辆和 33.11 万辆,跃居成为新能源汽车产销第一大国,2016 年和 2017 年继续保持领先优势^[11]。

如图 1 所示,2017 年产销量分别为 79.4 万辆和 77.7 万辆,产销量同比增长 53.8%和 53.3%,产销增速同比提高了 2.1%和 0.3%。同时,新能源汽车的市场占有率也呈逐年上升趋势,2017 年新能源汽车市场占比约为 2.7%,同比提高 0.9%。

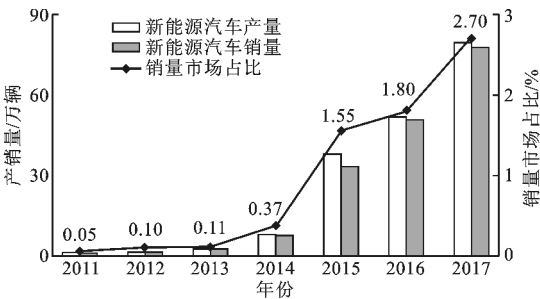


图 1 2011~2017 年中国新能源汽车产销量
Fig. 1 Production and Sales of New Energy Vehicles in China 2011-2017

总体来讲,中国新能源汽车产业发展势头强劲,增速较快,市场占有率逐年上升,市场规模已初步形成。从车型分布来看,纯电动汽车是中国新能源汽车产业的主体,如图 2 所示。

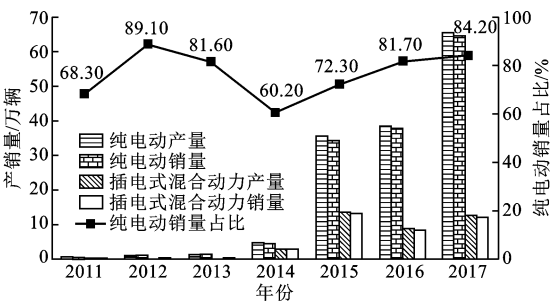


图 2 2011~2017 年不同新能源汽车产销情况
Fig. 2 Production and Sales for Different Types of New Energy Vehicles in China 2011-2017

截至 2017 年,纯电动汽车销量占比达到 84.2%,插电式混合动力汽车仍是目前中国新能源汽车市场的重要组成部分,燃料电池汽车尚处于起步阶段,仅有少数企业进行了样车开发与示范运行,后续产业化发展有待跟进^[12-13]。

中国新能源汽车产业的快速发展,也带动了自主品牌的崛起。2017 年中国新能源汽车自主品牌呈现“百家争鸣”的良好局面,有多家自主品牌进入全球新能源汽车销量排名前 20 位。

如图 3 所示,比亚迪以 10.9 万辆继续蝉联全年销售冠军。另外,北汽新能源异军突起,从 2016 年的第 5 位上升至第 2 位;上汽荣威以 4.5 万辆的销量稳居第 8 位,达到了有史以来最好水平;长安汽车成为 2017 年中国产新能源汽车中表现最突出的品

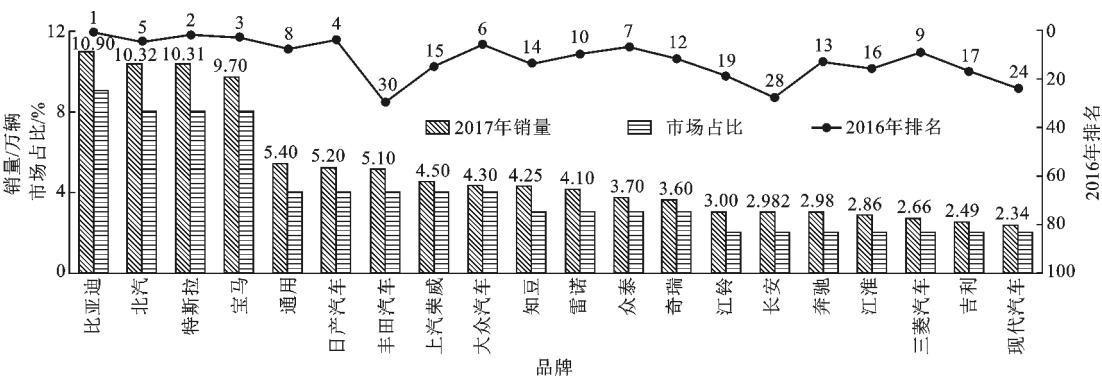


图 3 2017 年全球新能源乘用车企业销量排名

Fig. 3 Sales Ranking of Global New Energy Passenger Vehicle in 2017

牌,从 2016 年的第 28 位上升到第 15 位,销量排名上升了 13 位。

中国新能源汽车产销量激增的同时,市场格局也发生了重大变化,城市微型电动汽车成为 2017 年的主流产品。如表 2 所示,北汽 EC 系列共销售 78 079 辆,创造了新的历史记录,赢得 2017 年度中国销量冠军,终结了比亚迪的三冠王之路。

表 2 2017 年中国新能源乘用车车型销量排名

Table 2 Sales Ranking for Domestic New Energy Passenger Vehicle in 2017

排名	车型	企业	动力类型	销量/万辆
1	北汽 EC 系列	北汽	BEV	7.81
2	知豆 D2 EV	知豆	BEV	4.23
3	比亚迪宋	比亚迪	PHEV	3.09
4	奇瑞 eQ	奇瑞	BEV	2.74
5	江淮 iEV6S/E	奇瑞	BEV	2.57
6	比亚迪 e5	比亚迪	BEV	2.36
7	吉利帝豪 EV	吉利	BEV	2.33
8	比亚迪秦	比亚迪	PHEV	2.07
9	荣威 eRX5	上汽	BEV	1.95
10	众泰 E200	众泰	BEV	1.67

1.1.2 关键零部件产业现状

(1)动力电池

2016 年中国新能源汽车动力电池配套总量为 28.14 GW·h,同比 2015 年增长 72%;2017 年中国新能源汽车动力电池装机总量约为 36.24 GW·h,相比 2016 年的数据,同比增长约 29.4%^[14]。

当前中国动力电池市场仍以锂离子电池为主,车用动力电池主要有磷酸铁锂电池、三元材料电池、锰酸锂电池、钛酸锂电池、多元复合电池、镍氢电池等^[15]。如表 3 所示,以三元材料和磷酸铁锂作为电池正极是目前锂离子电池产业的两大主流工艺,二者在乘用车领域的装机总量高达 98%。

从配套企业来看,中国产新能源汽车共有 151

表 3 2017 年中国新能源乘用车动力电池装机情况

Table 3 Power Battery Installation of Domestic New Energy Passenger Cars in 2017

电池类型	装载量/(GW·h)	占比/%
三元材料	10.46	76.2
磷酸铁锂	2.99	21.8
其他	0.27	2.0

家动力电池单体配套企业和 2 家燃料电池企业。近年来,中国动力电池产业发展势头迅猛,2017 年宁德时代超越松下和比亚迪,跃居全球第一^[16]。

如图 4 所示,2017 年全球销量前十的动力电池企业,中国占据 7 席。同时,中国锂电池公司首次占据全球出货量榜首,标志着中国动力电池产业发展的新高度与新里程。

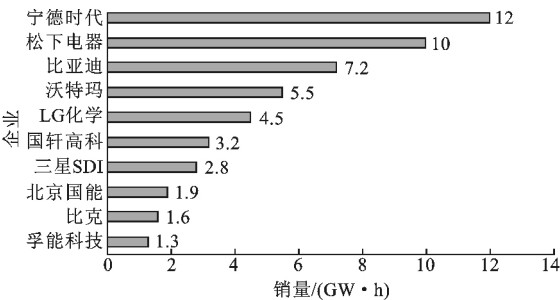


图 4 2017 年全球动力电池企业销量前十

Fig. 4 Top Ten Sales of Global Power Battery Enterprises in 2017

(2)电驱动系统

2017 年,中国新能源汽车产销均超过 70 万辆,其中,新能源乘用车产销量占 2/3,新能源商用车产销量占 1/3,除个别乘用车车型外,绝大部分新能源汽车(含全部新能源商用车)均配套中国自主研发的驱动电机及控制器产品^[17]。

如表 4 所示,2017 年新能源乘用车驱动电机装机量达到 55.2 万台。其中,永磁同步电机装机量超

表 4 2017 年中国新能源乘用车驱动电机装机情况
Table 4 Installation of Drive Motors for Domestic
New Energy Passenger Cars in 2017

电机类型	装机量/万台	占比/%
永磁同步电机	39.2	71
交流异步电机	15.4	28
其他	0.6	1

过 39.2 万台,占比达到 71%,交流异步电机装机量近 15.4 万台,占比约为 28%,二者仍为目前新能源乘用车驱动电机主流产品。

目前,中国驱动电机生产企业和电机控制器生产企业虽有 200 多家,但是市场相对比较集中。北汽新能源、比亚迪、江铃新能源、精进电动、联合电子等 10 家企业所占市场份额超过 75%^[17]。

如图 5 所示,中国排名前十的驱动电机企业中,除联合汽车电子为合资品牌外,其他均为中国自主品牌。目前,中国除部分驱动电机供应商被整车厂整合外,其他自主品牌电机供应商能够根据整车厂的需求联合开发新产品,对中国新能源汽车市场的适应度更高,因此,自主品牌驱动电机产业得到了较快的发展。

1.1.3 充电设施产业现状

总体来看,中国充电基础设施的建设相对于新

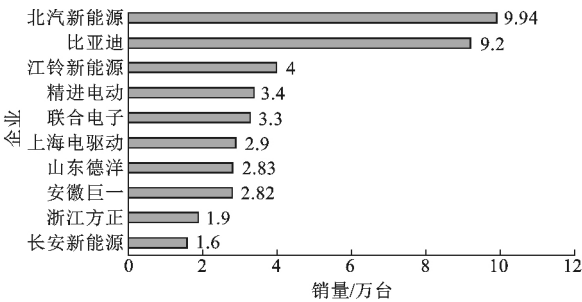


图 5 2017 年中国新能源乘用车电机销量前十

Fig. 5 Top Ten Motor Sales of Domestic
New Energy Passenger Cars in 2017

能源汽车的增速是持续滞后的,充电接口与新能源汽车数量之比远低于 1:1 的要求^[18-19]。随着中国新能源汽车保有量的快速增长,中国也成为充电基础设施发展最快的国家,2017 年全年月均新增公共充电桩数约为 6 054 个。

目前,中国已成为全球充电桩保有量最多的国家。截至 2017 年底,中国(不含港澳台地区,下同)充电桩数量达到 45 万个,公共充电桩数量达到 21 万个,同比增长 51%。其中,交流电桩 8.6 万个,直流电桩 6.1 万个,交直流一体桩 6.6 万个。截至 2018 年 4 月,中国各省充电桩分布见图 6。

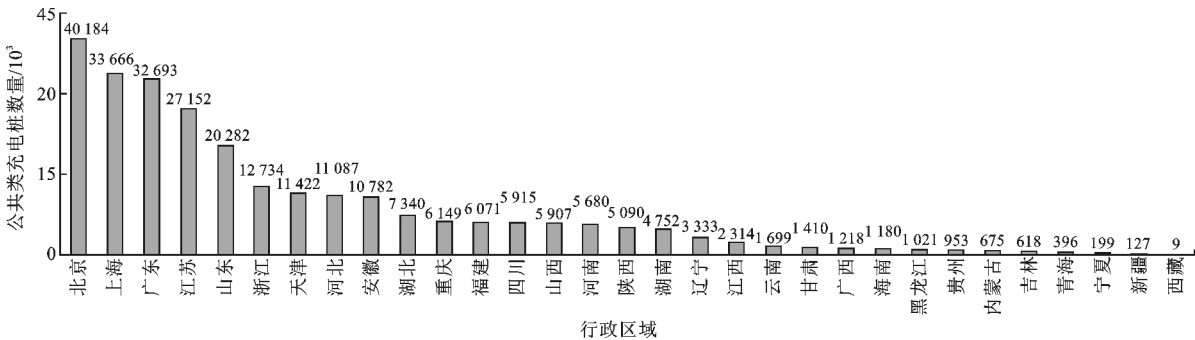


图 6 中国充电基础设施建设分布情况

Fig. 6 Distribution of Charging Infrastructure Construction in China Mainland

1.2 新能源汽车技术发展现状

1.2.1 整车技术

目前,中国纯电动乘用车技术接近国际先进水平,续驶里程、可靠性、安全性、动力性水平不断提高,经济性和综合效益水平持续优化,续驶里程突破 400 km,部分中高端产品达到国际一流水平,规模化商业推广的时机已经到来^[20-21]。

混合动力机电耦合装置关键技术取得重大突破,整车能耗水平显著下降^[22]。上汽 EDU 机电耦合动力系统构型规避了丰田公司 THS 系统和通用公司 Voltec 系统专利壁垒保护,搭载该系统的荣威

e550 和 ei6 PHEV 混动模式下综合碳排放分别为 102,95.8 g·km⁻¹,与普锐斯 3 和雅阁 9 相比,综合碳排放约降低了 2.98%^[23-24]。

新能源客车方面,开发出覆盖 6~12 m 的多种纯电动公交车型,形成了独具特色的钛酸锂电池快充、双源无轨及快速换电等多项能源供给技术。混合动力技术方面,掌握了插电式混合动力汽车多能源动力系统整车控制、高功率电机系统、串联式混合动力系统及 AMT 并联式混合动力系统,混合动力状态节油率最高可达 40%,插电式混合动力公交综合节油率超过 50%^[23,25]。

燃料电池汽车采用独具特色的“电-电混合”动力系统平台技术方案,具有“动力系统平台整车适配、电-电混合能源动力控制、车载高压储氢系统、工业副产氢气纯化利用”的技术特征。中国研发的燃料电池轿车最高车速可达 $150 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,百公里加速时间为 14 s ,一次加氢续驶里程达到 300 km ,百公里氢气消耗量为 0.912 kg 。燃料电池城市客车在三大系统(燃料电池/蓄电池混合动力、电动化底盘、整车控制)和三大技术(燃料电池耐久性、氢电安全性、整车燃料经济性)上取得了重要突破,基于国家标准公交循环的整车百公里氢耗不超过 7.5 kg ,示范运行取得了良好的社会效益^[23,26-27]。

在纯电动与插电式混合动力汽车推广应用方面,分阶段制定了纯电动汽车、插电式混合动力汽

车、关键零部件以及充电基础设施的发展路线与发展目标^[28]。

如图7所示,纯电动与插电式混合动力汽车总体技术路线分4个发展阶段,每个阶段按照“五年计划”来完成,分别以新能源汽车保有量、充电桩/站保有量、新能源汽车当年销量占比情况以及新能源汽车及其关键零部件技术与产业规模等作为考核指标。力争通过4个阶段的发展,到2030年中国新能源汽车保有量大于8000万辆,充换电站数量大于4.8万座,充电桩数量大于8000万个,新能源汽车当年销量占汽车总销量40%~50%,全面实现新能源汽车、智能电网与智能社区的联网运行,新能源汽车自主产业链进一步完善,培育出具有国际先进水平的新能源汽车零部件企业。

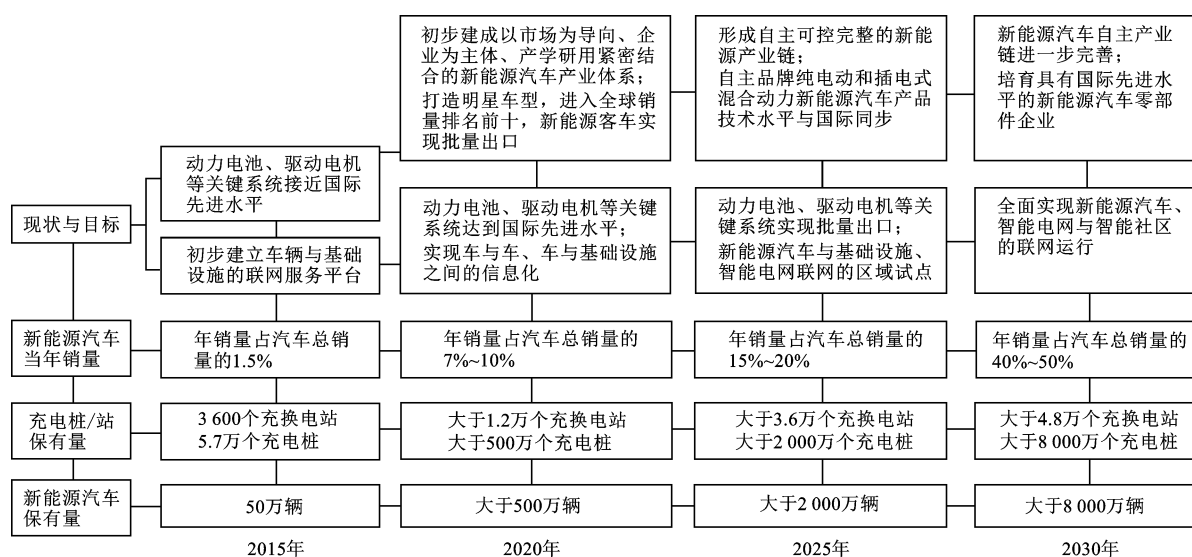


图7 纯电动和插电式混合动力总体技术路线^[28]

Fig. 7 General Technology Roadmap for Pure Electric and Plug-in Hybrid Traction^[28]

燃料电池汽车推广应用方面,按照3个“五年计划”布局,分别从产业规模、整车性能、关键零部件技术及氢能基础设施建设4个方面制定了燃料电池汽车总体发展路线^[28]。

如表5所示,通过3个“五年计划”的实施,到2030年实现燃料电池汽车在私人乘用车、大型商用车领域百万量规模的商业化推广,并培育出年产超过10万套燃料电池系统的龙头企业。另外,整车性能与传统车相当,耐久性和成本方面具有一定的竞争优势,同时,要突破燃料电池系统及制氢与储氢等关键技术,并建立超过1000座加氢站以支撑燃料电池汽车的产业化发展。

1.2.2 动力电池技术

“十三五”前,中国动力电池的发展历经锰酸锂

电池、磷酸铁锂电池、三元电池等阶段,已掌握电池材料、单体电池、电池系统、批量生产工艺等核心技术。形成包括磷酸铁锂和锰酸锂正极材料、三元材料前驱体、石墨负极材料、钛酸锂负极材料、电解液和PP/PE隔膜在内的完整电池材料技术体系,技术水平与国际基本同步^[29-30],如图8所示。

“十三五”期间,国家大力发展高比能量的新一代锂离子动力电池,动力电池系统比能量取得了突破性进展^[31]。目前,中国已量产使用的32131高能量密度圆柱磷酸铁锂电池单体能量密度达到 $170 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$;基于中国产高镍正极材料NCM622的方壳单体能量密度超过 $200 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$,全部电池单体能量密度为 $(230 \pm 20) \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。比克电池率先发布并准备投入量产的高能芯新品

表 5 燃料电池汽车总体技术路线^[28]

Table 5 General Technology Roadmap for Fuel Cell Vehicle^[28]

项目	2020 年	2025 年	2030 年
总体目标	在特定地区的公共服务用车领域小规模示范应用,规模为 5 000 辆	在城市私用车、公共服务用车领域实现大批量应用,规模为 50 000 辆	在私人乘用车、大型商用车领域实现大规模商业化推广,百万辆规模
	料电池系统产能超过 1 000 套·企业 ⁻¹	燃料电池系统产能超过 1 万套·企业 ⁻¹	燃料电池系统产能超过 10 万套·企业 ⁻¹
氢能燃料电池汽车			
功能要求	冷启动温度达到-30℃,动力系统构型设计优化,整车成本与纯电动汽车相当	冷启动温度达到-40℃,批量化降低整车购置成本,与同级别混合动力汽车相当	整车性能与传统车相当,具有相对产品竞争力优势
商用车	耐久性为 40×10 ⁴ km; 成本不大于 150 万元	耐久性为 80×10 ⁴ km; 成本不大于 100 万元	耐久性为 100×10 ⁴ km; 成本不大于 60 万元
乘用车	寿命为 20×10 ⁴ km; 成本不大于 30 万元	寿命为 25×10 ⁴ km; 成本不大于 20 万元	寿命为 30×10 ⁴ km; 成本不大于 18 万元
关键零部件技术	高速无油空压机、氢循环系统、70 MPa 储氢瓶等关键系统附件性能满足车用指标要求		系统成本低于 200 元·kW ⁻¹
氢能基础设施	氢气供应	可再生分布式制氢:焦炉煤气等副产氢气制氢/高效低成本氢气分离纯化技术	
	氢气运输	高压气态氢气存储与运输	低温液体氢气运输
	加氢站	数量超过 100 座	数量超过 300 座
			数量超过 1 000 座

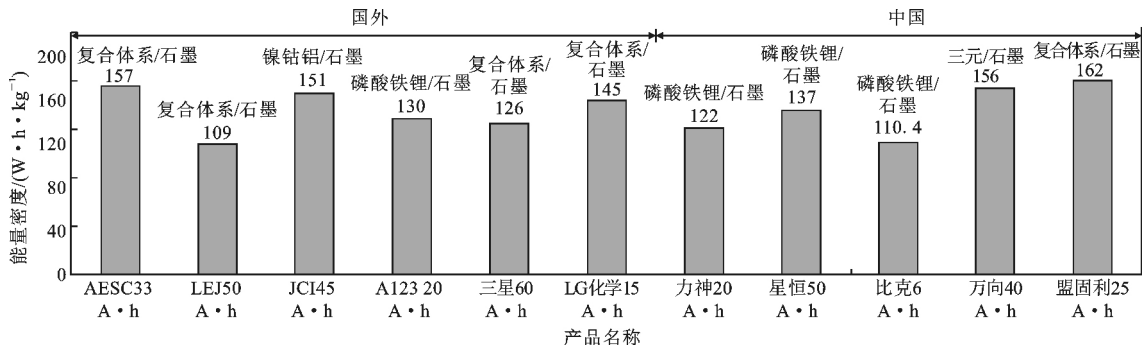


图 8 “十三五”前动力电池单体国内外技术水平

Fig. 8 Technology Level of Power Battery Cell Before “13th Five-year Plan” at Domestic and Foreign

3.0~18 650.0 A·h, 单体能量密度达到了 250 W·h·kg⁻¹;天津力神牵头开发的高比能量密度锂离子动力电池,单体能量密度可达 260 W·h·kg⁻¹;国轩高科开发出的三元 811 软包电芯,单体能量密度达到了 302 W·h·kg⁻¹,目前正处于产品中试阶段。

同时,在动力电池系统集成技术和能力方面也取得了较大进展和突破^[32],三元方壳电池系统能量密度达到 158 W·h·kg⁻¹,基于新一代动力电池热失控防控技术的电池系统能量密度接近 160 W·h·kg⁻¹,单体能量密度为 200 W·h·kg⁻¹的电池成组效率可以达到 77%,循环寿命超过 3 000 次。

1.2.3 电驱动系统技术

在驱动电机技术方面,利用中国稀土资源优势,形成了车用永磁电机技术特色^[33]。中国自主研发的永磁同步电机、交流异步电机和开关磁阻电机已

实现与整车产业化配套,系列化产品的功率范围可满足 200 kW 以下新能源汽车驱动电机动力需求,关键技术指标方面,中国驱动电机的功率密度、效率等与国际水平基本相当。

乘用车领域,开发出涵盖 42~120 kW 的系列化驱动电机及其控制器产品,功率密度达到 3.3~3.6 kW·kg⁻¹(峰值功率与有效质量之比),最高转速达到 12 800 r·min⁻¹以上。

商用车领域,开发出 AMT 同轴并联驱动电机、6~12 m 纯电驱动电机以及驱动转矩为 3 100 N·m 的电动客车双电机动力总成,电机转矩密度达到 18 N·m·kg⁻¹以上,最高转速达到 3 500 r·min⁻¹以上。

轮毂和轮边驱动电机方面,中科院电工所开发的直驱轮毂电机转矩和功率分别达到 950 N·m, 60 kW, 轮毂电机总功率密度达到 1.0

$\text{kW} \cdot \text{kg}^{-1}$; 精进电动开发的轮边驱动电机峰值功率和转矩分别可达 150 kW , $650 \text{ N} \cdot \text{m}$; 湖北泰特开发出的用于客车的外转子轮毂电机, 最高转速可达 $1\,000 \sim 1\,500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

电机控制器技术方面, 基于汽车级封装绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 模块, 采用电力电子集成技术, 开发出了多款峰值功率为 80 kW , 体积比功率达到 $11 \sim 12 \text{ kW} \cdot \text{L}^{-1}$ 的集成控制器, 控制效率高达 98% 以上; 同时在碳化硅 (SiC) 与 IGBT 混合模块利用方面, 开发出了峰值功率为 75 kW , 体积比功率达到 $12 \text{ kW} \cdot \text{L}^{-1}$ 的集成控制器, 电机控制器技术正在迅速追赶国外先进水平^[17,28]。

1.2.4 车用燃料电池系统技术

燃料电池系统技术链较长, 中国相关基础薄弱, 通过“十五”、“十一五”期间的发展, 低压燃料电池电堆动态寿命得到提升, 单堆动态循环工况累计运行超过 $1\,500 \text{ h}$, 性能仅下降 6.7% ; 乘用车燃料电池系统净输出功率提升到 55 kW , 客车燃料电池系统输出额定功率为 80 kW , 过载功率可达 110 kW , 系统最高效率超过 61% , 最大功率密度超过 $0.7 \text{ kW} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最大体积比功率达 $1.0 \text{ kW} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[26,34]。

目前, 中国轿车用质子交换膜燃料电池性能水平与国外乘用车燃料电池技术还存在明显差距 (表 6), 正通过自主研发和寻找关键部件 (如 MEA、金属双极板、氢气回收泵、空压机等) 国外供应商的方式来缩小与国外的差距。

表 6 国内外车用燃料电池产品技术对比
Table 6 Comparison of the Fuel Cell Technology at Domestic and Foreign

参数	日本 (丰田)	中国
电堆功率/kW	110	44
体积比功率/($\text{kW} \cdot \text{L}^{-1}$)	3.1	2.0
寿命/h	5 000	3 000
冷启动温度/ $^{\circ}\text{C}$	-30	-15
加湿方式	内增湿	外增湿

新源动力股份有限公司通过自主创新, 突破了电堆设计、测试解析、关键部件技术与工艺等关键领域技术难题, 研发的燃料电池电堆采用金属双极板, 功率达到 $45 \sim 80 \text{ kW}$, 体积比功率达到 $2.6 \text{ kW} \cdot \text{L}^{-1}$, 与国际第 2 代燃料电池技术水平相当; 武汉理工大学新能源有限公司实现了质子交换膜燃料电池膜极化 (MEA) 的产业化, 自主生产的膜电极形成了 $1 \sim 60 \text{ kW}$ 的燃料电池电堆设计和开发能力, 产品性能达到国际领先水平^[27]。尽管中国氢燃

料电池技术已取得了重大突破, 但是在催化剂和质子交换膜等关键材料方面与国外先进水平相比仍存在一定差距。

综上所述, 中国新能源汽车产业在整车、关键零部件、基础设施等方面都取得了长足的进步, 规模不断壮大, 发展势头迅猛, 技术水平也在不断提升。但是, 面对如此快速的发展形势, 仍存在大而不强的潜在风险, 核心关键技术与国外存在差距。因此, 在新能源汽车快速发展的同时, 应当密切关注其产业链、技术链与生态链的完善, 其中, 核心技术的突破是新能源汽车发展的重中之重。

2 国内外新能源汽车技术对比分析

2.1 纯电动汽车

2.1.1 国外技术现状与发展趋势

纯电动汽车作为新能源汽车的主要类型之一, 受到各国政府和企业的高度重视, 发展速度较快, 部分产品已进入产业化阶段。

美国纯电动汽车的发展主要以乘用车为主, 典型代表为特斯拉公司的 Model S 和 Model X^[35]。其中, 2015 款 Model S70 采用最大功率为 235 kW 的交流异步电机, 并搭载了 $70 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的锂离子电池, $0 \sim 100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 加速时间仅需 5.8 s , 续航里程可达 420 km , 整车性能与传统车相当, 在国外市场取得了较高的口碑。随后, 特斯拉公司于 2016 年发布了一款采用钢铝混合车身的 Model 3 车型, 搭载能量密度为 $315 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 20700 三元材料电池, 续航里程可达 346 km , 并准备在全球推广。

日本的纯电动代表车型主要有日产 Leaf 和三菱的 iMi EV。2012 款 Leaf 采用最大功率为 80 kW 的永磁同步电机, 装备了 $24 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的锂离子电池, 续航里程可达 161 km ^[36]。2016 年推出的新款 Leaf, 通过采用比能量为 $157 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 $30 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 锂离子电池将车辆续航里程提升到 172 km , 并一度成为欧美发达地区的畅销车型。

欧洲纯电动汽车以德系车为代表, 主要车型有大众 e-Golf 和宝马 i3。其中, 宝马 i3 采用全新设计的全碳纤维车身, 并融入了一体化设计思想, 将锂离子电池组与铝合金材料底盘进行了一体化设计, 降低了整车整备质量, 同时也提升了车辆续航里程^[37]。2016 款宝马 i3 纯电动汽车搭载了峰值功率为 125 kW 的永磁同步电机, 采用 $33 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的锂离子电池, $0 \sim 100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的加速时间仅为 7.2 s , 续航里程达到 271 km , 性能远超其他同级别纯电动

汽车。

从国际发展趋势来看,纯电动汽车的发展主要聚焦于 2 个方向:①整车的一体化开发;②电动汽车核心零部件与关键技术的提升。整车一体化开发方面,开发电动汽车专用一体化底盘,并通过轻量化技术对车体进行减重设计,同时,考虑整车 NVH 特性,对悬架、转向、电动附件等进行重新匹配,保证整车的可靠性;电动汽车核心零部件与关键技术提升方面,以动力电池能量密度提升作为主要突破口,开发新一代高比能量车用动力电池,并注重电池包的安全性设计,提高纯电动汽车续航里程的同时,也注重于整车安全性能的提升。

2.1.2 国内外技术差距对比分析

目前,中国纯电动汽车自主品牌正在逐步缩小与国际一流企业产品之间的差距,同级别车型在整车性能方面已与国际一流水平接近,并逐步形成标准化生产的规模效应,如表 7 所示。

表 7 国内外典型纯电动乘用车主要技术参数对比

Table 7 Comparison of Main Technical Parameters of Typical Battery Electric Passenger Cars at Domestic and Foreign

车型	Model S	Leaf	i3 EV	帝豪	e6	EV200
生产企业	特斯拉	日产	宝马	吉利	比亚迪	北汽
车长/mm	4 970	4 445	4 020	4 631	4 560	4 025
整备质量/kg	2 180	1 525	1 195	1 570	2 380	1 295
电机功率/kW	235	80	125	95	90	53
电机扭矩/(N·m)	440	280	250	240	450	180
电池能量/(kW·h)	70.0	24.0	33.0	45.3	57.0	30.4
最高车速/(km·h ⁻¹)	225	145	150	140	140	130
0~100 km·h ⁻¹ 加速时间/s	5.8	11.9	7.2	9.9	15.0	13.0
续航里程/km	420	161	271	253	300	245
能耗/ [kW·h·(100 km) ⁻¹]	22.0	14.6	12.3	15.8	19.5	15.0

由于中国汽车工业基础相对薄弱,在整车及关键零部件批量化生产工艺、质量控制以及成本控制等方面与国外知名企业存在较大差距。同时,由于基础设施不健全,商业化推广缓慢,产品应用率低等原因,造成产品性能的市场验证不足,自主品牌的认可度不高,整车可靠性和品牌效应有待提升。此外,动力电池及其能量管理系统、电驱动系统及其控制、电动汽车附件、快速充电、动力电池回收利用等关键技术尚需进一步提升。

从产品开发角度来看,中国车企大多以传统汽车底盘为基础平台进行改制开发,缺少全新设计的一体化电动车专用底盘,整体性和技术性相对落后,

严重影响整车性能的发挥;另外,中国汽车企业在轻量化设计方面相对落后,应用于车身和底盘的轻量化材料有限,极大地影响了纯电动汽车续航里程的提升。而国外电动汽车,如特斯拉 Model S 与宝马 i3 已大量采用全铝合金材料或碳纤维轻质材料,有效降低了整车的整备质量,提高了车辆续航里程。

2.2 插电式混合动力汽车

2.2.1 国外技术现状与发展趋势

插电式混合动力汽车作为传统车向纯电动汽车转变的过渡产品,已成为各大汽车企业应对日益严格的油耗与排放法规,提高产品竞争力的重要产品类型。国外各大车企先后制定了全系列车型插电化与混动化的发展战略,打造出一批具有国际竞争力的明星车型^[38]。

美系车中,最具代表的插电式混合动力汽车有通用雪佛兰的 Volt、福特公司的 Fusion Energi 和 C-MAX 等,3 款车型占据了美国 2015 年新能源汽车市场 37% 的份额。从技术参数来看,雪佛兰 Volt 搭载了 1.5 L 发动机与峰值功率为 111 kW 的永磁同步电机作为混合动力驱动系统,采用 16 kW·h 锂离子电池,纯电续航里程可达 80 km^[39],车辆综合行驶油耗仅为 1.2 L·(100 km)⁻¹,节能效果较为显著。

日本企业在新能源汽车方面长期以来以发展混合动力汽车为主,混合动力技术较为成熟,并在此基础上较快地开发出了插电式车型,其主要插电式车型有丰田的 Prius、本田的雅阁、三菱的欧蓝德等。其中,丰田 Prius 具有较高的产销量,该车型搭载了 1.8 L 发动机与 60 kW 交流电机作为混合动力驱动系统,并装备了 4.4 kW·h 的锂离子电池作为电驱动动力源,综合油耗为 1.64 L·(100 km)⁻¹,具有较好的节能减排效果^[40]。

欧洲的插电式混合动力汽车仍以德系车为主^[41],代表车型有宝马 i8 与奥迪 A6L e-tron 等。其中,宝马 i8 搭载的 1.5 L 发动机,最大输出功率可达到 170 kW,所采用的 96 kW 驱动电机最大输出扭矩可达 250 N·m,整车具有较高的动力性能,0~100 km·h⁻¹加速时间仅为 4.9 s,最高车速可达 250 km·h⁻¹。同时,车辆的综合油耗为 2.5 L·(100 km)⁻¹,与同级别传统车相比,油耗大幅降低。

从插电式混合动力汽车发展趋势来看,国外混合动力技术的发展主要集中在 3 个方面:①混合动力技术路线的优化;②混合动力系统关键零部件的优化与集成控制;③混合动力系统节油率的提升。

混合动力技术路线优化方面,结合现有混合动力技术路线多元化的特点,围绕系统构型、机电耦合等关键技术对混合动力系统开展进一步优化。关键零部件优化与集成控制方面,采用高压压缩比、高热效率的发动机,并对发动机、驱动电机、动力耦合装置等关键零部件进行轻量化设计,使混合动力系统结构更为紧凑,传动效率更高;同时,对混合动力系统各控制单元进行集成化设计,以提高控制功率与系统的安全性。混合系统节油率提升方面,通过提升混合动力系统的混合度来保证车辆有较长的纯电续航里程;同时,不断改进混合动力系统的能量管理策略来提高车辆节油率。

2.2.2 国内外技术差距对比分析

近年来,中国插电式混合动力汽车技术取得了较大进步,已进入产业化阶段,整车性能也在不断提升,已接近国际先进水平(表 8)。但是,在插电式混合动力系统动力输出平顺性、节油效果、整车 NVH 以及产品可靠性与耐久性等方面尚需进一步提高。另外,在混合动力发动机、机电耦合装置、电驱动系统及混合动力系统集成等核心零部件及关键技术方面与国际先进水平存在一定差距。其中,混合动力专用发动机技术的差距尤为明显,中国目前混合工况下的燃油经济性普遍为 $6\text{ L}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 左右,国际先进水平已达 $4.3\text{ L}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 。

表 8 国内外典型插电式混合动力汽车主要技术参数对比
Table 8 Comparison of Main Technical Parameters of Typical Plug-in Electric Vehicles at Domestic and Foreign

车型	Volt	Prius	i8 PHEV	GA5	秦 PHEV	e550
生产企业	雪佛兰	丰田	宝马	广汽	比亚迪	荣威
车长/mm	4 498	4 480	4 689	4 800	4 740	4 648
整备质量/kg	1 700	1 436	1 490	1 680	1 720	1 699
发动机排量/L	1.5	1.8	1.5	1.0	1.5	1.5
发动机功率/kW	63	73	170	45	113	80
电机功率/kW	111	60	96	94	110	147
电机扭矩/(N·m)	370	207	250	225	200	587
电池能量/(kW·h)	16.0	4.4	7.1	13.0	13.0	11.8
最高车速/(km·h ⁻¹)	161	180	250	150	185	200
0~100 km·h ⁻¹ 加速时间/s	9.0	9.8	4.9	11.0	5.9	9.5
纯电续航里程/km	80.0	26.4	35.0	50.0	80.0	60.0
综合油耗/ [L·(100 km) ⁻¹]	1.20	1.64	2.50	2.40	1.40	1.60

从技术路线来看,以日本丰田、本田为代表的整车企业主推节能型插电式混合动力汽车,即纯电里程较短,运行模式以 Blended 为主;美国和中国都采

用增程型技术路线,即纯电里程长,通常超过 50 km,运行模式以 CD/CS 为主。2 种技术路线各有特点,增程型路线是传统车向纯电动汽车过渡的必经阶段,节能型路线更适合现阶段大规模推广与应用^[42-43]。另外,在能量管理策略方面,中国采用的 CD/CS 模式仍需改进与优化。

2.3 燃料电池汽车

2.3.1 国外技术现状与发展趋势

氢燃料电池汽车作为新能源汽车的重要技术方向,对稳定能源供给,改善能源结构,保持汽车产业持续发展具有重大意义,各国对其关注与重视程度都在不断提升^[44-45]。

2005 年,美国已将氢能列入“主流能源”选择之一,并陆续制定发布了相关推进计划。典型的燃料电池乘用车有氢燃料电池版的福特 Focus 与通用雪佛兰 Equinox 燃料电池轿车,2 款车型主要以租赁方式供客户体验使用,取得了较好的示范推广效果^[46]。其中,雪佛兰 Equinox 的电力输出可达到 93 kW,0~100 km·h⁻¹加速时间为 12 s,一次加满氢燃料的续航里程为 240 km。另外,美国在物流运输领域对氢燃料电池汽车的推动作用较大,截至 2015 年,共有 34 家企业 8 000 多辆氢燃料电池叉车投入运行,起到了积极的技术和市场引导作用。

日本长期以来都将氢能利用作为国家战略方向之一,高度重视燃料电池汽车技术的开发与应用,取得了较为丰硕的成果,也是氢燃料汽车市场化应用较为成功的国家之一。其中,丰田公司的 Mirai 和本田公司的 Clarity 车型,都处于国际领先水平^[47]。2016 款丰田 Mirai 采用 113 kW 质子交换膜燃料电池,续航里程可到 502 km,2017 款本田 Clarity 的续航里程达到了 589 km,综合氢耗为 $3.46\text{ L}\cdot(100\text{ km})^{-1}$,已具备与传统能源汽车竞争的优势。

在欧洲清洁都市交通(CUTE)及欧盟其他相关项目的支持下,欧盟多个国家和地区都开展了燃料电池公共汽车的示范运行,推动了燃料电池汽车关键技术的发展与进步^[48]。德国戴姆勒-奔驰于 2004 年在多个地区投入了 60 辆 F-cell 燃料电池轿车进行试验,其搭载的高扭矩电动机输出功率高达 100 kW,续航里程可达 400 km;另外,2011 年生产的 Citaro 燃料电池客车,燃料电池耐久性达到了 $1.2\times 10^4\text{ h}$ ^[49],氢耗为 $10\sim 14\text{ kg}\cdot(100\text{ km})^{-1}$,性能达到国际先进水平。

与此同时,各国氢能基础设施建设与车辆推广同步实施,超前部署以满足商业化发展需要。美国、

日本、德国等纷纷制定了各自的加氢站建设规划,以配合燃料电池汽车的推广应用。美国到 2015 年已建成加氢站 68 座,并计划于 2018 年建成至少 100 座加氢站,达到单站日产 500 kg 以上的氢气产量;截至 2015 年,日本已在名古屋、东京、大阪和福冈 4 个城市之间建造了 100 座加氢站,并计划在 2025 年前扩大到 1 000 座,到 2030 年计划建成覆盖全国的加氢站;德国在 2015 年已建成加氢站 300 座,到 2017 年,加氢站数量已超过 1 000 座^[44,50]。

从国际燃料电池汽车发展的总体情况来看,全球主要汽车企业基本已完成了燃料电池汽车的性能研发阶段,车辆性能已达到传统汽车水平。其中,燃料电池乘用车的性能已接近用户接受水平,市场成熟度逐步得到了提升;燃料电池商用车的可靠性、经济性和便利性基本满足商业推广需求。今后的发展重点主要从 4 个方面考虑:①燃料电池系统性能的进一步提升,包括燃料电池输出功率的提升、燃料电池寿命的提升以及燃料电池低温启动性能的提升等;②燃料电池系统成本的降低,通过技术创新或开发高性能、低成本的新型燃料电池组件来降低系统成本;③加氢基础设施与氢能产业链的完善,加大加氢基础设施的建设力度,并对“制氢-运氢-储氢-用氢”全产业链进行配套与完善;④燃料电池汽车的商业化推广与示范,继续完善燃料电池汽车商业推广模式,建立相关推广与示范计划。

2.3.2 国内外技术差距对比分析

中国燃料电池汽车经过多轮商业化示范运行与考核应用,已取得了良好的效果,整车性能逐步提升,部分性能指标接近国际先进水平。如表 9 所示,现阶段中国燃料电池汽车在部分性能上与国际水平基本同步,在燃料电池系统输出功率与低温启动性能等方面仍与发达国家技术水平相距甚远。

从技术路线来看,中国车用燃料电池系统采用“电-电”混合的驱动模式,即燃料电池系统与动力蓄电池混合驱动的方式,以克服燃料电池系统输出功率不足对整车性能的影响,待燃料电池系统技术突破之后,再逐步加大燃料电池系统在混合系统中所占比例,最终实现燃料电池系统全功率驱动。国内外燃料电池汽车发展技术路线对比如表 10 所示。

从车用燃料电池系统关键技术来看,国内外技术差距主要表现在燃料电池系统输出功率、燃料电池系统寿命、燃料电池系统冷启动能力及燃料电池系统成本 4 个方面。目前,国外燃料电池系统的功

表 9 国内外典型燃料电池汽车主要技术参数对比^[51]

Table 9 Comparison of Main Technical Parameters of Typical Fuel Cell Vehicles at Domestic and Foreign^[51]

参数	通用 Equinox	丰田 Mirai	奔驰 F-cell	上汽集团 荣威 750	上汽集团 荣威 950
整备质量/kg	1 800	1 850	1 718	1 833	1 890
0~100 km·h ⁻¹ 加速时间/s	12.0	9.6	11.3	15.0	12.0
最高车速/(km·h ⁻¹)	160	175	170	150	160
燃料电池功率/kW	92	114	100	30	30
一次加氢续航里程/km	320	502	400	300	400
储氢压力/MPa	70	70	70	35	70
电机功率/kW	94	113	100	90	110
电机转矩/(N·m)	320	335	290	210	275
冷启动温度/℃	-30	-30	-25	-10	-20

表 10 国内外燃料电池汽车发展技术路线对比

Table 10 Comparison of Development Technology Routes of Fuel Cell Vehicles at Domestic and Foreign

对比项	中国技术路线		国外技术路线	
	乘用车	客车	乘用车	客车
驱动系统类型	能量 混合型	能量 混合型	燃料电池 全功率驱动	燃料电池 全功率驱动
燃料电池最大 功率/kW	55	80	114	250
燃料电池(FC)与蓄 电池(BAT)混合度	FC 50% 左右	FC 50% 左右	FC 100%	FC 100%
燃料电池系统 寿命/h	1 000 左右	3 000 左右	>5 000	>12 000

率输出能力基本在 80~100 kW,中国仅为 50 kW 左右,而且,质量比功率与体积比功率也远低于国外先进水平。燃料电池系统寿命方面,国外在道路试验条件下已超过 1.2×10^4 h,中国水平仅为 5 000 h 左右;冷启动方面,国外冷启动温度为-30℃,中国普遍实现了一10℃低温存储与启动,部分达到-20℃;燃料电池系统成本方面,由于关键材料尚未实现国产化,部件制备技术落后,系统耐久性与可靠性无法保证,导致中国燃料电池系统成本居高不下,缺乏市场竞争力。

此外,加氢基础设施的建设与氢燃料产业链的完善方面,与国外相比也存在一定差距。截至 2016 年中国仅有 6 座加氢站,与其他国家相比,差距较大;另外,在氢燃料全产业链的完善与配套环节也与国外有着不小的差距。如:国外已基本摒弃了各种化石燃料重整制氢的技术途径,更多采用车辆直接储存氢气的方案,而中国在这一方面发展相对较为

缓慢,同时,中国储氢技术也远远落后于国外。

2.4 新能源汽车关键零部件

2.4.1 国外技术现状与发展趋势

(1)动力电池

当前,美国、德国、日本和韩国是国际上动力电池产业与技术比较发达的国家。总体来看,美国和德国侧重于关键技术的创新研发,在电池制造方面较为薄弱;日韩两国在动力电池产业布局上比较全面,研发与制造实力同样雄厚,技术方面具有领先优势^[52]。特斯拉 Model 3 车型匹配的松下电池采用 21700 电芯,能量密度达到 $300 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$,成本在 $1.5 \text{ 元} \cdot (\text{W} \cdot \text{h})^{-1}$ 以内;雪佛兰 Bolt 搭载的 LG 电池具有 $60 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的总能量,能量密度达 $138 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$,车辆续驶里程超过 320 km,成本在 $1.7 \text{ 元} \cdot (\text{W} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右。另外,日本 AESC 公司为日产 Leaf 匹配的动力电池容量为 $33.1 \text{ A} \cdot \text{h}$,能量密度达到 $157 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$;LG 化学为雪佛兰 Volt 配套的电池容量为 $15 \text{ A} \cdot \text{h}$,能量密度达 $145 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$;三星 SDI 为德国 BMW、大众、奔驰等配套 $27 \text{ A} \cdot \text{h}$ 的锂离子动力电池,成为国际主流电动汽车电池供应商。

从各国制定的未来动力电池发展路线看,主要以提高动力电池能量密度为主要目标。其中,美国能源部支持的 Battery 500 计划,将通过 5 年时间打造出比能量为 $500 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的动力电池系统;日本的动力电池技术路线图中,规划到 2020 年和 2030 年,动力电池能量密度分别达到 250, 500 $\text{W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$;德国在国家电驱动平台计划中提出动力电池系统的 2020 年发展目标为 $130 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$;韩国将在动力电池单体、模块、系统及关键材料四大领域实施巨额投资,进行攻关研究。

从发展趋势来看,基于新材料、新结构的高比能电动汽车成为各国竞争的焦点^[53]。未来动力电池技术发展主要集中在高性能电池材料、高性能锂离子动力电池、高性能电池包、电池管理系统、电池热管理技术、电池标准体系、下一代锂离子动力电池、电池梯级利用回收技术、电池生产制造技术及装备等方面。

(2)电驱动系统

目前,国际上电动汽车驱动电机仍以永磁电机和感应电机为主。由于永磁电机具有效率高、功率密度高、功率因数大等优点,越来越多的电动汽车趋向于采用永磁电机驱动系统,但仍然有不少车型采用感应电机^[17,28]。

从产品应用来看,特斯拉 Model S 采用的异步电机,最大功率接近 300 kW,最大转矩为 $370 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。另外,德国大陆集团研制的车用电动磁同步电机,峰值功率可达 70 kW,最高转矩 $220 \text{ N} \cdot \text{m}$,最高转速 $12\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

轮边/轮毂电机应用方面,全球搭载轮边/轮毂电机的量产车为数不多,尚处于试验研发阶段^[16,33]。法国 Michelin 开发的集成悬浮电机、驱动电机及减速机构的电动轮,功率密度达到 $4.0 \text{ kW} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上;英国 Protean 轮毂电机采用一体轮结构,电机输出功率和扭矩分别可达到 80 kW 与 $800 \text{ N} \cdot \text{m}$;德国 Fraunhofer 将轮毂电机与电力电子控制器实施一体化集成,其功率和转矩分别达到 55 kW 和 $700 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

从电机控制器来看,国际先进水平控制器的体积比功率为 $12 \sim 16 \text{ kW} \cdot \text{L}^{-1}$ 。目前,利用碳化硅高温、高效和高频的特性来提升电机控制器功率密度和效率是未来电机控制器技术发展的主要趋势之一。随着以碳化硅和氮化镓为代表的第 3 代宽禁带功率半导体技术及产品的快速发展,国外企业(特别是日本和美国)不断推出碳化硅电力电子集成控制器或充电机产品样机^[28]。

2.4.2 国内外技术差距对比分析

(1)动力电池

从动力电池性能看,特斯拉和松下研发的 21700 锂离子电池已应用在 Model 3 车型上,能量密度达到 $300 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$,中国乘用车领域尚没有应用案例;中国三元电池主要以 NCM333 和 NCM523 为主,电池单体能量密度从 $200 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 向 $250 \sim 300 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 迈进,国际方面,NCM622 已开始宝马 i3 上应用,NCM811 开始小范围适用,电池单体能量密度将进一步提升^[52-53]。

总体来讲,中国锂离子动力电池产业链初具规模,能量型动力电池单体技术指标达到国际先进水平,但锂离子电池的设计水平、锂离子电池生产设备、锂离子电池原材料技术水平、锂离子电池大规模生产控制能力、系统集成能力仍有赶超空间。另外,在电池包设计、电池系统热管理、高压电安全管理、电池管理系统的剩余电量估计算法、故障判断和预警等技术方面亟待提升。

(2)电驱动系统

从电驱动系统性能看,中国电机基本性能与国际一流水平仍有差距。中国电机产品的峰值比功率大多在 $2.8 \sim 3.0 \text{ kW} \cdot \text{kg}^{-1}$,连续比功率在 $1.2 \sim$

$1.6 \text{ kW} \cdot \text{kg}^{-1}$, 电机最高转速可以达到 $12\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 而国际主流汽车企业采用的驱动电机峰值比功率达到 $3.8 \text{ kW} \cdot \text{kg}^{-1}$, 连续比功率可达 $2.4 \sim 2.8 \text{ kW} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最高转速达到 $14\,000 \sim 16\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。此外, 中国规模化生产的电机驱动控制器体积比功率为 $5 \sim 8 \text{ kW} \cdot \text{L}^{-1}$, 仅为国际先进水平的 50% [17,28]。

总体来讲, 中国驱动电机与国际水平差距不大, 但电机控制器技术急需追赶国外, 亟待在碳化硅半导体材料、控制器技术以及高温电力电子基础理论研究等方面展开深入研究。

通过对比国内外新能源汽车技术发展现状可知, 中国纯电动与插电式混合动力汽车整车性能已接近国际先进水平, 但是, 在关键零部件与核心技术方面与国外存在差距。此外, 燃料电池汽车技术的发展进程与技术水平远落后于国外, 特别是在燃料电池系统关键零部件以及氢能基础设施的产业链完善等方面具有较大的提升空间。

3 中国新能源汽车发展主要问题剖析

现阶段, 中国新能源汽车产业已由政策驱动下的培育期逐步进入到市场驱动下的快速增长期。通过与国外新能源汽车发展现状的对比分析发现, 中国新能源汽车的发展尚存在一些问题, 可概括为 6 个方面的矛盾, 如图 9 所示。通过深度剖析中国新能源汽车产业与技术的矛盾症结, 正视自身发展中存在的综合问题, 打破僵局, 消除顽疾, 才能真正将新能源汽车打造成汽车强国的有力支柱。

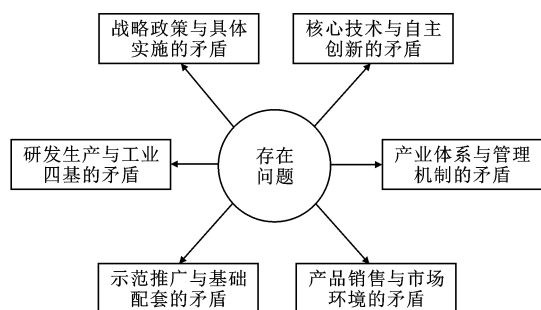


图 9 中国新能源汽车产业与技术发展主要问题

Fig. 9 Main Issues in New Energy Vehicle Industry and Technology Development of China

3.1 战略政策与具体实施的矛盾

新能源汽车的快速发展离不开国家顶层战略设计与政策扶持支持, 习总书记在上海汽车集团考察时强调, 发展新能源汽车是中国从汽车大国迈向汽车强国的必由之路。近年来, 国家已经颁布了“中国

制造 2025”以及“汽车产业中长期规划”等一系列战略政策, 明确指出了要在新一轮科技革命和产业变革的机遇下, 把中国建设成为引领世界制造业发展的制造强国。面向新能源汽车的政策体系框架不断完善, 核心技术水平不断提高, 产业结构调整不断升级, 新能源汽车顺势发展, 实现了产销快速增长。但在具体实施过程中, 缺乏精准的新能源汽车产业发展战略对其进行精确指导, 各企业责任意识、创新意识、人才意识参差不齐; 部分企业发展过程中追求短暂利益, 骗取国家补贴; 部分政府地方保护主义严重, 出现多头管理乱象; 部分企业未能有效执行相应标准; 部分市场环境不透明; 配套设施未能协同发展; 群众消费不信任等具体实施障碍, 严重迟滞了新能源汽车产业的健康有序发展。

3.2 核心技术与自主创新的矛盾

汽车是高新技术的载体, 基础零部件是推动汽车技术创新的主力, 中国新能源汽车产业在基础共性技术、核心关键技术、前瞻机密技术上与国外还存在较大差距, 技术研发不够深入, 如整车一体化电动底盘, 整体技术相对落后; 机电耦合装置、电机系统等核心零部件以及混动系统集成方面存在一定不足; 动力电池单体一致性、成组技术存在明显差距; 燃料电池的性能、寿命以及成本还有巨大的提升空间。其次, 产业自主创新能力不突出, 核心知识产权受限于人, 如企业研发投入少, 多以传统汽车改造为主, 未能颠覆已有技术积累, 知识产权保护意识弱, 未能很好地对成果进行保护; 最后, 人才队伍建设有待加强, 尤其是研发和技术人才缺乏, 难以适应产业快速变革。

3.3 研发生产与工业四基的矛盾

中国整车和零部件产业发展长期失衡, 早期战略以发挥整车核心龙头带动作用为主, 一定程度上忽视了对零部件产业的有效战略部署, 导致到现在为止, 零部件产业发展仍然是制约汽车产业发展的核心问题, 新能源汽车研发生产方面与工业四基(核心基础零部件、先进基础工艺、关键基础材料和产业技术基础)之间的发展不平衡。在核心基础零部件方面, 附加值高的关键零部件/元器件几乎全部依靠进口; 在先进基础工艺方面, 如激光焊接、先进挤压、真空铸造、自主涂装等工艺技术还有待完善, 部分先进技术尚处空白; 在关键基础材料方面, 国产材料性能波动性大, 稳定性低, 纯净度差, 虽能基本满足生产需求, 但质量远不如发达国家, 受限于技术水平, 新材料(如碳纤维材料、纤维增强复合材料等轻质高

强材料)应用有限;在产业技术基础方面,中国标准水平与发达国家仍存在一定差距,公共服务平台能力尚弱,产品数据采集、分析、管理数据库支撑严重不足。

3.4 产业体系与管理机制的矛盾

新能源汽车产业相比于传统汽车产业,进一步扩大了汽车产业的边界,涉及产业链上游包括能量系统(高性能电池材料、动力电池)、驱动系统(驱动电机)、控制系统(电池管理系统、电控制系统)和基础设施(充电站、充电设备)等细分环节,再往上可延伸到锂、稀土、镍、锰等金属矿产资源加工,往下包括新能源汽车整车运营及服务、动力电池回收利用等环节。产业体系的不断完善与管理机制的不相适应带来了新的问题,其中包括相关企业的准入资格,传统企业未获得行业准入进行转型升级是否合理,严格审批制度与市场快速变化是否相匹配;产品认证标准,资质参差的企业如何生产经过统一认证标准的产品,如何保证产品的可靠性,二手新能源汽车评估如何标准化;产品回收处理等方面,动力电池回收由谁负责,如何促进企业落实生产者责任延伸制;同时还存在多头管理现象,管理职能重合交叉,部门之间缺乏沟通,导致产业体系发展处处受限,不利于新能源汽车产业体系的完善壮大。

3.5 示范推广与基础配套的矛盾

中国新能源汽车产业目前发展的着力点集中于汽车的生产与销售方面,各地迅速布局新能源整车厂,并且各地政府大力示范推广应用新能源汽车,而忽略了对充电设施的发展,导致大部分地方出现“有车无桩”的现象,即使有些地方为了“示范”建设了大量充电桩,但所建充电桩布局并不合理,导致使用率低,有些充电桩甚至“无用”,使得基础设施配套未能与新能源汽车协同发展。

3.6 产品销售与市场环境的矛盾

在新能源汽车领域,地方保护导致的市场分割是困扰新能源汽车产业健康发展的一大顽疾。同时,由于新能源汽车产品应用率相对较低,产品性能的市场验证性不足,产品质量管理得不到保证,消费者对于新能源汽车的产品信任也影响了新能源汽车的销售。如,电动汽车并不能很好地解决驾驶人里程焦虑的问题;燃料电池汽车并不能有效消除驾驶人安全担忧等问题;大多汽车维修师技术水平依然停留在解决传统汽车问题的层面,未能及时更新技术,新能源汽车维修保养相关职业技术人才存在很大缺口。

4 中国新能源汽车发展对策建议

新能源汽车产业与技术在中国的发展已相对成熟,体量规模在全球也占有一定的优势,但在发展过程中即不可夜郎自大,又不能妄自菲薄。针对中国新能源汽车产业与技术发展存在的6个问题,提出切实可行并能有效解决问题的对策建议,对于中国新能源汽车产业与技术高标准、高要求、高效率、高质量的发展具有一定的指导意义(图10)。

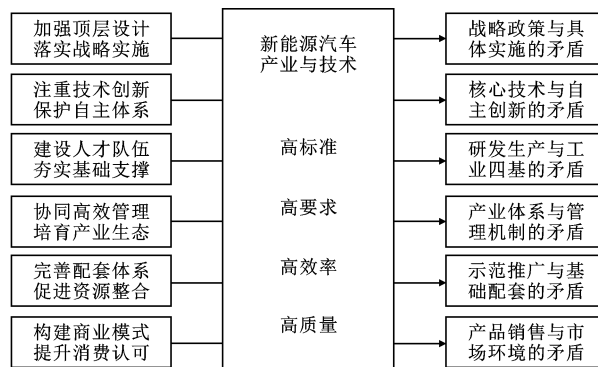


图10 中国新能源汽车产业与技术发展对策建议

Fig. 10 Suggestions on China's New Energy Vehicle

Industrial and Technology Development

4.1 加强顶层设计,落实战略实施

顺势把握新一轮技术革命与产业升级的历史机遇,加强新能源汽车产业顶层设计,凝聚传统产业与新能源相关产业核心资源和力量,出台新能源产业扶持政策,税收激励政策等正向鼓励政策,以及征收拥堵费、排污费等惩罚政策相结合的多元化政策组合方式,合理布局新能源汽车上下游企业,打造有影响力和示范力的新能源汽车产业群。同时,利用企业投入、社会资本、国家科技计划(专项、基金等)统筹组织企业、高校、科研院所等协同攻关,重点围绕动力电池与电池管理系统、电机驱动与电力电子总成、电动汽车智能化技术、燃料电池动力系统、插电/增程式混合动力系统和纯电动动力系统等6个创新链进行任务部署。推进企业标准体系和标准自主化建设,建设汽车产业联合创新中心和关键共性重大技术平台。各参与主体应按照各自的责任合理分工、高效协作,共同推进政策方案的落地实施。

4.2 注重技术创新,保护自主体系

强化自主创新体系建设,加强自主研发项目、自主研发成果市场转化的财税等支持力度。通过加大引技引智,深化产学研合作等,强化产业基础技术、关键技术、核心技术的攻关,夯实产业基础。中国自主汽车企业应全面提升新能源汽车产品的可靠性和

品质质量,加强研究最前沿的新材料、新工艺等基础技术,鼓励整零企业协同创新,加强全产业链技术突破,实现零部件“应用技术”与“平台技术”开发。以企业技术中心为载体,积极打造集零部件原材料、生产装备、模具等协同生产制造链,搭建新能源汽车零部件企业标准制定、技术开发、工程化应用、测试评价等协同平台,构建产学研用的联合创新服务平台,加强自主知识成果产权保护,构筑自主技术壁垒。同时,立足自主,加强国际协同,寻找合适途径开展国际合作,引导企业对各阶段制约产业自主发展的应用技术进行攻关,力争补齐短板,全面掌握新能源汽车重大关键技术。

4.3 建设人才队伍,夯实基础支撑

在国家政策的大力推动下,中国汽车产业规模已处于世界领先,部分核心技术领域取得突破,甚至具备了竞争优势,进入了由大规模向高质量的发展阶段。在此基础上,需要大力建设人才队伍,持续夯实基础支撑,提升新能源汽车发展的质量和效益。完善人才培养体系,贯通组织管理、生产研发、营销服务、维修检测等产业上下游人才需求环节;加强核心人才储备,引育优秀人才,充分发挥各类人才作用;建设一流人才队伍,培养多层次、多专业、多技能融合的综合型人才。同时还需因地制宜大力推进中国新能源汽车基础零部件基地、新能源汽车基础材料园区建设,促进新能源汽车基础产业的集群化、集聚化发展,下功夫从根本上改变中国新能源汽车产业基础材料研究缺失、工艺技术创新体系不健全的面貌,积极做好前沿新材料领域知识产权布局,加大技术创新成果向标准或专利的转化力度,提高对基础制造工艺的重视程度,加强工艺研究,注重工艺与装备的密切结合,推进汽车制造工艺革新,着力解决基础制造工艺的关键问题,建立基础工艺创新体系,利用现有资源建立关键共性基础工艺研究机构,开展先进成型、加工等关键制造工艺联合攻关,夯实新能源汽车产业基础支撑体系。

4.4 协同高效管理,培育产业生态

产学研政企合作能够发挥政府、企业和学校的各自优势,形成强大的研究、开发、生产一体化的先进系统并在运行过程中体现出综合优势,是推动新能源汽车科技进步与自主品牌创新的重要手段和必由途径。参与方共同培育新型新能源汽车产业生态,完成研发设计、生产制造、物流配送、市场营销、客户服务一体化产业全生命周期升级转型,形成新能源汽车与新一代信息技术、智能交通、能源、环保

等融合发展的新型智慧产业生态体系。优化地方政府管理职能,建立健全部门协调联动机制,形成科学管理体系;企业应积极推进自主汽车产业国际化进程,在稳定中国市场份额的同时,重视海外市场发展,以扩大总体销量规模。借助“一带一路”等国家发展倡议,从布局第三世界国家开始,逐步进入中等发达国家,最后进军发达国家,层层推进扩展市场,提升自主品牌国际影响力。

4.5 完善配套体系,促进资源整合

积极引导新能源汽车行业共同构建生产责任延伸、基础配套协同体系,规范并维护新能源汽车产业链条健康发展。完善新能源汽车安全监控、预警和处理机制;加强充电桩、充电设施网络布局的合理构建;解决充电接口和协议兼容性问题;建立国家充电基础设施管理部门,形成统一的平台,实现充电和结算的互联互通,共享互用,提升对未来新技术的兼容性,并与可再生能源发电一体化进行规划;同时加强新能源汽车的推广应用,促进不同企业进行优势资源整合。

4.6 构建商业模式,提升消费认可

构建合理有效的商业模式是决定新能源汽车产业能否可持续发展的关键环节。随着补贴的大幅退坡,新能源汽车市场受到了较大的冲击,唯有推行新能源汽车积分政策、用户补贴、税收减免等正向鼓励政策,构建以市场驱动为导向的新型商业模式,才能引领行业不断壮大。另外,公众对新能源汽车产品还存在一定程度的不信任,汽车企业可通过实地参观、性能检测、知识普及等方式,积极消除公众的担忧与顾虑,调动公众购买意愿。同时,质量监督机构应加强产品认定,严把质量关,防范信任风险发生,社会应为新能源汽车创造绿色消费的氛围,宣传补贴政策、发布行业报告等。政府应助力积极培育新能源汽车产品市场需求,释放新能源汽车产品市场潜力,探索共享型商业模式。

5 中国未来新能源汽车发展路径

经过近几年政策的推动和产业的快速升级,中国在新新能源汽车领域成绩显著。新能源汽车产销在全球市场占比均达到50%以上。中国新能源汽车产业整体技术水平显著提升,纯电动乘用车主流车型续航能力提升到250 km以上,插电式混合动力乘用车部分产品性能指标已与国外公司产品不相上下,新能源商用车突破了关键零部件防护、热管理、结构安全、涉水安全等关键技术,处于世界领先地

位,氢燃料电池汽车开展了多轮示范运行,全产业链研发及协同不断推进。自主研发能力不断增强,在电机、电池、电控等关键零部件领域已经形成了较为

完整的自主化产业体系,技术水平基本与国际同步。未来中国新能源汽车产业与技术发展将主要从以下几个方面开展,如图 11 所示。

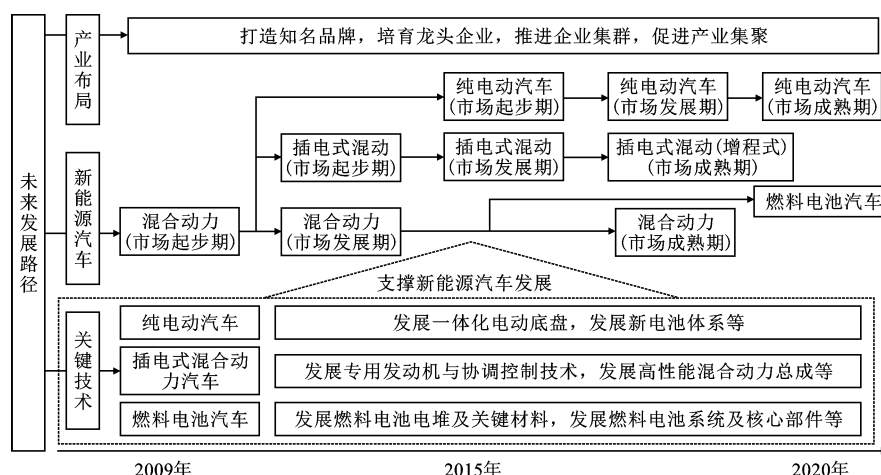


图 11 中国新能源汽车产业与技术未来发展路径

Fig. 11 Future Development Path of China's New Energy Vehicle Industry and Technology

5.1 新能源汽车产业布局

合理布局新能源汽车整车企业以及基础零部件配套企业,形成关键零部件的模块化供应基础,促进企业集群化,产业集聚化,打造知名品牌、培育龙头企业,积极推进新能源汽车产业链的合理布局。

5.2 纯电动汽车

纯电动汽车应着重发展一体化电动底盘,对悬架、转向、电动附件进行重新匹配,研制先进电机与电机控制器,生产高性能动力电池和电池管理系统,提升整车总体布置与性能集成优化技术,探索掌握电机先进设计技术,推动安全便捷、节能高效、高功率密度的充电基础设施的构建,重视 350 kW 的大功率充电技术和关键设备开发,建立贯通原材料、生产装备、电池产业的电动汽车产业链。

5.3 插电式混合动力汽车

插电式混合动力汽车应着重发展混合动力发动机、机电耦合装置、电机系统、制动能量回收系统以及功率控制单元等关键部件,提升整车控制技术、混动集成技术、分布式驱动控制技术等,优化动力输出平顺性、节油效果、整车 NVH 等性能,不断降低混合工况油耗,提升续航里程,推进电动汽车产品可靠性和耐久性。同时构建插电式混合动力汽车整车及关键零部件材料基础数据库、测试评价等共性平台,推动高性能插电式混合动力汽车动力总成产业化。

5.4 燃料电池汽车

燃料电池汽车应着重发展燃料电池电堆及关键材料、燃料电池系统及核心部件、燃料电池汽车及关

键零部件,掌握高效氢气制备、纯化、储运和加氢等关键技术,掌握低成本长寿命电催化剂技术、聚合物电解质膜技术、低铂载量多孔电极与膜电极技术、高一致性电堆及系统集成技术,提高燃料电池功率,降低燃料电池系统成本,建立完备的燃料电池材料、部件、系统的制备与生产产业链。

6 结 语

随着新能源汽车补贴政策的退坡、双积分政策的实施以及汽车进口关税的降低,中国新能源汽车的发展将面临更大的挑战,要在新一轮产业与技术变革中把握机遇还需重点关注以下问题:

(1)积极应对补贴退坡政策。新能源汽车补贴退坡在短期内将造成企业利润的降低,但是,也为新能源汽车产业链的深化改革带来新机遇。从企业层面来讲,应加大技术研发力度,掌握关键核心技术,加快新能源汽车产业与技术的升级;从政策角度来讲,应当继续完善新能源汽车相关产业政策,加快市场模式的转变,激发市场竞争活力,促进优胜劣汰,让技术领先、产品优质的企业持续健康发展。

(2)抓住汽车进口关税降低带来的发展机遇。关税的降低,将促进中国汽车产业结构的调整和转型升级,为新能源汽车发展带来新的契机。车企应当顺势而起,以提质增效为目标,提高自主创新能力,提升中国汽车产业的国际竞争力。

(3)注重企业规模与效益的同步发展。中国新能源汽车企业星罗棋布,企业规模效益普遍较低,缺

乏核心竞争力,在新能源汽车发展热潮的推动下,产业规模急剧扩张,容易出现投资过热的现象。因此,企业在快速扩张的同时,应注重产品核心竞争力的提升,发展过程中应保证规模和效益并驾齐驱,从而打造出具有国际竞争力的知名品牌。

(4)理性对待燃料电池汽车的发展。对燃料电池汽车的发展应有一个清醒的认识,中国燃料电池汽车的产业化、氢燃料电池关键技术的突破、氢燃料全产业链的完善尚需很长时间,另外,氢燃料电池汽车的安全性、可靠性有待提升。

(5)着力于动力电池关键技术提升。作为新能源汽车产业重点环节,开发高比能量动力电池是提升电动汽车续航里程的直接手段;此外,动力电池的回收利用也将成为未来新能源汽车产业发展的一个重要问题。后续应逐步建立全国性的动力电池回收网络,形成有效的回收模式,健全相应的市场规范。

(6)加快服务平台的建设。新能源汽车及其基础设施服务平台的建设严重滞后,相关配套设施及运营服务体系尚未完善,远程监控与故障维修快速响应系统的建设进程也需加快推进。

参考文献:

References:

- [1] 中国汽车工业协会. 2017 年汽车工业经济运行情况 [EB/OL]. (2018-01-11)[2018-02-23]. <http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057585/n3057589/c6011430/content.html>.
China Automotive Industry Association. Economic Operations of the Automotive Industry in 2017 [EB/OL]. (2018-01-11) [2018-02-23]. <http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057585/n3057589/c6011430/content.html>.
- [2] TABASSUM-ABBASI, PREMALATHA M, ABBASI T, et al. Wind Energy: Increasing Deployment, Rising Environmental Concerns [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 31: 270-288.
- [3] SHAIKH F, JI Q, FAN Y. Evaluating China's Natural Gas Supply Security Based on Ecological Network Analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139: 1196-1206.
- [4] 易兰,李文英,冯杰,等.煤基液体油分离技术研究进展[J]. *化工学报*, 2017, 68(10): 3678-3692.
YI Lan, LI Wen-ying, FENG Jie, et al. Research Progress on Coal-based Liquid Oil Separation Technology [J]. *CIESC Journal*, 2017, 68 (10): 3678-3692.

- [5] DOWELL N M, FENNELL P S, SHAH N, et al. The Role of CO₂ Capture and Utilization in Mitigating Climate Change [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7 (4): 243-249.
- [6] DONG H, DAI H, LIANG D, et al. Pursuing Air Pollutant Co-benefits of CO₂, Mitigation in China: A Provincial Levelled Analysis [J]. *Applied Energy*, 2015, 144: 165-174.
- [7] JIAN K H. Global Low-carbon Transition and China's Response Strategies [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2016, 7 (4): 204-212.
- [8] 王小峰,于志民.中国新能源汽车的发展现状及趋势[J]. *科技导报*, 2016, 34(17): 13-18.
WANG Xiao-feng, YU Zhi-min. Development Status and Trend of China's New Energy Vehicles [J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34 (17): 13-18.
- [9] ZHANG X, BAI X. Incentive Policies from 2006 to 2016 and New Energy Vehicle Adoption in 2010-2020 in China [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 70: 24-43.
- [10] MA S C, FAN Y, FENG L, et al. An Evaluation of Government Incentives for New Energy Vehicles in China Focusing on Vehicle Purchasing Restrictions [J]. *Energy Policy*, 2017, 110: 609-618.
- [11] DU J, OUYANG D. Progress of Chinese Electric Vehicles Industrialization in 2015: A Review [J]. *Applied Energy*, 2017, 188: 529-546.
- [12] LIU Z W, HAO H, CHENG X, et al. Critical Issues of Energy Efficient and New Energy Vehicles Development in China [J]. *Energy Policy*, 2018, 115: 92-97.
- [13] ZHOU Y, WANG M, HAO H, et al. Plug-in Electric Vehicle Market Penetration and Incentives: A Global Review [J]. *Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change*, 2015, 20 (5): 777-795.
- [14] 李文策,白雪,齐亮,等.新能源汽车新时代新征程:2017 回顾及未来展望[J]. *北京理工大学学报:社会科学版*, 2018, 20(2): 1-7.
LI Wen-ce, BAI Xue, QI Liang, et al. New Energy Vehicle New Era and New Expedition: 2017 Review and Future Outlooks [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology: Social Sciences Edition*, 2018, 20 (2): 1-7.
- [15] DUBAL D P, AYYAD O, RUIZ V, et al. Hybrid Energy Storage: The Merging of Battery and Supercapacitor Chemistries [J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, 44 (7): 1777-1790.
- [16] 王成,朱成,方凯正.车用动力电池产业发展概况

- [R]. 北京:中国汽车技术研究中心,2017.
- WANG Cheng, ZHU Cheng, FANG Kai-zheng. Development Overview of Vehicle Power Battery Industry [R]. Beijing: China Automotive Technology and Research Center, 2017.
- [17] 贡俊,张舟云. 车用驱动电机产业发展动态[R]. 北京:中国汽车技术研究中心,2017.
- GONG Jun, ZHANG Zhou-yun. Industry Development Trend of Automotive Drive Motor [R]. Beijing: China Automotive Technology and Research Center, 2017.
- [18] 张帆,李康,秦雪亮,等. 充电基础设施产业发展现状与趋势展望[R]. 北京:中国汽车技术研究中心,2017.
- ZHANG Fan, LI Kang, QIN Xue-liang, et al. Development Status and Trend of Charging Infrastructure Industry [R]. Beijing: China Automotive Technology and Research Center, 2017.
- [19] MICARI S, POLIMENI A, NAPOLI G, et al. Electric Vehicle Charging Infrastructure Planning in a Road Network [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 98-108.
- [20] CHENG M, TONG M. Development Status and Trend of Electric Vehicles in China [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017, 3 (2): 1-13.
- [21] YUAN X, LIU X, ZUO J. The Development of New Energy Vehicles for a Sustainable Future: A Review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 298-305.
- [22] DU J, OUYANG M, CHEN J. Prospects for Chinese Electric Vehicle Technologies in 2016-2020: Ambition and Rationality [J]. Energy, 2017, 120: 584-596.
- [23] 欧阳明高. 中国新能源汽车的研发及展望[J]. 科技导报, 2016, 34(6): 13-20.
- OUYANG Ming-gao. New Energy Vehicle Research and Development in China [J]. Science & Technology Review, 2016, 34 (6): 13-20.
- [24] 周玮. 中国新能源乘用车行业 2016 年发展综述[R]. 北京:中国汽车技术研究中心,2017.
- ZHOU Wei. A Summary of the Development of China's New Energy Passenger Vehicle Industry in 2016 [R]. Beijing: China Automotive Technology and Research Center, 2017.
- [25] 李鲁苗,朱光海,李飞强,等. 中国新能源客车行业 2016 年发展综述[R]. 北京:中国汽车技术研究中心,2017.
- LI Lu-miao, ZHU Guang-hai, LI Fei-qiang, et al. A Summary of the Development of China's New Energy Bus Industry in 2016 [R]. Beijing: China Automotive Technology and Research Center, 2017.
- [26] 李建秋,方川,徐梁飞. 燃料电池汽车研究现状及发展[J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5(1): 17-29.
- LI Jian-qiu, FANG Chuan, XU Liang-fei. Research Status and Development of Fuel Cell Vehicles [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014, 5 (1): 17-29.
- [27] 刘艳秋,王贺武,于丹. 燃料电池发展现状与趋势[R]. 北京:中国汽车技术研究中心,2017.
- LIU Yan-qiu, WANG He-wu, YU Dan. Development Status and Trends of Fuel Cells [R]. Beijing: China Automotive Technology and Research Center, 2017.
- [28] 节能与新能源汽车技术路线战略咨询委员会,中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图[M]. 北京:机械工业出版社,2016.
- Energy Saving and New Energy Vehicle Technology Route Strategy Advisory Committee, China Automotive Engineering Institute. Road Map of Energy Saving and New Energy Vehicle Technology [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2016.
- [29] ANDWARI A M, PESIRIDIS A, RAJOO S, et al. A Review of Battery Electric Vehicle Technology and Readiness Levels [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 78: 414-430.
- [30] YUAN X, LI L, GOU H, et al. Energy and Environmental Impact of Battery Electric Vehicle Range in China [J]. Applied Energy, 2015, 157: 75-84.
- [31] 李泓,郑杰允. 发展下一代高能量密度动力锂电池-变革性纳米产业制造技术聚焦长续航动力锂电池项目研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(9): 1120-1127.
- LI Hong, ZHENG Jie-yun. Research Progress of Developing the Next Generation of High-energy Density Power Lithium Batteries-transformative Nano-industry Manufacturing Technology Focusing on Long Endurance Power Lithium Batteries [J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2016, 31 (9): 1120-1127.
- [32] LUO X, WANG J, DOONER M, et al. Overview of Current Development in Electrical Energy Storage Technologies and the Application Potential in Power System Operation [J]. Applied Energy, 2015, 137: 511-536.
- [33] 孙悦超. 电动汽车驱动方式及未来发展[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(11): 98-102.

- SUN Yue-chao. Electric Vehicle Driving Mode and Future Development [J]. Motor and Control Applications, 2016, 43 (11): 98-102.
- [34] 方 川,徐梁飞,李建秋,等. 典型燃料电池轿车动力系统的核心技术[J]. 汽车安全与节能学报, 2016, 7 (2): 210-217.
- FANG Chuan, XU Liang-fei, LI Jian-qiu, et al. Key Technologies of Typical Fuel Cell Car Power System [J]. Journal of Automotive Safety and Energy Conservation, 2016, 7 (2): 210-217.
- [35] EISLER M N. A Tesla in Every Garage[J]. IEEE Spectrum, 2016, 53 (2): 34-55.
- [36] ZEFF S. My Electric Journey with a Nissan Leaf: A Classic Early-adopter Experience [J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2016, 5 (3): 79-80.
- [37] SAKTI A, MICHALEK J J, FUCHS E R H, et al. A Techno-economic Analysis and Optimization of Li-ion Batteries Forlight-duty Passenger Vehicle Electrification [J]. Journal of Power Sources, 2015, 273 (30): 966-980.
- [38] ONAT N C, KUCUKVAR M, TATARI O. Conventional, Hybrid, Plug-in Hybrid or Electric Vehicles? State-based Comparative Carbon and Energy Footprint Analysis in the United States [J]. Applied Energy, 2015, 150: 36-49.
- [39] RAHMAN K M, JURKOVIC S, STANCU C, et al. Design and Performance of Electrical Propulsion System of Extended Range Electric Vehicle (EREV) Chevrolet Volt [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 51 (3): 2479-2488.
- [40] KIM N, ROUSSEAU A, RASK E. Autonomie Model Validation with Test Data for 2010 Toyota Prius [J]. SAE Paper 2012-01-1040.
- [41] ANDERSSON S L, ELOFSSON A K, GALUS M D, et al. Plug-in Hybrid Electric Vehicles as Regulating Power Providers: Case Studies of Sweden and Germany [J]. Energy Policy, 2010, 38 (6): 2751-2762.
- [42] BASHASH S, MOURA S J, FORMAN J C, et al. Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charge Pattern Optimization for Energy Cost and Battery Longevity [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196 (1): 541-549.
- [43] KARNER D, FRANCFORT J. Hybrid and Plug-in Hybrid Electric Vehicle Performance Testing by the US Department of Energy Advanced Vehicle Testing Activity [J]. Journal of Power Sources, 2007, 174 (1): 69-75.
- [44] 刘宗巍,史天泽,郝 瀚,等. 中国燃料电池汽车发展问题研究[J]. 汽车技术, 2018(1): 1-9.
- LIU Zong-wei, SHI Tian-ze, HAO Han, et al. Research on the Development of Fuel Cell Vehicles in China [J]. Automotive Technology, 2018 (1): 1-9.
- [45] DAS H S, TAN C W, YATIM A H M. Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles: A Review on Power Conditioning Units and Topologies [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 268-291.
- [46] HELMOLT R V, EBERLE U. Fuel Cell Vehicles: Status 2007 [J]. Journal of Power Sources, 2007, 165 (2): 833-843.
- [47] MATSUNAGA M, FUKUSHIMA T, OJIMA K. Powertrain System of Honda FCX Clarity Fuel Cell Vehicle [J]. World Electric Vehicle Journal, 2009, 3 (1): 820-829.
- [48] ABDEREZZAK B, BUSAWON K, BINNS R. Flows Consumption Assessment Study for Fuel Cell Vehicles: Towards a Popularization of FCVs Technology [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42 (17): 12905-12911.
- [49] MILLER A R, HESS K S, BARNES D L, et al. System Design of a Large Fuel Cell Hybrid Locomotive [J]. Journal of Power Sources, 2007, 173 (2): 935-942.
- [50] MORENO-BENITO M, AGNOLUCCI P, PAPA-GEORGIOU L G. Towards a Sustainable Hydrogen Economy: Optimisation-based Framework for Hydrogen Infrastructure Development [J]. Computers & Chemical Engineering, 2016, 102: 110-127.
- [51] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述·2017[J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 1-197.
- Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's Automotive Engineering Academic in 2017 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (6): 1-197.
- [52] ENGELKE S. Current and Future Sodium-ion Battery Research [J]. International Journal of Energy Storage, 2013, 1 (1): 1-6.
- [53] GRUNDITZ E A, THIRINGER T. Performance Analysis of Current BEVs Based on a Comprehensive Review of Specifications [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2 (3): 270-289.