

电动汽车动力系统技术趋势

白常勋¹ 匡凤岐²

1.北京汽车集团有限公司 北京 101399

2.北京汽车研究总院有限公司 北京 101399

【摘要】：电动汽车的补贴退坡，将逐步进入纯市场化阶段。当前自主品牌、外资品牌、造车新势力相继入场，国内电动汽车的竞争日趋激烈，进行科学的技术布局显得尤为重要。本文分析了电动汽车动力系统的技术发展方向和迭代特征，梳理了2022年至2025年电池系统、电驱动系统和电控系统的技术发展预期。

【关键词】：新能源；动力系统；技术趋势；技术迭代

1 消费者需求和法规要求

1.1 消费者需求

当前用户对纯电动汽车的需求包括安全、续航能力、充电速度、成本、电池寿命（二手车残值）等。其中安全项最直接表现形式为电池的起火、爆炸；续航能力则关系到电池的能量密度及整车百公里电耗，百公里电耗的影响因素中，除去风阻、胎阻、惯性力外，三电系统的效率是主要因素；充电速度和电池寿命则是电芯技术及电池使用模式影响，成本则是电池、电驱动、电控三者共同控制的方向。

1.2 政策法规要求

政策法规要求包括双积分政策、安全法规。

双积分政策中，包括续驶里程（R）、电能消耗量、电池能量密度（D）。标准车型积分规则如下， $R < 100$ 公里的积0分， $100 \leq R < 150$ 的积1分， $R \geq 150$ 的积 $0.0056 \times R + 0.4$ 分，且最高值为3.4分；续驶里程调整系数则规定， $R \geq 300$ 公里时系数为最高值1， $R < 300$ 公里时根据不同里程范围则系数取0.7~0.9，所以当前对续航里程达到536公里以上的，随着续航里程增加不再有政策上的倾斜；能量密度调整系数，则规定 $D \geq 125 \text{Wh/kg}$ 时系数取最高值1，此值从之前的160下降达22%，正是基于安全考虑，在双积分政策上照顾了磷酸铁锂技术；而电耗调整系数则等于电能消耗量目标值与实际值之比，但最高不超过1.5，鼓励车企优化电耗。

安全法规 GB 38031-2020《电动汽车用动力蓄电池安全要求》中则要求在车辆热失控前至少5分钟，需要发出预警信号；针对电池的安全试验，迫于大多数三元锂电均不满足针刺试验，新版法规对此项要求取消。

2 电动汽车动力系统技术趋势及迭代特征

三电系统的技术发展趋势，正是基于消费者需求和相关法规要求不断迭代，下面分别分析。

2.1 动力电池系统

基于电池包的组成架构，将电池系统分成电芯、成组技

术、热管理3个维度进行分析。电芯关系到能量密度、充放电倍率、安全性、可靠性等基本性能；成组技术关系到产品能量密度，成本和安全；热管理则保障电池处于适宜工作温度区间，保障电池安全和性能。

2.1.1 电芯技术发展趋势

短期内，正极材料 NCM、NCA 和铁锂共存，而负极需关注石墨+硅的运用，这是因为硅的理论克容量非常高，达到了4191mAh/g，远远高于石墨的372mAh/g，但由于含硅负极的膨胀性特点，长期来看负极材料的理想材料是锂金属。电解质则将由当前的液态发展为半固态、准固态、及全固态电解质，国内已有电池企业于2020年7月量产准固态电芯，电芯能量密度与当前811液态电芯相当。预计2025年左右，国内将具备全固态电解质电池量产能力（见图2-1）。

		2019				2020				2021				2023		2025									
迭代内容		磷酸铁锂电池能量密度提升 NCM111电池量产应用				磷酸铁锂电池能量密度提升10% NCM622长寿命电池量产 NCM811电池能量密度提升 硅碳负极开始应用于动力电池				硅碳应用三元电池 准固态电解质装车				硅碳应用于准固态电池 新型正极布局应用		富锂硅基正极应用 金属锂负极量产应用									
材料	正极	磷酸铁锂 NCM523/622 NCM811 NCA				NCM622 NCM811 磷酸铁锂 NCA				NCM811 NCMNCA				NCMNCA		NCMNCA 富锂硅基									
	负极	天然/人造石墨				人造石墨				石墨+硅				石墨+硅				金属锂							
	电解质	液态				固态				准固态				固态											
	隔膜	PP				PE+陶瓷				PE+PVDF				PE+陶瓷隔膜				新型无隔膜							
性能	能量密度	160Wh/kg		260Wh/kg		280Wh/kg		280Wh/kg		240Wh/kg		280Wh/kg		200Wh/kg		300Wh/kg		280Wh/kg		300Wh/kg		300Wh/kg		500Wh/kg	
	循环寿命	>3000		2000		1500		1000		2500		1500		>3000		1000		1500		1500		1500		1000	
	热失控温度	>800℃		220℃		200℃		180℃		220℃		200℃		>800℃		180℃		200℃		无		无		无	

图2-1 电芯技术发展趋势（根据调研信息整理）

此外，干电极技术是未来可有效降低电芯成本的方向，当前已经成熟应用于超级电容，应用于动力锂电池后，可减少设备，提升单位厂房面积产能，预计降低电芯成本20%。且干电极技术可支撑负极预锂化，与硅碳负极技术相结合可有效改善硅碳负极带来的首充效率低问题，预期首充效率甚至可以超过100%。

2.1.2 电池成组技术发展趋势

电池成组技术向高安全、长寿命、高能量密度发展，在保证电池结构强度前提下，通过提高动力电池系统空间利用率，减少辅助零部件数量，以结构创新实现系统能量密度提升（见图2-2）。

项目	2019	2020	2023	2025		
	VDA355、380模组	VDA590模组	刀片电池	CTP无模组	大模组	电池包底盘一体化
类型						
电池模组	- 模组外形标准化 - 宽115mm - 高108mm - 长355/380mm - 不易拆解	- 模组外形标准化 - 宽115mm - 高108mm - 长355/380mm - 不易拆解	- 单体电池模块化 - 具有一定弹性 - 具有多种连接方式 - 电芯与壳体连接 - 不易拆解	- 无模组设计 - 散热直接连接与电芯大面积接触 模组带控制单元 - 不易拆解	- 采用大模组，模组之间用固定方式紧密地结合在一起 - 取消模组结构，直接将电池包固定于整车 模组带控制单元	- 电池包和底盘一体化爆震 - 高压电通过电池内部分配
优势	资源切换灵活	标准化大模组，减少模组数量，电芯一致性提高	- 电池能量效率高，电芯寿命长，电池性能好 - 降低生产成本	- 降低生产成本 - 延长电池寿命 - 提高散热效率	- 增强连接强度 - 电池固定方式更简单 - 提高能量密度 方便拆解	- 提升空间利用率 - 提升对电芯的结构防护，提高安全性
壳体材质	钢铝混合壳体	8系铝塑合金壳	7系铝塑合金壳	7系铝塑合金壳	7系铝塑合金壳	7系铝塑合金壳

图 2-2 电池成组技术发展趋势

此外，超级电容器与锂电池的混合使用是未来可预研的方向。超级电容器虽然能量密度不高，约为三元锂电池的 50%，但其具有功率特性佳，充放电倍率可达 50C；且寿命极长，可达 10 万次循环以上。与锂电池混合使用时，可在急加速和能量回收场景使用超级电容器，可以一方面避免锂电池的大功率充放电，改善电池寿命，另一方面提高能量回收效率，改善百公里电耗。

2.1.3 电池热管理技术发展趋势

液冷热交换效率高, 温度均匀性好, 技术成熟, 是当前主流热管理技术, 逐渐向模组集成。环境适应好、能耗更低、安全性更高的基于相变材料热管理是未来发展方向。

	2019	2020	2023	2025
技术趋势	独立制冷系统 水冷板位于电子模块与箱体之间，通过导热界面材料与模组接触，导热效率高，缺点为冷却液需要直接流经模组的绝缘阻层，存在一定的短路风险。	液冷系统与箱体集成 在腔体材料水冷板，既是水冷板，又是箱体底面，形成箱体密封，结构更简单、密封制造更简单，同时实现减重和降本。	液冷系统与模组集成 水冷板分散集成到模组的顶部，冷却效果好，有利于实现模块化。	相变材料与模组集成 相变材料替代冷却器，通过导热界面（PIGA）与芯片直接接触，在充能或低温时将存储的热量，存储效率高，温升小，体积小，无液漏风险，减少了电子水泵、散热器等电子器件，节约了成本。
结构布置				

图 2-3 电池热管理技术发展趋势

综上,按技术成熟度划分动力电池技术层级迭代如下。

	电芯技术	电池成组		BMS		热管理系统	
技术迭代	4.0 500Wh/kg 高能量密度，高电压三元	4.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	4.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	4.0 无感检测，无接触检测	4.0 无感检测，无接触检测	4.0 液冷+风冷	
	3.0 450Wh/kg NCM111, 300Wh/kg NCM111	3.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	3.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	3.0 无感检测，无接触检测	3.0 无感检测，无接触检测	3.0 液冷+风冷	
	2.0 400Wh/kg 高能量密度，高电压三元	2.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	2.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	2.0 无感检测，无接触检测	2.0 无感检测，无接触检测	2.0 液冷+风冷	
	1.0 350Wh/kg 高能量密度，高电压三元	1.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	1.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	1.0 无感检测，无接触检测	1.0 无感检测，无接触检测	1.0 液冷+风冷	
	0.5 300Wh/kg 高能量密度，高电压三元	0.5 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	0.5 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	0.5 无感检测，无接触检测	0.5 无感检测，无接触检测	0.5 液冷+风冷	
技术现状	2.0 400Wh/kg 高能量密度，高电压三元	2.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	2.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	2.0 无感检测，无接触检测	2.0 无感检测，无接触检测	2.0 液冷+风冷	
	1.0 350Wh/kg 高能量密度，高电压三元	1.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	1.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	1.0 无感检测，无接触检测	1.0 无感检测，无接触检测	1.0 液冷+风冷	
	0.5 300Wh/kg 高能量密度，高电压三元	0.5 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	0.5 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	0.5 无感检测，无接触检测	0.5 无感检测，无接触检测	0.5 液冷+风冷	
	0.1 250Wh/kg 高能量密度，高电压三元	0.1 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	0.1 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	0.1 无感检测，无接触检测	0.1 无感检测，无接触检测	0.1 液冷+风冷	
	0.05 200Wh/kg 高能量密度，高电压三元	0.05 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	0.05 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	0.05 无感检测，无接触检测	0.05 无感检测，无接触检测	0.05 液冷+风冷	
技术规划	4.0 500Wh/kg 高能量密度，高电压三元	4.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	4.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	4.0 无感检测，无接触检测	4.0 无感检测，无接触检测	4.0 液冷+风冷	
技术展望	4.0 500Wh/kg 高能量密度，高电压三元	4.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	4.0 固态电池，高能量密度，高电压三元，不可充电固态电池	4.0 无感检测，无接触检测	4.0 无感检测，无接触检测	4.0 液冷+风冷	

图 2-4 动力电池技术发展迭代

2.2 电驱动系统

2.2.1 电机系统

由于电机主流路线为永磁同步，这里仅对永磁同步电机做分析。

(1) 电机系统永磁同步电机工作原理

电机系统工作原理源自安培定则，即带电导体在磁场中运动产生电磁力。电机原始模型，设计一个圆周方向的电磁铁与磁铁对，调节定子线圈中的电流方向（即磁场角度），

维持电机运动（见图 2-5）。

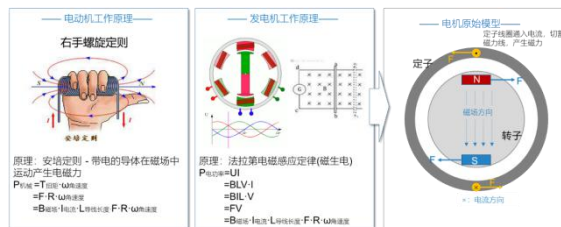


图 2-5 电机系统工作原理

(2) 永磁同步电机基本结构

永磁同步电机的基本结构：定子-定子铁心、定子绕组、机座、端盖，转子-转子铁心、永磁体、隔磁槽、转轴、轴承，气隙等。其中，转子铁芯、转子磁钢、定子铁芯、定子绕组是电机的重要组成部分，电机设计重点围绕这几部分展开。

定子铁芯：由 0.1~0.5mm 厚的硅钢片叠压而成，两面涂以绝缘漆，电机系统对定子铁芯的要求是磁感高、铁损低。

定子绕组：是电机的电路部分，其主要作用是通以电流、产生感应电势以实现机电能量的转换。电机系统对定子绕组的要求是电阻小、铜损低。

转子铁芯：是电机磁路的一部分，由 $0.1\sim 0.5\text{mm}$ 厚的硅钢片叠成，它和定子铁芯以及气隙共同构成电机的磁路。

转子磁钢：提供励磁磁场，材料为铁氧体、钕铁硼等。

(3) 永磁同步电机技术迭代特征及发展趋势

新能源汽车动力总成向高集成度、高效率、高功率密度、低噪声、低成本发展。（见图 2-6）

NVH: 电机噪声来源包括电磁噪声、机械结构噪声、空气动力学噪声;抑制措施通常有采用短距分布整数槽绕组、斜槽或者错极(V字型错极)、变载波频率、适当加大气隙、转子磁极正弦性设计、提高电机刚度等。

效率提升路径：减少铜耗、降低电枢电流、降低铁耗、降低机械损耗、降低附加铁耗等。

功率密度：提升电机质量和体积功率密度：扁线、油冷、高转速等。

成本：少磁钢、轻稀土、高磁阻设计。

永磁同步电机技术综合迭代特征见图 2-6。

	电机性能特征				材料侧		设计侧			
后续代	~ 87.5%	5.7kW/kg	2750	~ 18000rpm	0.1.0.2mm (6.5%齿槽比)	无稀土 低损耗、低电阻率电机材料	超级钢	16,000-18,000rpm	磁阻转矩 ~ 60%	
第二代	87%-87.5%	4.0kW/kg	2750	4000-18000 (齿槽比)	0.1.0.2mm (齿槽比)	轻稀土 (钕铁硼)	前铁+铝硅	14,000-16,000rpm	油冷 磁阻转矩~50%-60%	
这一代	96%~97%	3.0kW/kg	2800	2000-14000 (齿槽比)	0.35-0.5mm (齿槽比)	钢铁磁	圆铁+铝硅	12,000-14,000rpm	水冷 磁阻转矩~50%	
最高效率	功率密度	NVH	最高转速	电压	定转子铁芯	永磁磁材	定子绕组	电机转速	冷却方式	磁极结构

图 2-6 电机系统技术迭代特征

（4）国外在研电机技术创新对标

材料创新:

超级铜线技术: 超级铜线利用 CNT (碳纳米管) 与铜层结合, 形成超级铜线。可有效提高铜的电导率, 降低铜损, CNT 比例越高, 导电率越高。短期, 因工艺限制电导率提升有限且 CNT 成本较高, 暂不能大规模搭载。长期, 若电导率达 120-130% 有望大规模推广, 且 CNT 成本随着超级铜线上量大幅下降。

超级硅钢技术: 超级硅钢技术利用 6.5%Si 渗透替代 3.2% 硅渗透, 可大幅提升低速磁导率, 降低高速铁耗, 提升硅钢强度。6.5% 高渗透超级硅钢当前成本太高, 限制应用; 日本 JFE6.5% 复合硅技术在成本和性能间取得平衡, 作为技术核心利器适时应用。

技术创新方面:

低成本铝镍钴无稀土电机: 铝镍钴无稀土电机应用铝镍钴材料: 高磁密、低矫顽力替代现有稀土磁钢。美国 UQM 技术驱动型电机应用开发公司, 联合美国 Usdrive 电机产业链联盟开发出第二代铝镍钴无稀土电机。但是, 结合我国国情, 此技术方向有待商榷。

电励磁同步电机: 电励磁电机定子和永磁同步电机相同, 转子采用励磁绕组通入直流电产生磁场取代永磁电机的转子铁芯和永磁体。且励磁磁场可调, 在低速和高速时都能获得动力性, 并降低成本, 美国威斯康深大学项目还在进行中, 目前已完成 55kW 的样机, 功率密度可以达到 1.5kW/kg, 接近美国 DOE2020 年目标值。电励磁同步电机转子采用励磁绕组, 提升高低速性能且降本。

2.2.2 减速器系统

主要方向为两档减速器甚至多档减速器。目前看两档减速器率先应用于中高端车型, 带来效率的提升, 相同续航需求下, 可以减少电池用量, 抵消成本上升。由于传统自动变速器的技术积累, 这方面并无难点, 但在降低成本方面, 国内已有企业布局电控拨叉换挡机构, 减速器后续规划中应关注 NVH 等性能的改善, 以持续改善用户体验。

2.2.3 电驱动集成系统

主要方向为由简单的叠加集成, 向深度集成演变, 如电机、减速器共用端盖, 到电机、减速器、控制器共用壳体, 以及共用冷却系统及多合一集成等。

2.3 电控系统

2.3.1 电池 BMS 系统技术发展趋势

硬件技术: 电池管理逐渐向模组延伸, 淡化 PACK 级的控制, 无线 BMS 将带来更加智能的管理方案。

软件功能: 软件管理系统具有更高计算精度和功能安全等级。

	2019	2020	2023	2025
硬件技术	- 集中式BMS - 将所有的采集单元电压、温度的单元全部集中在一块BMS板, 成本低、结构紧凑、可靠性高 - SOC精度3%-5%, SOH精度5%	- 分布式BMS - BMS主板+从板, 从板负责单体电压检测、温度检测、均衡管理以及诊断工作, 且有SOC/SOH计算功能; 高压管理单元负责对PACK总压、母线电压、绝缘电阻监测	- BMS与VCU集成式 - BMS与VCU通讯, 减少了中间环节, 提高了整车系统的实时性、安全性、可靠性 - 高精度数据监测芯片和高效CPU, 提高SOC精度2%, SOH精度达到3%	- 无线式BMS - 中央处理器, 可以大幅度提高电芯管理的可靠性、精度, 提高PACK装配的效率, 降低PACK的技术复杂性、整体成本, 提供未来更好的智能管理方案
软件功能	Autosar, 控制器和软件解耦, 软件部分功能平台化	功能安全ASIL-C, 安全性提高	OTA和云计算, 支持复杂算法	网络安全, 功能安全ASIL-D

图 2-7 电池 BMS 系统技术发展趋势

2.3.2 电机控制器

(1) 电机控制器工作目的

电机控制器工作目的: 将动力电池的直流电进行电力转换成三相交流电, 为电机进行供应交流电。

(2) 电机控制器软硬件结构

电机控制器硬件由功率电子、驱动电路板、控制电路板、壳体、传感器、接插件、电容等零部件组成。其中, 驱动电路板(含功率电子-IGBT)、控制电路板和壳体成本占比较大。

控制电路板功能: 与整车通信, 计算和控制 PMW 信号; 实时进行状态和故障检测, 保护驱动电机和整车安全可靠运行。

驱动电路板功能: 进行电力转换, 为电动机提供动力输出所需要的电能。

软件功能: 由 CPU 与整车通信, 计算和控制 PMW 信号; 实时进行状态和故障检测, 保护驱动电机和整车安全可靠运行。

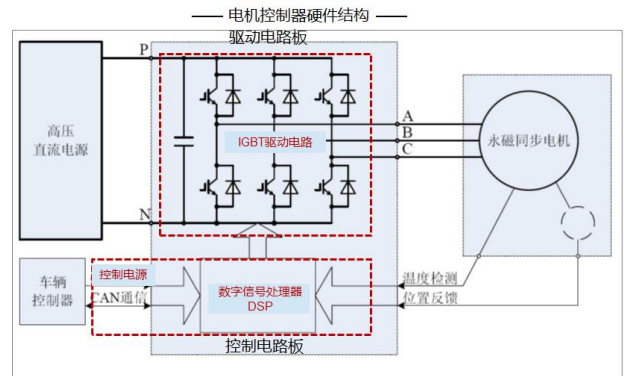


图 2-8 电机控制器硬件结构

(3) 电机控制器核心部件功率半导体的迭代特征

EV 电机控制器的核心部件是功率电子模块(当前主流应用 IGBT), 技术壁垒极高, 且成本较高(150kW 电机控制器中 IGBT 所占成本约 1300-1500 元)。

功率半导体本质上是起到开关作用, 通过控制电路中电流的开闭、流向、大小, 实现调速、调频, 进而对执行部件进行控制和驱动。

当前 IGBT 的主要材料是 Si, 下一代 SiC 材料的 MOSFET

可覆盖当前 Si IGBT 应用范围, SiC 与 Si 材料相比, 在耐高压、耐高温、高频等方面具备碾压优势, 带来体积和效率的提升及单车成本的降低。(见图 2-9)

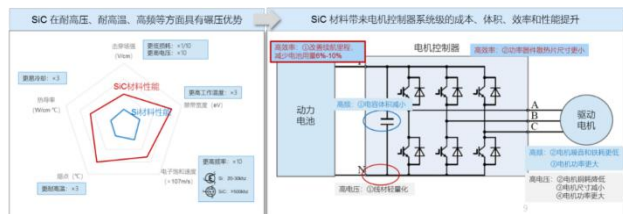


图 2-9 SiC 功率器件带来的优势

当前, 制约 SiC 功率器件大规模应用的核心原因是成本

和产业链成熟度, 一方面 SiC 原材料成本高: SiC 晶体生长效率比 Si 晶圆低; SiC (6 英寸量产, 8 英寸研发) 晶圆的尺寸迭代与 Si (12 英寸) 相比处于早期阶段; 另一方面主流车型尚未进行搭载, 原材料及下游器件、模块供应商等产业链尚不成熟。

3 结论

未来发展趋势, 电池以负极掺硅补锂、正极高压、干法电极、准固态电解质、全固态电解质、超级电容与锂电结合、电池包保温+隔热、CTP 集成等技术为方向; 电驱动系统以高转速、超级硅钢、油冷、扁铜线绕组、非晶带材、两/多档减速器、多合一集成等技术为方向; 动力域电控则关注 BMS 布置形式、连接形式和 SiC 电机控制模块等技术。

参考文献:

- [1] 国家标准化管理委员会.GB 38031-2020 电动汽车用动力蓄电池安全要求[S].2020.05.
- [2] 黄志坚著.电动汽车结构·原理·应用[M].北京:化学工业出版社,2014.10.
- [3] 王芳,夏军,等著.电动汽车动力电池系统设计与制造[M].北京:科学出版社,2017.8.