

我国交通电气化产业和技术路线图 (下)

中国电源学会电气化交通专委会 主任
清华大学教授 新概念汽车研究院副院长
李永东 (Li Yongdong)

编者按：2021，变频产业砥砺前行，轨道交通行路致远，新能源汽车踔厉奋发……

伴随收获和喜悦，2022 的华章已经开启，让我们一起去拥抱机遇和挑战吧！

本刊有幸特约到中国电源学会电气化交通专委会主任、新概念汽车研究院副院长、清华大学教授、《变频器世界》编委主任李永东教授，为我们深度剖析变频产业与技术发展的现状与趋势，高瞻远瞩地为我们带来我国交通电气化产业和技术路线图。此路线图将引领行业技术与创新，具有鲜明的行业价值主张，其内容分上（1 期）、下（2 期）两部分陆续刊出，敬请期待。

目录：

- 1 编制背景及过程
- 2 变频产业与技术发展现状与趋势
- 3 轨道交通电气化的发展现状及路线图
- 4 船舰推进电气化的发展现状及路线图
- 5 新能源汽车电驱动的发展现状及路线图
- 6 多电飞机及航空电源的发展现状及路线图

4 船舰推进电气化的发展现状及路线图

4.1 船舰推进电气化国内外发展趋势

推进电机：

取消齿轮传动，向低速直驱、高转矩密度、低噪声运行和智能化方向发展

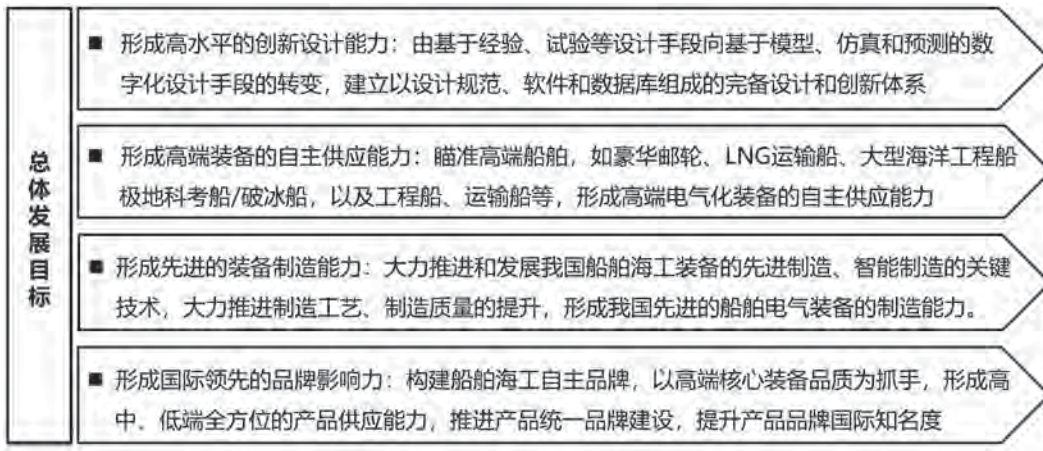


推进变频器：

向高电压、大功率、轻量化、智能化方向发展



船舰推进电气化未来发展目标



4.2 船舰推进电气化总体规划和技术突破路线图

中压大容量推进系统研究：开展中压船舶电网系统拓扑结构、系统保护及稳定性研究，特别关注电力电子装备高占比化的船舶电力系统的稳定性研究、电磁兼容性研究、能量匹配性和综合管理技术研究。

新能源动力系统研究：开展不同船型的新能源电力推进系统拓扑结构、系统配置及保护、能量综合管理等技术研究，形成新能源船舶设计标准、设计规范、检验规范等。

电力推进系统智能化研究：开展故障诊断及状态评估技术、环境态势感知技术、大数据分析处理技术在电力推进系统中的应用研究，开展智能能效管理、智能航行技术研究，提高电力推进船舶智能化水平。



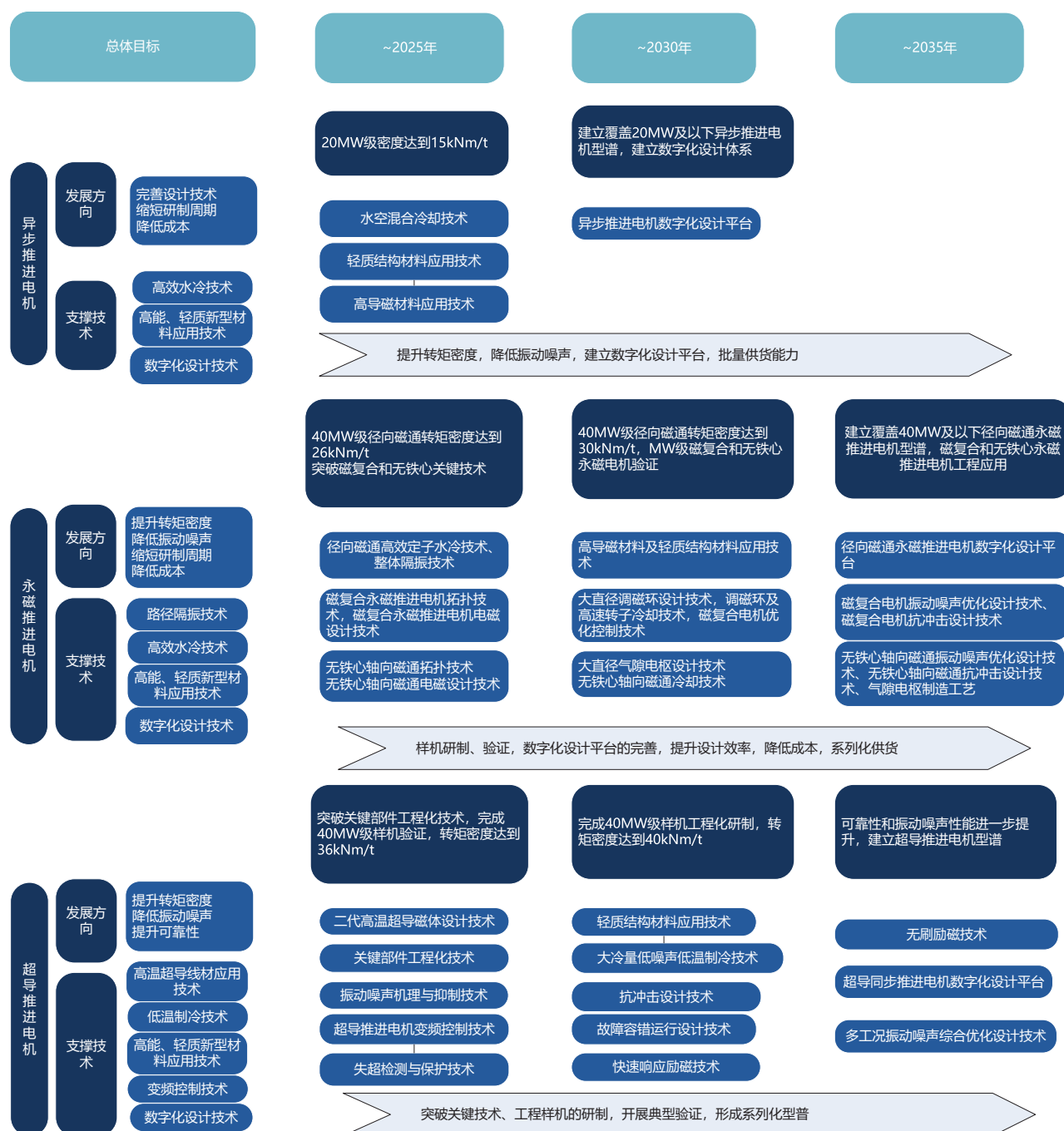
4.4 船舰推进电气化总体规划和突破路线图

高压多相多通道高转矩密度电机技术研究：取代传统三相高速电机加齿轮箱减速的驱动系统，研究多相多通道低速直驱电机。开展大容量永磁推进电机的设计与应用研究，突破 40MW 级高温超导推进电机的关键技术。

低噪声推进电机设计技术研究：开展推进电机的低转矩脉动和低振动噪声技术研究。

推进电机智能化技术研究：开展推进电机与变流系统的一体化集成设计技术研究，使推进电机具备自主控制的大脑，在此基础上开展推进电机参数智能在线识别、状态评估、故障诊断及寿命预测技术研究。

船舶推进电机技术路线

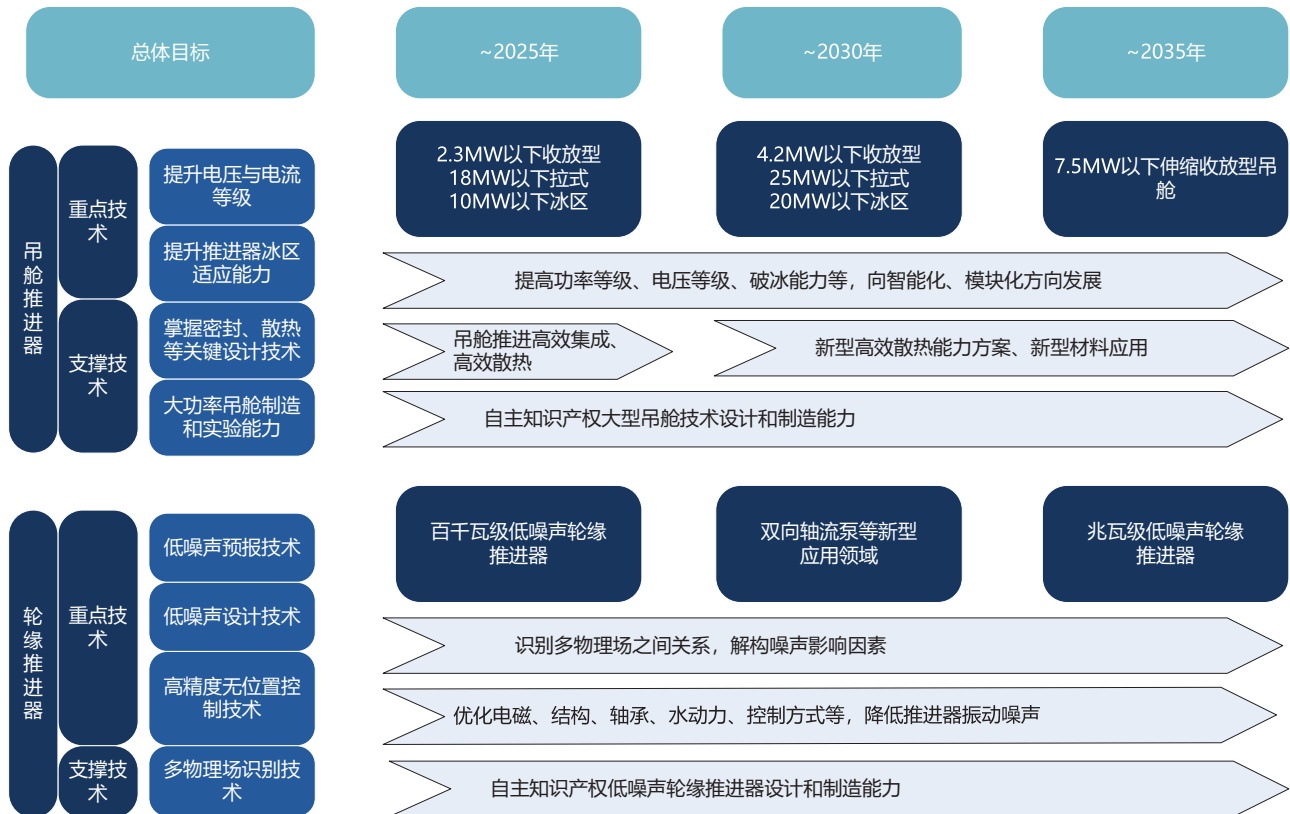


大容量吊舱推进器研究：开展大容量吊舱推进器设计与研制，包括大容量高转矩密度吊舱永磁推进电机设计、冷却和密封设计技术和集成结构设计技术等。

极地吊舱推进器研究：研究大容量极地加强型吊舱推进器设计技术研究，重点突破高冰区环境下的旋转密封及润滑系统设计、冰区结构强度加强设计、极限工况转舵全方位推力和转舵力矩图谱数据库研究等

大容量轮缘推进器研究：开展大容量轮缘推进器设计技术研究，重点突破大容量轮缘推进器的密封设计技术、水润滑设计技术、一体化集成结构设计技术，形成 5MW 以下轮缘推进器系列化型谱。

船舶特种推进技术路线



4.5 船舰推进电气化实施效果预估，支撑与保障措施

路线图实施效果预估

到 2025 年，国产船舶电气化系统及装备满足达到 60% 的国内市场和 10% 的国际市场

到 2030 年，国产船舶电气化系统及装备达到 70% 的国内市场需求和 30% 的国际市场

到 2035 年，国产船舶电气化系统及装备达到 80% 以上的国内市场需求和 40% 的国际市场

路线图实施支撑与保障措施

加强船舶电气化方向的顶层设计和战略规划，基于高技术船舶专项、装备预研技术基金等资金支持开展关键基础技术、创新技术研发

通过财税政策和金额支持鼓励国内厂商走出去，提高国际市场占有率

同时加强人力资源培养和学科建设，完善知识产权保护机制

5 新能源汽车电驱动的发展现状及路线图

5.1 新能源汽车电驱动国内外发展现状

· 能源革命和智能网联为汽车产业创新发展注入了新动力

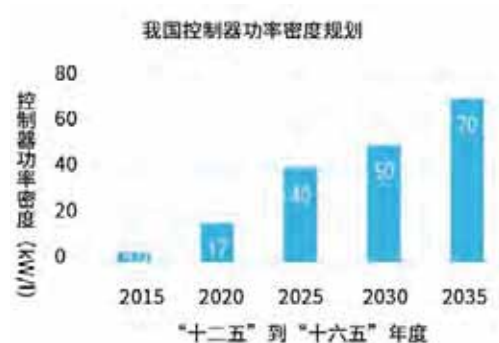
新能源汽车和混合动力汽车市场份额越来越大

智能网联汽车与智慧能源、智慧交通、智慧城市深度融合

· 驱动电机在功率密度、系统集成度、电机最高效率和转速等方面持续进步

· 在电机控制器方面，我国在研发方面不断进步，但在产品化方面做的还不够

· 电驱动总成向“三合一”（电机、控制器和减/变速器或“多合一”）方向发展



5.2 新能源汽车电驱动未来发展目标

· 以纯电驱动、插电式机电耦合、商用车动力、轮毂/轮边电机总成成为重点

· 以基础核心零部件和电机、控制器与减变速器总成国产化为支撑

· 充分利用国际平台的优势，提升电驱动总成集成度与性能水平

· 至 2035 年，我国新能源汽车电驱动系统产品总体达到国际先进水平

	2025年	2030年	2035年
发展目标	电驱动总成系统关键性能达到国际先进,实现可高压高速化与先进制造工艺,核心关键材料与关键制造装备实现国产化	电驱动总成系统关键性能达到国际领先,实现可高压高速化与先进制造工艺,核心关键材料与关键装备实现国产化	电驱动总成系统关键性能整体达到国际领先,核心关键材料、关键制造与测试装备与设计开发工具实现国产化
	乘用车电机比功率 5.0kW/kg, 电机系统超过 80%的高效率区90%	乘用车电机比功率 6.0kW/kg, 电机系统超过 80%的高效率区93%	乘用车电机比功率 7.0kW/kg, 电机系统超过 80%的高效率区95%
	乘用车电机控制器功率密度达到40kW/L	乘用车电机控制器功率密度达到50kW/L	乘用车电机控制器功率密度达到70kW/L
	纯电机系统比功率2.0kW/kg, 综合使用效率 87.0% (CLTC)	纯电机系统比功率2.4kW/kg, 综合使用效率 88.5% (CLTC)	纯电机系统比功率3.0kW/kg, 综合使用效率 90.0% (CLTC)

5.3 新能源汽车电驱动总体规划和突破路线图

以提升驱动电机功率密度与工况运行区效率、提高电机控制器集成度为重点
全面提升驱动电机及其功率电子控制系统技术水平，提升产品性价比
突破电驱动总成设计与集成、关键材料与核心零部件 / 元器件的短板

电驱动总成技术发展技术路径与趋势图



			~2025年	~2030年	~2035年	
总体目标			驱动电机、电机控制器、纯电驱动总成、机电耦合总成的关键性能达到国际先进，实现可高压高速化与先进制造工艺，核心关键材料与关键制造装备实现国产化。	驱动电机、电机控制器、纯电驱动总成、机电耦合总成的关键性能达到国际领先，实现可高压高速化与先进制造工艺，核心关键材料与关键制造装备实现国产化。	驱动电机、电机控制器、纯电驱动总成、机电耦合总成的关键性能整体达到国际领先，核心关键材料、关键制造与测试装备与设计开发工具实现国产化。	
驱动电机系统领域	重点技术	提升电机功率密度与效率	高性能乘用车电机比功率5.0kW/kg，电机系统超过80%的高效率区90%	高性能乘用车电机比功率6.0kW/kg，电机系统超过80%的高效率区93%	高性能乘用车电机比功率7.0kW/kg，电机系统超过80%的高效率区95%	
		提升控制器集成度	高性能乘用车电机控制器功率密度达到40kW/L	高性能乘用车电机控制器功率密度达到50kW/L	高性能乘用车电机控制器功率密度达到70kW/L	
		提高电驱动总成性价比	面向普及型应用，电机成本28元/kW，控制器30元/kW	面向普及型应用，电机成本25元/kW，控制器25元/kW	面向普及型应用，电机成本20元/kW，控制器20元/kW	
	支撑技术	关键材料与零部件突破	低损耗硅钢、低无重稀土磁钢、高速轴承、高线速度密封件、耐高频高压绝缘材料、低粘度润滑油等核心零部件技术			新材料与新工艺的核心零部件技术及其应用
		功率器件与无源器件国产化	功率部件高度集成、高效散热			新型功率半导体器件、新型无源器件（高温陶瓷材料）应用技术
软件架构与故障诊断应用		自主软件架构、基于智能云的状态检测、多核异构计算平台与智能控制、故障诊断与容错、寿命预测				
电驱动总成领域	重点技术	纯电驱动总成技术提升	纯电驱动系统比功率2.0kW/kg，CLTC综合使用效率87.0%	纯电驱动系统比功率2.4kW/kg，CLTC综合使用效率88.5%	纯电驱动系统比功率3.0kW/kg，CLTC综合使用效率90%	
		机电耦合集成度提升	机电耦合总成重量相对2020年降低12%，WLTC综合效率83%	机电耦合总成重量相对2020年降低20%，WLTC综合效率84.5%	机电耦合总成重量相对2020年降低30%，WLTC综合效率86%	
		提升商用车总成技术水平	商用车电机转矩密度20N·m/kg，控制器功率密度30kW/L	商用车电机转矩密度24N·m/kg，控制器功率密度40kW/L	商用车电机转矩密度30N·m/kg，控制器功率密度60kW/L	
		轮毂/轮边电机总成国产化	轮毂电机峰值扭矩密度20Nm/kg或功率密度5kW/kg	轮毂电机峰值扭矩密度24Nm/kg或功率密度6kW/kg	轮毂电机峰值扭矩密度30Nm/kg或功率密度7kW/kg	
	支撑技术	核心零部件国产化	核心零部件国产化（专用润滑油、高精度齿轮工艺、断开装置、平行轴，高转速/低摩擦/长寿命轴承和油封、强制润滑、两挡变速器）			新材料、新工艺、轻量化材料与核心零部件

5.4 新能源汽车电驱动实施效果预估，支撑与保障措施

路线图实施效果预估

节能降碳和环保减污对电动化汽车动力系统是刚需；汽车动力总成向智能网联化发展将成为主流。

2035 年全面转化为混合动力和新能源汽车，年销量都是 2000 万辆，燃料电池汽车将达到 100 万辆。

路线图实施支撑与保障措施

我国新能源汽车电驱动技术与产业形成了从电机、功率电子控制器减变速器到系统集成的自主能力，并一定程度地提升和完善了从子总成到上游核心零部件 / 元器件到基础材料的产业链。

有较好的电机工业基础和丰富的稀土资源，功率电子、控制芯片和算法软件也有了长足的发展。

从 2000 年以来连续四个五年计划对新能源汽车产业“三纵三横”的支持政策和财政扶持，使我国在高密度电机控制器、全碳化硅电机控制器、高密度驱动电机、电驱动总成等方面取得进展，推动核心零部件持续技术研发、制造与试验，进一步提升了我国核心器件和零部件的自主研发能力。

电驱动是新能源汽车的“心脏”，建议国家持续支持智能化系统和子总成设计与集成技术，补齐核心零部件 / 元器件与关键材料等产业链上游短板，加强设计与控制软件及装备制造等平台建设。

6 多电飞机及航空电源的发展现状及路线图

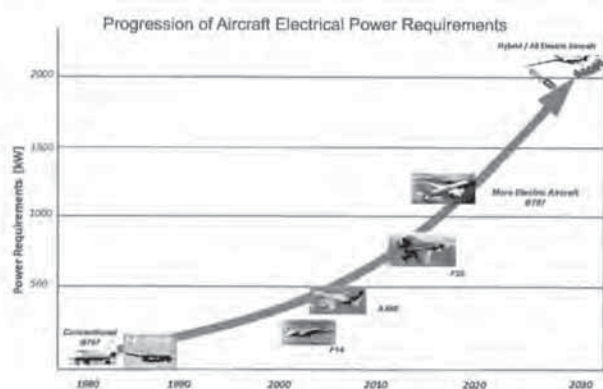
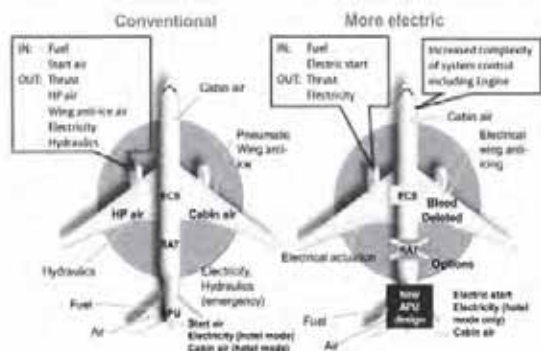
6.1 多电飞机及航空电源国内外发展现状

多电技术的核心是：“飞机系统化的研究理念和集成化的技术思想”

多电技术是将飞机的发电、配电和用电集成在一个统一的系统内，实行发电、配电和用电系统的统一规划、统一管理和集中控制的飞机技术。

电源系统是多电飞机的核心，包括大功率发电机、电力电子控制器以及电能变换装置

发电机同时具备起动功能，承担发动机起动任务。多电飞机电力电子控制器除调压控制器之外，另配置了高功率密度起动驱动器完成发动机起动任务



6.2 多电飞机及航空电源未来发展目标

多电飞机电源系统必然向大功率方向发展。恒速恒频或变速恒频交流电源效率较低，不合适大容量供电系统使用场合。高压直流系统和变频交流系统分别是飞机供电系统的两个重点发展方向。

采用宽禁带功率半导体器件大幅降低功率损耗，提高电机控制器运行效率，提高系统可用性。

提高电机控制器的数字化、集成化和通用化水平。同时，系统软件形成层次化、模块化和平台化，实现软件架构可移植、可扩展，并逐步形成行业自主软件架构。

发展目标	电源系统	变频交流系统、高压直流系统是未来系统架构趋势，向大容量、高功率密度方向发展。起动发电机探索三级式结构、异步电机以及开关磁阻电机结构，逐步实现起动发电机国产化。
	电机控制器	加大电机控制器研发力度，形成多功能复用控制器设计思路，完成发动机起动、电环控以及机载各种电动场景的一体化设计，提高电机控制器功率密度，实现核心部件国产化。
	二次电源	实现电能变换各电压体制之间的电能变换。提高电源效率及功率密度。提升设备可靠性。实现核心部件国产化。

6.3 多电飞机及航空电源总体规划和突破路线图

多电飞机电源系统研究：多电飞机电源系统在功率上需匹配日益增长的机载电能需求，实现单机电能输出功率翻倍，由 250kW 上升至 500kW。开展大功率启动发电机设计与研制，研究大功率启动发电机设计，大功率液冷散热，电源系统集成等技术。

多电飞机电机控制器研究：多电飞机电机控制器实现启动发电功能验证。采用 SiC 等宽禁带开关器件实现控制器效率的提升，提升功率器件及 IC 控制芯片的国产化率。

多电飞机二次电源研究：实现多种电能体制间的电能变换，实现变频交流电源系统内二次电源的上机使用，并逐步向高压直流系统内二次电能变换过渡，形成以高功率密度、高效率为特征的二次电源体系。

多电飞机及航空电源技术发展路线图



6.4 多电飞机及航空电源实施效果预估，支撑与保障措施

路线图实施效果预估

实现国产多电飞机型号立项，形成机载关键设备的国产化能力。

提供了向全电飞机过渡的可行性，同时为飞机一次能源电气化做充足的技术储备。

形成电源系统内材料、关键零部件、芯片及软件的产业链，成为全球机载电源市场的重要供应商。

路线图实施支撑与保障措施

加强航空电气化方向的顶层设计和战略规划，基于大飞机专项、装备预研技术基金等资金支持开展关键基础技术、创新技术研发。

通过财税政策和金额支持鼓励国内厂商走出去，提高国际市场占有率。

加强人力资源培养和学科建设，完善知识产权保护机制。

结束语

“交通电气化产业和技术路线图”是支撑政府科技和产业相关规划、引领行业技术创新、引导社会各类资源集聚等的重要工作。

《交通电气化产业和技术路线图 1.0》发布后，将向社会公开出版。同时，中国电源学会也将组织相关专家对技术路线图进行深入解读并开展专题培训，为政产学研用各界提供创新决策参考。