

第二次能源和电子革命 及其在陆海空天潜领域中的应用(中)

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

编者按:值此新年,回望过去,电力电子领域经历了无数变革与创新,从家用电器到轨道交通,从陆上储能到海上发电,每一项技术突破都见证了行业的共同成长与努力。第二次能源和电子革命及其在陆海空天潜领域中都拥有着优异的应用。

以国产化、轻量化、高效能为导向,以新型宽禁带半导体材料、永磁同步高速电机、高效电传动系统为支撑,高速安全、绿色高效、节能环保依然是轨道交通行业发展的主要目标;能源革命和智能网联为汽车产业创新发展注入了新动力;大力推进和发展我国船舶海工装备的先进制造、智能制造的关键技术,大力推进制造工艺、制造质量的提升,形成我国先进的船舶电气装备的制造能力。

在此背景下,清华大学电机系李永东教授的报告《第二次能源和电子革命及其在陆海空天潜领域中的应用》重磅出炉。本报告着重阐述第二次能源/电力和电子革命的现状与发展趋势,站在创新高度解读了第二次能源和电子革命,特别是在陆海空天潜和电驱动领域中的应用以及可持续发展,提出了我国电力电子功率变换和变频产业技术发展的新需求和新使命。

李永东现任清华大学电机系教授,博士生导师,先进电能变换与电气化交通团队负责人,清华大学新概念技术汽车研究院副院长。IEEE IAS Beijing Chapter Chair, IET and CES Fellow, 中国电工技术学会会士兼电力电子分会副理事长,中国电源学会常务理事兼电气化交通专委会主任,中国自动化学会电气自动化专委会副主任,荣获俄罗斯自然科学院外籍院士及俄罗斯工程院外籍院士。他长期致力于高性能、大容量交流电机控制系统和应用;交流电机矢量控制和直接转矩控制理论及其数字化实现;高压大容量变换器及其在节能、高铁牵引和船舶推进等电气化交通系统中的应用。

报告分三期(2024 年 1 期、2 期和 3 期)先后刊登本刊特约《变频器世界》编委会主任李永东教授的文章。敬请期待!

【中图分类号】TM921

【文献标识码】B

【文章编号】1561-0330(2024)02-0065-07

目录

- 1 第一次能源/电力和电子革命回顾
- 2 第二次能源/电力和电子革命现状与趋势
- 3 在陆上能源和电驱动领域中的应用
- 4 在海/潜能源和电驱动领域中的应用
- 5 在空/天能源和电驱动领域中的应用
- 6 结论和展望

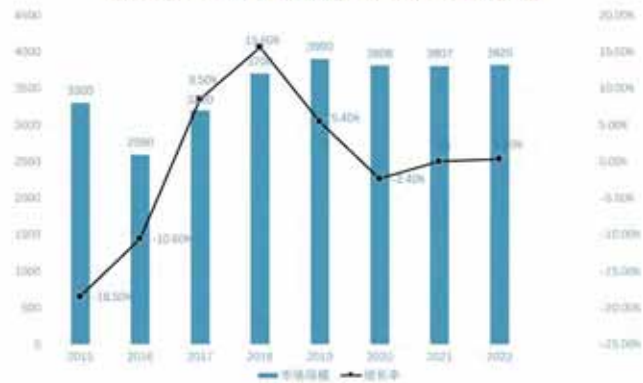
3.6 在高压大容量电机领域中的应用:变频调速系统

中高压变频器产品分为通用中高压变频器和高性能中高压变频器两大系列，电压等级主要以 6kV 和 10kV 为主。

通用型中高压变频器可实现对各类高压电动机驱动的风机、水泵、空气压缩机、提升机、皮带机等负载的软启动、智能控制和调速节能。占工业用电 30% 以上的各种风机、泵类负载，工况变化较大，如采用交流调速技术实现变速运行，节能效果明显。

高性能高压变频器运用矢量控制及能量回馈技术，具备恒转矩、动态响应快、调速精度高、调速范围宽、快速制动等特点，适用于轧机变频传动、矿井提升机变频、船舶推进驱动等高端领域。

2015-2019年中国中高压通用变频器市场规模及增长率



3.6.1 中高压大容量变频系统的发展现状及路线图

提升原创性技术开发能力：建立基于模型、仿真和数字孪生的设计和创新体系。

提升核心器件部件自主化水平：开展基于国产化电力电子器件，尤其是第三代功率半导体技术的变频器的设计开发，推进 CPU/FPGA 等核心芯片的国产化。

推动关键核心技术的突破：开展多电平和器件串并联研究，包括均压和均流的研究。

总体目标	2025年	2030年	2035年
满足中国智能制造十大重点领域对变频产品的需求，带动“电力电子+变频技术”飞速发展。变频产业核心技术自主自立自强	核心部件国产化超50%，通用型国产化达80%，工程型国产化达50%。完善产品系列化，初步完成比较完备的设计和创体系	核心部件国产化超80%，通用型国产化超90%，工程型国产化超80%。全系列产品，形成完备且实施有效的设计和创新体系	供应链全国产化量产，通用型接近全国产化，工程型国产化超95%。行业内使用完备且实施有效的设计和创新体系

提升产品的成熟度和系列化水平：以应用为导向，大力提升我国产品的成熟度。

3.7 在高压大容量电机领域中的应用:冶金轧钢系统

在未来十年内，冶金变频器要在电力电子技术（包括电力电子器件技术、变频器拓扑及其控制技术、模块化技术、测试技术等）、计算机技术（包括硬件系统设计、软件平台及系统应用软件等技术）、系统控制技术等相关技术上开展创新突破，掌握核心技术，逐步提高国产化率，最终达到全国产化目标。



3.8 轨道交通电气化国内外发展现状

高速安全、绿色高效、节能环保依然是轨道交通行业发展的主要目标

时间	2006-	2010-	2017-	2025-
产品世代	第一代高速动车组	第二代高速动车组	第三代高速动车组	第四代高速动车组
编号	CRH1-5	CRH380	CR400 复兴号	CR450
最高时速	250-350km/h	350km/h	350km/h	400km/h
技术水平	外方技术，合资生产，技术引进，吸收创新	自主研发	中国标准，正向研发，完全自主知识产权	中国标准，正向研发，完全自主知识产权

以新型宽禁带半导体材料、永磁同步高速电机、高能效电传动系统为支撑



图 1：2012 年，永磁牵引系统在沈阳地铁装车

图 2：2019 年，时速 400 公里高速动车组永磁电机牵引研制完成

图 3：2020 年，长沙地铁 5 号线全线装载永磁牵引系统

2025 年，永磁牵引成本降低 10%，效率提升 3%，功率密度达到 50kW/L，1.5 kW/kg，实现城轨运行，实现高铁试运行。

SiC 牵引变流器 2021-2035 发展趋势

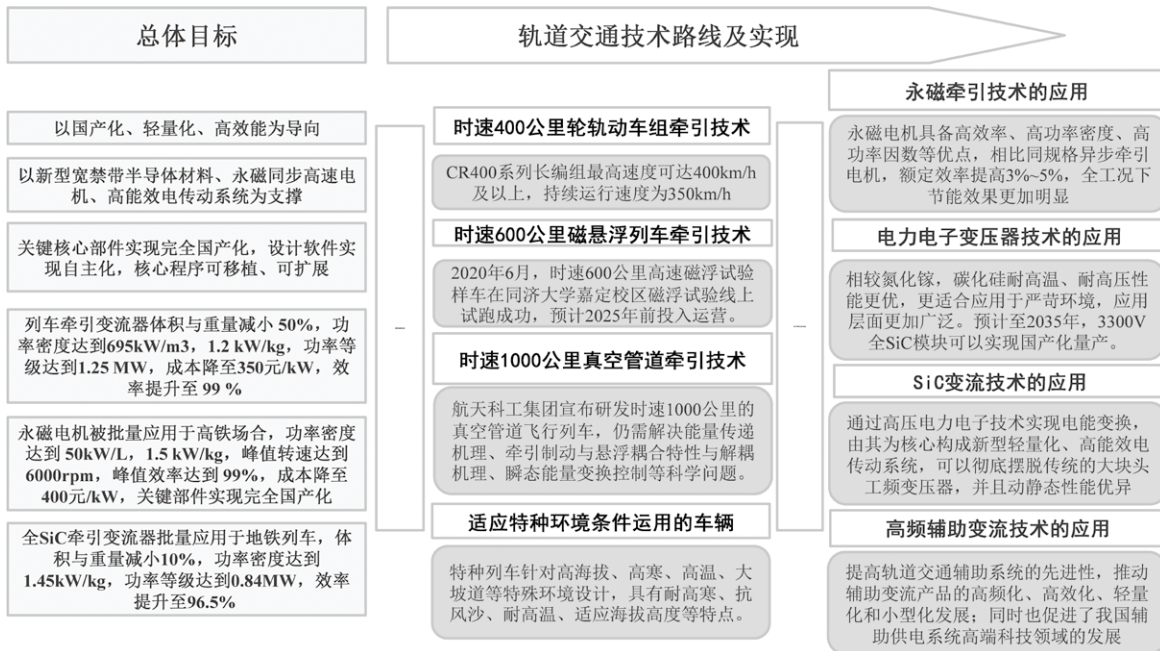
时间	2025	2030	2035
制式	3300V/750A全SiC模块	3300V/1200A全SiC模块	6500V/600A全SiC模块
功率密度	+30%	+20%	+15%
体积重量	-30%	-20%	-15%
功耗	-30%	-20%	-20%
应用情况	城轨列车试运行	高铁列车试运行	批量化生产应用

SiC 辅助变流器 2021-2035 发展趋势

时间	2025	2030	2035
功率密度	0.35kW/kg	0.5kW/kg	0.8kW/kg
体积重量	-20%	-20%	-30%
效率	94%	95%	96%
应用情况	高铁装车应用	主-辅一体化设计	全面替代现有辅助变流器；批量化应用

以国产化、轻量化、高效能为导向

- 以新型宽禁带半导体材料、永磁同步高速电机、高能效电传动系统为支撑。
- 充分利用国际平台与国内健全产业链优势。
- 研发下一代高速轮轨式、磁悬浮式、真空管道式高速列车。
- 提升国内与国际产品竞争力与影响力，到 2035 年整体达到国际先进水平。



	2025年	2030年	2035年
轨道交通电气化发展目标	轨道交通车辆技术与牵引技术达到国际先进，推进高铁产业链供应多元化，打造战略化、全局性产业链	轨道交通车辆技术与牵引技术达到国际领先，实现先进装备制造工艺，核心轨道装备与关键材料自主化、国产化	轨道交通车辆技术与牵引技术达到国际领先，实现整车装备与材料自主化、国产化，全局产业链优化完成
	400km/h高速列车CR450完成系统集成、轮轴驱动、制动控制、5G智能等核心技术攻关	400km/h高速列车CR450完成技术整合，整车研制以及试验线路测试运行	400km/h高速列车CR450整车完成下线试运行，正式进入商业化运行阶段
	600km/h公里高速磁浮试验样车和关键装备样机完成	600km/h公里高速磁浮完成线路修建、完成试运行	600km/h公里高速磁浮正式进入商业化运行阶段
	真空管道列车完成低压管道研究和试验，建设低压管道高温超导示范性运营线	真空管道列车完成管道线路修建以及列车装备制造	1000km/h真空管道列车完成调试并逐步提升速度至1000km/h

3.9 新能源汽车电驱动国内外发展现状

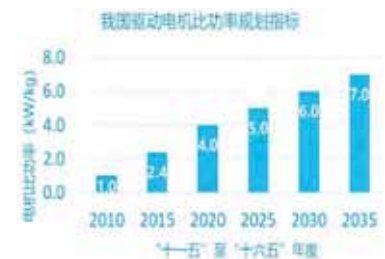
能源革命和智能网联为汽车产业创新发展注入了新动力。

- 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。

电驱总成向“三合一”（电机、控制器和减/变速器或“多合一”）方向发展。



3.9.1 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)

3.9.2 新能源汽车电驱动总体规划和突破路线图

			~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

3.10 数控 / 机器人伺服系统国内外发展现状

数控机床正在向着工艺复合化和多轴化方向发展

• 我国在电主轴的兼顾低速大扭矩和高速小转矩主轴电机研发方面还有很大不足，国外产品低速段的输出扭矩可以达到 300Nm 以上，而国内目前则多在 300Nm 以内，远远无法满足日益发展的数控机床行业的需求。

伺服电机的控制性能直接影响数控 / 机器人的精度、动态响应和稳定性等

• 伺服系统市场前 15 名厂商中，前三名安川、三菱和松下，均为日系品牌，但欧系伺服电机特点是过载能力高，动态响应好，驱动器开放性强，且具有总线接口。

• 大功率高刚度电主轴是整个数控机床电主轴市场的主体，同时，超高速高精电主轴因其独有的特点开始逐步在高端加工工业上应用。

近年来永磁直线伺服系统也获得了高速发展

• 无铁心永磁直线同步电机的定位精度高，调速范围宽，动态响应快，推力波动低，振动噪声小，过载能力强，推力线性度高，成为超精密直线伺服系统的首选。

• 国外精密磁悬浮平面电机已应用到最新一代光刻机，如 ASML 公司最新一代的光刻机就采用磁悬浮平面电机，大大提高了产品性能，取得了巨大经济效益。

高精度、大力矩 / 推力、大功率伺服 / 力矩 / 直线 / 平面电机设计技术

超精密直线 / 平面电机的推力密度通过提高磁负荷与电负荷得到提升，合理的电磁设计、结构与冷却设计，是提高直线 / 平面电机推力密度、抑制电机推力波动的关键技术之一。

高功率密度、高频高效变换器拓扑、PWM 算法及输出谐波控制技术

高开关频率宽禁带电力电子器件及软开关功率变换技术为低电感特性和低推力波动、高动态需求的无铁心同步电机 / 平面电机的电流控制带来新的控制手段，是实现高动态响应的关键技术。

超宽范围调速、高功率密度高速电主轴和工作台电机多自由度解耦控制研究

提高电主轴的功率密度的主要途径是提高电机的运行转速，电主轴调速比超过 50000，电机及控制需要有较大的恒功率弱磁调速能力。另外，要实现磁悬浮平面电机的精密解耦控制。

广适性驱动、驱控一体化、故障智能化诊断技术

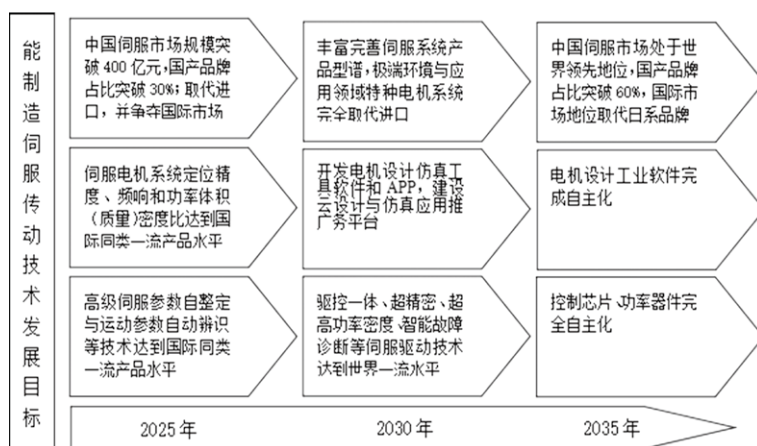
广适性驱动硬件兼容性方面，需要建立系统的各种电机参数和类型数据库，在存储空间内嵌入多类型电机的控制算法，以软件集成或者硬件扩展卡的形式实现多种工业总线协议和信号反馈的兼容。在单轴高性能伺服控制的基础上，采用驱控一体化技术，可极大地提高机床多轴联动系统的加工精度与效率。智能化故障诊断技术将伺服驱动技术、数字信号处理、故障诊断等诸多技术融合贯通，将电机本身视为智能传感器，并依据故障特征快速判断系统故障类型。

3.10.1 数控机床伺服系统技术突破路线图

完成交流伺服电机、大推力直线电机、大扭矩力矩电机、主轴电机和电主轴等相关研究。

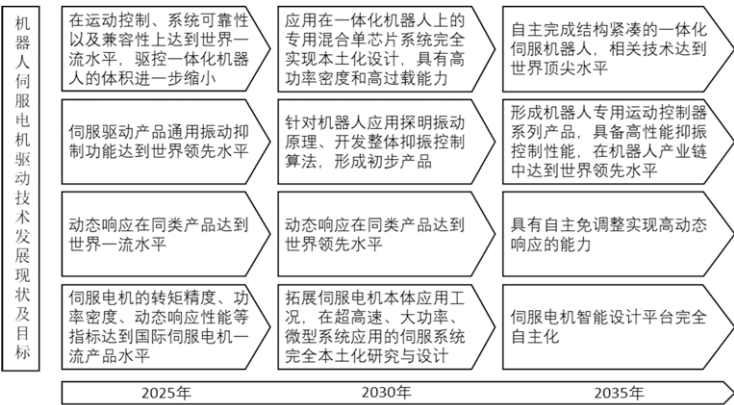
实现直接驱动、超精密伺服类电机及其驱动装置产品系列化，参数辨识和参数自整定智能化。

主要技术指标达到国际先进或国际领先水平，为进一步提高国产高端装备性能提供核心部件，拓宽数控机床装备制造厂家对电机及驱动装置的可选择范围。



3.10.2 机器人伺服系统技术突破路线图

- 高速、高精度、高可靠性是机器人伺服电机驱动技术的基本目标。
- 一体化电机与控制集成设计、振动抑制技术、高动态响应技术是主要的发展方向。
- 一个具体目标：实现直接驱动超精密伺服类电机及其驱动装置产品系列化。
- 总体目标：主要技术指标达到国际先进或国际领先水平。



机器人伺服电机驱动技术发展目标及规划路线图

3.11 家用电器变频技术的国内外发展现状和趋势

- 高效节能、绿色制造、数字化和智能化是家用电器变频技术发展的主要趋势。
- 以低功耗宽禁带半导体器件、高集成度、高速电机、智能自学习为支撑技术。

时间轴	2006-	2010-	2017-	2025-
产品世代	无位置传感器	无电解电容	SiC/GaN/高频化	智能化家居
特点和技术水平	空调压缩机内体 积狭小环境恶劣	小电解电容 到薄膜电容	宽禁带器件+高速电 机=>提高功率密度	参数自整定+健康 预测=>智能管理



智能家居系统