

我国变频及应用技术和产业发展路线图 (三)

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：国家“双碳”目标要求大力推广节能减排技术，交流电机采用变频调速后节能可达到 15-40%，节能效益巨大，一直是国家节能的重要举措；变频电源是国家重大工程高端装备的核心部件，广泛应用于国防、能源、交通、冶金、化工、机械制造中；交流伺服变频传动是高端制造中机器人、数控机床的核心部件；“变频家电”悄然走进千家万户。

在此背景下，以清华大学电机系李永东教授领衔的《我国变频及应用技术和产业发展路线图》重磅出炉。本报告立足新一轮科技革命背景下我国变频及应用产业发展，识别变频及应用产业技术发展方向和趋势，提出面向 2035 年变频及应用产业发展愿景，确定近期优先行动项目，凝练近中期关键核心技术研发需求，制定具有前瞻性、引领性的技术发展路线，为我国变频及应用产业的持续、快速、健康发展提供技术指引。

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。2022 年 4 月荣获俄罗斯自然科学院外籍院士，同年 7 月李永东教授再次当选为俄罗斯工程院外籍院士。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（2022 年 11 期、12 期和 2023 年 1 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。以飨读者！

【中图分类号】TM921 【文献标识码】B 【文章编号】1561-0330(2023)01-0075-08

4.5 数控 / 机器人伺服系统实施效果预估, 支撑与保障措施

路线图实施

效果预估

“十四五”期间，整个伺服产品市场规模将达到 400 亿元，国产伺服品牌市场份额 30%。

在定位精度、频响速度和功率质量（体积）密度、产品型谱覆盖率上达到世界一流水平；在参数免调试、故障诊断、产品质量一致性与可靠性等关键性能指标进一步缩短与世界一流品牌的差距；逐步在振动抑制、动态响应能力等技术方面达到国际领先水平、开发软件 + 硬件一体化的机器人驱动控制产品。

路线图实施

支撑与保障措施

2019 年，国家发改委发布的《产业结构调整指导目录》将“高端数控机床及配套数控系统，五轴及以上联动数控机床，高精密、高性能的切削刀具”列为鼓励发展产品。

2016 年，工信部等 3 部委联合印发了《机器人产业发展规划（2016 — 2020 年）》。提出“十三五”期间，要力争实现机器人关键零部件和高端产品的重大突破。

其中要大力发展以高性能关节伺服、振动抑制技术为代表的高性能驱动器控制器等工业机器人关键零部件，提高高速变负载应用中的运动精度。

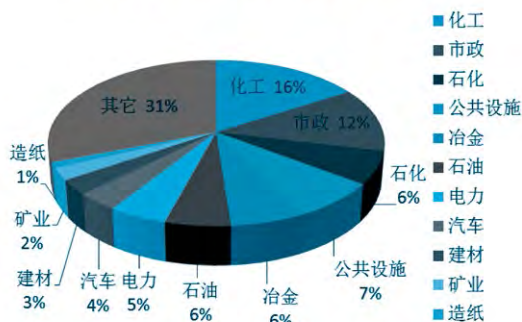
5 工业及通用变频系统的发展现状及路线图

5.1 工业及通用变频系统国内外发展现状

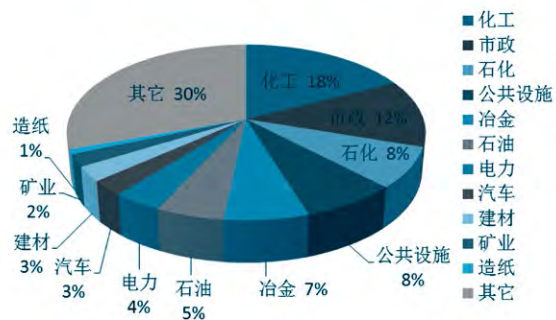
过去几年我国变频器市场规模整体处于震荡周期，2019 年中国各种变频器市场规模达 495 亿元，同比 2018 年增长 4.7%，延续了市场规模逐年增长的态势。

虽然我国经济整体保持平稳、稳中有进的发展态势，但 2020 年以来，由于新冠疫情的发生，外部环境趋紧，国内实体经济发展面临前所未有的困难，局部性和区域性问题的凸显、债务和金融风险隐忧累积等问题，整体工业经济运行趋缓，进而影响工业及通用低压变频器的需求，市场趋于平缓。

2018年中国低压变频器项目细分市场份额



2019年中国低压变频器项目细分市场份额



5.2 工业及通用变频系统未来发展趋势

高精度控制技术：采用矢量控制技术，通过建立交流电机数学模型，准确观测电机磁链矢量，对电流矢量进行闭环控制，进一步完成磁链和转速闭环控制，实现轧钢等高性能传动。

大功率和高频率技术：发新型中压大功率变频器拓扑，将提高变频器输出电压至 3.3-6.6 kV。

绿色降耗型技术：采用低功耗电力电子器件、降低开关频率和优化开关策略、优化缓冲回路参数。

高可靠、智能型技术：优化散热、绝缘和电磁兼容空间，参数自动识别、控制器 PID 参数自整定。

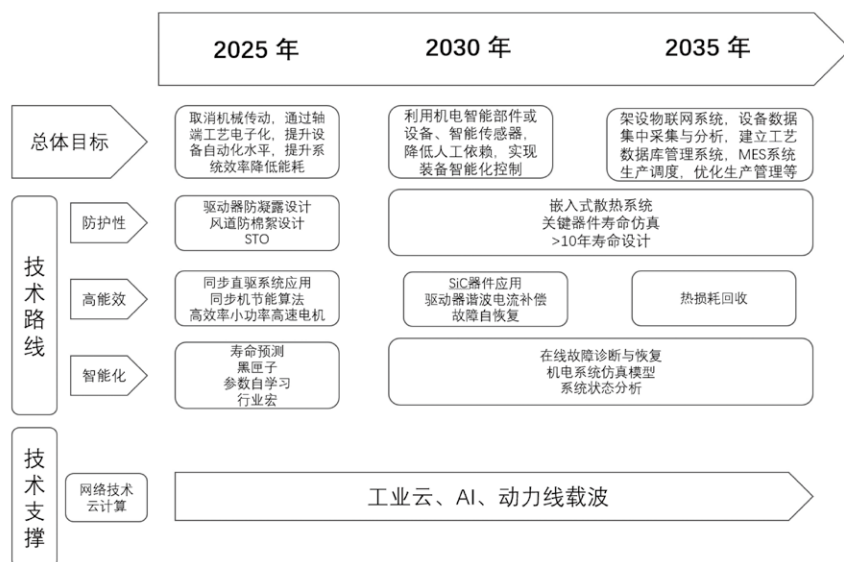


2015-2022 年中国低压变频器市场规模及增长预期

5.3 工业及通用变频系统技术突破路线图

我国变频器的市场需求巨大，在“碳达峰”和“碳中和”的大政策背景下，通用型变频器在风机、水泵变频调速、促进节能减排这一主战场中的需求将会持续扩大。

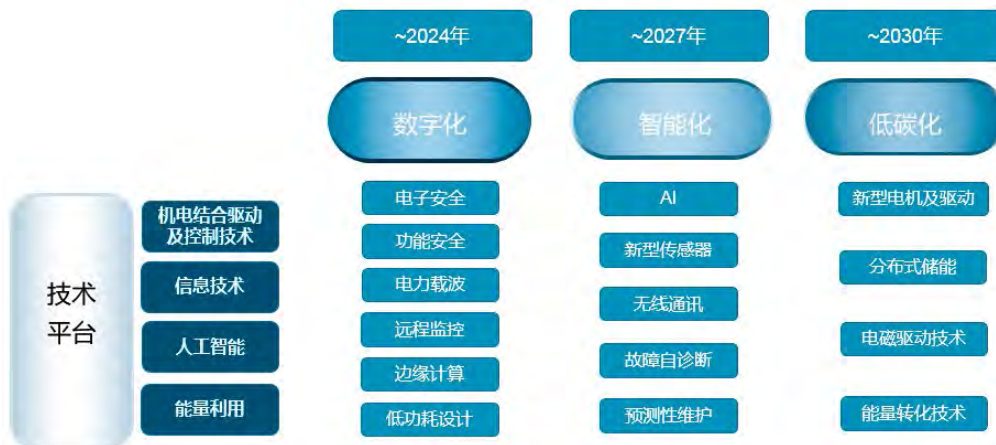
现有设备的技术改造、进口设备的国产化替代逐渐成为主流。随着市场应用领域不断扩大，用户需求也日趋多样化，越来越多的新型控制技术和新器件被应用在变频器研制中，促进了新一代变频器的研发。



通用变频器技术目标与路线图

未来的电梯制造，将由传统的机电结合的控制技术，向数字化、电子安全、无线通讯、新材料应用等高端化智能化方向发展，不断的提升用户体验。

随着电梯保有量及老旧电梯存量的不断增长，基于 IOT、AI、大数据、边缘计算的预测性维保技术，将成为破解行业维保痛点，解决乘梯安全的有效手段。



电梯变频器技术总体目标与路线图

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。



冶金变频器技术总体目标与路线图

矿山变频技术贯穿在采掘（剥）、运输、通风、洗选物流等矿山生产过程中，提高矿山变频设备的大功率化、低损耗化、智能化与小型化水平，并逐步实现核心器件与核心控制系统国产化自主可控是加快实现矿山智能化发展的关键技术之一。



矿山变频器技术路径与路线图

5.4 工业及通用变频系统实施效果预估,支撑与保障措施

路线图实施

效果预估

到 2030 年，国产低压两电平交 - 直 - 交变频器在节能领域、电梯和纺织等通用行业将占据主导地位；在冶金、造纸等工业生产线的应用将突破发展瓶颈期，份额从现在的 20%~30% 达到 50%~60%。大功率变频器元器件的国产化率从现在的 20%~30% 至少提升 10%。

国产变频器的性能指标、可靠性、智能化功能全面提升，总体技术水平达到国际先进水平，实现国产变频器从学习仿制追赶的阶段，过渡到创新发展、与国际领先一争高下的齐头并进新阶段。

在电力电子技术、计算机技术、系统控制技术等相关技术上并行开展创新突破，掌握核心技术，逐步提高国产化率，最终达到控制芯片和软件完全国产化的目标。

路线图实施

支撑与保障措施

国家一系列科技发展战略是国产工业及通用变频器实现品质、市场占有率、国产化率突破的保障。

成立全国变频调速设备标准化技术委员会，行业协会将逐步启动变频调速设备标准的制修订工作，逐步实现变频调速设备通用标准、各行业特性标准、技术标准、产品标准、方法标准相配套的体系。

6 中高压大容量变频系统的发展现状及路线图

6.1 中高压大容量变频系统国内外发展现状

我国近年来 中高压通用 变频器市场规模

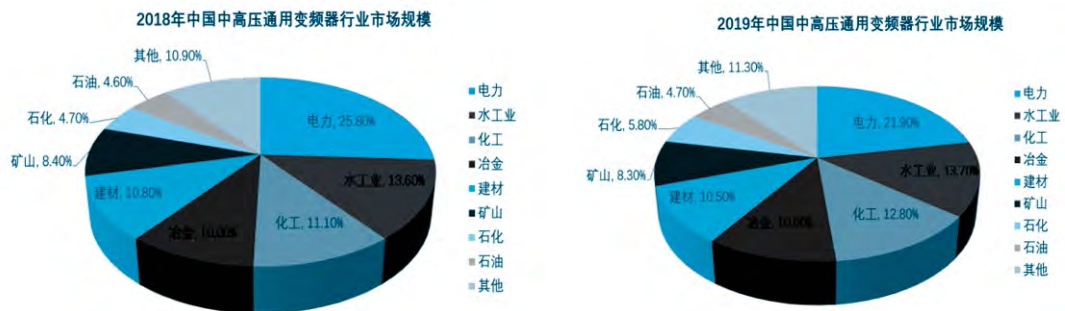
近年来，我国产业结构优化政策持续推进，整体工业产业结构逐步趋于合理，新旧动能效应逐步显现，中高压通用变频器项目型领域新建项目和改造升级项目需求逐步增多，在大型风洞和航母电磁弹射器上也得到应用。2019年，整体市场规模为39.0亿元人民币，达近年来的峰值。

我国在通用型中高压大功率变频器国产化方面发展迅速，大功率风机泵类的节能调速目前以单元级联中压变频器为主流配置，几乎完全由国内产品占据。

高性能中高压电机变频传动技术复杂、装备容量大，被少数国外大公司所垄断。

近年来，我国轧机和矿山用大功率交流变频系统也有了突破，在越来越多的工业现场得到应用。

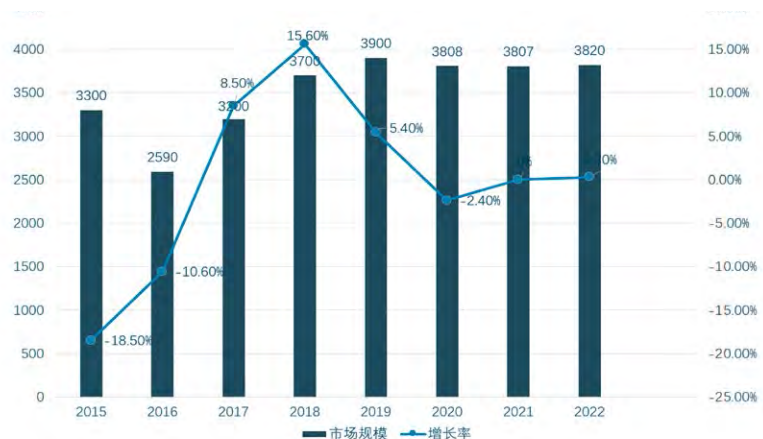
用并受到广泛认可，基于成本和服务优势，国产系统将逐步替代进口并进入快速发展上升期。



6.2 中高压大容量变频系统未来发展趋势

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。

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

6.3 中高压大容量变频系统技术突破路线图

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。

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。

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新的体系	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的体系	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的体系

6.4 中高压大容量变频系统实施效果预估,支撑与保障措施

路线图实施

效果预估

在未来十年内，国产单元级联型中压变频器、国产大功率交-交变频器保持 90% 以上份额；国产大功率三电平交-直-交变频器在轧机主传动的应用从现在的不足 1% 达到 25% 左右，最大输出功率达到 40 MW，最高输出频率达到 80 Hz；国产五电平变频器实现工业应用。

到 2030 年，国产矿用变频装备将完全实现 6kV、10kV 高性能变频和最大功率 30MW 低损耗高效变频，依据负载工况全面引入节能型电机和节能传动系统，对比当前系统能耗降低 15%。

路线图实施

支撑与保障措施

国家一系列科技发展战略是国产中高压大容量变频器实现品质、市场占有率、国产化率突破的保障。

在国家协调领导下，调动变频器全产业链科技创新、实现关键功率器件、数字控制芯片等关键元器件的国产化和自主可控，鼓励应用国产变频器，使其产业链逐步进入同步发展壮大的良性循环。

加强中国变频器行业协会作用。通过组织和举办行业发展研讨会等方式，统一行业企业认识，避免行业出现恶性价格竞争情况；出面协调行业企业与政府、社会、上下游客户的相互关系，积极协助政府落实有关节能降耗政策。构建细化产业发展战略联盟，鼓励产业集中向优势企业转移。

7 问题和展望

问题

原创性技术不足：

国内变频器厂家相继突破和掌握了大功率 IGBT 器件应用、四象限运行、零速悬停、大转矩启动等技术，实现了高精度、高输出频率、高动态响应的功能和性能，但主要技术还属于跟随阶段。

核心器件 / 部件自主化不高：

大容量高压电力电子器件是大功率高压变频器的核心部件，国内很多应用领域功率器件国产化不高。

产品的应用少，成熟度、系列化存在不足

国产中压交直交变频调速系统正逐步在矿山、水泥、西气东输、大型装备试验台、海上风电、轧钢和大型风洞领域进入快速应用阶段，在三电平、级联等拓扑实现了突破，但产品的系列化还存在不足。

智能化技术产品缺乏：

变频器产品在朝着智能化技术方向发展，如自学习、自调试等。此外，还可以依靠通讯工具访问远程专家，通过远程维护即可实现为客户提供快捷方便的售后服务。国内变频器厂家也有类似产品，但技术原创性不足，主要指标还属于跟随模仿阶段。

展望

国家需要进行前瞻性的规划、持续的变频调速系统研发人才的梯度培养、持续的研发投入，有效地把产、学、研、用有机地结合起来，将分散的技术集成在一起，才能实现国产高性能、大容量变频调速系统的技术水平全面达到和超过进口变频器，实现在全领域替代进口。

国内企业需要正视与国外企业存在的差距，加大研发力度，加快变频器核心器件部件的国产化，实现变频器的进一步小型轻量化、高性能化和多功能化。

写在最后

“变频及应用产业和技术路线图”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。

《变频及应用产业和技术路线图 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度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。