

我国变频及应用技术和产业发展路线图（二）

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。以飧读者！

【中图分类号】TM921 【文献标识码】B 【文章编号】1561-0330(2022)12-0075-05

3 家用电器变频技术的发展现状及路线图

3.1 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

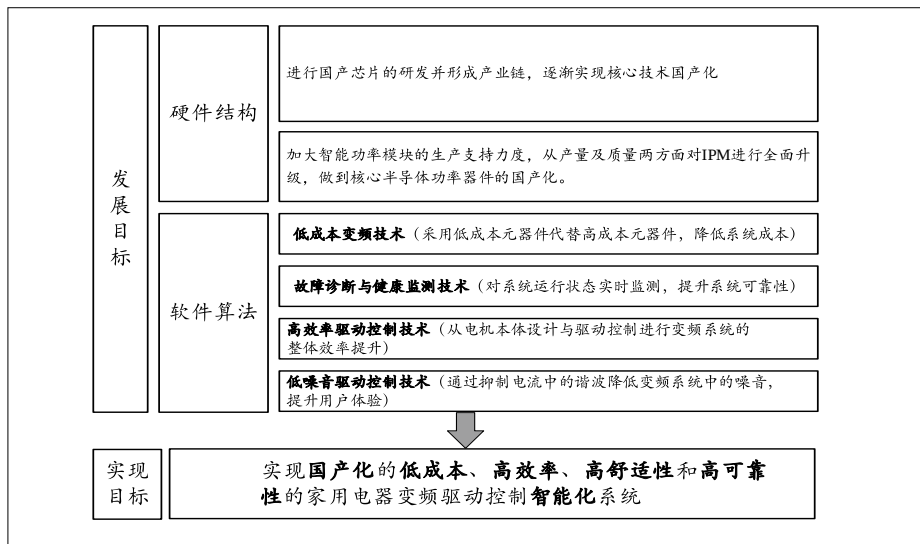


Dyson 数字马达 125000rpm



智能化家居系统

3.2 家用电器变频技术发展目标



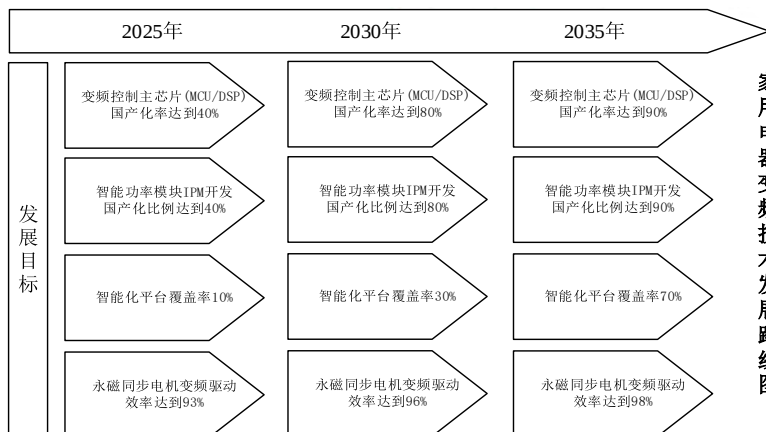
3.3 我国家用电器变频技术总体规划和突破路线图

• 以控制芯片及智能功率模块的国产化及产业化为基础

充分利用国际平台与国内健全的制造产业链优势

以提升电机的频率、效率、可靠性，以及用户舒适性体验为重点

实现国产化的低成本、高效率、智能化和高可靠性的家用电器变频驱动控制系统



家用电器变频技术发展路线图

3.4 我国家用电器变频技术实施效果预估，支撑与保障措施

→ 路线图实施效果预估

提升家用电器产品的质量、可靠性与寿命，实现高效节能、绿色制造、数字化和智能化。
在未来家用电器变频技术发展的重要方向上引领国际创新发展。

→ 路线图实施支撑与保障措施

在《中国制造 2025》中，“创新驱动”与“绿色发展”成为未来制造业发展的重要战略方针。
我国众多家电公司，如美的、格力和海尔等，已成为全球最大家电企业，是科研创新与高端产品开发和产业化的重要契机。
低功耗宽禁带半导体器件、高集成度、高速电机、智能自学习是未来发展的支撑。
建议国家相关部门和行业企业，加强对控制芯片、核心元器件和系统集成技术的支持力度，从节能减排、绿色环保的角度，开展技术创新和体制创新，实现我国家电变频技术的引领发展

4 数控 / 机器人伺服系统的发展现状及路线图

4.1 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。

→ 快速响应能力是伺服驱动系统的一大关键技术指标

作为基本性能指标的带宽是国产伺服产品与国外伺服品牌性能差距最为明显的一项核心技术指标，也是限制国产伺服产品市场竞争力的主要因素之一。

国内外品牌低惯量系列动态性能指标比较			
品牌	产品系列	速度环动态性能	码盘分辨率
安川	Σ-5	1.6kHz	20bits
	Σ-7	3.1kHz	24bits
三菱	MR-J4	2.5kHz	22bits
	MR-J5	3.5kHz	26bits
松下	A5	2.3kHz	20bits
	A6	3.2kHz	23bits
台达	ASDA-A2	1.0kHz	20bits
	ASDA-A3	3.1kHz	24bits
东元	JSDAP	0.8kHz	20bits
	JSDE2	1.2 kHz	23bits
	JSDG2S	1.5kHz	23bits
汇川	SV620	2.0kHz	20bits
	SV660	3.0kHz	23bits
	SV620	2.0kHz	20bits
清能德创	CDS7-E	3.0kHz	23bits

→ **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、结构设计与冷却设计,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。**

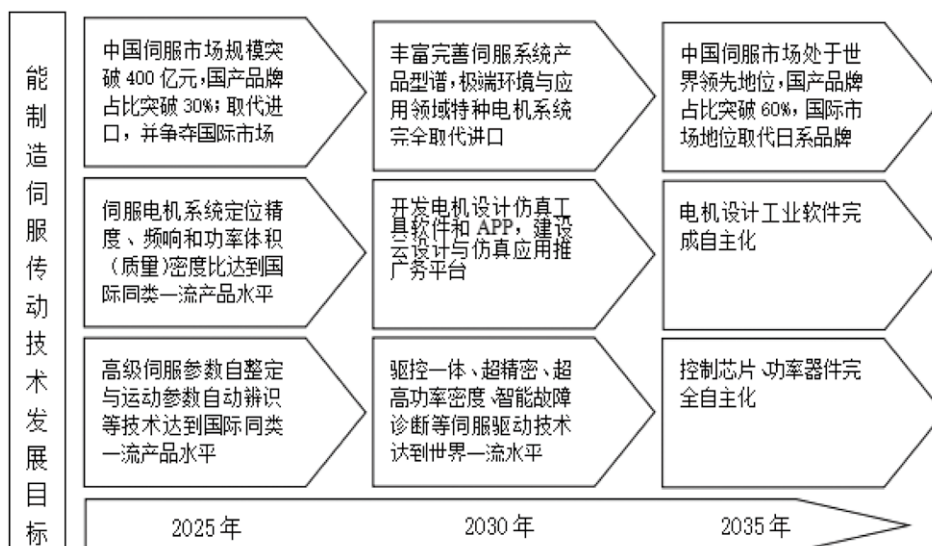
提高电主轴的功率密度的主要途径是提高电机的运行转速,电主轴调速比超过 50000,电机及控制需要有较大的恒功率弱磁调速能力。另外,要实现磁悬浮平面电机的精密解耦控制。

→ **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。

4.2 数控机床伺服系统技术突破路线图

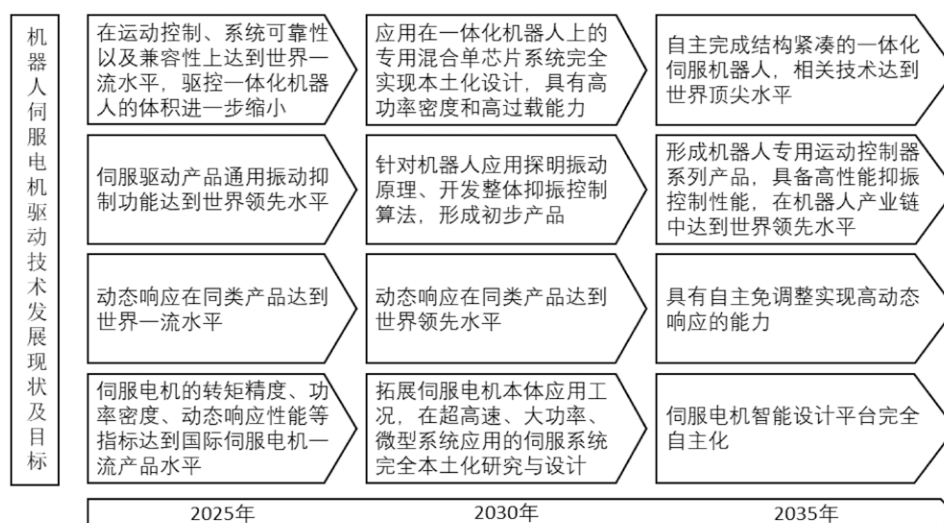
- 完成交流伺服电机、大推力直线电机、大扭矩力矩电机、主轴电机和电主轴等相关研究。
- 实现直接驱动、超精密伺服类电机及其驱动装置产品系列化，参数辨识和参数自整定智能化。
- 主要技术指标达到国际先进或国际领先水平，为进一步提高国产高端装备性能提供核心部件，拓宽数控机床装备制造厂家对电机及驱动装置的可选择范围。



智能制造伺服传动技术发展目标及规划路线图

4.3 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