

家用电器电机驱动控制技术发展现状及展望

徐殿国

哈尔滨工业大学

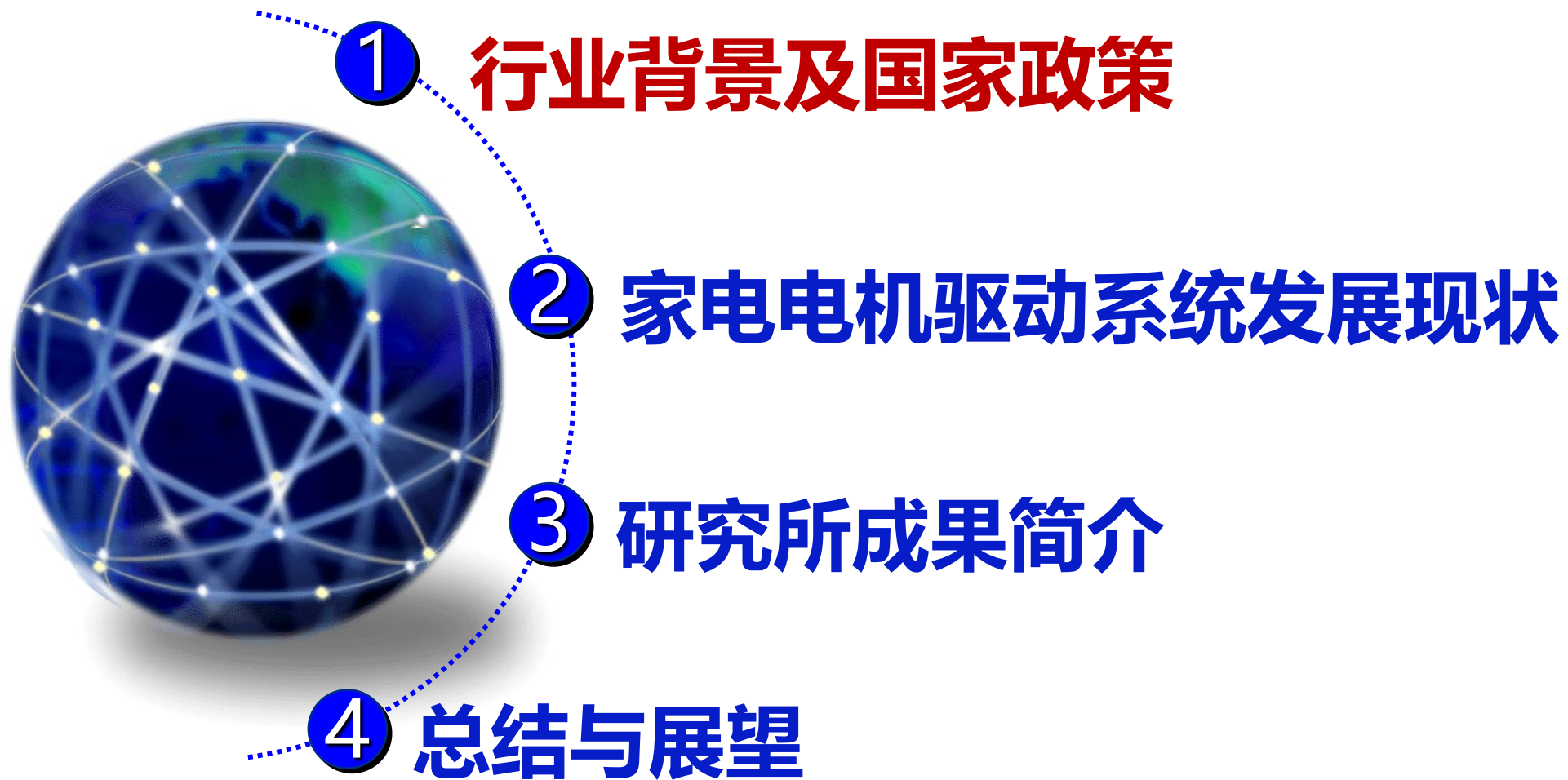
2022年1月6日 深圳



汇报提纲



汇报提纲



行业背景及国家政策

- **“十四五”发展规划指出深入实施增强制造业核心竞争力和技术改造专项，鼓励企业应用先进适用技术、加强设备更新和新产品规模化应用。**
- **工信部、市场监管总局2021年10月29日印发《电机能效提升计划（2021-2023年）》**
- **《电动机能效限定值及能效等级》（GB 18613-2020），2020-05-29发布，2021-06-01实施。**本标准所代替标准的历次版本发布情况为:GB18613—2002、GB18613—2006、GB18613—2012; GB25958—2010。
- **2021年12月8日至10日在北京举行中央经济工作会议。**会议对明年经济工作作出七个方面部署。会议认为，进入新发展阶段，我国发展内外环境发生深刻变化，面临许多新的重大理论和实践问题，需要正确认识和把握（包括五个方面）。
- **要正确认识和把握碳达峰碳中和。**实现碳达峰碳中和是推动高质量发展的内在要求，要坚定不移推进，但不可能毕其功于一役。要坚持全国统筹、**节约优先、双轮驱动**、内外畅通、防范风险的原则。传统能源逐步退出要建立在新能源安全可靠的替代基础上。要立足以煤为主的基本国情，抓好煤炭清洁高效利用，增加新能源消纳能力，推动煤炭和新能源优化组合。要狠抓绿色低碳技术攻关。要科学考核，新增可再生能源和原料用能不纳入能源消费总量控制，**创造条件尽早实现能耗“双控”向碳排放总量和强度“双控”转变**，加快形成减污降碳的激励约束机制，防止简单层层分解。要确保能源供应，大企业特别是国有企业要带头保供稳价。要深入推动能源革命，加快建设能源强国。



一、总体要求

（一）指导思想 坚持节能优先，以电机系统生产制造、技术创新、推广服务和产业服务为重点方向，积极实施节能改造升级和能量系统优化，不断提升电机系统能效，支撑重点行业和领域节能提效，助力实现碳达峰碳中和目标。

（二）主要目标 到2023年，高效节能电机年产量达到1.7亿千瓦，在役高效节能电机占比达到20%以上，实现年节电量490亿千瓦时，相当于年节约标准煤1500万吨，减排二氧化碳2800万吨。推广应用一批关键核心材料、部件和工艺技术装备，形成一批骨干优势制造企业，促进电机产业高质量发展。

二、重点任务

（一）扩大高效节能电机绿色供给

1. 加快提升绿色设计能力； 2. 大力推动基础材料及零部件绿色升级； 3. 持续提高电机产品绿色制造水平；

（二）拓展高效节能电机产业链

4. 加快推进电机系统技术创新； 5. 积极实施电机高效再制造

（三）加快高效节能电机推广应用

6. 开展存量电机节能改造； 7. 加大高效节能电机应用力度

（四）推进电机系统智能化、数字化提升

8. 加快推动电机系统智能化； 9. 协同推进电机系统数字化

三、保障措施

（一）加强组织实施 （二）严格监督管理 （三）强化节能服务 （四）积极宣传引导



行业背景及国家政策

□ 深入实施智能制造和绿色制造工程，发展服务型制造新模式，推动制造业高端化智能化绿色化

打造数字经济新优势

充分发挥海量数据和丰富应用场景优势，促进数字技术与实体经济深度融合

推动数据赋能全产业链协同转型

数字经济重点产业

云计算 大数据 物联网 工业互联网
区块链 人工智能 虚拟现实和增强现实

加快发展方式绿色转型



非化石能源占能源消费总量
比重提高到**20%左右**

清洁低碳、安全高效的能源体系

- ◇ 制定 2030 年前碳排放达峰行动方案
- ◇ 完善能源消费总量和强度双控制度，重点控制化石能源消费
- ◇ 实施以碳强度控制为主、碳排放总量控制为辅的制度，支持有条件的地方和重点行业、重点企业率先达到碳排放峰值



□ 我国家用电器的发展逐步由传统的制造业向**智能化与低碳化**的方向过渡，但是其过程仍然存在亟待突破的问题。



汇报提纲



1 高效能电机驱动系统 — 电机结构优化

□ 转子结构、轴承、散热优化



气悬浮制冷压缩技术



智能散热技术

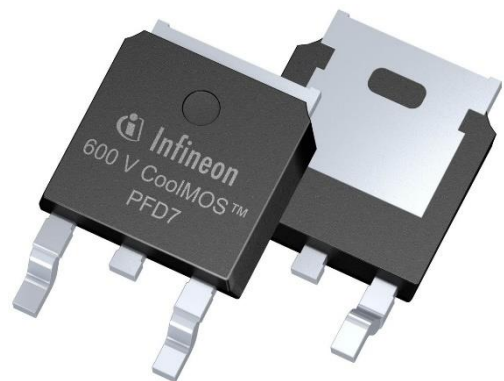


磁阻压缩机技术

- ✓ 气悬浮轴承**高速运行高温工况**下减小摩擦损耗
- ✓ 智能**控温散热技术**，实时监测冷却液温度，降低损耗同时确保电机在最佳温度范围
- ✓ 磁阻电机代替永磁电机减少稀土材料消耗

1 高效能电机驱动系统 — 低功耗器件

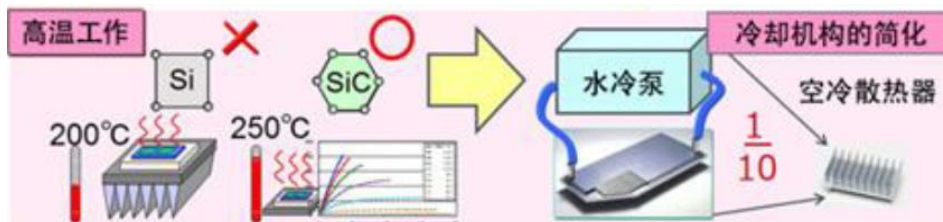
□ 快恢复二极管、宽禁带器件、散热设计



Cool MOSFET



SiC器件可以减小开关损耗和导通损耗



SiC器件具有耐高温特点

- ✓ Infineon推出集成快恢复二极管的Cool MOSFET，减小反向恢复损耗
- ✓ 采用宽禁带器件可以降低变换器损耗，简化散热设计，提高系统效率

1 高效能电机驱动系统 — 高效率控制算法

□ 变载波频率控制、母线电压自适应



- ✓ 根据负载情况**调节载波频率**，可以有效降低变换器损耗
- ✓ 自适应调整母线电压可以降低PFC与逆变器开关损耗

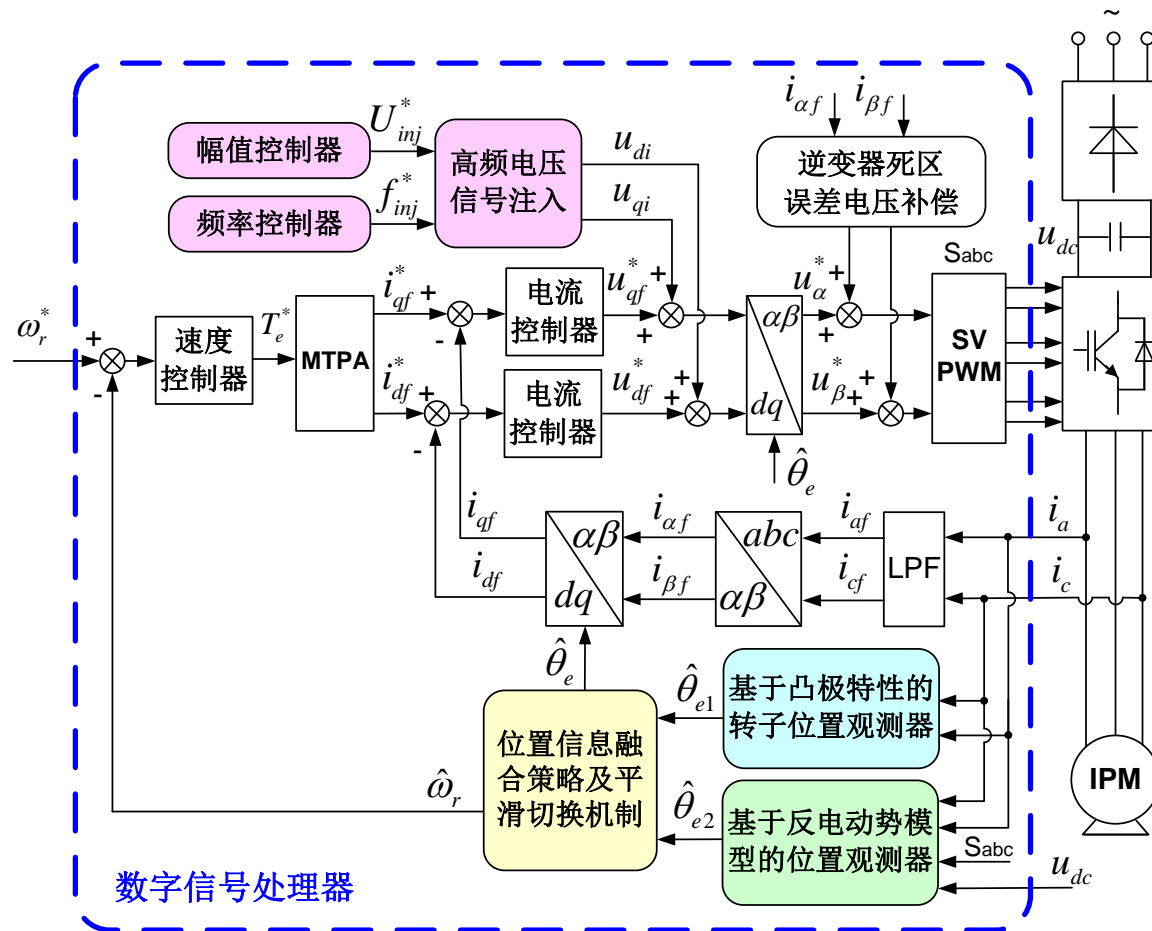


2 高可靠性家电用电机驱动系统 — 无位置传感器

□ 无位置传感器应用场景



◆ 空调压缩机内部空间狭小，且工况恶劣，不适合安装位置传感器，采用无传感器方法可以提高运行可靠性



全速域无位置传感器控制技术



2 高可靠性家电用电机驱动系统 — 无电解电容驱动器

□ 薄膜电容替代电解电容的应用

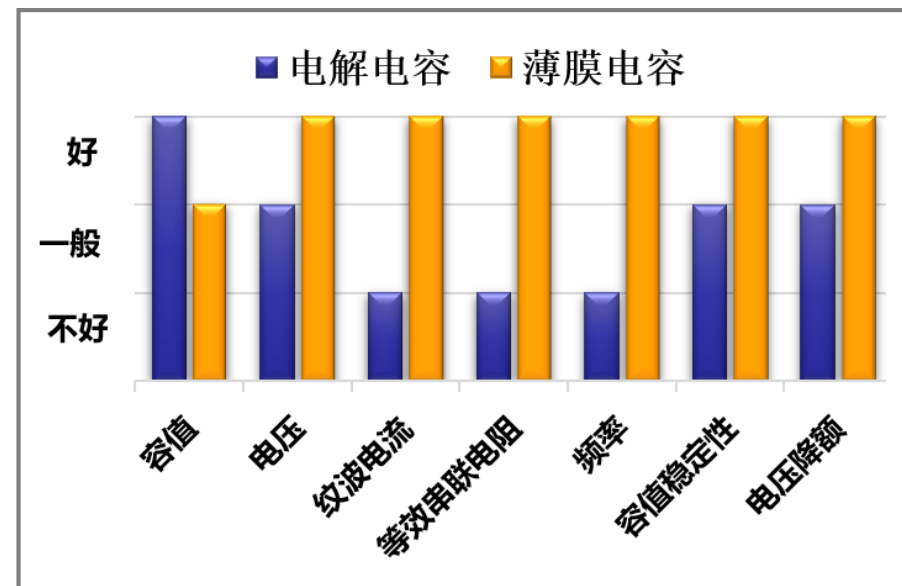
◆ 电解电容特点:

□ 寿命短, 受纹波电流影响大, 可靠性低



◆ 薄膜电容特点

□ 寿命长, 受纹波电流影响小, 可靠性高

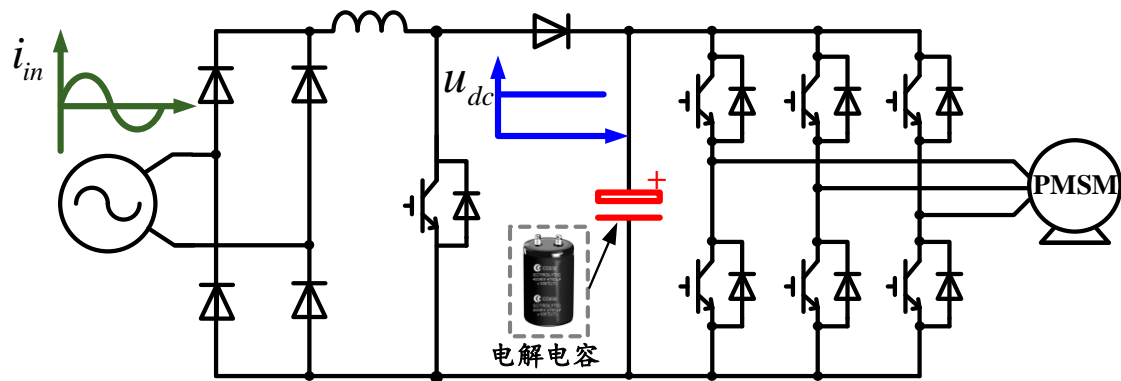


✓ 采用薄膜电容代替电解电容能够降低系统成本, 提升功率密度, 延长系统寿命。

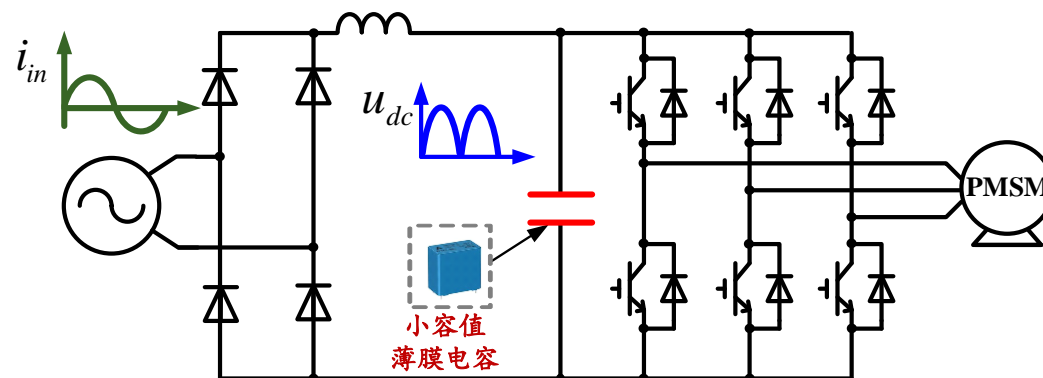


2 高可靠性家电用电机驱动系统 — 无电解电容驱动器

□ 无电解电容电机驱动技术



传统单相供电驱动系统



单相供电无电解电容驱动系统

技术优势:

- ✓ 电容电感体积减小, 可省略PFC电路
- ✓ 降低成本且电能质量符合IEC-61000-3-2标准

对比项	传统方案	无电解电容方案
PFC电路	PFC电感+IGBT+FRD	无PFC电路
储能单元	2个大容值电解电容	1个小容值薄膜电容



2 高可靠性家电用电机驱动系统 — 健康预测管理

实时监控状态

- ✓ 由温度在线辨识算法实时监测家电用压缩机热负荷等健康状况，延长家用电器使用寿命，提高家电用电机驱动系统的安全性。



温度传感器

×



温度在线辨识算法

✓

定子温度



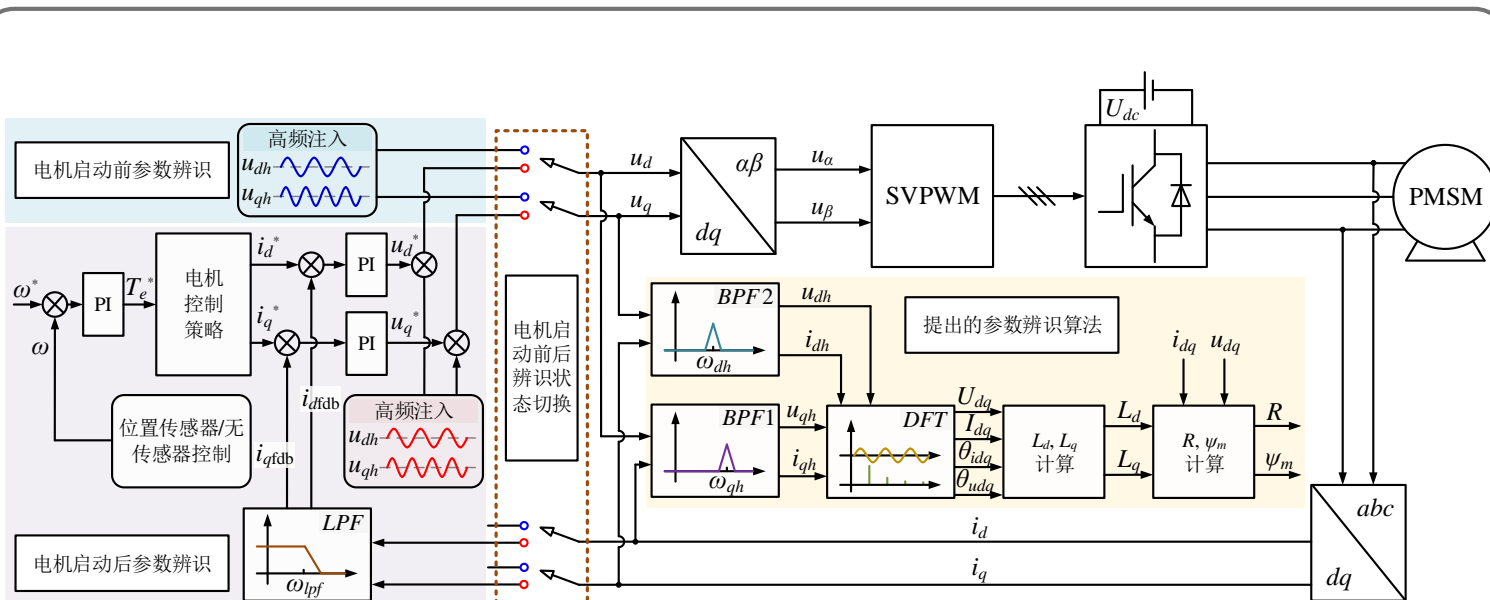
不同品牌与功率等级压缩机



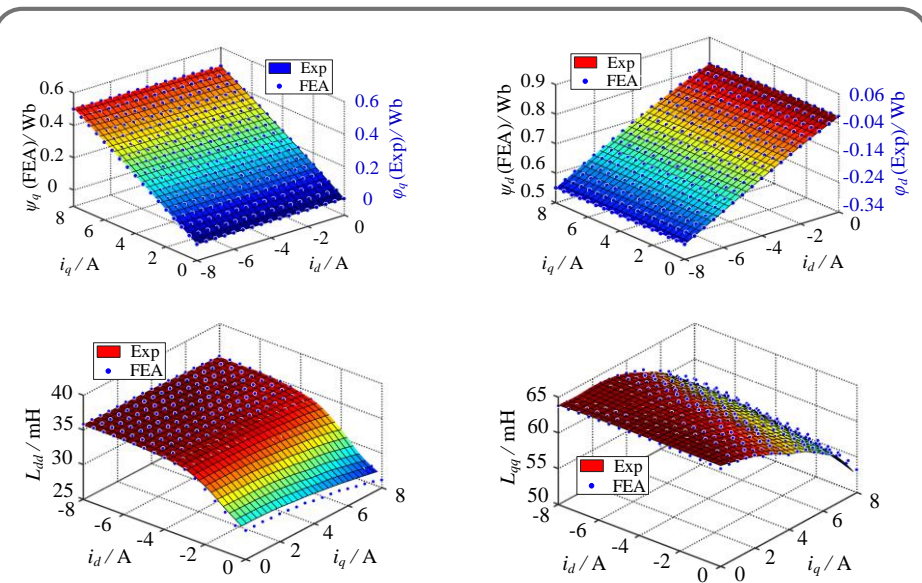
3 高适应性家用电器驱动系统 — 参数自学习及自整定

□ 自学习技术难点及解决策略

✓ 采用电气及机械**参数自学习**技术，通过对控制策略**自整定**，应用于复杂多变的家用电器控制场合，可提高控制性能的鲁棒性，对提升家用电器驱动系统**舒适性**、**可靠性**等方面具有重要意义。



永磁同步电机**参数自学习**控制策略框图



不同工况对应**磁链**、**电感**变化情况



3 高适应性家电用电动机驱动系统 — 智能化

□ 基于云数据库的智能操作及控制系统



- ✓ 基于云数据库实现**数据管理**，完善设备内各种**数据监测**，并进行**实时控制**
- ✓ 利用数字化手段**维护和管理家用电器**，优化家用电器的**运行状态**，提高控制效率，营造**舒适居住环境**



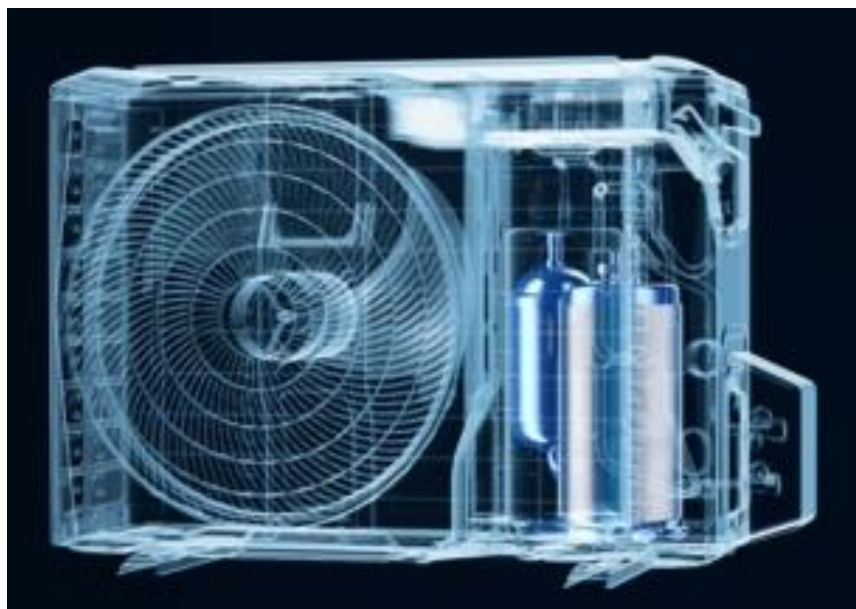
● 智能家居系统



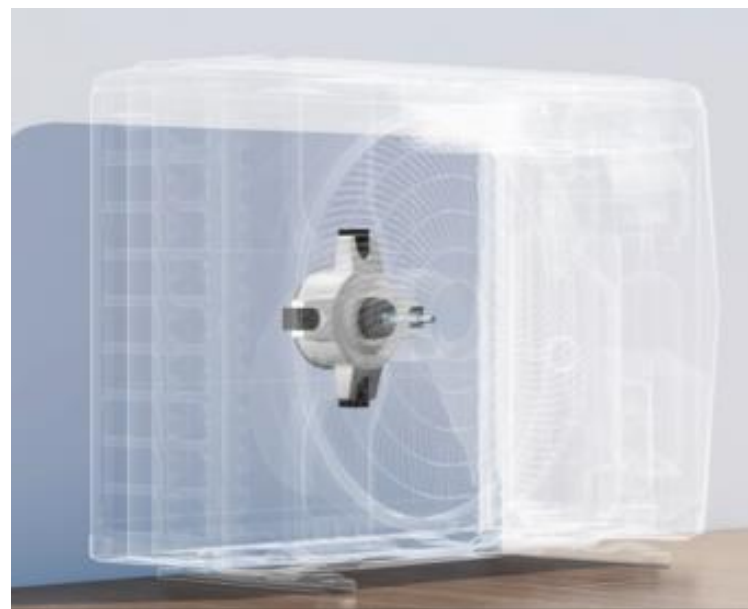
4 高功率密度电机驱动系统 — 小型化

□ 高功率密度压缩机

- ✓ 新一代变频压缩机体积比行业现有电机**减小30%**，同时将高中低频全频段噪音进行有效降低



高功率密度制冷压缩机



高功率密度风机

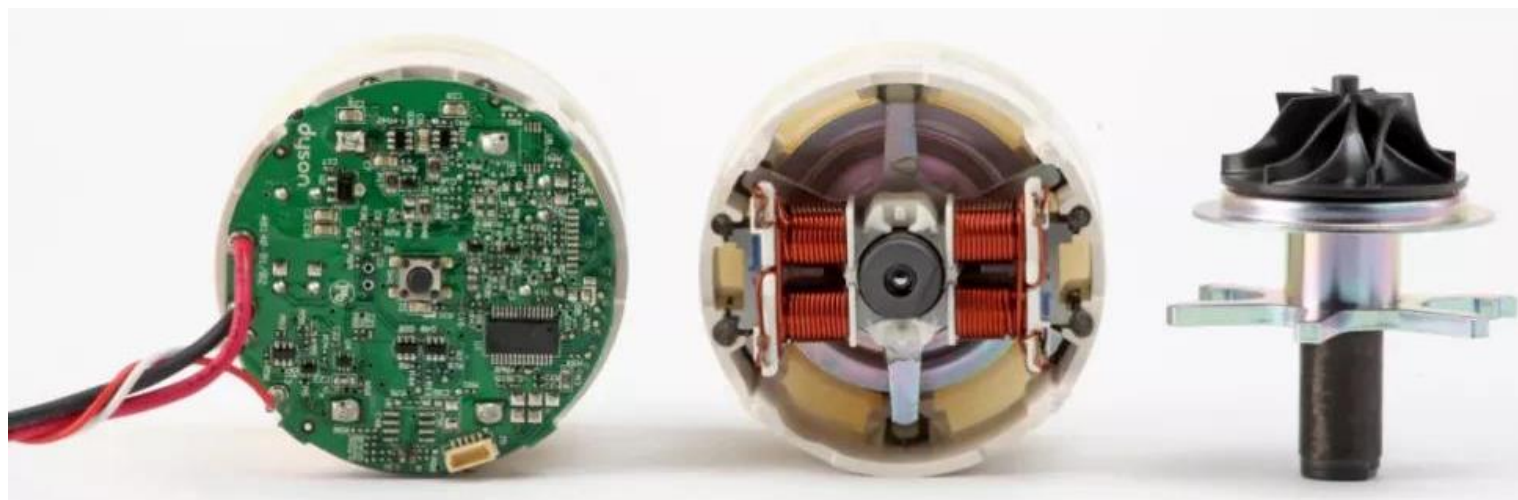


4 高功率密度电机驱动系统 — 高速化集成化

□ 驱动一体化



✓ 英国dyson——360
Heurist 透明版



✓ Dyson 数码马达 125000r/min



4 高功率密度电机驱动系统 — 高频化

□ 宽禁带器件应用

Si (10.2 cm)



GaN (7.6 cm)



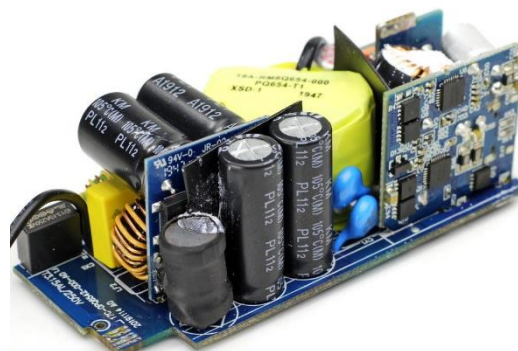
GaN (4.8 cm)



GaN (2.8 cm)



✓ 宽禁带材料为新一代高功率密度驱动系统提供解决方案



GaN充电器



40kHz 70kHz PFC电感



GaN图腾柱PFC变换器

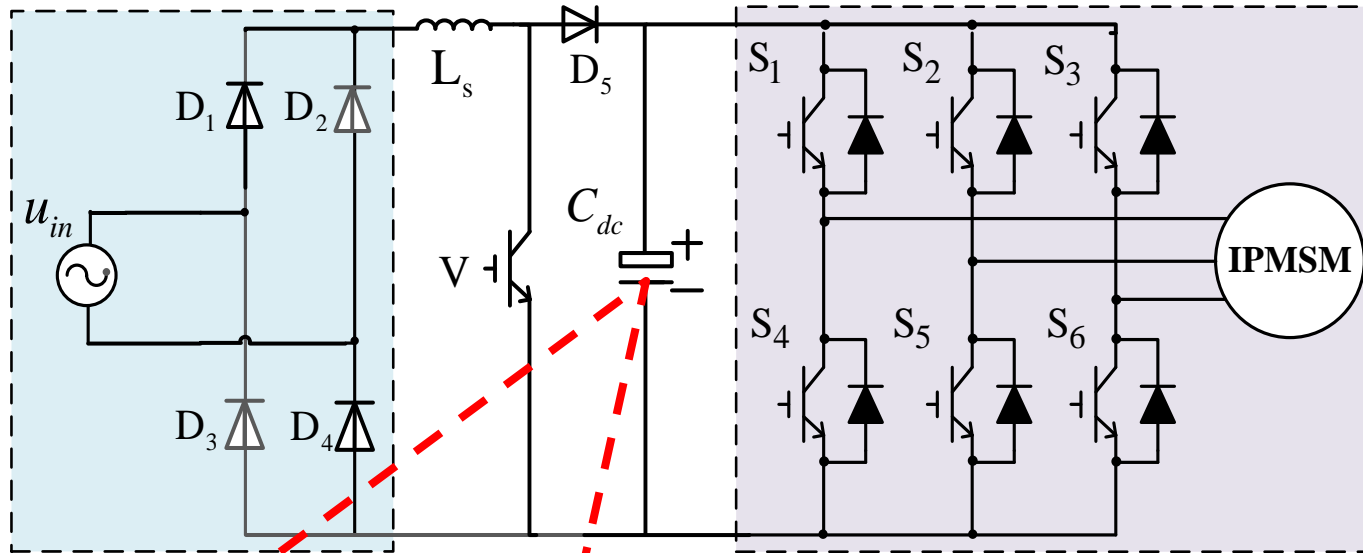


SiC功率器件驱动器



5 低成本家电用电动机驱动系统 — 小电解电容驱动器

□ 小电解电容驱动技术



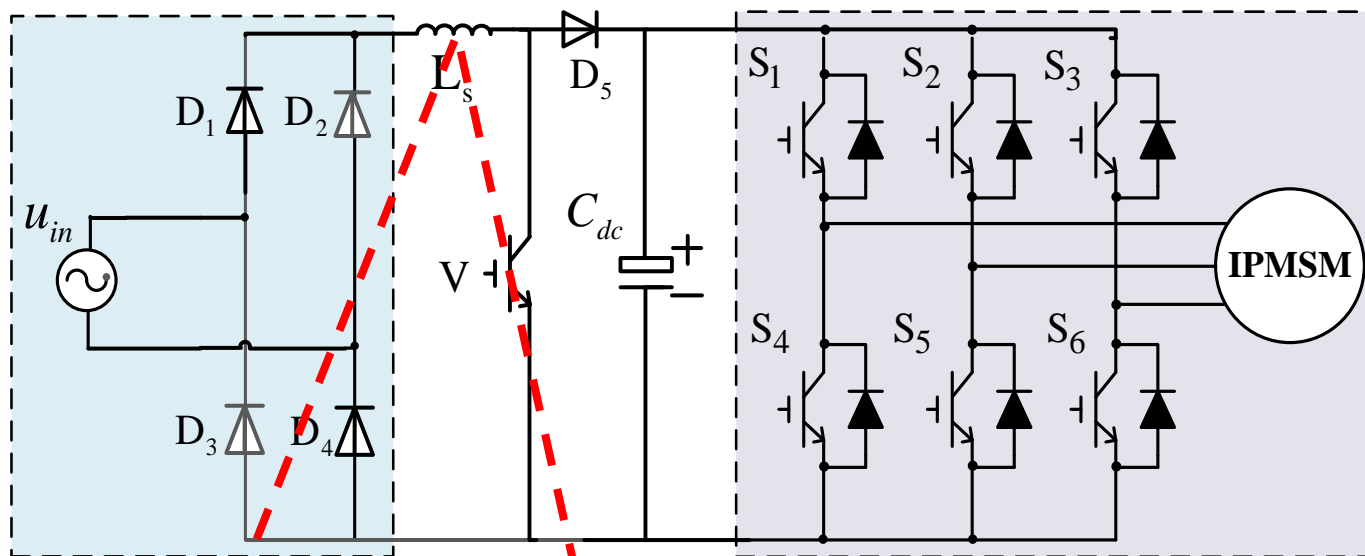
电解电容特点

- ◆ 体积大，占用空间，功率密度低
- ◆ 整流二极管导通角小，网侧电流畸变严重

- ✓ 可以通过减小母线电容容值，减小体积，降低成本，提升功率密度
- ✓ 母线电容降为原值的1/2或1/3
- ✓ 小电解电容驱动系统产生问题
 - 母线电压波动抑制
 - 母线电容电流纹波抑制，母线电容温度降低

5 低成本家电用电机驱动系统 — 减小PFC电感

□ 减小滤波电感



✓ 通过减小PFC电感值，可以降低成本

◆ 小PFC电感待解决问题：

✓ 减小电感之后，环路的稳定性受到影响，须通过算法保持系统稳定性

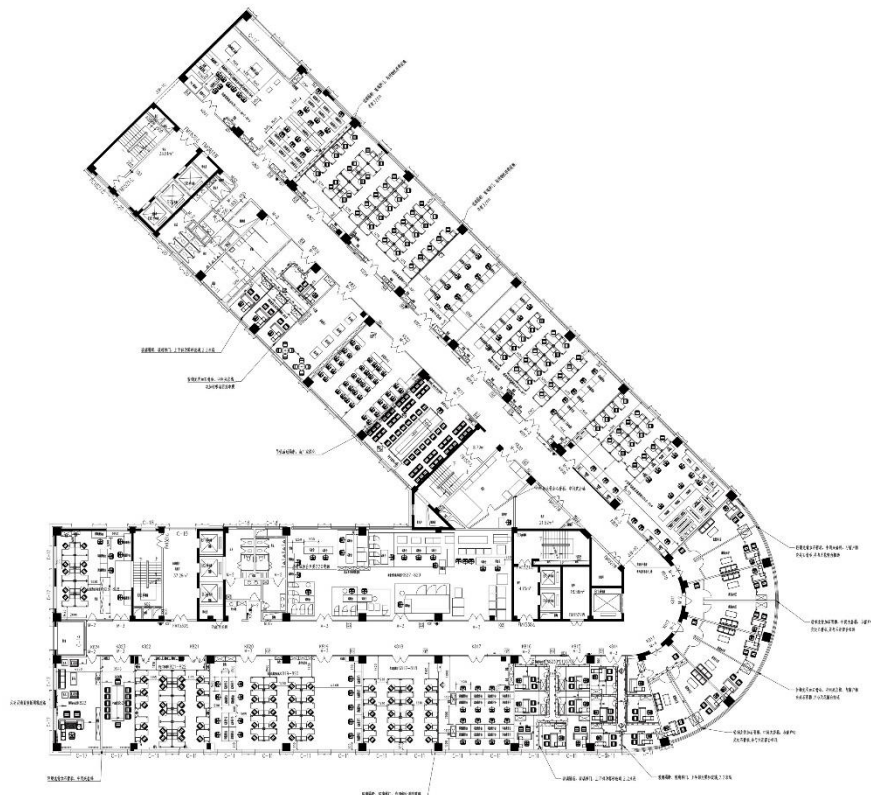
✓ EMI辐射以及提升PFC电路开关频率后IGBT的温升问题



汇报提纲



科技创新大厦/基础科研楼



PEED
电力电子与电力传动

电力电子与电力传动研究所

Power Electronics and Electrical Drives

电力电子与电力传动研究所 科创大厦8层平面图

电力电子与电力传动研究所 科创大厦负二层平面图



哈尔滨工业大学
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



电力电子与电力传动研究所
Institute of Power Electronics and Electrical Drives

哈工大电力电子与电力传动研究所成员

徐殿国
教授/博导/原副校长/
IEEE Fellow



交流电机驱动系统

电力电子化电力系统

High Power AC Motor Drives

- ◆ High Power Synchronous Motor Drive
- ◆ Smart Well and Digital Oil Field
- ◆ MV/LV IM/SM Motor Soft Starting System

AC Servo Drives

- ◆ Parameters identification and auto-tuning
- ◆ Mechanical Resonance Suppression
- ◆ Multiphysics field analysis

AC Motors & Drives

- ◆ FOC & DTC of AC Motors
- ◆ Speed/Position Sensorless Control
- ◆ Efficiency Enhancement
- ◆ Electrolytic Capacitorless Drives

MT-VSC-HVDC

- ◆ HV DC Transmission System
- ◆ Multi-Terminal DC Transmission
- ◆ DC Grid & Microgrid

Intelligent Network Connectivity

- ◆ Application of Power Line Communication (PLC)
- ◆ Communication Technology of Smart Grids

Renewable Energy

- ◆ Wind Power Generation system control
- ◆ Three Phase Solar Inverters
- ◆ Power Electronic Based Power System

Lighting Electronics

- ◆ LED Drives
- ◆ Wireless Power Transfer
- ◆ Ultra High Frequency Power Converters
- ◆ Biological Effect of UV lamp

Power Quality Mitigation

- ◆ Power Quality of Power Distribution System
- ◆ Analysis and Suppression of Resonance
- ◆ UPQC



高强
博士/教授

贵献国
博士/副教授

杨明
博士/教授

于泳
博士/教授

王高林
博士/教授

张国强
博士/副教授

王勃
博士/副教授

欧景
博士/副教授

李彬彬
博士/副教授

刘晓胜
博士/教授

姚友素
博士/副教授

张学广
博士/教授

张相军
博士/副教授

杨华
博士/高工

王懿杰
博士/教授

管乐诗
博士/副教授

武健
博士/讲师

哈工大-电力电子与电力传动研究所简介

教授



高强



刘晓胜



于泳



杨明



王高林



王懿杰



张学广

副教授



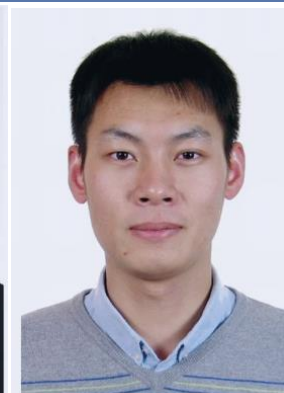
张相军



贵献国



武健



李彬彬



张国强



王勃



管乐诗



姚友素



欧景

研究方向

RESEARCH DIRECTIONS

高频/超高频功率变换器

High / Super High Frequency Power Converter

高温电力电子技术

High Temperature Power Electronics

电能与信息无线传输

Power and Information Wireless Transfer

照明电子与特种电源

Lighting Electronics and Special Power Supply

交流伺服系统

AC Servo System

交流电机无传感器控制

Sensorless Control for AC Motors

大功率变换器与交流传动

High Power Inverter and AC Drives

交流传动系统故障预测

Fault Prediction for AC Drives System

特种电机及驱动

Special Motor and Drives

电力电子与电力系统集成

Integration of Power Electronics and Power System

可再生能源功率变换

Renewable Energy Power Converter

电能质量控制

Power Quality Control

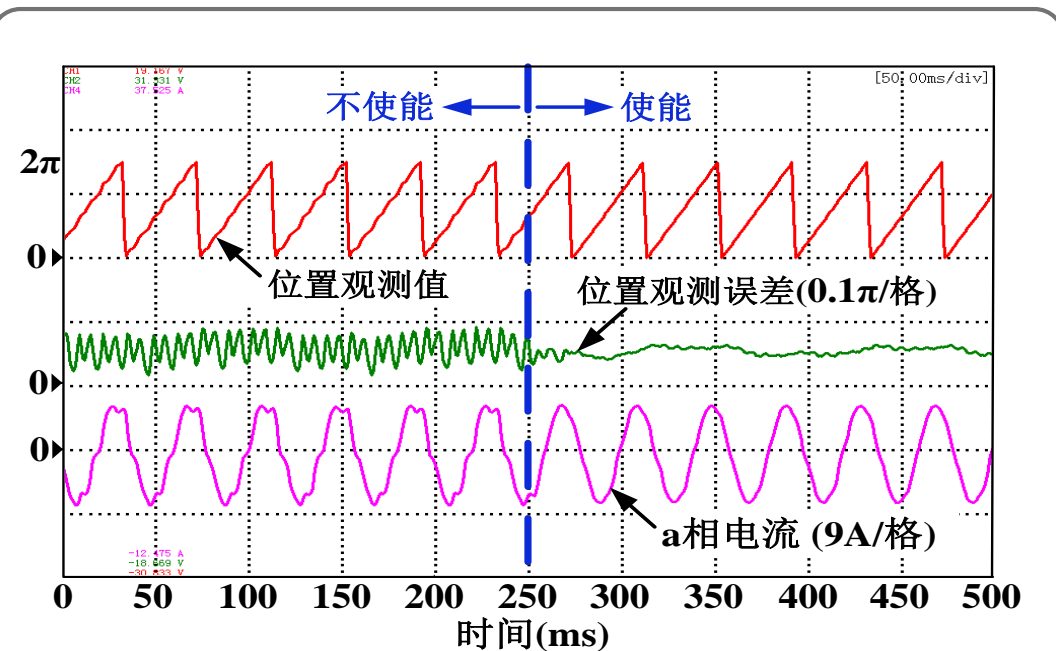
电力系统载波通信网络

Power System Communication Network

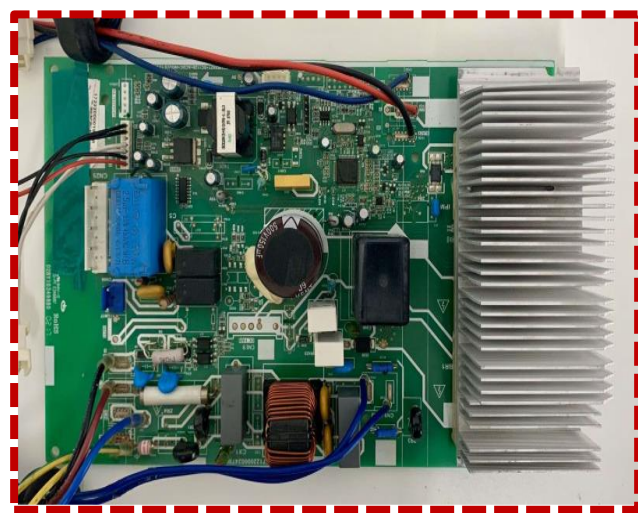
永磁电机无位置传感器控制技术 — 模型法

□ 关键技术 — 位置误差抑制

- ✓ 逆变器死区补偿技术及空间谐波建模
- ✓ 自适应滤波网络构建
- ✓ 复杂工况下位置观测误差抑制及补偿



位置观测误差抑制技术



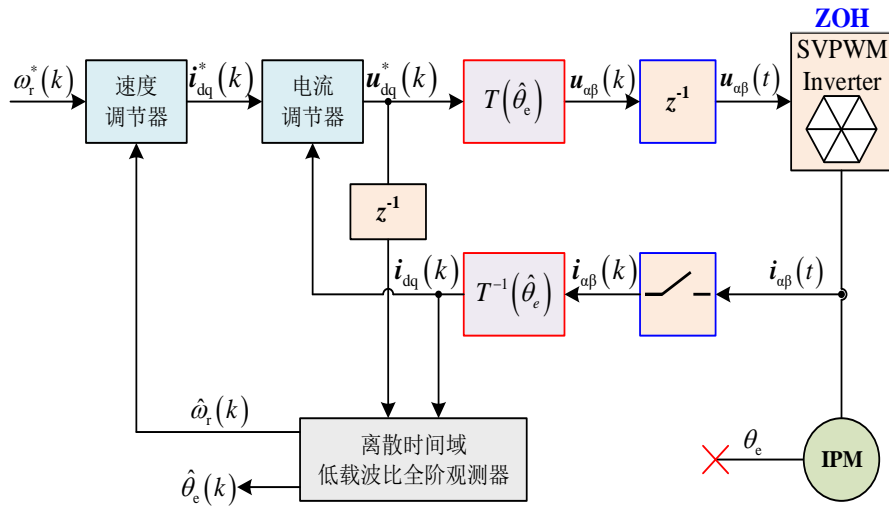
家用空调驱动系统



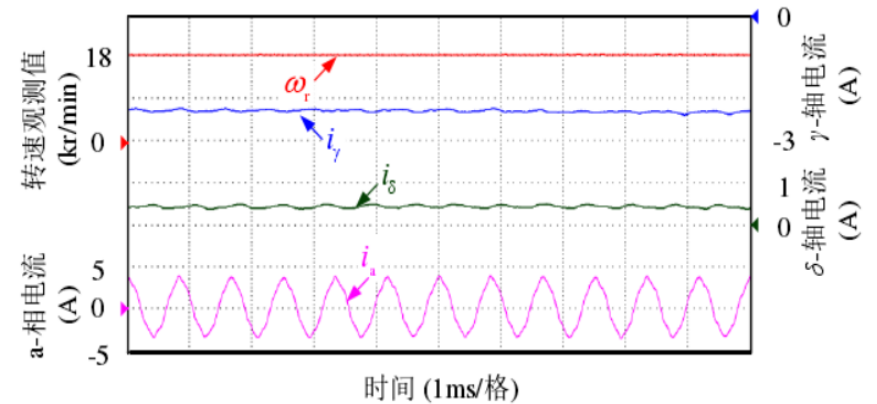
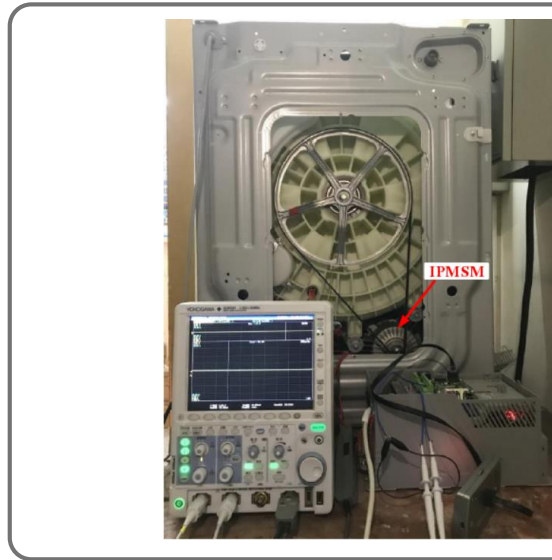
永磁电机无位置传感器控制技术 — 模型法

关键技术 — 高速电机控制

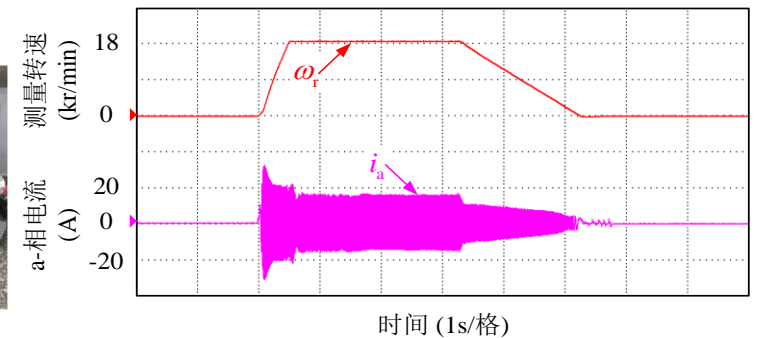
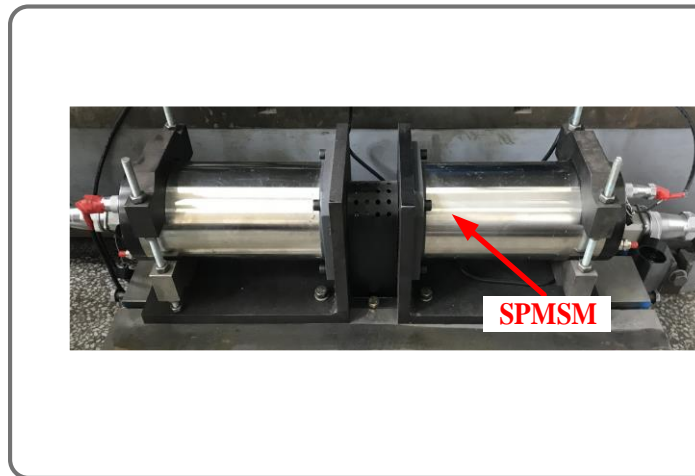
- ✓ 数字控制延迟建模&补偿
- ✓ 多核高速控制器
- ✓ 弱磁控制技术



PMSM低载波比无传感器控制结构框图



18000r/min实验结果



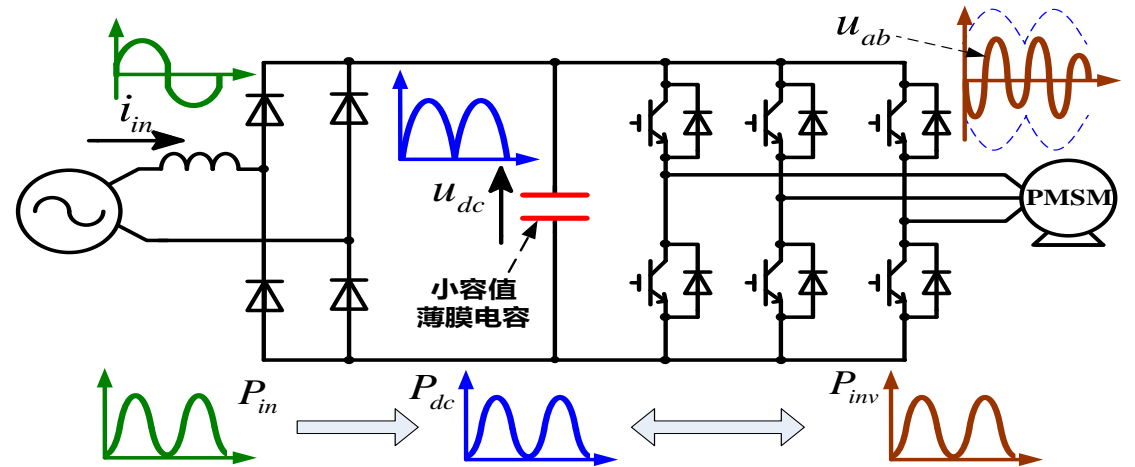
高速运行升降速实验结果



无电解电容驱动控制技术 — 单相供电

□ 单相供电无电解电容驱动系统特性

- ✓ 母线电容容值降低至原先**1/50**左右
- ✓ 省略**功率因数校正**电路
- ✓ 网侧与机侧**耦合严重**



□ 关键问题

- ✓ 网侧输入电流具有**明显谐波成分**
- ✓ 网侧LC谐振导致**驱动系统不稳定**
- ✓ 特定运行频率处系统**低频振荡**



传统驱动器

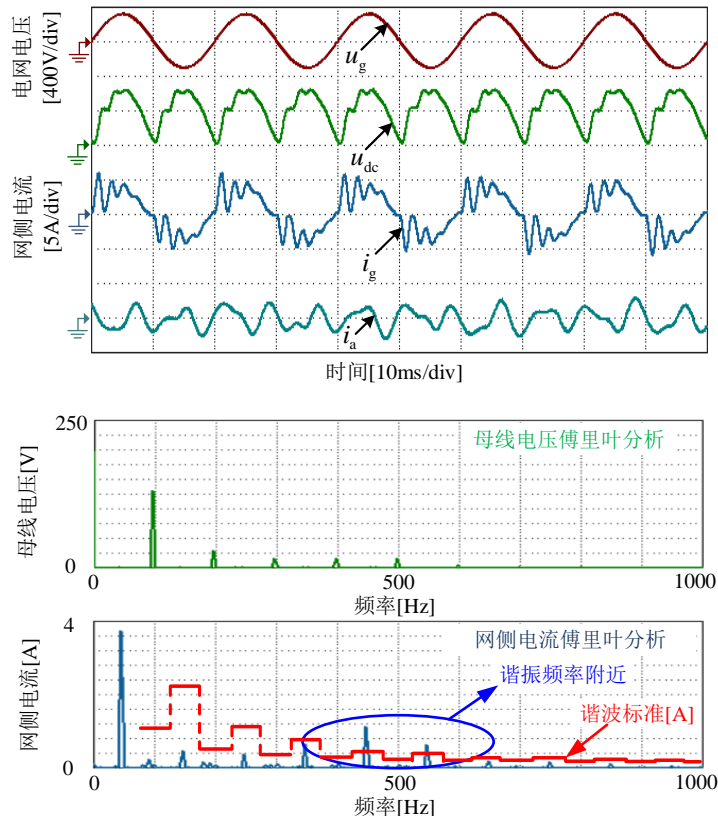


无电解电容驱动器

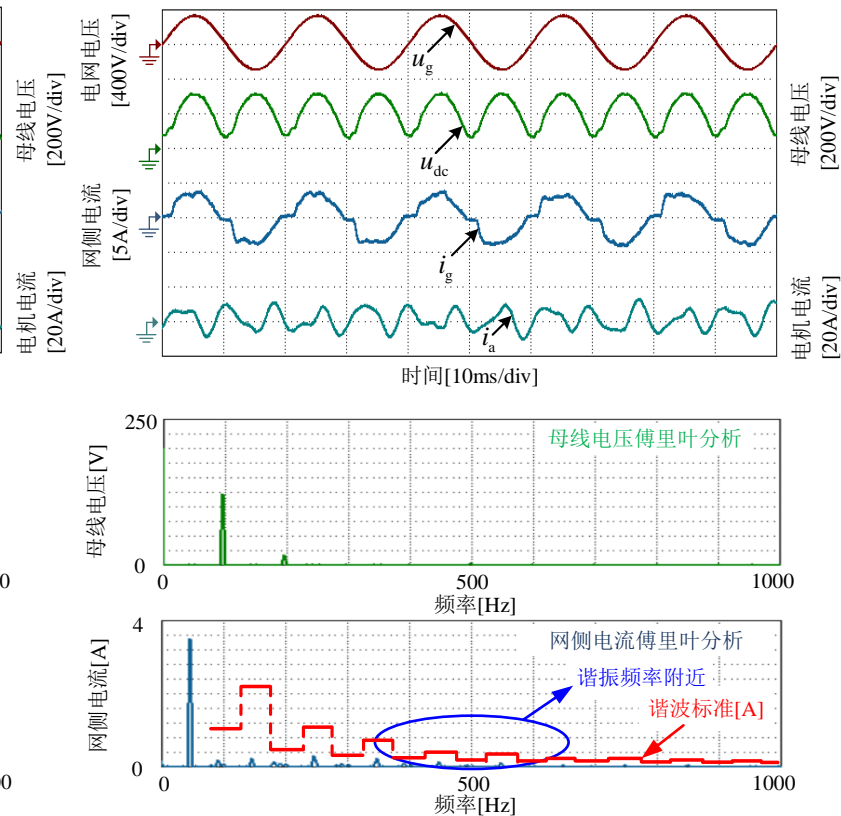
无电解电容驱动控制技术 — 单相供电

关键技术 — 谐振抑制技术

- ✓ 谐振机理分析
- ✓ 有源阻尼控制技术
- ✓ 稳定运行控制技术



未施加谐振抑制方法



施加谐振抑制方法



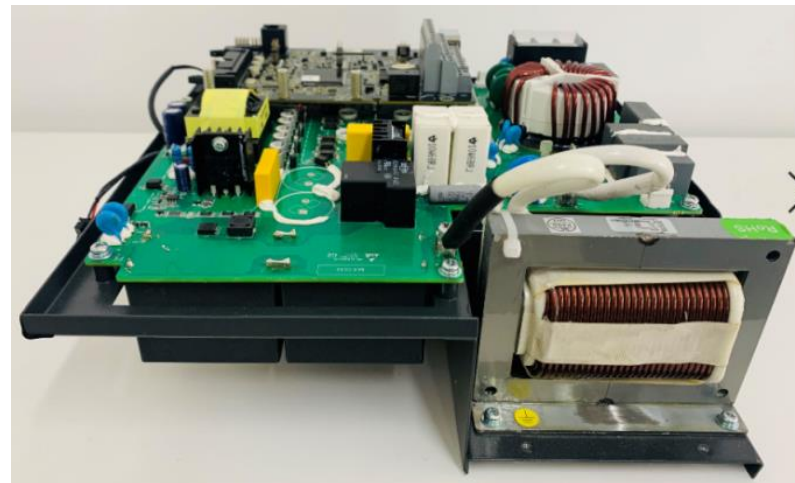
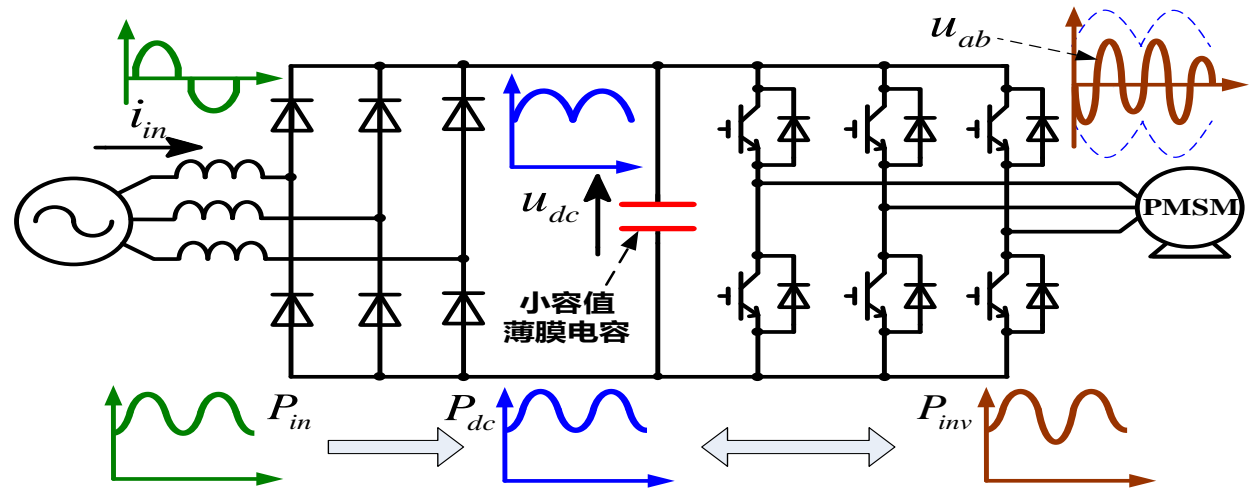
无电解电容驱动控制技术 — 三相供电

□ 三相供电无电解电容驱动系统优势

- ✓ 母线电容容值降低至**1/20**左右
- ✓ 成本降低
- ✓ 驱动器体积减小
- ✓ 网侧电流**谐波降低**、**功率因数提升**

□ 关键问题

- ✓ 母线电压波动工况下**弱磁控制**方法
- ✓ 负载、转矩突变时**母线电压泵升**问题
- ✓ 特定运行频率处系统**低频振荡**问题



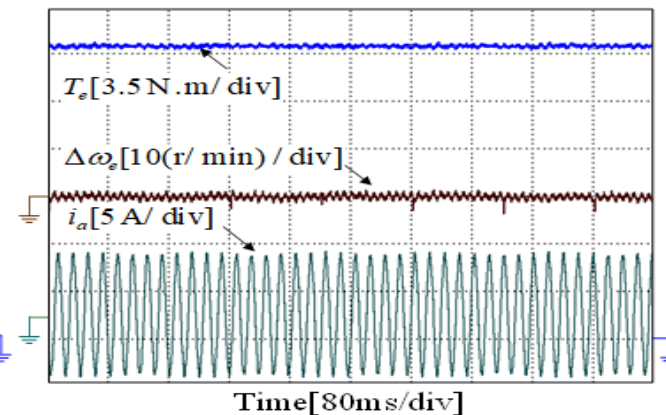
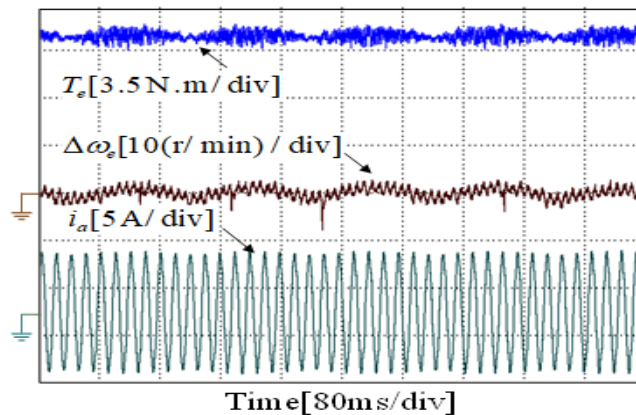
无电解电容水泵一体机



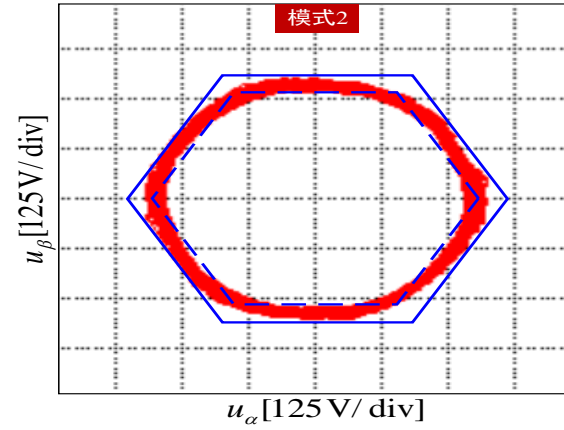
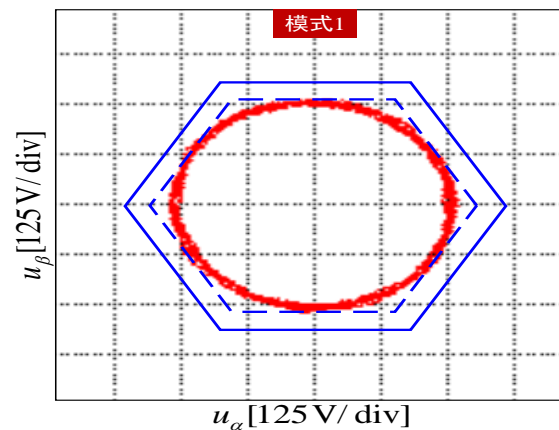
无电解电容驱动控制技术 — 三相供电

关键技术 — 弱磁控制技术

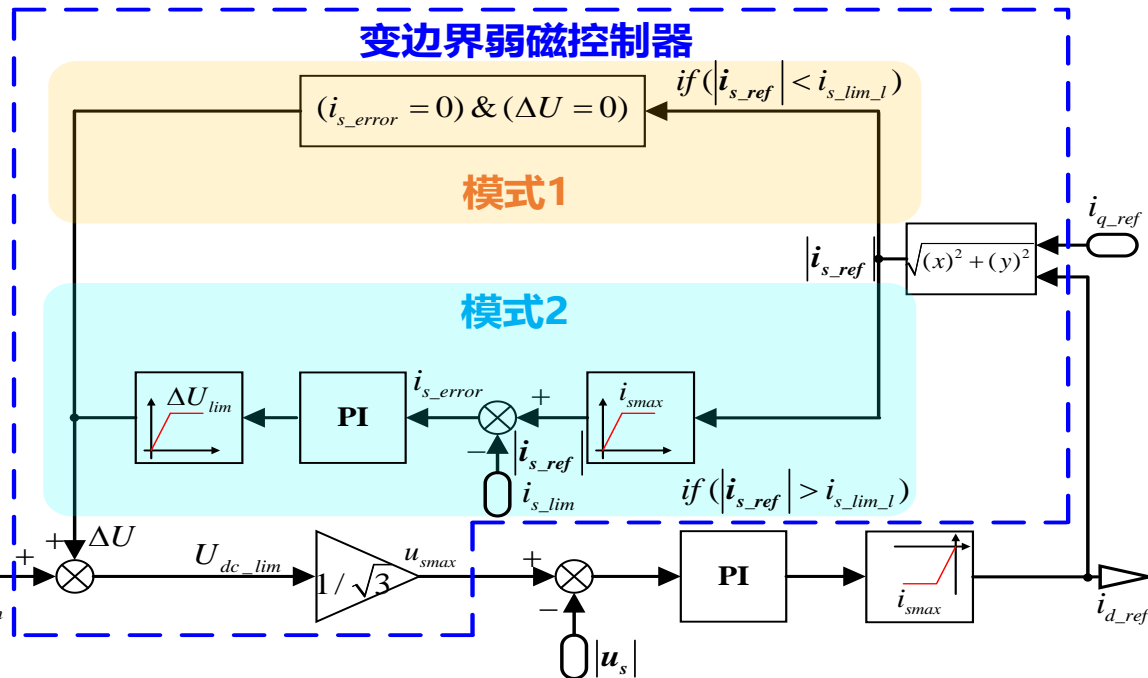
- ✓ 弱磁控制电压边界调节
- ✓ 电机转矩脉动抑制策略



控制前(转矩波动8%) 控制后(转矩波动2%)
转矩谐波 @51Hz & 21N.m



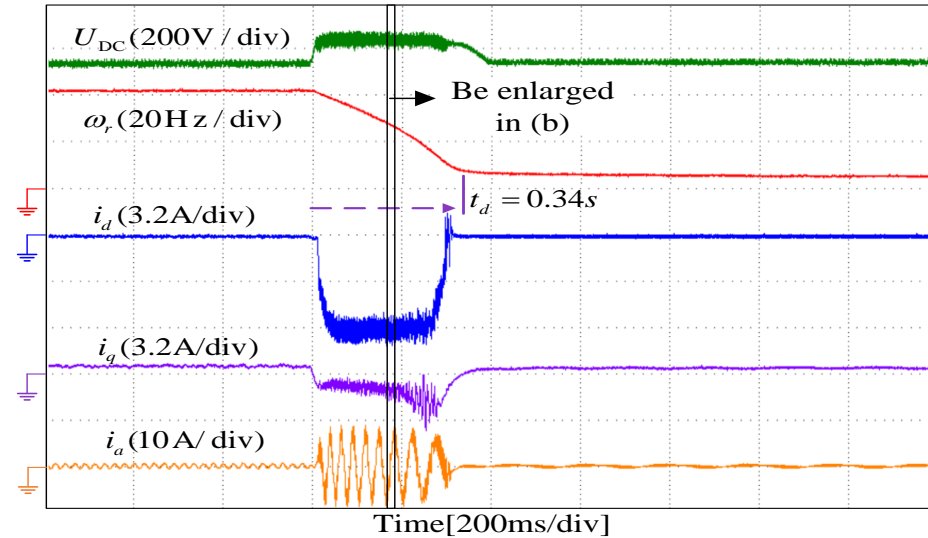
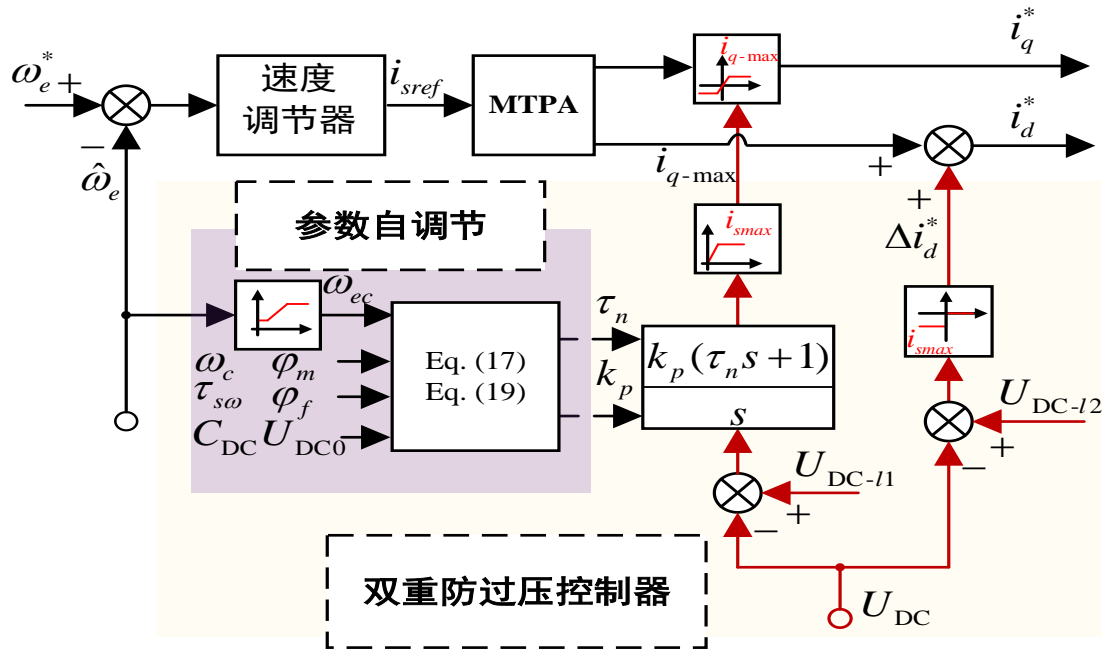
母线电压利用率得到提升



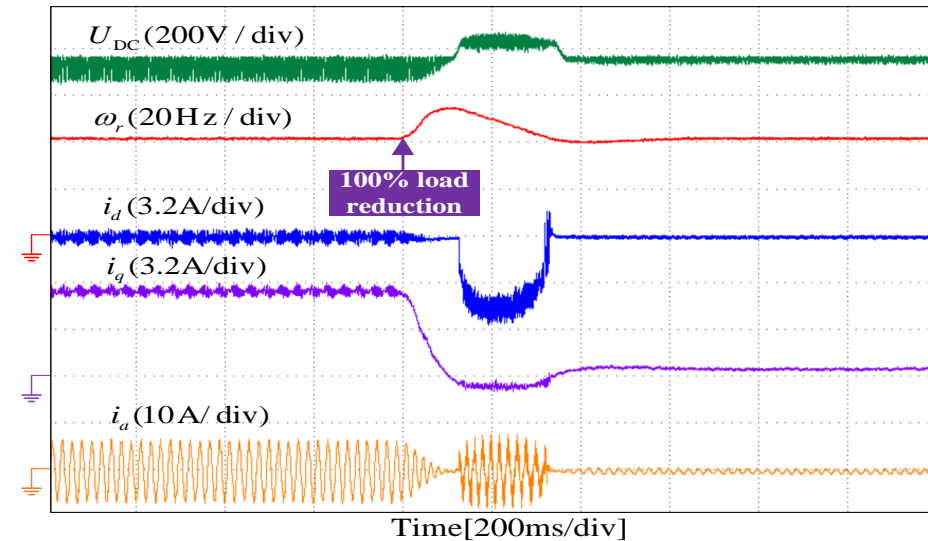
无电解电容驱动控制技术 — 三相供电

关键技术 — 防过压控制技术

- ✓ 双重防过压控制策略
- ✓ 参数自适应控制技术



降速过程防过压
(45~5Hz, 减速时间为0.34s)



减载过程防过压(可突卸100%负载)

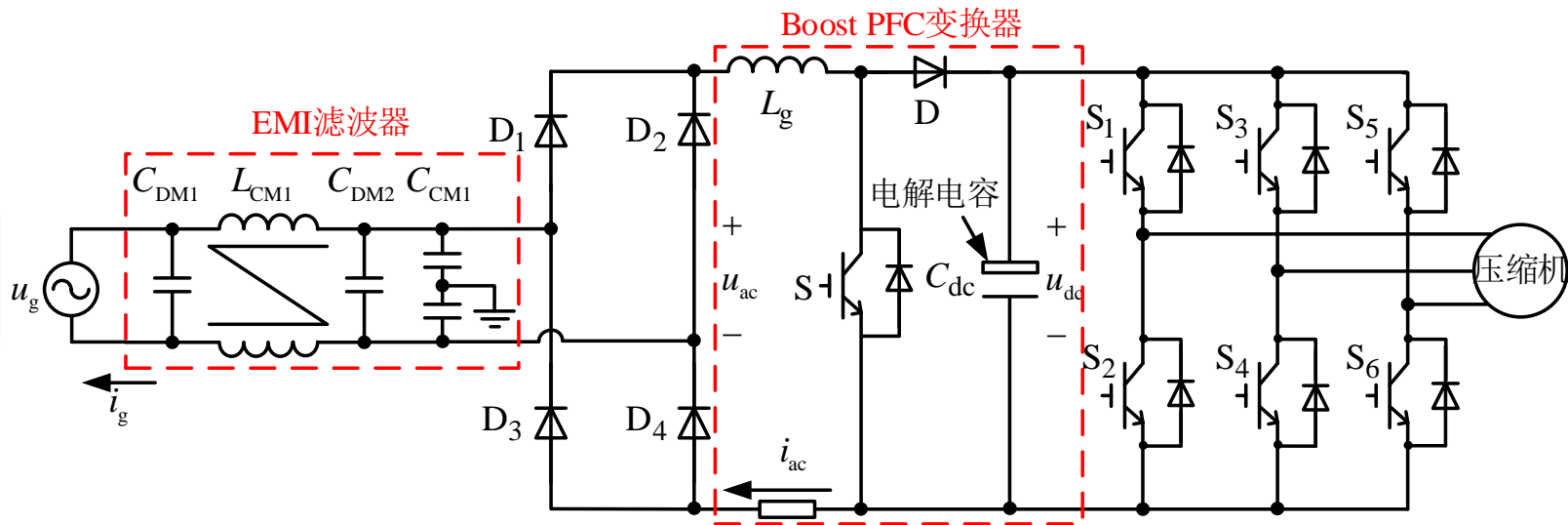


有源前端控制技术

Boost PFC 空调驱动器



空调PFC实验平台

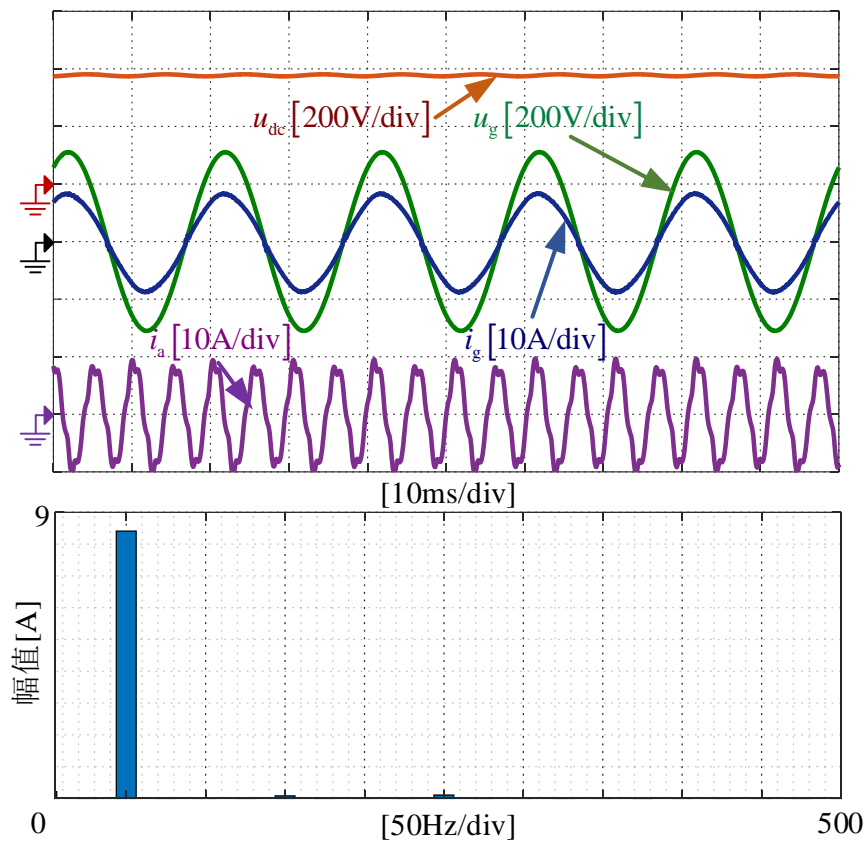
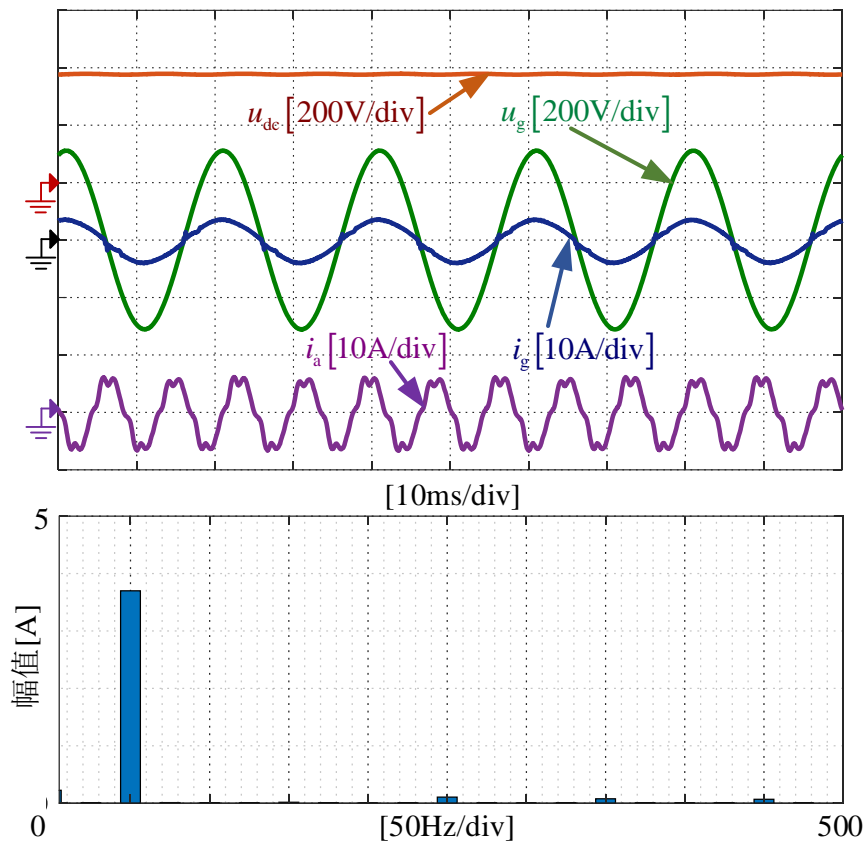


- ✓ 升压电感 L_g
- ✓ 母线电容 C_{dc} $470\mu\text{F} \times 2$
- ✓ 共模电感 L_{CM1} $5\text{mH}-10\text{A}$



有源前端控制技术

□ Boost PFC 空调驱动器



◆ 实验结果

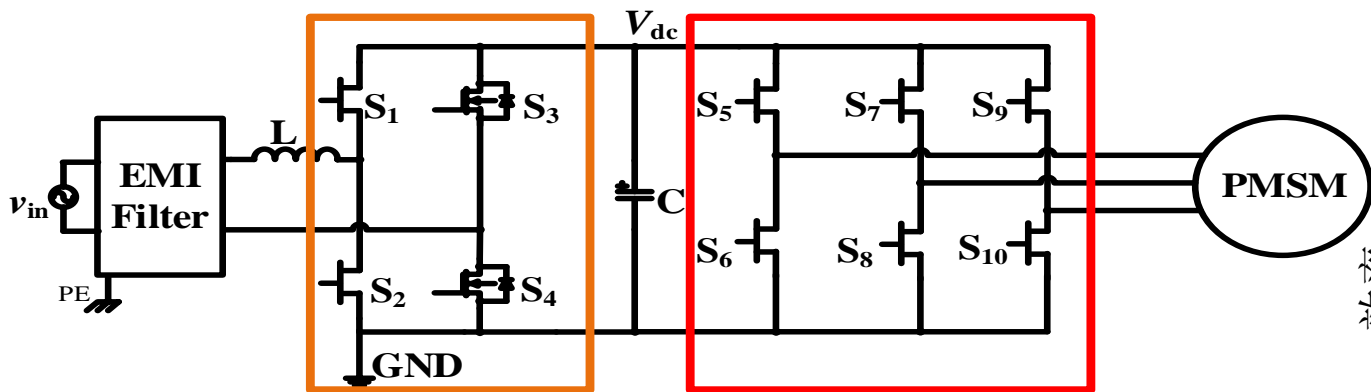
✓ 输入功率0.6kW、
1.3kW

采用PFC技术之后，网侧
电流THD较低，功率因数
接近1。



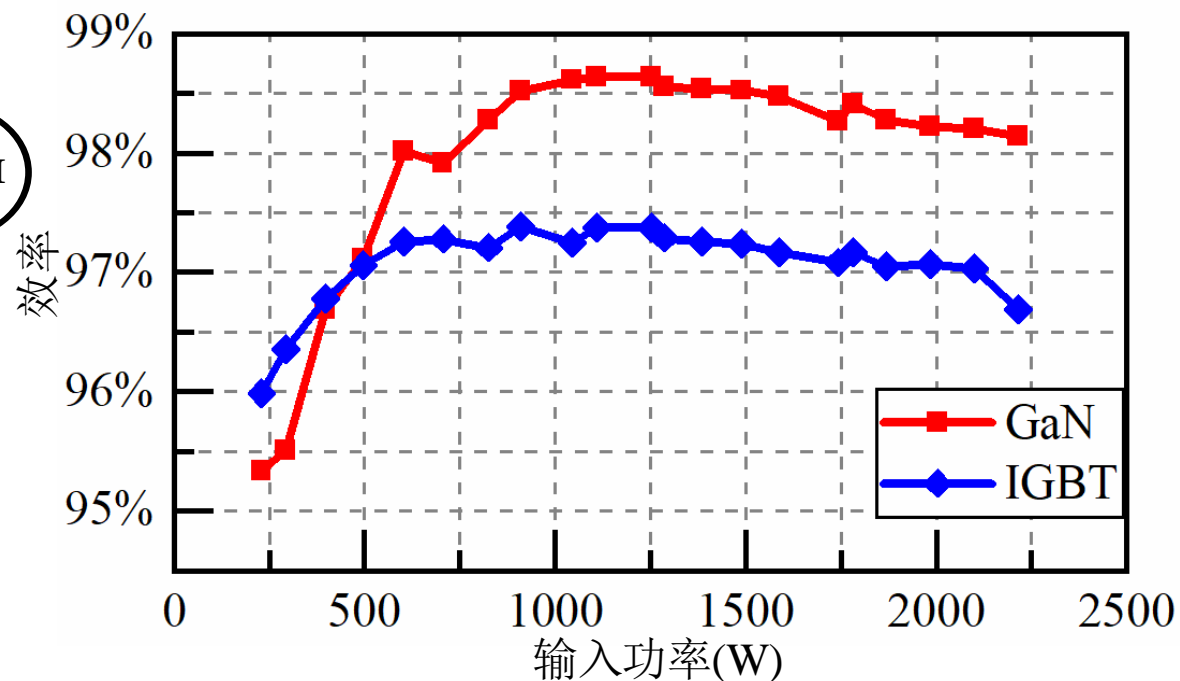
有源前端控制技术

基于GaN的图腾柱高频PFC空调驱动器



图腾柱无桥Boost PFC电路

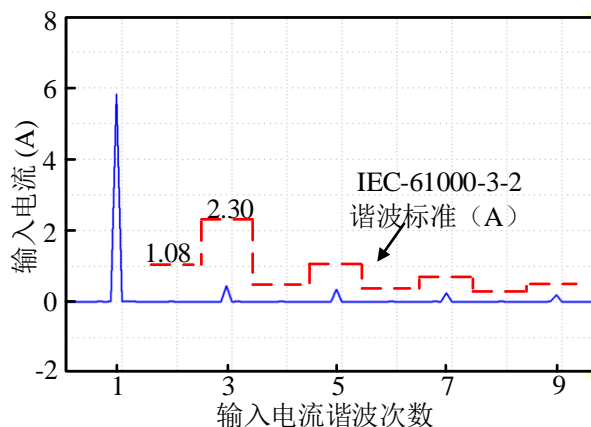
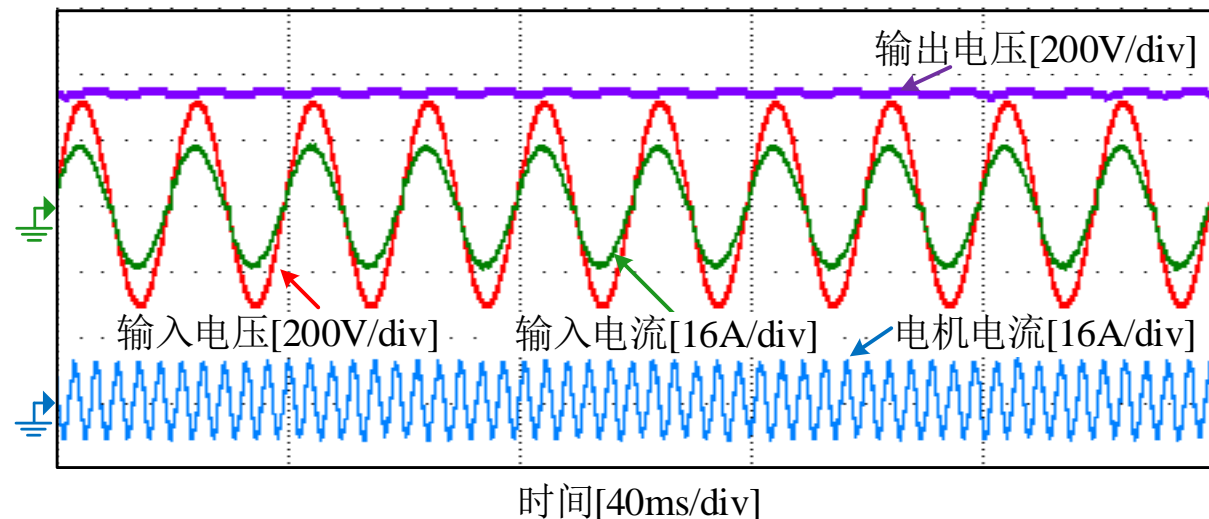
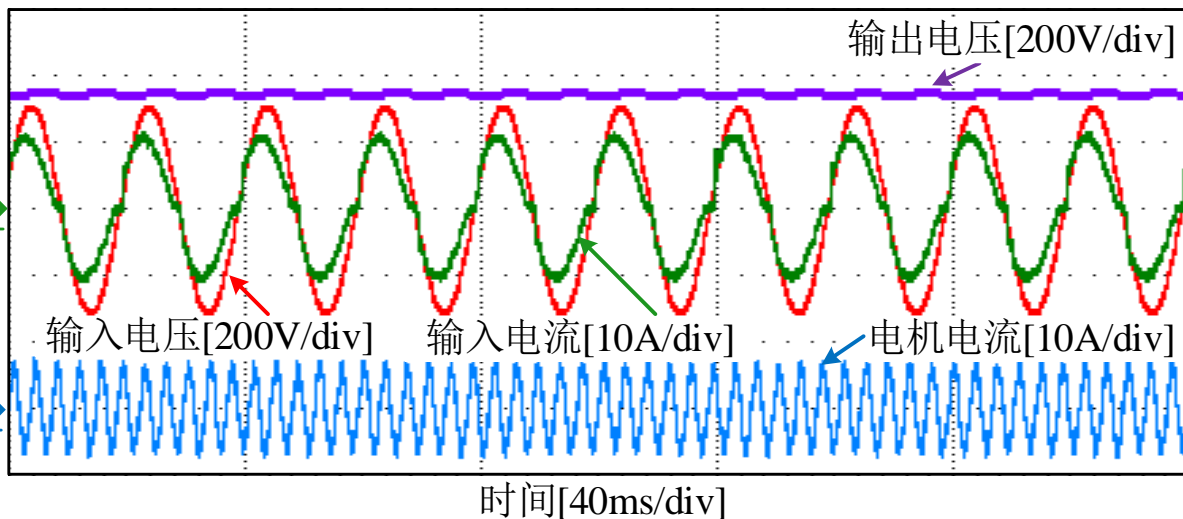
三相逆变电路



GaN图腾柱PFC与传统Boost PFC对比
最高效率98.65%、效率提升1%

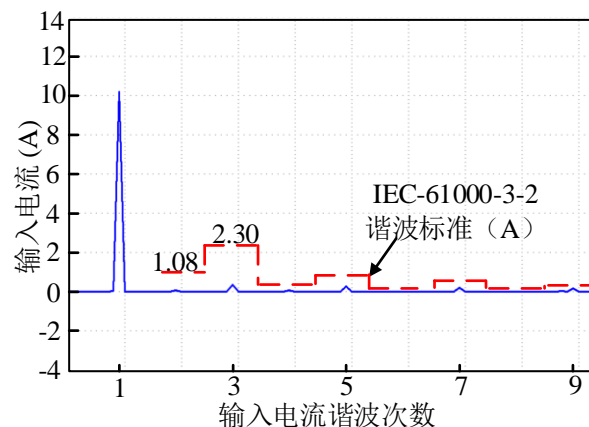
有源前端控制技术

实验结果 — 基于GaN的图腾柱高频PFC空调驱动器



图腾柱PFC实验结果

- ✓ 输入功率: 1.2kW
- ✓ 功率因数: 0.966
- ✓ THD: 12.79%
- ✓ 效率: 98.65%



图腾柱PFC实验结果

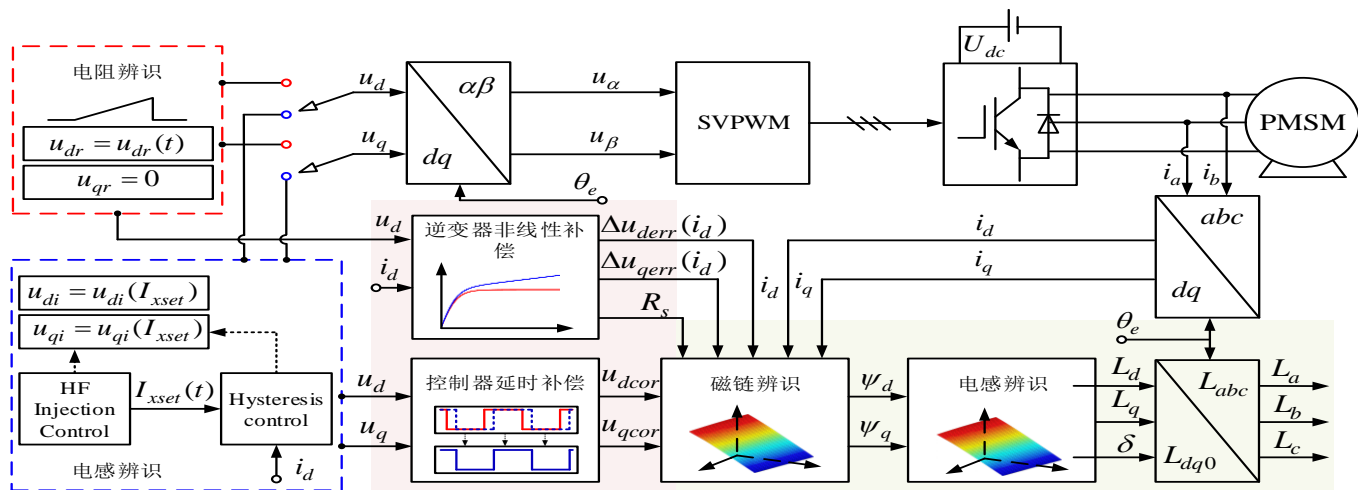
- ✓ 输入功率: 2.2kW
- ✓ 功率因数: 0.994
- ✓ THD: 6.39%
- ✓ 效率: 98.1%



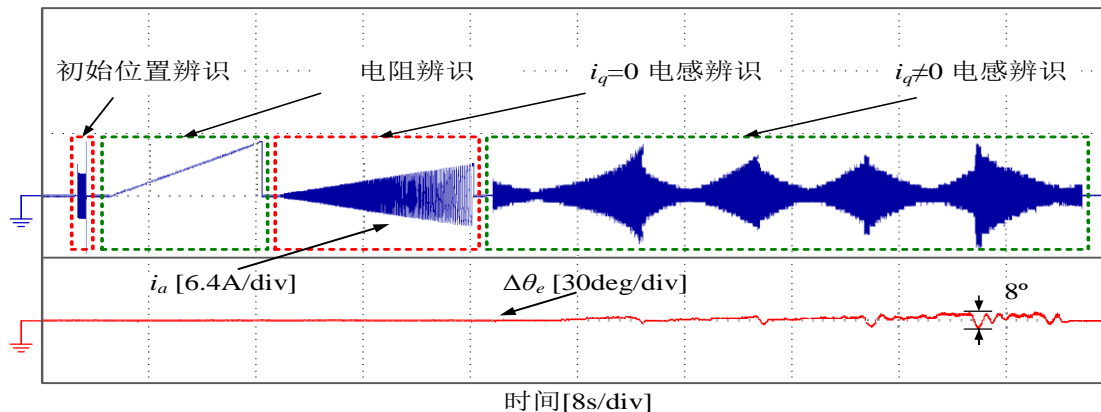
永磁电机参数自学习技术 — 离线辨识

关键技术 — 多参数辨识

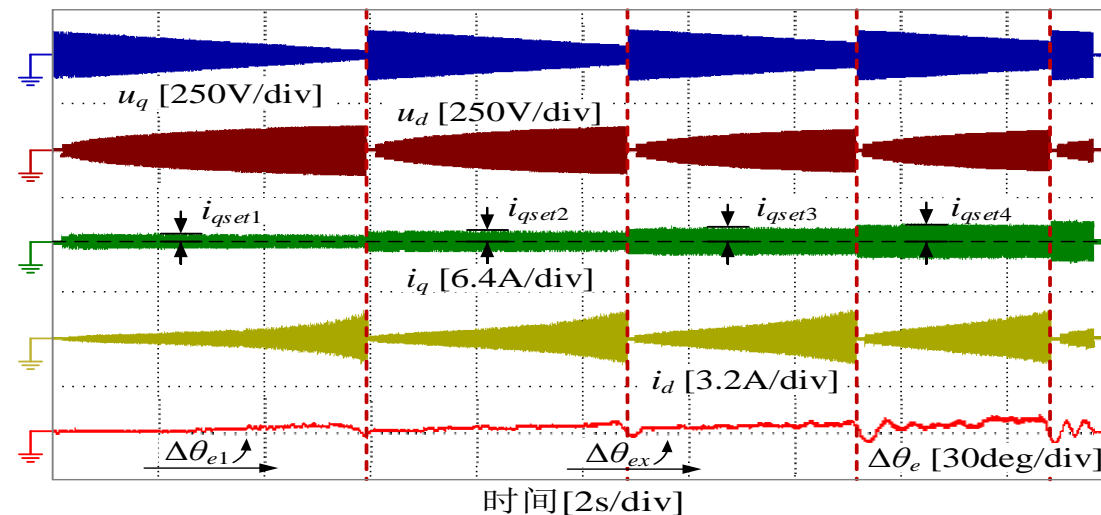
- ✓ 电机定子电阻辨识
- ✓ 逆变器非线性特性参数辨识
- ✓ 定子电感特性参数辨识



永磁电机参数离线自学习控制策略框图



参数离线自学习过程相电流



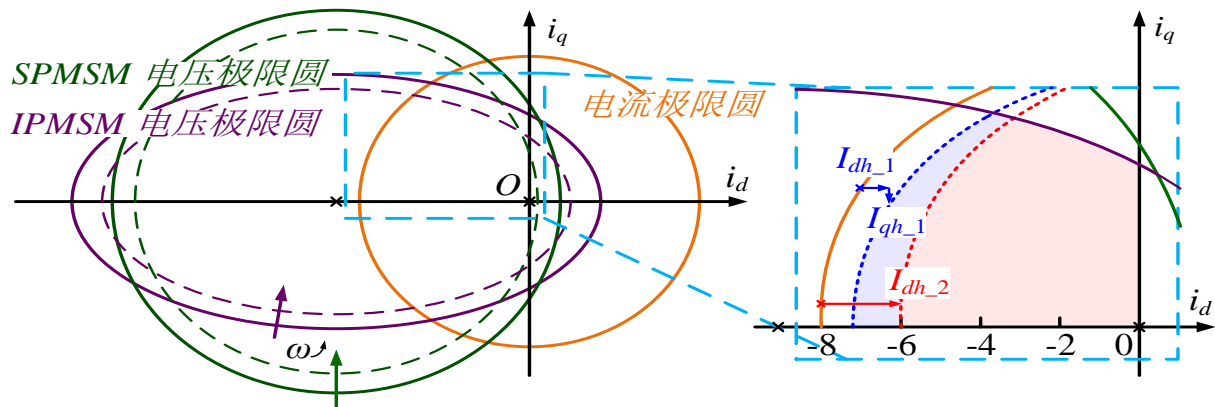
采用滞环控制辨识电感时dq轴电流



永磁电机参数自学习技术 — 在线辨识

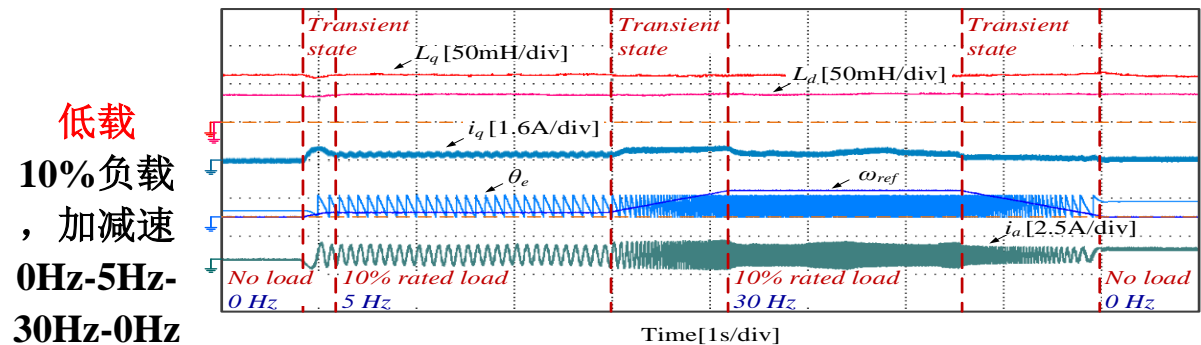
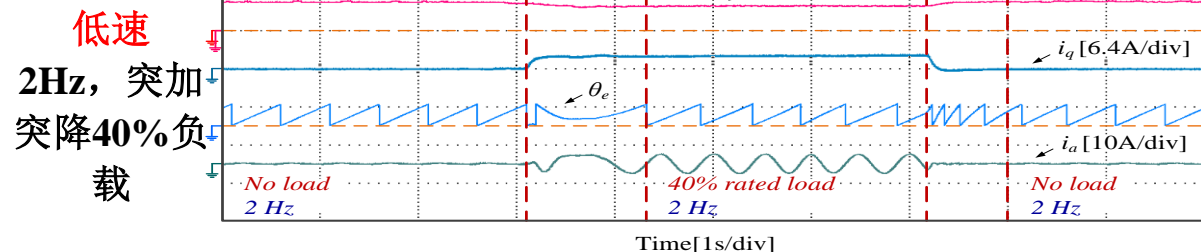
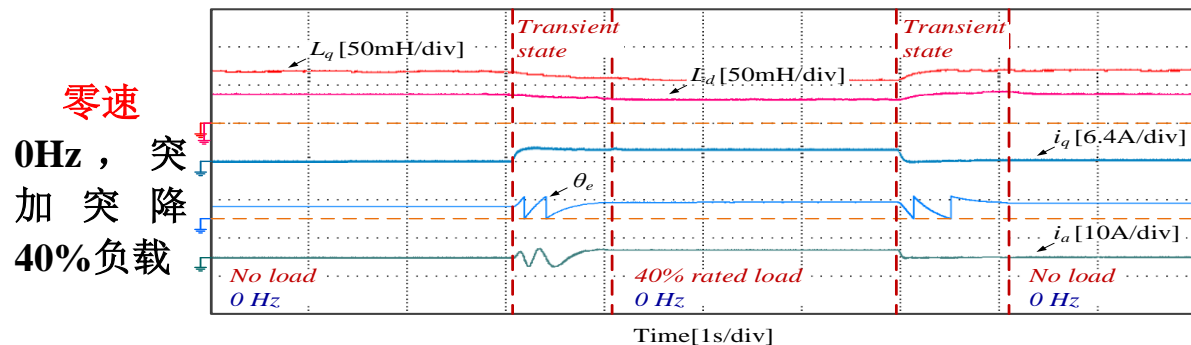
关键技术 — 提升方法适用范围

- ✓ 基于小信号注入的参数辨识策略
- ✓ 实现极端工况下的参数辨识



现有方法与提出方法参数辨识范围对比

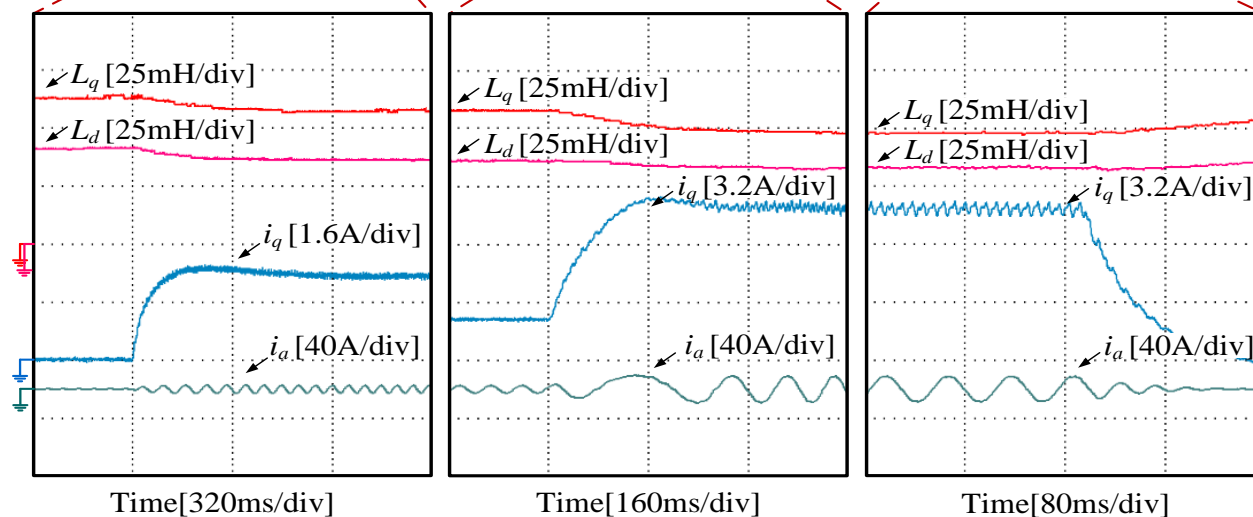
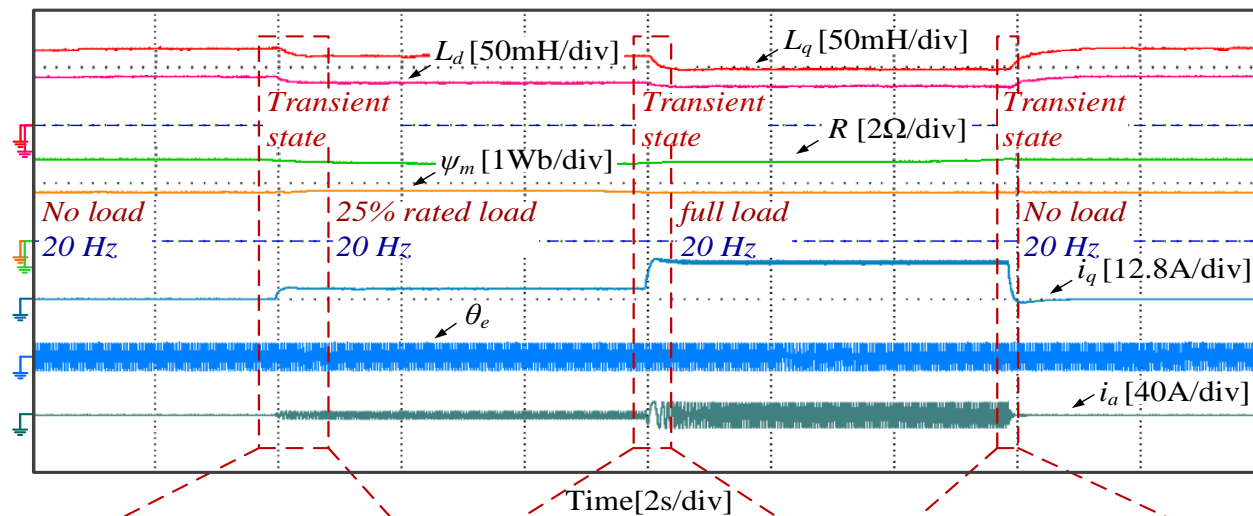
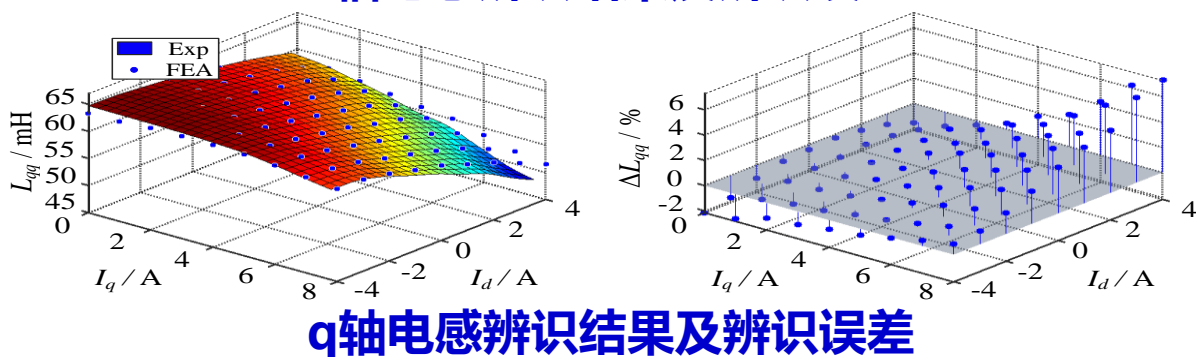
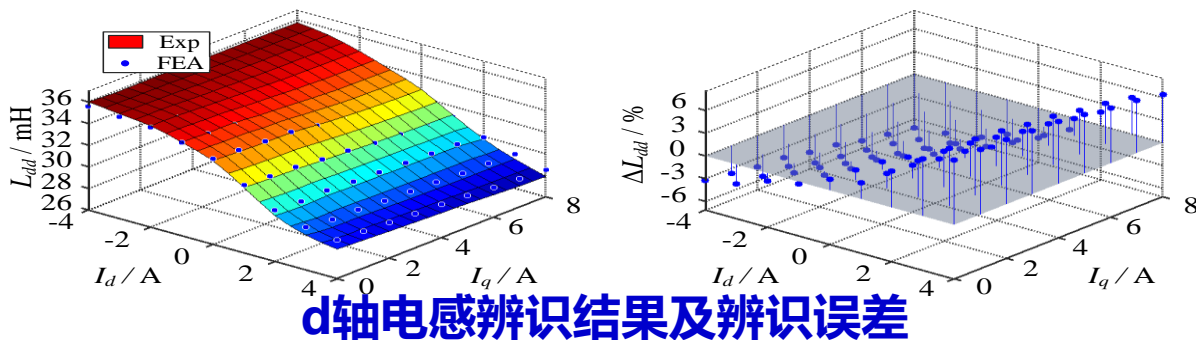
- ✓ 提出方法可实现在零速，低速，低载等极端工况下的精确参数辨识



永磁电机参数自学习技术 — 在线辨识

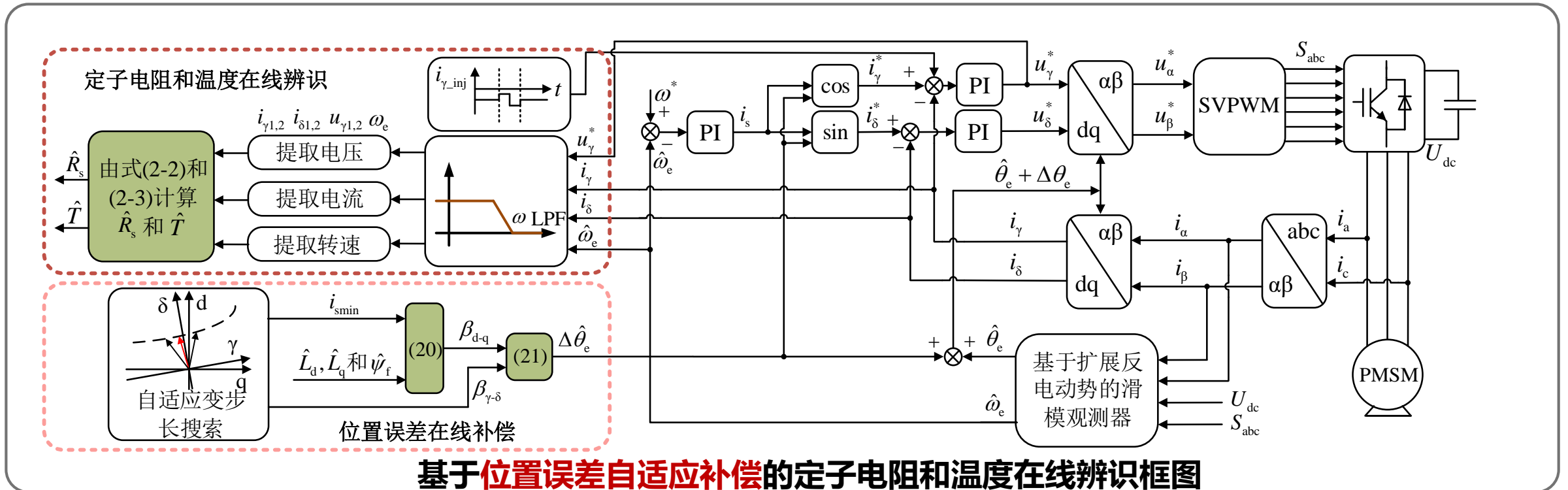
关键技术 — 提升辨识速度及精度

- ✓ 较快的收敛速度，可同时应用于稳态工况和暂态工况
- ✓ 在全工况实现多参数的准确辨识



永磁同步电机定子温度在线估计技术

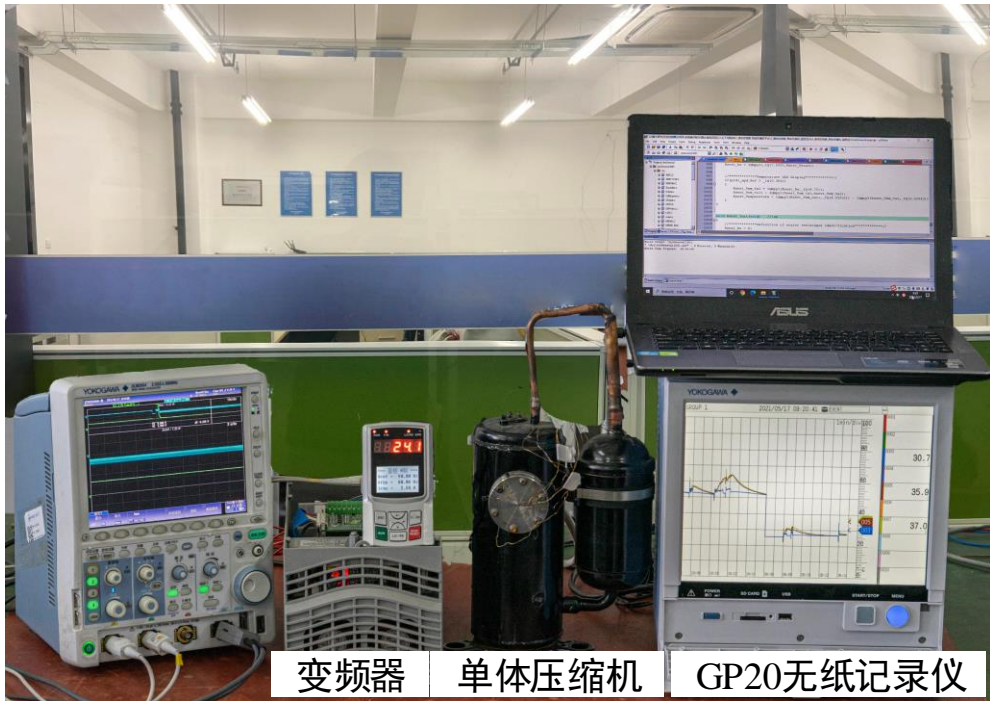
- **意义：** 温度过高会造成电机定子绝缘损坏，但加装温度传感器制作工艺复杂，会增加系统成本，采用定子温度在线估计方法可以实现电机热保护，降低系统成本
- **难题：** 无位置传感器控制系统中转子位置误差会对定子电阻及温度在线辨识精度产生影响



基于位置误差自适应补偿的定子电阻和温度在线辨识框图

永磁同步电机定子温度在线估计技术

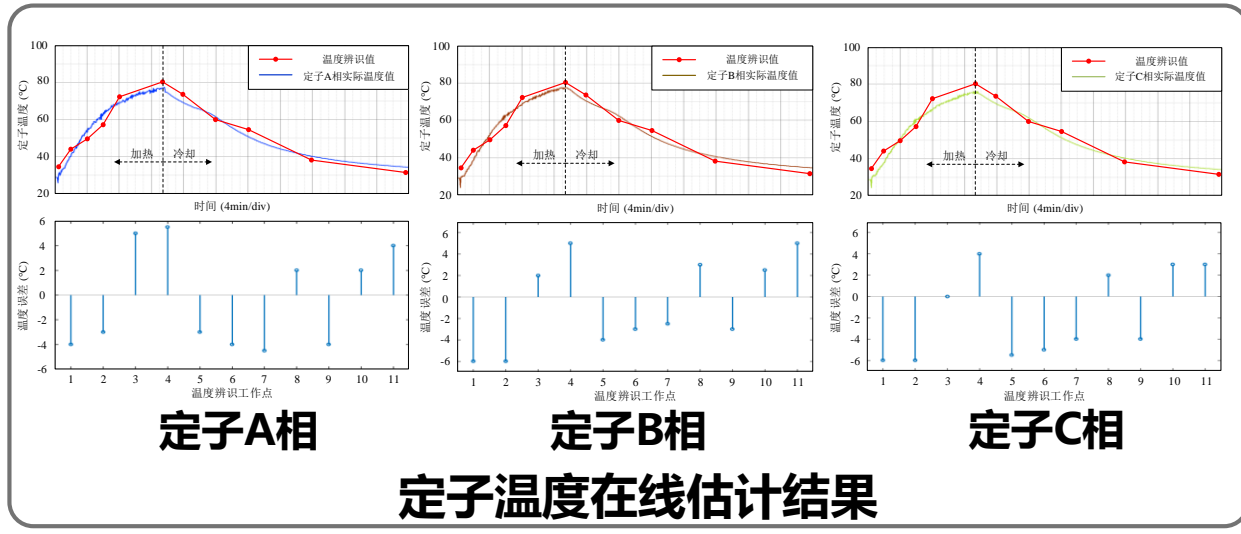
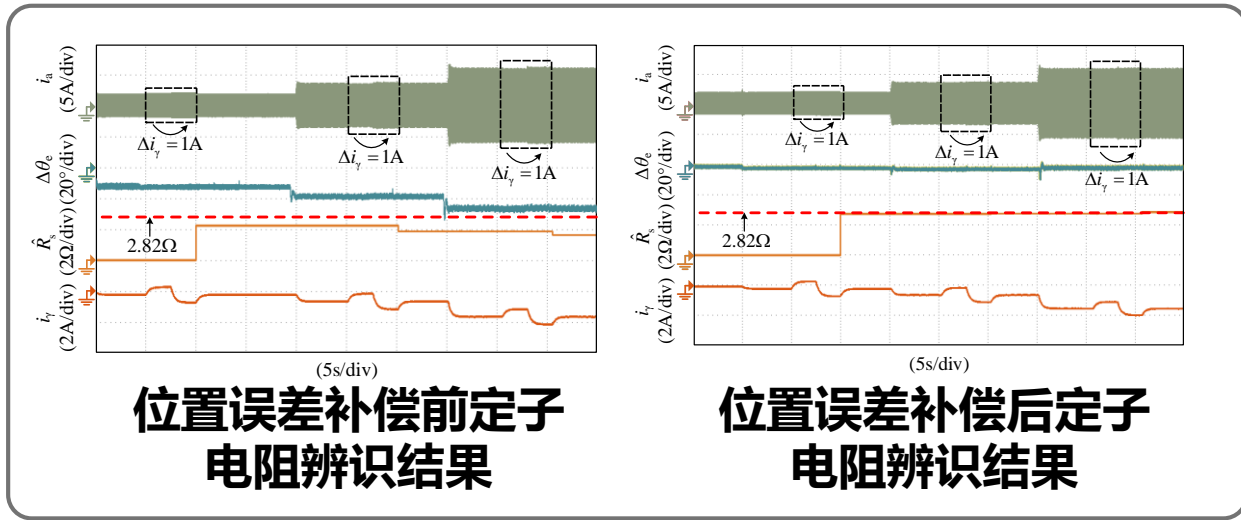
定子温度在线估计实验验证



变频器 单体压缩机 GP20无纸记录仪

电机升降温测试平台

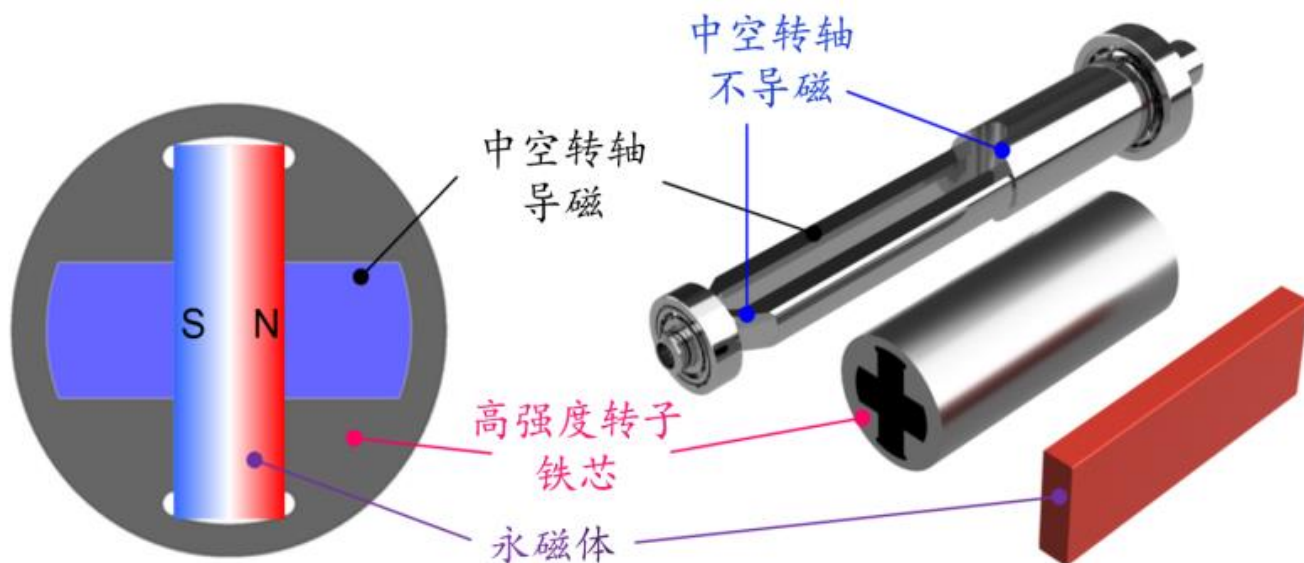
- ◆ 避免了位置误差对定子温度在线估计的影响，提高了温度估计的精度



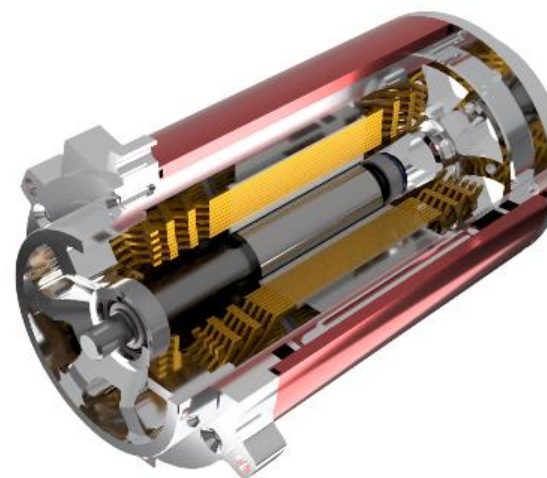
高速永磁同步电机速度和功率密度提升技术

□ 关键技术 — 转子结构创新

- ✓ 提出“高强度铁磁材料+复合中空转轴”结构
- ✓ 研发12.5万转每分钟、15千瓦高速电机

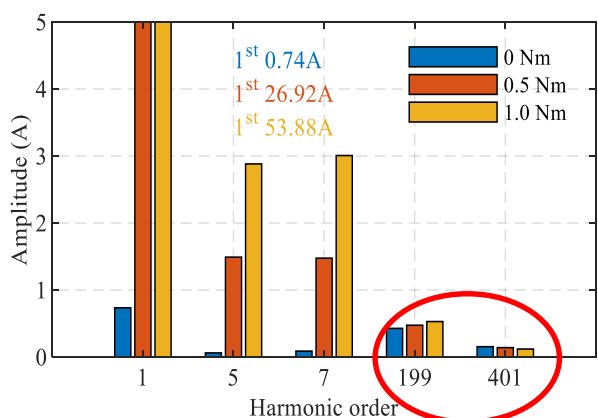


高速内置式永磁转子结构



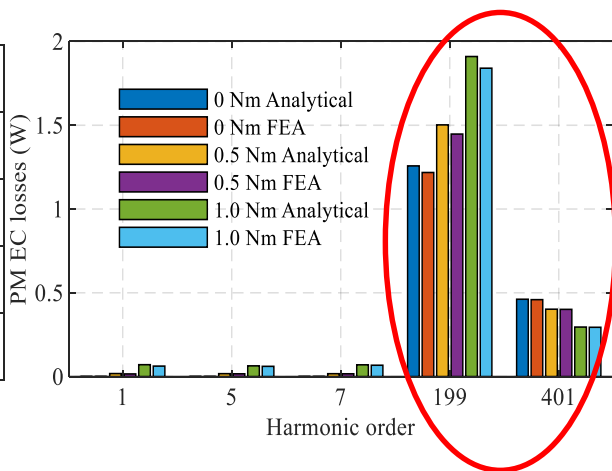
高速永磁同步电机速度和功率密度提升技术

- 关键技术 — 考虑驱动控制的电机设计
- 提高电机损耗和温度分布的计算准确度，避免绕组局部过温烧毁和转子永磁体高温失磁

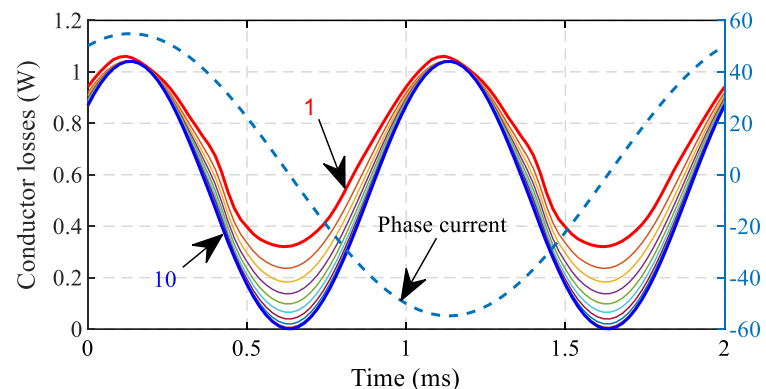


电流谐波

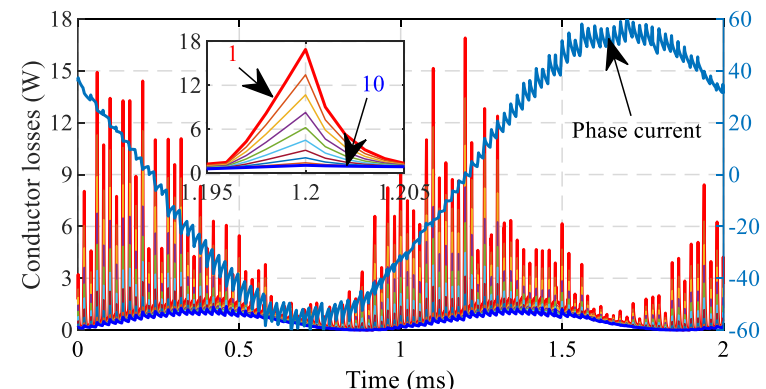
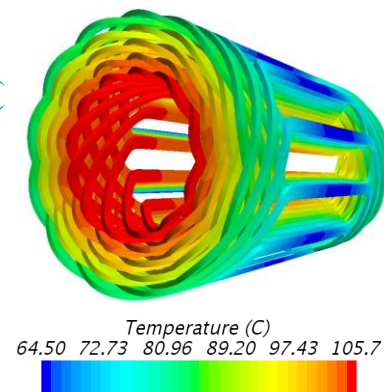
高频谐波电流幅值虽低，但所引起的转子永磁体涡流损耗高



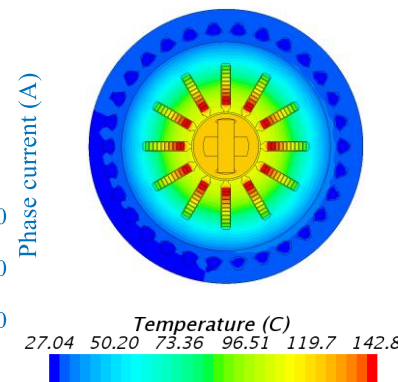
转子永磁体涡流损耗



不考虑电流谐波的绕组损耗



考虑电流谐波的绕组损耗



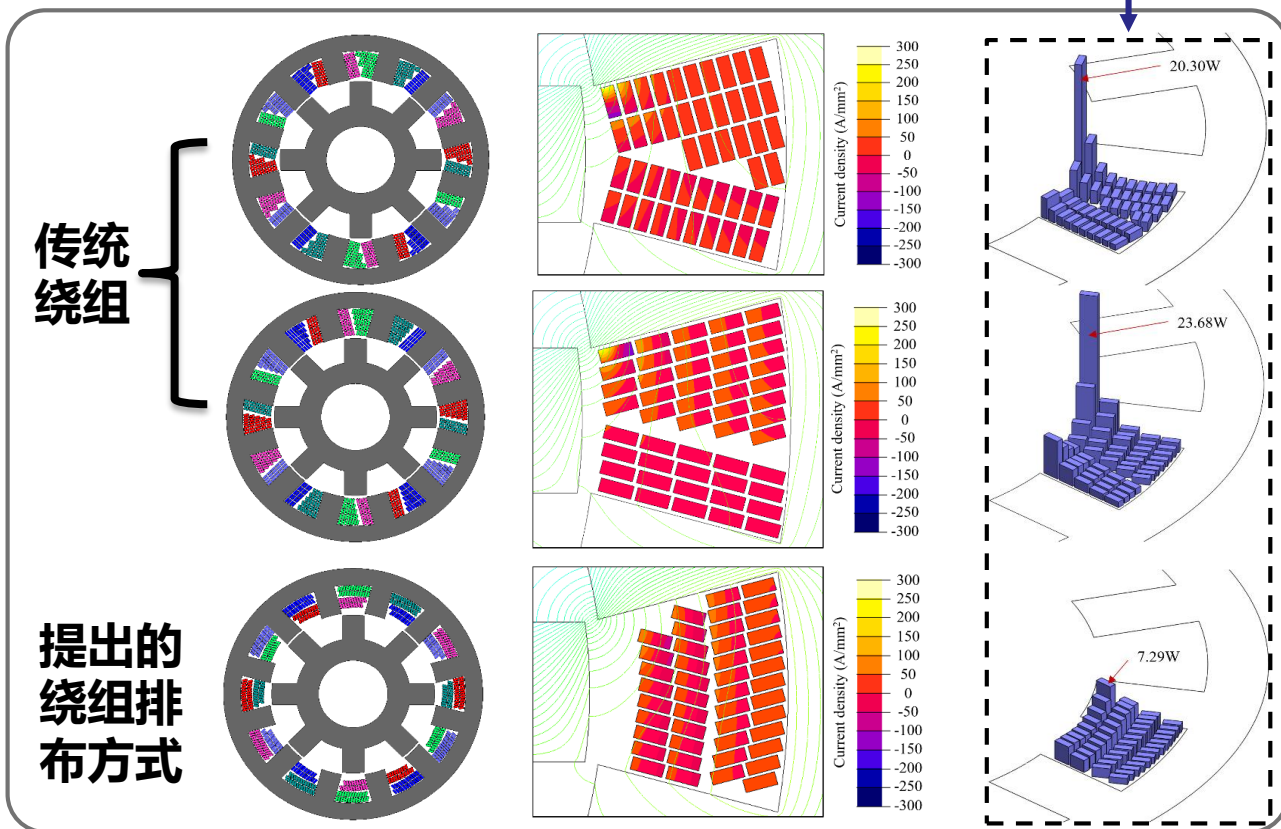
温度分布

定子绕组损耗槽内分布不均匀且不同位置散热能力存在差异



高速开关磁阻电机功率密度提升技术

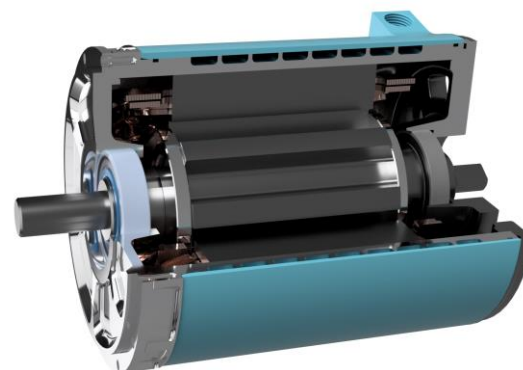
非晶合金开关磁阻电机



提出跑道型绕组，简化了绕组加工工艺，提升了槽满率并降低绕组涡流损耗

样机及参数

参数	值
额定转速	15000 r/min
最高转速	30000 r/min
额定功率	15 kW
峰值功率	25 kW
电机重量	12.4 kg
定子外径	126 mm
叠片长度	100 mm



汇报提纲



结合“十四五”发展规划和行业技术发展趋势

- ✓ 构建智能化、高可靠性家电用电机驱动系统自调节体系
- ✓ 进一步发展小型，集成化的高密度家电电机驱动控制系统
- ✓ 优化本体设计及控制方法提高家电电机系统控制品质
- ✓ 打造低能耗电机驱动控制系统，实现高效控制，减少碳排放



谢谢！ 请批评指正！

