



申请代码	E0703
接收部门	
收件日期	
接收编号	5227070822



国家自然科学基金 申 请 书

(2022 版)

资助类别：	面上项目		
亚类说明：			
附注说明：			
项目名称：	具有稳定开关频率的收扩圆限定边界中压感应电机预测控制方法		
申 请 人：	齐昕	电 话：	010-62334963
依托单位：	北京科技大学		
通讯地址：	海淀区学院路30号北京科技大学机械工程学院机电系		
邮政编码：	100083	单位电话：	010-62333061
电子邮箱：	ixin2006@ieee.org		
填写日期：	2022年02月21日		

国家自然科学基金委员会



基本信息

申请人信息	姓名	齐昕	性别	男	出生年月	1982年04月	民族	蒙古族
	学位	博士	职称	副教授				
	是否在站博士后	否		电子邮箱	ixin2006@ieee.org			
	电话	010-62334963		国别或地区	中国			
	申请人类别		依托单位全职					
	工作单位		北京科技大学/机械工程学院					
	主要研究领域		电力电子技术、电机拖动与逆变器变频控制、预测控制					
依托单位信息	名称	北京科技大学						
	联系人	李颖	电子邮箱	liying666@ustb.edu.cn				
	电话	010-62333061	网站地址	www.ustb.edu.cn				
合作研究单位信息	单位名称							
项目基本信息	项目名称	具有稳定开关频率的收扩圆限定边界中压感应电机预测控制方法						
	英文名称	Contracting and expending boundary circle Predictive control for medium-voltage induction motor drives with steady switching frequency						
	资助类别	面上项目				亚类说明		
	附注说明							
	申请代码	E0703. 电机及其系统				E0706. 电力电子学		
	研究期限	2023年01月01日 -- 2026年12月31日				研究方向：电机控制算法		
	申请直接费用	68.0000万元						
中文关键词		模型预测控制；中压感应电机；稳定开关频率；收扩圆限定边界调节策略						
英文关键词		Model predictive control; Medium-voltage induction motor; Steady switching frequency; Contracting and expending boundary circle adjustment strategy						



中文摘要	<p>边界限定形式的预测控制可以令电机系统在保持低开关频率的同时具有较高的动态特性，非常适合中压电机驱动，但该方法存在开关频率大范围变化的问题。这会导致谐波在频谱内大规模扩散，且无法充分利用功率器件的开关性能。本课题将重点围绕开关频率稳定这一核心问题展开研究，提出具有稳定开关频率的收扩圆限定边界中压感应电机预测控制新方法：①剖析开关频率变化的物理机制，探明影响开关频率的物理因素及其耦合作用规律；②提出收扩圆限定边界调节策略，促使开关频率保持稳定；③提出电压矢量切换触发机制，实现开关状态的精准切换；④提出收扩圆调节策略与切换触发机制的融合方法，避免电流轨迹与边界圆混叠运动所造成的触发紊乱；⑤提出快速预测控制并行算法，增强控制系统的实时性。本课题的研究将为中压电机的驱动控制提供一种收扩圆限定边界预测控制新方法，为推进其在大型船舶、矿用车辆等国家重大技术装备领域的工业实际应用提供有力理论指导。</p>
英文摘要	<p>Boundary confined predictive control enables motor systems to have high dynamic characteristics at low switching frequency. It is extremely suitable for medium voltage motor drive application. However, this method has the problem that the switching frequency varies over a wide range. This leads to harmonic propagations in the spectrum. Meanwhile, the switching performance of power devices cannot be fully utilized. This research will focus on the core problem of switching frequency stability, and propose a new method for predictive control of medium-voltage induction motors with stable switching frequency whose boundary restricted by contracting and expending circle: ①In order to discover the physical factors which influence variations of switching frequency and analyze the coupling patterns between them, physical mechanism of switching frequency variation will be analyzed. ②Furthermore, a strategy for adjusting the boundary circle will be proposed to maintain the switching frequency at a steady value. ③Trigger mechanism for voltage vector shifting will be applied to realize accurate transition of switching states. ④A fusion method of contracting and expanding boundary circle adjustment strategy and switching trigger mechanism will be proposed to avoid the trigger disorder caused by the mixed motion of current trajectory and boundary circle. ⑤A fast predictive control algorithm with parallel calculation method will be proposed to enhance the real-time performance of the control system. Finally, this research will provide an innovative predictive control method with contracting and expending boundary circle. This new method will be applied for the high performance drive of medium-voltage motors. Meanwhile, this research also provides a powerful theoretical guidance to promote the industrial practical application in the field of large ships, mining vehicles and other national major technical equipment.</p>



科学问题属性

- ☐ “鼓励探索，突出原创”：科学问题源于科研人员的灵感和新思想，且具有鲜明的首创性特征，旨在通过自由探索产出从无到有的原创性成果。
- ☐ “聚焦前沿，独辟蹊径”：科学问题源于世界科技前沿的热点、难点和新兴领域，且具有鲜明的引领性或开创性特征，旨在通过独辟蹊径取得开拓性成果，引领或拓展科学前沿。
- ☒ “需求牵引，突破瓶颈”：科学问题源于国家重大需求和经济主战场，且具有鲜明的需求导向、问题导向和目标导向特征，旨在通过解决技术瓶颈背后的核心科学问题，促使基础研究成果走向应用。
- ☐ “共性导向，交叉融通”：科学问题源于多学科领域交叉的共性难题，具有鲜明的学科交叉特征，旨在通过交叉研究产出重大科学突破，促进分科知识融通发展为知识体系。

请阐明选择该科学问题属性的理由（800字以内）：

3. 3kV等级中压电机系统在大型船舶、矿用车辆等国家支持发展的重大技术装备领域有着极其广泛的应用。然而由于电压等级较高，中压电机驱动极为特殊：一方面要将开关频率控制在1kHz甚至几百Hz之下，以降低开关损耗、减少高压脉冲对电机绕组的损伤；另一方面在降低开关频率的同时不能增加电流畸变，且须使电机系统保持良好的动态特性。这都是常规变频开关策略难以实现的。

边界限定形式预测控制作为一种中压电机变频驱动新方法，可以同时满足上述要求。该方法无需调制过程，直接生成逆变器的开关状态，在开关频率只有200Hz的情况下，仍能保持较低的电流畸变；且能与矢量控制有效结合，实现对励磁和转矩的解耦控制，令电机驱动系统具有较高的动态性能。

本课题将针对边界限定形式预测控制在调速控制过程中开关频率大范围变化的问题，创新性地提出具有稳定开关频率的收扩圆限定边界中压感应电机预测控制方法：

（1）提出收扩圆限定边界调节策略，动态调节边界圆大小，降低开关频率的波动，预计可将波动范围控制在 $\pm 40\text{Hz}$ ；

（2）提出电压矢量切换触发机制，实现开关状态的精准切换，抑制电流轨迹过冲。额定工况稳态时，预期电流过冲量在 $0.05[\text{pu}]$ 以内；

（3）提出快速预测控制并行算法，增强控制系统的实时性，预计可使系统整体执行周期最快缩短至 $25\mu\text{s}$ 。

本课题为解决预测控制方法中开关频率大幅波动这一技术瓶颈性问题，突破思维定势，提出收扩圆限定边界预测控制方法：建立开关频率多元非线性映射数学模型，创建收扩圆调节策略，完成边界调控以及转速协调的决策分析，以实现控制过程中边界圆的动态调整。该方法能保证系统以低开关频率运行的同时，实现开关频率稳定。本课题的研究工作将为解决预测控制方法中开关频率大幅波动的问题奠定理论基础，同时，推动预测控制方法在中压电机驱动控制领域的应用及发展，进而助力解决国家在技术装备领域的重大需求。

**主要参与者**（注：主要参与者不包括项目申请人）

编号	姓名	出生年月	性别	职 称	学 位	工作单位	项目分工	电话	证件号码
1	周晓敏	1975-05-13	女	副教授	博士	北京科技大学	算法设计	010-62334963	2*****8
2	冯涛	1981-08-30	男	高级工程师	硕士	北京科技大学	硬件技术支持	010-62332992	4*****9

总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生
9	3	0	0	0	1	5



国家自然科学基金项目资金预算表

项目申请号：5227070822

项目负责人：齐昕

金额单位：万元

序号	科目名称	金额
1	一、项目直接费用合计	68.0000
2	1、设备费	2.0000
3	其中：设备购置费	0.0000
4	2、业务费	56.5000
5	3、劳务费	9.5000
6	二、其他来源资金	0.0000
7	三、合计	68.0000

注：请按照项目研究实际需要合理填写各科目预算金额。



预算说明书

(请按照《国家自然科学基金项目申请书预算表编制说明》等的有关要求,按照政策相符性、目标相关性和经济合理性原则,实事求是编制项目预算。填报时,直接费用应按设备费、业务费、劳务费三个类别填报,每个类别结合科研任务按支出用途进行说明。对单价 ≥ 50 万元的设备详细说明,对单价 < 50 万元的设备费用分类说明,对合作研究单位资质及资金外拨情况、自筹资金进行必要说明。)

申请经费总额度: 68 万元

(1) 设备费 (2 万元)

中压逆变器功率驱动单元属于易损坏部件,在实验过程中的不当操作可能造成其损毁,需购置更换,以完成对现有设备的改造维修,预算经费约 2 万元。

(2) 业务费 (56.50 万元)

①材料费 (24 万元)

本课题在进行实验的过程中,需购置因误操作、控制不当或老化等原因损坏的器件。

名称	单价/万元	数量/批	总价/万元
大功率无源器件	1.00	1	1.00
各类集成电路芯片	1.50	1	1.50
半导体功率器件	4.80	1	4.80
各类传感器	3.50	1	3.50
硬件电路维修耗材	1.20	1	1.20
实验平台主要器件	4.00	1	4.00
控制系统中电子器件及模块	6.00	1	6.00
其他辅助材料	2.00	1	2.00

注: 上述需购买材料具体如下所示

- ①大功率无源器件: 包括固定/可变电抗、电容(包括滤波电容)、电感(包括滤波电感)等;
- ②各类集成电路芯片: 模拟集成芯片(包括集成运放等)、模数转换芯片、光电耦合器/隔离器、数字集成电路芯片等;
- ③半导体功率器件: 电力二极管、电力三极管、晶闸管、IGBT 模块、MOSFET、整流模块、功率集成电路等;
- ④各类传感器: 电压传感器、电流传感器、温度传感器、位置传感器等;
- ⑤硬件电路维修耗材: 焊锡、助焊剂、吸锡带、恒温焊台、热风箱、恒温拆焊台、电动吸锡拆焊枪等;
- ⑥实验平台主要器件: 主要包括交直流接触器、交流断路器、电缆、熔断器、接线端子及相关辅助耗材等;
- ⑦控制系统中电子器件及模块: FPGA 开发模块、DSP 开发模块、高速仿真器、参数检测电路、仪表运算放大器、开关电源及其它相关配件;
- ⑧其他辅助材料: 实验平台相关的铝型材、高强度柔性联轴器以及相关机械零部件、机械标准件、各种连接导线、接插头等材料。

②测试检验加工费 (4.8 万元)

课题的逆变器功率电路、内部状态实时监测系统、电流和电压独立检测电路都要自行研发,所有电路板自行设计后交由 PCB 制板企业外协加工;实验平台机械结构部分零件自行设计,外协工厂按照图纸进行加工,并对电路板进行焊接及检测。



名称	单价/万元	数量/个	总价/万元
PCB 板制作	0.05	40	2
机械零件加工	0.2	10	2
电路板焊接及检测	0.2	4	0.8

③燃料动力费（4 万元）

课题执行期间，按照北京市工业用电 1-10 千伏的尖峰时段 1.0761 元/度电，不满 1 千伏的尖峰时段 1.4660 元/度电计算，预计每年电量消耗费用约为 0.8338 万元，合计约 3.3352 万元。综合其它各项用电，合计约 4 万元。

中压电机 125kW 实验用电： $125\text{kW} \times 1\text{h} \times 1.0761 \text{ 元/度电} \times 50 \text{ 天} \times 4 \text{ 年} = 26902.5 \text{ 元}$

低压电机 2.2kW 实验用电： $2.2\text{kW} \times 5\text{h} \times 1.4660 \text{ 元/度电} \times 100 \text{ 天} \times 4 \text{ 年} = 6450.4 \text{ 元}$

④差旅/会议/国际合作与交流费（15 万元）

参加 IEEE 电力电子与电机驱动预测控制专题（PRECEDE）会议、中国高校电力电子与电力传动学术年会（SPEED）等本学科国内会议；ECCE、APEC 等本学科国际会议。举办预测控制相关的学术研讨会，并邀请国外学者访学交流。

名称	人均费用/万元	人次	参会次数	总价/万元
国内学术会议（注册费、差旅费）	0.35	3	4	4.2
国际学术会议（注册费、差旅费）	1.7	2	2	6.8
举办学术研讨会	/	/	/	4

注：国内学术会议注册费每人次 2000 元，交通费每人次约 1000 元，住宿及补贴每人次约 250/天；拟参加国外举办的国际学术会议 2 人次（APEC/ECCE2022 1 人次，APEC/ECCE2023 1 人次）会议注册费每人次 5000 元，往返机票每人次 0.9 万元，食宿及补贴 1000 元/天。

根据本项目的研究计划，需组织召开两次学术研讨会，并邀请国外学者进行访学交流，就“具有稳定开关频率的收扩圆限定边界中压感应电机预测控制方法”进行深入的研讨、交流，以促进本项目的研究工作。举办学术研讨会并邀请国外学者访学费用约 4 万元。

⑤出版/文献/信息传播/知识产权事务费（8.7 万元）

名称	费用/万元	数量	总价/万元
论文版面费	0.8	10	8
文献检索费	0.1	3	0.3
其他费用	0.1	4（年）	0.4

注：论文版面费以中国电机工程学报为例：每篇约为 8000 元；研究期间需进行 3 次文献检索（开题、中期、结题）。其他费用包括：论文资料、图纸的印刷费（包括打印费、复印费）、装订费、资料邮寄等费用约 1000 元/年。

（3）劳务费（9.5 万元）

课题执行的 4 年内，项目组中 1 名博士生、5 名硕士生科研劳务补助，共计 7.6 万元：

1 名博士每年 10 个月，400 元/人月 $\times 1 \text{ 人} \times 10 \text{ 月} \times 4 \text{ 年} = 1.6 \text{ 万元}$

5 名硕士每年 10 个月，300 元/人月 $\times 5 \text{ 人} \times 10 \text{ 月} \times 4 \text{ 年} = 6 \text{ 万元}$

聘请钳工进行实验平台的机械零部件维修调试工作，共计 0.9 万元。

本课题的研究不仅涉及电机和逆变器的控制理论，还涉及针对于具体器件的嵌入式编程、电子硬件技术以及功率半导体技术。需要聘请专业工程师对课题中的细节技术问题指导，按工作日分发补助，共计花费 1 万元。



报告正文

参照以下提纲撰写，要求内容翔实、清晰，层次分明，标题突出。
请勿删除或改动下述提纲标题及括号中的文字。

（一）立项依据与研究内容（建议 8000 字以下）：

1. 项目的立项依据（研究意义、国内外研究现状及发展动态分析，需结合科学研究发展趋势来论述科学意义；或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录）；

1.1 立项背景及研究意义

近年来，3.3kV等级的中压电机系统在大型船舶、矿用车辆以及风机等国家支持发展的重大技术装备领域有着极其广泛的应用^[1]。以变频驱动技术对中压电机系统加以控制，改变传统粗犷的运行方式，能将运行效率提升10%至20%，对实现“中国制造2025”战略有着重大的意义。

中压电机电压等级较高，逆变器功率器件单次开关损耗较大，且高压脉冲也会对绕组造成较大冲击，为此需要减少开关次数；然而开关频率的降低，会导致电流畸变的增加。因而中压电机的变频调速控制必须在电机寿命、电流畸变与开关损耗之间寻求平衡，逆变器的开关频率须处于 1kHz 甚至几百 Hz 以下的较低量值。目前能够有效降低开关频率而不增加电流畸变的中压电机变频调速方法主要有两种：一是较为成熟的最优脉宽调制策略^[2]，二是近年来成为研究热点的边界限定形式预测控制方法^[3]。前者虽然应用广泛但它建立在标量控制的基础上，动态特性普遍不高。后者属于直接电流控制，可以实现励磁和转矩的解耦，动态性能更好，正逐步成为取代前者的一种新方法^[4]。

边界限定形式的预测控制作为一种具有低开关频率高动态特性的变频驱动方法，尽管十分适合中压电机驱动的特殊场合，但该方法仍存在开关频率大范围变化的问题。这会导致谐波在频谱内大规模扩散，不易进行后续滤波^[5-6]，且在电机的调速过程中，逆变器的开关频率大都处在许用值的 60% 以下，无法充分利用功率器件的开关性能。

为了解决边界限定形式的预测控制开关频率大范围波动及其相关问题，应从如下几个方面展开更为深入的研究：

（1）预测控制方法下开关频率波动的原因及内在规律

预测控制在应用时会造成开关频率大幅度变化，此问题已引起了学术界的广泛关注，并且提出了一些控制开关频率的预测控制方法^[7-8]。然而对开关频率



大幅度变化产生的原因及内在规律还有待深入研究，这些研究工作可以为克服预测控制自身缺陷，改进预测控制方法提供必要的理论基础。

(2) 边界限定形式预测控制的开关频率稳定策略

边界限定形式预测控制以允许的最大电流畸变为半径，设定边界圆，当电流轨迹触碰或超出边界时，切换到可使电流轨迹最长时间保持在边界圆内部的电压矢量，从而有效降低开关频率^[9]。怎样结合上述特点制定相应的开关频率稳定策略，是解决边界限定形式预测控制方法中开关频率大范围波动问题所面临的首要任务。

(3) 系统开关状态切换触发机制的改进问题

常规预测控制基于简单的状态改变事件驱动开关状态切换，但实际系统中影响因素众多，以单一状态改变进行驱动往往会顾此失彼，造成开关状态切换的超前或滞后：前者会导致开关频率上升，增加开关损耗；后者则会令电流过冲加剧，控制指标达成度降低。可见，改进系统开关状态触发机制，实现电压矢量适时切换，对提升电流畸变抑制能力、降低开关频率具有实际的工程意义。

(4) 预测控制算法的实时性优化问题

预测控制往往需要对多个目标进行寻优，并遍历开关状态进行预测，计算量大，影响了系统的动态特性，并导致控制性能下降。因此，需要针对开关状态遍历过程无先后逻辑顺序的特点，对算法进行优化，以提升计算效率，增强方法的实时性。这对进一步推动预测控制方法的工程实际应用具有现实意义。

综上所述，本课题旨在提出一种具有稳定开关频率的收扩圆限定边界中压感应电机预测控制新方法，为进一步推动边界限定形式预测控制在实际工业产业中的应用提供理论支撑。

1.2 国内外研究现状及发展动态

1.2.1 两种预测控制形式的确立

SHEPWM 策略应用于中压驱动控制时，可有效降低开关频率，然而该控制策略下电机系统的动态特性不高。针对这一问题，Wuppertal 大学 Holtz 教授于文献[10]将预测控制这一过程控制理念引入到对实时性要求较高的感应电机低开关频率矢量控制中，使中压电机在低开关频率运行的同时具有较高动态特性。如图 1 所示，预测控制的核心思想是以目标电流矢量 i^* 末端为圆心，工程实际所允许的最大电流畸变为半径，将电流误差限定在一个边界圆内；当实际电流矢量 i 触碰到边界圆时，意味着需要改变逆变器当前的开关状态，通过预测直接输出新的电压矢量，使电流轨迹尽可能长时间的保持在边界圆内，进而减少开关状态的切换，以降低开关频率。同时，该方法可以与矢量控制有机结合，令系统具有较高的动态特性，为预测控制在电力电子领域的应用奠定了基础^[11]。

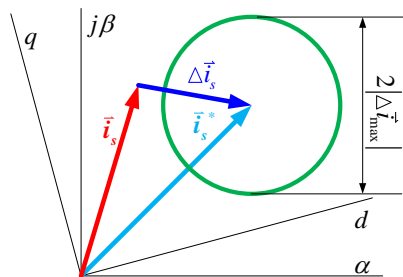


图 1 预测控制的基本原理

Kennel 教授 2005 年开始研究预测控制，于文献[12]中提出了代价函数（*cost function*）的概念。Rodriguez 教授于文献[13]中明确提出了有限控制集模型预测控制（FCS-MPC）的概念，将预测控制在理论上进一步升华，提出了一种具有统一数学形式的代价函数表达式（如式（1）），使其从一种工程方法上升为一种电力电子领域普遍适用的控制理论。

$$g = \lambda_x |x^* - x_p| + \lambda_y |y^* - y_p| + \cdots + \lambda_z |z^* - z_p| \quad (1)$$

至此，预测控制从形式上大体分为了两类：（1）基于权重形式评价（代价）函数的预测控制；（2）基于边界限定形式的预测控制。

近些年来，预测控制在电机控制领域获得越来越多的关注，逐渐成为当今的研究热点^[14]。在工业应用层面，ABB 公司已经着手规划预测控制方法在其工业级 ACS 2000 中压变频驱动系统中的应用^[15]。在理论研究方面，业界学者对提高预测模型鲁棒性^[16-18]、降低预测控制算法计算量^[19-22]、优化预测控制评价函数^[23-24]等问题进行了探讨。

基于权重形式评价函数的预测控制虽然理论上可以通过改变评价函数来任意增加控制变量，但评价函数中各个分项的权重确定相对困难，而且每增加一个控制变量都会增加运算负荷^[25]；基于边界限定形式的预测控制虽然无法同时对任意多种变量进行控制，只专注于电流畸变和开关频率的控制，但可以在降低开关损耗的同时兼顾系统的动态性能，且图形化的方法不涉及权重问题，更为直观，具有更明确的物理意义。

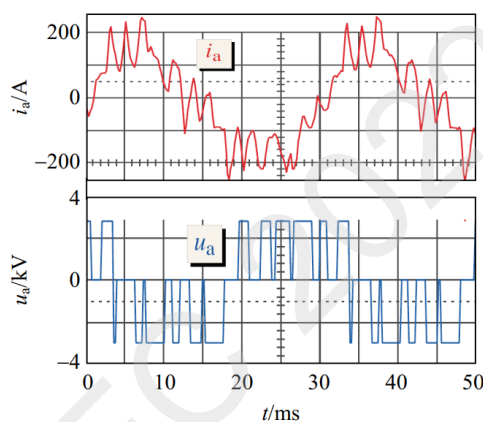
1.2.2 预测控制方法下开关频率的稳定

预测控制虽然已经成为当前研究的热点，但其在开关频率稳定方向上的研究还处于探索阶段，特别是针对边界限定形式预测控制的开关频率稳定策略还鲜有报道。但目前国内外一些学者已对基于权重形式预测控制的开关频率稳定问题开展了研究，且获得了较多具有参考价值的研究成果。

目前权重形式的预测控制可以有效稳定开关频率的方法主要分为两大类：连续控制集模型预测控制（Continuous Control Set-MPC, CCS-MPC）以及最优开

关序列有限控制集模型预测控制（Optimal Switching Sequence MPC, OSS-MPC）^[26]。

CCS-MPC 先通过预测获得电压矢量参考信号，再采用 SPWM 或 SVPWM 策略进行调制，然后输出逆变器的开关状态^[27-30]。这种基于脉宽调制的预测控制方法能够有效稳定开关频率，并且具有良好的稳态特性^[28]。但该方法不是基于功率变换器的离散特性进行预测，并不直接控制逆变器的输出，而是依赖于脉宽调制策略控制逆变器的开关状态。然而脉宽调制策略的控制性能与开关频率息息相关，如图 2 所示，随着开关频率的降低（尤其是当开关频率降低到 1kHz 以下时^[31]），控制系统的性能会急剧恶化，因此这种方法并不适用于低开关频率的应用场合。



（定子电流畸变超过基波幅值的 55%）

图 2 SVPWM 策略在 200Hz 开关频率下的电流—电压波形^[32]

传统有限控制集模型预测控制在每个控制周期仅作用一个电压矢量，OSS-MPC 在单个控制周期按照一定顺序作用固定数目的开关状态，一个周期内开关状态切换的次数是固定的，故一定程度上改善了稳态性能且实现了开关频率稳定。张永昌教授团队对 OSS-MPC 进行了深入研究，在文献[33-34]中提出了基于多矢量的模型预测控制方法，一定程度上实现了开关频率的稳定，如图 3（a）中蓝色曲线所示，基于双矢量 MPTC 的平均开关频率几乎稳定在 3kHz。华南理工大学康龙云教授团队在文献[35]中将预测最优开关序列控制用于三电平并网逆变器，并对寻优方式进行改进，降低了低次谐波含量，实现开关频率稳定。山东大学张祯滨教授团队在文献[36]中提出了一种适用于二阶 LC 滤波 VSI 的多矢量 OSS-MPVC 方案，将 OSS 的适用范围扩展到高阶 VSI 系统。

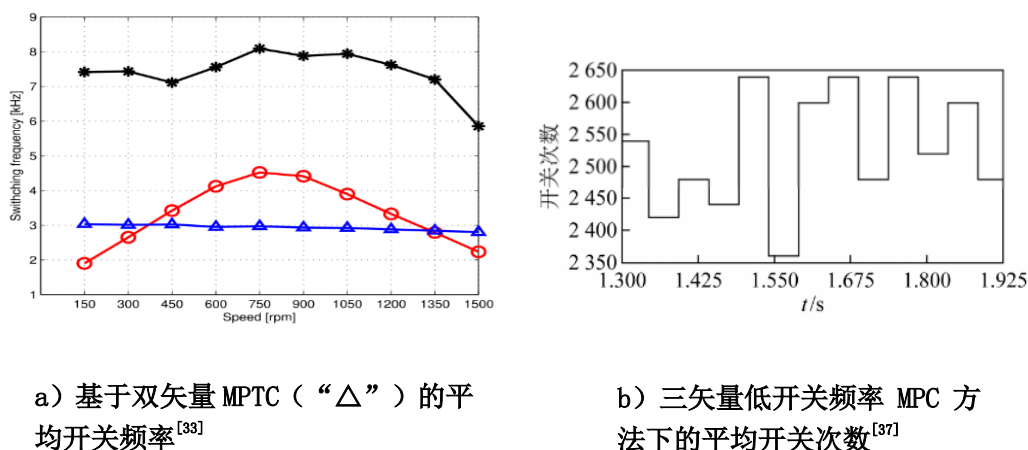


图 3 预测控制方法下的开关频率

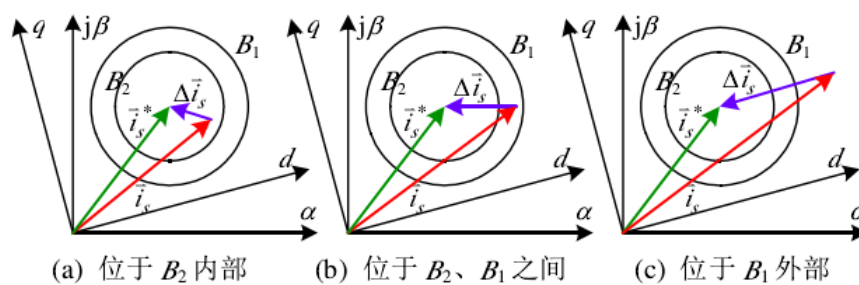
国内外众多学者对 OSS-MPC 做出了广泛研究与改进，但目前仍存在开关频率较高的问题，如文献[33]中所提方法的开关频率维持在约 3kHz 左右（如图 3a）中的蓝色曲线），文献[37]对多矢量低开关频率预测控制进行了研究，但开关频率依然维持在 2.3kHz 以上（如图 3b）所示）。

可见，上述方法虽能一定程度上实现开关频率的稳定，但在低开关频率应用场合是否适用，仍然值得商榷。因此本课题将参考上述解决开关频率稳定问题的思路，提出一种适用于低开关频率场合，且具有稳定开关频率运行特性的边界限定形式预测控制新方法。

1.2.3 逆变器开关状态切换的触发机制

基于边界限定形式的预测控制属于事件驱动，当电流矢量超出边界圆时才需要切换开关状态；然而基于权重形式代价函数的预测控制方法大多采用固定时间驱动机制，即在每次系统中断时统一进行电压矢量的切换，故不涉及切换触发问题。由于基于边界限定形式的预测控制专注于低开关频率高动态特性的应用场合，故电压矢量切换的超前或滞后，都会对其工作性能造成较大影响。

常规边界限定形式预测控制使用单一的边界圆进行切换触发判断，容易造成开关状态超前切换。为此，申请人在文献[38]中提出了双边界圆限定策略：如图 4（a）所示，设定用于判断电流矢量位置的两个边界圆，当电流矢量处于内边界圆 B2 内部时，保持当前的电压矢量不变，从而避免开关状态过早切换，可以进一步降低开关频率；如图 4（b）所示，当电流矢量靠近外侧 B1 边界时，当前电压矢量如果继续作用下去，则可能在下一轮中断到来前超出外层边界，故需要预测新的电压矢量；如图 4（c）所示，若电流矢量已经超出外侧 B1 边界，电流谐波也已高于其所允许的最大值，需要将其尽快拉回边界圆内。

图 4 双边界圆电流谐波限定策略算法思想^[38]

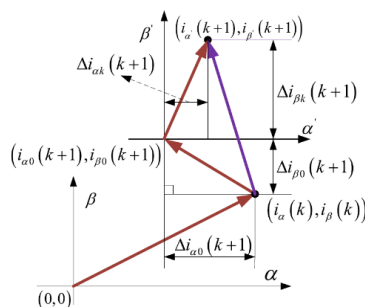
然而，文献[38]中的方法是在 d - q 坐标系中进行的。与 α - β 控制系统相比，它需要更多的 park 变换，而且对旋转角度的精度要求很高。北京交通大学的刁利军教授团队于文献[39]中提出了一种基于两相静止坐标系下双边界圆策略的 MPCC 算法，该算法在解决切换触发问题的基础上，可以减少 park 坐标变换的次数，并且与单边界圆策略相比，该策略可以实现更好的动态控制性能和更低的电机系统电流谐波含量。

预测控制采取简单的事件触发机制，即电流轨迹超出边界后才会触发算法选择新的电压矢量；且由于不可避免的系统软硬件延迟，当新矢量作用于电机时，电流轨迹已经大幅超出边界。为此，申请人在文献[22]提出一种电压矢量时间辅助切换机制，可以减小电流超出边界圆的几率，有效抑制电流畸变。此方法从模型预测电流控制的电流控制方式出发，将电压矢量时间辅助切换机制引入边界圆控制逻辑，有效改善了电流波形。

上述时间辅助切换触发机制虽能一定程度上减小电流超出边界圆的几率，但并没有考虑系统计算耗时等因素对开关状态变化的影响，且圆形边界的利用率过低。因此，还需对开关状态切换的触发机制进行更为深入的探索和研究。

1.2.4 预测控制方法实时性的提升

预测控制往往需要对多个目标进行寻优并遍历开关状态，计算量大，严重降低了系统的实时性。针对这一问题，国内外研究人员主要从候选矢量集缩减和预测过程优化两个方面展开了研究。在保证系统性能的基础上，减少了计算量，提高了系统的实时性。

图 5 定子参考系 α - β 和新参考系 α' - β' ^[40]



针对缩减备选电压矢量集的优化方法,北京理工大学的张承宁教授团队在文献[40]中,建立了图5所示的基于零矢量作用的电流轨迹参考坐标系,整个预测过程只针对零矢量计算,减少了轮询所有矢量造成的计算负担。张永昌教授提出一种基于快速矢量选择的模型预测控制,通过深入分析矢量选择过程,改进了模型预测控制算法,只需一次预测即可选出最优电压矢量,因而显著地降低了算法的复杂度和计算量^[41]。在文献[42]中,Rodriguez教授团队将我国张永昌等一些学者^[43]的思路进行了拓展,对基于矩阵式变频器的永磁同步电机有限控制集模型预测控制进行了简化,省去了对不同开关状态下电机电流的预测,减少了备选开关状态的数目,从而降低了系统的运算量。此外,文献[44]中提出了一种逐步简化预测转矩控制的方法,该方法通过对空间电压矢量进行分区,减少预测过程中候选矢量的数量,从而缩短了程序运行时间。文献[45]通过将李雅普诺夫原理引入扇区分区方法中,消除了不需要的电压矢量,简化了控制算法结构。汪凤翔教授团队根据无差拍电压矢量所在扇区的特点进行优化,只对该扇区内的非零电压矢量和2个零矢量进行寻优,有效减少了备选矢量的个数,简化了预测过程的计算量^[46]。

针对简化预测过程方面的优化,夏长亮院士团队提出了一种改进型模型预测转矩控制策略,通过合理划分区域,建立最小电压矢量的预测开关表,用查表的方法替代传统预测算法中的第二次计算,从而有效减小了计算量^[47]。天津工业大学的刘涛老师团队提出了一种改进的预测转矩控制,利用等效变换简化了预测过程,对代价函数进行了进一步的优化,大大减少了传统预测转矩控制的计算量^[48]。在文献[49]中,西安理工大学的徐艳平教授团队基于定子电流和定子磁链之间的关系,改进了模型,仅对定子磁链进行预测,有效地降低了预测控制的计算量与算法复杂度。文献[50]引入了偏移电压矢量的概念,将计算出的偏移磁链误差矢量作为最优电压矢量选择的判断标准,只需要一次预测并通过简单计算便实现了扇区判断,继而选出目标控制电压矢量,大大优化了预测控制算法,系统实时性显著提高。

缩减备选矢量集的方法可以实现稳态工况下系统的实时性优化,但是当系统运行于剧烈变化的动态过程时(如负载突变、转速突变),突变情况不可预知。若从缩减的矢量集中进行选择,则可能造成实际最优电压矢量的缺失,进而导致预测控制效果与预期相差较大。而针对预测过程方面的优化方法,虽然能够遍历所有矢量,保证了控制效果,但是在预测控制算法计算量庞大的情况下无法确保系统的高实时性。

因此, 如何在保证不影响控制效果的前提下,提高系统实时性是预测控制方法面临的挑战,也是本课题提出的中压感应电机稳定开关频率预测控制方法



在工业场合进一步推广的前提。

1.3 小结

综上所述,针对预测控制方法中开关频率的大范围波动及其相关问题,国内外学者进行了研究,取得了不少有意义的研究成果。基于权重形式的预测控制可以通过与调制方法相结合,实现开关频率的稳定,但难以适用于中压电机驱动所要求的低开关频率场合。对于这一特殊应用场合而言,边界限定形式的预测控制拥有极大的优势,但针对该方法的开关频率稳定研究尚不多见,且与之相关的开关状态切换触发机制、控制方法的实时性等问题仍待进一步深入研究。

本课题将探明边界限定形式预测控制下开关频率波动的物理机制;突破思维定势,提出收扩圆限定边界预测控制方法,在控制过程中对边界圆半径动态调整,实现开关频率的稳定;研发电压矢量精准切换触发新机制,避免造成开关状态切换的超前或滞后;利用开关状态遍历过程无先后逻辑顺序的特点,对算法进行优化,提升计算效率,增强方法的实时性。

最终,本课题将探索出一种具有稳定开关频率的收扩圆限定边界中压感应电机预测控制新方法,为推进电机系统的变频调速技术的基础性研究工作和预测控制方法的工业实际应用提供有力的理论指导。

参考文献:

- [1] Wu B , Narimani M . High-Power Converters and AC Drives[M]// High-Power Converters and ac Drives. 2005.
- [2] 王堃,游小杰,王琛琛,周明磊. 低开关频率下 SHEPWM 和 SVPWM 同步调制策略比较研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14):333-341.
- [3] J. Holtz. Advanced PWM and Predictive Control—An Overview [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6):3837-3844.
- [4] 齐昕,苏涛,周珂,杨建成,甘新鹏,张永昌. 交流电机模型预测控制策略发展概述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18):11.
- [5] Felipe Donoso, Andrés Mora, Roberto Cárdenas, Alejandro Angulo, Doris Sáez and Marco Rivera. Finite-Set Model-Predictive Control Strategies for a 3L-NPC Inverter Operating With Fixed Switching Frequency [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 3954-3965.
- [6] Petros Karamanakos, Mehrdad Nahalparvari, Tobias Geyer. Fixed Switching Frequency Direct Model Predictive Control With Continuous and Discontinuous Modulation for Grid-Tied Converters With LCL Filters [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020, pp(99): 1-16.
- [7] Apparao Dekka, Bin Wu, Venkata Yaramasu, Ricardo Lizana Fuentes and Navid R. Zargari. Model Predictive Control of High-Power Modular Multilevel Converters—An Overview [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(1):168-183.



- [8] Matías Aguirre, Samir Kouro, Christian A. Rojas, José Rodríguez and José I. Leon. Switching Frequency Regulation for FCS-MPC Based on a Period Control Approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7):5764-5773.
- [9] Joachim Holtz, **QI Xin**. Optimal Control of Medium Voltage Drives – an Overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(12):5472-5481.
- [10] Joachim Holtz, S. Stadtfeld. A predictive controller for the stator current vector of AC machines fed from a switched voltage source [C]. International Power Electronics Conf. IPEC, 1983.
- [11] Joachim Holtz. Power electronics-A continuing challenge [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2011, 5(2):6-15.
- [12] A. Linder, Ralph Kennel. Direct model predictive control—A new direct predictive control strategy for electrical drives [C]. European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2005.
- [13] Samir Kouro, Patricio Cortés, René Vargas, Ulrich Ammann, José Rodríguez. Model predictive control—A simple and powerful method to control power converters [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2009, 56(6):1826-1838.
- [14] 牛峰, 韩振铎, 黄晓艳, 张健, 李奎, 方攸同. 永磁同步电机模型预测磁链控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(03):34-41.
- [15] Nikolaos Oikonomou, Christof Gutscher, Petros Karamanakos, Frederick D. Kieferndorf and Tobias Geyer, Model Predictive Pulse Pattern Control for the Five-Level Active Neutral-Point-Clamped Inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(6):2583-2592.
- [16] 刘旭东, 李珂, 张奇, 张承慧. 基于非线性扰动观测器的永磁同步电机单环预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7):10.
- [17] 姚绪梁, 麻宸伟, 王景芳, 黄乘齐. 基于预测误差补偿的鲁棒型永磁同步电机模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17):10.
- [18] **QI Xin**, Kennel R, **XiaoMin Zhou**, Ke Zhou, **Tao Feng**. Influence of leakage inductance on operation performances for predictive control low-switching frequency application[C]// 2019 IEEE International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE). IEEE, 2019.
- [19] 郭磊磊, 孙怡舒, 李琰琰, 代林旺, 金楠, 罗魁. PMSM 无权重系数转矩预测控制方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8):8.
- [20] 李佳耀, 宋文胜, 刘碧, 余彬, 冯加旭. 低转矩脉动和共模电压的永磁同步电机模型预测脉冲序列控制[J/OL]. 中国电机工程学报:1-11[2022-03-07].
- [21] Chong Sun, Dan Sun, Zhihao Zheng and Heng Nian. Simplified Model Predictive Control for Dual Inverter-Fed Open-Winding Permanent Magnet Synchronous Motor [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(4):1846-1854.
- [22] 齐昕, 吴文昊, 吴琳, 周珂, 马祥华, **周晓敏**. 基于时间辅助信息的感应电机预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16):4927-4934+4995.
- [23] 於锋, 吴晓新, 田朱杰, 朱晨光. 计及中点电位平衡的 PMSM 三电平无权重值预测磁链控制[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(09):145-155.



- [24] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 杨启东, 任佳越, 秦玉贵, 赵承辉, 周逸凡. 表贴式永磁同步电机有限集模型预测转矩控制成本函数研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(09):12-18.
- [25] S. Kouro, P. Cortes, R. Vargas, U. Ammann and J. Rodriguez. Model Predictive Control—A Simple and Powerful Method to Control Power Converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6):1826-1838.
- [26] 柳志飞, 杜贵平, 杜发达. 有限集模型预测控制在电力电子系统中的研究现状和发展趋势[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22):58-69.
- [27] 盛明钢, 沈安文, 罗欣. 一种简化的 PMSM 连续控制集模型预测电流控制[J]. 微特电机, 2019, 47(05):36-40+46.
- [28] Hoach The Nguyen, Eun-Kyung Kim, Ik-Pyo Kim, Han Ho Choi and Jin-Woo Jung. Model Predictive Control with Modulated Optimal Vector for a Three-Phase Inverter with an LC Filter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(3):2690-2703.
- [29] Fengxiang Wang, Long He, Jose Rodriguez. FPGA-Based Continuous Control Set Model Predictive Current Control for PMSM System Using Multistep Error Tracking Technique [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(12):13455-13464.
- [30] 王治国, 郑泽东, 李永东, 李贵彬. 三相异步电机电流多步预测控制方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(09):1975-1984.
- [31] **QI Xin**, Joachim Holtz. Modeling and Control of Low Switching Frequency High-Performance Induction Motor Drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6):4402-4410.
- [32] **齐昕**, 周珂, 王长松, **周晓敏**, 潘治赞, 马祥华. 中高功率交流电机逆变器的低开关频率控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24):6445-6458.
- [33] Yongchang Zhang, Haitao Yang. Two-Vector-Based Model Predictive Torque Control Without Weighting Factors for Induction Motor Drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2):1381-1390.
- [34] 张永昌, 夏波, 杨海涛. 感应电机三矢量模型预测磁链控制[J]. 电气工程学报, 2017, 12(003):1-9.
- [35] 程建材, 康龙云, 胡毕华, 冯元彬. 三电平并网逆变器恒定开关频率的模型预测控制[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(05):169-175.
- [36] Changming Zheng, Tomislav Dragičević, Zhenbin Zhang, Jose Rodriguez, Frede Blaabjerg. Model Predictive Control of LC-Filtered Voltage Source Inverters With Optimal Switching Sequence [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 3422-3436.
- [37] 姚骏, 刘瑞阔, 尹潇. 永磁同步电机三矢量低开关频率模型预测控制研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13):2935-2945.
- [38] **齐昕**, 付永星, **周晓敏**, 周珂, 马祥华. 基于双边界圆限定策略的感应电机预测控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(01):282-292.
- [39] Yaru Xue, Dongyi Meng, Shaobo Yin, Wei Han, Wei Han, Zhan Shu, Lijun Diao. Vector-Based Model Predictive Hysteresis Current Control for Asynchronous Motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11):8703-8712.
- [40] Dandan Su, Chengning Zhang, Yugang Dong. Finite-state model predictive current control for surface-mounted permanent magnet synchronous motors based on current locus [J]. IEEE



Access, 2017, 5:27366-27375.

- [41] 张永昌, 杨海涛, 魏香龙. 基于快速矢量选择的永磁同步电机模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(06):66-73.
- [42] Mohsen Siami, Davood Arab Khaburi, Jose Rodriguez. Simplified finite control set-model predictive control for matrix converter-fed PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018,33(3):2438-2446.
- [43] Yongchang Zhang, Wei Xie, Zhengxi Li, Yingchao Zhang. Low-Complexity Model Predictive Power Control: Double-Vector-Based Approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(11):5871-5880.
- [44] Tao Liu, Yan Cai, Zhanfeng Song. Simplified Predictive Torque Control for Surface-Mounted PMSM Based on Equivalent Transformation and Partition Method [J]. IEEE Access, 2020, 8: 35048-35062.
- [45] Xing Liu, Dan Wang, Zhouhua Peng. A computationally efficient FCS-MPC method without weighting factors for NNPCs with optimal duty cycle control [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(5): 2503-2514.
- [46] Wei Xie, Xiaocan Wang, Fengxiang Wang, Wei Xu, Ralph M. Kennel, Dieter Gerling, Robert D. Lorenz. Finite-control-set model predictive torque control with a deadbeat solution for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5402-5410.
- [47] 夏长亮, 张天一, 周湛清, 张国政, 史婷娜. 结合开关表的三电平逆变器永磁同步电机模型预测转矩控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20):83-92+110.
- [48] Changliang Xia, Tao Liu, Tingna Shi and Zhanfeng Song. A Simplified Finite-Control-Set Model-Predictive Control for Power Converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2):991-1002.
- [49] 雷亚洲, 徐艳平, 周钦. 基于改进模型预测控制的永磁同步电机 DTC 方法[J]. 电气传动, 2015, 45(9):3-6.
- [50] Junpan Su, Dan Sun. Simplified MPCC for four-switch three-phase inverter-fed PMSM [J]. Electronics Letters, 2017, 53(16):1108-1109.

2. 项目的研究内容、研究目标, 以及拟解决的关键科学问题 (此部分为重点阐述内容);

2.1 研究内容

(1) 预测控制方法下开关频率的变化过程及其规律研究

需从物理本质上深入剖析边界限定形式预测控制方法下开关频率的变化规律, 探求影响开关频率的所有物理因素 (边界圆半径、调制指数、电机转速、电机负载、反电势等), 并确定其中的主导因素; 定性、定量地探求各主导因素的作用区间以及该区间内开关频率的变化规律, 获得开关频率、边界圆半径以及各主导因素之间的多元非线性映射关系。

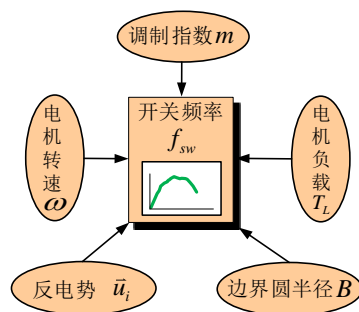


图 6 预测控制方法下影响开关频率变化的因素

(2) 具有开关频率稳定功能的收扩圆限定边界调节策略研究

基于开关频率变化的物理机制,研发边界限定形式预测控制方法下的开关频率稳定策略:依据电机的运行状态,并综合开关频率、转速、负载等参量,确定边界圆在未来的运动趋势以及边界圆半径变化规律,进而动态调节边界圆的尺寸(如图 7 所示),维持开关频率的稳定,充分利用功率器件的开关能力。

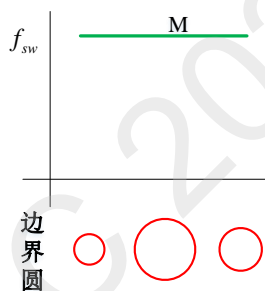


图 7 边界圆与开关频率间的对应关系

(3) 限定边界动态变化过程中电压矢量切换触发机制的研究

边界圆半径随着电机运行状态实时变化,与此同时电流轨迹也在不断变化。边界与电流轨迹的同时变化势必会对电压矢量的切换触发造成影响。因此,需要针对边界圆向内压缩(图 8 a))以及边界圆向外扩张(图 8 b))两种情况,同时配合电流轨迹的运动趋势,研发一种电压矢量切换触发新机制,实现电压矢量的精准切换,有效避免滞后切换造成的电流轨迹过冲,以及超前切换造成的开关频率上升。

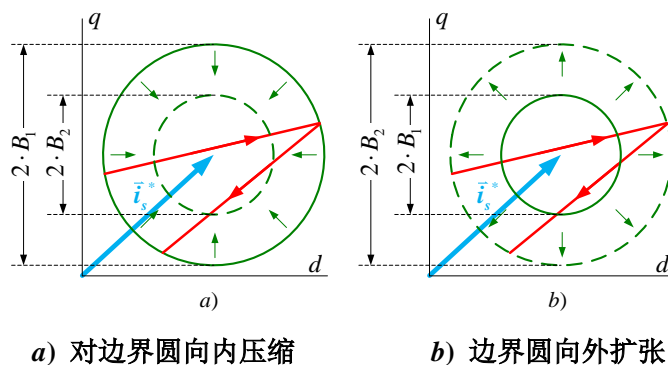


图 8 边界圆半径的变化情况



(4) 具有高实时性的稳定开关频率预测控制算法优化研究

对控制算法的逻辑关系和结构特点进行分析:对预测控制算法中时序逻辑依赖性不强的部分进行分解(例如电流采样换算、坐标变换与磁链计算部分相互之间没有时序逻辑依赖性),将原有的整体算法结构分解成能够并行执行的子算法结构;同时,针对预测控制算法中矢量轮询部分在逻辑关系上相互独立这一特点,可以将计算任务分而治之,将整体计算量平均分配,利用并行计算方法来压缩计算耗时。通过以上措施对算法进行优化改进能大幅压缩控制算法整体耗时,提高系统采样速率并增强控制系统的实时性。

2.2 研究目标

针对边界限定形式预测控制方法中开关频率大范围波动这一核心问题,本项目开展具有稳定开关频率的收扩圆限定边界中压感应电机预测控制理论方法研究,达到以下目标:

(1) 揭示边界限定形式预测控制方法下开关频率变化的物理机制,明确影响开关频率变化的主导因素及其变化区间;

(2) 建立开关频率、边界圆半径以及各物理因素之间的多元非线性映射数学模型,为边界预调环节提供数学理论依据。

(3) 提出一种收扩圆限定边界调节策略,在保证系统以低开关频率运行的同时,实现开关频率的稳定;

(4) 创建一种空间电压矢量精准切换触发机制,避免开关状态切换的超前或滞后;

(5) 优化稳定开关频率预测控制算法,以并行计算方法减少计算耗时,增强系统的实时性,提升系统的动态特性。

本课题的研究可使预测控制方法的理论体系得到进一步完善,并为预测控制在中压感应电机低开关频率驱动领域的应用提供有力的理论基础和方法支撑。

2.3 拟解决的关键科学问题

(1) 预测控制方法下开关频率波动的物理机制

如何分析边界圆半径、调制指数、电机转速、电机负载、反电势等物理量对开关频率波动的影响,研究开关频率随之变化的物理规律,并揭示开关频率波动的物理机制,创立多元耦合物理量作用下开关频率波动的分析理论,是本课题需要解决的关键科学问题之一。

(2) 开关频率多元非线性映射数学模型的建立

如何依据转速、期望的开关频率以及反电势等因素,确定边界圆半径在未来的变化量值以及变化速率,构建开关频率、边界圆半径以及各主导因素之间



的非线性映射关系，是实现收扩圆限定边界调节策略的前提，也是本课题需要解决的另一个关键科学问题。

3. 拟采取的研究方案及可行性分析（包括研究方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明）；

3.1 技术路线

课题将采取层级递进、单元化的方式展开研究，技术路线如图 9 所示，主体研究内容和研究工作构成主研究单元，其余研究工作构成辅助研究单元。研究路线由主研究路线、全局反馈回路以及辅助研究途径、局部反馈回路构成。

主研究路线：

首先，分析边界限定形式预测控制方法下的开关频率变化的物理机制，研发具有稳定开关频率运行特性的收扩圆限定边界调节策略；**其次**，改进电压矢量的切换触发机制，实现电压矢量切换触发机制与收扩圆调节策略的融合；**再次**，实现控制、监测的协同目标多任务并行处理，优化控制算法实时性；**最终**，基于上述研究，提出具有稳定开关频率的收扩圆限定边界中压感应电机预测控制方法，并对此方法进行系统性实验验证。

辅助研究途径：

为避免因算法不成熟等因素造成中压逆变设备的损毁，本课题在进行最终的中压系统性实验验证之前，将以**虚拟仿真、数字/物理混合实时模拟实验、等效中压实验**的辅助手段，初步完成开关频率变化物理机制分析，以及收扩圆限定边界调节策略、精准切换触发机制及其与收扩圆调节策略的融合等相关测试工作，并在低压等效平台上进行全局系统性初步实验验证。

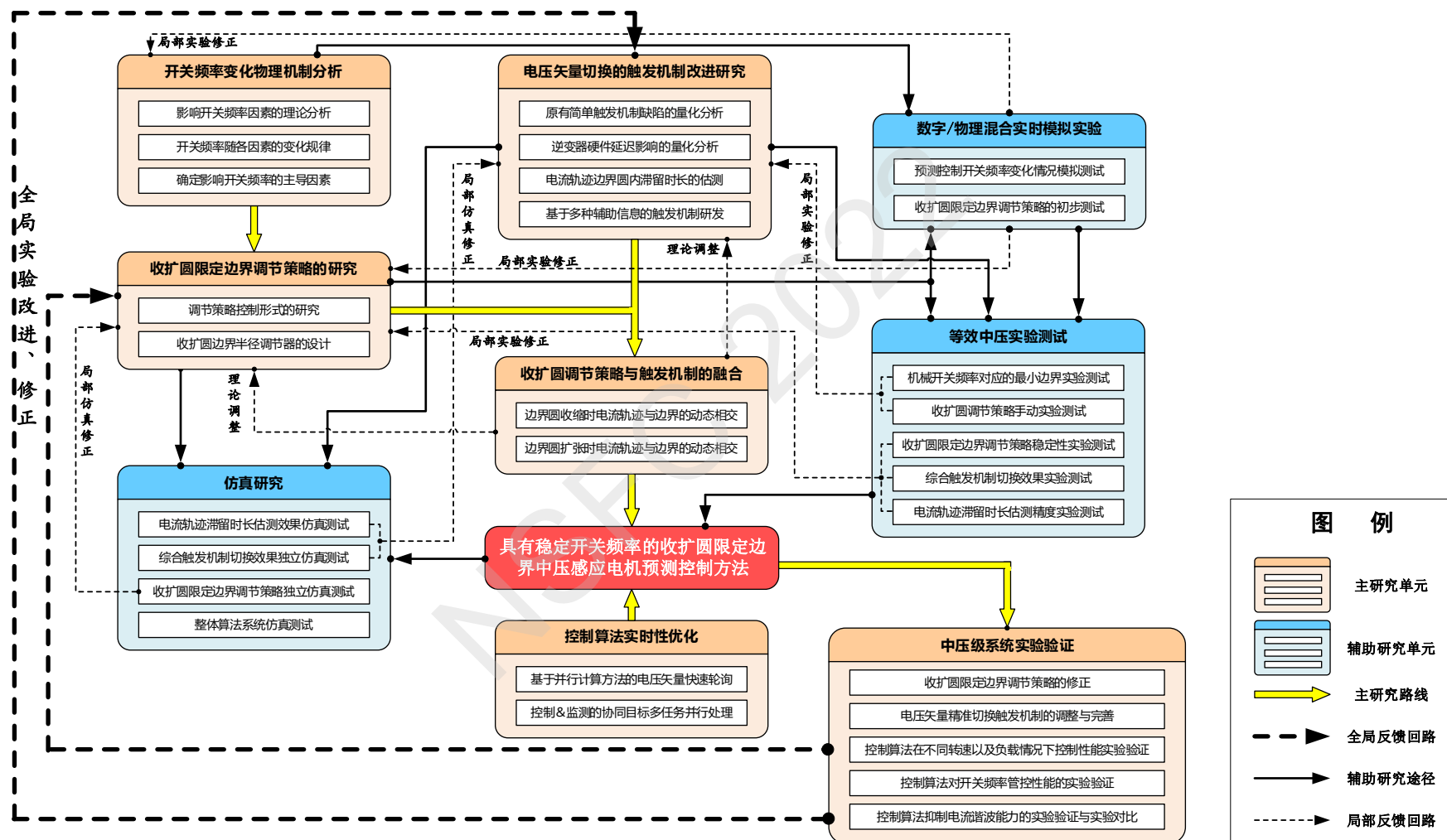


图9 课题研究技术路线



3.2 拟采取的研究方案以及相关方法

(1) 开关频率变化的物理机制及其变化规律分析

为了研究开关频率变化的物理机制及其变化规律,首先以转速作为切入线索展开研究:基波频率与转速 ω 近乎成线性关系,随着基波频率的提高,电压矢量 \vec{u}_s 将更频繁地在6个基础电压矢量 \vec{u}_{s_base} 间切换(如图10所示),逆变器的开关频率也就更高。

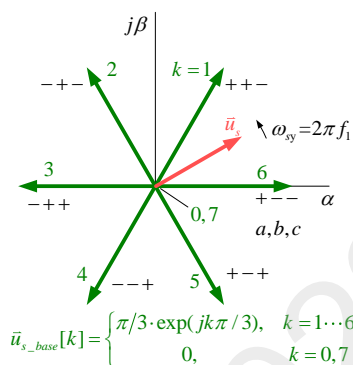


图 10 稳态时电压矢量的切换

然而,当转速上升到一定数值后,开关频率反而开始下降。因此还需要排查其他物理量,并基于感应电机复矢量数学模型、借助相量法以图形化的形式分析边界圆半径、调制指数、电机转速、电机负载、反电势等物理量对开关频率波动的影响,研究开关频率随之变化的物理规律;以电磁感应定律为理论基础,解耦各物理量对于开关频率的影响,确立主导因素,剖析开关频率波动的物理机制。

(2) 开关频率多元非线性映射数学模型的建立

为了给收扩圆调节策略中的边界预调环节提供数学理论依据,需建立多元非线性映射数学模型。根据前期实验探索,电机转速以及边界圆半径对开关频率变化的影响较大,故下面以二者为例,简述数学模型建立过程:

首先,需明确二者的变化范围:电机转速范围为零至全速;边界圆半径变化范围由电流畸变的允许值确定(其中,以工程实际为基础决定最大电流畸变,以算法不失效为前提决定最小电流畸变)。其次,对电机转速范围与边界圆半径范围进行网格划分(将边界圆半径划分为 k 项;将电机转速划分为 n 项。如式(2)所示,以 B 表示不同边界圆半径的集合, b 表示集合元素, Ω 表示电机转速的集合, ω 表示集合元素),得到测试点集,通过实验获得电机在不同测试点下对应的开关频率集合 $F_{sw}(f_{sw})$ 。

$$\begin{cases} B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_k\} \\ \Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n\} \end{cases} \quad (2)$$

然后,对所得到的数据集采用决策树进行缺失值补充;采用信度分析检测测

量结果的可信度；采用 Mentel-Hanszel 分层分析等方法检验测量结果的相关度，进而获得边界圆半径集合 B 、电机转速集合 Ω 、开关频率集合 F_{sw} 的映射关系：

$$\begin{cases} g_1: B \rightarrow \Omega \\ g_2: B \rightarrow F_{sw} \\ g_3: \Omega \rightarrow F_{sw} \end{cases}$$

最终，借由高斯-牛顿迭代等方法建立多元非线性映射模型： $g(f_{sw}, \omega) \rightarrow b$

(3) 收扩圆限定边界调节策略与电机调速系统的协调整合

为实现预测控制方法下开关频率的稳定，提出与电机调速系统协调整合的收扩圆限定边界调节策略。其系统控制框图如图 11 所示，其中最为重要的是“收扩圆边界半径调节器”，它的输入为目标转速 ω^* 、实际转速 ω 以及实时监测的逆变器平均开关频率 \bar{f}_{sw} 。一方面，调节器依据目标转速 ω^* 以及当前转速 ω 实现限定边界 B 的初步选择，在系统达到稳态后，以 \bar{f}_{sw} 为反馈对 B 进行精准调控；另一方面，调节器会综合转速变换情况以及开关频率条件，调整转速控制器的输入，让转速调节与开关频率的控制相匹配。

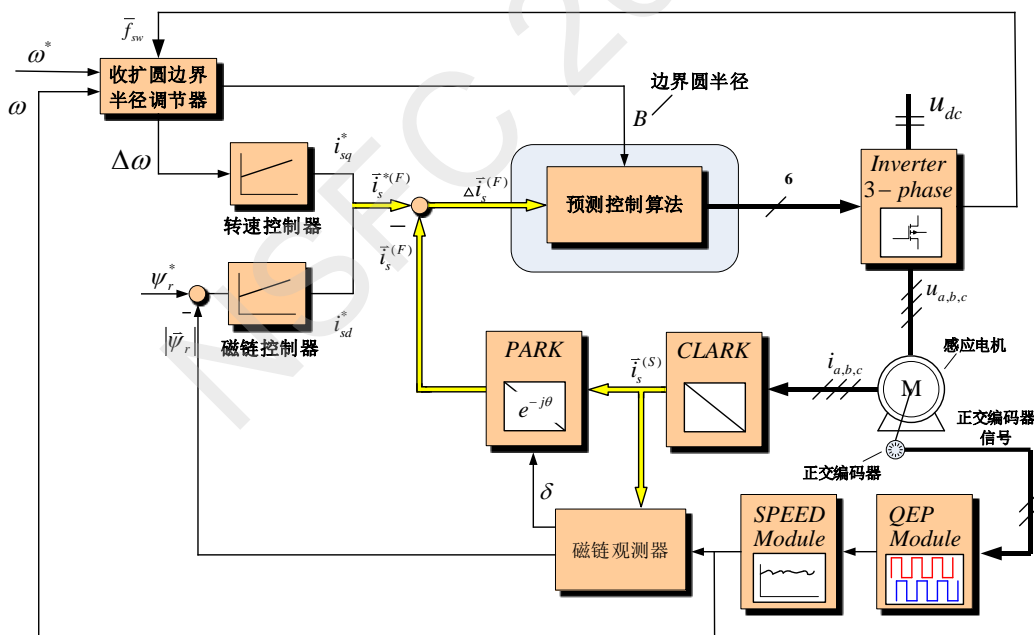


图 11 收扩圆限定边界调节策略系统控制框图

收扩圆边界半径调节器分为边界调控与转速控制匹配协调两大部分，其信号框图如图 12 所示。

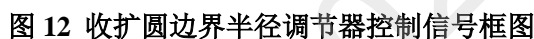


图 13 预测控制方法调速过程中开关频率变化

故可以直接根据 ω 与 ω^* 之间的大小关系决定边界半径调整与转速调节二者之间的先后顺序, 并以状态信号 s 作为决定其先后顺序的判别条件 ($s=1$, 则先调节转速, 延迟调节边界半径, 反之 $s=2$, 先调节边界半径, 延迟调节转速)。当 ω 与 ω^* 位于 ω_M 两侧, 则意味着限定边界在保持不变的情况下, 开关频率会先上升至最大值, 而后再下降, 因此要先将限定边界调整至最大 B_{\max} , 而后调节转速至 ω^* , 最后再进行边界的调整。

②边界调控部分以实现边界圆半径的动态调整，主要分为预调节和精准调节前后两大步骤。当调节器输入参数变化时（目标转速 ω^* 以及当前转速 ω ），为了能实时准确地输出期望边界圆半径，引入模糊控制方法进行边界圆半径的预调节。利用该方法高度的非线性逼近映射能力，达成对复杂的非线性、不确定性系

统的前馈控制，根据多元非线性映射数学模型，初步获取边界圆半径大小。

为了保证开关频率以较高的精准度稳定在预期设定值，需对开关频率进行精准调节。首先以数理统计理论为基础，通过公式（3）计算出开关频率的标准差，进行稳态判定；然后以 \bar{f}_{sw} 为反馈，利用滑模控制器（SMC）进一步输出此时精准调节后的边界圆半径；最终实现在稳态时对边界圆半径的精准调节。

$$s_w = \sqrt{\frac{1}{n} \left[(f_{sw1} - \bar{f}_{sw})^2 + (f_{sw2} - \bar{f}_{sw})^2 + \cdots + (f_{swn} - \bar{f}_{sw})^2 \right]} \quad (3)$$

式中： s_w 为开关频率的标准差； n 为 1s 内开关频率的采样数； f_{swn} 为开关频率的采样值； \bar{f}_{sw} 为 1s 内开关频率的平均值。

（4）收扩圆调节策略与电压矢量切换触发机制的融合方法

为了解决电流轨迹与边界圆混叠运动所造成的触发紊乱问题，拟提出一种收扩圆调节策略与切换触发机制的融合方法。以组合数学理论为基础，对电流轨迹和限定边界的运动模态进行排列组合，分类讨论。基于电流轨迹预测的结果，结合未来时刻边界圆半径大小，预判二者的相交位置。进而反推出发生触碰所经历的时间，并预测发生触碰时的电机状态。同时，结合电压矢量轮询所需的计算时长以及逆变器开关状态切换的硬件延迟等辅助信息，确定最佳的触发时机，并完成新电压矢量的计算选取。

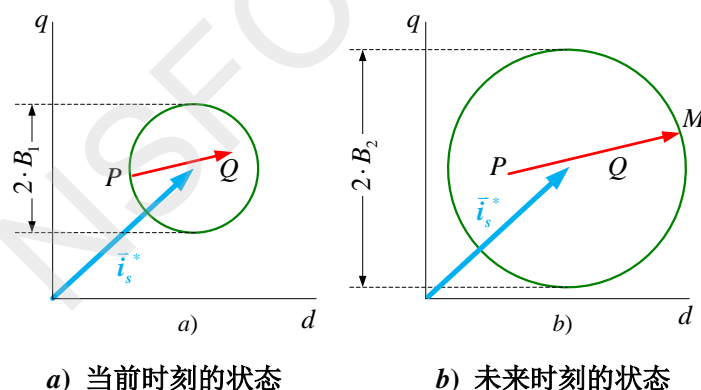


图 14 融合方法工作原理示例

以图 14 为例，电流轨迹由 P 点起始，现位于 Q 点，若电压矢量不变，则会依照当前方向继续前进。收扩圆调节策略要求边界圆半径由 B_1 扩张至 B_2 ，因此运动模态组合为“边界圆扩张+电流轨迹趋近边界”。预测未来的触碰点 M，进而可以反推出由 P 点到 M 点所需的时间，以及电机运行至 M 点时的内部状态。

(5) 基于协同目标多任务并行处理机制的控制算法实时性优化

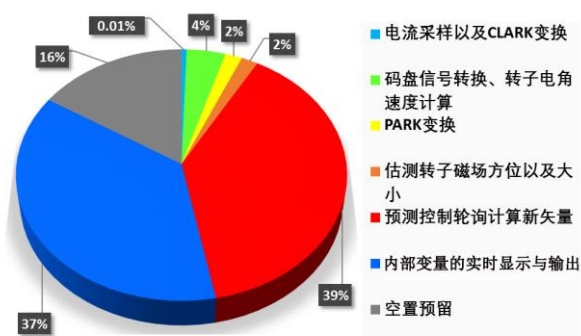


图 15 各个任务所消耗的时间比例

预测控制需要对各个电压矢量进行轮询计算，耗时巨大，以传统边界圆限定形式的预测控制为例，矢量轮询计算耗时占比 39%（如图 15 中红色区域所示）；此外还需要对 i_α 、 i_β 、 i_d 、 i_q 、 $\bar{\psi}_s$ 、 $\bar{\psi}_r$ 等诸多无法用仪器直接测量的状态变量实时观测、记录，这部分任务的系统耗时达到了 37%（如图 15 中蓝色区域所示）。这两大任务严重拉低了系统的采样频率，为此需要针对它们的特点进行优化，压缩其消耗时长，以便提高实时性，改善系统的动态特性。

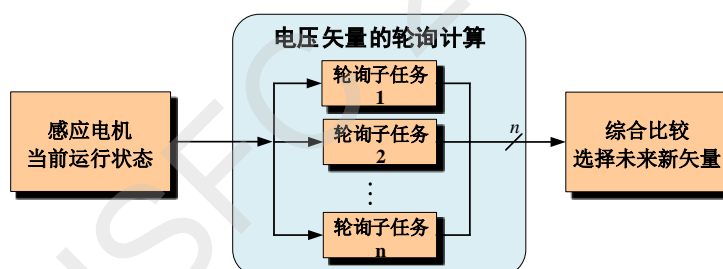


图 16 预测控制核心算法并行处理架构

首先，预测控制的核心算法具有其特殊性，各矢量的轮询之间相互独立且不存在因果关系。因此，拟采用并行计算的方法对算法进行优化。如图 16 所示，对电压矢量的轮询计算进行拆分，形成轮询子任务。合理分配任务量、优化算法，科学配置内存空间，组织各个处理核心协同计算，同步完成所有轮询任务，最大程度压缩运算时间，提高算法的执行效率。

其次，为提高实验系统的执行速率，将观测内部变量的任务剥离出来，研发一套独立运行的内部变量实时监测系统（如图 17 所示）。电流传感器信号和编码器信号同时输出到“控制子系统”和“监测子系统”，前者继续完成原有的驱动任务，后者实现内部变量的实时监测。这样可以有效减小原有控制系统的运算负担，提升整个实验系统的执行速率。

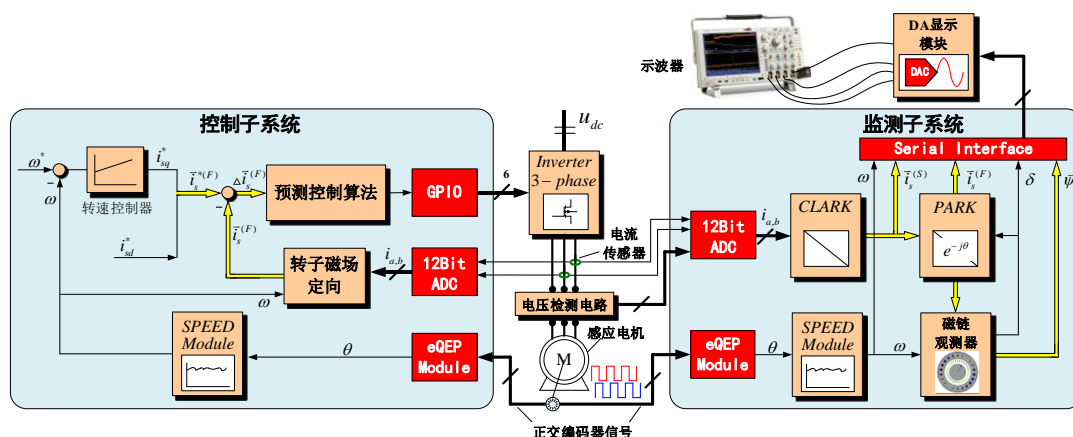


图 17 内部变量独立监测系统工作框图

3.3 实验手段及方案

(1) 数字/物理混合实时模拟实验

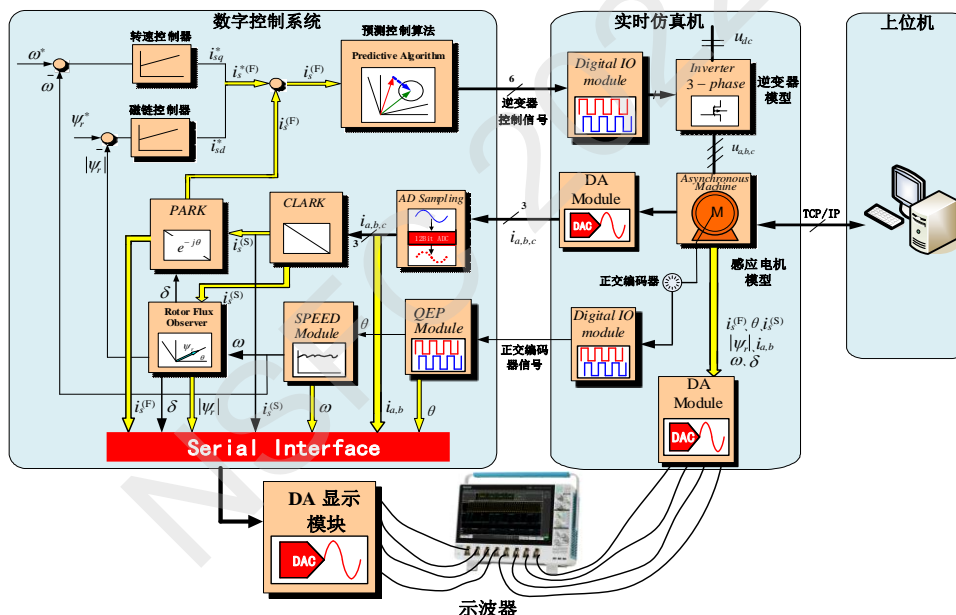


图 18 数字/物理混合实时模拟实验系统

数字/物理混合实时模拟实验系统如图 18 所示，主要由上位机、实时仿真机以及数字控制系统组成。

实时仿真机搭建感应电机控制驱动系统模型，实时计算并传送控制系统的运行信息至上位机，实现对控制器运行情况的实时监测；同时通过数字 IO 接口与 DA 模块等功能部件实现数字系统控制信号流的模拟与传输。

实时仿真机模拟生成的电流信号与正交编码信号传递给数字控制系统，其内部的预测控制算法模块计算出逆变器控制信号并发送到实时仿真机。同时，数字控制系统也将其估测出的电机内部变量经外部 DA 输出到示波器，并与实时仿真机输出的相应电机模型内部变量进行对比校准。

模拟实验具体内容包括以下几点：

- 1) 依据模拟实验中开关频率变化的情况，确定主导影响因素，并进一步分析开关频率变化的物理机制；
- 2) 对模拟实验的结果进行分析，获得开关频率的变化规律曲线，确定开关频率变化的转折点，进行分段划分，制定收扩圆限定边界调节策略；
- 3) 对收扩圆限定边界调节策略在数字/物理混合实时模拟实验平台上进行全局系统性初步测试，为后期实验打下良好的理论基础。

(2) 等效中压实验

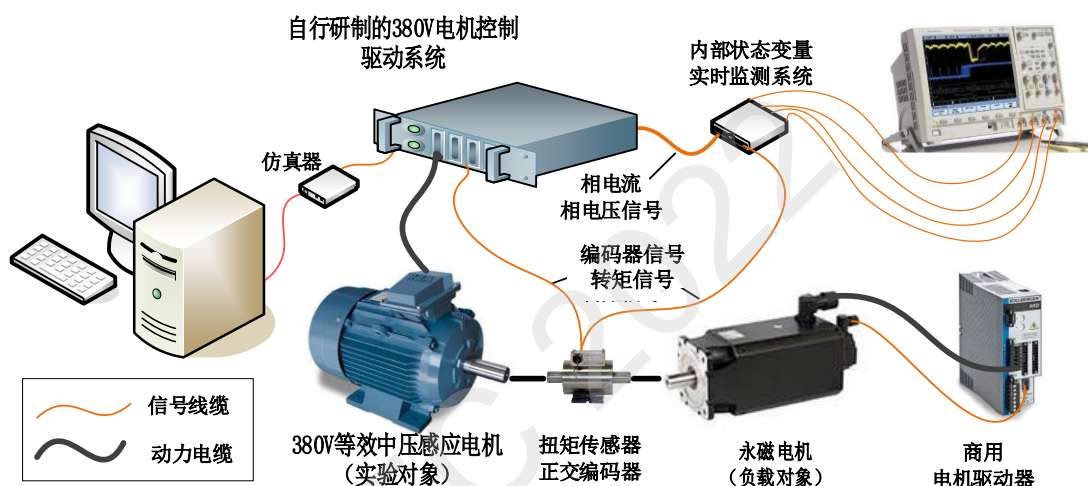


图 19 等效中压实验结构示意图

表-I 3.3kV 中压电机额定值以及相关参数

额定值		参数实际值		参数标么值	
P_R	125kW	R_s	0.63622Ω	r_s	0.0110
U_R	3.3kV	$L_{s\sigma}$	0.0215973H	$l_{s\sigma}$	0.1175
I_R	30A	R_r	0.81413Ω	r_r	0.0141
f_{sR}	50Hz	$L_{r\sigma}$	0.0198415H	$l_{r\sigma}$	0.1056
n_R	1481rpm	L_m	0.4918524H	l_m	2.6763

表-II 380V 等效电机额定值以及相关参数

额定值		参数实际值		参数标么值	
P_R	2.2kW	R_s	0.50417Ω	r_s	0.0110
U_R	380V	$L_{s\sigma}$	0.017151H	$l_{s\sigma}$	0.1175
I_R	4.8A	R_r	0.64625Ω	r_r	0.0141
f_{sR}	50Hz	$L_{r\sigma}$	0.015414H	$l_{r\sigma}$	0.1056
n_R	1440rpm	L_m	0.390649H	l_m	2.6763

为了防止在实验过程中，因操作不当造成中压逆变设备损毁，在进行中压实验前，先进行等效中压实验。表 I 为中压电机的额定值、电路参数以及其标么值。课题组将利用已有的 380V 等效中压电机（其额定值以及电路参数如表 II 所示）

进行等效实验，等效中压实验的结构示意图如图 19 所示。尽管该等效电机的额定电压、额定功率以及额定电流与中压电机都不同，但其标幺值与中压电机完全一致，该电机具有与中压电机同样的电气特性。

首先，完成 3.1 节“技术路线”中的第一轮全局系统性实验验证工作：通过实验测试获得最小边界对应的开关频率；完成收扩圆调节策略手动调节测试实验；进行收扩圆限定边界调节策略稳定性实验测试。针对实验过程中检测到的问题对调节控制策略进行修正。

其次，针对与逆变器等硬件相关的，且在混合模拟实验中不易实现的研究内容进行初步实验测试（包括精准切换触发机制效果测试、电流轨迹滞留时长估测精度测试）。对算法进行测试以及修正，并完成全系统的低压等效实验，待全部调试正常后再进行正式的中压实验，这样能够减少直接进行中压实验所带来的风险。

(3) 中压实验

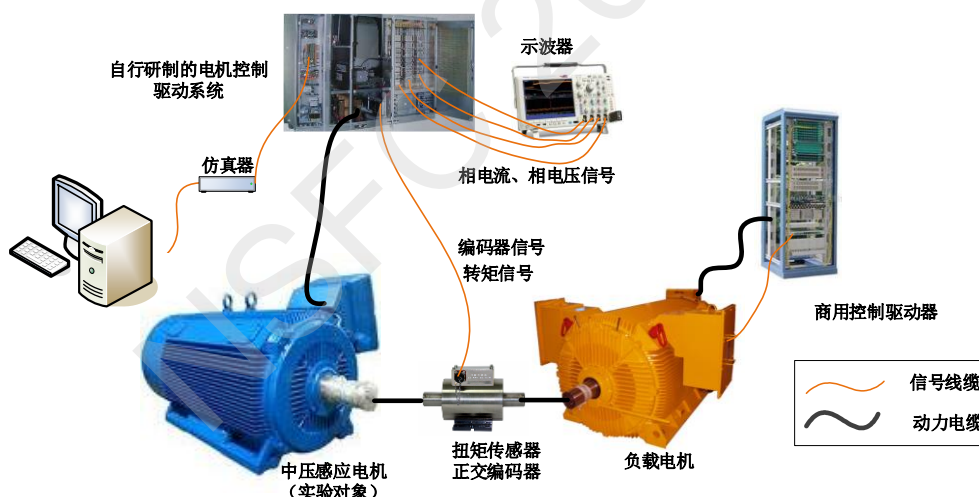


图 20 中压对拖实验结构示意图

虽然等效中压电机的电气特性与中压电机相同，但其机械特性存在差异，一些细节上（电压等级、额定功率）也有所不同，因此本课题将在图 20 所示的 3.3kV、125kW 中压平台上进行系统实验。

- 1) 在中压实验平台上对开关频率的变化情况进行实验测试，并与模拟实验的理论结果进行比较验证。
- 2) 针对中压电机的实际情况，对主导因素的作用区域需重新测定，并获得开关频率的变化规律曲线。对模拟实验制定的收扩圆限定边界调节策略进行修正。
- 3) 依据中压驱动系统的硬件特性，对精准切换触发机制进行调整及完善，并完



成收扩圆调节策略与电压矢量切换触发机制融合方法的实验测试，包括精准切换触发机制的效果测试、电流轨迹滞留时长估测精度测试。

- 4) 最后将以上研究内容进行整合分析，完善控制方法的工作特性，并进行全局实验验证。①在低速、中速、高速以及空载、中载、全载等不同条件下进行实验，验证算法的控制性能；②验证算法降低开关频率、抑制电流畸变的能力，并与常规预测控制进行对比；③对收扩圆调节策略的程序进行完善、对开关频率的保持能力进行定量的实验分析。

3.4 可行性分析

(1) 边界限定形式预测控制方法的理论可行性

首先，课题组对基于边界限定形式的预测控制进行了多年研究，申请人一作论文“感应电机预测控制改进算法”2013年发表于《电机与控制学报》，该文针对反电势电机模型计算电流矢量导数时进行微分运算造成系统内部高频噪声放大的问题，提出一种感应电机预测控制改进算法。使用转子磁场坐标系下的电机模型代替反电势电机模型，进而在计算电流矢量的导数的过程中避免了微分运算，减小了预测控制算法在选择最优开关状态时出错的几率。电流实际控制误差由 $\pm 0.1\text{pu}$ 降低到 $\pm 0.05\text{pu}$ ，转矩波动由 $\pm 0.04\text{pu}$ 降低到 $\pm 0.0225\text{pu}$ ，提高了系统的鲁棒性，使预测控制算法的控制性能得到进一步的提高。

其次，针对单边界圆电流谐波限定策略的预测控制容易造成开关状态过早切换的问题，申请人在2017年发表于《中国电机工程学报》的“基于双边界圆限定策略的感应电机预测控制研究”中提出了双边界圆限定策略。设定用于判断电流矢量位置的两个边界圆，当电流矢量处于内边界圆内部时，保持当前的电压矢量不变，从而避免开关状态过早切换，可以进一步降低开关频率。

再次，课题组发现提升系统采样频率（系统实时性）能够及时地捕获到触发事件并完成电压矢量切换，有利于减少电流轨迹过冲，可以有效抑制电流畸变。申请人在2019年发表于《中国电机工程学报》的“基于时间辅助信息的感应电机预测电流控制”中提出一种电压矢量时间辅助切换机制。该研究成果表明将基于时间辅助信息的切换触发机制引入边界圆控制逻辑，能有效降低错误切换的几率。

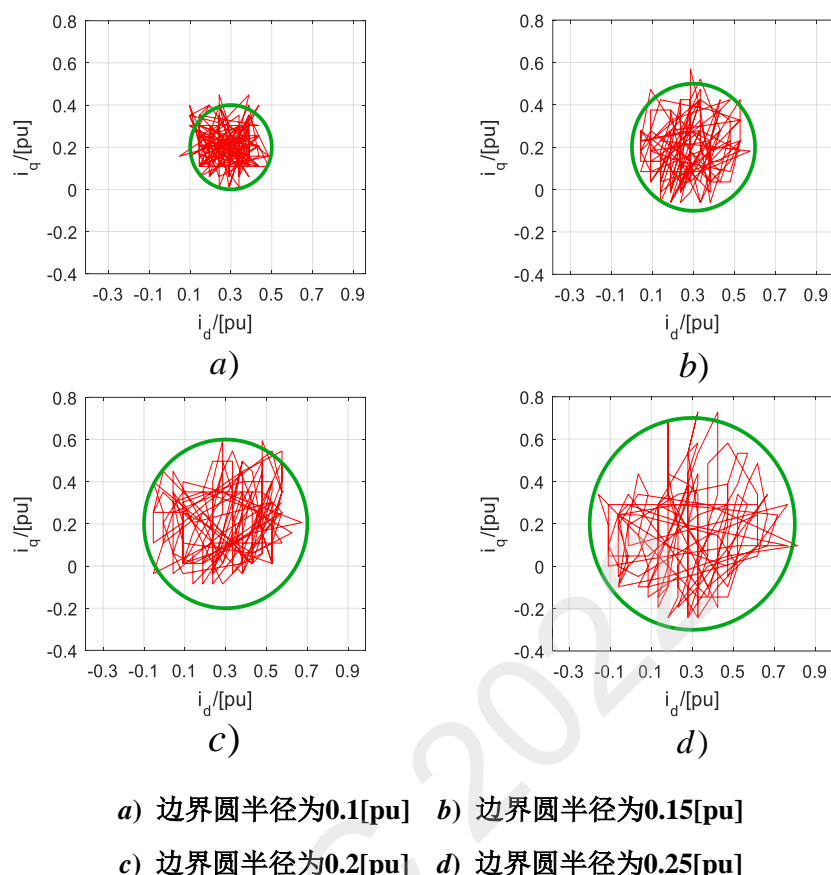


图 21 边界圆半径处于不同大小时的电流轨迹（记录时长 40ms）

最后，课题组为本课题做了前期预备实验，通过预测控制方法令电机运行在稳态，逐步改变边界圆的半径，其电流轨迹如图 21 所示。可以看出电流轨迹始终被限定在边界圆内部，这说明在边界圆半径变化的过程中预测控制方法始终有效。四组实验的记录时长一样，均为 40ms，图 21a)的边界圆半径最小，其电流轨迹最为密集，说明电流轨迹在边界内频繁折返，开关频率最高；图 21d)的边界圆半径最大，其电流轨迹最为稀疏，意味着电流轨迹无需频繁改变，开关频率最低。前期实验表明，边界圆的半径直接影响着开关频率的大小，因此，通过调节边界圆半径大小来管控开关频率是可行的。

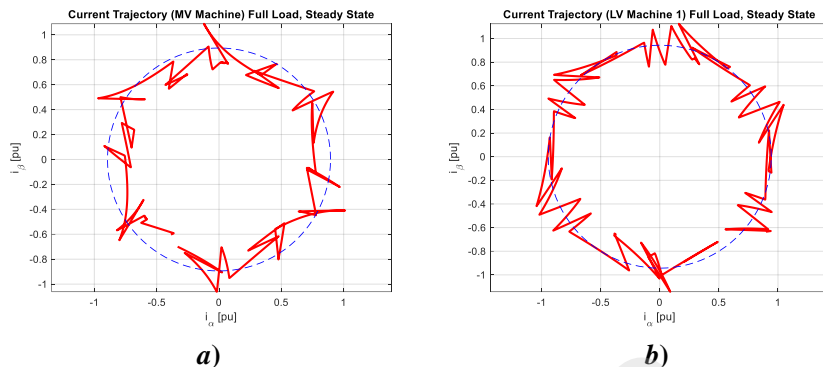
（2）实验手段及方案的可行性

1) 数字/物理混合实时模拟实验的可行性

数字/物理混合实时模拟实验结合了软件仿真和物理模拟的优势：它将数字控制系统与实时仿真机连接构成回路，可以有效模拟中压电机的运行情况以及高效捕捉开关频率的变化规律，并且进行初步实验测试有助于避免程序的不成熟而造成硬件损坏。因此运用实验室现有恒润 DeskHIL 数字/物理混合实时实验平台对上述模拟实验过程进行测试是切实可行的。

2) 等效中压实验的可行性

标么值相同的电机具有一样的电气特性,故可有效地模拟中压电机的运行情况。且 ABB 科研中心在进行中压驱动系统正式实验前都会以标么值相同的低压电机进行等效测试。



a) 中压电机电流轨迹 b) 低压等效电机电流轨迹

图 22 中压电机以及低压等效电机预测控制测试

此外,课题组已经搭建了等效中压电机实验平台和中压电机实验平台,并分别进行了前期测试,以同样的预测控制算法分别驱动 3.3kV 中压电机以及 380V 低压等效电机(电机参数见 3.3 节表-I、表-II)。电机运行于额定工况时的电流轨迹分别如图 22a)、图 22b)所示,二者的测试结果一致,也说明等效实验方案有效可行。

本课题采取循序渐进的研究方案:先在数字/物理混合实时模拟系统中进行测试,得到初步的实验数据;其次利用等效中压平台进行模拟系统中无法完成的实验,并完成全系统的低压等效实验;待全部调试正常后再进行正式的中压实验。以上实验方案是完备可靠的,尤其是数字/物理混合模拟系统以及等效中压平台是本课题的一大特色,能为中压实验的安全进行提供有力保证。

总之,项目研究已具备了较强的理论和技术可行性,具备相关研究的理论知识和现场经验,通过发挥各自优势,能够保证项目顺利实施和高质量完成。

4. 本项目的特色与创新之处;

4.1 本项目的特色

本课题采用预测控制方法,以满足中压电机系统在低开关频率运行时具有较高动态特性的特殊要求。同时,针对预测控制方法中开关频率大范围波动的问题开展研究,突破思维定势,提出收扩圆限定边界预测控制方法:建立开关频率多元非线性映射数学模型,创建收扩圆调节策略,完成边界调控以及转速协调的决策分析,以实现在控制过程中对边界圆半径动态调整,达成对开关频率的管控,



充分利用逆变器的开关能力，以此进一步推动预测控制方法在中压电机驱动场合的应用。

4.2 本项目的创新之处

(1) **创立多元非线性映射数学模型**：本课题运用统计学、数据驱动建模等方法，分析边界圆半径、开关频率、电机转速等参数之间的数理联系，并由此确定物理元素之间的映射关系，构建多元非线性映射数学模型。

(2) **提出收扩圆限定边界调节策略驱动的中压感应电机预测控制方法**：通过进行边界调控与转速协调的决策分析，动态调节边界尺寸，实现开关频率的稳定，缩小谐波在频谱上的污染范围，充分利用功率器件的开关性能。

(3) **构建多辅助信息支持的电压矢量精准切换触发新机制**：针对边界圆向内压缩以及边界圆向外扩张两种情况，同时配合电流轨迹的运动趋势，在其即将触碰到边界之时，对新矢量的计算与切换分别进行触发，避免切换的超前或滞后，在防止电流轨迹过冲的同时充分利用限定边界。

5. 年度研究计划及预期研究结果（包括拟组织的重要学术交流活动、国际合作与交流计划等）。

5.1 预期研究结果

科研成果

(1) 揭示边界限定形式的预测控制下开关频率变化的物理机制，为解决该控制方法中开关频率大范围波动的问题提供理论基础。

(2) 提出具有高稳定性控制架构的收扩圆限定边界调节策略，使系统稳定运行时平均开关频率能够维持在 500Hz，开关频率的波动范围控制在 $\pm 40\text{Hz}$ ，以满足中压电机系统的低开关频率运行要求。

(3) 构建多辅助信息支持的电压矢量切换触发机制，实现电压矢量的精准切换，进而可以将电流过冲量控制在 0.05[pu]以内。

(4) 提供基于协同目标多任务处理机制的控制算法实时性优化方案，使系统整体执行周期达到 $25\mu\text{s}$ ，电流环单位阶跃响应上升时间小于 5ms。

论著发表及专利申请

发表高水平学术论文 10-15 篇，至少 8 篇被 SCI 或 EI 检索。其中在中国电机工程学报、电工技术学报、IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS、IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS 等国内外知名学术刊物发表学术论文 8-10 篇；在重要学术会议 APEC/ECCE 及相关学术会议 PRECEDE 上发表 4-5 篇，并在上述会议上作大会专题报告。申请发明专利 2-5 项。



人才培养

培养硕士研究生 4-8 人，博士研究生 1-2 人，其中优秀毕业论文 3-4 人，优秀毕业生 6-8 人，校研究生十佳学术之星 1-2 人；培养副高级工程师 1 名；培养青年教师 2 人。

教学成果

基于课题科研成果，建设《机电传动控制》课程。本课程将紧密跟随领域前沿，形成具有“创新思维”的动态更新教学机制；引入科研项目难点，形成具有“挑战度”的课程教学。最终，项目团队将基于上述内容，申报“国家级线上线下混合式本科一流课程”1 门次，并编写一部具有较强工程指导意义的教材。

5.2 年度研究计划

本课题拟用 4 年时间完成，每年各个季度的时间安排如下：

	第一年				第二年				第三年				第四年			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
开关频率变化的物理机制分析	√	√														
收扩圆限定边界调节策略的研究			√	√	√											
电压矢量切换触发机制进行改进					√	√	√									
切换触发机制与收扩圆调节策略的融合						√	√									
数字/物理混合实时模拟实验						√	√	√								
等效中压实验及算法测试修正								√	√							
全局中压实验及算法完善										√	√	√	√			
研究成果总结 结题报告撰写													√	√	√	√

5.3 国际合作与交流计划

- (1) 项目组主要成员参加重要国际学术会议或出国访学 1~2 次；
- (2) 组织学术研讨会：

1) 基于本课题已获得的研究成果，组织关于“感应电机稳定开关频率预测控制方法”的研讨会（参会人数 100 人左右），邀请国内外开展相关研究与开发的高校、科研院所、企业的代表与会。

2) 总结研究中发现的新规律及新问题，为未来科研工作的开展奠定基础。



（二）研究基础与工作条件

1. 研究基础（与本项目相关的研究工作积累和已取得的研究工作成绩）；

（1）科研经验积累

申请人于 2006 年开始从事电机拖动与控制、电力电子驱动以及嵌入式系统等方面的研究工作，随后在博士学习期间以国家公派留学生身份前往德国 Wuppertal 大学，并跟随预测控制创始人 Joachim Holtz 教授进行中压交流电机控制技术的研究，且在其指导下开始专注于预测控制方法的研究至今十余年，在该科研领域积累了丰富的工作经验。并于 2015 年作为负责人主持青年基金项目《低开关频率三电平感应电机驱动系统最优预测控制研究》（27 万元，2017 年底结题）。本课题是对青年基金的延续和升华，为解决预测控制的开关频率稳定问题奠定理论基础。

项目组成员冯涛高级工程师作为参与人完成了申请人主持的上一个关于预测控制的青年基金，从事硬件部分的工作，具有相关研究基础；周晓敏副教授研究领域主要为电机控制和智能控制应用，2012 年 4 月至 2013 年 4 月在美国威斯康辛大学麦迪逊分校的 WEMPEC 实验室做访问学者，跟随 Robert Lorenz 教授从事永磁同步电机直接转矩控制研究。目前一直从事交流电机驱动控制相关研究工作。

此外申请人已邀请 Holtz 教授参与本课题的科研工作，并共同制定了关于收扩圆限定边界预测控制的研究方案。申请人长期与其合作开展预测控制方面的研究，共同完成了“感应电机驱动系统最优预测控制研究”，“中高功率电力电子驱动与控制技术研究”，以及“中压感应电机的先进驱动技术研究”等科学技术部国家外国专家局项目，并合作发表了多篇感应电机预测控制方面的高水平学术论文。

近年来，申请人完成了多项与感应电机预测控制相关的项目研究，在 IEEE Transaction on Industrial Electronics、中国电机工程学报、电机与控制学报等国内外高水平学术期刊上发表了 13 篇预测控制相关的学术论文，并于 2018 年 6 月，被评选为 IEEE Senior Member。申请人已经掌握了本课题的研究背景和动态前沿，具有良好的理论研究基础。诸如，当电机驱动系统运行于低开关频率工况时，会造成系统延迟，进而导致其电流环出现较为严重的交叉耦合。故使用空间复矢量方法对感应电机驱动系统进行分析并构建传递函数，且提出一种新的电流控制架构，可以有效消除交叉耦合，提高低开关频率工况下感应电机的动态特性，其相关成果于 2020 年发表在 IEEE Transactions on Industrial Electronics。预测控制



在采取简单的事件触发机制时,电流轨迹超出边界后才会触发算法选择新的电压矢量;但由于不可避免的系统软硬件延迟,当新矢量作用于电机时,电流轨迹已经大幅超出边界。为此,提出一种电压矢量时间辅助切换机制,减小电流超出边界圆的几率,有效抑制电流畸变,其相关成果于 2019 年发表在《中国电机工程学报》。

近年来申请人及其课题组成员在国内外重要期刊上发表多篇相关学术论文,其中部分文章如下:

- [1] 齐昕, 苏涛, 周珂, 杨建成, 甘新鹏, 张永昌. 交流电机模型预测控制策略发展概述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18):11. (EI)
- [2] L. Wu, **Qi Xin**, X. Shi, T. Su, Y. Deng and D. Xu, Sensorless Predictive Control Methods for Induction Motor-An Overview[C]// 2021 IEEE International Conference on **Predictive Control** of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE). IEEE, 2021.
- [3] **Qi Xin**, D. Xu, L. Wu, K. Zhou and **X. Zhou**, Predictive Control of Permanent Magnet Synchronous Motor based on the Circular Current Error Boundary[C]// 2021 IEEE International Conference on **Predictive Control** of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE) . IEEE, 2021.
- [4] Lin WU, **Qi Xin**, X Shi, T Su, Y Tao. A neutral point potential drift control method for NPC three-level inverter[J]. **HIGH TECHNOLOGY LETTERS**, 2021, 27(3):6.
- [5] **Qi Xin**, **Joachim Holtz**. Modeling and Control of Low Switching Frequency High-Performance Induction Motor Drives[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2020, 67 (6): 4402-4410. (SCI)
- [6] **Qi Xin**, **Joachim Holtz**. The Relationship Between Root Locus and Transient Field Components of AC Machines[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2020, 67 (3): 1836-1843. (SCI)
- [7] 齐昕, 吴文昊, 吴琳, 周珂, 马祥华, 周晓敏. 基于时间辅助信息的感应电机预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (16): 4927-4934+4995. (EI)
- [8] **Qi Xin**, Ralph Kennel, **Zhou Xiaomin**, Zhou Ke, **Feng Tao**, Influence of leakage inductance on operation performances for predictive control low-switching frequency application[C]// 2019 IEEE International Symposium on **Predictive Control** of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE). IEEE, 2019.
- [9] 齐昕, 付永星, 周晓敏, 周珂, 马祥华. 基于双边界圆限定策略的感应电机预测控制研究, 中国电机工程学报, 37(1), 282~291, 2017. (EI)
- [10] **Qi Xin**, Wu Lin. **Zhou Xiaomin**, Ma Xianghua. Field oriented predictive control strategy for induction machine drives[J]. **ASSEMBLY AUTOMATION**, 2017, 37(1):103~113. (SCIE)
- [11] Lin WU, **QI Xin**. Yongxing FU, Wenhao WU. Research on Improved Predictive Control Algorithm for Induction Motor[J]. **Technical Bulletin**, 2017, 55(17):128~137. (EI)
- [12] 齐昕, 周珂, 王长松, 周晓敏, 潘治赞, 马祥华. 中高功率交流电机逆变器的低开关频率控制策略综述, 中国电机工程学报, 35(24), 6445~6458, 2015. (EI)



- [13]Joachim Holtz, QI Xin. Optimal Control of Medium Voltage Drives – an Overview[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2013, 60(12):5472-5481. (SCI)
- [14]周晓敏, 孙文, 高大威, 林树林, 胡忠阳.应用于无线电能传输系统的三相单开关功率因数校正方法.电力系统自动化.2019.43 (2) .137-14. (EI)
- [15]Joachim Holtz. Predictive Finite-State Control—When to Use and When Not [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**,2022, 37 (4): 4225-4232. (SCI)
- [16]Joachim Holtz. Event Driven Control of Voltage and Current Gradients of Medium Voltage IGBTs[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2020, 67(8):6323-6330. (SCI)
- [17]Joachim Holtz. Advanced PWM and Predictive Control—An Overview[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2016, 63(6):3837-3844. (SCI)

(2) 针对本课题的前期准备工作

课题组针对本课题做了一些探索性的准备工作。

1) 电机运行过程中边界圆半径变化实验测试

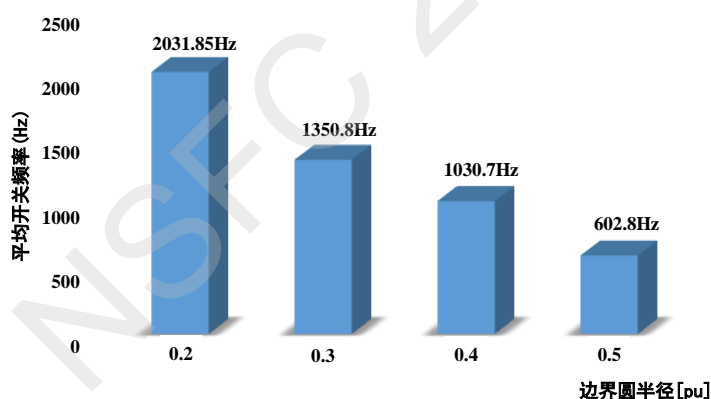


图 23 边界圆半径处于不同大小的开关频率

可行性分析部分的图 21 展示了实验中边界圆半径处于不同数值时电流轨迹的变化情况,表明在边界圆半径变化的过程中预测控制方法始终有效,证明了课题的研究工作是合理可行的。

实验中开关频率的具体变化情况如图 23 所示:当边界圆半径为 0.2[pu]时,开关频率为 2031.85Hz;而当边界圆半径增加到 0.5[pu]时,开关频率下降至 602.8Hz。说明可以通过改变边界圆半径来调节开关频率,这些实验数据也为本课题的进一步开展提供了研究基础。



2) 基于并行计算方法的快速预测控制算法初步测试

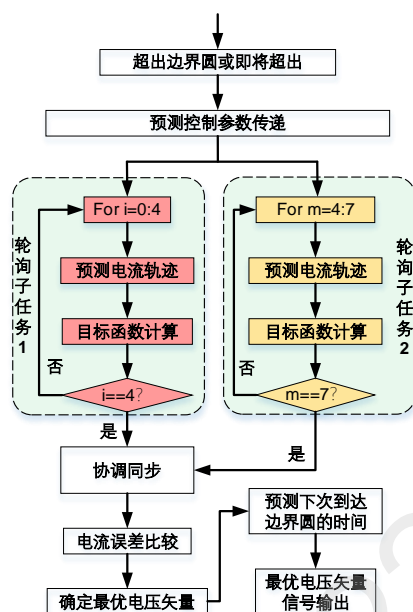


图 24 预测控制核心算法并行执行流程框图

课题组对两电平的感应电机预测控制方法进行了改进，完成了预测控制并行算法的优化设计，并进行了算法的初步运行测试。优化的并行算法流程如图 24 所示，预测控制中的矢量轮询任务被拆分为两个子任务，合理分配进行计算，并通过算法实现二者的协调同步。最终，对计算结果进行比较，获得下一个周期的最优矢量。

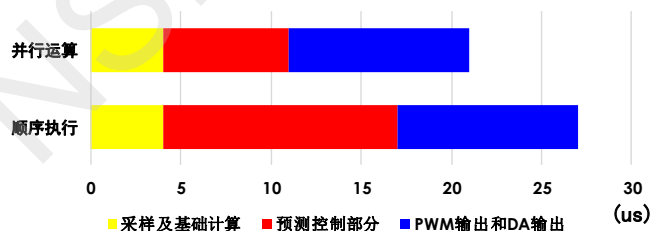


图 25 并行运算与顺序执行的算法耗时比较

初步测试的结果如图 25 所示，经过并行运算优化的预测控制算法核心部分耗时 7us，而顺序执行耗时 13us，相比而言，算法整体的执行速率提高了 22%。该前期工作为本课题通过多任务并行计算方法提升系统执行速率的技术方案打下了良好的科研基础。

2. 工作条件（包括已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决的途径，包括利用国家实验室、国家重点实验室和部门重点实验室等研究基地的计划与落实情况）；

申请者所在的北京科技大学机械工程学院建有国家板带生产先进装备工程

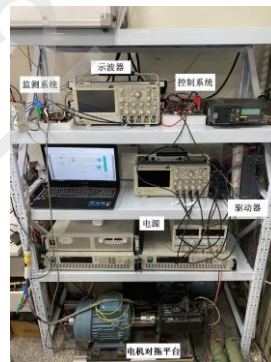


技术研究中心等 4 个国家级和省部级工程中心、重点实验室，新成立了北京科技大学“智能机器人创新研究院”，参与组建了“人工智能研究院”。多年来，申请者依托院校平台，在感应电机低开关频率预测控制领域承担了包括“国家自然科学基金”以及“科学技术部国家外国专家局项目”在内的多项科研课题，在国内外高水平学术期刊上，发表了多篇与预测控制相关的学术论文，在感应电机低开关频率预测控制领域具有一定的影响。

课题组从 2006 年开始一直从事交流电机控制与驱动方面的研究工作，经过多年积累，具备课题研究所需的设备仪器：课题组所在实验室已有数字/物理混合实时模拟实验平台（如图 26a）；针对本课题的中压实验搭建了 380V 等效中压感应电机对拖实验平台（如图 26b），可以保证等效实验的实施；可以进行 125kW 的中压感应电机对拖实验（如图 26c）。



a) 数字/物理混合实时模拟实验平台



b) 380V 等效中压感应电机对拖实验平台



c) 中压感应电机对拖实验平台

图 26 实验平台

实验室还拥有多台泰克四通道示波器 DPO2014、隔离示波器 TPS2024、混合示波器 MSO3014、泰克 AFG3022C 双通道信号发生器、品致 6.5kV 高压探头 DP100、泰克 A622 交直流电流探头、泰克 TCPA300 电流测量系统、奇石乐（Kistler）高精度扭矩传感器、安捷伦 LCR 测试仪、横河功率分析仪测试系统、多台 600V-5.1kW 安捷伦直流电源 N8762A 等设备。这些仪器设备为本项目研究与实验提供了良好基础设备与软硬件条件。



图 27 课题组与 TI 公司共建的 C2000 联合实验室

课题组与 TI 公司有密切合作，课题组的实验室也是受到 TI 大学计划支持共建的 C2000 联合实验室（如图 27）。课题组拥有多款基于 C2000 系列实时处理器控制板卡及开发套件，包括 TI 新一代多核 DSP 控制卡 F28379D controlCARD、F28379S LaunchPad 以及 TMDSEMU560V2STM-UE 高速实时仿真器。课题组不仅可以得到 TI 的部分硬件支持，更重要的是可以直接获得 TI 专业工程师的对口技术支持，能有力的保证课题研究顺利完成。

以上实验条件将为本项目的研究工作提供良好的科研基础，且课题组的工程师都有较为丰富的电子硬件研发经验，可以熟练完成硬件电路的焊接、调试以及维修。综上，本项目组不仅具备充实先进的电机理论基础、研究成果，还兼具完善的电机控制实验平台，能为本课题的顺利完成提供有力保证。

3. 正在承担的与本项目相关的科研项目情况（申请人和项目组主要参与者正在承担的与本项目相关的科研项目情况，包括国家自然科学基金的项目和国家其他科技计划项目，要注明项目的名称和编号、经费来源、起止年月、与本项目的关系及负责的内容等）；

无

4. 完成国家自然科学基金项目情况（对申请人负责的前一个已结题科学基金项目（项目名称及批准号）完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系加以详细说明。另附该已结题项目研究工作总结摘要（限 500 字）和相关成果的详细目录）。

前一个已结题科学基金项目为青年基金，项目名称：《低开关频率三电平感应电机驱动系统最优预测控制研究》；批准号：51407007。该项目按照原计划顺利完成，于 2017 年 12 月底结题。课题对提出的感应电机最优预测理论进行了深入研究，设计了具有高抗干扰性能的感应电机定子电流精确预测模型，完成了带有直接系统约束的三电平逆变器感应电机预测控制算法，对电流谐波边界圆限定



方法降低逆变器开关频率的工作机理进行了深入分析,同时完成了电流预测精确模型与最优预测控制算法的融合以及算法测试。项目发表期刊论文 3 篇,其中 SCI 一篇, EI 两篇。培养硕士研究生 5 人,博士研究生 1 人在读,举办学术研讨会两次。青年基金已经实现了任务书中的既定目标、完成了结题工作。

本申请课题将采用基于边界限定形式的预测控制,规避权重调节问题。**青年基金的研究为本课题提供了方法基础,本课题是对青年基金的延续和升华。青年基金专注于降低开关频率,没有考虑开关频率大幅变化的问题。**此外,青年基金主要围绕三电平逆变器展开:针对三电平逆变器的拓扑结构和工作特点,设计边界圆限定预测控制算法,研发三电平开关状态切换保护策略,并实现二者的融合。然而,本课题关注点在于稳定开关频率,实时调节边界圆半径,抑制开关频率大幅度波动。本课题基于收扩圆限定边界调节策略展开:针对边界圆固定条件下,开关频率大幅度波动的问题,将提出具有开关频率自稳定功能的收扩圆限定边界调节策略;为解决边界圆变化所带来的触发紊乱问题,将对收扩圆调节策略与电压矢量切换触发机制的融合方法进行探索。本课题是对中压电机低开关频率运行环境下控制体系广度的拓展和深度的挖掘。

附 1: 已结题项目研究工作总结摘要

已结题的青年基金从感应电机驱动系统的物理本质出发,基于电机的连续特性和逆变器的离散特性,探索具有高动态性能的中高功率感应电机系统预测控制方法,在建立具有高抗干扰性能的感应电机定子电流精确预测模型模型的基础上,提出了带有直接系统约束的三电平逆变器感应电机预测控制算法。并分析了电流谐波边界圆限定方法降低逆变器开关频率的工作机理,完成了电流预测精确模型与最优预测控制算法的融合以及算法测试。

研发了三电平交流电机控制驱动柔性实验平台,方便测试不同性能微处理器的控制效果。发表期刊论文 3 篇,其中 SCI 一篇, EI 两篇。培养硕士研究生 5 人,博士研究生 1 人在读。积极开展国内外学术交流活动,2016 年、2017 年两次邀请 Holtz 教授(IEEE life Fellow)来校指导,每年 25 天,解决了许多关键问题。2016 年举办“大功率驱动系统的新技术”学术研讨会,由 Holtz 教授、清华李永东教授、中科院温旭辉教授分别作了专题报告。2017 年,举办“永磁同步电机的无传感器驱动技术”学术研讨会,由 Holtz 教授作为主讲人。

课题研究不但为中高功率感应电机驱动系统降低开关频率的问题提供了一些具有工程实用价值的新方法,而且促进了本研究领域同行之间的学术交流以及行业的发展。



附 2: 相关成果目录

■ 期刊论文

- [1] 齐昕; 付永星; 周晓敏; 周珂; 马祥华, 基于双边界圆限定策略的感应电机预测控制研究, 中国电机工程学报, 2017.1.5, 37(1): 282~291, EI
- [2] **Qi, Xin** ; Wu, Lin; **Zhou, Xiaomin**; Ma, Xianghua, Field oriented predictive control strategy for induction machine drives, ASSEMBLY AUTOMATION, 2017, 37(1): 103~113, SCIE, EI
- [3] Lin WU; **Xin Qi**; Yongxing FU; Wenhao WU, Research on Improved Predictive Control Algorithm for Induction Motor, Technical Bulletin, 2017, 55(17): 128~137, EI

■ 依托青年基金项目的拓展和延续研究成果

- [1] 齐昕, 苏涛, 周珂, 杨建成, 甘新鹏, 张永昌. 交流电机模型预测控制策略发展概述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18):11. (EI)
- [2] L. Wu, **Qi Xin**, X. Shi, T. Su, Y. Deng and D. Xu, Sensorless Predictive Control Methods for Induction Motor-An Overview[C]// 2021 IEEE International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE). IEEE, 2021.
- [3] **Qi Xin**, D. Xu, L. Wu, K. Zhou and **X. Zhou**, Predictive Control of Permanent Magnet Synchronous Motor based on the Circular Current Error Boundary[C]// 2021 IEEE International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE) . IEEE, 2021.
- [4] Lin WU, **Qi Xin**, X Shi, T Su, Y Tao. A neutral point potential drift control method for NPC three-level inverter[J]. HIGH TECHNOLOGY LETTERS, 2021, 27(3):6.
- [5] **Qi Xin**, Joachim Holtz. Modeling and Control of Low Switching Frequency High-Performance Induction Motor Drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67 (6): 4402-4410. (SCI)
- [6] **Qi Xin**, Joachim Holtz. The Relationship Between Root Locus and Transient Field Components of AC Machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67 (3): 1836-1843. (SCI)
- [7] 齐昕, 吴文昊, 吴琳, 周珂, 马祥华, 周晓敏. 基于时间辅助信息的感应电机预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (16): 4927-4934+4995. (EI)
- [8] **Qi Xin**, Ralph Kennel, **Zhou Xiaomin**, Zhou Ke, **Feng Tao**, Influence of leakage inductance on operation performances for predictive control low-switching frequency application[C]// 2019 IEEE International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE). IEEE, 2019.

■ 人才培养

出站博士后/毕业博士/毕业硕士/在站博士后/在读博士/在读硕士

- (1) 王冲, 毕业硕士, 感应电机最优预测控制技术的研究
- (2) 潘治赞, 毕业硕士, 基于感应电机低开关频率下的最优预测控制



- (3) 李丹, 毕业硕士, 基于 FPGA 的嵌入式冷轧带钢板形检测仪的研究
- (4) 付永星, 毕业硕士, 感应电机低开关频率下的双预测控制研究
- (5) 吴琳, 毕业博士, 融合中点电位动态补偿的三电平异步电机并行预测控制方法研究

■ 学术交流

- (1) 2016.3.29-2016.3.29, 举办“大功率驱动系统的新技术”学术研讨会, 北京科技大学天工大厦, 北京科技大学, 负责人: 齐昕
- (2) 2017.3.31-2017.3.31, 举办“永磁同步电机的无传感器驱动技术”学术研讨会, 北京科技大学图书馆报告厅, 北京科技大学, 负责人: 齐昕

(三) 其他需要说明的问题

1. 申请人同年申请不同类型的国家自然科学基金项目情况 (列明同年申请的其他项目的项目类型、项目名称信息, 并说明与本项目之间的区别与联系)。

无

2. 具有高级专业技术职务 (职称) 的申请人或者主要参与者是否存在同年申请或者参与申请国家自然科学基金项目的单位不一致的情况; 如存在上述情况, 列明所涉及人员的姓名, 申请或参与申请的其他项目的项目类型、项目名称、单位名称、上述人员在该项目中是申请人还是参与者, 并说明单位不一致原因。

无

3. 具有高级专业技术职务 (职称) 的申请人或者主要参与者是否存在与正在承担的国家自然科学基金项目的单位不一致的情况; 如存在上述情况, 列明所涉及人员的姓名, 正在承担项目的批准号、项目类型、项目名称、单位名称、起止年月, 并说明单位不一致原因。

无

4. 其他。

Joachim Holtz 教授作申请人所在课题组的学术顾问, 已同意参与本课题的研究工作, 每年定期来校指导, 亲临实验室同课题组共同开展科研工作。除此之外, 每个月还将定期进行线上交流, 一并指导研究生科研工作。同时, 课题组也计划利用暑期前往德国进行短期学术访问。综合计算 Holtz 教授的参与时间为每年 2 个月左右, 故没有将其列在项目组成员中。



齐昕 简历

北京科技大学，机械工程学院，副教授

教育经历：

- (1) 2004-09 至 2011-01, 北京科技大学, 机械电子工程, 博士
- (2) 2009-10 至 2010-10, 德国Bergische Universität Wuppertal, 电机驱动控制, 其他
- (3) 2000-09 至 2004-07, 北京科技大学, 机械电子工程, 学士

博士后工作经历：

- (1) 2011-06 至 2013-06, 北京科技大学

科研与学术工作经历（博士后工作经历除外）：

- (1) 2017-08 至 今, 北京科技大学, 机械工程学院机械电子工程系, 副教授
- (2) 2018-08 至 2019-02, 德国Bergische Universität Wuppertal, 电机驱动控制研究所, 无
- (3) 2011-06 至 2017-07, 北京科技大学, 机械工程学院机械电子工程系, 讲师

曾使用其他证件信息：

无

近五年主持或参加的国家自然科学基金项目/课题：

无

近五年主持或参加的其他科研项目/课题（国家自然科学基金项目除外）：

- (1) 科学技术部国家外国专家局, 高端外国专家引进计划, G20190001347, 中压感应电机的先进驱动技术研究, 2019-08 至 2021-08, 35万元, 结题, 主持

代表性研究成果和学术奖励情况：

一、代表性论著：

- (1) 齐昕; 苏涛; 周珂; 杨建成; 甘新鹏; 张永昌 ; 交流电机模型预测控制策略发展概述, *中国电机工程学报*, 2021, 41(18): 6408-6418 (期刊论文)
- (2) Qi, Xin; Joachim Holtz ; Modeling and Control of Low Switching Frequency High-Performance Induction Motor Drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(6): 4402-4410 (期刊论文)
- (3) Qi, Xin; Joachim Holtz ; The Relationship Between Root Locus and Transient Field Components of AC Machines, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020. 春季, 37(3): 1836-1843 (期刊论文)
- (4) 齐昕; 吴文昊; 吴琳; 周珂; 马祥华; 周晓敏 ; 基于时间辅助信息的感应电机预测电流控制, *中国电机工程学报*, 2019, 39(16): 4927-4934 (期刊论文)
- (5) 齐昕; 付永星; 周晓敏; 周珂; 马祥华 ; 基于双边界圆限定策略的感应电机预测控制研究, *中国电机工程学报*, 2017, 37(1): 282-291 (期刊论文)

二、论著之外的代表性研究成果和学术奖励：



(1) 齐昕(1/1); 评选为IEEE Senior Member, IEEE, 其他, 国际学术奖, 2018(齐昕) (科研奖励)

(2) 齐昕 ; Predictive Control——An Emerging Technology for Motor Drives, The 2020 4th International Conference on Mechanical Engineering and Applied Composite Materials, MEACM2020, 线上会议, 2020-10-25至2020-10-25 (会议报告)

NSFC 2022



周晓敏 简历

北京大学，机械工程学院，副教授

教育经历：

- (1) 2004-09 至 2008-06，北京大学，机械电子工程，博士
- (2) 1996-09 至 1999-04，北京大学，机械电子工程，硕士
- (3) 1992-09 至 1996-07，北京大学，矿山机械，学士

博士后工作经历：

无

科研与学术工作经历（博士后工作经历除外）：

- (1) 2007-07 至 今，北京大学，机械工程学院，副教授
- (2) 2012-04 至 2013-03，威斯康星大学麦迪逊分校（University of Wisconsin-Madison），电机与电力电子中心（WEMPEC），无
- (3) 2001-07 至 2007-06，北京大学，机械工程学院，讲师
- (4) 1999-07 至 2001-06，北京大学，机械工程学院，助教

曾使用其他证件信息：

无

近五年主持或参加的国家自然科学基金项目/课题：

- (1) 国家自然科学基金委员会，联合基金项目，U1760106，金属板高速覆膜机理与关键控制技术，2018-01-01 至 2020-12-31，50万元，结题，参与

近五年主持或参加的其他科研项目/课题（国家自然科学基金项目除外）：

无

代表性研究成果和学术奖励情况：

一、代表性论著：

- (1) 周晓敏；孙文；高大威；林树林；胡忠阳；应用于无线电能传输系统的三相单开关功率因数校正方法，*电力系统自动化*，2019，(02)：137-146 （期刊论文）
- (2) 齐昕；吴文昊；吴琳；周珂；马祥华；周晓敏；基于时间辅助信息的感应电机预测电流控制，*中国电机工程学报*，2019，(16)：4927-4934+4995 （期刊论文）
- (3) 齐昕；付永星；周晓敏；周珂；马祥华；基于双边界圆限定策略的感应电机预测控制研究，*中国电机工程学报*，2017，(01)：282-292 （期刊论文）
- (4) Qi Xin; Wu Lin; Zhou Xiaomin; Ma Xianghua; Field oriented predictive control strategy for induction machine drives, *Assembly Automation*, 2017, 37(1): 103-113 （期刊论文）
- (5) 齐昕；周晓敏；马祥华；王长松；肖新航；感应电机预测控制改进算法，*电机与控制学报*，2013，17(3)：62-69 （期刊论文）

二、论著之外的代表性研究成果和学术奖励：



无

NSFC 2022



冯涛 简历

北京大学， 自然科学基础实验中心， 高级工程师

教育经历：

- (1) 2004-09 至 2007-04， 北京大学， 系统工程， 硕士
- (2) 2000-09 至 2004-06， 北京大学， 测控技术与仪器， 学士

博士后工作经历：

无

科研与学术工作经历（博士后工作经历除外）：

- (1) 2007-05 至 今， 北京大学， 自然科学基础实验中心， 高级工程师

曾使用其他证件信息：

无

近五年主持或参加的国家自然科学基金项目/课题：

- (1) 国家自然科学基金委员会， 青年科学基金项目， 61803024， 噪声引导观点动力学趋同的理论分析及应用， 2019-01-01 至 2021-12-31， 21万元， 在研， 参与

近五年主持或参加的其他科研项目/课题（国家自然科学基金项目除外）：

无

代表性研究成果和学术奖励情况：

一、代表性论著：

无

二、论著之外的代表性研究成果和学术奖励：

无



附件信息

序号	附件名称	备注	附件类型
1	交流电机模型预测控制策略发展概述	EI期刊——中国电机工程学报	代表性论著
2	Modeling and Control of Low Switching Frequency	SCI期刊——IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS	代表性论著
3	The Relationship Between Root Locus and Transient	SCI期刊——IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS	代表性论著
4	基于时间辅助信息的感应电机预测电流控制	EI期刊——中国电机工程学报	代表性论著
5	基于双边界圆限定策略的感应电机预测控制研究	EI期刊——中国电机工程学报	代表性论著

NSFC 2022



项目名称： 具有稳定开关频率的收扩圆限定边界中压感应电机预测控制方法
资助类型： 面上项目
申请代码： E0703. 电机及其系统

国家自然科学基金项目申请人和参与者承诺书

为了维护国家自然科学基金项目评审公平、公正，共同营造风清气正的科研生态，本人**在此郑重承诺**：严格遵守《中华人民共和国科学技术进步法》《国家自然科学基金条例》《关于进一步加强科研诚信建设的若干意见》《关于进一步弘扬科学家精神加强作风和学风建设的意见》以及科技部、自然科学基金委关于科研诚信建设有关规定和要求；申请材料信息真实准确，不含任何涉密信息或敏感信息，不含任何违反法律法规或违反科研伦理规范的内容；在国家自然科学基金项目申请、评审和执行全过程中，恪守职业规范和科学道德，遵守评审规则和工作纪律，杜绝以下行为：

- （一）抄袭、剽窃他人申请书、论文等科研成果或者伪造、篡改研究数据、研究结论；
- （二）购买、代写申请书；购买、代写、代投论文，虚构同行评议专家及评议意见；购买实验数据；
- （三）违反成果发表规范、署名规范、引用规范，擅自标注或虚假标注获得科技计划等资助；
- （四）在项目申请书中以高指标通过评审，在项目计划书中故意篡改降低相应指标；
- （五）以任何形式探听或散布尚未公布的评审专家名单及其他评审过程中的保密信息；
- （六）本人或委托他人通过各种方式和途径联系有关专家进行请托、游说，违规到评审会议驻地窥探、游说、询问等干扰评审或可能影响评审公正性的行为；
- （七）向工作人员、评审专家等提供任何形式的礼品、礼金、有价证券、支付凭证、商业预付卡、电子红包，或提供宴请、旅游、娱乐健身等任何可能影响评审公正性的活动；
- （八）违反财经纪律和相关管理规定的行为；
- （九）其他弄虚作假行为。

如违背上述承诺，本人愿接受国家自然科学基金委员会和相关部门做出的各项处理决定，包括但不限于撤销科学基金资助项目，追回项目资助经费，向社会通报违规情况，取消一定期限国家自然科学基金项目申请资格，记入科研诚信严重失信行为数据库以及接受相应的党纪政务处分等。

申请人签字：

编号	参与者姓名 / 工作单位名称（应与加盖公章一致） / 证件号码	签字
1	周晓敏 / 北京科技大学 / 2*****8	
2	冯涛 / 北京科技大学 / 4*****9	
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		



项目名称： 具有稳定开关频率的收扩圆限定边界中压感应电机预测控制方法
资助类型： 面上项目
申请代码： E0703. 电机及其系统

国家自然科学基金项目申请单位承诺书

为了维护国家自然科学基金项目评审公平、公正，共同营造风清气正的科研生态，**本单位郑重承诺**：申请材料中不存在违背《中华人民共和国科学技术进步法》《国家自然科学基金条例》《关于进一步加强科研诚信建设的若干意见》《关于进一步弘扬科学家精神加强作风和学风建设的意见》以及科技部、自然科学基金委关于科研诚信建设有关规定和要求的的情况；申请材料符合《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等有关法律法规和规章制度要求，不含任何涉密信息或敏感信息；申请材料不含任何违反法律法规或违反科研伦理规范的内容；申请人符合相应项目的申请资格；在项目申请和评审活动全过程中，遵守有关评审规则和工作纪律，杜绝以下行为：

（一）以任何形式探听或公布未公开的项目评审信息、评审专家信息及其他评审过程中的保密信息，干扰评审专家的评审工作；

（二）组织或协助申请人/参与者向工作人员、评审专家等给予任何形式的礼品、礼金、有价证券、支付凭证、商业预付卡、电子红包等；宴请工作人员、评审专家，或组织任何可能影响科学基金评审公正性的活动；

（三）支持、放任或对申请人/参与者抄袭、剽窃、重复申报、提供虚假信息（含身份和学术信息）等不当手段申报国家自然科学基金项目疏于管理；

（四）支持或协助申请人/参与者采取“打招呼”“围会”等方式影响科学基金项目评审；

（五）其他违反财经纪律和相关管理规定的行为。

如违背上述承诺，本单位愿接受自然科学基金委和相关部门做出的各项处理决定，包括但不限于停拨或核减经费、追回项目已拨经费、取消本单位一定期限国家自然科学基金项目申请资格、记入科研诚信严重失信行为数据库以及主要责任人接受相应党纪政务处分等。

依托单位公章：

日期： 年 月 日

合作研究单位公章：

日期： 年 月 日

合作研究单位公章：

日期： 年 月 日