

口”，汇聚网络流量、系统日志等多源数据，通过实时抓包、日志同步保障数据全面性；数据预处理层负责数据清洗、特征提取与格式标准化，为后续分析提供适配数据；机器学习分析层作为“核心”，依托入侵检测、恶意代码检测等模块，通过模型调度机制动态调用适配模型；决策响应层根据威胁等级生成流量阻断、策略调整等防护动作，优化响应逻辑；系统管理层则承担模型迭代、参数配置与日志审计，为系统运行提供支撑<sup>[4]</sup>。

### 3.3 关键技术实现要点

系统的有效运行依赖三大关键技术实现要点，解决架构落地过程中的核心技术难题。多源异构数据的融合处理需突破数据格式差异与特征孤立的问题：数据格式统一通过制定标准化数据 schema，将结构化日志、半结构化日志、非结构化流量数据转换为统一格式，消除数据交互障碍；特征互补融合则挖掘不同数据源间的关联特征，如将终端行为数据中的“异常登录时间”与网络流量数据中的“异常 IP 访问”结合，形成更全面的攻击特征描述，提升模型对复杂攻击的识别能力。机器学习模型的动态更新机制是应对新型网络攻击的关键：基于新攻击数据的增量训练无需重新训练整个模型，仅利用新增攻击样本对已有模型进行微调，减少训练时间与算力消耗，同时避免模型“遗忘”历史攻击特征；模型性能监控通过实时跟踪检测准确率、误报率等指标，当指标低于预设阈值时触发模型迭代，确保模型始终保持较高防护能力。多模型融合策略则用于规避单一模型的局限性：不同机器学习模型在特定场景下各有优势，如支持向量机在小样本攻击检测中表现优异，随机森林在多特征攻击分类中精度更高，通过加权融合或投票融合，整合各模型优势，提升系统整体检测性能，尤其在面对“混合攻击”“变异攻击”时，能有效降低单一模型的漏报、误报风险。

## 4 基于机器学习的网络安全防护技术挑战与未来展望

### 4.1 当前技术面临的核心挑战

当前基于机器学习的网络安全防护技术面临多重核心挑战：数据质量是基础瓶颈，标签数据稀缺限制监督学习模型训练，数据不平衡易导致模型偏向多数类样本，噪声数据会干扰特征学习精度，而隐私保护要求又制约多源数据融合；对抗性攻击直接削弱模型有效性，对抗样本通过细微特征篡改欺骗模型，恶意代码的“对抗性变异”还会使静态检

测失效；模型可解释性不足让黑箱决策逻辑难以追溯，既无法精准定位误判原因，也不利于安全事件责任界定；实时性与资源开销存在矛盾，大规模网络流量下复杂模型推理延迟难以满足实时防护需求，高算力消耗也增加硬件成本；同时，5G/6G、物联网、边缘计算等新场景的特征差异显著，现有模型难以快速适配场景化防护需求<sup>[5]</sup>。

### 4.2 未来研究与发展展望

未来研究需从技术融合、关键突破与场景拓展三方面推进：技术融合上，将深度学习的特征提取能力与传统机器学习的可解释性结合，使用联邦学习在保护隐私的同时实现多主体协同防护，通过强化学习让系统自主优化防护策略；在关键技术突破中，引入可解释 AI(XAI) 打破黑箱决策过程，优化对抗攻击防御算法以增强模型鲁棒性，研发轻量级模型降低资源消耗适配边缘设备；在场景拓展层面，针对工业互联网的控制协议特性、车联网的实时传输需求设计专用防护方案，同时构建跨域协同防护的模型联动机制，实现威胁特征共享与策略协同，打破单域防护局限，应对跨域攻击扩散风险。

## 5 结语

综上所述，本文围绕基于机器学习的计算机网络安全防护技术展开全面研究，明确四大核心防护场景的应用价值（入侵防御实现主动防护、恶意代码检测抗“免杀”、流量分析精准识别异常、身份认证动态控权）；构建的分层防护系统通过多模块协同满足核心防护目标，关键技术保障系统实用性；同时指出数据质量、模型可解释性等挑战，提出未来研究方向。研究验证了机器学习对传统防护的补充价值，为后续技术深化与复杂网络防护提供路径参考。

## 参考文献

- [1] 李艳梅,陈汲清.智能时代计算机网络安全技术应用策略——评《计算机网络安全技术与应用研究》[J].安全与环境学报,2025,25(10):4114.
- [2] 邵晓宁.计算机网络安全与漏洞扫描技术的应用与研究[J].网络安全技术与应用,2025,(10):25-28.
- [3] 陈静.大数据时代的计算机网络安全技术及防范措施探讨[J].科技与创新,2025,(19):98-100+104.
- [4] 苏正香,曾晓莉.基于隐私保护的高职院校计算机网络信息安全研究[J].中国宽带,2025,21(11):58-60.
- [5] 孔维强.提高医院计算机网络安全管理工作有效性的方法探讨[J].中国宽带,2025,21(11):61-63.

# Research Progress on Coupled Multi-Physics Simulation of Magnetically Levitated Motors in Electromagnetic Design.

Yajun Wu<sup>1</sup> Zhendong Cao<sup>1</sup> Hongru Wang<sup>1</sup> Fengxin Zhang<sup>1</sup> Chunlong Zhao<sup>1</sup>

Inner Mongolia Huo Coal Hongjun Aluminum & Electricity Co. Ltd., Tongliao, Inner Mongolia, 029299, China

## Abstract

As a novel class of highly efficient and energy-saving power device, magnetic levitation motors entail intricate multi-physics coupling involving electromagnetic fields, thermal dynamics, and structural mechanics. This paper presents a systematic review of recent research advancements in this domain, focusing on multi-physics coupling modeling methodologies and representative application cases. It further examines the critical roles of numerical simulation techniques and neural network-based data-driven approaches in electromagnetic design optimization, and explores future development trends in high-end equipment manufacturing propelled by the deep integration of Artificial Intelligence(AI) and multi-scale modeling technologies.

## Keywords

Magnetic levitation motor; Multi-physics; Numerical Simulation; Data-driven; Electromagnetic design

# 电磁设计中磁悬浮电机耦合多物理场仿真的研究进展

吴亚军 曹振东 王鸿儒 张凤鑫 赵春龙

内蒙古霍煤鸿骏铝电有限责任公司, 中国 · 内蒙古 通辽 029299

## 摘要

磁悬浮电动机作为高效节能的新型动力装置, 其设计涉及电磁、热力学、结构力学等多物理场的复杂耦合。本文从多物理场耦合建模技术方法、典型应用案例等方面, 系统综述了该领域的研究进展, 探讨了数值模拟仿真分析、神经网络数据驱动在电磁设计中的关键作用, 分析了AI技术与多尺度建模深度融合驱动高端装备制造的发展方向。

## 关键词

磁悬浮电动机; 多物理场; 数值模拟; 数据驱动; 电磁设计

## 1 引言

磁悬浮电动机通过电磁力实现转子的无接触悬浮与驱动, 具有低摩擦、高效率、长寿命等优势, 广泛应用于高速动力设备、新能源发电及工业节能领域<sup>[1]</sup>。然而, 其电磁设计需同时考虑电磁场、温度场、应力场等多物理场的动态耦合效应, 传统单一物理场分析方法难以满足高精度设计要求<sup>[2]</sup>。解析法通过直接求解麦克斯韦方程组的方式针对性进行电磁场分析, 针对几何结构简单的模型求解时呈现了计算速度快、计算精度高的优点, 但是其面向复杂问题时一般依赖于模型的大幅度简化, 从而造成实际求解过程与真实情况偏差较大的情形, 造成了较低的求解精度<sup>[3]</sup>。多物理场耦合仿真技术通过数值建模与算法优化, 为复杂电磁系统的设计提供了高效工具。研究表明, 基于多物理场仿真的优化设计可使转子损耗降低 15% 以上, 显著提升电机综合性能<sup>[4,5]</sup>。

**【作者简介】**吴亚军 (1974-), 男, 中国吉林梨树人, 本科, 工程师, 从事新材料在电力系统上的应用研究。

尽管数值仿真技术已成为分析磁悬浮电动机多物理场问题的基石, 但其应用仍面临显著挑战。首先, 高保真的三维瞬态多物理场耦合仿真对计算资源的需求极其庞大, 尤其在优化设计中需要进行大量参数扫描时, 计算成本往往令人望而却步<sup>[6]</sup>。其次, 结构力学场 (应力、形变) 的引入进一步加剧了问题的复杂性。高速转子所受的巨大离心力与电磁径向力共同作用, 直接影响系统的刚度和稳定性; 定转子之间的电磁力波则可能引发振动噪声, 这些都需要通过流固耦合等高级仿真手段才能准确评估<sup>[7]</sup>。因此, 如何在高计算精度与可接受的计算成本之间取得平衡, 是多物理场耦合设计中的核心难题。

为应对上述挑战, 研究者们发展了一系列先进的建模与求解策略。多物理场解耦与降阶模型 (ROM) 技术的应用提供了解决一个这些挑战的思路<sup>[8]</sup>。通过敏感度分析, 识别出耦合过程中的主导物理场与关键参数, 从而在保证精度的前提下, 将强耦合问题简化为弱耦合或顺序耦合问题, 大幅提升计算效率<sup>[9]</sup>。例如, 可先通过参数化扫描建立电磁参数 (如气隙磁场、推力密度) 与关键性能指标的响应面模型,

再将该代理模型用于后续的热 - 应力耦合分析, 避免了每次迭代都进行全阶有限元计算<sup>[10]</sup>。

近年来, 随着人工智能 (AI) 技术的迅猛发展, 尤其是机器学习 (ML) 与深度学习 (DL), 为磁悬浮电动机的多物理场设计与优化开辟了革命性的新路径<sup>[11]</sup>。传统的从模拟到分析, 最后进行修改的设计范式正逐步向数据驱动的智能设计范式转变<sup>[12]</sup>。神经网络作为一种强大的非线性函数逼近器, 能够通过学习海量仿真或实验数据, 构建从电机设计参数 (如几何尺寸、材料属性、激励电流) 到多物理场性能 (如电磁力、温度分布、应力集中) 的映射模型<sup>[13]</sup>。一旦训练完成, 此类数据驱动模型可在短时间内完成性能预测, 效率远超传统数值仿真, 为实时优化提供了可能。

然而, AI 技术与多物理场耦合的深度融合仍处于初级阶段, 面临数据获取成本高、模型物理可解释性弱、以及融合模型泛化能力不足等挑战<sup>[14]</sup>。物理机理与数据驱动的融合是一种前景广阔的方式, 将控制方程 (如麦克斯韦方程组、热传导方程) 作为约束条件嵌入神经网络的损失函数中, 使得模型的预测结果不仅符合数据, 更严格遵循物理规律, 从而显著提升其在训练数据稀缺区域的预测可靠性。此外, 多尺度建模与 AI 技术结合, 从而实现从材料微观特性到系统宏观性能的跨尺度协同设计与预测, 是推动磁悬浮电动机等高端装备向著更高功率密度、更高可靠性及全生命周期智能化的方向演进的主流方法<sup>[15]</sup>。

本文旨在系统综述磁悬浮电动机多物理场耦合设计与优化领域的研究进展。首先深入探讨多物理场耦合仿真的关键技术; 其次, 结合典型应用案例, 剖析数值模拟仿真分析与神经网络数据驱动方法在解决实际工程问题中的关键作用; 最后, 展望多尺度建模与 AI 技术深度融合的未来趋势, 以期为该领域的进一步研究提供有益参考。

## 2 多物理场耦合仿真关键技术

磁悬浮电动机的多物理场仿真需解决电磁场 - 热场 - 结构场之间的强耦合问题, 此类耦合问题涉及能量在不同物理域之间的传递与转化, 例如电磁损耗引起温升, 温升影响材料属性, 进而引起结构形变与应力重分布。有限元法作为当前主流的数值模拟技术, 基于 ANSYS、COMSOL 等多物理场仿真平台, 能够构建电磁 - 热 - 结构耦合求解模型, 实现对麦克斯韦方程组与傅里叶热传导方程等的协同求解。该技术路线具有较高的数值精度与良好的模型适应性, 不仅适用于电磁特性与温度分布的求解, 还可扩展至应力场分析、转子动力学响应及振动噪声等多类物理问题的仿真研究, 为电机综合性能评估与优化设计提供了可靠的数值实验平台。

尽管如此, 有限元法等数值模拟方法在多物理场耦合分析中表现出计算效率与建模灵活性较低的特点。对于瞬态过程或参数优化研究, 需要进行大量迭代计算, 全阶有限元模型会带来难以承受的时间成本<sup>[16]</sup>。此外, 强非线性 (如

材料饱和、温度相关的材料属性) 及复杂几何形状的网格划分, 也对其求解稳定性与精度构成挑战。近年来, 基于多物理场数据进行数据驱动辅助建模逐渐成为热点, 其核心思想是, 利用有限元法等仿真生成的高保真数据或精确实测数据作为训练样本, 构建一个从输入设计参数到输出场分布或关键性能指标的代理模型。比如结合深度学习方法预测电磁损耗与热应力分布, 可以提升求解效率的有益效果<sup>[17]</sup>。对此, 引入神经网络数据驱动模型, 以实现 AI 赋能优化求解路径。

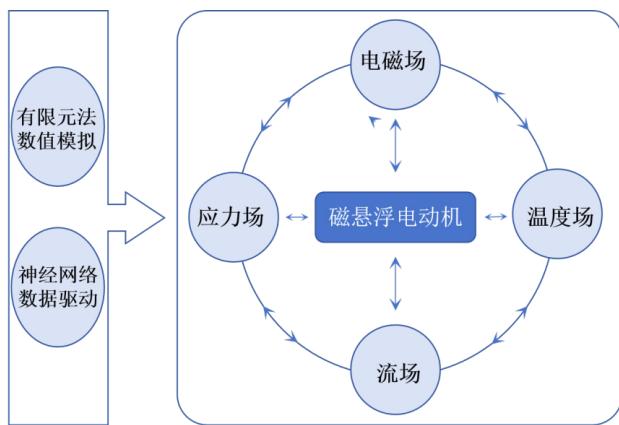


图 1 多场耦合建模技术路线

## 3 电磁设计优化中的典型应用

高速磁悬浮电动机的综合性能优化高度依赖于对电磁、热、力等多物理场的协同设计与精确控制。针对燃煤火力发电机组脱硫氧化风机应用场景, 研究者通过 ANSYS 与 COMSOL 数值计算工具建立电磁场、温度场、转子动力学及强度等耦合模型, 以转子损耗最小化为目标, 优化设计了一款高速磁悬浮鼓风机, 通过实验验证了仿真结果的可靠性。在上述优化设计过程中, 为突破传统的基于有限元的优化过程因其计算成本高昂而面临效率瓶颈, 使用了神经网络方法优化了流场预测、边界条件识别以及求解等数值模拟环节, 不仅提供了更精确的热仿真环境, 还深度参与了求解过程。



图 2 燃煤火力发电机组脱硫氧化风机应用