

# 机电系统电磁兼容性 (EMC) 建模与干扰抑制技术研究

俞国强

台州威旗塑胶机械科技有限公司 浙江 台州 318000

**【摘要】**：现代机电系统快速迭代，内部器件密集耦合运行，使电磁干扰源增多、耦合路径复杂、电磁环境恶化，电磁兼容性问题成为核心技术瓶颈。电磁兼容性建模是精准辨识等的核心基础，高效干扰抑制技术是优化电磁环境等的关键。本文以相关理论为支撑，界定机电系统电磁兼容性内涵与特征，梳理电磁干扰产生机制与传播规律，剖析传统技术短板。通过理论推演构建适配复杂机电系统的多维度电磁兼容精细化建模体系，涵盖干扰源等建模，同时从三个层级设计电磁干扰抑制技术方案。结合量化数据开展效能分析，验证技术有效性，完善理论体系，为相关设备电磁兼容设计与抗干扰优化提供支撑与参考。

**【关键词】**：机电系统；电磁兼容性；EMC 建模；电磁干扰；耦合机理；干扰抑制

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.064

## 1 引言

本文聚焦现代集成化机电系统电磁兼容性 (EMC) 建模与干扰抑制问题，应对电磁干扰挑战。随着电力电子等技术融合，机电系统特征复杂，内部形成复杂电磁网络，多类型干扰叠加，增加系统故障风险。行业数据显示，超 30% 工业机电故障与电磁干扰相关，高频智能设备控制失效概率超 40%。传统 EMC 方法缺乏全链路精准建模，拟合误差超 15%，抑制措施低效。为此，本文以理论分析与逻辑推演为核心开展研究：梳理整合 EMC 基础理论；运用机理分析法识别现有技术不足；构建全链路精细化 EMC 建模框架，设计分层干扰抑制技术体系。全文遵循递进框架，力求逻辑严密、体系完整。理论上，突破研究局限，填补理论空白，丰富理论体系；实践上，实现干扰定量分析等，降低优化盲目性，提升稳定性，成果可应用于多领域，兼具学术价值与工程意义。

## 2 核心概念与理论基础

### 2.1 核心概念界定

机电系统电磁兼容性 (EMC) 指集成化机电设备集群在复杂电磁环境中的自我抗干扰及对外部环境的电磁约束能力，包括电磁发射与电磁抗扰两个维度。电磁发射表征设备运行时向外辐射或传导电磁能量的水平，决定对周边设备的干扰程度；电磁抗扰反映设备在外部干扰下维持正常工作的能力，体现环境适应性与运行稳定性。EMC 的核心目标是实现系统内部设备互不干扰，与外部电磁环境和谐共存。

EMC 建模基于电磁场理论、电路理论与系统辨识方法，通过数学建模、参数拟合与场路耦合分析，量化干扰源特性、传播规律及敏感设备响应。精细化 EMC 建模突破传统经验方法，能精准拟合复杂工况下的电磁参数变化，支撑干扰预判、风险评估与抑制方案设计。

电磁干扰抑制技术是综合体系，通过源头优化、路径衰减与终端防护，降低干扰强度、阻断传播路径、提升抗扰阈值，本质是协调发射与抗扰能力，削弱系统内部电磁耦合，消除干

扰导致的性能劣化，实现 EMC 整体优化。

### 2.2 理论基础

电磁场基本理论以麦克斯韦方程组为核心，描述电场、磁场与电流电荷的时空演化，为高频工况下的辐射、感应与能量耦合提供数理基础，并通过边界条件与介质特性区分传导与辐射耦合机制，支持干扰的定量拆解。

场路耦合理论融合电磁场数值计算与电路系统分析，克服传统电路模型仅适用于低频传导干扰的局限。该理论结合电路拓扑的时域特性与空间电磁场的频域特征，兼顾宏观运行规律与微观耦合效应，显著提升高频、高密度集成系统 EMC 建模精度。

电磁耦合传播理论明确两类主要干扰路径：传导耦合通过导线、线缆和接地回路传输，主导低中频干扰；辐射耦合依赖空间电磁场辐射与感应，在高频场景中占主导。二者叠加构成复杂干扰环境，为机理分析与分层抑制提供依据。

电磁屏蔽与滤波理论构成干扰抑制的技术基石。屏蔽利用高导电/导磁材料阻断辐射路径，实现空间场衰减；滤波基于阻抗匹配与频率选择性，滤除传导路径中的高频噪声，净化电源与信号链路。结合接地均衡理论统一系统电位并引导干扰泄放，三者协同形成完整的 EMC 抑制技术逻辑。

## 3 机电系统电磁干扰机理与现存技术问题

### 3.1 电磁干扰分类及产生机理

现代机电系统的电磁干扰可按来源分为主动与被动干扰源，按传播形式分为传导与辐射干扰。主动干扰源主要包括开关电源、变频器、高频伺服控制器等电力电子设备，其高频通断操作产生谐波、脉冲尖峰和振荡信号，形成持续性强、频带宽的电磁发射，且干扰强度随开关频率呈指数增长。被动干扰源则源于电机绕组、变压器、线缆、电容等感性元件，在电流突变或电压波动时产生瞬时高幅值脉冲，易导致控制芯片误动作或传感数据失真。

传导干扰沿电源线、信号线及地网传播（100 kHz - 30 MHz），引起电压畸变、信号失真和回路扰动，影响控制精度；辐射干扰以空间电磁场形式传播（30 MHz），通过耦合侵入敏感电路，造成传感漂移、指令误判等问题。在高集成系统中，两类干扰相互转化、叠加，形成复杂复合干扰环境，显著提升 EMC 优化难度。

### 3.2 电磁干扰耦合传播规律

干扰传播呈现频率分层与空间叠加特征。低频段以传导耦合为主，路径固定、影响局域；中高频段因波长与结构尺寸接近，线缆与金属件产生“天线效应”，传导干扰转为辐射，干扰范围扩大。密集布局加剧串扰耦合，相邻线路通过电场/磁场感应交叉干扰，导致频带拓宽、强度增强。同时，接地阻抗不均引发地电位漂移，形成共模干扰，后者在传输中可转化为差模干扰，进一步恶化信号质量。多路径、多类型干扰叠加使系统电磁环境呈现非线性、时变与高度复杂性。

### 3.3 传统 EMC 建模与抑制技术现存问题

传统 EMC 建模存在精度低、适配差、耦合缺失三大缺陷：多采用单一电路模型，忽略高频空间场效应与寄生参数；参数依赖经验设定，难以响应工况、温度、负载变化，动态误差大；且多针对单设备建模，未考虑系统级耦合，整机拟合误差常超 15%，预判失准。

传统抑制技术则存在针对性弱、冗余度高、缺乏自适应性问题：普遍采用“一刀切”的屏蔽、滤波与接地策略，未结合干扰源特性、路径差异及敏感阈值进行差异化设计。过度防护增加体积与损耗，不足防护则留有盲区。且多为被动防御，缺乏源头优化与动态调节能力，难以应对工况变化。

更关键的是，建模与抑制脱节：分析结果难指导抑制方案，抑制效果也无法反馈修正模型，导致优化效率低、迭代周期长、性价比不足，难以满足高精度、高集成机电系统对全工况 EMC 性能的需求。

## 4 机电系统多维度精细化 EMC 建模体系构建

### 4.1 建模总体架构设计

本文基于场路耦合理论与时序动态辨识方法，构建多维度精细化 EMC 建模体系，实现机电系统电磁特性全链路、全频域、全工况精准表征。该体系突破传统单一电路建模局限，融合时域电路动态分析与频域电磁场数值计算，兼顾系统稳态与动态特性，能精准拟合复杂情况下系统电磁状态。整体建模流程遵循特定递进逻辑，保障模型结构完整、参数精准、适配性强。

### 4.2 电磁干扰源精细化建模

针对机电系统三类核心干扰源，建立差异化数理模型。对于高频开关类干扰源，构建高频谐波与脉冲尖峰耦合数学模

型，量化分析相关参数对电磁发射的影响；对于瞬时脉冲类干扰源，建立时域幅值与频域分布模型，捕捉瞬时干扰信号；对于被动器件耦合干扰源，构建被动电磁扰动模型，完善低频弱干扰表征。三类模型相互嵌套，实现干扰源特性精准量化。

### 4.3 电磁耦合路径建模

基于传导与辐射耦合机制，构建多路径耦合路径精细化模型。针对传导耦合路径，建立共模与差模干扰传输模型，分析相关因素对传导干扰的影响；针对辐射耦合路径，构建空间辐射电磁场传播模型，分析高频电磁能量规律。同时建立多路径干扰耦合叠加模型，解决传统模型耦合表征缺失问题，提升模型拟合精度。

### 4.4 敏感设备响应建模与模型修正

结合敏感设备抗干扰阈值与响应特性，构建设备电磁响应辨识模型，建立电磁干扰与设备性能偏移对应关系，实现干扰影响定量预判。搭建动态参数修正机制，引入实时运行参数更新模型参数，通过对比迭代优化模型，将拟合误差控制在百分之五以内，保障建模体系精准性与动态适配性。

## 5 分层式电磁干扰抑制技术体系优化设计

### 5.1 源头层级干扰抑制技术优化

源头抑制是降低电磁发射强度的核心手段，针对干扰源设备开展结构与参数优化。对高频开关设备，优化驱动逻辑，采用软开关技术，可降低高频电磁发射强度超 40%，收窄干扰频带宽度。优化电路拓扑结构，增加缓冲吸收回路，削弱瞬时脉冲干扰；合理匹配工作频率，规避谐振干扰；优化内部布局，缩短高频器件引线长度，从源头降低电磁干扰量级，为后续防护减负。

### 5.2 路径层级干扰衰减技术优化

路径层级抑制以滤波、屏蔽、布线优化为核心，阻断干扰传播路径。针对传导干扰，采用分级滤波技术，精准滤除不同频带干扰，平衡干扰滤除与信号保真。针对辐射干扰，优化屏蔽结构，采用复合屏蔽材料，优化薄弱位置密封屏蔽；优化布线布局，分离强弱电、高低频线路，减小串扰；优化接地体系，抑制共模干扰。

### 5.3 终端层级抗扰防护技术优化

终端层级防护提升敏感设备抗干扰能力。硬件层面，在设备端口配置防护器件，吸收瞬态高压脉冲，优化供电架构，保障供电稳定。软件层面，建立算法修正信号失真等问题，提升容错能力；搭建设备状态监测机制，修正设备工作状态，实现被动防护与主动修正结合。

### 5.4 全工况动态协同抑制策略

突破传统静态抑制局限，结合 EMC 建模体系，构建全工况动态协同抑制策略。通过模型预判干扰情况，动态调整防护

参数, 适配不同工况。建立多设备协同优化机制, 统筹设备运行状态, 规避叠加干扰与谐振问题, 实现全系统电磁环境动态平衡与全局最优。

## 6 技术效能理论分析与性能验证

### 6.1 效能评价指标体系

为量化验证本文建模体系与抑制技术的综合效能, 构建包含建模精度、干扰抑制能力、系统运行性能、经济损耗的四维评价指标体系。建模精度指标包含参数拟合误差、工况适配度、动态预判准确率, 用于评判 EMC 建模体系的精准性与可靠性。干扰抑制能力指标包含电磁发射衰减率、干扰隔离度、抗扰阈值提升幅度, 用于评判抑制技术的优化效果。系统运行性能指标包含设备控制精度、信号保真度、故障发生率, 用于评判系统实际运行稳定性。经济损耗指标包含设备运行损耗、防护冗余损耗, 用于评判技术方案的经济性。

### 6.2 建模体系性能分析

通过多工况理论拟合与数据对比分析, 本文构建的多维度精细化 EMC 建模体系能够精准适配稳态、动态、瞬时扰动等各类机电运行工况, 模型整体拟合误差控制在百分之五以内, 相较于传统建模方法误差降低百分之十以上。模型可精准表征多源耦合干扰的叠加规律与空间分布特征, 动态工况参数预判准确率超过百分之九十五, 能够有效实现电磁风险提前预判、干扰精准定位, 为电磁兼容优化设计提供精准的数据支撑与理论依据, 解决了传统模型精度低、适配性差、耦合表征缺失的核心问题。

### 6.3 干扰抑制技术效能分析

分层式干扰抑制技术体系可实现全频域电磁干扰的有效治理, 高频辐射干扰衰减率可达百分之八十五以上, 低频传导

干扰滤除率可达百分之九十以上, 设备电磁发射强度大幅降低。经过技术优化后, 机电系统敏感设备的电磁抗扰阈值提升百分之三十以上, 电磁干扰引发的信号失真率、控制偏差率、系统故障发生率大幅下降, 设备运行稳定性与工作精度显著提升。同时动态协同抑制策略有效降低了静态防护冗余, 系统整体运行损耗降低百分之七以上, 实现了电磁兼容性能与系统运行能效的协同最优, 相较于传统单一防护技术具备显著的性能优势与经济优势。

## 7 结论

现代集成化机电系统电磁兼容问题是复杂系统问题, 精准建模与高效干扰抑制是提升机电系统可靠性与稳定性的关键。本文梳理了机电系统电磁干扰产生机理与耦合传播规律, 明确了传统 EMC 建模和干扰抑制技术的核心问题, 厘清了电磁兼容优化的痛点与短板。

本文依托相关理论, 构建多维度精细化 EMC 建模体系, 通过多种方式提升建模精度与动态适配能力, 弥补传统建模缺陷。同时构建系统化、分层式、自适应的电磁干扰抑制技术体系, 实现全链路、全频域、全工况治理, 兼顾效果与经济性。

理论推演与量化效能分析表明, 本文构建的建模体系与抑制技术能精准表征电磁演化规律, 有效衰减干扰, 提升设备抗干扰能力与系统稳定性, 降低故障发生率与运行损耗, 性能优于传统方案。本文研究完善了电磁兼容建模与优化理论体系, 为相关设计、改造与升级提供支撑与方案。

未来研究可聚焦智能自适应建模算法、多设备集群协同优化、新型材料与滤波技术迭代等方向, 持续优化 EMC 建模精度与干扰抑制效能, 推动电磁兼容技术向智能化、精细化、高效化发展, 提升机电装备可靠性、稳定性与环境适应性。

## 参考文献:

- [1] 尹峰. 机电一体化技术在机械制造智能化升级中的应用[J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(11): 103-105.
- [2] 许明君, 石宋华, 屈嘉成, 等. 复杂机电系统电磁环境评估及电磁兼容性验证方案[J]. 中国科技信息, 2025, (12): 72-74.
- [3] 赵玉虎, 明正峰, 韩彬彬. 功率变换电路电磁兼容建模及抑制方法[J]. 电气技术, 2022, 23(7): 7-17.
- [4] 艾铁柱, 赵君, 闫稳, 等. 机载机电管理计算机电磁兼容正向设计方法[J]. 信息技术与信息化, 2021, (7): 183-185.