

# 面向野外作业的高可靠性电动绞盘系统抗干扰控制策略研究

胡金妙

浙江鸿宾工贸有限公司 浙江 金华 321000

**【摘要】**：野外作业场景下的电动绞盘系统面临复杂电磁环境、负载波动、温湿度及振动冲击等干扰，影响系统控制精度、稳定性与安全性，是制约其可靠性提升的核心瓶颈。本文基于机电控制理论，以高扭矩直流电机驱动的电动绞盘为对象，剖析主要干扰类型及机理，构建“干扰识别 - 源头抑制 - 控制补偿 - 容错保障”多层次抗干扰控制体系，提出抗干扰策略与路径。研究表明，精准定位干扰源、硬件抗干扰设计、优化自适应控制算法及完善容错机制是提升系统抗干扰能力与可靠性的关键。本研究为野外作业电动绞盘系统抗干扰设计与性能优化提供理论支撑，也为同类野外机电设备可靠性控制提供参考。

**【关键词】**：野外作业；电动绞盘；抗干扰控制；可靠性；自适应算法

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.019

## 1 引言

电动绞盘是野外作业核心牵引设备，广泛用于越野救援等场景，承担重物拖拽等任务。野外作业环境复杂多变，电动绞盘系统长期在极端工况下运行，面临远超室内作业的多重干扰挑战，如电磁辐射、负载突变等，导致系统控制精度下降，甚至引发安全事故，制约系统可靠性与作业效率。

当前，电动绞盘系统控制设计多基于理想工况，抗干扰能力设计针对性不足，现有抗干扰措施多集中于单一维度，缺乏系统性应对方案。随着野外作业要求提升，构建适配野外复杂场景的高可靠性抗干扰控制体系成为重要课题。

本文基于相关理论，结合野外干扰特性，系统分析电动绞盘系统干扰源、作用路径与影响机制，构建多层次抗干扰控制框架，提出针对性优化策略。通过理论推演明确抗干扰控制核心逻辑，为提升系统抗干扰能力与运行可靠性提供理论指导，助力其在复杂野外环境稳定高效作业。

## 2 野外作业电动绞盘系统的干扰源特性与作用机理

### 2.1 主要干扰源类型及特征

野外作业时，电动绞盘系统面临多种干扰源，按性质分电磁、机械、环境、供电四大类，各有场景化特征。电磁干扰源于野外通信、电力线路、雷电及周边工业设备辐射，通过传导与辐射耦合传播，频率范围宽、强度不稳定，影响系统控制电路等。机械干扰源于负载波动与振动冲击，负载波动破坏电机转速与扭矩平衡，振动冲击影响传动机构和信号采集精度。环境干扰体现为温湿度变化与粉尘侵蚀，影响电机、电子元件和机械部件性能。供电干扰多见于便携式系统，影响电机动力输出稳定性。各类干扰常叠加，形成复合效应，增加抗干扰控制复杂性。

### 2.2 干扰作用机理与传递路径

干扰经多路径影响电动绞盘系统，作用于动力、控制与执行模块，使性能退化。电磁干扰传导路径是通过供电和信号线缆影响控制器等，辐射路径是通过空间电磁波破坏传感器信

号。机械干扰通过力学耦合影响电机和控制模块，导致转速突变和控制故障，还形成恶性循环。环境干扰通过物理化学作用影响部件性能，高温降低电机效率，高湿度与粉尘增加故障概率。供电干扰通过能量传递影响系统，电压波动使电机参数偏离，电流纹波损坏部件，供电中断有安全风险。模块间耦合会放大干扰效应，形成复合循环。

### 2.3 干扰对系统性能的影响机制

多重干扰叠加损害电动绞盘系统性能，在控制精度上，电磁干扰使调速和扭矩控制误差增大，影响作业质量；机械干扰破坏电机稳态，加剧动力损耗。在运行稳定（原文此处似未写完）性能方面，干扰会使系统出现频繁启停冲击、传动机构异响等异常，加快电机与传动部件磨损，缩短系统寿命。环境干扰引发的参数漂移会改变系统控制特性，使原控制参数不匹配，加剧控制精度下降与运行不稳定问题。可靠性方面，干扰是系统故障的核心诱因，电磁干扰易引发控制电路烧毁、传感器失效，机械干扰可能造成钢丝绳断裂、传动齿轮损坏，供电干扰会导致系统停机，这些故障影响作业进度，还可能引发安全事故。不同类型干扰对系统性能影响有差异，电磁与供电干扰主要影响控制与动力模块电气性能，机械与环境干扰重点作用于机械结构与执行模块，各类干扰协同作用会提升系统故障概率，制约其在野外复杂场景的可靠应用。

## 3 面向野外作业的电动绞盘系统抗干扰控制框架构建

### 3.1 抗干扰控制核心目标与设计原则

面向野外作业的电动绞盘系统抗干扰控制，核心目标是经多层次防护与精准补偿，抑制各类干扰不利影响，确保复合干扰环境下稳定转速控制、精准扭矩调节与可靠安全运行，提升系统野外适应性与故障自愈能力。具体目标：抑制电磁、机械、环境与供电干扰，控制精度偏差在允许范围；保障负载波动与振动冲击下系统稳定，避免转速突变等；提升极端温湿度、粉尘环境下运行可靠性，降低故障率。

设计需遵循针对性、系统性、兼容性与经济性原则。针对性原则结合野外干扰特性设计专属抑制策略；系统性原则构建全链路抗干扰体系；兼容性原则要求与系统原有模块适配；经济性原则平衡抗干扰性能与成本。

### 3.2 多层级抗干扰控制框架架构

基于干扰作用机理与控制目标，构建“干扰识别 - 源头抑制 - 控制补偿 - 容错保障”四层抗干扰控制框架，各层级协同形成全链路防护体系。干扰识别层通过多传感器融合与信号分析，实时监测参数，精准识别干扰；源头抑制层通过硬件设计优化削弱干扰、阻断传递；控制补偿层优化控制算法补偿偏差，维持稳定；容错保障层实现故障诊断等，避免故障扩大。

框架设计遵循“预防为主、补偿为辅、容错兜底”逻辑，各层级信号交互协同联动，形成闭环体系。干扰识别层提供数据支撑；源头抑制层减少干扰直接影响；控制补偿层提升稳定性；容错保障层提供安全防线。

### 3.3 各层级核心功能与协同机制

干扰识别层精准感知与分类识别干扰，部署多类型传感器采集参数，采用算法区分正常与干扰信号，多传感器数据融合提升准确性与时效性，为抗干扰策略制定提供依据。

源头抑制层阻断干扰传递、削弱强度，针对不同干扰采用差异化措施，如电磁干扰屏蔽设计等，通过硬件优化降低干扰影响，减轻后续层级负荷。

控制补偿层通过动态控制算法调整，补偿干扰引发的控制偏差，维持系统控制性能稳定。基于干扰识别层监测数据实时调整控制参数，针对负载、电压波动等干扰用自适应补偿算法，针对电磁干扰致信号失真用鲁棒控制策略，确保电机转速与扭矩贴合设定值。同时，预判干扰趋势提前调整策略，主动补偿以减少干扰对系统性能的影响。

容错保障层核心是实现故障快速诊断、隔离与自愈。构建故障诊断模型，基于传感器数据与系统状态识别局部故障，如传感器失效、电机过载、传动部件卡滞等。针对不同故障触发容错机制，如切换备用传感器、降负荷运行、紧急制动等，避免故障扩大，保障人员与设备安全，维持系统基本作业能力，提升野外作业连续性。

## 4 电动绞盘系统各层级抗干扰控制策略实现

### 4.1 干扰识别策略：多传感器融合与信号分析

干扰识别准确性决定抗干扰控制策略有效性，基于多传感器融合技术构建干扰识别体系，结合信号处理算法精准分类与定位干扰。传感器配置采用“核心参数+环境参数”全覆盖模式，核心参数传感器实时采集电机运行与动力传递核心参数，环境参数传感器监测野外环境干扰因素，通过冗余配置提升数据采集可靠性。信号处理采用“滤波去噪 - 特征提取 - 模式

识别”三级流程，先滤波去噪，常用算法有卡尔曼滤波等，其中小波阈值滤波适配野外复合干扰场景；再提取时域与频域特征参数构建干扰特征向量；最后采用基于支持向量机或神经网络的识别算法分类识别，引入模糊识别理论处理复合干扰，设置预警阈值实现早识别、早响应。

### 4.2 源头抑制策略：硬件优化与结构改进

电磁干扰源头抑制通过硬件电路优化与屏蔽设计实现，如控制电路用金属屏蔽罩封装，线缆分开布置、采用屏蔽线缆，配置滤波器等，优化接地系统。机械干扰源头抑制聚焦传动结构优化与振动缓冲设计，如用弹性联轴器、斜齿轮，优化润滑系统，增加缓冲装置，强化传感器安装固定。环境干扰源头抑制通过密封防护与散热优化实现，系统外壳用高强度防水防尘材料，电机防爆型设计，优化散热结构，控制模块恒温设计。供电干扰源头抑制针对野外临时供电特性，配置大容量储能电池与稳压模块、浪涌保护器等，长时间作业采用太阳能辅助供电与储能模块结合。

### 4.3 控制补偿策略：自适应算法与鲁棒控制

针对野外复合干扰场景，采用自适应PID控制实现转速与扭矩动态补偿，依据干扰识别数据实时调整参数。结合鲁棒控制策略，构建系统不确定性模型，提升复杂电磁环境下的抗干扰能力。针对低速重载扭矩震荡问题，应用滑模控制算法设计滑模面与控制律，辅以前馈控制提升精度。

容错机制采用“模型-based+数据驱动”融合诊断方法，精准识别故障。针对不同故障实施差异化策略：传感器失效时切换备用并估算测量值；电机过载时降负荷散热或紧急制动；传动卡滞时停机报警并微动调节；控制电路故障时切换备用模块。系统具备故障记忆与学习能力，持续积累案例优化策略，提升整体可靠性与适应性。

## 5 抗干扰控制策略的理论验证与场景适配

### 5.1 理论验证逻辑与方法

构建的多层级抗干扰控制策略需理论验证其可行性与有效性，围绕干扰抑制效果等关键指标，采用理论建模、仿真分析与场景推演相结合的方式，评估其在野外复合干扰环境的应用效果。理论建模基于电动绞盘系统动力学方程与干扰机理，构建含多种干扰的系统仿真模型，融入抗干扰策略数学描述。仿真分析用专业软件搭建平台，模拟典型干扰场景，对比采用策略前后系统性能，针对单一与复合干扰分别开展，验证各层级策略效果。场景推演结合实际案例，模拟极端干扰工况，验证策略在极端场景的适应性与稳定性。通过理论计算与仿真分析印证优化策略参数与机制，确保应对复杂干扰，满足系统运行需求。

### 5.2 典型野外场景适配调整

不同野外场景干扰特性有差异，需针对性调整抗干扰策略

参数与侧重点。越野救援场景核心干扰为振动冲击等，需强化机械干扰抑制与自适应控制补偿，增强电磁屏蔽。地质勘探与林业作业场景面临环境与供电干扰，需优化环境干扰抑制与容错保障策略，稳定供电。野外工程抢修场景核心干扰为负载波动等，需优化滑模控制算法，强化供电稳压与储能设计。适配调整保持框架不变，优化各层级参数与权重，强化主导干扰层级能力，兼顾其他干扰防护，确保系统高可靠性运行。

### 5.3 理论案例的参考价值

结合同类设备抗干扰案例，可为本次策略提供实践参考。如某越野救援电动绞盘系统采用相关策略有效抑制干扰，提升转速控制精度；某野外勘探电动绞盘系统针对问题优化设计，应对故障确保作业连续性。这些案例表明本文策略能解决核心干扰问题，具理论参考与工程应用价值，可为同类设备抗干扰设计借鉴。

## 6 关键技术瓶颈与未来发展趋势

### 6.1 当前核心技术瓶颈

构建的多层级抗干扰控制策略能应对多数野外干扰场景，但实际工程应用仍有核心技术瓶颈。一是复合干扰识别精准度待提升，野外干扰叠加、特征交叉，强干扰下传感器信号失真，加剧识别难度，影响抗干扰策略触发。二是控制算法难平衡实时性与复杂性，自适应等算法计算量大，便携式绞盘系统难实现实时控制，制约策略落地。三是极端环境下硬件可靠性不足，野外恶劣环境使元件和部件性能退化，现有硬件设计难适配极端工况，影响源头抑制策略。四是容错机制自愈能力有限，现有容错策略面对复杂故障仅能隔离和制动，无法完全自愈，难

保障作业连续性。

### 6.2 未来技术发展趋势

随着相关技术发展，电动绞盘系统抗干扰控制将向智能化、精准化、高可靠性发展。在干扰识别上，融合人工智能与深度学习，构建自适应模型，提升识别精度与时效性，预判干扰趋势。控制算法朝轻量化、智能化优化，简化算法并提升算力，平衡实时性与复杂性，引入强化学习算法实现自适应最优控制。硬件方面，新型材料广泛应用，3D打印等技术提升部件性能，柔性电子与集成化设计减少干扰传递。容错保障构建远程诊断与自愈体系，提升复杂故障自愈能力，引入冗余设计确保核心部件故障时系统正常运行。此外，绿色节能理念融入设计，提升抗干扰能力同时降低能耗，适应野外作业。

## 7 结论

本文针对野外作业电动绞盘系统抗干扰控制需求，分析表明：系统面临电磁、机械、环境、供电四类复合干扰，严重影响控制精度与可靠性。

研究构建了"干扰识别-源头抑制-控制补偿-容错保障"四层抗干扰框架。该框架通过多传感器融合精准识别干扰源，硬件优化阻断干扰传播路径，自适应鲁棒算法补偿控制偏差，故障诊断与自愈机制保障系统持续运行，实现全链路协同防护。

策略具有较强可行性与场景适配性，但复合干扰识别精度、算法实时性及极端环境硬件可靠性仍是瓶颈。未来需结合智能技术推动系统向精准化、高可靠性方向发展。研究成果为野外电动绞盘及同类设备抗干扰设计提供理论支撑，后续需通过实验验证与工程优化提升实用性能。

### 参考文献：

- [1] 张扬,刘升台,唐安业,等. 艰险地区地质调查作业人员安全装备保障体系的构建[J]. 安全与环境工程,2017,24(6):107-112.
- [2] 李明. 重型越野汽车液压绞盘的设计研究[J]. 产业与科技论坛,2016,15(23):66-67.
- [3] 肖超,李伟,丛日平. 越野车液压绞盘牵引系统设计及分析[J]. 机械工程与自动化,2021(4):101-102.
- [4] 褚晓冬,支宏旭,贾奇勇,等. 考虑高温环境的无刷直流电机扰动补偿驱动系统[J]. 微电机,2025,58(6):13-18,49.
- [5] 杨少琴,庄衍平. 一种直流电机驱动的内装式电动电缆绞盘[J]. 移动电源与车辆,2014(2):14-15,23.