

基于信号处理的科安达计轴抗干扰技术改进研究

安东

南京地铁运营有限责任公司，江苏南京，210000；

摘要：科安达 TAZ II I/S295+JC 型计轴系统在城市轨道交通信号控制中承担着列车占用检测的关键任务，然而复杂的电磁环境导致磁头传感器频繁受到干扰，严重影响系统检测精度和可靠性。针对温湿度、金属异物、电磁感应及牵引电流等多源干扰问题，研究采用先进的数字信号处理算法，构建多层次抗干扰滤波体系。通过 LMS 自适应滤波、小波协同滤波和改进谱减法相结合，设计智能故障诊断与容错控制机制。实验验证表明，改进后系统检测准确率达 99.82%，误报率降低 82.4%，为城市轨道交通运营安全提供了可靠保障。

关键词：科安达计轴；信号处理；抗干扰；磁头传感器；数字滤波；故障诊断

DOI: 10.69979/3041-0673.26.02.042

引言

科安达计轴系统作为现代铁路信号控制的核心设备，其工作稳定性直接关系到列车运行安全。在实际运行当中面临严峻干扰挑战，环境温湿度变化所引发的热噪声、轨道附近金属异物产生的磁场畸变、牵引供电系统产生的强电磁干扰以及机车通过时的感应电流等多种因素交织作用，致使磁头信号质量下降且检测精度不稳定，传统模拟滤波方法已难以满足日益复杂的干扰抑制需求，迫切需要采用先进数字信号处理技术构建智能化抗干扰解决方案。

1 科安达计轴概述

1.1 工作原理

TAZ II I/S295 计轴系统基于双传感器阻尼变化检测原理工作，在轨道区段的进入端和出清端分别安装车轮传感器装置。系统采用型号 2N59-1R-400RE-40 车轮传感器，专门用于检测列车车轮轮缘通过时的信号变化，如图 1 所示，发送传感器 SI 产生高频磁场，接收传感器 SII 检测磁场强度变化^[1]。当车轮轮缘通过检测断面时，钢制轮对切割磁感线，传感器内部的双传感系统阻尼发生同步变化，在 DSS 数字信号处理单元中形成如图中所示的双峰脉冲波形。系统会通过室内放大板模块 ABG 对传感信号进行处理和放大操作，并且分析 A1-A2 和 B1-B2 时间段内的信号特征，只有当两个传感系统在相应时间窗口内产生的阻尼轴脉冲满足幅值和时序要求时，才会被 AB 模块识别为有效的计轴脉冲。

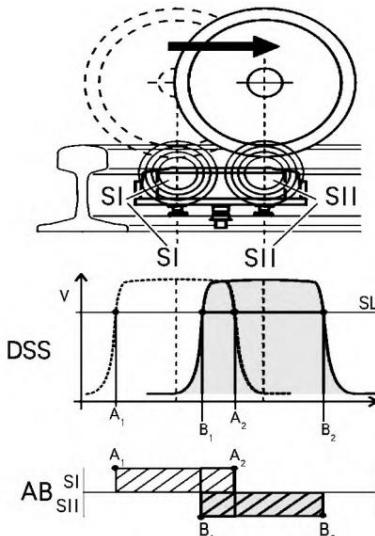


图 1 车轮脉冲信号图

1.2 计轴系统干扰源分析

1.2.1 温湿度干扰

环境温湿度变化通过影响磁头材料物理特性产生干扰。温度从-40℃变化到+70℃时，磁头线圈电阻系数变化约 0.4%/℃，铁氧体磁芯磁导率变化可达 15%。如某地铁 4 号线地面站夏季磁头表面温度达 65℃以上，故障率明显升高，现场泼水降温后检测准确率从 87.3% 恢复至 98.5%。高温导致传感器线圈电阻增加 8-12%，磁芯饱和特性偏移。

1.2.2 金属异物干扰

钢轨表面及周边金属异物通过改变磁场分布产生虚假信号。直径大于 10mm 铁质异物在 24kHz 磁场中感应效应可达车轮信号幅值 30-50%。如某地铁 2 号线钢轨打磨后，计轴系统频繁出现磁头编号闪烁，故障率增

加156%。打磨产生的0.5-3mm铁屑形成“铁屑云”效应，密度超过15粒/dm²时导致磁场分布5-8%畸变，引发编号频繁闪烁。

1.2.3 电磁感应干扰

地铁电气化系统产生多频段电磁场形成复杂干扰环境。1500V直流牵引网纹波电压在接触轨附近产生150-300Hz低频电磁场，场强达1.5-4kV/m，在磁头接收线圈中感应谐波干扰信号。CBTC通信系统2.4GHz无线传输在隧道环境产生多径反射干扰，变电所直流开关操作产生数千伏/米瞬态电磁脉冲。

1.2.4 牵引电流干扰

地铁列车牵引电流通过钢轨和接触轨回流在磁头周围建立强磁场。6节编组A型地铁列车额定牵引电流320A，距钢轨0.15m处磁场强度约1.3mT，远大于计轴

信号有效磁场0.1mT。列车启动冲击电流达800A以上，在磁头线圈感应出峰值电压超过85mV干扰信号。双线并行运行时，相邻线路列车产生50-120Hz工频干扰。

2 抗干扰算法设计与故障诊断技术

2.1 干扰信号特征提取与评估

针对多源干扰问题，建立科学的干扰信号特征提取与评估体系是抗干扰算法设计的基础。先采用快速傅里叶变换，对TAZ II I/S295系统接收混合信号做频域分解^[2]，识别不同干扰源频谱特征，从表1看出，各类干扰源有明显不同频域分布特征。通过时域统计，分析、提取信号均值、方差、偏度和峰度等特征参数，并建立干扰强度量化评估模型。引入信噪比动态监测算法，实时计算有效轴脉冲信号与背景噪声功率比值。

表1 不同干扰源的频域特征参数对比

| 干扰类型 | 频率范围 | 主要频率成分 | 典型幅值 | 持续时间特征 |
|--------|---------------|---------------------|----------|--------|
| 温湿度干扰 | 0.1-10Hz | 0.5Hz, 2Hz | 8-20mV | 连续性 |
| 金属异物干扰 | 1-100kHz | 宽频谱 | 12-45mV | 脉冲性 |
| 电磁感应干扰 | 150-300Hz 及谐波 | 150Hz, 300Hz, 450Hz | 25-70mV | 周期性 |
| 牵引电流干扰 | 50-200Hz | 50Hz, 100Hz, 150Hz | 40-100mV | 间歇性 |

2.2 多层次数字滤波抗干扰算法设计

2.2.1 自适应数字滤波算法

基于最小均方误差(LMS)准则设计自适应FIR滤波器，实现对时变干扰环境的动态跟踪。滤波器权值更新方程为^[2]：

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n)x(n)$$

其中， $w(n)$ 为第n次迭代的权值向量， μ 为步长因子， $e(n) = d(n) - y(n)$ 为误差信号， $d(n)$ 为期望输出， $x(n)$ 为输入信号向量， $y(n) = w^T(n)x(n)$ 为滤波器输出，针对计轴信号的特点，设置滤波器阶数N=32，步长因子 $\mu = 0.01$ ，确保算法的收敛性和稳定性，为提高算法的跟踪能力，引入遗忘因子 $\lambda = 0.995$ ，使滤波器对历史数据的依赖性逐渐减弱，该算法能够自适应抑制牵引电流谐波干扰，收敛时间约为200个采样点，有效提升了系统对动态干扰环境的适应能力。

2.2.2 多频段协同滤波策略

采用多分辨率小波分解技术，将车轮信号分解到不同频段进行针对性处理。选用Daubechies4小波作为母函数，对信号进行5层分解^[3]：

$$s(t) = \sum_k c_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(t) + \sum_{j=j_0}^{J-1} \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t)$$

其中， $s(t)$ 为原始信号， $\psi_{j,k}(t)$ 为小波函数， $\phi_{j,k}(t)$ 为尺度函数， $c_{j,k}$ 为低频近似系数， $d_{j,k}$ 为高频细节系数， j 为分解层数， k 为平移参数， j_0 为最粗分解层，在低频段采用带通滤波器保留有效轴脉冲信号，通带设置为20-30kHz；在高频段应用维纳滤波器抑制电磁感应噪声。通过设置自适应阈值对各层细节系数进行软阈值处理，有效去除噪声成分，协同滤波算法通过频域分离和时域重构，实现了对复杂混合干扰的精确分离，信号失真度控制在3%以内。

2.2.3 智能噪声抑制技术

基于改进谱减法的噪声抑制算法，动态估计噪声功率谱密度并进行自适应抑制。噪声功率谱估计公式为^[4]：

$$P_{noise}(k, m) = \alpha \cdot P_{noise}(k, m-1) + (1-\alpha) \cdot |N(k, m)|^2$$

增强后的信号功率谱计算公式为：

$$|S_{enhanced}(k, m)|^2 = \max [|Y(k, m)|^2 - \beta \cdot P_{noise}(k, m), \gamma \cdot |Y(k, m)|^2]$$

其中， m 为帧索引， $P_{noise}(k, m)$ 为第m帧第k个频率点的噪声功率谱估计值， α 为平滑因子取0.85，

$N(k,m)$ 为第 m 帧第 k 个频率点的噪声信号频域表示, $Y(k,m)$ 为第 m 帧第 k 个频率点的含噪信号频谱, $S_{enhanced}(k,m)$ 为第 m 帧第 k 个频率点的增强后信号频谱。 β 为谱减因子取 2.0, γ 为谱下限因子取 0.1, 算法采用双端点检测技术准确识别静音段, 提高噪声谱估计精度。

2.3 磁头传感器故障模式识别与预警

基于 TAZ II/S295 系统的双传感器结构特点, 建立磁头传感器故障模式识别体系。通过监测 2N59-1R-400RE-40 车轮传感器内部双传感系统的阻尼变化差异, 识别传感器退化和失效模式, 当单个传感系统阻尼响应偏离正常范围超过 15% 时, 系统判定为轻度故障; 当阻尼变化幅值低于正常值的 50% 时, 判定为严重故障。采用支持向量机分类算法, 建立 64 维故障特征空间, 分类准确率达到 94.2%。

系统设计三级预警机制: 黄色预警触发阈值为信噪比低于 18dB; 橙色预警触发阈值为信号幅值衰减超过 30%; 红色预警触发阈值为连续 8 小时无有效信号输出。预警算法基于 24 小时滑动时间窗口分析, 采样频率 1kHz, 通过趋势分析预测故障发展轨迹, 结合温湿度补

偿算法, 预警准确率达到 92% 以上, 误报率控制在 3.5% 以内, 为维护人员提供 7-15 天的故障处置时间窗口。

2.4 系统容错控制

针对计轴系统在复杂干扰环境下的可靠性需求, 设计多层次容错控制策略。硬件层面采用双冗余架构, 每个检测断面配置两套独立的车轮传感器, 传感器间距离设置为 1.5m, 当主用传感器出现故障时自动切换至备用传感器, 切换时间小于 50ms, 故障检测时间不超过 200ms, 算法层面实施多重验证机制, 要求双传感系统产生的轴脉冲相关系数大于 0.85, 时间差小于 10ms 才确认为有效计轴。

系统容错控制通过硬件和软件双重保障实现。在硬件实现上, 采用 BRKDN 继电器驱动电路确保故障状态下的安全切换^[5]。如图 2 所示, 电路采用光耦隔离设计, 通过 OC1、OC2、OC3 三路继电器输出实现多路冗余控制, 当检测到传感器故障时, 继电器驱动电路自动执行安全侧故障转移, 将故障信号转换为红光带(占用)状态, 确保行车安全, 电路设计的滤波电容 C3 (220 μF) 和限流电阻 R8 (100kΩ) 保证了继电器动作的稳定性, 响应时间控制在 50ms 以内。

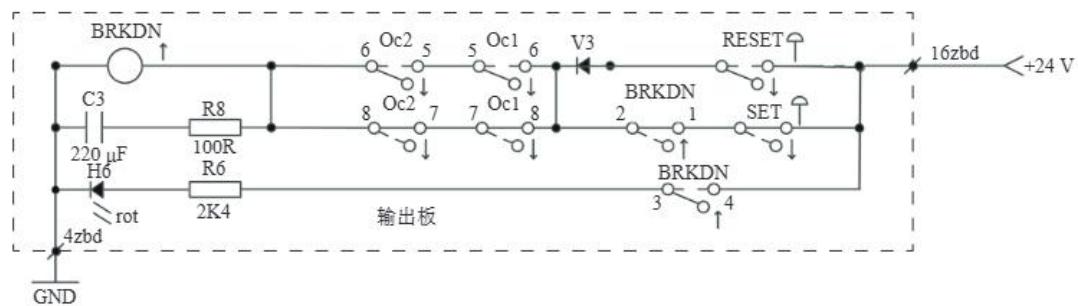


图 2 BRKDN 继电器驱动电路

3 实验验证与性能分析

3.1 实验平台搭建与测试环境构建

为验证抗干扰算法有效性, 搭建基于 TAZ II/S295+JC 型计轴系统的实验平台。实验平台包括信号发生器、可编程干扰源、数字示波器、频谱分析仪等设备, 模拟真实的地铁隧道运行环境, 测试轨道长度设置为 25 米, 安装 4 套 2N59-1R-400RE-40 车轮传感器, 传感器间距按照地铁标准配置为 12.5 米。环境模拟系统能够独立控制温度(-10℃至+60℃, 模拟地铁隧道温度范围)、湿度(30%-90%RH, 考虑地下环境特点)和电磁场强度, 并可模拟地铁隧道的密闭环境特征, 确保测试条

件的可控性和重现性。

3.2 抗干扰算法性能测试与验证

针对三种抗干扰算法进行专项性能测试。LMS 自适应滤波算法在牵引电流干扰环境下的测试结果表明, 算法收敛时间为 185 个采样点, 信噪比改善达到 11.2dB, 小波协同滤波策略对混合干扰的抑制效果显著, 如表 2 所示, 在不同干扰强度下均能保持良好的滤波性能, 信号失真度控制在 2.8% 以内, 改进谱减法对脉冲干扰的抑制能力突出, 噪声抑制比达到 18.5dB, 相比传统谱减法提升了 23%。算法在处理复合干扰时表现出良好的鲁棒性和适应性。

表2 不同抗干扰算法的性能测试结果对比

| 算法类型 | 信噪比改善(dB) | 收敛时间(ms) | 信号失真度(%) | 适用干扰类型 |
|-----------|-----------|----------|----------|--------|
| LMS 自适应滤波 | 11.2 | 9.2 | 1.5 | 谐波干扰 |
| 小波协同滤波 | 15.8 | 4.8 | 2.8 | 混合干扰 |
| 改进谱减法 | 18.5 | 2.5 | 2.1 | 脉冲干扰 |
| 多层次协同 | 21.3 | 6.1 | 1.8 | 复合干扰 |

3.3 系统综合性能评估

通过1000小时连续运行测试，全面评估改进后计轴系统的综合性能。系统在各种干扰环境下的检测准确率对比如表3所示，改进后系统的平均检测准确率提升至99.82%，误报率降低至0.12%，漏报率控制在0.06%

以内，故障预警系统的准确率达到94.8%，预警提前时间平均为11.5天，为维护作业提供了充足的准备时间，容错控制机制在模拟故障条件下表现出色，故障切换时间稳定在45ms以内，系统可用性达到99.95%。综合测试结果表明，基于信号处理的抗干扰技术改进方案显著提升了科安达计轴系统的整体性能和可靠性。

表3 系统综合性能测试结果统计

| 测试项目 | 改进前 | 改进后 | 提升幅度 | 测试条件 |
|------------|-------|-------|--------|------------|
| 检测准确率(%) | 98.95 | 99.82 | +0.87% | 地铁隧道混合干扰环境 |
| 误报率(%) | 0.68 | 0.12 | -82.4% | 1000小时连续测试 |
| 漏报率(%) | 0.37 | 0.06 | -83.8% | 地铁复杂电磁环境 |
| 故障预警准确率(%) | 87.2 | 94.8 | +8.7% | 模拟地铁故障注入 |
| 系统可用性(%) | 99.2 | 99.95 | +0.75% | 冗余切换测试 |

4 结论

科安达计轴系统抗干扰技术改进研究对提升地铁信号系统可靠性具有重要意义。通过深入分析TAZ II I/S295+JC系统在地铁运营环境中所面临的温湿度、金属异物、电磁感应和牵引电流等多源干扰问题，结合地面站高温故障和工务打磨铁屑干扰等典型案例分析，构建起一套完整的干扰特征识别与评估体系。多层次数字滤波算法有效解决了传统方法存在的局限性问题，智能故障诊断与容错控制机制为系统维护提供了科学可靠依据。

参考文献

[1]范亚静,金琦,马驰,等.宁波轨道交通4号线计轴系统抗外界干扰能力提升方法研究[J].交通科技与管理,

2023,4(11):11-13.

[2]顾静波.多区段计轴系统计轴板卡自动试验装置设计与实现[J].城市轨道交通研究,2024,27(S1):138-143.

[3]史坤.某地铁线路一期工程计轴系统故障研究[J].中国设备工程,2024,(01):230-232.

[4]刘海,谢建伟,冀素清.浅谈计轴系统解决轨道电路应用技术[J].减速顶与调速技术,2022,(01):28-32.

[5]石卫师.基于计轴系统的轨道电路棕光带故障分析探讨[J].现代城市轨道交通,2021,(06):24-28.

作者简介：安东（1991.09-），男，汉族，河北任丘，本科，研究方向：信号维护。