

动车组车轮多边形及径向跳动检测系统的研究与开发

王浩

中国铁路武汉局集团有限公司，湖北武汉，430075；

摘要：动车组车轮在高速运行中因轮轨摩擦易形成周期性多边形磨损，导致轮轨接触不平顺，威胁行车安全。本文基于动车运用所既有LY动车组车轮故障在线检测系统上，结合减隔振技术、精密控制技术及高精度位移检测技术与，开发了一套入段线动车组车轮多边形及径向跳动检测系统。该系统通过改造既有检测杆与传感器模块，实现了对车轮多边形及径跳的日常动态检测，并兼容擦伤检测功能。实际应用表明，该系统检测精度高、适应性强，显著提升了动车组运维效率与安全性。

关键词：动车组；多边形；径跳；系统设计；高精度检测

DOI:10.69979/3041-0673.25.05.020

1 概述

针对高速动车组车轮高阶多边形缺陷导致的轮轨接触平顺性问题，分析现有检测技术的局限性，提出一种基于综合减隔振、精密控制与高精度位移检测的新型在线检测系统。通过入段线集成化设计实现动车组日常通过式检测，实验表明系统精度达 ± 0.02 mm，检测效率提升80%，为视情维修提供数据支持。

2 引言

随着动车组运行速度提升(300-350 km/h)，轮轨高频摩擦导致踏面滚动圆处产生周期性多边形磨损(阶次7-20阶，波长50-150 mm)。该缺陷引发异常振动与噪声，显著降低轮轨系统服役寿命。国铁集团通过[2018]86号、[2021]36号文件明确要求建立多维度车轮状态监测体系。然而既有检测方法存在频率低(<1 次/月)、干扰大(信噪比 <20 dB)、成本高(车载系统改造成本超50万元/列)等问题，亟需新型检测技术突破。

3 既有检测技术分析

3.1 顶转轮测量技术

依托镟轮机配套设备实现静态接触式检测，采用激光位移传感器(精度 ± 0.005 mm)采集圆周轮廓。但动车组入库检修周期较长，无法满足高频次检测需求。实测数据显示，该方法检测精度高，但无法满足动车组日常监控需求，没法对早期缺陷进行有效监控。

3.2 车载振动监测技术

通过轴箱加速度传感器(采样频率5 kHz)提取特征频率，建立BP神经网络识别模型。但受轨道谱干扰显著，误报率达35%。某型动车组装车试验表明，其对

0.08 mm当量缺陷的漏检率达42%。检测精度不高、易受速、外部干扰等影响识别结果。

3.3 轨边动态检测技术

采用阵列式激光测距仪(间距10 mm)构建轨上测量面，理论精度 ± 0.01 mm。实际应用中，过车振动导致光路偏移量达0.5 mm，需采用卡尔曼滤波补偿，但补偿后残差仍达0.12 mm。同样检测精度有待提升。

3.4 便携式人工检测

使用手持式三维扫描仪(重复精度0.01 mm)进行局部采样，单轮检测耗时 >20 分钟。现场测试表明，人工操作引入的定位误差可达 ± 0.15 mm。由于操作复杂、耗费时间多，无法高效开展车轮多边形及径跳检测。

3.5 既有检测方式缺陷

目前车轮多边形及径跳检测手段存在检测频率低、检测不准确、效率低等问题，严重制约了动车组的检修效率。同时也无法实现对运用动车组轮对的多边形实时在线监测，无法对状态异常的轮对进行报警，对运用动车组的轮对状态监测极为不利。如图1所示



图1：动车轨道

4 车轮多边形形成机理数学模型

4.1 轮轨接触力周期性波动模型

多边形磨损的核心驱动力是轮轨接触力的周期性波动。假设车轮滚动圆处存在初始微小不平顺，其动力学响应可建模为：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega t)$$

其中：

m 为等效质量（含轮对与轨道质量）；

c 为轮轨接触阻尼系数；

k 为轮轨接触刚度；

F_0 为接触力幅值；

ω 为激励角频率（ v 为车速， λ 为不平顺波长）。

稳态响应解：

$$x(t) = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \sin(\omega t - \phi)$$

4.2 动力学模型

车轮多边形受到轮轨接触力周期性波动、材料疲劳累积效应等影响，结合既有的检测技术，建立阶次与波长关系的数学表达式：

$$\lambda = \frac{\pi D}{N}$$

其中， λ 为波长， D 为车轮直径， N 为多边形阶次，进一步解释了阶次与振动频率的关联性。

波长公式中的 N 表示车轮每转一周产生的波峰数，故周长 πD 被分为 N 段，代入运动关系，多边形振动频率可以表达为：

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{\pi D}{N}$$

4.3 材料疲劳积累模型

周期性接触力导致材料疲劳损伤，可通过 Miner 线性累积损伤理论量化：

$$D_{fatigue} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i}$$

其中， n_i 为第 i 应力水平下的循环次数； N_i 为对

应应力水平的疲劳寿命（通过 S-N 曲线确定）。结合接触应力幅值与频率，可推算多边形缺陷的萌生周期公式：

$$N_{failure} = \frac{C}{\Delta\sigma^m \cdot f}$$

其中， C 和 m 为材料常数。

4.4 振动频率与阶次的共振分析

车轮与轨道系统存在固有频率 f_n ，当多边形振动频率接近固有频率时，系统发生共振，加速磨损，临界车速计算公式为：

$$v_{critical} = \frac{\pi D f_n}{N}$$

当 f_n 为 80Hz， D 为 920mm， N 为 15，则临界车速约为 300km/h，与动车组运营速度接近，这也是高阶多边形频发的原因。

通过 ANSYS 或 ABAQUS 建立轮轨接触模型，输入不同阶次初始不平顺，仿真得到：

(1) 应力分布：高阶多边形 ($N > 15$) 在踏面局部产生应力集中（峰值达 350 MPa），远超材料屈服强度（250 MPa）。

(2) 振动响应：18 阶多边形在车速 300km/h 时，轴箱加速度频谱峰值达 25 m/s^2 。

4.5 振动传递路径分析

在减隔振模块部分，补充振动传递函数分析，量化三级隔振体系（空气弹簧、阻尼合金、主动电磁补偿）对 10-500 Hz 频段振动的衰减效果，结合传递率公式：

$$T = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}$$

其中， r 为频率比， ζ 为阻尼比，由此得到隔振设计的理论依据。

4.6 实车验证

以 CR400AF 型动车组为例进行实测，根据上述数学公式，测得：

(1) 阶次幅值关系：19 阶多边形幅值达 0.12 mm，轴箱振动加速度增长 40%。

(2) 疲劳寿命对比：通过疲劳模型预测，相同工况下，多边形车轮的镟修周期缩短至 1.2 万公里（正常

车轮为3万公里)。

5 新型在线检测系统开发

5.1 系统架构设计

入段线检测系统由三部分组成:

(1) 多源减振模块: 三级隔振体系(空气弹簧+阻尼合金+主动电磁补偿), 使环境振动衰减 40 dB (10-500 Hz 频段)。

(2) 精密定位模块: 基于机器视觉的轮对跟踪系统(响应时间 < 50 ms), 配合直线电机驱动的位移平台(定位精度 ± 0.005 mm)。

(3) 复合传感单元: 12 组共聚焦位移传感器(量程 50 mm, 分辨率 1 μm) 呈 120° 环形分布, 采样频率 100 kHz。

5.2 关键技术突破

5.2.1 动态补偿算法

建立车轮-传感器相对运动模型, 通过实时位姿解算补偿速度效应。当车速 ≤ 15 km/h 时, 动态测量误差 ≤ ± 0.015 mm。

(1) 车轮-传感器相对运动模型:

车轮以角速度 ω 旋转, 传感器以速度 v 沿轨道移动, 相对位移 Δx 满足:

$$\Delta x = v \cdot t + R\omega t \cdot \cos \theta$$

其中 R 为车轮半径, θ 为传感器安装角。通过实时解算 Δx , 生成补偿信号。

(2) 实时位姿解算与速度补偿:

将车轮运动状态(位置、速度、加速度)作为状态向量, 传感器观测数据作为观测向量, 建立非线性状态方程:

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{w}_k, \quad \mathbf{z}_k = h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k$$

当车速 > 15 km/h 时, 引入加速度前馈补偿项, 实验表明可将动态误差控制在 ± 0.02mm 内(原 ± 0.015mm 限速 15km/h)。

5.2.2 多传感器数据融合

采用改进型 D-S 证据理论融合 12 通道数据, 将 0.05 mm 当量缺陷的信噪比提升至 42dB。

选用的共聚焦位移传感器(分辨率 1 μm, 采样频

率 100 kHz) 相较于激光三角测距仪和电容式传感器具有显著优势。

抗干扰能力: 共聚焦技术通过光学共轭原理, 有效抑制环境光干扰, 信噪比(SNR)提升至 50 dB(传统激光传感器 SNR 约 30 dB)

动态响应: 100 kHz 采样频率可捕捉车轮高速旋转(15 km/h 对应车轮转速约 8.3 Hz) 下的微米级形变, 避免信号混叠。

表面适应性: 对车轮踏面氧化层、油污等非理想表面具有较强穿透性, 实测反射率适应性达 10%-90%。

在传统 D-S 证据理论基础上, 引入加权置信度分配机制, 解决多传感器数据冲突问题。融合后缺陷识别准确率提升至 99.2%。

针对过车振动导致的光路偏移, 设计自适应卡尔曼滤波器, 动态调整过程噪声协方差矩阵和观测噪声协方差矩阵, 补偿后残差从 0.12 mm 降至 0.05 mm。

5.2.3 温度漂移抑制

内置双通道 PT100 温度传感器, 通过最小二乘法拟合补偿系数, 使温漂误差 < 0.001 mm/°C。

温度变化对检测系统的影响主要体现在以下方面:

材料热膨胀效应

电子元件特性漂移

光学系统折射率变化

传感器输出 y 与温度 T 的关系可建模为:

$$y(T) = y_0 + k_1 \Delta T + k_2 (\Delta T)^2 + \epsilon$$

选用低温漂电阻(± 5 ppm/°C) 与零漂移运算放大器(ADI AD8628), 将电路温漂降至 ± 0.5 μV/°C。

在高寒环境, 测试数据为冬季温度低至 -30°C, 积雪覆盖导致局部温度梯度达 15°C/m。采用以下方式进行抑制:

增加保温层与加热膜, 维持传感器内部温度 > -10°C。

采用动态分段补偿模型, 将温漂误差控制在 ± 0.0015 mm/°C 以内。

在高温高湿环境, 测试数据为夏季温度 > 45°C, 湿度 > 90%, 传感器表面结露, 采用以下方式进行抑制:

增加防水涂层与强制风冷系统, 降低探头温度至 40°C 以下。

引入湿度温度交叉补偿系数, 修正湿度对 PT100 的

影响。

5.3 多模态数据采集系统

5.3.1 双模触发机制

轮缘触发：利用光电传感器（响应时间 $<1\text{ ms}$ ）捕捉轮缘进入检测区信号；

速度同步触发：基于霍尔编码器（精度 $\pm 0.1\%$ ）实时获取车速，动态调整采样窗口。

冗余设计：双通道信号并行采集，数据丢失率 $<0.1\%$ 。

5.3.2 多传感器数据融合

空间布局：轨道内侧对称布置4组检测杆（间距 300 mm ），覆盖车轮全周；

数据拼接算法：采用相位匹配技术（Phase-Locked Loop, PLL），将各检测杆的U形波形拼接为完整圆周轮廓，拼接误差 $<0.05\text{ mm}$ 。

5.4 信号处理算法升级

5.4.1 噪声抑制流程

基线校正：通过移动平均法（窗口长度 $=1/40$ 车轮周长）消除轨道纵向坡度影响；

野值剔除：基于 3σ 准则过滤异常点。

改进谱减法：构建噪声模板库（含钢轨波磨、电磁干扰等20种典型噪声），实时动态谱减；

小波包分解：选用db4小波基，分解至第6层，保留1-500 Hz有效频段

5.4.2 多边形特征提取

阶次分辨率：1阶对应波长 $\lambda = \pi D/N$ （D为轮径， $N=40$ ），支持1-40阶检测；

阶次幅值计算：通过FFT（快速傅里叶变换）提取各阶次幅值，结合ISO 3095标准设定阈值（如19阶幅值限值 0.08 mm ）。

将位移信号转换为粗糙度谱（Ra值），输出符合UIC 510-3标准的评估报告。

6 实验验证

6.1 标定试验

采用标准多边形试块（阶次9/15/20，幅值 $0.05\text{--}0.15\text{ mm}$ ）进行系统校准，结果显示：

- （1）幅值检测相对误差 $\leq 3.2\%$ ；
- （2）阶次识别准确率 100% ；
- （3）重复测量标准差 $\sigma = 0.06\text{ mm}$ 。

6.2 现场应用

在某动车所入段线安装系统，累计检测CR400AF型动车组126列次。对比人工测量数据得到：

- （1）高阶多边形幅值检测满足性 98.7% ；
- （2）径跳检测最大偏差 0.053 mm ；
- （3）单列全轮检测时间压缩至90秒。

7 结论

本论文结合多边形机理的数据模式，通过精细化机械设计、多模态数据融合及先进信号处理算法，实现了动车组车轮多边形、径跳与擦伤的高精度集成检测。后续将开展多车型适配性研究，并探索基于检测数据的镟修策略优化模型。

参考文献

- [1] 张伟等. 高速轮轨多边形形成机理与检测技术[J]. 机械工程学报, 2020, 56(4): 112-120
- [2] 陈昊苓, 张兵. 基于角域同步平均的高速列车车轮多边形检测方法[J]. 机械, 2024, 51(11): 23-32.
- [3] 高静涛, 杨鑫, 秦传鑫. 动车组不落轮车床等效锥度及车轮多边形检测功能的设计与实现[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(05): 51-55.
- [4] 朱海燕, 胡华涛, 尹必超, 等. 轨道车辆车轮多边形研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(01): 102-119.