

T/CSMT

团体标准

T/CSMT XXXX—XXXX

基于金刚石氮-空位色心的钢轨轨顶面裂纹 检测技术规程

Technical specification for rail top surface crack inspection based on diamond
nitrogen-vacancy color centers

(征求意见稿)

(本草案完成时间: 2026.03)

在提交反馈意见时, 请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国计量测试学会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 技术要求	1
4.1 使用环境	1
4.2 基本要求	1
4.3 主要技术参数	2
4.3.1 检出率	2
4.3.2 定位精度	2
4.3.3 检测范围	2
4.3.4 检测速度	2
5 检定要求	3
5.1 金刚石氮-空位色心量子钢轨顶面裂纹检测系统的检定	3
5.2 钢轨表面清洁状态的检查	3
6 检测流程及方法	3
6.1 检测前准备	3
6.1.1 设备检查	3
6.1.2 系统校准	3
6.1.3 作业环境确认	4
6.2 检测流程	4
6.2.1 设备部署	4
6.2.2 检测作业	4
6.3 数据处理与分析	4
6.3.1 正常钢轨漏磁检测数据特征	4
6.3.2 非正常钢轨漏磁检测数据特征	4
7 安全措施及保障	5
8 数据安全 管理	6
9 检测报告	6
附 录 A （资料性） 检测记录表	7
附 录 B （资料性） 检测报告	8

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国计量测试学会提出并归口。

本文件起草单位：高速铁路建造技术国家工程研究中心、中国中铁股份有限公司、安徽省国盛量子科技有限公司、中南大学、安徽省特种设备检测院、湖南高铁智检科技有限公司、高铁科技(湖南)有限公司、湖南高铁检维科技有限公司、山东铁路投资控股集团有限公司、中铁三局集团有限公司、中铁上海工程局集团有限公司、中国铁路沈阳局集团有限公司、中国铁路武汉局集团有限公司。

本文件主要起草人：余志武、程晓芳、赵博文、毛建锋、项诸宝、伍军、朱德兵、张少春、周梦良、王海俊、陈英、史红兵、王勇、谈遂、屠嘉杨、毕嘉琪、夏智、范华林、王仁涛、过晴、胡宗文、陈志强、董小卫、邬亮、曾华、童晓枫、赵冀红、尤嘉伦、张欣、陈宝亮、汪鹏、张凌霄、郭庆亮、郭琪、章朝晖、郭乐、童伟伟、刘剑锋、朱新伟。

基于金刚石氮-空位色心的钢轨轨顶面裂纹检测技术规程

1 范围

本文件规定了基于金刚石氮-空位色心的钢轨轨顶面裂纹检测技术的术语、技术要求、检定要求、检测流程与方法、安全措施及保障、数据安全管理和检测报告。

本文件适用于铁路干线、城际铁路及城市轨道交通的钢轨轨顶面裂纹（含坑洞、锈蚀引发的表面缺陷）的无损检测作业。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 17426-1998 铁道特种车辆和轨行机械动力学性能评定及试验方法

GB/T 43737-2024 量子测量术语

GB/T 15822.1-2024 无损检测 磁粉检测 第1部分：总则

DB 34/T 4550-2023 固态自旋量子磁力测量技术性能表征

TB/T 449-2015 铁路钢轨伤损分类及编码

3 术语和定义

GB/T 17426、GB/T 43737-2024、GB/T 15822.1-2015、DB 34/T 4550-2023和TB/T 449-2015界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

金刚石氮-空位色心的钢轨轨顶面裂纹量子无损检测 quantitative nondestructive testing for rail top surface cracks based on diamond nitrogen-vacancy (NV) color centers

采用金刚石氮-空位（NV）色心量子传感器，以漏磁检测为基本原理，利用金刚石NV色心的自旋态对外界磁场的敏感性，通过检测钢轨磁化后由轨顶面缺陷（裂纹、坑洞、锈蚀等）引起的漏磁场分布变化，实现对钢轨轨顶面裂纹进行检测的量子无损检测技术。

注1：本检测技术基于磁粉检测的漏磁检测原理（参见GB/T 15822.1—2024）。在钢轨轨顶面被外加磁场磁化后，轨顶面缺陷处产生漏磁场，金刚石NV色心量子传感器检测该漏磁场的变化并经信号处理后形成检测图谱。

注2：本检测方法主要用于钢轨轨顶面的表面及浅表层（深度不超过1mm）裂纹检测，不适用于钢轨内部伤损（如核伤、螺孔裂纹等）的检测。

注3：本技术中使用的金刚石NV色心量子传感器的性能表征应符合DB 34/T 4550—2023的规定。

注4：本检测技术涉及的量子测量相关术语应符合GB/T 43737—2024的规定。

4 技术要求

4.1 使用环境

- 温度：-20℃~50℃；
- 湿度：≤90%（无凝露）；
- 工作电压：220V AC/12V DC。

4.2 基本要求

- 金刚石氮-空位色心量子钢轨轨顶面裂纹量子无损检测（以下简称“检测系统”）应包括硬件系统和软件系统。硬件系统主要以下五个部分组成：

- 钢轨检测车：作为检测系统的移动承载平台，应具备自主驱动能力（电力驱动）或可由人力推行。机械结构应完好，车轮与钢轨贴合紧密，前后行驶正常，制动系统可靠，电压输出正常。应按 GB/T 17426 的要求配备必要的安全装置及警示标识。钢轨检测车系检测系统的有机组成部分，所有传感器模块、磁化装置及信号处理单元均须集成安装于检测车上。车体结构应确保金刚石氮-空位色心量子传感器模块与钢轨顶面的相对位置在动态检测中保持稳定，传感器底面与轨顶面间距不超过 5mm，且在检测速度范围内（0~10km/h）相对高度误差不超过 $\pm 2\text{mm}$ ；
- 金刚石氮-空位色心量子传感器模块：应包含至少 8 通道 NV 色心量子传感器阵列，具备对外界磁场的实时感知能力，磁场测量灵敏度不低于 $1\text{nT}/\text{Hz}^{1/2}$ ；
- 磁化装置：可采用永磁体或电磁磁化单元，应能在钢轨顶面产生强度不低于 $30\text{kA}/\text{m}$ 的磁化场；
- 信号采集与处理模块：应包含多通道同步数据采集单元、模数转换单元及实时信号处理单元（含滤波、放大、锁相解调功能）；
- 定位模块：应支持北斗/GNSS 双模定位（可选用差分增强定位），定位数据更新频率不低于 10Hz。
- 软件系统核心为数据分析与图像处理模块，基于 Windows 64 位及以上操作系统，具备磁场信号分析、二维成像、数据通讯、数据存储、数据导入等功能；
- b) 检测前，宜具有下列资料：
 - 工程名称、建设单位、运维管理单位；
 - 检测原因及其具体技术要求；
 - 测区线路里程、钢轨类型（材质、型号）、钢轨结构参数；
 - 测区钢轨铺设时间、服役时长、历史伤损及维修记录等；
 - 必要的设计图纸（钢轨铺设图、轨道基础图）、及前期同类检测数据；
 - 铁路运营管理部门批准的上线检测许可（含检测时段、作业区域安全协议）。
- c) 检测前应结合现场实际情况制定检测方案；
- d) 技术人员应配置至少两名，一人负责设备移动及轨面适配调整，另一人负责检测系统参数设置、数据监测及异常标记
- e) 检测时所用仪器应处于正常状态，仪器操作应规范、科学，检测数据记录应真实、准确，现场检测原始记录格式见附录 A。

4.3 主要技术参数

4.3.1 检出率

金刚石氮-空位色心量子钢轨顶面裂纹检测系统对深度不低于 $100\mu\text{m}$ 的钢轨损伤的检出率不低于 90%。

4.3.2 定位精度

金刚石氮-空位色心量子钢轨顶面裂纹检测系统对损伤的定位精度为 $\text{CEP}50=2.5\text{m}$ 。

4.3.3 检测范围

金刚石氮-空位色心量子钢轨顶面裂纹检测系统的检测范围是轨顶面。

4.3.4 检测速度

金刚石氮-空位色心量子钢轨顶面裂纹检测系统的最高检测速度为 $10\text{km}/\text{h}$ 。

本标准规定的 $10\text{km}/\text{h}$ 检测速度主要适用于以下作业场景：

- a) 营业线天窗点内精细化探伤作业：在天窗时间内（通常 2~4 小时）对重点区段（如小半径曲线、道岔区、焊接接头）进行高精度检测；
- b) 已发现伤损区段的病害复核与追踪：对超声或人工巡检发现的可疑伤损进行精确定位和形态确认；
- c) 工程验收阶段的质量检测：对新建或维修后钢轨顶面进行出厂前或验收检测；

d) 重点时段专项检测：如春运、暑运前的安全评估。

注1：对于野外钢轨长距离大面积普查检测场景，建议采用其他高效率检测手段（如双轨式超声波检测系统、钢轨探伤车等）进行初步筛查，本标准规定的检测系统适用于筛查后的精细化检测和损伤确认环节，形成“普查+精查”的技术互补模式。

注2：检测速度可根据钢轨表面清洁度、环境电磁干扰等因素在0~10km/h范围内选择，以保证检测质量为首要原则。

5 检定要求

5.1 金刚石氮-空位色心量子钢轨轨顶面裂纹检测系统的检定

a) 金刚石氮-空位色心量子钢轨轨顶面裂纹检测系统有下列情况之一时，应经生产厂商或检定单位检定后方可使用：

- 启用前；
- 超过检定有效期；
- 遭受严重撞击或其他损害。

b) 金刚石氮-空位色心量子钢轨轨顶面裂纹检测系统的检定内容应包括：

- 背景噪声；
- 通道一致性；
- 重复性；
- 灵敏度；
- 连续检测与监测功能；
- 实时存储与数据检验。

5.2 钢轨表面清洁状态的检查

检查轨顶面作业面清洁状态，确保金刚石氮-空位色心量子钢轨轨顶面裂纹检测系统信号不受干扰。

6 检测流程及方法

6.1 检测前准备

6.1.1 设备检查

- a) 量子传感器模块
 - 应确认外观无物理损伤；
 - 传感器阵列安装牢固；
 - 与钢轨表面间距不超过 5mm；
 - 无污染物附着。
- b) 信号采集与处理模块
 - 通电后自检应正常，指示灯显示稳定；
 - 与传感器及软件系统通讯链路畅通，无信号丢失现象。
- c) 定位模块
 - 启动后信号传输正常；
 - 经纬度显示稳定。
- d) 钢轨检测车
 - 机械结构应完好；
 - 车轮与钢轨贴合紧密；
 - 前后行驶正常，制动正常；
 - 电压输出正常。

6.1.2 系统校准

- a) 示值误差校准：采用标准亥姆霍兹线圈产生梯度磁场，对量子传感器模块进行校准，校准后磁场强度测量误差应 $\leq 5\%$ ；

- b) 定位校准：在已知坐标的铁路精密测绘控制点处，通过定位子系统采集数据，修正定位偏差；
- c) 性能验证：采用标准试块进行检测，损伤检出率应 $\geq 90\%$ 。

6.1.3 作业环境确认

- a) 轨顶面应清洁，无砂石、油污等覆盖物，若存在污染物，需采用专用工具清理并干燥后再检测；
- b) 检测区域应避开强电磁干扰源，环境电磁噪声 $\leq 5 \mu T$ ；
- c) 作业时段应无列车通行，现场应设置安全警示标识，配备专职安全员。

6.2 检测流程

6.2.1 设备部署

- a) 将钢轨检测车置于检测区段起点，固定初始位置；
- b) 连接系统各单元电源及数据线缆，依次启动量子传感器模块、信号采集与处理模块、定位模块及软件系统，完成初始化。

6.2.2 检测作业

- a) 启动钢轨检测车，按预设速度沿钢轨匀速行驶，同步开启信号采集功能；
- b) 实时监控软件系统显示的磁场信号曲线、定位信息及缺陷预警提示，若出现信号异常，应暂停检测并排查原因；
- c) 检测至区段终点后，停止钢轨检测车及信号采集，保存原始数据及定位信息。

6.3 数据处理与分析

6.3.1 正常钢轨漏磁检测数据特征

正常轨顶面的颜色连续且符合轨顶面磁场衰减逻辑：轨顶面中心到边缘（横向）、起始检测端到结束端（纵向），颜色按设定梯度平稳渐变；无孤立异色斑块、色阶跳变，颜色区间贴合标准轨面漏磁值统计范围，视觉呈现顺滑、可预测的渐变效果，如图1所示。



图1 正常轨顶面漏磁检测颜色图谱

6.3.2 非正常钢轨漏磁检测数据特征

6.3.2.1 裂纹

裂纹对应轨顶面位置的多通道颜色同步线性异常：裂纹破坏轨顶面连续磁路，各检测通道在裂纹区域同步出现颜色突变，于正常颜色带中形成线性异色斑块；异常色块呈狭长带状，空间形态、位置在通道间高度匹配，与裂纹走向、延展方向精准对应，如图2所示。

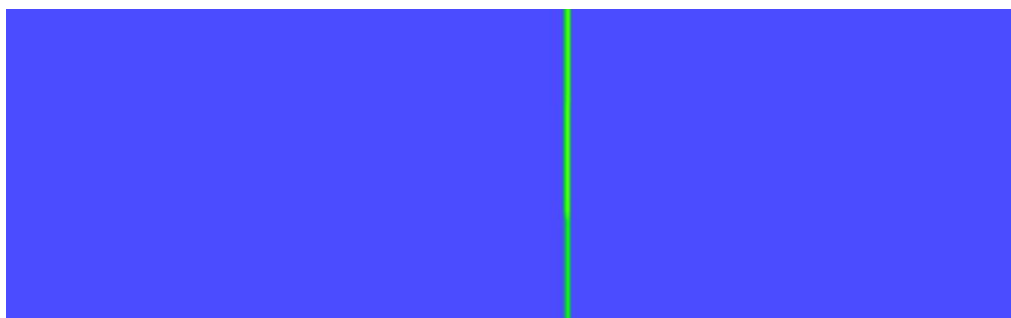


图2 裂纹损伤轨顶面漏磁检测颜色图谱

6.3.2.2 锈蚀

锈蚀对应轨顶面位置的多通道颜色局部弥散异常：锈蚀造成轨顶面表层磁导率不均，各检测通道在锈蚀区域呈现区域性模糊色斑，异常色块呈弥散状分布、边界柔和，多通道间异常位置对应但形态松散，无明显线性走向，如图3所示。



图3 锈蚀损伤轨顶面漏磁检测颜色图谱

6.3.2.3 坑洞

坑洞对应轨顶面位置的多通道颜色局部集中突变：坑洞引发轨顶面局部磁路突变，各检测通道在坑洞区域出现点状或块状高亮异色区，异常色块边界清晰、范围集中，多通道间异常位置高度重合，与坑洞轮廓匹配，如图4所示。



图4 坑洞损伤轨顶面漏磁检测颜色图谱

7 安全措施及保障

7.1 严格依据铁路建养管理相关规程，完成进场作业申请或报备流程。技术人员进场前，需开展安全教育培训，涵盖铁路作业安全规范、检测设备操作风险及应急处置要点。

7.2 检测作业前，按规范对金刚石氮-空位色心量子钢轨轨顶面裂纹检测系统的仪器设备完成登记、校验，确保设备状态合规、可追溯。

7.3 实施轨顶面检测作业时，在保障安全前提下开展工作。现场除检测技术人员外，配备至少1名专职安全员，负责全程监控作业环境、人员操作合规性，及时制止不安全行为，处理突发安全隐患。

7.4 检测作业前，成立安全生产管理领导小组，明确组长、安全员、技术人员等岗位安全职责，建立“岗位-责任-考核”一体化安全岗位责任制。细化各环节安全要求，进行安全生产检查，制定好应急处置措施，确保安全管理覆盖检测全流程。

8 数据安全

8.1 检测方结合轨顶面检测工程特性与需求，对检测数据划分三级密级：

- 保密数据：涉及铁路运营安全的高度敏感信息，泄露将直接威胁铁路运营安全、公共安全，或损害铁路运营单位核心权益；
- 内部数据：仅限公司或部门内部流通，对外扩散可能影响公司权益；
- 公开数据：向社会公众披露的一般性信息。

8.2 制定检测数据传输-使用-存储-销毁全周期管理制度，明确各环节操作规范与审批流程。传输采用加密通道，使用需实名授权，存储区分密级归档，销毁执行不可逆清除，确保数据“不遗失、无外泄”。

8.3 依据数据密级与内部管理要求，采用分级存储策略。保密数据专人专管、离线备份；内部数据本地加密存储；公开数据按需云存。定期校验数据完整性，保障随时可调用、可追溯。

8.4 检测数据同步移交相关部门，按密级实施“物理+逻辑”双重隔离管理。保密数据单独建档、异地备份；内部数据分区存储、权限管控；公开数据标签化管理，确保备份数据安全可控。

9 检测报告

- a) 检测报告需完整、准确反映轨面检测全流程，从数据采集到结论输出，真实还原检测结果，支撑铁路运维决策；
- b) 检测报告内容应包括：
 - 工程背景：说明检测区段、轨面基本信息、检测目的；
 - 技术原理：简述钢轨裂纹金刚石 NV 色心量子无损检测技术逻辑；
 - 检测方案：包含设备参数、检测流程、布点规划；
 - 现场检测：记录作业环境、设备运行、异常情况；
 - 数据分析：对比正常/非正常轨面数据特征；
 - 结论建议：明确轨面损伤判定、运维处置意见。
- c) 报告中检测数据需与原始存储数据 1:1 还原，严禁篡改、伪造，确保数据可追溯、可复核；
- d) 报告编制实行“三级管控”：专业技术人员编写、项目负责人审核、总工程师审批，确保报告质量符合铁路运维标准；
- e) 检测报告格式见附录 B。

附 录 A
(资料性)
检测记录表

检测记录表宜按照表A.1的格式记录。

表 A.1 检测记录表

工程名称			检测日期	
设备名称及编号			天气情况	
现场环境			检测方法	金刚石NV色心量子 无损检测法
钢轨类型				
测区起点里程号		测区终点里程号		特殊情况说明
轨面长度 (m)		轨面宽度 (m)		
采样间隔		采样长度		
检测测线布置示意图 (可手绘或插入简图, 描述测线在钢轨表面分布)				
备注				

检测/记录:

复核:

附 录 B
(资料性)
检测报告

检测报告宜按照如下格式记录：

XXX项目检测报告

一、工程背景

(本部分主要介绍工程概况，包括工程名称、工程位置、检测对象、检测要求、检测时间等。)

二、方法技术原理

(本部分主要介绍检测过程中涉及到的全部检测方法和技术原理，为检测结论提供理论支撑。)

三、检测方案

(本部分主要介绍通过对工程概况的了解和相关辅助资料的掌握而制定的检测方案，包含检测过程中的仪器设备、技术人员、测线布置等。)

四、现场检测

(本部分主要介绍现场检测的作业基本情况，建议附上现场检测照片。)

五、数据分析

(本部分主要介绍对检测原始数据的处理、分析和解译。)

六、结论及建议

(本部分应客观、完整、准确地总结检测结果，并针对检测结果提出相关的整治处理建议。)