

附件 2

《基于金刚石氮-空位色心的钢轨顶面裂纹检测技术规程》团体标准（征求意见稿）

编制说明

1、工作简况

1.1 编制依据

根据中国计量测试学会下达《中国计量测试学会关于征集 2026 年度第一批团体标准立项计划的通知》（量学发(2026)2 号)项目的要求，由中国计量测试学会归口，并由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共同起草《基于金刚石氮-空位色心的钢轨损伤检测技术规程》。

本标准为首次制定。

1.2 制修订本标准的必要性

量子信息技术发展已成为十四五以来国家科技战略之一，2025 年 10 月“十五五”规划建议提出“前瞻布局未来产业，探索多元技术路线、典型应用场景、可行商业模式、市场监管规则，推动量子科技、生物制造、氢能和核聚变能、脑机接口、具身智能、第六代移动通信等成为新的经济增长点”。随着量子传感技术的不断进步，基于量子传感的检测技术在轨道检测开展应用试点，精确的检测设备在钢轨表面

裂纹有着广泛的应用前景。制定相应的操作规程团体标准有助于推动新兴量子检测应用发展。而标准制定确保技术兼容性和互操作性，从而促进技术的互操作性和可交换性，推动量子技术应用与行业的进步，加速形成新经济增长点。

钢轨是铁路线路的重要装备，钢轨的健康状况直接影响客、货运输的安全。钢轨在运营过程中，由于受到列车车轮的辗压和冲击，钢轨的表面或内部会萌生疲劳裂纹，疲劳裂纹扩展到危及钢轨安全使用前如果不能及时发现，会导致钢轨折断，造成重大安全事故。钢轨裂纹量子精密检测技术是基于量子传感检测的有效技术手段和措施，对保证铁路运输安全具有重大的意义。

1.3 编制过程

在本标准的编制过程中，完成了大量的基础研究和编写工作。本标准编制过程概要如下：

(1) 标准计划下达后，在归口单位组织下，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成立了标准起草组，启动了标准的编写工作，明确了工作组成员任务分工，确定了标准编制原则，制定了相应的编制计划。工作组对我国在在役钢轨母材无损检测情况进行了调研，收集了相关技术资料，在对前期工作深入讨论研究后，2026年3月形成了本标准的征求意见稿。

2、编制原则

2.1 标准格式统一、规范，符合《中华人民共和国标准法》、《中华人民共和国质量法》等法律法规规定，符合 GB/T 1.1-2020 要求。

2.2 标准内容符合统一性、协调性、适用性、一致性、规范性要求。

2.3 标准技术内容安全可靠、成熟稳定、经济适用、科学先进、节能环保，有较高的检测效率、较低成本。

2.4 标准实施后有利于提高铁路产品质量、保障运输安全，符合铁路行业发展需求。

3、主要技术参数的论述

3.1 检出率

金刚石氮-空位色心量子钢轨损伤检测系统对深度不低于 100 μm 的钢轨损伤的检出率不低于 90%。

本参数的确定依据基于以下四个方面的综合考虑：

(1) 现场试验数据支撑：标准起草组于 2025 年 9 月至 2026 年 2 月期间，在高速铁路建造技术国家工程研究中心钢轨伤损模拟试验线上开展了系统性检测试验。试验采用含人工预制裂纹（深度分别为 50 μm 、100 μm 、150 μm 、200 μm ，宽度 0.2mm）的钢轨试件，在检测速度为 10km/h 的条件下，对每种深度裂纹各进行 500 次重复检测。试验结果表明：50 μm 深度裂纹检出率约为 76%，100 μm 深度裂纹检出率为 92.3%，150 μm 及以上深度裂纹检出率达 98% 以上。综合考虑技术可靠性和实际应用需求，选定 100 μm 深度作为检出率考核基准，对应检出率不低于 90%。

(2) 行业标准对标：参照《钢轨探伤管理规则》（铁运〔2006〕200 号）关于钢轨探伤作业质量管控的要求，以及现有钢轨无损检测设备的检出性能指标（钢轨超声检测设备对轨头内部缺陷的检出率一般为 85%~90%，钢轨探伤车对轨头表面缺陷的检出率约为 80%~85%）。本标准将检出率设定为不低于 90%，体现了量子无损检测技术的先进性。

(3) 钢轨安全运营需求：根据中国铁路总公司《钢轨

伤损判定及处理规则》，深度超过 $100\ \mu\text{m}$ 的表面裂纹应列为伤损并纳入监测或处置范围。本标准以 $100\ \mu\text{m}$ 深度裂纹作为检出基准，与铁路运维管理要求相匹配。

(4) 技术可行性边界：NV 色心量子传感器的磁场灵敏度可达 nT 级，理论上可检测微米级裂纹产生的漏磁场变化。但受限现场环境电磁噪声 ($\leq 5\ \mu\text{T}$)、钢轨表面清洁度及检测速度等因素，将检出率定为 90% 是在保证检测效率前提下的合理技术指标，当前技术条件下具备可实施性。

3.2 定位精度

金刚石氮-空位色心量子钢轨损伤检测系统的定位精度为 $\text{CEP}_{50}=2.5\text{m}$ 。

本参数的确定依据如下：

(1) 现场动态测试数据：起草组在 10km/h 检测速度条件下，采用北斗/GNSS 双模定位模块（支持差分增强，型号为 UM980）进行动态定位精度测试。测试在铁路现场进行（包含隧道、路堑、开阔地段等不同环境），共采集 200 组已知坐标的检测点数据。动态测试结果显示：圆概率误差 (CEP_{50}) 均值为 2.3m ，其中开阔地段可达 1.5m ，隧道段约为 3.0m 。综合考虑不同环境的实际表现，将 CEP_{50} 设定为 2.5m 。

(2) 铁路工务管理需求：根据《铁路线路修理规则》及工务轨道病害管理要求，钢轨伤损的里程定位误差不应大于 3m ，以便于现场复核、台账录入及维修处置。 2.5m 的定位精度能够满足上述管理需求。

(3) 行业设备惯例：参考铁路工务移动检测设备（如轨检车、探伤车等）的定位精度指标，常规 GPS/北斗定位系统在动态条件下的定位精度一般为 $2\text{m}\sim 5\text{m}$ 。本标准选取 2.5m ，处于行业通用水平，具有合理性和适用性。

(4) 兼顾现场工况：检测过程中的车体振动、卫星信号遮挡（如隧道、树木遮挡等）、多路径效应等工况会降低定位精度。设定 $\text{CEP}_{50}=2.5\text{m}$ 为系统在多数工况下应达到的统计精度，标准同时要求可采用差分增强定位以改善精度，体现了标准的现实可行性。

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。

参数确定依据:

(1) 伤损分布规律: 据中国铁路总公司 2017—2025 年钢轨伤损统计年报, 轨顶面裂纹(含剥离、掉块、锈蚀等)约占钢轨总伤损数量的 42%, 是钢轨最易出现损伤的区域。优先检测轨顶面符合“高风险区域优先覆盖”的安全管理原则。

(2) 技术原理约束: 本检测技术基于漏磁检测原理, 需采用磁化装置在钢轨表面产生饱和或近饱和磁场。轨顶面为平面或略带弧面, 易于磁化装置和传感器的布置与耦合。而轨头两侧圆弧及轨底部位几何形状复杂, 磁化及传感器接触条件恶劣, 当前技术条件下难以保证检测可靠性。

(3) 与其他标准的协调: 钢轨超声检测方法(GB/T 43888—2024)主要针对钢轨内部伤损(核伤、螺孔裂纹等)及轨底缺陷检测, 与本标准形成了“内外互补”的检测体系。本标准明确检测范围为轨顶面, 既体现了技术特长, 又避免了与其他标准的重复或冲突。

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检测速度最高 10km/h。

参数确定依据:

本参数的确定综合考虑了技术限制、安全规范和适用场景, 具体依据如下:

(1) 传感响应速度限制

金刚石 NV 色心量子传感器基于光致发光原理, 需在激光激发下采集荧光信号并进行锁相解调。NV 色心的荧光寿命约为 10ns ~ 100ns, 单点积分采样时间受限于所需信噪比($\geq 12\text{dB}$)。在保证数据质量的前提下, 采样时间对移动速度形成约束。理论计算表明, 为达到检出率 $\geq 90\%$ 所需的信噪比, 传感器在钢轨纵向的等效积分长度约为 5mm, 由此反推最大

允许检测速度为:

$$V_{\max} = \text{等效积分长度} / \text{最小采样时间} \approx 5\text{mm} / (1/550\text{Hz}) = 2.78\text{m/s} = 10\text{km/h}$$

(2) 信号采集与处理带宽限制

检测系统采用阵列式传感器（不少于8通道），每个采样点需同步采集多路信号，经模数转换（ADC采样率不低于1MHz）和实时处理（含滤波、放大、锁相解调、模数转换等）。信号采集模块的硬件设计最大数据处理能力约为550次/秒·通道。在10km/h（ $\approx 2.78\text{m/s}$ ）速度下，若空间采样间隔为5mm，则采样频率为：

$$f = v / \Delta x = 2.78\text{m/s} / 0.005\text{m} = 556\text{Hz}$$

该频率处于信号采集模块的稳定工作带宽上限内。当检测速度超过10km/h时，采样频率需高于700Hz，将导致数据采集模块超负荷运行，产生数据丢包或信噪比下降（实测信噪比下降约3dB~5dB），影响检测可靠性。

(3) 空间采样密度约束

为保证对深度 $\geq 100\mu\text{m}$ 裂纹的检出率（ $\geq 90\%$ ）和定位精度（CEP50=2.5m），需在检测方向（钢轨纵向）保持不低于5mm的空间采样间隔。这是因为100 μm 深度裂纹产生的漏磁场空间分布宽度约为5mm~10mm。根据奈奎斯特采样定理，采样间隔应不大于信号空间周期的1/2。10km/h对应的采样间隔5mm，满足采样定理要求；超过10km/h时采样间隔将大于5mm，可能漏检宽度较窄的裂纹。

(4) 钢轨磁化与退磁时间限制

检测系统采用永磁体或电磁铁对钢轨进行局部磁化。钢轨材料为高碳钢（典型牌号U75V、U78CrV），磁化过程需一定时间以达到饱和磁化强度。当检测速度超过10km/h时，钢轨通过磁化装置的时间过短，可能导致磁化不足，漏磁场强度下降，影响检出率。

(5) 安全作业规范限制

参照《铁路工务安全规则》（铁总运〔2015〕218号）及《钢轨探伤管理规则》（铁运〔2006〕200号），钢轨探伤作业在普通线路地段推行速度一般不大于2km/h，无缝线路地段不大于3km/h。本标准规定的10km/h显著高于上述速

度，但需说明：

适用场景不同：10km/h 主要适用于“营业线天窗点内精细化探伤、重点区段专项检测及病害复核”等场景，而非日常巡检测速。日常巡检仍应遵守既有安全规范。

天窗时间内作业：营业线天窗点一般 2~4 小时，10km/h 速度下可完成 20km~40km 重点区段检测，作业效率与天窗时间匹配。

安全冗余：检测车具备制动系统和警示装置，操作人员不少于 2 人（一人负责移动及轨面适配，另一人负责系统监控），确保在 10km/h 速度下具备紧急制动和避让能力。

（6）技术互补性定位

对于野外长距离大面积普查检测场景，本标准不推荐单独使用本检测系统，而是建议采用双轨式超声波检测系统（检测速度可达 15km/h~30km/h）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。这种“普查+精查”的技术互补模式，克服了 10km/h 单独使用的效率短板，增强了标准的实际可用性。

综合结论：10km/h 的检测速度是在当前量子传感技术水平下，综合考虑传感响应速度、信号处理带宽、空间采样密度、磁化时间及安全规范等因素确定的合理上限值。该速度能够保证对深度 $\geq 100 \mu\text{m}$ 裂纹的检出率 $\geq 90\%$ ，满足天窗点内精细化检测的作业效率要求。未来随着硬件升级（如更高速 ADC、更高灵敏度传感器），该指标可在标准修订时适时提高。

4、关键指标和预期效益

本标准规定了适用于钢轨裂纹量子精密检测技术的钢轨类型，规定了钢轨裂纹量子精密检测系统的检测范围。标准规定了钢轨裂纹量子精密检测系统的准确率、定位精度、检测速度以及采样频率，使得本标准规定的检测规程能够更好的显现出钢轨裂纹量子精密检测方法的优点，能够更广泛地适应于我国铁路、地铁和城市轻轨等在役钢轨母材内部缺陷的量子精密检测，使得量子精密检测技术在钢轨无损检测领域得到更好的推广。

5、与国际、国内标准的一致性

本标准兼容了 TB/T 449-2015 《铁路钢轨伤损分类及编码》标准的缺陷分类方法。参考了 GB/T 43888-2024 《钢轨超声检测方法》的报告格式，补充钢轨表面裂纹检测方法，填补表面裂纹检测标准空白，实现量子检测与传统超声检测结果互认。参考了 GB/T 39694-2020 《量子精密测量 术语》、GB/T 15822.1-2024 无损检测 磁粉检测 第 1 部分：总则，统一核心术语，保障技术交流一致性。

6、标准涉及专利情况

本团体标准在起草过程中，根据《中华人民共和国标准化法》《国家标准涉及专利的管理规定（暂行）》及中国计量测试学会团体标准知识产权管理要求，对标准可能涉及的专利技术进行了审慎排查与处置。

本团体标准仅规范基于金刚石氮-空位色心的钢轨损伤检测技术的作业流程、判定规则与通用操作方法，未纳入设备结构、算法原理、器件设计等具体技术细节。经全面排查梳理，标准条文本本身不包含专利专属技术方案。

标准依托量子传感检测相关成熟专利技术体系开展编制，起草单位拥有对应检测方法范畴相关发明专利，专利技术为行业通用检测原理基础，未将专利独有技术参数、专属实现方式写入标准条款。

相关专利权人承诺遵循公平、合理、无歧视原则，面向行业依规提供专利实施许可，标准实施过程不存在专利壁垒与侵权隐患。

本标准以统一检测作业方法为核心，无专属专利技术细节内容，知识产权风险可控，符合团体标准制定相关知识产权管理规范。

7、有无重大分歧意见

无。

8、实施标准的要求和措施建议

建议本标准在批准发布后 6 个月实施。

本标准发布后实施前，建议执行新国家标准。

为使本标准得到实际的广泛应用，建议本标准在颁布实施后，相关单位积极开展标准宣贯和推广工作，使标准使用者正确理解标准的技术内容和相关要求，推动标准的实施。同时，积极监督标准实施情况，鼓励标准相关方及时反馈问题并答复。

标准起草组

2026 年 5 月