

核电厂橡胶膨胀节老化状态多维度评估与决策方法研究

许小斌¹, 薛春旭², 刘元庆¹, 韩传伟², 杨龙龙¹, 朱雅洁²

(1. 阳江核电有限公司, 广东 阳江 529500;

2. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004)

摘要: 针对核电厂循环水系统(CRF)橡胶膨胀节传统“定期目视检查+固定周期更换”模式存在的表面检查局限性和维修策略经济性不足等问题, 本研究旨在建立一套多维度、标准化的老化探测技术体系。通过优化传统检查方法, 研究提出了四大核心模块: 首先, 构建了包含缺陷分级、响应策略及典型缺陷图谱的量化目视检查标准; 其次, 建立了基于基准值的动态硬度分析评估体系, 将硬度变化划分为正常区、监控区和超标区, 并制定了差异化管理对策; 再次, 开发了标准化的叩诊检查流程与“声音图谱”分级评判准则, 实现对内部缺陷的快速定性筛查; 最后, 为避免单一指标误判, 设计了综合目视、硬度、叩诊结果的综合决策矩阵, 实现了对膨胀节健康状态的精准分级和维修决策的科学指导。该技术体系将主观检查转化为标准化、可量化、可追溯的科学管理过程, 为实现核电厂关键橡胶部件老化状态的“可知、可控、在控”提供了有效技术支撑, 显著提升了设备管理的安全性与经济性。

关键词: 橡胶膨胀节; 老化探测; 多维度技术; 状态评估; 决策矩阵

引用论文: 许小斌, 薛春旭, 刘元庆, 等. 核电厂橡胶膨胀节老化状态多维度评估与决策方法研究[J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(3):57-62.

中图分类号: TQ330.7

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2026)10-0057-06

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.10.011

核电厂循环水系统(CRF)橡胶膨胀节作为吸收位移、隔离振动的关键柔性部件, 其老化失效可能引发泄漏链式反应。传统“定期目视检查+固定周期更换”模式存在两大缺陷: 第一, 表面检查具有局限性, 其无法识别内部脱层、织物腐蚀等隐性损伤; 第二, “一刀切”的更换模式可能导致性能良好部件过修或突发失效欠修^[1-5]。本研究旨在建立多维度探测技术体系, 实现核电厂循环水系统膨胀节老化状态的“可知、可控、在控”。

1 目视检查量化分析

核电厂对循环水系统橡胶膨胀节的检查, 通常是在计划性停机大修期间进行。传统的目视检查主要依赖经验丰富的现场检修人员和相对简单的工具(如手电筒等)。目视检查的局限性在于只能发现表面缺陷, 对于内部的早期分层、气泡或者材料老化, 无法有效发现。同时, 目视检查缺乏量化数据, 无法对老化程度进行定量评估。

针对当前目视检查的局限性, 开展了针对性的优化工作, 主要分为三个部分。

1.1 总体评判准则与原则

基于循环水系统橡胶膨胀节的功能特性, 建立针对该橡胶膨胀节的总体评判准则与原则, 见表1。

1.2 缺陷分级与响应策略

结合电厂大修期间对橡胶膨胀节内外层橡胶的状态检查结果, 将橡胶膨胀节可视缺陷分为四个等级, 并制定明确的响应策略, 见表2。

1.3 膨胀节可视缺陷识别图谱

针对大修检查发现的橡胶膨胀节缺陷, 对其进行缺陷分类并制定每种缺陷的可视图谱, 用于指导现场识别, 见表3~5。

2 硬度检查动态分析评估

目前核电厂在大修停机期间, 由经验丰富的现场检修人员使用便携式邵氏硬度计开展橡胶膨胀节的硬度测试。当前电厂对橡胶膨胀节的硬度检查缺乏可接

作者简介: 许小斌(1979—), 男, 本科, 工程师, 机械维修容器专业副主任工程师, 主要从事核电厂容器设备机械维修工作。

表 1 目视检查总体评判准则与原则

原则	具体内容
安全第一原则	任何可能立即导致泄漏或失效的缺陷（IV 级）均应被视为最高优先级，立即采取停机隔离措施。
记录溯源原则	所有检查必须有详细记录，包括缺陷位置、尺寸、形态及照片，建立“一节一档”的健康档案，便于趋势分析。
综合判断原则	不应仅凭单一缺陷下结论，需结合设备运行年限、历史数据、工况参数（温度、压力等）及其他检测结果（如硬度、叩诊）进行综合评估。
动态管理原则	缺陷是发展的，II 级和 III 级缺陷必须加强监控，其发展速度是决定下一步对策的关键。

表 2 缺陷分级与响应策略

缺陷等级	等级定义	响应策略
I 级	正常 / 轻微	记录与归档：属于正常制造痕迹或极早期轻微老化，不影响安全运行。记录在案，纳入例行检查。
II 级	监控 / 注意	加强监测：已出现明确老化或损伤迹象，但发展缓慢，短期内无风险。需缩短检查周期（如从 1 次 /2C 缩短至 1 次 /1C），并密切观察其变化趋势。
III 级	显著 / 计划	计划维修 / 更换：缺陷已对膨胀节的性能和寿命构成显著影响，存在中期风险。必须制定详细的维修或更换计划，在下一个计划性停机窗口期内执行。
IV 级	严重 / 紧急	立即停机处理：缺陷已达到或接近失效状态，随时可能发生泄漏或破裂，对设备和人员安全构成直接威胁。必须立即停机、隔离，并尽快进行更换。

表 3 表面裂纹分级图谱

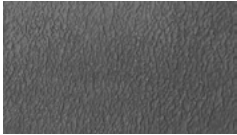
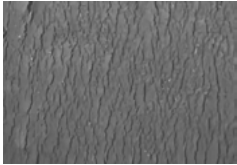
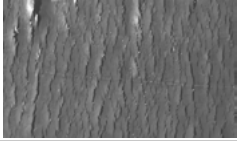
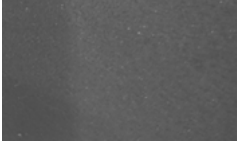
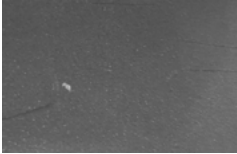
典型外观	常见位置	分级判定标准	图示
臭氧龟裂 呈无数细小、密集的网状或龟纹状裂纹。仅限于橡胶表面，深度较浅。	通常暴露在空气中的非应力集中区域，如膨胀节外层橡胶。	I 级：裂纹非常细微，仅在近距离仔细观察下可见，无集中现象。	
		II 级：裂纹清晰可见，形成网状，区域直径小于 50 mm，表面无剥离。	
		III 级：裂纹粗大，网状区域直径超过 50 mm，或出现局部密集的、走向一致的裂纹，并有轻微起皮现象。	
		IV 级：裂纹深且宽，已穿透橡胶层，露出帘子布，或大面积剥离。	
疲劳裂纹 呈单个或少数几条，有明确走向，其垂直于应力方向，从表面向内部发展。	通常位于高应力集中区域，如膨胀节的波峰和波谷处，特别是内侧。	I 级：无可见裂纹。	
		II 级：出现长度小于 10 mm 的单一细微裂纹，用指甲感觉无深度。	
		III 级：裂纹长度在 10~50 mm 之间，或有多条平行短裂纹，可探入一定深度。	
		IV 级：裂纹长度超过 50 mm，或已穿透管壁，或有分支现象。	

表 4 鼓包分级图谱

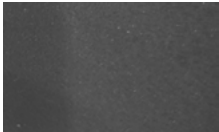
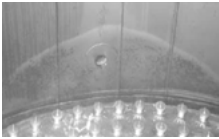
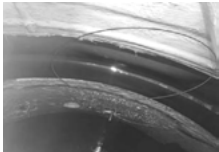
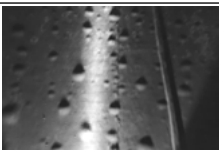
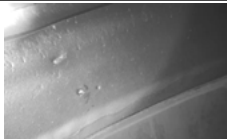
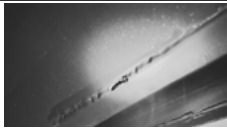
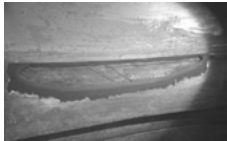
典型外观	常见位置	分级判定标准	图示
1. 表面局部隆起，形成鼓包或气泡。 2. 按压时有柔软感或气体流动感。	1. 膨胀节内层橡胶，尤其是承受循环压力和变形的区域。 2. 制造过程中可能存在的薄弱点。	I 级：无起泡或鼓包。	
		II 级：出现单个直径小于 20 mm 的孤立小鼓包，表面无破损。	
		III 级：出现多个鼓包，或单个鼓包直径在 20 ~50 mm 之间，鼓包表面有轻微裂纹。	
		IV 级：鼓包直径超过 50 mm，或已破裂，有介质渗出，或多个鼓包连成一片。	

表 5 磨损凹坑分级图谱

典型外观	常见位置	分级判定标准	图示
橡胶表面因摩擦而变薄、出现凹坑，甚至露出帘子布。	膨胀节内层橡胶，尤其是承受循环压力和变形的区域。	I 级：表面轻微擦伤，未伤及橡胶本体。	
		II 级：橡胶表面磨损深度小于 1 mm，面积小于 100 cm²。	
		III 级：磨损深度在 1~2 mm 之间，或已部分露出帘子布。	
		IV 级：帘子布大面积磨损、断裂，或磨损深度超过 2 mm。	

受准则的建立或对于已建立的可接受准则，未对硬度变化的趋势进行适当的干预与处理，缺乏对已出现的硬度变化进行及时的风险防范。

针对当前硬度检查的局限性，开展了针对性的优化工作，主要分为两个部分。

2.1 核心原则与基准确立

橡胶膨胀节的硬度评判须基于明确的“基准值”，即橡胶膨胀节的出厂质量证明书上提供的硬度数据。若无法获取出厂质量证明书上硬度数据时，则可通过获取与该膨胀节同批次、同工艺的留样，在实验室

环境下测得的硬度表征值作为基准硬度值，抑或获取同型号、同制造商的新备品的硬度表征值为基准硬度值。

举例：根据橡胶膨胀节生产厂商所提供的质量文件，某核电厂循环水系统橡胶膨胀节所用氯丁橡胶及三元乙丙橡胶的出厂硬度标准值为（62±5）Shore A。

硬度测试需执行标准化测试流程，使用经校准的邵氏 A 硬度计，在膨胀节表面选择至少 5 个具有代表性的测试点，如：波峰、波谷、法兰根部等。测试时橡胶表面温度应尽量接近环境温度（建议在 25±5℃），

并记录每次大修应在相同或相近位置测量，以便趋势分析。
以基准值为中心，将硬度测量结果划分为三个区域：正常区、监控区、超标区，见表 6。

2.2 硬度可接受准则分级

表 6 硬度可接受准则分级

区域名称	硬度变化范围 (相对于基准值)	评判标准与含义
I 正常区	$\Delta HA \leq \pm 8$	可接受： 1. 硬度在正常制造公差和早期轻微老化范围内。 2. 表明材料性能稳定，未发生显著老化。 对策： 记录数据，形成趋势变化，按原定周期进行下一次检查。 需关注：
II 监控区	$\pm 8 < \Delta HA \leq \pm 15$	1. 表明橡胶材料已发生明显老化（后硫化、氧化等）。 2. 虽然短期内可能不影响安全，但已进入性能快速衰减阶段。 对策： 3. 加强监测：缩短检查周期（如从 2C 检查调整为 1C 检查）。 4. 趋势分析：重点分析历次数据的变化速率。若变化速率加快，风险等级提高。 5. 关联检查：必须结合目视、叩诊进行综合评估。
III 超标区	$\Delta HA > \pm 15$	不可接受 / 需行动： 1. 表明橡胶材料已严重硬化 / 溶胀，其拉伸强度、断裂伸长率等关键性能可能已大幅下降，脆性增加，极易在应力下开裂。 2. 存在较高的安全风险。 对策： 3. 立即评估：必须立即组织专家进行现场评估。 4. 制定更换计划：原则上应在该运行周期结束后的首次计划性停机窗口期内进行更换。 5. 限制条件：在更换前，应严格控制运行参数（如压力、温度波动），并增加在线监测频率。

3 叩诊声谱标准化

叩诊检查即使用标准工具（如专用叩诊锤）敲击膨胀节表面，通过聆听和感受其声音响应和振动反馈，来定性判断内部结构（如分层、鼓包）和材料状态（如硬化）的一种快速检测方法。叩诊检查作为最快捷、成本最低的初步筛查手段，可用于快速发现重大异常，可为目视检查提供“靶向”区域，有助于后续修复等

工作处理。叩诊检查的局限性在于缺乏量化数据，无法对老化程度进行定量评估。

针对当前叩诊检查的局限性，开展了针对性的优化工作，主要分为两个部分。

3.1 标准化操作规程

结合实验室的叩诊检查方式模拟，对叩诊检查工作制定标准化流程，见表 7。

表 7 标准化操作规程

序号	要求	执行规范
1	标准化工具	叩诊锤：规定使用统一重量、锤头材质和形状的专用叩诊锤（如：头部直径约 20 mm 的尼龙或硬质橡胶锤）。严禁使用金属锤或其他随意工具。 标记工具：使用可移除的记号笔或粉笔。
2	环境要求	背景噪音：尽量在背景噪音较小的环境下进行 表面状态：待检表面应清洁、干燥，无泥沙等，以免影响声音传导。 基准对比法：在任何区域检查前，先选择一个外观完好、位于低应力区的位置（如橡胶膨胀节波峰位置平缓区域）作为“基准区”，轻敲几下，记住其“正常声”。
3	操作方法	网格化敲击：按照“从上到下、从左到右”的顺序，以约 10~15 cm 的间距，系统性地、有重叠地对整个膨胀节表面进行敲击。 力度一致：保持每次敲击的力度基本一致。力度以能发出清晰声音为准，不必过重，同时通过手握住锤柄感受振动反馈
4	记录与报告	现场标记：发现任何“异常声”或“严重异常声”区域，立即进行现场标记。 绘制图谱：在检查记录表上，绘制膨胀节的简易展开图，在图上准确标记出异常区域的位置、大致范围和等级。 文字描述：用标准化的词汇描述声音（如“沉闷有回响”、“尖锐高亢”），避免使用模糊描述。

3.2 评判准则 ——“声音图谱”分级

结合试验结果，将叩诊的声音和手感分为三个等级，并赋予明确的物理含义和响应策略，见表 8。

结合，通过决策矩阵避免“一刀切”，使最终的维修决策更加科学、精准和经济。

通过上述图谱和准则等的实施，可以将对循环水系统大型橡胶膨胀节的各项主观检查，转化为一个标准化、可量化、可追溯的科学管理过程，从而极大提升设备管理的安全性和经济性。

4 综合决策矩阵

硬度检查、目视检查与叩诊检查的结果必须相互

表 8 “声音图谱”分级

等级	等级一：正常声	等级二：异常声	等级三：严重异常声
声音特征	清脆、坚实、短促 1. 声音类似敲击优质实心轮胎。 2. 声音响应快，无拖尾余音。 3. 在整个表面声音均匀一致。	沉闷、空洞、有回响 1. 声音类似敲击中空的木板或鼓面。 2. 有“噗噗”或“梆梆”的振动感和余音。 3. 声音与健康区域对比差异明显。	极其尖锐、高亢或极其软弱、湿黏 1. 尖锐声：类似敲击硬质塑料，完全失去弹性感。 2. 软弱声：声音发“死”，感觉内部材料已松散、失去强度。
物理含义	1. 橡胶与帘子布层间粘结良好。 2. 内部无空洞、分层或鼓包。 3. 材料整体状态均匀、健康。	1. 存在内部分层、鼓包或帘子布脱粘。 2. 敲击能量无法在内部有效传递，形成空腔共振。	1. 严重硬化、脆化，材料已丧失弹性。 2. 或内部发生严重的化学腐蚀、降解，结构强度已严重下降。
响应对策	记录，继续检查 1. 判定为正常状态。 2. 在检查记录表上标记为“叩诊正常”。	标记，重点复查 1. 立即用粉笔或可移除标记笔在膨胀节表面圈出异常区域。 2. 在记录表上详细记录位置、范围和声音特征。 3. 必须将该区域列为后续检测与修复的重点。	上报，立即评估 1. 停止对该区域的敲击，避免诱发损伤。 2. 隔离该区域，由专家团队进行综合评估（结合硬度计测量、目视检查），决定是否需紧急处理。

表 9 综合决策矩阵

综合评价	综合等级	核心判定逻辑	综合建议措施
健康 / 正常	A	所有检测指标均为 I 级。 (目视 I 级, 硬度 I 级, 叩诊 I 级)	记录与归档 1. 表明膨胀节处于良好状态, 按原定周期进行例行检查即可。
注意 / 监控	B	任一检测指标为 II 级, 且无 III 级或 IV 级指标出现。 (例如: 目视 II 级, 硬度 I 级, 叩诊 I 级)	加强监测 1. 缩短检查周期 (如从 1 次 /2C 缩短至 1 次 /1C)。 2. 密切观察缺陷发展趋势, 进行趋势分析。 3. 对异常区域进行标记, 作为下次检查重点。
预警 / 计划	C	目视指标为 III 级, 硬度和叩诊指标小于 III 级。 (例如: 目视 III 级, 硬度 II 级, 叩诊 II 级)	计划维修 / 更换 1. 缺陷已对性能和寿命构成显著影响, 存在中期风险。 2. 必须制定详细的维修或更换计划, 在下一个计划性停机窗口期内执行。 3. 在更换前, 应严格控制运行参数, 并增加监测频率。
紧急 / 危险	D	目视指标为 IV 级, 或其他任意指标为 III 级。 (例如: 目视 I 级, 硬度 I 级, 但叩诊 III 级; 或硬度 III 级超标)	停机处理 1. 表明存在直接安全威胁, 随时可能发生泄漏或破裂。 2. 必须立即停机、隔离, 并尽快组织专家进行现场评估和更换。

5 结论

本研究围绕核电厂循环水系统橡胶膨胀节老化探测的难题，系统性地开展传统检查方法的优化与标准化工作，成功构建了一套多维度探测技术体系。主要结论如下：

（1）实现了目视检查的量化与标准化。通过建立总体评判准则、缺陷四级分级与响应策略，以及针对臭氧龟裂、疲劳裂纹、鼓包、磨损凹坑等典型缺陷的可视化分级图谱，将依赖经验的目视检查转变为有据可依、可量化、可追溯的标准化流程，有效解决了传统目视检查无法识别内部隐性损伤和缺乏量化依据的问题。

（2）建立了硬度检查的动态评估模型。确立了以出厂数据为核心的硬度基准值，并创新性地将硬度变化划分为“正常区”“监控区”“超标区”三个等级，制定了针对性的监测、评估与更换策略，实现了从静态合格性判断到动态趋势分析的风险预警升级。

（3）规范了叩诊检查的操作与评判标准。通过制定标准化的叩诊操作方法并结合三级声音图谱，将快

速、便捷的叩诊检查提升为具有明确物理含义和响应策略的初步筛查手段，为发现内部脱层、鼓包等缺陷提供了高效检查方式。

（4）构建了多指标融合的综合决策机制。设计的综合决策矩阵有效整合了目视、硬度、叩诊三种检查结果，通过对设备健康状态进行综合评定，避免了单一指标导致的“过修”或“欠修”，实现了维修决策的科学化与精细化。

综上所述，本研究形成的多维度探测技术体系，能够全面、准确地评估核电厂橡胶膨胀节的老化状态，为实现设备状态修、延寿评估及风险预控提供了坚实的技术基础，对保障核电厂安全稳定运行具有重要的工程应用价值和现实意义。

参考文献：

[1] 尚鸣宇, 方正, 岳仁杰, 等. 核电站循环水系统橡胶膨胀节寿命预测 [C]// 中国力学大会—2025 论文集. 2025.
[2] 王力, 张玲, 于涛, 等. 橡胶膨胀节开裂原因分析 [J]. 理化检验: 物理分册, 2013(8):4.
[3] 李开盈, 尹开锯, 赵宇翔, 等. 核电站凝汽器喉部橡胶膨胀节的性能评价与使用寿命预测 [J]. Polymer Materials Science &

Engineering, 2024, 40(11).

[4] 齐艳丽, 田甜, 李海伦. 橡胶膨胀节和金属波纹管膨胀节的对比分析及研究 [J]. 东方文化周刊, 2014,(002):110-111.

[5] 龚燎原, 揭阳, 卞五洲. 700 MW 水内冷发电机纯水系统橡胶膨胀节的研究与应用 [J]. 水电站机电技术, 2022(007):045.

Research on multi-dimensional evaluation and decision-making methods for the aging state of rubber expansion joints in nuclear power plants

Xu Xiaobin¹, Xue Chunxu², Liu Yuanqing¹, Han Chuanwei², Yang Longlong¹, Zhu Yajie²

(1. Yangjiang Nuclear Power Co. LTD., Yangjiang 529500, Guangdong, China;

(2. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co. LTD., Suzhou 215004, Jiangsu, China)

Abstract: In view of the limitations of surface inspection and the insufficient economic efficiency of maintenance strategies in the traditional "regular visual inspection + fixed-cycle replacement" mode of rubber expansion joints in the circulating water system (CRF) of nuclear power plants, this study aims to establish a multi-dimensional and standardized aging detection technology system. By optimizing traditional inspection methods, four core modules are proposed: firstly, a quantitative visual inspection standard is constructed, including defect classification, response strategies, and typical defect maps; secondly, a dynamic hardness analysis and evaluation system based on benchmark values is established, which divides hardness changes into normal, monitoring, and out-of-specification zones, and formulates differentiated management measures; thirdly, a standardized percussion inspection process and "sound map" grading criteria are developed to achieve rapid qualitative screening of internal defects; finally, to avoid misjudgment based on a single indicator, a decision matrix integrating visual, hardness, and percussion results is designed, enabling precise grading of the health status of expansion joints and scientific guidance for maintenance decisions. This technology system transforms subjective inspection into a standardized, quantifiable, and traceable scientific management process, providing effective technical support for achieving "knowable, controllable, and in-control" aging status of key rubber components in nuclear power plants, significantly enhancing the safety and economy of equipment management.

Key words: rubber expansion joint; aging detection; multi-dimensional technology; condition assessment; decision matrix

(R-03)

《橡塑技术与装备》投稿邮箱: crte@chinarpte.com

欢迎投稿, 欢迎订阅, 欢迎惠登广告