

团 体 标 准

T/CNS 86—2022

核电厂凝汽器钛管涡流检测技术导则

**Technical guide for eddy current testing
in titanium tube of nuclear power plant condenser**

2022 - 12 - 16 发布

2023 - 04 - 01 实施

中国核学会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	1
5 一般要求	2
6 灵敏度调试	4
7 检测策略制定	4
8 检测	5
9 结果评定	6
10 报告	7
附录 A（资料性） 检测报告示例	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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国核学会提出。

本文件由核工业化研究所归口。

本文件起草单位：中广核惠州核电有限公司、苏州热工研究院有限公司、国核电站运行服务技术有限公司。

本文件主要起草人：陈东旭、范岩成、刘光杰、牟浩、张顺、严海、徐宁、周宇、童忠贵、梁鹏飞、王琛、陈蔚、刘晓睿、吴强。

核电厂凝汽器钛管涡流检测技术导则

1 范围

本文件描述了核电厂凝汽器钛管实施内穿过式涡流检测的方法。

本文件适用于温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、外径为 $15\text{ mm}\sim 40\text{ mm}$ 、壁厚为 $0.5\text{ mm}\sim 1.0\text{ mm}$ 的钛合金传热管的涡流检测，检测部位为钛管全长度全壁厚（管端盲区除外）。核电厂的闭式循环冷却器、低压加热器等非铁磁性传热管的涡流检测可参照执行。

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 12604.6 无损检测 术语 涡流检测
- NB/T 47013.1 承压设备无损检测 第1部分：通用要求
- NB/T 47013.6 承压设备无损检测 第6部分：涡流

3 术语和定义

GB/T 12604.6和NB/T 47013.1界定的术语和定义适用于本文件。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

- R: 钛管所在行号 (Row)；
- C: 钛管所在列号 (Col)；
- Leg I: 海水进口端 (Leg In)；
- Leg O: 海水出口端 (Leg Out)；
- NDD: 无降质显示，传热管内无降质信号或未存在降质前兆 (No Detectable Degradation)；
- DNT: 支撑板处凹陷 (Denting. Any denting signal under support plate)；
- DNG: 自由段处凹陷 (Ding. Any denting signal in the free zone)；
- PVN: 磁导率变化 (Permeability Variation)；
- DFI: 自由段处内伤或外伤信号 (Distorted Free Zone Indication. Distortion of signal excited by tube degradation in the free zone)；
- DSI: 支撑板处内伤或外伤信号 (Distorted Support Indication. Distortion of support signal excited by tube degradation located under support plate)；
- WAR: 支撑板处磨损 (Wear under support plate)；
- THN: 自由段处减薄 (Thin in the free zone)；
- WTB: 穿错管，实际壁厚与设计壁厚不符的管子 (Wrong thickness tubes)；
- OBS: 不通管，常规探头不能通过、不能全长检测的管子 (Obstructed)；
- PLU: 堵管 (Plugged tubes)。

5 一般要求

5.1 检测人员

5.1.1 执行凝汽器钛管涡流检测的采集人员与分析人员，应具有国家市场监督管理总局、省市场监督管理局、电力行业电力锅炉压力容器安全监督管理委员会或国家核安全局考核颁发的有效期内的涡流检测资格证书。

5.1.2 I级人员应在II级或III级人员的监督指导下执行检测操作，II级及以上级别人员可以执行检测操作、评定检测结果、编写或审核检测报告。

5.1.3 涡流检测辅助人员无持证要求，但人员上岗前应进行工作流程工业安全相关的内部培训及实操演练。

5.2 检测设备

5.2.1 用于凝汽器钛管涡流检测的仪器应具有下列特性：

- 能够在探头线圈中产生频率范围为 10 kHz~1 MHz 的谐波电流。
- 可同时激励 4 个或 4 个以上的检测频率，能够以差分 and 绝对两种模式工作。
- 能够提供凝汽器钛管检测所需的采样率（100~3 000）点/s。
- 可在 0°~360° 范围内调整相位角。
- 对应软件具有混频功能。

5.2.2 检测仪器每 12 月应校准一次，维修后也应进行校准。

5.2.3 检测用探头为内穿过式差分探头，探头的外径应根据被检管子内径确定，填充系数应尽量大，且不应低于 85 %。

5.2.4 若使用推拔器等机械探头传动装置，应能保证探头在钛管内平稳地前进与后退，且不应造成钛管内壁表面损伤。

5.3 标定管

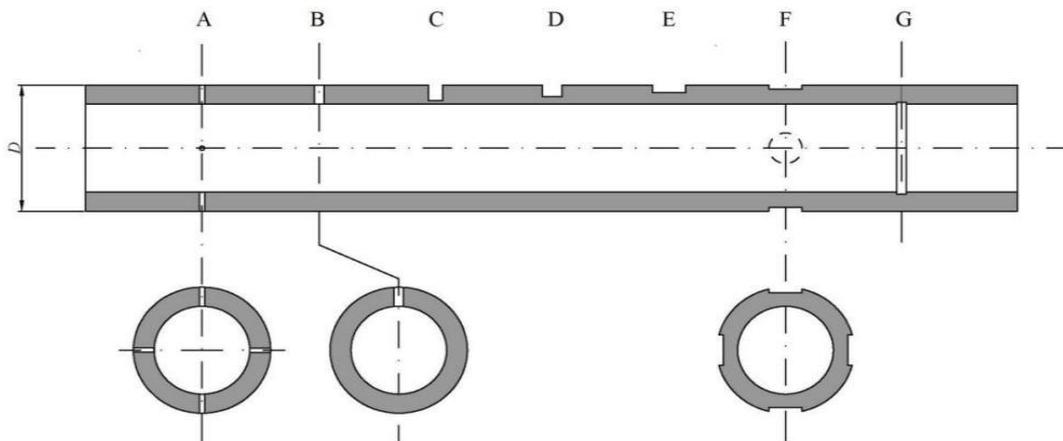
5.3.1 是对比试样的一种，主要用于调节检测仪器灵敏度、调整检测参数和保证检测结果准确性。

5.3.2 应选择与被检凝汽器钛管相同或相近的材料、电磁性能和尺寸规格。

5.3.3 表面不应沾有异物，及无影响校准的缺陷。

5.3.4 上人工缺陷的尺寸不应为检测设备能够探测到的缺陷的最小尺寸。

5.3.5 采用 01 型标定管调整检测系统、测试缺陷深度与相位的曲线。标定管上人工缺陷的位置和尺寸见图 1。



标引序号说明：

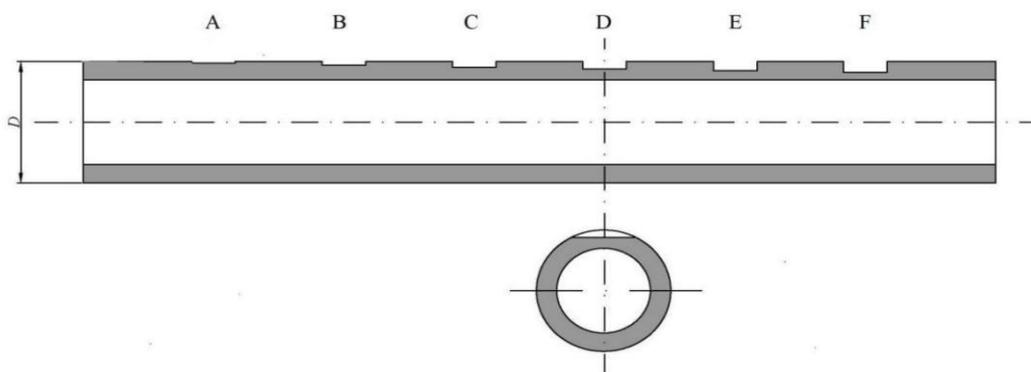
- A——4 个穿透壁厚的孔，环绕管子的圆周并在同一横截面上成 $90^\circ \pm 5^\circ$ 分布；当管子外径小于或等于 20.0 mm 时，孔径为 0.66 mm；当管子外径大于 20.0 mm 时，孔径为 0.83 mm；

图 1 01 型标定管上人工缺陷的形状及位置示意图

- B——1 个穿透壁厚的孔，当管子外径小于或等于 20.0 mm，孔径为 1.3 mm；管子外径大于 20.0mm，孔径为 1.7 mm；
 C——1 个外壁面平底孔，孔径为 2.0 mm，深度为壁厚的 80%；
 D——1 个外壁面平底孔，孔径为 2.8 mm，深度为壁厚的 60%；
 E——1 个外壁面平底孔，孔径为 4.8 mm，深度为壁厚的 40%；
 F——4 个外壁面平底孔，孔径为 4.8 mm，环绕管子的圆周并在同一横截面上成 $90^\circ \pm 5^\circ$ 分布，深度为壁厚的 20%；
 G——1 个 360° 的内壁面周向刻槽，槽宽 1.6 mm，深度为壁厚的 10%。
 注：如果能证明可以获得相同的效果，可以采用其他的人工缺陷对比试样。

图 1 01 型标定管上人工缺陷的形状及位置示意图(续)

5.3.6 采用 02 型标定管（又称单壁磨损标定管，见图 2）建立外壁磨损缺陷深度与幅值的曲线。标定管上人工缺陷 A~F 均为外壁面切槽，切槽长度（标定管轴向方向）均为 20.0 mm，深度分别为壁厚的 10%、20%、30%、40%、50%、60%。



注：如果能证明可以获得相同的效果，可以采用其他的人工缺陷对比试样。

图 2 02 型标定管上人工缺陷的形状及位置示意图

5.3.7 所有人工缺陷的轴向间隔及管端的距离，以在检测条件下能清楚的分辩为准（相互间隔宜不小于 40 mm，距端头距离宜不小于 70 mm）。

5.3.8 人工缺陷平底孔、刻槽或切槽的深度，其误差不超过规定深度的 $\pm 20\%$ ，或是 ± 0.08 mm，取两者中的较小值。其他所有人工缺陷的加工尺寸误差都应小于 ± 0.25 mm。

5.4 被检工件与检测环境

5.4.1 检测前应对被检管内表面进行清洗并干燥，不应有影响实施涡流检测的粉尘和妨碍探头进入的污物，特别是附着在内壁的铁磁性粉屑。

5.4.2 检测开始前，凝汽器内应搭设脚手架，提供照明，建立内外通讯，落实防窒息、防坠落、防异物措施。

5.4.3 实施检测的场地温度和相对湿度应控制在仪器设备允许的范围內。

5.4.4 检测场地附近不应有影响仪器设备正常工作的磁场、振动、大功率用电设备带来的电源波动及其他干扰。

5.5 检测工艺文件

5.5.1 检测工艺文件包括检验规程和现场操作程序。

5.5.2 现场操作程序是针对具体检测对象的现场检测使用的文件。有关检验规程与现场操作程序的编制应按照 NB/T 47013.6 的要求执行。核电在役检查领域的程序属于现场操作程序的一种。

5.5.3 现场操作程序在首次使用前应进行工艺验证，验证方式可在相关标定管上进行，验证内容包括检测范围内灵敏度、信噪比等是否满足检测要求。

6 灵敏度调试

6.1 选定一个主检频率（宜为 200 kHz~1000 kHz），使标定管上单通孔（01 型标定管上人工缺陷 B）涡流信号相位角与 4 个深度为 20% 壁厚的平底孔的涡流信号相位角沿顺时针方向差为 $50^\circ \sim 120^\circ$ （宜为 $80^\circ \sim 100^\circ$ ），见图 3。

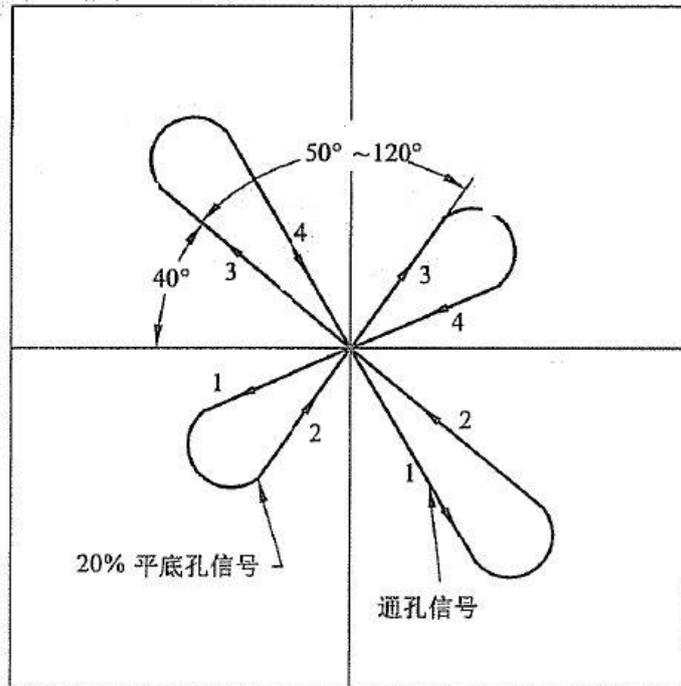


图 3 差分通道经过正确调整的典型涡流信号阻抗平面图

6.2 探头拉出时，20% 壁厚的平底孔的涡流信号轨迹见图 3，1 朝下向左，2、3 朝上向右，4 向下回到原点。

6.3 调节信号的相位与幅值，使单通孔信号的相位角在 $40^\circ \pm 5^\circ$ ，使 4 个周向分布通孔的信号（01 型标定管上人工缺陷 A）的幅值在 $8.0\text{V} \pm 0.8\text{V}$ 。

6.4 调节仪器的增益或信号的屏幕显示比，使 4 个周向分布的通孔信号相当于水平满刻度的 40% 左右或更高。在此灵敏度下，应能清晰地分辨出每一个人工缺陷信号的相位和幅值。

6.5 主频率（F1）选定后，还应选定辅助检测频率（F2、F3、F4）。辅助检测频率宜为主检频率的 1/2 到 1/4 或更低，与主检频率混频以消除支撑板信号的影响。F4 用于外壁磨损减薄的检测，对钛管的外壁磨损减薄缺陷进行定量分析；F4 同时也是定位频率，用于帮助分析人员对缺陷进行定位。

7 检测策略制定

7.1 对核电厂凝汽器钛管进行涡流检测时，检测比例、抽检方式可根据设备具体情况，与合同方协商决定。

7.2 一般情况下，在设备安装后进行 100% 的涡流检查或机组运行 10 年内完成 100% 的涡流检查，完成 100% 的涡流检查后每次大修抽检比例宜为 12%~20%，随着机组运行时间增加，抽检的比例适当增加。

7.3 检测范围通常由固定检测部分、抽检部分与跟踪管部分组成。

7.4 宜将受到落物砸伤及汽水冲刷风险较大的管子归为固定检测部分，在每次停机检修都进行检测，主要包括以下 4 种情况：

- a) 位于管板顶部第一行的管子；
- b) 中上部分位于各区域边缘位置的管子；
- c) 厚壁管中所有位于区域边缘的管子（若有）；

d) 合同方认为有必要每次检测的管子。

7.5 为了解凝汽器钛管的整体情况，应对固定检测部分以外区域的管子进行抽检，可按照 10 行~15 行抽一行的方式进行；抽检可在所有凝汽器水室同步进行，也可在一次检修期间集中抽检 1 个水室，在后续的检测中再进行轮换。

7.6 每次检测前应根据上一次涡流检测结果增加跟踪管检测部分，跟踪管选取原则见表 1。

表1 凝汽器跟踪管选取原则

序号	缺陷类型	下一次检测跟踪选取原则
a	凹陷管	幅值大于等于 30 V，在下次检测中进行跟踪
b	内伤管	伤深大于等于 10 %，在下次检测中进行跟踪
c	外伤/磨损管	伤深大于等于 10 %，在下次检测中进行跟踪

8 检测

8.1 检测速度应与采样率的设置相匹配，应保证至少采样 1.2 点/mm。

8.2 检测时的速度应与调试灵敏度时的速度、检测系统校验时的速度相同或接近，且在整个检测过程中尽可能使探头移动速度稳定。

8.3 在下列情况下，应使用 01 型标定管对涡流检测系统的灵敏度进行校验和复验：

- a) 每次检测开始前和结束后；
- b) 怀疑检测设备运行不正常时；
- c) 检测设备发生变化时（更换涡流仪、探头、连接线等）；
- d) 检测对象规格发生变化时；
- e) 连续检测过程中每隔 2 h；
- f) 检测人员或合同各方有争议或认为有必要时。

8.4 进行系统校验时，应至少保存 3 次 01 型标定管数据，并记录单通孔的相位与 4 个周向分布的通孔的幅值。如果系统校验时标定管的通孔相位、幅值与初始值产生较大差异（±10%），前次系统校验之后检测过的管子应重新进行检测。

8.5 检测开始前应对凝汽器钛管进行编号，每 1 根管子应具有独一无二的编号或标识（包括水室、区域、行号、列号等），以作为区分。检测中，每根被检钛管作为一条数据进行保存，每一条数据的命名应当以其对应管子的编号和标识进行命名。

8.6 每次开始检测时应填写摘要，应包含以下信息：

- 电厂；
- 机组；
- 部件/系统标识号；
- 涡流仪型号和编号；
- 检测时间；
- 探头型号和编号；
- 标定管标识号；
- 被检管材料与尺寸规格；
- 检测人员姓名及资格。

8.7 持续检测过程中，利用堵管、边缘管等特征位置校核被检管的位置是否正确。所检测各管的位置编号都应准确，如果发现被检管编号与实际正在检测的钛管位置不符，则上次位置确认后的所有管子应重新检测。

8.8 在数据采集记录中，应实时确认所记录数据的质量：检测数据完整无缺失；探头回拉速度均匀，各支撑板信号基本等间距；没有由电焊机等大功率用电设备引起的电源波动造成的异常噪声；没有涡流仪及探头损坏造成的异常信号等。

8.9 对于严重变形、有沉积物或其他原因造成探头不能通过的管子，在重新清洗以后仍然无法通过的，记录不通的位置并标识为不通管（OBS）。根据具体条件，可选择以下辅助方法对不通管进行补充检测，为后续决策提供依据：

- a) 采用工业视频内窥镜对不通处进行检查；
- b) 采用填充系数低的探头对不通管进行检测（若能通过）；
- c) 如有必要，在不通管另一侧管口实施检测。

9 结果评定

9.1 对检测中出现的信号，除支撑板信号或能证明是由其他原因引起的非相关信号外，其余信号均应进行评定。

9.2 根据缺陷响应信号的相位和幅值对检测结果进行综合评定。选择合适的检测通道来评定相关信号显示的性质、记录相关信号显示的特征参数。评定、记录通道见表 2。

9.3 相关信号显示记录见表 2。

表2 相关信号显示记录标准

序号	显示类型	位置	幅值 V	壁厚 %	通道	标识
1	外伤	自由段区	—	≥ 10	主检通道或低频差分通道	DFI
		支撑板区	—	≥ 10	混频通道	DSI
2	内伤	自由段区	—	≥ 10	主检通道	DFI
		支撑板区	—	≥ 10	混频通道	DSI
3	凹陷	自由段区	≥ 30	—	主检通道	DNG
		支撑板区	≥ 30	—	混频通道	DNT
4	磨损	支撑板区	≥ 0.5	≥ 10	混频通道	WAR
5	减薄	自由段区	≥ 0.5	≥ 10	低频绝对通道	THN
6	不通管	—	—	—	—	OBS
7	穿错管	—	—	—	—	WTB
8	堵管	—	—	—	—	PLU
9	磁导率变化	—	—	—	主检通道或混频通道	PVN

9.4 如发现可记录相关信号显示，应记录该信号对应的下列数值：

- 被检管子行列号及所在区域；
- 电压幅值；
- 相位角（若有）；
- 壁厚损失百分比（若有）；
- 信号类型；
- 位置（相对于支撑板）；
- 测量通道。

9.5 采用 BOBBIN 探头实施检测存在局限性：信号显示抽象、不能区分同一圆周截面的多个缺陷、对纵向缓慢变形的长缺陷不敏感。因此可选择适当的辅助检测方法（如旋转探头涡流检测、阵列涡流检测等）对有疑问的区域进行复检，帮助涡流检测人员对相关信号显示进行综合评定。

9.6 核电厂凝汽器钛管涡流检测的结果评定与验收应按照有关技术规范和标准要求与业主协商确定。一般来说，以下 5 种情况是不可接受的：

- a) 探头不能完全通过、存在不可达区域的钛管；
- b) 材料损耗造成的壁厚减薄及内外壁伤深度超过 40 % 的钛管；
- c) 存在大幅值的自由段处凹陷（检测时有明显卡滞探头现象，且通过视频内窥镜在卡涩处可见尖锐的折叠或变形）的钛管；
- d) 所有的周向裂纹（不计深度）；
- e) 针孔状缺陷（不计深度）。

10 报告

10.1 应依据检测结果出具检测报告。涡流检测报告除应符合 NB/T 47013.1 与 NB/T 47013.6 的规定外，还应包括如下内容：

- a) 被检管规格、材质；
- b) 检测的区域和范围；
- c) 检测仪器设备：涡流仪型号及编号、探头规格、标定管标识号、检测频率等；
- d) 检测结果或结论：缺陷的类型、幅值、相位、位置及处理意见等；
- e) 检测日期；
- f) 检测、审核人员及级别。

报告格式见附录A。

10.2 检测报告应附检测范围管板图及缺陷在管板上的分布图。

