



团 体 标 准

T/CES XXX-XXXX

局部放电光纤传感检测技术

第 2 部分：传感装置性能检测与评定方法

Optical fiber sensing technology for partial discharges detection—
Part 2: Performance test and evaluation method of sensor device

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

前言.....	I
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 局部放电光纤传感器基本构成.....	2
5 检测方法.....	3
6 功能评定.....	4
附录 A（资料性附录） 性能参数公式.....	7
附录 B（资料性附录） 测试块.....	10

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》给出的规则起草。

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这些专利的责任。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会城市能源互联网规划与运行标准工作组归口。

本文件起草单位：国网宁夏电力有限公司电力科学研究院、国网上海市电力公司、华北电力大学、华东电力试验研究院有限公司。

本文件主要起草人：吴旭涛、司文荣、程养春、倪辉、牛勃、何宁辉、周秀。

本文件为首次发布。

局部放电光纤传感检测技术 第2部分：传感装置性能检测与评定方法

1 范围

本文件规定了局部放电光纤传感器的检测方法和评定要求。
本文件适用于局部放电光纤传感器的性能检测与评定。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 7354-2018 高电压试验技术局部放电测量
GB/T 18459-2001 传感器主要静态性能指标计算方法
GB/T 18901.1-2002 光纤传感器第1部分：总规范
GB/T 33905.1-2017 智能传感器第1部分：总则
GB/T 33905.5-2017 智能传感器第5部分：检查和例行试验方法
DL/T 846.4-2016 高电压测试设备通用技术条件第4部分：脉冲电流法局部放电测量仪
DL/T 1894-2018 电力光纤传感器通用规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

局部放电 **partial discharge; PD**

导体间绝缘仅被部分桥接的电气放电。这种放电可以在导体附近发生，也可以不在导体附近发生。
[GB/T 7354-2018，定义 3.1]

3.2

局部放电脉冲 **partial discharge pulse; PD pulse**

当试品中发生局部放电时，用接在试验回路中适当的检测回路测得的电压或电流脉冲。“电流”或“电压”术语中可以和“局部放电”放在一起用，表示检测量的类型。
[GB/T 7354-2018，定义 3.2]

3.3

背景噪声水平 **background noise**

在局部放电试验中检测到的不是由试品产生的信号。
[GB/T 7354-2018，定义 3.6]

3.4

光电转换装置 **photoelectric conversion device**

接收到反映被测对象状态信息的光学参量，并将光学参量转化为电参量的元器件或装置。它可以包含一个或多个光电探测器、信号调节器和通信接口。

3.5

光传感元件或光供能传感元件 **optical or optically powered sensing element**

按照某一定律将接收到的一种物理量形式的信息，转换为光学参量形式信息的器件。
[GB/T 18901.1-2002，定义 3.4]

3.6

光源 **optical source**

提供传感元件和被测对象之间相互作用所需光能的器件。它至少包含一个发光源，并且可以包含信号调节。当光能由所传感的现象产生时，不需要光源。

[GB/T 18901.1-2002, 定义 3.9]

3.7

光纤引线 optical fibre lead(s)

将传感元件与光源和光电转换装置相连的光纤线路。

如含有光纤引线，这些引线必须保持不受被测对象的影响。

[GB/T 18901.1-2002, 定义 3.11]

3.8

局部放电光纤传感器 optical fiber sensor for partial discharge

光纤传感检测技术用于电工设备局部放电的检（监）测时，感知局部放电信号的前端装置，包括光传感元件和光纤引线。局部放电用光纤传感器通常与设备接触，或者放置于设备内部。

3.9

测量点 measurement point

进行检测试验时，为某一变量选取的数值。

3.10

灵敏度 sensitivity

输出变化量与相应的输入变化量之比。

[GB/T 18459-2001, 定义 2.3.2]

3.11

分辨力 resolution

在某一输入范围内都能产生可观测的输出量变化的最小输入量变化。

3.12

线性度 linearity

正、反行程实际平均特性曲线相对于参比直线的最大偏差，用满量程输出的百分比来表示。

3.13

脉冲分辨时间 pulse resolution time

两个持续时间极短、波形和极性相同、电荷量相等的相继输入脉冲之间的最短时间间隔，在这一时间间隔中脉冲响应幅值的变化不大于单个脉冲幅值的10%。

[GB/T 7354-2018, 定义3.9.5]

3.14

热零点偏移 thermal zero shift

由环境温度变化引起的零点输出变化，通常用单位温度的满量程输出的百分比来表示。

[GB/T 18459-2001, 定义 2.3.12]

3.15

热满量程输出偏移 thermal shift of output span

由环境温度变化引起的满量程输出变化，通常用单位温度的满量程输出的百分比来表示。

[GB/T 18459-2001, 定义 2.3.13]

4 局部放电光纤传感器基本构成

局部放电光纤传感装置由光电转换装置、局部放电用光纤传感器和光源（非必要）组成，简称传感器，如图 1 所示。

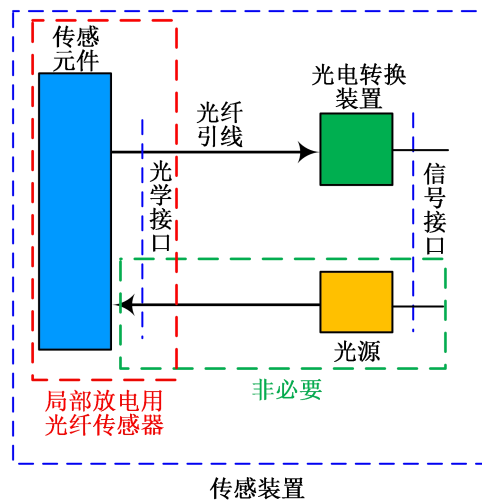


图 1 局部放电光纤传感装置基本构成

5 检测方法

5.1 总则

表征传感器性能的主要参数包括：灵敏度、幅值测量范围、信噪比、幅值分辨力、幅值检测准确度、幅值检测线性度、响应时间、脉冲分辨时间、检测频带范围、热零点偏移、热满量程输出偏移，各参数的计算方法见附录 A。

5.2 试验回路

传感器性能参数检测试验回路由激励信号源、测试块、传感器组成，如图 2 所示。激励信号源产生的信号通过测试块传递给传感器；测试块与光传感元件的连接方式，应与传感器的实际应用场景相一致。激励源代表局部放电源产生局部放电信号，激励源输出信号即为放电源产生的局部放电信号，即输入信号。传感器性能参数检测结果与测试块相关。测试块性能参数参见附录 B。

试验条件应满足 GB/T 33905.5 中第 7.3.1 条规定。

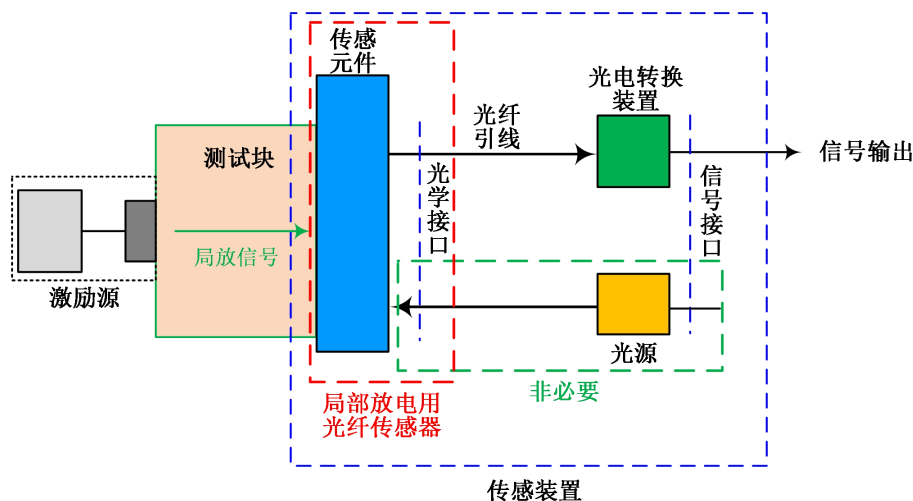


图 2 局部放电光纤传感器性能检测试验回路

5.2 灵敏度测试

试验宜按照下列步骤进行：

- 根据局部放电信号的种类和传播介质，选择相应的激励信号源和测试块，参见附录 B；

- b) 为输入信号幅值选取多个测量点，使其平均分布在预定的测量范围内，测量点应满足 GB/T 33905.5 中第 7.3.1 条规定；
- c) 依次测量每个输入信号幅值对应的输出信号幅值，并记录环境温度等相关信息；利用输入、输出信号幅值计算灵敏度数值。

5.3 幅值测量范围

试验宜按照下列步骤进行：

- a) 将输入信号幅值设置为零（不施加激励信号），记录传感器输出背景信号，计算其标准差；利用背景信号标准差和传感器灵敏度计算测量范围下限对应的输出信号；
- b) 调整输入信号幅值，使传感器输出信号幅值等于该输出信号幅值，记录此时的输入信号，作为幅值测量范围下限；
- c) 缓慢增大输入信号幅值，观测传感器输出信号幅值，直到输出信号幅值不再增加为止；
- d) 记录此时的输入信号，作为幅值测量范围上限。

5.4 信噪比测试

试验宜按照下列步骤进行：

- a) 根据应用场景确定局部放电信号检测阈值，将输入信号幅值设置为该阈值，记录传感器输出信号幅值（绝对值）的平均值；
- b) 将输入信号幅值设置为零（不施加激励信号），记录传感器输出背景信号幅值（绝对值）的平均值的；
- c) 利用这两个平均值计算信噪比。

5.5 幅值分辨力测试

试验宜按照下列步骤进行：

- a) 根据应用场景和 GB/T 33905.5 中第 7.3.1 条规定，确定输入信号幅值测量点；
- b) 参考 GB/T 18459-2001 中第 3.4 条规定，测量每个测量点上的最小输入变化量；
- c) 比较各测量点上的最小输入变化量，选择其中最大值作为传感器的幅值分辨力。

5.6 幅值检测准确度测试

幅值检测准确度测试应在完成传感器灵敏度标定之后进行。取输入信号幅值为真实值，取输出信号幅值经灵敏度折算之后对应的输入值为测量值。

采用测量值与真实值之间随机性偏差和系统性偏差之和来表示传感器的幅值检测准确度。其中随机性偏差用标准偏差或者相对标准偏差来表示；系统性偏差用平均偏差或者相对平均偏差来表示。

试验宜按照下列步骤进行：

- a) 根据应用场景并参考 GB/T 33905.5 中第 7.3.1 条规定，确定一系列局部放电信号幅值测量点，测量点的数量宜大于 50；
- b) 依次将输入信号设置为各测量点数值，记录各测量点的传感器输出信号；
- c) 参考 GB/T 18459-2001 中第 3.7.3 条规定，采用贝塞尔（Bessel）公式法计算样本标准偏差和相对标准偏差；
- d) 计算样本的算数平均偏差或者相对平均偏差；
- e) 计算随机性偏差与系统性偏差的绝对值之和。

5.7 幅值检测线性度测试

可采用最小二乘线性度表示传感器幅值检测的线性度。

试验宜按照下列步骤进行：

- a) 根据应用场景并参考 GB/T 33905.5 中第 7.3.1 条规定，确定一系列局部放电信号幅值测量点；
- b) 依次将输入信号设置为各测量点数值，记录各测量点的传感器输出信号；
- c) 利用这一系列输入信号和输出信号幅值绘制传感器输入-平均输出曲线；
- d) 参考 GB/T 18459-2001 中第 3.8.8 条规定计算最小二乘参比直线，并计算最小二乘线性度。

5.8 响应时间测试

试验宜按照下列步骤进行：按 GB/T 33905.5 中 7.3.3 条要求施加输入信号、测量输出信号并计算传感器的阶跃响应时间。

5.9 脉冲分辨时间测试

试验宜按照下列步骤进行：

- a) 根据应用场景确定某一局部放电信号幅值，并将输入信号固定在该幅值上；
- b) 将激励源输出方式设置成双脉冲输出，测量传感器输出信号波形并计算输出信号中的双脉冲时刻；
- c) 逐渐缩小激励源双脉冲的时间间隔，持续测量传感器输出信号波形，直到传感器输出信号波形等于输入单个脉冲时输出幅值的 110% 为止；
- d) 测量此时输入信号中双脉冲之间的时间间隔，作为传感器的脉冲分辨时间。

5.10 检测频带范围测试

试验宜按照下列步骤进行：

- a) 参考 DL/T846.4 2016 中第 5.3 条，采用正弦信号作为输入信号波形；
- b) 选定适当的输入信号幅值并保持固定，从低于频带范围下限估计值的某一频率开始逐步升高输入信号的频率，记录各频率测点下的输出信号幅值，直到频率已经高于频带范围上限估计值；
- c) 绘制传感器的输出信号的幅值频率响应曲线；
- d) 以幅值频率响应曲线顶部为基准值，幅值大于 0.5 倍基准值的曲线片段对应的频率范围即为传感器的检测频带范围。

5.11 热零点偏移测试

试验宜按照下列步骤进行：

- a) 按 GB/T 33905.5 中 7.4.3 条要求，选择环境温度测量点；
- b) 在不同环境温度测量点下，将输入信号设置为零，测量输出信号幅值并计算其平均值；
- c) 再参考 GB/T 18459-2001 中 3.10.3 条规定，计算热零点偏移。

5.12 热满量程输出偏移测试

试验宜按照下列步骤进行：

- a) 按 GB/T 33905.5 中 7.4.3 条要求，选择环境温度测量点；
- b) 在不同环境温度测量点下，将输入信号设置为测量范围上限，测量输出信号幅值并计算其平均值；
- c) 再参考 GB/T 18459-2001 中 3.10.4 条规定，计算热满量程输出偏移。

6 功能评定

6.1 放电幅值检测

传感器输出信号应反映局部放电的幅值，应满足以下要求：

- a) 输出信号的某一特征参数或者多个特征参数随放电量的增大而单调增大或减小。
- b) 装置能够区分单个放电脉冲时，其输出信号的特征参数随放电脉冲的放电量的增大而单调增大或减小。
- c) 装置不能区分单个放电脉冲时，其输出信号的特征参数随一段时间内放电脉冲平均放电量的增大而单调增大或减小。

6.2 放电时刻检测

传感器输出信号应反映局部放电的发生时刻，应满足以下要求：

- a) 传感器能够区分单个放电脉冲时，其输出信号的时刻或者特征参数随放电时刻的增大而单调增大或减小。

- b) 传感器不能区分单个放电脉冲时，其输出信号的时刻或特征参数随一段时间内放电脉冲整体时刻的增大而单调增大或减小。

6.3 放电信号位置检测

传感器输出信号的幅值、时间或者其他特征参数可反映放电信号位置信息。

6.4 放电脉冲时域波形检测

传感器输出信号可包含与放电脉冲时域波形相关的信息。

6.5 放电脉冲频谱检测

传感器输出信号可包含与放电脉冲频谱相关的信息。

附 录 A
(资料性附录)
性能参数公式

A.1 灵敏度

用 S 表示，按照公式 (1) 计算。 S 越大，灵敏度越高。

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

x_i —— n 个局部放电信号中的第 i 个信号的幅值； y_i 是与 x_i 对应的传感器输出信号的幅值；

\bar{x} —— x_i 的平均值

\bar{y} —— y_i 的平均值。

对于全局灵敏度，这 n 个局部放电信号的幅值应平均分布在传感器的幅值测量范围之内。对于局部灵敏度，这 n 个局部放电信号的幅值应平均分布在所关心的局部测量范围之内。

A.2 幅值测量范围

幅值测量范围由下限 L_d 和上限 L_u 组成。测量范围下限等于传感器输出信号幅值为 l_d 时的输入信号幅值。 l_d 按照公式 (2) 计算：

$$l_d = \frac{6\sigma_0}{S_d} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

σ_0 ——无局部放电信号时，传感器输出信号（背景噪声）的标准差；

S_d ——传感器在测量范围下限附近的灵敏度。

L_d ——传感器的输出信号幅值不再随输入信号幅值的增加而增大时对应的输入信号幅值。

A.3 信噪比

用 SNR 表示，按照公式 (3) 计算。 SNR 越大，信噪比越高。

$$SNR = 10 \log \frac{\bar{y}_{sig}}{\bar{y}_{noi}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

\bar{y}_{sig} ——传感器对于确定局部放电信号幅值 x_m 的输出信号幅值（绝对值）的平均值；

\bar{y}_{noi} ——传感器背景噪声幅值（绝对值）的平均值。

x_m ——传感器应该检测到的局部放电阈值，可根据应用场景确定为 5pC、10pC、100pC、500pC 或 1000pC 电量对应的光波、超声波、振动波等信号的幅值。

A.4 幅值分辨力

用最小变化量 d_{amp} 来表示，按照公式 (4) 计算。

$$d_{amp} = \max |\Delta x_{i-min}| \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$\Delta x_{i,\min}$ ——传感器对于局部放电信号幅值在 x_i 附近缓慢连续变化时，能够引起传感器输出信号发生可测变化的 x_i 的最小变化量。

x_i ——可根据应用场景确定为一系列放电量对应的光波、超声波、振动波等信号的幅值。这些放电量的测量点应覆盖所关心的测量范围。 $\max()$ 函数表示求最大值。

A.5 幅值检测准确度

用随机性偏差与系统性偏差的绝对值之和来表示。随机性偏差用测量值与真实值之间误差的标准差 SD_A 或者相对标准差 RSD_A 来表示，按照公式（5）或（6）计算。标准差 SD_A 或者相对标准差 RSD_A 越小，准确度越高。幅值检测的系统性偏差可用测量值与真实值之间平均偏差 ED_A 或者相对平均偏差 RED_A 来表示，按照公式（7）或（8）计算。平均偏差 ED 或者相对平均偏差 RED 越小，准确度越高。

$$SD_A = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{y_i}{S_m} - x_m \right) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i}{S_m} - x_m \right) \right]^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

$$RSD_A = \frac{SD_A}{x_m} \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

$$ED_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i}{S_m} - x_m \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$RED_A = \frac{ED_A}{x_m} \times 100\% \dots\dots\dots (8)$$

式中：

y_i ——传感器对于局部放电信号幅值恒定为 x_m 时的 n 次测量结果中的第 i 个；

S_m ——传感器在局部放电信号幅值为 x_m 时的灵敏度。

x_m ——可根据应用场景确定为 5pC、10pC、100pC、500pC 或 1000pC 放电量对应的光波、超声波、振动波等信号的幅值。

A.6 幅值检测线性度

用线性度（又称非线性误差） δ 来表示。非线性误差 δ 是传感器输出信号与传感器输出曲线的拟合直线之间的最大偏差与满量程输出的百分比，按照公式（10）计算。非线性误差 δ 越小，幅值检测线性度越好。

$$\delta = \max \left| \frac{\bar{y}_i - \hat{y}_i}{y_u} \right| \times 100\% \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$\hat{y} = C + Sx$ ——传感器在测量范围内输出信号幅值 y 与输入信号幅值 x 的曲线的参比直线；

\hat{y}_i ——参比直线上与测点 x_i 对应的数值， C 是截距， S 是灵敏度；

\bar{y}_i ——输出信号在测点 x_i 上的平均值；

y_u ——传感器在测量范围上限的输出信号幅值； $\max()$ 函数表示求最大值。

参比直线可通过最小二乘法或端基法等方法从传感器输出-输入曲线上获取。

A.7 热零点偏移

用 k_{TZ} 来表示，按照公式（11）计算。

$$k_{TZ} = \frac{\bar{y}_{0,T2} - \bar{y}_{0,T1}}{Y_{FS,T1}(T_2 - T_1)} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

$\bar{y}_{0,T1}$ 和 $\bar{y}_{0,T2}$ —— 分别是环境温度 T_1 和 T_2 下、输入信号幅值为零时，传感器输出信号幅值的平均值；

$Y_{FS,T1}$ —— 传感器在环境温度 T_1 时的满量程输出幅值。

A.8 热满量程输出偏移

用 k_{TS} 来表示，按照公式 (12) 计算。

$$k_{TS} = \frac{\bar{y}_{FS,T2} - \bar{y}_{FS,T1}}{Y_{FS,T1}(T_2 - T_1)} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中：

$\bar{y}_{FS,T1}$ 和 $\bar{y}_{FS,T2}$ ——

是环境温度 T_1 和 T_2 下、输入信号幅值为零时，传感器输出信号幅值的平均值；

$Y_{FS,T1}$ —— 传感器在环境温度 T_1 时的满量程输出幅值。

附录 B
(资料性附录)
测试块

B.1 圆盘状测试块

B.1.1 材质

硬铝或者不锈钢。硬铝对应于 GIS 外壳应用场景，不锈钢对应于变压器油箱应用场景。

B.1.2 机械尺寸

确定圆盘状测试块的机械尺寸时，需要考虑超声波、振动波在测试块上的传播与分布特性，尽量避免超声波、振动波在测试块上产生的驻波影响到测量结果。

圆盘的直径可确定为 1m，厚度可确定为 1cm。

B.1.3 测试块的固定位置

为了不影響超声波、振动波在测试块上的传播，测试块的支架的固定位置宜在圆盘边沿，远离测试区域（圆盘中心区域）。

B.1.4 激励源放置位置

激励源一般是压电陶瓷超声传感器或者振动传感器，或者其他能够产生超声波、振动波的仪器、工具等。

激励源应放置在圆盘中心位置附近。

B.1.5 光传感单元放置位置

光传感单元与激励源的相对位置和布置角度对于测量结果的影响很大。光传感单元应沿以激励源为圆心、半径为 10cm 的圆周布置。

B.2 圆桶状测试块

B.2.1 材质

桶体材料为硬铝或者不锈钢。硬铝对应于 GIS 外壳应用场景，不锈钢对应于变压器应用场景。桶中可充满变压器油，或者 SF₆ 气体。

B.2.2 机械尺寸

确定圆桶状测试块的机械尺寸时，需要考虑超声波、振动波在测试块上的传播与分布特性，尽量避免超声波、振动波在测试块上产生的驻波影响到测量结果。

圆桶的内直径可确定为 376mm，厚度可确定为 6mm，长度 1m（对应于 256kV GIS 腔体）。

圆桶状测量块有一个底面，底面厚度 6mm。

B.2.3 测试块的固定位置

为了不影響超声波、振动波在测试块上的传播，测试块的支架的固定位置宜在圆桶无底的那一侧边沿，远离测试区域（圆桶靠近底面区域）。

B.2.4 激励源放置位置

激励源一般是压电陶瓷超声传感器或者振动传感器，或者其他能够产生超声波、振动波的仪器、工具等。

激励源应放置在下列两种位置之一：

- a) 圆桶底面中心位置;
- b) 圆桶中轴线。

B.2.5 光传感单元放置位置

光传感单元与激励源的相对位置和布置角度对于测量结果的影响很大。光传感单元应布置在下列位置之一:

- a) 圆桶的侧壁圆周上, 该圆周距桶底 10cm;
- b) 圆桶的侧壁上、与轴线平行的直线上, 且布置点距桶底 10cm。

当激励源位于圆桶中轴线上时, 光传感单元还可布置在下列位置之一:

- a) 圆桶内, 与圆桶轴线垂直、以激励源为圆心的圆周上, 该圆周半径为 10cm;
- b) 圆桶内, 与圆桶轴线平行、距轴线 10cm 的直线上。

B.3 圆柱状测试块

B.3.1 材质

复合材料, 对应于电力电缆应用场景。
可用一段电缆来代替。

B.3.2 机械尺寸

直径 20cm, 长度 3m。

B.3.3 测试块的固定位置

为了不影响超声波、振动波在测试块上的传播, 测试块的支架的固定位置宜在圆柱两端, 远离测试区域(圆柱中间区域)。

B.3.4 激励源放置位置

激励源一般是压电陶瓷超声传感器或者振动传感器, 或者其他能够产生超声波、振动波的仪器、工具等。

激励源应放置在圆柱中间位置的表面上。

B.3.5 光传感单元放置位置

光传感单元与激励源的相对位置和布置角度对于测量结果的影响很大。光传感单元应布置在下列位置之一:

- a) 圆柱的侧壁圆周上, 该圆周距圆柱中心 10cm;
- b) 圆柱的侧壁上、与轴线平行、且经过激励源的直线上, 且距激励源 10cm。