

ICS 29.240
F 20
备案号: 68938-2019

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1951 — 2018

变压器绕组变形测试仪通用技术条件

General technical specification for winding deformation tester of power transformers



2018-12-25 发布

2019-05-01 实施

国家能源局 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 工作原理	2
5 技术要求	2
6 试验方法	4
7 检验规则	8
8 标志、包装、运输、贮存	9
9 供货成套性	9
附录 A（规范性附录） 频率响应特性曲线的数据导出格式	10
附录 B（规范性附录） 测试仪夹具要求	11
参考文献	12

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则编制。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会高电压试验技术标准化分技术委员会（SAC/TC 163/SC 1）归口。

本标准主要起草单位：中国电力科学研究院有限公司、国网山东省电力公司电力科学研究院、国网四川省电力公司电力科学研究院、国网浙江省电力有限公司电力科学研究院、国网河北省电力有限公司电力科学研究院、国网江苏省电力有限公司电力科学研究院、国网青海省电力公司电力科学研究院、江苏方天电力技术有限公司、国网陕西省电力公司电力科学研究院、广西电网有限责任公司电力科学研究院、国网湖南省电力有限公司电力科学研究院、国网天津市电力公司电力科学研究院、国网吉林省电力有限公司电力科学研究院、国网冀北电力有限公司电力科学研究院、国网安徽省电力有限公司电力科学研究院、云南电网有限责任公司电力科学研究院、国网重庆市电力公司电力科学研究院、成都恒锐智科数字技术有限公司、武汉磐电有限公司、宝钢技术上海金艺检测技术有限公司、上海思创电器有限公司。

本标准主要起草人：王旭、辜超、王斯琪、彭倩、詹洪炎、张军、潘瑾、蔚超、于鑫龙、包玉树、黄国强、张玉波、周恒逸、王楠、杨代勇、郭绍伟、吴兴旺、颜冰、梁星、李晏、孙军、杨兴隆、张围围、朱斌。

本标准首次发布。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

变压器绕组变形测试仪通用技术条件

1 范围

本标准规定了变压器绕组变形测试仪的技术要求、试验方法、检验规则、包装、标志、运输和贮存等要求。

本标准适用于频率响应分析法的变压器绕组变形测试仪（以下简称测试仪）的生产和检验。

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 191 包装储运图示标志

GB/T 6587—2012 电子测量仪器通用规范

GB/T 11463 电子测量仪器可靠性试验

GB/T 14864—2013 实心聚乙烯绝缘柔软射频电缆

GB/T 17626.2—2018 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验

GB/T 17626.3—2016 电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验

GB/T 17626.4—2018 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验

GB/T 17626.5—2008 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌（冲击）抗扰度试验

GB/T 17626.6—2017 电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度

GB/T 17626.8—2006 电磁兼容 试验和测量技术 工频磁场抗扰度试验

GB/T 17626.11—2008 电磁兼容 试验和测量技术 电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验

GB/T 18268.1—2010 测量、控制和实验室用的电设备 电磁兼容性要求 第1部分：通用要求

GB/T 25480 仪器仪表运输、贮存基本环境条件及试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

绕组变形 winding deformation

电力变压器绕组在遭受短路电流冲击或在运输过程中遭受冲撞时，在电力或机械力作用下发生的轴向或径向尺寸变化，通常表现为绕组局部扭曲、鼓包或移位等特征。

[DL/T 911—2016，定义 3.1]

3.2

频率响应 frequency response

在一定频率范围内，一端由电压源激励的试品两端测量电压的幅值比及相角差。

注 1：频率响应测量结果是在一定频率范围内的具体频率上的幅值比及相角差。

注 2：被测的电压是通过阻抗的电压，因而也与电流相关。

[GB/T 1094.18—2016，定义 2.1]

3.3

频率响应分析 frequency response analysis

通过频率响应测量来探测损伤的技术。

[GB/T 1094.18—2016, 定义 2.2]

3.4

幅值比 amplitude ratio

以对数形式表示的不同频率下响应端电压 U_2 和激励端电压 U_1 的信号幅值之比，用于表征幅频响应曲线 $H(f)$ 。

$$H(f) = 20 \lg \left[\frac{U_2(f)}{U_1(f)} \right] \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$H(f)$ ——频率为 f 时传递函数的模 $|H(j\omega)|$ ，dB；

$U_2(f)$ 、 $U_1(f)$ ——传递频率为 f 时响应端和激励端电压的幅值 $|U_2(j\omega)|$ 和 $|U_1(j\omega)|$ 。

4 工作原理

通过检测变压器各个绕组的频率响应特性，根据频率响应特性的变化程度，判断变压器绕组是否发生变形。其工作原理图如图 1 所示（以单相双绕组变压器为例）。

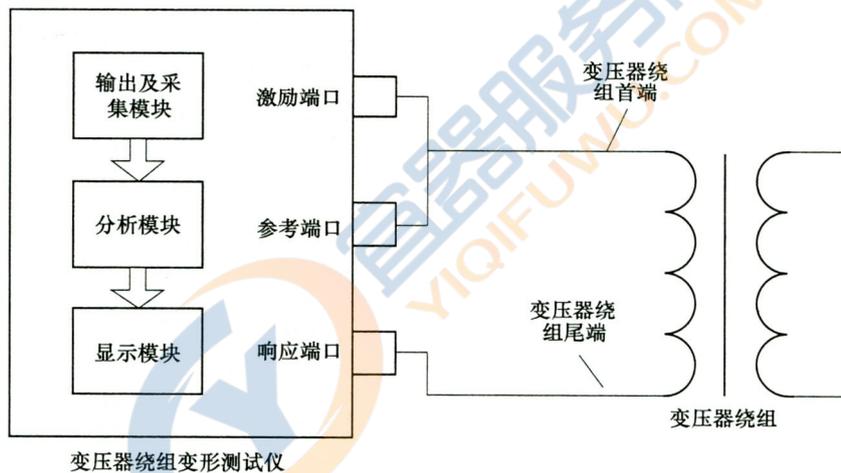


图 1 测试仪工作原理图

5 技术要求

5.1 工作条件

测试仪工作条件要求如下：

- 环境温度：-10℃~+50℃；
- 环境相对湿度：不大于 90%；
- 电源电压：交流 220 V (1±10%)；
- 电源频率：50 Hz (1±1%)。

5.2 外观

测试仪外观要求包括：

- 主机及各种配件的壳体无明显的划伤、凹陷、变形、脱漆，表面清洁无污迹；
- 壳体外贴装饰件不缺少、错装、倒装，与主体平贴黏紧；

- 铭牌标志、饰件文字、数字、符号标志正确、易辨、清晰；
- 具备良好的安全性防护，可吸收装卸、搬动所产生的振动与冲击；
- 具有良好的接地端子。

5.3 电气安全要求

5.3.1 绝缘电阻

测试仪电源输入端对机壳及地的绝缘电阻不小于 20 M Ω 。

5.3.2 介电强度

测试仪电源输入端对机壳及地应能承受工频 2 kV、历时 1 min 的耐压试验，应无击穿、闪络现象。

5.4 性能要求

5.4.1 基本功能

测试仪基本功能应符合以下要求：

- 具备幅值比测量功能；
- 具备试品信息录入和检索功能；
- 具备不少于 3 个波形的幅值比波形分析功能；
- 具备相关系数计算功能；
- 具备测量数据存储、查询、导出、打印、传输功能，数据导出格式应符合附录 A 的要求。

5.4.2 幅值比

测试仪幅值比动态测量范围至少应包括 -80 dB \sim +20 dB，最大允许误差不应超过 ± 1 dB。

5.4.3 输出频率

测试仪输出正弦波激励信号频率范围至少应包括 1 kHz \sim 1 MHz，且输出频率最大允许误差不应超过 $\pm 0.1\%$ 。

5.4.4 扫频特性

测试仪应至少具备线性分布的频率扫频模式和单频点检测模式。当测试仪设定为线性分布扫频模式时，扫描频率间隔可设定，且最小可设频率间隔不大于 1 kHz。

5.4.5 测量引线

测试仪的测量引线应使用特征阻抗为 50 Ω ($1\pm 2\%$) 的同轴屏蔽电缆，且测试仪激励端口、参考端口及响应端口的测试导线长度一致，宜不超过 30 m，同时测试仪引线所用夹具宜符合附录 B 要求。

5.4.6 端口阻抗

测试仪的激励端口在整个频率范围内的输出阻抗范围为 50 Ω ($1\pm 2\%$)，参考端口和响应端口在整个频率范围内的输入阻抗不小于 1 M Ω 。

5.5 环境适应性

测试仪的环境影响量包含电源适应性、温度、湿度、振动、冲击和包装运输 6 个方面，应符合 GB/T 6587—2012 环境组别为 II 组的相关规定要求，同时应符合 GB/T 6587—2012 流通条件等级 2 级规

定要求。

5.6 电磁兼容性

测试仪的电磁兼容性能包括静电放电抗扰度，射频电磁场辐射抗扰度，电快速瞬变脉冲群抗扰度，浪涌（冲击）抗扰度，射频场感应的传导骚扰抗扰度，工频磁场抗扰度，电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度，应符合 GB/T 18268.1—2010 的 6.2 中工业场所设备抗扰度的要求。

5.7 可靠性

测试仪的平均无故障时间（MTBF）不应小于 2000 h。

6 试验方法

6.1 试验条件

除环境试验外，测试仪的试验条件应符合以下要求：

- 环境温度：(20±5)℃；
- 环境相对湿度：20%~80%；
- 电源电压：交流 220 V (1±10%)；
- 电源频率：50 Hz (1±1%)。

6.2 主要试验装置

主要试验装置应符合表 1 的要求。

表 1 试验装置技术参数

序号	设备名称	性能指标
1	幅值比标准装置	范围：-80 dB~+20 dB，最大允许误差：不超过±0.3 dB； 频率范围：应包括 1 kHz~1 MHz
2	频率计	测量范围：1 kHz~1 MHz；最大允许误差：不超过±0.01%
3	示波器	模拟带宽：≥20 MHz
4	阻抗分析仪	最大允许误差：不超过±0.2%
5	网络分析仪	最高测量频率：≥2 MHz
6	绝缘电阻表	准确度等级：不低于 5 级
7	耐压测试仪	额定电压：不低于 2 kV；准确度等级：不低于 3 级

6.3 外观检查

用目测方法检查，结果应符合 5.2 的要求。

6.4 电气安全试验

6.4.1 绝缘电阻试验

使用 500 V 绝缘电阻表测量电源线端对机壳及地的绝缘电阻，结果应符合 5.3.1 的要求。

6.4.2 介电强度试验

在电源输入端对机壳及地施加 2 kV、1 min 工频交流电压，结果应符合 5.3.2 的要求。

6.5 性能试验

6.5.1 基本功能检查

在测试仪处于开机工作条件下，对测试仪进行操作，检查测试仪是否具备以下功能：

- 幅值比参数测量功能；
- 试品信息录入和检索功能；
- 至少 3 个波形的幅值比波形分析功能；
- 测量设备数据存储、查询、导出、打印、传输功能，数据导出按格式记录功能。

以上结果应符合 5.4.1 的要求。

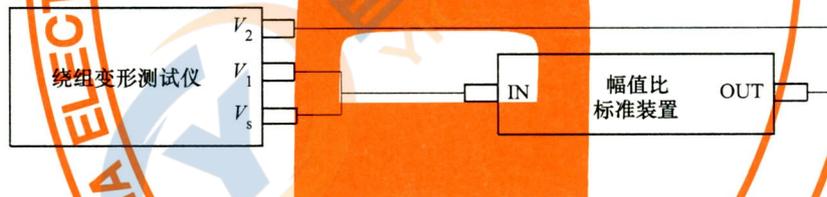
6.5.2 幅值比试验

幅值比试验接线图如图 2 所示。将标准装置分别设定 20 dB、10 dB、0 dB、-10 dB、-20 dB、-30 dB、-40 dB、-50 dB、-60 dB、-70 dB、-80 dB，启动测试仪进行测量，并分别在 1 kHz、2 kHz、5 kHz、10 kHz、20 kHz、50 kHz、100 kHz、200 kHz、500 kHz、1 MHz 记录示值，按式 (2) 计算示值误差，结果应符合 5.4.2 的要求。

$$\Delta A = A_N - A_x \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- ΔA —— 示值误差，dB；
- A_N —— 被检测测试仪示值，dB；
- A_x —— 标准装置参考值，dB。



说明：

- V_s —— 激励端口；
- V_1 —— 参考端口；
- V_2 —— 响应端口；
- IN —— 幅值比标准装置输入端口；
- OUT —— 幅值比标准装置输出端口。

图 2 幅值比试验接线图

6.5.3 输出频率试验

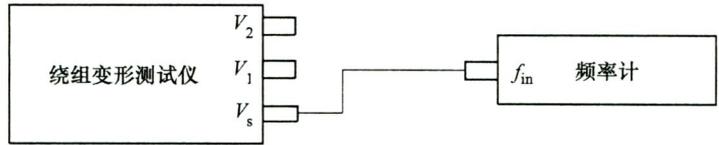
将测试仪设为单频点检测模式，并将测试仪的信号激励端口接入频率计的输入端口，试验接线如图 3 所示，将测试仪依次设置 1 kHz、2 kHz、5 kHz、10 kHz、20 kHz、50 kHz、100 kHz、200 kHz、500 kHz、1 MHz 的输出频率，并分别记录频率计的读数，按式 (3) 计算相对误差，结果应符合 5.4.3 的要求。

$$\gamma_f = \frac{f_x - f_N}{f_N} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- γ_f —— 测试仪输出频率相对误差，%；
- f_N —— 频率计测量值，Hz；

f_x ——测试仪设定频率值, Hz。



图中:

- V_s ——激励端口;
- V_1 ——参考端口;
- V_2 ——响应端口;
- f_{in} ——频率计输入端口。

图 3 输出频率试验接线图

6.5.4 扫频特性试验

测试仪的信号激励端口接入示波器的检测通道。将测试仪的扫频范围设置为 1 kHz~1 MHz, 扫描频率间隔设置为 1 kHz 或者设置为线性分布 1000 个扫描频点, 检查测试仪是否按照设定的参数进行扫频检测; 将测试仪设置为 1 kHz 和 1 MHz 单频点扫描检测模式, 用数字示波器检查测试仪输出对应频率的正弦波电压信号的连续性, 检查测试仪单频点检测的性能。以上检查结果应符合 5.4.4 的要求。

6.5.5 测量引线试验

测量引线试验按 GB/T 14864—2013 中 4.2.5 规定的方法进行, 结果应符合 5.4.5 的要求。

6.5.6 端口阻抗试验

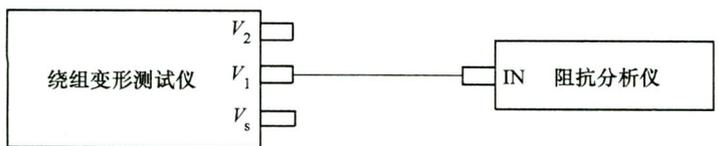
激励端口阻抗测量: 将测试仪设为单频点扫描检测模式, 用示波器依次测得激励端口输出频率在 1 kHz 和 1 MHz 时空载和 50 Ω 负载时的输出电压。根据式 (4) 计算出激励端口输出频率在 1 kHz 和 1 MHz 时的输出阻抗。

$$R_{out} = \frac{U_1 - U_2}{U_2} \times 50 \dots\dots\dots (4)$$

式中:

- U_1 ——空载时电压, V;
- U_2 ——50 Ω 负载时电压, V;
- R_{out} ——输出阻抗, Ω。

参考端口及响应端口阻抗测量: 将测试仪的参考端口(响应端口)连接阻抗分析仪的测试端, 试验接线如图 4 所示, 用阻抗分析仪测量测试仪参考端口在 1 MHz 下的阻抗值。测量结果应符合 5.4.6 的要求。



图中:

- V_s ——激励端口;
- V_1 ——参考端口;
- V_2 ——响应端口;
- IN ——阻抗分析仪输入端口。

图 4 参考端口阻抗测量试验接线图

6.6 环境适应性试验

6.6.1 电源适应性试验

测试仪的电源适应性试验按 GB/T 6587—2012 中 5.12.2 规定的试验要求和试验方法进行，结果应符合 5.5 的要求。

6.6.2 温度试验

测试仪的温度试验按 GB/T 6587—2012 中 5.9.1.3 规定的试验要求和试验方法进行，结果应符合 5.5 的要求。

6.6.3 湿度试验

测试仪的湿度试验按 GB/T 6587—2012 中 5.9.2.3 规定的试验要求和试验方法进行，结果应符合 5.5 的要求。

6.6.4 振动试验

测试仪的振动试验按 GB/T 6587—2012 中 5.9.3.3 规定的试验要求和试验方法进行，结果应符合 5.5 的要求。

6.6.5 冲击试验

测试仪的冲击试验按 GB/T 6587—2012 中 5.9.4.3 规定的试验要求和试验方法进行，结果应符合 5.5 的要求。

6.6.6 运输试验

测试仪的运输试验按 GB/T 6587—2012 中 5.10.2 规定的试验要求和试验方法进行，结果应符合 5.5 的要求。

6.7 电磁兼容试验

6.7.1 静电放电抗扰度试验

测试仪的静电放电抗扰度试验按 GB/T 17626.2—2018 第 8 章的规定和方法进行；试验等级：2 级；试验对象：整个装置人体可触及的部位；试验结果应符合 5.6 的要求。

6.7.2 射频电磁场辐射抗扰度试验

测试仪的射频电磁场辐射抗扰度试验按 GB/T 17626.3—2016 第 8 章规定和方法进行；试验等级：3 级；试验对象：整个装置；试验结果应符合 5.6 的要求。

6.7.3 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验

测试仪的电快速瞬变脉冲群抗扰度试验按 GB/T 17626.4—2018 第 8 章的规定和方法进行；试验等级：2 级；试验对象：装置的电源端口及数据端口；试验结果应符合 5.6 的要求。

6.7.4 浪涌（冲击）抗扰度试验

测试仪的浪涌（冲击）抗扰度试验按 GB/T 17626.5—2008 第 8 章的规定和方法进行；试验等级：2

级；试验对象：装置的电源；试验结果应符合 5.6 的要求。

6.7.5 射频场感应的传导骚扰抗扰度试验

测试仪的射频场感应的传导骚扰抗扰度试验按 GB/T 17626.6—2017 第 8 章的规定和方法进行；试验等级：2 级；试验对象：整个装置；试验结果应符合 5.6 的要求。

6.7.6 工频磁场抗扰度试验

测试仪的工频磁场抗扰度试验按 GB/T 17626.8—2006 第 8 章的规定和方法进行；试验等级：4 级；试验对象：整个装置；试验结果应符合 5.6 的要求。

6.7.7 电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验

测试仪的电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验按 GB/T 17626.11—2008 第 8 章的规定和方法进行；试验等级：60% U_T ；持续时间：10 个周期；试验对象：装置的电源；试验结果应符合 5.6 的要求。

6.8 可靠性试验

测试仪的可靠性试验按 GB/T 11463 的规定和方法进行，采用定时定数时间截尾方案 1-1，结果应符合 5.7 的要求。

7 检验规则

7.1 总则

测试仪的检验分为型式试验和出厂试验。

7.2 型式试验

7.2.1 试验条件

下列情况之一的，测试仪应进行型式试验：

- a) 新产品鉴定投产前，在生产中当设计、材料、工艺或结构等改变，且其改变可能影响产品的性能时，应重新进行型式试验，此时的型式试验可只进行与各项改变有关的试验项目；
- b) 国家质量监督机构要求进行质量一致性检验时。

7.2.2 抽样和合格判定规则

测试仪型式试验的抽样和合格判定规则应按照以下方法进行：

- a) 从出厂试验合格的产品中抽取 1 台为样品；
- b) 经过型式试验，全部样品都合格的，则判定该产品本次型式试验合格；
- c) 经过型式试验，样品不合格则应加倍抽样，重新进行型式试验；第二次抽样样品仍存在不合格，则判定本次型式试验不合格。

7.3 出厂试验

由生产商对生产的每一台产品进行试验。

7.4 试验项目

测试仪的型式试验和出厂试验项目见表 2。

表 2 试验项目

序号	试验项目	本标准条款		型式试验	出厂试验
		技术要求	试验方法		
1	外观检查	5.2	6.3	●	●
2	电气安全试验	5.3	6.4	●	●
3	性能试验	5.4	6.5	●	●
4	环境适应性试验	5.5	6.6	●	○
5	电磁兼容性试验	5.6	6.7	●	○
6	可靠性试验	5.7	6.8	●	○

注：“●”为必须做试验项目，“○”为不做试验项目。

8 标志、包装、运输、贮存

8.1 标志

产品铭牌应有下列明显标志：

- a) 产品名称；
- b) 产品型号；
- c) 出厂编号；
- d) 出厂年月；
- e) 制造厂名；
- f) 测量范围；
- g) 准确度等级；
- h) 产品生产标准号。

8.2 包装

包装应符合 GB/T 191 的有关标志的规定，并标明“小心轻放”“向上”“防雨”等标志。

8.3 运输

产品应适于陆运、空运、水运（海运），运输装卸按包装箱上的标志进行操作。

8.4 贮存

包装完好的测试仪应符合 GB/T 25480 规定的贮存运输要求，长期不用的测试仪应保留原包装，在相对湿度不大于 80% 的库房内贮存，室内无酸、碱、盐，无腐蚀性、爆炸性气体，无灰尘以及雨、雪的危害。

9 供货成套性

随同测试仪供货应有的附件：

- a) 产品检验合格证；
- b) 装箱单；
- c) 使用说明书；
- d) 随机备件、附件；
- e) 其他有关的技术资料。

附录 A (规范性附录)

频率响应特性曲线的数据导出格式

A.1 频率响应特性曲线的数据导出格式

数据文件名应包含激励端、响应端和测量次数信息，且均以 2 个字符表示。其中，代表绕组电压等级的字符为 H（高压）、M（中压）和 L（低压），代表绕组端头名称的字符为 A、B、C 和 X、Y、Z，也可用其他字母表示，代表测量次数的字符为两位十进制数字。示例：文件名“HOHA03.csv”表示激励端为高压（H）绕组的中性点 O 端，响应端为高压（H）绕组的 A 相，该文件为第 03 次测量的数据。

A.2 数据文件的存储目录

同一台变压器各个绕组的频响特性测试数据应保存在同一个文件目录下，并以该变压器的运行编号或出厂编号命名目录的名称。

A.3 数据文件的记录内容

数据文件的记录内容如下：

- a) 第 1 行第 1 列为频率单位“kHz”、第 2 列为幅值单位“dB”、第 3 列为扫频测量的起始频率值、第 4 列为终止频率值、第 5 列为扫频测量的频点数量。
- b) 第 2 行第 3 列用于记录检测仪器的型号及版本等信息，应以“;”开头。
- c) 第 3 行起至第 N ($N = \text{频点数量} + 3$) 行用于记录测试数据，其中第 1 列为频率（单位为 kHz），第 2 列为幅值（单位为 dB）。
- d) 第 $N+1$ 行的第 3 列记录变压器的名称信息，应以“;”开头。
- e) 第 $N+2$ 行的第 3 列记录测试编号，以“;”开头。例如“; 01”表示第一次测试。
- f) 第 $N+3$ 行的第 3 列记录变压器分接开关的挡位信息，以“;”开头。例如“; 12”表示测试时分接开关处于第 12 挡挡位。
- g) 第 $N+5$ 行的第 3 列记录响应端的名称，以“;”开头。例如“; HA”。
- h) 第 $N+4$ 行的第 3 列记录激励端的名称，以“;”开头。例如“; HO”。其中，被测绕组的电压等级可以 H（高压）、M（中压）和 L（低压）表示，被测绕组的端头名称通常为 A、B、C、O 或 X、Y、Z 等。
- i) 第 $N+6$ 行的第 3 列记录测试时间，以“;”开头。例如“; 2013 年 5 月 9 日 12 时 6 分”。
- j) 第 $N+7$ 行的第 3 列记录备注信息（如生产厂家名称），以“;”开头。
- k) 第 $N+8$ 行的第 3 列记录被测变压器的型号，以“;”开头。例如“; SFPSZ7-120000/220”。

附录 B
(规范性附录)
测试仪夹具要求

B.1 夹具引出导线未屏蔽长度

为降低高频信号和现场环境对同轴电缆信号的影响，夹具引出导线未屏蔽长度不大于 0.05 m。

B.2 夹具咬合力

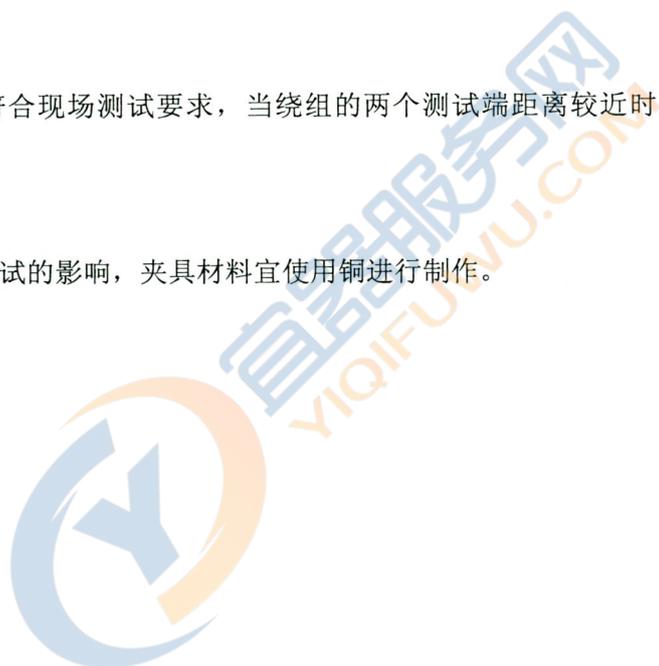
测试仪夹具咬合力需确保当同轴电缆垂直向上接到变压器绕组测试端时，应能咬合紧密、不滑落。

B.3 夹具尺寸

测试仪夹具尺寸需符合现场测试要求，当绕组的两个测试端距离较近时，需确保两个夹具不会接触。

B.4 夹具材料

为减小夹具电阻对测试的影响，夹具材料宜使用铜进行制作。



参 考 文 献

- [1] GB/T 1094.18—2016 电力变压器 第 18 部分：频率响应测量
 - [2] DL/T 911—2016 电力变压器绕组变形的频率响应分析法
-

