

The Uncertainty Evaluation and Analysis of Influencing Factors for the Insulation Resistance Measurement of Wire and Cable

Xiangnan Li, Li Xing, Huiyong Wang, Haipeng Zheng, Bin Wang

Shandong Inspection and Quarantine Technology Center, Qingdao Shandong
Email: lxn8969@163.com

Received: Mar. 9th, 2017; accepted: Mar. 27th, 2017; published: Mar. 31st, 2017

Abstract

The importance and definition of insulation resistance were discussed. The influence produced by measurement method was analyzed. The mathematical model was built, and sensitivity coefficient of uncertainty components was determined. Insulation resistance of wires with the model BV was measured, and evaluation method of uncertainty components was determined, and expanded uncertainty was obtained. Proposal for measurement of insulation resistance was presented.

Keywords

Electric Wires and Cables, Insulation Resistance, Influencing Factors, Uncertainty

电线电缆绝缘电阻测量影响因素分析及不确定度评定

李向男, 邢力, 王会永, 郑海鹏, 王彬

山东检验检疫技术中心, 山东 青岛
Email: lxn8969@163.com

收稿日期: 2017年3月9日; 录用日期: 2017年3月27日; 发布日期: 2017年3月31日

摘要

阐述了绝缘电阻的定义及重要性; 分析了测量方法对绝缘电阻测量结果的影响; 建立了绝缘电阻测量不确定数学模型, 并确定了不确定分量的灵敏度系数。测量了BV线的绝缘电阻, 并确定了不确定分量的评

定方法，计算得到测量扩展不确定度。最后提出了测量绝缘电阻的建议。

关键词

电线电缆，绝缘电阻，影响因素，不确定度

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

绝缘电阻的定义[1]：一定条件下，处于两个导体之间的绝缘材料的电阻。而排除表面电流后由体积导电所确定的绝缘电阻部分称为体积电阻。一般情况下，绝缘电阻指的是体积绝缘电阻，只有极少数产品有表面绝缘电阻的要求。

绝缘电阻反映了线缆类产品承受电击穿或热击穿能力的大小，与绝缘的介质损耗以及绝缘材料在工作状态下的逐步劣化等均存在着极为密切的关系[2]。因此，对于工作电压为 500V 及以上电压等级的产品，一般需测定其绝缘电阻，甚至对于低压弱电流的通信电线电缆，也把测定绝缘电阻作为控制和保证其绝缘品质的主要参数[3]。测量不确定度是对测量结果的定量表征，开展绝缘电阻测量不确定度的研究具有重要的应用价值。

2. 绝缘电阻测量影响因素分析

绝缘电阻的测量原理为[4]：在规定的温度下，对单位长度的电线电缆绝缘施加 100 V~500 V 的直流电压，绝缘材料中(绝缘内部或绝缘表面)将产生一定的电流，电流随时间逐渐减小。所以电线电缆的绝缘电阻测量值不是恒定不变的，影响测量的因素主要有以下几方面。

2.1. 极化电荷的影响

绝缘材料本身就是一种电介质，当给绝缘材料加电压后，介质与电极的分界面会在电场的作用下形成极化电荷，同时在电极上也会增加相应的自由电荷，当外电场去除后，极化电荷逐渐消失，但往往需要很长时间才能完全消失。这时需要将试样电极两端短接，电极上的电荷随极化电荷消失而慢慢减少。因此在测量时或重复测量时应先充分放电。

2.2. 温度的影响

电介质理论研究和实际应用表明[5]：绝缘介质的绝缘电阻是随温度变化而变化的，其变化程度又随着绝缘的种类而变化。绝缘电阻在测量之前都要使试样的温度(试样内部的温度)与要求的温度达到温度平衡，因为绝缘材料中的杂质离子会随温度的升高加快运动速度，使得电导增大，绝缘电阻下降。

2.3. 充电时间的影响

当绝缘材料加上直流电压后，会有四种电流[6]通过，其中充电电流、可逆吸收电流和不可逆吸收电流会随时间逐渐下降，最后趋于消失。因此理论测试时间应该是在这三种电流全部衰减至消失后，测量出泄漏电流，这样测得的绝缘电阻才是真实值。但由于可逆吸收电流要经过数分钟后才趋于消失，考虑

到测量系统长时间的稳定性，测量时间不宜太长，这样既可以保证非泄漏电流大部分已消失，又使得测量时间有了统一，使数据具有重复性和可比性。

3. 绝缘电阻不确定度评定

通常我们评定测量不确定度的方法有 A 类和 B 类[7]。A 类评定一般由重复观测列统计得到，B 类评定依据有关信息或经验进行评定，根据 A 类和 B 类的评定结果计算合成标准不确定度，最终确定扩展不确定度。

3.1. 数学模型建立

规定温度下的每千米电线电缆的绝缘电阻的数学模型可表示为： $R = [R_x + R(t)] \times L$ 。式中， R 为每千米电缆绝缘电阻($M\Omega \cdot km$)； R_x 为有效长度试样的绝缘电阻值($M\Omega$)； $R(t)$ 为测量绝缘电阻时，恒温水浴的温度对有效长度试样绝缘电阻的修正值($M\Omega$)； L 为试样的有效测量长度(km)。各分量 R_x 、 $R(t)$ 及 L 可视为互不相关。在较大的温度范围内，如 $23^\circ C \sim 70^\circ C$ ，绝缘电阻与温度成指数关系[8]，由于在测量过程中，测量时间较短，测量时的温度变化较小(实际温度可控制在 $1^\circ C$ 范围内)，因此我们可近似地认为 $R(t)$ 与温度 t 成线性关系，即 $R(t) = at + b$ 。

各分量的灵敏度系数为：

$$c(R_x) = \frac{\partial R}{\partial R_x} = L;$$

$$c(L) = \frac{\partial R}{\partial L} = R_x + R(t);$$

$$c(t) = \frac{\partial R}{\partial t} = aL$$

合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + c^2(R_x)u_2^2 + c^2(L)u_3^2 + c^2(t)u_4^2}$$

式中， u_1 为 A 类不确定度分量； u_2 为 R_x 的 B 类不确定度分量， u_3 为 L 的 B 类不确定度分量； u_4 为 t 的 B 类不确定度分量。

扩展不确定为：

$$U = ku_c$$

式中， k 为包含因子。

3.2. 确定各分量的不确定度

用于本次测试的样品规格型号为：IEC 6022701(BV) 450/750V 1.5 mm² 的一般用途单芯硬导体无护套电缆，取有效长度为 5 m 的试样，测量其 $70^\circ C$ 时的绝缘电阻。10 次测量的绝缘电阻平均值 $\bar{R}' = 43.1 M\Omega$ ，计算得到每 km 绝缘电阻平均值 $\bar{R} = 0.216 M\Omega \cdot km$ 。

3.2.1. A 类不确定度评定

对试样在 $70^\circ C$ 下重复测量 10 次，计算 $u_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n(n-1)}} = 0.00122 M\Omega \cdot km$ 。

3.2.2. R_x 的 B 类不确定度评定

测量用电线电缆绝缘电阻测试仪校准证书显示：107 Ω 档位时，扩展不确定度为 $Ur = 0.6\%$ ($k = 2$)。因此，

$$u_2 = Ur \times \bar{R}' / k = 0.129 \text{ M}\Omega$$

灵敏度系数 $c(R_x) = L = 0.005 \text{ km}$ 。

3.2.3. L 的 B 类不确定度评定

长度的测量涉及测量工具的准确度、试样的弯曲度等因素，单纯由测量工具的准确度确定长度的不确定度分量会远小于实际的不确定度分量，因此，我们以标准要求的长度允许误差来确定长度的不确定度分量。根据 GB/T 3048.5-2007 要求，试样长度的允许误差为 $\pm 1\%$ ，估计其为均匀分布，则：

$$u_3 = 0.005 \times 0.001 / \sqrt{3} = 1.67 \times 10^{-5} \text{ km}$$

灵敏度系数 $c(L) = \frac{\partial R}{\partial L} = R_x + R(t) = \bar{R}' = 43.1 \text{ M}\Omega$ 。

3.2.4. t 的 B 类不确定度评定

测量用恒温水浴的校准证书显示：在 70 $^{\circ}\text{C}$ 点测量结果的扩展不确定度为 $U = 0.25^{\circ}\text{C}$ ($k = 2$)，温度均匀度为 0.07 $^{\circ}\text{C}$ ，温度波动度为 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ 。温度均匀度和波动度估计为均匀分布，取 $k = 3$ 。计算：

温度偏差的不确定度分量 $u_{41} = 0.25/2 = 0.125^{\circ}\text{C}$ ；

温度均匀度的不确定度分量 $u_{42} = 0.07/\sqrt{3} = 0.040^{\circ}\text{C}$ ；

温度波动度的不确定度分量 $u_{43} = 0.15/\sqrt{3} = 0.087^{\circ}\text{C}$ 。

u_{41} 、 u_{42} 、 u_{43} 为相互独立的不确定分量，因此温度的不确定分量 $u_4 = \sqrt{u_{41}^2 + u_{42}^2 + u_{43}^2} = 0.157^{\circ}\text{C}$ 。

在 4.1 中，我们近似地认为 $R(t)$ 与温度 t 成线性关系，即 $R(t) = at + b$ 。因此 a 、 b 只能通过实验确定。我们以 70 $^{\circ}\text{C}$ 为基准点，每隔 2 $^{\circ}\text{C}$ 共取 5 个温度点进行绝缘电阻测量，利用最小二乘法进行数值拟合，并计算 a 和 b 。最终得到灵敏度系数 $c(t) = \frac{\partial R}{\partial t} = aL = -0.075 \times 0.005 = -3.75 \times 10^{-4} \text{ M}\Omega \cdot \text{km}/^{\circ}\text{C}$ 。

3.3. 合成标准不确定度和扩展不确定度

根据以上各分量及灵敏度系数，计算合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + c^2(R_x)u_2^2 + c^2(L)u_3^2 + c^2(t)u_4^2} = 0.0014 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$$

确定包含因子 $k = 2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = 2u_c = 0.0028 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$$

4. 结语

在相同绝缘材料和同一生产工艺下，电线电缆绝缘电阻的测量值与样品的长度、温度、测量时间等均有密切关系。重复性是本文中最大的不确定度分量，也表明在同一个样品上多次测量绝缘电阻有非常大的局限性。本文通过多次测量求得其重复性测量产生的不确定度，仅仅为了论述 A 类不确定度的评定方法。实际测量时，应尽量不对绝缘重复性施加电压，因为即使在每次施加电压前均对试样充分放电，绝缘介质吸收极化程度仍会发生变化，由此引入的不确定度的贡献是最大的。为准确测量绝缘电阻，应确保绝缘电阻测试仪和恒温水浴的精度满足要求。

基金项目

山东检验检疫局科技计划项目(SK201639)。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国国家标准. GB/T3048.5-2007, 电线电缆电性能试验方法 第5部分: 绝缘电阻试验[S].
- [2] 王效飞, 伯成. 电线电缆绝缘电阻测试方法比较[J]. 世界科技研究与发展, 2008, 30(6): 783-786.
- [3] 邓跃伟. 如何准确测量电线电缆的绝缘电阻[J]. 山东省农业管理干部学院学报, 2011, 28(3): 156-158.
- [4] 季红. 电缆绝缘电阻测量不确定度评估研究[J]. 电缆绝缘, 2011(4): 34-37.
- [5] 蒋雪花, 郭春有. 电线电缆绝缘电阻及其测量方法的探讨[J]. 硅谷, 2011(13): 192.
- [6] 胡钰林. 电线电缆绝缘检测技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2004: 3-11.
- [7] 国家质量技术监督局计量司组, 编. 测量不确定度评定与表示指南[M]. 北京: 中国计量出版社, 2000.
- [8] 何曼君, 陈维孝. 高分子物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2005.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jee@hanspub.org