# Rapid Measurement Method for Insulation Resistance of Safety Equipment for Electrified Railways

LIU Zhaochuan*
(CHN ENERGY Baoshen Railway Co.,Ltd.,Ordos Inner Mongolia 017000,China)

**Abstract**: When analyzing the insulation performance of electrified railway safety equipment, a single steady-state model is usually used to measure insulation resistance, which is sensitive to external environmental factors and leads to relatively large measurement errors. Therefore, a new method for rapid measurement of insulation resistance of electrified railway safety equipment is proposed. A fast measurement scheme for insulation resistance of safety equipment is established based on low-frequency injection method, and a fuzzy PID controller is connected in the measurement circuit to ensure that the current in the circuit remains stable during the testing period. A dynamic model is established for the insulation resistance measurement process and the dynamic measurement step response parameters are obtained as the basis for subsequent insulation resistance calculations. Kalman filter algorithm is introduced to solve the interference noise contained in the response signal, and then nonlinear least squares method is applied to carry out automatic identification of circuit model parameters and calculate the equivalent insulation resistance measurement value. The experimental results show that for electrified railway safety equipment, the relative error of the fast measurement results of insulation resistance provided by the proposed method is always less than 1%, which meets the requirements of insulation resistance analysis in this field.

**Key words**: electrified railway; safety equipment; insulation resistance; low frequency injection method; nonlinear least squares
**EEACC**: 7310D **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.015

# 电气化铁路安全用具绝缘电阻快速测量方法

刘照川*
(国能包神铁路有限责任公司,内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘 要**:在分析电气化铁路安全用具绝缘性能时,通常依靠单一稳态模型测量绝缘电阻,对外部环境因素较为敏感,导致测量结果相对误差较大。因此,提出一种新的电气化铁路安全用具绝缘电阻快速测量方法。建立以低频注入法为核心的安全用具绝缘电阻快速测量方案,并在测量回路中接入模糊 PID 控制器,确保测试期间回路内电流保持稳定状态。面向绝缘电阻测量过程建立动态模型,并获取动态测量阶跃响应参数,作为后续绝缘电阻计算的基础。引入卡尔曼滤波算法,解决响应信号中包含的干扰噪声,再应用非线性最小二乘自动辨识电路模型参数,计算出等效绝缘电阻测量值。实验结果表明:面向电气化铁路安全用具,所提方法给出的绝缘电阻快速测量结果相对误差始终低于 1%,满足了该领域绝缘电阻分析要求。

**关键词**:电气化铁路;安全用具;绝缘电阻;低频注入法;非线性最小二乘
**中图分类号**:TN79;TP212 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-9490(2026)04-0812-05

电气化铁路是伴随着电力机车的出现而产生的,因为电力机车本身不自带能源,需要铁路沿途的供电系统源源不断地为其输送电能来驱动车辆。在电气化铁路系统中,绝缘手套、绝缘靴等安全用具发挥了防止电流泄漏、防止电击事故的能力,直接保障了电力设备和人员安全[1]。针对安全用具的绝缘电阻进行测量,有利于及时发现电气设备的绝缘缺陷,预防因绝缘老化、受潮、脏污等原因导致的电气故障和安全事故。因此,开发一种适用于电气化铁路安全用具的绝缘电阻快速测量方法,成为铁路运营安全发展的重要环节。

王春坡等[2]提出基于金属护层环流的绝缘电阻监测方法,以金属护层环流形成原理为基础,设计一种面向现场工作设备的绝缘电阻计算模型,根据不同工作场景下设备运行参数变化,检测出其绝缘性能变化。但是,在绝缘电阻发生细微变化时,该方法无法及时准确地反映出来,导致其应用局限性较大。尹相国等[3]提出考虑杂散参数影响的绝缘电阻监测方法,依托于有限元分析思想,对目标设备的工作原理进行仿真建模,获取其在正常工作模式下

**收稿日期**:2024-10-21 **修改日期**:2024-11-29

产生的绝缘监测关注频段，了解各项杂散参数取值范围。面向实时测量电压振荡信息，去除杂散参数带来的干扰影响，再推算出准确的绝缘电阻值。但是，该方法通过有限元分析进行仿真建模，以获取绝缘监测关注频段内的杂散参数，涉及复杂的数学模型和计算，导致其无法满足实时性要求。吴本祥等[4]提出基于改进注入法的绝缘电阻检测方法，运用电源叠加法，将正向、反向并联直流电源均连接到待测试设备上，启动电源后，通过传感器获取不同场景下线路电流变化，结合其余已知参数推算出绝缘电阻。但是，该监测方法高度依赖于监测装置，容易受到外部环境因素影响，其在绝缘电阻测量过程中抗干扰能力较差。Niu 等[5]提出基于漏电流暂态特性的绝缘电阻测量方法，充分考虑绝缘设备工作过程中漏电流瞬态特性，提取电流变化曲线的振荡周期、初始振幅等参数，基于此完成对绝缘电阻变化的检测。但是，在某些情况下，如绝缘电阻值较高或绝缘退化初期，漏电流的变化可能并不显著，导致该方法在检测轻微绝缘故障时灵敏度不足。

从电气化铁路安全用具的实际使用环境和要求入手，提出了一种基于低频注入法的绝缘电阻快速测量方法。旨在依靠绝缘电阻动态测量模型，获取阶跃响应信息，再利用非线性最小二乘法完成参数辨识，实现对电气化铁路安全用具绝缘电阻的快速、准确测量。

## 1　设计电气化铁路安全用具绝缘电阻快速测量方法

### 1.1　建立安全用具绝缘性能快速测量方案

在电气化铁路安全用具绝缘电阻分析过程中，引入低频注入法，先向连接安全用具的测试回路上注入电流信号[6]，并观察接收回路上电流变化情况，并完成对绝缘电阻的快速测量。低频注入法测量过程中，测量回路对应的稳态模型如图 1 所示。

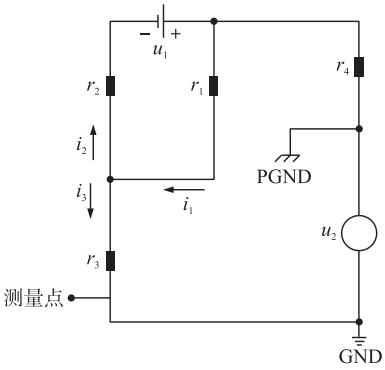


**图 1　基于低频注入法绝缘电阻测量电路稳态模型**

图 1 中，$r_1$、$r_2$、$r_3$、$r_4$ 分别表示限流电阻 1、限流电阻 2、采样电阻和等效绝缘电阻，$i_1$、$i_2$、$i_3$ 表示流经电阻的电流，$u_1$、$u_2$ 表示原始电压和注入信号电压。

考虑到回路中电流的传输具有不断衰减的特性，而想要测量得到准确的绝缘电阻，需要确保回路内电流在一段时间内保持稳定值[7]。面向这一问题，结合模糊理论和 PID 控制算法，构造图 2 所示的模糊反馈控制器。

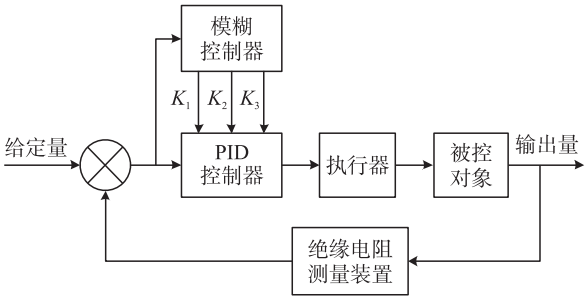


**图 2　模糊反馈控制器**

如图 2 所示，将模糊控制器连接到绝缘电阻测量回路中，通过两个控制模块、一个执行器的共同作用，控制回路内电流向着稳定状态发展。

### 1.2　获取绝缘电阻动态测量阶跃响应

以电气化铁路安全用具绝缘电阻快速测量稳态模型为基础，构建图 3 所示的动态测量模型，获取不同测量时刻阶跃响应信息[8]，为实时绝缘电阻计算提供依据。

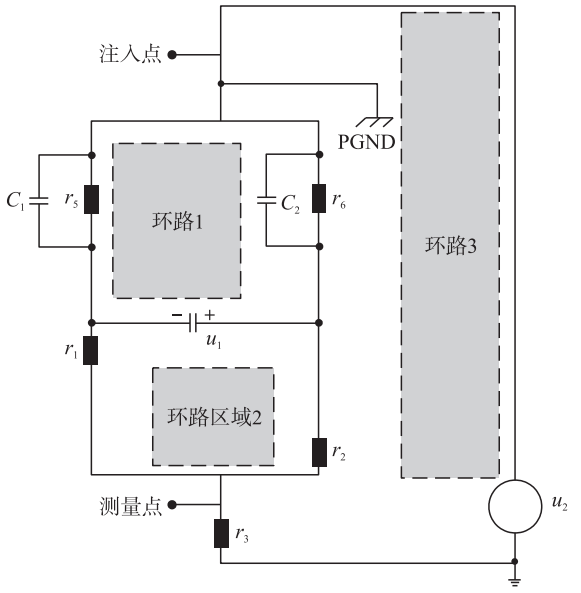


**图 3　动态测量模型**

图 3 中，$r_5$ 表示测量用具连接后电阻，$C_1$ 表示电容。

充分考虑注入信号的阶跃变化，可以计算出流经各个电阻的电流之间存在式(1)所示的关系。

$$\begin{cases} i_3 = i_1 + i_2 \\ i_3 = i_4 + i_5 \end{cases} \tag{1}$$

式中：$i_4$、$i_5$ 分别表示流经安全用具的电流。

从动态模型可以看出，整个测量电路被划分为 3 个环路，依托于基尔霍夫定律[9]，可以给出环路 1、环路 2、环路 3 对应的数学方程。

$$\begin{cases} \dfrac{u_1}{\varepsilon} = r_1 i_3 + r_2 i_4 \\ \dfrac{u_1}{\varepsilon} = \dfrac{i_2}{1/r_5 + \varepsilon C_1} - \dfrac{i_1}{1/r_6 + \varepsilon C_2} \\ \dfrac{u_2}{\varepsilon} = \dfrac{i_1}{1/r_6 + \varepsilon C_2} + \dfrac{i_2}{1/r_5 + \varepsilon C_1} \end{cases} \tag{2}$$

式中：$\varepsilon$ 表示测试时间周期。

结合式(1)和式(2)，对采样电阻的电流计算过程展开拉氏反变换，得到采样电流阶跃响应值：

$$i_3 = v_1 + v_2 \exp(\varepsilon / v_3) \tag{3}$$

式中：$v_1$ 表示响应稳态分量，$v_2$ 表示响应增益，$v_3$ 表示响应时间常数，exp 表示指数函数。

结合采样电流和采样电阻，可以得出测量过程中采样电压阶跃响应变化：

$$u_3 = i_3 \times r_3 = v_1 r_3 + v_2 r_3 \exp(\varepsilon / v_3) \tag{4}$$

式中：$u_3$ 表示采样电压阶跃响应值。

### 1.3 设计卡尔曼滤波信号处理技术

大量动态测量阶跃响应数据应用到绝缘电阻计算之前，考虑到测试过程中现场环境中各项因素的干扰作用，设计以卡尔曼滤波为核心的响应信号预处理方案。依托于线性最小均方误差准则[10]，对现场采集的随机阶跃响应信号进行最优递归估计，从而消除原始信号中的噪声。这一过程中，最优递归估计数学表达式为：

$$\hat{\psi}_k = F_{k-1} \hat{\psi}_{k-1} + \rho_k Y_k \tag{5}$$

式中：$k$ 表示信号维度，$\hat{\psi}$ 表示最优估计值，$F$ 表示反馈矩阵，$\rho$ 表示前向增益矩阵，$Y$ 表示测量数据向量。其中：

$$\rho_k = P_k H_k^{\mathrm{T}} (H_k P_k H_k^{\mathrm{T}} + \zeta_k) \tag{6}$$

$$F_{k-1} = H_{k,k-1} - \rho_k H_k H_{k,k-1} \tag{7}$$

式中：$P$ 表示协方差矩阵，$H$ 表示量测矩阵，T 为转置符号，$\zeta$ 表示噪声矩阵。

将无偏、最小均方误差估计准则加入到最优递归估计过程中，即可构造出式(8)所示的卡尔曼滤波器。

$$\hat{\psi}_k = \Phi_{k,k-1} \hat{\psi}_{k-1} + \rho_k (Y_k - H_k H_{k,k-1} \hat{\psi}_{k-1}) \tag{8}$$

式中：$\Phi$ 表示状态转移矩阵。

通过卡尔曼滤波器对所有绝缘电阻测量动态阶跃响应信号进行降噪处理，再将预处理后的数据应用到后续计算过程中，即可获得绝缘电阻计算值。

### 1.4 计算安全用具绝缘电阻测量值

以提升绝缘电阻测量效率和质量为目标，将非线性最小二乘法引入到计算过程中[11]，自动辨识模型参数并取响应信号中的极小值，得出绝缘电阻测量值。实际操作过程中，定义非线性最小二乘法迭代求解过程为：

$$(\mu^{\mathrm{T}} \times \mu) \times z = -\mu^{\mathrm{T}} \times f(v_1 r_3 \times \mathrm{e}^{\varepsilon / v_2 r_3} + \varepsilon / v_3) \tag{9}$$

式中：$\mu$ 表示 Jacobian 矩阵，$z$ 表示迭代步长，$f$ 表示极小值求解目标函数。

收敛条件为：

$$|\lambda(\beta + z) - \lambda(\beta)| \leqslant s \tag{10}$$

式中：$\lambda$ 表示均方差，$\beta$ 表示输入信号，$s$ 表示收敛阈值。

以满足收敛条件为目标，应用非线性最小二乘法展开不断计算，辨识出绝缘电阻快速测量稳态参数，将其代入式(11)中，即可输出等效绝缘电阻计算值。

$$r_4 = r_3 \times \frac{u_2}{u_3} - \left( \frac{r_5 + r_6}{2} + r_3 \right) \tag{11}$$

通过上述计算分析，得出最终的绝缘电阻快速测量结果，以此来描述电气化铁路安全用具绝缘性能。

## 2 实验与结果分析

### 2.1 实验准备

针对邯长线变电所、黎城牵引变电所等电气化铁路组成场所进行分析，明确其日常工作中最常用的安全用具就是绝缘杆、绝缘手套和绝缘靴。因此，在检验新提出绝缘电阻快速测量方法应用效果时，选择绝缘靴作为实验对象。考虑新研究方法的测量原理，打造面向电气化铁路安全用具的绝缘电阻低频注入测量装置，如图 4 所示。

图 4 测量装置实物图

该装置技术参数如表 1 所示。

**表 1　绝缘电阻快速测量装置参数**

| 参数项 | 取值 |
|---|---|
| 电源输入电压/V | 220±22 |
| 额定输出电压/V | 100 |
| 额定输出电流/A | 50 |
| 额定输出容量/kVA | 10 |
| 最大量程/mA | 19.9 |
| 测量误差/% | ±1 |
| 电流分辨率/mA | 0.01 |
| 环境温度/℃ | −10~40 |

利用该装置对 8 只绝缘靴进行测量，测试这些安全用具的绝缘电阻，为了保证回路内电流保持稳定值，在当前工作场景中加入模糊 PID 控制器，控制器的输入和输出结果如图 5 所示。

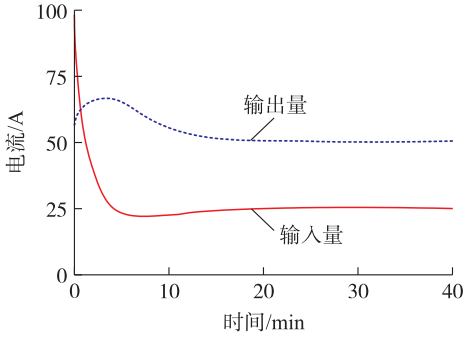


**图 5　模糊控制器输入量、输出量变化曲线**

从图 5 可以看出，应用模糊控制器后，回路内电流输出量稳定在 50 A，与测量装置的额定输出电流参数一致，满足了安全用具绝缘电阻测量要求。

## 2.2　数据处理

设置采样周期为 1 ms，启动安装绝缘靴的测试装置后，获取测量周期下动态阶跃响应数据，得到图 6 的数据分布图。

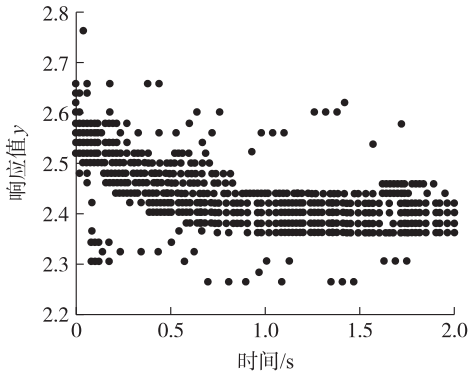


**图 6　原始测量数据**

从图 6 可以看出，原始测量响应数据呈现出阶梯分布特点，体现了数据变化趋势。但其中包含的大量噪声，会对后续绝缘电阻测量计算产生极大影响。因此，在卡尔曼滤波算法的作用下对原始响应数据进行去噪处理，最终得到图 7 所示的数据曲线。

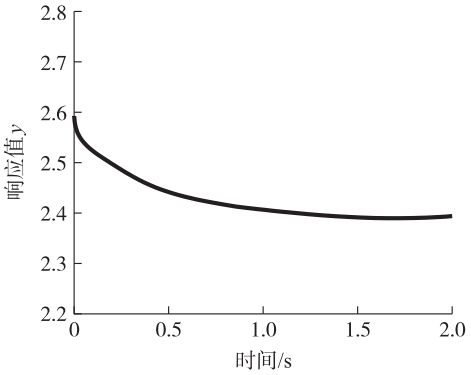


**图 7　滤波后数据变化曲线**

从图 7 可以看出，滤波后数据满足了聚合和平滑处理要求，绝大部分噪声数据点也被剔除，将其应用到后续等效绝缘阻值计算过程中，输出符合预期测量要求的测量结果。

## 2.3　绝缘电阻快速测量结果

利用非线性最小二乘法对动态测量数据进行进一步辨识和分析，获取有效的电路模型参数，以此为基础即可求出等效绝缘电阻，如图 8 所示。本次实验测试过程中，除了新研究的测量方法外，还采用了当前应用范围最广的考虑杂散参数影响的方法、基于金属护层环流的方法，分别对同样的安全用具完成绝缘电阻测量，测量结果同样体现在图 8 中，以便对比各方法测量性能。

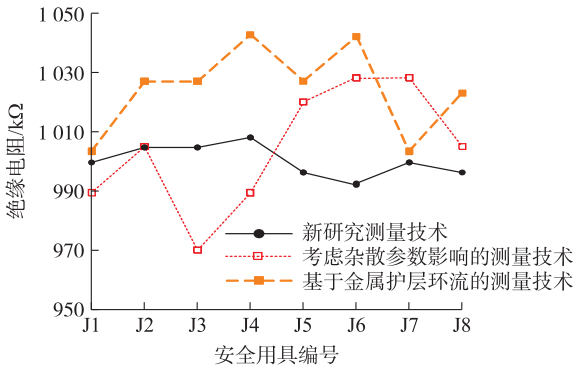


**图 8　不同安全用具绝缘电阻快速测量结果**

从图 8 可以看出，三种方法都完成了对绝缘靴绝缘电阻的测量，但测量结果存在较大差异。对比这些绝缘靴的真实绝缘电阻值（1 000 kΩ），通过式（12）计算出各方法测量结果相对误差，并生成图 9，以此来评估新提出快速测量方法的优越性。

$$E=\frac{|\eta-\eta'|}{\eta'}\times 100\% \tag{12}$$

式中：$E$ 表示相对误差，$\eta$、$\eta'$分别表示绝缘电阻测量值和真实值。

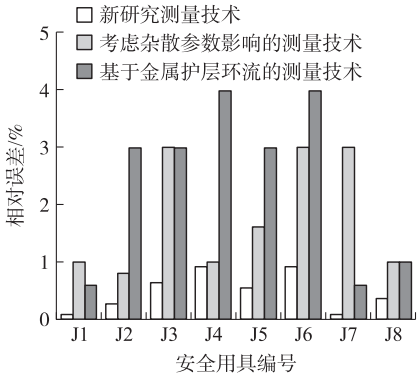


**图 9 不同方法测量结果相对误差对比**

从图 9 可以看出,新提出方法给出的绝缘电阻测量结果相对误差始终保持在 1%以下,而另外两种方法的相对误差最大值分别达到了 3%和 4%。从对比图像可以看出,新方法的推广应用,有利于更准确地观察电气化铁路安全用具绝缘性能,保障工作人员安全。

## 3 结束语

综上所述,提出结合低频注入法和非线性最小二乘法的绝缘电阻快速测量方法,不仅显著提高了测量效率和准确性,还增强了抗干扰能力,为电气化铁路安全用具的绝缘性能评估提供了可靠的技术手段。

**参考文献:**

[1] 徐海松,张大宁,胡冉,等. 基于谐波分量的配电电缆绝缘劣化状态带电检测技术[J]. 电工技术学报,2024,39(7):2161-2173.

[2] 王春坡,周凯,孟鹏飞,等. 基于金属护层环流的高压电缆外护套绝缘电阻在线监测方法[J]. 绝缘材料,2024,57(7):112-120.

[3] 尹相国,李洋,崔翔. 考虑杂散参数影响的控制电缆绝缘电阻监测方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2024,36(3):87-94.

[4] 吴本祥,陈亮,李耕,等. 船舶综合电力系统绝缘电阻在线检测方法[J]. 海军工程大学学报,2024,36(1):69-75.

[5] Niu F,Wang Y,Huang S,et al. An Online Groundwall Insulation Monitoring Method Based on Transient Characteristics of Leakage Current for Inverter-Fed Motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2022,37(8):9745-9753.

[6] 王玉,游志宇,刘永鑫,等. 动力电池组绝缘电阻检测与故障定位[J]. 电子测量技术,2022,45(5):157-162.

[7] 魏坤鹏,刘月明,褚明星. 牵引电机轴承绝缘涂层绝缘性能与力学性能试验分析[J]. 轴承,2023(4):9-14.

[8] 何东欣,魏君宇,王婉君,等. 界面缺陷及老化状态下电力电子器件封装绝缘应力波检测与分析[J]. 电工技术学报,2023,38(3):610-621.

[9] 祁忠永. 电气化铁路贯通式同相供电系统方案及控制策略[J]. 铁道工程学报,2024,41(5):67-72.

[10] 陈冲,贾利民,赵天宇,等. 基于储能的非电气化铁路新型牵引供电系统架构及关键技术[J]. 中国铁道科学,2024,45(1):162-177.

[11] 张杰,吴成辉,潘明俊,等. 电池储能系统绝缘电阻检测方法误差分析[J]. 储能科学与技术,2024,13(4):1167-1175.

**刘照川**(1980—),男,工程师,本科,主要研究方向:牵引供电,liuzhao25875@163.com。