

DOI: 10.13382/j.jemi.2018.11.011

基于模型参数辨识的电动汽车绝缘电阻测量

张 强 石 春

(中国科学技术大学 合肥 230026)

摘 要: 针对电动汽车运行复杂工况下,动力电池组和电底盘之间的绝缘电阻测量问题,构建基于低频注入法绝缘电阻测量的电路模型。考虑到高压系统与电底盘之间的 Y 电容变化会影响系统的测量精度和测量周期,以车辆绝缘电路模型为基础,测量注入信号下的阶跃响应。根据响应序列,采用非线性最小二乘法辨识电路模型参数,并依据该模型参数计算等效绝缘电阻值和测量周期。实验结果表明,所提出的测量方法不仅有效抑制了测量噪声,将绝缘电阻相对误差控制在 3% 以内,而且可以实时调整测量周期,提高了绝缘电阻测量系统的精确性和响应速度。

关键词: 电动汽车; 绝缘电阻; 低频注入法; Y 电容; 参数辨识; 非线性最小二乘

中图分类号: TN79 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Measurement of insulation resistance of electric vehicle based on model parameter identification

Zhang Qiang Shi Chun

(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: To solve the problem of measuring the insulation resistance between the power battery pack and the electric chassis under the complex operating conditions of electric vehicles, an insulation resistance measurement circuit model based on the low frequency injection method was constructed. Considering that the change of the Y capacitance between the high voltage system and the electric chassis will affect the measurement accuracy and measurement period of the system, this paper calculates the step response of the circuit model under the measured signal. According to the response sequence, the nonlinear least square method was used to identify the circuit model parameters, and the equivalent insulation resistance value and measurement period were calculated according to the model parameters. The experimental results show that the proposed measurement method effectively suppresses the measurement noise, controls the relative error of the insulation resistance within 3%, and enable the measurement period adjust in real time, improving the accuracy and response speed of the insulation resistance measurement system.

Keywords: electric vehicle; insulation resistance; low-frequency injection method; Y-capacitor; parameter identification; nonlinear least squares

0 引 言

随着我国汽车保有量的不断提高,能源安全和环境问题日益突出,大力发展新能源汽车成为产业发展的必然选择^[1-2]。相比燃油车,电动汽车包含高压部件,包括电机控制器、动力电池、电动压缩机和 DC/DC 等。电缆绝缘介质老化、潮湿环境等,都会导致高压电气系统和车辆电底盘之间的绝缘性能下降。动力电池组正极或

负极引线将通过绝缘层和电底盘之间构成漏电回路,使车辆底盘电位上升或下降,影响低压部件和高压部件的正常工作,危及驾乘人员的人身安全。因此实时监测高压电气系统的绝缘性能,是电动汽车电气安全技术的核心内容,对整车和驾乘人员安全具有重要意义。

传统的绝缘电阻测量方法为电桥法^[3],基本原理是在动力电池正负母线和车辆电底盘间接入限流电阻,通过电子开关改变电阻阻值的大小,测量在接入不同电阻情况下被测电阻上的分压,最后通过解方程计算绝缘电

收稿日期: 2018-06 Received Date: 2018-06

阻^[4]。电桥法电路简单,可以直接计算绝缘电阻,但该方法存在较多弊端。当正负母线与电底盘的绝缘电阻相等时,计算方程组无解,绝缘电阻无法计算^[5];当电池组总电压过低或者电池组开路故障时,由于无法测量电阻上的分压,故无法计算绝缘电阻;动力电池两极和电底盘之间存在 Y 电容,电桥法需要增加测量周期来提高绝缘电阻检测精度,从而降低了测量系统响应速度。因此,需要引入低频注入式绝缘检测方法^[6]。

低频注入法的基本原理是向高压回路注入一个可变电流信号,通过检测接收回路上的电流变化值,来测量系统当前的绝缘电阻值。与电桥法相比,解决了电池内部对地短接或正负对称接地时,无法测量绝缘电阻的问题。目前,基于有源信号检测的低频注入法在电动汽车绝缘监测中得到了广泛应用^[7-9]。

考虑到高压系统对电底盘之间存在 Y 电容,且该电容值易受车辆部件更换、环境变化(温度、湿度)等外部因素影响,进一步影响绝缘电阻测量精度和测量周期^[10]。本文在低频注入法稳态测量模型的基础上,建立系统动态模型,并根据其阶跃响应,利用非线性最小二乘法进行模型参数辨识,精确计算出绝缘电阻值和系统响应周期。

1 基于低频注入法绝缘电阻测量的电路模型

1.1 稳态模型与定点采样测量方法

基于低频注入法绝缘电阻测量电路的稳态模型如图 1 所示。其中, U 为高压动力电池组电压, U_s 为脉冲注入信号电压幅值, U_3 为采样电阻 R_3 两端电压, I_1 、 I_2 、 I_3 分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 上流过电流;注入电压源、等效绝缘电阻 R_f 、采样电阻 R_3 和限流电阻 R_1 依次串联构成回路 I;高压动力电池组、限流电阻 R_2 和限流电阻 R_1 构成回路 II;A 为测量点,且 $R_1 = R_2 = R$ 。

实际应用中绝缘故障可以发生在高压系统任何部位,但最终可等效为只发生在某一侧^[11]。假定绝缘故障发生在高压系统正极,则对应脉冲注入信号测量正半周期如下。

节点 A 电流方程为:

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (1)$$

回路 I 电压方程:

$$U_s = R_f \cdot I_3 + R_1 \cdot I_1 + R_3 \cdot I_3 \quad (2)$$

回路 II 电压方程:

$$U = R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 \quad (3)$$

U_3 为可测电压,因此:

$$I_2 = U_3 / R_3 \quad (4)$$

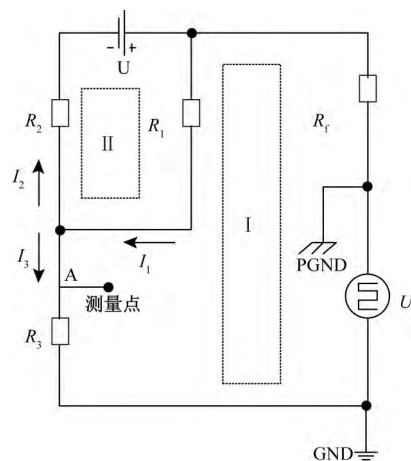


图 1 稳态模型电路原理

Fig. 1 Steady model circuit schematic

整理式(1)~(4),得出:

$$U_3 = \frac{(2U_s - U) R_3}{2(R_f + R_3 + 0.5R)} \quad (5)$$

进一步整理式(5),得到等效绝缘电阻 R_f :

$$R_f = \frac{R_3(2U_s - U)}{2U_3} - R_3 - 0.5R \quad (6)$$

定点采样方法 FSM(fixed-point sampling method) 采集一段区间内电压序列,利用滑动 R_p 区间内电压序列判断波形是否稳定。待电压波形稳定后,将电压值代入式(6),计算等效绝缘电阻。但稳定后电压波形易受车辆运行时复杂电磁干扰,直接影响系统测量精度。另一方面,由于后期波形变化缓慢且受到采样区间限制,很难判断波形是否稳定。在波形稳定之前计算绝缘电阻,会使绝缘电阻偏小,严重时会发生绝缘误报,影响整车运行。为确保计算值为电压波形稳定后值,定点采样方法在车辆初次上电时,测定系统响应时间,标定等效 Y 电容值,进一步标定系统测量周期。在车辆一次上电过程中,即使绝缘电阻值发生变化,其测量周期不变,为初次上电时标定的测量周期。在车辆初次上电时,高压系统未完全运行,干扰较少,因此得到的值较为可信。

1.2 动态模型及其阶跃响应

基于低频注入法测量绝缘电阻电路的动态模型如图 2 所示。其中 U 为动力电池组电压; R_p 为动力电池正极与电底盘之间的电阻; C_p 为动力电池正极与电底盘之间的 Y 电容; R_N 为动力电池负极与电底盘之间的电阻; C_N 为动力电池负极与电底盘之间的 Y 电容; R_1 、 R_2 为检测仪器的限流电阻,且 $R_1 = R_2 = R$; R_3 为检测仪器的采样电阻。绝缘监测仪将内部产生的 PWM 脉冲信号注入到电底盘 PGND,通过动力电池两极分别对底盘的绝缘电阻和 Y 电容,经过限流电阻,最终在采样电阻上产生压降。

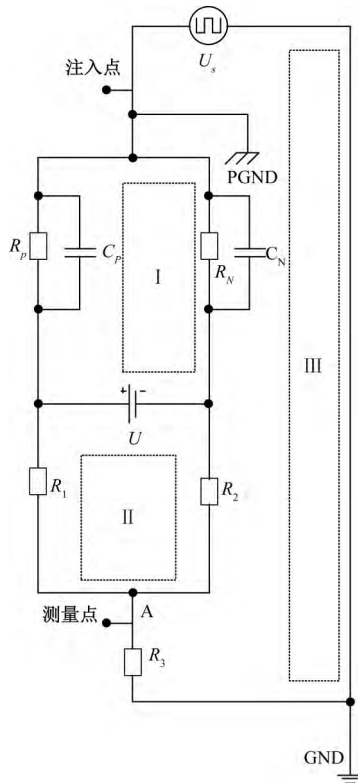


图2 动态模型电路原理

Fig.2 Dynamic model circuit schematic

当脉冲信号发生器产生幅值为 U_s 的阶跃电压时, 设 R_p 、 R_N 、 R_1 、 R_2 、 R_3 上分别流过的电流为 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 、 I , 则有:

$$I = I_1 + I_2 \quad (7)$$

$$I = I_3 + I_4 \quad (8)$$

对于 U 与 R_p 、 R_N 构成的回路 I, U 与 R_1 、 R_2 构成的回路 II, R_3 与 U_s 构成回路 III 根据基尔霍夫定律有:

$$U/s = R_1 \cdot I_3 + R_2 \cdot I_4 \quad (9)$$

$$U/s = I_2 / (1/R_N + s \cdot C_N) - I_1 / (1/R_p + s \cdot C_p) \quad (10)$$

$$U_s/s = I_1 / (1/R_p + s \cdot C_p) + R_1 \cdot I_3 + R_2 \cdot (I_3 + I_4) \quad (11)$$

整理式(7)~(11), 得出流过采样电阻 R_3 上的电流 I , 并作拉式反变换得:

$$i = a_1 + a_2 \cdot \exp(t/a_3) \quad (12)$$

其中 t 为时间变量, 参数表达式为:

$$a_1 = ((R_p - R_N) \cdot U) / ((R + 2R_3) \cdot (R_p + R_N) + 2R_p \cdot R_N) + ((R_p - R_N) \cdot 2U_s) / ((R + 2R_3) \cdot (R_p + R_N) + 2R_p \cdot R_N) \quad (13)$$

$$a_3 = (C_N + C_p) \cdot (R_p // R_N // (R + 2R_3) / 2) \quad (14)$$

参数 a_1 为响应稳态分量, 由于动力电池电压 U 的作用分量可以在后续的操作中消除, 所以 a_1 可表达为:

$$a_1' = ((R_p - R_N) \cdot 2U_s) / ((R + 2R_3) \cdot (R_p + R_N) + 2R_p \cdot R_N) \quad (15)$$

参数 a_2 为响应增益, 在本文中不做考虑。参数 a_3 为响应时间常数。

设该响应过程中采样电阻 R_3 上的电压为 U_3 , 则采样电压在脉冲注入信号下的阶跃响应为:

$$U_3 = i \cdot R_3 = b_1 + b_2 \cdot \exp(t/b_3) \quad (16)$$

其中:

$$b_1 = a_1' \cdot R_3 = (R_3 \cdot (R_p - R_N) \cdot 2U_s) / ((R + 2R_3) \cdot (R_p + R_N) + 2R_p \cdot R_N) \quad (17)$$

$$b_2 = a_2 \cdot R_3 \quad (18)$$

$$b_3 = a_3 \quad (19)$$

当采样电阻 R_3 上的电压稳定时, 即 $U_3 = b_1$, 对式(17)作变形, 得等效绝缘电阻:

$$R_f = R_p // R_N = R_3 \cdot U_s / U_3 - (R/2 + R_3) \quad (20)$$

由式(16)可得, 响应值在时间 t 下为非线性模型, 且不能利用数学方法对其进行线性化, 本文采用非线性最小二乘法对其进行参数辨识。

2 基于非线性最小二乘法模型参数辨识测量方法

根据 1.2 小节, 问题可转化为对于给定的 m 个数据点 (t_i, y_i) $i = 1, 2, 3, \dots, m$, 对模型 $f(t) = b_1 \cdot e^{t/b_2} + b_3$ 进行参数辨识。根据最小二乘法原理^[12] 欲使均方差:

$$E(x) = \sum_{i=1}^m (f(t_i) - y_i)^2 = \sum_{i=1}^m (b_1 \cdot e^{t_i/b_2} + b_3 - y_i)^2$$

$$x^T = [b_1 \ b_2 \ b_3] \quad (21)$$

取得极小值, 必要条件是:

$$\frac{\partial E}{\partial b_1} = \frac{\partial E}{\partial b_2} = \frac{\partial E}{\partial b_3} = 0 \quad (22)$$

不难看出这是一个非线性方程组^[13]。

考虑到迭代快速性, 可以采用牛顿迭代法求解^[14]。根据式(23), 算法迭代步长 h 由 $E(x)$ 对 x 取极小值时得到 J 为 Jacobin 矩阵:

$$(J^T \cdot J) \cdot h = -J^T \cdot f \quad (23)$$

收敛条件为 $|E(x+h) - E(x)| < \varepsilon$ 其中 ε 足够小。

参数辨识方法 (parameter identification method, PIM) 软件流程如图 3 所示, 其算法主要步骤如下^[15]。

- 1) 读取数据点 (t_i, y_i) , 并进行去野点、滑动平均滤波等操作, 保证数据的可靠性;
- 2) 给辨识参数 b_1 、 b_2 、 b_3 赋初始值;
- 3) 计算 Jacobin 矩阵 J 并计算迭代 h ;
- 4) 若 $|E(x+h) - E(x)| < \varepsilon$, 则认为 $E(x)$ 已收敛, 退出迭代, 输出最优参数组 b_1^* 、 b_2^* 、 b_3^* , 若否, 则更新参数组 x , 并重复步骤 3)。

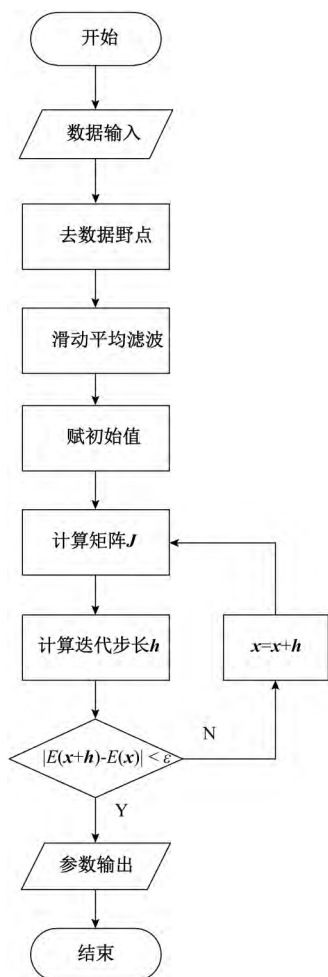


图 3 参数辨识算法流程

Fig. 3 Parameter identification algorithm flow chart

利用辨识出的稳态值 b_1^* 的值代入式(22), 计算得到等效绝缘电阻 R_f 。根据响应时间常数 b_3^* 确定系统响应时间, 得出系统测量周期。

PIM 得益于大量数据的拟合, 可以有效抑制噪声, 消除复杂环境干扰, 得到稳定精确的模型参数。进一步计算得到稳定可靠的绝缘电阻值, 并利用系统响应时间, 实时调整系统测量周期, 提升系统响应速度。

3 实验验证与分析

为了验证算法的可行性, 在电池组两极和模拟底盘间接入电阻 $R_N = R_p = 2 \text{ M}\Omega$, Y 电容 $C_p = C_N = 100 \text{ nF}$, 并利用低频注入法绝缘监测仪测量, 其测量值上限为 $50 \text{ M}\Omega$ 。其中动力电池组电压 $U = 45 \text{ V}$, 脉冲注入电压幅值 $U_s = 40 \text{ V}$ 。测量设备每 1 ms 对采样电压值进行采集, 得到测量周期下响应序列。

图 4 所示为采集到的原始数据和滤波后数据, 由于

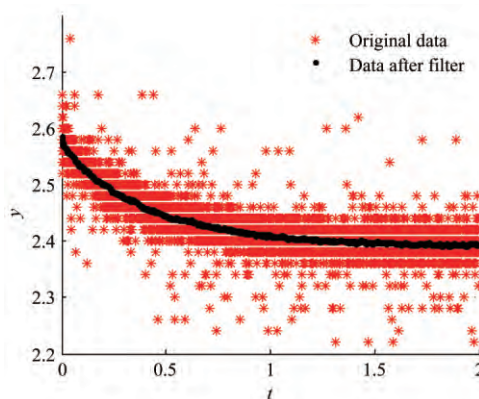


图 4 原始数据和滤波后数据

Fig. 4 Raw data and filtered data

环境干扰和采集设备精度限制, 原始数据中含有大量的随机噪声, 整体数据呈现阶梯分布; 对原始数据采用 3σ 原则剔除野点, 滑动平均滤波等操作后, 得到较为聚合和平滑的滤波后数据。

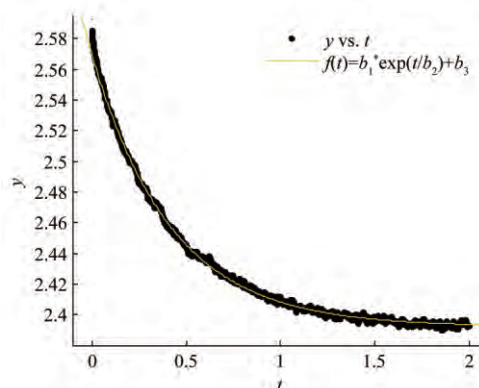


图 5 待拟合数据和拟合后曲线

Fig. 5 The data to be fitted and the curve after fitting

图 5 所示为对滤波后数据进行参数辨识得到的目标函数曲线, 可以看到目标曲线与数据点基本重合, 置信系数达到 95%, 误差平方和 SSE 为 0.061 29, 确定系数 R-square 为 0.998 4; 计算得到的等效绝缘阻值和等效 Y 电容值也达到预期效果。

进一步在不同工况下, 将采用参数辨识方法 PIM 与原始的定点采样方法 FSM 作对比, 其中动力电池电压 $U = 45 \text{ V}$, 注入电压 $U_s = 40 \text{ V}$ 。测定不同工况不同方法下得到测量周期 T , 等效绝缘电阻 R_f , 并计算等效绝缘阻值的相对误差 δ , 结果如表 1 所示。

从表 1 结果可看出, 在各种工况下, 定点采样方法 FSM 测得的等效绝缘电阻值相对误差在 10% 以内。由于受到 ADC 采样精度影响, 当等效绝缘电阻较大时, 相对误差较大; 当等效绝缘电阻较小时, 相对误差较小。又

表 1 不同工况下 FSM 和 PIM 测量结果对比

Table 1 Comparison of FSM and PIM measurement results under different operating conditions

工况	$R_p//R_n=80\text{ M}\Omega$ $C_p//C_n=200\text{ nF}$		$R_p//R_n=1\text{ M}\Omega$ $C_p//C_n=200\text{ nF}$		$R_p//R_n=200\text{ K}\Omega$ $C_p//C_n=200\text{ nF}$		$R_p//R_n=1\text{ M}\Omega$ $C_p//C_n=1\text{ }\mu\text{F}$	
	FSM	PIM	FSM	PIM	FSM	PIM	FSM	PIM
方法								
T/s	0.8	0.8	0.8	0.6	0.8	0.2	4	4
参数 $R_f/\text{k}\Omega$	5 000	5 000	1 089	1 025	209	202	905	972
$\delta/\%$	—	—	8.9	2.5	4.5	1	-9.5	-2.8

由于受到复杂的电磁环境干扰,给定点采样法得到的采样电压带来不确定因数,影响了等效绝缘电阻值的稳定性。利用参数辨识方法 PIM 得到的等效绝缘电阻相对误差在 3% 以内,消除了 ADC 精度和随机干扰带来的影响。

另一方面,参数辨识方法 PIM 相对定点采样方法 FSM 能实时调整系统响应周期。如表 1 所示,当车辆绝缘性能降低时,电池组正负母线与电底盘间的等效绝缘阻值由 80 MΩ 向预警值 200 kΩ 逼近,利用参数辨识方法 PIM 得到的测量周期也由 0.8 s 到 0.2 s 不断缩短,而利用定点采样方法 FSM 的系统测量周期不变,为当前工况下最大值 0.8 s,参数辨识方法 PIM 能更快测得预警值,发出预警信号,提高了系统响应速度。

4 结 论

本文以低频注入法测量绝缘电阻的电路模型为基础,计算该电路模型在脉冲注入信号下的阶跃响应。根据响应序列,采用非线性最小二乘法辨识出电路模型参数,并依据模型参数计算等效绝缘电阻值和测量周期。实验一方面验证了非线性最小二乘算法在模型参数辨识中的可行性;另一方面将定点采样方法 FSM 和参数辨识方法 PIM 作对比,结果表明基于动态模型的参数辨识方法 PIM 得到的等效绝缘电阻值相对误差在 3% 以内,明显优于前者,并且能实时调整测量周期,提高了测量系统的精确性和响应速度。

参考文献

[1] 王嘉悦. 电动汽车有源在线绝缘监测装置的研究与开发[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
WANG J Y. Research and development of active online insulation monitoring device for electric vehicles [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.

[2] 艾静. 客车智能绝缘检测仪的设计与实现[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
AI J. Design and implementation of bus intelligent insulation tester [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.

[3] LI J, WU Z, FAN Y, et al. Research on insulation resistance on-line monitoring for electric vehicle[C]. 8th

International Conference on Electrical Machines and Systems, IEEE, 2006: 814-817.

[4] 郭宏榆, 姜久春, 温家鹏, 等. 新型电动汽车绝缘检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(3): 253-257.
GUO H Y, JIANG J C, WEN J P, et al. Research on insulation detection method for new type electric vehicles [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(3): 253-257.

[5] JIANG J, JI H. Study of insulation monitoring device for DC system based on multi-switch combination [C]. International Symposium on Computational Intelligence and Design, IEEE, 2009: 1-4.

[6] 吴东来, 丁李辉. 新型电动汽车绝缘性检测方法探究[J]. 时代汽车, 2016(z1): 49-50.
WU D L, DING L H. Research on insulation test method for new type electric vehicles [J]. Auto, 2016(z1): 49-50.

[7] 王智, 徐军, 李平, 等. 基于自适应低频信号的绝缘监视装置设计[J]. 现代建筑电气, 2015(4): 37-41.
WANG Z, XU J, LI, et al. Based insulation monitor adaptive low-frequency signal [J]. Electrical Modern Buildings, 2015(4): 37-41.

[8] 姜雨, 沙立民, 任谊. 基于低频信号法的电动汽车绝缘监测方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(11): 25-28.
JIANG Y, SHA L M, REN Y. Research on insulation monitoring method of electric vehicle based on low frequency signal method [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014(11): 25-28.

[9] SONG C, SHAO Y, SONG S, et al. Insulation resistance monitoring algorithm for battery pack in electric vehicle based on extended Kalman filtering [J]. Energies, 2017, 10(6): 714.

[10] 陈刚. 电容型高压电气设备绝缘在线检测系统研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
CHEN G. Research on on-line insulation inspection system of capacitive high-voltage electrical equipment [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014.

[11] 甄洪亮. 车用直流高压系统的绝缘电阻的测量装置:

CN 201886083 U[P]. 2011.

ZHEN H L. Measuring device for insulation resistance of DC high voltage systems for vehicles: CN 201886083 U[P]. 2011.

- [12] ZHOU , ZHANG W J , LI. Global convergence of a regularized factorized quasi-Newton method for nonlinear least squares problems [J]. Computational & Applied Mathematics , 2010 , 29(2) : 195-214.

- [13] BAO J F , LI C , SHEN W P , et al. Approximate Gauss-Newton methods for solving underdetermined nonlinear least squares problems [J]. Applied Numerical Mathematics , 2016 , 111(1) : 92-110.

- [14] 张海宁. 基于非线性最小二乘法的光伏电池参数辨识[J]. 现代电力 2017(6) : 79-84.

ZHANG H N. photovoltaic cell identification parameter based on a nonlinear least square method [J]. Modern Power , 2017 (6) : 79-84.

- [15] 白忠雄. 基于 DSP 的零功率装置周期测量仪研究[J]. 中国核科技报告 , 2007(2) : 55-68.

BAI ZH X. Research on zero-power device period measuring instrument based on DSP [J]. China Nuclear Science and Technology Report , 2007(2) : 55-68.

作者简介



张强 ,2016 年于中国地质大学(北京) 获得学士学位 , 现为中国科学技术大学硕士研究生 , 主要研究方向为新能源汽车绝缘监测系统。

E-mail: legendzq@mail.ustc.edu.cn

Zhang Qiang received his B. Sc. degree from China University of Geosciences (Beijing) in 2016. He is currently a M. Sc. candidate in University of Science and Technology of China. His main research interests include new energy vehicle insulation monitoring system.



石春 , 分别在 2003 年和 2008 年于中国科学技术大学获得学士学位和博士学位 , 现为中国科学技术大学副教授 , 主要研究方向为汽车电子开发与应用、嵌入式系统。

E-mail: cshi@mail.ustc.edu.cn

Shi Chun received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from the University of Science and Technology of China in 2003 and 2008 , respectively. He is currently an associate professor in University of Science and Technology of China. His main research interests include automotive electronics development and application , and embedded systems.