

# 一种阻容电路特征阻值的快速测量方法<sup>\*</sup>

陈东成<sup>1,2</sup>, 贺庚贤<sup>1</sup>, 宁飞<sup>1</sup>, 李俊霖<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**为解决阻容电路特征阻值测试时间长、误差大的问题,对典型的阻容并联电路的特性进行了理论分析,提出了一种等时间间隔采样法,应用该方法,只需要等间隔采样三个测量值,便可以计算出该电路的特征阻值,讨论了特征阻值测试仪的误差源和减小误差的方法,实验验证,等时间间隔采样法的测量效率是直接测量法的5倍以上。

**关键词:** 特征阻值, 等时间间隔采样法, 阻容电路

中图分类号: TM934.12

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2011)12-0013-04

## A Characteristic Resistance Fast Measuring Method of Resistor-capacitor Circuits

CHEN Dong-cheng<sup>1,2</sup>, HE Geng-xian<sup>1</sup>, NING Fei<sup>1</sup>, LI Jun-lin<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China. 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China.)

**Abstract:** To reduce the measuring time and errors of characteristic resistance measuring of Resistor-Capacitor circuits, after some theoretical analysis on circuit parallel connected by a resistor and a capacitor, we deduced a measuring method and named it sampling in equal time interval method. Using this measuring method, we just need to sample 3 values in equal time interval, then we can calculate the characteristic resistance of the circuit. We also discussed the source of errors and found ways to reduce the errors of the results. The experiments improved that the new measuring method can work 5 times faster than traditional ways.

**Key words:** characteristic resistance, sample in equal time interval, resistor-capacitor circuits

### 0 引言

特征阻值是电接口任意两接点间的电阻值,是描述电接口特性的重要指标之一。通过对特征阻值的分析,可以判断电路内部是否存在隐患,例如由各种原因引起的短路、开路、元器件异常等,尤其是在各种环模试验前后,对特征阻值的比对就显得尤为重要。目前研制的特征阻值测试仪对于纯电阻性电路的测试具有较高的效率,达到人工测量效率的10倍,然而对于含有大电容元件的电路,其特征阻值测试的时间长,误差大,因此,提出一种等时间间隔采样法,可以提高测试效率和测量准确性。

针对研制的基于数字万用表卡的特征阻值测试仪<sup>[1]</sup>在试验过程中所遇到的问题,结合电子设备电接

口特性,分析了一种典型的阻容电路的测量原理,提出了一种针对该种电路的特征阻值测试方法,对特征阻值测试仪的研制和推广具有重要意义。

### 1 典型电路分析

#### 1.1 数字万用表卡的测阻原理及使用问题

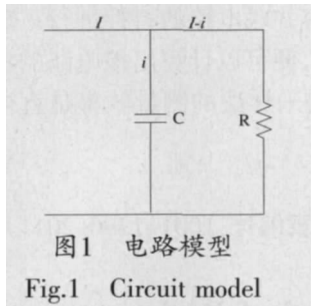
数字万用表卡的电阻测试原理<sup>[2]</sup>是通过万用表卡内高度稳定的恒流源向被测电路输出特定值的稳定电流,通过万用表卡内部测试该电流在被测电路上产生的压降,从而计算出被测电路的阻值。对于纯电阻电路,万用表卡输出的电流会迅速在电路两端产生稳定的电压,可以短时间内测试出比较准确的电阻值;然而对于电阻元件两端并入储能元件的电路,当电流流过时,会有一个充电过程,并且充电时间的长短与

\* 中科院装备研制改造资助项目(Y12135P110)

电路本身的参数有关，这样就影响了阻值的检测效率。通常使用的储能元件有电容和电感，对于直流信号来说，电感的作用可以忽略，而对电容电路，就要考虑该电路的充电过程。

### 1.2 典型电路分析

很多电子器件都可以通过等效电路最终等效成电阻和电容的组合形式，以电阻和电容并联的形式为例，分析该种电路的性质从而推导新的检测方法。电路模型如图1所示。



设万用表输出电流为  $I$ ，被测电路阻值为  $R$ ，电容值为  $C$ ，流过电容的电流为  $i$ ，电容两端电压降为  $v$ ，则电阻  $R$  上的电压降也为  $v$ ，由电容的动态特性可得<sup>[3]</sup>：

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

电阻  $R$  上的电压降：

$$v = R(I - C \frac{dv}{dt}) \quad (2)$$

设电容两端初始电压  $v_0$ ，解该微分方程得：

$$v = I[R - (R - \frac{v_0}{I})]e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$

万用表测得的阻值应为：

$$r = R - (R - \frac{v_0}{I})e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4)$$

对于某一次测量  $R$ 、 $v_0$ 、 $I$ 、 $C$  均为固定量，因而式(4)可等效为：

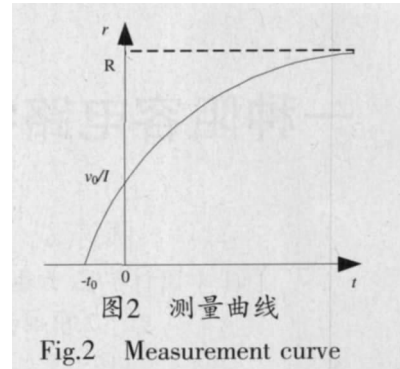
$$r = R(1 - e^{-\frac{t+t_0}{RC}}) \quad (5)$$

测量值  $r$  与时间  $t$  的关系曲线如图2所示。 $t_0$  的物理意义是在测量之前，该电路已经充电  $t_0$  时间，电压已达到  $v_0$ 。当  $t_0=0$  时，表示测量从零状态开始。

由以上推导可知，测量结果与测量时间、电路初始状态以及电路自身的参数有关。并且，测量时间越长，结果越接近真值，即  $\lim_{t \rightarrow \infty} r = R$ 。

### 2 等时间间隔采样法

对于采用直接测量法测量阻容电路的特征阻值时间长、误差大的问题，提出了一种等时间间隔采样



法。设实测三个电阻值分别为  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ ，采样时间点分别为  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ ，其中  $t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = \Delta t$ 。

由式(4)得：

$$r_1 - R = -(R - \frac{v_0}{I})e^{-\frac{t_1}{RC}} \quad (6)$$

$$r_2 - R = -(R - \frac{v_0}{I})e^{-\frac{t_2}{RC}} \quad (7)$$

$$r_3 - R = -(R - \frac{v_0}{I})e^{-\frac{t_3}{RC}} \quad (8)$$

式(7)除以式(6)，式(8)除以式(7)，整理得：

$$R = \frac{r_1 r_3 - r_2^2}{r_1 + r_3 - 2r_2} \quad (9)$$

式(7)减式(6)，式(8)减式(7)，整理得：

$$RC = \frac{\Delta t}{\ln(\frac{r_2 - r_1}{r_3 - r_2})} \quad (10)$$

由式(9)可知，测量过程中只需等间隔测量三个值，便可计算出电阻值，这样可以大大提高测量效率。

### 3 误差分析与消除

引起单次测量误差的误差源有导线温度漂移误差、路径阻抗误差和测量时间误差。导线温度漂移误差与测试系统所使用的导线材料和长度有关，铜导线的电阻温度系数一般小于  $3000 \text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。假设导线电阻为  $2\Omega$ ，则温度漂移的影响小于  $TC = 2\Omega \times 3000 \text{ppm}/^\circ\text{C} = 6 \text{m}\Omega/^\circ\text{C}$ ，当测量环境温度变化在  $\pm 2^\circ\text{C}$  以内时，该误差可忽略。

路径阻抗误差主要包括电缆阻抗和继电器接触点的阻抗。电缆阻抗基本是稳定的，接触点阻抗随着使用次数的增多会变大，图3给出了开关工作了5000万次以上时接触点的阻抗变化<sup>[4]</sup>，接触点阻抗在短时间内也是基本稳定的，因此，可以通过定期标定路径阻抗的方法消除该种误差。

由于采样间隔误差  $\Delta t'$  会带来单次测量的随机误差，由式(4)得：

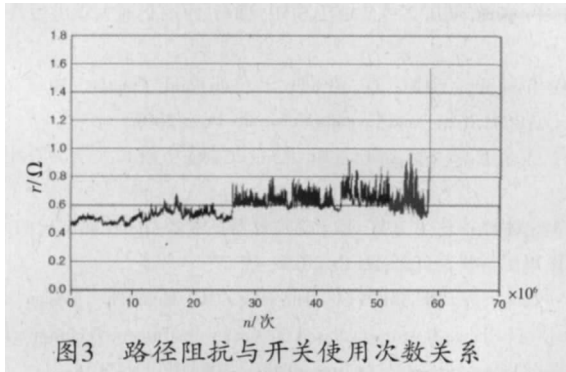


图3 路径阻抗与开关使用次数关系  
Fig.3 The relationship of path resistance and switch cycles

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{RC} \left( R - \frac{v_0}{I} \right) e^{-\frac{t}{RC}} \quad (11)$$

测量误差:

$$\Delta r = \frac{R-r}{RC} \Delta t' \quad (12)$$

由式(12)知,随着采样时间 $t$ 的增加, $r$ 会逐渐逼近 $R$ 值,单次测量误差 $\Delta r$ 会逐渐减小,因此,可通过增加采样间隔或延长测量时间的方法减小测量误差。

在测量中发现,测量时间和测量精度直接和电路的 $RC$ 常数的有关。例如,当时间常数 $RC < 50s$ 时,10s之内就能测得相对误差在2%以内的结果,而当 $RC > 100s$ 时,需要45s才能测得相对误差小于5%的结果。因此,测量时首先根据式(10),求出 $RC$ 常数并确定采样时间,这样有利于提升测试的效率。

#### 4 实验数据分析

图4为 $R=513.3k\Omega, C=205.79\mu F$ 时 $r$ 的理论曲线(下)和实测曲线(上)<sup>[5-7]</sup>。由曲线知,应用直接测量法,当测量时间 $t=RC=105s$ 时,所测得阻值 $r=R(1-e^{-1}) \approx 0.632R$ ,效率低。

应用等时间间隔采样法,选取前300个数,记为,每等间隔的三个数作为一组进行计算,如 $r_1、r_2、r_3; r_2、$

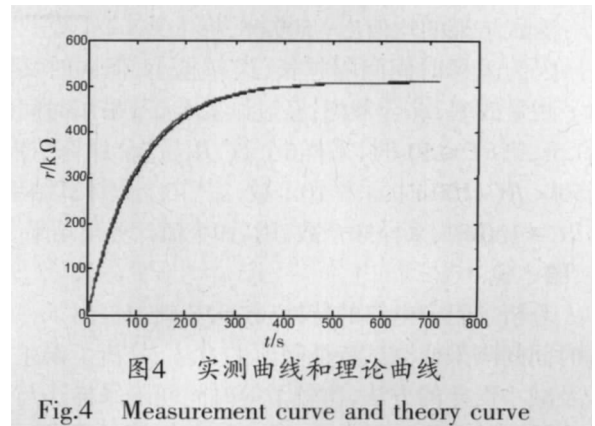


图4 实测曲线和理论曲线  
Fig.4 Measurement curve and theory curve  
 $r_3、r_4; r_3、r_4、r_5$ 依此类推计算出结果,采样间隔时间1s,计算结果如图5所示。

测量结果的均值 $\bar{r}_1 = 511.08$ ,标准差 $\bar{S}_1 = 13.72$ 。

将上面的实测数据以采样间隔为2s进行计算并绘图,如图6所示。

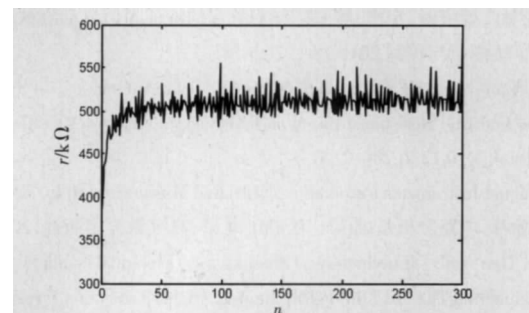


图5 采样间隔1秒计算结果  
Fig.5 Result of 1s sampling

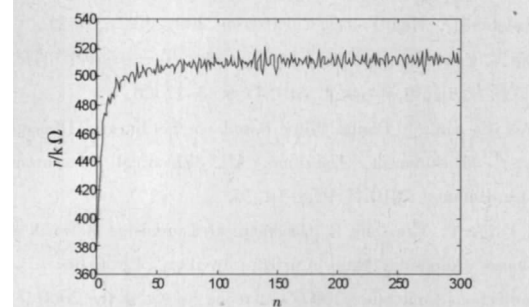


图6 采样间隔2秒计算结果  
Fig.6 Result of 2s sampling

表1 实测结果

Tab.1 Measurement result

序号	电阻/kΩ	电容/ $\mu F$	等间隔采样法		直接测量法	
			相对误差	测量时间/s	相对误差	测量时间/s
1	51.6	220	-1.74%	9	5%	34.2
2	51.6	470	-1.55%	9	5%	72.8
3	256.8	220	-4.09%	15	5%	169.3
4	153.5	470	-4.36%	15	5%	211.2
5	513.5	220	-1.97%	45	5%	338.4
6	513.5	470	-4.71%	45	5%	723.0

测试结果的均值  $\bar{R}_2 = 509.68$  ,标准差  $\bar{S}_2 = 4.32$  。

因为采样时间间隔越长,误差越小,但同时又牺牲了测量效率,综合考虑,经过试验验证,采用时间间隔 1.5s,当  $RC \leq 50s$  时,采样 6 个数,用后 5 个计算结果;当  $50s < RC < 100s$  时,采样 10 个数,用后 5 个数计算结果;当  $RC \geq 100s$  时,采样 30 个数,用后 9 个值计算出结果。

## 5 结论

分析了阻容电路的特性,在此基础上提出了一种等时间间隔采样测试特征阻值的方法,分析了误差源以及减小误差的方法,比较了等时间间隔采样法与直接测量法的测量结果。实验表明,采用等时间间隔采样法,在相对短的时间内测试结果的相对误差可以小于 5%,测试效率是直接测量法的 5 倍以上。

## 参考文献

- [1]胡剑虹,贺庚贤,宁飞,等.基于PXI总线的特征阻值自动测试系统[J].计算机测量与控制,2010.18(2):280-285.  
HU Jian-hong, HE Geng-xian, NING Fei, et al, Automatic Test System of Characteristic Resistance Based on PXI Bus[J].Computer Measurement & Control,2010.18(2):280-285.
- [2]National Instruments Corporation, NI Digital Multimeters Help, 2007.
- [3]李瀚荪.电路分析基础(第三版)[M].北京:高等教育出版社,2000.  
LI Han-sun. Introductory Circuits for Electrical and Computer Engineering(The 3rd Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press,2000.
- [4]National Instruments Corporation, NI Switches Help, 2008.
- (上接第 7 页)
- Substation[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(2) 20-21.
- [3]李志忠,王森,张娟,王雪松,吉宏亮.一种任意三角形补偿的接地电阻测试新方法[J].电测与仪表,2010,47(9):8-12,26.  
TIAN Jia-xin.. A Digital Filter Based on the Integral Dielectric Loss Factor Measurement Algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010,47(9):8-12,26.
- [4]G. Parise,U. Grasselli, R. Iaconelli. Measurements of Touch and Step Voltages Adopting Multi Current Auxiliary Electrodes [C].Industry Applications Conference,2000.Conference Record of the 2000 IEEE,Oct, 2000,5(5) 3187-3193.
- [5]D L GARRETT, J G PRUITT. Problems encountered with the average potential method of analyzing substation grounding systems [J]. IEEE, PAS104,1985,(12):3581-3593.
- [6]崔奇明.基于ESTA的电力设备状态评估专家系统[J].电力系统及其自动化学报,2008,46(5):46-49.  
CUI Qi-ming. Electrical Power Equipment Condition Assessment Expert System Based on ESTA [J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and its Automation, 2008,46(5): 46-49.
- [7]Bo Zhang, Zhibin Zhao, Xiang Cui, et al. Diagnosis of Breaks in Substation's Grounding Grid by Using the Electromagnetic Method [J]. IEEE Trans on Magnetics,2002,38(2):473-476.
- [8]王东焯,董刚.大型变电所地网评估若干问题的探讨[J].高电压技

- [5]罗建军,杨琦.精讲多练MATLAB[M].西安:西安交通大学出版社,2002.  
LUO Jian-jun, YANG Qi. Briefly Explain and Practise More on MATLAB[M]. Xian: Xian Jiaotong University Press,2002.
- [6]马宏,王金波.仪器精度理论[M].北京:北京航空航天大学出版社,2009.
- [7]吴忠杰,林君,韦建荣,朱虹.基于虚拟仪器技术微型阻抗测试仪的设计[J].电测与仪表,2005,42(1):28,38-41,  
WU Zhong-jie,LIN Jun,WEI Jian-rong,ZHU Hong.The Design of Micro-impedance Instrument Based on Virtual Instrument Technique[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2005,42(1):28,38-41.

作者简介:



陈东成(1987-),男,汉族,江苏赣榆人,硕士研究生,从事光电系统的电子学检测方法的研究。  
Email:chendongcheng8710@163.com



贺庚贤(1964-),女,汉族,吉林人,副研究员,通讯作者,从事光电系统电子学测试研究。  
Email:hegengxian@yahoo.com.cn

宁飞(1974-),男,汉族,吉林人,副研究员,从事空间有效载荷电子学测试研究。Email:ningfei741016@om.com  
李俊霖(1984-),男,汉族,辽宁人,助理研究员,从事空间有效载荷电子学测试研究。

收稿日期 2011-07-30  
(田春雨 编发)

- 术,2001,27(2):1-2.  
WANG Dong-ye, DONG Gang. Discussion of Several Problems about Evaluation for Large Grounding Grid[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(2):1-2.
- [9]黎清海,高庆.基于系统分层的故障诊断方法[J].仪器仪表学报,2005,26(8):16-20.  
LI Qing-hai, GAO Qing. Fault Diagnosis Method Based on System Hierarchy [J]. Chinese journal of scientific instrument, 2005, 26(8): 16-20

作者简介:



张蓬鹤(1978-),女,博士研究生,工程师,主要从事接地网的腐蚀与诊断的研究工作。zpphh2004@126.com

张丹丹(1968-),女,副教授,从事高压绝缘以及诊断的研究工作。  
Email:dandanzh6168@sina.com  
饶章权(1980-),男,工程师,研究方向为接地技术及电磁干扰分析。  
Email:zq\_rao@163.com  
韩鹏博(1988-),男,本科,研究电气相关内容。  
Email:783945976@qq.com

收稿日期 2011-04-02  
(杨长江 编发)