以 GPS 为基础的线路参数带电测量

陈允平　张承学　胡志坚
（武汉水利电力大学电气工程学院　430072　武汉）

摘　要　回顾了带互阻抗线路测量的数学模型，指出参数测量问题可以采用参数辨识方法，并进行了严格的数学推导。利用继电保护装置短时断开输电线路的一相，然后经综合重合闸合上以获取零序电流；并用 GPS 实现数据采集的同步。理论分析和试验结果均表明所提出的带电测试思想是正确且可行的。

关键词　输电线路　互感参数　带电测量　GPS

0　引言

随着电力系统的发展和线路走廊受限，互感线路越来越多。众所周知，互感的存在会影响故障电流的大小，在继电保护定值计算时必须考虑这种影响。互感影响显著时，如果在继电保护定值计算中不计及互感的影响，就会造成保护误动或拒动。而影响零序自感和零序互感大小的因素远比正序参数复杂，接地电阻率的大小对零序参数有明显的影响，相间距离和线间距离的比值对零序参数也会造成影响。这些影响零序参数的因素都是随机变量，精确计算零序参数几乎是不可能的。因此我国有关规程规定零序参数必须实测。遗憾的是，停电进行线路零序参数的测量经常是行不通的。原因是具有互感的线路中有些已经带电运行，无法因测量而停电，而已有的互感参数测量的方法都是停电进行的，不停电则无法进行测量。因此，寻求一种可行的带电测量线路零序参数的方法势在必行。由于输电线路走向复杂，空间跨度大，是一个典型的分布系统，而且互感参数线路存在共端、部分共端和不共端等多种复杂情况，带电测量输电线路互感参数存在许多理论和实践的问题需要解决。本文旨在对互感线路参数带电测量方法从理论和实践上进行探讨。

文献[1,2]中提出了带电测量互感的数学模型、测试方法和测试结果。由于带电测量互感线路参数的测量地点相距甚远，测量数据的通信和同步将是关键技术之一。为了解决这一问题，在我们的测量系统中采用了全球卫星定位系统(GPS)的授时功能，将所有的采集数据加上 GPS 的时间标签(time-tag)，作为同步信号。本文除了介绍带电测量互感参数线路的基本原理外，对于测试系统的硬件、软件和数值方法都作了较详细的介绍，并给出了试验结果。

1997－07－28收稿，1998－02－18改回。

1　基本原理、数学模型及关键技术

人们已注意到线路之间的磁耦合，但事实上，线路之间除了磁耦合之外还有电耦合，即除了互电感外还有互电阻存在，因此，线路之间的耦合作用应该用自阻抗和互阻抗来描述。假定有 n 条线路存在电磁耦合，如图 1 所示，为简单起见，图中只绘出了其中的两条线路 i，j。这些有互阻抗的线路中，可以是共端的，也可以是不共端的，为了不失一般性，图中绘出了不共端的情况。当零序电流源加到被测系统上时，所有有互感的线路上都会产生零序电流的增量，所有与被测线路有关的母线(除了直接接地的线路外)都会产生零序电压增量。数据采集系统把零序电源加入前和加入后的零序电压和零序电流送入测试系统，用以计算零序参数。被测系统的零序电流增量方程如(1)式所示。

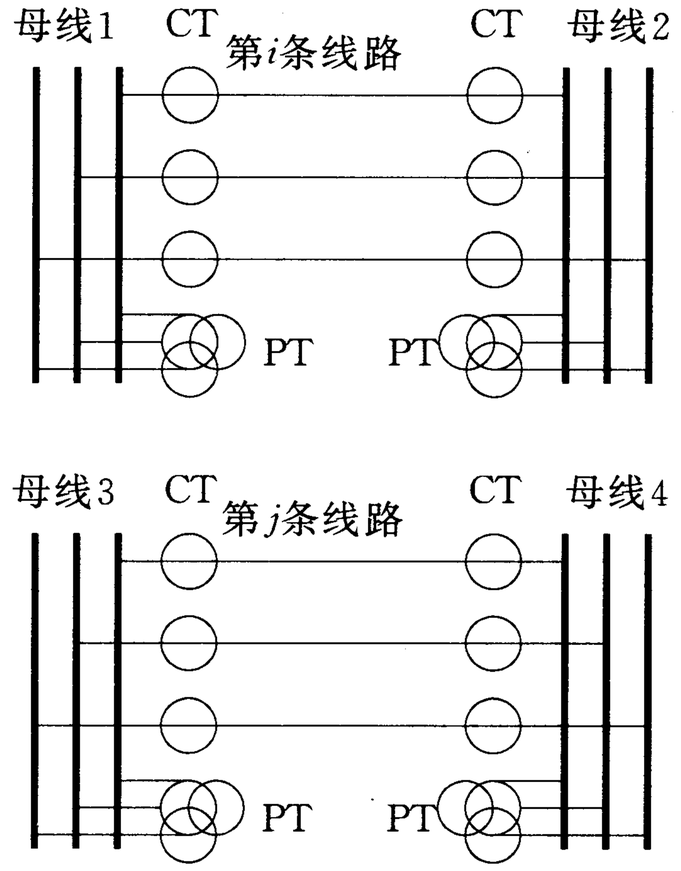

图1　带有互阻抗输电线路的示意图
Fig. 1　Sketch map of transmission lines with mutual inductance

$$\begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\dot{I}_1 \\ \Delta\dot{I}_2 \\ \vdots \\ \Delta\dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\dot{U}_1 \\ \Delta\dot{U}_2 \\ \vdots \\ \Delta\dot{U}_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

(1)式的紧缩形式为：

$$\boldsymbol{Z}\ \Delta\dot{\boldsymbol{I}} = \Delta\dot{\boldsymbol{U}} \quad (2)$$

其中 $\boldsymbol{Z}$ 为待计算或待辨识的线路零序阻抗矩阵；$\Delta\dot{\boldsymbol{I}}$ 为由测试电源产生的各条线路的零序电流增量矢量；$\Delta\dot{\boldsymbol{U}}$ 为由测试电源造成的各线路的零序电压增量矢量，其值为各线路相关母线的零序电压增量的相量差。

显然参数测量问题转换成了参数辨识问题，故可以将参数辨识的理论、算法和技术应用到参数测量问题中来。

输电线路零序参数在线测量的另一个关键技术问题是如何产生足够功率的零序电流。由于负荷的不对称性和线路空间分布的不对称性，正常运行时电压互感器的开口三角形端口存在零序电压，电流互感器的中性线回路存在零序电流。为了保证二次回路测量时有足够的分辨率，不至于使测试信号被噪声所淹没，要求有足够大的零序电流。因此如何在实际线路上，尤其在较长线路上产生足够大的零序电流，成为人们所关注的问题。事实上除了采用较高电压的专用电源外，还可以利用负荷电流作为零序电流源。利用继电保护装置短时(约0.5 s～1.0 s)断开输电线路的一相，然后经综合重合闸合上。这是一种获得零序大电流的行之有效的办法。在我们所研制的测试系统中，断开一相、重合闸恢复正常运行的过程都是通过计算机控制自动完成的。根据经验，只要零序电流达到50 A 以上，带电测量就可以得到稳定可靠的结果。

另外应该指出的是，为了求解阻抗矩阵中的未知参数，必须有 $n(n+1)/2$ 个独立方程，相应地在物理上应有 $n(n+1)/2$ 种独立的拓扑结构或独立的接线状态。

2 硬件结构

带电测试互感线路参数系统的硬件结构如图2所示。图中仅绘出两个变电站，但该结构可以推广到多个变电站的情况。图2所示的测试系统可以同时检测八条输电线路的数据。

图中 GPS 天线用来接收全球卫星定位系统的时间标志报文，包括年、月、日、时、分、秒，将接收到的报文送到微处理器，并用卫星的秒脉冲校正微处理器和微计算机的时钟。装置可以在预先给定的时刻发出电源合闸控制信号或保护掉闸控制信号，两

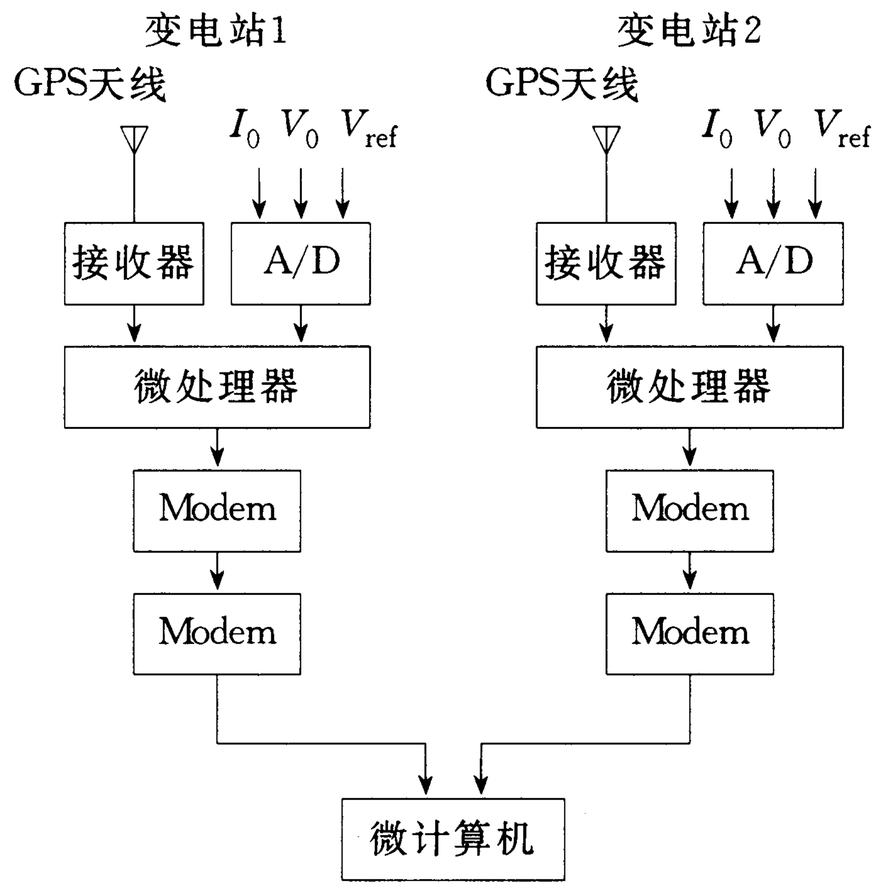

图2 带电测试互感线路参数系统硬件框图

Fig. 2 The hardware structure of practical measuring system

者都是为了给被测系统加入零序电流源。预先给定的控制信号发出时间可以由试验人员键入。一旦零序电流源合闸信号发出，则自动开始一次测试。测试系统的测试装置分别放置在各变电站内，采集各个变电站和线路的有关数据，包括母线的零序电压、线路的零序电流和参考电压。虽然这些数据采自不同的变电站和线路，但由于所有数据都带上了 GPS 时标，使得测试数据达到同步。需要说明的是，这些参数中，除了直接供计算用的零序电流、零序电压数据外，各个变电站还得有一个参考电压，它可以独立选取，经校对后确定计算用的公共参考矢量。显然，没有这个参考矢量就无法得到正确结果。

3 软件算法

由于采集的数据样本一般远大于待计算的参数个数，所求解的方程组为超定方程组，因此一般可用最小二乘法或卡尔曼滤波算法求出待测参数。计算的总体框图如图3所示。

4 试验结果

按上述原理对互感线路参数已进行了多次测试。集成的以 GPS 为基础的互感线路参数带电测试系统亦已在试验室进行了模拟试验。试验线路如图4。试验是对三条互感参数线路进行的，线路用有互感的空心线圈模拟，图中的开关 k_1，k_2，k_3 用于改变线路的状态，以便获得足够多的独立方程个数。用本系统和传统的模拟试验方法测得的结果见表1。

可以看出，所得的结果完全可以满足工程计算的要求。采用本方法和本文所提出的测试技术可以减少因停电测量所造成的损失，减少停电给调度部门和用户所造成的困难。

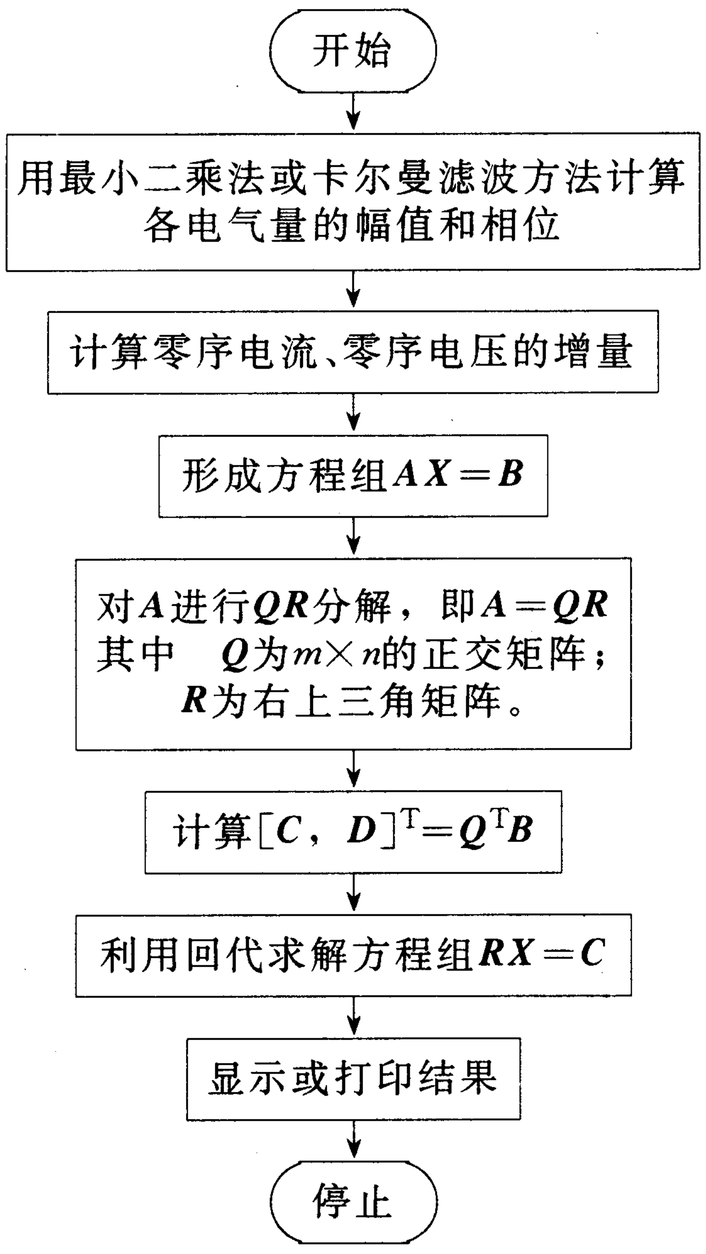

图3 测试系统的软件总体框图

Fig. 3 The software algorithm flow diagram of practical measuring system

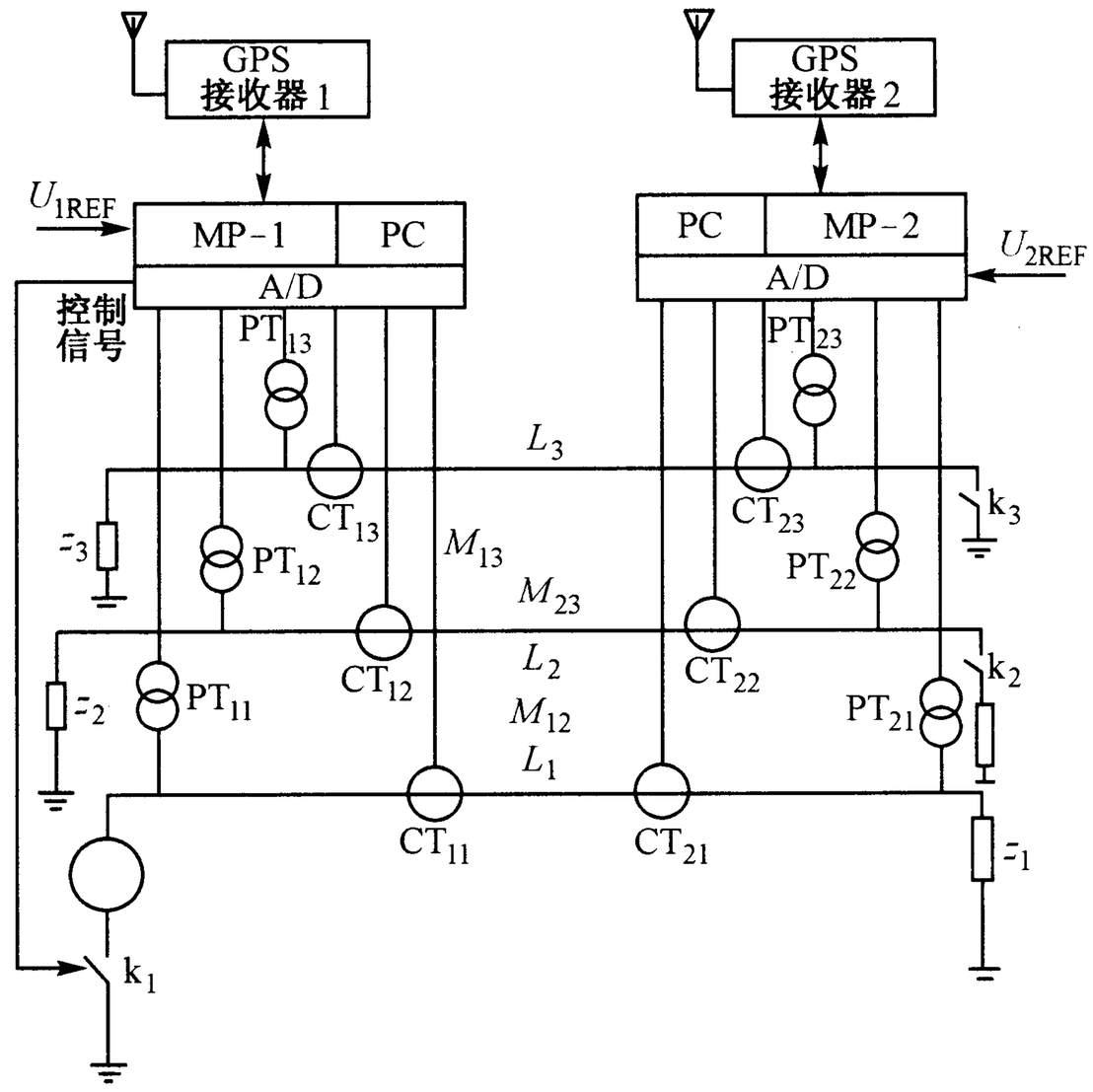

图4 GPS为基础的互感线路参数带电测试系统模拟试验接线图

Fig. 4 The wiring diagram of a test simulating the transmission lines with mutual inductance under operation based on GPS technology

表1 实验结果对照表

Table 1 Comparison of results from different methods

	z_{11}	z_{12}	z_{13}	z_{22}	z_{23}	z_{33}
模拟法	24.73 + j12.48	j10.84	j3.8	24.42 + j10.29	j3.7	9.98 + j1.49
最小二乘法	24.878 + j12.638	1.391 + j11.107	0.336 + j3.694	24.668 + j10.505	0.502 + j3.582	9.707 + j1.510
卡尔曼滤波算法	24.724 + j12.613	1.380 + j10.936	0.378 + j3.842	24.743 + j10.409	0.513 + j3.633	9.766 + j1.459

参考文献

1 陈允平，王旭蕊，韩宝亮. 带互感的输电线路零序参数带电测量研究. 电力系统自动化，1995，19(2)

2 Chen Yunping, Wang Xurui, Han Baoliang. The Principles and Computer-Based Realization of Zero-Sequence Parameter Measurement of Transmission Line with Mutual Inductance. In: International Power Engineering Conference. Singapore: 1995

陈允平，男，1945年生，教授，博士生导师，国务院学位委员会学科评议组成员，主要从事电力系统继电保护、高电压技术、电力系统运行及自动化方面的研究。

张承学，男，1954年生，教授，主要从事电力系统稳定及自动化方面的研究。

胡志坚，男，1969年生，博士研究生，从事电力系统辨识与自动化方面的研究。

ZERO-SEQUENCE PARAMETER MEASUREMENT UNDER OPERATION OF TRANSMISSION LINE WITH MUTUAL INDUCTANCE BASED ON GPS TECHNOLOGY

Chen Yunping, Zhang Chengxue, Hu Zhijian

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Power E gineering, 430072, Wuhan, China)

Abstract The mathematical models of two parallel transmission lines with mutual impedance are reviewed first. Parameter measurements may use parameter assessment method, and strict mathematical derivations are given. This paper presents the method for synchronization of data sampling by GPS and the method for generation of zero-sequence currents by tripping momentarily one phase of one transmission line and then rapid reclosing. Practical test shows that the results between the live test proposed in this paper and the static simulation test are coincident very closely.

Keywords transmission line mutual inductance parameter measurement under operation GPS