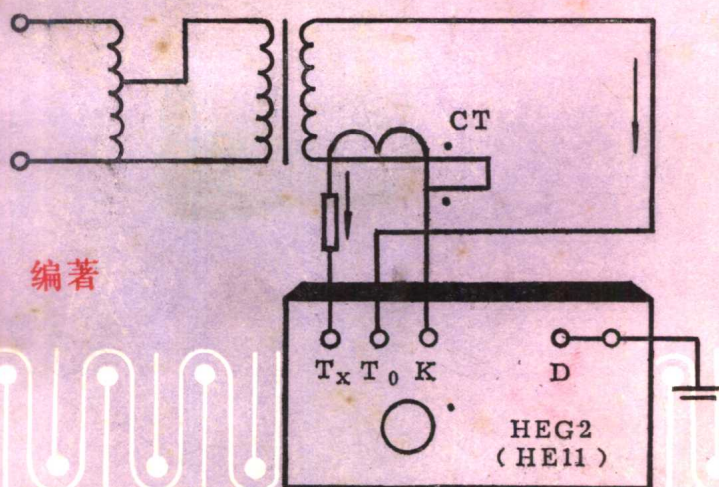


检定规程参考资料

互感器校验仪 的原理与检定

刘庆余 编著



中国计量出版社

{检定规程参考资料}

互感器校验仪的原理与检定

刘庆余 编著

中国计量出版社

内 容 提 要

本书对互感器校验仪的分类、原理、应用、检定方法与误差分析等作了系统而深入的论述。全书共三章,介绍了互感器校验仪的工作原理;互感器校验仪整体检定的理论基础;互感器校验仪检定规程主要内容的解释。最后在附录中,以实例介绍整体检定的步骤、方法与参数选择。

本书可作为计量检定工作的技术指导,也可作为大专院校电测专业师生的教学参考。

互感器校验仪的原理与检定

刘庆余 编著

责任编辑 刘宝兰

中国计量出版社出版

北京和平里11区7号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 850×1168/32 印张 6 字数 155 千字

1988年7月第1版 1988年7月第1次印刷

印数 1—8 000

ISBN 7-5026-0103-1/TB·84

定价 2.00 元

前 言

互感器校验仪是一种多功能的交流测量仪器，主要用来检定各种类型与各种等级的电力互感器或仪用互感器及其附属设备的基本误差，并可以对有关电气计量设备进行多功能的性能测试。故互感器校验仪是发展电力事业不可缺少的重要配套设备之一。

本书从电工基础理论出发，参照互感器校验仪检定规程 JJG 169-76，对其分类、原理、应用、检定方法与误差分析问题，作了较为系统的论述。全书共分三章。第一章介绍了组成互感器校验仪的各种元部件的特性，着重分析了各种互感器校验仪的工作原理，并对互感器校验仪的正确使用及其注意事项，进行了概括的介绍。第二章系统地研究了对互感器校验仪进行整体检定的两种新方法——电势补偿法与磁势补偿法。既给出了对互感器校验仪各种测量回路进行检定的计算公式，又论述了对检定结果的误差分析，以及整体检定中各局部误差的合理分配问题。第三章参照互感器校验仪检定规程 JJG 169-76，对实际检定工作中的技术要求、检定项目、检定方法及检定步骤等问题，进行了较深入的分析。最后的附录中，以实例介绍了采用电势补偿法与磁势补偿法对互感器校验仪进行整体检定的具体步骤、方法和参数的选择原则。

本书既可作为从事互感器与互感器校验仪计量检定工作的技术指导，又可作为有关电气设备或产品的生产调试与使用维护工作中的参考资料，也可供大专院校电测专业的师生作教学参考。

由于本人的理论水平与经验有限，难免在文中有不妥或谬误之处，热忱希望得到读者的批评指正。

作 者

一九八六年四月

目 录

第一章 互感器校验仪的工作原理	(1)
§ 1.1 交流电路中主要元件的性质	(1)
1.1.1 交流电阻器	(2)
1.1.2 电感线圈	(4)
1.1.3 电容器	(5)
1.1.4 交流电路中的阻抗与导纳	(8)
§ 1.2 交流电路中常用的测量设备	(9)
1.2.1 交流电源	(9)
1.2.2 交流指零仪	(12)
1.2.3 电流互感器与电压互感器	(13)
1.2.4 交流电位差计	(18)
1.2.5 电流比较仪	(21)
1.2.6 感应分压器	(23)
§ 1.3 互感器校验仪的工作原理	(25)
1.3.1 概述	(25)
1.3.2 HE 5 型互感器校验仪	(25)
1.3.2.1 检定电流互感器的工作原理	(25)
1.3.2.2 检定电压互感器的工作原理	(29)
1.3.2.3 测量交流阻抗的工作原理	(31)
1.3.2.4 测量交流导纳的工作原理	(32)
1.3.3 HEG 2 型互感器校验仪	(34)
1.3.3.1 检定电流互感器的工作原理	(34)
1.3.3.2 检定电压互感器的工作原理	(36)
1.3.3.3 测量交流阻抗的工作原理	(38)
1.3.3.4 测量交流导纳的工作原理	(39)
1.3.3.5 用补偿式电流比较仪检定电流互感器的原理	(41)
1.3.4 诺马 (NORMA) 型互感器试验器	(42)

1.3.4.1 检定电流互感器的工作原理	(42)
1.3.4.2 用双级电流互感器作标准检定电流互感器的工作原 理	(44)
1.3.4.3 检定电压互感器的工作原理	(46)
1.3.4.4 测量阻抗的工作原理	(48)
1.3.4.5 测量导纳的工作原理	(50)
1.3.5 电子式互感器误差检定装置	(52)
1.3.5.1 零值法的原理线路	(52)
1.3.5.2 差值补偿电路	(53)
1.3.5.3 非零值法的运算电路	(59)
§ 1.4 互感器校验仪的正确使用与维护的注意 事项	(63)
1.4.1 外磁场的 影响	(63)
1.4.2 接线方式	(64)
1.4.3 接地问题	(64)
1.4.4 量程的合理选择	(66)
1.4.5 负载匹配	(66)
1.4.6 极性试验	(67)
1.4.7 电流互感器次级开路	(67)
1.4.8 退磁	(67)
1.4.9 灵敏度检查	(68)
1.4.10 测量量程的选用原则	(68)
1.4.11 绝缘强度试验	(68)
§ 1.5 互感器校验仪的扩展应用	(68)
1.5.1 测量交流电势	(69)
1.5.2 交流小电流的 测量	(70)
1.5.3 测量交流相位	(71)
1.5.4 测量电感与电容	(73)
1.5.5 测定互感器在检定状态的负载	(74)
1.5.6 测试铁芯的磁性参数	(76)
1.5.7 互感器的自校方法	(77)
1.5.8 电压变送器与电流变送器的检定	(80)
1.5.9 双级电流互感器在检定中的应用	(82)

1.5.10 双级电压互感器在检定中的应用	(83)
1.5.11 电流比较仪在检定中的应用	(84)
1.5.12 零磁通电流互感器在检定中的应用	(85)
1.5.13 非标准化额定电流 (电压) 互感器的检定	(86)
1.5.14 乘法线路在检定中的应用	(89)
第二章 互感器校验仪整体检定的理论基础	(92)
§ 2.1 概述	(92)
§ 2.2 电势补偿法	(93)
2.2.1 电流互感器校验回路的整体检定	(94)
2.2.1.1 刻度盘零位示值的检定	(95)
2.2.1.2 同相刻度盘示值的检定	(96)
2.2.1.3 正交刻度盘示值的检定	(98)
2.2.2 电压互感器校验回路的整体检定	(100)
2.2.2.1 刻度盘零位示值的检定	(100)
2.2.2.2 同相刻度盘示值的检定	(101)
2.2.2.3 正交刻度盘示值的检定	(103)
2.2.3 阻抗校验回路的整体检定	(105)
2.2.3.1 刻度盘零位示值的检定	(105)
2.2.3.2 同相刻度盘示值的检定	(106)
2.2.3.3 正交刻度盘示值的检定	(107)
2.2.4 导纳校验回路的检定	(109)
2.2.4.1 刻度盘零位示值的检定	(109)
2.2.4.2 同相刻度盘示值的检定	(110)
2.2.4.3 正交刻度盘示值的检定	(111)
§ 2.3 磁势补偿法	(114)
2.3.1 电流互感器校验回路的整体检定	(114)
2.3.1.1 刻度盘零位示值的检定	(115)
2.3.1.2 同相刻度盘示值的检定	(115)
2.3.1.3 正交刻度盘示值的检定	(117)
2.3.2 电压互感器校验回路的整体检定	(118)
2.3.2.1 刻度盘零位示值的检定	(118)
2.3.2.2 同相刻度盘示值的检定	(120)
2.3.2.3 正交刻度盘示值的检定	(121)

2.3.3 阻抗测量回路的整体检定	(123)
2.3.3.1 刻度盘零位示值的检定	(124)
2.3.3.2 同相刻度盘示值的检定	(124)
2.3.3.3 正交刻度盘示值的检定	(126)
2.3.4 导纳测量回路的整体检定	(127)
2.3.4.1 刻度盘零位示值的检定	(128)
2.3.4.2 同相刻度盘示值的检定	(129)
2.3.4.3 正交刻度盘示值的检定	(130)
§ 2.4 整体检定综合误差的计算与分配	(132)
2.4.1 电势补偿法	(133)
2.4.2 磁势补偿法	(135)
§ 2.5 互感器校验仪整体检定装置	(145)
2.5.1 概述	(145)
2.5.2 JZ 1 型校验仪整体检定装置的原理线路	(146)
2.5.2.1 工频电流电压比值仪	(146)
2.5.2.2 电源供电电路	(150)
2.5.3 JZ 1 型校验仪整体检定	(151)
第三章 关于检定规程的解释	(156)
§ 3.1 适用范围与检定项目	(156)
§ 3.2 检定条件的规定	(158)
§ 3.3 外观检查、滑线变阻器与转换开关的检 查	(160)
§ 3.4 极性指示器的试验	(160)
§ 3.5 内附电压表与电流表的检定	(162)
§ 3.6 仪器灵敏度的测试	(163)
§ 3.7 刻度盘不同量程示值的一致性	(164)
§ 3.8 刻度盘极性符号的正确性	(164)
§ 3.9 仪器示值的实际值与工作电流 (或工作 电压) 的无关性	(164)
§ 3.10 仪器给外接互感器引入的负载效应	(165)
§ 3.11 仪器的绝缘电阻与绝缘强度	(166)
§ 3.12 仪器基本误差的检定	(166)

§ 3.13 检定结果的处理	(167)
附录: 检定方法举例	(168)
1 用电势补偿法检定	(168)
1.1 电流互感器校验回路的检定	(168)
1.2 电压互感器校验回路的检定	(171)
1.3 阻抗测量回路的检定	(173)
1.4 导纳测量回路的检定	(175)
2 用磁势补偿法检定	(177)
2.1 电流互感器校验回路的检定	(177)
2.2 电压互感器校验回路的检定	(179)
2.3 阻抗测量回路的检定	(180)
2.4 导纳测量回路的检定	(182)

第一章 互感器校验仪的工作原理

§ 1.1 交流电路中主要元件的性质

在直流电路中，除了直流电源以外，只有标准电池、直流电阻与直流检流计等设备，因此电路比较简单。而在交流电路中，由于电源的信号是随着时间而交变的，即电路中电压与电流的频率不为零（这里指的是正弦波）。因此电路中的元件，除了电阻以外，还有电容、电感和互感；而在参数方面还有阻抗、导纳与相角。相对来说，交流电路要比直流电路复杂得多。

在电工基础中，为了便于研究交流电路的特性和规律，总是将电路中的元件作理想化处理，即把交流电路中的各种元件都看成为具有单一性质参数的理想元件，如：交流电阻器、电容器、电感器和互感线圈等。这些元件在电路图中可用图 1.1 中的符号分别加以表示。

但是，在实际的交流电路中，真正理想的具有单一性质参数的元件是不存在的。任何一个实际的电路元件都是兼有电阻、电容与电感三种属性的。因此在研究交流电路的时候，必须首先注意到电路中每个实际元件的具体情况，弄清楚它的主要属性是什么，然后再确定其次要属性对此元件主要属性的影响。此外，由于一个电路中不同元件之间常常会产生一定的电磁场耦合，从

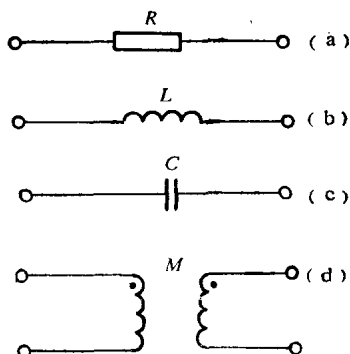


图 1.1

(a) 理想交流电阻器 (b) 理想电感器
(c) 理想电容器 (d) 理想互感线圈

而发生互感现象，因此还要注意到元件之间的互感参数的影响。

为了在下文分析的方便，这里将给出各种元件的等效电路及其参数表达式，而不作具体的推导。

1.1.1 交流电阻器

在电磁测量的领域中，常用的电阻元件有线绕电阻、碳膜电阻、金属膜电阻及塑料膜电阻。

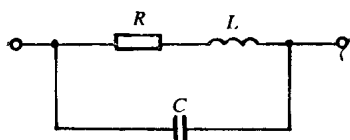


图 1.2

这些元件的属性都是以电阻为主，但都有一定的分布电容与残余电感。为了研究它的参数特征，仅以线绕电阻元件为例，分析一下它的等效电路。其等效电路如图 1.2 所示。

图中， R 为电阻元件的交流电阻，它与直流电阻略有区别，即由于频率的影响而产生了一定的电阻值变化； L 为电阻元件的残余电感； C 为电阻元件的分布电容。

根据电工原理，在音频范围内，图 1.2 等效电路的阻抗可以推导出表达式如下

$$Z = \frac{R + j\omega[L(1 - \omega^2 LC) - CR^2]}{1 + \omega^2[C^2 R^2 - 2LC + \omega^2 L^2 C^2]} \quad (1.1)$$

在通常情况下， L 与 C 的量值与 R 相比都是较小的（指其按阻抗的量纲相比较），而且在音频条件下， ω^2 的数值也很小，故式 (1.1) 中的 $\omega^2 LC \ll 1$ 与 $\omega^4 L^2 C^2 \ll 1$ ，可以将其相应的两项忽略掉，从而可将式 (1.1) 简化为

$$\begin{aligned} Z &= R[1 + \omega^2 C(2L - CR^2)] + j\omega(L - CR^2) \\ &= R_a + j\omega L_a \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\text{式中: } R_a = R[1 + \omega^2 C(2L - CR^2)] \quad (1.3)$$

$$L_a = L - CR^2 \quad (1.4)$$

一般称 R_a 为电阻器的等效有功电阻，或称为等效阻抗的有功分量；称 L_a 为电阻器的等效残余电感，而称 ωL_a 为等效阻抗的无功分量（或称正交分量）。

为了分析问题方便，这里引入一个时间常数的概念，即

$$\tau = \frac{L - CR^2}{R_s} \quad (1.5)$$

且可以近似认为

$$R_s \approx R \quad (1.6)$$

则得

$$Z = R_s(1 + j\omega\tau) \quad (1.7)$$

由此可见，交流电路中的电阻元件可以用其交流电阻与时间常数两个参数来表示其阻抗的定量关系。时间常数的单位是“秒”。时间常数是电阻器的一个重要参数，其值越小，说明电阻器所受残余电感与分布电容的影响越小。当 $\tau = 0$ 时，可得 $Z = R_s$ ，这时电阻器将变成为纯交流电阻的性质。

由式 (1.5) 与式 (1.7) 可以明显地看出时间常数的物理意义。当电阻器的阻值较低时，式 (1.5) 中的 τ 可能为正值，故电阻器将表现出电感的性质；当电阻器的阻值较高时，式 (1.5) 中的 τ 可能变为负值，故电阻器将表现出电容的性质。对于一般双股绕制工艺的线绕电阻来说，阻值在 $50 \sim 100 \Omega$ 的范围以内者，其时间常数接近为零；而小于 50Ω 者，其电阻器的时间常数为正值，电阻器显感性；而大于 100Ω 者，其时间常数为负值，电阻器显容性。

由式 (1.7) 还可以看出，由于电阻器的时间常数不为零，还将引起电阻器的阻抗模及阻抗角的变化，故当用它作为标准量具使用时，必然要产生一定的幅值误差和相位误差。

电阻器的幅值误差可以表示成为

$$\gamma_R = \frac{R_s - |Z|}{R_s} \quad (1.8)$$

由式 (1.7) 可得电阻器的阻抗模为

$$|Z| = R_s \sqrt{1 + (\omega\tau)^2} \quad (1.9)$$

如将式 (1.9) 按级数展开可得

$$|Z| = R_s \left[1 + \frac{1}{2}(\omega\tau)^2 - \frac{1}{8}(\omega\tau)^4 + \dots \right] \quad (1.10)$$

将式 (1.10) 取二阶近似并代入式 (1.8), 则得

$$\gamma_R \approx -\frac{1}{2}(\omega\tau)^2 \quad (1.11)$$

同样根据式 (1.7), 可得电阻器的相角误差为

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= 0 - \theta = -\operatorname{tg}^{-1}(\omega\tau) \\ &\approx -\omega\tau \end{aligned} \quad (1.12)$$

式中: θ 为电阻器的阻抗角。

上述式 (1.5)、式 (1.7)、式 (1.11) 与式 (1.12) 在实际工作中将会经常用到。

1.1.2 电 感 线 圈

电感线圈也可称为电感器, 它一般是由铜导线绕制在成型的绝缘骨架上而成。因此, 它除了具有一定的电感量以外, 还存在着一定大小的串联电阻与分布电容, 故其等效电路也可以用图 1.2 来表示。其等效阻抗的表达式也与式 (1.1) 完全一样。

但是, 在电感线圈里是 R 与 C 值比较小, 故可认为有 $\omega CR^2 \ll R$ 、 $\omega^2 C^2 R^2 \ll 1$ 与 $\omega^4 L^2 C^2 \ll 1$, 从而可将式 (1.1) 简化成为

$$\begin{aligned} Z &= R(1 + 2\omega^2 LC) + j\omega L(1 + \omega^2 LC) \\ &= R_s + j\omega L_s \end{aligned} \quad (1.13)$$

$$\text{式中, } R_s = R(1 + 2\omega^2 LC) \quad (1.14)$$

$$L_s = L(1 + \omega^2 LC) \quad (1.15)$$

一般将 R_s 称为电感线圈的等效残余电阻, 而 L_s 称为电感线圈的等效电感。

$$\text{如果令} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.16)$$

并将式 (1.16) 代入式 (1.14) 与式 (1.15), 则得电感线圈的阻抗角正切为

$$\theta = \operatorname{tg} \theta = \frac{\omega L_s}{R_s}$$

$$= \frac{\omega L}{R} \cdot \frac{\left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)}{\left(1 + \frac{2\omega^2}{\omega_0^2}\right)} \quad (1.17)$$

式中: ω_0 为电感线圈的谐振角频率;

Q 为电感线圈的品质因数, 也常称之为 Q 值。

当 $\omega = \omega_0$ 时, 又可得

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega L}{R} \quad (1.18)$$

由式 (1.17) 可以看出, 电感线圈品质因数的物理意义是比较明显的: 若电感线圈的品质因数越大, 则其等效电感在阻抗中所占的比例也越大; 反之, 若其品质因数较小, 则其等效电感在阻抗中所占的比例也较小。因此, 在设计电感线圈时, 要尽量提高其品质因数, 以提高其利用价值。

1.1.3 电 容 器

由于在电容器的两个电极之间存在着一定的绝缘介质, 而且两个电极的绝缘支架也有一定的介电常数和泄漏电阻, 因而, 任何实际的电容器元件都不可能是一个单纯的电容参数。由于在绝缘介质中要产生功率损耗, 可在电容器的等效电路中用一个等效电阻来表示之。根据等效电阻与电容的连接方式不同, 又可将等效电路分成为串联等效电路与并联等效电路两种。

电容器的串联等效电路如图 1.3 所示。

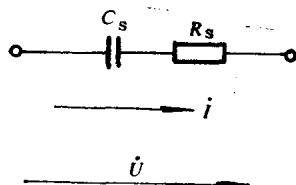


图 1.3

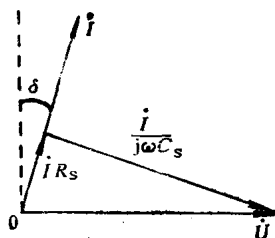


图 1.4

图中, C_s 表示电容器两个电极之间的电容量, R_s 表示绝缘介质中有功损耗的等效电阻。当在电容器上施加一个交流电压 $\dot{U}$ 时, 便在串联支路中产生一个电流 i , 其间的定量关系可用图 1.4 的向量图来表示。

由向量图可见, 由于在 R_s 上产生了一个与电流同相的电压降 iR_s , 故使得电流 i 与电压 $\dot{U}$ 之间的相位差已经不再是 90° , 而是存在一个误差角 δ , 一般称 δ 为电容器的损耗角, 它的大小可以表示为

$$D = \tan \delta = \frac{IR_s}{\frac{1}{\omega C_s}} = \omega C_s R_s \quad (1.19)$$

我们称 D 为电容器的损耗系数。

电容器的并联等效电路如图 1.5 所示。

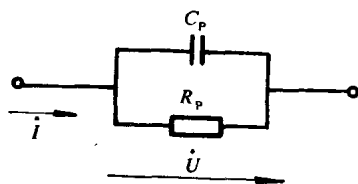


图 1.5

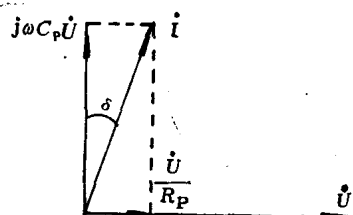


图 1.6

图中, C_P 表示两个电极之间的等效电容量, R_P 表示绝缘介质有功损耗的等效电阻。当给电容器施加一定的交流电压 $\dot{U}$ 时, 将在其输入与输出端上得到一个总电流 i 。如果考虑到电压 $\dot{U}$ 分别对 C_P 与 R_P 的作用, 则将分别产生两个支路电流为 $j\omega C_P \dot{U}$ 与 $\dot{U}/R_P$, 它们的向量关系如图 1.6 所示, 而且 $j\omega C_P \dot{U}$ 与 $\dot{U}/R_P$ 之向量和应该等于总电流 i 。由向量图可见, 由于支路电流 $\dot{U}/R_P$ 的存在, 使得 $\dot{U}$ 与 i 之间的相位差已经不再是 90° , 也有一个误差角 δ , 同样, 我们把它也称为电容器的损耗角。

并联等效电路中的损耗角正切为

$$D = \operatorname{tg} \delta = \frac{\frac{U}{R_P}}{\omega C_P U} = \frac{1}{\omega C_P R_P} \quad (1.20)$$

由公式 (1.19) 与公式 (1.20) 可见, 两种等效电路所求出的损耗系数公式是不完全一样的, 但是理论上可以证明, 对于同一只电容器, 其串联等效电路与并联等效电路的损耗角应该是相等的。从直观概念上也可作出如下的判断: 对于同一只电容器而言, 当它的电容量与功率损耗一定的条件下, 加在它上面的电压 $\dot{U}$ 与由它产生的总电流 $\dot{i}$ 都只能是唯一确定的量, 故电流 $\dot{i}$ 与电压 $\dot{U}$ 之间的相位差也应该是唯一的, 所以, 无论采取何种等效电路来表示它们, 其损耗角或损耗系数应该是完全相等的。

一般来说, 无论从使用角度还是从测量角度出发, 都是希望电容器的损耗系数越小越好, 因此, 在确实已知其损耗系数较小的前提下 (例如空气电容器), 常常可以近似地认为 $\operatorname{tg} \delta \approx \delta$, 即损耗系数的大小近似地等于损耗角的弧度值。

由上述可见, 既然同一只电容器的两种等效电路中的损耗系数是相等的, 那么两种等效电路中的参数之间也必定有一定的内在联系, 经推导可得

$$\begin{aligned} C_S &= C_P \left(1 + \frac{1}{\omega^2 C_P^2 R_P^2} \right) \\ &= C_P (1 + \operatorname{tg}^2 \delta) \end{aligned} \quad (1.21)$$

$$\begin{aligned} R_S &= \frac{R_P}{1 + \omega^2 C_P^2 R_P^2} \\ &= \frac{R_P \cdot \operatorname{tg}^2 \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \end{aligned} \quad (1.22)$$

由式 (1.21) 与式 (1.22) 可见, 在两种等效电路中的电容与电阻都是不完全相等的, 而且两者之间的关系式都与电源频率的大小有关。分析表明, 当损耗系数较小时, 两种等效电路中的电容量值是比较接近的, 但其损耗电阻却相差较大; 当损耗系数较大时, 两种等效电路中的电容量相差较大, 但其损耗电阻却很

接近。所以，只有在损耗系数相当小的条件下，才可以认为两种等效电路中的等效电容是近似相等的，否则相差较大。

1.1.4 交流电路中的阻抗与导纳

如前所述，在交流电路中的任何元件，都不只是单一的属性，而是具有阻抗的性质。无论电阻器、电感器或者电容器都可以用复数阻抗来表示，即

$$Z = r + jX = ze^{j\phi} \quad (1.23)$$

式中： r 为复数阻抗中的同相分量（或称有功分量）；

X 为复数阻抗中的正交分量（或称无功分量）；

z 为复数阻抗的模；

ϕ 为复数阻抗的阻抗角。

复数阻抗中几个参数之间的关系可以用图 1.7 来表示。

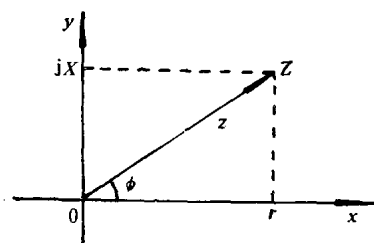


图 1.7

根据图 1.7 又可得到它们之间的定量关系式如下

$$r = z \cos \phi \quad (1.24)$$

$$X = z \sin \phi \quad (1.25)$$

$$z = \sqrt{r^2 + X^2} \quad (1.26)$$

$$\phi = \arctan \frac{X}{r} \quad (1.27)$$

有了上述公式，可对复数阻抗的参数进行相互变换，以适应某些运算或设计的需要。

对于交流电路中的阻抗，也可用复数导纳加以表示，即

$$Y = \frac{1}{Z} = g - jb = ye^{-j\phi} \quad (1.28)$$

式中： g 为复数导纳的同相分量；

b 为复数导纳的正交分量，但取负号；

y 为复数导纳的模；

ϕ 为复数阻抗的阻抗角。

根据式 (1.28) 可以推导出导纳与阻抗各参数之间的关系式如下