

阻抗参数理论

一. 阻抗参数的定义

阻抗是电子领域使用最为广泛的一个概念，阻抗是表征电子电路、元件及制作元件的材料的重要参数。

阻抗以符号 Z 表示，通常定义为一个器件或电路对流经它的给定频率下的交流电流(AC)的总抵抗能力。阻抗是一个讨论交流信号的概念，直流信号仅讨论电阻概念。直流电阻 R_{DC} ，有些场合为表示与交流电阻的区别，直接写为 DCR 。

阻抗是一个复数，需要在复平面（矢量平面）上方能完整地描述，因此在有些场合也称为复阻抗。复阻抗既可用直角坐标系以 $R+jX$ 形式表示，也可用极坐标系以幅值和相位角 $|Z| \angle \theta$ 形式表示，此两种坐标系所表示的参数是可以相互转换的，存在着图中所示的数学关系。

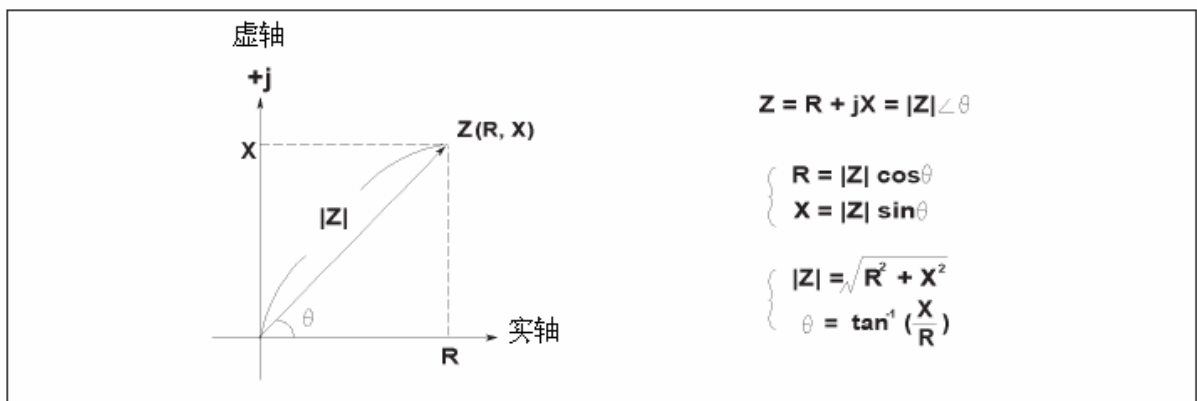


图 1. 阻抗(Z)由实数部分 (R) 和虚数部分 (X) 组成

图 1 为表示复阻抗的矢量平面，由实部（电阻， R ）和虚部（电抗， X ）组成。阻抗的模 $|Z|$ 和其与横坐标之间的夹角 θ 可组成极坐标，图 1 还表示了 R 、 X 、 $|Z|$ 、 θ 之间的数学关系。以下式表示： $Z = R + jX$ ， $Z = |Z|e^{j\theta}$

电阻 R 为阻抗 Z 的实部，在电路中起将电能转化为热能的作用，电抗 X 的为阻抗 Z 的虚部，在电路中起能量储存的作用。阻抗模 $|Z|$ 表示复阻抗的绝对大小， θ 为复阻抗 Z 与实轴（ R 轴）的夹角。

$$\text{它们之间的关系如下： } |Z| = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad \theta = \arctg\left(\frac{X}{R}\right) \text{----- (1)}$$

$$R = |Z|\cos\theta, \quad X = |Z|\sin\theta \text{----- (2)}$$

某些情况下，为数学运算的便利性而使用阻抗的倒数，表示为 $1/Z=1/(R+jX)=Y=G+jB$,

这里， Y 称为导纳， G 成为电导， B 称为电纳，如图 2 表示，物理意义可以描述为一个器件或电路允许流经它的给定频率下的交流电流通过的能力。

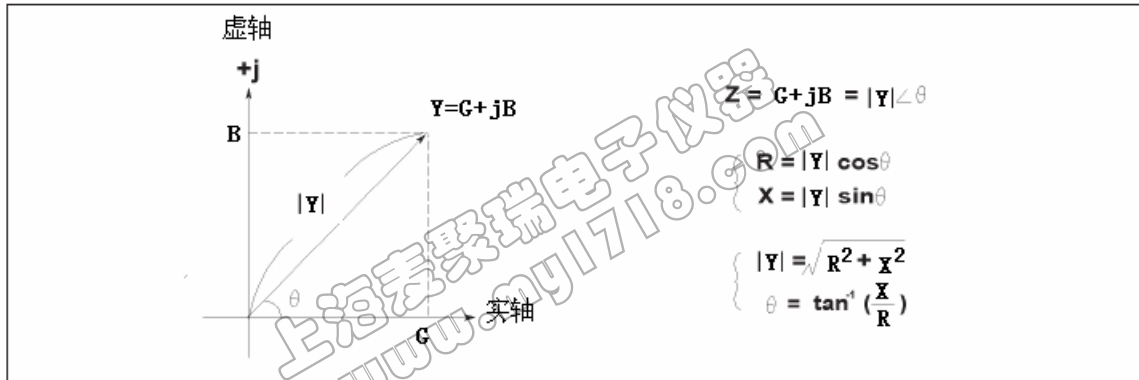


图 2. 导纳 (Y) 由实数部分电导 G 和虚数部分电纳 B 组成

同理，它们之间的关系可表示为： $|Y| = \sqrt{G^2 + B^2}$ ， $\theta = \arctg\left(\frac{B}{G}\right)$ ----- (3)

$$G = |Y| \cos \theta, \quad B = |Y| \sin \theta \text{----- (4)}$$

阻抗、电阻、电抗的单位是欧姆 (Ω)，导纳、电导、电纳的单位是西门子 (S)。阻抗是一个常用的参数，由于它可简单的表示为 R 和 X 的加法运算而专门用于电阻和电抗的串联连接中。对于并联连接，最好使用导纳（见图 2）。

二. 电子元件参数在测量中使用和引申

现实世界中，经常会使用诸如电阻器、电感器、电容器三种无源基本器件。从理论上说，所有无源器件均可使用这三种器件或器件的组合来描述，如压电器件、晶体振荡器、半导体等无源器件。加上基本的有源器件，如二极管、稳压管、三极管、场效应管等，便组成了电子电路的全部。因此，准确地了解基本无源器件的性质是极为重要的。

自然界中纯粹的电阻、电感、电容是不存在的，任何器件一定是某几种器件的组合，且随着频率的变化，其组合形式将发生变化。如一个电容器中均存在有以下几种寄生参数：引线电阻。引线电感，材料的绝缘电阻等。

为简化起见，一般地，将一个器件的参数组成形式描述为串联等效和并联等效两种形式，在低频领域 ($\leq 2\text{MHz}$) 这两种形式基本可以描述一个基本器件 (L 、 C 、 R) 的组成。

串联等效表示为为一个电阻 R_s (电导 G_s , $R_s=1/G_s$) 元件与电抗 X_s (电纳 B_s , $X_s=1/B_s$) 的串联，串联以下标 s 表示。

并联等效表示为为一个电阻 R_p (电导 G_p) 元件与电抗 X_p (电纳 B_p) 的并联, 串联以下标 p 表示。

如图 3 表示了串联等效和并联等效的两种电路组成。

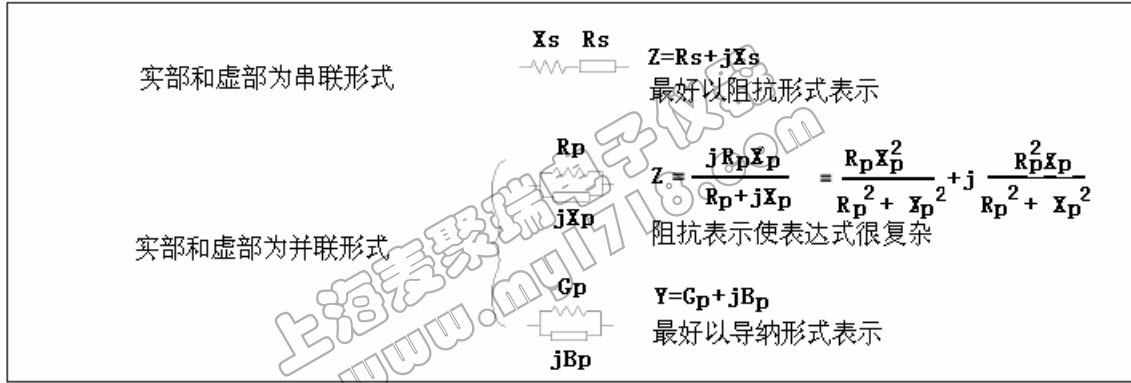


图 3. 实部和虚部元件分别以串联和并联形式表示

一般地, 串联等效形式用电阻 R_s 和 X_s ($Z=R_s+jX_s$) 表示, 并联等效形式用电导 G_p 和电纳 B_p ($Y=G_p+jB_p$) 表示。

串联等效和并联等效方式是可以相互转换的, 如图 3 已表示出了两种等效方式。以 R 、 X 关系描述其串联和并联的转换关系。

$$R_s = \frac{R_p X_p^2}{R_p^2 + X_p^2}, \quad X_s = \frac{R_p^2 X_p}{R_p^2 + X_p^2} \quad \text{----- (5)}$$

由式 (5) 可得 $\frac{R_s}{X_s} = \frac{X_p}{R_p}$, 并令其为 D , 下文将得到 D 的物理意义, 在此称为损耗因子 D ,

则式 (5) 可表示为:

$$R_s = \frac{R_p}{1 + 1/D^2}, \quad X_s = \frac{X_p}{1 + D^2} \quad \text{----- (6)}$$

由式 (6) 可得式 (7):

$$R_p = (1 + 1/D^2)R_s, \quad X_p = (1 + D^2)X_s \quad \text{----- (7)}$$

同理, 可得该两种等效方式以 G 、 B 描述时的转换关系。

电抗 X 为阻抗 Z 的储能部分, 可进行储能的元件有两种, 电感 L 和电容 C , 因此电抗 X 有两种形式---感抗 (X_L) 和容抗 (X_C)。

定义为, $X_L=2\pi fL$, $X_C=1/(2\pi fC)$, 这里, f 表示特定的频率, L 为电感量, C 为电容量。 $2\pi f$ 可

以角频率 (ω : omega) 表示, 进而可表示为 $X_L = \omega L$, $X_C = 1/(\omega C)$, 参见图 4。



图 4. 电抗的两种表示形式---感抗 (X_L) 和容抗 (X_C)

电纳和电导也可用相似的倒数形式表示。图 5 显示了电阻和电抗以串联和并联形式连接时的典型表达式。

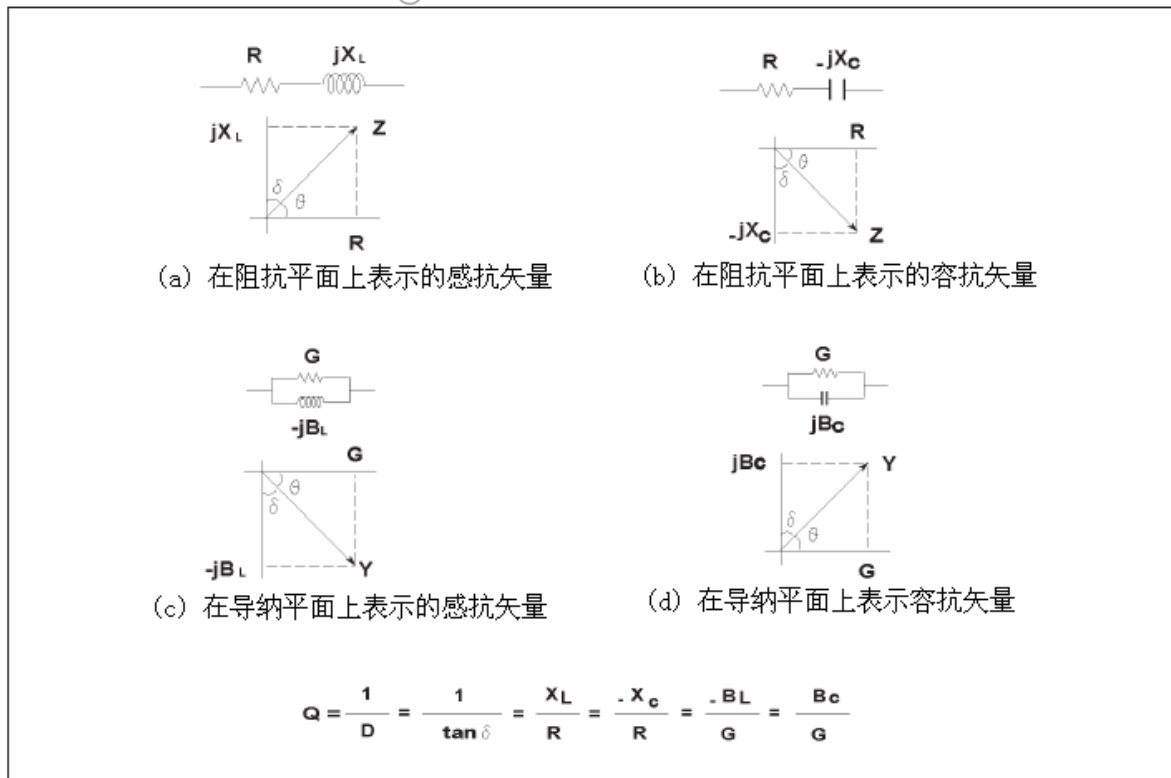


图 5. 阻抗和导纳参数间的关系

复阻抗 Z 存在耗能成分 R 和储能成分 X , 因此将 Z 中消耗的能量与存储能量之比称为损耗因子 (有时也称耗散因数) S 。

$$\text{在串联等效方式下, } D = \frac{P_{\text{耗}}}{P_{\text{储}}} = \frac{I^2 R_s}{I^2 X_s} = \frac{R_s}{1/\omega C_s} = \omega R_s C_s \text{----- (8)}$$

$$\text{在并联等效方式下, } D = \frac{P_{\text{耗}}}{P_{\text{储}}} = \frac{U^2/R_p}{U^2/X_p} = \frac{X_p}{R_p} = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (9)$$

无论是串联或并联等效方式, 损耗因子均是相等的。

品质因素 Q 用于表示电抗的纯净程度 (即与没有电阻时的纯电抗的接近程度), 定义为存储于元件中的能量与元件中消耗的能量之比。即 $Q=1/D$ 。

从图 5 可以看出, Q 是 θ 角的正切值; 对电容器来说, 通常用损耗因子 (D) 来表示纯净程度, 该量可简单地表示为 Q 的倒数, 即是 θ 角余角 δ 的正切值, 在图 5 (d) 中示出了 δ 角。

三. 阻抗参数的单位与量纲

序号	表示符号	名称	单位	量纲
1	$ Z $	阻抗模	欧姆	$\mu\Omega, m\Omega, \Omega, k\Omega, M\Omega$
2	R	电阻		
3	X	电抗		
4	$ Y $	导纳	西门子	$\mu S, mS, S, kS$
5	G	电导		
6	B	电纳		
7	θ	相位角	角度 DEG 弧度 RAD	$1^\circ (\text{DEG}) = 180^\circ / \pi \times \text{RAD}$
8	C	电容	法拉	pF, nF, μF , mF, F
9	L	电感	亨利	nH, μH , mH, H
10	D	损耗因子	无	无
11	Q	品质因素		

p (皮) = 10^{-12} , n (纳) = 10^{-9} , μ (微) = 10^{-6} , m (毫) = 10^{-3} , k (千) = 10^3 , M (兆) = 10^6

上海麦聚瑞电子仪器有限公司
 同惠上海总代理
 同惠上海办事处
 电话 :021-53084217/8/9
 传真 :021-51685888
 电邮 my1718.com@163.com
 地址 :上海市北京东路668号
 科技京城C区418室
 邮编 200001