

中国高等教育培训中心  
高职信息类专业国际合作组织

联合引进



德国国家远程教育中心 (ZFU) 批准

# 电气技术人员认证远程教育课程

【德】Robert Eckert博士远程教育学院 编著

## 测量技术 (第二册)



ECKERT  
SCHULEN  
Fernlehrinstitut  
GmbH



华文出版社  
Sinoculture Press

电气技术人员认证远程教育课程

# 测量技术

## 第二册

[德] Robert Eckert博士远程教育学院 编著  
北京泛华德教育科技有限公司 翻译

华文出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

测量技术/德国Robert Eckert博士远程教育学院编著;  
北京泛华德教育科技有限公司译—北京: 华文出版社, 2009.12

电气技术人员认证远程教育课程  
ISBN 978-7-5075-2958-6

I. ①测… II. ①德…②北… III. ①电子测量—工程技术人员—远距离教育—教材 IV. ①  
TM93

中国版本图书馆CIP数据核字 (2009) 第213440号

## 电气技术人员认证远程教育课程：测量技术(第二册)

---

- 编 著： 德国Robert Eckert博士远程教育学院  
翻 译： 北京泛华德教育科技有限公司  
责任编辑： 吴 晶  
责任校对： 华 一  
出版发行： 华文出版社  
社 址： 北京市宣武区广安门外大街305号8区2号楼  
邮政编码： 100055  
网 址： <http://www.hwcbcs.com>  
投稿邮箱： [hwcbcs@126.com](mailto:hwcbcs@126.com)  
电 话： 010-58336255 010-58336259  
经 销： 新华书店  
印 刷： 北京市艺辉印刷有限公司  
开 本： 210×297 1/16  
印 张： (全套3册)32  
字 数： (全套3册)830千字  
版 次： 2010年2月第1版  
印 次： 2010年2月第1次印刷  
标准书号： ISBN 978-7-5075-2958-6  
定 价： (全套3册)177.00 元

版权所有，侵权必究

# 德国《电气技术人员认证远程教育课程》中文版

## 导言：光荣与梦想

众所周知，德国是一个高度发达的工业化国家，在德国工业化进程中，德国政府始终如一地把职业教育作为国家经济发展的中坚力量，这不仅体现在理论上，更重要的是在教育实践中创造出闻名于世的“双元制”职业教育模式。进入新世纪后又发起了“职业教育攻势国家行动”，设立了全国“职业教育日”，颁布实施了新的《联邦职业教育法》等发展职业教育的重大举措。摆在我们面前的这套11000页，1800万字完整的电气技术专业课程，由中国高等教育培训中心、高职信息类专业国际合作组织联合引进，经德国国家远程教育中心批准，Robert Eckert博士远程教育学院编写的电气技术人员认证远程教育课程，就是在这样的经济社会环境制约下的德国职业教育课程一个具有代表性的建设成果。

在欧洲颇具影响的Robert Eckert博士远程教育学院根据职业院校培训框架计划开发的课程充分体现了学校配合企业的培训设计学习领域，实施项目教学。可以看出，这套课程是对学科体系的调整与改革，课程内容侧重知识的应用与技能的培养。我国很多优秀的院校都曾选派教师赴德国ECKERT教育集团Robert Eckert博士远程教育学院进行课程建设培训，国家示范性高职院校邢台职业技术学院、成都航空职业技术学院、淄博职业学院、常州信息工程学院、浙江工商职业技术学院、包头职业技术学院等院校的教师赴德归国后普遍感到受益匪浅。

《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》指出：“积极引进国（境）外优质职业教育资源。鼓励国（境）外组织和个人依照我国法律和办学资格要求，同我国境内职业教育机构和其他社会组织，合作举办高水平的职业学校或职业培训机构。努力拓展职业学校毕业生国（境）外就业市场”。在中德职业教育合作30年后的今天，中国职业教育已经站在了一个新的历史起点上，积极引进国际上先进的职业教育理念和优质教学资源将对我国职教未来发展起到很重要的作用。教材作为一种重要的教学资源，不仅是体现教育思想、实现教育目标的载体，也是人才培养过程中掌握知识、发展能力和提高素质的重要信息载体，是课程最具体的形式。德国基于工作过程导向理念、“双元制”职业教育模式的落脚点都聚焦在课程体系和课程内容上。对于日益重视职业教育课程建设的中国职业教育事业而言，系统地了解德国专业的课程体系、结构和课程内容，破解德国核心教育技术，无疑会对我们本土化的课程改革与建设，取得“他山之石，可以攻玉”的功效。

我们坚信，通过这套电气技术人员的认证教材，从中可以研究德国工作过程导向思想在职业学校的专业课程体系中是如何落实的，德国职业学校的教育活动如何应对经济技术发展。对比分析中国相应的专业课程体系，寻找相似与差异；系统分析教材的内容架构，研究课程设置依据、课程与课程之间的内在教育技术逻辑关系，比较研究中德职业教育在设计专业课程体系的内在逻辑思路的异同；分析教材的编写结构、传递技术信息的逻辑思路、编写方法、教材的形式、体例和模式，与国内同类教材比较各自的特色。所有这一切，都将为推动中国当代的职教课程改革提供新颖的视角、建设性的借鉴与参考。

高职信息类专业国际合作组织已开始与Robert Eckert博士远程教育学院、国际教育技术

研发机构北京泛华德教育科技有限公司合作开发与上述课程相配套的课件、教案及多媒体教学资源、教学参考、实训手册等。这套课程发行后将陆续举办与其配套的师资培训班、通过中德职教专家上示范课、开展交流研讨和观摩等途径，为职业院校以及职业培训机构的教师借鉴德国的职业教育理念、教育模式以及教学方法等提供切实有效的参考，本着洋为中用的原则，最终旨在提升广大教师驾驭本土化课程建设的能力。

对于那些区域经济条件不尽如人意，渴望交流学习的职业学校以及培训机构，高职信息类专业国际合作组织愿将其多年来的成功经验与丰硕成果以及对德国乃至其他发达国家职业教育合作的良好资源，无私地奉献出来。

我们的行动宗旨是：运用国家示范性高职院校的建设成果、借鉴德国的职业培训模式和课程体系、依托新媒体的远程教育平台、面向不发达地区扶持职业教育的弱势群体、整合国内外的教学、实习、实训与就业资源，为中国职业教育的宏图伟业做出自己的贡献。

德国《电气技术人员认证远程教育课程》中文版编委会

2009年12月 北京

# 德国《电气技术人员认证远程教育课程》

## 中文版编委会

- 主 编:** 钟玉琢 清华大学深圳研究生院信息学部主任
- 执行主编:** 曲克敏 中国高等教育培训中心副主任  
高职信息类专业国际合作组织秘书长
- 副 主 编:** 周长海 中国高等教育培训中心教育技术部首席顾问
- 徐玉彬 工业与信息化部电子教育与考试中心主任
- 左志成 中国电子科技集团公司人力资源部主任
- 刘 丛 国家示范性高职院校邢台职业技术学院院长
- 张学库 国家示范性高职院校宁波职业技术学院副院长
- 李学锋 国家示范性高职院校成都航空职业技术学院  
院长助理\教务处长\国家级教学名师
- 委 员:** 姜义林 国家示范性高职院校淄博职业学院副院长  
(按姓氏笔画排序)
- 吴志荣 宁波职业技术学院电子系主任
- 邱寄帆 成都航空职业技术学院计算机系主任
- 宗美娟 淄博职业学院示范建设办公室专职副主任
- 林训超 成都航空职业技术学院电子工程系主任
- 祝登义 成都航空职业技术学院教务处副处长
- 郭震震 中国高等教育培训中心教育技术部主任助理
- 高爱国 淄博职业学院信息工程系主任
- 曾照香 淄博职业学院电子电气系主任\国家级教学名师
- 诸建立 邢台职业技术学院信息工程系主任

电气技术人员认证远程教育课程

## 《测量技术》

### 审校委员会

主任：林训超

副主任：李明富

委员：梁颖 周兴 黄燕

第2分册a部分	电阻与电功率测量	杜晓杨翻译	任 菊主审、终审
第2分册b部分	高低频测量仪器与非电量测量	程 爽翻译	任 菊主审、终审

## 第2分册a部分

# 电阻与电功率测量

## 目 录

引 言.....	1
1 复合电阻测量.....	2
1.1 用电阻、电压和功率表测量交流电阻 .....	2
1.1.1 基本原理 .....	2
1.1.2 通过测量电流、电压和功率确定电阻 .....	6
1.1.3 通过三电压法确定电阻 .....	6
1.2 交流电——测量电桥测量交流电阻 .....	11
1.2.1 基本常识 .....	11
1.2.1.1 商数表示法.....	11
1.2.1.2 乘积表示法.....	12
1.2.2 电容量的测量 .....	13
1.2.2.1 4号电容量测量电桥.....	13
1.2.2.2 西林电桥.....	18
1.2.3 介电常数的测量 .....	20
1.2.3.1 麦克斯韦测量电桥.....	20
1.3 用桥接电路进行的频率测量 .....	23
1.3.1 维恩频率测量电桥 .....	23
1.3.2 维恩—鲁宾逊电桥 .....	25
1.4 检查桥接电路的可调性 .....	25
2 测量电功和电功率.....	30
2.1 测量装置种类、测量仪器及其刻度标记 .....	30
2.1.1 动线圈式仪表 .....	35
2.1.1.1 结构和工作原理.....	35
2.1.2 电动测量装置 .....	37
2.1.3 非铁质的测量装置 .....	38
2.1.3.1 铁封闭型测量仪.....	38
2.1.3.2 铁屏蔽测量仪.....	39

2.1.3.3	无定向检测仪 .....	39
2.1.4	旋转式铁测量仪 .....	40
2.1.4.1	性能和使用 .....	40
2.1.4.2	刻度单位 .....	41
2.1.4.3	表现形式 .....	41
2.1.5	电表 .....	42
2.1.5.1	磁动力计数器 .....	42
2.1.5.2	电动力计数器 .....	43
2.1.5.3	感应计数器 .....	43
2.2	电功率的计算过程 .....	44
2.2.1	电压电流变量器 .....	44
2.2.1.1	变压器 .....	44
2.2.1.2	变流器 .....	44
2.2.2	电功率的测量(直流) .....	45
2.2.2.1	通过测量电压和电流测量电功 .....	45
2.2.2.2	用功率表测量功率 .....	46
2.2.3	单相交流电流的功率测量 .....	49
2.2.3.1	有效功率的测量(P) .....	50
2.2.3.2	无功功率测量 .....	52
2.2.3.3	视在功率的测量 .....	54
2.2.4	三相交流电(又称三相电流)的功率测量 .....	54
2.2.4.1	有效功率的测量 .....	56
2.2.4.2	无功功率的测量(Q) .....	58
2.2.5	运用存储示波器对功率进行测量 .....	59
2.3	单相交流电与三相交流电的功率因数测量 .....	61
2.3.1	运用电动力学的比例测量仪器测量功率因数 .....	61
2.3.2	通过相位测量来确定功率因数 .....	62
2.4	电功的测量 .....	63
复习题答案 .....		66
练习题答案 .....		68

## 引言

在教材的第一部分你将理解和学习应用RLC-线路中的电阻测量方法。

在第二部分你将认识和应用所选取的仪器以及电功率和电流工作测量方法。

这是以电气工程、电子、目前为止教材中涉及的测量技术基础知识以及相应的数学（例如复杂的计算）和物理基础为前提的。

## 1 复合电阻测量

在详细进行第一章学习之前，你应该把这里总结的学习内容和相关学习目标回想一下。

在概述和目标定向中总是建议大家，无论是在认真学习中还是在本章的最后，都要把所学的与复习题、练习题相联系，与既定目标作比较。

**学习内容和学习目标：**

以下各节的目标是认识、理解和学习应用RLC-线路中的电阻测量的基本方法。

同时还将获知欧姆、电感和电容电阻拆分组合，用哪些测量方法来确定这些部分。

### ■ 1.1 用电阻、电压和功率表测量交流电阻

复合电阻（也即为交流电阻）可以通过电测量手段如电压、电流和功率以三种不同的形式来测量：

通过电压、电流和功率

通过纯电压测量（三电压法）

通过纯电流测量（三电流法）

下面将涉及到这三种方法。在这之前我们先简要复习一下交流电阻的描述形式。

#### 1.1.1 基本原理

交流电阻或复合电阻也叫阻抗，用复合系数 $Z$ 以代数形式写成实数部分和虚数部分。

$Z = R + jX$ （代数形式的组合表示）

同时 $R$ 被称为有效电阻， $X$ 被称为无功电阻。

有功组件 $R$ 是欧姆电阻。

无功组件可以是电感性的 $X = X_L = \omega \cdot L$ ，电容性的 $X = X_C = -\frac{1}{\omega \cdot C}$ 或混合的，它由频率来决定。

例：

电 感：

$$\underline{Z} = R + j \cdot X_L = R + j \cdot \omega \cdot L$$

电 容：

$$\underline{Z} = R + \frac{1}{j \omega C} = R - j \frac{1}{\omega C}$$

混 合:

$$\underline{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}$$

$$\underline{Z} = R + j \underbrace{\left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}_{\text{虚数部分}}$$

虚数部分可以根据电路的频率（对于恒定的L和C）来确定。若为正，那么是电感性的，若为负，则是电容性的。当 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ 时，它为0。

在这里比较一下电工基础里的谐振电路或共振电路章节。

交流电阻也可以以指数的形式通过总数来表示:

$$|\underline{Z}| = Z = \sqrt{(\text{实部})^2 + (\text{虚部})^2} \quad \text{相位角 } \varphi = \arctan \frac{\text{虚部}}{\text{实部}}$$

Z也被称为阻抗。

$$\underline{Z} = Z \cdot e^{j\varphi} \quad (\text{指数形式或指数表示})$$

两种表示形式（代数或指数）是一致的。

$$\underline{Z} = R + jX = Z \cdot e^{j\varphi}$$

图1.1以图表形式描绘了一个交流电阻（这里是电感的），为了换算运用了三角学中的关系 $R = Z \cdot \cos \varphi$ 和 $X = Z \cdot \sin \varphi$ 。

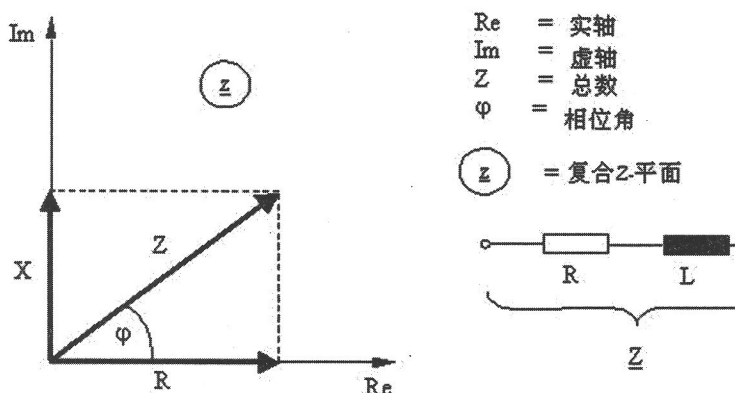


图1.1 复合电阻平面图

在图1.1复合电阻平面内的交流电阻（串联等效电路图）图表示当测量接近纯电容或纯电感的时侯，偏差（损耗角）变成理想元件的相位角 $\varphi = \pm 90^\circ$ 或损耗系数 $\tan \delta$ （见图1）

$$\tan \delta = \frac{R}{|X|}$$

或者定义为Q值

$$Q = \frac{1}{\tan \delta}$$

注意:

$\tan \delta = \frac{R}{|X|}$ 仅适用于串联等效电路图。在并联等效电路图(图中)中,电纳必须按比例计算,也

$$\text{就是 } \tan \delta_{(\text{并联})} = \frac{G}{|B|} = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{1}{|X|}} = \frac{|X|}{R}$$

G = 电导, B = 电纳

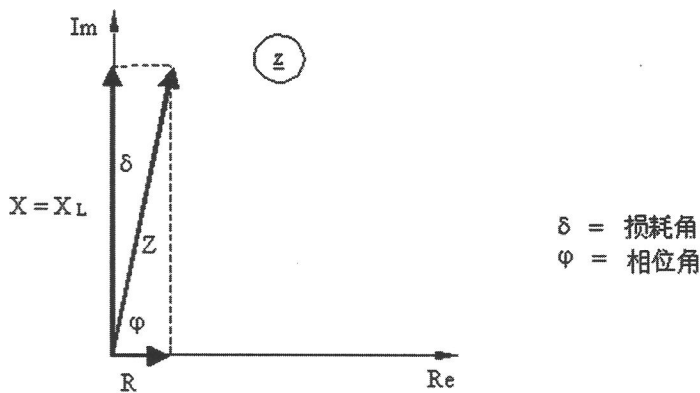


图1.2 损耗角与一个理想电感器  $j \cdot X_L = j \omega L$  相位角  $\varphi = +90^\circ$  的偏差

一个阻抗(交流电阻)由此可以通过以下完整地描述:

- a) 有效电阻R和无功电阻  $X_L$  (这里  $X_L = \omega \cdot L$ )
- b) 有效电阻R (或无功电阻X) 和损耗角  $\delta$  (或损耗系数  $\tan \delta$ )
- c) 有效电阻R (或无功电阻X) 和Q值
- d) 总数Z和相位  $\varphi$ 。

不仅电阻可以写成复合形式或在复合平面上表示, 交流功率也可以。

用代数表示法表示的复合视在功率的公式为:

$$\underline{S} = P + j \cdot Q$$

这里P表示有效功率, Q表示无功功率。

功率  $\underline{S}$  也可以以指数形式通过绝对值和相位  $\varphi$  来表达。

$$\underline{S} = S \cdot e^{j\varphi}$$

绝对值 $|S| = S$ 也被称为视在功率。

两者表示形式是一致的。

$$\underline{S} = P + jQ = S \cdot e^{j\varphi}$$

图1.3 在复平面中以图表形式表示了交流电功率（这里：电感性的）。

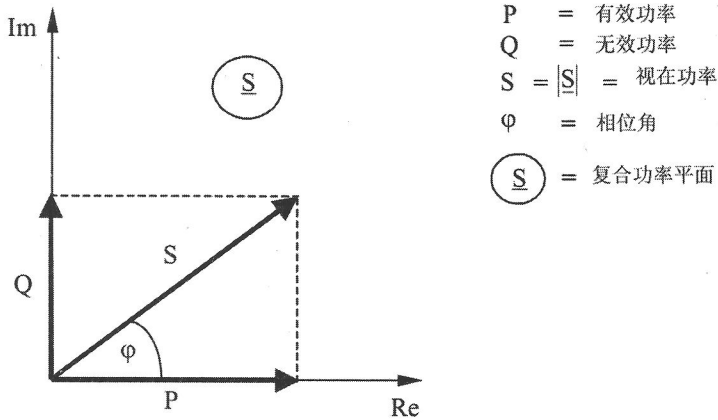


图1.3 复平面中功率示意图

功率 $\underline{S}$ 也可以通过电压和阻抗来表示

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = U \cdot \frac{U^*}{Z^*} = \frac{U^2}{Z^*}$$

用  $\underline{I}^*$  = 共轭复数 $I$

$\underline{U}^*$  = 共轭复数 $U$

$\underline{Z}^*$  = 共轭复数 $Z$

或通过电流和阻抗表示

$$\underline{S} = \frac{U^2}{Z^2} \cdot Z = I^2 \cdot Z$$

由此得出视在功率 $|S| = S$

$$S = \frac{U^2}{Z} = I^2 \cdot Z = I \cdot U = |S|$$

并由此得出有效功率 $P$

$$P = I^2 \cdot R = I^2 \cdot Z \cdot \cos \varphi$$

和无功功率 $Q$

$$Q = I^2 \cdot X = I^2 \cdot Z \cdot \sin \varphi$$

### 1.1.2 通过测量电流、电压和功率确定电阻

通过测量电流、电压和功率可以完全确定交流电阻。

测量装置如图1.4所示。

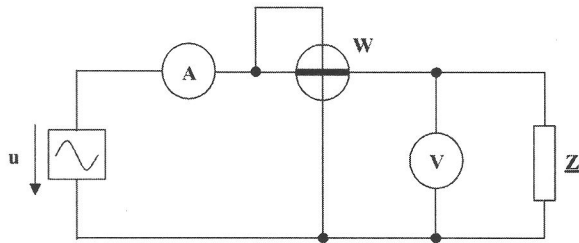


图1.4 通过电流、电压和功率确定电阻的测量装置

通过测量电流和电压得出视在功率S

$$S = I \cdot U$$

以及总电阻Z

$$Z = \frac{U}{I}$$

用功率表得到有效功率P

由相位角 $\varphi$ 的公式 $P = I^2 \cdot Z \cdot \cos \varphi$ 可以确定:

$$\varphi = \arccos \left( \frac{P}{I^2 \cdot Z} \right)$$

由相位角 $\varphi$ 和总电阻Z可以明确地确定阻抗。

### 1.1.3 通过三电压法确定电阻

通过测量电压也可以完全确定一个交流电阻。首先需要有一个纯欧姆电阻与Z串联，测量装置如图1.5所示。

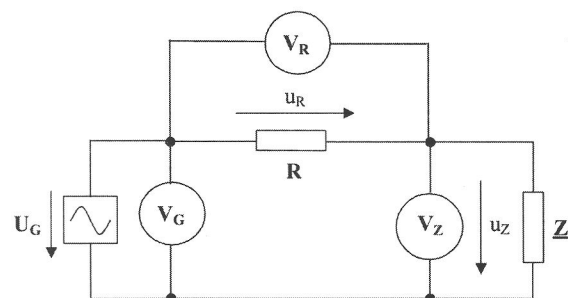


图1.5 通过测量三个电压确定未知阻抗Z的测量装置

可以将总电压 $U_G$ 作为分电压  $U_R$  和  $U_Z$  的矢量和标记在向量图中。如图1.6所示。因为电阻R为纯

欧姆电阻，所以可以将矢量 $U_Z$ 标记成与 $U_R$ 的角为 $\varphi$ 。

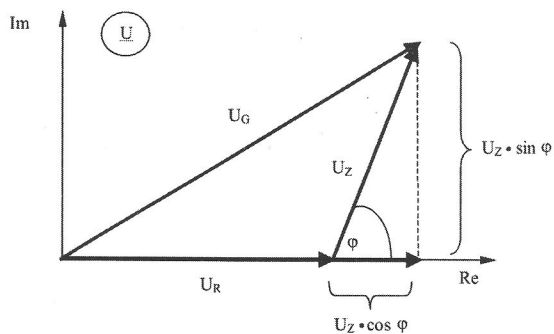


图1.6 测量装置的向量图

首先以基线 $U_Z$ 绘制一个直角三角形，以及由基线 $U_G$ 产生的直角三角形，可以写出：

$$(U_R + U_Z \cos \varphi)^2 + U_Z^2 \sin^2 \varphi = U_G^2$$

通过乘方得到：

$$U_R^2 + U_Z^2 \cos^2 \varphi + 2 U_R U_Z \cos \varphi + U_Z^2 \sin^2 \varphi = U_G^2$$

通过综合得到：

$$U_R^2 + U_Z^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) + 2 U_R U_Z \cos \varphi = U_G^2$$

由于 $(\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) = 1$ ，所以可以将 $\cos \varphi$ 写成

$$\cos \varphi = \frac{U_G^2 - U_R^2 - U_Z^2}{2 U_R U_Z}$$

因为，流过R和Z的电流 $I = \frac{U_R}{R}$ ，所以可以将总数 $Z = \frac{U_Z}{I}$ 写成

$$Z = \frac{R \cdot U_Z}{U_R}$$

由此用总数和相位就可以确定阻抗了。

### 1.1.4 通过三电流法确定阻抗

通过测量三个电流也可以完全确定一个交流电阻。这里需要一个纯欧姆电阻R并联到测量装置如图1.7所示。

可以将总电流 $I_G$ 作为分电流 $I_R$ 和 $I_Z$ 的矢量和标记在向量图中，如图1.8所示。由于R为纯电阻，所以可以将矢量 $I_Z$ 标记成与 $I_R$ 的角为 $\varphi$ 。

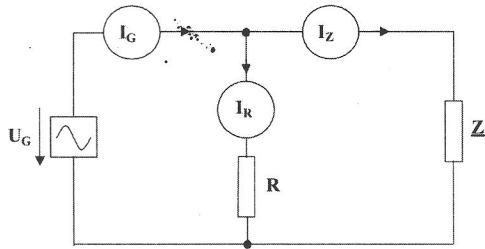


图1.7 通过测量三个电流确定未知阻抗Z的测量装置

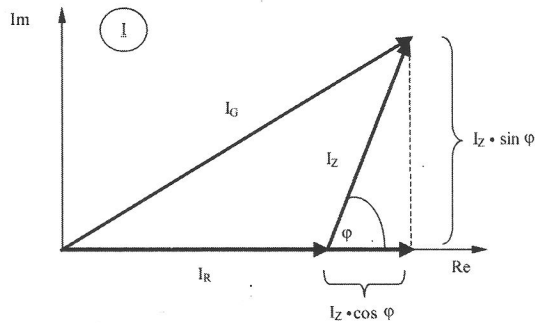


图1.8 测量装置向量图

这里也首先用基线 $I_Z$ 绘制一个直角三角形，与测量三个电压的方法类似，通过简单计算得到

$$\cos\varphi = \frac{I_G^2 - I_R^2 - I_Z^2}{2 I_R I_Z}$$

因为R和Z有相同的电压 $U = I_R \cdot R$ ，所以可以写成绝对值  $Z = \frac{U}{I_Z}$

由此，用绝对值和相位可以确定阻抗。

例：

一个未知阻抗通过上面三种方法测定。R = 200Ω作为串联或并联电阻使用。测量值记录在表1.1中。由测量值即可以确定总数和相位，又可以确定有效功率和无功功率。