

北京电影学院录音专业教材

M  
SOUND

当代影视声音系列丛书

影  
视

录音电声学

林达恂 / 编著

LINDAKUN BIANZHU

中国广播电视出版社

《当代影视声音系列丛书》

录音专业教材书系

北京电影学院  
《当代影视声音系列丛书》编委会编

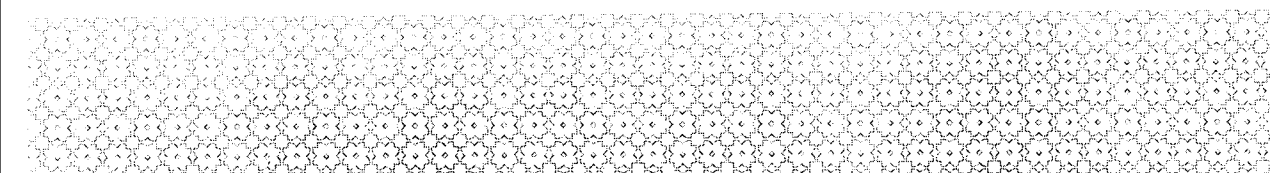
**影 视**

---

**录 音 电 声 学**

林达恂 / 编著

中国广播电视出版社



### 图书在版编目 (CIP) 数据

影视录音电声学 / 林达悃编著. —北京: 中国广播电视出版社, 2004.10

(当代影视声音系列丛书)

ISBN 7-5043-4346-3

I. 影... II. 林... III. ①电影录音-电声学  
②电视(艺术)-录音-电声学 IV. J933

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 101198 号

### 影视录音电声学

编 著:	林达悃
责任编辑:	林 曦
封面设计:	李燕平
责任校对:	谭 霞
监 印:	陈晓华
出版发行:	中国广播电视出版社
电 话:	86093580 86093583
社 址:	北京市西城区真武庙二条9号(邮政编码 100045)
经 销:	全国各地新华书店
印 刷:	北京海淀安华印刷厂
装 订:	涿州市西何各庄新华装订厂
开 本:	787毫米×1092毫米 1/16
字 数:	160(千)字
印 张:	11.5
版 次:	2005年1月第1版 2005年1月第1次印刷
印 数:	3000册
书 号:	ISBN 7-5043-4346-3/TN·309
定 价:	21.00元

(版权所有 翻印必究·印装有误 负责调换)

## 总 序

当我落笔写下以下文字时，不由想起了一年前当代影视声音系列丛书主编林达恂教授发给我的电子邮件。林先生是国内知名的影视声音专家，在北京电影学院从教多年，在录音的教学、科研和实践方面多有建树。他是国内录音声学的先驱者，写出了国内第一本《录音声学》专著。林先生向我详细地介绍了由他和他的学生与同事姚国强、孙欣教授共同策划出版的这套丛书的宏大想法。他们认为：“影视节目中的声音，涉及范围广泛。既涉及声音的客观物理特性，又涉及声音的主观感受；既包括声音的艺术构思，又包括声音的技术制作——录音，甚至还包括声音与画面之间的相互诱导、相互作用以及声音美学等一系列问题。因此，影视声音是一门涉及到科学技术和文化艺术的边缘学科，是一个既涉及物理学、生理学、心理学和美学等广泛领域，又具有本身学科特点的独立学科。”我以为，对影视声音的这一定义很有独到之处，把属于自然科学的物理声学和作为人文科学的影视艺术结合起来，把主观的感觉和客观的反映结合起来，去研究声音，一定更容易接近声音的本质，也更有利于声音的利用。

“《当代影视声音系列丛书》将根据主编者对影视声音的这一理解，组织撰写、编辑、出版一套既有系统理论，又有影视声音艺术创作实践和声音评价与欣赏的系列专业书籍，以满足我国在影视声音专业教育、艺术创作、爱好欣赏及技术发展方面的各种需求。”为此，林先生还将该丛书的编辑出版计划作为附件发给了我，里面列出了该丛书教学、辞书和科普三个书系的详细书目，其数目达六十余册之多。

毫无疑问，这是一个非常有意义的工作，一个非常有创新性的大胆设想。它不但对于推动我院影视声音教学和学科理论建设是十分必要的，而且在指导我国影视声音艺术创作和普及影视声音知识方面也都具有非常重要的意义。老实说，对于这样一个庞大的计划是否能够实现，哪怕是部分

的实现，当时我真的为他们捏把汗。现在，《当代影视声音系列丛书》教学书系中即将付梓的书目摆在了我的案前，共有10册之多，200余万字。看着这些书目及其内容介绍，不由得发自内心对他们的出色工作表示由衷的敬佩，而且彻底地消除了当时的担忧。

北京电影学院录音系的前身是成立于1960年的电影工程系电声专业，至今已近半个世纪。如果从1978年电影学院恢复招生，并正式成立录音专业算起，也有二十多年的历史了。应当说，在创办影视录音专业方面，可供借鉴的经验不多，世界各国对这一专业的学科特性的理解也不尽相同，在教学模式上也各有侧重。作为在我国最早创立、国际上为数不多的录音专业，虽然我们也经历过影视录音“是技术还是艺术”的争论，也出现过偏重于艺术或偏重于技术的理论倾向，但是，我们始终将“录音”看成是影视声音艺术创作的重要手段，始终坚持声音艺术与制作技术的结合。在坚持艺术实践的同时，始终强调理论的指导意义，并将其贯穿于录音艺术专业的教学工作和艺术实践的全过程中。显然，总结上述在教学和创作过程中所获得的经验教训，是一件非常有意义的事情。

这种总结的最好方式就是著述，将我院录音专业在教学、科研和艺术创作方面所获得的实践经验上升到学术理论层面的高度，并翔实地记载下来，供学生学习、同行评述。这样做不但必将推动我院录音学科在教学、科研和艺术创作方面的可持续发展，并继续保持在全国的学术领先地位；同时，这种学术总结还可能对中国乃至世界影视声音艺术事业的开拓做出我们应有的贡献。

作为大众传播媒介的影视艺术属于艺术范畴。由于声音的瞬变性，给受众对声音艺术的感知和理解带来了一定困难。由于我国有关声音艺术方面的美学研究文献相对贫乏，因此，如何提高受众的影视声音艺术的审美能力，即培养受众的声音艺术审美心理能力和相互协调能力，不仅是受众的迫切需求，同时也是创作者的需要。从这个意义上讲，该丛书的出版将会在一定程度上解决这个问题。

最后必须强调的是，对于这样一个庞大的学术出版工作，仅靠几个人的力量是难度极大的，它的完成需要得到各方面的支持与帮助。尽管北京电影学院和中国广播电视出版社的各级领导在出版方面已给予了极大的支持，而且张会军院长同意出任编委会名誉主编，但是，丛书的编辑和出版，还需要各兄弟单位和国内外有关专家学者的大力支持和积极参与。为了我国影视声音艺术事业的繁荣昌盛，为了声音艺术教学与学科的大力发

## 总 序

---

展，我在真诚感谢林先生和各位专家的工作的同时，希望能有更多的院内外专家和学者参与到此项学术研究工作中来，不吝指教，将《当代影视声音系列丛书》的编辑出版工作逐项完成。

我殷切地期待着。

是为序。



(北京电影学院党委书记、教授)

2004年10月



# 前 言

本书于1993年根据北京电影学院录音系1992年编制的教学计划要求编写的。其间曾作过多次修改。在此次出版之前又进行了全面修订，并作了某些补充，但基本内容仍完全保持原貌。全书主要包括传声器与扬声器的基本原理及使用两大部分。考虑到录音专业的实际需要，在选材方面更侧重于传声器。这不仅因为在实际录音中传声器比扬声器更加复杂多变，而且还在于扬声器一旦布置好了之后很少再变动，而传声器在实际使用中几乎没有固定的时候。换句话说，从使用角度上讲，在录音系统中的扬声器主要用于监听和审听，通过这种监听或审听来控制或鉴定节目的声音及其效果。在一般情况下，用于监听或审听的扬声器不需要也不允许进行变动，更不必要重新布置。这时了解扬声器（或扬声器系统）及其相应的放声系统的声学特性，目的在于通过聆听对记录在载体上的声信号特点作出判断；传声器则不然，它不仅在每次录音之前都必须在众多传声器中进行选择，而且几乎没有一成不变的放置方式。事实上，录音中的传声器不仅仅是一种将声能转换为电能，以便加以放大、分配、混合、传输及增优处理的电声换能器，而且其本身就是一种“音质加工处理设备”。从这个意义上讲，它在录音中比扬声器具有更加重要的地位。这也是我们将它作为重点讨论的主要原因。无论如何，对于录音工作者来说，分析讨论传声器或扬声器的原理和技术，目的在于实际应用而非设计制造。在阐述中力求实现这一目标。

不言而喻，为了达到上述目的，在讨论分析中不能不涉及有关基本理论和基本知识，例如声学基础知识、听觉理论、室内声学以及电学、音乐等基本知识。当然，这不是本讲义的内容。遇到这种情况，实在不能回避的，只好直接引用有关的结果。如果不具备这些基本知识，必将影响对问



题的深刻理解。因此出现这种情况时只能通过自觉地参阅有关文献或资料加以解决。

尽管笔者在编写中力求深入浅出，既注意理论分析又注重结合录音实践，但终因水平所限，错误在所难免，敬请不吝指正。

林达悃

2004年10月于北京电影学院





## 目 录

<b>第一章 总 论</b> .....	( 1 )
第一节 电声学的内容及其在录音中的作用 .....	( 1 )
第二节 电声换能器的一般原理 .....	( 2 )
<b>第二章 电—力—声类比</b> .....	( 4 )
第一节 类比的含义 .....	( 4 )
第二节 电路元件 .....	( 6 )
第三节 力学元件 .....	( 9 )
第四节 声学元件 .....	( 17 )
第五节 振动系统的类比——电—力—声类比线路 .....	( 22 )
第六节 力—声变量器 .....	( 32 )
第七节 导纳型类比与阻抗型类比之间的转换 .....	( 34 )
<b>第三章 传声器原理</b> .....	( 37 )
第一节 传声器的一般原理及分类 .....	( 37 )
第二节 传声器的电声参数 .....	( 39 )
第三节 传声器指向性的形成 .....	( 46 )
【附录】关于决定复合传声器复合程度的 B 值公式的推导 .....	( 53 )
第四节 电容传声器的换能原理 .....	( 55 )
第五节 压强式电容传声器的基本原理 .....	( 57 )
第六节 压强—压差复合式电容传声器 .....	( 59 )
第七节 电容传声器的极化电压与指向性 .....	( 63 )
第八节 驻极体电容传声器 .....	( 65 )
第九节 动圈传声器的基本结构与换能原理 .....	( 66 )
第十节 振带式传声器 .....	( 69 )
第十一节 专用传声器及其他 .....	( 71 )



第十二节	电容传声器的电源电路	(81)
第十三节	传声器附件	(84)
<b>第四章</b>	<b>传声器的使用</b>	<b>(91)</b>
第一节	传声器的选择	(91)
第二节	使用传声器的若干基本规律	(98)
第三节	单传声器拾音技术	(107)
第四节	立体声传声器放置技术	(111)
第五节	“主—辅”传声器拾音技术	(115)
第六节	多传声器拾音技术	(120)
<b>第五章</b>	<b>扬声器及箱式扬声器系统</b>	<b>(126)</b>
第一节	扬声器的一般原理及分类	(126)
第二节	扬声器的主要电声参数	(127)
第三节	扬声器的额定条件	(136)
第四节	电动式纸盆扬声器	(138)
第五节	宽频带电动式纸盆扬声器	(146)
第六节	号筒式扬声器	(147)
第七节	声柱	(150)
第八节	箱式扬声器系统	(154)
第九节	平板扬声器	(157)
第十节	耳机	(160)
第十一节	扬声器的选用	(161)
第十二节	室内扩声简介	(167)
	主要参考书目	(171)



# 第一章 总 论

## 第一节 电声学的研究内容及其在录音中的作用

电声学是一门研究电声换能原理、技术和应用的科学。事实上，它的研究内容除了包括再生声源（如扬声器）和声接收器（如传声器）外，还有录音系统、放声系统及声测量与分析系统等设备。尽管它是声学的一个分支学科，但在声学理论和声学工程及其发展中具有十分重要的地位。电声学和物理声学一样都是声学各分支学科的基础，它们分别从基本理论和基本实验手段两方面为声学的其他分支学科的研究与发展提供了必要保证。电声学的出现与发展，推动了声学其他分支学科的建立与发展。本世纪初，随着电子管的出现，使声学实验的方法全部改观了，电声学的发展因此获得巨大的发展，它不但使人们不再局限于研究音频范围内的声振动，而可能获得更高或更低频率的声波，而且使近代的声学研究工作得以超出声波基本性质的研究范围，而深入到近代科学与工业、农业、国防、文教、卫生及日常生活等领域中去，有声电影也就是在这一时期、在这种情况下出现的；反过来，其他声学分支学科的建立与发展又给电声学提出了新的课题，从而推动了电声学的发展。从电声学学科本身来讲，目前研究的主要方向有高保真电声系统（包括接收、记录、放声和播送等）、高灵敏度优质的声接收器、大功率再生声源（尤其是大功率超高频和甚低频——次声声源）、高质量的记录、测量、分析及处理的设备等几个方向。无论如何，作为电声学的基本研究内容则是电声换能器。因此，本讲义将以电声换能器的原理、技术和应用作为其基本内容。

众所周知，在电影、电视等一类视听艺术及广播（剧）、唱片等一类听觉艺术的录音创作中，“录音”作为一种艺术创作手段已不再是简单的“把声能转换为其他形式并加以贮存的技术”，“高保真”也不能满足实际录音创作的需要了。在这类录音中，对原声源进行必要的加工处理（或称“增优”处理）以满足艺术构思的要求是必不可少的。在电影声音创作中，



为了使（电影中的）声音能“……像画面那样从一种复制的技术变成一种创造的艺术”<sup>①</sup>，对声信号的有效控制就成了完成这一“任务”的一项基本要求了。将声信号转变为电信号无疑为满足这一要求提供了更加广阔的前景。电影中的声音如此，其他艺术声响何尝不是如此！尽管对声音的“驾驭”可以采用直接控制和间接控制两种基本方式，但进行任何自然声源的录音以及其后的放声，作为电声换能基本器件的传声器和扬声器却是必不可少的。没有传声器，一切自然声源的录音都将无法进行；没有扬声器，则记录在载体上的声信号就将无法为人们所聆听。可见，传声器和扬声器是录、放系统中必不可少的基本器件，它们的特性及放置方式直接影响着录、放声的效果。

### 第二节 电声换能器的一般原理

所谓换能器是指能够将一种形式的能量转换为另一种形式能量的器件。例如，能够实现光电能量之间转换的器件（如光电管）可称为光电换能器。电声换能器是一种能将电能转换为声能（如扬声器）或将声能转换为电能（如传声器）的一类装置。广义的电声换能器应用的频率范围很广，它包括了次声、超声及水声换能器。在声频范围内使用的电声换能器，大致可以分为通信用的、专业录放用的和测量用的三种基本类型。它们的基本要求是电信号与声信号之间的转换不应产生非线性失真，并以能满足这一基本要求的程度作为其重要的质量标志。因此，这类换能器均要求在相同的频率下实现其能量之间的转换。由于声振动也是一种机械振动，因此，在电声换能过程中，为了满足上述基本要求，换能器两端的电信号与机械振动信号随时间的变化就必须由线性方程联系起来，所以这类换能器又称为线性换能器。

已经知道，在电振荡理论中，有三种基本电元件：电容、电感和电阻。因为在消耗性元件上出现的电变化不可能产生机械力，所以不可能通过电阻元件实现机电转换；在储能元件上出现的电变化则将产生机械力，这就为机电转换提供了必要条件。由此可见，通过电容型或电感型元件进

<sup>①</sup> 贝拉·巴拉兹曾经说过：“对电影来说，声音还不是一个收获，而是一个任务，这个任务一旦完成，便将受益匪浅。但这要等到电影里的声音有一天能像电影里的画面那样成为一种可以驾驭自如的手段，等到声带有一天能像画面那样从一种复制的技术变成一种创造的艺术。”见贝拉·巴拉兹，《电影美学》（中译本），第180页，中国电影出版社（1986）。

行机电转换是可能的。这样就可以将电声换能器按其机电换能原理分为电感型换能器和电容型换能器两大类。具体地说，电感型换能器的基本特征是以电感型元件作为储能元件。尽管它们在实现机电转换的物理效应上可以各不相同，但在储能元件这一点上却是相同的。目前常用的换能形式有电动式与电磁式两种；电容型换能器实现机电换能的物理效应也可以各不相同，但储能的元件都是电容，如静电式（电容式、驻极体式）、压电式、静电式、压电式等都是属于这一类。

上述各种类型的换能器都是可逆的。也就是说，它们既可以作为声接收器（传声器），也可以用作声辐射器（扬声器或耳机）。此外，还有碳粒式、离子式和气流调制式等，它们都是不可逆的。碳粒式换能器虽然可以把声能转变为电能，但它不是一个电声能量的转换过程，而仅仅是电流受电压的调制而已。从严格意义上讲，它不能算是电声换能器。电话中用的碳粒送话器就是这样，它是利用碳粒之间的电阻变化而把声信号变化为电信号的。电离式和气流调节式的换能器只能产生声能，而不能将声能变为电能。前者如离子扬声器，它是一种在特殊设计的装置中使空气发生电离，由电信号（声频信号）调制高频振荡（约 27 兆赫）产生电晕放电，电晕的强度随声频信号变化，结果使空气振荡，从而使装置中的号筒喉部产生声波，再由号筒耦合辐射到空气中去。这种扬声器由于没有振膜，高频特性和瞬态特性好，失真小，但结构复杂；后者如气流调制扬声器。这种扬声器又称气动扬声器，它是利用压缩空气作能源，用声频电信号控制阀门，调制气流而辐射能量。其辐射功率可达数千瓦。气声效率约为 15%。

一般地说，电声换能器可以近似地看作由集总元件组成的简单振动系统。对于集总参数系统，采用类比方法进行分析是方便的。它对于了解和控制电声换能器的性能是十分重要的。



## 第二章 电—力—声类比<sup>①</sup>

### 第一节 类比的意義

类比是表明两个或多个科学范畴的方程和结构的一贯相似关系，并确定在这些方程和结构中起作用的量和元件，以便在这些不同科学范畴间传递数学分析步骤和性能的方法。这里要注意以下几个问题：

1. 类比是一种处理问题的方法，是在“不同科学范畴之间传递数学分析步骤和性能的方法”；

2. 这种方法是利用相似原理进行的。在类比时是在两个或两个以上不同的科学范畴中运用“相似原理”的。例如，本节中将在电学、力学和声学这三个不同科学范畴间进行类比；

3. 在进行类比时只考虑不同科学范畴中的方程和结构的相似性，而与它们的物理特性无关；

4. 为了在不同科学范畴中传递数学分析步骤和性能，必须确定在这些方程和结构中起作用的量和元件，从而得出可进行相互类比的量和元件。

举例来说，在机械振动学中，质点的（强迫）振动可用下列方程表示：

$$M_M \frac{d^2 x}{dt^2} + R_M \frac{dx}{dt} + \frac{1}{C_M} x = F_0 \cos \omega t \quad (2.1.1)$$

回忆在交流电路中，单回路振荡电路也具有相似的数学方程：

$$L_e \frac{d^2 q}{dt^2} + R_e \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C_e} q = E_0 \cos \omega t \quad (2.1.2)$$

而且质点振动系统（结构）和单回路振荡电路（结构）也具有一贯的相似

<sup>①</sup> 本节的内容与《录音电声学》第二章相同，这是为了保持内容系统性的缘故。在教学中可以一处为主。

关系。因此，力学系统和电学系统之间可以进行类比。比较 (2.1.1) 式和 (2.1.2) 式不难确定它们之间起相似作用的量和元件为：

$$M_M - L_e; \quad R_M - R_e; \quad C_M - C_e; \quad x - q; \quad F - E。$$

在进行类比时，事实上常用的不是“ $x-q$ ”，而是  $dx/dt = v$  和  $dq/dt = I$ ，即采用的是“ $v-I$ ”之间的类比。显而易见，在声学上也有相似的形式和类比关系。

除了这种起相似作用的量和元件之间的类比外，最常见的一种类比是“形式类比”，即基于时间或空间过程全等的量的比较，而和它们的物理特性无关。我们以前多次提到的模型实验就是一种空间过程全等量之间的类比。本章介绍的是动力类比，即力学系统、声学系统与具有相同微分方程的电学（电振荡）系统之间进行的类比。通过这种类比，可以应用电路理论（电路及相应的定律）求解力学（振动）与声学问题，而不必求解微分方程。

必须再次强调指出，“类比”仅仅是处理问题的一种方法。作为一种方法除了必须考虑它是否简便和易于掌握等实用意义外，重要的还必须十分注意它们的适用性。毫无疑问，电磁振荡、机械振动和声振动各有其不同的研究对象，分属于不同的科学范畴，必然有其各自的特殊性，因此，不能盲目地运用类比方法。

本章所介绍的类比方法是基于电（磁）学知识在实际生产、生活中为更多的人所掌握。换句话说，借助于电磁学理论来求解力学和声学问题比运用这些理论本身要简便得多，容易掌握得多。应当看到，尽管机械振动学和声学在其发展过程中曾对数学作出了巨大的贡献，但近几十年来，电磁学在实际生产、生活中的应用更加广泛，对电磁学理论的掌握也就更加普遍，因此，这就为借用电路理论（在这里指的是运用求解电路问题的方法）来解决力学和声学问题提供了必要的条件。特别是在研究发声器（如扬声器）和接收器（如传声器）等一类问题时往往同时存在着电、力、声的问题，在这种情况下，采用这种类比方法就显得更加必要。

具体地说，在无线电原理中通常运用电路图的元件及元件与元件之间的联系研究电磁运动规律。通过电路分析常常可以不必求解微分方程，而能直接了解系统的工作情况和特点，或者通过形象的电路图再来建立微分方程求解，从而使问题分析得更透彻，概念也更加明确。采用类比方法就是将力学问题或声学问题通过类比线路图（相当于电路图）进行



分析而不必求解微分方程。这就为问题的研究分析提供了一种容易掌握的方法。

电路图最容易用于集总参数元件的系统。因为集总参数系统唯一的变量是时间，而分布参数系统则不然。在一般情况下，分布参数系统的变量多达四个——三个空间变量和一个时间变量。这种情况在电路图中是容易想像的。因此，对于分布参数系统主要还是应用数学处理上的类比方法。本章将集中讨论集总参数系统的类比方法。

### 第二节 电路元件

在无线电原理的等效电路中，在相应的方程和结构中起作用的元件和量有：

1. 基本元件有：电阻  $R_e$ 、电感  $L_e$ 、电容  $C_e$  及变量（压）器。
2. 基本的电源有：恒压源（定压电源）和恒流源（定流电源）。
3. 相属量有：

- (1) 元件的数值（欧姆、亨利或法拉）；
- (2) 电压：电路两端的电位降，（伏特）；
- (3) 电流：流过电路元件的量，（安培）。

它们的符号及简单关系如表 2.1 所示。

- (4) 电路的组成及相互关系：

在一般情况下，电路中往往不止一个元件，而是电阻  $R_e$ ，电容  $C_e$ ，电感  $L_e$  及变量器等的复杂组合。在电路中，任意两点之间各种元件的串联或并联组合的结果，可以用电阻抗  $Z_e$  表示：

$$Z_e = R_e + X_e \quad (2.2.1)$$

注意，在一般情况下， $Z_e$  为一复数，其实数部分  $R_e$  为电阻，虚数部分  $X_e$  为电抗。如果以  $E^{\text{①}}$  表示  $Z_e$  两端的电位降（电压差）， $I$  表示流过  $Z_e$  的电流，则

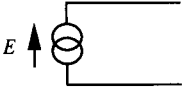
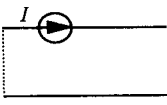
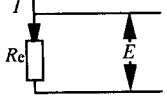
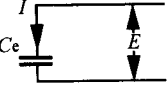

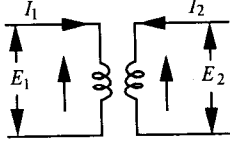
$$Z_e = E/I = R_e + jX_e \quad (2.2.2)$$

它们都是复数比。

① 为避免与速度  $v$  混淆，此处以  $E$  表示电位降（即电压差）。



表 2.2.1 电路元件的符号及其简单关系

名 称	符 号	意 义	
		瞬 态	稳 态
定压电源 (恒压源)		定压电源 $E$ 与负载无关, 箭头表示电压源方向	
定流电源 (恒流源)		定流电源 $I$ 与负载无关, 箭头表示电流源的方向	
电 阻 性 元 件		$E = IR_e$	
电 容 性 元 件		$E = \frac{1}{C_e} \int Idt$	$E = \frac{1}{j\omega C_e}$
电 感 性 元 件		$E = L_e \frac{dI}{dt}$	$E = j\omega L_e I$
变 量 器 元 件		$E_2 = nE$ $I_1 = nI_2$ $E_2/I_2 = n^2 \cdot (E_1/I_1)$	

注: 表中  $n$  为次级线圈与初级线圈的匝数比。

应当强调指出的是,  $E$  和  $I$  的有效值的同相位的乘积便是功率。同时必须牢牢记住: 对于某一定符号相属的数学运算关系是不变的。例如, 元件是电感性的,  $E$  为元件两端的电压降, 则数学运算关系总是

$$E = L_e \frac{dI}{dt}$$

$$e = L_e \frac{dI}{dt} \quad (2.2.3)$$

现在首先以最简单的串联电路为例, 对电路的工作情况作一简单的分