高等学校教学用書

电子管在实验物理中的应用

上 册

A. M. 邦奇布魯耶維奇著

高等教育出版社

高 等 学 校 教 学 用 書

电子管在实驗物理中的应用

A. M. 邦奇布魯耶維奇著
廖 增 祺 等 譯

高 等 教 育 出 版 社

本書系根据苏联技术理論書籍出版社（Гостехиздат）出版的邦奇布魯耶維奇（А. М. Бонч-бруевич）著的"电子管在实驗物理中的应用"（Применение электронных ламп в экспериментальной физике）1956 年版譯出的。

原書共分六章，中譯本暫分上、下兩册出版，上册包括前三章。第一章介紹綫性电路中的电过程及电子管特性曲綫和参量，第二章講述放大器的基本原理，第三章專門介紹一些特殊的放大器。本書可作为物理系学生及实驗室工作者的一般参考書。

本册譯者是廖增祺、郭汝嵩、于靜怡。

电子管在实驗物理中的应用

上 册

А. М. 邦奇布魯耶維奇著
廖增祺等譯
高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺 7 号
（北京市書刊出版業營業許可証出字第 054 号）
京华印書局印刷 新华書店發行

統一書号 13010·517 開本 850×1168 1/32 印張 11 4/16
字數 285,000 印數 0001—4 000 定價（8）¥1.30
1958 年 12 月第 1 版 1958 年 12 月北京第 1 次印刷

再版序言

本书初版本脱稿于1949年初。这是第一本闡述实驗物理的一个新部門(即物理实驗室无綫电技术)的书籍。自从初版以来，四年之中，无綫电方法又有了新的发展，并且終于形成了实驗技术的一个独立部門。由于它能解决各式各样的問題，所以它的內容极其丰富。这四年之間，还出版了許多专門书籍，闡述无綫电方法在实驗物理各部門里的应用，并分析实驗室里用的各种設备的工作。因此，新版本对每一章多少都作了一些重要的修訂。

书名所包括的問題范圍很广。在这些問題中，只討論了与"电子管在实驗物理中的应用"有关的一些問題。这些問題的选择、书的方針和叙述风格是这样来决定的，就是这本书应該成为一般性的指导书籍；用以掌握电子管設备的基本工作原理。和初版本一样，本书是为物理系学生及实驗室工作者写的；不是为无綫电物理学者写的，因为他們在实际工作中常有机会遇到无綫电方法。本书注重的主要是探討构成电路的主要元件和組件，以及实驗物理用得到的一般設备。为了解决实驗物理学上的許多問題而采用的一些特殊电路，只大概地講一講，目的在于說明一下应用电子管的各种可能性。若要詳細分析这些电路，就会过份增加本书篇幅；这未必合理，因为这应該是专門书籍和評述性文献的內容。

謹向在再版的准备工作中，給了我很大帮助的提出批評和意見的全体同志們致以深深的感謝。

三版序言

三版本不同于再版本的，只是修正了許多不确切的和印錯的地方。B. И. 西洛果夫(Широков)在这个工作中給了我很大帮助，特向他致以眞摯的謝意。

目　　录

第一章　緒論

第二章　电訊号放大器

第三章 几种特殊的放大器

第一章　緒論

§1　簡单綫性电路中的电过程

1. 綫性电路　大多数情况下，如果外电源作用于电路的电动势波形[①]和数值已知，那末，分析电路中电过程后，应当知道某两点之間电压的波形和数值；或者，知道流經电路某一支路的电流波形和数值。外加电动势的两个作用点，称为电路的輸入端。

当分析复杂的电路中的电过程时，要忽略电路的某些元件，并理想化另一些电路元件以簡化电路。当然，应当使电路簡化到这种程度，使得分析电路以后所得的結果实际上仍然适用于实在的电路。

电路由三个元件构成：理想的电阻器、电容器和自感綫圈；其实这一概念就是簡化电路分析的一种理想化。对于这三个元件分别有以下三个关系式成立：

$$\frac{u_R}{i_R}=\text{const}=R, \tag{1.1}$$

$$\frac{u_L}{\dfrac{di_L}{dt}}=\text{const}=L, \tag{1.2}$$

$$\frac{u_C}{\int i_C dt}=\text{const}=\frac{1}{C}. \tag{1.3}$$

R, L 及 C 称为純电阻、电感和电容，都是各該元件的参量。

电路中的实际元件可以用几个理想化元件的等效組合来代替。这譬如，具有損耗的实际电容器可以用电容和純电阻的組合来代表。同

---

① 以后凡是說到电路中电过程的“波形”时，我們都指的是电压或电流与时間的关系曲綫。

样，具有电阻和匝間电容的实际自感綫圈可以用由电感、純电阻和电容构成的电路来代表。称电容器为电容，自感綫圈为电感，以及称电阻器为純电阻①时表示已經用理想化元件代替了实际元件了。我們还要加进一句，虽然是同一实际元件或者是同一部分电路，却能表現出电容、电感、电阻或者它們的組合所具有的特性，这要看作用于电路的电压的頻率如何而定。

通常把电阻、电感和电容看作是綫性元件。一般地說，施于一个元件上的电压同流过这一元件的电流之間的关系若能写作綫性（代数或者微分）方程，这元件即称为綫性元件。关系式(1.1)、(1.2)和(1.3)符合这个条件。

严格說来，所有的元件都是非綫性的；但是在很多情况下偏离直綫性的程度很小，以致不能区别实际元件与理想化綫性元件。一般說来，只当电流和电压的数值在一定范圍之內时在元件为綫性元件的这一假定下进行电路分析的結果才是正确的。

的确，譬如，只当流过电阻的电流小到所产生的热不使电阻数值显著变化时，才能把这电阻看作是綫性的元件。对于自感綫圈和电容器也有类似的情况。

由綫性元件构成的电路称为綫性电路，若电路的R, L和C在出現所討論的电过程时保持不变，則說电路具有常数参量。

組成电路的元件可以集中在电路上完全确定的若干部分上，也可以是沿整个电路分布着的。在后一种情况下，电路的任何一支都不能看作只是某一种元件。第一种电路称为具有集总参量的电路，第二种电路称为具有分布参量的电路。一般說来，任何电路都具有分布参量。这些参量的实际数值由电路形式及作用电压的頻率决定(参看本章§4)。

关系式(1,1)、(1,2)及(1,3)加上基尔霍夫定理即能列出把作用于

① 为方便起見，以后 Активное сопротивление（純电阻）一詞一般地簡譯为“电阻”。必要时譯为“有功电阻”或仍譯为“純电阻”——譯注。

电路的瞬时电压，与流过电路的瞬时电流联系起来的方程。譬如，若在 R, L 及 C 的串联电路輸入端加以电动势 u_1（图1·1），則根据基尔霍夫定理可以写出：

$$iR+L\frac{di}{dt}+\frac{1}{C}\int idt=u_1 \tag{1.4}$$

或者

$$\frac{d^2i}{dt^2}+\frac{R}{L}\frac{di}{dt}+\frac{1}{LC}i=\frac{1}{L}\frac{du_1}{dt}. \tag{1.5}$$

完全同样地可以对任何其他綫性电路列出方程。方程积分之后，可以得到流經电路某一元件的瞬时电流的表达式及这元件两端的瞬时电压的表达式。

应当指出，好几个电动势共同作用于綫性电路时所引起的电过程，可以看作是各个电动势分别作用时的电过程的迭加。这是迭加原理的一个表現，迭加原理适用于綫性电路的原因是由于綫性电路中的过程是用綫性方程描述的。

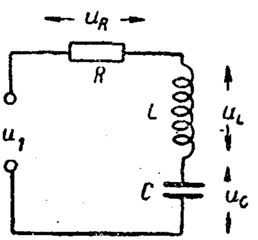

图 1·1 电感，电阻及电容的串联电路。

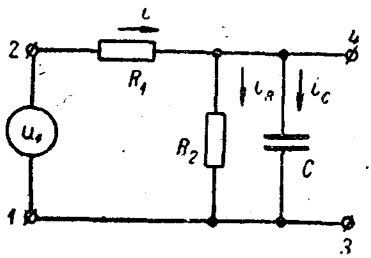

图 1·2 包含两个电阻的簡单 RC 电路。

利用迭加原理可以分析当电路受到复杂电作用时的結果；先把复杂电作用分解为若干簡单的电作用，找出这些簡单电作用的解，最后，把这样求出来的解加起来。

为了簡化复杂电路中电过程的分析，应当尽量設法把电路換作形式比較簡单的电路。

为此，第一，忽略一些次要的电路元件。譬如，电路的輸入电压 u_1（图1·2）如果变化得很慢，使得 $C\frac{du}{dt}\ll\frac{u}{R_2}$，即使得 $i_C\ll i_R$，則为了决定流过电阻 R_1 的电流（电流 i），可以从电路中把电容 C 除去，然后研究两个电阻 R_1，R_2 的串联电路。反之，如果有不等式 $C\frac{du}{dt}\gg\frac{u}{R_2}$ 成立，則研究电阻 R_1 及电容 C 的电路中电过程后就已得出流过电阻 R_1 的电流。因此，某个元件是不是次要，取决于参量的数値、电路的作用、电压的波形（或是电流波形），以及最后，取决于計算的精确度。

第二，为了簡化所討論的电路，可以把串联或并联起来的若干同类元件，利用电导或电阻的相加規則用一个同类元件代换。

最后，当分析电路时，把一些元件的組合，用另外一些在描述电过程时較为方便的組合代换常常是必須而且可能的。这时必須使原电路与代换电路相互等效。决定某一电路是否与另一电路等效，要看研究的是电路的什么特性而定，譬如，当电路輸入端作用有已知电动势 u_1 时要研究电路的輸出电压 u_2，那么，若有相同的輸入电动势加在某些电路上时得到相同的輸出电压，則这些电路就称为等效电路。

許多复杂的电路可以用某些电阻，电感和电容的串联电路等效替代。这些等效参量的数値可以在比較以下两个微分方程的系数时得到：一个方程是原电路輸出元件上的电流方程，另一个是电感、电容、电阻串联电路的方程。为了說明如何进行比較，我們来看图 1·3 a 的电路。从它的基尔霍夫方程中消去变数 i_C 就得到：

$$C_2R_1R_2\frac{di_R}{dt}+\left(R_1+R_2\frac{C_2}{C_1}+R_2\right)i_R+\frac{1}{C_1}\int i_R dt=u_1.$$

比較这个方程与方程（1.4）后就知道，通过图 1·3 a 中电阻 R_2 上的电流，同由电感 $L_{эк}=R_1R_2C_2$，电容 $C_{эк}=C_1$，电阻 $R_{эк}=R_1+R_2\frac{C_2}{C_1}+$ $+R_2$ 串联而成的电路中的电流是相同的（图 1·3б）。

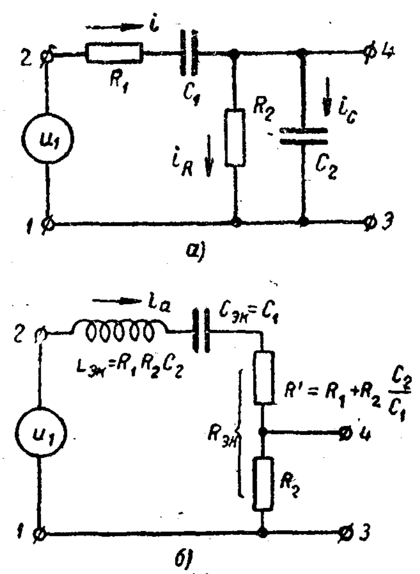

图 1·3 (a) 复杂 RC 电路。
(б) 等效的 RLC 电路。

显然，在等效电路中电阻 $r=R_2$ 上的电压等于原电路的輸出电压（如果它們的輸入电压相同的話）。因为 $L_{эк}$, $C_{эк}$ 及 $R_{эк}$ 等参量不是电压 u_1 的函数，所以对于任何波形的輸入訊号来說，原电路都由图 1·3 б 电路等效替代了。

有时不止可以有一个等效电路来代替所研究的电路，而可以有两个等效电路，譬如說，不难証实，图 1·2 的电路既与图 1·4 a 的电路等效，又与图 1·4 б 的电路等效。其中图1·4a与原电路等效时，輸入电压为 $u_{эк}=\dfrac{R_2}{R_1+R_2}u_1$。当

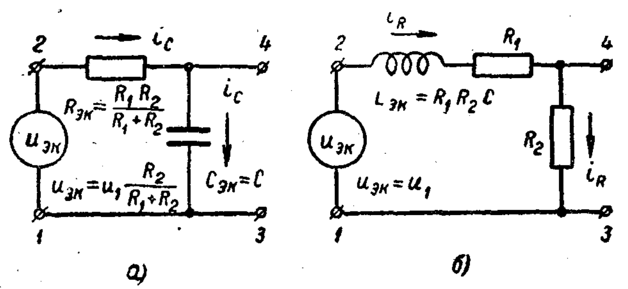

图 1·4 图 1·2电路的两个等效电路。

原电路有好几个等效电路时，可以选擇根据某种原因較为方便的一个等效电路来加以分析。

利用等效电路之所以方便，是因为复杂的电路化成了若干簡单的特性又已經很清楚了的电路。

描写电路的微分方程級数高于二級时，不可能用 $R_{эк}$，$L_{эк}$ 和 $C_{эк}$ 的串联电路来等效代换。

上面討論了如何求訊号通过电路时的等效电路的問題。有些时候訊号源流入电路的电流值很重要，这时某一电路是否是等效电路，由其輸入阻抗的等式来决定。輸入阻抗是輸入电压与由訊号发生器流入电路的电流的比，因此輸入阻抗也有平均值、有效值及瞬时值等三种。

如果发生器的电压波形已知，这三个数值就可以算出来，对电路輸入的电流来説的等效电路就可以找到了。

任何电压源都是用它的电动势 u 和它本身的（內）电阻 $R_г$ 来代表的，可以把它看作是由电阻 $R_г$ 和有电动势都沒有內阻的发生器串联在一起而成的。把电阻 $R_г$ 算入所研究的电路中之后，就可以認为在輸入端接有一个沒有內阻的发生器，这时发生器的电压等于它的电动势，而与輸出的电流无关。

有时为了簡化复杂的电路，利用等效发生器的概念。假定一个电动势为 u，內阻为 $R_г$ 的发生器并接有一个电阻 R，R 又并接有某个元件組合 M(图 1·5 a)。这时有电流 i_M 流过組合 M。

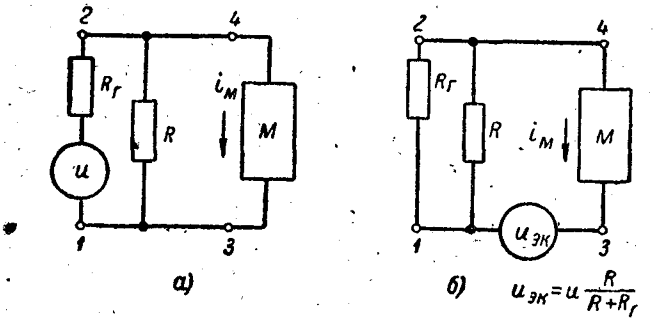

图 1·5 发生器的等效代换。

① 在这里及以后我們都把作用于电路輸入端的电压称为“訊号”。这个电压的电源我們称为訊号发生器。

列出电路的基尔霍夫方程后可以証明，如果在元件組合M与电阻R之間引入电动势为$u_{эк}=\frac{R}{R+R_г}u$的发生器，去掉发生器u，保留它的內阻(图1·5 б)，那么电流i_M将保持不变。

附带指出，利用等效发生器的概念可以馬上把图1·2的电路换为如图1·4 a所示的等效电路。

2. 正弦电动势作用下綫性电路中的电过程 作用电压有变化时电路中各个部分的电流和电压也将有变化。电路中电状态是不会突然改变的，变化总是发生在某个时間間隔以內。因此电状态有穩态及瞬态之分。

如果所有的电压和电流的变化都与外电源作用于电路的电压变化服从同一規律，或仅有常数值的差别，那么就認为綫性电路中的电过程是稳定过程。若情况相反，則認为电路处于(不穩定)瞬时状态中。

为了求出有正弦形作用电压时流过綫性电路的电流，需要积分自由項为$A\cos(\omega t+\varphi)$的非齐次綫性方程。大家知道，这样的方程的积分可以由非齐次方程的特殊积分，与所对应的齐次方程的一般积分相加而求得。非齐次方程的一个特殊积分形式为$A'\cos(\omega t+\varphi')$，它描写电路中的穩定过程，非齐次方程的一般积分描写不穩定过程。若A和φ的值已知，找特殊积分归根到底就是确定A'和φ'的值。这个計算沒有原則上的困难，但是是很麻煩的。引入复数之后大大地簡化了所有这些計算。所以我們将作用电压$u=U_m\cos(\omega t+\varphi)$改写为$u^*=U_m e^{j(\omega t+\varphi)}=\dot{U}_m e^{j\omega t}$。稳定状态下流經电路的电流表达式就是$i^*=I_m e^{j(\omega t+\varphi')}=\dot{I}_m e^{j\omega t}$。同此，在被积方程中微商$\frac{d^n i^*}{dt^n}$用$\dot{I}_m(j\omega)^n e^{j\omega t}$代换。这时微分方程就变为代数方程了。左右都消去$e^{j\omega t}$并对$i^*$求解方程，就得到了电流$i^*$的复数表达式。这个表达式的实部就是右方为正弦函数时所求的积分。这个方法大家都很熟悉，不用詳細叙述。

若要写出正弦电压作用之下电路中穩定电流瞬时值的表达式，只

須找到电流复数振幅 ($\dot{I}_m = I_m e^{j\varphi'}$) 的模量和幅角郎可。討論了最普遍的情况之后可以証实，无論綫性电路的結构是怎样的，电路一臂中流过的电流的复数振幅，与这一臂两端所作用着的电压复数振幅之間有以下的关系式：

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{Z}}.$$

$\dot{Z}$ 的意义是电路的阻抗。因为在一般情况之下电路中电流的相角与作用电压的相角不同，所以 $\dot{Z}$ 应当是复数，称为电路的复数的阻抗。把 $\dot{Z}$ 写作 $\dot{Z} = Ze^{j\Psi}$ 的形式，改写上一个表达式为：

$$\dot{I}_m = \frac{U_m}{Z} e^{j(\varphi - \Psi)}.$$

于是，若电路中作用有正弦形电压 $u = U_m \cos(\omega t + \varphi)$，則可以把电路的稳定电流瞬时值写为：

$$i = \frac{U_m}{Z} \cos(\omega t + \varphi - \Psi).$$

由这些簡单的討論可以看出，为了写出稳定电流到表达式，只須找出电路的复数阻抗就行了。为此須要知道电路元件的复数阻抗值。現在再来研究关系式 (1)、(2)、(3)；并假定在每一元件两端作用有电压 $u^* = \dot{U}_m e^{j\omega t}$，并且这时流过的电流为 $i^* = \dot{I}_m e^{j\omega t}$，我們得到：对于电阻 $\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{R}$，对于电感 $\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{j\omega L}$，最后，对于电容 $\dot{I}_m = j\omega C \dot{U}_m$。于是：

$$\left.\begin{aligned} \dot{Z}_R &= R, \\ \dot{Z}_L &= j\omega L, \\ \dot{Z}_C &= -\frac{j}{\omega C}. \end{aligned}\right\} \qquad (1.6)$$

由这些表达式可以看出 $\Psi_R = 0$, $\Psi_L = \frac{\pi}{2}$ 和 $\Psi_C = -\frac{\pi}{2}$.

于是，流过电阻的电流相角与作用在它两端的电压相角相同。流过电感的电流在相角上落后于作用在它两端的电压一个 $\frac{\pi}{2}$ 角，流过电

容的电流在相角上超前于作用在它两端的正弦式电压一个$\frac{\pi}{2}$角。由此可見，电流通过电感和电容时不释放能量。这一类元件常常叫作电抗。

其次，当正弦式电压频率增大时，稳定状态下的容抗模量$Z_C=\frac{1}{\omega C}$减小，而感抗模量$Z_L=\omega L$增大。

因为現在談到的是綫性电路，所以对于复数振幅說来基尔霍夫定律仍然是正确的。如果电路是由若干元件串联成的，那么复数阻抗就等于这些元件的复数阻抗之和。

同样，元件的并联电路的复数导納等于这些元件复数导納之和。

譬如，对于由电阻R和电感L串联而成的电路，有

$$\dot{Z}=R+j\omega L.$$

因而，$Z=\sqrt{R^2+\omega^2L^2}$及$\Psi=\operatorname{arctg}\frac{\omega L}{R}$. 因此如果这个电路輸入电压$u=U_m\cos\omega t$，則在稳定状态之下其中有电流:

$$i=I_m\cos\left(\omega t-\operatorname{arctg}\frac{\omega L}{R}\right),$$

这里$I_m=\frac{U_m}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}$。图1·6表示了作用电压频率同$I_m$, Ψ和Z的相互关系。

对于串联的电阻电容我們有

$$\dot{Z}=R-j\frac{1}{\omega C},$$

于是

$$Z=\sqrt{R^2+\frac{1}{\omega^2C^2}}$$

及 $\Psi=-\operatorname{arc\,tg}\frac{1}{\omega CR}$.

图1·7表示了这种情况下I_m, Ψ及Z与频率的相互关系。

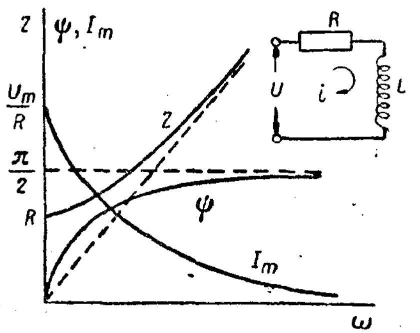

图1·6 电阻电感串联电路中I_m, Ψ及Z与频率的关系曲綫。

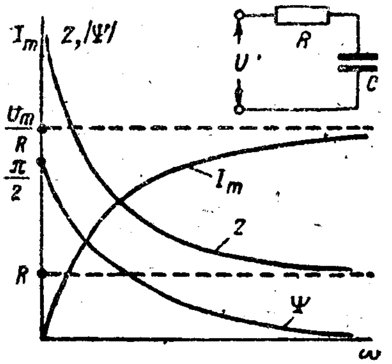

图 1·7 电阻电容串联电路中 I_m, Ψ 及 Z 与频率的关系曲綫。

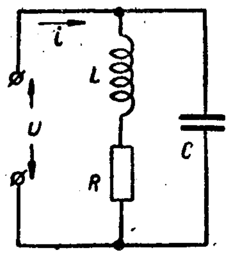

图 1·8 計算 RLC 电路的复数阻抗的电路。

要找几个支路的并联电路的复数阻抗时，只須把它們的导納加起来就行了，譬如，就图 1·8 的电路来說，我們經过一些簡单的变换之后就可得到：

$$\dot{Z}=\frac{R+j\omega L}{(1-\omega^2 LC)+j\omega RC},$$

以后当研究訊号通过各种装置的时候，我們将經常利用复数阻抗計算法来計算。应該强調指出，复数阻抗的概念是属于电路的稳定过程的，严格說来，只有当輸入訊号作用了无限长时間之后才能利用它。

为了討論电路的不稳定过程，应当找出有关于电压电流瞬时值的基尔霍夫方程的一般积分。譬如，若有正弦形电压作用于电感电阻的串联电路上，則

$$\frac{di}{dt}+\frac{R}{L}i=\frac{u}{L}=\frac{U_m}{L}\cos(\omega t+\varphi).$$

找出这个方程的一般积分，并由条件 $t=0$ 时 $i=0$ 定积分常数（亦即假定电动势 u 当 $t=0$ 时加入电路），我們得到：

$$i=i'+i''=I_m\cos(\omega t+\varphi-\Psi)-I_m\cos(\varphi-\Psi)e^{-\frac{R}{L}t},$$

这里