核物理电子仪器

上册

A. A. 薩宁 著

高等教育出版社

核物理电子仪器

上 册

A. A. 薩宁 著
清华大学工程物理系譯

高等教育出版社

本書是苏联專家薩宁(A. A. Санин)同志1957—1958年为我国高等学校教师及科學工作者講課时編著的講义。書中总結了近几年来核物理电子仪器的新成就，介紹了許多实用的电子学綫路，并加以分析、比較，此外，还对某些綫路进行了理論計算。全書分上、下两册，本書为上册。

本書可作为工程物理系、原子能系、物理系的教学参考書。

核 物 理 电 子 仪 器

上 册

A. A. 薩 宁 著

清 华 大 学 工 程 物 理 系 譯

高等教育出版社出版北京宣武門內承恩寺7号

(北京市書刊出版业營业許可証出字第054号)

京华印書局印裝　新华書店發行

統一書号13010·646　开本850×1168 1/32　印張10　插頁7

字數233,000　印數0001—2,200　定价(6)¥1.10

1959年10月第1版　1959年10月北京第1次印刷

譯 序

本書是苏联專家薩宁（A. A. Санин）同志 1957—1958 年在我国工作期間为教师及科学工作者講課而写的講义。作者在 1949 年曾出版过一本这方面的書籍（我国已有譯本“研究輻射的电子学方法”，忻賢杰、夏培肃等譯，科学出版社 1958 年出版）。这本講义在內容上与上書有很大不同。作者总結了近几年来在苏联及其他国家核物理电子仪器的新成就，介紹了許多实用的綫路，并且进行了分析和比較，指出它們的优缺点，書中还对一些綫路进行了理論計算。

随着我国工农业的大跃进，和平利用原子能事业也有了很大的發展，无論是在科学研究方面，或是在推广放射性同位素应用方面，电子学仪器和技术已日益成为不可缺少的工具。这本講义的出版将会对我国和平利用原子能的研究和干部培养方面起很大的作用。在这方面，我們应該衷心地感謝薩宁專家。

講义的前半部分介紹了电子学綫路的基础、綫性元件、电子管和电压脉冲放大器的基础；然后由綫路單元（基本放大节）开始講述了現代的不过載反饋綫性放大器。对綫性放大器的要求、噪声、放大器参量与信号振幅、信号噪声比及分辨时間的关系作了綜合論述。講义里介紹了許多种直流和慢变化电压放大器、弱电流放大器。專家用了很大的篇幅介紹了用于各种电子綫路和輻射探測器的稳压电源，并介紹了探測器的猝灭綫路。最后講义里很系統地講述了各种符合綫路，对綫路进行了精辟的分析。

講义的后半部分專家还沒有全部完成，內容将包括进位綫路、計数率計、脉冲振幅分析器等。

本書由清华大学工程物理系翻譯。北京大学原子能系和清华大学工程物理系共同校对。由于时間倉促及譯者学識所限，錯誤难免，希望讀者指正。賜教請寄北京宣武門內承恩寺7号高等教育出版社編輯部。

譯者

目　录

譯　序 ………………………………………………………………………v

第一章　綫路的綫性元件 ……………………………………………………1

§1. 正弦交变电流……………………………………………………………1

§2. 任意形状的脉冲經过四端網絡…………………………………………5

§3. 分压器 …………………………………………………………………17

§4. 用电感形成脉冲 ………………………………………………………19

§5. 包含电感、电容和电阻的电路…………………………………………20

第二章　电子器件……………………………………………………………22

§1. 二極管及二極整流管 …………………………………………………22

§2. 三極管、四極管和五極管………………………………………………26

第三章　电压脉冲放大器……………………………………………………38

§1. 电阻-电容耦合放大器…………………………………………………45

§2. 多級放大器 ……………………………………………………………51

§3. 多級放大器輸出脉冲的波形 …………………………………………54

第四章　脉冲畸变的补偿……………………………………………………57

§1. 脉冲平坦部分畸变的补偿 ……………………………………………57

§2. 脉冲上升沿的补偿 ……………………………………………………61

第五章　反饋放大器及阴極負載級 ………………………………………66

§1. 有反饋的电压脉冲放大器 ……………………………………………66

§2. 單級放大器中的負反饋…………………………………………………72

§3. 阴極負載級 ……………………………………………………………78

§4. 阴極負載級中引起的脉冲畸变 ………………………………………84

§5. 白氏阴極輸出級 ………………………………………………………89

第六章　基本放大节 ………………………………………………………93

§1. 差分放大器 ……………………………………………………………93

§2. 有反饋的双級放大节 …………………………………………………95

§3. 有反饋的三級放大节…………………………………………………101

§4. 有正反饋及負反饋电路的三級放大节………………………………109

§5. 具有差分放大器的双級及三級放大节………………………………112

第七章 直綫性放大器……117
§1. 直綫性放大器……117
§2. 万用反饋綫性放大器……126
第八章 噪声……134
§1. 放大器輸入电路的噪声……135
§2. 散粒效应(紹特效应)……138
§3. 栅流噪声……141
§4. 閃变效应……144
第九章 放大器参量与信号振幅、信号噪声比及分辨时間的关系……147
§1. 放大器参量对输出信号最大振幅的影响……147
§2. 信号振幅对噪声水平的比值……149
§3. 放大器的参量对信号噪声比的影响……151
§4. 放大器参量对分辨时間的影响……154
§5. 輸出信号上升时間小的放大器……158
第十章 直流或慢变化电压的放大器……175
§1. 有气体稳压管的直流电压放大器……178
§2. 有补償漂移元件的直流电压放大器……180
§3. 直流电压轉換为交流电压的放大器……184
§4. 具有漂移补償裝置的直流和交流电压放大器……191
§5. 具有参量調制的直流或慢变化电压放大器……196
第十一章 电源……201
§1. 电源的基本特性……201
§2. 气体稳压管……208
§3. 电源的电子管稳压器綫路……211
§4. 輻射探測器的电源……224
第十二章 直流电流放大器……241
§1. 靜电計电子管……243
§2. 測量弱电流的方法……248
第十三章 輻射探測器的接入綫路……266
第十四章 符合及反符合綫路……276
§1. 符合綫路……276
§2. 反符合綫路……310

第一章 綫路的綫性元件

§1. 正弦交变电流

每一个电子仪器中都包含有有源元件和无源元件。通常把电流电源或电压电源了解为有源元件。电阻、电容器和电感綫圈等是无源元件。

在电阻中，發生由电能变为热能的單方向轉換。如果在电阻 R 上有电流 i 流过，則在电阻上的电压降

$$E_R = iR, \tag{1.1}$$

在这个关系中，R 的大小是不变的，它与电流 i、电压 E_R 以及通电流的时間无关。

另一个无源元件是电容器。电容器由两个导体构成，这两个导体用电介質隔开，其間的距离比导体的尺寸小得多。在电容器充电时，两个导体間形成电場，卽积蓄了电能。电荷 q 的大小和电容器上的电压 E_C 間有下述直綫关系:

$$q = CE_C$$

或

$$E_C = \frac{1}{C}\int i_C dt. \tag{1.2}$$

比例系数 C 称为电容器的电容。理想的电容器的电容是不变的，卽与充电电流 i_C、加在电容器上的电压 E_C 以及电容器充电的时間无关。电場集中在电容器內，所以电容器的电容与外界导体的位置无关。

电感綫圈 L 是儲存磁能的綫路元件。当在綫圈通以电流时，在綫圈中形成的自感电动势 E_L 与电流对时間的导数成正比，卽

$$E_L = -L\frac{di_L}{dt}. \tag{1.3}$$

比例系数 L 称为电感綫圈的自感系数，它与电流 i_L、自感电动势 E_L 以及通电流的时間无关。

实际上，理想的无源元件是沒有的。例如，任何电阻在有电流流过时都会發热，因此，严格地說，电阻的大小在这个时間內不是不变的，此外，电阻自身有电容和电感；实际的电感綫圈有电阻和分布电容；电容器則有一定的漏电阻和自身电感。

在分析某些电路时，必須考虑到理想元件和实际元件的不同。在这种情况下，用几个理想元件的組合来代替实际元件。

对于由有源元件和无源元件組成的电路，可以用克希荷夫的两个著名的定律。克希荷夫定律是：

1）对于电路中的任何結点，在任何瞬时流入和流出此結点的电流之和等于零，即

$$\sum_{K=1}^{n} i_K(t)=0. \tag{1.4}$$

2）对于任何封閉迴路，在任何瞬时电压降之和等于零，即

$$\sum_{K=1}^{m} E_K(t)=0. \tag{1.5}$$

在这些定律的基础上，各种电路都可以列出积分-微分方程。对于由理想元件所組成的电路来說，所列出的方程是綫性方程，也就是一次方程（可以是代数方程、微分方程或积分方程）。上述的每一个元件（R、L 或 C），只有变数变化是在一定的范圍之內的情况下才是綫性的。

在許多电子仪器中也使用非綫性元件，对于非綫性元件来說，公式（1.1）、（1.2）、（1.3）是不适用的。非綫性元件有很多，如电子管、晶体二極管和三極管、热敏电阻、鎮流器等都是。

对于某些元件，由綫性到非綫性的过渡是跳跃的。在大多数

情况下，对带有非綫性元件的系統的工作过程不能进行很簡單和很完全的数学研究。但是，为了解决某些問題，可以把物理量的变化限制在一定区間内，并用綫性元件代替非綫性元件。当然，这样的簡化不是在任何情况下都可以的。

对只包含綫性元件的系統的工作过程，可以进行很完全和很簡單的分析。当正弦交流电压加在綫性系統上时，只有其相位和振幅發生变化，而波形不变。为了决定輸出电压的相位和振幅，可以使用建立在复数基础上的符号法。这种方法在"电工基础"課程的書中有詳細的討論。下面我們列举符号法的一些基本原理。

对于交流电流，电容和电感都有一定的阻抗。对于直流电流来說，理想的电容的阻抗为无穷大；而理想的电感的阻抗为零。这个阻抗通常称为电抗。当交流电流通过电抗时，电压的相位与电流的相位是不相符合的：对于电容而言，在相位上电流比电压超前四分之一周期；对于电感而言，与此相反，在相位上电流比电压滞后四分之一周期。用公式(1.1)、(1.2)、(1.3)不难証明这些說法是正确的。实际上，如果在电容器上加电压

$$e_C = e_0 \sin \omega t,$$

则 $q = Ce_C = Ce_0 \sin \omega t$。对电容器充电的电流

$$i = \frac{dq}{dt} = e_0 C\omega \cdot \cos \omega t = e_0 C\omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

当在綫圈上加电压时，流过綫圈的电流 $i_L = i_0 \sin \omega t$。这电流产生自感电动势

$$e_L = -L\frac{di_L}{dt} = -i_0 L\omega \cos \omega t.$$

在綫圈上产生的自感电动势必須在任何时刻都一定与外加电压相等，而符号相反，即

$$e = -e_L = i_0 L\omega \cos \omega t = i_0 L\omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

由于交流电压与交流电流的相位不同，因此交流电所适用的欧姆定律不能写成和直流电所适用的欧姆定律一样。

在符号法中，容抗 $Z_C=\frac{1}{j\omega C}$，而感抗 $Z_L=j\omega L$，这里，$j=\sqrt{-1}$。假如电路由串联的电容和电感組成，那么电路的电抗

$$Z=Z_C+Z_L=\frac{1}{j\omega C}+j\omega L=j\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right).$$

如果元件是并联的，其阻抗各为 Z_1 和 Z_2，則对交流电而言，电路的阻抗

$$Z=\frac{Z_1Z_2}{Z_1+Z_2}.$$

对于交流电，欧姆定律可以写成：

$$E=ZI=|A+jB|I, \tag{1.6}$$

这里 E 是交流电压的振幅；Z 是对交流的阻抗；I 是交流电流的振幅。所以交流电压的振幅等于交流电流的振幅乘以阻抗的模数 $|Z|=\sqrt{A^2+B^2}$，而电压的相位可以由公式

$$\varphi=\operatorname{arc\,tg}\frac{B}{A}$$

求得。

在某些情况下，要求出当四端網絡的输入端加入正弦交流电压时，在輸出端的交流电压的振幅和位相。通常把由任意联接的 R、L 和 C 元件組成的、并具有四个端点的电路，称为四端網絡，在一对端点上接發生器，而在另一对端点上接負載。为了决定輸出电压的振幅和相位，必須預先找出电压傳輸系数 K。电压傳輸系数是个复数，$K=M+iN$。系数的模数 $|K|$ 表明四端網絡輸出端的电压的振幅对加在其輸入端的电压的振幅之比：

$$\left|\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}\right|=\sqrt{M^2+N^2}.$$

輸出电压的相位

$$\varphi=\operatorname{arc\,tg}\frac{N}{M}.$$

§2. 任意形狀的脉冲經过四端網絡

我們最感兴趣的是解决任意形状的脉冲通过四端網絡的問題。为了解决这个問題，我們使用运算法。我們只討論运算法的几个最重要的定理，这种运算法是建立在拉普拉斯函数变换的基础上的。

假如給出某函数 $f(t)$，若函数 $f(t)$是連續的，或者在任意有限区間$(0, T)$ 內当实变数 t 变化时只有有限数目的断点，則这个函数(称为原函数）可以轉換为复变数 $p=\delta+j\omega$ 的函数 $F(p)$:

$$F(p)=\int_{0}^{\infty} f(t)e^{-pt}dt.$$

函数 $F(p)$通常称为 $f(t)$ 的像函数。对于任何的 t 值，只要不等式

$$f(t)<Me^{\delta_0 t}$$

成立，就可以进行拉普拉斯积分。在此不等式中，M 和 δ_0 与变数 t 无关。上述的限制是充分条件，但不是必要条件。拉普拉斯积分式只有对于某一定类型的函数才是有意义的。拉普拉斯轉換可以写成以下的等式:

$$F(p)[=]f(t), \tag{1.7}$$

符号 [=] 表示 $F(p)$ 是原函数 $f(t)$ 的像函数。通常，借助公式(1.7) 可以将复杂的函数 $f(t)$ 轉換成較簡單的函数 $F(p)$，例如，把超越函数变成代数函数等等。必須指出，拉普拉斯轉換是單值的; 也就是說，对于某原函数 $f(t)$只对应有一个像函数 $F(p)$。

除了正向的拉普拉斯轉換外，还有反向的轉換，即知道了像函数 $F(p)$，可以找到原函数 $f(t)$。在实际上，很少是用莫理(Меллин)公式把 $F(p)$轉換成 $f(t)$的，莫理公式是:

$$f(t)=\frac{1}{2\pi j}\int_{C-j\infty}^{C+j\infty}e^{pt}F(p)dp. \tag{1.8}$$

通常都是由表中查到原函数 $f(t)$，这些表列在运算法的書和手册中①。在某些手册中，其解答是为用另外一种方式写成的运算方程式用的。当使用这种手册来求用拉普拉斯轉換写成的方程式的解时，函数 $F(p)$要事先乘以 p。

我們把單位阶跃函数

$$\begin{cases} f(t)=1, & \text{当 } t>0 \text{ 时} \\ f(t)=0, & \text{当 } t\leqslant 0 \text{ 时} \end{cases}$$

作为一个例子来进行研究，这个函数在运算法中很重要。它的像函数

$$F(p)=\int_0^{\infty}e^{-pt}dt=\frac{1}{p}. \tag{1.9}$$

下面我們叙述一下运算法的几个基本定理，用公式(1.7)不难証明这些定理。

定理 I 对函数 $f(t)$ 乘以常数，或乘以与 t 和 p 无关的变数 A，就等于給函数 $F(p)$乘以相同的数値 A；也就是說，如果

$$F(p)[=]f(t),$$

则

$$AF(p)[=]Af(t). \tag{1.10}$$

定理 II 如果

$$F(p)[=]f(t),$$

则

$$f'(t)[=]pF(p)-f(0),$$

这里的 $f(0)$是当 $t=0$ 时函数 $f(t)$的値。

这个定理确定了函数 $f(t)$ 的导数和其像函数的关系。

当 $f(0)=0$ 时，

① Гинкин，无綫电手册，苏联国立动力出版社，1948 年。

$$f'(t)[=]pF(p), \tag{1.11}$$

这就是說，当 $f(0)=0$ 时，給函数 $F(p)$ 乘以 p 就等于对函数 $f(t)$ 求导数。

定理 III 如果

$$F(p)[=]f(t),$$

則

$$\int_0^t f(t)dt[=]\frac{F(p)}{p}+\frac{f^{(-1)}(0)}{p},$$

这里，

$$f^{(-1)}(0)=\int_0^t f(t)dt,\ 当\ t=0\ 时.$$

这个定理确定了函数 $f(t)$ 的积分式与函数 $F(p)$ 的关系。

当 $f^{(-1)}(0)=0$ 时，

$$\int_0^t f(t)dt[=]\frac{F(p)}{p}, \tag{1.12}$$

卽如果 $t=0$ 时 $f^{(-1)}(t)=0$，則函数 $F(p)$ 除以 p 就等于对函数 $f(t)$ 进行积分。

这些定理可以推广到 n 次导数和 n 次积分，卽有

$$\frac{d^n f(t)}{dt^n}[=]p^n F(p). \tag{1.13}$$

当 $t=0$ 时， $f(0)=0, f^{(1)}(0)=0, f^{(n-1)}(0)=0.$

定理 IV 如果 $F(p)$ 是函数 $f(t)$ 的像函数，而常数 A 与 t 和 P 无关，則

$$f\left(\frac{t}{A}\right)[=]AF(Ap). \tag{1.14}$$

这个定理称为相似性定理，当必須改变时間的量程时，就要用到它。

定理 V 拉普拉斯轉換是綫性的，

如果 $f_1(t)[=]F_1(p)$ 及 $f_2(t)[=]F_2(p)$,

则 $$f_1(t)+f_2(t)[=]F_1(p)+F_2(p). \tag{1.15}$$

定理 VI 在实变数 t 中减去与 t 和 p 无关的数值 A, 就等于給函数 $F(p)$乘以数值 e^{-Ap}; 即如果

$$F(p)[=]f(t), \text{当 } t\leqslant 0 \text{ 时}, f(t)=0,$$

则 $$F(p)e^{-Ap}[=]\begin{cases}0, & \text{当 } t\leqslant A \text{ 时}\\ f(t-A). & \text{当 } t>A \text{ 时}\end{cases} \tag{1.16}$$

一些比較簡單的函数 $F(p)$和 $f(t)$的轉換,列在表 1 中。

在实际中最常碰到的脉冲是方形、三角形和梯形脉冲。

振幅为 E 的方形脉冲的解析式为:

表 1.

$F(p)$	$f(t)$ $t\geqslant 0$
$\frac{1}{p}$	$1(t)$
$\frac{1}{p+a}$	e^{-at}
$\frac{1}{(p+a)(p+b)}$	$\frac{e^{-at}-e^{-bt}}{b-a}$
$\frac{p+a}{(p+b)(p+c)}$	$\frac{(a-b)e^{-bt}-(a-c)e^{-ct}}{(c-b)}$
$\frac{p+a}{p(p+b)(p+c)}$	$\frac{a}{bc}+\frac{a-b}{b(b-c)}e^{-bt}+\frac{a-c}{c(c-b)}e^{-ct}$
$\frac{1}{p^2+a^2}$	$\frac{1}{a}\sin(at)$
$\frac{1}{p^2-a^2}$	$\frac{1}{a}\mathrm{sh}(at)$
$\frac{p}{p^2+a^2}$	$\frac{1}{a}\cos(at)$
$\frac{p}{p^2-a^2}$	$\frac{1}{a}\mathrm{ch}(at)$

$$f(t)=\begin{cases}E, & \text{当 } 0<t<\tau \text{ 时}\\ 0, & \text{当 } t<0,\ t>\tau \text{ 时}\end{cases}$$

寬度为 τ 的方形脉冲可以想像为两个在时間上相隔为 τ 的阶跃电压的和。为了得到阶跃电压函数的像函数，使用定理 VI。如果电压的跳跃是發生在 $t=\tau$的瞬間，

則
$$F_2(p)=\frac{1}{p}e^{-p\tau}.$$

使用定理 V，得到：

$$F(p)=F_1(p)-F_2(p)[=]f(t)=f_1(t)-f_2(t).$$

这样，方形脉冲函数的像函数

$$F(p)=\frac{1-e^{-p\tau}}{p}. \tag{1.17}$$

函数
$$f(t)=\begin{cases}Kt, & \text{当 } t<\tau \text{ 时}\\ 0, & \text{当 } t<0 \text{ 时}\\ K\tau & \text{当 } t>\tau \text{ 时}\end{cases}$$

的像函数为：

$$F(p)=\frac{1-e^{p-\tau}}{p^2}K. \tag{1.18}$$

为了决定四端網絡輸出端的脉冲波形，必須事先找出用符号法表示的电压傳輸系数 K。下面討論在所謂"空的"，即沒有能量貯存的四端網絡的輸出脉冲波形。我們把由电阻 R 及电容 C 組成的四端網絡作为一个例子加以討論。这个四端網絡的电压傳輸系数等于

$$K(j\omega)=\frac{Z_2}{Z_2+Z_1}=\frac{R}{R+\frac{1}{j\omega C}}.$$

用 p 代替变数 $j\omega$，就可由 $K(j\omega)$ 找出用运算法表示的电压傳輸系数。实际上，把拉普拉斯轉换应用到公式(1.1)、(1.2)、(1.3)，就得到：

$$E_R(p)=R\cdot I(p),$$

$$E_C(p)=\frac{1}{pC}I(p),$$

$$E_L(p)=pL\cdot I(p). \tag{1.19}$$

如果 $t=0$ 时，$q_C=0$, $I_L=0$, 則在最初一瞬間沒有能量貯存的条件下，这些关系是正确的。由这些关系可以看到：把轉換后的阻抗 $\left(R、\frac{1}{pC} 和 pL\right)$ 乘以电流函数的像函数，就得到了电压函数的像函数。这样，电工学上的定律在形式上对于轉換后的电流和电压函数来說也是正确的了。

我們使用运算法来討論电压脉冲通过在电子仪器中最常見的各种四端網絡的情形。对于所討論的例子，用符号法所表示的电压傳輸系数

$$K(p)=\frac{p\tau}{1+p\tau}, \tag{1.20}$$

这里 $\tau=RC$。当找到电压傳輸系数 $K(p)$后，就来确定函数 $f(t)$的像函数，为

$$F(p)=\int_0^\infty f(t)e^{-pt}dt,$$

这里$f(t)$是加到四端網絡輸入端的电压脉冲的解析式。如果在由电容C及电阻R組成的四端網絡上加的是單位阶跃电压，对于这样的脉冲，

$$F(p)=\int_0^\infty e^{-pt}dt=\frac{1}{p}.$$

确定了加在四端網絡輸入端的电压脉冲的像函数 $F(p)$ 后，就得到乘积

$$E(p)=K(p)F(p).$$

再利用公式(1.20)，就得到：

$$E(p)=\frac{\tau}{1+p\tau}.$$