

綫性电路理論

上 册

Г. И. 阿塔別柯夫著

江澤佳等譯

人 民 教 育 出 版 社

綫性电路理論

上册

Г. И. 阿塔別柯夫著

江澤佳等譯



人民教育出版社

本书系根据苏联无线电出版社1960年出版的Г. И. 阿塔别柯夫(Атабеков)著“线性电路理论”(Теория линейных электрических цепей)一书译出的。

本书内容包括线性电路的分析和综合两部分。书中叙述电路的变换和计算方法、二端网络、四端网络、滤波器和长线理论,以及线性电路中的周期和非周期过程。

本书分上、下两册出版。上册包括第一至第九章;下册包括第十至第十三章及附录。上册内容包括:基本定义和概念;正弦电流电路中的基本关系;线性电路联接图的变换;线性电路算法;圆图;二端网络;四端网络;谐振电路、滤波器;以及分布参数电路。下册内容包括:非正弦周期过程(傅里叶级数);过渡过程(经典法);傅里叶积分法;运算法(拉普拉斯变换)及附录(复变函数论简述)。

本书主要供高等工业院校电机系和无线电系各专业的学生和研究生参考。对一般电气和无线电工程技术人员也有参考价值。

本书是由重庆大学电工基础教研组江泽佳、周守昌、陈时新、覃考、彭扬烈、张安邦、罗国光等同志翻译的。

线性电路理论

上册

Г. И. 阿塔别柯夫著

江泽佳等译

北京市书刊出版业营业许可证出字第2号

人民教育出版社出版(北京景山东街)

京华印书局印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号K15010·1121 开本850×1168 1/32 印张13 4/16

字数331,000 印数0,001—8,600 定价(7)¥1.50

1963年12月第1版 1963年12月北京第1次印刷

序

綫性电路理論正在电路分析和电路綜合两个主要領域中发展着：电路分析是按給定的电路联接图和电路参数計算各电气量，而电路綜合則是按給定的特性构成电路。

綫性电路理論的这两个領域有着共同的物理和数学基础，它們的物理基础就是为大家所熟知的各电工定律，而数学基础就是在复平面上的运算。它們以統一的原理为基础，在日益扩大的关于构成及計算各式电路最合理的方法的知識方面相互补充。所以，綫性电路理論中的分析和綜合是在发展的；并且在掌握它們时，不是彼此割裂，而是相互联系着的。

綫性电路理論对形成电工和无綫电工专家們的科学見識有着特別重要的意义。所有电工和无綫电工的專門課程都以之为基础。正因为如此，在深入研究电路分析和綜合的新問題方面，引起了广大学者的极大注意。

在工科大学数学教学的安排中，逐年地愈来愈全面考虑到扩大学生对有关数学分析的章、节(特殊函数、矩陣、傅里叶和拉普拉斯变换、解析函数等)的数学知識的必要性。这种安排非常重要，因为它有可能以应有的科学理論水平来闡述并研究專門的理論課程，綫性电路理論就是其中的一門課程。

綫性电路理論是一个內容极其丰富的知識領域。它的科学內容在电工理論基础、无綫电基础及有綫电信基础的近代教学用书中得到了不同完备程度的闡述。对綫性电路理論的一些問題(滤波器和电信号形成电路的設計方法等)的更詳細的闡述包含在專門教程和科学論文中。

本书阐述线性电路的分析和综合问题，是供电工和无线电工专业的学生、研究生及有志提高理论知识水平的工程师作为参考书。

作者力图对数学结论和物理现象的结合给以最大的注意。同时，书中的内容尽可能地按照由简到繁的次序来安排。

为了给还未通晓解析函数的读者以必要的帮助，在书末对复变函数的基本知识作了简要的叙述。

在编写本书时，除引用了极其丰富的国内外文献外，还利用了作者本人的两本著作：《线性电路》（苏联国防工业出版社，1957年版）和《谐波分析及运算法》（苏联国防工业出版社，1956年版）。以这两本书为基础，作者曾为荣膺列宁勋章的莫斯科奥尔忠尼启则航空学院无线电系和电机系的学生及研究生编写了讲义。

莫斯科航空学院“理论电工学”教研组的全体成以及 Я. З. 崔普金(Я. З. Цыпкин)教授和 Д. Ф. 哈拉卓夫(Д. Ф. Харазов)教授在校阅原稿时提出了许多宝贵的建议，作者谨向他们表示衷心的感谢。

在校阅原稿并准备付印时，В. Н. 伊斯特拉托夫(В. Н. Истратов)同志曾给作者以很大的帮助，谨向他表示深深的谢意。

作 者

符号說明

A ——四端网络的参数;

a ——四端网络的相位常数;

b ——四端网络的固有衰减, 电纳;

b_C ——容纳;

b_L ——感纳;

b_{BH} ——插入衰减;

b_p ——工作衰减;

C ——电容;

d ——迴路的衰减;

$\dot{E}$ ——复电动势;

e ——自然对数的底, 电动势的瞬时值;

$F(j\omega)$ ——频谱特性;

f ——频率;

f_c ——截止频率;

g ——四端网络的特征传递量, 电导;

H ——四端网络的参数;

I ——电流的有效值, 直流;

I_m ——电流的振幅;

$\dot{I}$ ——电流的复有效值;

$\dot{I}_m$ ——电流的复振幅;

I_a ——电流的有功分量;

I_p ——电流的无功分量;

$I_{\text{кз}}$ ——短路电流;

Im ——复数的虚部(不带因子 j);

i ——电流的瞬时值;

$j = \sqrt{-1}$;

K ——行波系数;

- K_U ——对电压的傳遞函数;
 K_I ——对电流的傳遞函数;
 k ——耦合系数, 滤波器的常数;
 L ——电感;
 l ——长度;
 M ——互感;
 m ——滤波器的常数;
 n ——变换比, 反射系数;
 P ——有功功率;
 p ——瞬时功率, 复频率;
 Q ——无功功率, 迴路的品质因数;
 Q_C ——电容器的品质因数;
 Q_L ——电感线圈的品质因数;
 q ——电荷;
 Re ——复数的实部;
 r ——电阻;
 S ——视在功率, 驻波系数;
 T ——周期;
 t ——时间;
 U ——电压或电动势的有效值, 直流电压或电动势;
 U_m ——电压或电动势的振幅;
 $\dot{U}$ ——电压或电动势的复有效值;
 $\dot{U}_m$ ——电压或电动势的复振幅;
 U_a ——电压的有功分量;
 U_p ——电压的无功分量;
 U_{x-x} ——空载电压;
 u ——电压或电动势的瞬时值;
 v ——速度;
 W ——能量;
 W_C ——电场能量;
 W_L ——磁场能量;
 w ——匝数;

- x ——电抗, 坐标长度;
 x_C ——容抗;
 x_L ——感抗;
 x_M ——互感抗;
 Y ——复导納, 四端网络的常数;
 Y_{ii} ——会集于节点 i 的支路的自导納;
 Y_{ik} ——节点 i 和 k 的共导納, 互(轉移)导納;
 $Y(p)$ ——运算导納;
 y ——导納;
 Z ——复阻抗, 四端网络的参数;
 Z_c ——特性阻抗;
 Z_{ii} ——迴路 i 的自阻抗;
 Z_{ik} ——迴路 i 和 k 的共阻抗, 互(轉移)阻抗;
 $Z(p)$ ——运算阻抗;
 $Z_{x,x}$ ——空载阻抗;
 $Z_{k,0}$ ——短路阻抗;
 $\dot{Z}_M$ ——复互感抗;
 Z_M ——桥式四端网络的特性阻抗;
 Z_{Π} —— Π 形四端网络的特性阻抗;
 Z_T —— T 形四端网络的特性阻抗;
 z ——阻抗;
 α ——傳輸綫的相位常数;
 β ——傳輸綫的衰减系数;
 γ ——傳播常数;
 δ ——頻率的相对失調, 損失角;
 $\delta(t)$ ——脉冲函数;
 Δ ——方程組的行列式;
 Δ_{ik} ——第 i 行和第 k 列元素的代数余因子;
 ε ——电容率;
 η ——效率;
 λ ——波长;
 μ ——磁导率;

ρ ——傳輸綫或迴路的波阻抗;

τ ——時間;

Φ ——磁通;

φ ——相位差角;

Ψ ——磁鏈;

ψ ——初相;

ω ——角頻率。

上册目录

序.....	vii
符号說明	ix
第一章 基本定义和概念	1
1-1. 电路理論的应用范围.....	1
1-2. 电路元件.....	2
1-3. 电动势源和电流源.....	9
1-4. 电路的联接图.....	11
1-5. 綫性电路.....	12
1-6. 电路的基本定律.....	14
1-7. 能量和功率.....	19
1-8. 綫性电路中的周期和非周期过程.....	21
1-9. 周期电气量的有效值和平均值.....	23
第二章 正弦电流电路中的基本关系	26
2-1. 以旋轉矢量投影形式表示正弦函数的方法.....	26
2-2. 在 r 、 L 、 C 元件中正弦电压与电流之間的关系.....	31
2-3. r 、 L 、 C 的串联	34
2-4. r 、 L 、 C 的并联	37
2-5. 复数的应用.....	40
2-6. 欧姆定律和基尔霍夫定律的复数形式.....	45
2-7. 正弦电流电路中的功率.....	49
2-8. 电源向受电器傳輸最大功率的条件.....	55
2-9. 功率平衡.....	57
第三章 綫性电路联接图的变换	59
3-1. 含混联元件的电路图的变换.....	59
3-2. 串联联接变换为等效的并联联接.....	62
3-3. 星形变换为等效的多角形.....	64
3-4. 三角形变换为等效的三射綫星形.....	67
3-5. 等效电压源和等效电流源.....	67
3-6. 有两个节点的电路图的变换.....	70
3-7. 电路中电源的轉移.....	72

第四章 线性电路算法	74
4-1 应用基尔霍夫定律计算电路.....	74
4-2 回路电流法.....	76
4-3 节点电压法.....	82
4-4 叠加法.....	86
4-5 入端阻抗、入端导纳和互阻抗、互导纳。电流比和电压比.....	88
4-6 互易定理.....	91
4-7 补偿定理.....	93
4-8 关于支路阻抗变化时电路中电流变化的定理.....	95
4-9 等效电源定理.....	98
4-10 互感电路计算的特点.....	104
4-11 耦合系数。漏感.....	110
4-12 空芯变压器的方程和代换电路.....	114
4-13 变压器的入端阻抗.....	120
4-14 对偶电路.....	123
第五章 圆图	128
5-1 复平面上的轨迹.....	128
5-2 变换 $Y = \frac{1}{Z}$	129
5-3 变换 $W = \frac{A+Bk}{C+Dk}$	134
5-4 简单电路的阻抗和导纳圆图.....	137
5-5 在最简单的电路中电压比值的圆图.....	144
第六章 二端网络	148
6-1 二端网络的定义和分类.....	148
6-2 单元件电抗二端网络.....	149
6-3 双元件电抗二端网络.....	151
6-4 多元件电抗二端网络.....	154
6-5 无源多元件电抗二端网络阻抗的一般公式.....	161
6-6 电抗二端网络的典型电路.....	166
6-7 电抗二端网络的阻抗或导纳对频率的导数的符号.....	173
6-8 电抗二端网络的链形电路.....	176
6-9 潜在等效二端网络及其等效条件.....	180
6-10 潜在倒量二端网络及其互为倒量的条件.....	184
6-11 含有两种类型元件的有损耗的多元件二端网络.....	186
6-12 阻抗的实部是频率的偶函数; 阻抗的虚部是频率的奇函数。电阻和电导的符号.....	195

6-13. 用复频率 $p = \sigma + j\omega$ 研究二端网络	198
6-14. 阻抗是正实函数的二端网络	201
6-15. 正实函数的性质	205
6-16. 按给定的正实函数构成二端网络	211
6-17. 二端网络的频率特性与复平面上零点和极点位置的关系	218
6-18. 二端网络的阻抗或导纳的有功和无功分量的频率特性间的关系	226
第七章 四端网络	238
7-1. 四端网络的基本定义及其分类	238
7-2. 四端网络方程组	241
7-3. 空载和短路参数	249
7-4. 四端网络的特性参数	253
7-5. 幅相特性或传递函数	259
7-6. 在任意负载下四端网络的输入阻抗	263
7-7. 四端网络的工作衰减和插入衰减	265
7-8. 以特性阻抗匹配为基础的四端网络的级联	268
7-9. 用矩阵形式表示的复杂四端网络方程	270
7-10. 复杂四端网络联接的正规性	274
7-11. 单元件四端网络	276
7-12. T形四端网络	278
7-13. T形四端网络	282
7-14. Π 形四端网络	283
7-15. 桥式四端网络	285
7-16. T形桥式四端网络	287
7-17. 作为四端网络的理想变压器	288
7-18. 与任意对称无源四端网络等效的桥式四端网络	289
7-19. 用等效四端网络代替具有串联或并联元件的理想变压器	294
7-20. 在复频率下四端网络的研究	297
7-21. 四端网络的幅值特性与相位特性间的关系	302
7-22. 根据已知的频率特性构成四端网络	302
第八章 谐振电路。滤波器	308
8-1. 线性谐振电路及其特性	308
8-2. 滤波器的一般概念	322
8-3. 电抗滤波器的传递条件	323
8-4. k 型滤波器	329
8-5. m 型滤波器	334
8-6. 作为滤波系统的耦合电路	342
8-7. 桥式滤波器。压电谐振器	345

8-8. 根据契貝雪夫近似法綜合滤波器.....	348
第九章 分布参数电路.....	363
9-1. 均匀傳輸綫的原参数.....	363
9-2. 均匀傳輸綫的微分方程.....	365
9-3. 均匀傳輸綫上的周期状态.....	367
9-4. 均匀傳輸綫的副参考.....	374
9-5. 无畸变綫.....	380
9-6. 无損失綫.....	382
9-7. 駐波.....	384
9-8. 傳輸綫的入端阻抗.....	389
9-9. 无損失綫上的功率.....	397
9-10. 作为匹配变压器的傳輸綫.....	399
9-11. 利用并联綫段的阻抗匹配.....	401
9-12. 无損失綫的圓图.....	403
9-13. 作諧振电路元件的傳輸綫.....	407
9-14. 模拟綫.....	409

第一章 基本定义和概念

1-1. 电路理論的应用范围

在电工学和无綫电工学中，存在着由場論的观点和由电路理論的观点来研究电磁現象的两种不同方法。

場論是研究三維空間中所發生的現象。例如，电磁能的輻射，无綫电波的傳播，体电荷的分布，电流密度的分布等等。

媒质——电介质、导体、半导体的单元体积，是在場論中被研究的元件。媒质是以介电系数、磁导系数、电导系数以及确定介质損耗的参数等来表示其特征的。

在場論中，运用电场强度矢量、磁场强度矢量及电流密度矢量等来作为电气量与磁量。这些量和媒质的参数之間的关系用麦克斯韦方程来表示。麦克斯韦方程表示对各种不同媒质都适用的电磁現象的規律。在場論中，具体問題的提出，就是給定这些媒质分界面上的边界条件。

当所研究的現象在空間具有有限特征时，我們就应用电路理論。

在給定情况下，所研究的元件不再是媒质的单元体积，而是电阻、电感及电容。以电路的这些元件来考虑导綫周圍的电場与磁场，以及沿导綫流过电流时所发散的热量。

电路理論使用下列电气量：电压、电流及电荷。这些电气量和电路元件一样，对于場論中所研究的具有微分特征的量而言是积分量。

电路理論的基本定律是：在分支点电流的平衡定律（基尔霍夫第一定律），以及在电路閉合部分上的电压平衡定律（基尔霍夫第二定律）。

在电路理論中，具体問題的提出就是給定电阻、电感及电容的相互联接，并以被称为电路图的图形来表示这些具体問題。电路图示出电

路元件联接的顺序。

借电路理論可直接确定沿傳輸綫的各电气量(电压、电流及电荷)与距离及時間的关系,而无需进行中間計算,也无需对場論中所用的电气量和磁量单位值进行积分。因而,将使計算大大簡化。

在电路理論中,我們研究分布参数电路和集中参数电路。

在分布参数电路中,电压与电流是作为空間坐标(长度)与時間的函数来研究的。

在集中参数电路中,对于工程实际來說可以足够精确地认为,磁場、电場以及热量散发都是分別集中在电路的各个元件之內的。

在集中参数电路中,不研究电压与电流随空間坐标的变化,而仅研究它們对時間的函数关系。

应当指出,把电路分为分布参数电路与集中参数电路是有条件的。同样一个电气装置或无綫电工装置,在較低的頻率时,可作为集中参数电路来研究,而在較高的頻率时,就作为分布参数电路来研究。

电路理論和場論应用范围的划分也是有条件的。对电磁現象的研究采用这种或那种概念,是以具体問題为轉移。例如,傳輸綫中的过程,不仅可用电路理論的方法,而且也可用場論的方法来研究。

文献[43, 51]闡述了电路理論在波动电磁系統中的推广,以及在高頻及超高頻无綫电振蕩、波导和輻射系統中的应用。

1-2. 电路元件

电路的研究与計算,是以各种不同的假設及电路元件的某些理想化为基础的。在电路理論中,所謂电路元件通常并不是指某些电工装置实际存在的构成部分,而是指理想化的电路元件。这些元件在理論上具有特殊的电气性质或磁性质,并且在总体上能近似地反映在实际装置中所發生的現象。

电路元件分为有源元件与无源元件两类。

电能源是有源元件。在有源元件中进行着化学能、机械能或其他形式的能量转变成电能的过程。在电路理论中所用的电能源,将在1-3节内阐述。

电阻、电感和电容是电路的无源元件。

电阻 r 是这样的电路元件,当有电流流过它时,在其中将发生电能转变成热能的不可逆过程。

电感 L 是能够储藏磁场能量的电路元件。

最后,电容 C 是能够储藏电场能量的电路元件。

这样,每一电路元件各具有其特殊的性质。

应当指出,在电路理论中采用的这些术语——电阻、电感、电容以及与它们相应的表示符号 r 、 L 及 C ——一方面用以表示电路元件本身,另一方面用以表示它们的参数,即定量地表示给定元件特性的电气量与磁量(以后都假定它们不随电压或电流而变——参阅 1-5 节)。

于是,电阻这个术语以及与它相应的符号 r 就表示电能转变成热能的电路元件。同时,它亦表示给定元件的电气参数,其值等于它两端的电压 u_r 与通过其中的电流之比:

$$r = \frac{u_r}{i}. \quad (1-1)$$

在 MKCA 单位制中^①, u_r 的单位为伏特(σ), i 的单位为安培(a), r 的单位为欧姆(oM)。

同样地,电感这个术语以及与它相应的符号 L ,表示在其中储藏磁场能量的电路元件。同时也表示等于自感磁链^②与电流之比的磁量:

$$L = \frac{\Psi}{i}. \quad (1-2)$$

在 MKCA 单位制中, Ψ 的单位为韦伯($\sigma\sigma$), L 的单位为亨利(m)。

① ГОСТ 8033-56: “电磁单位”。

② 磁链等于磁通与为这磁通所交连的匝数的乘积。

自感电动势等于磁链的变化率,即

$$e_L = -\frac{d\Psi}{dt}, \quad (1-3)$$

或者考虑到式(1-2),则得

$$e_L = -L \frac{di}{dt}. \quad (1-4)$$

式(1-4)右方取负号是由于选择自感电动势的正方向与电流的正方向一致的緣故。

量

$$u_L = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad (1-5)$$

称为在电感上的电压降,或称为电感上的电压。

如果与一个电感元件相交连的磁链,其中的一部分同时与另一个电感元件相交连,则这两个电感元件除了具有参数 L_1 及 L_2 之外,还具有被称为互感的参数 M 。当磁通和与之相应的磁链是电流的线性函数时,这个参数以互感磁链与电流之比来确定:

$$M = \frac{\Psi_{12}}{i_2} \quad (1-6)$$

和

$$M = \frac{\Psi_{21}}{i_1}. \quad (1-7)$$

式中 Ψ_{12} 是由第二元件内的电流所产生的第一元件的磁链; Ψ_{21} 是由第一元件内的电流所产生的第二元件的磁链。

在这种情况下,在第一元件和第二元件中将感应互感电动势,其值等于:

$$e_{1M} = -\frac{d\Psi_{12}}{dt} = -M \frac{di_2}{dt} \quad (1-8)$$

和