

高等学校教学用书

电 路 理 论

上 册

铁道部教材編輯組选編

人 民 鐵 道 出 版 社

高等学校教学用书

电 路 理 論

上 册

铁道部教材編輯組选編

人 民 鐵 道 出 版 社

一九六一年·北京

本書系根据铁道通信信号各专业1959年制訂的电路理論教学大綱，結合最近本学科的发展情况編写的。書中包括网络分析及綜合两方面。共分上下二册。本書为上册，包括复頻率的概念，二端网络和四端网络的分析与綜合，均匀传输綫理論，均衡器及滤波器的經典設計方法等。下册包括滤波器的最新設計方法及晶体滤波器等。

为学习的便利起見，上下册均附有附录，介紹本書所必須的数学概要。

本書可供铁道运输通信，铁道无线通信，铁道运输自动化及铁道运输自动控制及远程控制各专业教学之用。并可供从事通信及铁道信号工程技术人員的业务参考。

主編单位：北京铁道学院电信系电信基础教研組編

主編人：杜錫鈺，王文煊

高等学校教学用书

电 路 理 論

上 册

铁道部教材編輯組选編

人民铁道出版社出版

(北京市霞公府17号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第010号

新华书店科技发行所发行

各地新华书店經售

人民铁道出版社印刷厂印

书号1801 开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张 $16 \frac{1}{4}$ 字数455千

1961年8月第1版

1961年8月第1版第1次印刷

印数0,001—700册 定价(10)2.20元

前 言

本书系铁道运输通信及信号各专业的技术基础课，内容叙述二端网络、四端网络及均匀传输线的基本理论，并介绍均衡器、滤波器等的设计。为进而学习电话学、电报学、长途通信、铁道运输自动控制远程控制等各专业课打下基础。为了学习的便利，在基本理论方面，均附有例题，作为应用的示范。在设计方面，除附有例题外，并附有设计图表，供设计时采用。

为了适应大跃进以来我国生产技术的飞跃发展，所以本书内容较1959年所订教学大纲的要求广泛，增加的部分主要是网络的综合理论。因为应用本书的各铁道通信及自动化等专业要求不同，可作适当删减。如教学计划规定不足100学时者，可略去第一章，第二章第8节以后各节及第三章第17节以后各节，并不影响全课的系统性。

因为现代设计滤波器的方法日益增多，而学时有限，本书力求将各种设计方法的理论统一。在叙述滤波器理论时，从格型网络出发，不但容易解释它的物理概念，而且把K型m型滤波器当作格型滤波器的变换型式来处理，节省了学时。

本书采用的符号，凡各国通用的符号，例如*i*代表电流， ω 代表角频等，本书仍予延用。凡各国用其本国文字作角码的符号，本书则采用汉语拼音的字头作为符号。例如，最小衰耗英语用 $b_{\min}$ 表示，俄语用 $b_{\min}$ 表示，本书则用 b_{xiao} 表示。

本书的编写，虽然其中大部分是经过教学实践，但也有不少部分还感到经验不足，不当之处，尚希读者予以批评和指正。

目 录

緒 論

第一章 复频率的概念	7
§1-1 网络的分析	7
§1-2 网络对正弦电压的稳态响应	7
§1-3 网络的瞬态响应	9
§1-4 复频率概念	9
§1-5 阻抗函数和复频率平面	10
第二章 二端网络	13
§2-1 二端网络的定义与分类	13
§2-2 简单电抗二端网络	14
§2-3 多元件电抗二端网络的特性	17
§2-4 纯电抗二端网络的构成	20
§2-5 阻抗标称化与频率标称化	22
§2-6 倒网络与二端网络的等效	23
§2-7 梯形电路	26
§2-8 电抗二端网络阻抗的函数关系	30
§2-9 正实函数的一些性能	33
§2-10 按正实函数构成二端网络	35
§2-11 一般无源二端网络的综合	40
§2-12 不采用互感实现二端网络的方法	45
§2-13 元件损耗的影响	46
第三章 四端网络	46
§3-1 四端网络的定义与分类	46
§3-2 四端网络的传输方程式	48
§3-3 复杂四端网络的分析	52
§3-4 四端网络的特性参数	57
§3-5 四端网络按特性阻抗匹配链接	59
§3-6 几种基本四端网的参数	60
§3-7 衰耗器	64
§3-8 四端网络的输入阻抗	65
§3-9 四端网络的工作衰耗和介入衰耗	67
§3-10 链接四端网络的工作参数	70
§3-11 四端网络的回波衰耗与失配衰耗	71
§3-12 理想变量器	72
§3-13 变量器的等效电路	74
§3-14 负载为电阻的变量器	76
§3-15 四端网络的等效	79
§3-16 折叠理论与中分定理	82

§3—17	用复频率函数表示四端网络的特性	87
§3—18	实现电抗四端网络的条件	88
§3—19	从四端网络的阻抗矩阵求其构造	91
§3—20	终接电阻负载的电抗四端网络	92
§3—21	梯形网络终接电阻负载	95
§3—22	从工作损耗函数实现两终端均接电阻负载时的电抗四端网络	97
§3—23	电抗四端网络的工作特性	99
§3—24	从给定的工作特性实现网络的条件	101
第四章	孤立的均匀传输线	103
§4—1	引言	103
§4—2	直流电源接通到均匀线路和投射波的概念	103
§4—3	反射波的概念	105
§4—4	传输线方程式	106
§4—5	阻抗匹配线上电压与电流的分布	110
§4—6	特性阻抗	111
§4—7	传播常数	113
§4—8	波长及传输速度	114
§4—9	传输线产生的畸变	117
§4—10	阻抗不匹配线上电压与电流的分布	119
§4—11	均匀传输线的输入阻抗	124
§4—12	均匀传输线的工作损耗和介入损耗	128
§4—13	由测量均匀线的开路及短路阻抗值求其参数	131
第五章	均衡器	134
§5—1	均衡器的概念	134
§5—2	Γ 型损耗均衡器	135
§5—3	Γ 型损耗均衡器的设计	137
§5—4	电抗元件较多时 Γ 型损耗均衡器的设计公式	142
§5—5	格型及桥 Γ 型损耗均衡器	146
§5—6	可变损耗均衡器	147
§5—7	相移均衡器	152
§5—8	相移均衡器简单电路的设计公式	154
§5—9	相移均衡器的设计方法	159
第六章	滤波器	166
§6—1	滤波器的概念	166
§6—2	格型网络构成滤波器的条件	167
§6—3	低通滤波器基节	170
§6—4	低通滤波器的复合电路及设计举例	177
§6—5	高通滤波器基节	180
§6—6	对称带通滤波器	183
§6—7	对称带通滤波器设计举例	187
§6—8	不对称带通滤波器	189
§6—9	对称带阻滤波器	193
§6—10	元件中损耗对滤波器损耗特性的影响	194
§6—11	最佳的名义电阻	202
§6—12	样板法设计滤波器	207

§6—13 滤波器的并联运用 (分波器).....	212
§6—14 设计时电路的选择	219

附表:

附表6—1 低通滤波器节的计算公式及曲线表	222
附表6—2 高通滤波器节的计算公式及曲线表	223
附表6—3 三元件带通滤波器节的计算公式及曲线表	224
附表6—4 四元件带通滤波器节的计算公式及曲线表	225
附表6—5 五元件带通滤波器节的计算公式及曲线表	226
附表6—6 六元件不对称带通滤波器的计算公式及曲线表	227
附表6—7 对称带通滤波器的计算公式及曲线表	228
附表6—8 带阻滤波器的计算公式及曲线表	229
附表6—9 无耗滤波器每节衰耗奈培值与 m 值的关系	230
附录 I 双曲线函数	236
附录 II 复变函数概要	240
附录 III 求多项式的根	248

緒 論

概 述

为了提高列車的通过能力，保証行車安全，鉄路上設置了各种的自动控制、远程控制及通信的设备。

一般的自动控制是在比較不太远的范圍內实现操纵和监督自动化的设备；远程控制是在距离較远的条件下实现操纵和监督的设备。鉄路上的自动控制、远程控制，习惯上简称信号、联鎖、閉塞。“信号”就是用以指揮行車的信号，如臂板信号、色灯信号。“联鎖”是在站間調整列車运行的各种集中装置，比如电气集中就是将道岔和信号的操纵、监督 and 鎖閉等关系都集中在一处，并靠电力来进行的一种装置。“閉塞”是指供区間行車联络用的閉塞装置，如最簡單的电气路签，較复杂的半自动閉塞，更复杂的自动閉塞等。此外，如機車信号、調度集中、駝峰自动化等也都是提高运输效率，保証行車安全的有效工具。

通信方面包括书面通信用的电报及口头連絡用的电话。在电报方面有音响、打字、傳真及用戶等不同的型式。鉄路电话就用途來說有13种，如地区电话、长途电话、局調度电话、行車調度电话、养路电话、各站电话、搬道电话、閉塞电话、抄号員电话、列車无线电话、会议电话以及機車司机与調度联络用的无线电话。就构造来分有磁石、共电、自动、选号、載波、微波及无线等电话。此外长途自动、各站自动已开始装設，縱横制及电子式交换机也将被应用。

以上各种设备对准确地組織列車运行，提高車站及区間的列車通过能力，加速機車車輛的周轉，保証行車安全，以及各部門間紧密联系、相互协作等方面起着很重要的作用。

1958年党提出了“鼓足干劲，力爭上游，多快好省地建設社会主义”的总路綫。三年来在毛澤东思想的指导下，在总路綫、大跃进、人民公社三面紅旗的光輝照耀下，鉄路电务部門的职工，和全国人民一道，在党的领导下，破除了迷信，解放了思想，以革命的冲天的干劲，發揮了偉大的創造力。不仅大大提高了旧有各种设备的質量，而且制造了大量的新产品，正在朝自动化、集中化、远程控制化发展着。

通信信号设备类型是很多的，但是基本的計算方法是一致的。因为尽管他們繁簡不同，但都是由各种电路組成的总合体。因此对他們性能的分析方法以及电路的計算方法就不是各有一套，而是有一个共同的計算和分析方法。例如，不管一个电路的内部构造如何复杂，只要它对外有四个端子，而且我們所关心的是整个系統的外部电压电流的关系，就可以用四端网的理論来分析計算。又如不管是信号高压綫、通信綫、或是信号軌道电路都可用傳輸綫的理論分析和計算。因此在研究具体设备之前，也就是学习专业課之前，应该掌握計算这些设备綫性电路的一般方法。电路理論就是讲一般綫性电路的最通用的計算方法。看来，电路理論是一門技术基础課，是为专业課、科研以及将来工作时打好基础的一門課程。通过电路理論的学习，要掌握綫性电路的一般的分析和計算方法。

什么是电路理論

为了进一步明确什么是电路理論，首先应明确什么是电路。电路是我們已經熟悉的东西，在电工基础中一半的内容是电路的問題。

电路是构成电流通路的总合设备，它是由电阻器、电感线圈、电容器、变压器、连接线以及电源等组成的，并以 R 、 L 、 C 及 M 来说明其性能（当然在一电路内， R 、 L 、 C 、 M 不一定同时都有）。这里，电阻 R 代表回路消耗能量的性能； L 代表将能量 ($\frac{1}{2}LI^2$) 积聚到磁场的回路性能； C 代表将能量 ($\frac{1}{2}CU^2$) 积聚到电场的回路性能； M 代表耦合的性能。

电路理论就是以电路的形式，用电压电流的概念（不用磁场电场的概念）来研究能量沿回路传播、转化以及集聚等过程的普遍定律和计算方法。

当然，对所有电气过程来说，并不是都适宜用电路理论的方法来分析计算。比如研究天线及无线电波的传播过程，因为是研究电磁场传播如何远的问题，就应该用电磁场的方法。又如波导管（用方的或圆的导体管来代替传输线）及空腔谐振体（球形或圆柱形的空腔导体用来代替 LC 谐振电路）也都宜于用场的方法来分析计算。属于电子管离子管范围的问题就应该用电子理论的方法来分析。只有当电气过程适宜用电路的形式及用电压电流的概念研究电能的传播、积聚和转换过程较方便时，才采用电路理论的方法。

电路的元件

电阻器、电感线圈及电容器被称为电路的元件。电路的一切元件都以其基本参数来表示性能。例如用 R 代表电阻器，用 L 代表电感线圈等。实际的电路元件，除具有基本参数外还具有所谓寄生参数。比如电感线圈都是用导线绕成的，自然要具有电阻；同时各匝间要形成分布电容。电感线圈中的电阻电容 (R 、 C) 称为寄生参数。因此就应以图 1 所示电路来正确地表示电感线圈。

以下的措施可以减小电感线圈的分布电容：第一将整个线圈分成几段来绕。其次是使上下相邻的两层线圈形成一个角度，叫做蜂房式绕法。如果蜂房式绕法再分段则电容更小。另外也可使线圈有节距（如果匝数少时），或者在层间填纸，以增加导线距离的方法来减小分布电容。

表示 ωL 与 R 的比值的数字称为线圈的品质因数。其定义是无功功率与有功功率的比值，并以 Q 来代表。

对图 2a 来说：

$$Q = \frac{I^2 \omega L}{I^2 r} = \frac{\omega L}{r}.$$

对图 2b 来说：

$$Q = \frac{U^2 / \omega L}{U^2 / R} = \frac{R}{\omega L}.$$

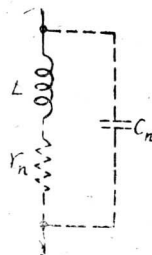
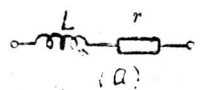


图 1



(a)

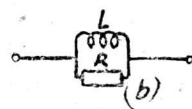


图 2

品质因数的倒数称损角的正切，即 $Q = \frac{1}{\tan \delta}$ ， δ 称为损角。增加 Q 值可用以下方法。采用较粗的导线，在频率较高、产生集肤效应时应采用李芝线（细线合成的绞线），采用介质损耗较小的材料做线架，采用铁损较小的铁心如钹莫合金、铁淦氧、铁硅铝等；采用最佳的空气隙（因空气隙使磁损减少但同时减小了 ωL ，故有最佳值）。此外圈卷的烘干也可增加 Q 值。

电阻器：可分为炭质的及线绕的两种。电阻器的规格是消耗功率的瓦数、分布电感、分布电容、时间稳定性及温度系数等。

炭质电阻的优点是寄生参数小，可认为纯电阻，并且价格便宜。但功率较小，且具有负温度系数。

线绕电阻是以电阻丝（锰镍铜丝、康铜丝或镍铬合金丝）绕制成的。优点是功率大，温度系数小。但具有分布电容及电感，故仍应用图 1 来表示线绕电阻的电路。为了减小寄生电感可采用图 3b、c、d 所示的几种绕法。如欲减小分布电容，可分段来绕。

电容器：按介质来分，通用的有纸电容器、云母电容器、聚苯乙烯电容器、陶瓷电容器以及电解电容器等种。电容器的规格，除电容量外，尚应考虑绝缘电阻、工作电压、试验电

压、交变磁场中的能量损耗以及固有电感等等。

絕緣电阻由介質电阻、浸漬物电阻以及电容器引綫間支架的电阻所决定。絕緣电阻往往随温度上升而降低，造成击穿。

工作电压是长期工作时（不短于 10^4 小时的連續工作）所承受的而不击穿的直流电压。

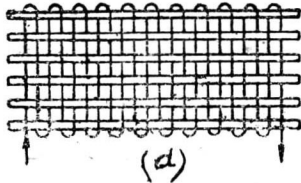
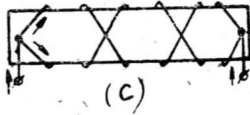
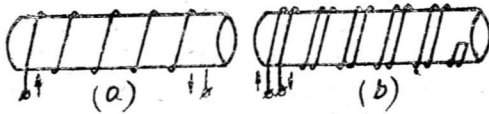


图 3

試驗电压是較短時間內（5 秒至 1 分）能承受而不击穿的电压。

击穿电压是快速（数秒）試驗下使电容器发生击穿的电压。

当电容器通过交流时，由于介質损耗，一部分能量变热而消失。一般情況下电容器由图 4 所示的电路来代表。

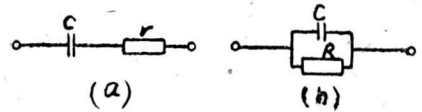


图 4

对于图4a來說：

$$Q = \frac{I^2}{\frac{\omega C}{I^2 r}} = \frac{1}{r \omega C} = \frac{1}{\tan \delta};$$

对于图4b來說：

$$Q = \frac{U^2 \omega C}{U^2 / R} = \omega C R = \frac{1}{\tan \delta}.$$

云母电容器的损耗角正切一般是 $10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-4}$ ；聚苯乙烯是 2×10^{-4} ；紙电容器是 $3 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$ 。

另外，由于引綫及电容器本身叠片使电容器具有固有电感，如图 5 所示。由图 5 看出，欲减小固有电感，引綫要尽量短，而且要放在叠片的中間。

下面应再談一下元件的分类：

1. 按能否产生功率来分：

{ 有源元件，如电源， $-L$ ， $-R$ ， $-C$ 等；

{ 无源元件，如 R 、 L 、 C 等。

2. 按 U/I 比值是否常值来分：

{ 綫性参数元件， U/I 为常值；

{ 非綫性参数元件， U/I 不为常值，如氧化銅、饱和鉄心的电感綫圈等。

本課所討論的限于綫性元件电路。

3. 按参数的量綱分：

{ 集中性参数元件；

{ 分布性参数元件。

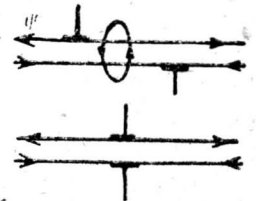


图 5

当寄生参数很小，而且連綫的 R 、 L 、 C 可以不計时，如图 6 所示的电路， R 、 L 、 C 都分別集中在一个地方，电场和磁场在空間可以分开的情况称为集中性参数的电路。这时 R 、

L 、 C 分别称为集中性参数的元件。

当寄生参数不能忽略时，比如在频率较高时，对线绕电阻的位移电流及绝缘损耗就不能忽略，这时就变成分布性参数的元件，其电路如图 7 所示。

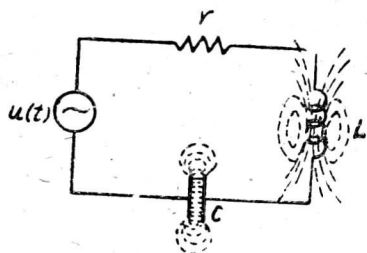


图 6

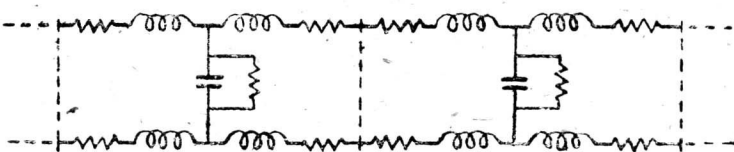


图 7

具体电路的分析方法

通常的电气设备都是由许多简单的电路组成的，而且这些电路可能既有分布性参数的也有集中性参数的。因此当分析或计算实际的电气设备时，首先应分解成最简单的电路，然后加以分别计算。

为了说明如何将实际电气设备分解成简单的电路，也为了说明电路理论中所要讨论的问题，让我们来研究一下以下的两个例子。首先研究一下自动闭塞区段上的机车信号的电路，如图 8。

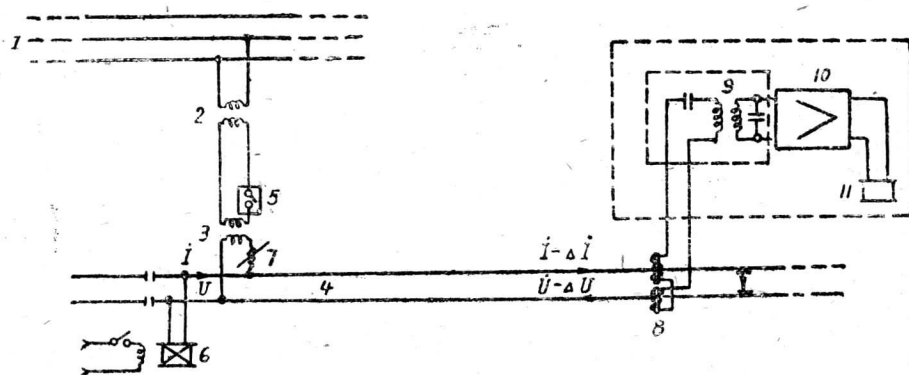


图 8

图 8 中：

- 1 为沿铁路敷设的 6000 伏电压的三相输电线路，供给区间铁路自动控制的全部电能；
- 2 与 3 为降压变压器；
- 6 为轨道继电器，借它的动作来控制本区段有无列车的信号；
- 4 为轨道电路，借以把 2 所加的轨道电源传到轨道继电器 6，当轨道电路上无列车时，继电器 6 的衔铁动作；当轨道上有列车时，继电器 6 被短路，因而衔铁不动作。这样就可以表示该区段有无列车。

5 为电码发送机（传送器），当列车进入轨道电路时，电码发送机就开始动作（启闭），而且依照驶出端的信号种类发送不同的电码，该电码信号经轨道电路被列车的车轴短路，在钢轨周围产生交变磁场，并在机车的接收线圈 8 中感应出相同的信号，经滤波器 9，放大器 10 使脉冲继电器 11 动作，而其接点又使译码继电器工作，在机车上显示相同的信号。

由于整个系统是很复杂的，为了分析它的运用情况以及设计满足要求的元件参数，可将整个系统分成以下几部分。

可以单独研究6000伏线路的传送情况。这时变电站为电源，变压器2为负载。如果电源的频率是50赫，输电线路长40~60公里时可将线路以及变压器都看成集中参数，但要考虑线路中的漏泄电流。当研究雷电现象时，线路应认为是分布参数电路而变压器绕组的分布电容也应考虑。

为了研究信号由轨道电路传送到机车的情况，可先单独研究由5、3、7、4组成的电路，这时5为电源，4为负载；然后研究由3、7、4、8所组成的电路，这时以变压器3为电源，机车接收线圈8为负载。当计算滤波器及放大器时，感应线圈是电源，继电器11是负载。

其次研究一下图9所示的调度电话主要原理图，在同一线路上并叠加有幻路电报。

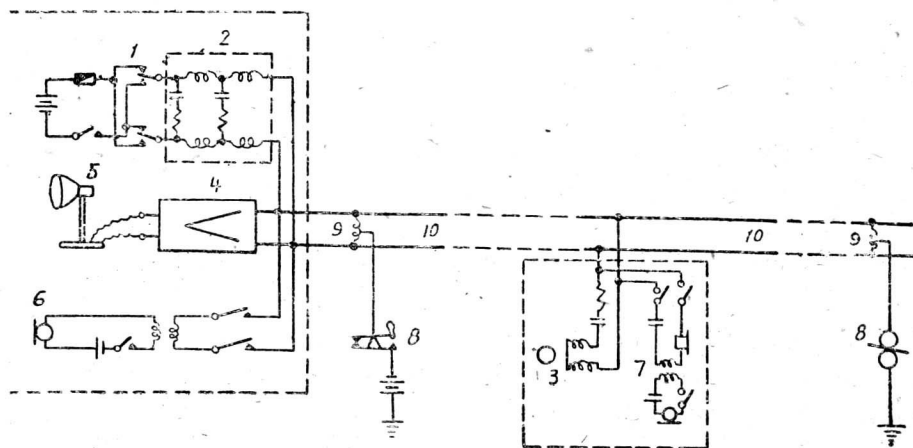


图 9

图9中：1——代表呼叫设备，往线路发送不同组合的脉冲电流，其中每一个组合专门控制一个选别器；

2——是滤波器，用它减低呼叫电流对邻近通信回路的干扰，同时防止沿线路传输的通话电流被电池短路；

3——是中间站选别器；

4——是放大器；

5——是调度员的扬声器；

6——是调度员送话器；

7——是车站值班员的电话机；

8——是电报机件（发送电键和接收器）；

9——是具有中间抽头的感应线圈，用以将电报机件接入双导线电话回路。线圈对音频电流的阻抗应该很大；

10——是调度通信的架空电线路。

当分析调度通信装置时，必须研究下述一系列的电路。车站值班员被调度员呼叫的电路，调度员的语言传送电路，用户语言的传送电路等等。而上述每一电路，又由简单的分布参数或集中参数的电路组成。例如滤波器、电话机件等应认为是集中参数的电路而线路则是分布参数的电路。

从以上两例看出：无论是通信设备中，或自动控制远程控制设备中，都有传输线、滤波器、变压器等，而上述传输线、滤波器、变压器等又分别属于不同参数的四端网，因此在讨论它们的特殊性之前，首先了解一下它们的共性，即要专章讨论四端网络的性能。而所有四端网的各臂又都是由二端网组成的。因此在研究四端网之前，应对二端网有一定的了解。这样就确定了电路理论课程的内容。即它应包括二端网、四端网、传输线、滤波器等。

电路理論发展簡史

毛主席曾說过“人类社会的生产活动，是一步一步地由低級向高級发展，因此人們的認識，不論对于自然方面，社会方面，也都是一步一步地由低級向高級发展，即由淺入深，由片面到更多的方面”^①。整个电路理論的发展过程，也是这样形成的。

随着电工技术的发展，电路理論亦不断地发展。整个說来，可分为三个阶段。

第一个阶段大約在1800~1880年，为直流电路理发展时期。在这一段期間內发表的文獻，有1801年彼得罗夫的电压与电流的試驗汇报，1826年的欧姆定律，1838年楞次的感应定律（稍后法拉第亦发现此定律），1845年的克希荷夫定律等等。这些理論确定了电路的基本概念及其計算方法。

理論与当时的电工技术有密切的联系，正如毛主席說过的“理論的基础是实践又轉过来为实践服务”^②。当时的电工技术主要是电报及电器照明。1832年施林格发明了电报，1837年韦斯登加以改良后取得专利。雅可比于1839年发明了記錄符号的电报，1850年又发明了直接印字的电报。在照明方面，1872年洛迪琴发明了白熾灯，1876年雅勃洛契可夫发明了电烛。

因为当时的技术主要是直流的，所以当时电路理論的研究也限于直流电路，成为物理电磁学的主要内容。

第二阶段是1880~1915年，可称为交流电路理論发展阶段。当时的主要发明有雅勃洛契可夫（1876）及烏舍金（1878）发明的变压器，1881年多里伏—多勃罗佛立斯基发明的三相电，1895年波波夫发明的无綫电等等。

由这些发明所建立起的电工技术就向电路理論提出以下的問題。首先是如何計算交流电路及其元件，其次是如何分析稳态及瞬态过程。

因此在理論方面就有計算自感互感的文獻，海維賽德及米特克維奇的符号法及运算法，柯瓦林克夫的交流在綫路上的傳輸理論等等。到这段期末，电路理論已成为电工基础的主要内容。

第三阶段是在1915年以后。由于电子管（1904）及滤波器（1917）的发明，电工技术获得了更大的成就。無論在电力傳輸、电信技术、无綫电技术等方面，电路理論都得到了广泛的应用。

在1931年以后，网络的問題就分成两大部分。一部分是旧有的分析法，自彼得罗夫、欧姆等就开始直到現在还广泛应用。所謂分析法就是由已知的电路元件及外加电压来求各处电压电流的方法。比如欧姆定律、克希荷夫定律的网孔法节点法，疊加法，补偿法，互易定理等都属于这一部分。

另外一部分是綜合法。所謂綜合法就是由給定的电压电流或其間的关系来求网络构造的一种方法。綜合法是一門較新的科学，因为他更符合实际要求，特性更好，元件更少。因此，近来发展很快。許多人从事这方面的研究，积累了不少的文献。但正因为这是一項新生事物，所以也还存在一些缺点。比如計算工作較比繁重，对元件的要求較高。前者已有不少文獻制成符合一定技术要求的图表，后者在元件制造工艺方面，也有很大的改进。都为綜合法的普遍采用逐步奠定了基础。

应提出的是分析法与綜合法并非截然不同的两事，在发展上是相輔相成的两种方法。

到現在为止，無論是分析法或綜合法，不仅能解决綫性电路問題，而且也逐漸被运用来解决非綫性电路問題。不仅应用在电气方面而且也应用到非电的方面。比如在自动控制系统，在机械学內，都利用机电类比的关系，仿照电网络做成力网络，然后由网络的理論分析計算。

随着新技术的不断发展，电路理論亦正日益发展。到現在为止，已形成独立的一門科学。

① 見“毛泽东选集”第一卷，人民出版社1951年版，第282頁。

② 見“毛泽东选集”第一卷，人民出版社1951年版，第283頁。

第一章 复频率的概念

§1—1 网络的分析

当以电压接通到网络时，网络内各支路中就有电流通过。电流值的大小依外加电源和网络的构造来判定。

当外加电源骤然接通到电路上时，则电路内电流具有稳态分量和瞬态分量。其值可依电路列出微分方程式，解该方程式求得。例如，以直流电势骤接到图 1-1 的 $R-L$ 串联电路，则按该电路可列出

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E$$

的微分方程式。解该式就得

$$i = \frac{E}{R} + A e^{-\frac{R}{L}t}; \quad A = -\frac{E}{R},$$

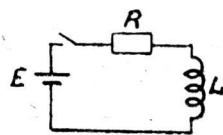


图 1-1

式中第一项系微分方程的特解，属于电流中的稳态分量；而第二项系微分方程的补函数，属于电流中的瞬态分量。

但当外加电势为正弦函数时，显然，解上面的微分方程式就较繁琐。但是如果用指数函数代替正弦函数，则运算将要简化很多。例如，某一电压的表示式是

$$e(t) = |E| \cos(\omega t + \psi), \quad (1-1)$$

上式又可以写作

$$e(t) = \frac{1}{2} |E| \left(e^{j\psi} e^{j\omega t} + e^{-j\psi} e^{-j\omega t} \right), \quad (1-2)$$

设 E 表示电压的复量值， $\overline{E}$ 表示其共轭值，则

$$E = |E| e^{j\psi}; \quad \overline{E} = |E| e^{-j\psi},$$

这样 (1-2) 式就可以写作

$$e(t) = \frac{1}{2} \left(E e^{j\omega t} + \overline{E} e^{-j\omega t} \right), \quad (1-3)$$

或

$$e(t) = \operatorname{Re} [E e^{j\omega t}].$$

如果 (1-1) 式为 $\sin(\omega t + \psi)$ ，则 $e(t) = \operatorname{Im} [E e^{j\omega t}]$ 。

从以上的论述中，看出用指数式代替正弦函数时，会使运算简化很多。但必须取运算结果的实项或虚项，才代表真正的电压函数。或者按 (1-3) 式说，必须在具有 $+j\omega$ 角频的电压外，另加一个 $-j\omega$ 角频的电压才代表真正的电压。

§1—2 网络对正弦电压的稳态响应

设以正弦电压接通 $R-L-C$ 的串联电路。则按上节所述，可列出微分方程式

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = E e^{j\omega t}. \quad (1-4)$$

从数学知上式中 i 的解也将为指数式，可写作

$$i = I e^{j\omega t}.$$

将上式代入 (1-4) 式，就得

$$I = \frac{E}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{E}{Z}.$$

§1—3 網絡的瞬态响应

从§1—1所述，知道当外加电势接通到电路时，电路内电流除去具有与电势角频相同的稳态分量外，还有一个 e^{pt} 形式的瞬态分量。 p 与外加电势的角频无关，却与网络结构及其元件值有关。 p 值可从依网络列得的微分方程式的特性方程求出。例如，外加电势接通到 $R-L$ 串联电路时，其电流的瞬态分量为 Ae^{pt} 形式。 p 值从

$$Lp + R = 0$$

求得。当外加电势接通到 $R-L-C$ 串联电路时， p 值从

$$Lp^2 + Rp + \frac{1}{C} = 0$$

解得

$$p = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} = -\alpha \pm j\omega_0。$$

所以电流的瞬态分量应包含两项，即

$$Ae^{(-\alpha + j\omega_0)t} + B e^{(-\alpha - j\omega_0)t}。$$

依照电路中 R 、 L 与 C 数值间的关系，可以判定这部分瞬态分量是减幅的非周期振荡，还是减幅周期振荡。

对于更复杂的网络，可设(1—5)式中的 e_1 为零，解这一组联立方程式中 p 的根。倘得 n 个根，则瞬态一般表示式为

$$A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots + A_n e^{p_n t}。$$

相仿，如果以 $p'_1, p'_2, \dots$ 表示网络阻抗行列式中诸余式的根，则(1—7)式可写作

$$W = \frac{A_m(p-p_1)(p-p_2)\dots(p-p_m)}{B_n(p-p'_1)(p-p'_2)\dots(p-p'_n)}， \quad (1-8)$$

式中诸 p_k 值称为 W 函数的零点，而诸 p'_k 值称为 W 函数的极点。

既然诸 p_k 值与诸 p'_k 值都是网络结构及其元件值的函数，所以 W 函数用其零点和极点表示出来，也就表示了网络的本性。研究(1—8)式看出，如果 W 表示输入阻抗(或导纳)，当两个输入阻抗具有相同零点和极点时，则两阻抗只差一理想变量器。如果 W 表示转移阻抗(或导纳)，当两个转移阻抗具有相同零点和极点时，则两者只差一常值增益或衰耗。

§1—4 复频率概念

从以上两节的叙述，知道当外加电势接通到网络时，则各网孔的电流为

$$i = i_s + i_t = Re I e^{pt} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots。$$

从上式看出，用以连结网络结构和外加电势的量是变数 p 。

在稳态分量里 p 等于外加电势的角频 $j\omega$ ，该角频 ω 为一实数，称为强迫振荡角频。而 $p_1, p_2, \dots$ 等为网络元件值的函数。例如在 RL 和 RC 电路里， p 为一负实值，而 e^{pt} 代表一简单指数下降的响应。又如在 RLC 电路里， p 则为一复值， $e^{p_1 t} + e^{p_2 t}$ 则可代表一振幅按指数下降的振荡响应。因此，可将诸 p_n 称为自由振荡角频。一般说， p_n 等于复值，而 p_n 为实数或纯虚数时，仅为特殊情况而已。把频率延拓成为复值，就称为“复频率”。这样，就把稳态响应和瞬态响应统一起来了。可说，网络的性能等于复频率的函数。在稳态分量，该复频率等于外加电势的频率(一般说，等于 $j\omega$)，在瞬态分量，该复频率依网络元件值和结构而定。

这里要指明，复频率并不是假想的量，而是有实际意义的数量。设 $p = a + j\omega$ ，则不同的 p 值可用复频率平面 (p -平面) 上的点表示出来，而在 p 平面上不同位置的点代表不同的讯号响应。图 1-2 举出一些在 p 平面不同位置的零点例子，图 1-3 则列出相应于这些零点的时函数，以说明 p 值所代表的讯号的形状。

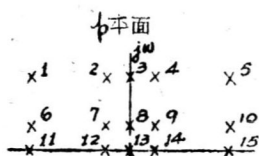


图 1-2

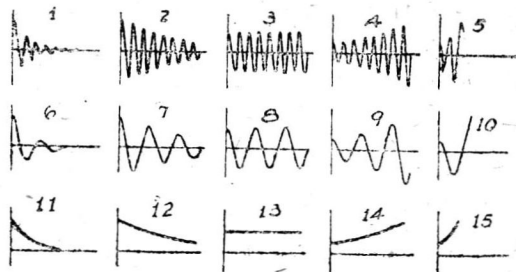


图 1-3

例如，设某电势为一振幅随指数下降的振荡波，则其频率可设用 p_2 表示，当此电势加到 RL 电路上，则瞬态电流的频率将似 p_{12} 的形状。所以，电路内的电流将为

$$i = Ae^{p_2 t} + Be^{p_{12} t},$$

式中 A 和 B 为常数，依网络元件值和外加电势的情况而定。

这里要说明的，从 §1-1 叙述知道，一对 $p = j\omega$ 和 $p = -j\omega$ 的讯号加到网络，才能产生稳态电流，而从 §1-3 讨论，知瞬态中的 p 值一般也是共轭的复值，所以图 1-2 中的零点分布，应该还有负 j 值的一半，这里为了简化，就不画了。

§1-5 阻抗函数和复频率平面

结合以上两节的讨论，可说阻抗是复频率的函数。因此可以利用复频率平面来研究阻抗函数的性能。现在用几个例题说明这点。

例1. 设有一串联 $R-L$ 电路，可写出其阻抗为

$$Z = R + j\omega L.$$

设
则

$$p = j\omega, \quad p_1 = -R/L$$

$$Z = L(p - p_1)$$

(1-9)

(1-9) 式表明该阻抗和电源频率与自由振荡频率之差成比例。

图 1-4 是一个 p 平面。由图看出，此电路的阻抗就等于起于 p_1 点、终于 p 点的向量乘常数 L 。当将 p 点沿 j 轴移动时，由图就可看出阻抗大小和相角随频率变化的情况。

从图 1-4 的图示，同时可看出 $R-L$ 串联电路的稳态响应和瞬态响应。 p_1 点的位置就表明了瞬态电流的曲线。而 p 点移动时， $(p - p_1)$ 向量的变化又决定了稳态电流的形状。

例2. 设有一并连 $R-L$ 电路，仍设

$$p = j\omega, \quad p_1 = -\frac{R}{L}$$

则其导纳为

$$Y = \frac{1}{R} + \frac{1}{pL} = \frac{(p - p_1)}{Rp}$$

或其阻抗为

$$Z = \frac{Rp}{p - p_1} \quad (1-10)$$

这个函数的性能可用图 1-5 复平面说明。此时，分子的 p 可看作向量 $(p - O)$ 。因此，阻抗函数将为向量 $(p - O)$ 和向量 $(p - p_1)$ 的比值乘 R 。由看出，

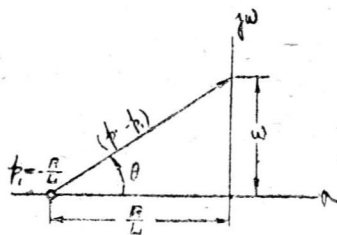


图 1-4

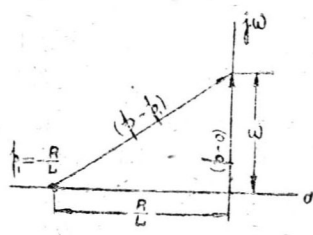


图 1-5