

濾波器

苏联H. Д. 波色著
杜錫銓等譯

人民邮电出版社

濾

波

器

苏联 H. Д. 波色 著

杜錫鈺 等 譯

人 民 郵 電 出 版 社

2471/11

Н. Д. БОСЫЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ФИЛЬТРЫ

ГОСТЕХИЗДАТ УССР 1957

本书先介绍滤波器计算必需的二端和四端网络的基本理论，然后叙述K型、M导出型滤波器的理论与计算。

对格型滤波器、晶体滤波器、无电感滤波器也辟有专章介绍。

近代根据预给的衰耗频率特性寻求滤波器最佳的电路参数的计算方法，本书也结合实际例子，作了专门的叙述。

本书还介绍了滤波器的测量与调谐，书末并附有滤波器的计算公式及图表。

本书可供电信（有线及无线电信）工程技术人員参考，也可作高等学校有关课程的参考教材。

本书由铁道学院杜锡钰 黄明光 王啓寿 孙肇藩 屠 蓉 王文植等同志集体翻译。

滤 波 器

著 者：苏联 Н. Д. 波 色
译 者：杜 锡 钰 等
出版者：人 民 邮 电 出 版 社
北京东四六条13号
(北京市书刊出版业营业登记证出字第〇四八号)
印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂
发 行 者：新 华 书 店

开本 850×1168 1/32
印张 15 页数 240
印刷字数 376,000 字

1952年5月南京第一版
1952年5月北京第二次印刷
印数平装707—3,506 册

統一書号：15045·总714-有131

定价：(11) 3.10 元

序

最初把电气滤波器应用于通信上的是俄罗斯陸軍上尉依格納节也夫 (Г. Г. Игнатъев)，他发明了在同一条导线上同时通电话和电报的方法。这种方法是根据利用最简单的滤波器将不同频率的电话和电报电流分开这一原理的，依格納节也夫于1880年在基輔大学用实物表演了他的发明。

在1895年，俄罗斯科学家波波夫 (А. С. Попов) 发明了无线电，这是长途通信技术发展上的一个大转变。

利用无线电原理，研制了高频多路通信机，能在架空明线上，通信电缆上，电力传输线上以及后来在无线线路上进行多路通信。

在改善有线及无线多路通信机的同时，也改善并创造了新型的电气滤波器。

目前，滤波器的应用极为广泛，并且是各种各样的，以致不能列举其全部应用的范围。

例如在明线及电缆载波通信线路及无线电接力通信线路中都是利用电气滤波器将各通路的电流分开的。利用滤波器可把高频通信机禁在电力传输线上的避免各种干扰。电气滤波器还广泛地应用于技术之中，例如在波形分析器中就須用滤波器来分出欲频

电气滤波器不論在极低或极高频率范围内均可运用。

因为电气滤波器的质量在很大的程度上决定了通信机通信的质量，所以电气滤波器的原理和计算问题引起特别的重视。过去曾經研究过滤波器的有瓦格森耳 (K. W. Wagner)、坎貝尔 (G. A. Campbell)、曹拜耳 (O. J. Zobel) 以及苏联科学家謝略赫 (Э. В. Семенов)。

魏里金 (Я. И. Великин)、柯干 (С. С. Коган) 及利斯多夫 (В. Н. Листов) 等人。

滤波器的理論有两种。

第一种理論在1915年提出，它是以分析理想电抗四端网络的具體电路为基础的。根据这种理論所发展起来的計算滤波器的方法可以計算简单滤波器电路的元件和电气特性。

第二种理論自1937年开始进行研究，它是根据預給的固有衰耗或工作衰耗特性来求滤波器电路最佳的（最合适的）参数作为基础的。根据这种理論，苏联科学家創造了計算滤波器的分析法，这种理論的优点是能够在最少的元件数目下获得滿足預給条件的滤波器电路。此外，它是对梯型及格型滤波器普遍适用的理論。

由于衰耗頻率特性斜率很大的滤波器之存在，就有可能更充分地利用通信綫路，这类滤波器中采用了損耗很小的电感和电容器。用正确的綫圈结构，并采用新的磁心材料，如坡莫合金、鉄矽鋁合金、炭基鉄及新的亚鉄酸盐等磁性材料，可以制成損耗最小的电感綫圈。

在某种場合，由普通的电感和电容所組成的滤波器，由于这两种元件中存在損耗，以致不能得到所希望的电气特性时，可采用損耗极小的晶体諧振体作为滤波器的元件。

近年来，在很多通信机和仪器中采用无电感滤波器，这种滤波器由电阻和电容組成。它与电子管（放大器）联合运用，能在极低的頻率下获得良好的电气特性。例如，可以制成通頻帶中为若干赫而頻率特性很好的狭帶通滤波器。設計制造这种滤波器并不引起任何困难。

为了便于研究滤波器起見，本书首先介紹了学习滤波器所必需的二端网络和四端网络理論。

本书不能說已将电气滤波器的計算和理論問題闡述詳尽了，所以作者非常欢迎并感謝所有对本书的意見，并請將意見函寄出版社。

目 录

序

第一章 二端网络

- § 1 二端网络的基本定义及其分类..... (1)
- § 2 单元件电抗二端网络..... (2)
- § 3 二元件电抗二端网络..... (3)
- § 4 三元件电抗二端网络..... (6)
- § 5 四元件电抗二端网络..... (16)
- § 6 多元件电抗二端网络。一般电抗二端网络..... (23)
- § 7 电抗二端网络的简化..... (27)
- § 8 由預給的頻率特性計算电抗二端网络的元件..... (29)

第二章 四端网络

- § 1 四端网络的基本定义及其分类..... (30)
- § 2 四端网络的参数和一般傳輸方程式..... (32)
- § 3 四端网络的輸入阻抗与特性阻抗..... (35)
- § 4 四端网络的衰耗、相移和傳輸常數..... (38)
- § 5 反射衰耗..... (44)
- § 6 四端网络的工作衰耗和介入衰耗..... (47)
- § 7 四端网络的回波衰耗和失配衰耗..... (54)
- § 8 依特性阻抗匹配原則迭接 (鏈接) 的四端网络..... (56)
- ✓ § 9 基本四端网络电路的参数和傳輸方程式..... (58)
- § 10 四端网络基本电路的等效..... (65)
- § 11 变量器作为四端网络..... (63)

第三章 K型滤波器

- ✱ § 1 电气滤波器的基本定义及分类..... (76)
- ✓ § 2 梯形滤波器的通頻条件..... (77)

§ 3 \ K 型濾波器的定义	(81)
§ 4 \ 低通濾波器	(82)
§ 5 \ 高通濾波器	(92)
§ 6 \ 帶通濾波器	(98)
§ 7 帶阻濾波器	(105)
§ 8 K 型濾波器的优点和缺点	(111)

第四章 导出濾波器

§ 1 获得 m 型濾波器的方法	(112)
§ 2 m 型濾波器的衰耗頻率特性	(116)
§ 3 m 型濾波器的相位特性	(119)
§ 4 m 型濾波器的特性阻抗頻率特性	(120)
§ 5 m 型低通濾波器	(124)
§ 6 m 型高通濾波器	(132)
§ 7 m 型帶通濾波器	(136)
§ 8 m 型帶阻濾波器	(140)
§ 9 m 型濾波器的电路及 m 值的选择	(140)
§ 10 m 型濾波器的优点和缺点	(144)
§ 11 导出型濾波器的繁复节	(145)
§ 12 两系数的 m 型导出帶通濾波器	(145)
§ 13 六元件帶通濾波器	(147)
§ 14 五元件帶通濾波器	(152)
§ 15 四元件帶通濾波器	(155)
§ 16 三元件帶通濾波器	(159)
§ 17 具有两个系数的帶通濾波器的一般特性	(162)
§ 18 mm' 型濾波器	(164)
§ 19 組合濾波器	(170)
§ 20 不对称濾波器	(182)
§ 21 含有自耦变量器耦合电路的濾波器	(190)
§ 22 平衡和不平衡濾波器的电路	(193)

§ 23 ✓	變量器作為帶通濾波器	(197)
--------	------------	---------

§ 24	電氣濾波器中電路和參數的相互關係	(200)
------	------------------	---------

✓ 第五章 格型濾波器

§ 1	格型濾波器通頻條件	(204)
-----	-----------	---------

§ 2	格型濾波器電路的特性	(207)
-----	------------	---------

§ 3	格型濾波器的等效電路	(212)
-----	------------	---------

§ 4	低通濾波器	(215)
-----	-------	---------

§ 5	高通濾波器	(220)
-----	-------	---------

§ 6	帶通濾波器	(224)
-----	-------	---------

§ 7	帶阻濾波器	(237)
-----	-------	---------

第六章 濾波器的工作特性及並聯運用

§ 1	濾波器元件中的損耗對其特性的影響	(239)
-----	------------------	---------

✓ § 2	濾波器電感繞圈中的損耗及其減低的方法	(241)
-------	--------------------	---------

§ 3	電容器內的損耗	(251)
-----	---------	---------

✓ § 4	計及損耗時濾波器的等效電路	(254)
-------	---------------	---------

✓ § 5	元件中的損耗對濾波器衰耗的影響	(255)
-------	-----------------	---------

§ 6	損耗對濾波器特性阻抗的影響	(266)
-----	---------------	---------

✓ § 7	濾波器最佳標稱特性阻抗的計算	(270)
-------	----------------	---------

✓ § 8	濾波器的工作衰耗及回波衰耗	(275)
-------	---------------	---------

✓ § 9	濾波器在電子管電路內的應用	(283)
-------	---------------	---------

§ 10	濾波器中的振幅畸變	(289)
------	-----------	---------

§ 11	濾波器中的相位畸變	(292)
------	-----------	---------

§ 12	濾波器中的非線性畸變	(296)
------	------------	---------

✓ § 13	低通及高通濾波器的並聯運用	(299)
--------	---------------	---------

✓ § 14	帶通濾波器的並聯運用	(310)
--------	------------	---------

第七章 晶体濾波器

§ 1	一般概念	(314)
-----	------	---------

§ 2	壓電效應	(315)
-----	------	---------

§ 3	晶体諧振體	(317)
-----	-------	---------

§ 4	石英晶体片的割切及其特性	(325)
-----	--------------	---------

§ 5	人造晶体	(328)
-----	------	---------

§ 6	晶体諧振體的計算	(333)
-----	----------	---------

§ 7	音頻晶体諧振體	(336)
-----	---------	---------

§ 8	狹帶通晶体濾波器	(333)
§ 9	寬帶通晶体濾波器	(350)
§ 10	帶阻晶体濾波器	(362)
§ 11	差接格型晶体濾波器	(368)
§ 12	晶体低通及高通濾波器	(370)
§ 13	晶体濾波器的穩定度	(372)
§ 14	磁致伸縮濾波器的概念	(373)

第八章 无电感濾波器

§ 1	无电感濾波器概論	(376)
§ 2	帶通与帶阻濾波器	(377)
§ 3	低通和高通RC濾波器	(388)

第九章 濾波器的現代計算法

§ 1	概論	(392)
§ 2	求通頻帶和阻頻帶內的利用系数	(393)
§ 3	濾波器等級及其定义	(397)
§ 4	求阻頻帶內衰耗峯頻率和最低衰耗頻率	(401)
§ 5	計算梯形濾波器的步驟	(405)

第十章 濾波器的測量及調整

§ 1	濾波器測量概論	(416)
§ 2	工作衰耗的測量	(417)
§ 3	固有衰耗的測量	(422)
§ 4	濾波器輸入阻抗的測量	(425)
§ 5	濾波器特性阻抗的測量	(429)
§ 6	反射系数的測量	(429)
§ 7	相移的測量	(432)
§ 8	濾波器非綫性衰耗的測量	(438)
§ 9	濾波器元件的測量	(440)
§ 10	濾波器的調整	(440)
§ 11	測量濾波器電特性时的可能誤差及其消除方法	(450)

附 录

計算各种濾波器节的公式及曲綫总表

參考书刊

第一章 二端网络

§1. 二端网络的基本定义及其分类

有线通信中所采用的各种电路，可以由电阻、电感和电容串联、并联或复联组成，这些电阻、电感和电容叫做元件。

构成闭合电路的电气元件总合叫做回路。

由个别的元件、简单的回路和复杂的回路构成了复杂的电路。因此为了研究复杂电路的电气特性，必须首先研究个别元件及由元件构成的简单回路和复杂回路的电气特性。

凡具有两个端子的，用来联接电源或其他电路的任何复杂电路，都叫做二端网络。

二端网络可以按其各种特征分类。按有无电源可分成有源（即电路中包含电源）和无源（即电路中不包含电源）二端网络。

按二端网络元件的阻抗特性可分成下列几种：

- a) 由电抗（电感和电容）组成的电抗二端网络；
- b) 由具有电阻的电抗元件组成的有耗二端网络；
- c) 由纯电阻组成的二端网络。

由电源输入电阻内的电能变成他种能量而不能复还，因之从能量的观点上可用不断的消耗（吸收）电能来说明电阻的特性。

按阻抗的直线性，可分为线性的和非线性的二端网络。

组成线性二端网络的元件，其阻抗数值与通过其中的电流大小以及加于其上的电压大小、极性无关。属于线性二端网络的有：电阻；具有未饱和铁心的电感线圈；介质常数与电场无关的电容器。

非线性二端网络的阻抗数值与通过它的电流大小以及加上的电

压大小、极性有关。属于非线性二端网络的有：半导体整流器；具有饱和铁心的电感线圈。

当研究二端网络电气特性时，引用下面的定义：

两个电路不同的二端网络，其阻抗或导纳的乘积为一常数者，称为倒量二端网络。

如果在一定条件下可能成为倒量的两个二端网络称为潜在倒量二端网络。

两个电路不同的二端网络，其阻抗或导纳在所有的频率下都能彼此相等，则称它们为等效二端网络。如果它们的阻抗和导纳只在一定的条件下能彼此相等，则称为潜在等效网络。

我们来研究组成滤波器的二端网络的电路及其特性。

§2. 单元件电抗二端网络

单元件电抗二端网络（图1）是二端网络最简单的类型。

电路a所示电感二端网络的阻抗及导纳分别等于：

$$Z_L = j\omega L; \quad Y_L = \frac{1}{j\omega L} = -j \frac{1}{\omega L} \quad (1.1)$$

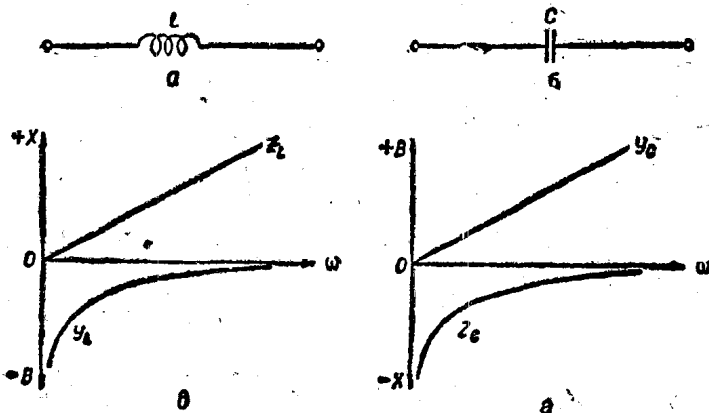


圖 1. 单元件二端网络及其阻抗和导纳的频率特性

电路6所示电容二端网络的阻抗及导纳分别等于:

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C}; \quad Y_C = j\omega C. \quad (1.2)$$

由公式(1.1)和(1.2)可知,带正号的阻抗表示有电感性,带负号的有电容性。反之,带正号的导纳表示有电容性,带负号的有电感性。

由公式(1.1)和(1.2)又可知,感抗随频率的升高而不断增加,并趋向于无穷大,而容抗则逐渐减少,并趋向于零。反之,当频率升高时,电感的电纳减少,并趋近于零,而电容的电纳则不断增加,并趋近于无穷大。

电路a和b中单元件二端网络的电抗及电纳的频率特性,示于图1, c和1, z。

(规定用字母B表示电纳,以资区别于常用的符号b,后者在本书中表示损耗。)

上述二端网络为倒量二端网络,因为对所有频率其电抗或电纳之乘积为一常数,即

$$\left. \begin{aligned} Z_L Z_C &= \frac{j\omega L}{j\omega C} = \frac{L}{C} = R^2 \\ Y_L Y_C &= \frac{j\omega C}{j\omega L} = \frac{C}{L} = \frac{1}{R^2} \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

式中R——常数。

§3. 二元件电抗二端网络

二元件电抗二端网络可以由电感和电容串联或并联组成。

图2a二端网络的阻抗(即串联回路的)等于

$$Z_a = j\omega L_1 - j \frac{1}{\omega C_1} = jL_1 \left(\omega - \frac{1}{\omega L_1 C_1} \right),$$

当在某一频率 ω_{0a} 时, 感抗和容抗相等, 则二端网络的阻抗将等于零, 电路中开始电压谐振。

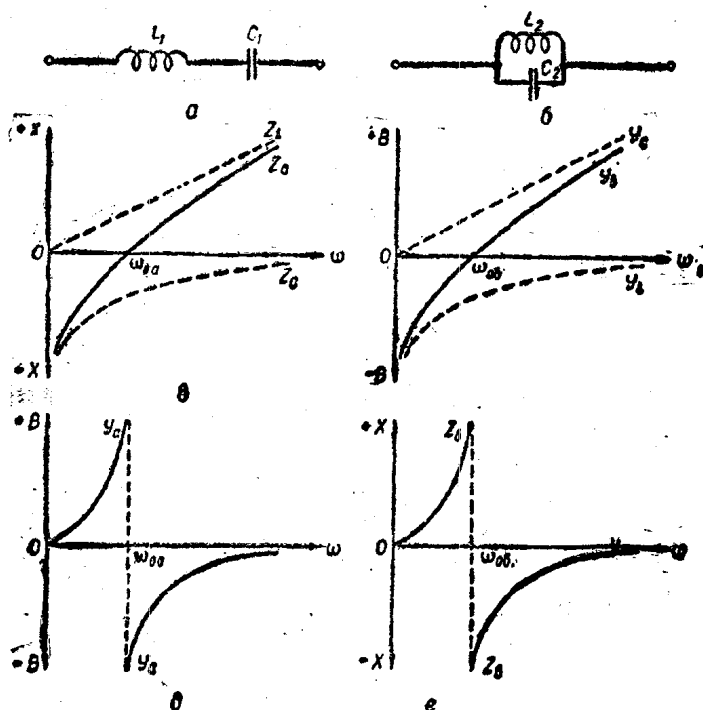


圖 2. 兩元件二端網絡及其阻抗和導納的頻率特性

ω_{0a} 叫做諧頻并等于

$$\omega_{0a} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}},$$

將 $\omega_{0a}^2 = \frac{1}{L_1 C_1}$ 代入上述二端網絡的阻抗公式內, 得

$$Z_a = jL_1 \frac{\omega^2 - \omega_{0a}^2}{\omega} = \frac{L_1}{j} \frac{\omega_{0a}^2 - \omega^2}{\omega}. \quad (1.4)$$

由此公式可知, 在所有低于諧頻的頻率 ($\omega < \omega_{0a}$) 时, 回路阻抗具有电容性, 在諧頻上 ($\omega = \omega_{0a}$)。回路阻抗等于零, 在高于諧

頻的頻率 ($\omega > \omega_{0s}$) 时, 回路阻抗具有电感性。

上述二端网络的阻抗頻率特性, 可以用图解法将感抗 ($Z_L = j\omega L$) 的頻率特性和容抗 ($Z_C = \frac{1}{j\omega C}$) 的頻率特性相加来确定 (图 2, e)。

串联回路的导納是阻抗的倒数, 等于

$$Y_s = \frac{1}{Z_s} = \frac{j}{L_1} \frac{\omega}{(\omega_{0s}^2 - \omega^2)} \quad (1.5)$$

串联回路的导納頻率特性示于图 2, d。

为了确定图 2, d 中二端网络 (并联回路) 的特性, 现在来求其导納。該回路的导納等于各支路导納的总和, 即

$$Y_\delta = j\omega C_2 - j \frac{1}{\omega L_2} = jC_2 \left(\omega - \frac{1}{\omega L_2 C_2} \right)。$$

在某一固定頻率 ω_{0s} 时, 其电感和电容的导納相等, 二端网络的导納等于零, 并在回路中开始电流諧振。

ω_{0s} 叫做諧頻, 对于无耗的回路为

$$\omega_{0s} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}。$$

将 $\omega_{0s} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ 代入上面 Y_δ 的公式中, 得

$$Y_\delta = jC_2 \frac{\omega^2 - \omega_{0s}^2}{\omega} = -jC_2 \frac{\omega_{0s}^2 - \omega^2}{\omega} \quad (1.6)$$

由公式 (1.6) 可見, 电路 δ 二端网络的导納在頻率低于諧頻 ($\omega < \omega_{0s}$) 时, 呈电感性。等于諧頻时 ($\omega = \omega_{0s}$) 为零, 在所有高于諧頻的頻率 ($\omega > \omega_{0s}$) 时, 呈电容性。上述二端网络的导納頻率特性 (图 2, z), 可以用图解法将电感的导納 ($Y_L = -j \frac{1}{\omega L_2}$) 的頻率特性和电容的导納 ($Y_C = j\omega C_2$) 的頻率特性相加来确定。

并联回路的阻抗是导納的倒数, 等于

$$Z_{\sigma} = \frac{1}{Y_{\sigma}} = \frac{1}{-jC_2} \frac{\omega}{\omega_{\sigma\sigma}^2 - \omega^2} = j \frac{1}{C_2} \frac{\omega}{\omega_{\sigma\sigma}^2 - \omega^2} \quad (1.7)$$

研究图 a 和 σ （即串、并联回路）二端网络的阻抗频率特性时可以看出，电压谐振是回路阻抗由电容性转变到电感性（图2, σ ）的转折点，而电流谐振是由电感性转变到电容性（图2, a ）的转折点。

当谐振频率相等时，上述两个二端网络互为倒量网络，因为它们的阻抗或导纳的乘积为一常数，即当 $\omega_{0a} = \omega_{0\sigma}$ 时

$$Z_a Z_{\sigma} = \frac{jL_1}{jC_2} \frac{\omega^2 - \omega_{0a}^2}{\omega} \cdot \frac{\omega}{\omega^2 - \omega_{0\sigma}^2} = \frac{L_1}{C_2} = R^2;$$

$$Y_a Y_{\sigma} = \frac{jC_2}{jL_1} \frac{\omega^2 - \omega_{0\sigma}^2}{\omega} \cdot \frac{\omega}{\omega^2 - \omega_{0a}^2} = \frac{C_2}{L_1} = \frac{1}{R^2}.$$

因此，电路 a 和 σ 中二端网络互为倒量的条件，就是谐振频率相等，也就是 $\omega_{0a} = \omega_{0\sigma}$ 或 $\frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ ，从而；

$$L_1 C_1 = L_2 C_2 \quad \text{或} \quad \frac{L_1}{C_2} = \frac{L_2}{C_1} = R^2. \quad (1.8)$$

比较这两个二端网络的阻抗或导纳的频率特性时，就可看出它们是互为倒量的。

§4. 三元件电抗二端网络

如果在图2, a 二元件二端网络上并联（图2, σ 电路中串联）一个电感或一个电容即可获得一个具有两个谐振频率的三元件二端网络，即具有新的电气特性的二端网络。

在二元件二端网络的任一个元件上，串联或并联一个与其阻抗特性相同的新元件时，则该二端网络的谐振数目不变。当这种二端网络的电路有了这样的变化时，只改变了其元件之一的总值，结果

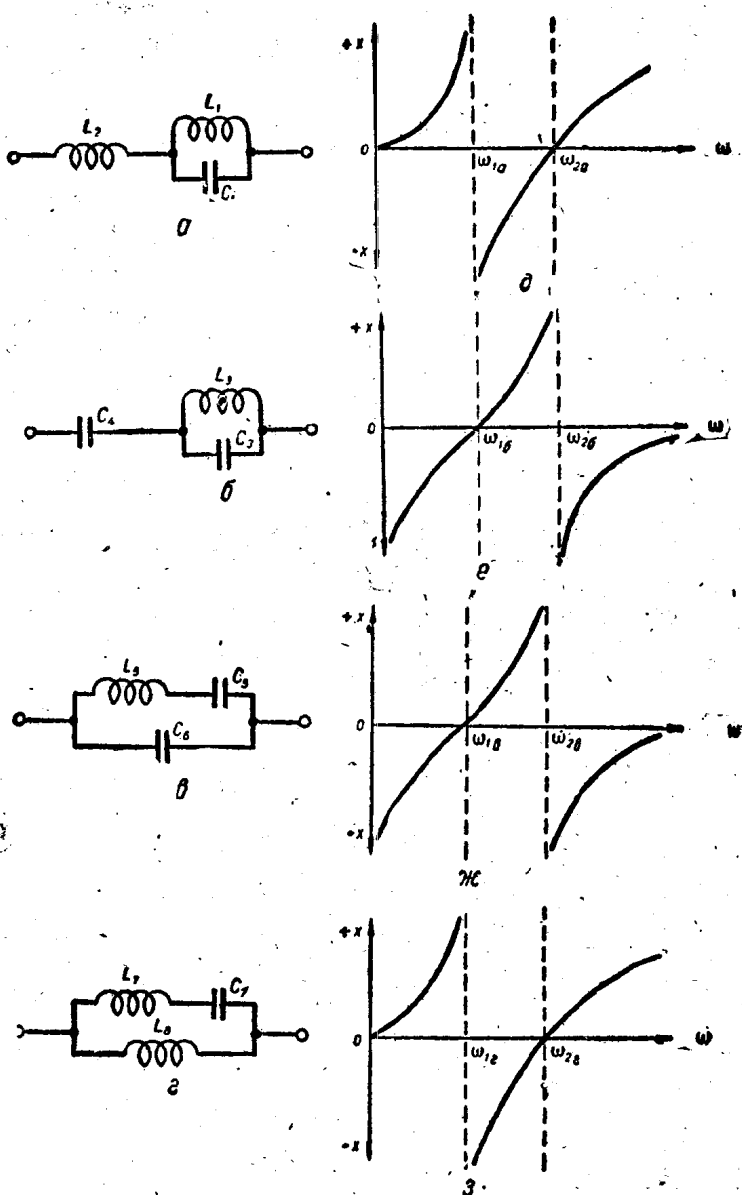


圖 3. 三元件二端網絡及其阻抗的頻率特性

将使諧頻增加或減低，例如，如在圖 2, a 二端網絡電路中串聯一個電感，則其總的電感增加，結果減小了諧頻。反之如串聯一個電容，將使總的電容減小，因而諧頻升高。

根據以上所述可得到以下結論，即由三個元件只能組成如圖 3 所示的四種不同電路的三元件二端網絡。

現在我們來確定圖 3 中電路不同的各個三元件二端網絡的阻抗及導納的頻率特性。

電路 a 的二端網絡的阻抗等於電感 L_2 和並聯回路 $L_1 C_1$ 的阻抗之和，根據公式 (1.1) 和 (1.7) 可以用下式來表示

$$Z_a = j\omega L_2 + j \frac{1}{C_1} \frac{\omega}{\omega_{1a}^2 - \omega^2}, \quad (1.9)$$

式中 $\omega_{1a} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ 為 $L_1 C_1$ 回路的電流諧頻。

因為當頻率 $\omega > \omega_{1a}$ 時，公式 (1.9) 的第二項呈電容性，所以當某一頻率 ω_{2a} 時，即電感 L_2 的感抗和回路 $L_1 C_1$ 的容抗在數值上相等在符號上相反時，開始第二次諧振——電壓諧振。

第二個諧頻 ω_{2a} ，由下式來確定

$$\omega_{2a} L_2 = -\frac{1}{C_1} \frac{\omega_{2a}}{\omega_{1a}^2 - \omega_{2a}^2} = \frac{1}{C_1} \frac{\omega_{2a}}{\omega_{2a}^2 - \omega_{1a}^2}.$$

將 $\omega_{1a} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ 代入上式，並解 ω_{2a} ，得

$$\omega_{2a} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_1}} \quad (1.10)$$

以方程式 (1.9) 表示的電路 a 中二端網絡的阻抗，考慮到方程式 (1.10)，便可改寫成另一種形式：

$$Z_a = j\omega L_2 \left[1 + \frac{1}{C_1 L_2 (\omega_{1a}^2 - \omega^2)} \right] = j\omega L_2 \left(1 + \frac{L_1}{L_2} \frac{\omega_{1a}^2}{\omega_{1a}^2 - \omega^2} \right)$$