

选择性RC系统的理论和计算

苏联 Э.О. 薩 柯 夫 著
邓 頻 喜 譯

人民邮电出版社

選擇性RC系統的理論和計算

苏联 Э. О. 薩柯夫著

邓 頻 喜 譯

人民邮电出版社

Э. О. СААКОВ

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ RC-СИСТЕМ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1954

本書探討了 RC 系統的各个組成部分，將 RC 振盪器和選擇性 RC 放大器加以分類，并闡述了計算与設計 RC 系統的主要問題。

本書的对象是从事于生产阻容式高选择性电子管系統以及將它应用在各种科学和技术目的上的工程师和科学工作者。

選擇性 RC 系統的理論和計算

著者：苏联 Э. О. 薩 柯 夫

譯者：邓 頻 喜

校者：鐘 佐 華

出版者：人 民 郵 電 出 版 社

北京東四六條13號

(北京市書刊出版登記證出字第0148號)

印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂

發行者：新 華 書 店

開本 850×1168 1/32

1953年6月北京第一版

印張 24/32 頁數 121

1953年6月北京第一次印刷

印刷字數 207,000字

印數 1—4,700册

統一書號：15045•總990—無264

定 价：(10) 30 元

序 言

作为正弦波振荡器、谐振放大器和抑制放大器的高选择性阻容式电子管系统(简称 RC 系统)广泛地应用来达到各种科学和技术的目的。

苏联学者在发展 RC 系统的工作中起着重大的作用。

С.Э.哈依金在1930年首先指出在含有电阻和电容的一定的电子管电路中可以得到正弦波振荡。

在В.И.西福罗夫、С.И.捷捷里鲍姆、А.А.李斯金、Г.В.沃依什维罗、К.Ф.捷奥多尔契克以及其他人的工作中得到了很有价值的结果。有许多用普通方法解决不了的技术问题用 RC 系统解决起来相当简单。 RC 系统在由几分之一赫起到数兆赫的频率范围内的质量指标很高,它们又是现有各种选择性系统中最便宜和最简单的。

尽管是这样,但到最近为止的文献中还没有对这种系统进行理论和计算方面的系统论述。本书便是企图填补上述空白的一个尝试。

除了系统地介绍各种正弦波振荡器、谐振放大器和抑制放大器的电路以及在那些电路中发生的物理过程外,本书还叙述了 RC 系统及其各部分的一般理论、研究方法以及工程计算方法。

作者希望本书能对科学工作者、工程师或学生在进行他们的工作或学习时有所裨益。此外,本书不可避免地会有许多缺点。

编辑Л.Б.斯列波扬教授、审阅者А.А.李斯金技术科学付博士给予作者许多宝贵的指示和建议,Н.Г.薩柯娃工程师帮助作者准备原稿付印,作者谨向他们表示谢意。

目 录

第一章 緒言	1
1-1 定义、应用范围和特点	1
1-2 电路的簡單介紹及其工作原理	2
1-3 RC 系統的分类	8
第二章 RC系統的理论	9
2-1 一般物理方面的理解	9
2-2 RC 系統的方框圖及其分析	17
2-3 基本方程式的分析	21
2-4 綫性四端網路在某一頻率附近的特性	22
2-5 自激振盪和电位自激振盪系統的方框圖和基本方程式	25
2-6 振盪	26
2-7 再生	29
2-8 去再生 (抑制)	31
2-9 諧振	33
第三章 RC电路	34
3-1 用途和分类	34
3-2 基本关系	36
3-3 RC 电路的等效电路	37
3-4 α 的通式的确定	38
3-5 各种参数的計算	41
3-6 第Ⅰ类 RC 电路	43
3-7 第Ⅱ类 RC 电路	48
3-8 三节电路	49
3-9 四节电路	57
3-10 分佈常数的 RC 电路 (“ R_C 綫”)	66
3-11 第Ⅲ类 RC 电路	69
3-12 Ⅲa小类 RC 电路	70
3-13 Ⅲb小类 RC 电路	75

3-14	■ 小类 RC 电路	80
3-15	作成振荡 RC 系统的回授电路	88
第四章	RC 系统的放大器和辅助电路	101
4-1	RC 系统的放大器	101
4-2	辅助电路	107
4-3	调整电路	108
4-4	稳定电路	110
4-5	控制电路	120
4-6	耦合电路	124
第五章	正弦波 RC 振荡器	124
5-1	分类和基本原理	124
5-2	放大器类型和回授电路类型间的匹配	127
5-3	由放大器引起的频率变化	130
5-4	振幅稳定的条件	133
5-5	振幅的稳定性	135
5-6	谐波	137
5-7	RC 振荡器的质量指标	138
5-8	多相振荡器	142
5-9	反相振荡器	147
5-10	零相移振荡器	149
5-11	各种 RC 振荡器的评比和典型电路的选择	157
5-12	RC 振荡器的技术计算	166
5-13	计算 RC 振荡器的例子	177
第六章	选择性 RC 放大器	183
6-1	分类	183
6-2	再生放大器的基本原理	184
6-3	最大增益, 增益最大时的频率, 再生放大器的选择性	186
6-4	增益, 选择性和再生频率与调整系数间的关系	189
6-5	再生选择性放大器指标的稳定性	190
6-6	再生选择性放大器的质量指标	192
6-7	多相再生器	195
6-8	反相再生器	199

6-9 零相移再生器	200
6-10 各種RC再生器的評比	210
6-11 諧振RC放大器	213
6-12 抑制RC放大器	220
6-13 選擇性RC放大器的評比與典型電路的選擇	225
6-14 選擇性RC放大器的技術計算	230
6-15 計算選擇性RC放大器的例子	234
附錄 本書中常用的符號	240
參考文獻	241

第一章 緒 言

1-1 定义、应用范围和特点

作为正弦波振荡器、选择性滤波器和抑制滤波器的电子管选择性电路，广泛地应用在各种科学和技术中。具有电感电容回路的振荡器和滤波器（ LC 系统）应用最广。在射频时， LC 系统的质量指标很高，而且价格便宜、结构简单。但是，将 LC 系统应用在音频范围时，便会产生各种困难，因为在低频时用 LC 系统不能得到质量高而体积小的回路。

在低频时，时常采用变频（差频）系统。这种系统的优点是所有波段都可以合用一个刻度。但是，它们也有严重的缺点。第一，这种系统的频率稳定度不高，因为差频振荡器中的高频略变一些便会使低频发生很大的变化。第二，为了避免振荡器间的捕捉现象，必须小心地去耦和隔离。这样便会提高造价并增大体积。第三，必须定期用与标准振荡器比较或校验零点的办法来校验刻度。第四，需要有能将振荡器的频率和许多组合频率抑制掉的滤波器。

在一赫和几分之一赫的频率范围内，采用变频式的结构实际上是不可能的。这些频率，我们用很复杂的结构（例如采用旋转式电容器）还能产生出来，但要用 LC 滤波器来分离或抑制它们直到现在还不能实现，而选择性 RC 系统就没有这些缺点。

所谓选择性 RC 系统就是含有电阻和电容的电子管线路，这些电阻和电容器接得能在一定的条件下，使整个设备对一定频率的正弦波有很高的选择性。由于其组成元件（电阻和电容）很稳定，并由于采用强负回授使得电子管参数很稳定，这种系统可以获得足够高的总稳定度。

RC 系统在由几分之一赫到数兆赫的频率范围内的质量指标很高，同时又是现有各种系统中最便宜和最简便的。因此，这种系统

应用得越来越广泛。

测量上用的現代音頻振盪器几乎都是 RC 型式的 (ЛИГ-19; 3Г-1; ЛМ-73; 200-с 等等), 其頻率範圍由 0.5 赫到 10 兆赫。典型的質量指标如下: 頻率不穩定度 $\frac{\Delta f}{f} \leq 3\%$, 諧波系数 $k_h \leq 1\%$, 輸出电压变化 $m \leq 1$ 分貝 (大約 10%)。这种振盪器不需要零調整。頻率的变化在有些型式的振盪器中是連續的, 而在另一些型式的振盪器中則是間斷的。

選擇性 RC 濾波器具有諧振曲綫, 其質量因数在固定頻率时为数百, 而在可变頻率时則为数十。用这种系統很容易在数赫到数兆赫的頻率範圍內得到頻移寬度很狹的調頻波。要使振盪器和濾波器得到頻率偏移很大 (直至最低頻率) 的調頻也將容易得多。

1-2 电路的簡單介紹及其工作原理

RC 系統是在 LC 系統已經完全建立起来并且显露出其优点和缺点的时候开始發展的; RC 系統开始应用在等幅波振盪器中, 后来才用作諧振放大。还在本世紀 20 年代的中叶, 便已經注意到在一定条件下, 在弛張振盪器、多諧波振盪器、 RC 耦合放大器等中出現了正弦波振盪。但是, 这些被觉察到的現象沒有在实际中应用, 只不过看作是干扰基本过程的、附屬的、寄生的現象。

1930 年, С. Э. 哈依金 [文献 1] 發表了在某些条件下, 一定的弦張振盪器电路 (圖 1-1) 会产生正弦波的意見。这个电路包含一个以并联电路 R_2C_2 和串联回授电路 R_1C_1 为負載的兩級直流放大器, 它本身形成一个閉合系統。

在这样的閉合系統中产生等幅正弦波的必要而且充分的条件是幅度平衡和相位平衡。这就是說, 如果將閉合系統在任何一处分切開, 并按照能量运动的方向, 在系統的一端加上电动势, 而在另一端測量电压, 那末在自激頻率上輸出和輸入电压的大小相等, 相位也相同。在所給电路中, 这些条件都能滿足, 这是由于在某个頻率

时, 并联电路 R_2C_2 引起的电压相移和串联电路 R_1C_1 所产生的相移相反, 而在 R_1C_1 电路中的电压损失则由整个电路的增益填补的缘故。在实际中并不应用这种电路。

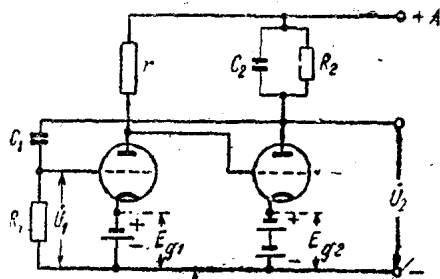


圖 1-1 最初的 RC 振盪器中的一種

1934年出現了第一個適用於实际的 RC 振盪器 (參看文獻 2), 其電路如圖 1-2 所示。因為它能同時產生相位彼此相差 120° 的三種振盪, 所以叫做多相振盪器。這種電路是電阻電容耦合的三級放大器, 其輸入端和輸出端相連。在一定的增益下可以產生幾乎是正弦波的振盪, 其振盪頻率可以很低 (30 秒振盪一次), 也可以很高 (每秒 500 千赫)。相位平衡這個條件由耦合電路 RC 的作用而得到滿足。在自激頻率時,

每一個耦合電路 RC 使相角移動 $\frac{\pi}{3}$, 這樣, 總相移就等於 π , 而

電子管本身產生的總相移為 3π 。顯然, 在閉合電路開口處的兩端總的相移是 4π , 即兩端電壓同相。電阻 ρ 用來消除瞬時現象, 但經驗證明這是不必要的。這種系統, 在欠激勵狀態下可以用作諧振放大器。

1936 年 B. H. 西福羅夫進行了“反相”振盪器的理論研究 (參看文獻 3)。西福羅夫所用的電路如圖 1-3 所示。這種電路用三節 RC 迴路來實現產生振盪所必需的電子管輸入電壓和輸出電壓相差 180° 的相移。

這種電路的主要缺點是振盪狀態的臨界性, 而這種臨界性引起振盪波形和振幅的不穩定。所以, 隨後的研究者都是致力於消除這些缺點。

有好幾種著作都是研究“多相”振盪器的, 而且所用電路有了許多改進。其中最重要的一個改進乃是應用慣性非線性元件 (鎮流管, 白熾電燈 [參看文獻 4] 或熱變電阻) 來獲得振幅的自動穩定。

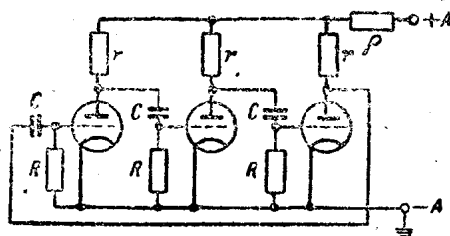


圖 1-2 多相振盪器

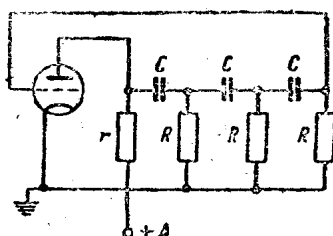


圖 1-3 反相振盪器

有許多人進行過反相振盪器的試制和研究(參看文獻 5, 30, 33)。在反相振盪器中也採用了振幅的自動穩定, 這是靠着延遲自動增益調整電路(參看文獻 5)來實現的。這個改進大大提高了振盪器的質量和穩定度。

反相振盪器也能够在音頻範圍內有成效地用來獲得頻移寬度較大的調頻(4M)(參看文獻 6)。

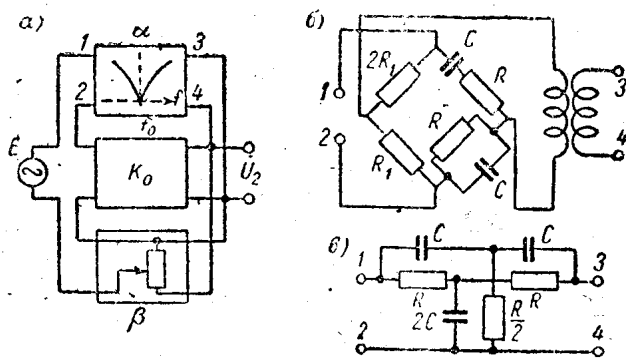


圖 1-4 雙 T 型橋式選擇性電路

1938 年出現了一種叫做雙 T 橋式選擇性的電路(圖 1-4a)(參看文獻 7), 這種電路由無失真放大器 K_0 和與頻率有關的電壓負回授電

路 α 組成。這種電路有兩個方案如圖 1-4b 和 1-4c 所示。在某個頻率上(普通所謂准諧振頻率), 其傳送系數等於零, 而在距離這個頻率很遠的頻率上便等於 1。電路的工作原理是: 在准諧振頻率時, 回授電路不起回授作用, 因而放大器的增益最大。在去諧時產生回授作用, 增益急速減小(在增益系數很大時), 直到接近于

1. 因此, 这种系统可以用作选择性滤波器, 而且其相对通带在一定频率范围内可以固定不变。如果再加上正回授电路 β , 那末这样的电路将产生几乎是正弦波的振荡。这种电路的缺点是必须用增益系数大的直流放大器。

有好几种著作(文献8, 32)对这种电路进行了理论上和实验上的研究, 研究了各种各样的方案。Л.С.古特金的论文(参看文献8)讨论了这种电路工作稳定性的问题。

图1-5所示的电路就是根据这样的原理工作的(参看文献11), 这种电路可以得到直线性频移为 $\pm 50\%$ 的正弦波音频调频。

在1939年出现了

图1-6(参看文献10)所示的电路, 这种电路得到广泛应用, 一般叫它为RC桥式电路。在这种电路中, 将负回授和振幅自动稳定作了适当的配合。这种电路由普通的两级电阻电容交流放大器和RC桥式电路组成。电桥的左半边

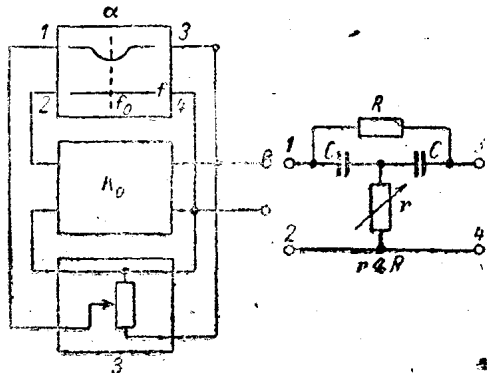


图 1-5 宽频移RC振荡器

实现与频率有关的回授, 而电桥的右半边则实现与频率无关的回授。电桥左半边的传递系数在谐振频率上最大, 而且是实数。如果同时右半边的传递系数略小于左半边, 那末电路便会在谐振频率上产生自激振荡。振幅自动稳定用负回授电路中的白炽灯 π 来实现。白炽灯灯丝的电阻是通过它的电流的有效值的增函数。这样, 加在电桥上的电压发生变化时便会引起与它的作用相反的回授系数的变化, 使被破坏了的平衡能自动恢复过来。如果用普通电阻来代替白炽灯灯丝, 那末在没有自激的情况下这个系统便是谐振放大器。

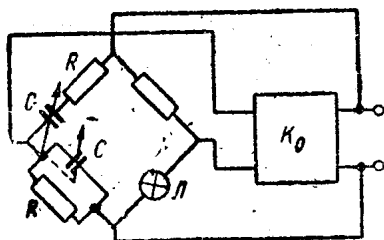
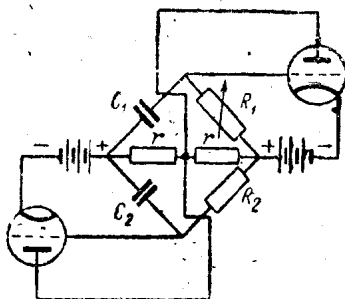


圖 1-6 RC 橋式電路

圖 1-7 兩級橋式電路
 $r \ll R_1, R_2; R_1 C_1 \neq R_2 C_2$

1940年B.И.西福罗夫首先研究了RC系統的綫性理論（參看文獻12）。同時，他証明了這種系統有諧振性質。1941年A.A.李斯金（參看文獻13）用圓圖的方法首先得出電路在放大工作情況下的各種關係。

有許多文獻討論了這種型式的各種振盪器（參看文獻14, 15），這些振盪器的頻率範圍一般在20赫到20千赫之間。也討論了其他頻率範圍如1.8赫到100千赫和0.1赫到1000赫的設備。在這些文章中也講述了關於由10赫到10兆赫的振盪器的知識。頻率範圍分段係數一般等於10，但也有分段係數較大（約等於15）的電路。頻率的變化可以用可變電阻或可變電容器來獲得。

大多數現代測量儀器都是採用上面介紹過的電路。

RC 橋式電路可以用來獲得頻移不很大（4兆赫以下）的高質量調頻（參看文獻16）。

也還有人提出了根據同樣原理的其他電路（參看文獻17, 18），如圖1-7和1-8所示。它們的特點是：在輸出電壓有滿意的波形和穩定度時，可以只用一個可變電阻來獲得直到20倍的較大的頻率範圍。

具有負阻抗的電子管的应用引起了負互導管RC正弦波振盪器電路的出現（參看圖1-9）。在這種電路中，電子管輸入阻抗等於

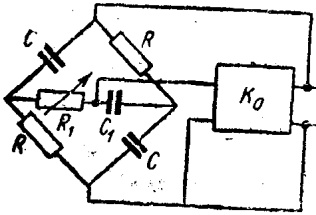


圖 1-8 用一个可变电阻的桥式电路
 $R_1 \gg R$; $C_1 \ll C$; $RC \approx R_1 C_1$

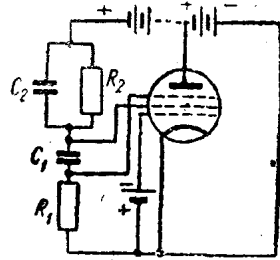


圖 1-9 真空管 RC 振荡器

负电阻和自感并联。因此，也可能产生正弦波的振荡。

RC 系统的进一步发展便出现了用一个振荡迴路的电路（参看文献19, 20）。这种电路具有谐振性质，能自由振荡，但不能自激，如图10所示。其原理是根据电压的特殊谐振。在某一个频率上，输入电压($\dot{E}$)和输出电压($\dot{U}_2$)在栅极电阻上同时作用而产生的电流（因而也是电压）与输入电压同相，并且达到最大。这种电路可以在桥式电路中用作回授电路。

A.A. 李斯金在1948年提出了一种如图1-11所示的电路（看文献20），这种电路的性质与上述性质相类似。其电子管作用如一个

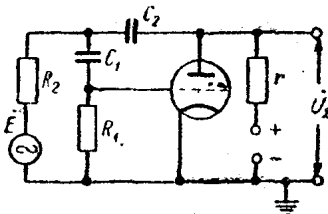


圖 1-10 谐振 RC 系统
 $r \ll R_1, R_2, R$

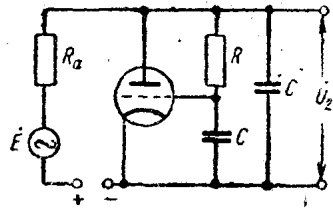


圖 1-11 有电阻管的 RC 系统

电感，使系统具有谐振性质。如果适当地选择元件的数值，那末等效迴路的质量因数可以比大得多，作者证明，在桥式电路中采用这种电路作回授时，在其他条件相同的情况下可以得到比用 RC 桥式电路的 RC 系统高 9 倍的选择性。

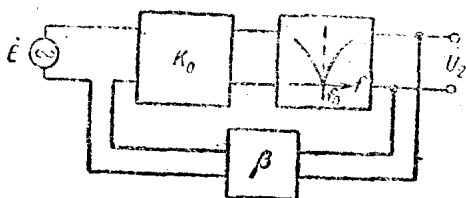


圖 1-12 控制 RC 系統的方框圖

如Г.В.沃依斯杰尔罗在1946年所証明的,用 RC 系統可以获得狹的頻帶抑制。他建議用如圖 1-12所示的方框圖来达到这个目的。在这种电路中,双 T 式电桥在某一个

頻率上有抑制作用,还可以用强的电压負回授来进一步將頻帶縮狹。

在結束时,还应该指出有关 RC 系統的一般性的重要著作。在这些著作中,首先是K.Φ.特奥多尔茨克的一系列的著作(參看文献22-27),它們研究了具有慣性非綫性的自激振盪系統(文献22),以及关于三次和四次正弦波的自激振盪系統的問題(文献25),并給出了某些 RC 振盪器的非綫性理論(文献27)。此外,还可以提到C.H.捷捷里鮑姆的著作(文献28),在这篇論文中作者第一次介紹了一系列的电路,并將 RC 系統当作具有負阻抗的系統来分析。

1-3 RC 系統的分类

对主要著作和电路进行了簡要的介紹后,可以得出下面的結論来:

1) 所有 RC 系統都是由放大器和用 RC 迴路作成的回授电路組成。

2) 系統的特性主要是由回授电路来决定,而放大器(电子管)只起輔助作用。

RC 系統可以按其特性分为下列三类:

1. 正弦波自激振盪系統(圖1-1-1-9)。
2. 他激振盪(諧振)系統(圖1-10-1-11)。
3. 抑制系統(圖1-12)。

第一类系統可以用作振盪器,但在沒有自激的情况下則可用作濾波器。在用作濾波器时会有再生作用,这时这种系統可以叫做电

位自激振盪系統。

第二種系統可以用作選擇性濾波器。它們不能自激，也可以接在自激振盪電路中或抑制電路中作回授電路。

最後，第三類系統可以獨立用作帶除濾波器或加在振盪系統中作回授迴路。

將自激振盪按自激頻率時 RC 迴路中輸出電壓和輸入電壓的相移來分類是最方便的。

因此， RC 系統自激振盪器可以分為下列各種：

甲) 多相系統 ($\psi_0 = \pm \frac{\pi}{N}$) (圖 1-2)，其中 ψ_0 是每一級 RC 迴路的相移，而 N 是迴路的數目，等於相移次數。

乙) 反相 RC 系統 ($\psi_0 = \pm \pi$) (圖 1-3)。

丙) 零相移 RC 系統 ($\psi_0 = 0$) (圖 1-4—1-10)。

最後， RC 系統還可以根據其他特徵來分類，如根據其用途，工作原理，以及放大器型式等來分類，但是，這樣的分類方法比較少用，而且對研究工作來說也是不方便的。

第二章，RC 系統的理論

2-1 一般物理方面的理解

現在要研究的系統總是包括兩個主要部分：1) 電子管放大器，2) 由電阻和電容器組成的迴路，這個迴路將一部分電能由放大器輸出端送到輸入端。在一定的條件下，這些系統就會象自激振盪系統、電位自激振盪系統或只能存儲一種能量的正弦波諧振系統那樣來傳送能量。

系統中所包含的是電能儲存器（電容器）還是磁能儲存器（自感），這在原理上是沒有區別的。但實際上使用電容器比較方便些。因此，我們只限於研究 RC 系統，而不研究 LC 系統。

初看起来难以相信：只含有非周期性元件的系统可以具有固有振盪。但是，要提醒一下，能量在两个储存器间进行交换时，在这个系统中便会出现固有振盪。同时，当一个储存器的能量最大时，另一个储存器中能量便最小，即两个储存器中能量的变化相差一个相位。例如，由于具有两种型式的能量储存器，所以在电振盪迴路中能进行电能和磁能的互换，而在时钟的摆动中，则会进行物体的动能和位能的互换，等等，这就是所谓振盪的自然形式。

但是，利用一种储存器和电阻，相移就能用人工的方法产生，因而振盪也能用人工的方法产生。为了补偿能量的损失，在系统中加进能源（电子管放大器）。在这种情况下，同样也能产生能量的互换，但只是一种型式的储存器的能量（例如 RC 系统中各个电容器的电场能）发生互换。

研究 RC 系统可以用列出并解出微分方程的方法来进行。这种方法是最一般的，利用它可以得到系统中所发生的过程的全部概念（原则上是这样，如果微分方程能解的话）。但是对实际研究来说，大多数 RC 系统的微分方程常常超过二阶，这种方法便显得很复杂和困难了。因此，我们只是用它来得到关于 RC 系统中变化过程的最一般的概念，而以后实际研究正弦波振盪的 RC 系统时，我们采用的是大家都熟知的符号法。

在一般情况下，RC 系统中的变化过程可以写成 n 阶的非线性微分方程：

$$\sum_{k=0}^{k=n} A_k(x) D^{(k)}(x) = f(e), \quad (2-1)$$

其中 x 是一个量，表征系统中的变化；

e 也是一个量，表征外界作用量；

$A_k(x)$ 是一个系数，是系统中的变化的函数；

$D = \frac{d}{dt}$ 是运算符。