

高等学校教学用书

無線电接收設備

下 册

В. И. 西福罗夫著

高等教育出版社

高等学校教学用书



無線电接收設備

下 冊

В. И. 西 福 罗 夫 著
陈炳南 刘国棟等譯

高等教育出版社

下 册 目 录

第十三章 無線电接收机的电路	567
1. 再生、原理和电路	567
2. 再生电路的非直线性效应	572
3. 超再生的一般原理	578
4. 超再生电路的特性	582
5. 超再生电路的类型	589
6. 直接放大式接收设备	592
7. 超外差式接收机	594
8. 超外差式接收机谐振电路的跟踪	605
第十四章 無線电接收时的干扰	623
1. 干扰概論	623
2. 天电干扰	625
3. 工业干扰	630
4. 無線电台的干扰	636
5. 干扰对無線电接收机影响的分析	638
6. 抗干扰的無線电接收机的电路	644
第十五章 無線电接收机中的人工控制及自动控制	652
1. 接收机的調諧方法	652
2. 接收机的自动調諧与微調	659
3. 自动增益控制(APV)的原理及电路	669
4. 自动增益控制的計算	679
5. 無線电接收机中的人工控制	683
6. 拟定和計算具有自动增益控制的接收机方框圖的例子	686
第十六章 無線电接收机中的瞬变过程	698
1. 瞬变过程概論	698
2. 研究瞬变过程的方法	694
3. 已調制电压通过振荡系統的規律	707
4. 振荡系統中的瞬变过程	709
5. 射頻脈冲通过振荡系統	718
6. 振荡系統的最佳頻帶	724

第十七章 無線电接收机的一般特性	727
1. 灵敏度及灵敏度特性曲线	727
2. 超高频無線电接收机的灵敏度	731
3. 选择性及选择性特性曲线	740
4. 失真特性曲线	746
5. 自动增益控制、稳定性及交流声的特性曲线	749
第十八章 調頻信号的接收方法	754
1. 調頻概論	754
2. 限幅器及頻率檢波器	757
3. 接收調頻信号时干扰的影响	768
4. 接收調頻信号时的失真	775
5. 应用于調頻信号接收机中的中頻放大器及外差振蕩器的特点	777
第十九章 脉冲信号接收机	779
1. 雷达接收机概論	779
2. 雷达接收机的电路与特点	786
3. 用脉冲傳送無線电话信号概論	798
4. 脉冲調制的种类	804
5. 用脉冲时間調制进行多路無線电话通信时信号的接收	808
6. 脉冲幅碼調制的多路無線电话通信时的信号接收	818
第二十章 电视接收机	824
第二十一章 各种用途的無線电接收机的特点	846
1. 無線电广播及無線电话接收机	846
2. 单边帶無線电话接收机	855
3. 同步接收的無線电接收机	861
4. 無線电报接收机	868
5. 無線通信接收机	891
第二十二章 無線电接收技术的发展阶段、任务及問題	896
附录 接收放大管和电子器件的主要数据	907
参考書刊	918

第十三章 無線電接收机的电路

1. 再生、原理和电路

圖 353 表示一个最簡單的利用再生的电路。外来信号的高頻电流流过天綫綫圈 L_A 时，在 LC 諧振电路內感应一电动势 E (圖 354)。如果把諧振电路調諧到外来信号的頻率，那么很显然地諧振电路內的电

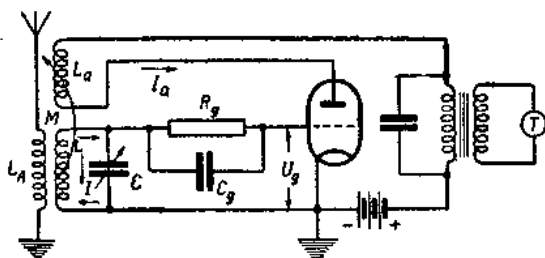


圖 353. 最簡單的再生接收机电路。

圖 354. 圖 353 电路的电压和电流的向量圖。

流 I 將与电动势 E 同相。当电流 I 流过电容器 C 时，产生一相位比它滞后 90° 的电压 U_g 。实际上这个电压全部加于电子管的栅極上，因为电容器 C_g 对于高频电流的容抗很小。假設陽極电路的外部阻抗远小于电子管的內阻，我們就可以認為陽極电流 I_a 和栅極电压的相位近乎同相。当电流 I_a 流过陽極綫圈 L_a 时，將在 LC 电路內感应一电动势 E_{06p} ，即所謂回授电动势，因为它是由陽極电路与栅極电路間的回授产生的。很显然，回授电动势对电流 I_a 而言，在相位上移动了 90° 。如适当地选择綫圈 L_a 的繞綫方向，則可以使电动势 E_{06p} 超前电流 I_a 90° 。

这样，当外来电动势 E 加于 LC 諧振电路时，就可在其中得到一个

和电动势 E 同相的附加的回授电动势 E_{06p} 。因此，为了在 LC 諧振电路內获得某一定强度的电流，有回授时所需加上的外来电动势比沒有回授时要小。回授愈强，則要在諧振电路內得到同一强度的电流所需加至諧振电路中的电动势愈小。換句話說，由于回授作用，諧振电路的电阻好像减小了。

如写出电流和电压的方程式，將不难求得諧振电路的电阻减小的程度。对上述最簡單的电路來說，可写出

$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{\dot{E} + \dot{E}_{06p}}{r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \\ \dot{E}_{06p} &= j\omega M \dot{I}_a = j\omega M S \dot{U}_g = j\omega M S \frac{1}{j\omega C} i \end{aligned} \right\}$$

式中 r 、 L 和 C 是諧振电路的参数， M 是諧振电路的綫圈 L 和回授綫圈 L_a 間的互感，而 S 是电子管的互导。

把第二式代入第一式，并求 i 的解，得

$$i = \frac{\dot{E}}{\left(r - \frac{MS}{C}\right) + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$$

从这关系式中可以看出，考虑回授的影响时，諧振电路的等效电阻將为

$$r_a = r - \frac{MS}{C}, \quad (491)$$

即諧振电路的等效电阻是由两个分量组成的——諧振电路的自身电阻 r 及因回授而产生的电阻。

因此，利用再生时，可以大大降低諧振电路的电阻，因而可以使諧振电路中的振荡电压增大，并提高它的选择性，当然这时諧振电路的通頻帶也减小了。为了选择最佳的回授，通常將回授作成可以改变的。

例如在圖 353 的电路中，綫圈 L 和 L_a 就是可以相对地移动的。

当已調制的电动势作用于天綫时， LC 諧振电路中(圖 353)也产生

一已調制电压，經過柵極檢波后，在陽極电路內产生一低頻电流。这电流流过变压器的初級綫圈，在次級綫圈內感应一电压，这电压再加以低頻放大器，并用普通的方法加以利用。

必須注意到，回授的影响远不能局限于單純的諧振电路电阻的减小。由于电子管的特性曲线是非直綫性的，所以在再生电路內就發生了一系列必須考慮到的复杂現象。这些現象將在以后討論。

再生电路可用来接收無線電話和电报。

当接收無線電話时，这样选择回授，使得諧振电路的等效电阻为正的。利用再生，能够提高無線电接收机的灵敏度和选择性。

当接收等幅波的無線电报时，回授应该这样选择，即使振荡电压不大时仍能保証 $r_0 < 0$ ，也就是以产生振荡为宜。因此，在外来信号的作用下，諧振电路中产生两个电压——一个是因自激而产生的振荡电压，一个是外来信号电压。这样，当諧振电路对外来信号有某些失諧时，就产生差拍，經檢波后得到低頻电压和电流。所以在接收無線电报时，利用再生不仅能提高灵敏度和选择性，并且还用来把高频电流变为音响收听所需要的低頻电流。

这样，在音响收听等幅波的無線电报时（根据圖 353 的电路），同一个电子管要完成几种作用：产生振荡，用回授来放大外来高频信号，把高频信号变为低頻信号以及放大低頻。用一个电子管同时完成上述作用的無線电接收称为自差接收，而相应的电路称为自差电路。

上述电路（圖 353）的缺点，是难于得到均匀的回授控制。以电容器控制回授的电路在这方面的效果要好得多，圖 355 所示即为一个以电容器控制回授的电路。在这电路中，回授是利用可变电容器 C_0 来控制的，这时綫圈 L 和 L_0 間的互感保持不变。

为了說明以电容器控制回授的电路的作用原理，应该注意在电路中有两种回授。一种是由陽極电路中的綫圈和諧振电路綫圈間的互感所引起的回授，它减小着諧振电路的电阻。另一种是由柵極—陽極間

的電容 C_{ga} 所引起的回授，它增大着諧振電路的電阻，因為當陽極電路內為電容性負載時，電子管的輸入電阻（即柵極—陰極兩端間的電阻）是正的。

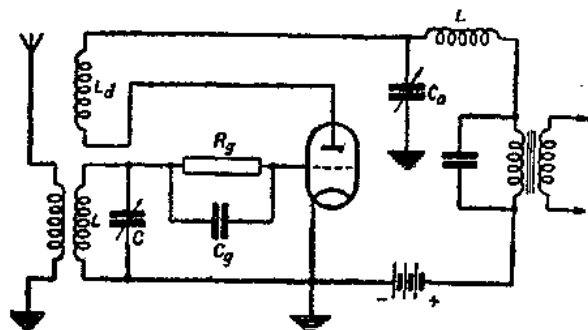


圖 855. 以電容器控制回授的再生電路。

顯然，改變回授電容器 C_a 的電容量時，就引起陽極負載電抗的改變，這也就引起電子管輸入電阻的改變。因此，變更 C_a 的電容量，就可改變由於電子管輸入電阻的影響而引進於 LC 諧振電路的電阻。

如果把可變電容器 C_a 轉到電容量最小的位置，則通過電容 C_{ga} 的回授最強，因為引入 LC 諧振電路中一很大的正電阻，這個電阻大於由電感回授而引入諧振電路的負電阻，這就是說，計及兩種回授的作用後，諧振電路的總電阻是正的。

如果把可變電容器 C_a 轉到電容量最大的位置，則通過電容 C_{ga} 的回授較弱，因為引入 LC 諧振電路內的正電阻很小。這時候考慮全部回授的作用後，諧振電路的總電阻將是負的，因此電路產生自激。所以變更回授電容器 C_a 的電容量，就可以改變 LC 諧振電路的總電阻。

上述圖 355 電路的作用的解釋是 А. В. 斯列潘教授所作的，他首先注意到了通過柵極—陽極間電容的回授的重要作用。從前這種電路內回授的控制被認為是由於改變了線圈 L_a 內的高頻電流的大小。換句話說，是認為在電容器 C_a 的電容量最小時，由於電容器的容抗較大，陽極電路對高頻電流來說好像是被截流了。

除以上所討論的电路外,在当时曾提出很多其他再生电路。圖 356 所示为利用改变帘栅極电压的电位器来控制回授的电路。在这种电路中,回授的控制是很均匀的。

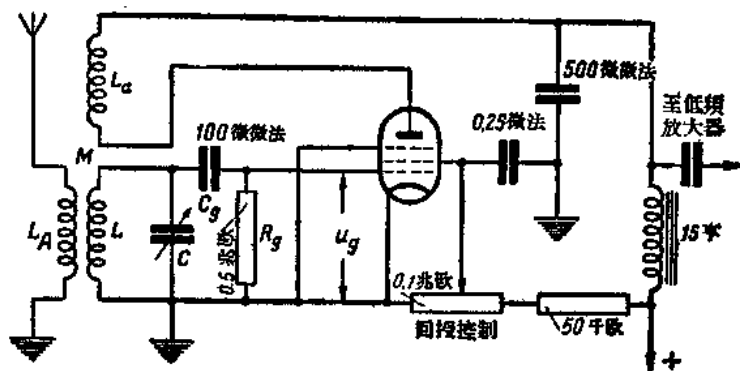


圖 356. 用帘栅压控制回授的再生电路。

其他的再生电路这里不再多講了,我們仅研究一下和再生电路的技术計算上有关的一般原則。在作技术計算时,我們首先必須解决与給定波段复盖有关的一切問題。为此,可以把調諧放大器一章(第三章第 8 节)中論述过的原則作为根据。确定諧振电路的参数后,我們必須这样选择电路的所有元件,即当將电路調諧于指定波段的任一頻率时,都能在調整回授时得到一产生自激振蕩的临界耦合。这时,在使用所选定的类型的任一电子管的情况下,以及在工作中电源电压發生任何变化的情况下,都应保証能得到临界耦合。

在測試再生电路时,首先需要驗證指定的波段实际上是否可以复盖住。此外,还必須檢查回授的控制。如果在諧振电路調諧于任一頻率下,旋得回授旋鈕时都能产生振蕩或中止振蕩,也就是說可得到临界耦合,那末电路的正常工作可以認為是可靠的。事实上,在得动回授旋鈕时是否發生振蕩,可以从耳机內發生的喀喀声来判断,这喀喀声乃由于在發生振蕩时陽極电流直流成分的急剧变化而引起的。

2. 再生电路的非直綫性效应

前节所討論的再生的直綫性理論並沒有說明發生在再生电路中的、并有重要的实际意义的許多現象。例如，根据再生的直綫性理論，如果当回授無限地接近临界耦合，那么由外界电动势在諧振电路內引起的振蕩电流應該趋近于無穷大。同时再生諧振电路的通頻帶应趋近于零。但事实上，即使能保証均匀地接近临界耦合，諧振电路內的振蕩电流也永远不会达到無穷大。正因为这样，所以再生諧振电路的通頻帶也就永远不会变为零。理論和实际有这种差别的原因是因为在确立理論的时候，沒有考虑到电子管特性曲綫的非直綫性。

現在我們来討論一下再生的准直綫性理論，它可以更充分地說明在再生电路中發生的許多現象。这一理論能足够精確地在数量与性質上来研究这样一些現象，如軟自激和硬自激、振蕩滯后、强制現象以及許多其他現象。

在再生的准直綫性理論中，是这样考虑电子管特性曲綫的非直綫性的，即把电路参数（諧振电路的总电阻、电子管的互导等）認為是一些与振蕩的振幅有关的数值。

前面（第三章第5节）已經証明，柵極上正弦电压的振幅为 U_{mg} 时，陽極电流的基波振幅为

$$I_{ma1} = SU_{mg} + \frac{1}{8} S'' U_{mg}^3.$$

陽極电流的基波振幅与柵極电压振幅的比即表示考虑了电子管非直綫性后的平均互导，即

$$S_1 = \frac{I_{ma1}}{U_{mg}} = S + \frac{1}{8} S'' U_{mg}^2.$$

振蕩电压很小时，第二項很小，因而平均互导 S_1 实际上等于起始点的互导 S 。振蕩电压較大时， S_1 就与 S 不同了。因此是这样考虑电子管特性曲綫的非直綫性的，就是把平均互导看作与諧振电路上的振

荡电压的振幅有关的。

以 S_1 的展开式代替公式(491)中的 S , 即得

$$r_0 = r - \frac{MS}{C} - \frac{1}{8} \frac{M}{C} S'' U_{mg}^2, \quad (492)$$

这就是說諧振电路的总电阻决定于其上的振荡电压的振幅。

若 $S'' < 0$, 则 U_{mg} 增大时, 电阻 r_0 也增大。

在这种情况下, 当回授均匀地增大时, 自激振荡电压的振幅 U_{mg} 也将均匀地增大。实际上是这样的, 若互感 M 略为超过临界值 M_{kp} (这时

刚够引起自激振荡), 则 $r - \frac{MS}{C}$ 是負的, 且其绝对值很小。但是因为沒有外电动势时在 $r_0 = 0$ 的平衡状态下, 故最后一項 $-\frac{1}{8} \left(\frac{M}{C} \right) S'' U_{mg}^2$ 是正的, 其绝对值也很小。因此自激振荡的振幅 U_{mg} 也很小。从而可以看出, 当 M 增加时, 振幅 U_{mg} 均匀地增大, 也就是产生軟自激(圖 357)。

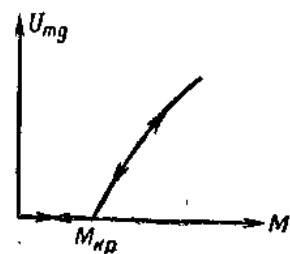


圖 357. 軟自激时自激振荡的电压与回授的关系。

若 $S'' > 0$, 则当 U_{mg} 增大时, 电阻 r_0 减小, 当回授均匀地增大时, 自激振荡电压的振幅 U_{mg} 將跳躍地增大。实际上是这样的, 若互感 M 略为超过其临界值, 这时 $r - \frac{MS}{C}$ 是負的, 并且其绝对值很小; 公式(492)的最后一項, 即 $-\frac{1}{8} \left(\frac{M}{C} \right) S'' U_{mg}^2$ 也是負的。換句話說, 当回授稍微超过临界值时, 諧振电路的总电阻 r_0 就是負的, 因此当还没有使 r_0 等于零以前, 自激振荡就突然發生, 接着很快地增大。因为这种增大發生得甚快, 所以在实际上是可以把它認為是跳躍的增大, 也就是硬自激(圖 358)。

如所周知, 硬自激时自激振荡电压的振幅 U_{mg} 是 M 的非單值函数, 即振荡滞后(圖 358)。

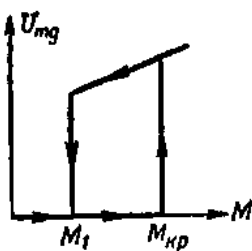


圖 358. 硬自激時自激振蕩的
電壓與回授的關係。

選擇再生电路的工作状态及其元件时，必須以产生軟自激為准。由于振蕩滯后，在硬自激的情况下不能够使回授接近临界值，因为这可能产生振蕩。因此在硬自激时，接收机的灵敏度不可能依靠再生来获得显著的提高。

應該注意到，自激的特性不仅取决于电子管特性曲线的形状，并且在相当的程度上也取决于栅流、栅漏电阻 R_g 以及許多其它因素。实际上当装制再生电路时，通常都用实验的方法来获得軟自激，因为用計算的方法来確定自激的特性是很困难的。

除上述现象以外，再生的准直线性理論还可以解釋为什么临界耦合时外来信号的振蕩电压 U_{mg} 为有限值。运用公式(492)，并設

$$r - \frac{MS}{C} = 0,$$

即認為回授等于临界值，則得

$$r_0 = A_2 U_{mg}^2,$$

其中

$$A_2 = -\frac{1}{8} \frac{M}{C} S''.$$

因为从临界耦合的条件得出

$$M = \frac{rC}{S},$$

所以

$$r_0 = -\frac{1}{8} r \frac{S''}{S} U_{mg}^2. \quad (493)$$

由此可見，临界耦合时，諧振电路有一有限的电阻，它与 U_{mg} 因而也与外来电动势 E 有关。應該着重指出，当临界耦合时，等效电阻 r_0 与原始电阻 r 成正比。

所以在其他条件相同时，再生电路的振蕩电路的原始电阻愈小，該

电路的灵敏度就愈高。

强制现象没有为再生的直线性理论所解释，但是完全能用准直线性理论解释。这种现象就是把与电路的自然频率相差甚小的外来电动势加在处于自激状态（回授超过临界值）的再生电路时，尽管电路有失谐，但不产生差拍。换句话说，在失谐很小时，再生谐振电路中电流的频率完全等于外来电动势的频率。强制现象只有当外来电动势的频率处在一固定频带（所谓强制频带）的范围内才会发生。当电路失谐较大，就产生差拍，这时自激振荡不为强制现象所抑制。

我们来证明简化的强制现象的准直线性理论，这结论是不严密的，但与实际很符合。设再生电路（图 353）处于自激状态中。这时其谐振电路中有电流 I ，谐振电路的总电阻 r_0 等于零。

若在谐振电路上加一频率与谐振电路的自然频率相等而振幅比谐振电路自激振荡的电动势小很多的外来电动势 E ，则电流 I 实际上并不改变。若把再生的谐振电路看成二端网络，则在与外来电动势谐振时，其电阻 $r_{0,p}$ 就可以写成

$$r_{0,p} = \frac{E}{I}.$$

因为 $I \approx$ 常数，所以随着外来电动势 E 的增加，电阻 $r_{0,p}$ 也增大。这增大的情况决定于电子管特性曲线的非直线性。实际上是这样的，电动势 E 增大时，电流 I 的得到一很小增量 ΔI ，且 $\Delta I \ll I$ 。这电流 I 的增加引起谐振电路上的振荡电压 U_m 的增加，由于非直线性缘故它又引起平均互导 S_1 的变化，根据公式(492)，还引起 r_0 的增加，因为在软自激时 $S'' < 0$ 。

现在假设外来电动势的频率与谐振电路的自然频率有些不同。那末电流 I 可以表示为

$$I = \frac{E}{\sqrt{r_0^2 + x^2}},$$

这里 $x = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ 是谐振电路的电抗。

随着失諧的增大，电抗 x 也增大。这时由于加在諧振电路上的电动势 E 很小，所以电流 I 的数值几乎保持不变。也就是 x 的增大引起了 r_0 的减小，并在某一失諧量时， r_0 变为零。这失諧量可以从調諧和失諧时电流相等的条件所組成的等式

$$x = r_{s.p} \text{ 求得。}$$

这等式相当于强制頻帶的边界。失諧量繼續增大时，再生电路中就要产生差拍，因为在普通的等幅振荡的情况下，电路不可能处于平衡的状态。事实上，假若不是这样，即 $x > r_{s.p}$ 时，电路就可能在普通的等幅振荡情况下处于平衡状态。这时电流

$$I = \frac{E}{\sqrt{r_0^2 + x^2}}.$$

在 r_0 为任何数值(正的或負的)时，都将远小于諧振时的电流 $\frac{E}{r_{s.p}}$ 。但由于外电动势小于由自激振荡产生的内电动势，所以这一点是不可能的。

以展开式写出所得的关系式，則

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = r_{s.p}$$

或

$$\omega L \left[1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right] = r_{s.p},$$

这里 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 是諧振电路的自然頻率。

設失諧不大，就可写为

$$1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} = \left[1 - \frac{\omega_0}{\omega} \right] \left[1 + \frac{\omega_0}{\omega} \right] \approx \frac{2(\omega - \omega_0)}{\omega} = \frac{r_{s.p}}{\omega L}.$$

現在我們用由于自激而产生的諧振电路上的电压 U 来表示比值 $\frac{r_{s.p}}{\omega L}$ 。

因为

$$U = I \omega L = \frac{E}{r_{s.p}} \omega L,$$

所以

$$\frac{r_{\text{э.в}}}{\omega L} = \frac{E}{U}.$$

从已求得的关系式中得出

$$\frac{2(\omega - \omega_0)}{\omega} = \frac{2(f - f_0)}{f} = \frac{E}{U},$$

或者

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{E}{U}, \quad (494)$$

这就是说相对的强制频带等于加到谐振电路的外来电动势与谐振电路中因自激而产生的电压之比。实验证明，公式(494)是正确的。在电动势很小时，它是足够准确的。

公式(494)表明，强制频带随着外来信号强度的增加而加宽。所以用自差接收时，差拍会随着信号强度的增加而消失——自激振荡为外加振荡所同步。在这种情况下，强制现象起着有害的作用。

强制现象有时出现于使用变频管的短波超外差式接收机中。实际上是这样的，当信号足够强时，由于寄生耦合的关系，变频器的外差振荡器可能被外来信号所强制。显然，这时变频管的阳极电路内就没有中频电流了。

在使用差拍原理的测量装置中(例如测量电容的装置中)，也应考虑到强制现象。

必须指出，强制现象并不是在任何时候都是有害的，当需要去同步振荡时，可有效地加以利用。

许多科学著作是专论再生的理论的。其中最有价值的是苏联学者们的著作。研究非直线性系统中，特别是再生电路中各种复杂物理现象的方法是 Л. И. 芒杰耳什塔姆及 Н. Д. 帕帕列克西所创造的。严格地研究非直线性系统的符号法是 Н. М. 克雷洛夫及 Н. Н. 波戈柳波夫所研究出来的。除了这些严密的方法以外，我们的学者们还创造了非常有效的近似研究法，其中首先应提到 Ю. Б. 科布札烈夫以最一般化的方式所提出的准直线性法。在 1935 年发表的论文“论解释近似正弦

波的振蕩器中的各種現象的准直線性法”及以後關於再生理論的許多著作中，科布札烈夫對非直線性振蕩電路中的一些現象在定量與定性方面都作了深刻的研究，而不是用像范德比爾所採用的、以多項式來表示電子管特性曲線的方法。

我們的學者們應用了嚴密的非直線性和近似的准直線性的研究方法，在定量及定性方面對電子管電路內的這樣一些複雜現象作了分析，如強制現象、分頻、在被同步及同步振蕩的頻率之間存在着有理分數關係時的同步以及在各種不穩定因素的作用下外差振蕩器的頻率偏移等。

3. 超再生的一般原理

上述再生電路的主要缺點之一就是不可能在保持工作穩定性的要求下獲得高的靈敏度。若回授接近於臨界值，則靈敏度雖高，但電路工作不穩定。若回授遠小於臨界值，工作穩定性雖有了保證，但此時靈敏度卻又很低。

實際上是這樣的，要從再生電路中獲得較大的放大量（在接收無敏電話時），回授必須這樣選擇，就是使 r_0 是正的，並且遠小於 r 。例如使 $r_0 = r - r_{06p} = 0.1r$ 。那麼當供給再生電路的電子管的電源電壓變化時，因為互導 S 隨電源電壓而變，所以 $r_{06p} = \frac{MS}{G}$ 的數值也將改變。可見即使 r_{06p} 有很小的變化，都會引起等效電阻 r_0 很大的變化，等效電阻 r_0 甚至會變成負的，也就是說電路產生了自激振蕩，而這是不容許的。

超再生電路在很大的程度上消除了這個缺點。如使用超再生電路，可以在足夠穩定的工作條件下獲得很高的靈敏度。超再生電路與再生電路的區別就是在超再生電路中，諧振電路的等效電阻 r_0 是隨着某一輔助頻率作周期性變化的。這種變化是這樣進行的，即 r_0 依次地為正值及負值。這樣，在超再生電路中應用了諧振電路參數周期性變化的原理。