第一章　非线性电阻电路

1.1　非线性电阻电路的基本分析方法

1.1.1　图解法

图解法是相对较为直观的方法，它不能求出精确的解，但是可以分析大致的特征。对于含有非线性电阻的电路，可以将其拆分为两个对接的网络，一方是线性网络，一方是非线性网络，并且用关联参考方向、源关联参考方向定义两个网络。作出两个网络的伏安特性曲线，其交点就是所求的解。这个解是粗略的，下面的方法更能求得精确的或者接近精确值的解。

1.1.2　牛顿-拉夫逊迭代法

在上面图解法的基础上，牛顿-拉夫逊迭代法可以求得尽可能精确的解。联立曲线方程，得到一个方程$f(x)=0$。这个方程是超越的，那么可以用迭代法。给定一个大致的解$x^{(0)}$，每一次迭代(这里是$k+1$次)都对上一次的解进行一个修正$\Delta x^{(k)}$，也就是$x^{(k+1)}=x^{(k)}+\Delta x^{(k)}$。由Taylor展开可以得到

$$f(x^{(k+1)})=f(x^{(k)}+\Delta x^{(k)})\approx f(x^{(k)})+f'(x^{(k)})\Delta x^{(k)}=0$$

$$\Delta x^{(k)}=-\frac{f(x^{(k)})}{f'(x^{(k)})}$$

$$x^{(k+1)}=x^{(k)}-\frac{f(x^{(k)})}{f'(x^{(k)})}$$

设定一个精确度ε，如果$f(x^{(k)})<\varepsilon$，就认为精度足够了，迭代终止。一般而言，不到十次就可以得到比较精确的解。这种方法适用于计算机分析，手工分析更常用后面的方法。

1.1.3　分段折线法

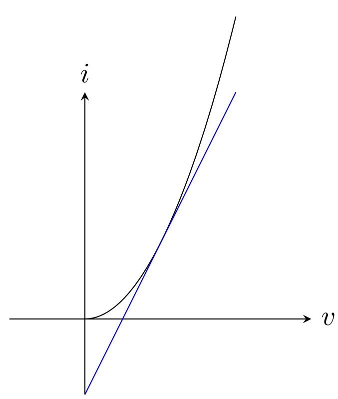
分段折线法是一种化曲为直的方法。如果伏安特性曲线有明显的分区特性，就可以用直线代替曲线，从而手工解出较为准确的解。对于曲线的一部分，可以利用割线或者切线来代替曲线。有时不知道位于哪个工作区时，可以先假设位于其中某个区，然后计算验证，如果符合，则假设成立；如果不符合，应该另外设别的区。分段折线法更多地会结合下面的方法运用。

1.1.4　局部线性法

局部线性法适用于直流与交流叠加的电压：$v = V_0 + \Delta v$，习惯用大写字母表示直流量，小写字母表示交流量。对于含有此类电信号的非线性电路，采取的方法是将直流和交流分别分析：首先只看直流，利用前面提到的方法确定直流工作点(区)；然后只看交流，确定更细致的关系。对于电源、电阻、电容、电感元件，在直流情形和交流情形的分析如下：

(1)电源：将电源分为恒压源和交流电压源，在直流情形下，将交流电压源短路即可；在交流情形下，将恒压源短路即可。

(2)电阻：对于线性电阻，直流情形和交流情形的分析相同；对于非线性电阻，其伏安特性曲线并非直线，在直流情形下按照前面的方法分析，在交流情形下视为电阻，其阻值是伏安特性曲线在直流工作点切线斜率的导数，这个电阻称为**微分电阻**。



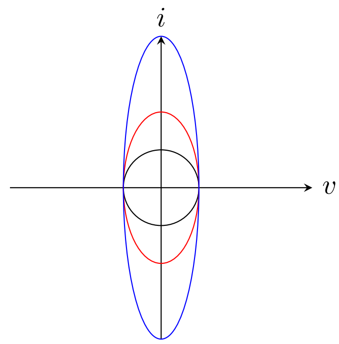
(3)电容电感：以电容为例，其电压电流特性为

$$i(t) = C\frac{\mathrm{d}v(t)}{\mathrm{d}t}$$

我们设$v(t)=V_0+V_m\cos\omega t$，则可以得到$i(t)=-\omega CV_m\sin\omega t$，因而

$$\frac{(v(t)-V_0)^2}{V_m^2}+\frac{i(t)^2}{\omega^2C^2V_m^2}=1$$

当$V_0=0$时，其图像是以原点为中心的椭圆，长半轴为ωCV_m，短半轴为V_m。对于高频交流电压，其长半轴将是无限长，此时近似为经过原点且垂直于v轴的直线，也就是短路。而当$\omega=0$时，则相当于开路。当$V_0\neq 0$时，则抽象为恒压源。



同理，对于电感元件，当初始电流为0时，对于高频交流电压相当于开路，对于直流电压则相当于短路。

综合上述几方面，我们可以得到直流与交流分析时的元件处理办法。

元件	**直流分析**	**交流分析**
直流源	不变	屏蔽
交流源	屏蔽	不变
电阻	不变	微分电阻替代
耦合电容	开路	短路
高频扼流圈	短路	开路

考虑单端口线性网络(L)与非线性网络(N)的对接，假设非线性网络的GOL为$v=f(i)$，则有

$$v_{TH}-Ri=f(i)$$

现在假设电源电压是波动的，我们有$v_{TH}=V_{TH}+\Delta v$，$i=I_0+\Delta i$，则上述方程可以拆解为

$$V_{TH}-RI_0=f(I_0)$$
$$\Delta v-r\Delta i=f'(I_0)\Delta i$$

如果网络L是阻性的，则$R=r$；如果含有耦合电容或高频扼流圈，则会出现$R\neq r$，需要分别处理。

现在考虑二端口网络。假设有两个二端口网络连接在一起，则需要从四种连接方式中选取较为合适的。以$\boldsymbol{z}$ 参量为例，对于线性网络，我们有

$$\begin{pmatrix} v_{L1} \\ v_{L2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{TH1} \\ v_{TH2} \end{pmatrix}$$

对于非线性网络，我们有

$$\begin{pmatrix} v_{N1} \\ v_{N2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(i_{N1}, i_{N2}) \\ f_2(i_{N1}, i_{N2}) \end{pmatrix}$$

两个网络串串连接，之后两个端口短路处理(电路是闭合的)，那么我们可以得到

$$\begin{pmatrix} f_1(i_1, i_2) \\ f_2(i_1, i_2) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{TH1} \\ v_{TH2} \end{pmatrix} = \mathbf{0}$$

假设现在电压源有波动，电流也有相应波动。我们可以得到

$$\begin{aligned} f_1(I_{10}+\Delta i_1, I_{20}+\Delta i_2) &= f_1(I_{10}, I_{20}) + \frac{\partial f_1}{\partial i_1}\Delta i_1 + \frac{\partial f_1}{\partial i_2}\Delta i_2 \\ f_2(I_{10}+\Delta i_1, I_{20}+\Delta i_2) &= f_2(I_{10}, I_{20}) + \frac{\partial f_2}{\partial i_1}\Delta i_1 + \frac{\partial f_2}{\partial i_2}\Delta i_2 \end{aligned}$$

从而

$$\begin{pmatrix} f_1(I_{10}+\Delta i_1, I_{20}+\Delta i_2) \\ f_2(I_{10}+\Delta i_1, I_{20}+\Delta i_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(I_{10}, I_{20}) \\ f_2(I_{10}, I_{21}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \partial_1 f_1 & \partial_2 f_1 \\ \partial_1 f_2 & \partial_2 f_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta i_1 \\ \Delta i_2 \end{pmatrix}$$

由此，就可以将其拆分为如下两个方程

$$\begin{pmatrix} f_1(I_{10}, I_{20}) \\ f_2(I_{10}, I_{20}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{10} \\ I_{20} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{TH10} \\ V_{TH20} \end{pmatrix} = \mathbf{0}$$

$$\begin{pmatrix} \partial_1 f_1 & \partial_2 f_1 \\ \partial_1 f_2 & \partial_2 f_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta i_1 \\ \Delta i_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta i_1 \\ \Delta i_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta v_{TH1} \\ \Delta v_{TH2} \end{pmatrix} = \mathbf{0}$$

其中Z和z的区别同样在于耦合电容和高频扼流圈。综上，局部线性法的要点在于：

(1)直流分析：忽略交流部分，画出直流情形下的电路，通过解析法、分段折线法等求得直流工作点。

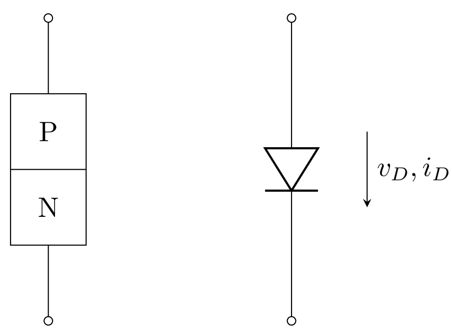
(2)交流分析：忽略直流部分，画出交流情形下的电路，进行进一步的分析。

其实，第一步的操作相当于坐标轴的平移，以直流工作点作为新的原点，建立新的坐标轴，进行分析。

1.2 二极管及其应用

1.2.1 二极管的特性

这里我们介绍PN结二极管，涉及普通二极管与Zener二极管。按照关联参考方向定义，从P指向N，如图所示



PN结二极管有一个势垒电压，取0.7V。当$v_D < 0.7\text{V}$时，此时的电流极其微小，只有fA 量级，降低电压不会引起电流的明显变化，达到**电流饱和**，一般取饱和电流$I_{S0} = 1\text{fA}$。当$v_D > 0.7\text{V}$时，i_D满足

$$i_D = I_{S0}(e^{\frac{v_D}{v_T}} - 1)$$

其中

$$v_T = \frac{kT}{q} \approx 26\text{mV} \quad (298\text{K})$$

k是玻尔兹曼常数，T是温度，q是电荷量，这里是电子的电量。在室温($25°\text{C} \approx 298\text{K}$) 下取值为26mV。

一般二极管应该避免被击穿，而Zener二极管则专门设计工作在反向击穿区。反向击穿区有三个重要的工作点:(1)拐点电流I_{ZK}，反偏电流大于这个值才会进入击穿区;(2)测试电流I_{ZT}，相对应测出电压V_Z，V_Z@I_{ZT};(3)最大电流I_{ZM}，二极管电流不应该超过这个值，否则有可能损毁二极管。

1.2.2 二极管的模型

1.2.3 二极管的应用

1.3 MOSFET及其应用

1.4 BJT及其应用