

[苏联] Л. П. 聂孟 K. C. 捷米尔强 著

电工理论基础

下 册

哈尔滨工业大学电工基础教研室 译

高等教育出版社

电 工 理 论 基 础

下 册

[苏联] Л.П. 聂孟 K.C. 捷米尔强著
哈尔滨工业大学电工基础教研室译

高等教育出版社

本书是苏联高等与中等专业教育部审定的教科书的中译本。原作者是苏联科学院院士、通讯院士、列宁格勒工业大学教授。原书是苏联教材代表作之一。其前身为聂孟、卡兰塔罗夫著的同名教材，曾由钟兆璜同志译为中文，定名《电工学理论基础》，于1955~1956年出版，对我国教学影响颇大。新版本仍采取“场—路—场”体系，结构严谨、概念清楚，注意联系实际，将公式化的分析计算方法和物理实质联系起来，在保证基本内容的同时，增添了矩阵拓扑法、状态变量法和电路综合等新内容。

全书分上、下两册出版，上册为“电磁场理论和电路与磁路理论的基本概念和定律”、“线性电路理论”两篇，下册为“非线性电路与磁路理论”、“电磁场理论”两篇。本书可供大学本科电工、自动控制等专业学生和技术人员、教师参考。

责任编辑 农植伟

(京) 112号

Л.Р.Нейман, К.С.Демирчян

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Издание третье, переработанное и дополненное

том второй

Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1981

电工理论基础

下 册

[苏联] Л.Р. 聂孟 К.С. 捷米尔强著

哈尔滨工业大学电工基础教研室译

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷二厂印装

开本787×1092 1/16 印张12.25 字数410 000

1992年7月第1版 1992年7月第1次印刷

印数0001—1 525

ISBN7-04-002001-6/1M·119

定价 9.35元

目 录

第三篇 非线性电路与磁路理论

第一章 非线性电路的元件, 它们的特性与参数

- §1-1 非线性电路的特点.....(1)
- §1-2 非线性电阻电路的元件, 它们的参数与特性.....(2)
- §1-3 非线性电阻元件的对称与不对称特性.....(4)
- §1-4 惯性的与无惯性的非线性电阻元件.....(8)
- §1-5 可用于稳压或稳流的非线性电阻元件的特性.....(8)
- §1-6 半导体二极管作为电路非线性元件.....(9)
- §1-7 可控非线性元件·带控制电极的离子器件.....(15)
- §1-8 可控非线性元件·三极电子管.....(15)
- §1-9 三极电子管作为电路元件.....(17)
- §1-10 可控非线性元件·半导体三极管.....(18)
- §1-11 半导体三极管作为电路元件.....(20)
- §1-12 铁磁性材料的非线性性质.....(23)
- §1-13 带铁磁性材料心体的线圈的非线性特性与参数.....(27)
- §1-14 带非线性特性的电容器.....(29)
- §1-15 有非线性特性的电动势源与电流源.....(31)

第二章 非线性直流电路与磁路的计算

- §2-1 非线性直流电路的计算.....(33)
- §2-2 电路中包含非线性元件而不包含电源的诸部分的串联、并联

与混联.....(34)

- §2-3 电路中包含非线性元件与电动势源的诸部分的串联、并联与混联.....(36)
- §2-4 有一个非线性元件的复杂电路的计算.....(38)
- §2-5 有两个非线性元件的复杂电路的计算.....(40)
- §2-6 有三个非线性元件的复杂电路的计算.....(41)
- §2-7 复杂非线性直流电路的数字算法.....(43)
- §2-8 在保证唯一解的条件下编写非线性直流电路的方程组.....(46)
- §2-9 小扰动下非线性直流电路特点的研究.....(49)
- §2-10 磁路的规律与参数.....(52)
- §2-11 各部分相串联的磁路的计算.....(55)
- §2-12 带分支的磁路的计算.....(56)
- §2-13 永久磁铁的计算.....(58)
- §2-14 有永久磁铁的磁路的计算.....(59)

第三章 非线性电路与磁路中的周期性过程

- §3-1 含有惯性非线性元件的电路中的周期性过程的特点.....(61)
- §3-2 有电感性惯性机电元件的电路中的过程.....(62)
- §3-3 含有无惯性非线性元件的电路中的周期性过程的特点·等效正弦波法.....(64)
- §3-4 铁心线圈中电流、磁通与电动势的波形.....(65)
- §3-5 铁磁性材料心体中的损耗.....(65)
- §3-6 等效正弦波以及磁链与电流间

的关系	(67)
§3-7 铁心线圈的方程、矢量图与等效电路	(68)
§3-8 磁路的复磁阻抗	(69)
§3-9 有铁心的变压器的方程、矢量图与等效电路	(70)
§3-10 引入等效正弦波后的图解法	(72)
§3-11 铁心线圈与电容器串联时的铁磁谐振现象	(72)
§3-12 铁心线圈与电容器并联时的铁磁谐振现象	(74)
§3-13 铁磁稳压器	(76)
§3-14 非线性电路中的可控电感元件·铁磁功率放大器	(77)
§3-15 计算非线性电路中周期性过程的谐波平衡法	(78)
§3-16 在非线性电路中分离出高次谐波以变换频率	(80)
§3-17 利用铁磁元件以分离出零序谐波的倍频器	(81)
§3-18 用非线性特性的分段线性化来计算电路	(82)
§3-19 整流器电路的计算	(82)
§3-20 利用可控整流元件对整流器调节并把直流变为交流	(85)
§3-21 交流电路中的非线性电容器	(88)
§3-22 用正弦电压源给非线性电路供电时的功率因数	(89)

第四章 振荡理论基本概念与非线性

性电路中过渡过程的计算方法	(90)
§4-1 非线性电路中振荡过程的特点	(90)
§4-2 在直流电压源作用下有电感和非线性电阻的电路的工作稳定性	(90)
§4-3 在直流电压源作用下有电容和非线性电阻的电路的工作稳定	

性	(92)
§4-4 研究稳定问题时的等效电路图的选择	(93)
§4-5 在直流电压源作用下复杂非线性电路工作稳定性的一般考虑	(94)
§4-6 有反馈的非线性系统中自振荡的产生·电子管振荡器	(97)
§4-7 张弛振荡	(101)
§4-8 非线性电路中过渡过程的计算方法	(103)
§4-9 非线性电路过渡过程的图解积分法	(104)
§4-10 过渡过程的解析算法——使用非线性特性的近似解析表达式	(107)
§4-11 计算非线性电路过渡过程的连续时段法	(110)
§4-12 利用电路方程有条件线性化的非线性电路过渡过程的计算方法	(112)
§4-13 在相平面上表出过渡过程	(113)
§4-14 画出相轨迹和计算过渡过程的等倾线法	(116)
§4-15 缓变幅值法——王德波法	(120)
§4-16 非线性电路的频率性质	(123)
§4-17 非线性电路在现代技术中的作用	(124)

第四篇 电磁场理论

第五章 电磁场方程 (125)

§5-1 电磁场及电磁场方程的积分形式	(125)
§5-2 全电流定律的微分形式——麦克斯韦第一方程	(128)
§5-3 电磁感应定律的微分形式——麦克斯韦第二方程	(129)
§5-4 高斯定理与麦克斯韦假说的微分形式	(130)
§5-5 磁通连续性原理和电流连续性原理表达式的微分形式	(133)

§5-6 奥斯特罗格拉斯基定理·斯托克斯定理.....(134)	§7-4 计入地面影响时的两线传输线电容.....(176)
§5-7 完整的电磁场方程组.....(135)	§7-5 三相输电线的电容.....(176)
§5-8 静电场和恒定电流场——电磁场的特殊情形.....(137)	§7-6 计算导线系统中电位系数和电容的平均电位法.....(179)
第六章 静电场(139)	§7-7 根据电场图计算电容.....(182)
§6-1 静电场的无旋性·电位梯度.....(139)	第八章 恒定电流的电场(184)
§6-2 电场强度和电位在远离带电体系统处的衰减.....(141)	§8-1 恒定电流的电磁场方程.....(184)
§6-3 根据已知的电荷分布确定电位.....(144)	§8-2 载有恒定电流的导体周围介质内的电场.....(184)
§6-4 泊松方程与拉普拉斯方程.....(145)	§8-3 导电媒质中的电场与电流密度矢量场.....(185)
§6-5 导体表面上的边界条件.....(146)	§8-4 两导电媒质分界面上的边界条件.....(186)
§6-6 两介质分界面上的边界条件.....(146)	§8-5 导电媒质中的电场与静电场的比拟.....(187)
§6-7 静电学的基本问题.....(148)	§8-6 电缆中的漏电流与电缆的绝缘电阻.....(188)
§6-8 平行平面场.....(149)	§8-7 接地电阻.....(188)
§6-9 复变函数的应用.....(152)	第九章 恒定电流的磁场(191)
§6-10 圆截面的孤立导线的电场.....(153)	§9-1 电流磁场的有旋性·无电流区域磁场的标量位.....(191)
§6-11 两个成夹角的平面的电场.....(155)	§9-2 电流磁场的矢量位.....(192)
§6-12 两线传输线的电场.....(155)	§9-3 用矢量位表示的磁通表达式.....(195)
§6-13 平行而不共轴圆柱的电场.....(158)	§9-4 恒定电流磁场计算的一般问题.....(195)
§6-14 平板电容器边缘的电场.....(159)	§9-5 平行平面磁场.....(196)
§6-15 平行平面电场的图解法.....(161)	§9-6 复变函数的应用.....(197)
§6-16 旋转体电场的图解法.....(162)	§9-7 线状导线的磁场·平行平面电场与磁场的对应原理.....(198)
§6-17 不均匀绝缘媒质中电场的图解法.....(162)	§9-8 在均匀外磁场中的载流直导线.....(199)
§6-18 外静电场中的介电体.....(163)	§9-9 具有任意形状有限截面的导体的磁场.....(200)
§6-19 均匀外电场中的介质球.....(163)	§9-10 圆截面导线的磁场.....(201)
§6-20 外静电场中的导体·静电屏蔽.....(166)	§9-11 两线传输线的磁场.....(202)
§6-21 均匀外电场中的金属球.....(167)	§9-12 磁导率不同的两媒质分界面上的边界条件.....(203)
§6-22 镜象法.....(167)	§9-13 靠近铁磁体平面的电流的磁
第七章 电容的计算(169)	
§7-1 圆柱之间的电容·两线传输线的电容.....(169)	
§7-2 导体系统的电位系数·静电感应系数和部分电容.....(171)	
§7-3 极长的平行导线系统的电位系数.....(175)	

	场·镜像法.....	(204)
§9-14	磁场图解法	(205)
§9-15	立体问题·载流圆线圈的磁 场.....	(208)
§9-16	以对电流回路所张的立体角 表示的标量位表达式	(209)
§9-17	离任意形状的载流回路很远 处的磁场	(210)
§9-18	外磁场中的物体·与静电场 问题的比拟	(211)
§9-19	均匀外磁场中的圆球与旋转 椭球	(212)
§9-20	去磁系数	(213)
§9-21	磁屏蔽	(213)

第十章 电感的计算(215)

§10-1	互感与自感的一般表达式	(215)
§10-2	两个圆形回路的互感系数	(218)
§10-3	圆形回路的自感	(219)
§10-4	分段计算法	(220)
§10-5	由直线段组成的回路的电 感	(221)
§10-6	矩形线框的电感	(223)
§10-7	两条两线传输线之间的互 感	(223)
§10-8	两线传输线的电感	(224)
§10-9	三相输电线的电感	(225)

第十一章 电介质中的交变电

磁场.....(227)

§11-1	电介质中的平面电磁波·电 磁波的传播速度	(227)
§11-2	坡印亭矢量	(231)
§11-3	电磁能流	(233)
§11-4	天线的电磁波辐射·赫芝的 试验·列别捷夫的著作·波 波夫发明无线电	(236)

§11-5	电磁场的电动态矢量位与 电动态标量位	(239)
§11-6	电荷交变的电偶极子	(243)
§11-7	离偶极子的距离小于波长处 的电磁场	(245)
§11-8	离偶极子的距离远大于波长 处的电磁场	(246)
§11-9	偶极子和天线的辐射功率与 辐射电阻	(246)
§11-10	电磁能量沿导线的传输.....	(248)
§11-11	电磁能量沿金属管内腔的传 输.....	(250)
§11-12	波导.....	(251)

第十二章 导电媒质中的交变电磁

场(257)

§12-1	导电媒质中的平面电磁波	(257)
§12-2	波长与波的衰减	(259)
§12-3	趋表效应现象	(260)
§12-4	导线的电阻与内感抗	(260)
§12-5	趋表效应强烈时的导线电阻	(263)
§12-6	铁磁材料制成的粗导线内的 趋表效应	(265)
§12-7	复磁导率与复介电常数	(266)
§12-8	交变磁通在平薄片中的不均 匀分布	(268)
§12-9	圆柱导线内电流的不均匀分 布	(270)
§12-10	圆柱导线的电阻与内感抗.....	(274)
§12-11	邻近效应·用感应法使表面 硬化.....	(276)
§12-12	电磁屏蔽.....	(277)
§12-13	电场与磁场的实验研究和 造型.....	(278)
§12-14	关于电路与磁路理论问题和 电磁场理论问题的区分标 准.....	(281)

第三篇 非线性电路与磁路理论

第一章 非线性电路的元件，它们的特性与参数

§ 1-1 非线性电路的特点

凡参数随电流、电压而变的电路，称为非线性电路。如第一篇§3-5所示，严格地讲，所有电路都是非线性的。但在许多实际情况中，这种非线性的表现是如此微弱，以致在分析电路中的过程时可略去不计。这样就能建立本书前面篇章所述的线性交流电路理论，并把它成功地应用于许多电工装置的计算。

但是，有这样的电路元件，它们的非线性特性表现得非常突出。包含这种元件的电路称为非线性电路，它们具有一系列新的、线性电路所没有的性质。正是在这些特性的基础上创造了自动控制与调节系统、电磁能转换装置、电测与信息传递装置、快速计算机等。

不对称非线性元件，如两极整流管、汞弧与半导体整流元件以及充气管等，当电流以某一方向通过时有很小的电阻，而当电流以另一方向通过时则有很大的电阻。利用这些元件可进行整流，即把交流转化为直流。

可控非线性元件的创造具有特殊意义，这些元件包括三极电子管、有控制栅极的闸流管、三极半导体器件等等，它们除了有通过主电流的两个主电极外，还有附加的控制电极。利用这些非线性元件可实现把直流电转化为交流电、交流电的放大与变频。

当电路中存在非线性元件时，如在电路端子上加上正弦电压，则稳态电流将按非正弦周期性规律变化。反之，如电路通过正弦电流，那么端子上的电压就是非正弦的。非线性交流电路的这个性质可用来实现交流电的变频。

在包含非线性电容器与电感线圈的交流电路中，会产生一种有时称为铁磁谐振的奇特现象。以此为基础可制作电压的或电流的稳定器。

以后我们将看到，非线性电路中的不稳定状况是很重要的，它们在适当条件下可在电路中激起不衰减的振荡。这种周期过程的稳定性，亦即振荡幅值的固定性是由电路中的非线性元件决定的。这类振荡装置的重要例子为电子管振荡器与张弛振荡器。

非线性电路中过程的理论性研究远较线性电路为复杂。这些过程由非线性代数方程与微分方程描述，它们是在基尔霍夫第一与第二定律的基础上列出的。

为了得到这些方程的解析解，必须把电路中全部非线性元件的特性用解析式表达出来。

在多数情况下，可以选择各种解析式来近似地表达非线性元件的特性。能否得到解析解，这决定于非线性元件特性的近似解析式是否选择得成功。

要成功地分析非线性电路中的过程可采用图解法或图解-解析法。这些方法能给出较精确的结果，因为它们利用非线性元件的以曲线形式表示的真实特性。但是从这些方法不能得到电路的一般关系式，而当分析电路中过程随参数而变化的情况时，这些关系式是必需的。

对于某些具体的非线性装置可使用近似法来解算，这有重要意义。在电路理论领域中，为了解算非线性问题，广泛利用现代的电子计算机。

§ 1-2 非线性电阻电路的元件，它们的参数与特性

当直流电动势在电路中作用时，电流的值由电路各部分的电阻 r 与电导 g 决定。因此，当研究直流电路中的非线性元件时，我们首先感兴趣的是它们的电阻与电导。以后我们会看到，在解算这种电路的工作方式的稳定性问题时，电感与电容的存在有重要意义。但是，即使在交流电路中，对于许多非线性元件来说，它们的电阻与电导是主要的，而在一定频率范围内考虑它们的电感与电容则是次要的。因而在本节中我们只研究这样的非线性元件：它们的主要参数为电阻与电导。

我们把电阻元件端电压对元件中电流的关系式 $u = f(i)$ 以及其逆关系式 $i = \varphi(u)$ 称为元件的特性。这种特性经常称为伏安特性。非线性电路的本质特点之一是元件的伏安特性可以非单值地表示电流与电压间的相互关系。例如，以 $u = ai^2$ 为解析表达式的伏安特性，对于任何给定的电流，总是单值地确定元件的端电压。与此同时，从表示式 $i = \pm \sqrt{u/a}$ 可以看出，对于任何正的电压，电流

有两个值。不仅如此，对于 $u < 0$ 的情况，一般地没有物理上可承认的以电流的实数值为形式的解。还须注意到，有这样的伏安特性的非线性元件不可能是无源的。实际上，当 $i < 0$ 时， $p = ui = ai^3 < 0$ ，故而此时这元件为一电源。

根据电流与电压间的单值与非单值相互关系，可把伏安特性分为以下几种：

1. 单调的伏安特性 在范围 $-\infty \leq i \leq \infty$ 内，在特性上每一点，给定的电流单值地

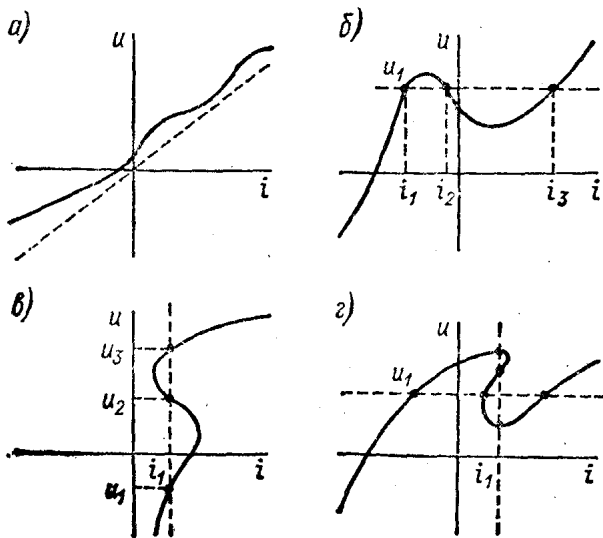


图 1-1

确定电压；在同一范围内，电压单值地确定电流（图1-1a）。单调的伏安特性的一个特殊情况

况是线性元件的特性（图 1-1a 中虚线所示）。

2. 电流控制的伏安特性 在范围 $-\infty \leq i \leq \infty$ 内，在特性上每一点，给定的电流单值地确定电压；但电压非单值地确定电流（图 1-1b）。把这样的伏安特性表示为 $u = f(i)$ 或 $u = R(i)$ 。

3. 电压控制的伏安特性 在范围 $-\infty \leq u \leq \infty$ 内，在特性上每一点，给定的电压单值地确定电流；但电流非单值地确定电压（图 1-1c）。把这样的伏安特性表示为 $i = \varphi(u)$ 或 $i = G(u)$ 。

4. 不受控的伏安特性 其特征为电流与电压都具有多值性（图 1-1d）。

伏安特性可以用图、表与解析表达式的形式给出。用解析表达式可最完整地描述伏安特性，因图与表的表示方式不够精确，并且只能在有限范围内给出 u 与 i 的变化。图与表的表示方法的吸引力在于，伏安特性的实验结果可以最简便地用这些形式来表达。

如伏安特性的每一点给出直流电压以及与之相应的直流电流的值，那么这是静态特性。从它们可确定非线性元件的静态电阻与静态电导：

$$r_{CT} = \frac{u}{i} = f_1(i), \quad g_{CT} = \frac{i}{u} = F_1(i)$$

动态特性则给出当电流变化足够快时电压与电流间的关系。由于热惯性或其它原因，它们可能不同于静态特性。根据它们可确定非线性元件的动态电阻与动态电导：

$$r_d = \lim_{\Delta i \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta i} = \frac{du}{di} = f_2(i), \quad g_d = \lim_{\Delta u \rightarrow 0} \frac{\Delta i}{\Delta u} = \frac{di}{du} = F_2(i)$$

当电压与电流变化足够慢时，动态特性与静态特性一致。根据静态特性来确定而以导数形式表达的电阻 du/di 与电导 di/du 则称为微分电阻和微分电导。把它们表示为 r_d 与 g_d 。

为了统一，我们将只讲动态参数 r_d 与 g_d ，同时考虑到，当电流变化足够慢时，它们与微分参数一致，即 $r_d = r_{CT}$ ， $g_d = g_{CT}$ 。

明显地有这样的关系式：

$$r_{CT} g_{CT} = 1, \quad r_d g_d = 1$$

但对于非线性元件来说，除了特性上的个别点外， $r_{CT} \neq r_d$ ， $g_{CT} \neq g_d$ 。

静态电阻比例于坐标原点与特性上给定点之间直线的倾斜角的正切（图 1-2）：

$$r_{CT} = k \operatorname{tg} \alpha$$

动态电阻比例于特性给定点上切线的倾斜角之正切：

$$r_d = k \operatorname{tg} \beta$$

这里 $k = u/a$ ，而 v 与 a 则为电压与电流的比例尺。相应地

$$g_{\alpha} = \frac{1}{k} \operatorname{ctg} \alpha, \quad g_{\beta} = \frac{1}{k} \operatorname{ctg} \beta$$

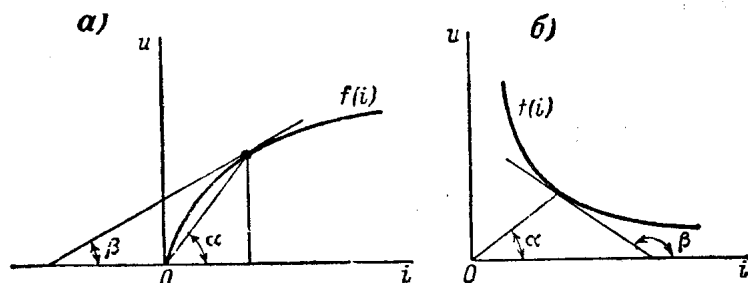


图 1-2

当从特性上的一点转移到另一点时，所有这些参数都要变化。对于所谓无源元件，即不包含电源的元件，总有 $r_{\alpha} > 0$ 和 $g_{\alpha} > 0$ ；但是 r_{α} 与 g_{α} 只有当给定点在特性的上升部分时才是正的（图1-2a），如给定点在特性的下降部分， r_{α} 与 g_{α} 是负的（图1-2b）。

§ 1-3 非线性电阻元件的对称与不对称特性

根据特性 $u = f(i)$ 的形状，把非线性元件分为对称的与不对称的。对称元件的特性相对于曲线的轴是对称的，亦即当电流从元件的两个不同方向通过时，这种元件的电阻与电流关系是一样的。不对称元件则有不对称的特性，当电流从元件的不同方向通过时，它们的电阻与电流关系是不一样的。

属于对称元件的有白炽灯、热敏电阻、砂砾陶元件、稳流管、辉光放电管以及相同电极间的电弧。

白炽灯工作于高温下，由于灯丝电阻依赖于温度，灯在额定电流下的电阻与冷的状态时（即在远低于额定值的电流下）迥然不同。图 1-3 显示钨丝灯的特性（曲线 1），它的电阻温度系数是正的；还有碳丝灯的特性（曲线 2），它有负的电阻温度系数。

在电力网中，当发生故障时，负载电压往往剧烈波动。如要研究负载特性对发电机的影响这一类问题，必须充分考虑照明负载的非线性。

利用电阻随温度而变的原理专门制作了所谓热敏电阻，它们一般地有图 1-3 中曲线 2 那样的特性。它们被用于测量和温度自控方面的仪表和仪器、延时继电器等等，以补偿电阻随温度的变化。也用半导体材料来制作热敏电阻，其特性如图 1-4 所示，特性的大部分是下降的。半导体热敏电阻的某一种结构是用金属氧化物（镍、镁等的氧化物）的混合物制成的小球，并掺入磨得很细的铜粉，以增加导电性。有两根用含铍铂制成的导线穿进小球，作为电流的引线。整个装置封在起保护作用的玻璃外壳中。这种半导体热敏电阻用于高频技术方面的测量。

在高压技术方面应用砂砾陶非线性元件，它是用一种名叫砂砾陶的陶瓷材料制成的。它们的电流电压关系可表示为 $|i| = A|u|^n$ ， $n \approx 3.5$ ，另外，特性是对称的。因而它们的静态

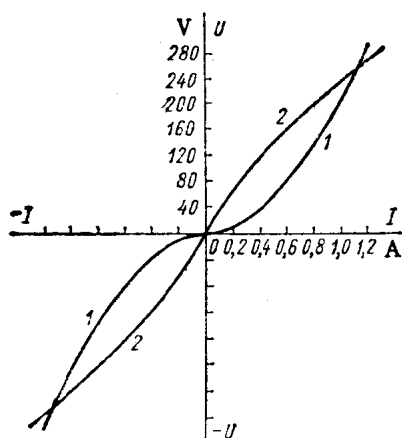


图 1-3

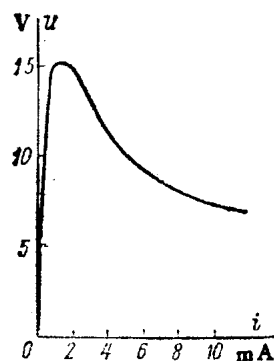


图 1-4

与动态电导为:

$$g_{\bullet} = \frac{i}{u} = \frac{|i|}{|u|} = A |u|^{n-1} \approx A |u|^{2.5}$$

$$g_s = \frac{di}{du} = \frac{d|i|}{d|u|} = An |u|^{n-1} \approx An |u|^{2.5}$$

即电导随电压的增加而增长。砂砾陶元件的这种电导电压间关系使得它们可用于高压装置（电厂、变电所、变压器等）的过电压保护。制成了所谓砂砾陶避雷器，它是用砂砾陶圆片叠成的圆柱体 T ，通过放电间隙 a 与被保护装置 N 并联联结，位于高压交流输电线和地之间（图1-5）。

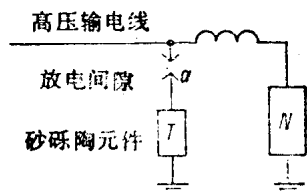


图 1-5

在额定电压下，放电间隙不击穿，没有电流通过避雷器。当输电线上的电压超过额定值时，放电间隙被击穿，避雷器的电压大为升高，电阻大大下降，于是有大电流通过砂砾陶圆柱体。这样，输电线通过砂砾陶避雷器放电，它上面的电压就降低了。电压降低后，避雷器的电阻增加，通过它的电流急剧减少，使放电间隙中的气体放电停止，结果，避雷器中完全没有电流了。图 1-6 显示用于避雷器的砂砾陶圆片的典型特性曲线。当电压增至额定值的两倍时，电流增大十倍。

电弧是电路中的非线性元件，有很大的实际用途。

称为电弧的现象是 B.B. 彼得洛夫教授在1802年发现的。图 1-7 为碳极间电弧的示意图，它在大气压的空气中燃

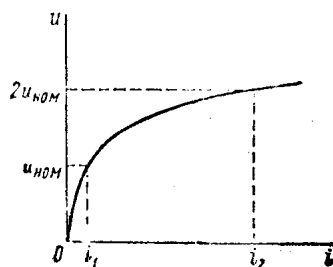


图 1-6

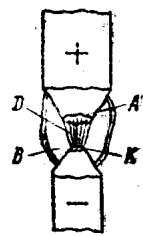


图 1-7

烧而由电源供电。阴极的有效部分 K 发射电子，其温度为 $2700—3150^{\circ}\text{C}$ 。阳极的被电子轰击的部分 A 一般有凹陷的形状，称为电弧的陷口。陷口的温度达 $3500—3900^{\circ}\text{C}$ 。电弧本身 D 位于阴极的有效部分和陷口之间，其温度达 4800°C 。电弧所占据空间中的气体与蒸汽处于电离化状态。这样，在电弧中，电荷既由电子又由离子载运，但电流主要由电子流决定。电弧被外层 B 所包围，在其中，碳的蒸汽和粒子燃烧，并形成空气的燃烧产物，即氮的氧化物。

B.Φ.米特凯维奇院士在 1902—1905 年期间进行关于电弧的一系列研究，确定了电弧燃烧的一般条件，并弄清楚了，电子是电弧中电流的主要载运者。根据 B.Φ.米特凯维奇所作实验知道，电子从阴极发射是电弧形成和存在的基本条件。在热电子发射的情况下(B.Φ.米特凯维奇所研究的情况)，阴极有高温是电弧燃烧的必要条件。阳极有高温只有次要的意义。根据随后的研究明确了，阴极如有足够强的自电子发射，在冷阴极的条件下也可存在电弧。这样，电弧产生的基本条件是阴极有足够强的电子发射。

电弧在许多电工领域中得到应用。П.Н.雅勃洛奇阔夫在 1876 年发明的著名电烛揭开了电在照明方面的广阔利用。现在，电弧在探照灯和投影机械中用作光源。在冶金方面，强大的电弧用于电弧炉。H.Γ 斯拉方诺夫与 H.H.贝那尔多斯所提出的电弧焊接法得到广泛传播。在化工方面，电弧被用来固定大气中的氮。电弧又被广泛用于整流装置中。

电弧有明显的非线性特性。随着电流 i 的增加，电弧中的电压降 u 减少，即它有下降的特性(图 1-8)。如两个电极相同，电弧的特性是对称的(图 1-9)。

对于某些元件，如通过交流电，所生电弧当电流增加时的特性 $u = f(i)$ 与电流减小时的特性不重合。图 1-10 显示相同电极间的电弧在周期性交流电下的特性曲线。电流上升时，电

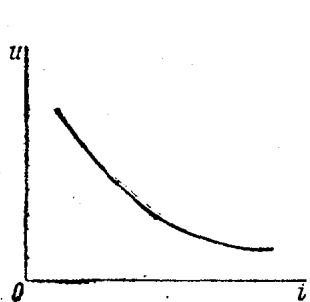


图 1-8

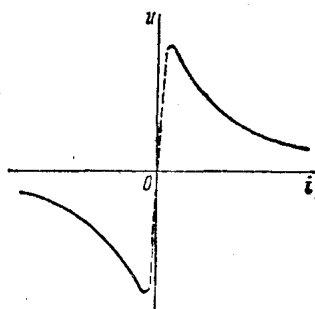


图 1-9

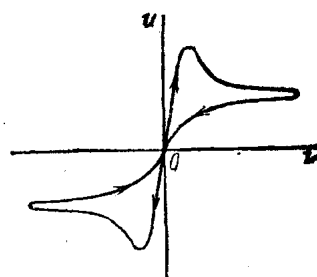


图 1-10

极间电压 u 大于电流下降时的电压，因为当电流增加时，放电过程是从较少电离化的状态和较低温度出发而进行的(与电流下降时比较)。这种元件的特性依赖于交流电的频率。

属于不对称非线性元件的有：不同电极间的电弧、电极有不同形状的辉光放电管、汞弧整流元件、两极整流管、充气管、半导体整流元件等。

电弧中的基本载流子是较强的电子流(带负电荷的粒子流)，而要使电弧存在，阴极(负电极)须有较强的电子发射，据此可知，当电极不同时，电弧的特性应该不对称。出现最大

不对称的是这样的情况：一个电极处于有较强电子发射的条件下，而另一个电极则位于没有任何明显电子发射的条件之下。例如，一个电极被加热至高温，足以有较热的热电子发射，另一个则人为地保持于冷的状态；或者，一个电极的周围形成高的电场强度，足以造成较强的自电子发射，而另一个电极的表面附近则不可能形成这样高的电场强度。这类装置只能在一个方向通过电流，因而可用于整流。

这类装置的重要代表是汞弧整流元件，它是一个器件，其中的空气尽可能地抽去而充以汞蒸汽，它有液态汞作为阴极而以铁或石墨的圆筒作为阳极。电弧在汞汽中燃烧。电子发射产生于汞液表面的所谓阴极辉点。这样，根据所取正方向，电流在汞弧整流元件中只能从阳极流向阴极。一般地利用外加电源在阴极与其附近的辅助阳极之间产生激励电弧以维持阴极辉点。图1-11表明汞弧整流元件的特性，即在有激励电弧的条件下主阳极和阴极间电压 u 与电流 i 间的关系。

当电弧燃烧时，整流元件中的电压降很小（15—30V），并且与电流关系不大。汞弧中的电流不仅由从阴极到阳极的电子运动，并且由从阳极到阴极的正的汞离子运动组成。因此汞弧整流元件属于离子器件。当整流元件的电压方向改变时，通过它的逆电流是微不足道的。汞弧整流元件既可制成小功率的（放在密封的玻璃容器内），又可制成大功率的（放在用泵抽气的铁容器内）。汞弧整流元件可做得能耐受几十万伏的逆电压并同时通过几百安的大电流，这是很有用的，可以制作成交直流之间的变换装置，安装于高压直流输电线的两端，关于它们，我们以后要讲到。

两极整流管（有两个电极的真空管）也是不对称非线性元件。它的阴极有较高温度，足以发射电子。为此用专门的电源来加热阴极。阳极则维持于足够低的温度，以使它的表面不发射电子。这样，在两极整流管中，电子只能从阴极飞向阳极，亦即电流只能从阳极流向阴极。两极整流管用于整流。在其中，电流只由电子运动组成。故它属于电子器件。

图1-12显示两极整流管的特性，即电流 i 与阳极和阴极间电压 u 的关系。当电压 u 达到这样一个数值、阴极所发射的电子全部

抵达阳极的时候，电流 i 就有极限值 i_s ，称为饱和电流。要增加饱和电流，只有提高阴极的温度。在较小电压下电流达不到饱和值，这是由于阴极与阳极间有负的空间电荷，即正从阴极飞向阳极的电子。这个负的空间电荷在阴极附近造成一个电场，与阳极的电场相反，于是限制了给定电压下的电流。在特性的起始部分， i 与 u 间的关系可表示为 $i =$

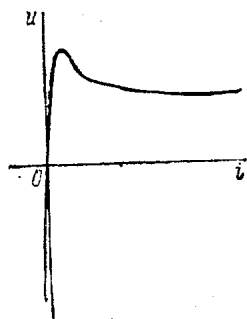


图 1-11

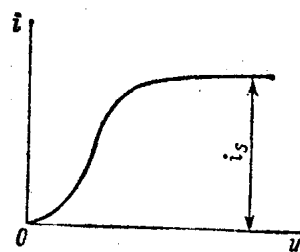


图 1-12

$ku^{3/2}$ ，这是可从理论上导出的。容易把两极整流管做得能耐受高压，因为其中有高真空。它的本质缺点是有大的电压降，这是由于上述负的空间电荷。在这方面，离子器件优于两极

整流管，前者的电压降不大，因为离子的正电荷在很大程度上补偿了电子的负电荷。

属于整流用离子器件的，除了上述的汞弧整流元件之外，还有充气管。它类似两极整流管，有用外电源加热的固体阴极，但充以某种稀有气体或汞蒸汽。如要充以汞蒸汽，则在管体中放一滴汞液，在它的表面以上形成汞的饱和蒸汽。充气管的特性曲线的形状与汞弧整流元件相似（见图1-11）。

半导体二极管的特性也是不对称的，我们将在§1-6中专门讨论这种器件。

§ 1-4 惯性的与无惯性的非线性电阻元件

某些非线性元件在交流电下有这样一个特征，即有电阻不能迅速变化的惯性。白炽灯就是这样的惯性非线性元件，有很大的热惯性。当通过灯的电流以足够大的频率变化、例如以工频 $f = 50\text{Hz}$ 变化的时候，灯丝温度在一个周期中实际上不变，相应地灯的电阻在一个周期中也保持不变。因此，当交变电流的有效值不变时，白炽灯表现为线性元件。通过灯的电流的波形与外加电压一致，如电压为正弦形，电流也是正弦的。但是当电流的有效值 I 变化时，灯丝的温度与电阻随之变化，于是灯的表示电压电流有效值关系的特性 $U = F(I)$ 相应地显示为非线性的（见图1-3）。

除了惯性的非线性元件之外，还有这样的非线性元件，它们在不太高的频率下可看作无惯性的。属于它们的首先是电子管，因为在其中形成电流的电子只有很小的惯性。这种元件无论对电压电流的有效值来说，或对瞬时值来说，都是非线性的。在交流电下，这些元件的电压与电流的波形是不同的，例如，在正弦形电压下，电流是非正弦的；反之，当通过正弦电流时，电压是非正弦的。因此，这类元件的表示电压电流有效值关系的非线性特性 $U = F(I)$ 依赖于电压电流瞬时值的波形。

在研究这种元件的电压电流瞬时值之间的关系时，自然地要使用动态电阻与电导：

$$r_s = \frac{du}{di}, \quad g_s = \frac{di}{du}$$

这里 r_s 与 g_s 是电流 i 与相应电压 u 的函数。

在研究元件的电压电流有效值之间的关系时，可使用等效电阻和电导，它们为

$$r_e = \frac{U}{I}, \quad g_e = \frac{I}{U}$$

因为这些元件的电感和电容略去了。

§ 1-5 可用于稳压或稳流的非线性电阻元件的特性

图1-13显示稳流管的特性。它有密封并充以氢气的玻璃外壳，其中放有铁丝，接向外壳的端子。当通过铁丝的电流改变时，它的温度发生变化，再加上相应的冷却条件，就使稳流管

具有如图中所示的电压电流间的非线性关系。当稳流管端电压在 u' 与 u'' 之间的范围内变动时, 电流几乎不变。因此它被用以稳流。为此目的, 把它串接于需要稳流的负载。假如这样选择电路的工作状态, 使加在稳流管上的电压 (即电网电压与负载电压之差) 如图1-13中的 u_{HOM} , 那么当电网电压有 $\pm \Delta u$ 的波动时, 这些波动实际上全由稳流管承担, 因为电流保持不变并且相应地负载电压也不变 (当负载电阻为常数时)。如负载电阻变化, 电路中电流也不变, 但此时负载电压是要变的。要达到稳流目的, 重要的是使电网电压与负载电压之差不越出 u' 与 u'' 的范围 (图1-13)。

辉光放电管 (氖气管、稳压管等) 被广泛地用作非线性元件。这些电子管都有充以惰气的密封外壳, 其中有两个电极, 隔以气隙。图1-14给出这种电子管的特性。当这种管子处于冷的状态时, 如逐渐增加电压, 电流略有增长, 但数值保持很小。电极间电压达到 u_0 时, 发生辉光放电——管子点燃, 即气体开始发光。管子特性曲线的某一段是下降的, 这是由于电流增加时气体电离化程度加大, 于是气隙电导相应地增大的缘故。如电流在 i' 与 i'' 的范围内变动, 管子电压实际上保持不变。所谓稳压管就利用这个现象来稳压。

稳压管是一种辉光放电管, 它与一线性电阻器 r 串联 (图1-15)。需要稳压的负载 N 与管子并联。整个电路的正常工作状态是这样选择的, 以使管子电流等于 i_{HOM} (图1-14)。当电网电压 u_1 变动时, 电阻器 r 中的电流 $i_1 = i + i_2$ 也变化, 但只要电流的这些波动不越出 $\pm \Delta i$ 的范围 (图1-14), 那么它们实际上全由管子电流 i 来承担。管子与负载的电压 u_2 以及负载电流 i_2 基本上不变。如负载电阻变化, 电压 u_2 也保持恒定。这时电流 i_2 的变化由管子电流 i 的变动来补偿。要稳住电压 u_2 , 必须在电网电压和负载电阻的波动下, 使管子电流保持在 i' 与 i'' 的范围内 (图1-14)。

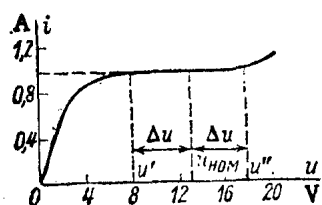


图 1-13

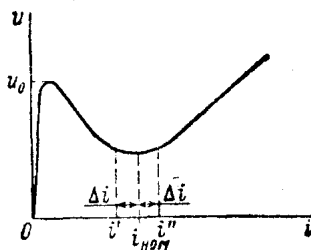


图 1-14

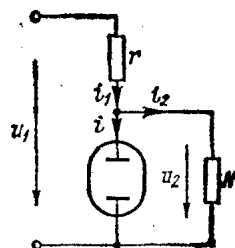


图 1-15

§ 1-6 半导体二极管作为电路非线性元件

具有不对称非线性特性的半导体二极管得到特别广泛的应用。用氧化铜和硒制作的半导体整流元件来整流已是很长久的事情了。

应用极广的锗和硅半导体整流元件特别使人感兴趣。我们将较详细地研究这些整流元件中的过程, 因为这对后面弄清楚锗三极管的作用原理时是必需的。

锗与硅属于第四族元素，它们的原子在外层有四个价电子。在锗的晶体中，原子是这样排列的，每个原子位于四个相邻原子的中间，它与那四个原子间的距离相等，角度也相同。每个原子的四个价电子与四个相邻原子结合成所谓共价键。这样，相邻原子的两个电子参与每个共价键。图1-16在平面上有条件地显示锗的晶体格子的结构。原子核与价电子以外的电子合在一起在化学性能和导电性方面是不活泼的，带有正的电荷，其绝对值与四个电子的电荷相等。

在所谓半导体的能级图上，在价带与传导带之间的能级间隙约为1 eV（锗是0.72 eV，硅则为1.11 eV），远小于介质。因此，在室温条件下，半导体中有比介质为多的电子能越过这个间隙而进入传导带。这时价带中出现了未被电子占领的地方，即正的空穴。图1-17a在晶体格子模型上示意地显示这个过程，图1-17b则在能级图上表示之。传导带中的电子与价带中的空穴决定半导体的导电性。纯锗在 $t = 20^{\circ}\text{C}$ 时的电阻率为 $\rho = 0.6 \Omega \cdot \text{m}$ ，而云母之类的介质则为 $\rho \approx 9 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$ 。当温度增加时，能穿越能级间隙的电子数目就增加，因而纯锗的电阻率随温度的上升而减少，即纯锗有负电阻温度系数。

特别重要的是，如在锗中掺入微量由第三族元素（硼、镉）或第五族元素（砷、锑）所构成的杂质，则可影响它的电导的数值与性质。

现假设，在锗的晶体中加入少量由第五族元素所构成的杂质，这类元素的原子有五个价电子。杂质原子在晶体格子中取代了锗原子。这时，杂质原子的四个价电子与四个相邻锗原子结合成共价键，而杂质原子的第五个价电子不参与结合，与自己原子关系松懈。它在热运动之类的影响下容易解脱出来，成为导电的自由电子。

这种类型的杂质称为电子的“施主”或“施给者”。掺有这类杂质的半导体的特征为自由电子占优势，称为n型半导体。图1-18a在锗晶体格子模型上示意地显示了因锑原子取代一个锗原子后而形成自由电子的情况。在能级图（图1-18b）上，施主能级位于能级间隙中靠近传导带的地方，因为要使多余的电子解脱出来并进入传导带只需要少许能量。在这个电子

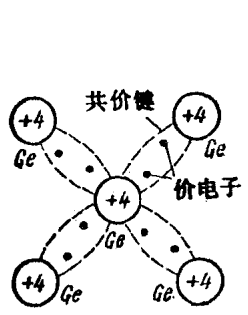


图 1-16

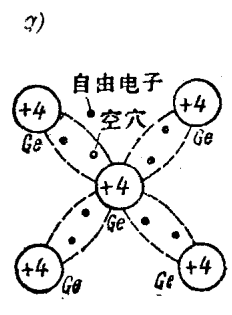


图 1-17

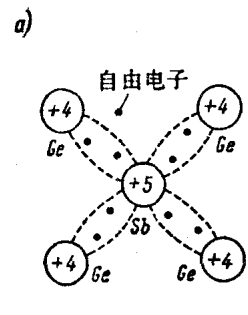
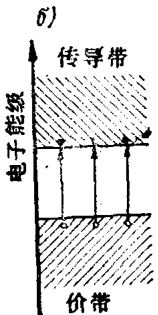


图 1-18



离开后，杂质原子就成为束缚于晶体格子中的正离子。加入微量这种杂质可大大增加锗的电导。例如，在 10^8 个锗原子中加入一个施主原子可把它的电阻率在室温下降为 $\rho = 0.04 \Omega \cdot \text{m}$ 。