

336717

高等学校教材

无线电信号与线路原理

中 册

常 廻 编

高 等 教 育 出 版 社

本书是高等工业学校无线电技术专业的“无线电技术基础”课程的教学参考书。

本书着重研究无线电技术的基本理论和基本分析方法。

全书分上、中、下三册出版。上册内容为控制信号与线性线路分析；中册内容为已调信号与非线性线路分析；下册内容为网络分析与网络综合引论。

中册包括非线性元件及非线性特性的表示法、谐振放大、调制概论、调制的实现、解调与变频、自激振荡原理、正弦波自激振荡器线路、一些振荡现象及其应用、反馈系统九章。

本书中册经冯秉銓同志审阅。

无线电信号与线路原理

(中 册)

常 迺 编

北京市书刊出版业营业许可出字第 119 号

高等教育出版社出版(北京景山东街)

人民教育印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 K15010·1189 开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 9 $\frac{10}{16}$

字数 237,000 印数 0,001—5,000 定价(7)¥1.10

1965年11月第1版 1965年11月北京第1次印刷

序

本册内容为已调信号与非线性线路分析。

在无线电技术中,信息的传输是一个核心问题。为能有效而可靠地传输信息,除应将信号作适当的放大外,还须进行一系列的频率变换过程。因此,信号的放大和各种形式的频率变换(包括倍频、调制、解调、变频等过程)就成为无线电技术的主要内容。

频率变换须借助于非线性线路或变参量线路实现,前者已获得普遍应用,而后者正在迅速发展。在本册中,主要讨论非线性线路的频率变换。非线性线路中包含非线性元件。非线性元件的类型很多,最常用到的是电子管与晶体管。在本册中,以讨论电子管线路为主,间或讨论到晶体管线路。

非线性元件的主要特征在于它们的静态特性是非线性的。非线性的静态特性主要表现为弯曲和折曲两种形式。当作用于非线性元件的信号较小时,只运用到静态特性的弯曲部分,称为小信号运用;当作用于非线性元件的信号较大时,运用到静态特性的折曲部分,称为大信号运用。无论何种形式的频率变换,皆可按信号的大小而分为小信号和大信号两种运用情况。在本册中,从第一章起,就注意到这两种运用在物理过程上和分析方法上的特点和差异。

鉴于自激振荡器在无线电设备中起着类似于心脏性质的核心作用,应用十分广泛,故在本册中给予应有的重视。用负阻概念和反馈概念对振荡器作了统一的解释,并从不同的角度讨论了自激振荡器的平衡条件和稳定条件。此外,对间歇、拖曳和占据三种振荡现象的物理过程以及产生条件分别作了简要的阐述和分析。

反馈系统在无线电技术中的应用正在日益增多。在本册最后列入了反馈系统一章。首先,简单地介绍了反馈系统的方块图表示法和信号流图表示法;然后概括地讨论了判断系统稳定性的两个常用准则——罗斯-胡维茨稳定准则和奈奎斯特稳定准则。这些表示方法和稳定准则虽属于线性系统的分析方法,但对于非线性系统的增量等效线性线路同样适用。

就本册的章节安排而言,可分为三个部分:一是谐振放大和频率变换部分,包括前五章;二是自激振荡部分,包括第六章、第七章和第八章;三是反馈系统部分,仅包括最后一章。

本册中所采用的符号,力求与上册中所采用的一致,但考虑到问题的特点和习惯用法,有些地方作了适当的变动。例如,为避免混淆,分别用 $\bar{K}$ 和 $\bar{\beta}$ (而不是用 K 和 β) 来表示复量放大特性与反馈特性;而与拉氏变换、傅氏变换有关的复量,其上的一横都省去了。

本册除第八章外,其余各章均配有习题。第六和第七两章在内容上紧密联系,习题也合在一起附于第七章之后。

在本册的编写过程中,编者得到了校内和校外很多同志的帮助,并承冯秉铨同志审阅,提出很多宝贵意见。在此,编者谨向以上同志表示感谢。

编者

1965年7月于清华大学

目 录

序	vii
第一章 非线性元件及非线性特性的表示法	1
1-1. 引言	1
1-2. 非线性电阻、非线性电感与非线性电容	2
1-3. 非线性特性的幂级数表示法	7
1-4. 非线性特性的最小二乘方逼近表示法	13
1-5. 非线性特性的折线近似表示法	15
1-6. 非正弦波的傅里叶级数表示法	16
1-7. 余弦脉冲的分解系数	18
1-8. 综合频率的产生	21
习题	23
第二章 谐振放大	26
2-1. 引言	26
2-2. 线性谐振放大器的工作原理	29
2-3. 参差调谐线性谐振放大器	33
2-4. 功率谐振放大器的工作原理	36
2-5. 功率谐振放大器的图解分析	42
2-6. 功率谐振放大器的折线法分析	46
2-7. 功率谐振放大器的等效电路	54
2-8. 谐振放大器的镇电线路	56
2-9. 倍频	59
习题	60
第三章 调制概论	63
3-1. 引言	63
3-2. 瞬时频率	64
3-3. 调幅	66
3-4. 调频与调相	73
3-5. 调频波的频谱	79
3-6. 调相波的频谱	86
3-7. 调幅信号通过振荡回路	88

3-8. 调频信号通过振荡回路.....	93
习题.....	100
第四章 调制的实现	102
4-1. 引言.....	102
4-2. 小信号平方律调幅.....	102
4-3. 小信号平衡调幅.....	106
4-4. 大信号栅偏压调幅.....	110
4-5. 大信号阳极调幅.....	116
4-6. 直接调频——电抗管调频.....	123
4-7. 间接调频——调相-调频.....	129
习题.....	133
第五章 解调与变频	137
5-1. 引言.....	137
5-2. 大信号幅度检波——大信号二极管检波器.....	138
5-3. 小信号幅度检波——小信号二极管检波器.....	152
5-4. 栅极检波与阳极检波.....	156
5-5. 频率检波——鉴频器.....	159
5-6. 相位检波——鉴相器.....	164
5-7. 变频.....	166
习题.....	171
第六章 自激振荡原理	175
6-1. 引言.....	175
6-2. 负阻作用与负阻元件.....	176
6-3. 反馈振荡器的平衡条件.....	181
6-4. 反馈振荡器的稳定条件.....	184
6-5. 反馈振荡器振幅平衡与振幅稳定的分析.....	189
6-6. 自激振荡器的振荡方程.....	193
6-7. 自激振荡的自动起振——自给偏压的作用.....	201
6-8. 弛张振荡.....	203
第七章 正弦波自激振荡器线路	209
7-1. 引言.....	209
7-2. 三点式 LC 自激振荡器线路.....	209
7-3. 调阳振荡器线路与调栅振荡器线路.....	214
7-4. RC 自激振荡器线路.....	217
7-5. 石英振荡器线路.....	223

7-6. 半导体管自激振荡器线路·····	225
习题·····	230
第八章 一些振荡现象及其应用·····	237
8-1. 引言·····	237
8-2. 间歇振荡现象·····	238
8-3. 拖曳现象·····	244
8-4. 占据现象·····	250
8-5. 参量激励·····	257
8-6. 参量放大·····	262
第九章 反馈系统·····	265
9-1. 引言·····	265
9-2. 方块图表示法·····	266
9-3. 信号流图表示法·····	270
9-4. 简单反馈线路示例·····	277
9-5. 反馈系统的一般稳定条件·····	282
9-6. 罗斯-胡维茨稳定准则·····	283
9-7. 奈奎斯特稳定准则·····	289
习题·····	296
参考书目·····	300

第一章 非线性元件及非线性特性的表示法

1-1. 引言

在无线电技术中，除大量应用线性的电阻、电感和电容外，还广泛采用了各种非线性元件。利用非线性元件可以产生振荡，实现放大和频率的变换。

非线性元件的共同特征就在于它们的工作特性是非线性的。非线性电阻的伏安特性，非线性电感的磁化特性和非线性电容的伏库特性都不满足线性关系。

按照电流可流通的方向，非线性元件可分为单向的和双向的两类。常用电子器件(电子管、晶体管)属于单向的非线性元件；热敏电阻、磁心电感和钛酸钡电容等属于双向的非线性元件。按照引出端的数目，非线性元件又可分为二端的、四端的和多端的等类。在二端的非线性元件上流过的电流仅与其两端的电压有关，所以这类非线性元件又称为自控的非线性元件。二极管、非线性电感和非线性电容都属于这类元件。若非线性元件具有较多的引出端，则流过其中两端的电流不仅与这两端间的电压有关，而且还受到其他端点间的电压或电流的控制，所以这类非线性元件又称为他控的非线性元件。三极管和多极管都属于他控非线性元件。

分析非线性线路要比分析线性线路复杂得多。主要原因在于非线性线路不满足叠加定理，因此，许多适用于线性线路的分析方法对非线性线路就不再适用。在正弦电压的作用下，非线性元件中的电流波形已不是正弦波，因而在非线性线路中将产生新频

率。这是非线性线路的一个基本特点。换言之，非线性元件有频率变换的作用。

既然非线性线路与线性线路有着本质的差异，因而研究这两种线路的方法也就大不相同。非线性线路的分析方法大致可分为图解法与解析法两类。根据非线性元件的特性曲线，通过作图直接求得线路中的电流和电压的方法称为图解法。借助于特性曲线的数学表示式，列出线路方程，从而解得线路中的电流和电压的方法，称为解析法。

无论采用什么方法来分析非线性线路，都必须知道非线性元件的静态特性。静态特性通常用静态特性曲线来表示。静态特性曲线是根据实验数据绘制出来的。在解析法中，须先将静态特性曲线近似地表示为数学式。由于信号的强弱不同，静态特性的运用范围也不同，因而就有不同的近似方法。

在本章中，首先讨论几种双向非线性元件的非线性特性。然后着重讨论非线性特性的近似表示法，特别是适用于小信号工作情况的幂级数法和适用于大信号工作情况的折线法。最后，讨论正弦振荡作用在非线性电阻上的情况，从而看到非线性元件有频率变换的功能。至于非线性电抗元件对激励电压所产生的响应则不在本章讨论范围之内。在学习本章内容之前，读者应已熟识电子管和晶体管的静态特性。

1-2. 非线性电阻、非线性电感与非线性电容

1) 非线性电阻

电阻的概念来自欧姆定律。欧姆定律指出：对由一定材料做成的一定大小的样件来说，流过其中的电流与其两端的电压成正比。比例常数随样件的材料和几何形状而变。满足这种比例关系的样件称为线性电阻。线性电阻的阻值 R 是一常数，即

$$R = \frac{u}{i} = \frac{du}{di}. \quad (1-1)$$

式中 u 是电阻两端的电压, i 是流过电阻的电流, $\frac{du}{di}$ 表示电压对电流的导数。在线性条件下, 电压与电流的比值等于电压对电流的导数。

但有很多电阻, 其端电压 u 和电流 i 不成比例, 它们之间的关系只能表示为一般的函数式

$$u = f(i). \quad (1-2)$$

这时电压与电流的比值随电流值而变, 不等于常数。比值 $\frac{u}{i}$ 也不再等于电压对电流的导数 $\frac{du}{di}$ 。这种电阻称为非线性电阻。对于非线性电阻, 我们应规定两个电阻值——静态电阻和动态电阻:

$$\text{静态电阻 } R_j^{\text{①}} = \frac{u}{i}, \quad (1-3)$$

$$\text{动态电阻 } R_d^{\text{②}} = \frac{du}{di}. \quad (1-4)$$

这两个电阻值都不是常数, 而是电流或电压的函数。

表征电阻上的电压与电流之间关系的特性称为伏安特性。线性电阻的伏安特性可表示成如图1-1所示的通过坐标原点的直线。

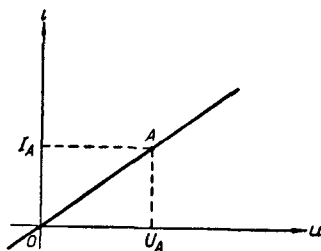


图 1-1. 线性电阻的伏安特性。

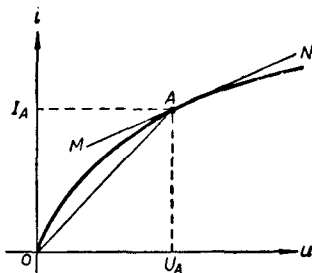


图 1-2. 非线性电阻的伏安特性。

① R_j 中的下角 j 是静态(jingtai)的代号。

② R_d 中的下角 d 是动态(dongtai)的代号。

该直线的斜率的倒数即等于电阻值。图 1-2 上的曲线代表一非线性电阻的伏安特性。图中直线 OA 的斜率的倒数就是当电流等于 I_A 时的静态电阻, 切线 MN 的斜率的倒数是这时的动态电阻。显然, 直线 OA 和切线 MN 的斜率都是随电流值 (或 A 点的位置) 而变的。

实际应用中所遇到的非线性电阻元件有很多种, 大致可分为两类: 单向的非线性电阻和双向的非线性电阻。电子管和晶体管属于前一类, 变阻器和热敏电阻等属于后一类。图 1-3 所示的硅

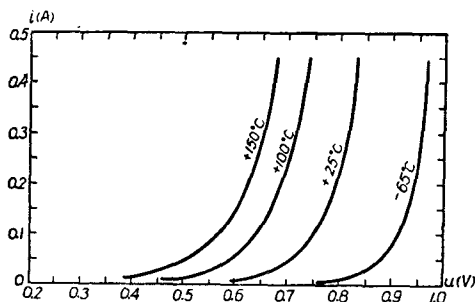


图 1-3. 硅二极管的伏安特性。

二极管的伏安特性是单向的。从图中曲线可看出: 这种元件的静

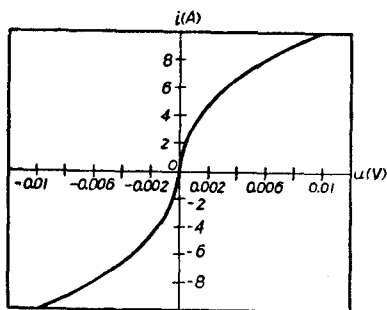


图 1-4. 硅炭非线性电阻的伏安特性。

态电阻值和动态电阻值相差很大, 随电压或电流的变化也较显著, 并且与工作温度有很大关系。由硅炭混合物制成的非线性电阻具有双向对称的非线性伏安特性, 如图 1-4。这种特性可表示为

$$u = K i^n, \quad (1-5)$$

式中 K 和 n 是两个常数, 由元件的材料和结构而定。

2) 非线性电感

电感的概念来自法拉第定律。当穿过线圈的磁链发生变化时，在线圈两端将产生感应电动势。这感应电动势等于

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}. \quad (1-6)$$

式中 e 代表感应电动势， Ψ 代表总磁链量。

设线圈中的磁链是由通过线圈的电流产生的，这时感应电动势可写为

$$e = -\frac{d\Psi}{di} \frac{di}{dt}. \quad (1-7)$$

如果线圈的磁链与电流成线性关系，则

$$\frac{d\Psi}{di} = \frac{\Psi}{i} = L \quad (1-8)$$

是一常数，称为线圈的自感系数或简称电感。如果线圈中填充有磁导率随磁链而变的物质，则磁链与电流间不再保持线性关系，这时线圈的电感也就不再是一常数，而是电流的函数，记为

$$L(i) = \frac{d\Psi(i)}{di}. \quad (1-9)$$

这里，把 $L(i)$ 称为非线性电感或动态电感。同静态电阻相比拟，虽同样可规定一静态电感，但在动态分析中，静态电感是没有意义的，因为感应电动势只与动态电感有关。感应电动势一般可表示为

$$e = -L(i) \frac{di}{dt}. \quad (1-10)$$

电感的非线性特性主要决定于磁心材料。理想的非线性电感的磁链应是电流的单值函数，也就是，电感的磁心材料应该没有磁滞。单值非线性电感的特性可绘成如图 1-5(I) 所示的变化曲线。这种曲线通常称为磁化曲线。但有时也用到具有磁滞环的磁心材料，这种电感的非线性特性比较复杂，它不仅与磁心材料的性质有

关, 而且与磁心材料的磁化历史有关, 这时磁链是电流的多值函数, 如图 1-5(2) 所示。

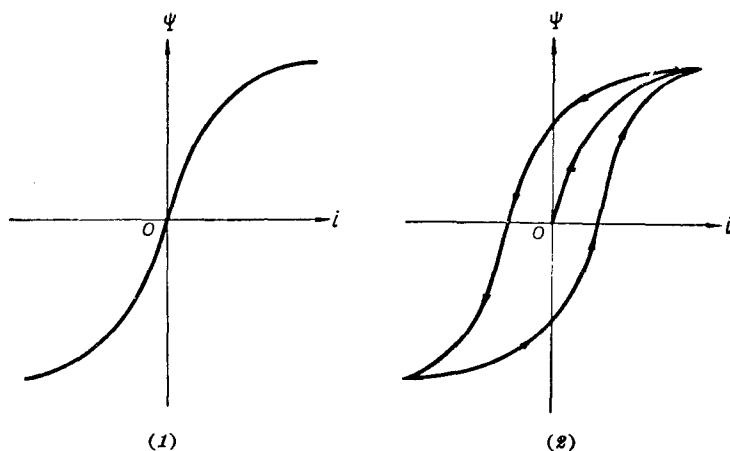


图 1-5. 磁化曲线。

3) 非线性电容

电容的概念来自库仑定律。在两金属板间聚集有正负电荷时, 两板间将有电位差产生。电荷的电量 q 与电位差 u 的比值即等于该两金属板的电容量 C 。设金属板的面积为 A , 距离为 d , 其中间介质的介电常数为 ϵ , 则两金属板的电容 C 将等于

$$C = \frac{\epsilon A}{d} = \frac{q}{u}. \quad (1-11)$$

若介电常数 ϵ 不随金属板间的电场强度而变, 则电容 C 将是一固定值, 金属板上所储存的电荷与板间的电位差将成比例地改变。这是线性电容的特征。但也有许多介电常数 ϵ 随电场强度而变的介电材料, 如钛酸钡、智利盐等。由于它们的介电常数不是常数, u 与 q 不再保持线性关系。这种电容称为非线性电容。对非

线性电容而言, 同样可定义静态电容与动态电容:

$$\text{静态电容 } C_j = \frac{q}{u}, \quad (1-12)$$

$$\text{动态电容 } C_d = \frac{dq}{du}. \quad (1-13)$$

满足线性条件时, 这两个电容相等; 在非线性情况下, 它们彼此不等, 且都随电荷或电压而变。

电容两端的电压与其上累积的电荷量之间的关系称为电容的伏库特性。非线性电容的伏库特性随电容中介电材料的性质而定。同导磁材料相似, 许多介电材料具有饱和和滞后性质。利用这种材料做成的电容器不仅具有非线性特性而且有滞后特性。

以上分别讨论了非线性电阻、非线性电感和非线性电容的基本特性。前一种属于耗能元件, 后两种属于储能元件。这两类元件在应用上有着很大的差别。耗能元件上的电压仅是电流的函数, 而储能元件上的电压则是电流的微分或积分的函数。耗能元件不存在滞后现象, 而储能元件则可能产生滞后现象。以上所讨论的非线性元件限于二端非控制元件, 即仅有两个引出端的固定元件。此外, 还有一些多端的或他控的非线性元件, 如电子管、晶体管和一些其他控制元件。这些元件在一定的运用条件下, 具有非线性耗能元件或非线性储能元件的性质。关于这些非线性元件的特性与应用将见于以后各章中。

1-3. 非线性特性的幂级数表示法

非线性元件的特性一般是由实验得到的。非线性电阻的伏安特性(包括单向和双向)、非线性电感的磁化特性和非线性电容的伏库特性都是根据实验数据绘出的特性曲线。若利用解析法研究含有非线性元件的线路, 须先写出特性曲线的数学表示式, 然后再

根据线路方程求解。

用幂级数来表示特性曲线是一种最基本的方法，但在应用上却存在一定困难。若欲准确地表示出一组特性曲线，往往需要用项数较多的级数，这样就使计算变得十分烦琐。如果所得的非线性特性比较规则，用级数的少数几项就能代表原来的特性曲线，这时幂级数法将是一较好的方法。特别是在小信号运用条件下，由于运用范围较小，级数收敛很快，利用幂级数是方便的。

现在来讨论幂级数表示法。设一非线性电阻的伏安特性 $i(u)$ 可用如下的幂级数来表示：

$$i(u) = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3 + \cdots \quad (1-14)$$

为确定这幂级数中的各系数，可首先求出函数 $i(u)$ 的各阶导数，然后再从各阶导数中求出系数 $a_0, a_1, \cdots$ 。对式 (1-14) 求各阶导数，可得下列一组关系式：

$$\left. \begin{aligned} \frac{di}{du} &= a_1 + 2a_2 u + 3a_3 u^2 + 4a_4 u^3 + \cdots; \\ \frac{d^2 i}{du^2} &= 2a_2 + 6a_3 u + 12a_4 u^2 + \cdots; \\ \frac{d^3 i}{du^3} &= 6a_3 + 24a_4 u + \cdots; \\ \frac{d^4 i}{du^4} &= 24a_4 + \cdots; \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

现举一例来说明求各阶导数和各系数的方法。

例 1-1. 在表 1-1 的前两列中列入已得的实验数据。相邻两电流 i 的差值列入第三列，以 $\Delta_1 i$ 表示之。再取相邻两 $\Delta_1 i$ 的差值列入第四行，以 $\Delta_2 i$ 表示之，依此类推，得 $\Delta_3 i$ 和 $\Delta_4 i$ 。因为 $\Delta_3 i$ 已近于常数，若再取其差值，则近于零，可忽略不计。

各阶导数可近似表示为：

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{di}{du} &= \frac{\Delta_1 i}{\Delta u}; \\
 \frac{d^2 i}{du^2} &= \frac{\Delta \left(\frac{\Delta_1 i}{\Delta u} \right)}{\Delta u} = \frac{\Delta_2 i}{(\Delta u)^2}; \\
 \frac{d^3 i}{du^3} &= \frac{\Delta \left[\frac{\Delta_2 i}{(\Delta u)^2} \right]}{\Delta u} = \frac{\Delta_3 i}{(\Delta u)^3}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 \frac{d^n i}{du^n} &= \frac{\Delta \left[\frac{\Delta_{n-1} i}{(\Delta u)^{n-1}} \right]}{\Delta u} = \frac{\Delta_n i}{(\Delta u)^n}.
 \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

表 1-1.

u (V)	i (mA)	$\Delta_1 i$ (mA)	$\Delta_2 i$ (mA)	$\Delta_3 i$ (mA)	$\Delta_4 i$ (mA)
0	0.05				
10	0.90	0.85			
20	2.15	1.25	0.40	-0.05	0
30	3.75	1.60	0.30	-0.05	0
40	5.65	1.90	0.25	-0.05	-0.01
50	7.80	2.15	0.21	-0.04	+0.01
60	10.16	2.36	0.16	-0.05	-0.01
70	12.68	2.52	0.12	-0.04	0
80	15.32	2.64	0.08	-0.04	
90	18.04	2.72			

因为 $\Delta_1 i$ 、 $\Delta_2 i$ 、 $\dots$ 随 u 值而变, 故系数 a_0 、 a_1 、 a_2 、 $\dots$ 也都是电压 u 的函数。在确定各系数时, 应先选择一合适的 u 值。

在本例题中, 取 $u=30$ V, $\Delta u=10$ V。根据式(1-15)和式(1-16), 再利用表 1-1 中所列数据可得:

$$a_4 = 0;$$

$$a_3 = \frac{1}{6} \frac{d^3 i}{du^3} \approx \frac{1}{6} \frac{\Delta_3 i}{(\Delta u)^3} = \frac{-0.05}{6(10)^3} \approx -0.8 \times 10^{-5} \text{ mA/V}^3,$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{d^2 i}{du^2} - 6a_3 u \right)$$

$$\begin{aligned}
&\approx \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta_0 i}{(\Delta u)^2} - 6a_3 u \right] \\
&= \frac{1}{2} \left[\frac{0.30}{10^2} - 6(-0.8 \times 10^{-5})30 \right] \\
&\approx 0.0022 \text{ mA/V}^2; \\
a_1 &= \frac{di}{du} - 2a_2 u - 3a_3 u^2 \\
&\approx \frac{\Delta_1 i}{\Delta u} - 2a_2 u - 3a_3 u^2 \\
&= \frac{1.75}{10} - 2(0.0022 \times 30) - 3(-0.8 \times 10^{-5} \times 30^2) \approx 0.065 \text{ mA/V},
\end{aligned}$$

这里 $\Delta_1 i$ 取表 1-1 中 1.60 和 1.90 两值的平均值 1.75;

$$\begin{aligned}
a_0 &= i - a_1 u - a_2 u^2 - a_3 u^3 \\
&\approx 3.75 - 0.065 \times 30 - 0.0022 \times 30^2 - (-0.80 \times 10^{-5}) \times 30^3 \\
&= 0.04 \text{ mA}.
\end{aligned}$$

将上面所求得的系数代入式(1-14)中, 即得 $i(u)$ 的幂级数

$$i = 0.04 + 0.065u + 0.0022u^2 - 0.8 \times 10^{-5}u^3.$$

这样所得到的幂级数有时是不够准确的。引入误差的原因有二: 一是实验数据有误差, 尤其是在取各次差值时, 其上下跳动的程度愈来愈显著。最好是将实验数据和各次差值先绘成平滑的曲线, 再从平滑的曲线上取下与各电压相对应的数据。经过一次平整后所得的结果将更为准确。二是由于非线性的关系, 各次差值随电压值而变, 根据不同电压值所得的系数也就有所不同。

在应用时, 为减小级数表示式的误差, 经常是围绕运用点而不是围绕原点将非线性特性展为幂级数, 这就是泰勒级数表示法。

设一伏安特性表示为 $i(u)$, 围绕 u_0 将其展为泰勒级数, 即有

$$\begin{aligned}
i(u) &= i_0 + \left. \frac{di}{du} \right|_{u_0} (u - u_0) + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2 i}{du^2} \right|_{u_0} (u - u_0)^2 + \\
&\quad + \frac{1}{3!} \left. \frac{d^3 i}{du^3} \right|_{u_0} (u - u_0)^3 + \dots, \quad (1-17)
\end{aligned}$$

或写为