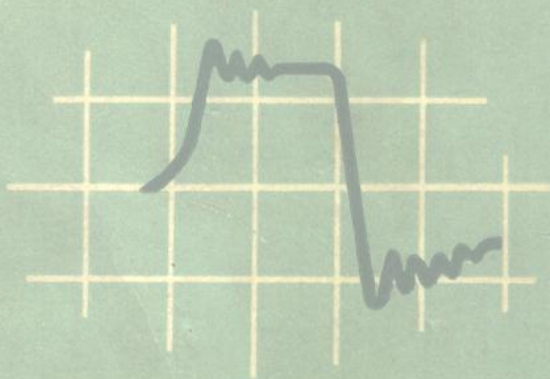


[苏联] B. T. 弗罗尔金著



脉冲技术

国防工业出版社

75.463
168
3

脉 冲 技 术

[苏联] B. T. 弗罗尔金著

俞斯乐、邱 洵、祖百正 译

俞斯乐校



国防工业出版社



1964
1965.1.14

图书馆

內容簡介

本书系統地介紹了在雷达、电视、无綫电控制、核子物理、电子計算机以及工业生产过程自动化等技术部門中广泛应用的各種脉冲电路的工作原理和一般的工程計算方法。在分析工作过程方面，除了利用普通拉普拉斯变换法以外，还应用了离散拉普拉斯变换法。在所研究的电路方面，除了电子管脉冲电路以外，还有晶体管脉冲电路。

本书可作为高等学校无綫电系“脉冲技术”課程的教学参考书，同时也可供在应用无綫电技术和工业电子学的各部門中从事脉冲电路的制造和設計的工程师参考。

ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА

〔苏联〕 В. Т. Фролкин

СОВЕТСКОЕ РАДИО 1960

*

脉冲技术

俞斯乐、邱洵、祖百正譯

俞斯乐校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印張 9¹/₂ 243 千字

1964年12月第一版 1964年12月第一次印刷 印数：0,001—6,600册

統一书号：15034·745 定价：(科六)1.40 元

目 录

第一章 緒論	5
§ 1 脉冲技术的研究对象	5
§ 2 电子管和半导体器件的脉冲等效电路	10
第二章 利用微分电路和积分电路形成电压脉冲	24
§ 1 概述	24
§ 2 最简单的 RC 微分电路和积分电路	25
§ 3 利用負反饋运算放大器提高微分和积分的精确度	31
§ 4 利用电感綫圈的准微分	43
第三章 三角形 (鋸齿形) 电压脉冲的获得	46
§ 1 概述	46
§ 2 产生鋸齿电压的方法	51
§ 3 电容器經過电阻充电	54
§ 4 高交流阻抗的应用	59
§ 5 补偿电路	71
§ 6 具有負反饋的电路, 积分电路	83
§ 7 在自感綫圈中得到三角形电流脉冲	95
第四章 触发綫路和脉冲張弛振蕩器	102
§ 1 概述	102
§ 2 双稳态触发綫路 (触发器)	103
§ 3 单稳态多諧振蕩器	129
§ 4 幻象型脉冲張弛振蕩器	153
§ 5 間歇振蕩器	168
第五章 应用延迟綫的脉冲发生器	185
§ 1 概述	185
§ 2 延迟綫用作形成电路的方法	187
§ 3 由阶跃电压形成脉冲的發生器的原理电路	191

75.463
125
3

脉 冲 技 术

[苏联] B. T. 弗罗尔金著

俞斯乐、邱 洵、祖百正 译

俞斯乐 校



国防工业出版社

1964

内 容 简 介

本书系统地介绍了在雷达、电视、无线电控制、核子物理、电子计算机以及工业生产过程自动化等技术部门中广泛应用的各种脉冲电路的工作原理和一般的工程计算方法。在分析工作过程方面，除了利用普通拉普拉斯变换法以外，还应用了离散拉普拉斯变换法。在所研究的电路方面，除了电子管脉冲电路以外，还有晶体管脉冲电路。

本书可作为高等学校无线电系“脉冲技术”课程的教学参考书，同时也可供在应用无线电技术和工业电子学的各部门中从事脉冲电路的制造和设计的工程师参考。

ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА

〔苏联〕 В. Т. Фролкин

СОВЕТСКОЕ РАДИО 1960

*

脉 冲 技 术

俞斯乐、邱 洵、祖百正译

俞斯乐校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 9¹/₂ 243 千字

1964年12月第一版 1964年12月第一次印刷 印数：0,001—6,600册

统一书号：15034·745 定价：(科六)1.40 元

目 录

第一章 緒論	5
§ 1 脉冲技术的研究对象	5
§ 2 电子管和半导体器件的脉冲等效电路	10
第二章 利用微分电路和积分电路形成电压脉冲	24
§ 1 概述	24
§ 2 最简单的 RC 微分电路和积分电路	25
§ 3 利用負反饋运算放大器提高微分和积分的精确度	31
§ 4 利用电感綫圈的准微分	43
第三章 三角形 (鋸齿形) 电压脉冲的获得	46
§ 1 概述	46
§ 2 产生鋸齿电压的方法	51
§ 3 电容器經過电阻充电	54
§ 4 高交流阻抗的应用	59
§ 5 补偿电路	71
§ 6 具有負反饋的电路, 积分电路	83
§ 7 在自感綫圈中得到三角形电流脉冲	95
第四章 触发綫路和脉冲張弛振蕩器	102
§ 1 概述	102
§ 2 双稳态触发綫路 (触发器)	103
§ 3 单稳态多諧振蕩器	129
§ 4 幻象型脉冲張弛振蕩器	153
§ 5 間歇振蕩器	168
第五章 应用延迟綫的脉冲发生器	185
§ 1 概述	185
§ 2 延迟綫用作形成电路的方法	187
§ 3 由阶跃电压形成脉冲的發生器的原理电路	191

§4 延迟綫在張弛振蕩器中的应用	193
§5 延迟綫的結構和参量选择	195
第六章 脉冲重复頻率的分頻	207
§1 概述	207
§2 自激張弛振蕩器的同步	208
§3 利用期待張弛振蕩器的重复頻率的分頻	214
§4 复杂的分頻器电路	216
第七章 脉冲計数器	220
§1 概述	220
§2 串联作用型計数器 (計数电路)	221
§3 儲存型計数器电路	226
§4 計数器的連接图	236
第八章 脉冲信号起始电平的箝定	241
§1 箝位的必要性	241
§2 单极性信号起始电平的箝定	243
§3 双极性信号起始电平的箝定	248
§4 在变压器負載中电流起始电平的箝定	252
第九章 脉冲信号的幅度选择	255
§1 引言	255
§2 幅度选择器	256
§3 幅度比較器	270
§4 幅度鉴别器	280
第十章 脉冲信号的时间选择	285
§1 引言	285
§2 时间选择器	285
§3 时间比較器	293
§4 时间鉴别器	296
参考文献	303

第一章 緒 論

§ 1 脉冲技术的研究对象

像电视、雷达和无线电控制这样一些无线电技术领域的发展，要求制造出一些能形成规定波形的脉冲振荡的设备。在这些技术领域，工作信号的电流和电压具有脉冲特性，它们是一些波形和宽度不同的、经过一定时间间隔而重复着的脉冲。

与电压或电流脉冲的形成和显示有关的问题的范围获得不断扩大和深入的另一个原因是应用电子学——应用电信号以监督工业生产过程并使之自动化及测量各种非电量，包括供精确测量时间间隔用的设备、核物理学中的基本粒子计数器和“示踪原子”显示器及数字计算机中实现数学运算的设备。

脉冲技术的对象是研究无线电技术和应用电子学中所采用的各种波形的脉冲信号的获得和显示的方法和手段，也研究脉冲系统中各单元电路的计算和设计。

由脉冲技术课程中所讨论的电路和设备形成的信号，通常具有低的平均功率，即不超过接收放大管和半导体器件的耗散功率。电流和电压的幅度值也比较小[●]。

脉冲信号的重复周期和宽度可以有极不相同的数值，从几微秒和十分之几微秒到几秒和几十秒。信号的空度，亦即脉冲的重复周期对宽度之比，可以从接近 1 的值变到几百和几千。

脉冲设备的工作特性及其研究的特点 在设计脉冲设备时，通常必须运用各种波形的电压和电流（三角形的，矩形的，阶梯形的，指数形的，双曲线形的等等）。脉冲信号与正弦信号不同，

● 应当指出，普通接收放大管在大空度的脉冲状态下工作时，脉冲电流能够超过其平均值几百倍和几千倍。

即使在通过綫性电路时，它也会发生波形的重大改变。这一性质为利用綫性电路产生所需波形的脉冲信号的方法奠定了基础。这种方法，有时亦通用术语“信号的綫性形成法”。

在綫性形成脉冲信号时，广泛采用带負反饋的放大电路。利用負反饋，可以稳定信号的波形和实现放大器輸入阻抗、輸出阻抗与外电路的匹配。脉冲設備中放大器的作用，常常不在于增大振蕩的幅度，而在于减小信号源的内阻。

脉冲技术中应用的另一种形成振蕩的方法是利用电子管和半导体器件特性曲綫各段的非綫性（信号的非綫性形成法）。这时，电子和离子器件被用作电子继电器，有两个状态：“接通”（电子管导电）和“断开”（电子管截止）。

与无綫电接收设备和无綫电发送設備的一系列綫路不同，在脉冲設備中，所需的信号一般不是在稳定过程中获得的，而是在过渡过程中获得的，像电容器里电荷的改变或自感綫圈中电流的改变就是这样的过渡过程。

由于这些特点，在脉冲技术中很少采用富氏級数和富氏积分对工作过程进行数学分析。研究脉冲电路的基本数学工具是建立和解常系数綫性微积分方程的方法。在用这种方法的时候，非綫性元件的特性曲綫用一些个别的直綫段来代替，而对应于各直綫段的微分方程，在它們的交界处被“縫合”起来。

如果电路不复杂而輸出信号的波形也简单，那么微分方程的解可以用“經典法”找出来，它具有特解和通解之和的形式。但是，現在在研究各种脉冲电路时，广泛采用运算法，运用拉普拉斯正变换和反变换：

$$L[f(t)] = \varphi(p) = \int_0^{\infty} f(t) \exp[-pt] dt \textcircled{\bullet},$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} \varphi(p) \exp[pt] dp,$$

● $\exp[-pt]$ 即 e^{-pt} 。——譯者

式中确定反变换的第二个积分在算子 p 的复变量平面上计算。

这种解微分方程的方法是方便而有效的，分析由微分方程组描述的复杂电路时尤其如此。

在好些脉冲设备中，当电容器在脉冲序列的每一个脉冲宽度内沿某一电路充电，而在脉冲的间隔时间内沿另一电路放电时，常常需要确定动平衡状态的建立时间以及当电容器电荷改变时，这种状态存在的条件。

在这种情况下，动平衡状态的建立时间，以及它存在的条件，将是到来的脉冲数目 n 的函数。这个数目是具有有限增量的整数自变量。

这样的问题，利用线性差分方程^①（有限差方程），并运用离散拉普拉斯变换（例如，参阅文献[6]）：

$$\Phi(q) = \sum_{n=0}^{\infty} f[n] \exp[-qn],$$

$$f[n] = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} \Phi(q) \exp[qn] dq$$

是很容易解决的。

这些公式确立了实变数 n 的阶跃函数（原函数）和复变数 q 的函数（象函数）之间的联系。当复变数 q 的实部的值超过 σ_0 ——即收敛横座标值^②时，由第一个公式确定的级数是绝对收敛的。因此，如果某一阶跃函数 $f[n]$ 的收敛横座标值 $\sigma_0 < \infty$ ，那么在 $R_c[q] > \sigma_0$ 的一切 q 值下，级数将收敛。

可以确定正、反离散拉普拉斯变换的单值性，并能得到一系列与普通拉普拉斯变换中相应的定理和法则类似的定理和法则。

① 关于差分方程和离散拉普拉斯变换问题均可参阅文献[6]第二章或Я.З. Цыпкин (Я.З. 崔普金) 著“Переходные и установившиеся процессы в импульсных цепях”（“脉冲电路中的过渡过程和稳定过程”）苏联国家动力出版社1951年版第一章。——译者

② 参阅文献[6]中文译本第76页。——译者

利用离散拉普拉斯变换去解线性差分方程的优越性和利用普通拉普拉斯变换去解微分方程的优越性是一样的。

对常系数线性差分方程（或方程组）进行离散拉普拉斯变换，可以得到所求阶跃函数象函数的代数方程（或方程组），包括全部边界条件。根据求得的象函数，利用离散拉普拉斯变换反运算的法则或查表即可求出原函数。

脉冲技术的产生和发展 脉冲技术是无无线电电子学中最年青的领域之一。然而，这一领域中的很多成就，却是远在雷达、电视和无无线电控制出现以前的几十年间，由许多学者和工程师发现和工作的结果。

脉冲技术的最大特征是使用张弛（断续）振荡发生器，首先是三角形和矩形脉冲发生器。1918年，卓越的俄罗斯无无线电工作者，尼日格勒无无线电技术实验室领导者、M. A. 邦奇-布鲁叶维奇（Бонч-Бруевич）教授曾研究过具有正反反馈的两级电阻耦合放大器电路，这一电路成为后来研究出的触发线路的基础。1918~1919年在国外发表了自激多谐振荡器的电路（阿勃拉甘与勃洛赫）和板栅耦合触发线路（触发器）（依克尔士和召尔丹）。到1925~1930年间开始了对负跨导管张弛振荡器的研究（范德堡），现在其原理用于幻象延迟电路中。同时，也开始研究供电子束管射线扫描用的线性电压电路（派克拉电路，现在也还用于示波器中）。

在发展非正弦振荡器的一般理论中，苏联的Л. И. 曼杰利什塔姆（Мандельштам）院士和Н. Д. 帕帕列克西（Папалекси）院士所创建的学派占有领导地位。这个学派的代表人物，A. A. 安德罗诺夫（Андронов）院士和С. Э. 哈伊金（Хайкин）教授建立了张弛振荡理论，保证了以后各种触发与张弛振荡设备的很多理论问题及设计任务的解决。

在第二次世界大战年代和战后若干年内，由于无无线电电子学在实验物理、工业和军事技术中的应用，近代脉冲技术才得到创建并迅速发展。在大战年代，交战各国的科学工作者与工程技术

人員創建了很多脉冲电路与設備。美国和英国在无线电电子学領域內的研究成果可在美国麻省理工学院出版的丛书中找到反映，其中有一系列的书包含有大量的脉冲技术电路与設備[●]。

結果，在战后年代形成了大量的實踐上的“堆积”，既得成果的科學總結落后了。这在頗大程度上阻碍了脉冲技术的进一步发展。

战后十年来，在国外，特別是在我国所进行的深入的科学研究，使得这个缺陷得到了消除，并且获得了在脉冲技术領域中新的更大的成就。

Ю. Б. 高布扎烈夫(Кобзарев)、С. И. 耶夫加諾夫(Евтянов)、В. И. 西福罗夫(Сифоров)、Н. Н. 克雷洛夫(Крылов)以及Я. С. 依茨霍基(Ицхоки)、С. А. 德罗波夫(Дробов)、Л. А. 米耶罗維奇(Меерозич)、С. И. 卡塔也夫(Катаев)和其它許多学者在发展脉冲技术的理論基础方面，都作出了很大的貢獻。

现在脉冲技术朝着几个方面发展。由于无线电电子学在物理、工业和軍事技术方面的应用范围日益广泛，在成批制造与使用脉冲电路时保証它們的运用可靠性及高的經濟性有着决定性的意义。达到这些目的的措施之一是使用半导体器件——鍺和硅的二极管及三极管。与电子管相比，它們的寿命长、重量輕而尺寸小、經濟性高。但是，半导体三极管目前还具有一系列缺点，还不能完全代替电子管。

半导体器件的这些缺点中有：气候改变和电离輻射时参量的不穩定、載流子的扩散速度有限、低的輸入阻抗及其它等等。由于半导体器件的参量和电子管相应的参量不同（低的輸入阻抗，具有內部反饋等），因而不允許将本来制訂的电子管电路套用于半导体器件的設備中。

因此，在研究半导体器件的脉冲电路时，发生一系列复杂的問題，为解决这些問題，有許多物理学家和工程师的集体在进行

● 这些书的俄文譯本名称見参考文献 [3, 5, 8, 9]。

工作。目前已經制出了运用半导体三极管（晶体管）的个别的脉冲电路及设备，其中的某些电路将在本书中进行讨论。

最近几年内开始发展一种获得宽度为几个、几十和几百毫微秒（ $10^{-9} \sim 10^{-7}$ 秒）的脉冲技术——毫微秒脉冲技术。这些脉冲的频谱的截止频率相当于 1000~100 兆赫。这个波段的脉冲设备的特点介乎微秒级视频脉冲形成设备与超高频射频脉冲发生器及传输线之间。因此，在产生毫微秒脉冲的技术中，一方面力求改善普通的脉冲电路，使之接近所需的范围；而另一方面采用作为超高频波段特征的具有分布参量的设备。脉冲技术的这个领域是一个专门的研究课题。

§2 电子管和半导体器件的脉冲等效电路

为了对脉冲电路中的工作过程进行数学分析，需要有电子与离子器件伏安特性曲线的解析式。这些器件的特性曲线是非线性的，并且根据实际特性曲线的工作段与其解析式需要符合的程度不同，它可以用各种不同的函数来近似。作为非线性近似，最常用的是将电子管特性曲线用指数、幂级多项式、半立方抛物线以及某些双曲线函数来代表。

但是，这种非线性近似，仅仅适用于解决个别的专门的研究性问题，而对于一般的工程计算却没有得到广泛的应用。

为了进行工程计算，一般都是采用电子管和半导体器件特性曲线的线性近似，从而可用常系数线性微分方程或差分方程来研究脉冲设备的等效电路。线性近似的精确度尤其是在特性曲线下边与上边的弯曲部分附近，自然要比非线性近似低些。但是，常常在分析脉冲电路时，最主要的是获得虽然近似但却是一目了然的、能确定电路参量之间一般关系的公式，而数量上的进一步确定可以比较简单地在实验过程中得到。

在另外一些情况下，当电子管特性曲线的非线性确定着物理过程的实质时（如在间歇振荡器中就有这种情况），则应用依靠电

子管特性曲綫及負載電路的作圖來進行分析的圖解分析法更為適宜。

應當指出，在很多情況下，為了使求得的“綫性化”公式精確而使分析複雜化是不妥當的，因為器件的各個產品的特性差別很大，同時在老化和氣候因素的影響下，器件的參量是改變的。

二極管和三極管的綫性等效電路 圖 1.1 所示為二極管（見圖 1.1 a）和三極管（見圖 1.1 b）的綫性化的伏安特性曲綫。這些特性曲綫的各個綫段可以表示為下列解析式：

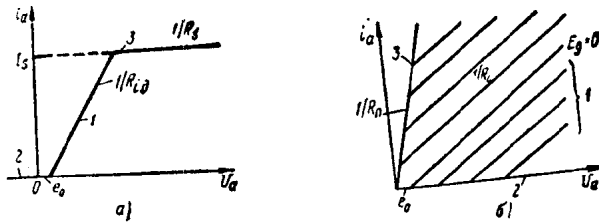


圖 1.1 二極管 (a) 和三極管 (b) 的綫性化靜態特性曲綫：

1—放大狀態；2—截止狀態；3—臨界狀態。

綫段 1 —— 三極管的放大狀態和二極管的傳輸狀態

$$\text{三極管: } i_a = \frac{1}{R_i} [\mu U_g + U_a - e_0], \quad (1.1 a)$$

$$\text{二極管: } i_a = \frac{1}{R_{i\pi}} [U_a - e_0]. \quad (1.1 b)$$

綫段 2 —— 電子管的截止（關閉）狀態

$$i_a = 0. \quad (1.2)$$

綫段 3 —— 三極管的臨界狀態和二極管的飽和狀態

$$\text{三極管: } i_a = \frac{U_a}{R_{ii}}, \quad (1.3 a)$$

$$\text{二極管: } i_a = I_s + \frac{U_a}{R_s}. \quad (1.3 b)$$

公式 (1.1) 至 (1.3) 中所用的各量的符號由圖 1.1 來說明。其中，參量 e_0 表征二極管在傳輸狀態下和三極管在零偏壓

($E_g = 0$) 的放大状态下, 其綫性化特性曲綫在电压軸上的截距值。还应当強調指出, 当电子管特性曲綫各段作这种近似时, 电子管各电极的电压和电流值既包括交流分量 ($i(t), u(t)$), 也包括直流分量 (I, E)。例如, 公式 (1.1 a) 中栅压 U_g 既包括交变的信号电压 $u_g(t)$, 也包括直流偏压 E_g : $U_g = u_g(t) + E_g$ 。

按照关系式 (1.1), (1.2) 和 (1.3) 在图 1.2 上作出了二极管和三极管的等效电路, 以后可利用它們得到計算公式。

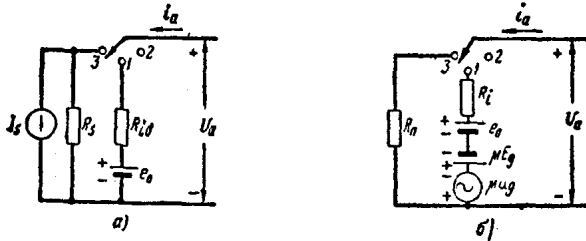


图 1.2 对应于图 1.1 中特性曲綫的二极管 (a) 和三极管 (b) 等效电路。

在这些电路中轉換开关的位置应与二极管或三极管的工作状态相对应。

例如, 在图 1.2 a 的电路中, 当板阴电压 $U_a < e_0$ 的时间間隔內电鍵应处于位置 2。对于图 1.2 b 的电路, 电鍵位置 2 确定于 $U_a < 0$ 和 $U_g < -E_{g0}$ 的数值范围, 这里 E_{g0} 表示电子管栅极截止电压的大小。

帘栅与阴极間具有恒定电压 E_{g2} 的五极管 帘栅与阴极間为某一电压 E_{g2}^{\ominus} 时, 五极管的綫性化特性曲綫示于图 1.3 a。

如果和前面一样, 数值 e_0 理解为在 $E_g = 0$ 时特性曲綫伸直后的延长綫在横軸上的截距, 則显然, 关系式 (1.1a)、(1.2) 和 (1.3 a), 因之图 1.2 b 的等效电路在这种情况下都是正确的 (由图 1.3 a 可以看出, 对于五极管, e_0 永远为負)。对于工作在放

⊖ E_{g2} 原文誤为 E_{g2} 。——譯者

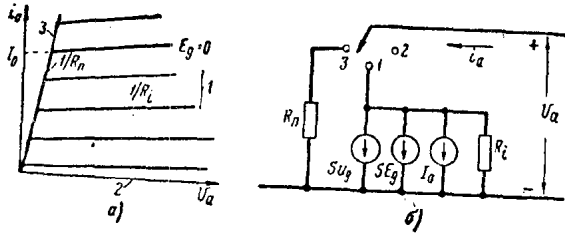


图1.3 五极管的綫性化静态特性曲线 (a) 和等效电路 (b)。

大状态下的五极管，有时按照关系式

$$i_a = I_0 + SU_g + \frac{U_a}{R_i}, \quad (1.4)$$

运用电流源等效电路更为方便(见图 1.3 b)，式中 I_0 是在 $E_g = 0$ 时特性曲线在伸直后与电流轴相交时所得到的一个假想电流。

具有交变电压 U_{g_2} 的五极管 在脉冲电路中，常常不得不碰到帘栅对阴极的电压，在信号形成过程中是变化的五极管。例如，当帘栅由电源 E_{g_2} 经过电阻分压器供电时，或者当存在阴极电阻而帘栅电路并未旁路到阴极时，就有这种情况。在交变帘栅电位的情况下，对于电子管的放大工作状态可以采用图 1.4 所示的板极和帘栅极等效电路，这些电路是按照下列板流和帘栅流的綫性化特性曲线的方程式建立的：

$$i_a = \frac{1}{R_i} (\mu U_{g_2} + \mu_{a0} U_{g_2} + U_a - e'_0), \quad (1.5a)$$

$$i_{g_2} = \frac{1}{R_{i0}} \left(\mu_{g_2} U_{g_2} + \frac{1}{\mu_{a0}} U_a + U_{g_2} - e'_{0g} \right), \quad (1.5b)$$

式中 $R_{i0} = \frac{\partial u_{g_2}}{\partial i_{g_2}}$; $\mu_{g_2} = \frac{\partial u_{g_2}}{\partial u_{g_2}}$; $\mu_{a0} = \frac{\partial u_a}{\partial u_{g_2}}$; $e'_0 = I'_0 R_i$;

$$e'_{0g} = I'_{0g} R_{i0}.$$

假想电流 I'_0 和 I'_{0g} 是在 $U_{g_2} = U_{g_2} = U_a = 0$ 的情况下，板流和帘栅流的相应綫性化特性曲线与纵轴相交构成的。

将板极等效电路和帘栅极等效电路的相应两个方程组联立求