

电子与波的非线性相互作用现象

[美] J. E. 罗埃 著

科学出版社

电子与波的非线性 相互作用现象

[美] J. E. 罗埃 著

张静波 刘国政 黄妙珠 译

齐 欣 校



内 容 简 介

本书是一本较为完整和系统的非线性理论专著,从理论上分析了微波电子器件在大信号情况下电子与波的相互作用。作者把高频结构用等效电路模型处理,把电子注划分成有限数目的电子群,采用拉格朗日法并借助电子计算机对各电子群通过互作用区时的运动和换能情况进行分析,求得大信号情况下各类管型的增益、效率和其它特性参量。

书中前四章为概论和基本理论(分别介绍拉格朗日法、高频结构的等效电路和电子注空间电荷表达式),其余各章运用上述基本理论对各类具体管型及各种相互作用过程进行非线性分析,给出了分析计算结果。本书还对各种非线性理论进行了比较。

本书可供从事微波电子器件研制工作的科技人员和高等院校有关专业师生参考。

Joseph E. Rowe
NONLINEAR ELECTRON-WAVE
INTERACTION PHENOMENA
Academic Press, 1965

电子与波的非线性相互作用现象

〔美〕J. E. 罗埃 著

张静波 刘国政 黄妙珠 译

齐 欣 校

*

科学出版社出版
北京朝阳门内大街 137 号
北京印刷一厂印刷
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979 年 12 月 第 一 版 开本: 850 × 1168 1/32
1979 年 12 月 第一次印刷 印张: 18 1/2
印数: 0001—19,650 字数: 488,000

统一书号: 15031 • 224

本社书号: 1359 • 15—7

定 价: 2.25 元

中 译 本 前 言

微波电子器件经过几十年的发展,已在早期的大量实验研究的基础上,演变成为一个具有完整理论的技术科学分支。人们不仅需要掌握产生和放大微波功率的技术,而且应该从理论上认识它,以推动微波电子器件的发展。四十年代末期,随着大功率微波管的出现,人们开始了非线性理论的研究,以后逐渐形成了几种不同的理论体系。《电子与波的非线性相互作用现象》一书,就是罗埃理论的一个系统总结。

在分析电子与波的非线性相互作用时,罗埃把高频结构用等效电路模型进行处理,把连续的电子注划分为分立的电子群,然后分析各个电子群通过相互作用区时运动和换能情况。在非线性相互作用情况下,电子运动出现超越现象,导致电子速度的多值性,从而“连续流体模型”或欧拉分析法不再适用。本书则采用拉格朗日分析方法,借助于高速度大容量电子计算机对非线性相互作用问题进行定量的数值计算,求得了各类器件在非线性的状态下的增益、效率和其它特性参量。

当然,罗埃的理论还不尽完善,这一点早已有人指出。此外,就本书而言,对理论计算结果的实验验证,尚感缺乏,这也是一个不足之处。但是,它仍是目前在非线性理论方面一本较为完整而系统的专著,其中提出的各种分析方法,对我国从事微波电子器件的科技人员来说,仍有一定参考价值。因此我们将其译成中文出版,供有关人员参考。

在本书的译校过程中,吴鸿适同志和黄国祥同志给予了很大的帮助,提出了许多宝贵的意见,并仔细校阅了部分或全部章节,在此向他们表示诚挚的感谢。同时,在译校过程中,还得到了刘盛纲、徐承和同志以及中国科学院电子研究所三室部分同志的大力

帮助,在此一并表示感谢.

由于我们水平所限,中译本的缺点与错误在所难免,热诚希望广大读者批评、指正.

原 序

电子与波的非线性互作用这一论题是在 50 年代初期出现的。早在 1921 年, 赫尔 (A. W. Hull) 在其早期著作中就指出了这类研究的必要性, 而速度调制原理则是在 30 年代后期提出的。在对速调管、行波管和正交场器件进行了好几年卓有成效的实验之后, 微波电子注型的放大管在电子技术中取得了重要地位, 尽管对它们在大信号状态下的工作机理还了解得不多。因此, 建立一种普遍的非线性理论就很有必要了。诺德西克 (A. T. Nordsieck) 的工作 (约在 1952 年) 为后来更详细的研究开辟了道路。

虽然本书的主要内容是讨论微波电子器件, 但拉格朗日变量体系的非线性分析方法也适用于电子注与等离子体的相互作用问题。近来, 这种方法也用于研究电离层的非线性过程, 如啸声-模式 (whisther-mode) 现象。可以认为, 本书所阐明的基本方法也可直接用来研究所有带电粒子与波的互作用现象。

作者希望, 这本书既能成为一本研究专著, 又可作为研究生的非线性互作用理论教程。本书前四章叙述基本方法, 以后各章则详细研究这些方法在各种具体的互作用系统上的运用。

J. E. 罗埃
1965.8.

目 录

中译本前言

原序

第一章 绪言	1
1. 概论	1
2. 本书内容	2
3. 对所研究器件的分类与说明	3
4. 非线性分析的必要性	11
参考文献	11
第二章 欧拉法和拉格朗日法的比较	17
1. 引言	17
2. O型行波管方程的欧拉表示法	17
3. 拉格朗日法	23
4. 拉格朗日方程组	27
第三章 高频等效电路	29
1. 引言	29
2. 麦克斯韦理论和开耳芬理论的等效性	31
3. 螺旋导波结构的等效电路	35
4. 在等离子柱上传播表面波时的等效传输线	50
5. 多维传播结构的等效传输线	52
6. 返波等效电路	60
7. 传输线具有在空间上变化的参量时的等效电路	63
参考文献	65
第四章 空间电荷场的表达式	67
1. 引言	67
2. 求解电位问题的格林函数法	69
3. 笛卡儿坐标系中的位函数	71
4. 二维矩形系统的电位函数	79

5. 用电荷棒模型计算空间电荷场	87
6. 用阻抗壁代替高频结构	87
7. 圆柱系统的空间电荷电位	90
8. 轴对称系统中电荷环的电位函数	94
9. 空心注的电位函数	100
10. 一维空间电荷圆盘模型	101
11. 一维空间电荷场的谐波计算法	104
12. 在一维问题中格林函数法与谐波法的等效性	110
13. 特定结构的空间电荷场	112
参考文献	117
第五章 速调管分析	118
1. 引言	118
2. 一维速调管分析	119
3. 一维速调管分析的结果	128
4. 二维速调管分析	143
5. 三维速调管的互作用	148
6. 速调管中的径向效应和角向效应	153
7. 速调管的相对论分析	165
8. 速调管中的电压跳变	170
参考文献	173
第六章 行波管分析	175
1. 引言	175
2. 一维行波管的数学分析	177
3. 一维分析的结果	193
4. 行波管的 N 注分析	217
5. 二维行波管分析	224
6. 三维 O 型行波管分析	230
7. 二维电路, 三维电子流	233
8. 横向变化对行波管增益和效率的影响	235
9. 相对论 O 型行波管	246
10. 积分方程分析	253
参考文献	261

第七章	○型返波振荡管	263
1.	引言	263
2.	返波电路	264
3.	数学分析	266
4.	求解程序	268
5.	效率的计算	272
6.	振荡管的相对论分析	277
7.	返波振荡管中的径向变化和角向变化	279
	参考文献	280
第八章	正交场漂移空间互作用	282
1.	引言	282
2.	二维漂移空间方程	283
3.	正交场电子流的隙缝调制	292
4.	二维正交场漂移区的分析结果	295
5.	三维漂移空间方程	300
6.	漂移区中的绝热运动	301
	参考文献	302
第九章	正交场前向波放大管(M-FWA)	303
1.	引言	303
2.	具有负底极的二维 M-FWA	305
3.	具有负底极的二维 M-FWA的分析结果	313
4.	具有正底极的二维 M-FWA	341
5.	具有负底极的二维 M-FWA 的绝热方程	344
6.	具有负底极的三维 M-FWA	347
7.	回旋波效应	347
8.	同塞丁的计算结果的比较	349
9.	M-FWA 的各种非线性理论的结果及其比较	354
	参考文献	363
第十章	正交场返波振荡管 (M-BWO)	364
1.	引言	364
2.	具有负底极的二维 M-BWO	365
3.	具有负底极的二维 M-BWO 的分析结果	369

4. 具有正底极的 M-BWO.....	372
5. 具有负底极的 M-BWO 的绝热方程	373
6. M-BWO 中的回旋波	378
7. 理论与实验的比较	379
参考文献	381
第十一章 行波能量转换器	383
1. 引言	383
2. O 型行波能量转换器(O-TWEC)	385
3. M 型行波能量转换器(M-TWEC)	391
参考文献	391
第十二章 多注互作用及电子注-等离子体互作用	392
1. 引言	392
2. 一维电子注-等离子体电路的非线性方程组	394
3. 双注电路解	407
4. 没有高频电路时的互作用方程	411
5. 速度分布	414
6. 电子注-等离子体互作用中的二维效应	416
参考文献	418
第十三章 电子群的相位聚焦	422
1. 引言	422
2. 历史背景和实验工作	423
3. 提高行波管的效率	426
4. 提高 O 型返波振荡管的效率	452
5. 提高正交场放大管的效率	459
6. 提高正交场返波振荡管(M-BWO)的效率	474
参考文献	483
第十四章 预群聚电子注	485
1. 引言	485
2. 拉格朗日方程的数学阐述	486
3. 速调管的分析结果	487
4. 行波管的分析结果	491
5. 正交场放大管的分析结果	499

6. 实现电子注群聚所需的高频功率	504
参考文献	511
第十五章 降压收集极	512
1. 引言	512
2. 降压收集极的图解	514
3. 对O型器件输出能量分布的分析	515
4. O型器件的计算结果	521
5. 降压收集极中的注电流限制	532
6. 正交场器件中的降压收集极	537
参考文献	544
第十六章 调制特性	546
1. 引言	546
2. 对O型器件的数学分析	547
3. O型器件非线性调制的分析结果	552
4. 对M型器件的数学分析	556
5. 低频调制的输出频谱	559
6. 多个高频信号的调制	564
参考文献	564
附录A 高频结构的阻抗变化	567
1. 用于O型前向波放大管的螺旋线	567
2. 用于O型返波振荡管的螺旋线	567
3. 渐变交叉指线的特性	572
参考文献	575
附录B O型行波管的考夫纳下沉条件	576
参考文献	579
附录C M-FWA 的考夫纳下沉条件	580
参考文献	581

第一章 绪 言

1. 概 论

本书主要讨论带电粒子的漂移流和电磁行波之间的互作用。对于那些波幅足够大并且带电流体和波之间存在着强耦合的情况,则给予特别的注意,因为在这种情况下,非线性是很重要的。在时变量的幅度与相应的直流量相比足够大时,互作用才被认为是非线性的。如果经过足够的波长数,所有互作用累积起来,最后系统就变成非线性系统。

这里我们应特别注意的是这样一些系统,即漂移流(带电流体)是由电子和(或)离子组成,并在一个相当长的距离内与慢电磁波相耦合的系统。对导波媒质的类型是没有限制的,因此,可以是普通的周期加载波导系统,也可以是其他媒质,例如磁限制等离子体,在这种等离子体中,波的相速小于自由空间中的光速。

本书的大部分内容是讨论电子注和波之间的互作用,仅在第十二章中专门研究了等离子体现象。

现在为人们所熟知的并得到广泛应用的直线型电子注器件(主要是多腔速调管和行波管),是以哈恩(Hahn)^[2,3]、拉姆(Ramo)^[9,10]、汉森(Hansen)和瓦里安(Varian)^[13,16]等人对速度调制原理所进行的早期研究为基础的。他们发展了利用渡越时间效应的速度调制的基本概念,并成功地用来解决高频信号的产生和放大。稍后,又有人^[8,42,51,53]研究了注入式正交场(或所谓磁控型)放大管¹⁾。

1) 建议用“磁控管”这个术语表示那些利用多腔谐振回路的,或具有发射底极的,或兼而有之的正交场器件;而用“正交场放大管”(M型或法国人所称的 TPOM)这个术语表示注入式器件。

本书主要讨论那些具有某种确定形式的注入电子流器件。这种普遍分析方法也适用于分布发射式器件，但本书未对此进行讨论*。在注入式器件中，相互作用发生在定向的电子注和电磁波之间；在分布发射式器件中，尽管电子流并不是在一固定方向上运动，相互作用过程仍是相似的。本书将研究带电粒子速度和电磁波速度远小于光速以及可以与光速相比拟这两种情况。

本书将着重分析下列器件的相互作用机理：速调管、行波管(O-TWA)、返波振荡管(O-BWO)、正交场放大管(M-TWA)、正交场振荡管(M-BWO)、多注器件和电子注-等离子体器件。假定读者已熟悉线性(小信号)理论，因而只是在进行比较时，以及在定义相互作用参量时，才引用小信号理论。在许多文章和大量书籍中对小信号理论进行了详尽的阐述。

任何线性理论的一个基本假定，都是略去交变量的二次项和更高次项，在非线性理论中则不能做这样的假定，从而导致交变量随距离按指数函数增长。因此，在小信号理论中，必定要忽略饱和效应，因而对能量交换过程则了解极少，甚至一无所知。

如果在相应的互作用方程中保留二次项或更高次项，那么这些方程便是高度非线性的，通常只有利用高速数字计算机才能解出。数字计算机的出现，使得在以前被认为不能求解的算题有可能求解。计算机可以比较快和省地得到大量的解，然而，这也不是没有缺点的，因为大量的计算数据掩盖了清楚的物理概念。只有通过计算结果的详细分析和研究，才能真正地了解相互作用现象。把线性理论直接外推，还可以为非线性理论的解释提供依据。

2. 本书内容

本书的目的是，建立适当的物理模型和分析方法，以研究上述

* 请读者注意，本书仅限于讨论注入电子注这一类器件，并未讨论分布发射式器件。书中某些术语，本应包括注入式和分布发射式这两类器件，但由于作者在此已将讨论范围限于注入式器件，故读者在阅读时应特别注意这一点。例如第九章的 M-FWA 一词，均指注入式前向波放大管，而不包括分布发射式前向波放大管。——校者注

自由电子器件中的非线性相互作用现象。所进行的讨论完全是理论性的，只有在验证若干计算结果时，才引用少量的实验数据。对于所论及的一般方法将进行严格的论证，以便能对电荷流和电磁波之间的任何相互作用问题提供一个分析基础。在某些情况下，列举了几种分析方法，并进行了比较，以明确还有另一些可能采用的方法，而在通常情况下，作者希望采用一种以上的方法以检验某些原始假定的合理性。

在大多数情况下，只能用高速数字计算机求解非线性相互作用方程，这是因为迄今尚未建立起能处理这些方程组的非线性数学。然而，对于某些情况（第十三章）已研究出可以获得非线性方程闭合解的详尽解析方法。在理想电荷群的假设下这一点尤为正确，因而这种假定已被用来处理行波管和正交场器件中的相位聚焦问题。

作者深信，本书的核心材料能成为研究生的非线性相互作用理论课程的教材。对某些内容，例如高频到直流的能量转换、降压收集极及其他内容，可由学生自行选择阅读。

3. 对所研究器件的分类与说明

上述所有器件，在各种电子设备中得到了广泛的应用，每种器件都适合于某一特殊用途。由于每一种器件都具有不同于另外一些器件的特性，所以没有一种器件能在这个学科中占统治地位；因此，我们面临着对所有器件进行分析和了解的问题。

在高功率电平下，器件出现饱和，并处于非线性状态，不能用线性理论进行分析。要想知道器件工作的最高效率，以及各种各样的相互作用和器件的各个参量对最高效率的影响，就必须进行详细的非线性分析。这种非线性分析，文献中通常称之为大信号分析，这意味着，当高频信号幅度很大时，与相应的直流项相比较，高频的二次项不能忽略。通过分析自然还能得到增益、相移等方面的数据。在下面几节中，我们将对本书所研究的各类器件作一扼

要讨论。

3.1 直线型电子注器件

直线型电子注器件有时也称做O型器件,其能量转换过程是,依靠电磁力使电子减速,从而将电子注的动能转换为高频能量。这类器件包括:速调管、行波管、返波振荡管、双注放大管、阻壁放大管和电子注-等离子体放大管。各类器件之间的差别在于对电子流的调制方法和(或)取能方法,而不在于基本相互作用过程。下面扼要叙述每一种器件的某些特性。

a. 速调管¹⁾

速调管最简单的结构为双腔式,如图1(a)所示。其中,第一个谐振腔用来使高频波耦合到电子注从而达到调制电子注的目的。

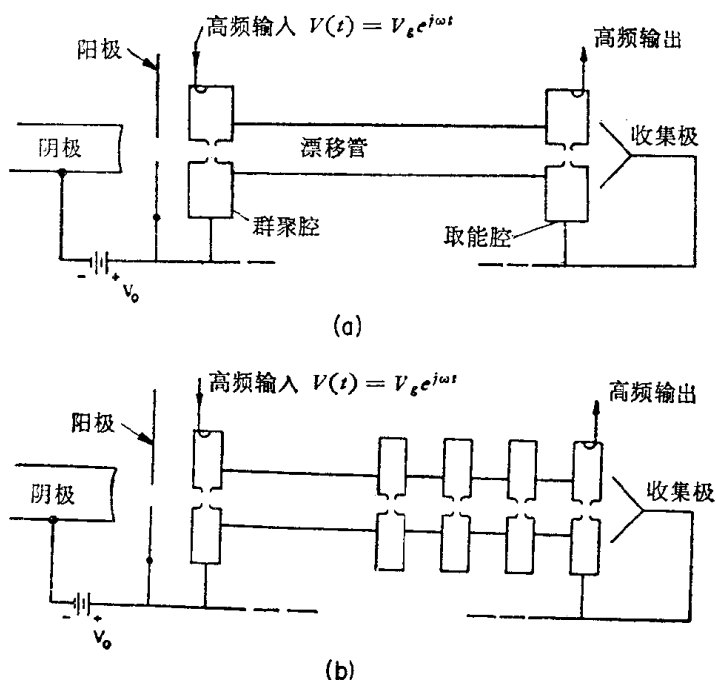


图 1 双腔速调管(a)和五腔速调管(b)结构示意图

1) 关于速调管的研究,最早见于瓦里安的论文(美国专利 U.S. 2,242,275)。

输出谐振腔用来从电子注取出高频能量。当电子注穿过第一个谐振腔而获得速度调制之后,便通过漂移管,在这里速度调制逐步变为密度调制,结果,便在输出腔形成具有非线性群聚的电子注。这些电子群激励输出回路,在谐振腔隙缝上产生高频电压。

为了在输出端获得最佳群聚和高频电流的最大幅度,可以使用多个群聚腔,如图 1(b) 所示。在这种情况下基本工作原理不变。为了得到较宽的频带,通常是使各输出腔参差调谐,尽管如此,大功率速调管的最大带宽一般仍仅有 2—3%。

b. 行波管*和返波振荡管¹⁾

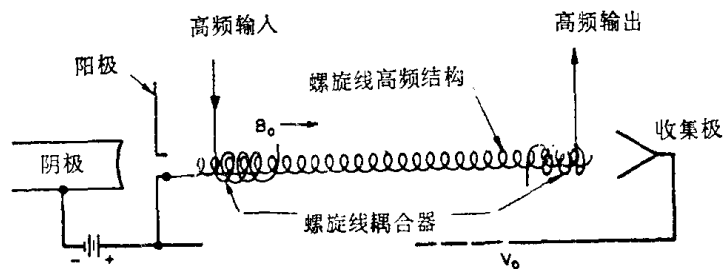
行波管和返波振荡管都是所谓动能转换器件,两者之间的区别主要在于慢波电路的工作模式不同。前向波放大管工作在具有正色散的空间谐波模式上,而返波放大管或返波振荡管是工作在具有负色散的空间谐波模式上。

图 2 为前向波器件和返波器件的示意图,图中同时示出在这两类器件中电流和电压随距离的变化情况。在这些器件中,高频电压在高频结构的全长上对电子注进行速度调制,因此,互作用是分布的。而速调管却有一个集中的速度调制区,这个区域与形成密度调制的区域是分开的。电磁波调制电子注,一些电子被加速,另一些电子被减速,并且在高频结构的单位长度内,减速电子多于加速电子,因此,在这个区域中便发生了能量从电子注向电磁波的净转换。

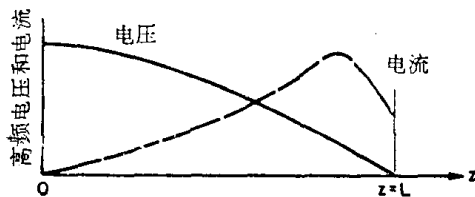
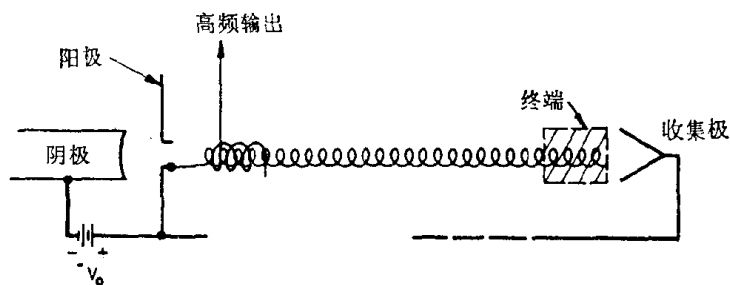
在行波管和返波振荡管中采用了各种类型的周期性谐振和非谐振电路。螺旋线是周期性非谐振电路的一个重要例子。对前向波放大管来说,螺旋线是一种频带十分宽的慢波电路,在电压调谐

* 原文应译为“行波放大管”(TWA),本书中一概译作国内通称的“行波管”。——校者注

1) 关于行波管的研究,最早见于考夫纳(R. Kompfner)的论文(美国专利 U.S. 2,653,270, 1953 年 9 月 22 日)。关于返波振荡管的研究,最早见于埃波斯坦(B. Epsztejn)的论文(美国专利 U. S. 2,880,355, 1959 年 3 月 11 日; U.S. 2,932,760, 1960 年 4 月 12 日)。



(a)



(b)

图 2 前向波和返波器件。(a)前向波放大管;(b)返波振荡管

宽带返波振荡管中也很有用。利用这种电路，在放大管中很容易得到倍频程的带宽，在振荡管中很容易得到倍频程的调谐频带。另一些经常使用的电路（如耦合腔结构和折叠线），带宽则要窄得多（10—30%）。功率范围，返波振荡管为毫瓦级至千瓦级；前向波放大管为毫瓦级到兆瓦级。器件的频率覆盖可由数百兆赫直到数