

无线电广播发送设备 近年来的某些发展

冯秉铨 编著

科学出版社

无线电广播发送设备 近年来的某些发展

冯秉铨 编著

科 学 出 版 社

1978

内 容 简 介

本书以专题的形式介绍了无线电广播发送设备近年来某些方面的发展情况。内容包括：丁类射频放大，戊类放大器，脉宽调制式调幅发射机，晶体管发射机，频率合成器，语言加工技术，宽带器件，自动调谐和匹配，功率合成，遥讯、遥控、遥测，广播中心的自动化等。

本书可供从事无线电广播、通信设备的生产、研究和维护工作的工人、技术人员参考，也可作为高等学校有关专业课程的补充读物。

无线电广播发送设备 近年来的某些发展

冯秉铨 编著

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978年7月第一版 开本：787×1092 1/32
1978年7月第一次印刷 印张：13 1/4 插页：1
印数：0001—25,700 字数：300,000

统一书号：15031·181

本社书号：1062·15—7

定价：1.40元

前 言

伟大领袖和导师毛主席教导我们：“努力办好广播，为中国人民和全世界人民服务。”在毛主席、党中央亲切关怀下，我国的无线电广播事业取得了迅速的发展。它为宣传马列主义、毛泽东思想，传达党中央的战斗号令以及巩固无产阶级专政起到了巨大的作用。

由于新技术、新器件不断出现，十几年前我们编写的《无线电发送设备》一书，大部分内容已陈旧过时，不能适应目前的需要。

本书编写的目的是想把近若干年来，特别是近十几年来无线电广播发送设备某些方面的发展情况，作一些概略的介绍，以补前书之不足。“广播”这个词本来应包括声音广播和电视广播，但目前国内习惯往往把二者分开，即，把电视另列，而用广播一词专指声音广播。本书的命名指的是后者。

通信技术与广播技术有各自的特点，也有一些共性。本书虽以广播为重点，但其中有一部分内容也适用于通信，甚至个别章节中的内容（例如第三、六章）反而更适用于通信。这些“文不对题”的地方，觉得弃之可惜，所以大部分都保留下来了。

本书的主要读者对象是从事广播发送设备的生产、研究和维修工作的工人和技术人员，也可以作为高等学校有关课程的参考读物，但它不是教科书，更不是工程手册。它的目的仅在于介绍某些方面的技术现况和发展方向，给读者提供一些线索和思路。它不可能象教科书那样系统地阐述基础理论，也不可能象工程手册那样提供大量的线路图和设计数据。

但是在每章中都附有一两个实例供读者参考，这些实例的引入也仅仅是为了说明该章中所讨论的有关问题而不一定是应该“照此办理”的典型样品。

本书共分十一章，涉及十一个专题，尽管这些题目之间是有联系的，但在处理方法上则基本上是各自独立的。这样做是为了读者的方便，阅读时可以择阅任何一章而不必从头读起。

本书的一个显著缺点是它的不平衡性。有些章节，例如一、二、五、六各章，由于作者及其多年共事的同志们亲自参加过一些工作，有较多的第一手资料，所以写得就较详细一些，在这些章节里有一部分内容是以前还未经发表过的。另一些章节，则由于编者没有直接参加过这类工作而只有一些间接的知识，所以只能简略地介绍一个轮廓，例如第九、十两章就是这样。此外，本书所谈到的内容，有相当大的一部分是正在发展中的东西，还没有达到成熟的阶段，写出来只是供读者参考。在这一点上它和教科书是不同的。

各章之后附有的附录，有些是为了避免在正文中写入过长的数学推导以致打断读者在概念上的思路，因而分开另写的；有些则是由于书稿写成之后又收到各单位寄来的信件，要求补充某些内容，补入正文有一定的困难，因而以附录的形式写出的。

每章之后附有参考资料目录，说明所写内容的来源，以备读者必要时作进一步的探索。这些资料显然是不完整的。事实上，所引每一篇文章之后都附有该文所用的参考资料，读者按图索骥，对某一专题都可以找到大量的资料。这里所列出的仅以编者所阅读过的、与书中内容直接有关的为限。

在编写过程中，出版社曾向有关的许多单位征求过意见，由于他们的热情支持、鼓励，甚至主动地提供资料，本书才能在短期间完成。对于同志们所提的意见、希望和要求，编写时

已尽量考虑在内,有些是初稿已有的,有的是初稿所无后来加入的,有的是写入正文来不及只能以附录形式写入的.但也有一些与本书命题离开较远或者是非编者学力所能及,这些只好暂时搁起,留待对这些问题比较熟悉的同志们来写了.

本书是在华南工学院党委的积极领导、支持和鼓励下写出来的,院党委对本书出版的关心以及对编者工作时间的安排和照顾,是本书能及时出版的主要原因.中央广播事业局、北京广播器材厂、韶关无线电厂提供了本书中部分原始资料和实验数据;有十几个生产、科研和教学单位提出了许多宝贵的意见.作者谨致以衷心的感谢.

本书第二、五章所涉及的设计计算,全部是由张正寅同志做的.第十章的前六节是丘水生同志写的.第一章的一部分内容是陈大岚同志写的.在与他们讨论和通信中,作者得到了许多启发,使得初稿中许多不严谨甚至错误的地方得到了纠正.没有他们的协助,这本书是达不到出版要求的.

由于编者思想水平和业务水平所限,尽管有许多同志给予了很大的帮助,本书存在的缺点和错误仍然是会有不少的,恳切地希望读者予以指正.

本书按照原计划完稿之后又看到了一些新的资料,另补写了“戊类放大器”一章作为本书的最后部分.从内容上来讲,这部分本应放在紧接第五章之后.因原稿即将发排,更动不便,只能放在最后.读者阅读这一部分内容时,可参阅第一章的内容.

编者

1976年8月,华南工学院

目 录

第一章 丁类射频功率放大器	1
§ 1-1 引言	1
§ 1-2 丁类放大器的工作原理	2
§ 1-3 丁类放大器电路	6
§ 1-4 丁类放大器的工作状态	7
§ 1-5 丁类放大器设计举例	14
§ 1-6 准丁类放大器和倍频器	20
§ 1-7 丁类放大器的调整	27
§ 1-8 丁类设计在晶体管电路中的应用	30
附录 1-1 关于 $g_1(\theta)$ 的计算	32
附录 1-2 丁类放大器板极电路的计算	36
第二章 脉宽调制与脉宽调制式调幅发射机	40
§ 2-1 引言	40
§ 2-2 开关管作用原理	42
§ 2-3 调宽脉冲的频谱	45
§ 2-4 开关放大器电路	53
§ 2-5 脉宽调制发射机中的低通滤波器	57
§ 2-6 关于残波辐射的抑制	65
§ 2-7 开关放大器的特性	67
§ 2-8 脉宽调制的主要特点	76
§ 2-9 梯形调制与并行的可能性	79
§ 2-10 大功率脉宽调制发射机举例	82
§ 2-11 脉宽调制发射机的调整与测试	86
§ 2-12 关于脉宽调制式调幅发射机中调制及效率的定义及其测量方法	92

附录 2-1	丁类放大器栅极迴路的计算	102
附录 2-2	关于帘栅自调的说明	106
附录 2-3	关于图 2-22 电路中的中和	107
附录 2-4	调宽脉冲发生器中的典型部件	108
第三章	晶体管发射机	113
§ 3-1	引言	113
§ 3-2	晶体管射频功率放大器的基本线路及其特点	114
§ 3-3	晶体管电路中的寄生振荡	115
§ 3-4	晶体功率管的安全工作和保护措施	118
§ 3-5	晶体管射频功率放大器的设计与计算	124
§ 3-6	晶体管电路的功率合成	132
§ 3-7	1kW 全晶体管发射机举例	143
第四章	频率综合与频率合成器	151
§ 4-1	引言	151
§ 4-2	直接式频率合成器	153
§ 4-3	控制式频率合成器	159
§ 4-4	间接式频率合成器	167
§ 4-5	数字式频率合成器	176
§ 4-6	频率合成器的遥控	178
第五章	语言加工及其在发射机中的应用	181
§ 5-1	引言	181
§ 5-2	语言加工的目的	182
§ 5-3	几种常用语言加工的方法	183
§ 5-4	音量压缩法	186
§ 5-5	自动电平控制式压缩器	190
§ 5-6	梯形调制	193
§ 5-7	射频削波	201
§ 5-8	第一种射频削波语言加工器	207
§ 5-9	第二种射频削波语言加工器	209
§ 5-10	第三种射频削波语言加工器	216

§ 5-11 小结	219
附录 5-1 用移相滤波法产生单边带的几个问题	221
附录 5-2 第一种射削语言加工器的设计	233
第六章 发射机的自动调谐和匹配	240
§ 6-1 引言	240
§ 6-2 自动调谐的一般原理	242
§ 6-3 三种自动调谐方法的比较	244
§ 6-4 鉴相器	247
§ 6-5 鉴阻抗器	250
§ 6-6 鉴阻器的基本电路原理	252
§ 6-7 鉴阻器电路应用举例	255
§ 6-8 具有三取样的鉴阻器	258
第七章 宽带部件和器件	264
§ 7-1 引言	264
§ 7-2 宽带放大器的一般原理	265
§ 7-3 多级放大器的参差调谐	269
§ 7-4 分布放大器的基本原理和线路	274
§ 7-5 1kW 宽带放大器举例	278
§ 7-6 宽带射频变压器	280
§ 7-7 传输线型宽带变压器	292
§ 7-8 宽带平衡转换器	297
第八章 发射机的并机工作	303
§ 8-1 引言	303
§ 8-2 并机工作的条件和要求	304
§ 8-3 利用 $L-C$ 网络的并机	306
§ 8-4 辐射并机	312
§ 8-5 小功率发射机的并机	314
§ 8-6 传输线并机	319
附录 传输线的设计	330
第九章 广播发射机的遥控	331

§ 9-1	引言	331
§ 9-2	遥控系统简介	332
§ 9-3	发射机的遥控	334
§ 9-4	发射机的遥测和遥讯——显示、监察和报警	336
§ 9-5	切换设备	338
§ 9-6	维修工作及其他	340
§ 9-7	遥控端点和信息传输	342
§ 9-8	传输线路及控制系统	349
§ 9-9	控制系统举例	350
第十章 采用频率编码的小型遥控遥测设备原理		355
§ 10-1	引言	355
§ 10-2	编码与遥讯	359
§ 10-3	遥控设备原理	365
§ 10-4	遥测设备原理	369
§ 10-5	“三遥”设备	373
§ 10-6	国外遥控遥测设备典型实例简介	377
附录	广播中心的自动化	378
第十一章 戊类放大器的原理和设计		392
§ 11-1	引言	392
§ 11-2	丙、丁、戊三类放大器的区别	393
§ 11-3	戊类放大器的电压、电流波形	397
§ 11-4	戊类放大器的基本电路	398
§ 11-5	电路元件的计算	401
§ 11-6	性能方程式与实验结果	403
§ 11-7	进一步的改进和存在的问题	404
索引		408

第一章 丁类射频功率放大器

§ 1-1 引 言

丁类放大器这个名称是在 1958 年首次被提出的^[1], 事实上早在四十年代的初期已经有人进行过不少探索^[2]. 但一直到六十年代后期才得到实际的应用. 这主要是由于过去对超大功率的发射机没有迫切的要求, 所以很少有人注意. 正如下面将指出, 丁类状态的优点仅在功率较大时才显得突出. 在 10 kW 以下的发射机中, 把末放级从丙类改为丁类, 收效并不显著, 但在 100kW 以上就相差很远了.

丁类与丙类相比, 其主要不同之处是: 丙类的栅压 u_g 和板压 u_a 都是余弦波, 板流 i_a 一般是余弦脉冲; 而丁类的 u_g 和 u_a 则均为矩形波, i_a 是矩形脉冲. 把余弦波改为矩形波的好处是可以进一步提高板极效率, 从而减低板耗或 (和) 增加输出功率. 但是这样做时, 如果峰值激励功率与丙类状态保持一样的话, 则平均激励功率将较丙类状态大得多, 因而平均栅耗也会增加. 由此可见, 从丙类改为丁类, 是有利于板而不利于栅的一种措施.

一切事物总是一分为二的, 没有一种措施是十全十美的. 在发送设备电路中, 一般来说, 凡是有利于栅的往往是不利于板, 有利于板的就往往不利于栅. 欠压工作状态属于前者而过压状态就属于后者, 这种例子不胜枚举. 丁类状态也是属于后者之列. 因此, 在采用丁类状态时, 不要只看到优点的一面, 还要看它的局限性的一面.

在七十年代的今天，大功率中波广播电台已经有不少采用了丁类放大器作为射频末级，而在十几年前几乎是无人问津的。但是，即使在今天，短波电台和中、小功率电台都少用它。可以说，目前它的主要用途是在固定频率的大功率发射台。为何如此，我们在以下几节中会讲到。

§ 1-2 丁类放大器的工作原理

如上所述，丁类状态的特征是 u_g 和 u_a 均为矩形波。但是，理想的高频矩形脉冲是不易获得的，一般的做法是在基波电压之外加上一定份量的二次或三次谐波，使 u_g 和 u_a 变为近似矩形波就可以了。经验证明，取三次谐波的振幅为基波振幅的 $1/6-1/5$ 左右，就能得到相当满意的结果。例如，一般丙类放大器的板极效率约在 70% 至 80% 之间；如改用丁类，则一般可提高到 90% 左右。一台 1000 千瓦的发射机，效率提高 10%，功率就省了 100 千瓦，这是很可观的。

为什么改成矩形波就会提高效率呢？我们知道，板耗 P_a 是板压 e_a 与板流 i_a 的乘积在一周期 T 内的平均值，即

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T e_a i_a dt \quad (1-1)$$

在丙类工作状态下， e_a 是余弦波， i_a 是余弦脉冲（设工作于临界状态）。当调谐时， i_a 的最大点对应于 e_a 的最小值；在失谐时， i_a 的最大点不重合于 e_a 的最小点，正因如此，所以调谐后放大器的 P_a 值才比失谐时小得多，故效率高得多。现在，如上述波形都改为矩形，则在整个板流流通的期间内， e_a 均保持为 e_{amin} 或近似 e_{amin} 的数值，这样积分后的 P_a 值当然就小得多了。试以 100kW 发射管 4CX35000 工作于丙类和丁类两种情况下的数据为例，列入表 1-1。由表可见，改用丁类后，在

功率和效率方面都有显著改进,例如输出功率增加了4.5kW,板耗减低了约40%.

表 1-1 丁类与丙类的比较

4CX35J00	丙 类	丁 类
E_a (直流板压)	15kV	15kV
E_{g2} (直流帘栅压)	750 v	750 v
E_g (栅偏压)	-500 v	-500 v
e_{amin} (最小板压)	1.2kV	1.2kV
U_a (交流板压峰值)	13.8kV	13.8kV
I_m (板流脉冲峰值)	38 A	22 A
I_{a0} (直流板流)	8.4 A	8.1 A
P_0 (直流输入功率)	126kW	121.5kW
$P_{出}$ (射频输出功率)	103.5kW	108kW
η (板极效率)	82.2%	88.8%
P_a (板耗)	22.5kW	13.5kW
U_g (交流栅压峰值)	700 v	600 v
U_{g1} (交流栅压基波峰值)	700 v	690 v
I_{g0} (直流栅流)	0.5 A	0.27 A
I_{g20} (直流帘栅流)	1.4 A	0.65 A
P_{g2} (帘栅耗)	1.05kW	0.49kW
P_g (栅耗)	350W	190W

这里要指出,表中所列两种状态的比较,是以同样数值的 e_{amin} 作为基础的,也就是说,两种状态都采用同样数值的 E_a 和同样数值的 U_a . 对于丙类来说, U_a 就是 u_a 的峰值(这里仅有基波分量);而对于丁类来说, U_a 则是 u_{a1} (基波)与 u_{a3} (三次谐波)之和的瞬时最大值. 在这样的前提下,丁类状态所需要的激励电压 U_g (600V) 要比丙类状态所需的数值 (700V) 为小而不是更大,因而丁类的栅耗 P_g (190W) 也比丙类的数值 (350W) 要小. 这与我们一开始时讲的“板栅相互矛盾”的说法并无矛盾,前面讲的情况是以同样的峰值激励功率,亦即同样的 U_g 值作为前提的;而这里则是以同样的 e_{amin} 作为前

提的。

以上我们假定了在栅路和板路均引入谐波电压。事实上，只将谐波电压引入于栅路或板路，只要使基波与谐波之间满足一定的相位关系，以便取得近似矩形的 u_a 波形，也能得到提高板极效率的结果^[2]。我们将把这种工作状态叫作准丁类以区别于 § 1-1 中所定义的丁类。这种工作状态之所以能提高效率，可以从工作路的形状得到解释*。大家知道，当没有引入谐波电压时，放大管在 $e_g - e_a$ 平面上的工作路 QA 是一条直线，其中 Q 是静态点， A 是工作端点，如图 1-1(a) 所示。

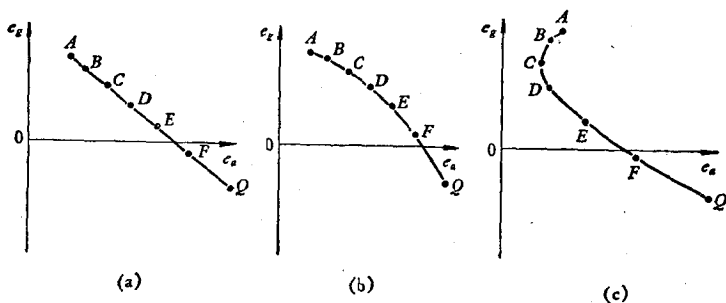


图 1-1 工作路的比较

当有足够的谐波电压加于基波电压之上时，工作路就会变为一条曲线。视谐波分量与基波分量之间的相位关系之不同，曲线可能向上弯 [如图 1-1 (c)]，也可能向下弯 [如图 1-1 (b)]。如所周知，丙类倍频器的工作路就是属于向下弯的情况^[3]，一般的自激振荡器也是这样的情况^[4]。不难用作图法证明，如果在板路中引入三次谐波，并设法使三次谐波的负峰重合于基波的正峰，则得到的工作路就是向上弯的，如图 1-1 (c)

* 关于工作路的讨论，详见 § 1-6。

所示 (参看 § 1-6 中有关图 1-7 的讨论)。

图 1-1 中所示 A, B, C, \dots 各点是 13 点分析法中的各点。13 点分析法中计算板流直流分量 I_{a0} 与基波分量振幅 I_{a1} 的公式分别为:

$$I_{a0} = \frac{1}{12} (0.5i_A + i_B + i_C + i_D + i_E + i_F) \quad (1-2)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{12} (i_A + 1.932i_B + 1.732i_C + 1.414i_D + i_E + 0.518i_F) \quad (1-3)$$

这里, A, B, C, \dots 各点是以 15° 相隔开的。

比较图 1-1(a) 和 1-1(c), 对于同样的 A 点和 Q 点来说, 图 1-1(c) 中的 i_B, i_C, \dots 都小些而在图 1-1(b) 中的 i_B, i_C, \dots 都大些。因此, 在图 1-1(c) 所示情况下, I_{a1}/I_{a0} 的比值会大些。对于一个极端情况来说, 如设 i_B, i_C, \dots 等均甚小于 i_A , 则有 $I_{a0} \cong \frac{0.5}{12} i_A$, $I_{a1} \cong \frac{1}{12} i_A$, 因而 $I_{a1}/I_{a0} \cong 2$ 。在此情况下, 如取板压利用系数 $\xi = 1$, 则板极效率

$$\eta = \frac{1}{2} g_1(\theta) \xi = \frac{1}{2} \xi \frac{I_{a1}}{I_{a0}} \cong \frac{1}{2} \times 1 \times 2 = 100\% \quad (1-4)$$

实际上, $\eta = 100\%$ 是做不到的, 因为工作路无论怎样弯曲也不会使得 i_B, i_C, \dots 可以忽略不计。但是, 由于上述理由, 在图 1-1(c) 所示情况下, η 值高于图 1-1(a) 所示情况 (即一般丙类放大器的情况) 则是可以肯定的。正是由于类似的原因, 倍频器和一般自激振荡器的板极效率总是比调谐丙类放大器低得多。

由上述可见, 关键问题在于引入的谐波与基波的相位关系是否满足图 1-1(c) 的要求。

以上我们只是从基本概念上解释了为什么改用了类或准丁类就能够提高效率。关于这一问题的定量分析, 将在 § 1-4

和 § 1-6 中再进一步讨论。

§ 1-3 丁类放大器电路

丁类放大器电路与丙类在组成形式中唯一不同之处是在栅极调谐回路和板极调谐回路之内分别串联接入一个谐振于二次或三次谐波的回路,如图 1-2 所示。图中 L_1-C_1 和 L_2-C_2 分别代表栅、板电路中调谐于基频的回路,而 L_3-C_3 和 L_4-C_4 则调谐于第三次谐波。这样, u_g 和 u_a 就分别等于两个基频电压与两个三次谐波电压之和,结果就使 u_g 与 u_a 都变为近似矩形的波形。

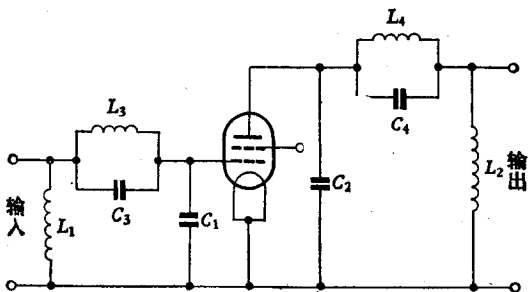


图 1-2 丁类放大器电路

如果将谐波仅加于板路或栅路,则变成准丁类状态。这样做时必须注意保证谐波电压与基波电压的相位关系仍能使三次谐波的负峰重合于基波的正峰,因为只有这样才能获得如图 1-1(c) 所示的工作路。这些电路的具体分析见 § 1-6。

丁类或准丁类放大器的缺点是,谐波回路的引入将在一定程度上造成调谐的不便,特别是在经常需要更改频率的短波电台,尤其不便。因此,到目前为止,它仅应用于大功率的固定频率电台。至于甚高频和超高频,由于谐波回路的制造困难,采用丁类就更不现实了。

在这里我们顺便指出, 图 1-2 所示的电路组成形式不是唯一的。例如, 板极迴路可以不用两个并谐迴路相串联的形式而采取双 π 网络的形式, 其计算方法见本章之后的附录 1-2。栅极迴路有时采用一个串谐迴路与一个并谐迴路相并联的形式, 这种电路的分析见本书第二章后面的附录 2-1。

§ 1-4 丁类放大器的工作状态

如前所述, 丁类放大的主要特征是, u_g 和 u_a 均为矩形波, i_a 是矩形脉冲。使 u_g 和 u_a 从余弦波变为近似矩形波的常用方法是在栅路和板路中分别串入谐振于三次谐波的谐振迴路, 而一旦 u_g 变为近似矩形波, i_a 自然就变为近似矩形的脉冲。前已指出, 板极效率之所以能够提高, 直接的原因是由于 u_a 变为矩形波, 而 u_a 之所以能够变为矩形波则是由于 i_a 是矩形脉冲。对板流 i_a 进行傅立叶级数分解, 得:

$$i_a = I_{a0} + I_{a1} \cos \omega t + \cdots + I_n \cos n\omega t \quad (1-5)$$

如在板路内接入谐振于基频和三次谐波的两个谐振迴路并令其谐振阻抗分别为 R_{oe1} 和 R_{oe3} , 则在二谐振迴路的两端产生的电压将分别为 $u_{a1} = R_{oe1} I_{a1} \cos \omega t$ 和 $u_{a3} = R_{oe3} I_{a3} \cos 3\omega t$, 总的交流板压 $u_a = u_{a1} + u_{a3}$, 如图 1-3 所示。

注意在图 1-3 中, 三次谐波的负峰与基波的正峰出现于同一瞬时, 只有在这种正确的相位关系下才能得到近似矩形的板压。

在上述前提下, 瞬时板压 e_a 可写为

$$\begin{aligned} e_a &= E_a - u_a = E_a - (u_{a1} + u_{a3}) \\ &= E_a - (U_{a1} \cos \omega t + U_{a3} \cos 3\omega t) \\ &= E_a - U_{a1} (\cos \omega t + a \cos 3\omega t) \\ &= E_a - U_{a1} (\cos \omega t - |a| \cos 3\omega t) \end{aligned} \quad (1-6)$$