

微波放大器

樊景渤 崔淑芳 编著

微波接力通信技术丛书

人民邮电出版社

微波接力通信技术丛书

微波放大器

樊景渤 崔淑芳 编著

人民邮电出版社

DL16/29
内 容 提 要

本书介绍微波接力通信系统中的微波放大器。主要内容有行波管放大器、晶体管低噪声放大器、晶体管功率放大器和负阻放大器。

书中以典型放大器为例，讲述基本原理、电路构成、设计、调整 and 调试等。结合微波接力线路中常用的设备进行讲解。

本书可供微波接力通信的维护、生产、科研人员使用，也可供大专院校师生参考。

微波接力通信技术丛书

微 波 放 大 器

樊景渤 崔淑芳 编著

责任编辑 俞天林

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：787×1092 1/32 1988年3月 第一版
印张：7 16/32 页数：120 1988年8月河北第1次印刷
字数：171千字 插页：1 印数：1—2 500册

ISBN7115—03514—8/TN

定价：1.50元

出版者的话

几年前，我社曾给微波站的维护人员出版了一套微波设备维护手册，帮助他们了解微波设备的简单原理，学会值机操作和处理简单的障碍，起到了较好的作用。但时隔数年，全国微波电路有了新的发展，微波站维护人员的水平也不断在提高。需要为他们编写切合实际而又较为深入的读物，以便帮助他们进一步提高技术水平，做好维护检修工作。《微波接力通信技术丛书》就是在这个思想指导下组织编写的。

这套丛书准备结合当前使用的微波通信设备，分部件讲述各部分原理、各元器件作用、工作性能、指标以及调整、测试等问题。力求结合实际进一步阐明原理，并能适合当前大部分维护人员的实际水平。

丛书的读者对象主要是微波站的维护人员，也可以供微波设备的研制、生产人员和有关专业的大专院校师生参考。

我们希望广大读者对这套丛书的编辑出版提出要求和建议，帮助我们做好这一工作。

目 录

绪 论	(1)
第一章 行波管放大器	(6)
第一节 行波管放大器	(6)
1-1-1 行波管基本结构	(6)
1-1-2 行波管放大器的工作原理	(10)
1-1-3 行波管放大器的工作特性	(16)
第二节 行波管放大器电源	(37)
1-2-1 EY-502型行波管放大器电源	(37)
1-2-2 B-257型行波管放大器电源	(50)
1-2-3 4WG-2发信机行波管放大器电源	(61)
第三节 行波管放大器的应用	(64)
1-3-1 使用和维护	(64)
1-3-2 行波管放大器工作状态调整	(65)
1-3-3 行波管放大器常见故障	(66)
第二章 微波晶体管放大器基本理论	(69)
第一节 基本理论	(69)
2-1-1 传输线	(69)
2-1-2 二端口网络及S参数	(85)
2-1-3 共轭匹配	(90)
2-1-4 稳定性	(93)
2-1-5 完全共轭匹配	(96)
2-1-6 功率增益	(97)
第二节 匹配技术	(100)

2-2-1	阻抗圆图	(101)
2-2-2	匹配实现	(106)
第三章 微波晶体管放大器的分析与设计 (121)		
第一节	微波晶体管	(121)
3-1-1	砷化镓场效应管($GaAs$ FET)	(121)
3-1-2	$GaAs$ MESFET小信号等效电路	(123)
3-1-3	功率场效应管	(125)
3-1-4	硅(Si)双极型晶体管	(126)
3-1-5	硅双极型晶体管小信号等效电路	(127)
3-1-6	大功率双极型晶体管	(127)
第二节	偏置电路	(128)
3-2-1	微波场效应管偏置电路	(128)
3-2-2	微波双极型晶体管偏置电路	(137)
第三节	放大器设计	(139)
3-3-1	最大增益设计	(139)
3-3-2	低噪声放大器	(146)
3-3-3	高功率放大器	(148)
3-3-4	平衡放大器	(159)
第四节	设计实例	(163)
3-4-1	中等带宽放大器设计	(163)
3-4-2	宽带微波晶体管放大器机助设计	(166)
3-4-3	微波晶体管放大器优化设计	(174)
第五节	微波收发信机实现全固态化的几种方 式	(183)
第四章 微带晶体管放大器调整与测试 (195)		
第一节	使用与调测	(195)
第二节	性能指标测量	(198)

4-2-1	输出功率—频率特性	(198)
4-2-2	输入—输出特性	(199)
4-2-3	调幅—调相转换	(199)
4-2-4	噪声系数	(200)
4-2-5	输入输出驻波比	(201)
4-2-6	三次交调	(201)
第五章 负阻放大器		(203)
第一节 负阻器件		(204)
5-1-1	转移电子器件(耿氏二极管)	(204)
5-1-2	雪崩渡越时间微波二极管	(207)
第二节 负阻放大器分析和设计		(211)
5-2-1	稳态反射型负阻放大器工作原理	(212)
5-2-2	稳态反射型负阻放大器调整原理	(215)
5-2-3	稳态反射型负阻放大器匹配电路	(218)
5-2-4	负阻放大器设计	(222)
参考资料		(231)

绪 论

微波功率放大器广泛地应用于各种地面通信设备和卫星转发器中。用量最大的要算地面微波接力通信和卫星地球站的发射机。在微波接力站中，由邻站发来的信号经长距离(约50公里)的衰耗，收下的信号已很微弱。混频后虽经中频放大再变成微波也不过只有几个毫瓦的功率，只有经过微波功率放大器将信号放大到几瓦，才能保证线路所规定的信号噪声比。所以微波功率放大器是微波通信设备中的一个重要部件。

微波放大器质量指标有：

规定的功率增益和输出能力

良好的幅频特性

良好的噪声性能

小的幅度失真和相位失真

高的直流/射频变换效率

长寿命和高可靠性

据资料报导，目前世界上用于地面通信上的行波管放大器已达十万个以上。我国微波接力通信线路已建四万余公里，到目前为止主要还是应用行波管作为功率放大器。

行波管放大器具有下列缺点：

1. 行波管是电真空器件，寿命比固体器件要低得多。
2. 电真空器件在长期使用后，热发射效率降低，性能也变差。
3. 行波管电源需用几千伏高压，而高压电源一般故障较低压电源高得多。

8810539

· 1 ·

4. 行波管电源的变换效率低, 行波管取用的电源功率较大, 因而整机取用电源功率大。

5. 综合 3、4 两点, 在无人值守微波系统中, 一般使用太阳能电池供电 (或其它方式供电), 因而不能使用行波管放大器。

许多国家在五十至六十年代就制成了不用电真空器件 (包括行波管) 的“全固态化”设备以代替只有一只行波管的“半固态化设备”。

国际上, 微波接力线路的固态化进展不够快, 一方面由于固态器件研制进度慢, 更重要的是在过去的十几年里由于行波管本身有如下几方面的改进。

管子结构和制造工艺方面进行了改进, 淘汰了老式的玻璃壳改为耐震的金属陶瓷结构; 聚焦用周期性永久磁铁的电子束聚焦; 采用浸渍阴极延长寿命; 为了提高效率, 管子用了两级降压收集极, 第二级电压工作在第一级电压的一半。这样的产品经过测试, 在饱和情况下效率可达 36%, 典型噪声系数为 6 吉赫, 24 分贝; 14 吉赫, 27 分贝, 调幅调相转换系数低于每分贝 4 度 ($4^\circ/\text{dB}$)。

行波管电源做成标准系列, 管子都有相同的工作电压 (仅有一个阳极电压调整旋钮) 和相同的驱动电平, 使得改变行波管型号和改变电源时可以方便地更换。

对这样的 58 只管子进行了寿命试验, 无故障工作累计时间超过二百万小时, 第一批管子已经连续工作五年以上。

经过浸渍的阴极, 长时间贮存以后, 很容易激活。冷备用四年以上的管子, 预热了三分钟以后, 加上高压即可正常地工作。

行波管是一种固有非线性器件。如果倒退使用当效率降到

10%时，会是一只线性很好的放大器件，或使用线性化技术（前馈、反馈、预失真），则行波管线性性能会得到较大的改善。

1970年左右，某些欧洲国家在放大器设计中开始利用硅双极型功率晶体管和变容管。这种放大器输入频率较低，晶体管放大器大多工作在1.5~2吉赫间，末级输出还需倍频，但这种方法当时已用在4~12吉赫各种通信机中。所获得的输出功率和效率随着输出频率的上升而下降得较快，往往在接收端用降低噪声系数进行补偿。

对这种间接放大方案不感兴趣者开展了直接的基频放大技术的研究，希望固态器件成为功率放大的有效器件。到七十年代中期耿氏（Gunn）和碰撞雪崩渡越时间（IMPATT）二极管应用于 n 个通信系统中，对于频率高于6吉赫的设备，用固态放大器代替了行波管。

七十年代后期砷化镓场效应器件（GaAs FET）成为与行波管竞争最有希望的功率放大器件。

双极型功率晶体管放大器在5吉赫，丙类工作时显出具有高效率、高输出功率和高可靠性。而且每瓦输出的费用要比GaAs FET低。器件往往接成共基极，管内有做好的匹配电路简化了放大器设计。

双极型功率晶体管放大器低于4吉赫时，作为线性放大明显地优于GaAs FET。

目前在4吉赫以上和其他固态器件相比，GaAs FET功率放大器提供最好的直流到射频变换效率，最低的交调失真和最低的调幅调相变换。

一在6吉赫频段的GaAs FET放大器，增益38分贝，输出10瓦放大器，效率高于14%；14吉赫频段，增益35分贝，输出

2 瓦，效率可高于10%。

—6 吉赫频段，38分贝增益，输出10瓦的放大器在 3 分贝输出倒退点三次交调小于25分贝；在14吉赫频段，35 分 贝 增益，输出 2 瓦，在分贝输出倒退点小于20分贝。

—6 吉赫频段，38分贝增益，输出10瓦放大器，调幅调相转换系数小于每分贝1.5度；14吉赫频段，35分贝增益，输出 2 瓦，调幅调相转换系数小于每分贝 2 度。

—由于环境温度变化，高增益GaAs FET放大器的小信号增益变化大约每25摄氏度为 ± 2 分贝。

—可靠性：由于高功率GaAs FET是工作在高电压幅度情况下，因此仅用高温贮存和直流加电试验已不足以估价高功率GaAs FET的可靠性，必须在最恶劣的工作条件下，比如沟道温度达135度，漏源电压 8 伏，饱和输出情况下进行测试。

据资料举出2250只功率GaAs FET在工作现场，实际使用超过4600小时，全部器件时间超过25,000,000小时，在这期间仅损坏了四只。因此，在工作现场的GaAs FET的平均故障间隔时间(MTBF)是6250000小时。

如果代替行波管的功率GaAs FET放大器，具有 35分贝增益，需使用七到八只GaAs FET。因此，功率GaAs FET 放大器的MTBF将优于行波管放大器十倍以上。

根据许多研究报告可以预料，近期可能生产出 6 吉赫，25瓦；11吉赫，10瓦；20吉赫，5 瓦的功率GaAs FET放大器。自1977年到1980年国外用场效应管放大器代替行波管在6~8吉赫频段，制成输出0.5~5瓦的调频发射机，而在 6 吉赫频段可得输出功率10瓦的发射机。

预测GaAs FET放大器将在下列两个方面得到发展。

1. 目前场效应管低噪声放大器 (FET LNA) 已普遍地使

用，到1990年在低噪声放大方面将独占从L波段到毫米波领域。

2. 功率GaAs FET将把频率降到L和S频段，在新的设备中将代替双极型晶体管放大器。

因此，GaAs FET放大器在1983年几乎占美国使用放大器的三分之二，到1990年将占78%，见图1。

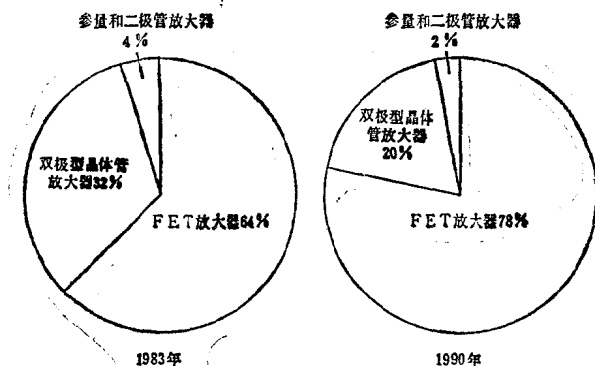


图1 FET放大器的费用比例

1983年在设备生产中使用单片微波集成电路(MMIC)的还不多，预计到1990年，在大功率、中功率和低噪声放大几个方面，由于器件性能的改善，价格大幅度降低和生产量的增多，使用在设备中的比例将占10%。

第一章 行波管放大器

我国的微波接力通信设备，目前普遍采用中小功率的行波管作为微波末级功率放大器件。

行波管是一种电真空器件。由于微波信号在管内呈行波状态而得名。它具有频带宽、增益高的优点。

行波管放大器的基本工作原理是：在真空管壳内，沿螺旋线慢波结构传输欲放大的高频信号。该信号与在螺旋线管内部以略高于信号的速度前进的高速细束电子流相互作用，进行能量交换，把电子流由于直流电源加速所得到的能量的一部分，逐步转换成高频电磁波（即高频信号）的场能，从而使信号得到放大。

第一节 行波管放大器

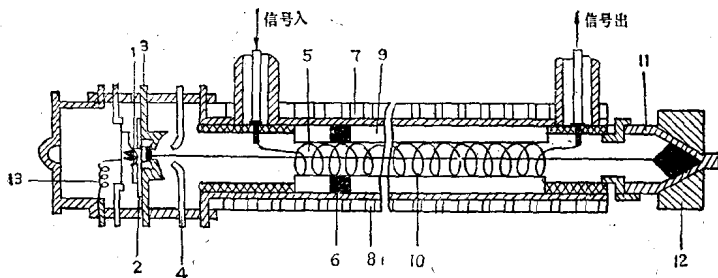
1-1-1 行波管基本结构

为了保证电子流与高频信号间能量有效的交换，行波管应包括以下五个主要部分。见图(1.1)。

现将各部分作用简述如下：

1. 电子枪

电子枪装在真空管壳内，由灯丝、阴极、控制极和阳极组成。其作用是形成一条高速、细束电子流并射入慢波系统。



1—灯丝；2—阴极(K)；3—聚焦极(F)；4—加速极(A)；5—电子束；6—石墨；7—磁环；8—极靴；9—石英棒；10—螺旋线(H)；11—集电极(C)；12—散热器；13—钛泵。

图 1.1 EY-502型行波管的结构图

灯丝点着后，把阴极加热至正常工作温度，阴极表面就有良好的发射电子能力，这时若在阳极上加以比阴极高得多的电位，就能够使电子离开阴极表面飞向阳极。而控制极、阴极和阳极的形状、位置以及各电极电位的配合，使离开阴极后的电子逐渐会聚，形成了一条高速细束电子流，穿过阳极中心的小孔，射入螺旋线慢波系统。

电子在阳极加速场中的运动速度由下式决定：

$$v_e = \sqrt{\frac{2e}{m} U_A} \quad (1-1)$$

其中 e —— 电子的电荷量，为 1.602×10^{-19} 库伦

m —— 电子质量，为 9.107×10^{-31} 克

U_A —— 阳极电压

如果 $U_A = 2000$ 伏，则

$$v_e \approx 6 \times 10^8 \sqrt{2000} \approx 3 \times 10^8 \text{ (米每秒)} = C/10$$

C —— 光速，为 3×10^8 米每秒

因此，改变阳极电压 U_A ，就可以改变电子的运动速度。

电子枪内的钛泵，启动后用来吸收行波管内的残余气体，

提高行波管内的真空度。

2. 磁聚焦系统

其作用是保证从电子枪射入慢波系统的电子流保持细束穿过整个螺旋线段，减少螺旋线对电子流的拦截，从而保证电子流与螺旋线上的高频信号间能量转换作用能够正常进行。本书介绍的放大管采用周期性永磁聚焦系统，它是在管外面同轴地排列着一列环行磁钢，相邻磁钢同极性相对，中间被软铁制成的极靴隔开。这样，就能在管子的轴线上，也即电子流通过的路线上形成周期变化的轴向磁场，图(1.2)是永磁周期性聚焦装置结构和磁场分布示意图，它能保持电子流聚焦而不散开。

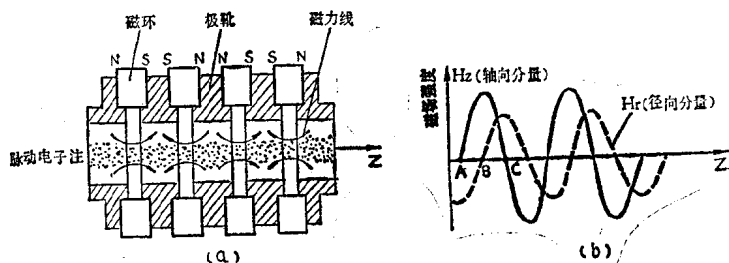


图 1.2 永磁周期性聚焦装置和磁场分布示意图

这种聚焦系统的特点是体积小、重量轻、漏磁少。

3. 慢波系统

分布在细长的管壳内部，包括螺旋线、夹持杆、集中衰减器和输入、输出陶瓷窗五部分。行波管放大过程即在慢波系统内进行。

由输入端耦合进来的高频电磁波（即高频信号）沿螺旋线传播，从而沿轴向速度减慢，并与在螺旋线管内运动的电子流

速度接近，达到“同步”。这样电子流与信号才能进行有效地相互作用，使高频信号得以放大。因此，工作时，螺旋线电压必须调整到“同步电压”，使电子流与电磁波速度“同步”，此时得到最大功率输出。

夹持杆用来支持螺旋线，使柔软的螺旋线具有一定的强度和很好的直度以及与管壳的同心度，以便电子流在螺旋线内通过。此外，夹持杆上蒸发上一段碳层作为集中衰减器，用来防止因输出、输入端反射而引起自激振荡。

输入、输出陶瓷窗的主要作用是使螺旋线两端分别与管外的输入、输出同轴插座的内导体连接，实现直接耦合。

因为电子在行波管内运动的速度 $v_e \approx C/10$ ，为了使高频信号轴向速度 $v_z \approx v_e = C/10$ ，必须恰当地选

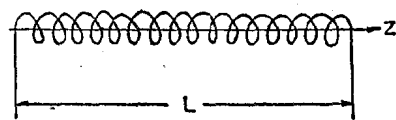


图 1.3 慢波系统螺旋线

择螺旋线管的尺寸。见图(1.3)。

设螺旋线本身长度为 l ，螺旋线管长度为 L ，则高频信号在螺旋线管中的轴向速度为 $v_z = L/lC$ 。若使螺旋线的结构尺寸 $L/l = 1/10$ ，则可得 $v_z \approx v_e \approx C/10$ 。

微波高频信号以电磁波的形式沿螺旋线螺旋式地行进，其速度为光速 C 。但是，沿螺旋线管的轴向速度 $v_z \approx C/10$ ，相当于把电磁波的速度降低为原来速度的十分之一，故把螺旋线称作慢波系统。

4. 收集极和散热系统

收集极的作用是收集经过能量交换后的电子。在慢波系统中，经过能量交换后的电子仍具有一定的动能，被收集极吸收

后, 电子的动能转换为收集极的热能。电子流打在收集极上产生的热量经金属传热筒及高导热性瓷环传给放大器的外壳及散热片散发热量。放大器恰当地安装在机架底板上, 便可实现传导散热, 自然冷却或强制冷却。

5. 输入、输出装置

输入、输出装置的作用是分别把欲放大的高频信号经输入窗耦合进入慢波系统, 并把沿慢波系统放大后的高频信号经过输出窗耦合出来。

这里介绍的行波管采用直接耦合方式。同轴插座的内导体分别经慢波系统两端的输出窗和输入窗与螺旋线两端直接相连。这种耦合方式的特点是频带宽, 损耗小。

1-1-2 行波管放大器的工作原理

1. 聚焦原理

电子枪发射出来的电子注, 因电子间的同性相斥作用, 使电子注的截面沿螺旋线管轴向逐渐膨胀扩大, 散落到螺旋线上产生螺旋线电流 I_H , 而产生电子能量损耗, 以及螺旋线电流升高而烧毁螺旋线。为了将电子注形成电子束通过螺旋线, 在螺旋线管外围安置了电子注的聚焦系统。将电子注形成电子束的基本原理, 是应用运动电子在磁场作用下改变运动方向的性质, 使电子注中的电子沿径向排斥变为紧缩收敛。

周期性磁场聚焦系统部分已绘于图(1.2)中。周期性磁场在螺旋线管轴附近可分解为轴向磁场分量 H_z 和径向磁场分量 H_r , 图(1.4)为 H_z 和 H_r 沿 z 轴的分布, 定义指向 z 轴的 H_r 为负, 背离 z 轴的 H_r 为正。现选取 z 轴上A、B、C三点为例加以说明:

A点: $H_r = -H_{rm}$, $H_z = 0$