

高效率放大及 功率合成技术

李振玉 姚光圻 编著

GAOXIAOLÜ FANGDA JI GONGLÜ
HECHENGJISHU 中国铁道出版社

高效率放大及功率合成技术

李振玉 姚光圻 编著

中 国 铁 道 出 版 社

1985年·北京

内 容 简 介

全书共分五章。第一章结合传输线变压器原理,介绍了宽带功率放大技术;第二章通过电路工作状态的分析及计算,论述了新型高效率功率放大技术;第三章根据合成器与分配器电路的设计,讨论了晶体管功率合成技术;第四章根据实用典型的微带电路设计,介绍了数百兆赫微带混合功率放大技术;第五章介绍了电台收发信机并联运用的工作原理及实例。

本书可作通信专业补充教材,也可供广大通信工作者和有关电子技术人员参考。

2585/20

高效率放大及功率合成技术

李振玉 姚光圻 编著

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092毫米 $\frac{1}{16}$ 印张: 9.875 插页: 1 字数: 225千

1985年9月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—3,500册 定价: 1.95元

前 言

由于近年来新技术、新器件的不断发展,使原有的通信系统发生了深刻的变化,在宽带电视信号转接放大以及工业、医疗、电子器械的晶体管大功率信号源等方面迫切需要解决高效率宽带放大及晶体管功率合成技术。本书就是为适应通信电子技术发展的新形势而编写的。

在编写过程中,注意了理论的系统性和电路的实践性,在每一章中都有典型电路的分析、计算、设计和测量方法的实例。使读者既能获得新技术的理论知识,又能得到从事研究、实验的方法和技能,以便于进行创新和设备改进。

第一、二、三、五各章由李振玉编写,第四章由姚光圻编写,全书由李振玉主编。李明理同志为第三章提供了100W超声功率合成实验的部分数据,并协助作者做了不少誊写和绘图工作,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中如有错误和不妥之处,请读者批评指正。

作 者

1984年1月

目 录

第一章 射频宽带功率放大技术	1
第一节 高频传输线变压器特性及原理.....	1
第二节 宽带传输线变压器电路.....	27
第三节 宽带功率放大电路.....	49
第二章 新型高效率功率放大技术	74
第一节 <i>D</i> 类高频功率放大技术.....	74
第二节 晶体管准 <i>D</i> 类放大技术.....	113
第三节 <i>BD</i> 类高功率放大技术.....	126
第四节 <i>E</i> 类功率放大技术.....	145
第三章 功率合成技术	157
第一节 功率合成的基本原理.....	157
第二节 传输线变压器型功率合成电路.....	165
第三节 功率合成技术的分析.....	198
第四章 微带混合功率放大器	217
第一节 高频大功率晶体管的选择.....	219
第二节 微带电路设计基础.....	228
第三节 阻抗匹配电路的设计.....	237
第四节 辅助电路设计.....	247
第五节 结构设计与装配.....	250
第六节 调整与测试.....	259
第七节 设计与研制实例.....	262
第五章 电台并机工作原理	276
第一节 并机运用的条件和要求.....	277

第二节 并机运用的合成网络.....	287
第三节 几种并机工作方法.....	293
第四节 并机工作运用实例.....	303
参考资料.....	310

第一章 射频宽带功率放大技术

随着无线通信技术的发展，要求通信信道大大增加，因而宽带信号传输是现代通信发展的特点之一。例如，目前应用甚广的远距离短波通信，其工作频率范围达到 $2 \sim 70\text{MHz}$ 。对于频率范围这样宽的信号的传输及放大，如果仍然采用传统的调谐电路方式工作，则必须划分相当多的波段，这就使整个调谐系统十分复杂。同时，电路调谐手续也非常繁琐，且速度也慢，不能适应当前通信发展的要求。近期发展起来的对抗同频（瞄准式）干扰的跳频技术、多频道频率合成技术等宽带频率信号，要求快速调谐跟踪的放大电路。因此，宽带放大技术在高频功率放大中得到了广泛的应用。由于宽带放大器频带覆盖着整个发射机工作频率范围，所以，在发射机变换工作频率时不需要进行调谐。目前，广泛应用的一种高频宽带功率放大器是用传输线变压器作为输入输出及级间耦合电路和阻抗变换的耦合元件。这种宽带传输回路的最大优点是结构简单、频率可由一兆赫到几百兆赫。

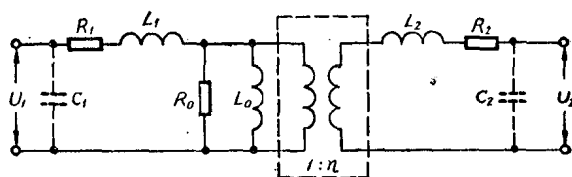
第一节 高频传输线变压器特性及原理

宽带变压器是当 $f_H \geq 5f_L$ 时，仍能高效无失真地传输宽带信号的变压器。它是耦合系数接近于 1，而通频带又很宽的一种特殊耦合元件。

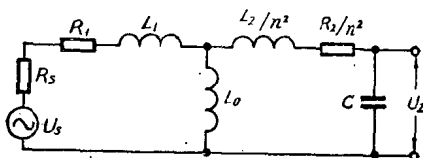
所谓传输线变压器，顾名思义，这种变压器是在传输线和变压器理论上发展起来的新元件。它用高频性能良好的、高导磁率 (μ) 的铁氧体材料作为磁芯。由这样的铁氧

体磁环双线绕制的变压器称高频变压器。由于信号能量不再象低频变压器那样耦合，而输入与输出间是由电磁耦合链传递能量的，所以传输线变压器不同于普通变压器，但它们都是通过磁通互感耦合的。在研究传输线变压器的工作原理和特性之前，先对普通变压器的特性简单分析一下。

一、一般变压器特性分析



(a) 电原理图



(b) 等效电路

图 1—1 普通变压器的等效电路

- L_0 ——初级线圈电感；
- L_1 、 L_2 ——初、次级引线电感及初、次级漏感；
- C_1 、 C_2 ——初、次级分布电容；
- R_1 、 R_2 ——初、次级损耗电阻；
- R_0 ——铁心损耗，通常很大，忽略不计；
- L_2/n^2 ——折合到初级的次级引线电感；
- n ——变压器初、次级的匝数比；
- R_2/n^2 ——折合到初级的次级损耗电阻；
- C ——等效分布电容，是变压器各个分布电容折合到初级的总和。

图1—2曲线在频率的低端受初级电感 L_0 感抗的影响, 负载输出电压下降; 高端受漏感和分布电容的影响(产生了串联谐振), 在谐振频率 f_s 附近, 负载两端的电压急剧增加, 并在 f_s 达到了最大(出现峰值); 偏

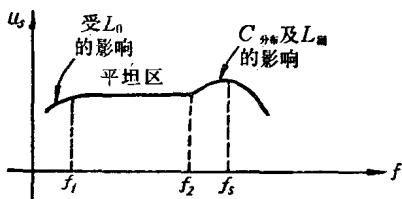


图1—2 普通变压器的频率响应曲线

离谐振频率 f_s , 电压急剧地减小, 输出幅度随之下降。这就导致了一般变压器高频特性变差, 不能用于高频放大。

为改善低频响应, 可增加初级线圈匝数(加大电感 L_0), 但又导致分布电容的加大, 使高频响应愈加变坏。采用高导磁率(μ)的磁芯可使高、低端的频率特性大大改善, 但磁芯都有其最佳工作频段, 高于此频段时, 磁芯的损耗增加, 其传输效率下降。因此, 在高频信号情况下, 分布电容和漏感的影响, 即使采用了高 μ 的高频磁芯的普通绕组, 普通变压器仍然不能工作在更高的频段和传递几倍频程的带宽的宽频信号。

二、传输线变压器的工作原理

能否采取某种办法减小分布电容, 而把分布电容不利因素变为有利因素呢? 近代研制出宽带传输线变压器, 其最高频率可达几百兆赫甚至上千兆赫。而且整个工作频段在几个倍频程。

(一) 高频传输线变压器的结构

图1—3为传输线变压器的结构示意图。传输线变压器一般用高频传输线绕制而成。绕制方法有两种, 一是用两根平行导线并绕在高 μ 、低损耗的铁氧体磁环上, 二是用一对绞绕

线或用带状传输线绕在磁环上。线的始端“1”、“3”接电源 E ，而终端“2”、“4”接负载 R_L 。由图可见，信号传到2、4端后将能量送给负载。

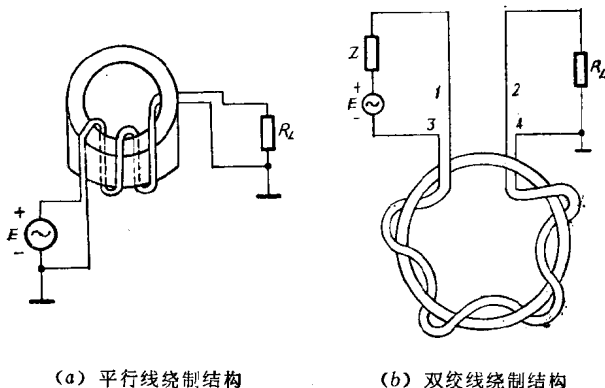


图 1—3 高频传输线变压器的结构

(二) 传输线变压器的工作原理

为了分析传输线变压器原理，把结构图改画为等效原理图，如图 1—4 所示。

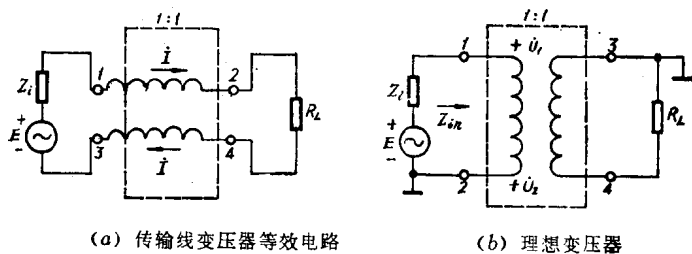


图 1—4 传输线变压器电原理图

由图 1—4 (a) 可知， $\dot{U}_{13} = \dot{U}_{12}$ 是反映了传输线变压器

外特性。传输线变压器的两组线圈绕向相同，线长相等，流过线圈的电流大小相等，方向相反，因而可以看成是一对均匀传输线。由传输线的原理已知，信号在传输线中是利用导线间介质传递能量（作耦合），当信号频率很高时，双线绞绕线其分布电容均匀，如把这种双线同绕在高导磁率（ μ 大）的磁芯上，其分布电感大且均匀。由传输线理论可知其串联阻抗 Z_1 及并联导纳 Y_1 为

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1$$

$$Y_1 = G_1 + j\omega C_1$$

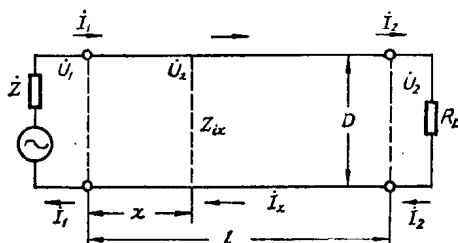


图1-5 传输线的原理图

当高频传输线的损耗电阻 R_1 及漏电导 G_1 皆很小时，则为无耗传输线。这时

$$Z_1 = j\omega L_1$$

$$Y_1 = j\omega C_1$$

$$\text{传播常数 } \gamma = Z_1 Y_1 = \alpha + j\beta$$

式中 α ——衰减常数，无耗时 $\alpha = 0$ ，

β ——相移常数， $\beta = \omega L_1 C_1$ 。

传输线的特性阻抗

$$Z_0 = \frac{Z_1}{Y_1} = \frac{L_1}{C_1} \quad (1-1)$$

式中 L_1 ——传输线单位长度的分布电感，

C_1 ——传输线单位长度内二线之间的漏电容。

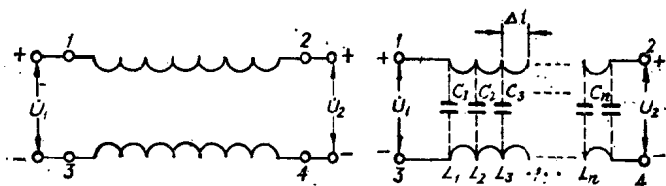
在负载匹配的条件下，即 $R_L = Z_c$ 时，传输线的输入阻抗 $Z_{in} = R_L = Z_c = \frac{L_1}{C_1}$ 。传输线上是行波状态，无反射波；

电源的能量由输入端无损耗地送到终端负载；而传输线各点阻抗均等于特性阻抗，与工作频率无关，即 $Z_{ix} = R_L = Z_c$ ；传输线上各点电流和电压振幅是相同的，都等于 I_1 和 U_1 ，只是与始端比较其相位滞后 β 。传输线两线间距离 D 比传输线的长度 l 小得多，其电场由一线指向另一线，磁场与电流关系按右手定则。电磁场基本集中于两导线之间，能量也就集中于电磁场内。能量靠电磁波进行传输，能量传输效率决定于传输线之间的介质损耗。

将高频传输线绕在具有高导磁率(μ)低损耗的铁氧体磁环上，就变成传输线变压器，其电路从表面上看似乎与普通变压器没有多大差别，但实际上它们传递能量的方式是不相同的。普通变压器信号电压加在初级绕组的 1、2 端，使初级线圈有电流流过，然后由此产生的磁力线在次级(3、4 端)感应出相应的交变电压，能量就是这样由输入端传到负载。而传输线变压器的信号电压却加在 1、3 端，能量在两导线的介质间传播到负载。传输线变压器能量传输原理如图 1—6 所示。由于两根导线是紧靠绕在一起，所以导线任意点的线间电容都是很大的，而且在整个线长上是均匀分布的。由于导线是绕在高 μ 磁芯上，故导线每一小段 Δl 的电感量是很大的，而且均匀分布在整個线段上。这些电容和电感量通常叫分布参数，由线间电容和导线电感组成的电路叫分布参数电路，如图 1—6(b)所示。

因此，传输线可以看成由许多电感、电容组成的耦合链，从而产生了新的传输能量的方式。当信号电压 $\dot{U}_1$ 加在图 1—

6(b)的输入端(1、3端)时,由于传输线间电容较大,因此信源向电容 C_1 充电,使 C_1 贮能。而 C_1 又通过电感 L_1 放电,使电感贮能,电能变为磁能。然后,电感 L_1 又向电容 C_2 充电,磁能又变成了电能。如此循环不止,直把电磁能送到终端负载,最后被负载吸收。如果忽略了导线的欧姆损耗及导线间的介质损耗,则输出端能量将等于输入端的能量,也就是说,通过传输线变压器,负载可以取得信源供给的全部能量。因此,在传输线变压器中,线间的分布电容不但不会影响高频能量传输,而且是电磁能转换必要条件。由于电磁波主要是在导线间的介质中传播的,磁芯的铁磁损耗对信号传输的影响就大大减少,所以传输线变压器的最高工作频率就可以大大提高,这就构成了传输线变压器传输宽频带信号的可能。



(a) 能量传输

(b) 等效分布参数

图 1-6 传输线变压器的工作原理

但是严格的讲,传输线变压器在高频和低频段上,能量传输的方式是不同的。在高频段,主要是由电磁能交替变换的方式传送。在低频段,由于频率较低,而传输线的线长又较短,这样单位长的感抗和容抗都很小,分布电容与分布电感的贮能作用很差,要利用电磁能的交替转换作用是很困难的,能量不易从始端传到终端。但是低频信号电压加在传输线的1端和地之间,将有电流流过初级绕组。这电流通过高

μ 的磁环内磁耦合, 就可以象普通变压器那样, 在次级产生感应电压, 将能量传输到负载端。因此在低频时, 信号能量将通过传输线方式和电磁耦合两种方式同时传送。实践证明, 在几十千赫频段内, 传输线变压器还是以传输线方式为主传送能量的。频率越高, 传输线方式传送能量的效率就越低, 而更多地用电磁耦合方式来进行传输。这一点对我们正确地设计传输线变压器是很重要的。

三、传输线变压器的特性

(一) 具有传输线的特性

传输线变压器是用双线绞绕在磁环上, 而且都是在匹配条件下设计的, 即 $Z_{in} = R_L = Z_0$ 。但在实际应用时, 由于终端负载的高频大功率晶体管的输入阻抗很小, 且不很稳定, 所以不能完全匹配, 即 $R_L \neq Z_0$, 传输线变压器呈现驻波状态, 在传输线距始端 x 处的电流电压为入射波和反射波的矢量和, 当 $x = l$ 时

$$\begin{aligned}\dot{U}_2 &= \frac{1}{2}(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_0) e^{-j\beta l} \\ &\quad + \frac{1}{2}(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_0) e^{j\beta l} \\ \dot{I}_2 &= \frac{2}{2Z_0}(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_0) e^{-j\beta l} \\ &\quad - \frac{1}{2Z_0}(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_0) e^{j\beta l}\end{aligned}$$

在始端, 即 $x = 0$ 处的输入阻抗 Z_{in} 为:

$$Z_{in} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = Z_0 \cdot \frac{R_L + jZ_0 \tan \frac{2\pi}{\lambda} l}{Z_0 + jR_L \tan \frac{2\pi}{\lambda} l} \quad (1-2)$$

可见 $\dot{U}_2, \dot{I}_2$ 的大小与 $2\pi\beta \cdot l (= 2\pi \frac{l}{\lambda})$ 有关。而在一定的 l 条件下, $\dot{U}_2, \dot{I}_2, Z_{in}$ 都随工作频率(或 λ) 变化而变化, 这就产生了频率限制。为了展宽频带, 应使 $\frac{l}{\lambda_{min}} \ll 1$, 实际取

$$l \ll \frac{\lambda_{min}}{8} < 0.1\lambda_{min} (\lambda_{min} \text{ 为最短波长}), \text{ 这样 } \beta l \approx 0.$$

$$\dot{U}_2 \approx \frac{1}{2} (\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_c) + \frac{1}{2} (\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_c) \approx \dot{U}_1$$

$$\dot{I}_2 \approx \frac{1}{2Z_c} (\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_c) - \frac{1}{2} Z_c (\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_c) \approx \dot{I}_1$$

$$Z_{in} = Z_c \frac{R_L + jZ_c \operatorname{tg} 2\pi \frac{l}{\lambda}}{Z_c + jR_L \operatorname{tg} 2\pi \frac{l}{\lambda}} \approx R_L \quad (1-3)$$

由此可见, 当 $l \ll \lambda$ 时, 传输线变压器上的电压和电流可以认为与匹配情况相同, 其输入阻抗等于负载电阻 R_L , 输入功率无耗地传给负载; 传输线对应的线间电压振幅不变; 导线上流过的电流大小相等, 方向相反; 沿线任一位置的 $\dot{U}, \dot{I}$ 振幅均相等, 绕组各点电压电流的相位不同, $\dot{U}_2 = \dot{U} e^{-j\alpha l}$ 每根导线上电压降 $\Delta \dot{U}$

$$\Delta \dot{U} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{2} \quad (1-4)$$

下面分析 $\dot{U}_1$ 与 $\dot{U}_2$ 的向量关系:

αl ——相位移, 其数值越大, $\Delta \dot{U}$ 越大, 其值为

$$\alpha l = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l.$$

由图 1—7 可见, 当传输线的长度 $l < 0.1\lambda_{min}$ 时,

$$\alpha l = \frac{2 \times 180^\circ}{\lambda} \times 0.1\lambda < 36^\circ$$

$\Delta \dot{U}$ 很小, 与 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 相比可忽略不计, 因此当选取传输线变压器绕线长 $\frac{l}{\lambda} < 0.1$ 时, 线两端基本上无电压降, 而电压全部加到负载上。

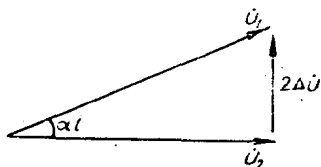


图 1—7 输入电压与输出电压的向量关系

(二) 传输线变压器具有承受大功率容量的特性

传输线变压器的磁环对特性阻抗 Z_0 没有影响。这是因为两根平行导线紧靠在一起, 磁环在两线的外侧, 而两线的各相应点电流大小相等, 方向相反, 其电磁场集中于两线之间, 在外侧互相抵消。外侧磁环的存在并不改变电磁场的基本结构, 也不改变两导线间的分布电容 C 和导线的分布电感 L , 因此磁环存在并不影响特性阻抗。能量由输入端传到输出负载不是通过铁氧体材料, 而是通过分隔传输线导体间的介质来耦合的。由于传输线变压器的功率传输不通过铁氧体材料, 因而磁环截面大小不受传输功率大小的影响, 截面较小的磁环可以传输较大功率的信号, 而不致饱和。这样传输线变压器的体积可以做得很小, 一个 $\phi 10 \times 6 \times 5 \text{ mm}$ (外径 $\times$ 内径 $\times$ 高) 能承受 30W 功率。为了减小损耗, 增大功率容量, 应使变压器中的磁通量尽量小, 也就是两组线圈产生的磁通应尽量互相抵消。而普通变压器能量是通过磁环进行互感耦合的, 磁通集中于铁心之内, 铁心截面的大小必须与所传输功率的大小相适应, 才不致使铁心饱和。

(三) 传输线变压器的宽频带工作特性

传输线变压器具有传输线的一切基本特性, 传输线变压器的特性阻抗 Z_0 可以认为与传输线的特性阻抗 Z_0 相同。在终端匹配的情况下, $R_L = Z_0$, 因此其工作带宽可以做得很宽。但传输线变压器毕竟不是传输线, 因此要深入的研究其

工作频带，就必须即要考虑到传输线的因素，也要考虑到变压器的因素，从中分析出限制高端和低频的频率特性因素。

1. 低频截止因素的分析

从传输线角度来看，传输线变压器的低频特性是不成问题的，因为低端工作波长 λ 大大增长了， $\frac{l}{\lambda} \ll 1$ 的条件更容易满足，更有利于能量传输，因此传输线工作方式是不限制低频特性因素的。当传输线变压器以变压器方式工作时，其工作频带应与变压器一致。根据变压器的初级电感 L_0 来决定变压器工作时的低频特性， L_0 也就成为限制传输线变压器低频特性的因素。为了使低频响应好，要求其变压器的初级电感 L_0 足够大。要增大 L_0 ，可增加导线的长度 l ，但与高频特性相矛盾。故采用把传输线绕在高 μ 的磁环上的方法，加大变压器的初级感抗。

在低频端，信号源的负载是传输线的输入阻抗 Z_{in} 和变压器的初级电感 L_0 所形成的感抗。在传输线变压器处于匹配的情况下，输入阻抗 $Z_{in} = Z_c$ ，感抗随着工作频率降低而线性的减小。信号源输出到传输线变压器的功率随感抗减小而减小，也就是随工作频率降低而减小。

因

$$\omega_L L_0 = 2\pi f_L L_0 = Z_c$$

所以

$$L_0 = \frac{Z_c}{2\pi f_L} \quad (1-5)$$

式中 Z_c ——传输线变压器特性阻抗，以 Ω 计；

f_L ——低端截止频率，以 Hz 计；

环形电感线圈的电感量以 H 计：

$$L = 4\pi\mu_r N^2 \frac{S}{l} \times 10^{-9} \text{ (H)} \quad (1-6)$$

式中 L ——线圈电感量，