

高功率微波源四极管发射机设计与研究

纪安, 孙方礼, 张建华

(中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088)

摘要: 重点介绍了一种直线加速器系统注入能量的高功率微波源四极管发射机。从加速器注入功率要求入手, 介绍四极管发射机研制方法。主要内容包括发射机系统构成, 指标计算、分配以及具体实现。重点阐述了发射机的固态放大器设计、阳极电源设计、控栅和帘栅电源设计。并对发射机的馈线设计和热设计提出了工程解决方案。针对四极管发射机特点作出了细致分析。项目完成后, 经过测试、联调, 各项指标满足设计要求, 为以后四极管高功率微波源的研制与开发提供了很好的设计参考。

关键词: 四极管; 固态放大器; 阳极电源; 控栅; 帘栅

中图分类号: TN837 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2016)01-0095-05

Design of a High Power Microwave Transmitter Based on Quadrode

Ji An, Sun Fangli, Zhang Jianhua

(No. 38 Research Institute of CETC, Hefei 230088, China)

Abstract: A kind of high power microwave transmitter is presented, which is based on the HDLS quadrode. Starting from the request of power immitting into the HDL, the design method of the quadrode transmitter is discussed. The paper mainly includes the composition of the transmitter and the calculation, allocation and realization of the performance indexes, focusing on the design methods of solid-state amplifier, anode power source, controlling grid power source and shade grid power source. The engineering solutions of transmission lines and cooling system are presented. The characteristics of the quadrode transmitter is particularly analysed. Through test and experiment, all parameters meet the design requirements.

Key words: quadrode; solid-state amplifier; anode power source; controlling grid; shade grid

0 引言

目前, 高能射频直线加速器为了获得 1 000~20 000 eV 甚至更高的加速梯度, 通常需要高功率微波源来激励加速腔产生高束流电子。为了使腔体内带电粒子与电磁场作更好的能量交换, 需要高功率微波源提供足够高的能量。微波源发射机稳定可靠产生的微波能量, 对加速器关键性能参数——加速梯度即电子能量增加的速率有着直接的、重要的影响^[1]。

1 主要特点及技术指标

在 UHF 波段, 对于输出功率达到 300 kW 的发射机, 根据目前的技术水平, 如果采用全固态方案, 不仅成本极高, 而且也不太现实。可行的方案

是采用真空管作为末级放大器。该发射机采用主振放大式体制, 末级放大器为 UHF 波段的微波四极管。将频率源产生的 UHF 波段的脉冲信号放大到需要的功率电平, 经馈线、定向耦合器到负载。对发射机的指标要求如下:

输出频率: 201.25 ± 1 MHz

3 dB 带宽: ± 1 MHz

最大输出功率: 300 kW

输出功率调节范围: 0~300 kW

频率稳定度: $\pm 1^\circ$

功率稳定: $\pm 1\%$ (脉间+脉内)

相位稳定度: ± 10

谐波抑制比: -25 dB

输出阻抗: 50 Ω

工作方式: 脉冲

脉冲重复频率: 1, 2, 5 Hz

脉冲平顶宽度：20~400 μ s
 输出接口：法兰连接
 输出馈管：6 in
 内外同步工作状态：可选择

2 系统组成与工作原理

发射机系统组成框图如图 1 所示。由晶振源或外接信号源产生的高频微波信号经过变频、调制和放大后产生功率放大器所需的 201.25 MHz 微波信号，经过高功率放大器放大至加速腔所需的 300 kW 微波功率。加速腔的反馈信号与输入的微波信号进行比较，用于保证加速腔输入端微波信号的幅度、相位及加速腔频率的稳定。

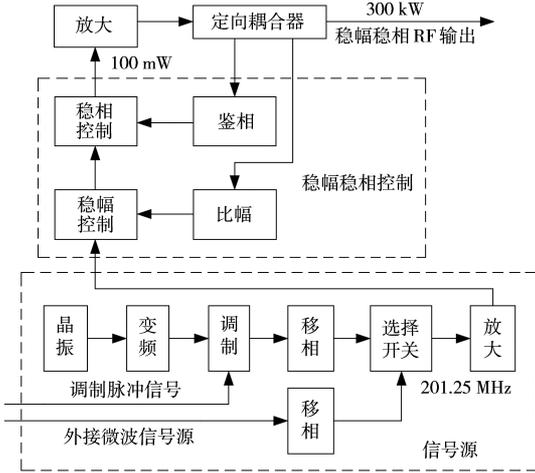


图 1 发射机系统组成框图

高功率微波发射机方案采用固态推动四极管的方案，由两级放大器组成，晶振源产生约 100 mW 的微波信号，经过固态放大器放大至 8 kW 左右，再经过高功率四极管放大器放大至 300 kW 左右。四极管放大器主要是要求工作稳定，不易自激，该管是阴极端接地，所以采用共阴极放大器。灯丝电源给四极管提供加热电源，阴极受灯丝加热后发射电子；阳极电源为管子提供 20 kV 工作电压；帘栅电源和控栅电源控制四极管通断，在射频脉冲激励期间控栅电源工作，帘栅电源提供截至电压^[2]，如图 2 所示。

3 发射机采用的主要技术

3.1 高功率固态放大器

高功率固态放大器的主要功能是完成射频功率放大，为四极管放大器提供所需的推动功率。

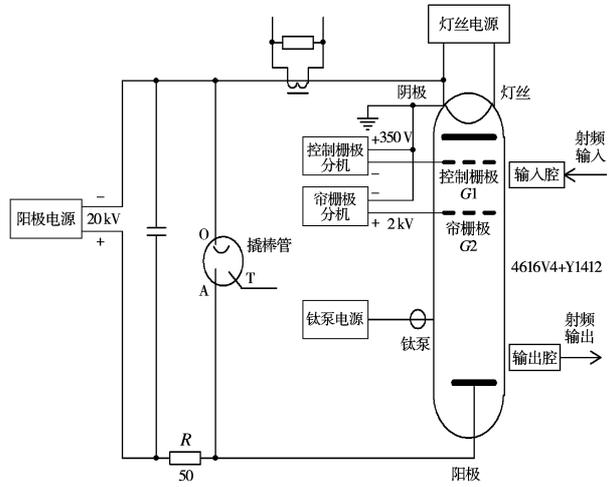


图 2 四极管工作框图

四极管的增益大约为 20 dB，理想情况下，前级激励功率需要 3 kW，考虑管子参数有一定离散性，同时考虑隔离器和传输线损耗，固态放大器的输出要求大于 6 kW。设计中，将末级放大器作为基本单元，根据系统需要可适当调整合成路数。其原理框图如图 3 所示（虚线框内为本任务系统）。功率放大器采用全固态方式，由前级组件、末级组件、合成/分配网络、开关电源模块和监控接口分机等组成。组件和分机安装在机柜内，需要有独立风道来散热。图 3 所示为 4 路末级合成时原理框图和各级放大器的功率分配（虚线框内为高功率放大器部分）。

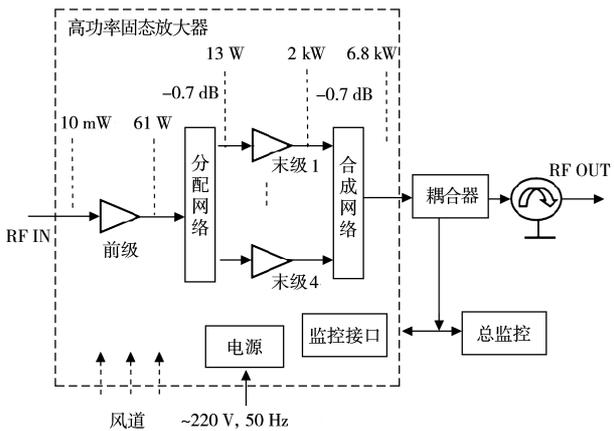


图 3 固态放大器组成框图

系统送来的 RF 激励信号 10 mW 经过前级放大，经过分配网络后推动 4 个末级，经合成网络后，输出 6.8 kW 的峰值功率；为了提高效率，对各级放大器的电源进行调制，这是前级和末级组件内电源调制板实现的功能；采用监控接口分机检测

放大器的工作状态,为放大器提供保护,同时将状态信号送至总监控^[3]。

3.2 阳极电源

为了获得极高的微波功率,四极管的阳极需有一个高频高压开关电源,电源纹波和稳定性要高,电源响应速度快,电源的参数为:

- 电压: 20 kV
- 脉冲电流: 27 A
- 工作比: 0.2%
- 峰值功率: 540 kW
- 平均功率: 1 080 W

3.2.1 电路选择

由于阳极电源的输出功率较大(1 080 W),电压也高(20 kV),主电路采用全桥移相零电压脉宽调制变换器(简称 FB-ZVS-PWM 变换器)。这种电路具有以下优点:电路简洁,充分利用线路杂散电感和器件寄生电容;实现功率管的零电压开关(Zero Voltage Switch, ZVS),降低开关损耗,有利于提高开关频率;较低的器件电流电压应力,较低的电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI);功率器件无需吸收电路。电源由整流滤波、逆变电路、高频变压器、高压整流、电压反馈和控制电路构成,原理框图如图 4 所示。

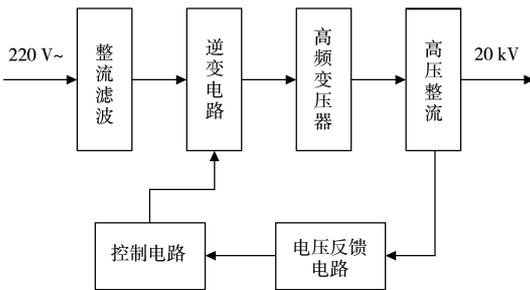


图 4 阳极电源原理框图

图 4 中,整流滤波单元采用 π 型滤波电路,将 220 VAC/50 Hz 输入电源变换为 300 VDC;逆变电路采用全桥移相脉宽调制变换器,可以充分利用输入电压,降低高频变压器的匝比,减小分布参数;高频变压器的次级有两个绕组,两个绕组的参数完全相同,这两个绕组的输出各自 2 倍压整流滤波后串联叠加,叠加后的电压为 20 kV;由于阳极电源浮于帘栅电源上,为了便于调试及电压调节,

电压反馈电路采用差值方式,分别由 20 kV 对地及帘栅电压对地采样,取两者差值为电压采样;控制电路中主芯片采用全桥移相控制器 UC2879。

3.2.2 FB-ZVS-PWM 变换器工作原理

如图 5 所示, V_s 为输入直流电压。 $T_{ri} (i=1, 2, 3, 4)$ 为功率 MOS 管, 其体二极管为 $D_i (i=1, 2, 3, 4)$, $C_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为功率管寄生电容或寄生电容与外部谐振电容并联等效值, L_r 是变压器漏感或漏感与外加谐振电感串联等效值。变压器副边电压 V'_s 经过桥式整流和滤波器给负载供电。图 5 给出变压器原边电压 V_{AB} 、副边电压 V'_s 和原边电流 i 的波形图, I_p 为原边电流峰值。

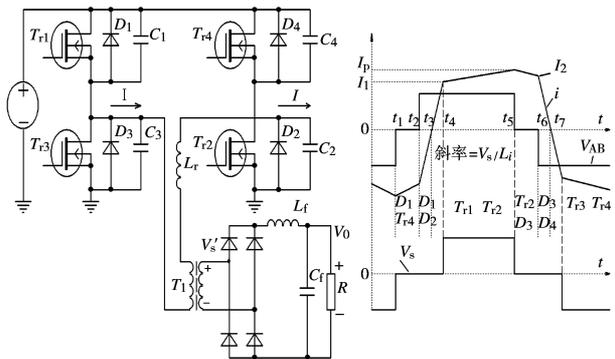


图 5 FB-ZVS-PWM 变换器

其原理是利用变压器漏感 L_r 和电容 C_i 谐振,漏感储能向 C_i 释放过程中,使 C_i 电压逐步下降到零,体二极管 D_i 开通,创造了 T_{ri} 的 ZVS 条件。为了改变占空比 D 以便实现调节控制,采用了移相技术。左右两桥臂的开关管分别为 T_{r1} 、 T_{r3} 和 T_{r4} 、 T_{r2} , 在两者的驱动信号脉冲之间保持一定的相位差,只要改变这个相位差(即移动一组驱动脉冲的相位),就可使占空比改变,也就改变输出电压大小。

由于阳极电源浮于帘栅电源上(如图 6 所示),为了便于调试及电压调节,电压反馈电路采用差值方式,分别由 20 kV 对地及帘栅电压对地采样,取两者差值为电压采样。

3.3 灯丝电源

其主要参数如下:

输入: 220 VAC;

输出: 最大直流电压 1.0 V, 典型直流电压 0.95 V, 典型电流 495 A(0.95 V);



图 6 阳极电源

预热时间: 从零开始到额定工作点最短时间不小于 30 s, 到达工作点后预热时间不小于 90 s。

此电源有输出电流、输出电压表头指示, 由于输出电流较大, 靠近管子灯丝端放置, 输出形式采用接线柱, 在电源的顶部输出; 有故障保护指示, 包括输出过压、过流、欠流等, 这些故障在电源启动过程中封闭, 到达工作点后再放开, 其中输出过压、过流故障(超过额定值 10%) 出现时将电源输出切断, 需要外部复位时才重新开始工作; 欠流故障出现时, 给出报警信号, 但输出不用切断, 该电源与管子灯丝端子的连接采用软的铜编织线, 因为电流大, 可能会产生应力, 如果采用硬连接会对灯丝端子产生损害。该电源的连接插座放置在电源的前部, 方便插拔^[4]。图 7 为灯丝电源示意图。



图 7 灯丝电源

3.4 控制栅极电源

四极管的工作状态主要按照栅流的有无和大小来分类, 以栅流和阳流之比来度量, 当栅流比阳流小到可以忽略时, 为欠压状态, 反之栅流较大以至占总电流相当大的一部分时, 为过压状态, 介于两者之间的状态为临界状态。作为末极放大器, 从输出功率和阳极效率考虑, 应该工作在稍过压状态。

控制栅电源最高输出 -350 V, 输出在 -250 ~ -500 V 范围的可调稳定电压。

栅极脉冲电流: 1.2 A

栅极平均电流: 2.4 mA, 设计时按 100 mA

3.5 帘栅极电源

四极管中帘栅极的作用最大, 它屏蔽了从阳极发出的终止于阴极的电力线; 削弱了阳极电压控制阴极电流的能力; 提高了放大系数。高频应用中, 帘栅极等效系统接地, 使栅极与阳极间的跨导电容减到 80%。

对于四极管来说, 不能过宽和过工作比工作, 必须在开启同步信号的控制下受控工作, 之后要快速有效地截止, 因此帘栅极的输出电压必须达到额定值。如果损坏或输出电压下降, 四极管的阳极将会因为过流而烧毁, 因此要对帘栅极的输出电压进行检测, 设置欠压保护。主要指标为:

帘栅极电压: 2000 V

帘栅极脉冲电流: 1.6 A

帘栅极平均电流: 3.2 mA, 设计时按 100 mA

3.6 馈线系统

馈线系统是研制的一个难点, 由于该加速腔在脉冲功率的上升和下降沿表现出短路的特性, 整个馈线系统考虑耐功率容量为 1.2 MW。

本系统馈线系统主要由以下几部分组成: 两个隔离器、一个 1/4 波长移相器、一个定向耦合器、一些长度和数量不等的同轴线, 以及一些同轴线 90°弯头组成。馈线系统的组成示意框图如图 8 所示。

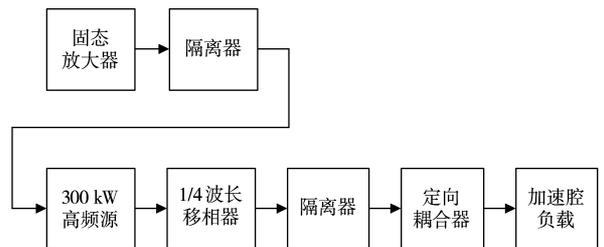


图 8 高频功率源输出馈线系统框图

输出负载在脉冲工作期间, 由于加速腔束流变化引起负载驻波较大, 在四极管放大器输入和输出端拟采用高功率隔离器进行隔离, 保证放大器工作稳定性。在四极管输出端接同轴 1/4 波长移相器进行调配。通过定向耦合器的输入端和反射端检测输出加速腔的频率、幅度和相位信息, 送

至 RF 控制器进行闭环控制,保证加速腔的频率、功率、相位的稳定。

本系统中的馈线传输线采用 50 或 75 型号的同轴线,它的特征阻抗是 $50\ \Omega$,外导体内径是 75 mm,内导体外径为 32.5 mm,它的理论功率容量为 16.3 MW,它的理论衰减值为 0.004 dB/m。由于本系统在正常工作时的峰值功率是 300 kW,但是在每个脉冲前后沿输出窗口会产生全反射。按电压击穿理论,整个馈线系统需考虑耐功率容量为 1.2 MW。50 或 75 型号同轴线的理论功率容量仍然是实际工作峰值功率的 13 倍,它能够承受本方案对于功率容量的要求^[5]。

本系统中的定向耦合器模型图如图 9 所示,它由两个同轴线相互叠加形成信号的耦合。定向耦合器耦合端口和隔离端口的输出是 N 型阴头,它们的间距大约为 400 mm,定向耦合器的主传输端口,即输入输出端口为 50 或 75 同轴线,整个定向耦合器的总长度大约为 800 mm。它能够达到的指标为:损耗 $\leq 0.3\ \text{dB}$,耦合度 20 dB。

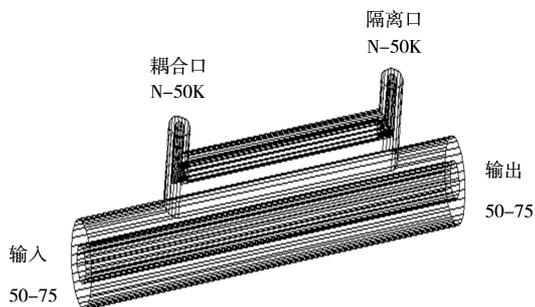


图 9 定向耦合器模型图

3.7 水冷系统

四极管需要数百安培的灯丝加热;阳极电位约为 20 kV,而该管和腔体在 17 kV 就会打火,需要充氮气,气压不能过高;控制栅极、帘栅极、阴极、灯丝、阳极需要五路去离子水进行冷却,在阳极部位采用分水器,如果漏水则会引起输出腔打火。本系统水冷设计五路水冷,采用去离子水冷却,需要加树脂筒进行过滤,与管子的连接管采用塑料绝缘水管,独立机柜,整体的耗散功率不超过 2 kW,水冷配电为三相 50 Hz/380 V,工作温度 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$,全密封结构,具有排气装置。冷却系统有压力指示和各路温度指示,每路的水流量可以调节,故障保护有各路流量、各路温度、压力等。

4 试验结果

本文所论述的高功率四极管发射机,经调试,各项技术指标均达到设计要求,发射机的最高功率达 310 kW,发射机脉冲宽度可达 $400\ \mu\text{s}$,前后沿小于 150 ns,能适应 $20\ \mu\text{s}/5\ \text{Hz}$, $1\ \text{Hz}/400\ \mu\text{s}$ 等各种工作状态。工作稳定可靠。在工作过程中四极管曾发生管内打火现象,通过对输出腔充 0.2 MPa 氮气,提高了绝缘度,打火现象已经得到解决。图 10 为发射机输出 RF 脉冲功率信号的包络波形。



图 10 发射机输出包络

5 结束语

高功率微波四极管以前没用过,是国内首次进口,所以对此类型管的特性不太熟悉,如何安全有效地使用该管至关重要。四极管自身的结构和腔体外部谐振回路密切联系,在使用时需要按部就班进行调谐,防止自激;管子输出射频通过阳极和阴极边缘耦合到输出腔,在管子和输出腔的接口处如果接触不好,驻波过大就经常会出现打火现象,时间一长,情况会越严重,最终导致管子被打坏。

四极管发射机需要同步调节的地方较多,包括输入腔短路双环的、输入射频耦合调节、输出腔谐振调节、输出射频耦合调节、阳极电压、帘栅电压、控栅电压、输入激励等。这些参数之间相互影响,在某个工作点调试结束后换个工作点又需要重新调试,同时由于腔体的 Q 值很高,谐振和耦合的微小调节都会导致输出功率有巨大差异,如果可能,设计一个可精密调节的调谐机构至关重要。

解决低频大功率时的干扰问题:输入输出腔体和四极管接触的谐振面要干净光洁,接触良好;做好空间的电磁屏蔽;发射机接地应该采用即薄又宽的铜箔,电感最小;管子灯丝、帘栅(下转第 106 页)