

第一章

概述

发射机(或称高功放)是航天测控、深空探测、卫星通信等系统的重要设备,主要完成对上行微波信号的放大、滤波和馈送等任务。它能把地面微弱的小信号放大到数十瓦甚至几十、几百千瓦的功率量级,以遥控在数百、上千万乃至数亿千米外的航天器,是天地链路中最重要的联系纽带、上行发射信号的核心设备,也是地面测控系统的重要组成部分,在航天测控、深空探测、卫星通信等系统中起到举足轻重的作用。它直接关系到测控距离等问题,是航天地面测控系统的重要组成部分,也是航天地面测控技术领域的关键技术之一。

发射机的能力可以从侧面反映一个国家航天科研综合实力,从中、小功率量级的固态功放到高功率量级的速调管发射机,无不体现着科技力量的基础和实力。发射机专业是一个基础学科,综合性很强,它涉及力、热、光、电、磁、结构、工艺、材料等数个学科,综合性极强,一个极小的失误都可能对系统指标造成严重后果,进而影响整个系统的成败。

因此,国际主要航天大国、强国都十分重视发射机技术的发展,并相继投入了大量人力物力,开展发射机相关的研究工作。从早期的速调管、行波管真空器件,到后来的横向扩散金属氧化物半导体(laterally-diffused metal oxide semiconductor, LDMOS)、砷化镓(GaAs)、氮化镓(GaN)等固态功率器件,都体现了科技的进步和基础研究的强大。我国在 20 世纪 60 年代开发了航天测控领域的 C 频段速调管功放,近二十多年来,随着业务需求、国内科技的进步和国产化要求的提高,逐步研发了针对航天测控、卫星应用的 S 频段、C 频段、X 频段、K 频段、Ku 频段、Ka 频段等多种功率等级的固态和真空管连续波高功放产品。

近十年来,随着航天测控技术的发展和需求的增加,我国对空间目标探测的距离已由常规航天器的探测向月球探测、深空探测等更远距离探测的方向发展,所需发射机的种类和功率量级也有很大不同。本书立足于国内外的专业发展现状和近年来我国各类航天发射机的研制要求,开展了一些技术性讨论说明。

第二章

航天发射机类别

发射机作为天地链路的核心设备,除提供足够大的射频功率外,还必须针对不同应用满足不同的技术要求。目前根据发射机所采用器件的不同,可分为电真空器件发射机和固态发射机等若干大类,其中,电真空器件发射机又可分解为速调管发射机、行波管发射机等^[1];固态发射机可分为 LDMOS 器件发射机、GaAs 器件发射机和 GaN 器件发射机等。

选择何种类型的发射机,一般应根据设备要求的频率范围、功率大小、带宽、效率和使用环境条件等各类因素综合考虑。

2.1 真空电子管类

2.1.1 速调管发射机

速调管作为一种微波真空管器件,具有输出功率大、效率高、稳定性高等优点,在早期高功率应用时经常作为发射机的首选方案。尤其是在固态器件没有大规模发展的 20 世纪 80 年代以前,高功率发射机几乎都采用了速调管方案。近年来,随着固态器件的发展,在 Ku 频段千瓦级(脉冲、连续波)以下的发射机大都采用了固态方案。但在高功率需求前提下,速调管发射机仍然拥有较大优势。如 C 频段 3000W 卫星通信发射机^[2]、X 频段 10kW 航天测控发射机等^[3],都仍然采用速调管方案。

2.1.2 行波管发射机

行波管(travelling-wave tube, TWT)是 19 世纪 40 年代早期发明的一种用于微波频率放大的真空器件,其放大作用是通过将电子束动能转化为射频电磁波来实现的。行波管具有很宽的带宽,而且体积小,所以很多卫星通信发射机都应用行波放大器。

由于固态器件的出现使对行波管的需求大大减少,尽管真空器件在很多领域已被固态器件所代替,但在雷达、电子对抗和卫星通信这些要求高功率(几瓦到几兆瓦)、高频率(1~100GHz)、高效率(效率 65%、功率 100W、工作于 Ka 波段的行波管是很普遍的)和很宽的带宽的实际应用场景中,大多只有真空器件才能满足技术要求,例如卫星通信使用的 Ku 频段 2000W 卫星通信发射机^[4]。

2.2 固态器件类

2.2.1 LDMOS 器件发射机

LDMOS 晶体管自应用以来,一直在无线通信基站收发器的固态功放中起着主导作用。相对于其他固态器件来说,LDMOS 晶体管具有线性度好、增益高、效率高和热稳定性好等优点,特别是由于半导体技术的快速发展,LDMOS 器件性能得到不断提升,其优越的特性也吸引了军用电子系统,特别是雷达发射机的极大关注。

但是,该类型发射机由于器件本身的特性,目前大多集中在 L、S 频段,或者在 4GHz 以下。随着近年的技术发展,目前 LDMOS 功率器件已经可以用于 6GHz,但在 6GHz 甚至更高频率的固态化设备中,又逐渐被另外的固态器件(如 GaAs、GaN 等)替代。

由于 LDMOS 的源极和沟道是短接的,击穿电压较高,其抗驻波能力也相应较高。同时 LDMOS 能承受比它高几倍的负载失配,能够接受更高的反射能量,因此其在抗击穿和抗烧毁能力方面具有极大优越性。另外,由于其大规模应用于民用通信领域,成本较低,故而成为各类用户最好的选择。

在航天测控应用方面,LDMOS 器件发射机由于其巨大的优越性,目前仍然有很多发射机采用这一类型作为核心器件。

2.2.2 GaAs 器件发射机

砷化镓场效应晶体管(gallium arsenide field-effect transistor, GaAsFET)固态发射机具有高可靠性、长寿命、易维护性等优点,长期以来受到雷达总体和众多用户的青睐。我国于 20 世纪 70 年代初开始全固态雷达发射机的研究,经过几十年的努力,目前在千瓦量级的 C 频段和 X 频段都有相应的固态产品^[5-6]。优越的线性指标使其在过去十多年成为卫星通信领域的不二选择。但由于单管功率、功率密度、工艺水平、成本等一系列因素的影响,尤其在高频条件下(X 频段及以上),GaAs 正在被另一种固态器件——GaN 取代。目前 GaAs 技术和市场应用正在受到越来越大的压力,就如固态器件逐渐替代真空管器件一样,GaAs 器件发射机也正逐渐被替代、走向衰落。

2.2.3 GaN 器件发射机

近年来,以氮化镓高电子迁移率晶体管(GaN high electron mobility transistor,GaN HEMT)为代表的宽禁带半导体器件发展迅猛。相比于传统 GaAs 等器件,GaN 器件在输出功率能力和效率方面有了很大的提升,非常适合用于制作大功率、高频和高密度集成的微波功率器件,被称为第三代半导体材料。GaN 功率晶体管发射机发展较快,因为该器件具有其独特的优点:①沟道工作温度高(高于 600°C),工作温度范围宽;②工作效率高,远优于 GaAs 器件和 Si 器件;③功率密度高,单元输出功率在 $10\text{W}/\text{cm}^2$ 以上,工作电压在 50V 以上;④阻抗高,便于宽带匹配,可实现超宽的工作带宽;⑤噪声系数指标竞争力强;⑥具有较高的抗辐射能力。

基于上述诸多优势,GaN 功率发射机将有很广阔的发展空间,Ku 频段固态功放产品目前已达 2000W ^[7],大有取代电真空器件和 GaAs 器件的趋势。但由于目前其线性度相比于 GaAs 等前述器件较差,在要求较高线性度的卫星通信、航天发射机领域并没有得到大规模应用。不过随着线性化技术的发展,由该类型器件主导的功率产品将迎来极大发展。

参考文献

- [1] 蒙青屏. GEN IV 速调管常见故障及应对措施[J]. 中国有线电视, 2020(4): 455-456.
- [2] 宋鹏飞. CPI 3kW 速调管高功放运行实践[J]. 广播电视信息, 2019(1): 77-80.
- [3] 侯满宏,郭忠凯. X 频段 10kW 速调管功放在深空地面站的应用[J]. 电子科技, 2015,28(3): 112-116.
- [4] 杨学宁,李文旭. 6~18GHz/2000W 宽带脉冲行波管的研制[J]. 真空电子技术, 2021(4): 77-81.
- [5] 刘杰. C 波段 1000W 连续波固态高功放设计[J]. 现代电信科技, 2014(7): 34-38.
- [6] 李新胜. X 频段 1000W 连续波固态高功放研制[J]. 无线电工程, 2013, 43(5): 39-41.
- [7] 马云柱,赵迎超,陈福媛. Ku 频段 2kW 氮化镓固态发射机设计[J]. 火控雷达技术, 2022, 51(2): 79-82, 87.

第三章

国内外发展历程

3.1 美国深空测控发射机

3.1.1 NASA 深空测控网发射机配置

美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)深空站建立于 20 世纪 50 年代末,用于支持 NASA 对太阳系探测,由加利福尼亚戈尔德斯顿、澳大利亚堪培拉和西班牙马德里三个地面站组成。三者经度相差 120° ,可以实现全天候、全弧度测控任务。每个站都建有 4~10 个深空设备,配备大抛物面天线。

1. 加利福尼亚戈尔德斯顿深空地面站

加利福尼亚戈尔德斯顿深空地面站包括一副直径为 34m 的高效(high efficiency, HEF)天线、一个由 4 副直径为 12m 天线组成的天线阵、三副 34m 波束波导天线,以及一副直径为 70m 的天线组成。其中,70m 天线具备 S 频段上行、下行能力,主要用于新技术开发和验证。

X 频段 100kW 速调管发射机原理框图如图 3-1 所示,设备图如图 3-2 所示^[2]。

该发射机采用了美国 CPI-MPP 公司研制生产的 X 波段连续波速调管。其冷却设备主要是热交换器,包括两个功率为 29 840W 的水泵和两个功率为 7460W、长为 1.22m 的风机,整个热交换器的质量为 66 150kg。在 20kW 和 25kW 速调管高功放系统中,美国采用的是常规的乙二醇混合溶液的冷媒,但在 100kW 发射机的冷却系统中却采用了纯水作为冷媒。其高压电源配备了一个功率大于 500kW 的电动发电机。

2. 澳大利亚堪培拉深空站

澳大利亚堪培拉深空站包括一副直径为 34m 的高效天线、三副一个由 4 副直径为 12m 天线组成的天线阵、一副 34m 波束波导天线和一副直径为 70m 的天线。

3. 西班牙马德里深空站

西班牙马德里深空站由一副直径为 34m 的高效天线、三副一个由 4 副直径为 12m 天线组成的天线阵、一副 34m 波束波导天线和一副直径为 70m 的天线组成。

分布在全球的、三个经度相差 120° 的地面站构成了美国深空网,三个地面站中还包含了 70m 系统构成分布式业务网络(distributed service network,

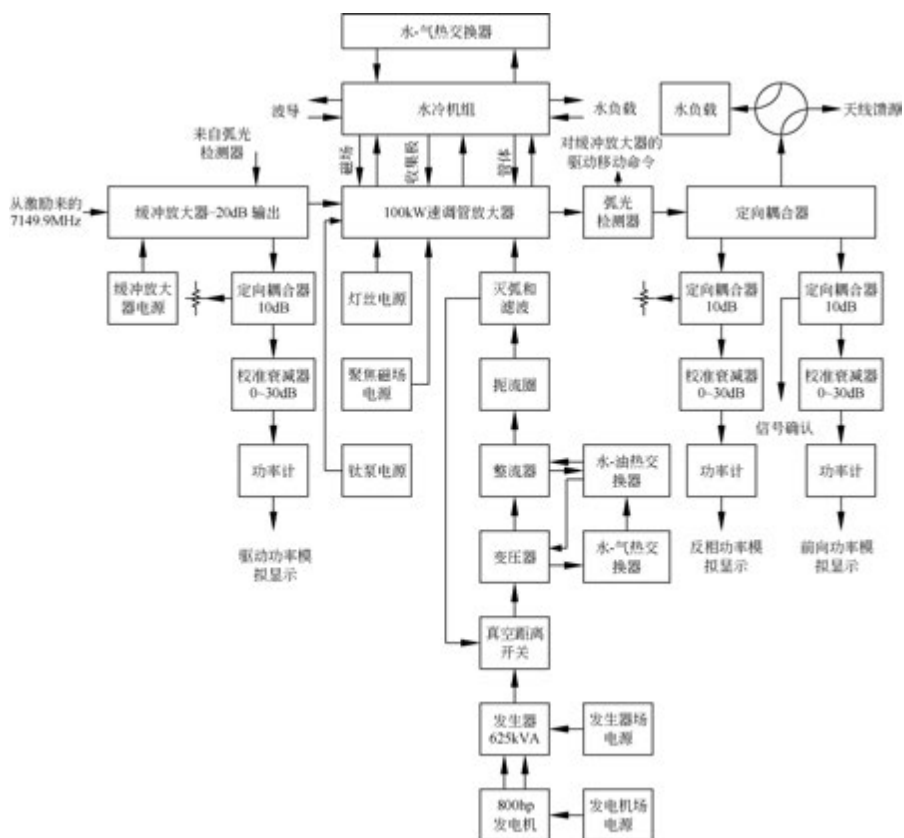


图 3-1 美国 X 频段 100kW 速调管发射机原理框图



图 3-2 美国 X 频段 100kW 速调管发射机设备

DSN)的子网,其 70m 天线在原 64m 天线基础上改造而来。到 2001 年,DSN 的子网 70m 天线系统均配备有 S 频段、X 频段上行发射机,S 频段上行工作频率为 2110~2120MHz,输出功率为 20kW,X 频段上行工作频率为 7145~7235MHz,输出功率为 20kW^[3-5]。

NASA 深空网三个地面站的 34m 高效天线系统构成了 DSN 的子网。其跟踪测量探测器、甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)和射电源观测建于 20 世纪 80 年代,支持 X 频段上行。

NASA 深空网在 20 世纪 90 年代建立了 34m 波束波导天线提高天线主反射器和副反射器来增加孔径效率,在 34m 波束波导天线配备了 S 频段上行 20kW 输出功率发射机和 X 频段上行 4kW 发射机。为了支持火星探测任务,NASA 在 2004 年对设备进行了升级改造,更换了新的 S 频段速调管,使其体积减少了 30%,工作频率为 2020~2125MHz,输出功率最大为 20kW,动态范围为 20dB。X 频段发射机工作频率为 7145~7235MHz,带宽由 45MHz 提高到 90MHz,输出功率由原来的 4kW 提高到 20kW,动态范围为 20dB,如图 3-3 所示。

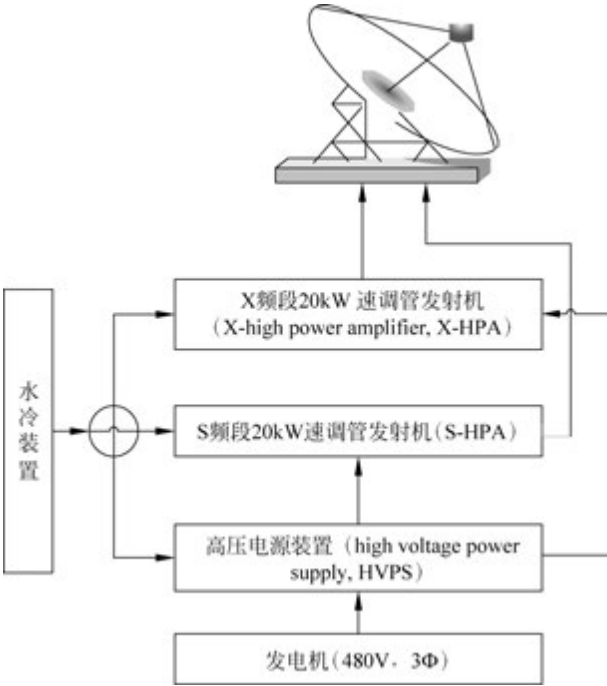


图 3-3 NASA 34m 波束波导天线 S 频段、X 频段发射机框图