

六性设计

可靠性指标分析

系统充分借用了其他固态功率放大器成熟技术，利用长期积累的真实稳定性数据迭代开展技术、稳定性一体化设计，重点针对稳定性薄弱环节采用了简化设计、电气互联设计和优化冗余设计等稳定性设计措施。

可靠性设计指标

- a) 连续无故障工作时间；
- b) 功放长时间不间断工作于不方便人员抵达的环境中，联锁控制系统若发生死机等情况，可远程恢复。另外功放内部的激励射频开关及联锁控制电路将作为模组安全联锁、机器联锁和轨道联锁等的执行机构，需绝对稳定；
- c) 系统柜长时间不间断时，在充分考虑性能指标的情况下，通过对关键环节采取冗余设计外，经过稳定性分析、稳定性分配和预计、不断优化设计，反复迭代，综合权衡以达到性能与成本的最优化。

根据分析，功放从系统到单元、模块均采取了一系列有针对性的措施，确保功放工作稳定稳定性，因此系统稳定性指标的实现是完全有把握的。

系统稳定性指标通过设计、制造、管理和使用体现出来的，针对本系统功放的实际情况，在产品实现过程中特别加强以下关键点：

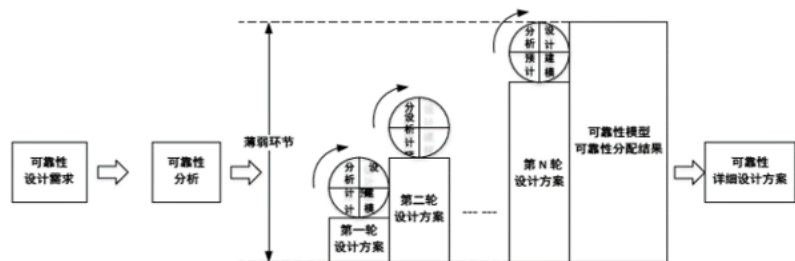
- a) 从研制开始，紧密结合工程研制，同步进行稳定性设计，采取合理可行、卓有成效的稳定性设计措施，以保证功放稳定性指标的实现；
- b) 从简化设计入手，合理划分功能，整合优化相关电路，大量减少硬件设备和电气互连，提高基本稳定性；
- c) 从插件和功放模块热设计入手，合理调整布局，优化设备内部温度场分布，改善元器件（晶体管和电容等）工作环境，降低元器件工作结温，大幅度提高设备的工作稳定性；
- d) 功放开展整机的热仿真分析计算，通过模态对比筛选，反复优化设计，降低系统热阻，提高系统散热的效率，大力提升设备工作的环境适应性；
- e) 针对工艺关键项目（末级功放模块、插件的盲插和整机全反射耐功率等），进行专题研究，细化关键工艺流程和质量监控要求，保证可生产性和可重复性；
- f) 严格按照元器件大纲规定要求控制元器件的选用；

g) 确定符合性验证方法，制定合理的验证计划，开展符合性验证。

系统稳定性要求尽管很高，在采取有针对性的设计措施和合理可行的稳定性保证措施后，实现稳定性指标是完全有把握的。

稳定性建模和分配

在功放系统设计中迭代开展技术、稳定性一体化设计，初步方案确定后，建立稳定性模型，利用相似设备法开展初步稳定性预计，进行功能寻找稳定性薄弱环节和过度设计环节，修正设计方案，迭代进行设计和分析工作，最终实现性能、稳定性和成本的最优化，输出稳定性模型和指标分配结果，可以依据下图开展稳定性设计工作。



稳定性总体方案过程

该功放系统充分借用了前期产品的成熟技术，实现了稳定性水平的高起点，稳定性初步预计时采用相似设备法，利用了长期积累的稳定性数据库内的数据，可以保证稳定性初步预计的准确性和稳定性分配的合理性。

对功放系统进行分析后可知系统的稳定性模型为串并混联模型。

功放系统采用自上而下逐层分配。由于本系统大量借用成熟技术、成熟电路、成熟组件和模块，积累了丰富的历史数据，本固态系统的稳定性指标分配采用相似设备法进行分配，功放可高稳定性的连续工作。

稳定性设计

元器件和原材料的选择与控制

功放的全部零部件和原材料都是经过严格的检验；所用的全部元器件都是经过严格的筛选；所用的电子元器件、机电产品、指控元件、接插件和线材均能保证供方质量要求；对稳定性要求高的部件、电路，都通过容差分析进行漂移设计；优先选用标准的设备、工具、元器件和零部件，并尽量减少其品种规格。

简化设计

产品设计中严格按照“三化”要求，遵循产品设计中的简化思想，达到产品简化设计的目的，增强产品的可操作性、测试性、维修性。

降额设计

在电路设计时都做了详细的分析和计算，计算出每个电路元件上的电压、电流、频率、功率等应力，对元器件进行合理的降额使用。

在计算各元器件的参数时，充分考虑其参数的离散性对电路性能的影响。采取折中、补偿和降额等方法保证电路参数在极端温度应力、极端电应力等环境下稳定的工作。

电气、电子电路的稳定性设计

由于功放的结构特点，为了保证产品的正常工作和参数的最优化，电路板组件较高散的分布在功放的各个部分。电路板遵循模块化的设计思想，每个电路板组件均能独立完成一项或几项的工作任务。

在整机装配时采用镀银短铜片实现各个功能电路板组件之间的互联（完成主要连接点之间的互连）。镀银铜片具有电阻率低、强度高的特点，保证了互联点之间较低的线损，提高了连接点的强度和抗振动能力。克服了采用软线互连时带来的线损大、强度低、稳定性低的缺点。

由于结构和工艺上的原因不能采用镀银短铜片连接的地方，则采用单点多线、或多点多线制的方式用软导线实现互连。安装导线绞合（需要时）、成束、套绝缘套管通过专门的固定孔进行固定，并用硅橡胶进行粘接辅助加固。

结构设计稳定性设计

应考虑方便设备装配、调试和维修，确保结构坚固性，以承受规定的环境应力。

人机工程稳定性设计

为了使人与电子设备有效地结合成为一个协调的有机体，要求根据人的能力和容限，科学地确定设备的具体设计、操作方法和操作环境，以达到安全、易用和易于维护的目的。因此，在设计中力求作到设备操作方法简单，用户易于掌握；显示、报警齐全，工作环境舒适。

经过以上分析和设计，可以保证产品状态、性能和指标在单次使用中和多次使用中保持相对稳定和不降级。

维修性设计

缩短故障定位时间、缩短故障排除时间、缩短修复验证时间是维修性设计的三大措施。并严格按照我国有关法律、条例、规定及有关国标、船标、行业标准的要求进行设计，确保设备的可维护性。其具体措施如下：

- a) 设计过程中，将电源模块、前级驱动、单模块、合成器及控制电路均采用模块化设计，便于拆卸维修，更换；
- b) 增强系统的自检和巡检功能，增加能够定位的故障点；
- c) 具有良好的可达性：机柜的前板、后板可拆卸，功放模块组件可以方便从机柜里面拆卸下来检修，经常拆卸的结构安装件要求设计成不脱落结构；
- d) 配置通用工具和专用工具；
- e) 提高标准化和互换性程度：所以功放模块均采用标准的接口，方便互换和与电源等其他部件的连接。器件均选用专业厂家生产的标准件；尽量减少其品种和规格，提高互换性和通用化程度，以提高维修效率；可用随机工具进行可更换的元器件、模块进行备份，快速更换；
- f) 具有可维修标识：器件均有标牌；
- g) 在功放装配中，加强设备履历书的记录和管理，收集、整理现场使用中的维修性数据，保证功率模块在装配前后状态的一致性，也保证小批量生产中，功率模块之间的一致性，便于简化功率模块及维修操作；
- h) 关键部位均有防错设计，可有效防止装配错误。各连接点都设计有清晰、标准、易理解的标示符，可防止连线错误。涉及的连接件，接口均采用国家标准。

环境适应性设计

环境设计要求

该功放环境设计保证要求如下：

- a) 环境温度：0~40℃。
- b) 相对湿度：20%~80%。

在设计时，要充分考虑其使用的环境要求。

本方案提供的 S 频段连续波功放工作温度、低温指标一般器件都能满足，为了适应高温环境，要采取两个措施：

- 1) 尽量选用耐高温性能好器件；

2) 通过合理的冷却措施来保证器件工作在合理的温度范围，保证整机在高温状况下能正常工作。↵

c) 电源状况：三相五线交流，频率 50Hz~60Hz，电压 220V 允许波动 $\pm 10\%$ 。↵

装配工艺环境适应性设计↵

各个功能电路板组件之间的互联采用镀银铜条实现（完成主要连接点之间的互连）。镀银铜片具有电阻率低、强度高的特点，保证了互联点之间较低的线损，提高了连接点的强度和抗振能力。克服了采用软线互连时带来的线损大、强度低、可靠性低的缺点。↵

由于结构和工艺上的原因不能采用镀银短铜片连接的地方，则采用单点多线、或多点多线制的方式用软导线实现互连。安装导线绞合（需要时）、成束、套绝缘套管通过专门的固定孔进行固定，并用硅橡胶进行粘接辅助加固。↵

测试性设计↵

为提高设备的完好性、持续能力和任务成功性，降低维修人力与资源的要求，降低寿命周期费用。系统在设计上遵循模块化、标准化和通用化的“三化”设计准则，把产品按功能划分为基础功率模块部分、电源部分、天线部分、伺服结构部分和控制部分，每个部分都能单独的检测其工作状态和性能指标。↵

故障检测↵

由于该系统产品的功能较单一，内部空间小（为保留足够的功率余度和热冗），功放对外未设置专门的测试接口，可以利用现有功能接口来兼做测试接口对产品的性能指标、状态及故障进行甄别。功放的检测方式主要有输出功率、输出频谱特性等参数。通过对上述各参数的判定分析，功放可实现 100% 的故障检测率。↵

输出功率下降时，表现为供电电流下降、功率计的读数减小。无功率输出时，表现为供电电流仅为静态电流，功率计无读数。当主电源未加电或主电源模块无输出时，表现为无功率输出。输出脉冲包络的前后沿延时时间可以通过示波器进行检测和读数，从而判定延时参数是否满足要求。↵

故障隔离↵

系统的内部构成为基础功率模块组件、电源组件及控制组件。每部分组件都完成某些预先分配的功能，可单独进行测试和检测。基础功率模块组件是功放的主要组成单元，主要完成射频信号的放大功能，产品共有两个基础功率模块组件。电源组件完成包含负压电源部分及正压电源部分，负压电源供给前级及末级放大器的栅极，正压

电源供给放大器的漏极。控制部分主要完成对加电顺序的控制、负压保护等功能。上述各部分功能组件按照一定的空间布局，遵循连接最优、性能最佳、稳定、方便装卸的原则分布在整机的各个部位。在整机的各个部位都设置有关键信号的测试点，在功放发生故障不能完成既定任务或性能降低时，通过对这些测试点进行检测、逐级排查，便能快速的定位故障点，故障能定位和隔离到基础功率模块级（包括前级模块和末级模块）、单个电源模块及控制电路，定位及隔离率为 100%。

安全性设计

为确保人员和设备安全，对全套设备进行安全性分析与设计，将不安全因素消除在设计中。为此，从电保护、结构保护、射频保护、环境设计等多方面加以考虑。

安全性设计按 GJB2225A-2008《地面电子对抗设备通用规范》、GB/T 13869-2017《用电安全导则》，T/CIE 050-2018《液/气双通道散热系统通用技术规范》和我司安全生产规范等执行。

人员安全按照 GJB2225A-2008 中条款 3.11.2 人员安全执行：

用电安全按照 GJB2225A-2008 中条款 3.11.3.1 用电安全要求和 GB/T 13869-2017《用电安全导则》执行：

机械安全按照 GJB2225A-2008 中条款 3.11.3.3 机械安全要求执行：

防射频辐射按照 GJB2225A-2008 中条款 3.11.2.2 防射频辐射要求执行：

射频保护按照我司安全生产规范执行。

人员安全措施

- a) 可能危及人身安全的部位，应有安全防护措施和醒目的标志；
- b) 在维修技术文件的扉页，应有《维修安全注意事项》，手册中凡涉及安全的维修操作，应用黑体字注明安全操作要领，维修仪表应附有安全使用规则；
- c) 设备正常工作时间内，凡有可能接触到超过安全电压的地方，均应采取保护措施；当地线作为线路的一部分时，任何外部电缆或内部互连电缆在其两端的电缆接线端有一条地线；
- d) 维修时必须移动的超过 10kg 的部件应安装把手，必要时还应设托架，不允许维修人员手托重物工作；
- e) 维修时肢体需要通过的部位，不允许有毛刺和尖锐棱角，维修孔边缘必须倒圆或加防护圈；
- f) 触及高压的工具、橡皮手套、绝缘垫等，其耐压应为触及电压的 2.5 倍以

上；↵

- g) 设备应有明显的安全操作警示，设备的高压部位应安放写有“高压危险
××V”字样的提示性标志牌(图形符号按 GB/T 5465.2-1985 中第 1016 号的
规定)；↵
- h) 防电击：超过 500V 的设备，若要求测量电压时，应采取分压器或其他技术措
施，使测量在低电位下进行；↵
- i) 电压（均方根值或直流）大于 30V，小于或等于 70V 时的部位，工作时不可直
接接触。电压大于 70V 小于或等于 500V 电压范围内所有的触点 接线端和类似
装置应设有挡板或防护罩。挡板或防护罩标有一旦拆除就可能碰上高压电的标
志。当设备在工作和维修时，设置测试点，使得所有高电压能够在较低的电压
级上测量，在设备说明书或维修手册中，应详细规定在设备测试点上测量电压
的方法；↵
- j) 配电装置上电源转换开关安装在易接近的地方，并清楚地表明其功能。在工作
人员操作可达范围内设置应急开关，以便在发生危险时迅速切断电源；↵
- k) 插箱单元，上下限位使得插箱不能轻易掉落，把手承重超过插箱单元重量的 4
倍；↵
- l) 所有易于接触到的边缘、凸起物、拐角、开孔、挡板、把手等做倒角、抛光等
处理，使得接触位置光滑圆润，避免在正常使用设备时造成人员伤害；↵
- m) 可触及件不会因过高温度而使人烫伤。↵

用电安全措施↵

- a) 采用熔断器和断路器保护。利用熔断器、断路器、延时电缆、中断器或电路
断流装置，以使在故障一出现时就断开电路的各引线；↵
- b) 影响人机安全的部位，增加了标识、符号和说明；↵
- c) 进行了防插错设计；↵
- d) 所有接地点都有接地标识；↵
- e) 所有操作面板都有警示性标识，配电操作开关，门把手等处。↵
- f) 所有供电线缆用符合国标用电标准的颜色线缆,和普通线缆和直流电源线缆颜
色进行区分；↵
- g) 一般应配备调试用的假负载；↵
- h) 设备的信号预埋线与动力线应分开布置；↵

- i) 设备应有过流保护、过压欠压保护装置,采用保护装置后,应不影响设备的正常工作;↵
- j) 高压电路中的电容器两端,应有放电开关或放电棒或其他措施,使电容器能迅速放电至安全电压,为防止介质极化恢复过程再次产生高压,放电电路应能联接到高压线路上持续放电;↵
- k) 设备的金属外壳(柜、箱、台等)和屏蔽层均应安全接地,接地电阻小于或等于 0.5Ω ;↵
- l) 插头与插座分离后,其带电的芯线应不会碰到机壳而造成短路危险;插头的接点应不带电或接点不可能与人体直接接触;↵
- m) 设备在额定电参数(电压、电流和功率等)下按规定运行时,不得造成人身危害或设备事故;↵
- n) 设备所有的电连接器、连接线和接线端子必须能承受所规定的电、热和机械负荷,易造成危害的部位必须通过位置排列、结构设计或附加装置来保证稳定的电气连接;↵
- o) 在所有可能由于过电压、过电流、泄漏电流或类似作用发生危险的地方,必须留有足够的电气间隙、爬电距离以及电流通路;↵
- p) 设备电源应设置总开关,并有保护性切断措施;↵
- q) 电能的接通、断开和控制,必须保证有最大限度的安全性,必须有防误接通、误断开措施,手动控制要保证操作运动的作用清楚明了,必要时可辅以提示性文字与图形符号;↵
- r) 电压超过 36V 交流有效值或 42V 直流时,对裸露部分应采取安全防护措施;↵
- s) 电压为 70V-500V 交流有效值或直流的所有触点、接点或类似装置,应有防止维修人员偶然接触的防护措施;↵
- t) 电压超过 500V 的部位,不允许裸露,必须有妥善的绝缘、密封措施。↵

机械安全措施↵

- a) 设备的外露部位、拐角、边缘处均应倒圆;↵
- b) 立式设备应在振动、大风或其他外力作用下不致倾倒,有足够的稳定性;↵
- c) 设备在架设、撤收、运输时,其活动部件能锁固;密封车厢要设置排气孔、阀,在内外温度、压力变化时,防止门窗开启失灵或发生其他事故。↵

防射频辐射安全措施

- a) 系统在屏蔽暗室内工作时，人员应在暗室外操作，确保照射到人体的微波功率密度应小于 $10\text{mW}/\text{cm}^2$ ，对设备的射频功率单元(含馈源系统连接法兰盘处)进行射频防护；
- b) 若因调试或维修需要，当不可避免在强射频辐射环境中工作时，应有防强射频辐射措施，应提示操作人员着射频防护服、帽，并戴防护眼镜。

射频保护安全措施

- a) 过激励保护措施，使得输入功率过大时不损坏后级电路；
- b) 输出和反射功率监测功能；
- c) 功率和过反射保护功能；
- d) 过温保护功能；
- e) 供电电压监测功能；
- f) 级间功率模块宽度匹配与隔离。

先进性设计

生产工艺需达到行业内较高水平

微波功率放大器是微波通信设备的重要部件，它的性能优劣在很大程度上影响着通信质量。比如，微波功率放大器增益减小、输出功率下降，则会引起信噪比降低，或使通信距离减小；功放的泄漏会造成自激，使工作不稳定，严重时甚至会使通信中断。性能优良的功率放大器，除了要进行精确合理的电路和结构设计外，还必须要有良好的生产工艺作保证。

微波功率放大器的电路设计

微波功率放大器与小信号微波放大器情况不同，作为功率放大器，应有较大的输出功率和高的效率，同时也要满足带宽、增益和稳定性的要求。由于功率放大器处在大信号状态，放大过程中难免产生非线性失真，在设计时必须着重考虑。因此，功率放大器的设计比小信号放大器的设计要复杂得多。

根据几年来在微波功率放大器设计和生产中积累的经验，我们认为：合理选择功放管，正确确定工作状态、精心设计匹配网络和选择合适的电路是设计微波功率放大器的关键。

合理选择功放管

功放管是微波功率放大器的有源器件，放大功能主要由它来完成。合理选择功放管

是设计中十分重要的环节。选择时，首先考虑管子的功率、耐压和使用频率。管子最大额定输出功率应大于要求的输出功率，考虑到管子参数的容差和长期工作的稳定性，应留有足够的余量。一般情况下后者为前者的 70%左右。在选择功放管时，对最大容许工作电流 I_{cm} 、最大耗散功率 P_{cm} 、最高允许温度 T 和各级耐压等均应留有余量。放大器的频率应在管子建议的工作频带内，同时还应考虑到管子的稳定性和参数的一致性以及抗疲劳、抗冲击等特性。↵

正确确定放大器的工作状态↵

微波功率放大器的工作状态主要由功率、效率、失真及被放大信号的性质等要求来确定，恰当选择工作点、合理设计匹配网络，减小电路损耗以及良好的散热，通常效率可达 30%~40%。↵

精心设计匹配网络↵

如前所叙，微波功率放大器工作时处于放大状态，放大过程中会产生过冲等问题，因此，输入、输出匹配网络除起到阻抗变换作用外，还应有滤波作用。匹配网络可根据动态输入、输出阻抗设计，同时要考虑到功率及带宽的要求。通常可采用 LC 匹配电路，其目的是减少电路损耗，减小增益波动并满足带宽和功率放大的要求。↵

微波功率放大器的结构设计↵

良好的屏蔽、接地设计↵

微波功率放大器通常安装在一个腔体内。由于频率高，往往容易产生寄生耦合与干扰，结构设计中应特别留心。如高、低电平点应尽可能隔离；电路板设计一定要重视屏蔽；腔体应采用导电优良的材料，如表面镀银或经导电处理的铝板；接地点可采用大面积铜皮等。↵

多重防泄漏设计↵

微波功率放大器功率大，很小的功率泄漏也会对周围电路的工作产生较大影响，轻则造成电路工作不稳定，干扰增加，严重时使电路自激甚至损坏元器件。此外，由于功率放大器作为一个组件，同在一个腔体内，高功率部分的功率泄漏对低功率部分的工作可能会产生严重的影响，因此，防止功率泄漏是功放结构设计中极为重要和困难的问题。我们生产中采用了放、吸、堵等多种措施来减小泄漏，即加泄漏槽以释放泄漏，对重点泄漏区用吸收材料吸收泄漏，对腔体缝隙用导电胶密封堵塞泄漏等，经过上述综合治理，泄漏大大减小。↵

热学设计

微波功率放大器在大功率下工作，合理设计功放结构，加装散热装置以提高功放管热量辐射效率等，是微波功率放大器设计中特有的问题。认真进行热学设计是提高功放效率、延缓衰老、保证长期工作稳定的重要手段。

微波功率放大器的生产工艺

由于微波电路对装配工艺的要求很严，性能良好的功率放大器不仅要有合理的电路设计和优良的结构，还需要有精湛的装配工艺来保证。

装配标准化，提高产品一致性

微波功率放大器作为产品，必须具有较好的一致性和可复制性。在放大器电路设计时，虽然已考虑到元器件的参数容差，使电路对器件具有较好的适应能力，但是对微波电路生产来说，仅有这些考虑还是远远不够的。由于微波电路对装配工艺的依赖性较大，为使生产装配一步到位，减小装配对电路性能的影响，在工艺设计中，我们设置了许多定位标记。

严格工艺步骤，便于组织批量生产

在装配标准化的基础上，为加强工艺管理，我们规定了严格的装配工艺，先装什么后装什么，在工艺文件中有明确的规定。批量生产采用小流水方式，各道工序由专人承包。在装配时采用引进的装配和焊接技术，既提高了装配质量，也加快了生产进度。按这样的工艺步骤来组织批量生产，能使产品达到性能稳定，合格率高。

加强质量控制，提高产品质量

为了不断提高产品质量，必须实行对产品生产全过程进行严格的质量控制。这就是对生产过程中的每道工序步步把关，关键工序后都有检验，变过去的被动检验为主动的过程控制，把一切不稳定因素和故障消灭在产品设计和生产过程中。