

Research on Amplitude and Phase Characteristics of Power Amplifiers and Demonstration of Remote Phase Monitoring

Tianhe Xia Tao Yao Kun Zhang Yiqi Su Xiaoxi Liu

State Key Laboratory of Aerospace Dynamics, Xi'an, Shaanxi, 710043, China

Abstract

With the increase of the service life of the power amplifier equipment, the stability and reliability of the power amplifier seriously decline, which brings significant hidden dangers to the operation and real-time monitoring of the equipment, and increases the workload of the staff. This paper studies how to achieve remote monitoring of power amplifier output power phase matching, in order to timely detect the problem of transmission efficiency decline caused by power amplifier output amplitude phase mismatch. By collecting a database of fault cases related to power amplifier equipment and issues that arise during maintenance, as well as searching for information online and consulting with factory personnel, the amplitude and phase characteristics of the power amplifier output can be determined. Secondly, it is important to familiarize oneself with the monitoring design and functional implementation of power amplifier equipment, in order to add remote monitoring functionality for phase matching and design its implementation.

Keywords

power; phase matching; launch efficiency; remote monitoring

功放幅相特性研究与相位远程监视论证

夏天鹤 姚涛 张坤 苏倚琦 刘孝僖

宇航动力学国家重点实验室, 中国·陕西 西安 710043

摘要

在功放使用过程中随着功放设备使用年限的增加, 功放的稳定性和可靠性严重下降, 为设备工作和实时监视带来较大隐患, 为岗位人员增添了工作量。论文研究如何实现功放输出功率相位匹配的远程监视, 从而及时发现功放输出幅相不匹配现象带来的发射效率下降问题。通过岗位人员收集功放设备相关的故障案例库和维护中出现的相关问题, 以及网上查阅资料和向厂所人员咨询, 得出功放输出的幅相特性变化。其次是熟悉掌握功放设备的监控设计和功能实现, 从而添加相位匹配的远程监视功能并设计实现。

关键词

功率; 相位匹配; 发射效率; 远程监视

1 引言

论文主要研究如何实现功放输出功率相位匹配的远程监视, 从而及时发现功放输出幅相不匹配现象带来的发射效率下降问题。为实现该目的, 首先需要了解功放输出效率和相位匹配之间存在的联系。

2 功放输出幅相特性的影响因素

结合网上搜集的资料和电子研究所技术人员反馈, 当前固态功放设备中, 影响功放输出幅相特性的因素主要如下所示:

①每级放大器均由输入匹配网络、功放管和输出匹配

网络组成, 保证固态功放幅相一致性的关键环节是合理选择功放管、调整匹配网络。固态功放的相移特性与功放管的参数, 如结构参数和工艺参数等密切相关, 而功放管参数又与其输入、输出匹配网络相关联, 因此选用同一批次的功放管是保证相位一致性的前提条件。

②输入输出匹配网络和级间匹配网络性能直接影响管子的输入、输出电压驻波比、增益、输出功率和稳定性等, 在使用同一批次的功放管的前提下, 匹配网络的差异也将导致相位一致性的差异。匹配网络微带线尺寸的加工精度、PCB 板材的一致性、级间耦合电容、调谐阻容元件和装配工艺等的差异都将造成匹配网络的差异, 直接影响功率放大器的相位一致性。

③功放末级输出和级间级联使用的隔离器的相位一致性也必须加以重视。隔离器的相位一致性受磁性材料的批次性、烧结工艺的影响较大, 温度变化也可能造成其相位一致

【作者简介】夏天鹤(1988-), 男, 中国新疆阿克苏人, 本科, 工程师, 从事网络应用、计算机技术、航天技术应用等研究。

性存在较大的差异，必要时需对其进行温度筛选。

现行使用功放已经将功放工作环境温度因素考虑在内，功放机房配备 2 台大功率立式空调，用以调节功放工作环境温度。

④由于固态功放工作时处在大信号状态，信号放大过程中会产生非线性失真和调幅 / 调相变换效应，进而影响相位^[1]。非线性失真是影响放大器相位一致性的因素之一，改善非线性失真的最简单方法是输出功率回退，让功放管的输出功率比它的 1dB 压缩点功率低一些，综合考虑，通常回退 0.5~1dB。

此类方法在功放设计时便已经考虑在内，现在使用的功放均已经具备输出功率回退功能，因此此次不做考虑。

3 功放输出幅相特性研究

当设备入场安装完毕后，虽然上述因素依然影响着功放输出幅相特性，但因为安装完毕无法对上述所有影响因素均作出调整。仅对装备管理维护中可实际操作的影响因素，即功放机间匹配网络性能进行研究。

3.1 实验验证

以 1000W 固态功放为例，经过多次试验，查找功放输出功率与输出相位之间的关系，具体步骤如下：

①功放的功率输出耦合口连接矢量网络分析仪。每次手动设置功放的输入信号强度，使得面板显示的输出功率为 100W。关闭 8 个末级插箱中的 6 个，只留 2 个，由 2 个末级插箱输出功率合成 100W，观察此时的驻波比以及输出相位；矢量网络分析仪既可以测功放输出相位也可以测驻波比，且不需要额外连线，可在连好线缆后一直进行测试，缓解了长管间隙时间紧的压力。

②通过调整功放末级插箱输出线缆以及合成器输出线缆，使得 2 路合成功放的输出相位发生变化，并记录每一次相位变化固定值时功放的驻波比；此步骤之所以只用 2 路合成，是实际工作需要以及数据分析需要。变动路数过多不容易恢复且影响设备的正常稳定运行，且分析数据时要考虑的因素太多，加大了分析的难度。

③减小输入信号，使输入信号强度下降 0.5dB，重复上述第 2 步骤，记录每一次相位变化固定值时功放的驻波比；此步骤中每次只调节 0.5dB 是为了避免信号变化太大造成测试时仪器本身的系统误差，且更符合工作实际。

④将驻波比换算成发射效率，与每一次的相位值对应，根据以上步骤得出图 1。

3.2 理论计算

由上图我们得知，在相位相同时，功率差在 3dB 以内时，功率效率影响在 5% 以内；相位差 30 度时，功率合成效率会下降 5%，相位差 90 度时，功率合成效率下降到 50%。幅度对合成效率的影响不如相位对合成效率的影响大。当功放输出幅相不一致时，功放的发射效率就会降低，驻波会增大，从而影响到设备整体的技术指标，某些关键时候甚至能影响到实时任务完成的圆满程度。

通过网上查阅资料得知：功率合成器输出信号是各路输入信号的矢量叠加之和，各功放模块输出信号的振幅和相位的差别会产生合成损耗，影响合成效率。试验中两路信号合成功率率为^[2]：

$$P_{OUT} = (P_1 + P_2) * \frac{(K^2 + 2K\cos\phi + 1)(K^2 + 2K\cos\phi + 1)}{2 + 2K^2} \quad (1)$$

式中 $K = \left| \frac{V_1}{V_2} \right| = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}}$ ， P_1 、 P_2 和 P_{OUT} 分别为第一路输入、第二路输入和合成后输出功率。

两路合成效率为：

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_1 + P_2} = \frac{K^2 + 2K\cos\phi + 1}{2 + 2K^2} \quad (2)$$

4 功放输出相位远程监视的可行性论证

通过上文分析，我们知道了幅相不匹配对于功放合成效率的影响。接下来就需要论证怎么能实时监视功放输出相位，才能让我们更好地应对相位不匹配带来的影响。

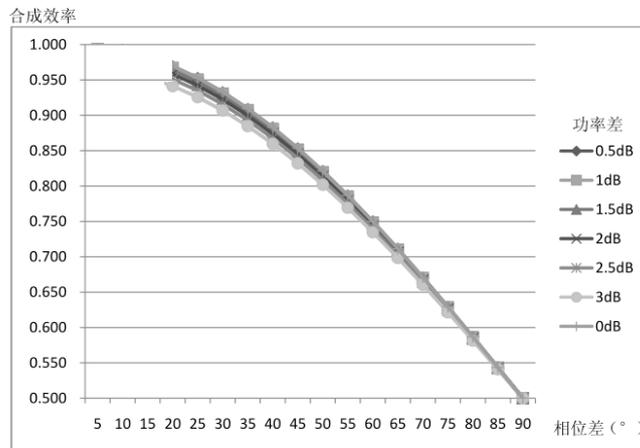


图 1 幅相不一致性对合成效率影响

4.1 功放监控的设计与实现

S 固态高功放总体上划分为 A 机监控、B 机监控和开关控制监控等三部分，每部分设一个监控单元，监控单元具备分控和远控两种工作方式：分控时，通过机箱前面板按键操作 LCD 指示；远控时，通过 RS422A 串行接口接受上级监控控制，并将设备状态上报。

高功放 A 机和 B 机监控单元相同，负责完成高功放单机内部驱动单元、各功放单元和单机的输出功率、反射功率、电流、温度等的检测；控制衰减器，完成单机的功率设置。各功放单元数据采集方式是以单片机为核心，通过 AD 转换电路，把温度、电流、电压、输出功率、反射功率等模拟量转化成数字信号，通过 RS422A 串口传输给本机监控单元^[3]。

4.2 功放输出相位实时检测的方法

通过上述实验和理论分析，我们需要测试功放末级 8 路合成的输出幅相特性变化，得出相关变化关系，将数据拟合生成功放输出功率、反射功率、合成相位、合成效率关系表格和曲线。在后续的工作中，直接实时测量输出功率和反射功率即可，然后对照表格曲线即可得出对应输出相位与合成效率。

对于功放输出相位的实时监测，有以下几种方案：

方案一：将矢量网络分析仪与功放输出耦合口连接，设置矢量网络分析仪使之处在测相位功能下，实时测试功放输出相位。再将矢量网络分析仪的图像用图像数据盒通过光端机传输至长管大厅。

优点：操作简单，无需其他辅助手段，所有连接设施已有。缺点：为实现单一功能长期占用矢量网络分析仪，造成巨大测量资源浪费。从实际工作情况出发此方法对长期使用不可取。

方案二：通过上述功放监控原理分析，得知功放各分机有反射功率状态反馈。可通过公式（1）和公式（2）计算得到功放效率，再将效率与图 1 比对，得出当前功放的输出相位值。

优点：无需其他任何设置和连接，通过计算得到当前相位值。缺点：当合成路数为 8 路时，公式急剧复杂化，计算困难，并且公式中的 P_1 与 P_2 均为功放分机自检得到，未把输出后的合成线等因素考虑在内。此类方法中因考虑因素不全，所得结果不能反映实际情况，方案不可取。

方案三：通过上述功放监控原理分析，得知功放整机具备反射功率状态反馈。将实验所得功放输出功率、反射功率、合成相位、合成效率关系表格和曲线，设计一款小程序自动比对，在正常范围之内则功放相位值正常，不在范围内则说明功放相位值异常，需重新进行相位匹配。

优点：立足现有条件，不浪费更多的测量资源和人力计算。缺点：该方案中的功放整机反射功率仅为反检功率，未将功率合成后的诸多因素考虑完整，所得反射功率值远小于测试值。并且由于设计原因，功放整机反射功率只能是整数，不能精确显示反射功率具体数值。数据准确性不够，方案不可取。

方案四：在功放输出耦合口连接一个功率传感器。当前所用功率传感器采用专用的功率变化电路把交流功率信号变换成与之呈线性关系的标准直流电流电压信号，再经有源滤波线性放大输出恒流或恒压模拟量，使传感器具有高精度、工作稳定等特点。

固态功放前级插箱示意图见图 2。

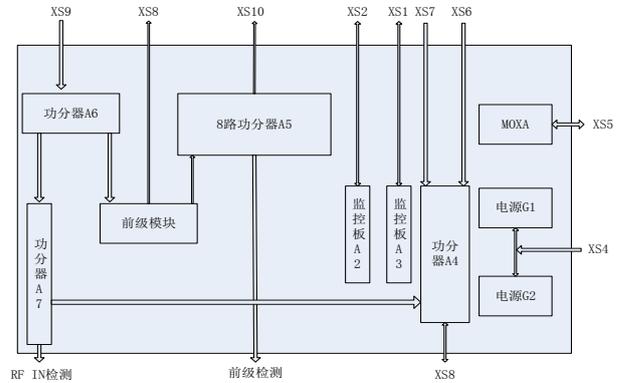


图 2 固态功放前级插箱示意图

功放单机前级插箱 XS8 为限幅检测口，但实际工作中未接，因此将功率传感器传来的信号接入 XS8，信号进入监控板 A4。通过更改功放前级监控程序，写入监控板中。在监控软件中加入反射功率项目，之后设备连接按照 2.1 章节第 1 步实施，测试整机相位、对应功率值和反射功率值，确定正常范围时的相位值和对应反射功率。再将对应相位值和反射功率值做成图表，在告警软件中加入自动比对程序，在正常范围之内则功放相位值正常，不在范围内则说明功放相位值异常，需重新进行相位匹配。

优点：数据来源准确性高，更贴近实际。缺点：需要更动设备状态，且做出改变之处较多。但从长远考虑，实际可操作性以及数据准确性有保障，方案可行。

经比对上述四个方案可得，方案四准确性和可操作性最佳。

5 结论

经上述理论研究，可初步了解功放输出幅相特性以及影响幅相特性的因素，进而由幅相特性反推功放工作状态。因此论证了功放相位远程监视的可行性方案，并对比了各方案的优缺点，从而得出方案四最具可行性。这对装备管理和任务执行都有着较明显的实际意义，建议后续功放设备升级改造中考虑予以实现。

参考文献

- [1] 孙玉平,李新民.射频频率合成技术分析[J].西部广播电视,2013(5):135-136.
- [2] 杜海旺,李鹏程,管超,等.大功率固态功放功率合成器效率研究[J].科学技术与工程,2011,11(32):7926-7930.
- [3] 中国电子科技集团公司第十研究所.TS-4217S频段统一测控系统发射分系统方案设计报告[R].2017.