

大功率广播发射系统效率优化与能耗控制策略

莫凌燕

内蒙古自治区广播电视传输发射中心 海拉尔548台 内蒙古 呼伦贝尔 021000

摘要: 大功率广播发射系统效率优化与能耗控制是降低运营成本、提升信号覆盖质量的关键。通过采用Doherty拓扑、包络跟踪等高效功率放大技术,结合数字预失真补偿线性度,可显著提升功放效率。同时,动态电压调整、同步整流等电源优化技术,以及液冷/热管散热与智能风冷控制,能有效减少辅助系统能耗。此外,基于需求预测的分层控制架构与强化学习功率调度算法,可实现系统级能耗的动态优化,为广播行业可持续发展提供技术支撑。

关键词: 大功率广播发射系统; 效率优化; 能耗控制策略

引言: 随着广播行业不断发展,大功率广播发射系统的应用日益广泛,但其高能耗问题也愈发凸显,不仅增加了运营成本,还与当下节能减排的绿色理念相悖。系统效率低下和能耗过高,主要源于功率放大器非线性失真、电源转换损耗、散热能耗大以及调制方式不合理等因素。因此,深入开展大功率广播发射系统效率优化与能耗控制策略研究,对于降低运行成本、提高能源利用率、推动广播行业可持续发展具有重要意义,成为当前广播技术领域亟待解决的关键问题。

1 大功率广播发射系统能耗分析

1.1 系统组成与能量流动模型

(1) 在大功率广播发射系统中,发射机是核心能耗单元,能耗占比约60%-75%,其内部功放模块作为能量转换核心,直接决定基础能耗水平;天线系统能耗占比10%-15%,主要包括馈线传输损耗和辐射损耗,受线缆材质、长度及天线匹配度影响显著;冷却系统能耗占比10%-25%,风冷系统能耗较低但适用于中小功率设备,大功率系统多采用水冷方式,能耗随散热需求同步增长。(2) 能量损耗关键环节集中在两大领域:功放非线性失真会导致30%-40%的能量转化为无用谐波,尤其在多载波调制场景下损耗加剧;散热损耗是另一主要痛点,水冷系统的水泵运行、换热器能耗及风冷系统的风机功耗,叠加设备自然散热损失,合计占总能耗的20%左右,且高温环境下损耗会进一步上升。

1.2 效率评估指标体系

(1) 功率附加效率(PAE)是衡量功放模块能效的核心指标,计算公式为输出射频功率与输入直流功率和输入射频驱动功率差值的比值,主流大功率发射机功放模块PAE通常在45%-60%;漏极效率(DE)聚焦晶体管能量转换效率,计算输出射频功率与输入直流功率的比值,其数值一般比PAE高5%-10%,反映晶体管本身的能

耗性能。(2) 系统级能效比(EER)用于评估整体能耗水平,定义为单位能耗产生的有效广播覆盖范围,计算方法为有效覆盖面积与系统总耗电量的比值,该指标综合考量发射、传输、冷却等全链路能耗,是优化系统节能设计的核心依据^[1]。

1.3 能耗瓶颈识别

(1) 静态损耗主要源于偏置电路和匹配网络,偏置电路为晶体管提供稳定工作点,即使无信号输入也存在持续功耗,占静态损耗的60%;匹配网络用于阻抗匹配,因元件寄生参数导致5%-10%的能量损耗,尤其在宽频段工作时损耗更为明显。(2) 动态损耗与系统运行状态密切相关,开关损耗出现在功放晶体管开关过程中,占动态损耗的40%-50%,受开关频率和驱动电路性能影响;调制损耗则因信号调制方式不同存在差异,幅度调制系统损耗可达20%-30%,正交频分复用调制下损耗相对较低,但仍占动态损耗的20%左右。

2 大功率广播发射系统效率优化关键技术

2.1 功率放大器优化

(1) 高效率拓扑结构是提升功放能效的核心方向。Doherty拓扑通过主功放与峰值功放协同工作,主功放覆盖常规功率区间,峰值功放仅在高功率时段启动,可将功放效率从传统ClassAB的40%-50%提升至65%-75%,尤其适用于多载波广播场景;包络跟踪(ET)技术通过动态调整功放供电电压,使供电电压精准匹配输入信号包络,减少电压冗余损耗,在信号幅度波动较大的广播系统中,可降低功放能耗15%-25%;异相功率放大器(Outphasing)将输入信号分解为两个相位差可调的恒定幅度信号,通过控制相位差实现输出功率调节,避免传统功放因幅度调节产生的额外损耗,在大功率段效率可达70%以上,且线性度表现优异。(2) 数字预失真(DPD)技术有效解决高效率拓扑带来的线性度下降问

题。该技术通过采集功放输出信号与输入信号的偏差，建立非线性失真模型，生成预失真补偿信号并叠加至输入信号中，抵消功放的非线性失真。在采用Doherty或ET拓扑的广播发射机中，DPD可将邻道泄漏比（ACLR）改善15-25dB，确保功放保持在保持高功率附加效率（PAE）的同时，满足广播信号的线性度要求，避免对相邻频段造成干扰^[2]。

2.2 电源与供电系统优化

（1）动态电压调整（DVS）技术根据功放实际功率需求实时调节供电电压。通过电压检测模块监测功放输出功率变化，由控制单元驱动DC-DC转换器调整输出电压，在功放低功率工作时降低供电电压，减少静态功耗。在广播信号功率波动较大的场景（如语音广播时段），DVS技术可降低电源系统能耗8%-12%，同时避免因电压过高导致的元件发热损耗。（2）开关电源拓扑改进显著提升供电效率。LLC谐振拓扑通过谐振电感与电容的谐振特性，实现开关管零电压开通（ZVS）和零电流关断（ZCS），减少开关损耗，使电源转换效率提升至94%-96%，较传统PWM电源提高5-8个百分点；同步整流技术采用低导通电阻的MOS管替代二极管，降低整流环节损耗，在低压大电流输出场景（如功放供电），可进一步将电源效率提升2-3个百分点，有效减少电源系统的热量产生。

2.3 散热系统能效提升

（1）液冷与热管技术在不同场景下展现差异化能效优势。液冷系统通过冷却液循环带走热量，散热系数可达1000-2000W/(m²·K)，较传统风冷提升3-5倍，适用于功率密度超过500W/L的大功率发射机，且在高温环境下能效稳定，但系统复杂度较高、初期成本略高；热管技术利用工质相变传递热量，散热系数约800-1500W/(m²·K)，介于液冷与风冷之间，具有无运动部件、可靠性高的特点，在中功率发射机中应用广泛，能耗较液冷系统低10%-15%，且维护成本更低。（2）基于温度预测的智能风冷控制通过提前调节散热强度降低能耗。该技术结合发射机功率变化规律与环境温度数据，利用机器学习算法预测未来10-30分钟内的设备温度，提前调整风机转速：在温度上升前适度提高转速，避免温度骤升导致的高功耗满负荷运行；在温度平稳或下降时降低转速，减少风机能耗。实际应用中，智能风冷控制可使风冷系统能耗降低20%-30%，同时延长风机使用寿命^[3]。

2.4 调制与信号处理优化

（1）高效调制方式选择直接影响系统能耗。OFDM（正交频分复用）调制通过多子载波并行传输，频谱

效率较单载波调制提升30%-40%，在相同广播覆盖需求下，可降低发射功率需求，间接减少系统能耗；同时，OFDM对信道衰落的抗干扰能力更强，可减少因信号重传导致的额外能耗。而单载波调制虽实现简单，但频谱效率低，在大容量广播场景下需更高发射功率，能耗较OFDM系统高15%-20%，更适用于小范围、低容量的广播应用。（2）峰均比（PAPR）降低算法有效减少功放非线性损耗。剪波算法通过对信号峰值进行限幅处理，可将PAPR降低3-5dB，但会引入少量失真，需配合DPD技术补偿；预留子载波算法在OFDM系统中预留部分子载波，通过调整预留子载波的幅度与相位抵消信号峰值，可降低PAPR 2-4dB，且失真度极低。两种算法均能减少功放因处理峰值信号产生的额外损耗，使功放PAE提升5-8个百分点，尤其在多载波广播系统中效果显著。

3 大功率广播发射系统能耗控制策略

3.1 分层控制架构

（1）设备层聚焦单器件效率优化，从系统最基础的硬件单元入手，针对发射机内功放晶体管、电源模块、散热风扇等核心器件开展性能升级。通过优化器件的电路设计、选用低功耗材料、改进制造工艺等方式，减少单个器件在运行过程中的能量损耗，提升器件自身的能量转换效率。例如，对功放晶体管进行结构改进，降低其导通电阻与开关损耗；对电源模块的内部元件进行选型优化，减少元件的寄生参数带来的额外能耗，从根源上降低系统整体能耗水平。（2）系统层强调多模块协同功率分配，打破各功能模块独立运行的局限，建立模块间的联动控制机制。根据广播信号传输需求与系统实时运行状态，动态调整发射机、天线系统、冷却系统等模块的功率分配比例。当广播信号负载较低时，适当降低发射机的输出功率，并同步减少冷却系统的运行功率，避免能源浪费；当信号负载升高时，协调各模块提升功率输出，确保系统稳定运行，通过模块间的高效协同，实现系统整体能耗的合理分配与优化。（3）网络层依托基于需求预测的发射功率调整，结合广播覆盖区域的用户数量、信号使用时段、业务类型等数据，对不同时段、不同区域的广播信号需求进行预测。根据预测结果，动态调整发射系统的功率输出强度，在用户需求旺盛、信号使用频繁的时段和区域，提高发射功率以保证信号质量；在用户需求较少、信号使用低谷的时段和区域，降低发射功率，避免不必要的能源消耗，实现按需分配能源，提升网络层面的能耗控制精度。

3.2 动态功率管理算法

（1）负载感知的功率缩放策略以实时监测系统负载

状态为核心,通过传感器与数据采集模块,持续采集发射系统的信号负载、功率消耗、运行温度等关键参数,实时掌握系统当前的负载水平。当检测到系统负载处于较低状态时,自动触发功率缩放机制,逐步降低相关模块的功率输出,如减少功放模块的工作功率、降低电源模块的供电电压等;当负载升高至设定阈值时,快速提升功率输出,确保系统性能满足需求,通过实时跟踪负载变化并动态调整功率,实现能耗与性能的平衡。(2)强化学习在发射功率调度中的应用,将发射功率调度问题转化为智能决策问题。通过构建强化学习模型,以系统能耗最低化、信号质量最优化为目标函数,让模型在长期的运行过程中,不断学习不同广播场景下的功率调度策略。模型通过与环境的交互,获取不同功率调度方案对应的反馈信息,如能耗变化、信号传输效果等,持续优化决策策略,逐步形成适应复杂广播环境的动态功率调度机制,实现更智能、更高效的发射功率控制,提升系统能耗管理的自主性与适应性^[4]。

3.3 智能预测与维护

(1)基于LSTM的发射机状态预测利用长短期记忆网络(LSTM)的时序数据处理优势,采集发射机历史运行过程中的关键状态参数,如工作温度、电压、电流、功率输出等时序数据,构建LSTM预测模型。通过对历史数据的训练与学习,模型能够捕捉发射机状态参数随时间变化的规律,进而对未来一段时间内发射机的运行状态进行预测,提前预判可能出现的性能下降、参数异常等情况,为后续的能耗控制与维护工作提供提前预警,便于及时采取措施调整运行策略,减少因设备状态异常导致的能耗增加。(2)能耗异常检测与故障预警系统通过

建立能耗基准模型,实时对比系统实际能耗数据与基准能耗数据的差异。当检测到能耗数据出现异常波动,如能耗突然大幅升高或持续高于基准值时,系统自动触发异常警报,并结合设备运行状态参数,分析能耗异常的可能原因,初步判断是否存在设备故障。同时,将异常信息与故障诊断结果及时反馈给运维人员,便于运维人员快速定位问题、排查故障,避免因故障导致的长时间高能耗运行,保障系统稳定、高效、低耗运行。

结束语

综上所述,大功率广播发射系统效率优化与能耗控制是一项系统且长期的工程。通过功率放大器优化、电源与供电系统改进、散热系统能效提升以及调制与信号处理优化等关键技术,可有效提升系统效率、降低能耗。同时,结合分层控制架构、动态功率管理算法以及智能预测与维护等策略,能实现系统能耗的精细化、智能化管理。未来,随着技术的不断进步,我们将持续探索更高效的优化方法与控制策略,推动大功率广播发射系统向绿色、节能、高效的方向发展。

参考文献

- [1]孔春丽.广播发射系统自动化监测设计[J].电视技术,2023,47(05):211-212.
- [2]刘绍伍.广播发射系统自动化监测及故障诊断系统研究[J].电声技术,2023,47(03):57-59.
- [3]倪鹏.调频广播发射系统应用现状及其升级方案研究[J].电声技术,2022,46(10):59-61.
- [4]吴献辉.中波广播发射台供配电系统故障分析与处理[J].数字传媒研究,2021,38(03):75-77.