

# 通信基站节能技术与运行效率提升研究

闫春娟

鸿盛建设有限公司, 河北 张家口 075000

[摘要]随着 5G 网络规模化部署深入推进, 通信基站能耗激增已成为制约行业绿色发展的突出瓶颈。文内在分析通信基站能耗构成与节能意义的基础上, 系统梳理了混合能源供电、智能电源管理、基站设备休眠、高效制冷等基站节能关键技术。从数字化智能运维、精细化负载调控、热管理优化三个维度, 提出通信基站运行效率提升策略。

[关键词]通信基站; 节能技术; 运行效率; 智能管控; 数字化

DOI: 10.33142/ect.v4i3.19429

中图分类号: U23

文献标识码: A

## Research on Energy-saving Technology and Operational Efficiency Improvement of Communication Base Stations

YAN Chunjuan

Hongsheng Construction Co., Ltd., Zhangjiakou, Hebei, 075000, China

**Abstract:** With the deepening of the large-scale deployment of 5G networks, the sharp increase in energy consumption of communication base stations has become a prominent bottleneck restricting the green development of the industry. On the basis of analyzing the energy consumption composition and energy-saving significance of communication base stations, this article systematically sorts out key energy-saving technologies for base stations, such as hybrid energy power supply, intelligent power management, base station equipment sleep, and efficient cooling. Propose strategies to improve the operational efficiency of communication base stations from three dimensions: digital intelligent operation and maintenance, refined load regulation, and thermal management optimization.

**Keywords:** communication base station; energy-saving technology; operational efficiency; intelligent control; digitalization

### 引言

截至 2025 年底, 全球通信基站总量已接近 1300 万座, 年耗电量超过 2000 亿 kWh。我国已建成全球规模最大的 5G 网络, 基站数量突破 400 万座。5G 基站单站功耗约为 4G 基站的 3 至 4 倍, 年均耗电超过 1.8 万度, 网络总能耗呈倍增态势。据测算, 基站能耗已占通信网络总能耗的 60% 以上, 空调系统能耗又占基站总能耗的 40%~50%。与此同时, 通信行业碳排放压力持续加大, 运营商电费支出占网络运营成本的 25%~30%, 降本增效需求极为迫切。

面对“双碳”战略的刚性约束与业务流量持续增长的双重压力, 单纯依靠设备换代或被动节能已难以满足要求。近年来, 业界在基站节能技术领域取得系列突破。智能叠光控制首次成为国际电信联盟国际标准; 极致休眠技术实现基站闲时“能耗归零”; AI 驱动的时频空三域协同节能使节能时长与效果大幅提升; 热管与相变材料耦合的制冷系统展现出显著节能潜力。这些进展表明, 通信基站节能已从单一设备改进转向“供电-用电-管控”全链条系统优化。

本文立足上述技术进展, 系统梳理基站节能关键技术体系, 重点探讨运行效率提升的可行路径, 以期为通信基站绿色低碳运营提供参考。

### 1 通信基站节能的意义与挑战

#### 1.1 基站能耗构成与特性

通信基站能耗主要由四部分构成: 一是无线主设备, 包括基带单元、射频单元、功率放大器等, 功耗占比约 40%~50%; 二是空调与通风系统, 功耗占比约 40%~50%; 三是供电与配电系统, 交直流转换损耗约占 4%~8%; 四是动力环境监控、照明等辅助设备。

5G 基站能耗呈现新特征。第一, 射频单元功耗占比显著上升。5G 采用更高频段、更大带宽, 射频功率放大器在高功率输出时能效偏低, 发热量大。第二, 设备功耗动态范围扩大。业务忙时与闲时负载差异可达 3~5 倍, 但传统供电与制冷系统难以按需调节, 低负载时段能源浪费严重。第三, 网络密度大幅提升。为满足连续覆盖与容量需求, 5G 基站密度约为 4G 的 3 倍, 且大量采用微站、室分等形式, 部署环境复杂, 运维难度增加。

#### 1.2 节能减排的现实意义

从运营成本看, 电费已成为运营商仅次于人力成本的第二大支出。以一个典型 5G 宏站为例, 年均耗电 1.8 万度, 电费支出约 1.5 万元, 全国基站年电费总额超过 600 亿元。有效降低基站能耗, 可直接转化为运营利润。

从环境影响看, 通信基站是信息通信产业碳排放的主要来源。据估算, 若不对基站能耗加以控制, 2030 年 5G

基站将占全球通信能耗的 70% 以上。发展绿色基站供电系统、提高清洁能源使用比例，是通信行业实现碳达峰、碳中和目标的必由之路。

从技术引领看，我国在通信基站节能领域的创新已从“跟随”转向“领跑”。中国铁塔牵头制定的《基站光伏系统的智能控制方法》成为 ITU-T 国际标准；国内企业与运营商在极致休眠、AI 节能、新型储能等方向率先实现规模商用。这些实践不仅支撑国内网络绿色转型，也为全球通信基础设施低碳发展提供“中国方案”。

### 1.3 当前面临的主要技术挑战

一是多能源协同调度难。光伏、风电出力具有间歇性和不确定性，储能系统充放电策略若不合理，绿电消纳率难以提升，甚至影响供电可靠性。二是存量设备节能改造难。大量在网运行的 4G 基站受硬件架构限制，无法直接应用极致休眠等新型节能技术，改造需要兼顾成本与效果。三是节能与体验平衡难。传统节能方案以“一刀切”时段关断为主，业务突发时易造成用户感知下降。如何在保障体验的前提下最大化节能收益，仍是技术难点。四是精细化管控落地难。基站分布广、数量多、现场无人值守，单纯依靠人工巡检无法及时发现能耗异常，亟需数字化、智能化管控手段。

## 2 通信基站节能关键技术

### 2.1 混合能源供电与智能叠光技术

混合能源供电是基站侧“绿电替代”的核心路径。典型方案为“光伏+储能+市电”互补供电，通过能量路由器实现多源协同。传统光伏基站存在两大痛点：一是组件之间阴影遮挡导致整串发电效率下降；二是直流侧电压失配造成电能转换损耗。

针对上述问题，智能叠光技术提出组件级智能控制方法，包括串联架构下的功率优化与并联架构下的独立接入，可实现每块光伏组件独立最大功率点跟踪。即使部分组件被遮挡，其余组件仍可高效发电。电压跟随技术则根据负载需求动态调整供电电压，减少 DC/DC 变换级数，提升系统效率 5%~10%。

2025 年，中国电信安徽公司在高铁站试点风光储备直流微电网系统，通过最大化利用光伏能源，预计年节电量超 20 万度，推动基站供电向“零碳化”突破。

### 2.2 供电系统节能与极致休眠技术

基站供电系统包含交流配电、整流模块、直流配电等环节，传统设计按峰值负载配置容量，低负载时整流模块处于“空载”状态，空载损耗不容忽视。极致休眠技术的突破改变了这一局面。该技术通过在基站内嵌智能配电单元，由网管实时监控业务需求。无业务时控制供电模块完全下电，设备能耗降至 0 瓦；有业务接入时秒级唤醒，恢复供电。

北京移动与中兴通讯在房山试点的结果显示，基于

GSDU（绿色站点数字化单元）的极致休眠生效后，基站闲时能耗降至 0 瓦，单站日均节电 1.45 度，能耗降低近 16%。GSDU 采用通用端口设计与标准尺寸规格，可原位替换原有配电单元，电源线充分复用，支持热插拔，极大降低了存量基站改造门槛-8。据测算，该技术在中兴基站全网推广后，预计年度节电量可超 300 万度。

### 2.3 基站设备节能与动态调控技术

基站主设备节能主要从时域、频域、空域三个维度展开。时域节能的核心是符号关断与通道关断。传统方案按固定时段关断部分载波，难以匹配业务动态变化。AI 技术引入后，基站可智能识别业务类型：对心跳包、网页浏览等时延不敏感业务，进行数据积攒发送，最大化符号关断时长；对游戏、短视频等敏感业务即时响应。河南移动与华为的联合实践表明，该技术使符号关断时长提升 30% 以上。频域节能针对多频共存的复杂网络。基于 AI 建模分析各频段能耗特性与业务负载规律，低负载时段自动关断部分频段，实现分层施策、精准节能。空域节能聚焦天线覆盖优化。通过预测业务潮汐效应，动态调整天线方位角与下倾角，使无线覆盖与业务分布实时匹配，避免无效覆盖造成的能源浪费。2025 年上半年，河南移动通过该体系实现总节电量 2700 万度，4G、5G 单站能耗分别压降 14.07% 和 14.11%，5G 每 GB 流量用电量下降 25.53%。

中兴通讯 AIR RAN 方案进一步引入“敏业务感知”与“智实时决策”。基站可精准识别 16000 余种应用业务，仅解析 0.1% 报文头部即可实现 99% 以上识别准确率；针对直播、游戏、工业互联网等不同业务建立差异化体验模型，节能策略在线迭代寻优，遇突发业务可“秒级熔断”退出节能状态，确保用户体验。

### 2.4 制冷系统节能技术

空调系统是基站能耗大户，也是节能潜力最集中的环节。近年来，高效制冷技术呈现多条技术路线并进态势。

①热管冷却技术。针对 5G 基站小型化、无人值守的特点，有学者提出一体化热管背板冷却方案。室内侧蒸发器贴合机柜发热设备，室外侧冷凝器自然冷却，制冷剂依靠重力或泵驱动循环，无需压缩机运行。采用遗传算法对风机转速、压缩机频率等参数优化，并简化为线性拟合控制策略，可在五大气候区实现年制冷负荷因子 0.061~0.56 的优异能效水平。若该技术在我国 5G 基站规模推广，年节电量可接近 750 亿 kWh。

②相变材料耦合空调技术。传统基站空调压缩机频繁启停，不仅能耗高，且影响寿命。将相变蓄冷单元与现有空调系统耦合，可在空调运行时储存冷量，空调停机时释放冷量，平抑室内温度波动。实验表明，该方案可将室内温度波动降低 60.47%，引入新风后日节电率达 34%，采用季节性切换策略全年可节省电费 30.21%。尽管初期投资回收期约 9.81 年，但 20 年全生命周期可较传统空调节

约 1.6 万元。

③自然冷源利用。拼装式室外机柜采用垂直瓦楞结构柜门，形成自然风道散热，配合顶部自调速风机，可完全替代空调运行。实测显示，该方案使机柜散热效率提升 50%，年度节能投资降低约 58%。存量机柜通过加装节能型热交换器、精准送风风道改造，单柜全年节电量可达 1726kWh，节能率 43.72%。

### 3 通信基站运行效率提升策略

#### 3.1 数字化智能运维策略

通信基站数量多、分布广、现场无人，传统人工巡检模式已难以适应精细化节能要求。数字化智能运维的核心是构建“感知-分析-控制”闭环。

首先，在机柜内部、设备表面、电源入口等关键点部署电流、电压、温度、能耗监测传感器。对于拼装式铝合金机柜等新型设备，传感器布置需考虑电磁环境影响，采用多次独立测量、格鲁布斯检验剔除异常值，确保监测数据准确可靠。其次，动环监控单元与智能维护边缘网关协同，将传感器实时数据与 AI 视频识别结果融合分析。例如，将 FSU 上报的烟雾、水浸、门禁告警与智能摄像头烟感识别、水浸识别结果关联校验，快速判断告警真实性，减少无效上站。最后，基于分析结果自动下发节能策略：调整空调温度设定值、调节整流模块输出电压、控制休眠模块唤醒/关断。2023 年汛期，某地市利用智能维护系统对 500 余重点站址完成 7000 站次轮巡核查，主动发现进水隐患 2 处，减少损失约 30 万元。

#### 3.2 精细化负载调控策略

业务负载在时间维度呈现明显闲忙时规律，在空间维度呈现潮汐迁移特征。采用轻量化 AI 模型预测未来 15~30min 的业务量变化，当负载持续低于阈值时，依次关断冗余电源模块、载波、通道，保留满足当前需求的最小容量；检测到负载上升趋势时，提前唤醒休眠资源。不同业务对网络性能的敏感度存在显著差异。短视频业务关注卡顿率与首帧时延，云游戏要求端到端时延低于 50ms，工业互联网需抖动低于 1ms。节能策略应建立业务特征库，对直播赛事、游戏更新等高敏感业务时段“主动避让”，避免因节能影响用户体验。将可再生能源出力预测与负载预测耦合，在光伏大发时段主动调度蓄冷、蓄电，减少弃光；在电价低谷时段充电、蓄冷，电价高峰时段放电、释冷，实现电费支出最小化。

#### 3.3 热管理优化策略

存量基站机柜普遍存在气流短路、局部热点问题。通过加装导风罩、封闭冷通道、精准送风风管，使冷风直达发热设备，避免“冷量走捷径、热量散不出”。实测表明，精准送风改造可使空调利用率提升 30% 以上。室外机柜

采用垂直瓦楞结构柜门，形成自然对流通道；室内基站根据室外温湿度联动控制新风系统，室外温度低于设定阈值时关闭压缩机、开启风机。以北京地区为例，过渡季与冬季可实现压缩机零运行时长。对于发热密度高的 5G 机柜，单一风冷已难以满足散热需求。热管背板利用相变传热，热阻低、无运动部件，适合高密度场景；相变储能模块可平抑峰值负荷、延长自然冷源利用时间。二者复合使用，可兼顾高热流密度散热需求与全年能效提升。

#### 3.4 设备集约化与存量改造策略

针对 4G 网络 BBU 设备类型复杂、单机容量小、能效偏低的问题，实施“大容量 BBU 归并计划”：将前期小容量 F 系列设备替换为新型 A 系列大容量设备，减少设备台数，提升单机负载率。安徽电信实践显示，该措施年节电量达 265 万度。在山区、地下室等低话务场景，将故障率高、能耗大的老旧 RRU 替换为新型低功耗设备，节电比例可达 43.6%。存量机柜不具备整柜更换条件的，采用“节能型热交换器+智能风机”方案：热交换器利用室内外温差换热，智能风机根据温度动态调速，减少空调开启频次。单柜改造后全年节电 1726kWh，节能率 43.72%。

### 4 结语

通信基站节能是一项系统工程，涉及供电、用电、管控、散热等多个环节。本文系统梳理了基站节能关键技术体系与运行效率提升策略。展望未来，随着 6G 技术研发推进，基站设备将进一步向小型化、高集成度发展，单设备功耗有望下降，但算力与连接需求增长将带来新的能耗挑战。通信技术与能源技术融合创新仍需持续深化：在网络架构层面，探索接入网云化、空天地一体化；在供电层面，推动基站侧储能参与电力需求响应；在管控层面，引入大模型技术提升业务预测与策略寻优能力。唯有技术与管理双轮驱动，方能实现通信网络绿色低碳与高质量发展的双重目标。

#### [参考文献]

- [1]曹志鑫.5G 通信基站节能供电系统运行控制策略研究[J].科技视界,2025,15(6):51-53.
- [2]徐维府.通信基站能效提升与节能减排策略研究[J].智慧中国,2024(11):86-87.
- [3]吴一凡,孙学朋.通信基站配套设施节能技术研究与应用[J].中国新通信,2024,26(24):7-9.
- [4]黄赞,陈旭黎,余光佐.通信基站拼装式铝合金室外机柜节能运行监测研究[J].科技资讯,2025,23(4):99-101.
- [5]李尚坤,黄伟,周磊.通信基站数字化治理能力提升策略研究[J].中国新通信,2025,27(1):1-3.

作者简介：闫春娟（1991.9—），毕业院校：石家庄铁道大学，所学专业：工程造价管理，当前就职单位名称：鸿盛建设有限公司，就职单位职务：项目管理。