

5G 基站节能面临的 关键问题和解决方案



Key Problems and Solutions of Energy-Saving for 5G Base Stations

王小锋/WANG Xiaofeng, 韩茜/HAN Qian

(中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202505010

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20240726.1651.004>

网络出版日期: 2024-07-29

收稿日期: 2024-05-25

摘要: 在全球“双碳”战略推动下, 5G 基站高能耗问题亟待解决。剖析了 5G 基站商用节能存在的四大关键问题: 凝露引发的硬件风险、多制式共用射频限制节能效果、性能与感知下降, 以及复杂场景节能策略难定义。针对性地提出软硬件协同、频谱规划优化和感知-能耗动态平衡等方案, 基于人工智能和大模型构建“大模型+大数据”驱动的逆向节能决策体系, 为 5G 网络实现高效、智能、可靠节能提供系统性解决路径。

关键词: 5G; 节能; 神经网络; 大模型

Abstract: Driven by the global "dual-carbon" strategy, the high energy consumption of 5G base stations has become an urgent issue to address. This paper analyzes four key challenges in the commercial deployment of 5G energy-saving technologies: hardware risks induced by condensation, limited energy-saving effectiveness due to multi-mode shared radio frequency units, degradation in network performance and user perception, and difficulties in defining energy-saving strategies for complex scenarios. To address these challenges, this paper proposes targeted solutions, including hardware-software co-design, spectrum planning optimization, and dynamic balancing between user perception and energy efficiency. Furthermore, leveraging artificial intelligence and large models, this paper establishes a "large model + big data"-driven inverse energy-saving decision framework, providing a systematic approach to achieve efficient, intelligent, and reliable energy savings for 5G networks.

Keywords: 5G; energy saving; neural network; large model

引用格式: 王小锋, 韩茜. 5G 基站节能面临的关键问题和解决方案 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(5): 66-70. DOI: 10.12142/ZTETJ.202505010

Citation: WANG X F, HAN Q. Key problems and solutions of energy-saving for 5G base stations [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(5): 66-70. DOI: 10.12142/ZTETJ.202505010

气候与环境变化已成为 21 世纪人类社会面临的最严峻挑战之一。为应对气候变化, 中国明确提出 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的“双碳”战略目标, 推动经济社会全面绿色转型。在此背景下, 作为能源消耗和碳排放的重要领域, 信息通信技术 (ICT) 产业的绿色低碳发展备受关注。5G 网络作为新型基础设施的核心, 其建设规模持续扩大。截至 2025 年 4 月, 全国 5G 基站总数已突破 374 万个, 占全球总量的六成以上。然而, 5G 基站单站功耗较 4G 显著提升, 整体能耗呈指数级增长, 导致运营商面临巨额电费支出和碳排放考核的双重压力。基站能耗问题已成为制约 5G 可持续发展的关键瓶颈。为响应国家“双碳”战略, 中国移动提出“C²三能一碳达峰碳中和行动计划”, 构建“三能六绿”绿色发展模式; 中国电信发布“天翼零碳计划”, 推进网络节能降耗; 中国联通则实施“碳达峰、碳中和”专

项行动, 强调绿色网络建设。三大运营商均将 5G 网络节能作为重点任务, 积极推动节能技术的研发与商用部署。然而, 在实际商用环境中, 节能技术的落地仍面临诸多挑战, 如节能效果受限、用户体验下降、硬件安全风险等问题。

1 节能功能

5G 基站的基本节能功能包括符号关断、增强型符号关断、射频通道关断、载波关断、深度休眠、自动启停 (也称为极致节能), 以及调压。表 1 简要介绍了 5G 基站的基本节能功能的原理和应用建议。

图 1 给出了 4 发射通道射频拉远单元和 64 发射通道有源天线单元两款典型设备, 在空载条件下各种节能功能的节能收益。相比于中、高负荷, 空载或者低负荷时的节能收益更明显。当开启自动启停时, 设备的功耗可以降到 10 W 以内,

表1 5G基站基本节能功能原理、应用建议

节能功能	原理简述	应用建议
符号关断	关闭空闲符号的功放	无特殊限制,可用于大多数场景
增强型符号关断	通过调度汇聚,增加空闲的符号个数	不适合时延敏感类业务的传输
射频通道关断	低负荷时关闭部分发射通道	对于网络覆盖和多天线性能有影响,小区内边缘用户时慎用
载波关断	关闭网络容量层的载波及使用的硬件器件,达到节能目的	适用于多载波共覆盖的组网场景,恢复时间在30~60 s之间
深度休眠	在网络轻载或者空载情况下,休眠射频模块,减少设备能耗	适用于多载波共覆盖的组网场景,恢复时间为分钟级,一般不超过3~4 min
自动启停	关闭射频模块的绝大部分硬件设备,减少设备能耗	除了考虑网络的需求之外,还需要关注周围环境的温度/湿度条件是否适合开启本功能
调压	通过软件对功放的漏压进行控制,达到节能目的	开启后会对业务传输产生一定的影响,高负荷或者重要数据传输时慎用

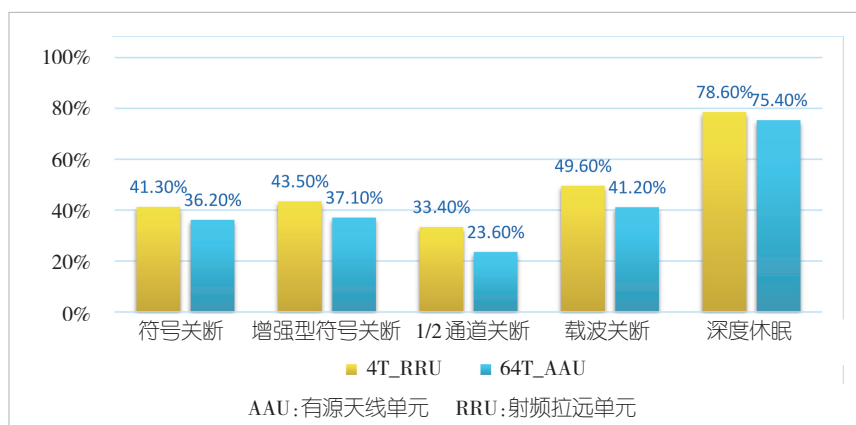


图1 典型AAU/RRU射频设备空载时部分节能功能的节能收益对比

有一些设备甚至可以降到5 W以内。调压可以单独开启,也可以和其他节能功能叠加开启。在商用网络中开启调压功能,可以在原有基础上增加5%~13%的节能收益。

2 关键问题

在5G基站的商用过程中,硬件器件的可靠性、无线配置差异、组网配置差异,都会对设备的节能收益产生影响^[1-4]。

1) 节能可能导致硬件设备损坏

深度休眠、自动启停等节能功能,在一定条件下会导致设备表面产生“凝露”^[5],进而导致设备损坏。凝露是指当一定温度和湿度的空气遇到温度较低的固态表面时,空气中的水蒸气析出并以液体形式在器件表面形成露滴。凝露和设备内的灰尘混合后,会在器件表面形成导电通道,容易产生短路,损坏电子元器件。

2) 节能受设备特征影响

随着射频器件硬件集成度和无线制式复用度的提升,设备体积、重量和成本都在不断降低。这对节能产生了重要影响。这种影响主要体现在:不同无线制式载波复用相同的射

频通道和功放器件。当出现部分无线制式的载波可关闭而部分无线制式的载波工作时,被复用的功放硬件将无法关闭获取节能收益。例如,与全球移动通信系统(GSM)/通用移动通信系统(UMTS)共享硬件的4G/5G设备节能收益普遍偏低。

3) 节能导致网络性能和用户感知下降

通道关断通过关闭部分发射通道实现节能,但是关闭部分发射通道会削弱无线系统的赋形能力;载波关断通过关闭节能频层载波实现节能,而关闭载波带来的小区退服会在网络中形成节能频层覆盖空洞,

使得空洞区域的其他频层小区的负荷上升。这些后果会影响网络的基础指标和用户感知指标,严重的会导致网络性能和用户感知下降。

4) 节能策略复杂而难以制定

在复杂的商用网络环境中,如何制定网络的节能策略,才能在保障网络性能指标和用户体验的前提下,尽可能降低能耗?该问题的求解属于受大量因素影响的非线性寻优,难以确定最优解。而且随着节能区域的扩大,寻优、求解涉及的参数将成倍增长,求解的复杂程度也随之增加^[6]。

3 解决方案

硬件可靠性、射频设备特征、节能与网络指标及用户体验的平衡关系,以及最优节能策略的求解,是影响商用环境下节能功能使用的4个主要因素。本节针对这些关键问题,逐一提出对应的解决方案。

3.1 软硬件协同提升器件可靠性

针对设备凝露的问题,核心解决思路是阻断设备的过快降温。相关方案可以结合外部的环境温度和湿度特点,采用

“递进式节能”的方法，逐步降低设备的温度。

在低温、潮湿的环境下，实施节能时若直接关闭射频设备，容易因设备温度快速下降产生凝露。对此可以通过分阶段逐步关闭硬件设备的方法，来减缓射频设备温度下降的速度。比如，有些较新的射频设备安装了传感器，在监测环境的温度和湿度以及设备自身的温度时，可自动控制硬件的关闭节奏，避免凝露的产生。

3.2 基于射频器件特征最大化节能收益

针对设备特征对节能的影响，可以从网络节能、硬件设计两个方面来构建解决方案。

1) 网络节能

当前主流运营商掌握多个商用频段的频谱资源。以中国移动为例，4G的商用频段包含1 800 MHz（Band3）、900 MHz（Band8）等，5G商用频段包含2.6 GHz（n41）、4.9 GHz（n79），并与中国广电共享700 MHz（n28）频段。中国电信和中国联通也在850 MHz、900 MHz等频段部署了4G/5G网络。

（1）隔离基础覆盖层和补热层频谱资源：在网络频谱的规划和使用上，把承担基础覆盖而不能关闭的网络层部署在低频段、小带宽的频谱资源上面；把承担补热的4G/5G容量层部署在高频段、大带宽的频谱资源上面。比如，把GSM、UMTS和承担基础覆盖的长期演进（LTE）网络，部署在低频段、小带宽的频谱资源上；把5G、补热的4G网络部署在高频段、大带宽的频谱资源上。这样便于低负荷时段独立关闭5G、4G的补热频层的设备硬件，从网络频层规划上避免补热层和基础覆盖层因为硬件的共享带来关闭时的冲突，保障节能效果。

（2）迁移低负荷时段小区用户：针对多频层覆盖的区域，低负荷时段可以关闭补热频层的硬件设备。在低负荷时段到来时，将驻留在补热频层小区的用户迁移到基础覆盖频层，为补热频层的设备关闭创造条件。比如，在条件允许的情况下，将驻留在5G容量层的用户迁移到4G基础覆盖层，甚至迁移到2G、3G的频层上，可为5G频层设备的关闭创造条件。

（3）避免容量频层和基础覆盖频层复用硬件设备：在网络规划时，尽量避免将GSM/UMTS/LTE基础覆盖频层和容量频层的4G、5G频层部署在同一个射频设备上。在无法避免的情况下，尽量规划其他的基础覆盖层，并在需要节能的时候，将驻留在共用设备上的基础覆盖层用户迁移到独立覆盖层，从而创造关闭容量频层设备的条件。

2) 硬件设计

硬件的设计不仅要考虑如何提高复用度、降低设备体积和重量，还要考虑如何避免影响硬件的可关闭性。具体而

言，在硬件设计中应提升节能能力相近的无线制式的硬件复用度，避免节能能力差异较大的无线制式复用同样的硬件器件。将节能设计理念和约束引入到硬件设计中，有助于在成本、体积、重量和节能之间找到平衡点。

3.3 平衡节能与网络性能、用户感知

节能会导致用户迁移、容量频层关闭，这在一定程度上会影响网络性能和用户感知。但是从更宏观的视角做深层逻辑分析，节能未必导致网络性能下降和用户感知下降。

为了保障覆盖、性能和感知，无线网络常通过“做加法”（如提升发射功率、增加信道控制等）来实现优化。这些优化在一定程度上提升了覆盖、性能和用户感知，但也会带来一些不利影响。比如，功率提高会增加干扰，带宽扩容会加剧系统间的冲突，差异化业务处理会导致低优先级用户业务感知受损。而节能在低负荷时段关闭容量频层小区，可以降低区域内的干扰，进而能提升区域内用户的感知。因此，从更大范围、更长时间的观测，节能未必导致用户感知下降。

此外，节能所引发的用户迁移，未必会导致移动性指标、连接类指标和用户感知类指标恶化。移动性指标、连接类指标和用户感知类指标，与用户的行为、业务变化有关。无线网络中，每天会产生大量的用户小区切换和用户业务变化。如果这种小区切换与业务变化导致移动性指标、连接类指标和感知类指标恶化，首先需要从网络的规划和优化上找原因和解决方法，而不应该关闭节能，损害节能收益。

3.4 AI助力节能策略寻优

首先，明确无线网络节能的目标：降低能耗是核心目标之一；保持网络关键KPI稳定、维持良好用户感知，同样是重要目标。综合来看，商用无线网络节能的核心目标是：在维持网络覆盖性能、保障关键性能指标（KPI）与用户感知达标的基础上，实现能耗最小化。商用网络的节能策略选择，本质上是多因素影响的非线性寻优问题。如何做到能耗、覆盖、网络指标和用户感知的平衡，是节能策略选择需要达到的目标。同一片无线网络在不同的时段和负荷条件下，网络性能或者用户感知的要求可以不同；同样，同一片网络在不同的时段和负荷条件下，为保证网络覆盖和用户感知，需要的网络资源也不同。比如，针对城市热点区域，在深夜节能时间段，要把降低能耗作为优先考虑目标；在白天低负荷的节能时段，要平衡能耗和指标；在白天繁忙时段，要保证网络指标和用户感知优先。

其次，节能策略部署的区域越大，策略的复杂程度就越高。这是因为，目标区域越大，包含的站点越多，要考虑和

分析的输入参数就越多,节能策略就越复杂。

最后,节能策略属于多因素共同作用的非线性多目标寻优。对于多因素共同作用的非线性多目标寻优,传统的寻优方法显得力不从心。

基于神经网络的深度学习被证明是可行的解决方法。图2是节能策略智能决策系统的结构框图,它主要由数据维护模块、模型训练模块、策略制定模块、策略执行模块组成。

- 数据维护模块:主要功能包括学习数据维护/提供、获取并维护基站的反馈数据、向模型训练模块提供训练数据、向策略制定模块提供输入数据^[7];

- 模型训练模块:主要功能包括基于训练数据进行神经网络的学习、将学习后的结果部署/更新到策略制定模块、接收策略制定模块的预期结果、将预期结果和网络反馈的实际结果进行对比、优化神经网络模型性能;

- 策略制定模块:主要负责接收模型训练模块的模型部署和更新、接收输入数据并进行节能策略的制定、将节能策略下发给策略执行模块;

- 策略执行模块:主要负责接收策略制定模块下发的节能策略、将节能策略下发给各个目标网元。

在节能策略智能决策系统中,模型训练模块和策略制定模块需要使用神经网络来实现节能策略的寻优和决策^[9]。

以卷积神经网络(CNN)方法为例,在工程实践中,特征过滤器可以基于深度学习学习方法学习得到;卷积层、池化层的子层数量及卷积层深度,则需依据具体任务场景灵活配置;输出结果也需要根据实际的计算目标进行针对性设定。依托神经网络算法的自优化能力,可在系统能耗与网络性能(如精度、推理速度)之间建立动态权衡机制,进而生成适配具体应用场景的最优节能策略。

基于神经网络算法的智能节能,通过对网络负荷和网络关键指标的分析,对可节能时间段进行动态调整。通过延长可节能时间段、在指定时段内使用节能效果更优的节能方法,可获取更高的节能收益。图3是在4G/5G混合、多频段网络中,应用AI算法对21:00(前一天)—6:45(第二天)时段内的载波关断、深度休眠和自动启停节能时段进行调整的结果。调整后的结果表明,自动启停的节能时段比例明显增加,

载波关断和深度休眠的节能时段比例存在下降。这种改变使得验证区域内的节能收益增加了15%,能效提升了11%。

4 基于“大模型+大数据”的逆向方案

AI助力节能策略寻优,使用神经网络来解决多入参的非线性多目标寻优问题。这种方法存在难于收敛、计算复杂等问题。大模型的出现为这种非线性多目标寻优问题的求解带来了新的解决方案。基于大模型,我们可以通过从结果向前追溯的逆向求解方案来解决该问题。

图4展示了基于大模型+大数据的逆向求解方案,该方案主要包含下面5个部分:

- 1) 训练大模型:从商用网络采集海量节能数据,训练并构建大模型;

- 2) 构建优秀节能案例库:从商用网络采集大量的优秀节能数据,构建优秀节能案例知识库;

- 3) 为目标网络匹配适用的节能数据集:针对需要做节能优化的目标网络,提取其特征数据并“喂给”大模型。大模型依据目标网络中的典型特征,在优秀节能案例知识库中匹配最合适的案例集合;

- 4) 节能数据集预处理:将选择到的案例样本数据(其中包含节能策略和参数配置),传递到策略执行单元,并对案例

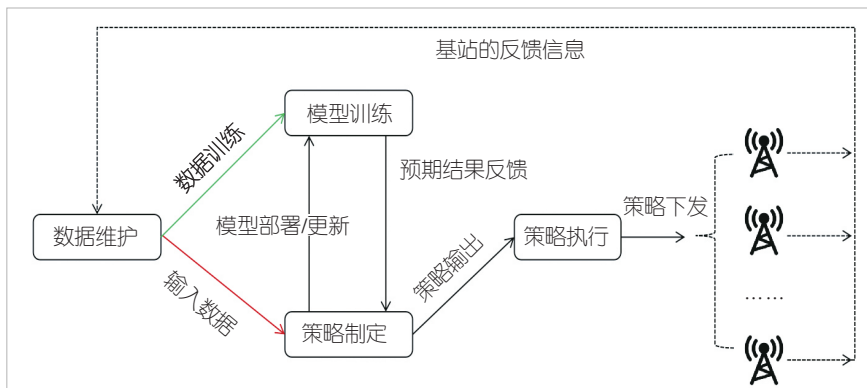


图2 节能策略智能决策系统框图^[8]

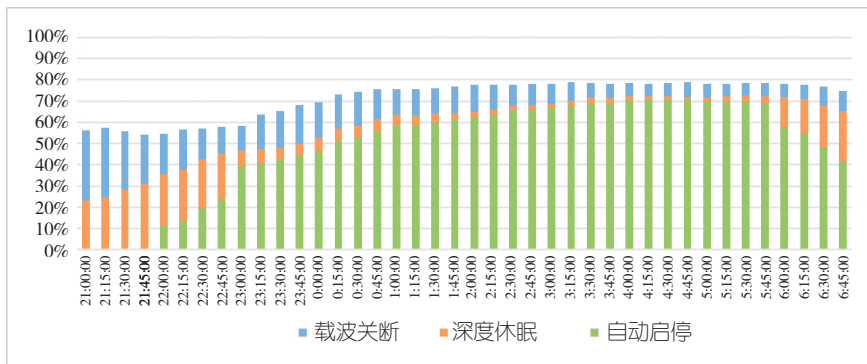


图3 应用AI算法优化后的节能功能时长占比

样本数据集进行预处理；

5) 向目标网络下发节能数据集：策略执行单元将预处理后的节能数据集，下发给目标网络中的各个节点。

通过策略选择和多次尝试，从中选择最适合目标区域网络的节能策略。

大模型+大数据的逆向方案具有如下3个突出优点：

1) 优秀节能案例知识库中的案例集合具有良好的可迁移性：其数据集合均是从商用网络中采集的有效节能策略/配置数据，且已从中筛选出有效的策略/配置样本。只要是特征类似的网络或者基站，都可以直接复用；

2) 避免神经网络算法的“不收敛”

问题：筛选到的节能案例数据集，是经过商用实践验证的有效数据集合，将其用于目标网络的节能优化，可有效避免神经网络计算的不收敛、收敛慢的问题；

3) 系统支持持续迭代：数据越丰富，模型的精度越高，特征匹配和节能数据选择的精度也会同步提升。

因此，基于大模型+大数据的逆向求解方案，在降低节能策略寻优算法复杂度的同时，维持网络覆盖性能、保障关键KPI指标和用户感知达标，并进一步实现能耗最小化、能效最优化。

5 结束语

本文介绍了当前主流的无线设备节能方法，对无线基站节能的主要问题进行分析，针对神经网络算法的弊端，提出了基于大模型+大数据的逆向求解方案。随着全球气候挑战的不断加剧，绿色低碳已是大势所趋。如何结合网络、基站特征选择有效的节能策略，在保持网络覆盖质量、保障用户感知的基础上，尽可能降低设备能耗，是5G及未来无线网络的重要研究方向。

参考文献

- [1] 郭诚, 陈梦竹. 面向5G-A的无线网络节能关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 27(2): 11-15. DOI:10.12142/ZTETJ.202306003
- [2] 周均翼, 周琳, 张舜卿. 面向节能减排的跨制式融合感知通信系统 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 27(2): 16-22. DOI: 10.12142/ZTETJ.202306004
- [3] SUN S Y, WEN G Y. Optimal design of wireless power transmission systems using antenna arrays [J]. ZTE communications, 2022, 20(2): 19 - 27. DOI: 10.12142/

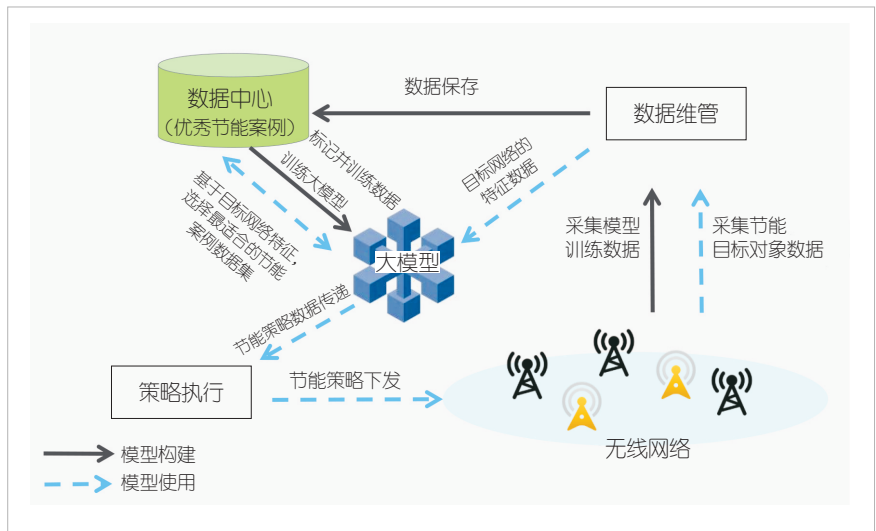


图4 基于“大模型+大数据”的节能策略逆向求解方案

ZTECOM.202202004

- [4] 陈天贝, 李娜, 陶小峰. 低开销智能反射面辅助无线通信研究综述 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 27(2): 29-38. DOI: 10.12142/ZTETJ.202306006
- [5] 中兴通讯股份有限公司. AAU自动启停凝露分析技术白皮书 [R]. 2021
- [6] 王映民, 孙韶辉. 5G移动通信系统设计与标准详解 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020
- [7] 3GPP. Study on enhancement for data collection for NR and EN-DC (Release 17): 3GPP TR 37.817 [S]. 2022
- [8] 3GPP. Study on system and functional aspects of energy efficiency in 5G networks (Release 17): 3GPP TR 32.972 [S]. 2024
- [9] 伊恩·古德费洛, 约书亚·本吉奥, 亚伦·库维尔. 深度学习 [M]. 赵申剑, 黎或君, 符天凡, 等, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2017

作者简介



王小锋，中兴通讯股份有限公司RAN产品规划总工；主要研究方向为5G无线产品、大规模MIMO、无线网络节能等；先后参与WiMax、LTE和NR系统的研发与规划工作；申请发明专利4项。



韩茜，中兴通讯股份有限公司产品经理；主要研究方向为LTE、5G测试终端物理层和系统设计与开发；先后参与过WiMax系统研发，LTE、NR测试终端的研发和项目交付工作；拥有专利2项。