

老旧变电站绿色化改造中能效提升与空间受限的矛盾 破解路径

唐永波

银川农村电力服务有限公司 宁夏 银川 750011

摘要：在“双碳”战略目标驱动下，电力系统绿色低碳转型势在必行。城市配电网中大量老旧箱式变电站因能效低、技术落后，已成为提升电网整体能效的瓶颈。其绿色化改造面临突出矛盾：能效提升通常需更大体积、更高性能设备（如非晶合金变压器）及复杂辅助系统（如强化散热、智能监控），却受限于箱站固有空间紧凑性与城市核心区严苛用地条件。本文系统剖析该矛盾机理，提出多维度破解路径：通过材料革新（如非晶合金铁芯）、结构优化（三维立体布局、模块化预制装配）、先进散热技术及基于数字孪生的智能能效管理系统，在不显著增加甚至缩小外廓尺寸的前提下实现能效跃升。研究构建了以高效变压器、集成化设计与智能化赋能为核心的技术矩阵，并建议建立覆盖全生命周期的碳足迹评估体系与精细化经济性分析模型，为改造决策提供科学支撑，确保环境、社会与经济效益协同统一，助力大规模老旧箱站绿色升级。

关键词：箱式变电站；绿色化改造；能效提升；空间受限

引言

随着新型城镇化与能源结构转型加速，城市配电网面临供电能力、可靠性与低碳发展的双重压力。作为连接主网与用户的“最后一公里”关键设施，箱式变电站的能效水平直接影响电力系统绿色化成效。当前大量老旧箱站在网运行，普遍采用高损耗硅钢片变压器，缺乏智能监测与调控手段，不仅年电能损耗巨大，还存在运维成本高、安全隐患多等问题。对其进行绿色化改造，既是落实“双碳”战略的必然要求，也是提升城市电网韧性与供电质量的迫切需求。然而，改造面临核心矛盾：箱站的核心优势在于占地小、部署灵活，适用于土地稀缺的城市核心区，而传统能效提升手段（如更换非晶合金变压器、加装散热或监控系统）往往需更大空间，与既有紧凑结构冲突。如何在严苛空间限制下实现能效跃升，成为关键技术难题。本文聚焦“螺蛳壳里做道场”的挑战，系统论证材料革新、结构优化、三维集成与智能赋能等创新路径，打破“能效提升必增体积”的思维定式，为老旧箱式变电站绿色、智能、集约化改造提供可行方案。

1 能效提升与空间受限矛盾的根源剖析

要有效破解矛盾，首先需深刻理解其产生的根源。该矛盾主要体现在以下三个层面：

1.1 设备本体层面的矛盾

能效提升最直接的手段是更换高能效的核心设备，尤其是变压器。目前，非晶合金变压器被公认为是替代

传统硅钢片变压器的最佳选择。其铁芯由铁基非晶态金属制成，原子排列呈长程无序状态，磁滞损耗和涡流损耗极低。数据显示，非晶合金变压器的空载损耗可比同容量的新S9型硅钢片变压器降低60%-80%，节能效果极为显著。然而，非晶合金材料的饱和磁通密度较低（约为1.3-1.35T），远低于高导磁硅钢片（Hi-B钢，可达1.65-1.75T）。为了达到相同的功率传输能力，非晶合金变压器的铁芯截面积需要做得更大，导致其体积和重量通常比同规格的硅钢片变压器增加10%-20%^[1]。对于内部空间已高度饱和的老旧箱变而言，简单替换将面临“放不下”的窘境，这是设备本体层面最直接的物理冲突。此外，非晶合金材料本身较为脆硬，在运输和安装过程中需要格外小心，这也对改造施工工艺提出了更高要求。

1.2 辅助系统层面的矛盾

高效的设备往往伴随着更高的热管理需求。虽然非晶合金变压器的损耗更低，但其对运行温度更为敏感，过高的温升会加速绝缘老化，影响寿命。同时，为了实现真正的绿色化与智能化，还需集成在线监测传感器（如光纤测温、高频电流互感器用于局放检测）、智能终端、通信模块乃至储能单元。这些新增的辅助系统都需要占用宝贵的内部空间，并产生额外的热量，进一步加剧了散热压力。传统的自然通风或简单风扇散热方式已难以满足要求，而加装空调或大型风冷系统又会大幅挤占空间并增加自身能耗，形成新的悖论，使得在有限空间内平衡能效提升与热安全变得异常复杂。尤其在夏

季高温或负荷高峰期，箱内局部热点问题若得不到有效解决，将成为制约设备长期安全稳定运行的瓶颈。

1.3 政策标准与现实条件的矛盾

近年来，国家层面密集出台了多项推动电力设备能效提升的政策法规。例如，《变压器能效提升计划（2021-2023年）》以及强制性国家标准GB 20052-2024《电力变压器能效限定值及能效等级》，均明确要求新采购的变压器必须达到一级或二级能效水平，而一级能效的核心技术特征正是非晶合金铁芯。这些政策为绿色化改造指明了方向，但在实际操作中，老旧箱变所处的物理环境（如狭窄的街角、地下管廊旁）和产权归属复杂，使得大规模土建改造或设备扩容在现实中阻力重重。许多老旧箱变位于建成区，周边管线密布，不具备开挖或扩建的基础条件。如何在遵守高标准的同时，又能适应严苛的现场条件，是摆在改造实施者面前的一道现实考题，凸显了顶层设计与基层实践之间的张力。

2 矛盾破解的核心技术路径

针对上述矛盾，单一的技术手段难以奏效，必须采取一种系统集成、协同优化的综合策略。以下是几条关键的破解路径：

2.1 材料革新与设备选型优化：从源头减损

尽管非晶合金变压器体积略大，但其巨大的节能潜力不容忽视。破解之道在于精打细算与长远规划。首先，应避免“大马拉小车”的现象，通过大数据分析历史负荷曲线，精确计算出最优的变压器容量，选用刚好满足峰值负荷需求的设备，而非盲目放大，这不仅能降低初始投资，更能使变压器长期运行在高效区间，最大化节能效益^[2]。其次，可以探索三角立体卷绕等创新铁芯结构，在保证磁路性能的同时，更有效地利用箱内空间，减少无效体积。一些前沿研究也在积极探索纳米晶合金等新材料，试图在保持超低损耗的同时，进一步缩小体积，为未来的技术迭代预留空间。更重要的是，在设备选型时，应摒弃仅关注购置成本的短视行为，引入全生命周期成本（LCC）模型。该模型全面考量设备从采购、安装、运行、维护到报废回收全过程的成本，虽然非晶合金变压器的初始购置成本可能高出10%-20%，但其在整个25-30年寿命周期内节省的电费（仅空载损耗一项，每年即可节省数千至上万元）远超这部分差价，投资回收期通常在3-5年，从长远看经济性十分可观。

2.2 模块化与预制装配技术：实现空间的极致利用

模块化设计理念是解决空间矛盾的根本出路。它将箱式变电站分解为高压室、变压器室、低压室、智能控制室等多个标准化的功能模块。所有模块在工厂内完

成制造、装配和调试，确保了最高的质量和精度，运抵现场后，只需进行简单的机械对接和电气连接，极大缩短了施工周期（从数周缩短至数天），减少了对周边交通和居民生活的干扰。在此基础上，可以打破传统的“目”字形或“品”字形平面布局，向垂直空间要效益，例如将低压开关柜采用双层或多层布置，将智能终端、蓄电池等小型设备巧妙地嵌入箱体夹层、侧壁或顶部空间。华为等公司已申请相关专利，通过在变压器多个侧面布置散热器并与风机协同布局，实现了散热效率与空间利用的双重优化。相较于美式箱变，欧式箱变（即高压/低压预装式变电站）的高低压开关设备与变压器分室布置，结构上更具灵活性，便于进行内部空间的精细化分割与优化，更适合在有限空间内进行定制化改造，为设计师提供了更大的发挥余地。

2.3 先进散热与热管理技术：平衡能效与温控

高效的散热系统是保障高能效设备稳定运行的前提，同时也是空间优化的重点。可以取代简单的温控风扇，采用基于多点温度传感器的闭环控制系统。系统可根据不同区域的实时温度，智能启停不同位置的风机，形成定向、高效的气流循环，彻底消除局部热点。重庆望变电气等公司已开发出从底部进气、顶部排气的散热结构，有效解决了设备室下部的气流死角问题^[3]。同时，在箱体外壳涂覆高反射率的隔热涂料以减少太阳辐射热的吸收；在箱体内壁使用高导热复合材料，加速热量向箱壁传导；并精心优化内部元器件布局，确保风道畅通无阻，减少气流阻力，这些都是有效的被动式散热强化手段。此外，在关键发热元件附近填充相变材料（PCM），利用其在相变过程中吸收大量潜热的特性，起到“热缓冲”作用，平抑短时负荷高峰带来的温升，从而可以适当减小主动散热系统的规模，巧妙地化解了散热需求与空间占用的矛盾。

2.4 智能化与数字化赋能：以软实力弥补硬约束

当物理空间的挖掘达到极限时，智能化技术便成为提升整体能效的关键杠杆。通过部署全面的传感器网络，对变压器油温、绕组温度、局部放电、环境温湿度等关键参数进行7x24小时不间断监测，可以构建设备健康状态的全景画像。在此基础上，利用人工智能算法对海量运行数据进行深度学习与分析，不仅能预测潜在故障，实现状态检修，还能根据实时电价、负荷预测和电网调度指令，动态优化变压器的运行模式，例如自动投切无功补偿装置、调整分接头位置，甚至协调站内分布式电源与储能，实现削峰填谷和最优经济运行。更进一步，为每一座改造后的箱变构建一个虚拟的“数字孪生

体”，通过虚实映射，可以在数字空间中模拟不同工况下的运行状态和能效表现，为运维决策提供强大支持，甚至可以远程指导现场操作，减少不必要的人员到场，间接降低了运维的“空间”和时间成本，实现了以软件定义能效的高级目标，将箱变从一个单纯的电力转换节点转变为一个具备自感知、自决策、自优化能力的智能能源单元。

3 支撑体系构建：标准、评估与经济性

技术路径的成功落地，离不开完善的支撑体系。

3.1 建立全生命周期碳足迹评估方法

绿色化改造的最终目标是减碳。为此，必须建立科学、统一的碳足迹核算标准。中国电工技术学会发布的T/CES 279-2024《变电站运行阶段碳足迹核算方法》以及T/CMEPCA 041-2024《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 箱式变电站》等团体标准，为量化改造前后的碳减排量提供了权威的方法论^[4]。通过评估从原材料开采、设备制造、运输安装、运行维护到报废回收的全过程碳排放，可以清晰地展示绿色化改造的环境价值，为争取政策补贴和绿色金融支持提供坚实的数据依据，使绿色效益得以量化和彰显，从而形成正向激励。

3.2 强化政策协同与标准引领

工信部、国家能源局等部门应持续完善绿色低碳标准体系，将高效节能、小型化、智能化等要求融入箱式变电站的设计、制造和验收规范中。同时，通过税收减免、增值税即征即退等激励政策，引导市场优先选择符合绿色化改造要求的产品和技术，形成良性循环，从制度层面为技术创新和应用扫清障碍。此外，还应鼓励电网企业将绿色化改造纳入其社会责任报告和可持续发展战略，提升其内生动力。

3.3 精细化经济性分析模型

改造项目的可行性最终取决于经济账。除了前述的LCC模型外，还应考虑土地机会成本、可靠性提升效益以及延寿效益等多重因素。在城市核心区，节省的每一平方米土地都具有极高的隐含价值，这部分价值应在经济性评估中得到体现。智能化改造带来的故障率下降和

停电时间缩短，可为用户和电网企业创造巨大的间接经济效益，包括减少的生产损失、提升的客户满意度等。而良好的运行环境和状态检修则可以显著延长设备使用寿命，推迟下一轮资本支出。综合来看，尽管老旧箱式变电站绿色化改造的初期投资较高，但其在节能降耗、提升可靠性、节约土地、降低碳排放等方面的综合效益，使其具备了强大的长期投资价值，是实现高质量发展的必然选择。

4 结语

老旧箱式变电站绿色化改造中能效提升与空间受限的矛盾，本质上是传统发展模式与新时代高质量发展要求之间的冲突。破解这一矛盾，不能寄希望于单一技术的突破，而必须依靠一场涵盖材料、结构、系统、管理的全方位创新。本文提出的“材料革新—模块集成—热管优化—智能赋能”四位一体的技术路径，清晰地勾勒出一条可行的解决方案。通过选用非晶合金等高效核心部件，结合模块化预制和三维立体布局实现空间的集约化利用；通过先进的智能散热技术保障设备安全稳定运行；再辅以数字化、智能化的运维管理模式，以软件定义能效，最终能够在严苛的空间约束下，实现能效水平的质的飞跃。未来，随着新材料、新工艺、人工智能等技术的不断进步，箱式变电站将朝着更高效、更紧凑、更智能、更绿色的方向持续演进。这场始于“螺蛳壳”里的革命，不仅将重塑城市配电网的面貌，更将为我国实现“双碳”目标贡献不可或缺的基层力量。

参考文献

- [1]白润成.220 kV智能变电站设计与绿色应用研究[J].现代工业经济和信息化,2025,15(12):172-173+176.
- [2]朱元灿.绿色节能环保型城市变电站设计探讨[J].科技资讯,2025,23(09):100-102.
- [3]高美金,梁艳群,王婷婷,等.变电站绿色建造全过程评价体系研究[J].城市建筑,2024,21(16):107-111.
- [4]顾靖达,白小会,李伟,等.新型电力系统变电站绿色低碳技术分析[J].南方能源建设,2024,11(04):111-117.