

# 新型电力系统建设中变电站土建建筑的适配性设计综述

刘 睿\*, 郭思彤, 李琰文, 张 虎

陕西电力建设集团有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2026年1月3日; 录用日期: 2026年1月25日; 发布日期: 2026年2月5日

## 摘 要

在电网智能化与新型电力系统建设的双重驱动下, 变电站已从传统电力传输枢纽演进为集数据采集、信息处理与智能决策于一体的核心节点, 其功能重构对土建建筑的技术适配性提出刚性需求。本文基于模块化建设理念与智能建造技术发展趋势, 系统探究智能变电站土建建筑的多维适配设计体系。研究表明, 土建建筑需通过精准预留温度、湿度及SF<sub>6</sub>气体泄漏监测等智能传感器的安装点位与走线通道, 耦合边缘计算、通信设备的防尘防潮及抗电磁干扰环境要求, 构建数据采集与传输的物理支撑基础。针对智能化运维场景, 需通过优化站区布局为巡检机器人规划无阻碍运行路径, 并预留自主充电接口, 实现设备状态的自动化监测。在安防与二次系统适配方面, 关键区域监控基座需满足视野无遮挡与抗震稳定性双重标准, 同时顺应集中式控制室向分散化、虚拟化转型趋势, 采用灵活布局设计预留新型设备扩展空间。结合地基处理技术优化与模块化建材应用, 上述适配设计实现了土建结构与智能系统的深度协同, 有效提升了变电站运行的安全性与运维效率。研究为智能变电站土建工程的标准化设计提供了技术参考, 契合新型电力系统对关键基础设施智能化升级的发展需求。

## 关键词

新型电力系统, 变电站, 土建, 适配性

# A Review of Adaptive Design for Substation Civil Engineering in the Construction of New Power Systems

Rui Liu\*, Sitong Guo, Yanwen Li, Hu Zhang

Shaanxi Electric Power Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: January 3, 2026; accepted: January 25, 2026; published: February 5, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 刘睿, 郭思彤, 李琰文, 张虎. 新型电力系统建设中变电站土建建筑的适配性设计综述[J]. 土木工程, 2026, 15(2): 87-95. DOI: 10.12677/hjce.2026.152028

## Abstract

Driven by both the intelligentization of power grids and the construction of new power systems, substations have evolved from traditional power transmission hubs into core nodes integrating data collection, information processing, and intelligent decision-making. Their functional restructuring imposes rigid requirements on the technical adaptability of civil engineering buildings. Based on the concept of modular construction and the development trend of intelligent construction technology, this paper systematically explores the multi-dimensional adaptive design system for civil engineering buildings in intelligent substations. The research shows that civil engineering buildings need to construct a physical support foundation for data collection and transmission by accurately reserving installation points and wiring channels for intelligent sensors such as temperature, humidity, and SF<sub>6</sub> gas leakage monitoring, and coupling with the environmental requirements of dustproof, moisture-proof, and anti-electromagnetic interference for edge computing and communication equipment. For intelligent operation and maintenance scenarios, it is necessary to optimize the station layout to plan unobstructed operation paths for inspection robots and reserve autonomous charging interfaces to realize automatic monitoring of equipment status. In terms of security and secondary system adaptation, the monitoring bases in key areas must meet the dual standards of unobstructed vision and seismic stability. Meanwhile, in line with the trend of transforming centralized control rooms to decentralized and virtualized ones, flexible layout designs are adopted to reserve expansion space for new equipment. Combined with the optimization of foundation treatment technology and the application of modular building materials, the above adaptive designs realize the in-depth collaboration between civil engineering structures and intelligent systems, effectively improving the operation safety and maintenance efficiency of substations. The research provides a technical reference for the standardized design of civil engineering projects in intelligent substations, and conforms to the development needs of the new power system for the intelligent upgrading of key infrastructure.

## Keywords

New-Type Power System, Substation, Civil Engineering, Adaptability

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

2025 年第八届中国能源产业发展年会中指出面向“十五五”的新型电力系统建设思考,强调了能源结构转型、电力系统灵活性提升及数字化智能化升级的重要性[1]。作为新型电力系统的关键节点,变电站不仅承担着传统的电能汇集、变换与分配功能,更需适应高比例可再生能源接入、源网荷储协同互动以及电力市场改革等新要求[2]-[7]。

见图 1 所示,在能源转型的背景下,风电、光伏等可再生能源具有间歇性[8]、波动性[9]的固有特性,其固有特性给变电站的稳定运行带来了严峻挑战,同时也对变电站的空间布局[10]、承载能力[11]、抗干扰性能[12]等提出了全新的适配需求。土建建筑作为变电站的物理承载结构,设计质量直接决定了变电站对新型电力系统的适配能力,是保障设备安全运行、实现系统功能升级的基础支撑[13]-[15]。相较于传统电力系统下的变电站,新型电力系统中的变电站在储能设备安装[16]、智能监测终端部署[17]、虚拟电厂调度接口[18]等新型功能模块方面,发生了根本性的转变[19]。在土建建筑规划设计阶段,突破了传统模

式,达成了与电气设备、智能系统的深度协同[20]。然而,当前变电站土建设计仍存在结构老化[21]、空间利用率不足[22]、智能化改造兼容性差[23]等问题,难以满足新型电力系统对变电站灵活扩展、快速响应及安全可靠的运行需求。

基于此,研究新型电力系统背景下变电站土建建筑的适配性设计理论与方法,对于推动变电站建设向智能化、模块化、绿色化转型,保障新型电力系统的稳定高效运行具有重要的理论价值与工程意义。

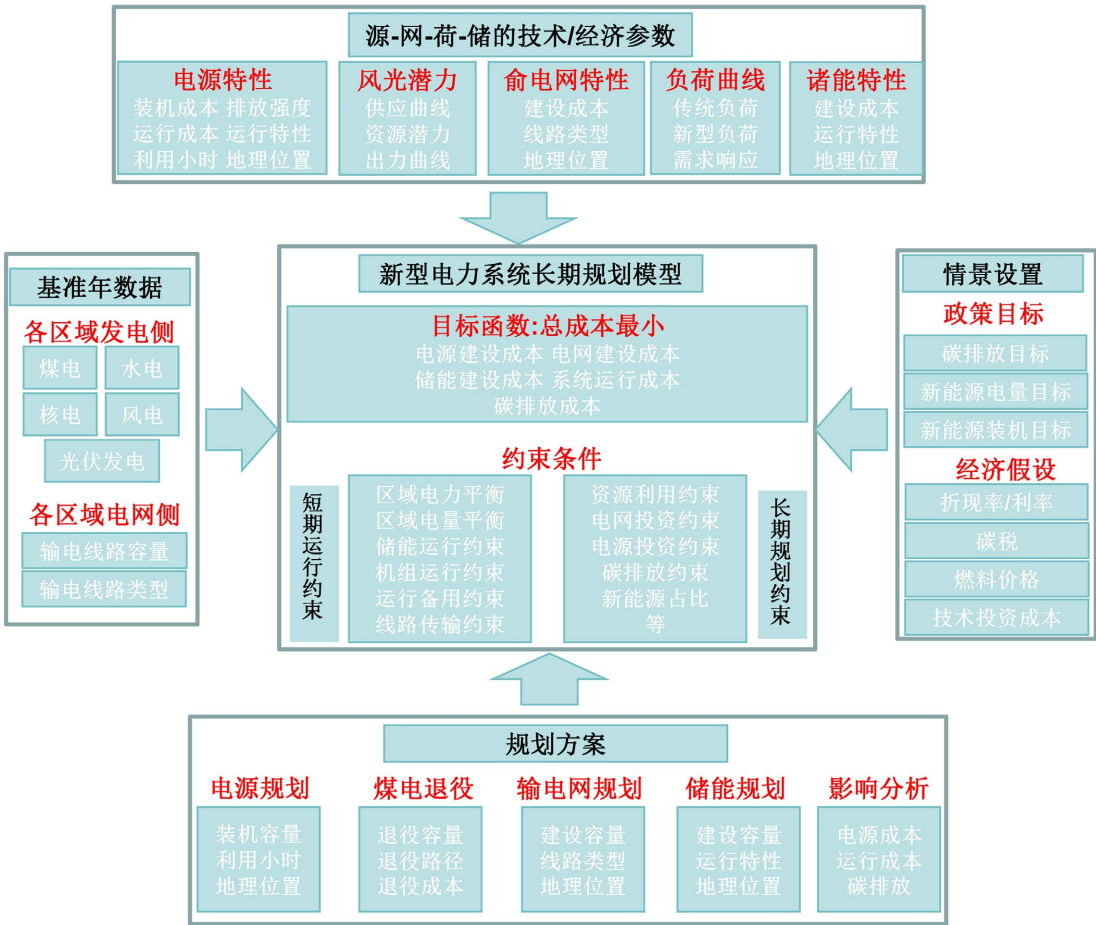


Figure 1. Long-term planning framework of new power system [24]  
图 1. 新型电力系统长期规划框架[24]

## 2. 新型电力系统对变电站土建建筑的核心适配需求

### 2.1. 高比例新能源并网下的空间适配需求

高比例可再生能源电力系统对于变电站土建建筑的空间规划提出了全新挑战。见图 2 所示,在高比例可再生能源电力系统的协同优化运行技术展望中提出了全新的运行研究框架[25]。但是对于变电站土建建筑而言,传统变电站在设计时往往基于固定的负荷预测和设备配置,空间预留较为有限[10]。而高比例新能源的接入,如风电、光伏等具有间歇性和波动性的电源,使得变电站需要配置更多的储能设备(如电池储能系统、飞轮储能等)以平抑功率波动、保障电网稳定[5]-[7]。这些储能设备通常体积较大,且对安装环境(如温度、湿度、通风等)有特定要求,这就要求土建建筑在规划阶段必须预留足够的设备安装空间,并合理设计设备布局,确保设备之间的操作维护通道符合安全规范。同时,新能源并网可能导致变

电站内电力电子设备(如逆变器、变流器等)的数量显著增加,这些设备的布置、散热以及相关电缆的敷设路径规划,也对变电站的内部空间分配和层高设计提出了更高要求[26]。因此,高比例新能源并网下的空间适配需求,要求变电站土建建筑从传统的“固定功能、有限扩展”模式向“弹性空间、动态适应”模式转变,通过科学的空间规划和模块化设计,为未来新能源相关设备的增容、升级和改造提供充足的物理空间支撑。

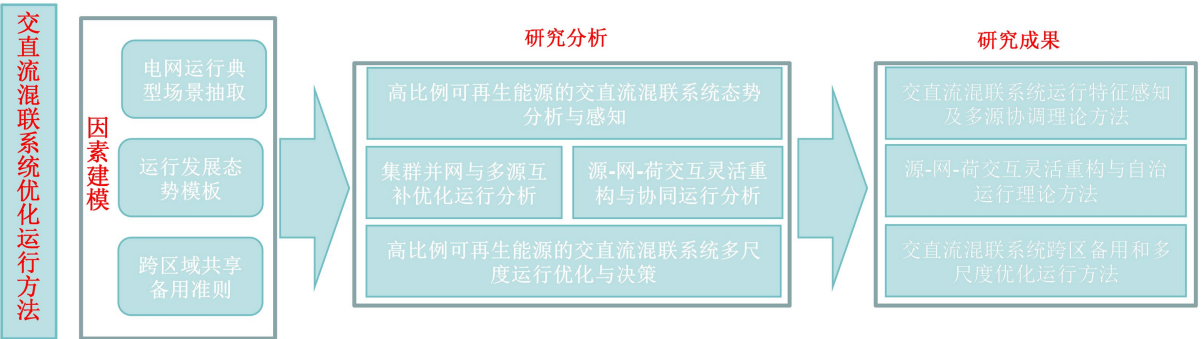


Figure 2. Research framework for collaborative optimization and operation of power systems with a high proportion of renewable energy

图 2. 高比例可再生能源电力系统协同优化运行研究框架

## 2.2. 智能化升级下的功能适配需求

智能化的升级对于新型电力系统对变电站土建建筑提出了更为复杂的功能适配要求。见图 3 所示,为工业产业技术变化图。变电站不仅是电力传输的关键枢纽,更逐步演进为集数据采集、信息处理与智能决策于一体的核心节点[6]。这一功能转变对变电站土建建筑提出了针对性要求:一方面,需为温度传感器、湿度传感器、SF<sub>6</sub>气体泄漏监测传感器等各类智能传感设备预留充足的安装点位与走线空间,保障传感器对设备运行状态数据的精准采集。在实际中传感器安装点位应预留 M12~M16 规格安装螺栓孔,孔距误差不超过±2 mm,走线通道采用 Φ50~Φ80 mm 的 PVC 套管或金属穿线管,套管转弯半径不小于管径的 6 倍,且每 3 m 设置固定支架。另一方面,满足边缘计算设备、通信设备等核心智能装置的防尘、防潮、抗电磁干扰等环境需求,同时兼顾数据线路的高效汇聚与传输。边缘计算设备安装区域的暖通空调(HVAC)热负荷计算参考值为 150~200 W/m<sup>2</sup>,空调系统需具备恒温恒湿功能,控制精度为温度±1℃、湿度±5%,设备安装区域防尘等级不低于 IP54,抗电磁干扰强度不小于 80 dB。



Figure 3. Diagram of technological changes in the industrial sector

图 3. 工业产业技术变化图

此外,随着智能化技术的迭代升级,机器人巡检已成为变电站运维的主流趋势,未来土建建筑需为巡检机器人的运行路径规划提供基础支撑,确保其自主充电与数据实时上传功能的稳定实现[27]。巡检机器人无障碍通道宽度不小于 1.2 m,通道地面平整度误差不超过 $\pm 3$  mm/2m,通道转弯半径不小于机器人最大转弯半径的 1.5 倍(常规不小于 1.5 m);自主充电接口预留区域尺寸不小于 1.0 m $\times$ 0.8 m,地面承载力不低于 15 kN/m<sup>2</sup>,充电基座预埋件采用 Q235B 级钢材,厚度不小于 12 mm,预埋件锚固深度不小于 200 mm,外露部分平整度误差不超过 $\pm 1$  mm。智能化建设同样要求土建结构深度融合智能安防系统,例如在变电站周界及关键设备区域,需预设视频监控设备的安装基座,基座尺寸不小于 0.5 m $\times$ 0.5 m $\times$ 0.6 m(长 $\times$ 宽 $\times$ 高),采用 C30 混凝土浇筑,内置 4 组 M20 地脚螺栓,螺栓外露长度不小于 80 mm,基座抗震设防烈度不低于 8 度,水平地震影响系数最大值不小于 0.2 g,确保监控视野无遮挡,且具备优良的抗震性能,以维持监控设备的长效稳定运行[28]。

### 2.3. 低碳化转型下的绿色适配需求

在“低碳”背景下,对变电站土建建筑的绿色适配性提出了明确且紧迫的要求[1]。见图 4 所示,为绿色建筑的发展目标图。对于变电站土建建筑绿色适配而言,均需融入绿色低碳理念。在变电站土建工程的建材选用方面,可推广使用高性能混凝土、再生骨料混凝土、低碳钢材等,以降低建材在生产和运输过程中的碳排放。同时,对于墙体、屋面等围护结构,需着重提升其保温隔热性能,通过采用新型节能保温材料并优化构造设计,降低变电站运行期间的采暖与制冷能耗,进而间接减少因电力消耗产生的温室气体排放。在变电站土建工程的建筑设计方面,应充分借助自然条件,例如通过优化变电站建筑物的朝向、窗墙比设计,实现良好的自然采光与自然通风,减少对人工照明和机械通风的依赖。此外,应积极推广应用太阳能光伏建筑一体化(BIPV)技术,在变电站的屋顶、围墙乃至部分结构构件表面安装太阳能光伏板,将建筑本身转变为小型分布式能源站,为变电站自身运营提供清洁电力,实现能源的自给自足或部分自给。这不仅直接降低了对传统化石能源发电的需求,也是变电站土建建筑践行绿色低碳理念的重要体现。这种全方位、多层次的绿色适配需求,旨在将变电站土建建筑打造成为新型电力系统中低碳、环保、可持续的绿色基础设施节点[29]-[31]。

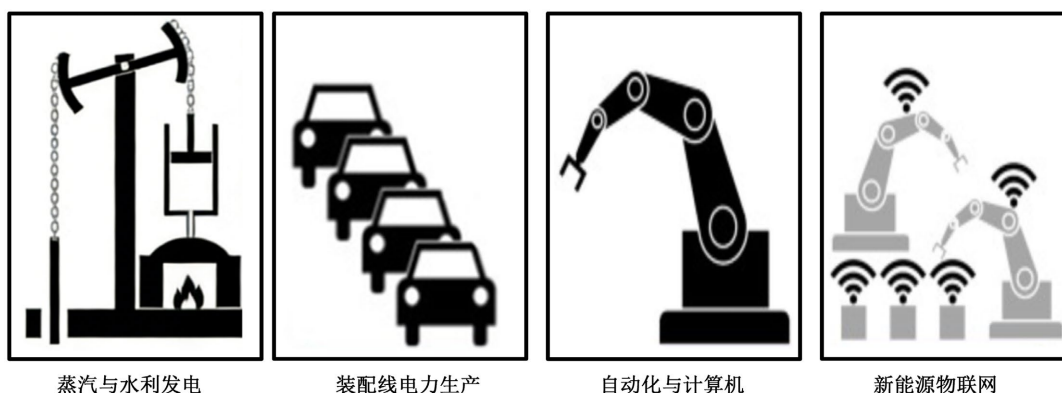


Figure 4. Development goals of green buildings  
图 4. 绿色建筑的发展目标

## 3. 变电站土建建筑适配性设计的关键因素

### 3.1. 智能化融合土建设计因素

智能化融合土建设计因素是实现变电站土建建筑与新型电力系统智能化升级深度适配的核心环节

[32]。见图 5 所示，为构建“土建为基、智能为魂”的一体化设计体系图。对于变电站土建建筑来说，在设计初期阶段，可建立土建结构与智能设备的协同建模机制，利用建筑信息模型(BIM)技术，将各类智能传感设备的安装位置、安装方式、供电与通信接口需求等参数，确保传感器安装点位的结构强度、电磁兼容性及数据传输路径的最优化。对于智能设备的特殊运行环境需求，土建设计需提供定制化的物理防护方案。以边缘计算柜为例，其运行时对环境温湿度、防尘等级有严格要求，土建设计应在其安装区域采用具有良好密封性的轻质隔墙进行空间分隔，并配套设计独立的通风散热系统或恒温恒湿空调系统，空调的出风口和回风口位置需结合设备的散热特性进行优化，确保冷空气能均匀流过设备表面，提升散热效率。对于智能安防系统，土建设计可配合视频监控摄像头、红外对射探测器等设备的安装需求，在建筑物外立面、设备区围栏等位置预留安装基座，能抵御变电站内可能出现的强风、震动等不利因素影响。智能化融合土建设计应具备一定的前瞻性和可扩展性，考虑到未来智能技术的迭代升级，土建结构在预留设备安装空间、管线敷设通道等方面应留有一定的富余量，以便后期根据新的智能化需求进行设备增容或功能扩展时，能够快速、便捷地对土建结构进行局部调整和改造，从而降低改造成本，缩短改造周期。

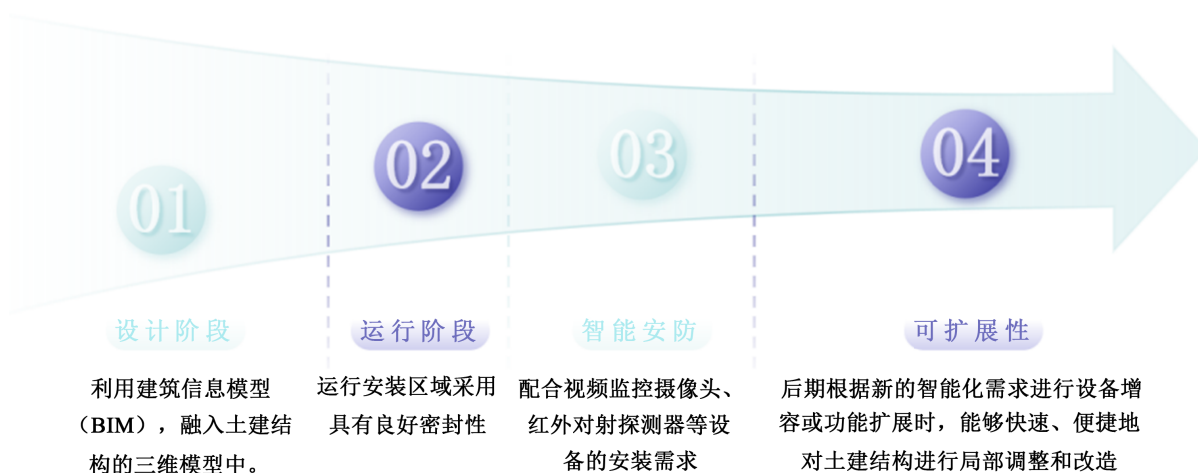


Figure 5. Diagram of building an integrated design system with “Civil Engineering as the Foundation and Intelligence as the Soul”

图 5. 构建“土建为基、智能为魂”的一体化设计体系图

### 3.2. 绿色低碳土建设计因素

绿色低碳土建设计因素是推动变电站土建建筑实现低碳化转型、响应新型电力系统绿色发展目标的关键支撑。绿色低碳已成为全球能源领域的核心议题，变电站作为电力系统的关键节点，其土建建筑的绿色低碳设计已成为必然要求。在具体实践中，绿色低碳土建设计需从材料选择、能源利用、资源循环等多维度入手[33]-[35]，通过明确技术路径与量化指标实现低碳目标。

在新型墙体材料应用方面，不同墙体材料的核心性能对比见表 1。蒸压加气混凝土砌块凭借多孔结构实现导热系数低至  $0.12\sim 0.16\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，且碳排放因子仅为  $28\sim 35\text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ ，较传统黏土砖(碳排放因子  $180\sim 220\text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ )降低 80%以上，同时其干密度 $\leq 600\text{ kg}/\text{m}^3$ ，可降低建筑自重 15%~20%；岩棉夹芯彩钢板导热系数虽低至  $0.038\sim 0.042\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，但生产过程碳排放因子较高( $85\sim 100\text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ )；石墨烯改性保温砂浆则通过纳米改性技术实现导热系数  $0.032\sim 0.036\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，碳排放因子  $45\sim 55\text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ ，且施工适应性强，可用于异形结构及既有建筑改造。在实际应用中，应根据变电站不同区域功能需求进行材料组合，例如外墙主体采用蒸压加气混凝土砌块，外墙外保温选用石墨烯改性保温砂浆，形成“主体结构 + 外保温”复合体系，确保外墙传热系数 $\leq 0.45\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

在 BIPV 光伏组件屋顶安装技术路径方面，重点解决结构加固与防水构造两大核心问题。结构加固方面，对原有屋顶进行承载力复核，当屋顶设计承载力不足 2.5 kN/m<sup>2</sup> 时，采用型钢檩条加固方案，檩条选用 H 型钢 H140 × 70 × 3.5，间距 ≤ 1.5 m，通过化学锚栓与屋面板基层连接，锚栓抗拔力 ≥ 15 kN；对于混凝土屋面，采用植筋技术增设混凝土支墩，支墩尺寸 400 mm × 400 mm × 300 mm，间距 2.0 m × 2.0 m，混凝土强度等级 C30，内置 4 根 HRB400 级 Φ16 钢筋，植筋深度 ≥ 15 d (d 为钢筋直径)。防水构造方面，采用“三道防水”设计：第一道为屋面原有防水层(改性沥青防水卷材，厚度 ≥ 4 mm)；第二道在光伏支架与屋面接触处设置丁基橡胶止水带，宽度 ≥ 150 mm，压实系数 ≥ 0.95；第三道在支架紧固件处加装不锈钢防水压盘，压盘直径 ≥ 100 mm，与屋面接触部位涂刷聚脲防水涂料，厚度 ≥ 2 mm。同时，光伏组件排列需预留检修通道，宽度 ≥ 0.8 m，组件边缘与女儿墙间距 ≥ 0.5 m，确保排水通畅，避免积水导致的渗漏风险。

在资源循环利用方面，雨水回收系统需根据变电站占地面积优化设计，当站区面积 ≥ 5000 m<sup>2</sup> 时，设置容积不小于 100 m<sup>3</sup> 的雨水蓄水池，采用钢筋混凝土结构，抗渗等级 P6，池体设置沉砂池、过滤池、消毒池三级处理单元，处理后水质需满足《城市污水再生利用城市杂用水水质》(GB/T18920-2022)，用于绿化灌溉时悬浮物 ≤ 10 mg/L、pH 值 6.0~9.0，年雨水利用量不低于年降水量的 30%。建筑垃圾回收方面，建立分类回收机制，混凝土块经破碎筛分后制成再生骨料，用于道路基层或小型构件制作，再生骨料粒径控制在 5~31.5 mm，压碎值 ≤ 25%；钢材废料经除锈处理后回收再利用，回收率不低于 95%；木材废料通过粉碎、干燥处理后制成生物质燃料，替代部分燃煤用于冬季采暖，实现废弃物资源化。

Table 1. Comparison of properties of different new wall materials  
表 1. 不同新型墙体材料性能对比

| 墙体材料类型    | 导热系数<br>[W/(m·K)] | 碳排放因子<br>(kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ) | 干密度<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 适用场景        |
|-----------|-------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------|-------------|
| 蒸压加气混凝土砌块 | 0.12~0.16         | 28~35                                         | 400~600                     | 外墙主体结构、内墙分隔 |
| 岩棉夹芯彩钢板   | 0.038~0.042       | 85~100                                        | ≤120                        | 设备机房、临时建筑   |
| 石墨烯改性保温砂浆 | 0.032~0.036       | 45~55                                         | ≤600                        | 外墙外保温、异形结构  |
| 传统黏土砖(对照) | 0.81~0.85         | 180~220                                       | 1600~1800                   | -           |

3.3. 全生命周期适配性优化因素

全生命周期适配性优化因素能够使变电站土建建筑在，均能动态响应新型电力系统的发展需求。见图 6 所示，为产品全生命周期评价示意图。从图中可以看出资源和能源的消耗对于变电站土建建筑全生命周期适配性优化因素能够使变电站土建建筑在规划设计、施工建造、运营维护直至最终拆除回收的整个生命周期内，均能动态响应新型电力系统的发展需求[33]。因此，在规划设计阶段，需进行前瞻性的需求预测与多方案比选，充分考虑未来电力系统升级可能带来的设备增容、功能扩展等需求，采用模块化、标准化的设计理念，预留必要的结构空间和管线接口，避免后期大规模改造带来的资源浪费和碳排放增加。在施工建造阶段，推广应用绿色施工技术，减少施工过程中的材料损耗、能源消耗和环境污染。进入运营维护阶段，建立基于物联网和大数据分析的智能化运维管理平台，对建筑结构健康状况、设备运行参数、能耗数据等进行实时监测与预警，实现预防性维护，降低运维成本和故障风险。在建筑达到其使用年限或因电力系统发展需要进行拆除时，则应优先考虑建筑材料的回收再利用，对混凝土、钢材、木材等可回收材料进行分类拆解、处理和再生利用，最大限度地减少建筑垃圾的产生，实现资源的循环利用，从而完成变电站土建建筑全生命周期的低碳化和可持续性闭环。

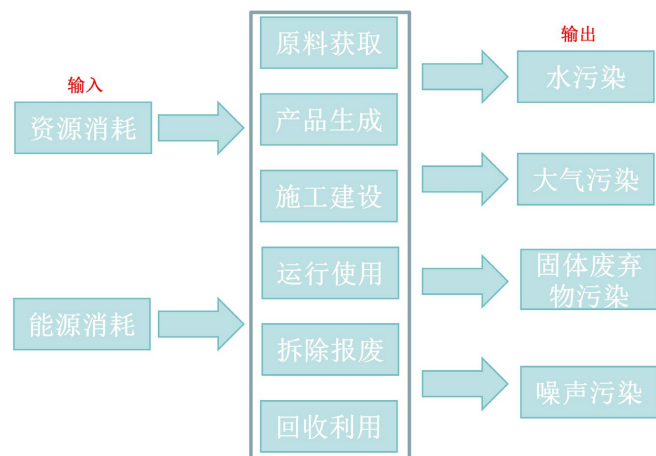


Figure 6. Schematic diagram of product life cycle assessment  
图 6. 产品全生命周期评价示意图

## 4. 结论

新型电力系统的快速发展对变电站土建建筑提出了高比例新能源并网下的空间适配、智能化升级下的功能适配以及低碳化转型下的绿色适配等核心需求。变电站土建建筑作为电力系统的物理载体，其适配性设计直接关系到新型电力系统的安全稳定运行与可持续发展。本文通过对新型电力系统下变电站土建建筑适配性设计的系统分析，明确了智能化融合、绿色低碳及全生命周期适配性优化是其关键设计因素。主要结论如下：

- 1) 变电站智能化转型推动其功能升级，从单一电力传输枢纽，演变为集数据采集、信息处理、智能决策于一体的核心节点，对土建建筑的适配性提出多元要求。
- 2) 智能化设备集成是土建建筑的核心适配方向，需为各类智能传感器预留安装与走线空间，同时满足边缘计算、通信设备的环境防护需求，保障数据采集与传输效能。
- 3) 土建建筑需适配智能化运维与安防需求，包括为巡检机器人规划运行路径、预留自主充电条件，以及在关键区域设置无遮挡、抗震动的安防设备安装基座。
- 4) 二次系统布置模式变革要求土建建筑优化结构布局，顺应集中式控制室向分散化、虚拟化的转型趋势，预留新型设备安装与扩展的灵活空间，实现物理空间与智能系统的深度融合。

## 参考文献

- [1] 林水静. 面向“十五五”的新型电力系统建设思考[N]. 中国能源报, 2025-12-08(004).
- [2] 湖南新型电力系统首座绿色建造变电站[J]. 大众用电, 2025, 40(1): 81.
- [3] 杨睿. 新型电力系统下的智能变电站设备检修技术[J]. 城市建筑空间, 2024, 31(S2): 430-431.
- [4] Santos, G.R., Zancul, E., Manassero, G. and Spinola, M. (2024) From Conventional to Smart Substations: A Classification Model. *Electric Power Systems Research*, **226**, Article ID: 109887. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109887>
- [5] Trivedi, A., Tyagi, A., Chichi, O., Kumar, S. and Trivedi, V. (2023) Substation Technology Selection for Environment Efficient Power Distribution System in India: An Integrated AHP-TOPSIS-Based Approach. *International Journal of Energy Sector Management*, **18**, 617-638. <https://doi.org/10.1108/ijesm-09-2022-0002>
- [6] 王闪闪, 张灿灿, 王见. 基于新型电力系统的智能变电站继电保护技术探析[J]. 电力设备管理, 2025(12): 2-4.
- [7] Liu, Z., Sun, Y. and Ma, C. (2024) An Overview of Grid-Forming Technology and Its Application in New-Type Power System. *Global Energy Interconnection*, **7**, 541-552. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2024.10.003>
- [8] 林英明, 刘洋, 喻振帆, 等. 漂浮式海上波电、风电、光伏多能互补一体化平台综述[J]. 新能源进展, 2025, 13(4):

- 450-456.
- [9] 李晓飞. 光伏风电系统的实时监控与故障诊断技术[J]. 科技与创新, 2025(22): 121-124.
  - [10] Yao, Y., Feng, C., Xie, J., Yan, X., Guan, Q., Han, J., *et al.* (2023) A Site Selection Framework for Urban Power Substation at Micro-Scale Using Spatial Optimization Strategy and Geospatial Big Data. *Transactions in GIS*, **27**, 1662-1679. <https://doi.org/10.1111/tgis.13093>
  - [11] Priyono, P., Alihudien, A. and Fiendyo, H. (2025) Review Study of Foundation Structure of Belawan Medan Crane Electrification Substation Building Regarding Bearing Capacity and Settlement. *Jurnal Pensil*, **14**, 508-517. <https://doi.org/10.21009/jpensil.v14i3.59104>
  - [12] 杨春侠, 揭双全, 赵晓宇, 等. 近断层地震动作用下变电站避雷器的地震响应分析[J]. 重庆建筑, 2021, 20(5): 32-34+43.
  - [13] 沈育辉, 徐寅翔, 俞昇森, 等. 变电站土建施工设计图集精细化的探讨与应用[J]. 农村电气化, 2025(12): 16-20.
  - [14] 李永健. 浅析变电站土建工程施工质量监理的控制要点[J]. 产品可靠性报告, 2025(11): 92-94.
  - [15] 莫海科. 变电站土建施工与电气施工配合技术分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(23): 118-120.
  - [16] 胡朝华, 杜新伟, 苟竞, 等. 提升新型电力系统宽频振荡稳定性的构网型储能设备优化配置方法[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(12): 4583-4593.
  - [17] 江秀臣, 许永鹏, 李曜丞, 等. 新型电力系统背景下的输变电数字化转型[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 1-10.
  - [18] 栗峰, 丁杰, 周才期, 等. 新型电力系统下分布式光伏规模化并网运行关键技术探讨[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 184-196.
  - [19] 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(4): 111-117.
  - [20] 刘圣楠. 新型电力系统构建中电气工程对城市规划的优先保障机制探索[J]. 工程技术前沿, 2025, 1(6): 1-4.
  - [21] 傲东, 余晓, 谷聚辉, 等. 智慧变电站建设中的技术挑战与创新策略[J]. 工程与技术创新, 2025, 1(8): 1-4.
  - [22] 义军吴. 变电站土建设计要点及优化策略探讨[J]. 水电科技, 2024, 7(5): 113-115.
  - [23] 裕谷, 航赵. 变电站选址的方法和在电网建设中的作用[J]. 城市建设与规划, 2025, 2(3): 77-79.
  - [24] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.
  - [25] 姚良忠, 朱凌志, 周明, 等. 高比例可再生能源电力系统的协同优化运行技术展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 36-43.
  - [26] Gür, T.M. (2018) Review of Electrical Energy Storage Technologies, Materials and Systems: Challenges and Prospects for Large-Scale Grid Storage. *Energy & Environmental Science*, **11**, 2696-2767. <https://doi.org/10.1039/c8ee01419a>
  - [27] 张祥义, 田学帅, 黄瑞桦. 土木工程结构试验中的传感器和数据采集技术[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(2): 186-199.
  - [28] 李昕, 黄钰超. 基于 BIM 的地铁车站土建施工自动化监测系统的开发与应用技术[J]. 广州建筑, 2024, 52(6): 76-81.
  - [29] 黄山, 吴振升, 任志刚, 等. 电力智能巡检机器人研究综述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(2): 26-38.
  - [30] Zhang, Y. and He, Z. (2023) Brief Analysis of the Development and Application of Green Building Design and Green Energy-Saving Buildings. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **48**, 1131-1141. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01198-4>
  - [31] Xu, H. (2024) The Application of Green Energy Conservation and Environmental Protection Technology in Civil Engineering. *International Core Journal of Engineering*, **10**, 63-69.
  - [32] Liang, M., Liu, L., Liang, W., Mi, W., Ye, K. and Gao, J. (2024) Intelligentization Helps the Green and Energy-Saving Transformation of Power Industry-Evidence from Substation Engineering in China. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 8698. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59271-5>
  - [33] 林伯强, 杨梦琦. 碳中和背景下中国电力系统研究现状、挑战与发展方向[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2022, 42(5): 1-10.
  - [34] 鹏王. 低碳概念下的建筑设计方法研究[J]. 建筑工程与管理, 2023, 5(10): 32-34.
  - [35] 左涛, 刘建涛, 蒋强, 等. 基于全生命周期评价的撬装式移动变电站碳排放分析[J]. 电气技术, 2026, 27(1): 49-56.