

# 桥梁隧道工程施工节能降耗技术与可持续发展路径

刘育东

5138221991\*\*\*\*0039

**摘要:** 随着全球对环境保护和可持续发展的关注度不断提高,桥梁隧道工程作为交通基础设施建设的核心组成部分,其节能降耗与可持续发展已成为行业转型的关键命题。本文系统梳理桥梁隧道工程施工中的节能降耗技术体系,涵盖新能源利用、设备节能改造及智能控制系统应用等核心领域;同时从绿色设计、资源循环、生态保护三个维度构建可持续发展实施路径,通过典型案例验证技术应用实效,为推动交通基建领域的低碳转型提供理论支撑与实践范式。

**关键词:** 桥梁隧道工程; 节能降耗技术; 绿色施工; 低碳转型

**DOI:** 10.69979/3029-2727.25.10.032

## 引言

桥梁隧道工程是现代交通网络的关键节点,通过跨越自然屏障实现区域联通,对经济社会发展具有基础性支撑作用。此类工程具有建设规模大、施工周期长、资源消耗集中等特点,传统施工模式下存在能源利用率低、生态扰动大等突出问题——施工阶段的碳排放占工程全生命周期总量的35%以上,施工废弃物处理不当还会造成土壤与水体污染。在“双碳”目标与新型基础设施建设的双重背景下,推动桥梁隧道施工向节能化、生态化转型,不仅是破解资源环境约束的必然选择,更是实现交通建设与生态保护协同发展的战略需求。这种转型并非简单的技术叠加,而是需要从理念革新、技术集成到管理优化的系统性变革。

## 1 桥梁隧道工程施工现状与能耗分析

### 1.1 施工现状概述

我国桥梁隧道工程建设已进入高质量发展阶段,在技术创新领域取得突破性进展:盾构隧道施工直径突破18米,跨海大桥主跨长度突破2000米,预制拼装率达到70%以上,施工效率较十年前提升40%。但规模扩张也带来新挑战:超大型工程日均能耗相当于5000户家庭的月用电量,山区隧道施工的生态修复成本占总投资比例高达8%。当前行业正面临双重压力——既要满足日益增长的交通需求,又要应对严格的环境管控要求,传统高能耗施工模式已难以为继。

### 1.2 能耗特点与主要能耗源分析

桥梁隧道施工能耗呈现“三维分布”特征:空间上

集中于隧道掌子面、桥梁墩台等作业区域,时间上峰值出现在主体结构施工阶段,类型上以机械动力、照明通风、材料加工为主。具体能耗构成如下:

**施工设备能耗:** 占总能耗的55%-60%,其中盾构机单机功率可达3000kW,日均耗电量约4万度;液压挖掘机等移动设备的燃油消耗占机械能耗的70%,空载运行时能源浪费率达25%。

**照明与通风能耗:** 隧道施工中该部分能耗占比达20%,10公里长隧道的通风系统需持续克服2500Pa风压,照明系统采用传统灯具时的能耗是LED灯具的3倍。

**材料生产能耗:** 每立方米混凝土从原材料加工到浇筑完成的综合能耗约0.12吨标准煤,特大桥项目的混凝土用量常突破百万立方米级,材料相关能耗总量显著。

## 2 桥梁隧道工程施工节能降耗技术

### 2.1 新能源与可再生能源的利用

#### 2.1.1 太阳能利用技术

建立“分布式发电+储能”的太阳能应用体系:在施工营地屋顶及料场顶棚安装光伏板,采用PERC电池技术实现18%以上的转换效率;配套磷酸铁锂电池储能系统,解决昼夜供电不均衡问题。某山区隧道项目通过200kW光伏系统,满足了施工生活区80%的用电需求,年减排二氧化碳180吨。针对野外施工特点,开发可移动光伏照明车,采用单晶硅组件与智能调光技术,较传统柴油发电机照明节能60%。

#### 2.1.2 风能利用技术

在风速稳定的沿海或高原地区，部署 50–200kW 级风力发电机组，采用垂直轴设计适应复杂风向。某跨海大桥施工中，将 3 台 100kW 风机与光伏系统组成微电网，通过 EMS 能量管理系统实现风光互补供电，供电可靠性达 95% 以上。针对低风速区域，开发风光储一体化配电箱，集成小型风机、光伏板及储能模块，为临时用电设备提供清洁能源。

### 2.1.3 地热能利用技术

结合隧道施工的地质条件，采用地源热泵系统实现施工区域温湿度调控。在寒区隧道施工中，通过埋设在洞口周边的 U 型换热管提取地热能，配合空气源热泵辅助加热，较传统电采暖节能 40%。某高原隧道项目利用 300 米深的施工钻孔作为换热通道，冬季可提供 50℃ 热水用于混凝土养护，单季节约标准煤 80 吨。

## 2.2 施工设备的节能改造

### 2.2.1 发动机节能技术

对燃油设备实施“电喷化+智能化”改造：采用高压共轨系统将燃油喷射压力提升至 1800bar，使燃烧效率提高 15%；加装智能节油器，通过转速自适应控制减少怠速能耗。某项目对 20 台挖掘机改造后，单台日均节油 8–10 升，年节约燃油成本超 12 万元。针对老旧设备，采用废气再循环（EGR）技术降低氮氧化物排放，同时通过涡轮增压器升级提升动力输出效率。

### 2.2.2 设备智能化改造

构建施工设备物联网平台：在盾构机上安装振动、温度等传感器，实时监测刀盘负载状态，通过 AI 算法自动调节推进速度与扭矩，使单位进尺能耗降低 12%。起重机加装重量传感器与防摇装置，起吊作业效率提升 20%，能耗降低 15%。开发设备远程运维系统，通过大数据分析预测故障风险，避免因突发性停机造成的能源浪费。

### 2.2.3 节能型设备的选用

推广“电动化+大型化”设备替代：采用电动装载机替代燃油机型，能耗成本降低 60%，噪音下降至 75 分贝以下。某城市隧道项目全部采用电动盾构机，较传统机型减少碳排放 90%。针对特种作业需求，选用混合动力起重机，在吊装作业时启用柴油动力，转场时切换电动模式，综合节能率达 25%。

## 2.3 智能控制系统的应用

### 2.3.1 施工过程智能监控系统

搭建 BIM+IoT 的智能管控平台：通过部署 5G 边缘计算节点，实现施工参数的毫秒级采集；建立能耗数字孪生模型，实时显示各作业面能耗指标。某桥梁项目通过该系统优化混凝土浇筑顺序，减少设备等待时间，使机械利用率提高 30%。开发能耗异常预警模块，当某区域能耗超出基准值 10% 时自动报警，及时排查管路泄漏、设备故障等问题。

### 2.3.2 照明与通风智能控制系统

采用“人员定位+环境感知”的联动控制：在隧道内布设 UWB 定位基站与 CO 浓度传感器，当检测到人员进入时，自动开启对应区域的 LED 照明（亮度调节至 80%）和轴流风机；人员离开 10 分钟后自动切换至节能模式（照明显度 30%，风机降速运行）。某长隧道应用该系统后，照明通风能耗降低 45%，同时保障了作业环境安全。

### 2.3.3 能源管理系统

建立三级能源计量体系：一级计量覆盖项目总进线，二级计量监测各工区能耗，三级计量针对重点设备。通过能源管理软件生成能耗看板，直观展示单位工程量能耗、设备能效排名等数据。某项目利用该系统发现混凝土搅拌站的粉料输送泵能耗异常，经检修后单站日节电 2000 度，验证了系统的节能效益。

## 3 桥梁隧道工程施工可持续发展路径

### 3.1 绿色设计理念的融入

#### 3.1.1 优化工程方案

推行“地质适配”设计方法：通过三维地质建模选择最优隧道轴线，某高速公路隧道通过调整走向避开复杂断层，减少支护工程量 30%，施工能耗降低 20%。桥梁采用节段预制拼装工艺，工厂化生产减少现场作业量 60%，同时通过 BIM 技术优化构件尺寸，节约钢材用量 8%。开发桥隧协同设计平台，实现线路方案的能耗与生态影响双指标评估。

#### 3.1.2 采用绿色建筑材料

建立绿色材料选用标准：推广再生骨料混凝土（取代 30% 天然骨料），某桥梁项目使用 5 万立方米再生混凝土，消纳建筑垃圾 8 万吨。采用高性能混凝土（C80 以上）减少结构截面尺寸，配合矿物掺合料（粉煤灰、矿渣）替代 40% 水泥，降低生产阶段碳排放。临时工程

选用模块化钢结构，重复利用率达 90%，较传统脚手架节约木材 70%。

### 3.1.3 考虑全寿命周期成本

构建“建设-运营-拆除”全周期模型：在设计阶段植入可维护理念，隧道衬砌预留检修通道，减少后期维护的开挖作业；桥梁支座采用可更换设计，降低大修能耗。某跨江大桥通过全周期优化，虽然初期投资增加 5%，但运营 20 年内的维护成本降低 35%，总能耗减少 25%。引入碳足迹核算方法，将材料运输距离、设备能耗等指标纳入设计考量。

## 3.2 资源循环利用策略

### 3.2.1 施工废弃物的处理与再利用

建立“分类-加工-再用”闭环体系：隧道弃渣经破碎筛分后，作为路基填料或混凝土骨料，某项目实现 95%弃渣资源化，减少弃渣场占地 200 亩。钢结构边角料通过集中回收、熔炼重铸，回收率达 98%；木材模板经修复后重复使用 3-5 次，报废后加工为生物质燃料。开发移动式废弃物处理站，实现混凝土废渣的现场再生，运输成本降低 60%。

### 3.2.2 水资源的循环利用

构建三级水循环系统：收集雨水和地表径流至沉淀池，经砂滤处理后用于场地降尘；施工废水通过混凝沉淀+超滤工艺处理，回用至混凝土养护（回用率 80%）；盾构机排水经脱泥处理后作为冷却水循环使用。某地铁隧道项目通过该系统，日节约自来水 500 吨，水费支出减少 40%。推广节水型器具，将高压水枪更换为雾炮降尘，用水量降低 50%。

### 3.2.3 材料的回收与再利用

实施“租赁-共享-回收”模式：对钢模板、脚手架等周转材料采用集中租赁管理，提高周转率至 6 次/年以上；建立项目间材料共享平台，闲置设备利用率提升 30%。工程竣工后，可拆卸的临时用电电缆、配电箱等经检测合格后进入库存，供后续项目使用。某央企通过材料循环管理，年度采购成本降低 15%，减少新材消耗 8000 吨。

## 3.3 生态保护与修复措施

### 3.3.1 减少施工对生态环境的影响

推行“最小干预”施工法：隧道洞口采用“零开挖”进洞技术，减少山体开挖面积 70%；桥梁基础施工采用

钢护筒代替传统基坑开挖，避免水下泥沙扰动。在敏感区域设置声屏障（降噪量 25dB）和围挡喷淋系统（降尘效率 80%），某景区桥梁项目通过该措施，施工期噪声控制在 55 分贝以下。建立环境监测预警机制，实时监测地表水 pH 值、空气质量等指标，超标时自动启动应急措施。

### 3.3.2 生态修复与景观再造

遵循“自然恢复为主”原则：对取土场采用“地形整理-土壤改良-植被重建”三步修复法，某项目将 200 亩取土场改造为湿地公园，植被覆盖率从 10% 提升至 85%。隧道洞口实施“景观化”处理，采用喷播绿化技术恢复山体植被，与周边自然景观融合度达 90%。桥梁两侧设置生态缓冲带，种植乡土植物净化雨水，同时构建小型生物栖息地。

### 3.3.3 生物多样性保护

建立“避让-隔离-补偿”保护体系：线路设计避开野生动物核心栖息地，无法避让时设置生态通道（宽度不小于 50 米），某山区隧道配套建设 3 处动物饮水池，监测显示有 12 种哺乳动物使用。施工区域周边设置生物隔离网，防止施工干扰扩散；对受影响的珍稀植物采用迁地保护，成活率达 80% 以上。开展施工人员生态培训，严禁破坏周边植被和野生动物栖息地。

## 4 案例分析

### 4.1 某跨海大桥施工节能降耗实践

该项目主桥长 2680 米，施工高峰期投入大型设备 120 台套。通过构建“三能融合”体系实现节能降耗：

**能源结构优化：**在施工平台安装 500kW 光伏电站，配套 2MWh 储能系统，结合 3 台 200kW 风机组组成微电网，提供施工用电总量的 30%，年发电 450 万度。

**设备能效提升：**对 30 台柴油设备进行高压共轨改造，盾构机加装能量回收装置（再生制动时回收电能），设备综合能耗降低 22%。

**智能管控赋能：**部署 5G+北斗定位系统，实现施工船舶、吊装设备的协同调度，机械闲置时间减少 40%；照明通风采用智能感应控制，节电 350 万度/年。

项目最终实现施工期能耗强度 0.18 吨标煤/万元，较行业平均水平降低 30%，获评国家级绿色施工示范工程。

### 4.2 某特长隧道施工可持续发展案例

该隧道全长 18.2 公里，穿越国家级自然保护区。通过“四维协同”模式实现生态与工程双赢：

**设计优化：**采用曲线线形避开核心保护区，隧道埋深增加 30 米但减少植被破坏 500 亩；选用模块化衬砌结构，预制率达 90%。

**资源循环：**建立洞内渣料再生系统，80 万吨弃渣加工为衬砌骨料；施工废水经深度处理后回用，日节水 800 吨。

**生态保护：**洞口采用“暗挖+绿化”方案，恢复原生植被 1.2 万平方米；设置 3 处野生动物通道，安装红外相机监测到豹猫等保护动物通行。

**智能监测：**构建生态环境监测平台，实时监控噪声、振动等 12 项指标，数据超标时自动触发施工降速。

项目竣工时生态修复验收合格率 100%，单位长度能耗较同类工程降低 25%，成为山区隧道绿色施工标杆。

## 5 结语

桥梁隧道工程施工的节能降耗与可持续发展，是一项系统工程，需要技术创新、管理优化与生态理念的深度融合。从新能源利用到设备智能化改造，从绿色设计到资源循环，再到生态保护，各环节技术的协同应用已在实践中展现出显著效益——不仅能降低能耗强度 20%

-30%，更能实现生态扰动最小化。

未来发展将呈现三个方向：一是“数字孪生+节能管控”的深度融合，通过全要素建模实现能耗精准调控；二是“零碳施工”技术体系构建，依托氢能设备、碳捕捉等前沿技术突破；三是“生态工程”理念升级，实现工程建设与自然修复的动态平衡。

推动行业转型需要多方协同：企业应加大研发投入，建立绿色施工标准；政策需完善激励机制，将节能指标纳入评标体系；科研机构应聚焦关键技术攻关，形成可复制的技术方案。唯有如此，才能实现桥梁隧道工程从“规模扩张”向“质量效益”的根本转变，为交通强国建设奠定绿色根基。

## 参考文献

- [1] 袁靖博. 双碳目标下公路道路与桥梁工程低碳施工技术研究 [J]. 越野世界, 2025, 20(6):179–181.
- [2] 张昊森. 建筑工程施工中节能降耗技术的应用研究 [J]. 门窗, 2024(22):34–36.
- [3] 珊珊 张, 婷婷 刘, 泳延 尚, 等. 探究节能降耗技术在城建施工中的应用 [J]. 建筑工程与管理, 2020, 2(6):3. DOI: 10.33142/aem.v2i6.2426.