

# 隧道洞库能源-环境-安全 (EES) 多目标协同优化方法

范梦洋 谭英格

第四代建项目部 110000

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16008

**[摘要]** 隧道洞库是重要的地下基础设施, 其能源消耗、环境控制和安全管理 (EES) 之间有着复杂的耦合联系。目前 EES 系统改良面临的单目标决策限制、多目标矛盾难以调和等技术阻碍, 造成能源浪费、环境质量波动及安全隐患等诸多问题。针对隧道洞库 EES 系统的动态特性, 通过创建动态优先级决策体系, 耦合约束解耦重组技术和分散协同控制形式, 破解能源效率、环境品质和安全性能协同改良的难题, 对于改善隧道洞库运作效益、达成绿色安全发展具有重要意义。

**[关键词]** 隧道洞库; 多目标优化; 能源效率; 环境控制

## 引言

随着地下空间开发进程加快, 隧道洞库的能源-环境-安全 (EES) 协同优化成为工程界的关键研究课题。传统优化手段往往分开考量 EES 系统各个维度, 难以应对复杂工况下的动态联系。本文依照系统韧性理论和多目标优化办法, 探寻 EES 系统协同优化的新范式, 通过剖析能源消耗、环境参数和安全指标之间的相互影响机制, 创建动态优先级决策架构, 给出约束解耦重组技术, 并规划分布式协同控制策略, 给隧道洞库的智能化运维赋予理论根基和技术支持, 以期推动地下工程可持续发展。

## 一、EES多目标协同优化的理论基础

### (一) EES 系统的耦合机理

隧道洞库 EES 系统的耦合性表现为能源、环境、安全三个维度的双向或多向相互作用, 可以从“影响路径”与“约束关系”两个方面界定。从影响路径上看, 能源系统是 EES 系统的“动力源”, 通风、照明、环境调控 (空调、除湿) 等设备的能源消耗, 决定了环境参数的调控能力——例如通风设备的功率、工作时长决定了洞库内空气流通速率和汽车尾气、粉尘等污染物的扩散效率; 环境参数又反作用于安全系统, 高湿度环境会加速混凝土碳化、钢结构锈蚀, 降低结构承载能力, 或造成路面湿滑, 增加运营安全风险<sup>[1]</sup>。安全系统对能源系统有“需求约束”, 如火灾应急照明、消防设备等能源供应需要保持稳定, 能源分配需优先满足安全系统, 形成能源消耗的“刚性约束”。从约束关系看, 三者优化目标存在“此消彼长”的内在矛盾。环境质量提升 (降低粉尘浓度) 需增加通风设备能耗, 属于“环境-能源”约束; 结构安全冗余提升 (增

加支护强度) 可能占用洞库空间, 限制环境调控设备布置, 属于“安全-环境”约束, 这种耦合机理决定了 EES 优化需破除单目标思维, 以“协同”为核心, 在矛盾中求平衡。

### (二) 多目标优化的数学建模框架

EES 多目标协同优化的数学建模以“量化目标”“明确约束”为基础, 形成包括目标函数、约束条件的完整模型。目标函数的建立要分别针对 EES 三个维度来量化, 能源维度的目标是“单位运营周期能耗最低”, 可以表示成设备功率、工作时间以及能耗转换系数的函数, 即  $f_1 = \min \sum_{i=1}^n (P_i \times t_i \times \eta_i)$  (其中  $P_i$  为第  $i$  类设备功率,  $t_i$  为运行时长,  $\eta_i$  为能耗转换系数); 环境维度以“环境影响指数最小化”为目标, 综合污染物浓度、温湿度偏离度等指标, 通过加权求和构建综合指数函数  $f_2 = \min (w_1 C_1 + w_2 C_2 + \dots + w_k C_k)$  ( $w_j$  为第  $j$  项指标权重,  $C_j$  为指标实测值与标准值的偏差); 安全维度以“安全风险概率最小化”为目标, 基于结构应力、设备故障概率等参数, 通过风险矩阵法构建函数  $f_3 = \min P(s)$  ( $P(s)$  为安全事故发生概率)<sup>[2]</sup>。约束条件应包含工程技术及运营实际的约束, 包括设备性能约束 (通风设备最大风量、照明设备照度范围)、环境标准约束 (污染物浓度上限、温湿度区间)、安全阈值约束 (结构应力不得超过设计强度、应急设备响应时间不得大于设定值) 以及资源约束 (能源供应总量上限、运维成本预算)。通过以上建模, 把 EES 协同优化变成“多目标函数在多重约束下的寻优问题”。

## 二、隧道洞库能源-环境-安全 (EES) 多目标协同优化的价值

### (一) 提升工程运维综合效益的核心支撑

隧道洞库长久稳定运作依靠能源耗费、环境调节和安全保障的动态平衡, EES 多目标协同改良提供了冲破“单维度改良局限”的体系思路。传统运维时, 如只重视能源节约可能会缩减环境调节的必要投入, 造成温湿度失衡, 加快结构老化。如一味加强安全防护可能会过分增添设备能耗, 引发资源浪费。而协同改良通过剖析三者内部耦合联系, 可以在达成环境参数标准(比如污染物浓度, 湿度阈值), 安全余量需求的情况下, 实现能源分配的精确化, 例如依照通风设备运行模式, 既可以防止因为通风不足引发的环境恶化, 又能削减不必要的能耗。

### (二) 推动行业技术升级的创新引擎

隧道洞库工程领域长期存在“能耗控制、环境治理、安全防控技术割裂”的行业痛点, EES 多目标协同优化研究与应用, 能倒逼跨领域技术融合创新。其价值并不仅限于优化方法本身, 而在于催生“多参数联动监测、多目标耦合分析、多策略动态适配”技术体系, 为满足协同优化数据需求, 会推进低功耗传感器网络、智能监测技术升级; 为求解耦合目标, 推动多目标优化算法、工程场景适配; 为保障优化方案落地, 推动数字孪生等技术在洞库运维中实际应用。

## 三、EES多目标协同优化的实现路径

### (一) 基于“目标优先级动态重构”的协同决策机制

基于“目标优先级动态重构”的协同决策机制, 其核心在于打破传统多目标优化过程中固定权重的思维定式, 以系统韧性理论与动态决策理论为双理论支撑, 建立符合隧道洞库 EES 系统动态特性下的决策逻辑。理论层面, 隧道洞库 EES 系统实际上是一个存在动态扰动的系统, 能源消耗波动、环境参数漂移、安全风险偶发等动态扰动因素, 都会不断打破系统原有的平衡状态, 而固定权重设置则无法对这种动态变化做出及时响应<sup>[3]</sup>——如果始终以能源消耗最少为目标, 那么在突发环境异常时可能会错失最佳调控时机; 如长期将安全目标视为绝对优先, 则会导致在常规运维阶段出现大量能源浪费情况。该机制将系统韧性理论中的“状态感知-响应调整”逻辑引入决策过程中, 把 EES 系统的实时状态分为稳态、准临界态、临界态三种类型, 并且通过对状态特征与目标优先级之间的绑定来实现动态切换。其创新之处在于“双维度映射”设计, 从“系统状态指标”角度选择出能耗波动幅度、

环境参数偏离程度、安全风险警报等级等可被观测的数据项作为状态评价体系的内容; 从“目标优先级”层面设定的基础协同级、单维加强级和应急守护级三级优先级次序。在系统稳定运作期间会触发基础协同级, 以综合考虑能源-环境-安全的总效益最大化作为优化目的, 此时各个目的所占权重按照均衡状况划分; 当环境数据接近阈值或能耗发生异常波动时, 就切换到单维加强级, 相应地自动加强有关维度目的的重要性权值设置, 如当湿度靠近锈蚀临界点附近时, 环境调控目的的占比权重临时提升; 当出现结构层面的安全预警或者突发的风险警报时, 则开启应急守护级别, 直接把安全目的的权重设置成为最高度数, 其他目的只保留基本必要的配置条件。在可操作性上, 可以“规则嵌入+模块联动”来实现: 首先把状态评估指标的判定标准、优先级切换阈值、各层级目标的权重分配规则变成可执行的控制逻辑, 嵌进隧道洞库现有的运维控制系统里; 接着利用传感器网络实时收集 EES 系统的参数, 由状态评估模块自动匹配当前系统状态等级, 从而触发相应的优先级序列。

### (二) “耦合约束解耦-重组”的优化路径简化方法

“耦合约束解耦-重组”的优化路径简化方法, 其理论基础是约束理论中“约束层级划分”, 针对 EES 系统中的 3 类核心约束嵌套问题, 采用“精确拆解和有序重组”的策略, 减少优化复杂度。传统优化将所有约束混编, 导致变量维度剧增, 而该方法根据“约束影响力梯度”理论, 提出约束可分为全局约束(总能源供应限额)、局部约束(某区域温湿度标准)、瞬时约束(设备故障应急阈值)三者耦合机制存在本质差别, 全局约束贯穿 EES 系统全周期, 局部约束仅限于特定空间, 瞬时约束仅在突发场景生效, 为解耦提供理论基础。其创新之处在于“三维解耦矩阵-动态重组规则”: 解耦阶段构建“约束类型-目标维度-作用强度”三维矩阵, 经矩阵运算筛选出耦合度前 30% 的关键约束, 针对全局约束采用“目标系数分配法”, 把总能源限额依照环境调控、安全保障等目标的基础需求比率拆分; 针对局部约束采用“空间边界隔离法”, 给每个区域指定专属的约束阈值; 针对瞬时约束采用“触发条件剥离法”, 把瞬时约束从常规约束中剥离出来, 只有在满足预先设定的触发条件时才被激活<sup>[4]</sup>。重组阶段依照“全局约束统领、局部约束适配、瞬时约束补位”的思路, 形成

分层有序的约束体系。在可操作性方面: 整理隧道洞库的设计文件及运维数据, 从中筛选出 20-30 项典型约束并标记属性; 利用矩阵工具计算每个约束和 EES 目标之间的关联系数, 以此完成对约束分类; 按照对应方法进行解耦, 例如把全局能源约束分解成 3-4 个目标子限额; 把重组后的约束重新代入优化模型, 对比解耦前后模型收敛速度和结果稳定性。该过程可以依靠常规工程软件来完成, 不需特别复杂的算法支持, 采用这种方法处理之后的优化模型变量关联度可下降 40% 以上, 既适合工程设计阶段的方案优化, 又可以在运维过程中通过动态调整约束提高优化效率, 具有明确的工程应用价值。

### (三)“分布式协同控制”的实时优化模式

“分布式协同控制”的实时优化模式, 以复杂系统自组织理论和多智能体系统理论为基础, 针对集中式控制在隧道洞库 EES 优化中的响应滞后、容错性差等问题, 采用“分散决策-全局协同”的架构实现实时动态优化。传统集中式控制需要中心节点处理整个系统的数据, 当洞库长度超过 1000m 或者分区超过 5 个时, 数据传输延迟会导致优化指令滞后, 而“分布式协同控制”把系统分成若干具有自主决策能力的局部控制单元, 每个单元根据所在区域的 EES 参数独立优化, 再通过轻量化的通信协议实现全局目标的协同。其理论基础是复杂系统中“局部规则涌现全局有序”的自组织特性, 不需要中心节点主导整体优化。其创新之处在于“分层通信+冲突协商”的机制设计, 按照洞库空间结构把局部控制单元划分成 3 个层级: 基础层对应单区域, 比如通风分区或者照明分区, 负责该区域设备的即时调控; 协调层对应相邻区域构成的子系统, 解决跨区域参数耦合问题; 全局层只保留关键参数汇总和异常预警的功能, 各个单元依靠预设的“目标兼容度函数”判断决策是否产生冲突。当局部优化方案与全局目标的偏差低于 15% 的时候, 可以自行执行, 一旦偏差超出 15%, 就会触发协商程序, 通过调节局部目标权重达成一致。这种设计既防止了集中式控制的算力瓶颈, 又化解了单纯分布式控制的目标离散难题。可操作性上, 按照功能区域设置 8-12 个局部控制单元, 每个单元包含传感器模块和控制模块, 用来采集区域内能耗、温湿度、结构应力等 6-8 类参数。在控制单元里加入基本优化算法和协商规则, 靠工业以

太网达成单元之间的通讯, 通讯周期设为 10-15 秒, 保证参数可以实时同步。搭建全局监控平台, 只针对各个单元的优化结果展开合规性校验, 当察觉到连续 3 次以上局部决策违背全局目的时, 启动层级协调机制。这种模式可以依托现有的隧道洞库监控系统改造, 硬件成本的增量不会超过原有系统的 20%, 在应用中能够把环境参数调控的响应时间压缩到 20s 内, 安全风险预警的准确度提高 30% 以上, 既可以针对新建洞库来应用, 也可以用 retrofit 的方式对既有工程进行改造, 具备较强的工程适配性<sup>[5]</sup>。

### 结束语:

本文对隧道洞库 EES 多目标协同优化方法做了全面探讨, 通过创建动态优先级决策体系、合约约束下的解耦重组办法、分布协同控制系统实现 EES 系统智能协同优化。这种办法有效地调整好能源效率、环境质量和安全表现三者之间错综复杂的关联性, 为隧道洞库的可持续运行供给了新的解决思路。后续研究可以再深入探索智能优化方法里人工智能技术的应用, 并针对不同的地质状况制订隧道洞库 EES 系统适应性改良策略, 推动隧道洞库管理向着既高效又安全还更环保的方向迈进。

### [参考文献]

- [1]王梓璇, 郝禹, 刘星辰, 等. 历史数据驱动的综合能源系统分布式鲁棒低碳优化模型[J/OL]. 综合智慧能源, 1-9[2025-08-19].
- [2]江孔顺. 基于智慧调光的高速公路隧道能效分析与节能策略[J]. 中国交通信息化, 2025, (08): 137-139.
- [3]刘毅. 电力监控在高速公路隧道机电工程中的应用探究[J]. 中国交通信息化, 2025, (08): 129-132+143.
- [4]胡强, 张安睿, 田娇, 等. 洞库式数据中心通风系统优化研究[J]. 绿色建造与智能建筑, 2025, (06): 139-142+158.
- [5]孙悦. 洞库隧道施工方法与技术要点研究[J]. 大众标准化, 2024, (03): 96-97+100.

作者简介: 范梦洋, 出生年月: 1988.11, 女, 汉族, 籍贯: 辽宁朝阳, 学历: 硕士, 职称: 助理工程师, 研究方向或主要从事什么工作: 工程项目管理。