

1 数学建模 Mathematical Modeling

1.1 模型整体框架 Overview of Model Framework

本项目针对大型山地光电场设计，构建全流程集成优化模型，覆盖“光伏面板切割布局 → 电气设备选型选址 → 电缆路由规划 → 全生命周期成本优化”四大核心环节。模型基于运筹学（混合整数线性规划）与图论方法，综合考虑山地地形复杂性（如边缘边界效应、曼哈顿路径）、设备容量约束（逆变器/升压站负载率）、电缆共沟路由及非线性电力损耗，通过“分阶段耦合 + 增强约束”确保优化结果的工程可行性与经济性。

2 研究内容一：山地区域光伏面板布局规划模型

光伏面板布局是山地光伏项目的物理基础，核心目标为“最大化山地可用区域覆盖 + 最小化材料与分区成本”，模型分为切割布局子问题与分区规划子问题，二者通过面板长度参数深度耦合。

2.1 切割布局模型（第一阶段）

核心目标：

最小化光伏面板（对应文档中“PVA 材料”）的采购成本与切割浪费，确保切割后的面板规格与数量满足山地阵列布局需求。

符号定义

2.1.1 集合与索引

- \mathcal{M} : 标准光伏面板原材料集合，索引 $m \in \mathcal{M}$;
- \mathcal{L} : 面板可切割长度规格集合，索引 $l \in \mathcal{L}$;
- \mathcal{V}_1 : 切割后实际用于阵列的面板单元集合，索引 $i \in \mathcal{V}_1$ 。

2.1.2 参数

- D : 标准原材料面板的固定长度（单位：m，如 12m/15m）;
- t_l : 规格为 l 的切割后面板长度（单位：m，由山地坡度决定，如缓坡 3m、陡坡 2m）;
- n_l : 规格为 l 的面板数量需求（由阵列覆盖面积与单块面板功率推导）;
- c_0 : 单位标准原材料面板的采购成本（单位：元/块，含运输、预处理费用）。

2.1.3 决策变量

- $x_{ml} \in \mathbb{Z}^+$: 从原材料 m 中切割得到规格 l 的面板数量（非负整数，切割数量不可拆分）;
- $y_m \in \{0, 1\}$: 二进制变量， $y_m = 1$ 表示原材料 m 被使用， $y_m = 0$ 表示未使用（统计实际消耗成本）。

数学模型

2.1.4 目标函数

最小化原材料采购总成本：

$$I = c_0 \sum_{m \in \mathcal{M}} y_m \quad (1)$$

说明：因 c_0 为固定单位成本，目标等价于“最小化被使用的原材料数量”，直接降低切割浪费与采购支出。

2.1.5 约束条件

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} t_l x_{mlm}, \quad m \in \mathcal{M} \quad (1)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} x_{mll}, \quad l \in \mathcal{L} \quad (2)$$

$$x_{ml} \in \mathbb{Z}^+, \quad m \in \mathcal{M}, l \in \mathcal{L} \quad (3)$$

$$y_m \in \{0, 1\}, \quad m \in \mathcal{M} \quad (4)$$

2.1.6 约束解释

原材料长度约束（式 1）：单块原材料 m 切割的所有面板总长度不得超过其标准长度 D ；若原材料未使用 ($y_m = 0$)，则切割数量 x_{ml} 强制为 0，避免“无材料却切割”的逻辑矛盾。例如： $D = 12m$ 时，切割 2 块 3m (t_1) 与 2 块 2m (t_2) 面板，总长度 $2 \times 3 + 2 \times 2 = 10 < 12$ ，满足约束。

需求满足约束（式 2）：所有原材料切割的某规格 l 面板总数，需至少满足项目需求 n_l ，确保施工时无规格缺失。例如：若 $n_1 = 50$ （需 50 块 3m 面板），则 $x_{11} \geq 50$ 。

变量离散性约束（式 3）： x_{ml} 为非负整数——切割数量为物理离散量，不可为小数（如不能切割 0.5 块面板）。

原材料使用状态约束（式 4）： y_m 仅取 0 或 1——原材料仅“使用”或“未使用”两种状态，符合工程采购逻辑。

2.2 分区规划模型（第一阶段耦合子问题）

核心目标：

在切割方案基础上，将面板划分为规则分区（每区对应 1~2 台逆变器），最小化分区总周长（减少电缆布线距离），同时满足逆变器容量、分区连通性约束。

符号定义

2.2.1 集合与索引

- \mathcal{V}_1 ：切割后实际面板单元集合（同 1.1.2），索引 $i, j \in \mathcal{V}_1$ ；
- \mathcal{K} ：逆变器候选安装位置集合（需位于面板阵列中心或平坦区域），索引 $k \in \mathcal{K} \subseteq \mathcal{V}_1$ ；
- $\mathcal{A}_i = \{u(i), l(i), e(i), r(i)\}$ ：面板 i 的相邻单元集合（上/下/左/右，适配山地矩形阵列）。

2.2.2 参数

- a_i : 面板单元 i 的等效功率 (单位: kW, 由切割长度 t_i 推导: $a_i = t_i \text{密度}$, b 为面板宽度, $P_{\text{密度}}$ 为功率密度);
- q : 单台逆变器的额定容量 (单位: kW, 如 50kW/100kW);
- r : 逆变器最小负载率 (单位:);
- p : 项目总逆变器数量 (由阵列总功率与 q 推导);
- LB, UB : 分区周长的上下界 (单位: m, 避免分区形状过于狭长或不规则)。

2.2.3 决策变量

- $\sigma_{ik} \in \{0, 1\}$: 面板 i 是否归属于逆变器 k , $\sigma_{ik} = 1$ 表示归属, $\sigma_{ik} = 0$ 表示不归属;
- $\phi_{ij}^k \in \{0, 1\}$: 分区边界指示变量, $\phi_{ij}^k = 1$ 表示面板 i 与相邻 j 归属于不同逆变器 k (即二者为分区边界);
- $\chi_{ij}^k \in \{0, 1\}$: 共边指示变量, $\chi_{ij}^k = 1$ 表示面板 i 与相邻 j 归属于同一逆变器 k (可共用电缆路径)。

数学模型

2.2.4 目标函数

最小化分区总周长 (减少后续布线成本):

$$Z = \sum_{k \in \mathcal{K}} \left(\sum_{i \in \mathcal{V}_1} t_i (\phi_{i,u(i)}^k + \phi_{i,l(i)}^k) + \sum_{i \in \mathcal{V}_1} b (\phi_{i,e(i)}^k + \phi_{i,r(i)}^k) \right) \quad (2)$$

说明: 周长由“纵向边界长度” ($t_i \times \phi$ 项, 对应上下相邻面板) 与“横向边界长度” ($b \times \phi$ 项, 对应左右相邻面板) 累加得到。

2.2.5 约束条件

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sigma_{ik} = 1, \quad i \in \mathcal{V}_1 \quad (5)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sigma_{kk} = p \quad (6)$$

$$\sigma_{ik} \leq \sigma_{kk}, \quad i \in \mathcal{V}_1, k \in \mathcal{K} \quad (7)$$

$$|\sigma_{ik} \sigma_{jk}| \leq \phi_{ij}^k, \quad i \in \mathcal{V}_1, k \in \mathcal{K}, j \in \mathcal{A}_i \quad (8)$$

$$\sigma_{ik} + \sigma_{jk} \leq \chi_{ij}^k, \quad i \in \mathcal{V}_1, k \in \mathcal{K}, j \in \mathcal{A}_i \quad (9)$$

$$rq \sigma_{kk} \leq \sum_{i \in \mathcal{V}_1} a_i \sigma_{ik} \leq \sigma_{kk}, \quad k \in \mathcal{K} \quad (10)$$

$$LB \leq \sum_{i \in \mathcal{V}_1} t_i (\phi_{i,u(i)}^k + \phi_{i,l(i)}^k) + \sum_{i \in \mathcal{V}_1} b (\phi_{i,e(i)}^k + \phi_{i,r(i)}^k), \quad k \in \mathcal{K} \quad (11)$$

2.2.6 约束解释

- 0 **面板逆变器唯一归属（式 5）**：每个面板 i 仅归属于 1 台逆变器 k ，确保电力传输路径唯一，避免负载分配混乱。
- 0 **逆变器数量约束（式 6）**：归属于自身的逆变器数量 ($\sigma_{kk} = 1$ 表示逆变器 k 实际安装) 总和等于项目总需求 p ，避免设备冗余或不足。
- 0 **逆变器存在性约束（式 7）**：仅当逆变器 k 实际安装 ($\sigma_{kk} = 1$) 时，面板 i 才能归属于 k ($\sigma_{ik} = 1$)，避免“归属不存在的逆变器”。
- 0 **分区边界定义（式 8）**：若面板 i 与相邻 j 归属于不同逆变器 k ($|\sigma_{ik}\sigma_{jk}| = 1$)，则 $\phi_{ij}^k = 1$ (标记为分区边界)，用于后续周长计算。
- 0 **共边条件定义（式 9）**：仅当 i 与 j 均归属于逆变器 k ($\sigma_{ik} = \sigma_{jk} = 1$) 时， $\chi_{ij}^k = 1$ (可共用电缆路径)，减少布线成本。
- 0 **逆变器负载率约束（式 10）**：逆变器 k 的实际负载 (${}_i\sigma_{ik}$) 需在 rq (最小) 与 q (最大) 之间，平衡运行效率与设备安全。
- 0 **分区形状约束（式 11）**：分区周长需在 LB 与 UB 之间，避免形状不规则 (如狭长分区增加布线距离)。

1.2.4 求解方法采用基于逻辑的 Benders 分解算法：主问题：求解切割布局模型 (确定 x_{ml}, y_m)；子问题：基于主问题的切割结果，求解分区规划模型 (验证分区可行性)；迭代机制：通过“可行性割”(修正不可行切割方案) 与“最优性割”(优化成本)，逐步收敛至全局最优。

3 研究内容二：电气设备选型选址及电缆路由规划模型

本部分优化“逆变器箱变升压站”的选型选址与电缆路由，核心目标为“最小化设备购置 + 电缆布线 + 管沟开挖成本”，重点考虑共沟路由与路径冲突约束。

3.1 2.1 符号定义

2.1.1 集合与索引

- $\mathcal{V} = \mathcal{V}_0 \cup \mathcal{V}_1 \cup \mathcal{V}_2 \cup \mathcal{S}$ ：系统顶点全集，其中： \mathcal{V}_0 ：山地边缘虚拟面板集合 (处理边界效应，不参与实际发电)； \mathcal{V}_1 ：实际面板单元集合 (同研究内容一)； \mathcal{V}_2 ：管沟内虚拟顶点集合 (对应面板位置，适配管沟路径规划)； \mathcal{S} ：升压站候选选址集合 (需靠近电网接入点)，索引 $s \in \mathcal{S}$ ；
- $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 \cup \mathcal{E}_2$ ：系统边全集，其中： \mathcal{E}_1 ：面板逆变器边集合 ($(i, j) \in \mathcal{E}_1, i, j \in \mathcal{V}_0 \cup \mathcal{V}_1$)； \mathcal{E}_2 ：逆变器升压站边集合 ($(u, v) \in \mathcal{E}_2, u, v \in \mathcal{V}_1 \cup \mathcal{V}_2 \cup \mathcal{S}$)；
- \mathcal{S}_{box} ：箱变候选位置集合 (介于逆变器与升压站之间)，索引 $b \in \mathcal{S}_{\text{box}}$ 。

2.1.2 参数

- d_{ij} ：面板 i 与 j 间的曼哈顿距离 (单位：m，适配山地直角转弯路径)；

- D_{uv} : 边 $(u, v) \in \mathcal{E}_2$ 的实际长度 (单位: m, 由地形勘测确定, 含坡度修正);
- Q : 单台升压站可接入的最大逆变器数量 (单位: 台, 如 20 台/30 台);
- c_1 : 面板逆变器电缆单位距离成本 (单位: 元/m, 含材料 + 人工);
- c_2 : 逆变器升压站电缆单位长度成本 (单位: 元/m, 需更粗电缆, 成本高于 c_1);
- c_3 : 管沟单位长度开挖成本 (单位: 元/m, 山地需考虑支护费用, 岩石区成本更高);
- c_{box} : 单台箱变购置安装成本 (单位: 元, 根据容量选型确定);
- $d(S)$: 顶点子集 $S \subseteq \mathcal{V}_1 \cup \mathcal{V}_2$ 的“需求总量” ($d(i) = 1$ 为逆变器需求, $d(j) = 0$ 为虚拟顶点需求);
- $K(S) = \lceil \frac{d(S)}{Q} \rceil$: 满足子集 S 需求的最小子树数量 (基于升压站容量 Q)。

2.1.3 决策变量

- $\alpha_{uv}^{ks} \in \{0, 1\}$: 逆变器 k 到升压站 s 的路径是否包含边 $(u, v) \in \mathcal{E}_2$, $\alpha_{uv}^{ks} = 1$ 表示包含;
- $\beta_{uv}^s \in \{0, 1\}$: 升压站 s 启用时, 是否开挖管沟边 $(u, v) \in \mathcal{E}_2$, $\beta_{uv}^s = 1$ 表示开挖;
- $\tau_s \in \{0, 1\}$: 是否启用升压站 s , $\tau_s = 1$ 表示启用;
- $\gamma_{kb} \in \{0, 1\}$: 逆变器 k 是否接入箱变 b , $\gamma_{kb} = 1$ 表示接入;
- $f_{ijk} \geq 0$: 面板 i 到 j 流向逆变器 k 的功率流 (单位: kW, 验证电缆载流量)。

2.2 数学模型

2.2.1 目标函数最小化设备 + 布线 + 挖沟总成本:

$$z = c_1 \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}_1} d_{ij} \sigma_{ij} + c_2 \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{(u,v) \in \mathcal{E}_2} D_{uv} \alpha_{uv}^{ks} + c_3 \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{(u,v) \in \mathcal{E}_2} D_{uv} \beta_{uv}^s + c_{\text{box}} \sum_{b \in \mathcal{S}_{\text{box}}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \gamma_{kb} \quad (3)$$

拆解: 第一项为面板逆变器布线成本, 第二项为逆变器升压站布线成本, 第三项为管沟开挖成本, 第四项为箱变购置成本。

2.2.2 基础约束条件

$$\sum_{b \in \mathcal{S}_{\text{box}}} \gamma_{kb} = \sigma_{kk}, \quad k \in \mathcal{K} \quad (12)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{u \in \mathcal{V}_1 \cup \mathcal{V}_2} \alpha_{ku}^{ks} = \gamma_{kb}, \quad k \in \mathcal{K}, b \in \mathcal{S}_{\text{box}} \quad (13)$$

$$\sum_{u \in \mathcal{V}_1 \cup \mathcal{V}_2} \alpha_{uv}^{ks} \sum_{u \in \mathcal{V}_1 \cup \mathcal{V}_2} \alpha_{vu}^{ks} = \begin{cases} \sigma_{kk} & \text{if } v = s \\ \sigma_{kk} & \text{if } v = k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad v \in \mathcal{V}, k \in \mathcal{K}, s \in \mathcal{S} \quad (14)$$

$$\alpha_{uv}^{ks} \leq \beta_{uv}^s, \quad k \in \mathcal{K}, s \in \mathcal{S}, (u, v) \in \mathcal{E}_2 \quad (15)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \gamma_{kb} \leq \sum_{k \in \mathcal{K}} \gamma_{kb} \quad (16)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{V}_1} f_{ijk} \leq (q2) \sigma_{jk}, \quad k \in \mathcal{K}, j \in \mathcal{V}_2 \quad (17)$$

3.1.1 基础约束解释

- 0 **逆变器箱变接入 (式 12)**: 仅当逆变器 k 实际安装 ($\sigma_{kk} = 1$) 时, 才接入某台箱变 b ($\sum \gamma_{kb} = 1$)。
- 0 **箱变升压站路径 (式 13)**: 接入箱变 b 的逆变器 k , 需通过某条路径连接至升压站 s ($\sum \alpha_{ku}^{ks} = 1$)。
- 0 **路径流量平衡 (式 14)**: 对升压站 s , 流入的路径总和等于逆变器安装数量; 对逆变器 k , 流出的路径总和等于安装数量, 确保路径闭环。
- 0 **布线挖沟协同 (式 15)**: 仅当管沟边 (u, v) 开挖 ($\beta_{uv}^s = 1$) 时, 才能在该边布置电缆 ($\alpha_{uv}^{ks} = 1$), 避免“无管沟布线”的安全隐患。
- 0 **箱变容量约束 (式 16)**: 单台箱变接入的逆变器数量不得超过其容量 Q_{box} (如 10 台/台)。
- 0 **电缆流量上限 (式 17)**: 途经面板 j 的功率流 f_{ijk} 不超过逆变器剩余容量, 避免电缆过载。

2.2.3 增强约束 (有效不等式) 为解决“路径冗余”与“容量超限”问题, 引入以下增强约束 (基于图论与整数规划理论):

- (1) 容量割约束 (CapacityCuts) 确保升压站服务的逆变器数量不超过其容量 Q :

$$\sum_{(u,v) \in \delta(S)} \beta_{uv}^s(S), \quad \forall S \subseteq \mathcal{V}_1 \cup \mathcal{V}_2, s \in \mathcal{S} \quad (18)$$

定义: $\delta(S) = \{(u, v) \in \mathcal{E}_2 | u \notin S, v \in S\}$: 子集 S 的“入边”集合; $K(S) = \lceil \frac{d(S)}{Q} \rceil$: 满足 S 需求的最小子树数量 (每棵子树对应 1 个升压站服务单元)。解释: 流入子集 S 的管沟边数量, 需至少等于服务该子集所需的子树数量, 避免升压站过载。

- (2) 广义子环消除约束 (GeneralizedSubtourElimination) 避免管沟网络中出现“不连接升压站的无效子环”(即闭环路径):

$$\sum_{(u,v) \in \mathcal{E}_2(S)} \beta_{uv}^s \leq |S|K(S), \quad \forall S \subseteq \mathcal{V}_1 \cup \mathcal{V}_2, s \in \mathcal{S} \quad (19)$$

定义: $\mathcal{E}_2(S) = \{(u, v) \in \mathcal{E}_2 | u, v \in S\}$: 子集 S 内部的边集合; $|S|$: 子集 S 的顶点数量。解释: 子集 S 内部的管沟边数量, 不得超过“顶点数最小子树数量”, 强制子环必须连接至升压站。

- (3) 奇圈不等式 (OddCycleInequalities) 处理电缆路径冲突 (避免同一区域多条路径交叉): 定义冲突图 $\hat{G} = (\mathcal{E}_2, \hat{C})$, 其中 \hat{C} 为“冲突边对”集合 (两条边不可同时开挖)。若边子集 $U \subset \mathcal{E}_2$ 在 \hat{G} 中形成“奇圈”(边数为奇数的闭环), 则:

$$\sum_e \beta_e^s \leq \frac{|U|1}{2}, \quad e \in \mathcal{S}, U \subset \mathcal{E}_2(U \text{诱导奇圈}) \quad (20)$$

解释: 奇圈中最多只能选择 $\frac{|U|1}{2}$ 条边开挖, 确保每个逆变器最多有一条出边, 避免路径冗余。

- (4) 团约束 (CliqueConstraints) 处理冲突边对的互斥选择: 若边子集 $F \subset \mathcal{E}_2$ 在冲突图 \hat{G} 中形成“团”(任意两条边均冲突), 则:

$$\sum_e \beta_e^s \leq 1, \quad e \in \mathcal{S}, F \subset \mathcal{E}_2(F \text{诱导团}) \quad (21)$$

解释: 团中最多只能选择 1 条边开挖, 避免冲突边同时使用 (如山地狭窄区域无法并行开挖两条管沟)。

2.2.4 求解方法采用分支定价算法 (BranchandPrice): 主问题: 固定部分路径变量, 求解简化的整数规划模型 (最小化成本); 子问题: 通过“列生成”技术, 动态生成未考虑的路径变量 (优化路径选择); 聚类加速: 对相似逆变器分组, 减少子问题求解规模, 快速生成高质量路径。

4 研究内容三：山地光电场设计中的集成优化模型

集成模型联合优化“面板切割布局 → 设备选型选址 → 电缆路由 → 电力损耗”，实现全生命周期成本最小化（建设成本 + 运行损耗成本），核心挑战为处理电力损耗的非线性特性。

3.1 符号定义（新增/补充） 3.1.1 参数

- T : 项目寿命期（单位：年，行业标准 25 年）；
- C_{elec} : 电价（单位：元/kWh，按当地电网标杆电价）；
- τ : 年运行小时数（单位：h，如西北 1800h、东南 1200h）；
- r_d : 折现率（单位：）；
- ρ : 电缆电阻率（单位： Ω ，如铜缆 $\rho = 1.7 \times 10^8$ ）；
- r_c : 电缆截面积半径（单位：m，决定电缆载流量与电阻）；
- λ : 运行成本权重因子（如 0.8，平衡建设成本与运行成本）。

3.1.2 决策变量（新增）

- $P_{\text{loss},t}$: 第 t 年的总电力损耗（单位：kW）；
- I_{uv}^{ks} : 电缆边 (u,v) 上流向逆变器 k 、升压站 s 的电流（单位：A）；
- $z_{c,i} \in \{0,1\}$: 电流区间指示变量（用于线性化非线性损耗）。

3.2 数学模型 3.2.1 目标函数最小化全生命周期总成本：

$$\begin{aligned} \text{total} = & c_0 \sum_{m \in \mathcal{M}} y_m + c_1 \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}_1} d_{ij} \sigma_{ij} + c_2 \sum_{s,k,(u,v)} D_{uv} \alpha_{uv}^{ks} + c_3 \sum_{s,(u,v)} D_{uv} \beta_{uv}^s + c_{\text{box}} \sum_{b,k} \gamma_{kb} \\ & + \lambda \cdot \sum_{t=1}^T \frac{P_{\text{loss},t} \cdot \tau_{\text{elec}}}{(1+r_d)^t} \end{aligned} \quad (4)$$

拆解：前五项为“建设成本”（同研究内容一、二），最后一项为“全生命周期运行损耗成本”（折现后现值）。

3.2.2 电力损耗计算（非线性处理）基于焦耳定律，电缆损耗功率为 $P_{\text{loss}} = I^2 R$ ，其中 $R = \frac{\rho}{c} L$ （ L 为电缆长度），为非线性项。通过分段线性化转化为线性约束：

(1) 损耗计算式总电力损耗为所有电缆边损耗之和：

$$P_{\text{loss},t} = \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{(u,v) \in \mathcal{E}_2} I_{uv}^{ks^2} \cdot \frac{uv}{c}, \quad \in [1, T] \quad (23)$$

(2) 分段线性化约束将电流 I_{uv}^{ks} 划分为 K 个区间（如 $0 \sim 20A, 20 \sim 35A, 35 \sim 50A$ ），用线性函数近似 I^2 ：

$$I_{uv}^{ks^2} \approx \sum_{i=1}^K z_{c,i} (a_i I_{uv}^{ks} + b_i), \quad , s, (u, v) \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^K z_{c,i} = 1, \quad \in \mathcal{E}_2 \quad (25)$$

$$I_{\min}^{(i)} z_{c,i} I_{\max}^{(i)} z_{c,i}, \quad = 1, \dots, K, k, s, (u, v) \quad (26)$$

$$z_{c,i} \in \{0,1\}, \quad \in \mathcal{E}_2, i = 1, \dots, K \quad (27)$$

定义: a_i (斜率)、 b_i (截距) 为第 i 区间线性函数参数, 通过最小二乘法拟合 I^2 曲线; $I_{\min}^{(i)}, I_{\max}^{(i)}$ 为区间上下限。

3.2.3 耦合约束确保各环节优化的一致性:

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} x_{im} = \sum_{k \in \mathcal{K}} \sigma_{ik}, \quad \in \mathcal{V}_1 \quad (28)$$

$$I_{uv\max}^{ks}, \quad , s, (u, v) \in \mathcal{E}_2 \quad (29)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \alpha_{uv}^{ks} \leq \beta_{uv\max}^s, \quad , (u, v) \in \mathcal{E}_2 \quad (30)$$

解释: 式 28: 仅当面板 i 归属于某逆变器 ($\sum \sigma_{ik} = 1$) 时, 才从原材料切割 ($x_{im} = 1$); 式 29: 电缆电流不超过最大载流量 I_{\max} (避免过热损坏); 式 30: 单条管沟边最多容纳 N_{\max} 条电缆 (如 5 条/边, 考虑管沟空间)。

3.3 求解策略采用“强化学习 + 数学启发式 + 求解器”混合方法: 1. 初始解生成: 用端到端强化学习 (如 DQN 算法), 基于山地地形特征快速生成可行的集成方案 (缩小搜索空间); 2. 局部优化: 通过禁忌搜索 (TabuSearch) 优化电缆路由与电流分配, 降低电力损耗; 3. 精确求解: 固定大部分变量后, 用 Gurobi/CPLEX 求解松弛后的整数规划模型, 得到全局近似最优解。

5 模型总结

本项目构建的系列模型具有以下核心特点: 1. 全流程覆盖: 从面板切割到运行损耗, 覆盖山地光伏项目设计的全环节, 避免“局部优化”导致的整体成本升高; 2. 地形适配性: 采用曼哈顿距离、虚拟节点、坡度修正等方法, 精准适配山地复杂地形; 3. 技术创新性: 引入 Benders 分解、分支定价等先进算法, 解决大规模整数规划问题; 通过分段线性化处理非线性损耗, 兼顾求解效率与精度; 4. 工程实用性: 模型参数源于实地调研 (如山地挖沟成本、电缆电阻率), 可直接应用于典型山地光伏项目; 5. 可扩展性: 支持新增约束 (如生态保护红线、动态负载变化), 适配未来项目需求。

该模型可为我国山地光伏项目设计提供科学决策支持, 助力降低度电成本, 推动“双碳”目标实现。