

## 1 数学建模 MathematicalModeling

### 1.1 模型整体框架 OverviewofModelFramework

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：

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

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： $D = 12\text{m}$  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  $\sum_m x_{m1} \geq 50$ 。

**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:  $a_i = t_i \times \text{密度}$ ,  $b$  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):

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

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

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

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

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

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

$$\sigma_{ik} + \sigma_{jk} - 1 \leq \chi_{ij}^k, \quad i \in \mathcal{V}_1, k \in \mathcal{K}, j \in \mathcal{A}_i \quad (9)$$

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

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

### 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 ( $\sum \sigma_{ik}$ ) 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 ( $(u, v) \in \mathcal{E}_2, u, v \in \mathcal{V}_1 \cup \mathcal{V}_2 \cup \mathcal{S}$ );
- $\mathcal{S}_{\text{box}}$ : 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);
- $c_{\text{box}}$ : 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:

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

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

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

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

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

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

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \gamma_{kb} \leq 1, \quad b \in \mathcal{S}_{\text{box}} \quad (16)$$

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

### 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  $Q_{\text{box}}$  (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“不连接升压站的有效子环” (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:

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

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:

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

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）；
- $C_{\text{elec}}$ : 电价（单位：元/kWh，按当地电网标杆电价）；
- $\tau$ : 年运行小时数（单位：h，如西北 1800h、东南 1200h）；
- $r_d$ : 折现率（单位：%）；
- $\rho$ : 电缆电阻率（单位： $\Omega$ ，如铜缆  $\rho = 1.7 \times 10^8$ ）；
- $r_c$ : 电缆截面半径（单位：m，决定电缆载流量与电阻）；
- $\lambda$ : 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  $R = \frac{L}{\sigma c}$ （ $L$  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  $I^2$ ：

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

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

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

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

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：

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

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

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

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。