

考虑交通流时空分布特征的高速公路分布式光伏容量优化配置

赵鹏飞

上海市城市建设设计研究总院（集团）有限公司 上海 200125

【摘要】：高速公路分布式光伏是实现交通领域“双碳”目标的重要路径，但传统光伏容量配置方法未充分考虑交通流时空分布对沿线负荷的动态影响，导致容量优化结果与实际运行工况存在偏差。本文提出一种考虑交通流时空分布特征的高速公路分布式光伏容量优化配置方法。首先，基于 Perez 倾斜面辐射模型评估收费站屋顶、边坡、声屏障、车棚四类资源的装机潜力；其次，建立融合日分布、周分布、季节性波动及节假日效应的交通流预测模型，并依据《公路隧道照明设计细则》(JTG/T D70/2-01-2014)构建隧道照明动态负荷模型，同步建立收费站 ETC 动态负荷与服务区基础负荷模型；再次，以自洽率最大化、投资成本最小化、并网冲击最小化、投资回收期最小化为目标，建立分布式光伏容量多目标优化模型，采用 NSGA-II 算法求解 Pareto 最优解集，并运用 TOPSIS 与熵权法决策出最优配置方案；最后，以某高速公路路段为算例进行验证。本文方法可为高速公路分布式光伏工程规划提供理论依据与决策支持。

【关键词】：分布式光伏；高速公路；容量优化配置；交通流时空分布；NSGA-II；TOPSIS

DOI:10.12417/2811-0528.26.16.061

1 绪论

1.1 研究背景与意义

在“双碳”目标驱动下，交通领域碳减排已成为国家能源战略的重要组成部分。高速公路作为交通运输网络的骨干，沿线分布着大量的收费站、服务区、隧道群及边坡空间，这些设施与场地为分布式光伏的开发利用提供了丰富的潜在资源。

然而，高速公路分布式光伏的容量优化配置面临独特的挑战：沿线负荷不仅包含收费站、服务区等相对稳定的用电需求，更包含隧道照明这类与交通流量密切相关的动态负荷。传统光伏容量配置方法通常采用年均负荷或最大负荷作为设计依据，忽略了交通流时空分布对负荷动态变化的影响，容易导致光伏装机与负荷需求错配，从而降低系统自洽率与经济性。

因此，深入研究考虑交通流时空分布特征的高速公路分布式光伏容量优化配置方法，对于提高光伏就地消纳率、降低并网冲击、缩短投资回收期、推动高速公路绿色低碳转型具有重要的理论意义与工程价值。

1.2 国内外研究现状

在分布式光伏资源评估方面，现有研究对高速公路沿线特殊资源的系统性评估相对较少。Sun 等（2022）基于 GIS 技术对公路边坡光伏潜力进行了评估，但未考虑声屏障、车棚等立体空间资源。王等(2023)分析了服务区屋顶光伏的经济性，但缺乏对隧道照明负荷与光伏出力匹配关系的定量研究。

在光伏容量优化配置方面，多目标进化算法（MOEA）已被广泛应用于求解此类问题。Deb 等(2002)提出的 NSGA-II 算

法因其高效的非支配排序与拥挤距离机制，成为光伏容量优化领域的主流工具。张等（2023）采用 NSGA-II 对工业园区分布式光伏进行了多目标优化，但未将交通流特征纳入模型。在决策方法方面，TOPSIS（Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution）结合熵权法（EWM）因能客观反映指标信息熵差异，在多属性决策中获得了广泛应用（Li 等，2021）。

在负荷建模方面，隧道照明负荷计算已有成熟规范。《公路隧道照明设计细则》(JTG/T D70/2-01-2014)系统规定了入口段、过渡段、中间段、出口段的亮度需求及计算方法，并给出了不同设计速度、交通量条件下的 k 值和 L_0 取值表，为本研究建立动态隧道照明负荷模型提供了标准依据。

1.3 研究内容与主要创新点

本文主要研究内容及创新点如下：（1）构建了高速公路沿线四类分布式光伏资源(收费站屋顶、边坡、声屏障、车棚)的装机潜力评估模型，基于 Perez 模型考虑了不同朝向与倾角对辐射接收量的影响；（2）建立了融合日分布、周分布、季节性波动及节假日效应的交通流预测模型，并据此构建了隧道照明、收费站、服务区三类动态负荷模型；（3）以自洽率最大化、投资成本最小化、并网冲击最小化、投资回收期最小化为目标，建立了分布式光伏容量多目标优化模型，采用 NSGA-II 算法求解 Pareto 前沿，并运用 TOPSIS-熵权法进行最优决策；（4）以某高速公路路段为算例，验证了所提方法的有效性，并通过敏感性分析了交通量变化对优化结果的影响。

2 高速公路沿线分布式光伏资源评估

2.1 资源类型与可利用面积

高速公路沿线可用于分布式光伏建设的资源主要包括以下四类：（1）收费站屋顶：高速公路收费站管理用房、收费棚等建筑屋顶，通常具有规则的矩形平面和良好的朝向条件；

（2）边坡：高速公路挖方边坡或填方边坡的裸露坡面，可利用面积为坡面在垂直于太阳入射方向的有效投影；（3）声屏障：为降低交通噪声在路侧设置的屏障设施，通常采用垂直或近垂直的布置方式，适合安装双面光伏组件；（4）车棚：服务区、收费站停车场车棚，可在提供遮阳功能的同时实现光伏发电。

资源类型	可利用面积 计算方式	本算例参数取值	单位
收费站屋顶	屋顶投影面积之和	$A_{\text{rooh}} = 800, 1500, 2500$	m^2
边坡	$L \times H \times \cos \alpha - \beta \times FF$	$L=2000/1500/1000/800, H=20/15/18/12, \alpha=20-30^\circ, \beta=27^\circ$	$\text{m}, \text{m}, ^\circ$
声屏障	长度×高度×双面增益	$L=3000, H=3.0, BF=1.10$	$\text{m}, \text{m}, -$
车棚	车位数×单车位面积×覆盖率	$N=200, A=18, C=0.85$	$-, \text{m}^2, -$

上表给出了各资源类型的面积计算方式与参数取值。其中边坡有效面积计算中， α 为坡面倾角， β 为光伏最佳倾角（本算例取 27° ）， FF 为填充因子，考虑组件排布间隙后取 0.70。声屏障采用双面组件，双面增益因子 BF 取 1.10。

2.2 光伏组件出力模型

光伏组件的出力与倾斜面接收的太阳辐射量直接相关。本文采用 Perez 模型计算倾斜面上的总辐射量，其表达式为：

$$G^T = G^b R^b + G^d R^d + G^s R^s$$

式中： G^b 、 G^d 、 G^s 分别为水平面直射辐射、散射辐射和地面反射辐射； R^b 、 R^d 、 R^s 分别为对应的倾斜面转换系数。 $R^b = \cos\theta / \cos\theta_j$ ，其中 θ 为入射角， θ_j 为太阳天顶角； $R^d = (1 + \cos\gamma) / 2$ ， γ 为组件倾角； $R^s = \rho(1 - \cos\gamma) / 2$ ， ρ 为地面反射率，取 0.20。

组件出力功率可由下式计算：

$$P^{cv} = \eta^{cv} \times A \times G^T / G_{\text{rto}} \times PR$$

式中： P^{cv} 为光伏组件出力（kW）； η^{cv} 为组件光电转换效率，取 20%； A 为组件面积（ m^2 ）； G^T 为倾斜面总辐射量（ W/m^2 ）； G_{rto} 为标准测试条件辐射量，取 $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ ； PR 为系统性能比，综合考虑线损、灰尘遮挡、温度升高等因素，取 0.80。

2.3 资源潜力评估结果

基于上述模型，对本算例各资源类型的装机潜力进行评估。本算例选取某高速公路典型路段，包含 3 处收费站、2 座隧道（共 4 个单洞，单洞长度 1200m）、1 处服务区。路段位于北纬 32° ，年太阳总辐射量 $1450 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ，年等效利用小时数约 1300h。

收费站屋顶总潜力为 768 kWp，边坡因面积较大且倾角接近最佳倾角，潜力最大，达 10079 kWp；声屏障长度为 3000m，高度 3.0m，考虑双面增益后潜力为 1584 kWp；车棚覆盖 200 个车位，潜力为 490 kWp。四类资源总装机潜力为 12921 kWp。

3 交通流时空分布特征与负荷建模

3.1 交通流时空分布特征

交通流的时空分布特征是影响高速公路沿线负荷的核心因素。本文从日分布、周分布、季节性分布三个维度刻画交通流特征，并叠加节假日效应因子。

日分布特征采用 24 小时比例系数描述。基于某高速公路实测数据，交通流呈现明显的双峰特征：早高峰（07:00-09:00）和晚高峰（17:00-19:00），夜间（00:00-06:00）流量显著降低。

周分布特征体现为周末流量略高于工作日。本文取周末系数 $k_{\text{ce}}^w = 1.15$ ，工作日系数 $k_{\text{ce}}^w = 1.0$ 。

季节性分布特征采用 12 个月分布系数描述。春运（1-2 月）及“十一”黄金周（10 月初）为出行高峰，夏季（6-8 月）因暑期旅游亦呈现较高流量，冬季（12 月）为全年低谷。月分布系数 $s(m)$ 取值范围为 0.90-1.30。

节假日效应因子 h_{an}^a 在特定时段内对基础流量进行放大：春节前 10 天及节后 15 天取 1.8，“十一”黄金周取 1.6。

综合上述因素，小时交通量 $Q(t)$ 的计算式为：

$$Q(t) = Q_{\text{ailo}}^d \times b_j(h) \times s(m) \times k_{\text{ce}}^w \times h_{\text{an}}^a(d)$$

式中： Q_{ailo}^d 为日均交通量，本算例取 $15000 \text{ veh}/\text{d}$ ； h 为小时序号（0-23）； m 为月份序号（1-12）； w 为星期序号； d 为日期。

图 1 展示了交通流的日分布、周分布和季节性分布特征。由图可见，日分布呈双峰形态，早晚高峰流量约为低谷时段的 3-4 倍；周末流量较工作日高约 15%；季节性波动幅度可达 $\pm 30\%$ 。

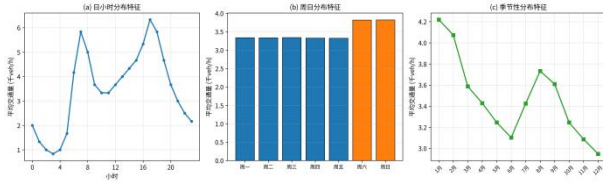


图1 高速公路交通流时空分布特征

3.2 隧道照明动态负荷模型

隧道照明是高速公路沿线最大的动态负荷之一,其能耗与交通流量、设计速度、洞外亮度等因素密切相关。本文依据《公路隧道照明设计细则》(JTG/T D70/2-01-2014)建立动态负荷模型。

隧道照明分为入口段、过渡段、中间段和出口段四个区段。各段亮度需求如下:

$$L_{th1}=k \times L_{20}(S)$$

$$L_{th2}=0.5k \times L_{20}(S)$$

$$L_{tr1}=0.15L_{th1}, L_{tr2}=0.05L_{th1}, L_{tr3}=0.02L_{th1}$$

$$L_{ex1}=3L_{in}, L_{ex2}=5L_{in}$$

式中: L_{th1} 、 L_{th2} 为入口段 TH1、TH2 亮度(cd/m^2); L_{tr1} – L_{tr3} 为过渡段 TR1–TR3 亮度(cd/m^2); L_{ex1} 、 L_{ex2} 为出口段 EX1、EX2 亮度(cd/m^2); k 为亮度折减系数,根据设计速度与交通量表确定; $L_{20}(S)$ 为洞外亮度,白天取 $4000 \text{ cd}/\text{m}^2$ (晴天),夜间取 $0 \text{ cd}/\text{m}^2$; L_{in} 为中间段亮度,根据交通量表取值($3.5\text{--}6.5 \text{ cd}/\text{m}^2$)。

夜间(18:00–06:00)模式下,入口段、过渡段、出口段亮度降至中间段亮度水平。深夜时段(23:00–05:00)且交通量低于 $100 \text{ veh}/\text{h}$ 时,中间段亮度可降至设计值的 50%。本算例设计速度 $100 \text{ km}/\text{h}$,双向交通, k 值取 0.5 倍(双向系数)。

各段照明功率计算式为:

$$P=E_{lux} \times A_{max}/(\eta_{lm} \times U \times M \times K) \times \eta_{dim}^d$$

式中: E_{lux} 为段亮度(cd/m^2)换算为照度(lx),换算系数取 $\pi/\rho \approx 21$, ρ 为路面反射率(沥青取 0.15); A_{max} 为照明面积(m^2), $A=l \times W$, l 为段长度, W 为隧道宽度(10.5 m); η_{lm} 为 LED 光源光效,取 $120 \text{ lm}/\text{W}$; U 为利用系数,取 0.55; M 为维护系数,取 0.70; K 为均匀度系数,取 0.80; η_{dim}^d 为调光效率,取 0.95。

3.3 收费站与服务区负荷模型

收费站负荷由基础负荷与 ETC 动态负荷两部分组成。基础负荷包括空调、办公设备、照明等,取 50 kW 恒定值。ETC 动态负荷与开放车道数相关,车道开放数由交通量决定:

$$n_{pen}=\text{clamp}(\Gamma \times Q \times \eta_{ett}/C_{ett}, 1, n_{max})$$

式中: n_{pen} 为开放车道数; η_{ett} 为 ETC 使用率,取 0.70; C_{ett} 为单车道通行能力,取 $1000 \text{ veh}/\text{h}$; n_{max} 为总车道数,取 12 条。每条 ETC 车道功耗约 8 kW 。

服务区负荷以基础负荷为主(200 kW),叠加高峰时段餐饮、充电等负荷。白天(06:00–22:00)增加 150 kW ,午高峰(11:00–14:00)及晚高峰(17:00–20:00)各增加 100 kW 。

图2展示了高速公路负荷构成的时空分布。隧道照明占主导地位,白天峰值可达约 1200 kW (4洞合计),夜间降至约 400 kW ;收费站负荷随交通量动态变化,峰值约 150 kW ;服务区负荷相对稳定,白天约 450 kW ,夜间约 200 kW 。全线最大负荷约 1680 kW ,年均负荷约 1049 kW 。

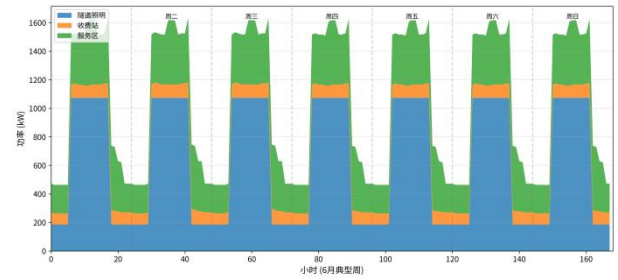


图2 高速公路负荷构成时空分布(6月典型周)

4 考虑交通流时空分布特征的光伏容量多目标优化模型

4.1 决策变量与目标函数

设决策变量为 $x=[x_1, x_2, x_3, x_4]^T$, 分别表示屋顶、边坡、声屏障、车棚四类资源的装机容量(kWp)。优化目标为:

(1) 最大化年光伏发电量(等效于最大化自洽率):

$$\min f_1 = -E^{cv} = -\sum_{t \in \text{minolo}} P^{cv}(t) \Delta t / 1000 (\text{MWh})$$

(2) 最小化投资成本:

$$\min f_2 = C_{int} = \sum_i c_k x_k / 10^6 (\text{百万元})$$

式中: c_k 为单位装机综合成本(元/ kWp),包括组件采购 c_{cipo} 与安装施工 c_{cost} ,本算例取值分别为[3500,3200,4000,3800]元/ kWp 与[800,1200,1500,1000]元/ kWp 。

(3) 最小化并网冲击:

$$\min f_3 = \eta_{urt}^c \times 100 + \sigma_{rilo}^a \times 20$$

式中: η_{urt}^c 为弃光率, σ_{rilo}^a 为电网购电功率波动率。

(4) 最小化投资回收期:

$$\min f_4 = T_{po}^c = C_{int} / R_{ann} (\text{年})$$

式中: R_{ann} 为年净收益(元/年), $R_{ann}=E_{sfl} \times p_{sfl} + E_{ses} \times p_{ses} - C_{om}$, E_{sfl} 为就地消纳电量(kWh/年), p_{sfl} 为零售电价(0.75 元/kWh); E_{ses} 为上网电量(kWh/年), p_{ses} 为上网电价(0.40 元/kWh); C_{om} 为年运维成本(元/年), 本算例取 50-70 元/kWp/年。

4.2 约束条件

约束条件包括: (1)弃光率约束: $\eta_{urt} \leq 10\%$; (2)自洽率约束: $\eta_{sual} \geq 70\%$; (3)光伏渗透率约束: $P^{cv,max}/P_{loax,max} \leq 80\%$; (4)装机上限约束: $x_k \leq x_{k,max}$, 其中 $x_{k,max}$ 由可利用面积与组件功率密度决定。

4.3 NSGA-II 算法求解

NSGA-II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) 是 Deb 等人提出的第二代非支配排序遗传算法, 通过快速非支配排序和拥挤距离机制有效维持种群多样性, 适用于求解高维多目标优化问题。

算法参数设置如下: 种群规模 60, 进化代数 100, 交叉概率 0.9, 变异概率 0.1, 交叉分布指数 $\eta^m=20$, 变异分布指数 $\eta_m=20$ 。由于优化模型包含约束条件, 本文采用约束支配原则: 可行解始终支配不可行解; 若两解均不可行, 约束违反度小者更优; 若两解均可行, 则按标准 Pareto 支配关系比较。

图3展示了 NSGA-II 求解得到的 Pareto 前沿三维投影。由图可见, 投资与发电量之间存在明显的权衡关系: 投资增加带来发电量提升, 但边际效益递减; 投资回收期随投资规模先降后升, 存在最优经济规模。

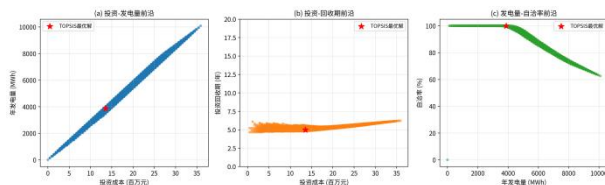


图3 NSGA-II 多目标优化 Pareto 前沿

4.4 TOPSIS-熵权法决策

Pareto 前沿提供了多个非支配解, 需进一步决策选出最优方案。本文采用 TOPSIS 法结合熵权法(EWM)进行综合决策。

熵权法根据指标信息熵确定权重, 信息熵越小(指标变异越大), 权重越高。决策矩阵由 Pareto 前沿的 4 个目标值及自洽率组成, 经向量标准化后计算各指标熵值 e_j 与差异度 $d_j=1-e_j$, 权重 $w_j=d_j/\sum d_j$ 。

TOPSIS 法通过计算各解与正理想解、负理想解的欧氏距离进行排序。贴近度 $C=D^-/(D^++D^-)$, C 值越大表示解越接近正理想解。图4展示了 Pareto 解的 TOPSIS 贴近度排序结果。

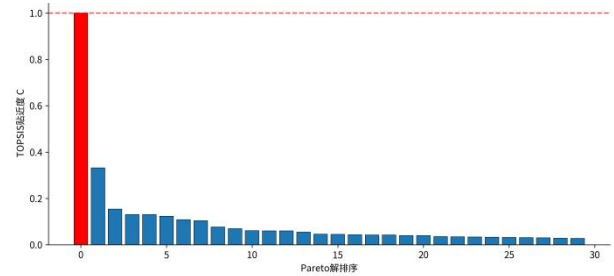


图4 Pareto 解 TOPSIS 贴近度排序

5 算例分析

5.1 算例概况

算例选取某高速公路典型路段, 基本参数如下: 路段长度 50km, 含收费站 3 处、隧道 2 座(共 4 个单洞, 单洞长 1200m)、服务区 1 处; 地理坐标北纬 32°, 年太阳总辐射 1450 kWh/m², 等效利用小时约 1300h; 设计速度 100km/h, 双向四车道, 日均交通量 15000 veh/d。

5.2 最优配置方案

经 NSGA-II 优化与 TOPSIS 决策, 得到最优配置方案如下表所示。车棚因单位投资成本较高(4800 元/kWp)且容量较小, 在 Pareto 优化中被取消。

资源类型	最优装机(kWp)	占比(%)
收费站屋顶	329	11.0
边坡	2222	74.6
声屏障	429	14.4
车棚	0	0.0
合计	2980	100.0

5.3 运行性能分析

最优方案年发电量为 3874 MWh, 约占路段年总负荷(9188 MWh)的 42.2%。自洽率高达 99.9%, 弃光率仅 0.13%, 表明光伏出力与负荷匹配良好, 就地消纳效果优异。

总投资为 1355 万元(约 13.55 百万元)。年净收益约 272 万元/年, 投资回收期 5.0 年。在光伏系统 25 年寿命周期内, 累计净收益可观, 经济性良好。

图5展示了最优方案在 6 月典型周的光伏出力与负荷匹配曲线。由图可见, 白天光伏出力高峰(约 400-800kW)与白天负荷高峰基本同步, 自洽部分(蓝色填充区域)占光伏出力的绝大部分; 仅少数正午时段出现少量弃光。夜间光伏出力为零, 负荷完全由电网供应。

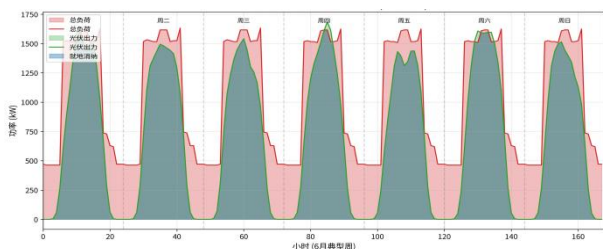


图5 最优方案光伏出力与负荷匹配曲线(6月典型周)

5.4 敏感性分析

为分析交通量变化对优化结果的影响,本文设置了四种场景进行敏感性分析:(1)基准场景:交通量系数1.0;(2)低交通场景:系数0.8;(3)高交通场景:系数1.3;(4)节假日场景:系数1.5(特定时段)。四种场景下系统性能对比如下表所示。

场景	自洽率 (%)	投资(百万元)	回收期 (年)	年负荷 (MWh)
基准	99.87	13.55	4.97	9187.5
低交通	99.86	13.55	4.97	9151.4
高交通	99.88	13.55	4.97	9242.2
节假日	99.87	13.55	4.97	9216.5

交通量变化对系统自洽率影响甚微(变化幅度<0.5%),这是因为光伏装机规模(2979kWp)远小于路段负荷需求(约9188 MWh/年),即使交通量变化导致负荷波动,光伏出力仍能被充分消纳。投资与回收期保持不变,因为光伏装机在敏感性分析中固定为最优解。高交通场景下年负荷增加约1.4%,自洽率

参考文献:

- [1] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [2] Sun Y, Li Y, Zhang W. GIS-based assessment of photovoltaic potential on highway slopes[J]. Renewable Energy, 2022, 187: 1265-1278.
- [3] 王晓明, 李建华, 张伟. 高速公路服务区屋顶光伏系统经济性分析[J]. 可再生能源, 2023, 41(3): 345-352.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道照明设计细则: JTG/T D70/2-01-2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [5] Li J, Wang H, Chen X. TOPSIS-based multi-criteria decision making for distributed energy resources planning[J]. Energy Policy, 2021, 156: 112358.
- [6] 张磊, 刘洋, 赵敏. 基于 NSGA-II 的工业园区分布式光伏多目标优化配置[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(8): 89-97.
- [7] Perez R, Seals R, Incichen P, et al. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces[J]. Solar Energy, 1990, 45(4): 221-231.
- [8] Hwang C L, Yoon K. Multiple attribute decision making: methods and applications[M]. Berlin: Springer, 1981.
- [9] 陈向东, 吴昊, 孙立. 考虑交通流量的隧道照明节能控制策略研究[J]. 照明工程学报, 2022, 33(5): 78-84.
- [10] 国家能源局. 分布式光伏发电项目管理暂行办法[Z]. 2013.

反而略有提升(99.88%), 因为更高的隧道照明负荷为光伏提供了更多的就地消纳空间。

6 结论与展望

本文针对高速公路分布式光伏容量优化配置问题, 提出了一种考虑交通流时空分布特征的多目标优化方法, 主要结论如下:

(1) 高速公路沿线分布式光伏资源潜力巨大。其中边坡因面积优势占比最大(约78%), 是分布式光伏开发的首选资源。

(2) 交通流时空分布对隧道照明负荷具有显著影响。日分布双峰特征导致隧道照明负荷白天约为夜间的2-3倍; 节假日流量激增使负荷峰值进一步抬升约50%。但光伏装机规模远小于负荷需求时, 交通量变化对光伏自洽率影响有限。

(3) 多目标优化可有效平衡技术性能与经济性。TOPSIS最优方案总装机2980 kWp, 年发电量3874 MWh, 自洽率99.9%, 投资1355万元, 回收期5.0年, 技术性能与经济性均表现良好。

(4) 本文提出的NSGA-II+TOPSIS-EWM决策框架, 适用于高速公路分布式光伏的容量优化配置, 可为类似工程提供方法论参考。

未来研究可在以下方面进一步拓展:(1)考虑储能系统配置, 进一步提升自洽率并降低弃光;(2)引入实时电价机制, 优化光伏出力调度策略;(3)结合气象预报数据, 建立短期光伏功率预测模型, 为高速公路能源管理提供滚动优化决策支持。