

“双碳”背景下“光伏+车棚”模式的社会接受度与工程推广路径研究——基于攀枝花市公交场站的实证分析

容宇轩^{1*}, 张芸熙¹, 母峻睿², 李 广³

(1.成都理工大学能源学院, 四川省成都市, 610059;

2.成都理工大学数学科学学院, 四川省成都市, 610059;

3.成都理工大学商学院, 四川省成都市, 610059; *通讯作者, 3108044492@qq.com)

摘 要: 在全球能源转型与“双碳”目标背景下, “光伏+车棚”模式作为分布式光伏发电的创新应用, 其推广需兼顾技术可行性与多元主体需求。本研究以攀枝花市公交场站为实证对象, 通过751份问卷调研和20个典型场站的空间资源分析, 系统探究了市民、司机及企业的差异化诉求。研究发现: 74.22%的市民愿为光伏公交支付溢价, 且支持度与环保认知显著相关; 司机群体虽认可光伏效益, 但充电设施不足和速度慢成为主要痛点; 企业则更关注初始投资回收周期与电力容量瓶颈。基于此, 研究提出“政策分级补贴+PPP模式”的协同路径, 并结合“自发自用+储能调节+余电上网”三级消纳体系优化技术方案。研究成果为交通领域低碳转型提供了社会接受度验证与工程推广范式, 对分布式光伏的差异化发展具有实践指导意义。

关键词: 光伏车棚; 社会接受度; 分布式光伏发电; 新能源公交车; 储能消纳

引言

在全球能源转型与碳中和目标下, 光伏发电因其技术成熟、应用广泛, 成为实现“双碳”目标的核心路径。中国光伏发电装机容量在全球居于首位[1], 但区域资源禀赋差异显著(如图1)。

以四川为例, 其年均太阳辐射量($900\sim 1200\text{kWh/m}^2$)仅为西北地区的60%~70%。成都等城市因多云雾天气、地形复杂, 建设大型光伏电站受限, 导致光伏产业发展缓慢(如表1)。这一特征决定四川省亟需探索分布式光伏差异化发展路径。随着新能源汽车的快速普及, 交通系统的绿色化能源供给已成为各国应对气候变化与能源安全挑战的核心议题[2]。当前, 光伏与交通基础设施的协同发展成为缓解电网压力、优化能源结构的有效举措。而“光伏+车棚”模式因其空间复合利用、就近消纳等优势, 成为极具潜力的解决方案。攀枝花市新能源公交车数量趋势见图2。

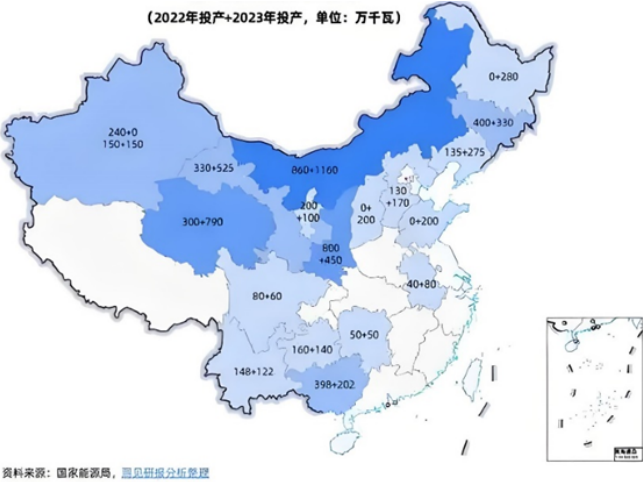


图1 中国大型风光建设分布图

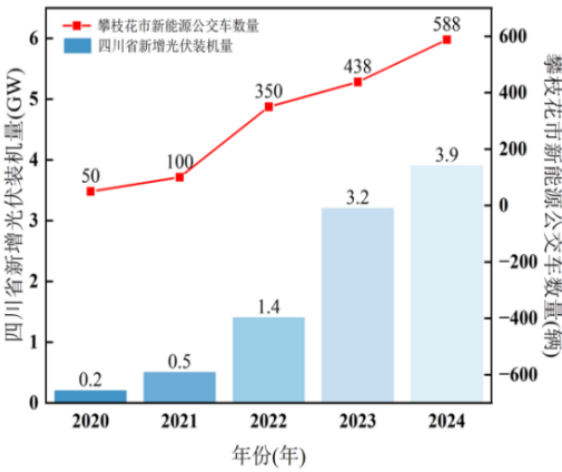


图2 攀枝花市新能源公交车数量趋势图

表1 大型光伏电站环境标准与四川省、成都市基本条件

环境标准	大型光伏电站	四川省	成都市
年太阳辐射总量	≥1400kWh/m ²	约900~1200kWh/m ²	约930~1167kWh/m ²
年均日照数	≥2500小时	1000~1600小时	1042~1412小时
天气	多雨、多云雾天气	阴雨天气较多	阴雨天气较多
地形	平坦地势, 土地集中利用	多山地、云雾覆盖率高	地势西高东低

1.研究背景

1.1. 国内外研究现状

光伏车棚作为可再生能源利用的创新模式, 近年来已在全球范围内实现规模化示范应用, 并呈现出加速推广的发展态势。在国外, 光伏车棚主要应用于大都市建筑、商业停车场、主题园区(图5) [3, 4]等场景。在国内, 交通领域的光伏车棚建设已形成多元化发展格局, 包括合肥市(图3)创新的“光储充换+车网互动”模式[5]、南京市(图4)的“自发自用”系统[6]、宁波市(图6)的“自发自用, 余电上网”方案[7], 以及重庆市(图8)打造的“明月湖超充示范站”等典型应用案例。这些项目已成功在高速公路服务区、大型公共停车场、政务中心、产业园区等多个场景实现商业化运营, 取得了显著的经济效益和环境效益。



图3 合肥市政务中心光伏车棚



图4 南京市高速公路站区光伏车棚



图5 比利时野生动物园光伏车棚



图6 宁波市行政服务中心停车棚



图7 武汉市产业园区



图8 重庆市明月湖超充示范站

基于国内外典型项目的建设运营经验，本研究通过案例分析和数据对比，系统构建了光伏车棚建设的核心条件评估体系（如表2）。该体系采用多维度综合评价方法，从光照条件、场地条件、环境适应性、政策经济性和用能需求五个关键维度进行量化评估。

表2 光伏车棚建设核心条件汇总表

核心条件分类	具体指标
光照资源	年日照时数≥1200小时为宜
场地条件	停车场等面积≥500m ² 为宜，地势较平坦，若为山地地形则可考虑小型光伏车棚场景
气候与环境	极端天气影响较小，气候温和，自然散热条件较好
政策经济性	政府提供光伏补贴，当地有完善的光伏产业基础
用能需求	所在区域有一定电力需求，如工厂、园区等能就地消纳光伏电力

1.2. 研究区选择

1.2.1. 研究区概况与问题背景

攀枝花市作为四川省辐照最优地区，年均太阳辐射量高达1550kWh/m²，年日照时数长达2700小时，完全满足光伏车棚建设的光照资源要求。《攀枝花市“十四五”能源发展规划》等政策明确提出，要突破现有开发模式，创新太阳能、风能利用方式[8]。目前，当地已形成完善的光伏产业链和政策支持体系，具备发展分布式光伏的优越条件。

近年来，攀枝花市新能源公交车数量逐年增多（如图2），但供给新能源公交车充电的首末公交场站存在充电基础设施不完善、充电桩数量不足等问题，制约新能源公交车充电。场站空间大、公交车需电量多、电价成本高的现状也导致充电场地拥堵，运营成本居高不下。



图9 攀枝花市公交场站公交车充电图



图10 攀枝花市公交场站环境图



图11 攀枝花市公交场站电价图

为此，研究聚焦小型光伏发电模式，系统探究“公交场站+光伏车棚”模式的应用潜力与实施路径。公交场站的光伏车棚即在车棚顶端安装光伏组件，将吸收的太阳能转化为直流电，经逆变器转换为交流电后，可直接供给场站充电桩使用。该模式此前在攀枝花市尚未实施，具有显著的创新性和地域特色，不同于传统集中式光伏电站的单一布局，采用分布式建设方案，可在各个公交场站灵活应用，实现就地发电与充电的有机

结合,可有效降低运营成本,缓解充电压力,为解决公交充电难题提供示范性解决方案,具有重要的实践价值。

1.2.2. 研究区域选择与定位

为确保研究科学性,采用多源数据融合方法定位公交场站:整合公交线路首末站信息、交通局备案数据及高德地图API实时充电桩分布[9],构建场站空间数据库。基于数据清洗后样本,结合场站规模(小型<500m²、中型500-1000m²、大型>1000m²)、用电负荷及地形特征三维度评估,最终筛选出20个具有区域代表性的典型场站作为研究对象(如图12)。所选样本覆盖攀枝花市三区两县(东区、西区、仁和区、米易县、盐边县),能够全面反映攀枝花市公交场站的特点,为研究提供可靠的样本。



图12 攀枝花市东区、西区、仁和区、米易县、盐边县公交场站筛选结果分布图
(红色标识为有停车场、充电桩场站;紫色标识为有停车场无充电桩场站)

1.3. 研究目标

本研究旨在构建“社会需求-空间资源”双维驱动的公交场站光伏车棚实施路径框架。当前相关研究多聚焦于技术参数优化,而对项目落地的社会可行性关注不足。基于攀枝花市实证,通过社会调研系统识别社会接受度瓶颈,采用实地考察量化场站资源禀赋,揭示场地层面的关键制约,最终提出“政策-技术-运营”协同解决方案。研究成果不仅为后续工程实施提供社会基础数据支撑,更为城市公交场站绿色转型提供可复制的实施范式。

2. 调研设计与样本特征

2.1. 多元主体需求调研设计与实施

2.1.1. 调研对象确定

在新能源转型背景下,公交场站光伏车棚项目的推进面临多元主体需求博弈:市民注重服务体验,公交车司机群体关注运营实效和充电问题,企业管理人员则权衡投资与运营成本。三方的差异化需求直接影响光伏项目的推进效果,为此我们针对这三类群体展开专项调研。

2.1.2. 设计调查问卷

本次调研采用文献分析、词云图和文本挖掘技术科学设计问卷。通过文献分析梳理政策背景,利用词云图提炼“碳中和”、“光储充”等核心方向,并运用文本挖掘技术分析反馈数据,精准把握各方需求,为研究光伏产业在社会上的认可度提供了扎实基础。

2.1.3. 确定抽样容量

截至2023年底,全国公交车保有量为68.25万辆,其中新能源公交车数量为55.44万辆,占比81.2%,根据本次调研对象(新能源公交车流失用户、现有用户和潜在用户)确定抽样比例为0.4。

$$n_0 = \frac{N \times Z_{\frac{\alpha}{2}}^2 P \times (1-P)}{N \times \Delta \bar{x}^2 + Z_{\frac{\alpha}{2}}^2 \times P \times (1-P)} \quad (1)$$

式(1)中,N表示总体数量或样本量(68.25万);是标准正态分布的临界值,对应于显著性水平 α 的二分之一;P表示估计的比例或概率为0.4;(1-P)是P的补,即0.6。

$$6.825 \times 10^5 \times 1.96^2 \times 0.4 \times 0.6 / 6.825 \times 10^5 \times 0.05^2 + 1.96^2 \times 0.4 \times 0.6 \approx 369$$

样本量调整公式见式（2）：

$$n_1 = \frac{n_0}{(1 + \frac{n_0}{N})} = \frac{369}{(1 + \frac{369}{6.825 \times 10^5})} \approx 369 \quad (2)$$

为初始样本量；N为总体数量。

根据预调研结果，确认问卷无效比例为12%，无效比例调整公式见式（3）：

$$n_2 = \frac{n_0}{(1-p)} = \frac{369}{0.88} \approx 419 \quad (3)$$

为初始样本量；p为无效比例（12%）。

此次调研需要发放的样本量为419份，经数据质量检测有效份数为751份，调研充分有效。

2.1.4. 问卷质量检测

团队对问卷进行了信度、效度和相关性分析。结果显示，问卷的克隆巴赫信度系数（Cronbach's α 系数）为0.837，KMO值为0.776，表明问卷具有较高的可靠性和有效性，可以准确反映调研对象的真实情况。

2.2. 公交场站空间资源分析

2.2.1. 场站地理特征

从地理位置来看，攀枝花市公交场站东区、仁和区分布广泛，而西区、盐边县和米易县则相对较少。在攀枝花市主城区，公交场站主要布局于商业中心、交通枢纽以及大型居民区附近，相邻公交场站之间较密集。如炳三区公交场站和五十一广场公交场站（如图13、图14），其坐落于城市核心商圈，出行需求巨大。公交场站的存在极大地满足了这一区域高强度出行的需要，成为多条公交线路的重要交汇点。



图13 东区炳三区公交站示意图



图14 仁和区五十一广场站示意图

从地理环境来看，攀枝花市地形复杂，山地、丘陵众多。多数公交场站依地势而建，在选址时应充分考虑地形因素，确保公交车辆能够安全、顺畅地进出。仍有部分小型公交场站道路坡度较大、停车道路狭窄（如图15、图16）。此类公交场站应尽快纳入改造规划，提高停放与调度效率。



图15 东区密地桥南站示意图



图16 米易县天空之城站示意图

2.2.2. 场站设施建设现状与光照特征

调研显示，攀枝花市公交场站设施建设呈现两极分化：仅36%的场站（如仁和区攀枝花南站）规划完善，配备充电桩、维修点等基础设施；而64%的老城区场站（如图17、图18）因建设年代久远，普遍存在充电设施缺失、场地规划混乱等问题，严重制约公交运营和光伏设施应用，亟需改造升级。



图17 米易县柳贤站示意图



图18 米易县易安驾校站示意图

2.2.3. 场站形式与功能设计

攀枝花市公交场站的设计充分考虑了当地的气候特点和功能需求。由于攀枝花市地处亚热带季风气候区，阳光充足，气温较高，公交场站在形式上注重遮阳与通风，顶部通常设有大面积的遮阳棚，侧面则采用开放式或半开放式设计（如图19）。

在功能区布局上，充分考虑了光伏发电系统的运行和维护便利性（如图20）。充电区紧邻光伏板，缩短输电距离降低损耗；维修区设置在靠近充电桩和光伏设备的位置，便于在设备出现故障时快速进行维修，提高了整个系统的运行可靠性与安全性。



图19 公交站功能示意图（a）



图20 公交站功能示意图（b）

3. 调研数据处理与需求分析

3.1. 样本特征描述

问卷样本男女比例均衡（男49.3%，女50.7%），年龄段主要集中于18~60岁（如图21），受访者覆盖城乡不同区域（如图22），多数受访者处于工薪阶层。



图21 问卷年龄段分布图

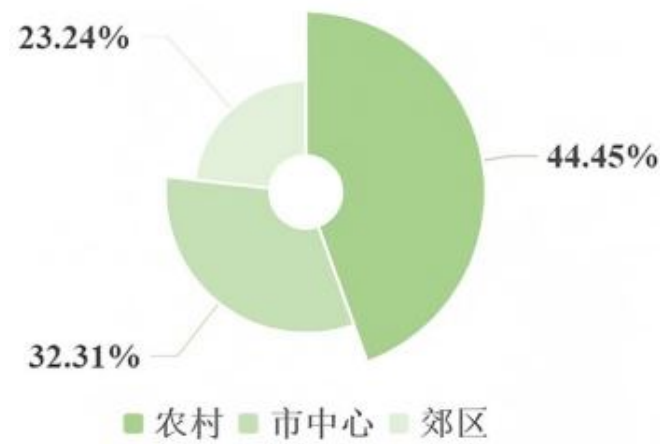


图22 居住区域分布特征图

3.2. 市民问卷分析

3.2.1. 描述性分析——公交车对市民出行不可或缺

根据市民问卷数据分析，攀枝花市市民的主要出行方式中，公交车占比32.3%，位居第一，表明公交车是城市交通系统的关键组成部分。进一步分析显示，公交车的主要使用者为工薪族，其次为学生和退休人员，体现了公交车服务的广泛性和普惠性。使用频率方面（如图23），每周2-3次出行的市民占比最高（19.7%），凸显了其作为公共交通工具的重要性和便捷性。

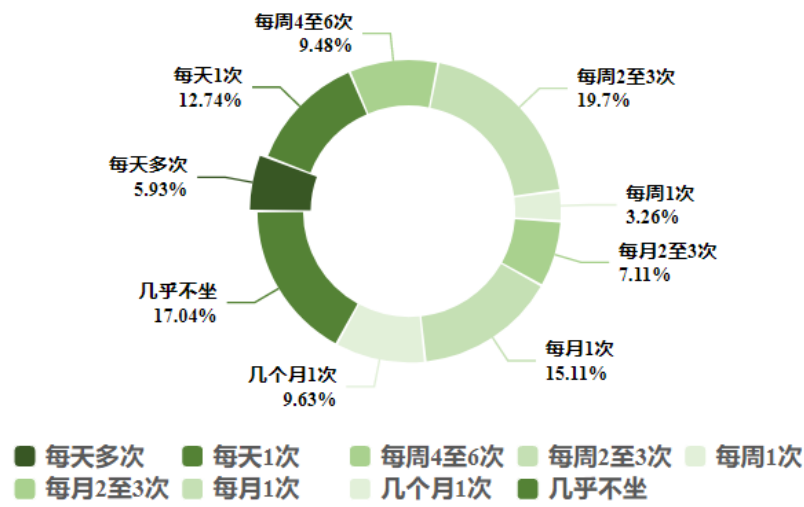


图23 市民乘坐公交车频率统计图

3.2.2. 市民视角下新能源公交车的主要优势

卡方拟合优度检验显示（如表3），市民对新能源公交车优势的认知存在显著差异。进一步分析显示，环境效益相关维度、技术性能及能源可持续性的认可度呈现统计学优势，显著高于经济性（52.44%）和政策导向性（30.96%）选项。这表明市民更关注新能源公交车的直接环境改善效果、技术可靠性及能源结构优化潜力，而对运营成本控制及政策激励的感知度相对较弱。

表 3 市民对新能源公交优势认知多重响应分析表

项	响应		普及率（n=675）
	n	响应率	
降低尾气排放	447	18.70%	66.22%
减少噪音污染	456	19.07%	67.56%
动力输出平稳	435	18.19%	64.44%
能源来源多元	488	20.41%	72.30%
运营成本低	354	14.81%	52.44%
政策支持力度大	209	8.74%	30.96%
其他	2	0.08%	0.30%
汇总	2391	100%	354.22%

备注：拟合优度检验时 $\chi^2 = 548.693$ $p = 0.000$

3.2.3. 市民对光伏充电的支付意愿与支持度分析

如表4所示，74.22%的受访者愿意为使用光伏充电的新能源公交车多支付1元票价，表明公众对绿色出行技术具有较高接受度，反映出环保属性对支付意愿的正向驱动作用。

针对“是否愿意为环保项目支付额外费用”时，70.07%的支持率略低于光伏公交专项支付（74.22%），但仍保持较高水平。这表明环保支付意愿存在一定的场景依赖性，与具体技术应用场景的关联度越强，公众支付意愿越高。

表4 市民态度的多重响应分析表

名称	选项	频数	百分比(%)	累积百分比(%)
您是否愿意为使用光伏充电的新能源公交车多支付1元票价？	A.愿意	501	74.22	74.22
	B.不愿意	174	25.78	100.00
若光伏充电收益用于社区共享，您的支持度如何？	A.支持	609	90.22	90.22
	B.不支持	66	9.78	100.00
您是否愿意为环保项目（如太阳能光伏充电设施）支付额外费用？	A.愿意	473	70.07	70.07
	B.不愿意	202	29.93	100.00
合计		675	100.0	100.0

3.2.4. 市民对新能源公交及光伏充电设施的认知度分析

如表5所示，在“是否支持推广新能源公交车”问题中，77.78%的受访者选择“非常支持”（39.26%）或“支持”（38.52%），仅7.56%持负面态度。这表明新能源公交已获得广泛社会认同，其环保属性与技术优势得到公众普遍认可。

3.3. “非常了解”光伏发电技术的群体中，81.4%支持公交站光伏安装，显著高于“不了解”群体的58.4%（ $\chi^2=12.37$ ， $p<0.01$ ）。这表明知识普及能有效提升技术接受度。

表 5 基于市民认知度的多重响应分析表

名称	选项	频数	百分比 (%)	累积百分比 (%)
您是否支持推广新能源公交车？	A. 非常支持	265	39.26	39.26
	B. 支持	260	38.52	77.78
	C. 中立	99	14.67	92.44
	D. 不支持	19	2.81	95.26
	E. 非常不支持	32	4.74	100.00
您是否了解太阳能光伏发电技术？	A. 非常了解	328	48.59	48.59
	B. 了解一些	234	34.67	83.26
	C. 不了解	113	16.74	100.00
	非常支持	228	33.78	33.78
您是否支持在公交收发站安装光伏板为新能源车辆充电？	支持	282	41.78	75.56
	中立	113	16.74	92.30
	反对	29	4.30	96.59
	强烈反对	23	3.41	100.00
您认为在公交车收发站安装太阳能光伏板对城市环保的贡献如何？	A. 贡献非常大	226	33.48	33.48
	B. 贡献较大	290	42.96	76.44
	C. 贡献一般	100	14.81	91.26
	D. 贡献较小	36	5.33	96.59
	E. 没有贡献	23	3.41	100.00
您是否支持在公交车收发站安装太阳能光伏板，为新能源公交车充电？	A. 非常支持	237	35.11	35.11
	B. 支持	277	41.04	76.15
	C. 中立	110	16.30	92.44
	D. 不支持	25	3.70	96.15
	E. 非常不支持	26	3.85	100.00
合计		675	100.0	100.0

3.3. 司机问卷分析

3.3.1. 多重响应分析——司机视角下对新能源公交车的态度

如表6所示，公交车司机普遍认可新能源公交车在减少尾气排放、减少噪音污染方面有显著优势，且认为新能源公交车主要存在充电时段集中、充电桩不足和充电速度慢三个方面的问题。司机普遍希望提升充电速度，提高运营效率。对充电的便捷性和稳定性有较高要求。

表6 基于公交车司机的多重响应分析表

题号	选项内容	响应比例	排序	个案百分比
Q6	充电时段集中	100%	1	100%
	充电桩不足	97.30%	2	97.30%
	充电速度慢	32.43%	3	32.43%
Q13	充电速度	100%	1	100%
	操作便捷性	81.08%	2	81.08%
	设备稳定性	75.68%	3	75.68%

3.3.2. 相关性分析——公交车司机对光伏的接受度

研究数据（表7）显示，光伏认知度与用户接受度呈显著正相关，其中94.59%的受访者更关注长期成本优化而非短期电价差异，同时充电效率的提升对技术推广具有关键作用，这三方面共同构成了光伏技术推广应用的重要基础。

表 7 公交司机光伏接受度相关性分析表

变量	相关系数	显著性
光伏认知程度	0.71**	p<0.01
运营成本降低预期	0.83***	p<0.001
充电速度关注度	0.65*	p<0.05

3.3.3. 优先级矩阵——量化需求改进方向

优先级矩阵分析（如表8）表明：充电速度改进需求最迫切（关注度100%，相关系数0.65），是系统效能提升的关键瓶颈；电价成本虽优先级最低，但满意度接近临界值，需建立成本预警机制。

表 8 缺陷改进优先级矩阵分析表

需求维度	重要性	当前满意度	改进紧迫度
充电速度	9.8	6.2	高
设备稳定性	8.7	7.1	中
操作便捷性	8.5	7.8	中
电价成本	6.3	5.9	低

评分标准：10分量表，数据基于Q12/Q13/Q20综合计算

3.4. 企业管理人员问卷分析

3.4.1. 充电设施现存问题的结构化分析

根据企业调研数据（如图24），现有充电设施面临四大核心挑战：
空间布局失衡（89.74%），区域供需不匹配导致利用率不均；电力容量瓶颈（84.62%），制约新能源公交规模化推广；运营成本高企（82.05%），电费及维护成本影响经济效益；智能化管理缺失（92.31%），缺乏智能调度系统降低资源配置效率。

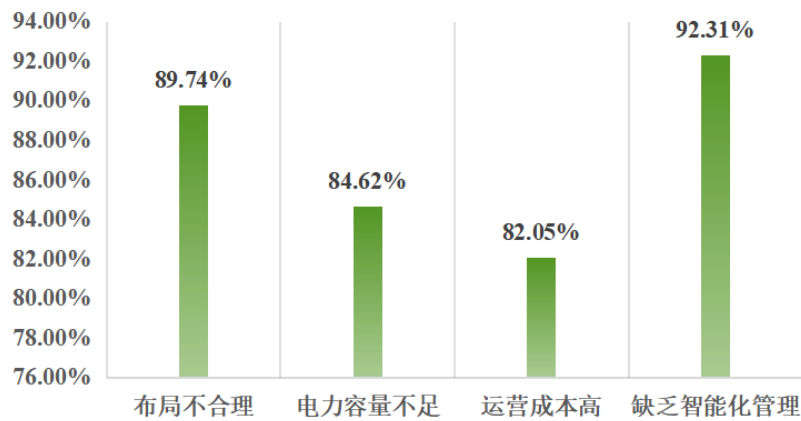


图24 充电设施现存问题条形图

3.4.2. 线性回归分析——企业参与模式与投资决策

通过线性回归分析发现（如表9），企业不同部门人员对项目关注点（初始投资、技术可靠性、施工影响、后期维护）与其所在部门无显著相关性（ $p>0.05$ ），模型解释力 $R^2=0.115$ 。这表明企业管理人员在推进项目时，更注重全局效益而非部门局部利益，验证了战略决策的整体性特征。

表 9 企业管理人员对光伏项目关注度分析表

变量	非标准化系数（B）	标准化系数	t值	p值	VIF值
初始投资过高	-0.514	-0.215	-1.019	0.315	1.715
技术可靠性	-0.858	-0.405	-1.942	0.060	1.670
施工影响运营	-0.576	-0.168	-0.897	0.376	1.345
后期维护复杂	0.250	0.087	0.511	0.613	1.104
模型拟合	$R^2=0.115$ ，调整 $R^2=0.011$ ， $F(4,34)=1.102$ ， $p=0.371$				

4. 研究结论

4.1. 多元主体需求分析

攀枝花市市民、司机与企业管理人员的互动关系呈现多维交织特征（如图25）。市民群体以74.22%的光伏支付意愿和90.22%的收益共享支持率，为企业提供市场需求基础；司机群体则通过100%的充电速度关注度、97.3%的充电桩不足反馈，倒逼企业优化充电网络布局和提升设备功率；企业基于市民支付意愿与司机操作需求，在政府PPP模式框架下平衡投资风险与长期收益。

政策作为关键纽带，需响应市民诉求，强化基础设施投资，推动企业实施核心区充电设施覆盖与智能调度系统建设。最终实现“需求驱动—技术响应—政策保障”的系统性优化，破解新能源公交车推广中的协同困境。

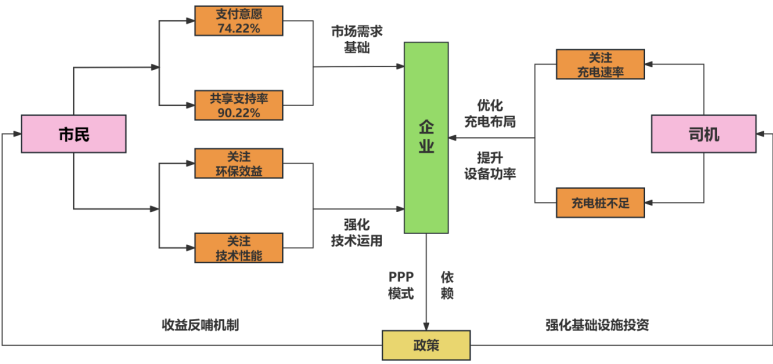


图 25 多维需求联动图

4.2. 光伏车棚模式解决社会难题

攀枝花市公交场站“光伏+车棚”模式通过空间优化、技术创新与利益共享，系统性破解新能源公交车推广中的协同困境，为实现“双碳”目标提供可复制的实践范式。

（1）响应市民需求

依托市民较高的光伏支付意愿与社区共享支持率，“光伏+车棚”模式通过“技术应用+收益反哺”机制，可将光伏发电收益定向用于社区共享，既满足市民对环保效益的核心诉求，又通过社区共建提升公众参与感，形成“技术推广—社会福利—公众支持”的良性循环。

（2）公交车司机痛点破解

针对充电速度慢与充电桩不足的问题，“光伏+车棚”模式可利用场站空间新增充电桩，结合智能调度系统优化充电时段，将传统“集中充电”转为“日常补电”，降低司机运营压力。同时，光伏供电可减少电费支出，呼应94.59%的经济性诉求。

（3）企业瓶颈突破

通过“光伏发电+储能+余电上网”的设计，攀枝花市公交场站可实现自发自用与余电上网协同，能有效缓解企业面临的结构性矛盾：降低电网依赖、实现智能管理、提升资源配置效率和优化空间利用率。同时，光伏作为重点发展领域，可通过PPP模式吸引社会资本，形成“政府引导+市场运作”的可持续机制，助力企业突破8.5%的IRR阈值，推动新能源公交规模化发展。

4.3. 场站空间资源配置问题

基于攀枝花市20个典型公交场站的实地调研数据，研究发现当前场站空间资源配置存在系统性失衡问题，亟需通过光伏车棚建设实现结构性优化。

（1）空间利用效率低下

调研数据显示，64%的场站存在设施布局混乱问题，平均空间利用率不足40%。特别是老旧场站普遍存在充电区与停车区交叉混用现象，导致光伏组件安装面积受限。

（2）充电设施供需错配

当前充电桩布局呈现“核心区过载、边缘区闲置”的特征，89.74%的场站存在充电排队现象。数据表明，充电桩数量与新能源公交车保有量的配比仅为1:3.2，远低于1:2的行业标准。

（3）电力基础设施滞后

82.05%的场站面临电力容量瓶颈，电力成本压力显著，调研场站的平均电费支出占运营总成本的35%以上，其中峰时电价（0.75元/kWh）进一步加剧了企业的经济负担。

5. 研究建议

5.1. 多元主体协同推进机制

5.1.1. 政府层面：强化政策保障与统筹协调

攀枝花市建立交通、能源、财政等多部门协同机制，将公交场站光伏改造纳入城市更新项目库，优化土地审批和电网接入流程；同时创新金融模式，推行光伏收益权资产证券化（ABS）和碳收益权质押贷款（基于四川碳市场58元/吨交易价），提升项目融资吸引力。

5.1.2. 企业层面：推动技术创新与市场化运营

攀枝花市公交场站通过AI算法优化充电调度，结合实时电价动态调整充电时段；创新推出“光伏公交月票”阶梯优惠和“基础电价+碳积分”双轨制，增强市民支付意愿；建立收益共享机制，公交场站充电设施社会化运营，开放共享充电桩是破解资源错配、实现多方共赢的智慧选择[10]，将30%光伏收益投入社区充电基金，形成政企民三方共建模式，使公众支持率达90.22%。

5.1.3. 社会层面：深化公众参与与低碳生态构建

公众科普与体验：在公交枢纽设置“绿色能源科普角”，增进公众对清洁能源的了解；开设“新能源公交开放日”，邀请市民参与车辆充电全流程，提升技术认知度。激发其参与低碳行动的主观意愿，为绿色出行生态营造社会基础。

5.1.4. 技术实施建议

5.1.5. 场站空间资源优化与充电设施改造

基于实地调研发现公交场站存在场地规划不合理及充电桩不足等问题，通过测量评估，对现有场站空间进行改造（如表10）。一方面在现有建筑物屋顶（如维修车间、候车亭等）安装光伏组件（如图26、图27），总铺设面积达2690m²；另一方面对原有露天停车区进行改造，加装光伏车棚，新增可铺设面积2950m²。改造结果为：公交场站停车车位达570个，充电桩总数达286个，实现桩车比1:1.8的优化目标。

表10 攀枝花市各公交场站可铺设面积和充电桩改造情况

区域	已有车位数 (个)	新增车位数 (个)	屋顶可铺设面积 (m ²)	其他可铺设面积 (m ²)	充电桩总数 (个)
米易县	23	45	410	0	33
盐边县	38	15	300	0	31
东区	149	58	1680	0	102
西区	0	3	0	0	1
仁和区	184	55	300	2950	119
总计	394	176	2690	2950	286

数据来源：实地清点、实地测量和公交公司提供的资料



图26 光伏车棚与周围建筑结合（a）



图27 光伏车棚与周围建筑结合（b）

5.1.6. 光伏车棚发电模式探索与季节应用优化

针对攀枝花市20个公交场站的电力供需特点，基于实地调研发现的电力容量瓶颈等问题，研究提出构建“自发自用+储能调节+余电上网”三级消纳体系（如图28），即将并网式太阳能发电与储能装置相结合，并将盈余电量通过智能并网装置馈入公共电网，按照当地基准电价执行余电上网交易。

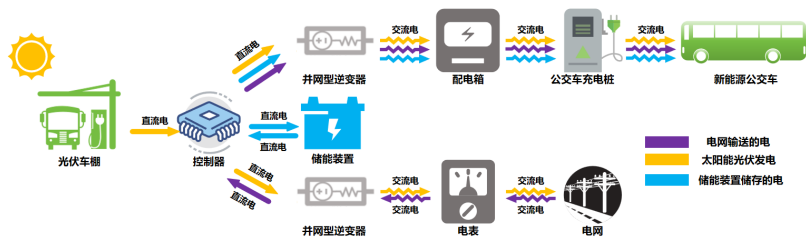


图28 攀枝花市公交场站光伏发电拟定用电模式图

光伏系统通过逆变器将直流电转换为交流电供公交车充电。发电富余时，电能先储存后并网；发电不足时，由储能装置供电，缺额由电网补充并利用谷段电价降低成本。

本研究针对攀枝花市光伏车棚系统提出分季优化方案（如表11）。春秋季采用“自发自用+余电上网”模式；夏季实施动态负荷管理及谷段电力补充以应对高温；冬季利用组件低温高效特性，结合储能系统调峰保障供电。

表11 攀枝花市东区、西区光伏发电系统优化方案

季节	发电特点	核心策略
春、秋季 (3~5月、9~11月)	发电稳定，温度适宜	优先消纳本地发电，满足日常需求 盈余电量储存，余电上网交易
夏季(6~8月)	高温效率低，制冷需求激增	实施动态负荷管理，限制非必要负载 低谷时段购电补充
冬季(12~2月)	低温效率高，光照短	依赖储能供电，正午高峰时段集中充电

5.2. 实施路径探索

试点探路（2025~2026）：选择3个具有代表性的场站作为示范点，重点验证“光伏+储能+智能调度”系统的技术经济性。此阶段将完成570个停车位改造和286个充电桩建设，建立发电量监测平台，收集完整的运行数据。同步开展市民光伏积分试点，测试社会接受度。

推广阶段（2027~2028）：根据示范项目运行数据，优化技术方案和管理制度。重点解决夏季高温效率下降和冬季储能调度等季节性问题，完善智能调度算法。将改造范围扩大至全市20个场站，实现光伏电力满足60%的公交充电需求。建立政企社协同管理平台，健全收益分配机制。

全域覆盖（2029~2030）：形成完整的“光伏发电-公交运营-社区共享”循环体系。推动光伏车棚标准纳入地方建设规范。通过碳交易等市场化手段提升项目收益，确保长期可持续运营。最终将攀枝花模式向省内其他城市推广，为四川省交通领域碳中和提供示范样板。

参考文献

[1] 李鹏, 孙静琳, 于玲玲.探秘可再生能源电解海水制氢新蓝海——专访北京化工大学孙晓明教授 [J].太阳能, 2025, (6): 5-12.DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20250604.01.

[2] 廖凯, 向悦萍, 岑怡繁, 等.交通能源融合发展的典型场景、关键问题与发展建议 [J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2025, 22(3): 1-22.DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20250427001.

[3] SAIMAN H, MUHAMMAD T, ANS M Z, et al.Assessment and optimization of carport structures for photovoltaic systems: A path to sustainable energy development [J].Energy Conversion and Management, 2023, 295.

[4] GIULIA S D, PAOLO P, LAURA M .Photovoltaic road pavements as a strategy for low-carbon urban infrastructures [J].Heliyon, 2023, 9(9): e19977-e19977.

[5] 刘小容.光伏停车棚城市“充电宝” [N].合肥晚报, 2025-03-25(A03).DOI: 10.28337/n.cnki.nhfwb.2025.000609.

[6] 许雪记, 徐文文, 殷承启, 等.江苏省高速公路站区光伏能源综合利用研究 [J].能源环境保护, 2020, 34(2): 43-47.

[7] 全球最大光伏发电车棚杭州湾在建 [J].墙材革新与建筑节能, 2015 (12): 67.

[8] 黄晓丽, 张江平, 唐光荣, 等.“双碳”目标下光伏发电助力乡村振兴的探讨——以攀枝花市为例 [J].农村经济与科技, 2023, 34(2): 66-69.

- [9] 朱厚霖,周春艳,贾金凯.基于“双碳”目标下公交车站太阳能光伏潜力研究——以吉林省长春市为例 [J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2024, 25(2): 88-96.
- [10] 曹家瑞,林杰,林芳,等.厦门公交场站充电设施社会化运营新思考——厦门公交集团有限公司探索绿色低碳转型升级之路 [J]. 人民公交, 2025, (9): 35-37.DOI: 10.16857/j.cnki.cn11-5903/u.2025.09.002.