第53卷第11期
2025年11月

华南理工大学学报（自然科学版）
Journal of South China University of Technology
（Natural Science Edition）

Vol. 53 No. 11
November 2025

doi：10. 12141/j. issn. 1000-565X. 250070

面向净功率最大化的车载光伏系统气动性能优化

罗玉涛　林志强

（华南理工大学 机械与汽车工程学院/广东省汽车工程重点实验室，广东 广州 510640）

摘　要：当前对车载光伏系统的研究多侧重于通过优化折叠机构增加光伏板安装面积来提升发电功率，忽视了发电功率与系统附加阻力能耗协同优化的问题。该文以提升车载光伏系统净功率为目标，通过优化车载光伏系统的气动性能，减小系统给车辆附加的阻力能耗，从而提升系统净功率。首先，以折叠式车载光伏系统为对象，设计了符合空气动力学原理的高透光率整流罩和车载光伏系统尾翼；然后，选取前倾角、后背角和系统高度3个设计变量对整流罩外形进行优化，通过构建正交试验方案，由极差分析得到3个设计变量对气动阻力的影响程度为系统高度>前倾角>后背角，由主效应图分析得3个参数对系统气动阻力的影响均具有单调性，由此确定整流罩外形结构参数为：前倾角70°，后背角0°，系统高度100 mm；进而，对车载光伏系统尾翼攻角进行优化，对实验数据构建三次样条插值近似模型，得到升阻比最优的尾翼攻角为33. 96°。将安装了该文所提出的车载光伏系统的车辆与未安装该系统的车辆进行对比，发现空气阻力系数降幅达44. 59%，气动阻力降幅达22. 45%；升力系数降幅达226. 15%，升力方向由向上转为向下，消除了气动升力向上给整车操控和安全性能带来的不利影响。与原始车辆模型对比，空气阻力系数降幅达17. 35%，气动阻力仅增加3. 14 N，基本消除了车载光伏系统对车辆气动性能的负面影响。该文还对优化前后的车载光伏系统净功率进行了对比和分析，发现所提出的优化方案可有效提升车载光伏系统在车辆行驶时的净发电功率，当车速为40. 0 m/s时，净功率差达7723. 62 W。

关键词：车载光伏系统；气动性能优化；净功率

中图分类号：U463.99　　**文章编号：**1000-565X（2025）11-0122-10

目前国家正大力推动光伏产业的发展，将光伏与汽车结合，通过太阳能直接为车辆供电，可降低对传统燃油和电网电力的消耗，助力交通领域碳减排。国内外学者对光伏在汽车上的应用进行了大量的研究，例如：林泽权等[1]基于典型气象数据对光伏汽车的年发电性能进行了分析，证明光伏汽车比常规电动汽车的年充电量可减少78%以上；孟宝[2]设计了一种汽车折叠式光伏追光系统，增加了车载光伏的安装面积，同时实现了追光功能；王鑫恫[3]设计了光伏电动汽车自动追光系统的机械结构和光伏电动汽车能量管理系统；赵轩[4]设计了房车光伏电池折叠机构和自动追光系统，优化了其减振性能，提升了系统的使用寿命；Araki等[5]研究了汽车外形对车载光伏系统发电量的影响。这些研究侧重

收稿日期：2025-03-14

基金项目：广东省2024年省级制造业当家重点任务保障专项资金（先进电驱动系统研发及产业化应用）项目（穗工信函[2024]60号）；广州市科技计划项目（2023B01J0016）

Foundation item：Supported by the Guangdong Province 2024 Industrial Infrastructure Reconstruction Project

作者简介：罗玉涛（1972—），男，教授，博士生导师，主要从事无人驾驶汽车和新能源汽车研究。E-mail：ctytluo@scut. edu. cn

于通过设计折叠机构和自动追光系统来提升车载光伏系统的发电功率，忽略了车载光伏系统对车辆气动性能的影响。研究表明，当车速为 60 km/h 时，克服气动阻力需消耗 30%~40% 的行驶总功率；若车速进一步达到 150 km/h，则 65%~75% 的行驶功率将用于克服气动阻力[6]。因此，对车载光伏系统进行气动性能优化，减少系统的附加气动阻力做功，可有效提升系统的工程应用价值。

综上，在研究车载光伏系统时应注重净功率（即系统发电功率与系统附加阻力消耗的功率之差）这一核心性能指标。文中以常见乘用车为原型车，设计了一种折叠式车载光伏系统的机械结构，基于系统对车辆气动性能的影响分析，设计了高透光率整流罩和尾翼，通过优化系统的气动性能，抑制系统对车辆附加的气动阻力，以期提高车载光伏系统的净功率。

1　车载光伏系统的结构设计及对车辆气动性能的影响

独立式车载光伏系统采用类似车顶行李架的安装方式，突破了车顶固有面积的限制，通过折叠式拓扑结构扩展光伏电池板布局，从而提升了系统功率输出和车辆续航里程，具有很高的实用价值。

1.1　折叠式车载光伏系统初始结构的设计

文中所设计的折叠式车载光伏系统结构如图 1 所示。该系统基于常规乘用车的车顶实际面积设计，由 3 块光伏电池组成，包含 2 层结构，其中光伏电池 1 和 2 位于顶层，光伏电池 3 可折叠收纳于光伏电池 2 下方，展开时光伏电池 3 位于车头上方。

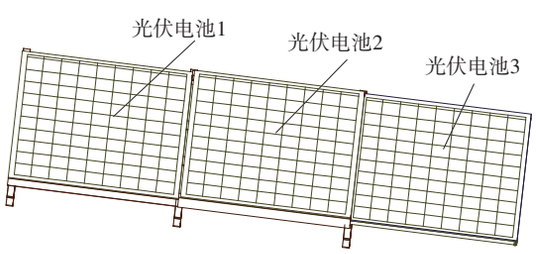


图 1　折叠式车载光伏系统的结构

Fig. 1　Structure of foldable vehicle-mounted photovoltaic system

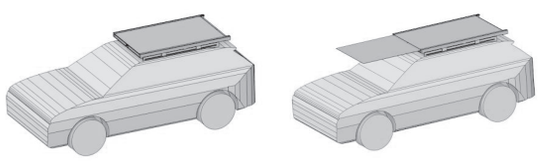
在规定标准的 AM 1.5G 辐照度（1 000 W/m^2）下，所用的 3 块光伏电池的额定输出功率均为 300 W，根据式（1），计算得系统发电功率 P_{out} 为 714.78 W。以全国日照平均时间 2.84~6.70 h/d 计算，其日均发电量为 2.03~4.79 kW·h[7]。

$$P_{out} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot P_{PV} \tag{1}$$

式中：η_1 为光伏电池实际发电功率与额定功率的折算系数，取 0.95；η_2 为光伏组件不匹配和光伏板间连线损失的折算系数，取 0.95；η_3 为因安装角度固定造成的效率损失的折算系数，取 0.88；P_{PV} 为光伏系统额定发电功率，取 900 W。

1.2　折叠式车载光伏系统的安装

折叠式车载光伏系统在车辆上的安装如图 2 所示。在车辆行驶过程中，该系统的光伏电池 3 收起，仅由光伏电池 1 和 2 工作；在车辆长时间停车时，折叠结构展开，3 块光伏电池共同工作，提高系统的发电功率。



（a）车辆行驶状态　　（b）车辆停止状态

图 2　折叠式车载光伏系统在车辆上的安装示意

Fig. 2　Schematic diagrams of the installation of foldable vehicle-mounted photovoltaic system

1.3　折叠式车载光伏系统对车辆气动性能的影响

基于数值仿真及优化方法研究折叠式车载光伏系统的气动阻力，以及该系统对车辆气动性能的影响，使用的流体力学软件为 ANSYS Fluent。选用雷诺时均法（RANS）作为模拟方法[8]，湍流模型选择 SST k-ω 湍流模型[9]。

1.3.1　计算域设置

计算域是用来模拟车辆行驶的外部空间，需考虑计算精确度和效率，通常要求阻塞比 φ 小于 5%，阻塞比的计算公式见式（2）。根据文献[10]，如图 3 所示，计算域入口需距离模型 3 倍模型长度（3L），以保证均匀的气流流入；计算域出口需距离模型尾部 7 倍模型长度，以保证模型尾部流场的完整；左右边界与顶部需距离模型 5 倍模型宽度，以有效避

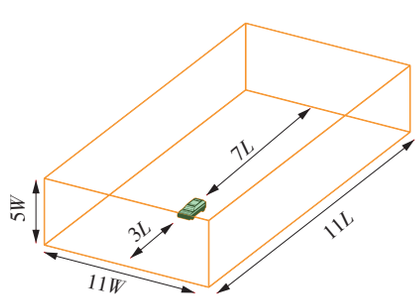


图 3　计算域

Fig. 3　Computational domain

免边界对模型外流场的干扰。经计算得仿真计算域的阻塞比为1.43%，符合要求。

$$\varphi = \frac{A_{\mathrm{ref}}}{WH} \times 100\% \tag{2}$$

式中：A_{ref}为仿真模型的正投影面积，取3.15 m^2；W为计算域宽度，取22 m；H为计算域高度，取10 m。

1.3.2 模型设置

所用SUV车型的等比例模型如图4所示。文中主要探讨折叠式车载光伏系统对车辆整体气动性能的影响，因此简化了车辆后视镜、轮毂、车头格栅等小型构件，以提升计算效率。

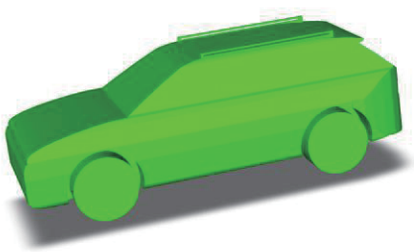


图4 SUV等比例模型

Fig. 4 Scale model of an SUV

1.3.3 网格无关性验证

如图5所示，选用4层网格局部加密方案，通过改变加密区网格的尺寸来改变网格总数，对应的空气阻力系数C_{d}和升力系数C_{l}如表1所示。可以看出，在网格数从5.12×10^{6}增加到36.63×10^{6}的过程中，当网格数达到8.71×10^{6}时，继续增大网格数后续仿真结果相差不大，误差在1%以内，说明网格尺寸在达到此数量时已经具备相当高的精度。因此，文中选用表1中编号2的网格加密方案。

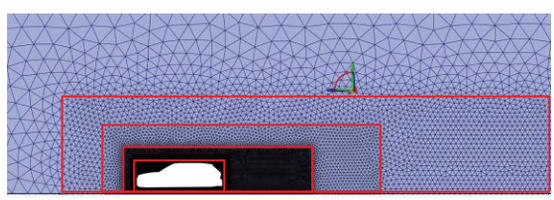


图5 网格加密示意图

Fig. 5 Schematic diagram of mesh refinement

表1 网格无关性验证结果

Table 1 Results of mesh independence verification

编号	加密网格尺寸/mm				体网格数/10^6	C_{d}	C_{l}
	1层	2层	3层	4层			
1	15	52	200	300	5.12	0.432	−0.0100
2	10	52	200	300	8.71	0.415	−0.0081
3	8	52	200	300	15.38	0.411	−0.0080
4	6	30	150	300	36.63	0.412	−0.0082

为进一步验证仿真设置的准确性，使用编号2的网格加密方案和上文所述相同的数值模拟设置，对标准Mira阶背式汽车模型进行仿真计算，对比谷正气等[11]在HD-2风洞中用Mira模型组开展试验获得的空气阻力系数。文中数值模拟方案得到的标准Mira阶背式汽车模型的空气阻力系数为0.330，风洞试验的空气阻力系数为0.322，相对误差为2.48%，小于工程允许误差(5%)，说明文中所使用的数值模拟方案与模型可靠性较高。

1.3.4 仿真结果分析

加装折叠式车载太阳能系统后，车辆的空气动力学性能参数变化如表2所示。可以看出，安装折叠式车载光伏系统使车辆的空气阻力系数C_{d}从0.415上升到0.619，升力系数C_{l}由−0.008变为0.065；C_{d}值上升49.2%，同时升力系数由负变正，代表气动升力方向由向下转为向上。在30.0 m/s时，系统附加气动阻力达到111.84 N，此时系统附加气动阻力做功功率已超过系统最大发电功率。

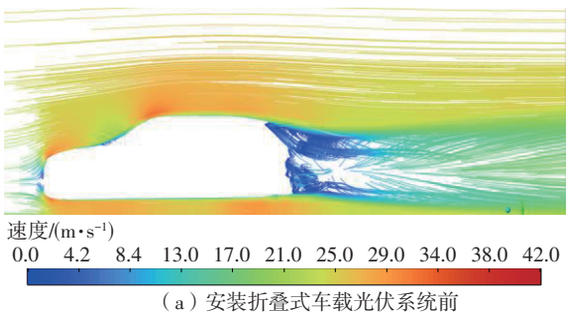
表2 加装折叠式车载光伏系统对车辆空气动力学性能的影响[1)]

Table 2 Impact of foldable vehicle-mounted photovoltaic system on vehicle aerodynamic performance

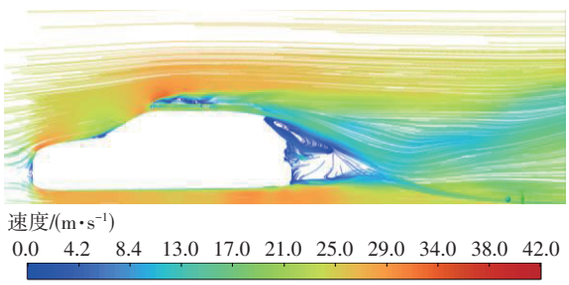
车辆类别	C_{d}	F_{D}/N	C_{l}	F_{C}/N
原型车	0.415	372.42	−0.008	−7.22
安装后	0.619	484.26	0.065	57.61

1)表中结果在车速为30.0 m/s的条件下仿真得到，F_{D}为气动阻力，F_{C}为气动升力。

安装车载光伏系统前后车辆的外流场速度流线图见图6。对比可知，折叠式车载光伏系统破坏了原型车车顶气流的流动状态，在系统顶部产生了一个旋涡区，同时，对车身尾流场的气流流动也产生了影响，车顶与系统间隙区域流速有较大程度的降低，这导致了下洗气流对尾流场中空气的剪切力变小，形成了一个大面积的尾部旋涡区。两个旋涡的产生将消耗大量动能，使旋涡区的压力降低，从而增大整车受到的压差阻力，造成整



（a）安装折叠式车载光伏系统前



（b）安装折叠式车载光伏系统后

图6　安装折叠式车载光伏系统前后车辆的外流场速度流线图

Fig. 6　Velocity streamline diagrams in the external flow field of the vehicle before and after the installation of foldable vehicle-mounted photovoltaic system

车所受空气阻力增大。同时，车顶的电池板前端结构受到了前方高速来流的冲击，产生阶梯效应，导致气流分离，产生湍流和压差阻力，使阻力增大。另外，车顶压力的减小改变了整车气动升力的方向，向上的气动升力在车辆高速行驶时会影响车辆的操控性能，存在安全隐患。综上，要优化车载光伏系统的气动性能，关键是提高系统前部气流的分离平顺性，减轻阶梯效应，减小系统头尾的压力差；同时，对尾部气流进行引导，降低尾部湍流能耗。

2　折叠式车载光伏系统气动性能优化

由于缺少导流装置，折叠式车载光伏系统前端会产生严重的流动分离现象，尾部边界层无法获得有效动量补偿，形成大范围低速区域，造成车辆气动性能的恶化。为折叠式车载光伏系统设计高透光率整流罩和尾翼，可在不影响系统发电功率的前提下优化系统的气动性能。

2.1　高透光率整流罩的设计

通过对折叠式车载光伏系统进行仿真计算，得到图7所示的压力云图。由图7可以看出，系统前端对气流存在明显的阻碍作用，出现高压区，系统头部和尾部压力差达388 Pa左右，这增大了系统的压差阻力，而压差阻力在空气阻力中的占比

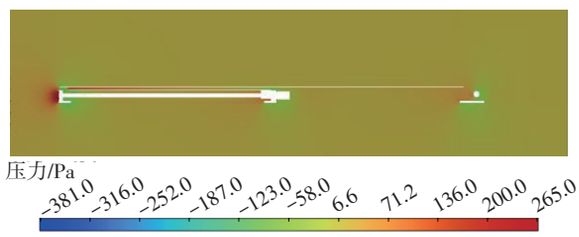
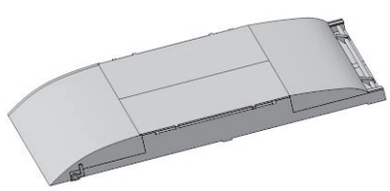


图7　折叠式车载光伏系统的压力云图

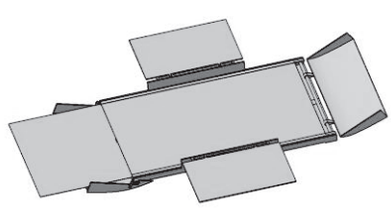
Fig. 7　Pressure contour map of foldable vehicle-mounted photovoltaic system

在55%~65%之间[12]，是影响空气阻力大小的主要因素。

所设计的整流罩如图8所示，其材料为聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）。PMMA的透光率可达92%以上，使得系统在整流罩处于关闭状态下仍可保持良好的发电功率；而且其耐候性和刚性优良，可为光伏电池板提供良好的保护；同时，其易于加工，适用于制造折叠式车载光伏系统整流罩。整流罩主体可分为4部分，前后两部分为流线型曲面机构，中间的左右两部分为平面结构，展开方式均为翻折打开，角度可根据实际周边环境情况调整。



（a）整流罩关闭状态



（b）整流罩打开状态

图8　整流罩的结构

Fig. 8　Structure of the fairing

2.2　整流罩对系统气动性能的影响

整流罩将折叠式车载光伏系统包围成一个整体，将原本外露的光伏板与车身表面平滑过渡，消除了光伏板边缘的阶梯效应。同时，整流罩避免了滚珠丝杆和电机等内部构件与高速气流直接接触，减少了对气流的干扰，从而降低了干扰阻力。前部和尾部的流线型结构也有助于减轻气流分离现象，并起到导流作用，有效填补了尾部气流真空区，减小了系统整体的压差阻力。

加装整流罩后，系统的压力云图如图9所示。从图9可以看出，流线型曲面结构有效增大了系统尾部的压力，进而改善了系统的头部和尾部压力差，压差降低至195 Pa左右，压差阻力大幅减小。

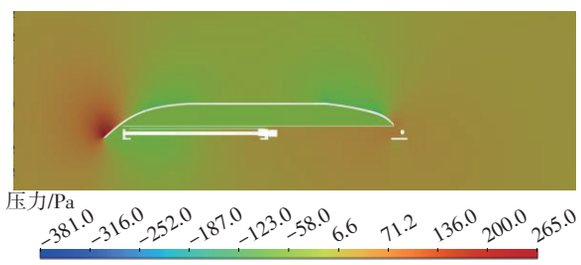
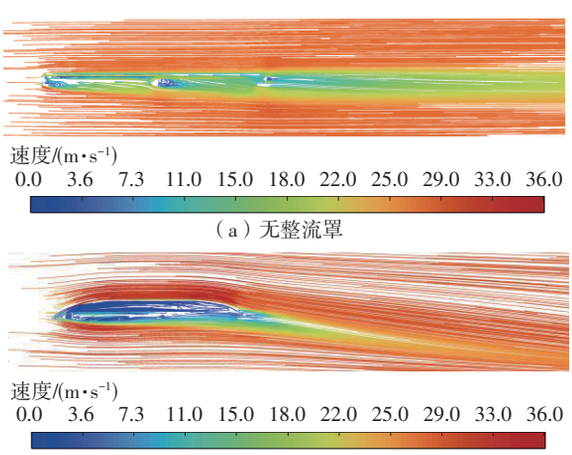


图9 安装整流罩后系统的压力云图

Fig. 9 Pressure contour map of the system after fairing installation

折叠式车载光伏系统的速度流线图见图10。可以看出：安装整流罩后，系统前端的气流过度平滑，降低了由阶梯效应引起的压差阻力和湍流耗能；同时，整流罩外形对气流的引导作用大幅减小了尾部低速流场区域的面积，有助于减小系统尾部的旋涡区面积，从而降低系统的压差阻力。



(a) 无整流罩

(b) 有整流罩

图10 折叠式车载光伏系统的速度流线图

Fig. 10 Velocity streamline diagrams of foldable vehicle-mounted photovoltaic system

2.3 整流罩外形的优化

2.3.1 整流罩外形优化模型的建立

建立优化模型需要确定3个要素：目标函数、设计变量和约束变量。整流罩外形优化的目的在于车载光伏系统的气动减阻，因此文中选取系统气动阻力作为目标函数。气动阻力F_D的计算公式如下：

$$F_D = \frac{1}{2}\rho v^2 C_d A \tag{3}$$

式中，ρ为流体密度，v为来流速度，C_d为气动阻力系数，A为正投影面积。

在几何形体的气动优化中，前倾角影响气流分离点，若减小前倾角，气流分离点将前移，产生更大的湍流区，使阻力增大，但可能改善系统气动升力；增大前倾角，则可带来更平缓的气流分离路径，减少湍流，降低正面迎风阻力，但前倾角过大可能导致气流贴附不足。后背角可控制尾流区的压力梯度，抑制涡旋脱落；整流罩高度则直接影响系统的正投影面积[13]。因此，选择设计变量(优化参数)如下：整流罩前倾角(°)、后背角(°)和系统高度(mm)，如图11所示。

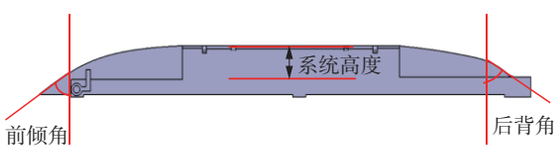


图11 优化参数示意图

Fig. 11 Schematic diagram of optimized parameters

约束条件的选取需考虑实际需求和限制。前倾角定义为系统光伏板前端边缘处垂线与整流罩前缘轮廓线之间的夹角，该位置旨在确保气动优化时整流罩开合功能不受干扰。若将前倾角参考点右移，则在小倾角工况下易引发整流罩与光伏系统的结构干涉，导致功能失效。后背角定义为光伏板后端边缘处垂线与整流罩尾部曲线之间的夹角，选择此位置是为了保证优化过程中后背角的取值不会使光伏板超出整流罩边界。系统高度定义为车载光伏系统顶面和整流罩顶面之间的距离，因整流罩展开的驱动电机和相关机械结构需安装在内，所以系统高度应大于100 mm。以上3个设计变量的具体取值范围如表3所示。

表3 正交试验因素设置及水平数

Table 3 Factor setting and level number of orthogonal test

参数	取值上限	取值下限	水平数
前倾角/(°)	70	10	4
后背角/(°)	60	0	3
系统高度/mm	200	100	3

2.3.2 正交试验结果与分析

正交试验法可以高效地分析各因素对实验结果的影响，并通过极差分析来确定各因素对结果的影响程度及其重要性[14-15]。根据所设计的正交试验表开展实验，得表4所示结果，表中C_d和F_D在仿真车速为30.0 m/s时测得。对正交试验结果进行极差分析，确定各因素的主次顺序和最优水平组合。由表4可以看出，对系统气动阻力影响最大的因素是系统高

表4　正交试验结果及分析

Table 4　Results and analysis of orthogonal test

编号	前倾角/(°)	后背角/(°)	系统高度/mm	C_d	F_D/N	C_l	F_C/N
1	10	0	100	0.62	44.15	1.07	78.66
2	10	30	150	0.63	48.85	1.09	79.00
3	10	60	200	0.65	53.66	1.19	85.91
4	30	0	150	0.58	45.27	0.99	76.75
5	30	30	200	0.64	53.17	1.08	78.82
6	30	60	100	0.60	43.04	1.19	85.55
7	50	0	200	0.60	47.39	1.02	77.24
8	50	30	100	0.56	39.83	1.10	78.98
9	50	60	150	0.58	45.05	1.18	85.25
10	70	0	100	0.46	33.30	0.98	74.61
11	70	30	150	0.47	37.19	1.09	79.02
12	70	60	200	0.53	49.07	1.10	80.62
k_1	48.89	42.53	40.08				
k_2	47.16	44.76	44.09				
k_3	44.09	47.70	50.82				
k_4	39.85						
极差	9.04	5.17	10.74				
最优方案	70	0	100				

度，其次是前倾角，最后是后背角，最优方案组合为前倾角70°、后背角0°、系统高度100 mm。

根据极差分析结果，绘制Pareto图(见图12)和主效应图(见图13)。从图12可以看出，系统高度和前倾角是影响系统气动阻力的主要因素，后背角对系统阻力的影响最小。从图13可以明显看出，系统阻力随着前倾角的增大而减小，随着后背角和系统高度的增大而增大。由主效应图还可看出，3个参数对系统气动阻力的影响均具有单调性，最终得到整流罩外形结构参数为：前倾角取70°，后背角取0°，系统高度取100 mm。

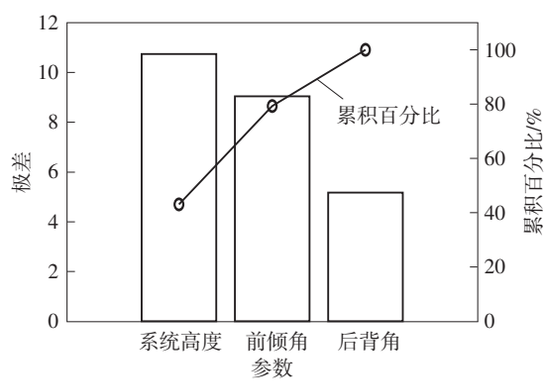


图12　Pareto图

Fig. 12　Pareto Chart

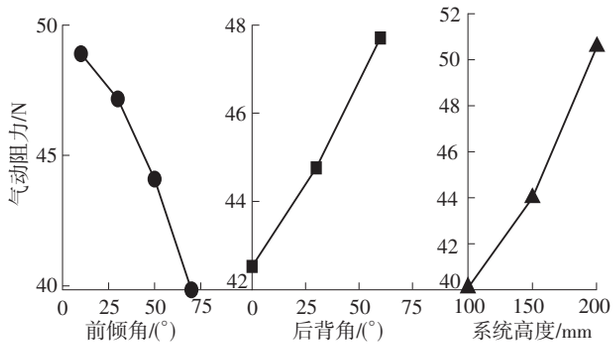


图13　主效应图

Fig. 13　Main effects plots

2.4　系统底部的封闭处理

图14为整流罩外形优化后系统的速度流线图。可以看出，通过外形的优化，前部气流平滑贴附表面，减少了气流分离区的面积，从而降低了压差阻力；同时，前部分离平滑，气流更顺畅地流经系统，减少了后方形成的涡流，从而降低了能量损耗，提升了气动效率，降低了整体阻力。但是，系统底部存在大范围空腔，气流流经此处时速度由33 m/s衰减至15 m/s以下，造成了能量损耗。选择将底部封闭，可在提升系统一体性的同时进一步提升系统气动性能。

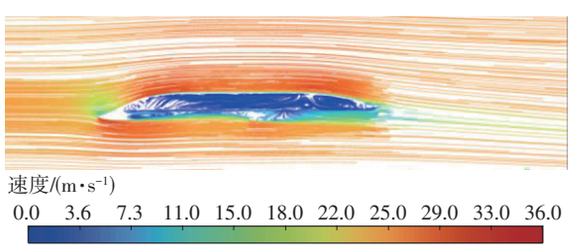


图14　优化后系统的速度流线图

Fig. 14　Velocity streamline diagram of the optimized system

使用波浪形底板进行封闭后，系统外流场速度流线图见图15。可以看出，系统底部气流贴附性更好，减少了边界层的分离，下方空气流速明显加快，低速区域大幅缩小，气动性能提升明显。

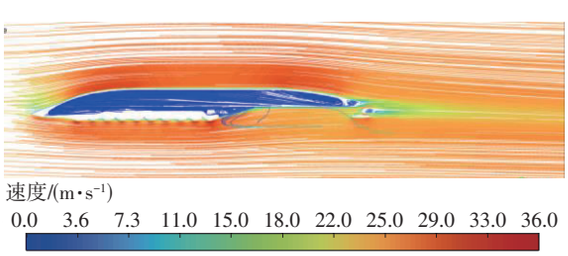
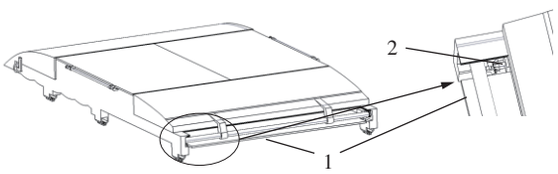


图15　底面封闭后系统的速度流线图

Fig. 15　Velocity streamline diagram of the system with the bottom surface being closed

2.5 车载光伏系统的尾翼设计

尾翼可优化尾部气流，降低车辆后方的空气乱流，从而减少行驶阻力。但安装了折叠式车载光伏系统后，车辆顶部空间有限，不便于安装尾翼。为解决此问题，在车载光伏系统尾部集成设计尾翼，以进一步减小车载光伏系统给车辆带来的附加行驶阻力，同时，尾翼还可以调节车辆的气动升力，提升行驶稳定性。车载光伏系统的尾翼结构如图16所示，图中角度可调的尾翼可适应不同的车辆需求。



1—尾翼所处位置；2—调整尾翼角度的电机和齿轮传动机构

图16 车载光伏系统尾翼结构示意图

Fig. 16 Schematic diagram of the rear wing structure for vehicle-mounted photovoltaic system

记尾翼初始角度(即水平状态)为0°，将顺时针转动角度记为负数，逆时针转动角度记为正数，根据尾翼实际结构，将尾翼的转动角度范围限制在-40°~40°之间，不同角度尾翼对应的整车空气阻力系数和升力系数如表5所示。

表5 不同尾翼角度下的仿真结果

Table 5 Simulation results obtained at different rear wing angles

尾翼角度/(°)	C_d	C_l	尾翼角度/(°)	C_d	C_l
40	0.343	−0.066	−10	0.360	0.049
30	0.347	−0.074	−20	0.358	0.048
20	0.360	0.017	−30	0.356	0.053
10	0.360	0.018	−40	0.357	0.066
0	0.356	0.050			

尾翼的性能通常用升阻比来评判，升阻比即C_l与C_d的比值。对表5数据进行升阻比计算，并采用三次样条插值拟合，曲线变化规律与实际变化相符[16-17]，拟合结果见图17。因C_l值为负数代表升力方向向下，因此升阻比最小值为最优点。

由三次样条插值结果可知，升阻比最小值出现在尾翼角度为33.96°时，对应的升阻比为-0.241。取尾翼角度33.96°进行仿真验证，得表6。

2.6 整车气动性能优化结果及分析

经整流罩外形和尾翼角度优化后，整车的气动性能参数对比见表7。可以看出：经过整流罩的气动优化和尾翼的共同优化，安装车载光伏系统车辆

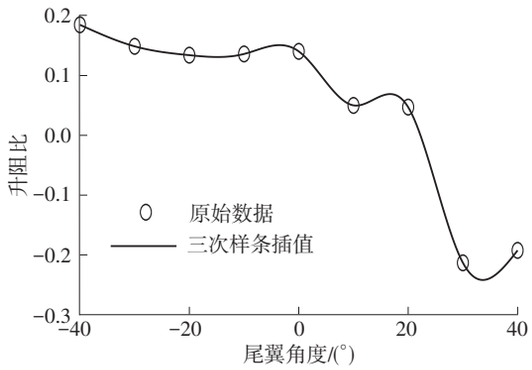


图17 三次样条插值拟合结果

Fig. 17 Fitting results of cubic spline interpolation

表6 最值点仿真验证结果

Table 6 Simulation verification results of extreme points

车速/(m·s^{-1})	尾翼角度/(°)	C_d	F_D/N	C_l	F_C/N
15.0	33.96	0.343	93.86	−0.086	−23.16
20.0	33.96	0.343	166.71	−0.085	−42.20
25.0	33.96	0.343	259.23	−0.083	−55.22
30.0	33.96	0.343	375.56	−0.082	−78.65
35.0	33.96	0.343	510.86	−0.080	−129.00
40.0	33.96	0.343	666.84	−0.079	−151.65

表7 整车气动性能对比

Table 7 Comparison of vehicle aerodynamic performance

对象	C_d	F_D/N	C_l	F_D/N
原型车	0.415	372.42	−0.008	−7.22
原型车+车载光伏系统	0.619	484.26	0.065	57.61
原型车+车载光伏系统+整流罩+尾翼	0.343	375.56	−0.082	−78.65

的空气阻力系数从0.619降低至0.343，降幅达44.59%；气动阻力从484.26 N降低至375.56 N，降幅达22.44%；升力系数从0.065降低至-0.082，降幅达226.15%；升力方向由向上转为向下，消除了气动升力向上对整车操控和安全性能带来的不利影响。与原始车辆模型对比，空气阻力系数从0.415降低至0.343，降幅达17.35%，气动阻力从372.42 N上升至375.56 N，仅增加了3.14 N。上述结果表明，经一系列优化后，车载光伏系统对车辆气动性能的影响大幅降低，提升了车载光伏系统的工程应用价值。

整车的外流场速度流线图见图18。可以看出，安装优化后折叠式车载光伏系统的车辆，系统前方气流分离平滑，未产生阶梯效应，车载光伏系统所设计的尾翼将尾部气流有效分离，使原先附着在后挡风玻璃上的旋涡区大幅缩小，减小了旋涡区带来的动能耗散问题[17]。

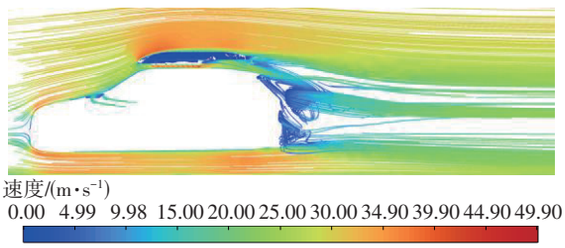


图 18　车辆外流场速度流线图

Fig. 18　Velocity streamline diagram in the external flow field of vehicle

3　车载光伏系统的净功率

净功率表示车载光伏系统实际能为车辆提供的补能功率，通过对比分析系统优化前后的净功率，可直观验证系统气动性能优化的工程应用价值。

3.1　系统净功率计算

系统优化前后车辆所受空气阻力见表 8。

表 8　不同速度下车辆所受阻力

Table 8　Resistance on the vehicle at different speeds

车速/(m·s⁻¹)	原模型 F_D/N	安装无整流罩系统 F_D/N	总体优化后 F_D/N
5.0	10.35	13.45	10.46
7.5	23.25	30.27	23.52
10.0	41.38	53.81	41.82
15.0	93.11	121.07	93.86
20.0	165.53	215.23	166.71
25.0	258.63	336.30	260.48
30.0	372.42	484.26	375.56
35.0	506.91	659.14	510.86
40.0	662.08	860.92	666.84

车辆行驶时消耗的功率采用式(4)计算[18]：

$$P_T = P_w + P_d + P_x + P_a + P_s + P_r - P_b \tag{4}$$

式中，P_T为总功率需求，P_w为克服车轮和传动转动惯量的功率，P_d为克服风阻的功率，P_x为车辆辅助设施消耗的功耗，P_a为加速所需功率，P_s为爬坡所需功率，P_r为克服轮胎滚动阻力的功率，P_b为再生制动功率。

P_a、P_s和P_r与车辆总质量密切相关，可进一步计算如下：

$$P_a = m \times a \tag{5}$$

$$P_s = m \times g \times \sin\alpha \tag{6}$$

$$P_r = m \times g \times C_r \tag{7}$$

式中，m为车辆总质量，a为车辆加速度，g为重力加速度，α为道路坡度，C_r为滚动阻力系数。

折叠式车载光伏系统主要影响车辆的P_d、P_a、P_s和P_r，据此可得车载光伏系统的净功率计算公式如下：

$$P_n = P_{out} - P_{d1} - P_{a1} - P_{s1} - P_{r1} \tag{8}$$

$$P_{d1} = F \times v \tag{9}$$

式中，P_n为净功率，P_{d1}、P_{a1}、P_{s1}和P_{r1}分别为车载光伏系统给车辆行驶带来的额外克服风阻、加速、爬坡和克服轮胎滚动阻力所需的功率，F为安装车载光伏系统带来的附加空气阻力，v为车辆行驶速度。

假设在水平道路上匀速行驶，忽略P_{a1}和P_{s1}，则P_n的计算公式可简化为

$$P_n = P_{out} - P_{d1} - P_{r1} \tag{10}$$

3.2　优化前后系统净功率对比

设光照强度为 1 000 W/m²，按式(1)算得行驶时两块光伏电池工作的发电功率为 476.52 W。原始折叠式车载光伏系统总质量约为 25 kg，滚动阻力系数取 0.015；加装整流罩后车载光伏系统总质量为 35 kg，整流罩对光伏电池发电功率的影响按透光率取折算系数为 92%，此时行驶状态下两块光伏电池工作的发电功率取 438.40 W。优化前后车载光伏系统的净功率见表 9。

表 9　优化前后车载光伏系统的净功率

Table 9　Net power of the vehicle-mounted photovoltaic system before and after optimization

车速/(m·s⁻¹)	优化前净功率/W	优化后净功率/W
5.0	457.35	432.71
7.5	416.69	431.10
10.0	348.55	428.86
15.0	53.45	422.01
20.0	−521.15	409.66
25.0	−1 468.91	387.00
30.0	2 882.36	339.06
35.0	−4 855.21	295.01
40.0	−7 480.76	242.86

分析表 9 结果可知，优化后系统虽然在低速时因外壳对阳光的遮挡损失了小部分净功率，但当车速大于 6.58 m/s 左右时系统净功率已大于优化前，且差距随着车速的升高而增大，在车速为 40.0 m/s 时净功率差达到了 7 723.62 W。

4　结论

文中通过为折叠式车载光伏系统设计高透光率整流罩和尾翼来提升系统的气动性能，有效减小了系统给车辆带来的附加阻力能耗，显著提升了系统

的净功率，主要结论如下。

(1)通过对整流罩构建优化模型，以前倾角、后背角和系统高度来构建正交试验方案，并对结果进行极差分析，得对车载光伏系统气动阻力的影响程度为：系统高度>前倾角>后背角。根据主效应曲线变化趋势，确定前倾角取70°后背角取0°、系统高度取100 mm为最优方案。对尾翼攻角进行优化，得升阻比最优角度为33.96°。

(2)安装优化后车载光伏系统的车辆的空气阻力系数从0.619降低至0.343，降幅达44.59%，气动阻力从484.26 N降低至375.56 N，降幅达22.45%；升力系数从0.065降低至-0.082，降幅达226.15%；升力方向由向上转为向下，消除了气动升力向上给整车操控和安全性能带来的不利影响。与原型车对比，空气阻力系数从0.415降低至0.343，降幅达17.35%，气动阻力从372.42 N上升至375.56 N，仅增加3.14 N，基本消除了车载光伏系统给车辆气动性能带来的负面影响。

(3)优化后的车载光伏系统净功率在车速大于6.58 m/s左右时即大于优化前，且差距随着车速的升高而增大，在车速为40.0 m/s时净功率差达到了7 723.62 W，说明文中优化方案可有效提升车载光伏系统在车辆行驶时的净发电功率。

参考文献：

[1] 林泽权，赵斌，裴刚. 基于典型气象数据的太阳能汽车年性能分析[J]. 太阳能学报，2024，45(7)：577-583.
LIN Zequan，ZHAO Bin，PEI Gang. Annual performance analysis of solar vehicle based on typical meteorological data[J]. Acta Energiae Solaris Sinica，2024，45(7)：577-583.

[2] 孟宝. 汽车可折叠式太阳能板追光系统的设计与研究[D]. 长春：吉林大学，2017.

[3] 王鑫恫. 具有自动追光功能的太阳能电动汽车能量管理系统研究[D]. 淄博：山东理工大学，2021.

[4] 赵轩. 房车光伏电池板折叠机构自动追光系统设计与研究[D]. 西安：西安理工大学，2021.

[5] ARAKI K，JI L，KELLY G，et al. To do list for research and development and international standardization to achieve the goal of running a majority of electric vehicles on solar energy[J]. Coatings，2018，8(7)：251.

[6] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京：人民交通出版社，2005.

[7] 曾勇，张光亚，黄炎. 一种车载太阳能充电系统的原理与应用研究[J]. 时代汽车，2023(15)：114-116.
ZENG Yong，ZHANG Guangya，HUNG Yan. Research on the principle and application of a vehicle solar charging system[J]. Auto Time，2023(15)：114-116.

[8] ROLLET-MIET P，LAURENCE D，FERZIGER J. LES and RANS of turbulent flow in tube bundles[J]. Internation Journal of Heat and Fluid Flow，1999，20(3)：241-254.

[9] 张群峰，何洪涛. 不同湍流模型数值模拟三维轴对称凸体分离流动的比较[J]. 科学技术与工程，2010，28(2)：3693-3703.
ZHANG Qun-feng，HE Hong-tao. Numerical study on three-dimensional separated flow on an axisymmetric bump by different turbulent models[J]. Science Technology and Engineering，2010，28(2)：3693-3703.

[10] 王坤阳. 车顶箱对整车气动减阻的影响研究[D]. 长春：吉林大学，2019.

[11] 谷正气，王师，仇健，等. MIRA模型组尾部造型风洞试验研究[J]. 科技导报，2011，2908：67-71.
GU Zhengqi，WANG Shi，QIU Jian，et al. Wind tunnel tests of MIRA model group for study of vehicle's rear shape[J]. Science & Technology Review，2011，29(8)：67-71.

[12] 贾浩. 某车型行李架气动噪声与阻力的协同优化及分析[D]. 重庆：重庆理工大学，2021.

[13] 廉玉波，罗秋丽，张风利，等. 基于形体优化方法的汽车空气动力学开发[J]. 汽车工程，2022，44(10)：1619-1626.
LIAN Yubo，LUO Qiuli，ZHANG Fengli，et al. Automotive aerodynamics development based on shape optimization method[J]. Automotive Engineering，2022，44(10)：1619-1626.

[14] 张喆，宋世达，王国华，等. 赛车俯仰运动下的气动特性[J]. 吉林大学学报(工学版)，2023，53(8)：2201-2211.
ZHANG Zhe，SONG Shi-da，WANG Guo-hua，et al. Aerodynamic characteristics of a racing car in pitching motion[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2023，53(8)：2201-2211.

[15] MIRZA A F，MANSOOR M，LING Q. A novel MPPT technique based on Henry gas solubility optimization[J]. Energy Conversion and Management，2020，225：113409/1-22.

[16] ZUO K，YE Z，ZHANG W，et al. Fast aerodynamics prediction of laminar airfoils based on deep attention network[J]. Physics of Fluids，2023，35(3)：037127.

[17] WU H，LIU L，AN W，et al. A generative deep learning framework for airfoil flow field prediction with

sparse data [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(1): 470-484.

[18] PATEL N, BITTKAU K, PIETERS B E, et al. Impact of additional PV weight on the energy consumption of electric vehicles with onboard PV [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2024, 14(2): 319-329.

Aerodynamic Performance Optimization of Vehicle-Mounted Photovoltaic System for Net Power Maximization

LUO Yutao　LIN Zhiqiang

(School of Mechanical and Automotive Engineering/Guangdong Provincial Key Laboratory of Automotive, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: The present researches on vehicle-mounted photovoltaic systems mainly focus on increasing the installation area of photovoltaic panels by optimizing the folding mechanism to enhance the power generation capacity, while neglecting the issue of the synergistic optimization of power generation capacity and the additional drag energy consumption of the system. To enhance the net power of vehicle-mounted photovoltaic systems, by optimizing the aerodynamic performance of the system, this paper presents a new methodology to reduce the additional drag energy consumption imposed by the system on the vehicle, and thereby to increase the net power of the system. Firstly, a foldable vehicle-mounted photovoltaic system was designated as the object, and a high-transmittance fairing and a tail wing that conform to the aerodynamic principle were designed. Subsequently, three design variables, namely the front tilt angle of the fairing, the back angle, and the system height, were selected to optimize the shape of the fairing. Through the construction of an orthogonal test scheme and the analysis of polar deviation, the influence degree of the three design variables on the system aerodynamic drag was obtained as system height > front tilt angle > back angle. From the analysis of the main effect plot, the three variables are found exhibiting monotonic effects on the aerodynamic drag of the system, thus determining the structural parameters of the fairing shape as follows: a front tilt angle of 70°, a back angle of 0°, and a system height of 100mm. Subsequently, the tail attack angle of the vehicle-mounted photovoltaic system was optimized, a cubic spline interpolation approximation model was constructed based on the experimental data, and the tail attack angle with optimal lift-to-drag ratio was obtained as 33.96°. In addition, the vehicles equipped with the on-board photovoltaic system proposed in this paper were compared with those without the system. It is found that the air resistance coefficient decreases by 44.59%, the aerodynamic resistance decreases by 22.45% and the lift coefficient decreases by 226.15%, and that the direction of the lift undergoes a transformation from upward to downward. This transformation serves to mitigate the adverse impact of upward aerodynamic lift on the handling and safety performance of the entire vehicle. A comparison of the original vehicle model with the modified version reveals a significant decrease of air resistance coefficient of 17.35% and a modest aerodynamic resistance increase of 3.14 N, which means that the modification effectively mitigates the adverse effects of the on-board photovoltaic system on vehicle's aerodynamic performance. Finally, a comparison and analysis of the net power of the on-board photovoltaic system before and after the optimization was conducted. It is found that the proposed optimization scheme can effectively increase the net power generation of the vehicle-mounted photovoltaic system during vehicle operation. When the vehicle speed is 40.0 m/s, the net power difference reaches 7723.62 W.

Key words: vehicle-mounted photovoltaic system; aerodynamic performance optimization; net power