·汽车智能座舱技术专题·

汽车智能座舱光学系统的发展及光学材料的应用*

顾梦旋[1] 张自豪[1] 梁鸿宇[2] 耿龙飞[1] 陈宏利[2] 蒋晓明[1]

（1.江苏斯迪克新材料科技股份有限公司江苏省复合涂层功能膜材料与技术重点实验室，宿迁 223900；
2.吉林大学汽车集成与仿生全国重点实验室，长春 130022）

【欢迎引用】顾梦旋，张自豪，梁鸿宇，等. 汽车智能座舱光学系统的发展及光学材料的应用[J]. 汽车文摘，2026(5): 1-24.

【Cite this paper】GU M X, ZHANG Z H, LIANG H Y, et al. Development of Optical Systems and Applications of Optical Materials in Automotive Intelligent Cockpits[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(5): 1-24.

【摘要】智能座舱正朝着智能化、舒适化、个性化方向快速发展，用户对座舱体验需求的提升推动了光学材料性能要求的升级，其性能优势得以充分发挥。重点分析了汽车智能座舱中光学显示、光调控及感知成像技术的发展现状及光学材料的应用，具体包括中控显示、抬头显示、智能调控玻璃和自动驾驶传感器成像4个方面，分析各场景下座舱功能实现对光学材料的需求及相关研究成果。结合工程化应用现状，通过分析用户体验反馈，明确未来发展重点，为智能座舱光学材料的研究、工程化应用及优化升级提供参考。

关键词：智能座舱；抬头显示；智能调控玻璃；传感器；光学透明胶；光学涂层

中图分类号：TB34　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20260035

Development of Optical Systems and Applications of Optical Materials in Automotive Intelligent Cockpits

Gu Mengxuan[1], Zhang Zihao[1], Liang Hongyu[2], Geng Longfei[1], Chen Hongli[2], Jiang Xiaoming[1]

（1. Jiangsu Key Laboratory of Coating Functional Film and Technology, Jiangsu Sidike New Materials Science & Technology Co., Ltd., Suqian 223900; 2. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022）

【Abstract】Intelligent cockpits are developing rapidly toward intelligence, comfort, and personalization. The growing demand for improved cabin experience has driven the upgrading of performance requirements for optical materials, allowing their performance advantages to be fully utilized. This paper focuses on the development of optical display, light regulation and perceptual imaging technologies in automotive intelligent cabins, as well as the application of optical materials. It specifically covers 4 aspects: central control display, Head-Up Display (HUD), smart adjustable glass, and autonomous driving sensor imaging. The requirements of cabin function realization for optical materials in various scenarios and the relevant research achievements are analyzed. Combined with the current situation of engineering applications and through the analysis of user experience feedback, this paper clarifies the key future development directions, so as to provide a reference for the research, engineering application and optimization upgrading of optical materials for intelligent cabins.

Key words: Intelligent cockpit, HUD, Intelligent control glass, Sensor, Optically Clear Adhesive (OCA), Optical coating

0 引言

在汽车产业向电动化、智能化、网联化转型背景下，智能座舱是实现人机协同、提升驾乘体验的关键载体，也逐渐发展成为衡量汽车产品竞争力的核心指标。智能座舱并非单一设备的简单叠加，而是由显示终端、光交互系统、内饰光饰模块、感知单元及控制模块等多部分协同构成的综合系统，其中显示终端涵盖

*基金项目：科技创新专项（车载极端环境下OCA界面动态失效机制与跨尺度粘弹调控研究）（J202501）。

仪表板、中控联屏、抬头显示(Head-Up Display, HUD)、副驾及后排娱乐屏等多元载体。光交互与感知系统承担人机互动核心功能,内饰光饰模块则负责营造舒适个性化的座舱环境,各系统相互配合,共同推动座舱从“工具属性”向“第三生活空间”演进。

当前,随着消费者对驾乘体验的需求从便捷性、安全性,向个性化、舒适化、沉浸式方向不断升级,智能座舱呈现出全显示化、多模态交互、场景化光环境的发展趋势。行业研究表明,车载显示屏数量持续增长、尺寸逐渐变大、应用场景不断拓展,同时用户对座舱视觉清晰度、交互流畅度、环境舒适度的要求大幅提升,这不仅推动智能座舱的功能迭代,更对其核心支撑材料——光学材料的性能提出了更高要求。传统材料在透光率、耐候性、抗反射、多功能集成等方面的局限性日益凸显,而光学材料凭借优异的透光性能、良好的机械稳定性、可定制的功能特性,正成为满足智能座舱多场景性能需求、推动智能座舱高质量发展的核心驱动力。

作为智能座舱功能实现的基础,光学材料的选用与性能直接影响座舱的显示效果、交互体验与环境舒适度,近年来已成为汽车材料领域的研究热点。目前,国内外学者围绕光学材料的研发、改性及在智能座舱中的应用开展了大量研究,但多聚焦于单一应用场景,缺乏对“显示-交互-光环境”全场景的系统性梳理,且对光学材料的工程化应用现状及用户体验反馈的整合分析较为欠缺,难以全面支撑智能座舱光学材料的规模化应用与优化升级。

基于此,本文围绕汽车智能座舱光学系统的发展及光学材料的应用展开系统性综述,旨在梳理相关研究成果与工程化应用现状,为后续研究与工程落地提供参考。首先,从中控显示、抬头显示、智能调控玻璃和自动驾驶传感器成像4个方面,分析各场景下座舱功能实现对光学材料的需求及相关研究成果。然后,结合工程化应用现状,分析用户对座舱光学系统与材料应用的体验反馈。最后,总结本文核心研究结论,分析当前光学系统与光学材料应用面临的挑战,并对未来技术发展趋势进行展望。

1 车载中控显示

1.1 车载显示屏的结构与功能

在智能座舱中,车载显示屏作为核心组件是信息传递和控制的中心:高分辨率的车载显示屏能够以清晰的视觉效果呈现各类信息,便于驾驶者实时获取所需数据;车载显示屏的多媒体娱乐功能使用户能够轻松访问车载音响、流媒体服务、广播电台等;车载显示屏还整合了通信功能,使得驾驶者能够拨打和接听电话、及时回复信息[1]。

传统的车载显示屏采用液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD),其构造是在薄膜晶体管与彩色滤光片玻璃基板中间放置具有各向异性的液晶,通过外加电场改变液晶分子的排列方向,实现了对光的动态调控。液晶分子自身无法发光,需要通过背光源的照射实现显示功能,最常见的是以发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)作为背光源的LCD显示屏。近年来,作为新一代显示技术,有机发光二极管(Organic Light Emitting Diode, OLED)因其画质好、轻薄、可塑性高、响应快速、低功耗、可宽温使用等优点,在车载应用中逐渐替代LCD显示器。

1.2 车载显示屏技术的发展

1.2.1 车载屏幕尺寸的演变

在20世纪末,车载显示屏的尺寸相对较小,多数在5英寸以下,形态主要为传统的液晶显示屏。这些屏幕通常只能显示基本的车辆信息和音频系统控制界面,功能相对简单。尽管如此,当时的车载显示屏已经被认为是一种豪华配置,而且逐渐普及于高端车型。21世纪后,车载显示屏迎来较大规模的升级。2007年,苹果公司发布了第一代iPhone,引领了触屏技术的革新,该技术也逐渐应用于车载显示屏。到2010年,车载显示屏的尺寸进一步增大,多数在9英寸以上。同时,屏幕的形态也开始多样化,部分车辆采用了翻转式屏幕设计,可以根据需要调整显示角度。2015年后,车载显示屏的发展趋势更加明显。屏幕尺寸普遍超过10英寸,如特斯拉17英寸横向液晶显示屏。此外,全触控式设计逐渐成为主流,大部分车载显示屏已经实现了多点触控,用户可以通过手势操作实现更多功能。

近年来,虚拟现实和增强现实技术迅速发展,开始影响车载显示屏的形态。一些高端车型开始集成HUD技术,将车辆信息投射到驾驶员的视线上方,提供更方便的信息展示方式。此外,一些车企还探索将虚拟现实技术应用于车载显示屏上,通过增强现实技术实现更丰富的交互体验。车载显示屏作为现代汽车的重要组成部分,其技术发展经历了多个阶段,反映了汽车工业与信息技术的深度融合。从最初的简单显示功能到如今的多媒体交互系统,车载显示屏在形态和功能上都经历了显著的演变[2]。

1.2.2 车载屏幕形态的演变

在20世纪80年代至90年代,车载显示屏主要以

LCD为主。该阶段的屏幕通常用于显示基本信息(如车速、油量、温度等),显示屏尺寸通常为5~7英寸,分辨率较低,色彩单一,显示效果有限。21世纪后,车载显示屏开始引入彩色液晶屏。这一时期的屏幕尺寸逐渐增大,能够更加清晰地呈现更多复杂信息和图形,开始支持多媒体功能,包括收音机、CD播放和导航功能。

随着技术的不断进步,高清显示技术逐渐应用于车载屏幕上,为车载显示屏带来了更为细腻的视觉效果,画面的清晰度和色彩的还原度得到了显著提升。近年来,曲面屏逐渐应用于车载显示屏领域,提升了屏幕的美观性,提供更广阔的视角,给用户带来身临其境的体验。

1.2.3 车载屏幕功能的演变

随着电子技术的持续进步,车载显示屏的功能实现了从单一化到高度集成化的演进。早期屏幕主要用于显示基础车辆信息,随后逐步整合了导航、多媒体播放以及蓝牙连接等多种功能,成为集信息呈现与娱乐控制于一体的核心平台。2010年后,触控屏技术的普及,彻底改变了人机交互模式,传统的物理按键与旋钮大量被触控手势操作所取代。为了进一步提升行车安全性,降低驾驶员在行驶中的分心程度,语音识别技术被广泛集成,形成了“触控+语音”的多模态交互方案,使驾驶者能够更安全、便捷地操控车载系统。

1.3 车载显示屏的新技术

随着汽车智能化快速发展,消费者对座舱的智能化要求越来越高,显示屏作为座舱中的关键交互界面,其设计和功能对购车决策和驾乘体验有重要影响。在此趋势下,一系列创新显示与交互技术应运而生,例如集防眩光、防反射、防指纹于一体的3A镀膜技术,以及曲面双联屏、五联屏、悬浮屏、聚音屏和空气成像等技术。

1.3.1 车载3A镀膜曲面双联屏

3A镀膜技术通过在玻璃表面增加防眩光、防反射和防指纹的膜层,提升了显示屏的视觉效果和用户体验。曲面双联屏采用热弯工艺成型,这种工艺利用玻璃在高温下的可塑性,通过自重贴附在模具上形成所需的曲面形状。在贴合过程中,需要精确控制液晶量和光学透明胶的贴合参数,以确保显示屏无缺陷地与曲面盖板贴合。3A镀膜的高硬度和耐磨性使得产品更加耐用,而涂层的厚度和材料可以根据产品的具体需求进行定制,满足高端市场的需求。车载3A镀膜曲面双联屏如图1所示。



图1 车载3A镀膜曲面双联屏[3]

1.3.2 车载五联屏

车载前排显示屏配置正从三联屏向集成电子外后视镜显示屏的五联屏的发展趋势演进。电子后视镜通过摄像头采集车辆侧后方图像,并在屏幕上呈现,能为驾驶者提供了更广阔的视野,并降低环境光线干扰。五联屏(图2)因其尺寸较大且形状不规则,对盖板的成形工艺要求较高,3A镀膜的均匀性难以控制,且贴合过程较为复杂。目前,行业内的自动化贴合设备主要针对主屏幕区域,对于两侧后视镜屏幕的异形、高精度贴合仍存在技术瓶颈,这在一定程度上制约了五联屏方案的工业化量产进程[4]。



图2 东风本田灵犀五联屏[5]

1.3.3 极致窄边框一体化显示屏

在车载显示屏的传统设计中,模组背板与塑胶机壳组装后再安装到车内,而一体化设计则是将模组背板与机壳合二为一,使用压铸件的背光,正面承载膜片,背面结构作为外观件直接安装于车内。这种设计通过取消塑胶后壳,减小了模组边框宽度和模组厚度,节省了组装和使用成本,同时改善了塑胶强度弱及散热差的问题。以12.8英寸的显示屏为例,一体化设计可以使边框宽度减小约3 mm,厚度减小2~4 mm,屏幕占比提升约5%。窄边框设计使得背光LED发光面到同侧背光显示区域边缘的混光距离减小,增加了效果调试的难度,同时一体化设计对模组内膜材组装以及柔性印刷电路组件的弯折组装提出了较大挑战。

1.3.4 空气成像显示屏

全息空中智能显示技术作为一种全新的人车交互方式,通过负折射平板透镜,利用光场重构原理,将

发散的光线在空中重新汇聚，形成无需介质承载的实像，结合交互控制技术，实现了用户与空中实像的直接交互。该技术为用户打造了一个具有科技感的智能座舱，使驾驶人员无需频繁低头，实现了平视交互，提高了视觉交互的直观性、效率和便捷性，交互信息包括辅助驾驶、强提示、安全保障、智能关怀、全息导航等。空气成像显示屏如图3所示。



图3　空气成像显示屏[6]

1.3.5　聚音屏

聚音屏，即定向发声显示屏，采用了独特的透明超声参量阵技术，将声波电信号经过调制处理后由显示屏发出超声波，调制信号的超声波在空气传播过程中自解调，还原出可听声音，在传播路径上形成具有积累效应的虚拟声源，生成高指向性的声束（图4）。该技术仅使处于特定位置的人员听到屏幕声音，如只有驾驶员能听到导航及电话通话声音，而副驾及后排乘客可以听到对应位置的娱乐屏中的声音，实现了驾乘人员之间互不干扰。

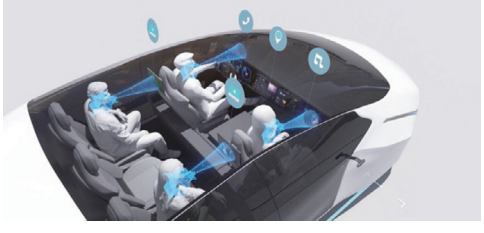


图4　车载聚音屏[7]

1.4　光学材料在车载显示屏中的应用和趋势

车载显示屏正朝着大屏化、高清化、多屏化、多形态化方向发展，触控功能逐渐成为标配。这推动了全贴合技术发展，其中光学胶粘剂（Optically Clear Adhesive, OCA）或液态光学透明胶（Liquid Optical Clear Adhesive, LOCA）是实现无缝贴合的关键材料。为了减轻车载显示屏的反射提升显示，抗反射（Anti-Reflection, AR）膜也被广泛应用。

1.4.1　光学胶粘剂在车载显示屏中的应用

OCA是一种多功能的无基材特种粘接材料，凭借其优异的光学透明性、高粘接强度及较低的固化收缩率，被广泛应用于各类电子产品显示模组的光学粘接与封装[8-10]。在众多OCA材料中，丙烯酸光学胶因其耐紫外线、耐湿度、耐温度，以及优异的光学性能和成本效益在市场中应用广泛。

在传统的刚性显示器中，OCA的核心作用是确保各功能层的强附着力，保持光学透明度，并在多变的环境条件下维持OLED等显示器件亮度与色彩的稳定性[11-12]。对于柔性显示屏，OCA的作用更加关键，其不仅要完成层间粘接，还需在动态弯折变形中有效缓冲和分散应力，保护柔性屏体免受机械损伤[13-14]。根据柔性显示器的应用和曲率半径，所需的OCA性能有所不同。因此，开发适用于柔性显示的OCA，必须系统权衡其机械性能、粘附性能、光学性能和环境稳定性[15-17]。

相比于平面屏，曲面屏、折叠屏乃至卷曲屏的材料选择更加严苛。OCA胶膜的综合性能分析如图5所示。OCA材料既要在严苛环境下特性稳定，同时还要具备良好的耐弯折性、减少对OLED屏体本身造成的应力，还要考虑整机外观性（如表面抗冲击、折痕等）。因此，车载显示屏用OCA胶膜材料研发面临着

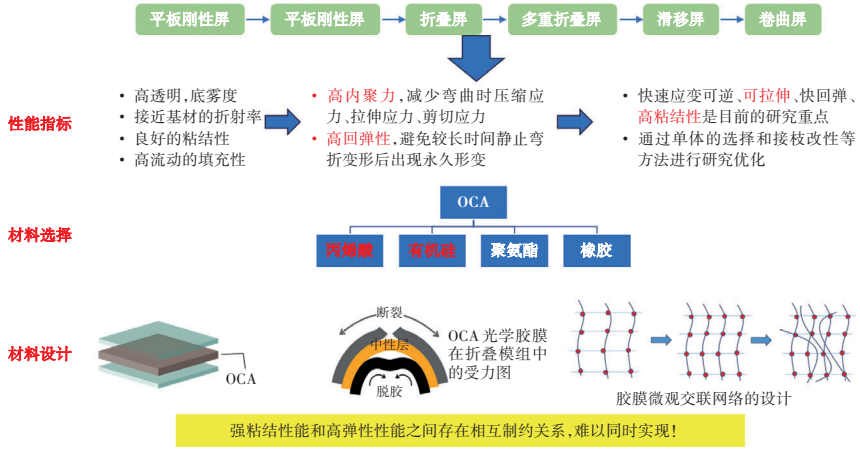


图5　OCA胶膜的综合性能分析

诸多难点。

在OCA材料中，粘附性与弹性通常难以兼顾。尽管采用表面化学接枝、调整交联剂等策略可以构建高交联网络，从而增强柔性与回弹性，但通常会导致粘附性大幅下降。此外，为提升粘附性而引入的氢键，虽能增强内聚力，但也会带来高玻璃化转变温度、对基材润湿性差以及较强的分子间物理交联等问题，导致材料柔韧性降低。同时，变形后新形成的氢键网络会损害其可恢复性。因此，如何在确保OCA高粘附性的同时实现超高弹性，仍是当前的研究难点。

可滑动或可卷曲设备因其具有节省空间的优势，在汽车领域有应用潜力，但其粘合剂的热稳定性和紫外线稳定性要求远高于传统可折叠设备。因此，可卷曲胶粘剂的研究重点是耐过度变形和提高环境可靠性。为了防止极端变形，提高粘合剂的内聚性能至关重要，确保其在较大应力下不发生撕裂，并且可以在展开过程中恢复。

随着平板显示器被柔性显示器所取代，OCA除了具有固定部件的能力外，还需要具备多种特性。其中，恢复性能与应力松弛性能是柔性显示器用OCA必须满足的基本要求。恢复性能指OCA在应力解除后恢复初始状态的能力，良好的恢复性可抑制OCA在重复变形下的下垂现象。应力松弛性能则关系到显示器所受应力的消散能力，该过程通过分子运动、化学键断裂与交换实现。松弛不足会导致残余应力积累，进而引发分层、应力腐蚀、开裂等问题，并降低器件疲劳寿命。研究表明，通过调控高分子量与交联密度，可在提升OCA附着力的同时改善其恢复性能。此外，也有研究尝试通过与高弹性弹性体共混来调节OCA的恢复与松弛行为。然而，现有工作多聚焦于单一性能，OCA模量与柔韧性之间的关联机制仍需进一步探索。

与传统的刚性器件使用的粘合剂相比，柔性器件使用的粘合剂通常更薄、附着力更低，难以保持足够的粘接并保证相邻层的内粘运动[18]。附着力主要由界面相互作用和胶粘剂内部的体积变形损失决定。在剥离试验中，能量耗散发生在剥离前形成一个塑性粘弹性区，在剥离前发生脱粘过程。该区域的形成受胶粘剂厚度和剥离速度的影响。随着厚度的减小，剥离前无法形成充分发育的塑粘弹性区，导致附着力下降。根据可折叠胶粘剂的标准，柔性胶粘剂的粘合力应不低于1 N/cm，以实现可靠界面结合。为了实现该目标，柔性粘合剂的配方应允许有效的交联，增强对内聚失效的抵抗力，并确保界面处有足够的润湿和粘合[19]。表1中列举了随着车载屏幕的变化，OCA在力学、流变和蠕变等性能方面提出的新需求。

表1　平板、曲面和折叠屏幕中OCA的性能变化

测试项目	性能指标		平板	曲面	折叠
力学	断裂伸长率/%		200	100	800
	剥离力/N·25 mm^{-1}		20	30	15
流变	玻璃化转变温度/℃		−20	0	−35
	模量	20 ℃/kPa	4 800	327 030	100
		25 ℃/kPa	100	300	30
		80 ℃/kPa	25	60	20
蠕变	最大形变量/%		200	100	400
	回复率/%		80	85	90

除了上述关键特性外，用于显示器的粘合剂还需具备优异的光学性能，尤其是在前层贴合中，光学透明度和折射率是确保OLED发射的光在没有额外损失的情况下有效传输的关键。为了保持OLED色彩完整性，与颜色相关的参数，如黄度指数和Lab值也至关重要。此外，随着柔性设备向组件最小化、高透光率和低功耗的趋势发展，彩色滤光片封装和触摸封装等创新技术已经被成功开发，可取消偏振镜。在OLED器件中，偏振片虽不像在LCD中那样不可或缺，但仍承担着抑制环境光反射、提升对比度及阻挡紫外线以延缓OLED老化等重要功能[20-22]。除前层外，其他层无法防止紫外线导致的OLED降解，因此粘合剂应具备紫外线阻挡能力。

鉴于电子设备通常具有较长的使用寿命，粘合剂的耐老化性能对于保持其长期功能和可靠性至关重要[23]。粘合剂的老化通常是由于暴露于热、湿度、紫外线、氧气和各种化学物质等因素引起，这些因素会改变或降解其聚合物结构，从而降低其机械和流变性能。例如，在高温下，粘合剂内的化学键会因氧化而降解，从而降低机械强度和附着力[24]。湿度和氧气会加速胶粘剂中的氧化和水解反应，削弱其柔韧性和抗拉强度[25]。为了解决上述问题，粘合剂可以加入稳定剂，如抗氧化剂、紫外线吸收剂和热稳定剂，以提高抗老化能力。此外，选用耐热、耐湿性高的单体和交联剂可以进一步提高抗老化性能。为了评估抗老化性能，可以进行各种加速老化试验。这些测试将粘合剂暴露在极端条件下（高温、高湿和紫外线），以观察短时间内的长期老化效果。随着技术进步，车载屏幕厂商对粘合剂的环境测试条件也越来越严苛，表2中列举了各项环境测试的条件标准所

提出的新要求。

表2　粘合剂环境测试新要求

环测	以前	目前	未来
高温	95 ℃,1 000 h	95 ℃,2 000 h	105 ℃,2 000 h
冷热冲击/℃	−40/85	−40/95	−40/105
高温、高湿/h	1 000	1 500	2 000
b*	<1.0	<0.6	<0.5

注:光学测试中,b*值代表着材料从黄色到蓝色的偏移程度。

1.4.2　有机硅LOCA/OCR在车载显示屏中的应用

在光学透明粘接材料中,OCA具有生产效率高、厚度均匀、无溢胶问题等优点,而液态光学透明胶(Liquid Optical Clear Adhesive,LOCA)、光学透明树脂(Optical Clear Resin,OCR)则更适用于大尺寸、曲面等复杂结构的贴合。当前,消费电子领域的全贴合市场以丙烯酸材料为主,而车载显示屏则广泛应用有机硅材料。与消费类电子相比,汽车生命周期更长,需经历更加严苛的环境测试要求。汽车运行过程中,有机硅会遇到低至−40 ℃的极端严寒以及70 ℃高温。除此之外,汽车运行过程中还要承受各种振动、瞬时冲击、光照、湿气、热气等来自外界环境的力、光、热等不利因素影响。

有机硅OCR的性能优势体现在以下5方面:(1)有机硅OCR固化后无色透明,透光率高达98%以上,与丙烯酸酯类OCR相比,有机硅OCR在固化过程中的收缩率更小,有助于保持贴合后产品的尺寸稳定性。(2)有机硅OCR具有良好的耐黄变、耐高温高湿和冷热冲击的性能,特别适合于中大尺寸触摸屏产品及车载、工业控制、医疗器械等对环境要求高的行业领域。(3)有机硅OCR的通用性强,缝隙填充性好,适合各种尺寸产品、曲面和复杂型面的贴合。(4)有机硅OCR对多种基材粘接强度好,可在常温或中温条件下固化。(5)有机硅OCR是低VOC、无毒、环境友好的材料,可以满足多种光学材料的粘接。常见的有机硅OCR的性能如表3所示。

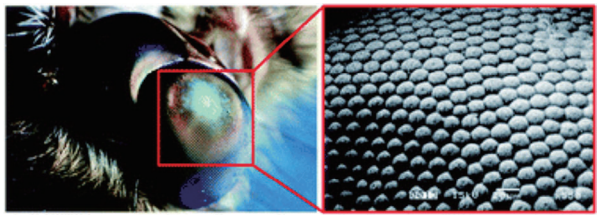
综上所述,有机硅OCR因其优异的光学性能、耐候性、粘接性能和环境友好性,在全贴合技术中发挥着重要作用,是实现高显示效果和高触控性能的关键材料。

1.4.3　防反射膜在车载显示屏中的应用

反射是一种自然的物理现象,其被描述为光射向两种介质的界面,部分光的传播方向又回到原介质继续传播[26]。研究人员从仿生学得到了启示,如图6所示,为了伪装捕食者,“飞蛾的眼睛”或角膜晶状体已经进化成无光泽表面,从而防止光线反射[27]。然而,当光线照射在光滑的表面时,强烈的镜面反射会造成屏幕眩光,干扰视觉。因此,增透涂层或增透材料备受关注,研究其反射机理具有重要意义[28]。采用物理或化学方法制备的具有优异防反射性能与增透性能的纳米结构材料已被广泛应用于显示器、手机屏幕、汽车智能座舱等领域[29−31]。

表3　有机硅OCR关键性能参数

性能参数	数值
折射率	1.41
邵氏硬度(Shore 00)	13.00±2.00
储能模量(25 ℃)/kPa	9.40
体积收缩率/%	0.10
拉拔粘接强度/MPa	0.35
相对透光度(550 nm)/%	>99
雾度/%	0.05
b*(85 ℃/85%RH/1 000 h)	0.55
黄变指数(85 ℃/85%RH/1 000 h)	0.94



(a)蛾子眼睛及角膜晶状体　(b)表面纳米突起SEM表征

图6　蛾子的眼睛和角膜晶状体外表面的纳米突起SEM显示[27]

光学减反射技术通过匹配叠层结构的折射率和厚度,实现减反增透的效果:每个界面有一个反射波且反射波具有相同的强度。其他光学相互作用,如散射、吸收等,可以忽略不计[32]。基于各向同性均匀单层或简单多层介质膜的减反射,其原理是通过选择或者构造合适的光学参数,在基材表面交替沉积高折射率和低折射率的薄膜材料,利用光的干涉效应来减少反射光。当光线入射到膜层时,不同膜层之间的反射光会发生干涉、相互抵消,从而降低反射率,以达到增加显示的透过率和对比度的目的。通过材料设计,可筛选出具有合适等效光学参数的人工结构或材料。例如,采用纳米柱阵列结构,通过调整纳米柱的高度、直径和间距等参数,可以改变等效折射率,减少反射。

为了提升驾驶安全性和用户体验,以确保驾驶员在各种光照条件下都能清晰地读取屏幕信息,防反射膜的市场需求持续增长。随着汽车行业向智能化、网联化方向发展,车载显示屏的尺寸不断增大,数量逐

渐增多，功能日益丰富目前，高性能的3A（抗眩光（Anti-Glare，AG）、AR、抗指纹（Anti-Fingerprint，AF））光学膜仍一定程度依赖韩国和日本进口。然而，市场竞争格局正从早期由国际厂商（如3M、迪睿合等）主导，逐步向多元化、本土化方向发展。国内厂商近年来持续加大研发投入，产品性能已逐步接近国际先进水平，并在成本控制与本地化服务方面展现出竞争优势。

防反射膜未来的发展方向包括更低的反射率、更高的透过率、更好的防刮耐磨性能和抗指纹、抗污性能等。例如，采用新型的纳米材料和多层膜结构设计，能够有效提高防反射膜的光学性能和耐用性。除了基本的防反射功能外，防反射膜还在向多功能化发展。一些厂商开始研发集成隔热、自修复、触控兼容等功能的防反射膜，为汽车制造商提供更多的选择。随着OLED、MiniLED等新型显示技术在车载中控显示屏中的应用不断增加，防反射膜也需要与这些新型显示技术相适配。厂商们正在针对这些新型显示技术的特点，开发专门的防反射膜产品，以充分发挥新型显示技术的优势。

综上所述，防反射膜给智能座舱带来的减反增透效果，实现了显示屏的高对比度和清晰度的效果，大大增加了智能驾驶中的使用舒适度，提升出行的安全性。随着新能源汽车快速发展，智能驾舱中防反射膜的应用具备广阔的市场前景。

2 HUD技术

2.1 HUD发展趋势

HUD是智能座舱中消费者感知最明显的模块之一。随着智能座舱的发展，HUD能够与行车电脑、导航仪及倒车雷达等设备协同工作，用于实时显示车速、发动机转速、挡位、转向灯、导航信息、故障提示、巡航状态、前车距离等信息，为用户提供“看得见的智能”效果[33]。

HUD最初应用在航空领域，作为飞行辅助设备。其“平视”设计使飞行员无需要低头即可获取重要信息，从而减少因视线转移而忽略外界环境快速变化所带来的操作延迟。汽车HUD系统利用光学反射原理，将重要的行车信息以虚拟图像形式实时显示在驾驶员的视野中，使驾驶员不必低头，即可以看到行车信息，从而避免注意力分散，消除了潜在的行车隐患。而且，由于投影时虚像落在车正前方，能够缩短驾驶员调整目视焦距的时间，大幅增强行车安全并提升了驾驶体验。

目前市面上的车载平视显示系统主要可分为3种类型：直接反射式（Combiner HUD，C-HUD）、挡风玻璃式（Windshield HUD，W-HUD）与增强现实型（Augmented Reality，AR-HUD）[34-35]，如图7所示。其中，C-HUD与飞机上的HUD结构相似，均通过置于驾驶员前方的一块透明树脂玻璃作为投影介质来呈现信息。W-HUD与AR-HUD均采用挡风玻璃作为显示屏幕，通常将HUD集成于仪表板下方。以下对3种车载平视显示系统进行详细分析。



（a）宝马mini搭载C-HUD显示系统



（b）上海大众搭载W-HUD显示系统



（c）奔驰S级AR-HUD显示系统

图7 车载平视显示系统[34]

（1）C-HUD：C-HUD是在汽车仪表台上放置一块透明树脂玻璃作为投影介质，是一个独立于汽车配件的显示系统，因而具备良好的跨车型适配性与简便的安装特性[36]。其设计较为简单，开发成本也较低，售价也比较合理。然而，由于不能阻碍驾驶员的视线，C-HUD的显示区域较小，约为6~8英尺，投影距离约为1.7~1.9 m，所呈现的信息量有限。同时，因其放置于汽车仪表台位置，低于人眼观测位置，驾驶员在行车过程中需频繁调节视线焦距以兼顾路面信息与投影内容，易造成视觉疲劳。如果发生交通事故，放置

在仪表台上的物体掉落均会对驾驶员造成一定的风险。鉴于上述局限，C-HUD已经趋于淘汰，汽车制造商目前更关注能与车辆更好集成的W-HUD与AR-HUD。

（2）W-HUD：W-HUD以当前挡风玻璃为投影介质显示信息。挡风玻璃通常由内外玻璃及中间聚乙烯醇缩丁醛（Polyvinyl Butyral，PVB）夹层构成，直接投射时可能因玻璃内外表面折射率与厚度差异而产生重影现象。因此，消除重影是W-HUD系统设计中的一个关键问题。与C-HUD相比，W-HUD在视场大小和投影显示面积方面均有显著提升，W-HUD投影显示尺寸可以达到7~12英尺，投影距离约为2.5 m，能够提供更为丰富的驾驶信息。

（3）AR-HUD：AR-HUD在硬件架构上与W-HUD较为接近，均基于影像生成单元，并通过光学系统将图像投射至前挡风玻璃。不同之处在于，AR-HUD依赖更为先进的增强现实算法与软件平台，以实现更大的视场角与多平面显示，从而为驾驶员提供虚拟信息与实际路况深度融合的视觉体验[37]。AR-HUD利用增强现实光学成像和虚实融合技术将车辆行驶信息、智能驾驶等虚拟信息通过车载HUD设备投影到前挡风玻璃上，并使虚拟信息与车外实时、实际的路况相结合，从而提升驾驶信息呈现的直观性与交互性。随着智能驾驶和智能座舱不断深度发展，AR-HUD凭借其更大的成像区域、更多的应用体验场景、更丰富且更深入的人机交互与辅助驾驶体验，是未来车载HUD技术发展的重要方向。

视场角（Field of View，FOV）、虚像距离（Virtual Image Distance，VID）等是评价HUD光学特性的关键指标[38-39]。FOV指驾驶员可观察到的虚拟图像视野范围。在高速公路等场景下，为将提示信息覆盖约3.5 m宽的车道，HUD辅助驾驶系统界面水平视场角应该至少为20°。然而，目前多数HUD产品的FOV与实际需求存在较大差距，视野狭窄问题限制了其与高级驾驶辅助系统（Advanced Driver Assistance System，ADAS）信息的有效配合。VID指HUD透射的虚拟图像到人眼的距离[40]。为实现导航信息与道路实景的自然融合，避免驾驶员目光远近切换，VID应至少大于10 m，理想情况应超过20 m。较远的VID可提供更大的投影尺寸，进而承载更多信息并增强交互体验。传统HUD的VID一般较短（约2.5 m），难以与远方实景融合，显示内容有限且较为集中，易干扰驾驶员对路况的持续关注。因此，扩大FOV与VID、增加成像幅面，是实现车载级虚实融合交互显示的基础。

如图8所示，相较传统HUD，AR-HUD成像区域更广、显示能力更佳。最初的C-HUD成像区域仅为一小块前置的树脂半透明玻璃，FOV仅为5°×1°~4°、投射面积仅为6~8英寸，显示内容非常有限。W-HUD成像区域为部分的前挡风玻璃，FOV为10°×4°、投射面积提升至7~15英寸，成像区域有一定提升。而AR-HUD由于要满足虚实相融的信息展示，成像区域必须更大，因而应用了更大和更先进的PGU，带来FOV提升至13°×5°及以上、投射面积大幅扩展至20英寸以上。同时，比较虚像距离等与HUD性能正相关的参数时，AR-HUD性能亦远超其他类型HUD，无论成像范围还是虚实结合能力均更佳，如表4所示。

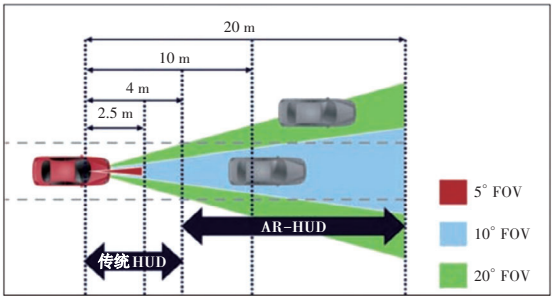


图8　传统HUD与AR-HUD视场角和距离对比[34]

从C-HUD到AR-HUD，汽车抬头显示经历3代技术变迁，从C-HUD到W-HUD，再到AR-HUD，AR-HUD主要技术模式是将图像与现实事物拟合叠加，而为实现深度融合，AR-HUD相比传统HUD需要更长的投影距离和更大的视场角，这带来了技术端和成本端的挑战，尽管多家车企推出搭载AR-HUD的车型，但目前仍然处于小规模试水阶段，AR-HUD除了带来成本上升外，还带来了体积变大、阳光倒灌等技术问题。

表4　3代HUD技术对比

类别	成像区域	成像内容	FOV/(°)	VID/m	显示技术
C-HUD	前置半透明树脂玻璃	车速、导航、油耗、温度	5×1~4	2~3	TFT
W-HUD	前挡玻璃	车速、导航、油耗、温度、周围路况、行车警告灯	10×4	4~5	TFT、DLP
AR-HUD	前挡玻璃	车速、导航、油耗、温度、周围路况、行车警告灯、AR实景导航、来电显示、中控导航、ADAS辅助系统等	15×5	15	TFT、DLP、LCOS、Micro-LED

注：TFF为薄膜晶体管（Thin Film Transistor），DLP为数字光处理（Digital Light Processing），LCOS为硅基液晶（Liquid Cystal on Silicon），Micro-LED为微发光二极管（Micro Light Emitting Diode）。

2.2 光学膜和光学结构在AR-HUD中的应用情况

2.2.1 阳光倒灌问题

由于AR-HUD的大视场角和三次光反射成像体系的体积较大，导致系统存在阳光倒灌的烧机问题。为了减少阳光倒灌对发电机组（Power Generation Unit，PGU）等核心部件的影响，需要对红外波段的光照进行阻隔。目前，常用方法主要是通过引入抗红外粒子，实现对红外波段的吸收阻隔，或者通过真空蒸镀的方法将铝层蒸发于基材上，实现高反光以达到隔热效果，具备较持久的隔热性，但缺点在于红外阻隔膜形成的清晰度不高，影响视野舒适性，无法应用于有透过率要求的光学膜领域。除此之外，还可以通过磁控溅射工艺并结合光学设计将镍、银、钛、金等高级宇航合金材料基于先进多腔高速旋转设备，高速度、高力量地将金属粒子均匀溅射于高张力的基材层上，实现可见光波段的高透过和红外波段的高反射，完成红外阻隔[41-42]。

为了改善阳光倒灌问题，AR-HUD防护功能层膜相对于传统HUD防护功能膜，在结构上更为复杂，经过在PC基材上分别涂布防雾硬化涂层（Anti-Fog Hard Coating，AFHC）硬化功能层和AR抗反射功能层、油墨丝印、红外吸收型OCA贴合、激光切割、框胶模切、框胶组装等关键的生产工序流程。同时，根据AR-HUD的应用痛点和客户需求进行了光学设计、功能设计、结构设计、配方设计，形成了AR-HUD独特的复合结构的功能薄膜，从而赋予产品具备抗UV抗红外耐高温（300~380 nm范围内透过率≤5%，780~1 600 nm波段透过率≤25%）、高耐磨、高水接触角，高透过低反射（双面反射率实现≤4%）等优异性能。该技术成功解决了投影模糊及暗纹、环境高温、湿热等极端条件对AR-HUD的影响，显著提高了AR-HUD产品寿命，保证了产品的运行稳定性，成功导入上汽、比亚迪等车企。

除了通过红外吸收型OCA来控制阳光倒灌的高温对HUD核心部件的影响，另一种方式是通过引入红外反射膜来控制外界高温的影响。采用磁控溅射工艺在所述透明基材层上依次形成第一高折射率层、第一银合金层和第二高折射率层，从而使红外反射膜能够具有较高的可见光透过率和红外反射率，从而提高了红外反射膜的隔热性，进而将次红外反射膜引入AR-HUD防护功能膜中，使得产品300~380 nm范围内透过率≤5%，420~680 nm波段透过率≥90%，780~1 600 nm波段透过率≤40%，成功解决了因阳光直射导致的材料黄变与高温开裂问题，为AR-HUD的PGU核心部件提供了可靠保护。

2.2.2 体积问题

当前AR-HUD多采用离轴三反射镜光学系统，经由三次光反射成像：通过PGU图像单元生成虚拟图像后，经反射镜第一次反射光路至曲面镜，由曲面镜第二次反射放大，最终在挡风玻璃上进行第三次反射入人眼，形成虚像在视线前方，与实景融合。由于三次反射光路需要较大的光机体积，为了给用户带来更好的驾驶体验，满足真实驾驶视线关注距离和多车道覆盖显示需求，AR-HUD对虚像距离（VID和FOV的要求较高——通常FOV需大于10°×3°，VID大于7.5 m。在投影技术不变的前提下，为获得足够大的虚像，需增加对应的系统光学距离（即两块镜片之间的距离+镜片与PGU之间的距离），这将进一步增大体积，使AR-HUD整机体积更加难以控制：AR-HUD的体积约为10~20 L，远大于传统W-HUD 3~6 L的体积[43]。在此背景下，采用光波导和全息膜技术，不仅能缩小AR-HUD尺寸，也能增加FOV，成为AR-HUD光路未来发展方向。

光波导技术通过光耦合器，对图像进行耦入、耦出处理，无需经过3次反射即可直接输出原始的完整图像，能够在实现尽可能大的FOV前提下使得HUD机身更轻薄，节省体积空间。其本质是对微显示画面的拆分和复原，可适配多种微显示方案。其原理为：将完整图像切割成若干块，经折叠后形成视场细条，通过光学镜片耦入并进行视场折叠，光线在波导内实现无损传导后，由耦出端将分割图像重组复原。通过多次的波导无损传播，改变光的传递方向，从而缩小AR-HUD的光路系统体积。作为支撑增强现实的核心光学技术，光波导已成为国内外科技企业的布局重点。

根据光耦合器的不同，光波导可分为几何光波导和衍射光波导，其原理差异如表5所示。几何光波导主要包括阵列光波导，几何光波导的阵列波导技术通过核心元件半透半反镜面阵列，图像源的光线耦合进入波导，进行全反射传输至半透半反镜面阵列后，开始被反射进入人眼。阵列光波导的优势是可以对应较大的眼盒，图像显示效果好，但半透半反镜面工艺难度大，总体良率难以保证。

衍射光波导利用光栅的衍射特性来设计“光路”，让光在设计好的路径上传播，将微投影系统发出的光导入人眼[44]。衍射光波导技术包括表面浮雕光栅波导和全息体光栅波导和几何光波导技术方案对比，衍

表5　几何光波导和衍射光波导对比

主要技术路径		原理阐述	优势	劣势
几何光波导	阵列光波导	原理：图像源的光线耦合进入波导，进行全反射传输，至半透半反镜面阵列后，开始被反射进入人眼 核心元件：半透半反镜面阵列	能够实现一维、二维扩瞳，对应较大的眼盒 解决体积和FOV兼得问题 相较衍射光波导技术，图像显示效果更好	实现扩瞳的难度较大 半透半反镜面工艺复杂，需要粘合，总体良率难以保证
衍射光波导	表面浮雕光波导	原理：几何光波导中，立体的镜面阵列、棱镜等被几乎平面化的“衍射光栅”取代，光的传导是立体到平面的过程 核心元件：光栅 其中，表面浮雕光栅通过纳米压印技术在薄膜层上“压”出所需要的痕迹；全息体光栅通过使用激光激发的干涉图案，曝光附着在基底上的光敏材料上	可实现二维扩瞳 量产难度低 良率更高	较大的先进设备投入 相较几何光波导，显示效果差 彩虹效应
	全息体光栅波导		相较阵列光波导技术体积减小，更有效 涉及成本，制造成本优势 生产效率高 能量利用率高	相较表面浮雕光栅，无法实现自动化制造，量产难度较高 色散问题

射光波导技术一般采用的是平面型的波导片，光栅结构可以经过特殊的设计进而集成在波导基底上，作为耦入和耦出的元器件，微型图像源利用特定设计的光学系统整体的功能，实现以更小的入射光瞳和出瞳扩展元器件，最终实现增强现实显示的效果。

衍射光波导技术中应用比较成熟的是表面浮雕光栅波导，通过光刻、刻蚀、纳米压印等工艺在材料表面“雕刻”出高峰和低谷，以此实现能够满足所需光学性能的周期性结构。当光束照射到衍射光栅上时，光束会被削弱，分裂成多个部分，并朝不同的方向传播。对于线条光栅来说，光栅周期决定了衍射光束的输出角度。衍射方向垂直于光栅线，且所有衍射级次的效率取决于光栅横截面轮廓的形状和高度。通过精确控制周期、占空比、槽深、侧壁倾角等光栅参数，光栅能够对不同波长的光的能量进行精确控制，集中到衍射光波导的工作级次上，最大程度消除色散问题。

表面浮雕光栅波导是光波导重要的耦合器，可以根据光栅表面的不同的槽形形状，表面浮雕光栅波导具有很多种类型的光栅，尤其是倾斜光栅是目前用途最广的光学元器件，倾斜光栅的角度带宽和波长带宽通过调整倾斜角度来进行调整，并且相同的周期内的前倾角以及后倾角分别对其进行优化调整，由于该方案具有非常大的设计自由度，产品需求的波长带宽和角度带宽得到了很大的满足。值得一提的是闪耀光栅在较宽的入射角度范围内能够将衍射光能量集中在某一个衍射级，而抑制其他衍射级的能量损失，但是由于闪耀光栅的特殊结构，高精度加工难度大。

微型显示器激发输出的光束经输入表面浮雕光栅波导技术的耦合器被衍射进入波导层的特定通道，在光波导中以全反射的形式，传播到设计的转折光栅，穿过一个维度方向的出瞳扩展，到达输出的耦合器后，光束继续实现另一个维度方向的出瞳扩展，比如通过对倾斜光栅或闪耀光栅的耦出器件的槽深进行优化调整，达到出瞳面输出的光束分布均匀的效果。随着终端消费者对于全彩色宽波段的强烈需求，微型显示器发射的光源必须包括红色、绿色、蓝色3种不同波长的光束，但是考虑到衍射光栅的衍射效率和衍射角与波长具有很强的相关性，因此研发人员设计一种新的技术方案，通过设计开发多层光波导的堆叠结构，实现了在特定的波导层中传输特定的波长的光，分别调制开发了每层波导的出入耦合元件光学特性，实现了全彩的显示效果。因此，为了使光波导方案中的红色、绿色、蓝色各个波段的视场角最大化，解决方案通常为使用3层甚至更多层的堆叠的光波导片，令单色光波分别通过对应的波导片，优化设计开发每片波导的红色、绿色、蓝色输入和输出耦合器的衍射角来获得耦合最大视场角。但是，由于设计和工艺门槛非常高，目前能够完全满足终端消费者需求的消费级表面浮雕光栅波导技术产品较少。利用纳米压印技术制作的表面浮雕光栅结构自由度高，调节光栅参数便利，相比几何光波导的技术方案具有更佳的出瞳扩展连续性以及均匀性。然而，其缺点是表面浮雕光栅的衍射层级越多，显示系统的成像画面亮度越低、彩虹现象更严重。因此，在进行表面浮雕光栅设计时，需配合光波导技术的光束和设备的具体参数。

在衍射光波导体系中，全息体光栅波导同样基于衍射光栅原理，其区别是采用全息光学元件（Holographic Optical Element，HOE）代替浮雕光栅，实现从立体到平面的光传导过程[45]。全息光学元件是利用光全息术，在记录材料薄膜上记录点光源形成的干涉条纹，经处理后制成光栅条纹结构的薄膜光学元件，具有光束准直、聚焦、偏转等功能。记录材料包括

卤化银乳胶、重铬酸明胶、光致聚合物、液晶、光折变晶体等。全息体光栅波导是具有周期结构的光学元件，一般通过双光束全息曝光的方式，直接在微米级厚度感光聚合物薄膜内部干涉形成明暗分布的干涉条纹，引起材料内部折射率的周期性变化。该结构周期一般为纳米级，且通常具有正弦凹槽的光栅结构，尺度与可见光波长相当，从而实现对光场的有效调控。同时凭借其波长和角度选择性，HOE兼具较高衍射效率与良好透光性，是HUD领域备受关注的光学功能材料。综上，全息技术可在较小体积下对光场进行实时调控与重构，是AR-HUD重要发展方向。

3 智能调控玻璃

Mordor Intelligence™行业报告显示，全球汽车玻璃市场近5年复合年增长率将超过4%，智能玻璃市场受到广泛关注，尤其是在高端汽车领域[46]。智能玻璃通过提升驾乘舒适性并在安全、隐私与温控方面提供卓越功能，正逐渐改变驾驶体验。2020年，智能玻璃约占汽车玻璃3/4份额，未来几年内市场渗透率仍将持续增长。智能玻璃技术有望以全新方式提升行车安全性、舒适度与便捷性。

智能玻璃窗又称可切换玻璃，集成了电致变色材料、液晶器件及嵌入式传感器等先进技术与材料，使其能够动态调节透光率、热传递乃至实现信息显示功能。随着汽车智能化发展，智能调控玻璃广泛应用于全景天幕、车窗、后视镜及隐私隔断等场景，旨在优化驾驶体验、增强安全舒适性并实现节能目标。

3.1 智能调光玻璃

调光玻璃通过改变透明材料的透光状态，实现透明、半透明或不透明的外观转换。智能调光玻璃按驱动方式不同可分为主动调光和被动调光2种类型。若需外部电能触发状态切换则为主动调光，否则为被动调光。主动式可切换玻璃技术的类型及其常见应用包括：电致变色(Electrochromic Glass，EC)玻璃、聚合物分散液晶(Polymer Dispersed Liquid Crystal，PDLC)玻璃、悬浮颗粒装置(Suspended Particle Device，SPD)玻璃。

3.1.1 EC玻璃

EC玻璃的工作原理主要基于电致变色材料的特性，利用电流驱动玻璃中的离子移动来改变其颜色和透明度[47-48]，可以快速响应用户的指令。其工作原理如图9所示，在未施加电压的情况下，电致变色材料处于透明或半透明状态，当外加电压通过电致变色材料时，材料中的离子会发生迁移，导致材料的颜色发生变化，进而调整透光率的变化，实现对光线的调节。

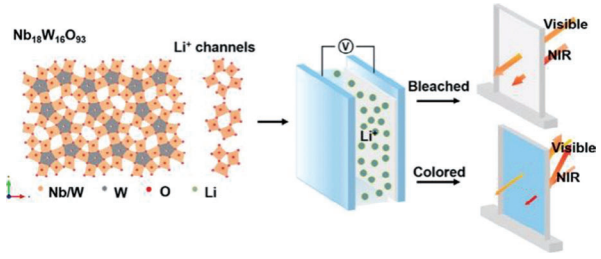


图9 电致变色原理[49]

电致变色玻璃广泛用于车窗、车载天幕，在阳光强烈的夏季，电致变色车窗能够自动变暗，在保持自然采光的同时有效控制车内的热量，减少强烈阳光照射，提高乘客的舒适度。奔驰S级轿车和宝马7系的部分车型采用了电致变色天幕，驾驶员或乘客可以通过车内控制系统调整天幕的透明度。特别是在夏季，电致变色天窗可以防止阳光直射的同时保持车内亮度，提升了车内的舒适感和豪华感。

3.1.2 PDLC与SPD玻璃

液晶调光智能玻璃是一种通过电场控制透光率的智能玻璃，最常见的类型是PDLC玻璃[50]。液晶智能玻璃主要结构包括液晶层、导电层与保护层。液晶层是含有液晶(Liquid Crystal，LC)分子的聚合物层，是控制透明度的关键部分；导电层通常为透明导电膜，如PVB，用于施加电场；保护层为外层，为普通玻璃或塑料，用于保护液晶层并提供机械强度。其利用PDLC技术，在两层透明导电膜之间填充含有液晶微滴的聚合物基质，当电场关闭时，LC分子呈随机分布状态，光线散射且光轴取向随机，玻璃变得不透明；当施加电场时，液晶分子随电场方向排列整齐，LC分子与聚合物基质折射率相匹配，玻璃变得透明，关闭电场后，LC分子恢复自由排列，自由切换雾化和透明2种状态[51]。

SPD智能玻璃同样通过电场调控透光率[52-53]，其通过在2层透明导电膜之间填充含有悬浮粒子的液体来实现这一功能。当施加电压时，悬浮粒子会在电场的作用下沿电场方向排列，形成通道，允许光线通过，玻璃变得透明。当电压移除时，悬浮粒子恢复随机分布，阻挡光线，玻璃变得不透明或半透明。相比于其他类型的智能玻璃，SPD玻璃的响应速度非常快，通常在几毫秒内即可完成透光率的调节。如图10所示，电动汽车在阳光下行驶时，传统全透明天窗使太阳辐射直接照射车内，造成温度迅速上升，导致空调系统的负荷增加，从而消耗更多电量。而集成PDLC或SPD技术的智能天窗则可根据阳光强度、车内温度或

乘客需求，快速调整透光率，缓解阳光直射带来的不适，降低车内温度，减少空调使用，从而优化电池的能耗效率，延长电动汽车的续驶里程。



图10　PDLC与SPD玻璃的车载应用[54]

3.1.3　其他智能玻璃及其车载应用

热致变色智能玻璃具有独特的温度响应特性，当温度达到某个阈值时，玻璃会自发地改变颜色以增加或减少光线辐射进入内部，有助于降低能耗[55]。在低温状态下，热致变色材料通常是透明或半透明的。当外界温度升高时，材料分子结构会发生变化，导致颜色发生变化，颜色的变化会导致透光率变化，从而实现对光线的调节。温度越高，材料的颜色越深，透光率越低，当温度降低时，材料会逐渐恢复到初始的透明状态。

与之类似，光致变色玻璃依赖光敏分子或微粒的光化学响应。这些光敏分子或微粒在吸收特定波长的光后会发生化学反应，导致其光学性质发生变化，从而改变玻璃的透光率。例如，银卤化物在受到紫外线照射时，Ag^+会被还原成Ag原子，形成微小的银颗粒，使玻璃变暗[56]。

3.1.4　智能调控玻璃发展趋势

智能调控玻璃已经在高端车型的车窗玻璃、全景天幕、后视镜等领域广泛应用，可以根据环境光照强度自动调节透光率，提供舒适的车内光线环境和隐私保护，减少空调和照明的能耗，或应用于自动防眩目后视镜，减少眩光，保护眼睛，提高舒适度与夜间驾驶的安全性。

EC、SPD、PDLC均属电控型智能调控玻璃，通过施加电压实现玻璃颜色切换，适用于多种场景。但是，其成本较高，并且为了维持其工作状态，必须接入稳定的电力供应，并配备相应的控制系统，增加了安装复杂性和维护难度。相比之下，热致变色与光致变色玻璃无需外部电源和复杂的控制系统，维护成本低，但是目前光致变色玻璃的响应速度相对较慢，且当前的颜色变化有限[57]。可以通过优化材料和工艺来提高响应速度、降低维护成本、开发更多样化的颜色选项以满足不同需求。未来，智能玻璃将调光功能与触控、显示、AR等功能集成于单片玻璃，结合AI算法，优化调光策略，实现更精确、更快速的自适应调节，实现多功能一体化的智能玻璃[58]。

3.2　新型显示、智能交互玻璃

近年来，车载显示技术推动了汽车内饰和驾驶体验的革新，尤其是新型车载显示和可交互玻璃的应用，已成为提升用户体验、信息传递和驾驶安全的重要手段。新型车载显示与可交互玻璃是一类集成显示和触控功能的透明玻璃，使得汽车在保持传统车窗和挡风玻璃透明性的同时，能在玻璃上显示信息。车载显示玻璃通过多种显示技术将行车信息、导航、娱乐和其他内容展示在驾驶者的视野范围内。可交互玻璃则进一步加入触摸、手势识别、语音控制等交互方式，使驾驶者可以更方便地与车辆进行信息交互。

3.2.1　车窗智能信息显示玻璃

如图11所示，车窗智能信息显示器是一种集信息展示、驾驶辅助和娱乐互动为一体的新兴车载显示技术。该显示器可以在挡风玻璃、侧窗、后窗等车窗位置上，提供实时导航信息、天气情况、车速信息等内容，增强驾驶体验，同时提升行车安全性和便利性。



图11　车窗智能信息显示器的应用场景[59]

车窗智能信息显示器的构造相对复杂，需要集成多项先进技术，如透明显示技术、智能传感与感知系统、图像处理与增强现实算法、中央控制模块及专用玻璃材料。大多数车窗智能显示器采用具有电致变色或智能调光的玻璃材料，通过电流控制透明度。这类玻璃不仅能保证显示效果，还具备调节车窗透光度和隔热的功能。

3.2.2　裸眼3D与LCD玻璃

LCD显示屏已广泛应用于汽车的仪表盘、中央控制台以及HUD系统中，为驾驶员提供导航、行车信息以及娱乐内容的显示[60]。由于消费者对驾驶体验的期望不断提高，尤其在中高端车型中，LCD玻璃显示技术的使用率逐渐增加。将裸眼3D技术与LCD屏幕结合，可以在传统平面显示的基础上实现立体视觉效果，为用户带来身临其境的体验[61]。

LCD技术具有高亮度、无缝拼接和适合现实超大屏幕显示的特点，但是屏幕显示缺乏立体感，观看舒

适度不如3D影像，裸眼3D视差屏障技术，可以结合利用液晶层和偏振膜制造出一系列明暗相间的条纹[62]。在立体显示模式下视差栅栏会被激活，双眼的间距产生的微小视差会导致不透光条纹遮挡左右眼，使得左眼和右眼看到的像素并不相同。视差屏障技术与既有的LCD液晶工艺兼容，只在自屏幕表面额外镀一层膜，再对屏幕驱动电路做一些改造与匹配即可，因此在量产性和成本上较具优势，但由于挡光，其画面亮度只有2D屏的1/4。除此之外，指向光源3D技术、柱状透镜技术也广泛被用于LCD屏中的裸眼3D显示。2019年8月，博世推出了其裸眼3D显示屏产品。在停车时，逼真的显示画面可以让驾驶员更加直观有效地判断车辆与墙壁之间的剩余空间。此外，该技术还在地图导航领域发挥较大作用。在复杂路况环境中，驾驶员可以更加明确自己要在哪一栋楼前转弯。同时，驾驶员和车内乘员无需佩戴3D眼镜或其他辅助设备即可实现上述效果[63]。大陆集团与美国硅谷Leia公司合作开发的光场显示器、马瑞利的裸眼3D显示屏可用来取代传统汽车仪表板，均无需配合3D眼镜，即可向驾驶员呈现出立体效果。

如图12所示，裸眼3D LCD屏幕可以用于汽车的中控台和仪表板显示，通过裸眼3D效果来呈现导航、道路信息、车辆状态等内容，使驾驶员在不分散视线的情况下清晰了解车况信息。此外，后排娱乐系统也可配备裸眼3D功能，为乘客带来更丰富的观影体验。传统的3D内容制作成本较高，且不同应用场景下内容需求差异较大。未来，AI技术将成为裸眼3D内容生成的重要工具，通过深度学习和图像处理算法，智能识别和处理平面内容并生成立体效果。此外，AI还能根据用户偏好自动优化显示效果，实现个性化的裸眼3D体验。



图12　裸眼3D成像技术与车载应用[63]

3.3　光学材料在智能调控玻璃中的应用

3.3.1　涂层在智能调控玻璃中的应用

3.3.1.1　光学涂层

光学涂层主要应用于提高玻璃的光学性能，如透光率和反射率，包括防眩光学涂层、隔热光学涂层、电致变色涂层。

光学涂层的关键原理之一是薄膜干涉效应。通过控制涂层厚度和材料折射率，光线在涂层的多层结构中发生多次反射与干涉，从而增强或削弱特定波长的光[64]。防眩光涂层正是通过这种干涉效应减少可见光的反射，提升驾驶员的视觉体验。现代汽车前挡风玻璃和后视镜中广泛采用防眩光光学涂层。这种涂层通过在玻璃表面添加特殊的氧化物涂层来减少光的反射率，从而有效减少太阳光或前车大灯引起的眩光现象[65]。例如，宝马在其部分车型中采用了纳米级防眩光涂层技术，可在强光环境下保持驾驶员视野清晰。

隔热光学涂层基于光谱选择性原理，实现对不同波段光线的差异化调控。典型金属氧化物涂层能高效反射红外辐射，同时保持较高的可见光透过率，从而在维持舱内明亮度的同时抑制温升[66]。隔热光学涂层，可减少太阳光中红外线透过，广泛应用于车窗和天窗，降低车内温度。丰田汽车在其混合动力车型中引入了此项隔热涂层技术，不仅提高了车内舒适度，还减少了燃料消耗。

电致变色光学涂层的原理是基于材料的电化学反应。当外加电压时，涂层材料中的离子发生迁移，改变其光学特性，进而调节光的透过率。这种技术使得玻璃在不使用机械遮阳设备的情况下自动变暗或变亮，达到智能调光的效果[67]。在特斯拉Model S的全景天窗中，电致变色涂层技术允许用户根据光照条件调节天窗的透明度，从而减少阳光直射，提高乘客的舒适度。类似地，还有根据温度变化自动调节透光率的热致变色光学涂层、根据光照强度变化自动调节透光率的光致变色光学涂层。Zhang等[68]制备了一种H^+或Li^+掺杂的HPC-PAA水凝胶，具有3层夹层结构（ITO玻璃、H^+/Li^+掺杂HPC-PAA热致变色水凝胶电解质、WO_3镀膜ITO玻璃），利用水凝胶层引起的热致变色和WO_3层引起的电致变色之间的协同作用实现高透明到不透明状态的相互转换。

3.3.1.2　自清洁涂层

无论是雨水、灰尘、还是其他污染物，均会影响驾驶员的视野和行车安全，因此车载玻璃的清洁问题一直是汽车驾驶中的重要问题。自清洁涂层技术通过自动清除玻璃表面污垢，提升了汽车的智能化程度和驾驶体验。

光催化涂层通常使用二氧化钛等光催化剂材料。在紫外光照射下，涂层材料产生电子和空穴，这些活性粒子可以与水分子和空气中的氧气反应，生成具有强氧化性的羟基自由基。这些自由基能够分解附着在玻璃表面的有机物质，如油脂、灰尘等，从而实现自

清洁。此外，光催化过程还能增加玻璃表面的亲水性，使得水能够均匀地铺展在玻璃上，形成水膜，有效去除污垢[69]。例如，日产汽车在部分车型上引入了光催化自清洁玻璃涂层技术，通过紫外线照射分解车窗上的有机物，同时雨水也可以轻松冲刷掉污物。

超疏水涂层的原理是基于表面化学修饰和微纳米结构的设计，使涂层表面对水表现出极强的疏水性，形成超过150°的接触角。当水滴落到超疏水涂层表面时，由于其接触面积小，水滴迅速滑落，并带走污物。该效应不仅可以减少雨水停留，还能防止灰尘、泥浆等附着。超疏水涂层通过形成高接触角的表面，使水滴难以附着，污物能够随着水滴滑落，从而保持玻璃清洁。常见的超疏水涂层材料包括氟化物和纳米结构材料[70]。例如，福特汽车在其高端车型上采用了超疏水自清洁技术，雨水在玻璃表面形成珠状水滴迅速滑落，不留水痕，减少了驾驶员在雨天的视野障碍。

为了增强自清洁效果并扩展功能性，部分汽车制造商开发了集成光催化和超疏水功能的复合自清洁涂层。这种涂层不仅能够在阳光照射下分解污物，还能够通过超疏水效应使污物随水滴滑落，从而达到更佳的自清洁效果[71]。大众汽车在部分车型的前风窗玻璃上就采用了此类多功能自清洁涂层，使其在各种天气条件下都能保持清洁。

3.3.1.3　防紫外涂层

汽车的车窗玻璃不仅是乘客与外界环境之间的屏障，还是车内舒适度和安全性的重要保障。长期暴露在紫外线下，不仅会导致车内饰材料老化，还会对人体健康产生威胁。因此，防紫外涂层逐渐成为车载玻璃中不可或缺的部分。

防紫外涂层的原理主要基于光的吸收和反射，通过特定材料的应用，阻挡或吸收紫外线，从而减少UV对车内的侵害。例如，防紫外涂层中的氧化物材料通过吸收紫外线中的高能量光子，将其转化为较低能量的热能，从而阻挡紫外线穿透玻璃。这些材料中的电子在吸收紫外光子后，从价带跃迁到导带，释放的能量以热的形式散发，从而达到吸收紫外线的效果[72]。这种吸收效应主要用于阻挡UV-B（波长280~320 nm）和UV-A（波长320~400 nm）。日产汽车在部分高端车型上采用了含钛氧化物的防紫外玻璃涂层，这种涂层能够阻挡超过90%的UV-B辐射，极大地提升了车内的防护能力。一些防紫外涂层采用高反射性的金属氧化物材料，通过在玻璃表面沉积一层具有高反射率的纳米材料，涂层可以反射紫外线而不吸收。这类涂层能够通过反射紫外线来减少车内热量积聚，同时保持车窗的高透明度[73]。银纳米涂层的优点是其对可见光的高透过性，同时能够有效反射紫外线和红外线，减少光线对车内的伤害。例如，特斯拉在其Model X车型中采用了一种基于银纳米粒子的复合涂层技术，这种涂层不仅具有优异的隔热效果，还能阻挡95%以上的紫外线[74]。多层复合涂层通过在不同层之间的材料折射率差异以及光干涉效应，能够对紫外线进行选择性吸收和反射。这种涂层不仅可以有效阻挡紫外线，还能提高车窗玻璃对可见光的透射率，使车内环境更加明亮舒适。例如，宝马的防紫外复合涂层技术结合了氧化铟锡和钛氧化物，使得车窗玻璃在阻挡紫外线的同时，保持高透光率和低能耗。

3.3.2　液晶材料在智能调控玻璃中的应用

液晶材料因其独特的光学和电学性质，在智能调控玻璃领域得到了广泛应用。液晶分子能够在电场的作用下改变排列状态，从而实现对光的透射、反射和散射的控制[75-76]。PDLC玻璃通过施加电压来控制液晶分子的排列状态，从而实现透明与不透明之间的切换。PDLC玻璃在汽车天窗、侧窗的应用可以提供隐私保护和遮阳功能。北京科技大学团队通过系统研究乙烯基醚和硫醇化合物的功能和结构相容性制备了PDLC薄膜，当薄膜厚度调整到8 μm时，薄膜饱和电压降低到6.7 V，PDLC薄膜表现出出色的光调制能力。

热致变色液晶玻璃利用液晶材料对温度变化的敏感性来实现颜色的变化。这种玻璃可以在不同的温度下自动调整透光率，从而实现节能效果。如图13所示，中国科学院化学研究所[77]研究了一种基于液晶和温敏聚合物复合材料的热致变色玻璃。试验结果表明，这种玻璃在高温下变为深色，有效阻挡阳光，而在低温下恢复透明，保证室内采光。

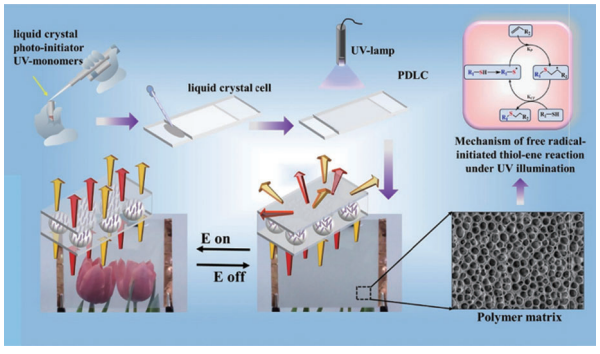


图13　基于液晶和温敏聚合物复合材料的热致变色玻璃制备流程[77]

液晶材料在车载调控玻璃中的应用取得了显著进展，并展示了广阔的发展潜力。提高响应速度和透光率控制精度是液晶车载调控玻璃的重要发展方向。通过优化液晶分子结构、改进聚合物基质以及开发新型驱动技术，可以进一步提高其性能。从性能提升到功能集成，再到节能环保和智能化，这些技术不仅提高了玻璃的功能性和灵活性，还为驾驶安全性和舒适性带来了新的可能性[78-80]。

3.3.3　染料在智能调控玻璃中的应用

染料在智能调控玻璃中的应用主要体现在光致变色和电致变色2种技术中。这些技术利用特定的染料或材料，通过外界条件的变化来调整玻璃的透光率，从而实现智能化控制。

光致变色智能玻璃利用特定的光敏染料，在紫外线或可见光照射下发生化学反应，从而改变其透光率。常见的光敏材料包括螺吡喃类化合物、偶氮苯等。当受到光照时，这些染料分子结构发生变化，导致颜色加深；而当光照减弱或消失时，染料分子恢复原状，玻璃再次变得透明。这种特性使得光致变色玻璃能够在不同光照条件下自动调节室内光线强度，有效阻挡眩光并减少热量进入驾驶室内，达到节能减排的效果。电致变色智能玻璃通过施加电压来控制染料的状态，进而调整透光率。这类玻璃通常由两层导电玻璃夹持一层含有电解质和染料的薄膜构成。常用的电致变色材料包括氧化钨、普鲁士蓝以及有机染料如紫罗碱等。当电流通过时，染料分子会发生氧化还原反应，引起颜色变化，从而实现对透光率的精确控制。例如，View公司开发了Dynamic Glass电致变色玻璃，用户可以通过手机应用远程控制窗户的颜色和透光率[81]。

为了满足市场上日益增长的多样化需求，研究人员正在努力拓宽现有染料的颜色选择范围，并提供更为丰富的视觉效果。通过精细调控染料配方及加工工艺参数，可以实现从浅蓝到深灰等多种色彩的变化。此外，基于用户偏好进行个性化设计的服务模式也将逐渐普及，为客户提供独一无二的产品体验。另外，环境保护已成为全球共识，因此寻找更加绿色、无毒害且可循环利用的染料替代品成为重要课题。

3.3.4　偏光片在智能调控玻璃中的应用

偏光片可控制特定光束的偏振方向。自然光在通过偏光片时，振动方向与偏光片透过轴垂直的光将被吸收，透过光只剩下振动方向与偏光片透过轴平行的偏振光。为了只允许单一方向的光线通过，通过上下两片偏光片的垂直排列就可以控制光线。

如图14所示，偏光片实际是一种产生偏振光的光学薄膜，偏光层由聚乙烯醇（Polyvinyl Alcohol，PVA）薄膜经染色、拉伸而成，此层为偏光片的主要部分，又称偏光原膜。偏光层决定了偏光片的偏光性能及透过率，也是影响偏光片色调、光学耐久性的主要部分。偏光层基本加工工艺按染色方式可分为染料系列、碘系列两大类，按拉伸工艺可分为干拉伸、湿拉伸两大类，改变其材质及加工工艺可实现对偏光、透过率、色调及光学耐久性的调整。起偏振作用的核心膜材是PVA膜，该材料决定了偏光片的偏光性能、透光度、偏振度、色调等关键光学指标[82]。PVA膜经过染色后吸附具有二向吸收功能的碘分子，通过拉伸使得碘分子在PVA膜上有序排列，形成具有均匀二向吸收功能的偏光膜，其透过轴与拉伸的方向垂直。PVA膜制成的偏光层容易吸水、褪色而失去偏光性能，因此需要两面均使用光学均匀性好、透明度高的三醋酸纤维素酯（Triacetyl Cellulose，TAC）膜，隔绝水分、空气，保护偏光层。TAC膜充当PVA膜的支撑体，保证了PVA膜的延伸不会回缩，另外TAC膜还具有优异的耐紫外线、耐酸碱特性，保护PVA膜不受到水汽、紫外线等外界环境因素损害。采用具有UV CUT和Anti-Glare功能的TAC膜，可制成抗紫外线偏光片和防眩光偏光片。反射膜侧胶的作用是将反射膜与TAC膜牢固地粘合在一起，其工艺要求不允许有再剥离性。压敏胶是偏光片贴合在LCD面板上的胶材，决定了偏光片的粘着性能以及贴片加工性能，其性能是LCD偏光片用户最关心的问题之一。离型膜是一面涂有硅涂层的对苯二甲酸乙二酯薄膜，主要起保护压敏胶层的作用，同时其剥离力对LCD贴片加工性有一定的影响。保护膜是一面涂有乙烯醋酸乙烯酯共聚物层的聚乙烯薄膜，黏度较低，起保护TAC薄膜表面的作用。

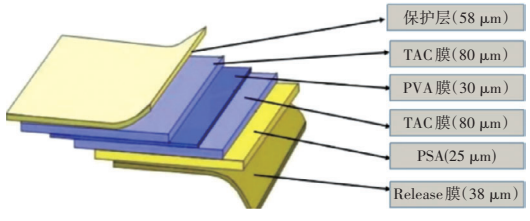


图14　偏光片的结构示意[82]

3.3.5　透明导电材料在智能调控玻璃中的应用

透明导电层是LCD显示的重要组成部分之一，用于传导电信号并控制液晶分子的排列，从而实现图像显示。常用的透明导电材料主要包括氧化铟锡（ITO）、氟掺杂氧化锡（FTO）、铝掺杂氧化锌（AZO）、

镓掺杂氧化锌(GZO)、石墨烯等,其在性能、成本和应用场景上各具特点。ITO是目前应用最广泛的透明导电材料,具有良好的导电性和高透光率,在可见光范围内可达到85%以上的透光率,是LCD、OLED等显示设备的标准选择。然而,ITO的主要缺点是成本高,且在柔性显示器上的应用受限,因为ITO薄膜易碎、易裂,难以适应弯曲或折叠需求。FTO在导电性上稍逊于ITO,但具有更好的耐高温特性,因此适用于需要高温工艺处理的显示器制造。虽然透光率比ITO稍低,但在耐用性和稳定性上有一定优势,适合一些特殊环境下的应用。AZO和GZO是氧化锌基的透明导电材料,具有资源丰富、环保、成本低的优势,是ITO的经济替代材料。铝或镓的掺杂可以显著提高氧化锌的导电性,但其在湿度和温度较高的条件下稳定性较差,因此更适合应用于低成本、对导电性要求不高的显示产品。

3.4 智能玻璃未来发展趋势

随着汽车智能化程度不断提升,车载智能玻璃正由传统的物理隔断与采光部件,逐步演进为融合智能调光、三维显示与人机交互等多功能的综合性光学平台。未来的智能玻璃将在保障行车安全与环境舒适性的基础上,进一步打通车内外的信息壁垒,成为连接乘员、车辆与外界的多功能交互界面。

3.4.1 能源效率与低功耗改进

目前,PDLC和SPD玻璃在保持变色状态时通常需要持续电流支持,存在一定静态功耗。未来,研发重点在于通过新材料体系与驱动电路优化,降低工作电压与电流,从而减少能耗。在电动汽车中,智能玻璃的低功耗化有利于增加整车续驶里程。另一重要方向是研发具有双稳态或记忆效应的"记忆型"智能玻璃,其可在断电后维持透射/雾化状态,仅在切换时消耗能量,从而实现长期调光场景下的节能运行。

3.4.2 全车身互动显示

未来,汽车智能玻璃可以在透明模式和显示模式之间无缝切换,车窗不仅是看风景的窗户,也将成为广告显示、通知展示的平台。例如,在夜晚停车时,汽车车窗可以自动进入显示模式,为行人展示车辆状态或展示特定品牌的广告。此外,这些显示功能可支持触控,车主和乘客能够直接在车窗上进行简单的手势操作,查看信息、进行支付或互动。

3.4.3 沉浸式体验的互动窗口

未来,车窗将实现3D显示功能,将普通玻璃升级为全息屏幕,为乘客提供一个与外界交互的沉浸式窗口。对于乘客,3D显示技术能把车窗变成一个互动娱乐空间。例如,车窗上可以实时呈现出沿途的风景解说,或为儿童乘客展示趣味的虚拟生物在窗外"游玩",乘客甚至可以选择在车窗上观看电影、玩3D游戏或体验虚拟旅行。车窗可以模拟外太空、海底世界等虚拟场景,为旅程增添无限乐趣。这种沉浸式显示技术不再局限于信息呈现,而是为乘客打造个性化的出行体验。全息投影助手可以"浮现"在车窗上,与乘客互动,解答问题、调节温度、设定导航路径。例如,车窗上可能出现一个虚拟助手的人物形象,为乘客介绍目的地信息或推荐沿途的热门景点和餐厅。该方式不仅增加了汽车的科技感,还能让乘客体验到与科幻电影类似的虚拟互动情景。

3.4.4 5G和扩展现实(XR)应用

随着5G网络的发展,超高速率和低延迟的特点使得裸眼3D能够实现实时视频的3D化应用,满足在线流媒体、游戏和互动内容的需求。5G还使裸眼3D技术可以通过云端实现内容传输和处理,减轻终端设备的计算压力,提高显示效果。结合XR应用,裸眼3D LCD屏幕有望在虚拟现实、增强现实等领域获得广泛应用,为用户提供更为沉浸的互动体验。

3.4.5 外观定制与情感化互动

未来,智能玻璃车窗的应用还将体现在外观的个性化与情感互动中。例如,车窗会根据天气变化而显示不同的色彩或纹理。此外,这种智能车窗甚至可以与车主的心情相连。例如,通过生物识别技术,车窗可以根据车主的情绪调整透明度、颜色,甚至显示不同的图案或动画,表达车主心情。这种情感化的设计不仅让车窗更具互动性和趣味性,也赋予汽车独特的个性和温度。

综上所述,未来智能车窗将以智能调光、立体显示、互动交互等技术为基础,发展成为全功能的多维互动平台。这些车窗将不仅是观察世界的"玻璃",也是高效的信息终端、沉浸的娱乐平台、安全的保护系统以及车内外沟通的桥梁。

4 自动驾驶下的成像

4.1 自动驾驶下的成像和发展趋势

自动驾驶的实现高度依赖于多层次、多类型的传感器系统。根据其感知对象不同,车载传感器可以划分为2大类别:车身感知传感器和环境感知传感器。车身感知传感器如压力传感器、位置传感器、温度传感器、线加速度传感器、角加速度传感器等,如同"神

经元”一般遍布在动力、底盘及车身等各个系统之中，用来感知车辆自身信息，显著提升了汽车的信息化水平。环境感知传感器是智能驾驶技术的核心组成部分，专注于对周围环境的感知与识别，能够精确捕捉并整合车辆周围的各种环境数据，并将这些数据传输至汽车计算机系统，为汽车自动驾驶系统做出精准、实时决策提供核心依据和关键支持，进而推动汽车自动驾驶等技术的发展。环境感知传感器可分为2种类型：主动型传感器包括激光雷达、毫米波雷达和超声波雷达，被动型传感器包括摄像头和红外传感器。

激光雷达主要由发射系统、接收系统及信号处理系统所组成，其中激光器、扫描器及光学组件等是激光雷达系统的重要组件，多种组件的整合能够提供高分辨率的图像。激光雷达的工作原理是根据激光遇到障碍物进行折返，计算目标与自己的距离，而且激光光束可以准确衡量现场物理情况，并根据实际情况绘制3D环境地图，其精确度可以准确到厘米甚至毫米。

毫米波雷达在自动驾驶中，主要是在30~300 GHz毫米的波段探测，其工作原理主要是通过振荡器产生频率，并根据实际情况逐渐增加与稳定信号，从而能够计算频率差值，掌握自身与障碍物之间的距离，并按照工作状态进行频段划分，提高运行效果。目前比较常见的毫米波雷达主要有3种类型。短程毫米波雷达：安装在车辆的后保险杠内，为了观察汽车盲点或根据实际情况辅助车辆变道；中程毫米波雷达：安装在车辆的前保险杠内，为了检测前车的速度，紧急情况下能够实现制动的效果；长程毫米波雷达：分辨率准确度远远高于前2种，为了最终确定行驶方向。

超声波雷达通过超声波发射装置向外发出超声波，通过接收器接收到返回的超声波信号来测算距离。常用的探头工作频率包括40 kHz、48 kHz和58 kHz，频率越高，灵敏度越高，但水平与垂直方向的探测角度越小。超声波针对液体和固体都具备较强的穿透性，这种技术能够帮助汽车探测外部环境，提高汽车反应的灵敏度。自动泊车功能主要利用超声波传感器提供停车区域的信息及自身车辆所处位置，并通过计算机对位置进行计算，控制车辆的油门、制动与转向。超声波紧急刹车系统是通过松开油门踏板并采取制动避免碰撞事故的出现，该功能主要原理是在汽车车头安装超声波传感器，并根据实际情况发出超声波，全面掌握车辆与物体之间的距离。

车载摄像头为了实现报警与识别功能。摄像头将光学图像投射在互补金属氧化物半导体（Complementary Metal-Oxide-Semiconductor，CMOS）光电传感器上，经过模数的转换与优化，提供较为准确的数字信号，再经过数了信号处理器（Digital Signal Processor，DSP）将信号进行高效处理，显示在车载显示屏上。通过对采集图像的处理与优化，驾驶员能够更加全面掌握汽车周边环境信息情况，发挥其辅助的作用，做好辅助预警，减少安全事故的出现。

图15为部分车型搭载的传感器配置。激光雷达的高精度和高分辨率使其能够精细绘制车辆四周的三维地图；毫米波雷达则以其强大的穿透力和抗干扰性，在恶劣天气下仍能保持稳定的性能；超声波雷达则以其低成本和易于部署的特点，在短距离探测中发挥着重要作用；高清摄像头能够精准识别道路标志、交通信号以及行人等重要信息。通常，随着自动驾驶级别提高，汽车需要的传感器数量和类型越多，如表6所示。

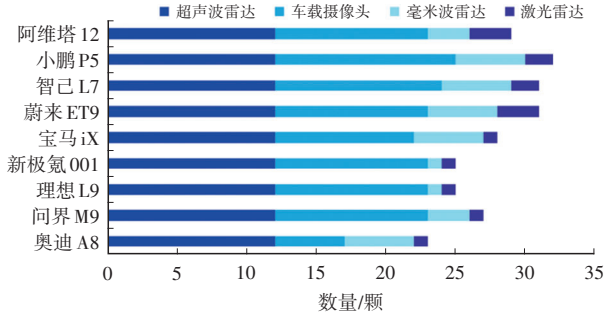


图15　部分车型搭载传感器配置[83]

表6　不同级别自动驾驶汽车建议传感器数量[83]　　颗

自动驾驶级别	激光雷达	毫米波雷达	摄像头	超声波雷达	总计
L1~L2	1	3	5	12	20
L2~L3	1	4~8	6~8	8~12	19~29
L4~L5	1~3	6~12	8~15	8~12	23~42

以视觉算法为核心及以激光雷达为主导是汽车传感器应用领域的两大主流。以视觉算法为核心的方案主要依赖摄像头辅以毫米波雷达来捕捉环境信息，并通过先进的计算机视觉算法实现自动驾驶。这种方法的优势是所需的硬件相对成熟，成本较低。劣势是毫米波雷达探测距离较远但探测角度有限，这需要通过精细的算法来弥补。特斯拉是这一路线的代表企业。

另外一个方向是以Alphabet旗下的Waymo和部分车企为代表的激光雷达主导方案，同时结合毫米波雷达、超声波传感器和摄像头，能够实现远距离、全方位的探测，且分辨率较高。然而，该方案的硬件成本相对较高。例如，新极氪001共搭载26颗环境感知传

感器，其中包括1颗部署在车前顶的M平台激光雷达，使智能驾驶更高效、更安全。

在科学技术水平不断提升的背景下，多种传感器综合成像能够融合应用到自动驾驶当中并全面展现整合的优势与作用，也是未来自驾驶的发展方向。而软件作为自动驾驶的核心内容，整合软件及多种算法可以为传感器的应用提供帮助，确保自动驾驶系统能够快速记录有用信息并过滤错误信息，提高信息处理的效率，做出重大决策，保障自动驾驶的安全性。在未来发展趋势下，国内汽车企业必须要注重自动驾驶系统的研发与创新，并充分认识到各种雷达的重要性，不断降低其造价并实现广泛的应用，合理的将其与多种传感器整合，提高自动驾驶系统运行的效率。

4.2 光学材料在成像系统中的应用

4.2.1 激光雷达

激光雷达中的光学结构主要包括透镜、反射镜、分束器、滤波片等。透镜是一种折射光线的光学元件，可以将发散的光线汇聚到一点，或者将汇聚的光线发散开。在激光雷达中，透镜通常用于聚焦激光束，以便更好地测量物体的距离和形状。反射镜是一种反射光线的光学元件，可以将入射光线反射到不同的方向。在激光雷达中，反射镜用于改变激光束的方向，以便更好地测量物体的距离和形状。分束器是一种将光线分成两束或多束的光学元件，可以将一束激光束分成两束或多束，然后分别进行处理。在激光雷达中，分束器通常用于测量物体的多普勒效应，以便更好地测量物体的速度。滤波片是一种过滤光线的光学元件，只让特定波长的光线通过。在激光雷达中，滤波片用于过滤背景光，以便更好地测量物体的距离和形状。例如，905 nm和1 550 nm是激光雷达无人驾驶中常用的波长，针对这些波长的滤光片需要具备高透过率、窄带宽、深度截止和宽入射角等特性。

激光雷达滤光片的性能受到多种因素的影响。首先，滤光片的材料特性至关重要。不同的玻璃材料，如石英玻璃、光学玻璃等，其折射率、透光率和耐温性等性能存在差异，直接影响滤光片的光学性能和稳定性。激光雷达滤光片具有多个关键特性：

（1）高选择性：能够精确选择所需的波长范围，有效滤除杂散光，确保激光雷达只接收目标波长的光信号，提高测量的准确性。

（2）高透过率：使得在所选波长范围内，光的能量损失小，保证了激光雷达系统的灵敏度和探测距离。稳定性良好，在不同的环境条件下，如温度、湿度变化时，滤光片的性能保持稳定，波长选择范围不变。

（3）较宽的入射角范围：能够适应不同角度的激光入射，保证良好的滤波效果。其次，镀膜工艺的精度和质量对滤光片性能起着关键作用。镀膜的均匀性、厚度控制以及膜层的稳定性都会影响滤光片的透过率、截止深度和带宽等参数。

激光雷达的视窗作为车载雷达的最外层参与光学成像，所以它在可见光波段应不透光，但在905 nm或1 550 nm波段透过率较好。为了保证车体外观的一致性，窗口一般吸收可见光，呈黑色。在寒冷潮湿的天气中，光学窗口容易结霜起雾，影响透过率，所以应具备加热导电的功能。以905 nm激光为例，由于激光雷达需要对周围环境全方位探测，因此要求滤光膜在0~30°入射角度下(905±30) nm波段的平均透过率达到91.5%以上；为了减少杂散光对系统信号接收的影响，要求滤光膜在400~700 nm波段不透光，平均反射率应低于7%。付秀华等[84]选择SiH_x与SiO_2作为高折射率材料，研制了一种应用于车载测距激光雷达的大角度近红外滤光膜，并在薄膜最外层加镀了一层低方块电阻值的ITO薄膜，以便于屏蔽电磁波干扰且在通电加热后具有除霜防雾的功能。

4.2.2 毫米波雷达

毫米波雷达中的光学材料主要包括聚对苯二甲酸丁二醇酯（Polybutylene Terephthalate，PBT）、聚碳酸酯（Polycarbonate，PC）、聚苯醚（Polyphenylene Oxide，PPO）、聚醚酰亚胺（Polyetherimide，PEI）等塑料材料。这些材料在毫米波雷达中扮演着重要的角色，主要用于制作雷达天线罩、后盖（底板）、微波吸收材料和天线基板等部件。PBT是一种聚酯类热塑性工程塑料，具有优异的电气特性和耐化学性，结晶快速，易成型，熔点高达225 ℃。在PBT中增加玻璃纤维可以降低材料的热膨胀系数，提高刚度和强度。PBT作为雷达天线罩的优势在于其低介电常数、高耐热性、易于加工和耐化学性，能够在高温环境下保持性能稳定。PC材料的介电常数高于PPS、PTFE等，但透波性良好，成本相对较低，易加工，且满足耐候性、轻量化需求。因此，PC材料成为现有毫米波雷达外装饰件主体材料的主流选择。PPO塑料具有优异的电气性能和机械强度，适用于制作高要求的电磁屏蔽材料和天线基板。PEI塑料具有优异的耐热性和机械性能，适用于制作高性能的微波吸收材料。这些材料的选择和应用不仅满足了毫米波雷达在不同环境下的性能需求，还确保了雷达的稳定性和可靠性。除了覆盖件材料本身

外，材料壁厚、毫米波入射角度及油漆金属粉含量都会影响毫米波雷达的衰减，通过研究雷达衰减的影响因素可以指导研发人员选择合适的材料、壁厚及表面处理工艺，布置合理的车载雷达毫米波的入射角度[85]。

4.2.3　超声波雷达

超声波雷达中使用的光学材料主要包括压电晶片和保护膜。压电晶片是超声波传感器中最为核心的部分，其是一种特殊的材料，能够将电场转换为机械振动，或将机械振动转换为电场。当在其两极加载的频率等于压电晶片的固有振荡频率脉冲电信号时，压电晶片就会产生共振，并带动共振板振动，从而产生超声波。反之，如果当共振板接收到超声波信号时，将压迫压电晶片作振动，将机械能转换成电能就成为了超声波接收器。保护膜是一层覆盖在传感器表面的薄膜，主要目的是保护传感器不受环境中的灰尘、湿气或其他污染物的影响，从而延长其使用寿命。

4.2.4　光学摄像头

车载光学摄像头中的光学材料主要包括光学玻璃、镀膜材料和塑料材料。光学玻璃是车载镜头常用的材料之一，具有较好的透光性和抗光干扰能力。常用的光学玻璃材料包括石英玻璃和硅玻璃，这些材料能够提供清晰的图像质量，主要用于高要求的摄像头。镀膜是提高镜头光学效果的关键步骤，其能够有效减少光线的干扰和反射，提高镜头的透光率和减少眩光，增强图像的对比度和清晰度，保证驾驶员能够清晰视物。塑料材料如聚碳酸酯和聚甲基丙烯酸甲酯也被广泛应用于车载镜头中，相比光学玻璃，塑料材料更轻便和经济，适用于一些低成本的车载摄像设备。

5　用户需求分析

为弥补现有智能光学系统设计研究在用户需求端探索的短板，本章借助文本挖掘与情感分析手段，对国内外社交平台的用户在线评论进行深度解析，明确终端消费者的核心需求与使用倾向，为智能光学系统的未来发展方向提供客观的数据依据。

5.1　数据来源

针对汽车中控显示、抬头显示HUD、智能调控玻璃等智能光学系统进行用户态度分析，揭示国内外用户对此类功能的认知态度、需求倾向及体验痛点差异。如图16所示，通过结构化爬虫技术采集国内外主流社交与视频平台评论数据，共采集国内平台合计21 896条有效评论，其中国内平台评论13 168条，海外平台评论8 728条。对每条评论的态度倾向进行分类，划分为消极、中性、积极3类。

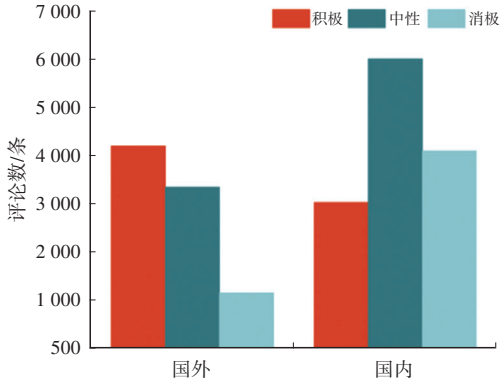


图16　国内外智能光学系统在线评论情况

5.2　需求分析

从样本规模来看，国内研究样本量显著高于海外，反映出国内用户对汽车智能光学系统的讨论热度更高，这与国内新能源汽车市场渗透率及用户对智能配置的关注度相契合。在评论态度分布层面，由图17所示，海外用户呈现“积极态度占比最高（48.2%），中性态度次之（38.5%），消极态度占比最低（13.3%）”的特征，积极与中性评价合计占比超86%，整体反映出海外用户对智能光学交互功能的接受度较高，且对功能实用性的认可成为主流态度；国内用户则呈现“中性态度占比最高（45.7%），消极态度（31.2%）高于积极态度（23.1%）”的分布态势，虽积极与中性态度总和（68.8%）仍超过消极态度，表明用户未对智能光学交互功能形成明确排斥，但消极态度占比显著高于海外，透露出国内用户对该类功能的接受倾向仍待提升。

进一步通过关键词共现分析与主题语义归类，挖掘评论内容中聚焦智能光学交互功能的核心关注点，结果如表7所示。国内外用户对该类功能的评价结构存在共性，均围绕“光学性能实用性”与“视觉体验适配性”两大维度展开，但在具体关注重点与价值取向上呈现显著差异。

国内用户评论呈现明显的“体验导向型”两极化特征：积极评价高度聚焦光学交互的视觉效果与科技感，如“HUD在强光下仍能清晰显示车速，不晃眼”、“中控屏幕自动调节亮度，进隧道不用手动调”、“智能玻璃切换隐私模式时，光影过渡很流畅”，反映出国内用户将智能光学功能视为“强化驾驶场景视觉体验的核心配置”，对功能的接受度与“光学显示的清晰度”、“光线自适应能力”强相关；消极评价则集中于光学体验的痛点问题，典型表述包括“HUD投影总偏左，看久了眼睛累”、“夜间中控屏幕反光严重，影响看路况”、“智能玻璃调节速度慢，进隧道时遮光不及时”，均指

向光学功能在视觉适配性与使用稳定性上的不足。

海外用户评论则呈现“安全导向型”的评价倾向，智能光学功能被更多视为“优化驾驶视觉安全的关键组件”：积极评价聚焦光学功能与复杂驾驶环境的适配性，如“HUD maintains visibility even in heavy rain, great for safety”（HUD在大雨中仍保持可见性，安全性出色）、“Smart glass tint adjusts instantly to sunlight, no more squinting”（智能玻璃遮阳色调随阳光即时调节，无需眯眼驾驶），体现海外用户对光学功能“环境适应性”与“安全辅助价值”的重视；消极评价同样紧扣光学特性展开，主要针对“光学显示的场景适配缺陷”，如“HUD display washes out in direct sunlight, hard to read”（HUD在直射阳光下显示泛白，难以辨认）、“Center console screen has poor contrast at night, strains eyes”（中控屏幕夜间对比度差，易造成视觉疲劳），反映出海外用户对智能光学功能“极端环境下的视觉稳定性”“长期使用的视觉舒适度”要求更高，评价维度更聚焦光学性能本身。

表7　国内外智能光学交互功能在线评论分析

地区	评论主题倾向性	代表性评论内容
国内	关注光学显示效果、光线适配性、视觉疲劳度	“HUD强光下清晰不晃眼”、“中控自动调亮度，进隧道很方便”、“HUD投影偏左，看久眼睛累”、“夜间中控反光影响路况判断”
海外	关注环境光学适配、视觉安全性、显示稳定性	“HUD in heavy rain maintains visibility, very safe”、“Smart glass adjusts instantly to sunlight”、“HUD washes out in direct sunlight”、“Console screen poor contrast at night, strains eyes”

6　总结与展望

6.1　总结

汽车产业电动化、智能化与网联化的深度转型，推动智能座舱向“第三生活空间”快速演进，光学材料作为座舱光学系统功能实现的核心支撑，其性能要求随驾乘体验需求升级而不断提高。本文针对现有研究对智能座舱光学材料的梳理缺乏全场景系统性的问题，以车载中控显示、HUD、智能调控玻璃及自动驾驶传感器成像四大核心应用场景为切入点，系统分析了各场景光学系统的技术发展特征，明确了不同场景下座舱功能对光学材料的性能需求，梳理了光学材料的应用现状与相关研究成果，构建了智能座舱“显示-调控-感知”全场景的光学材料应用体系，为该领域的材料研发、工程化应用及优化升级提供了系统性参考。

研究表明，智能座舱各核心场景的光学系统技术迭代，均对光学材料提出了差异化、高严苛性的性能要求：车载中控显示向大屏化、柔性化、多形态化发展，光学胶粘剂需平衡粘结性、弹性与耐候性，有机硅OCR因适配车载极端环境成为优选，而防反射膜则依托微纳结构与薄膜干涉原理，成为提升显示清晰度的关键；HUD技术完成从C-HUD到AR-HUD的升级，红外阻隔类光学材料有效解决了AR-HUD阳光倒灌的核心痛点，光波导与全息膜技术则是实现其小型化、大视场角的核心路径；智能调控玻璃以电致变色、PDLC、SPD等电控型技术为主流，涂层、液晶、偏光片、透明导电材料等多元光学材料，从调光、防护、显示等维度支撑玻璃向智能交互载体转型；自动驾驶传感器成像系统中，不同类型传感器对光学材料需求差异显著，激光雷达滤光片、毫米波雷达工程塑料、摄像头光学镀膜等材料的性能，直接决定了传感器的探测精度与环境适应性，且自动驾驶级别越高，对光学材料的协同适配性要求越高。

整体而言，光学材料的光学性能、机械稳定性、耐候性与环境适应性，是决定智能座舱显示效果、交互体验与感知可靠性的关键因素，现有光学材料已实现各场景的基础应用，但仍面临诸多技术瓶颈，如柔性OCA材料高粘结性与高弹性的性能耦合难题、高端3A光学膜与光波导材料的国产技术空白、部分光学材料工程化量产的工艺良率问题等，成为制约智能座舱光学系统向更高性能升级的核心因素。

6.2　展望

随着消费者对智能座舱沉浸式、个性化体验的需求持续提升，以及自动驾驶技术的不断发展，智能座舱光学系统将向高集成化、高智能化、全场景交互的方向演进，与之匹配的光学材料研发与应用也将迎来新的发展机遇，未来研究与产业发展将聚焦以下核心方向：

（1）光学材料的高性能化与功能集成化：针对各场景的核心技术痛点，突破材料性能耦合难题，研发适配柔性显示、AR-HUD、高等级自动驾驶的专用光学材料；同时推动单一功能材料向多功能复合发展，实现光学材料的减反、隔热、自清洁、抗紫外等功能集成，简化光学系统结构，提升综合应用效益。

（2）光学技术与新兴技术的深度融合：加快光波导、全息膜等核心光学技术的工程化落地，解决AR-HUD小型化、裸眼3D显示效果优化等问题；同时结合5G、XR、人工智能等技术，推动光学材料与座舱智能交互系统的融合设计，实现光学系统的场景化自适应

调控，打造沉浸式驾乘体验。

（3）高端光学材料的国产化与工艺突破：加大对高性能3A光学膜、高端光学胶粘剂、光波导核心材料等的研发投入，突破纳米压印、磁控溅射、精密涂布等核心制备工艺，提升国产光学材料的性能指标，实现高端产品的进口替代；同时优化材料制备与器件集成工艺，提升量产质量，降低产业应用成本。

（4）绿色低功耗与环境友好型材料研发：契合碳中和与汽车电动化发展趋势，研发低VOC、无毒、可降解的环保型光学胶粘剂、涂层材料，降低材料生产与使用的环境影响；针对电动汽车续航需求，开发低功耗的智能调光材料与节能型光学系统，实现光学材料的绿色化、节能化发展。

（5）跨场景的材料协同与一体化设计：围绕智能座舱“显示-调控-感知”的系统协同需求，推动光学材料与座舱各功能模块、自动驾驶多传感器的一体化设计，提升材料的跨场景适配性；同时加强材料研发企业、汽车企业与零部件厂商的产学研用协同，加速实验室技术向工程化应用的转化，推动智能座舱光学系统与材料产业的协同升级。

参 考 文 献

[1] 寸敏敏, 何国伟, 唐凯. 浅述车载显示屏的发展趋势[J]. 电子产品世界, 2024, 31: 12-15.

[2] 高瞩, 朱志欣, 尹庆华, 等. 认知负荷视角下的商用车AR-HUD研究[J]. 时尚设计与工程, 2025, 3:7-10.

[3] 汽车之家. 中期改款宝马3系官图发布 [EB/OL].(2022-08-26)[2026-04-16].https://chejiahao.m.autohome.com.cn/info/10943207.

[4] 马伶丽, 王学浪, 郭锦添, 等. 基于ALSE与混响室法的大尺寸车载联屏辐射抗扰度测试研究[J]. 环境技术, 2025, 43:122-129.

[5] 汽车之家. 东风本田灵悉L内饰官图首发 [EB/OL]. (2024-04-17) [2026-04-16]. HTTPS://CHEJIAHAO. M. AUTOHOME.COM.CN/INFO/15069984.

[6] 车东西. 车载屏幕再进化，光场屏“黑科技”将电影院搬进车里 [EB/OL]. (2023-10-30) [2026-04-16]. HTTPS://CHEJIAHAO.M.AUTOHOME.COM.CN/INFO/13552087.

[7] 汽车之家. 清听声学汽车独立分区听音系统给每位乘客至尊的私密听音 [EB/OL].(2024-07-10)[2026-04-16]. HTTPS://WWW. AUTOHOME. COM. CN/CAR/20240710/652690.HTML.

[8] PANG B, RYU C M, KIM H. Effect of Naphthyl Curing Agent Having Thermally Stable Structure on Properties of UV-Cured Pressure Sensitive Adhesive[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20: 3195-3200.

[9] AKINDOYO J O, BEG M D H, GHAZALI S, et al. Polyurethane Types, Synthesis and Applications-A Review[J]. RSC Advance, 2016, 6:114453-114482.

[10] LEE J H, SHIM G S, PARK J W, et al. Adhesion Performance and Recovery of Acrylic Pressure-Sensitive Adhesives Thermally Crosslinked with Styrene-Isoprene-Styrene Elastomer Blends for Flexible Display Applications[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2019, 78: 461-467.

[11] SEOK W C, LEEM J T, KANG J H, et al. Change of Characterization and Film Morphology Based on Acrylic Pressure Sensitive Adhesives by Hydrophilic Derivative Ratio[J]. Polymers, 2020, 12: 1504.

[12] BAEK S S, JANG S J, HWANG S H. Preparation and Adhesion Performance of Transparent Acrylic Pressure Sensitive Adhesives: Effects of Substituent Structure of Acrylate Monomer[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016, 64: 72-77.

[13] LEE J H, MYUNG M H, BAEK M J, et al. Effects of Monomer Functionality on Physical Properties of 2-Ethylhexyl Acrylate Based Stretchable Pressure Sensitive Adhesives[J]. Polymer Testing, 2019, 76: 305-311.

[14] SIENGCHIN S, KARGER-KOCSIS J. Mechanical and Stress Relaxation Behavior of Santoprene® Thermoplastic Elastomer/Boehmite Alumina Nanocomposites Produced by Water-Mediated and Direct Melt Compounding[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(6): 768-773.

[15] BACK J H, BAEK D, SIM K B, et al. Optimization of Recovery and Relaxation of Acrylic Pressure-Sensitive Adhesives by Using UV Patterning for Flexible Displays[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(10): 4331-4340.

[16] LEE J H, LEE T H, SHIM K S, et al. Effect of Crosslinking Density on Adhesion Performance and Flexibility Properties of Acrylic Pressure Sensitive Adhesives for Flexible Display Applications[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017, 74: 137-143.

[17] LEE J H, LEE T H, SHIM K S, et al. Adhesion Performance and Recovery of Platinum Catalyzed Silicone PSAs under Various Temperature Conditions for Flexible Display Applications[J]. Materials Letters, 2017, 208(11): 86-88.

[18] LEE T H, KIM J S, LEE J H, et al. Pressure-Sensitive

Adhesives for Flexible Display Applications[EB/OL]. (2019-12-23)[2026-04-14]. https://www.intechopen.com/chapters/70587.

[19] POCIUS A V. Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction[M]. Munich: Hanser, 2012.

[20] WON Y, SHIN H S, JO M, et al. An Electrically Switchable Dye-Doped Liquid Crystal Polarizer for Organic Light Emitting-Diode Displays[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 333(7): 115922.

[21] VENKATESAN V, WEGH R, TEUNISSEN J, et al. Improving the Brightness and Daylight Contrast of Organic Light-Emitting Diodes[J]. Advanced Functional Materials, 2005, 15: 138-142.

[22] HACK M, MA R. Integrated Circular Polarizer and Permeation Barrier for Flexible OLEDs: US20180047945A1[P]. 2016-08-12.

[23] ANTOSIK A K, BEDNARCZYK P, CZECH Z. Aging of Silicone Pressure-Sensitive Adhesives[J]. Polymer Bulletin, 2018, 75:1141-1147.

[24] SCHWOTZER W, KÄSER F, RODUIT B, et al. Simulating the Aging of Adhesives[EB/OL]. (2008-01-01)[2026-04-14]. https://www.adhesivesmag.com/articles/87025-simulating-the-aging-of-adhesives.

[25] RUDAWSKA A, ABDEL WAHAB M, MÜLLER M. Effect of Ageing Process on Mechanical Properties of Adhesive Tubular Butt Joints in Aqueous Environment[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020, 96(1): 102466.

[26] 丁汉良, 牛士超, 韩志武. 仿生减反射功能表面研究进展[J/OL]. 中国表面工程, (2026-03) [2026-04-15]. https://link.cnki.net/urlid/11.3905.TG.20260302.1258.010.

[27] HEMANT K R, ANAND G, SREEKUMARAN N, et al. Anti-Reflective Coatings: A Critical, In-Depth Review[J]. Energy Environment Science, 2011, 4(10): 3779-3804.

[28] LUN M W, BIN J, PENG J. Bioinspired self-cleaning antireflection coatings[J]. Advanced Materials, 2008, 20(20): 3914-3918.

[29] DOREY P, TATEO R, WATTS G. Generalisations of the Coleman-Thun Mechanism and Boundary Reflection Factors[J]. Physics Letters B, 1999, 448(3-4): 249-256.

[30] LALANNE P, MORRIS G M. Antireflection Behavior of Silicon Subwavelength Periodic Structures for Visible Light[J]. Nanotechnology, 1997, 8: 53-56.

[31] CHO K J, YU S, HUH C J, et al. Flexible, Angle-Independent, Structural Color Reflectors Inspired by Morpho Butterfly Wings[J]. Advance Materials, 2012, 24(18): 2375-2379.

[32] MEHMOOD U, AL-SULAIMAN F A, YILBAS B S, et al. Superhydrophobic Surfaces with Antireflection Properties for Solar Applications: A Critical Review[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2013, 157(12): 604-623.

[33] 金晶, 吴君瑶, 程芳芳, 等. 车载平视显示技术中的光学元件研究[J]. 汽车实用技术, 2021(20): 89-93.

[34] 高惠民. 汽车智能座舱人机交互——平视显示技术[J]. 汽车维修与保养, 2023(10): 42-45.

[35] LIU Y C, WEN M H. Comparison of Head-Up Display (HUD) vs. Head-Down Display (HDD): Driving Performance of Commercial Vehicle Operators in Taiwan[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2004, 61(5): 679-697.

[36] 赵赶超, 雷晶晶. 平视显示器(HUD)助力航空大发展[J]. 科技与创新, 2019(10): 124-125.

[37] SKIRNEWSKAJA J, WILKINSON T D. Automotive Holographic Head-up Displays[J]. Advanced Materials, 2022, 34(19): e2110463.

[38] 蔡锦浩. 衍射平视显示技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

[39] 陈晓伟, 曹妍, 薛嘉隆, 等. 双自由曲面平视显示系统光学模组优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 360-366.

[40] 欧光辉. 车辆增强现实平视显示光学系统研究与设计[R]. 重庆: 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 2019.

[41] 张玉春, 王平, 朱慧. 红外阻隔膜及其制备方法[P]. 中国: 国家知识产权局, 2016 (CN105954825B).

[42] 蔡昭军. 太阳热阻隔隔热涂层及其研究进展[J]. 涂料技术与文摘, 2006(5): 1-4.

[43] 李可峰, 刘保磊, 黄立, 等. 光学镜片及其制备方法、抬头显示系统和交通工具[P]. 中国: 国家知识产权局, 2023 (CN117170003A).

[44] GU L, CHENG D W, WANG Q W, et al. Design of a Two-Dimensional Stray-Light-Free Geometrical Waveguide Head-Up Display[J]. Applied Optics, 2018, 57(31): 9246-9256.

[45] RICHTER P, VON SPIEGEL W, WALDERN J. Volume Optimized and Mirror-Less Holographic Waveguide Augmented Reality Head-Up Display[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2018, 49(1):725-728.

[46] Mordor Intelligence. Automotive Glass Market Size & Share Analysis-Growth Trends & Forecasts (2026-2031) [EB/OL]. (2025-07-15) [2026-04-14]. https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/automotive-glass-market.

[47] 程枝萍, 付君伟. 电控调光玻璃产生的防眩目效果研究[J]. 汽车零部件, 2020(2): 23-27.

[48] 汪清淼, 郭健忠. 基于防眩目功能的液晶调光玻璃电学性能研究[J]. 制造业自动化, 2015, 37(7):84-89.

[49] WU C, SHAO Z. Niobium Tungsten Oxides for Electrochromic Devices with Long-Term Stability[J]. ACS Nano, 2022, 16(2): 2621-2628.

[50] 翟浩明, 余建宁. 潜力巨大的电子调光玻璃[J]. 今日科技, 1996, 2: 5.

[51] 姜磊, 刘鎏. 智能调光膜的制备、生产技术及其应用研究综述[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 454-463.

[52] CHOU H, CHEN Y. Switchable Transparency of Dual-Controlled Smart Glass Prepared with Hydrogel-Containing Graphene Oxide for Energy Efficiency[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 166(7): 45-51.

[53] Gauzy Inc. Everything You Want to Know About Smart Glass[EB/OL]. [2026-04-14]. https://www. gauzy. com/smart-glass-everything-you-want-to-know/#SmartGlass Technologies2.

[54] Gauzy Inc. Smart Glass for Cars[EB/OL]. [2026-04-14]. https://www. gauzy. com/automotive-smart-glass-passenger-vehicles/.

[55] 何云富, 徐刚, 朱俊, 等. VO_2热色智能玻璃研究进展[J]. 微纳电子技术, 2008, 45(7): 387-396.

[56] 苏同, 王明召. 会变色的玻璃——卤化银光致变色玻璃[J]. 中国教育技术装备, 2010, 33: 32-33.

[57] WARWICK M, RIDLEY I, BINIONS R, et al. The Effect of Transition Gradient in Thermochromic Glazing Systems[J]. Energy & Buildings, 2014, 77: 80-90.

[58] 廖燕. 汽车玻璃新技术及其发展方向[J]. 汽车工艺与材料, 2008(2): 61-62.

[59] 搜狐. 汽车玻璃相关技术解析[EB/OL]. (2022-04-28) [2026-04-14]. https://www. sohu. com/a/541942769_100227382.

[60] P&S Intelligence. Automotive Glass Market Size & Share Analysis-Key Trends, Future Opportunities, Growth Strategies, and Forecasts (2025-2032) [EB/OL]. 2024 [2026-04-14]. https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/automotive-glass-market.

[61] HAMILTON L. Emerging Display Technologies and the Role of Precision Glass[EB/OL]. 2021[2026-04-14]. https://www. corning. com/cn/zh/products/display-glass/resources/thought-leadership/emerging-display-technologies-and-the-role-of-precision-glass.html.

[62] 台湾中山大学物理系. 物理演示相关资料[EB/OL]. 2012 [2026-04-14]. https://www2.nsysu.edu.tw/physdemo/2012/A5/演示物理 2/2010 看板.pdf.

[63] 智能汽车俱乐部. 汽车智能产业相关技术资讯[EB/OL]. (2021-10-08) [2026-04-14]. https://www. smartautoclub. com/p/5041/.

[64] LEI J, QU J, WANG P, et al. A Facile Method for Precise Layer Number Identification of Two-Dimensional Materials through Optical Images[J]. Optics Communications, 2019, 440: 21-25.

[65] 李思愚. 浅析现代汽车防眩目后视镜的结构原理及使用技巧[J]. 甘肃科技, 2011, 27: 80-81.

[66] HU H Q, LIU J, WANG J B, et al. New Design for Highly Durable Infrared-Reflective Coatings[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 17175.

[67] SHEN X, YANG M, HE C X, et al. Multicolor Bipolar Modulation of Titanium-Chromium Oxide Electrochromic Coatings[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2023, 5(3): 1812-1823.

[68] ZHANG L, DU Y, XIA F, et al. Two Birds with One Stone: A Novel Thermochromic Cellulose Hydrogel as Electrolyte for Fabricating Electric-/Thermal-Dual-Responsive Smart Windows[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 455: 140849.

[69] 王鹏刚, 陈睿馨, 逄博, 等. TiO_2基环境稳定性光催化自清洁涂层的设计及制备[J]. 复合材料学报, 2024, 42:1-15.

[70] 张应轩, 鲁浈浈, 葛倩倩, 等. 光催化型超疏水自清洁涂层研究现状[J]. 表面技术, 2023, 52(12): 298-314.

[71] QIN J, LU H. A Review of Self-Cleaning Coatings for Solar Photovoltaic Systems: Theory, Materials, Preparation, and Applications[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30: 91591-91616.

[72] MORIMOTO T, TOMONAGA H, AKEMI M, et al. Ultraviolet Ray Absorbing Coatings on Glass for Automobiles[J]. Thin Solid Films, 1999, 351(2): 61-65.

[73] 王世锋, 李鑫, 周倩玉, 等. 透明隔热抗紫外涂料的研究进展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(13): 5167-5178.

[74] Tesla Inc. Nano-silver Coatings for UV Protection in Automotive Applications[J]. Tesla Technology Journal, 2022, 6(2):14-20.

[75] 王萌, 祝伊飞. 智能窗用液晶/高分子复合材料研究进展[J]. 液晶与显示, 2022, 10: 1243-1262.

[76] 鞠纯, 孙海涛, 王璐, 等. 液晶高分子智能调光玻璃研究进展[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2017, 49(1): 21-25.

[77] FENG Y, XU J, HE L X, et al. The Electrically Controlled

Dimming Film of Thiol-Vinyl Ether System with Low-Voltage and High Contrast Ratio for Smart Windows[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 187: 108427.

[78] 王宇. 纳米掺杂对聚合物分散液晶光电性能影响的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.

[79] SHEN W, LI G. Recent Progress in Liquid Crystal-Based Smart Windows: Materials, Structures, and Design[J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 17(1): 2200207.

[80] ZHANG Z, HE X, YU M J, et al. An Intelligent Electrochromic Film with Passive Radiative Cooling and Synergistic Solar Light Control Capabilities for Displays and Smart Windows[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2024, 12: 25773-25783.

[81] View Inc. Dynamic Glass: A Smarter Way to See the World [EB/OL]. (2024-04-02)[2026-04-14]. https://view.com.

[82] 誉卓科技. 光学膜片之偏光片的结构及其工作原理介绍[EB/OL]. (2023-06-06)[2026-04-14]. http://www.apexe.net/news/tech/89.html.

[83] 毕马威中国. 智慧之眼: 汽车传感器市场洞察[J]. 汽车与配件, 2024, 20: 58-65.

[84] 付秀华, 陈星聿, 檀承启, 等. 用于车载激光雷达导电滤光膜的研究[J]. 中国激光, 2022, 49(17): 1703101.

[85] 汤莹, 张超, 赵忠流. 浅析外覆盖件对车载雷达毫米波的衰减影响[J]. 汽车维修, 2024(1): 27-30.

（责任编辑　**明慧**）

《汽车文摘》征文

《汽车文摘》(月刊)于1963年7月3日创刊,由国务院国有资产监督管理委员会主管、中国第一汽车集团有限公司主办,为中国汽车工程学会会刊。《汽车文摘》以“览全球汽车技术文献,指中国汽车技术之道”为使命,以打造“中国汽车前沿与创新技术传播与交流的重要平台”为愿景,致力于成为汽车领域最具影响力的综述类期刊。

《汽车文摘》深耕电动化、智能化、网联化、共享化和智能制造5大方向和10大领域,聚焦新能源、燃料电池与混合动力汽车、智能网联汽车、氨氢融合零碳和碳中性燃料、汽车安全、健康与舒适、碳达峰与碳中和、生命周期评价(LCA)与技术经济分析、智能制造、材料轻量化与一体化压铸、飞行汽车前沿与创新技术综述论文,揭示相关领域的新动态、新趋势、新技术和新进展,为广大科研和工程技术人员进一步发展这一领域提供新突破口、新出发点和新基准。

欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员,充分发挥专业领域优势,深度挖掘国内外高影响力学术期刊与其它文献,形成某个技术领域前沿综述。

《汽车文摘》选题范围:

电动化:混合动力关键技术;动力电池关键技术;先进充电技术;电驱动系统及电力电子技术;智能底盘及子系统线控关键技术;燃料电池动力系统设计与优化。

智能化:新型电子电气架构;自动驾驶感知、决策与运动控制;智能新能源汽车测试评价方法与工具链;车辆智能安全技术。

网联化:智能网联云控技术;车用通信及网络技术;车路协同技术;汽车人因、人机交互与智慧座舱;信息安全与预期功能安全;车网融合(V2G)及应用。

低碳化:汽车节能与排放技术;清洁能源动力系统技术;碳达峰、碳中和;氢燃料制、储、运、加及安全管控技术;生命周期评价(LCA)、标准法规与技术经济分析;氨氢融合零碳和碳中性燃料。

轻量化:新能源汽车新材料技术;混合材料轻量化设计;一体化压铸。

共享化:区块链技术与移动出行;车辆大数据挖掘方法与应用案例。

燃料电池:电池堆、电池系统与基础设施。

智能制造:机器人与自动化控制、四大工艺、物流技术、设计-制造-服务。

颠覆式出行:飞行汽车;未来低空智能交通体系及其关键技术。

汽车安全:主被动安全与融合;智能安全;健康与舒适。

《汽车文摘》发表论文的独特优势:

《汽车文摘》是国家级刊物、中国汽车工程学会会刊、汽车领域唯一的综述期刊。《汽车文摘》不收版面费、4个月左右可发稿。

投稿要求:

1. 综述篇幅在10 000 ~ 15 000字(6~10页),图文并茂,图、表和公式非原创要求标注引用文献;

2. 请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数约200字;

3. 文章必须附有公开发表、体现本领域最新研究成果和高影响力出版物作为参考文献,一般要求参考文献在20篇以上,一半左右为外文参考文献,且在文中标注所引用文献;

4. 来稿保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;

5. 切勿一稿多投。

《汽车文摘》投稿网址:http://www.qcwz.cbpt.cnki.net

邮箱:autodigest@faw.com.cn

《汽车文摘》编辑部