现 代 科 学 探 索

目　录

1　装配式建筑预制构件吊装施工常见问题及质量控制措施研究

周文博，吴　丹

9　自动驾驶技术应用中的安全验证体系问题与优化方向

孙　杰

18　智能家居跨品牌设备互联互通障碍及优化策略研究

王晨宇

26　滨海湿地保护与生态旅游协调发展的路径探讨

张　晨

37　聚乳酸基可降解材料在食品包装中的应用特点与发展前景

许嘉泽

现代科学探索
第 2 卷 第 4 期 2026 年 8 月
Brilliance Publishing Limited

DOI: 10.53104/xdkxts.2026.02.04.001

装配式建筑预制构件吊装施工常见问题及质量控制措施研究

周文博[1]，吴丹[1]

1. 辽宁工程技术大学，辽宁 阜新 123000

摘要：装配式建筑施工将大量现场湿作业转移到工厂生产环节，但预制构件最终仍需要通过运输、吊装、定位、校正和连接形成完整结构。吊装施工处于预制生产与现场装配的衔接位置，构件重量较大、安装精度要求高，且受到起重设备、场地条件、测量定位、临时支撑和工序配合等多种因素影响。任何一个环节控制不足，都可能造成构件磕碰、吊装姿态失稳、安装位置偏差、临时固定不牢以及节点连接质量下降等问题。本文采用文献分析法和施工过程分析法，在梳理预制构件吊装基本施工流程的基础上，对吊装前准备、起吊与转运、构件就位、临时固定和工序协同中常见的质量问题进行分析。研究认为，预制构件吊装质量不能只依靠安装完成后的检查，而应建立覆盖构件进场、吊装准备、起吊控制、安装校正和节点固定的全过程质量控制方式。针对现有问题，本文提出完善吊装前条件验收、合理编制专项施工方案、加强吊装姿态和路径控制、提高测量定位精度、规范临时支撑及节点固定、优化构件供应与吊装计划衔接，并合理应用 BIM 和数字化技术等措施。通过将技术控制与施工管理结合，可减少吊装过程中的质量偏差，提高预制构件安装的稳定性和准确性。

关键字：装配式建筑；预制构件；吊装施工；安装精度；质量控制

Common Problems and Quality Control Measures in Prefabricated Component Hoisting Construction for Prefabricated Buildings

ZHOU Wen-bo[1], WU Dan[1]

1. Liaoning Technical University, Fuxin 123000, P. R. China

Correspondence to: WU Dan

Abstract: Prefabricated building construction transfers a large amount of on-site wet work to factory production. However, prefabricated components still need to be transported, hoisted, positioned, adjusted, and connected on the construction site before a complete structural system can be formed. Hoisting construction is an important link between component production and on-site assembly. It involves heavy components, high installation accuracy, lifting equipment, site conditions, measurement and positioning, temporary support, and construction coordination. Poor control in any of these stages may cause component damage, unstable lifting posture, installation deviation, unreliable temporary fixation, and reduced connection quality. This paper adopts literature analysis and construction process analysis to examine common quality problems in pre-hoisting preparation, lifting and transportation, component positioning, temporary fixation, and process coordination. It argues that the quality of prefabricated component hoisting should not depend only on inspection after installation. Instead, a whole-process quality control system should cover component arrival, hoisting preparation, lifting control, installation adjustment, and connection. Corresponding measures include improving pre-hoisting inspection,

引用格式：周文博，吴丹．装配式建筑预制构件吊装施工常见问题及质量控制措施研究[J]．现代科学探索，2026，2(4)：1-8.

preparing appropriate construction plans, controlling lifting posture and routes, improving positioning accuracy, standardizing temporary supports and connections, coordinating component supply with the hoisting schedule, and applying BIM and digital technologies properly. These measures can reduce construction deviations and improve the stability and accuracy of prefabricated component installation.

Key words: prefabricated building; prefabricated component; hoisting construction; installation accuracy; quality control

引言

装配式建筑与传统现浇建筑在施工组织方式上存在明显区别。梁、板、墙、柱、楼梯等构件可以在工厂中提前生产，再运输到施工现场完成拼装。工厂化生产有利于改善构件制作环境，提高生产标准化程度，也能够减少施工现场模板安装、钢筋绑扎和混凝土浇筑等工作。但构件由工厂生产并不意味着现场质量控制的重要性下降。预制构件只有准确安装到设计位置并可靠连接，才能形成满足设计要求的结构体系。预制构件施工涉及生产、运输、堆放、吊装和连接等多个环节，任何环节发生偏差都可能继续传递到后续施工中[1]。

吊装是预制构件从“产品”转变为“结构组成部分”的关键过程。施工现场需要使用塔式起重机或其他起重设备，将构件从堆放位置起吊并移动到安装位置，再经过调整、定位、临时固定和连接完成安装。装配式建筑施工质量控制涉及的内容较多，而吊装阶段具有构件重量大、空间移动明显、现场配合人员多和误差控制要求高等特点，是质量问题较容易集中出现的环节。已有装配式建筑施工质量研究也表明，规范施工工艺和加强关键工序控制，是减少质量缺陷的重要基础[2]。

从工程实践看，预制构件吊装出现问题并不一定是某个单独技术操作错误造成的。构件进场检查不到位、堆放位置不合理、吊装计划与构件供应不一致、测量控制线不准确、吊具选择不当以及不同工种配合不及时，都可能影响最终安装质量。预制构件本身具有明显的全过程管理特征，需要将设计、生产、存储、运输和施工联系起来进行控制[3]。如果仅在构件安装完成后进行尺寸检查，很多前期问题已经转化为实际施工偏差，返工成本也会明显增加。

基于此，本文不建立复杂数学模型，也不进行工程数据统计，而是采用文献分析和施工过程分析的方法，以预制构件吊装的实际作业顺序为主线，对常见质量问题及其原因进行归纳，并提出具有现场可操作性的质量控制措施。研究重点不是讨论复杂的吊装计算，而是明确不同施工环节“容易出现什么问题、为什么出现、应当怎样控制”，使研究内容与本科土木工程专业的知识基础相适应。

1 预制构件吊装施工流程及质量控制特点

1.1 预制构件吊装的基本施工流程

预制构件吊装不是单纯利用起重机械将构件从地面吊到楼层，而是由多个连续工序组成。一般情况下，现场吊装可以划分为施工准备、构件检查、吊具连接、试吊、正式起吊、空中转运、构件就位、测量校正、临时固定、节点处理和最终验收等环节。不同类型构件的具体操作有所差异，但基本控制逻辑相近。

正式吊装前，需要确认构件编号、规格、尺寸、外观和预埋件情况，并核查安装位置是否满足施工条件。吊装设备的起重能力、作业半径和安装位置也需要与构件重量及施工区域相适应。吊点和吊具安装完成后，一般需要进行低高度试吊，通过观察构件受力和姿态判断吊点连接是否可靠。正式起吊后，构件应保持相对稳定，避免快速起升、急停和大幅摆动。

构件到达安装位置附近后，吊装施工从大范围空间移动转为精细定位。此时不能只依靠起重机械直接“放到位置”，还需要测量人员和

安装人员配合，对轴线、标高、垂直度以及构件之间的相对位置进行校核。安装达到要求后设置临时支撑或临时连接，构件形成可靠稳定状态后才能逐步解除吊钩。对于装配式结构来说，整个过程实际上是“吊运”和“安装”两个过程的结合，后半段的测量、调整和固定对最终质量具有更直接的影响。

1.2 吊装施工质量具有连续传递特征

预制构件吊装最明显的质量特点，是前一道工序产生的误差容易进入下一道工序。例如，构件生产阶段预埋件位置存在偏差，可能造成现场吊具安装困难；运输或堆放时构件受到碰撞，可能影响安装后的外观或节点连接；测量放线存在误差，则可能使构件即使按照现场控制线安装，最终位置仍然不符合设计要求。由此可见，吊装质量不能只从起吊动作本身进行判断。

吊装施工还具有较强的安全与质量关联。构件发生明显摆动、吊具受力不均或临时支撑不稳定，既属于安全隐患，也容易引起构件碰撞、边角破损和安装偏位。对装配式建筑吊装事故的相关研究表明，现场人员的不安全行为与组织管理漏洞具有较强联系[4]。在质量控制中同样存在这种情况。很多表面上的技术问题，实际上与施工组织、人员交底和责任落实不足有关。

因此，预制构件吊装质量控制需要改变只检查“最后装得准不准”的做法。更合理的方式是把质量控制点向前延伸，通过吊装前确认施工条件、吊装中控制构件状态、就位后及时测量校正，使问题尽可能在形成较大偏差之前被发现。

2 装配式建筑预制构件吊装施工中问题的常见

2.1 吊装前构件和现场条件检查不足

吊装前准备看似属于辅助工作，实际上直接决定后续施工是否顺利。部分项目为了加快进度，在构件到场后只核对编号便安排吊装，没有充分检查构件尺寸、外观、吊点、预埋件和连接部位。当构件存在边角破损、预埋件偏位或吊点异常时，问题可能直到起吊甚至就位阶段才被发现。

现场安装条件不满足也是较常见的问题。下层结构标高未复核、安装控制线不完整、连接钢筋位置存在偏差、作业面材料没有清理，都可能阻碍构件顺利就位。此时若继续依靠起重机械反复移动构件寻找安装位置，不仅降低施工效率，还容易造成构件与已完成结构发生碰撞。

构件堆放方式也会影响吊装。数字化仓储管理相关研究指出，预制构件现场管理中容易出现堆放场地无序、库存信息与实际情况不一致以及二次搬运较多等问题[5]。在吊装施工中，如果当天需要安装的构件被压在其他构件下方，或者堆放位置距离塔吊作业区域过远，就需要增加倒运和重新堆放。额外移动次数增加后，构件受损和吊装计划延误的可能性也会增加。

2.2 吊点、吊具和起重设备匹配不合理

构件吊装必须依靠吊点、吊索、吊梁等装置传递荷载。如果吊点设置、吊索长度或吊具形式与构件不匹配，构件在起吊后可能发生倾斜。对于墙板、楼梯等形状不完全对称的构件，其重心位置与几何中心并不一定重合，直接按照经验选取吊点容易造成各吊索受力不均。

起重设备选择不合理同样会影响吊装质量。塔吊是否满足要求不能只比较“最大起重量”和“构件重量”，还需要考虑实际作业半径。构件距离塔身越远，可允许的起重量通常越低。如果施工方案没有结合不同楼层、不同位置的构件重量安排吊装设备，现场可能出现设备工作能力接近极限的情况。

部分项目存在施工方案编制比较粗略的问题，同一种吊装方法被直接用于不同规格构件。事实上，墙板、叠合板、楼梯、梁柱等构件在尺寸、重量、重心位置和安装方式上都有区别。专项施工方案如果没有针对构件类型进行细化，现场人员只能根据个人经验调整操作方法，质量控制就容易失去统一标准。

2.3 起吊和空中转运过程中构件姿态不稳定

构件离开支撑面后，质量控制重点由地面

条件转向空间运动状态。起升速度突然变化、塔吊回转过快、吊索长度不合理或者现场风力较大，都可能使构件发生摆动。构件摆动不仅影响吊装人员对其位置的判断，还可能碰撞脚手架、已安装构件或其他结构。

对于体积较大、形状较长的预制墙板等构件，如果没有设置有效的溜绳进行方向控制，安装人员很难仅依靠人工直接限制构件旋转。此时为了赶进度而强行拉拽构件，反而可能造成操作人员受伤或构件姿态进一步失控。吊装安全行为研究表明，现场操作中的违规和组织管理上的缺陷往往会共同增加吊装风险[4]。这一结论同样说明，控制构件姿态既是设备操作问题，也是现场组织问题。

另一个容易被忽略的问题是构件边角保护。预制混凝土构件的边角和局部突出部位在运输及吊装中较容易受到碰撞。轻微缺损虽然未必立即影响主体承载能力，但会增加修补工作，也可能影响建筑外观和后续接缝处理。质量控制不能只关注构件是否“吊上去了”，还应尽量保持构件从进场到安装过程中的完整性。

2.4 构件就位及安装精度控制不到位

构件接近设计位置后，起重机需要进行小幅移动，安装人员同时根据测量结果调整构件位置。这一阶段对操作精度要求较高，也是预制构件吊装质量控制的核心环节。

常见问题包括轴线偏位、标高不准确、墙板垂直度超差以及相邻构件之间缝宽不均等。部分偏差并不是就位阶段单独形成的，而是测量控制线、下层预埋钢筋或连接件偏差共同作用的结果。若施工人员发现构件难以就位后直接通过撬动、敲击等方式强行调整，可能损伤构件或连接部位。

BIM 技术在装配式建筑施工管理中可以用于预制构件信息管理、施工进度和质量控制，并有利于减少构件信息缺失及现场协同不足的问题[6]。装配式建筑中铝模与预制构件协同施工的案例也表明，通过 BIM 进行接口定位，并对构件吊装时序进行安排，可以改善不同施工工序之间的冲突[7]。这说明安装精度控制不能只依赖吊装人员的现场经验，还需要将设计信息、测量数据和施工顺序结合起来。

2.5 临时支撑和摘钩时机控制不规范

预制墙板、柱等竖向构件完成初步就位后，通常需要设置临时支撑。临时支撑的作用是在正式连接形成稳定结构以前保持构件位置。如果支撑数量不足、支撑点设置不合理、紧固不到位，构件可能在解除吊钩后产生位移。

部分施工人员容易将“已经放到安装位置”理解为吊装工作基本结束，在构件尚未稳定的情况下过早摘钩。事实上，构件能够落在安装位置并不代表其已经形成稳定受力状态。墙板等高宽比较大的构件尤其需要确认支撑可靠性和垂直度。

钢结构装配施工研究显示，通过临时螺栓完成初步组装，再使用高强螺栓进行最终连接，并结合过程监测控制结构位置，可以将施工偏差控制在较小范围内[8]。尽管钢结构外框架与混凝土预制构件的具体连接方式不同，但其质量控制思路具有共同点，即必须先形成可靠临时稳定状态，再逐步转入永久连接。摘钩应当作为一个明确的质量控制节点，而不能完全依靠现场人员经验决定。

2.6 构件供应、堆放和吊装工序之间衔接不畅

装配式建筑具有明显的多工序协同特点。构件生产太早，可能造成现场大量堆放；到场过晚，则会出现塔吊和施工人员等待。即使构件已经到场，如果实际堆放顺序与安装顺序不一致，也会增加二次吊运。

更容易出现的问题是不同专业施工相互占用作业空间。例如，模板、钢筋、脚手架和预制构件吊装可能在同一区域交叉作业。若施工计划只考虑单个工种的工作效率，没有协调总体施工顺序，现场就容易出现作业面冲突。装配式建筑施工中的设计、生产和现场施工存在较强的连续关系，任何信息传递不及时都会影响后续环节。

因此，吊装计划不应理解为简单列出“每天吊多少块构件”。真正有效的计划还需要明确构件编号、到场时间、卸车位置、堆放顺序、安装楼层、起吊顺序以及对应的施工班组。只有这些信息相互一致，塔吊才能把主要工作时间用于正式安装，而不是反复倒运和等待。

3 预制构件吊装质量问题的形成原因

3.1 质量管理偏重结果检查

部分项目的质量控制仍然集中在构件安装完成后的验收环节，例如检查垂直度、标高、轴线和接缝宽度。最终验收当然重要，但如果前面的构件进场、吊点安装、试吊和临时固定没有形成明确的检查节点，最终发现偏差时往往已经需要重新调整。这种管理方式的主要问题在于控制时间过晚。预制构件重量较大，安装完成后重新起吊和调整的成本明显高于普通材料。吊装质量管理更适合采用“前一道工序合格后进入下一道工序”的方式，将问题控制在早期。

3.2 专项施工方案针对性不足

吊装方案承担着把设计要求转换成现场操作要求的作用。如果方案只列出常规施工流程，而没有明确不同构件的重量、吊点、吊具、安装顺序和控制标准，方案对现场的指导作用就比较有限。预制构件类型较多，不同构件的吊装难点并不相同。大型墙板重点是稳定和垂直度控制，叠合板重点是吊点受力和平稳落位，楼梯构件则需要关注倾斜状态下的重心和安装角度。如果使用完全相同的技术交底内容，施工人员难以准确掌握不同构件的质量重点。

3.3 人员配合和质量责任不够清晰

吊装不是塔吊司机一个人的工作。信号工、司索工、安装工、测量人员、质量管理人员和现场管理人员均参与其中。如果指挥信号不统一、测量结果不能及时传递，或者出现偏差后无人明确负责处理，都会影响施工质量。吊装过程中还有一个典型问题，就是施工进度压力容易影响质量判断。当构件已经被吊起，而安装部位临时发现条件不符合要求时，现场往往希望尽快完成安装，可能出现边吊边整改甚至强行就位的情况。其根本原因并非单纯技术能力不足，而是吊装前检查责任没有落实。

3.4 数字化技术与现场质量控制脱节

装配式建筑具有较好的数字化应用条件。构件从设计、生产到施工都可以建立唯一编号，并将尺寸、位置、生产状态和安装状态关联起来。吊装施工场景的三维重建技术已经能够利用点云数据较准确地还原施工空间[9]，点云匹配技术也可以用于分析预制构件位姿并进行调节控制[10]。但对于普通工程项目而言，数字化技术不能为了追求技术复杂程度而使用。部分项目虽然建立BIM模型，但模型主要用于展示，现场质量人员仍然依赖纸质图纸和人工传递信息，数字模型与吊装作业之间没有形成直接联系。这种情况下，即使投入了信息化技术，也难以真正改善吊装质量。

4 装配式建筑预制构件吊装施工质量控制措施

4.1 建立吊装前施工条件验收制度

提高吊装质量最直接的方法之一，是把质量控制时间向前移动。正式起吊以前应当对“构件是否可以吊”和“安装位置是否可以装”进行双重确认。

构件检查应包括编号、规格、外形尺寸、外观质量、吊点、预埋件和连接部位等内容。对于发现的裂缝、明显缺角、预埋件异常等问题，应在起吊以前确定处理方式。不能为了避免耽误塔吊而先吊到安装位置再处理。

安装部位则应重点检查测量控制线、标高、连接钢筋、预留孔洞和作业空间。构件进入吊装状态后，塔吊、人员和构件都已经开始占用施工资源，此时再处理基础条件问题会明显降低效率。施工技术及质量保障研究提出，装配式建筑应通过规范关键工艺并加强不同参与方之间的质量协同来减少质量问题[11]。吊装前条件验收正是把这种全过程控制落实到具体施工工序的一种方式。

现场可以设置简单的吊装条件检查表，由施工、测量和质量管理人员共同确认。表格不需要复杂，但应明确构件编号、安装位置和检查结果。只有全部满足要求后才能进入正式吊装流程。

4.2 根据构件特点完善吊装专项施工方案

吊装方案应与实际构件相对应，而不是使用统一模板简单修改项目名称。方案编制前，需要统计主要构件的类型、尺寸和重量，结合塔吊布置情况确定不同构件的实际作业半径和起重能力。

对于重量较大或形状特殊的构件，应单独明确吊点位置、吊具形式、吊索夹角、起吊姿态和移动路线。对于容易发生旋转的构件，可以设置控制绳，由地面或楼层安装人员控制方向。吊装路线还要考虑脚手架、临时设施和已安装构件，尽量减少构件从人员密集区域上方经过。

技术交底也应按照构件种类进行细化。交底重点不是简单重复施工方案，而是告诉现场人员“该类型构件最容易在哪一步出现问题”。例如，墙板重点说明垂直度和临时斜撑，叠合板重点说明吊点和落位，楼梯构件重点说明倾斜姿态和上下端安装位置。这样更有利于施工人员理解质量控制要求。

4.3 加强试吊和空中姿态控制

正式起吊以前进行试吊，可以用较低成本发现吊索受力、吊点连接和构件平衡问题。构件离开支撑面一定高度后应短暂停留，确认吊具没有异常、构件姿态稳定，再继续起升。起吊过程中应控制加速和减速，减少突然启停。塔吊司机按照统一指挥信号操作，非指挥人员不应同时向司机发出不同指令。构件需要改变方向时，应利用控制绳进行辅助，不宜由安装人员直接推拉处于明显摆动状态的重型构件。对于大尺寸构件，还应结合现场天气条件决定是否适宜进行吊装。风力会直接影响构件空中姿态，墙板等迎风面积较大的构件受影响更明显。施工现场不能只以塔吊“能不能起吊”作为判断标准，还需要考虑构件在空中是否能够保持可控制状态。

4.4 强化构件就位过程中的测量与校正

构件安装质量最终需要通过测量数据确认。轴线、标高和垂直度控制不能完全依靠目测。施工前应建立可靠的测量控制体系，并保证楼层控制线能够向后续施工连续传递。

构件接近安装位置时，应先完成粗定位，再进行精细调整。粗定位解决构件能否顺利进入安装区域的问题，精调则根据测量结果控制最终位置。两者如果混在一起，安装人员容易在构件尚未稳定时反复进行细小调整，降低施工效率。

当构件出现明显无法就位的情况时，应停止继续施力，检查究竟是构件尺寸、连接钢筋、预埋件还是测量控制线存在问题。不能简单采用强行撬动或敲击的方式解决。装配式建筑施工技术研究已经将预制构件吊装和节点连接作为施工技术体系中的关键内容[12]，说明吊装精度并不是独立要求，而会直接影响后续节点施工。

对条件较好的工程，可利用全站仪、激光扫描等手段进行辅助测量。点云匹配研究显示，通过获取构件表面点云并不断更新匹配结果，可以提高位姿调整的精细程度[10]。普通本科层次的工程研究不需要深入算法本身，但可以借鉴其中的基本思路，即利用更连续、准确的测量信息代替完全依靠人工经验的调整方式。

4.5 规范临时支撑、节点固定和摘钩程序

构件就位后，应先完成临时固定，再进行复测。对于预制墙板等竖向构件，应检查临时支撑位置、数量、连接牢固程度和支撑角度，并通过支撑调整构件垂直度。摘钩前可以设置明确的确认条件：构件位置已经达到要求，临时支撑安装完成，连接部位具备基本稳定性，现场人员已经撤离危险区域。只有这些条件满足后才能解除吊具。通过程序化要求限制随意摘钩，比单纯要求施工人员“注意安全和质量”更具有实际操作意义。节点连接施工还应避免将吊装偏差全部留给后一道工序解决。如果构件安装位置本身已经超过允许范围，再依靠灌浆、填缝或其他连接施工弥补，很容易影响节点质量。吊装完成后的验收应成为节点施工的前置条件，而不是两种工作同时无序进行。

4.6 优化构件进场、堆放和吊装计划

预制构件现场管理应围绕安装顺序组织，而不是构件到场后随意寻找空地堆放。当天或近期需要吊装的构件应布置在较容易起吊的位置，减少二次搬运。构件编号、堆放位置和安装楼层之间应保持对应关系。数字化仓储研究提出将 RFID、BIM 等技术用于构件信息与实际库存的同步管理[5]。对于普通项目，即使不建设复

杂的信息系统，也可以借鉴这种管理思路。通过二维码或电子台账记录构件编号、到场时间、堆放区域和安装状态，就能够降低寻找构件和重复搬运的情况。吊装计划还应与构件运输计划配合。理想状态并不是现场构件越多越好，而是保持适当库存，使构件到场节奏基本满足施工需要。现场空间有限时，大量提前到场反而会挤占吊装区域。对于体积大的墙板和楼梯构件，这一问题更加明显。施工管理人员还需要协调模板、钢筋、脚手架和机电施工等工序。相关工程案例通过优化构件吊装时序改善了铝模与预制构件之间的施工冲突[7]，说明吊装效率和质量不仅取决于单个班组操作水平，也受到总体施工组织的影响。

4.7 利用 BIM 和数字化技术形成质量信息闭环

BIM 在吊装施工中的价值不应局限于建立三维模型。更实际的应用是将构件编号、安装位置、吊装顺序和质量检查结果关联起来。施工前可以利用模型检查作业空间和构件安装关系，施工过程中记录构件状态，施工完成后保存质量验收信息。

数字化智能建造技术可以贯穿预制构件生产、施工和综合管理[13]。对于吊装质量控制而言，没有必要在本科论文中提出过于复杂的智能算法，而应强调“信息是否能够真正进入现场决策”。例如，当某块构件检查不合格时，应在管理系统中标记，防止其被误安排吊装；当安装顺序发生变化时，构件运输和堆放计划也应同步调整。

三维扫描和点云技术则可以应用于安装精度要求较高的构件。相关研究已经证明，施工场景点云能够用于高精度三维重建[9]。这类技术未来可以更多地承担安装位置复核和偏差识别工作。不过数字化手段属于质量管理工具，不能代替施工人员对吊装设备、构件连接和临时支撑的基本检查。施工现场最需要解决的仍然是工序是否规范、责任是否明确和质量问题能否及时被处理。

5 结论

预制构件吊装是装配式建筑现场施工中技术要求和组织要求较为集中的环节。构件从现场堆放状态转变为结构组成部分，需要连续经历吊点连接、起吊、转运、就位、测量、校正、临时固定和节点连接等过程。实际施工中的质量问题往往不是由单一因素造成，而是构件管理、吊装设备、测量定位、人员操作和施工组织共同作用的结果。

常见问题主要表现为吊装前检查不充分，吊点、吊具和起重设备匹配不合理，构件空中姿态控制不足，安装定位偏差，临时支撑及摘钩程序不规范，以及构件供应与吊装工序衔接不畅。针对这些问题，质量管理重点应从安装完成后的结果检查逐步向全过程控制转变。构件起吊以前要确认构件和作业面条件，起吊过程中要保证姿态稳定，就位阶段要强化测量校正，摘钩以前要确认临时稳定状态，同时通过合理的供应和堆放计划减少不必要的二次搬运。

BIM、构件数字化管理和三维测量等技术能够为吊装施工提供更准确的信息，但技术应用应服务于实际质量问题。对于一般装配式建筑项目，更重要的是将构件信息、施工计划、测量结果和验收记录真正联系起来，而不是单纯增加复杂的软件和设备。通过技术操作、施工管理和信息协同的结合，可以减少预制构件吊装中的安装偏差和返工，提高装配式建筑现场施工质量。

参考文献：

[1] 张良凯, 屈增辉, 田静超. 装配式建筑预制构件施工工艺优化路径[J]. 四川建材, 2026, 52(8): 150-152.

[2] 孙亚朋. 装配式建筑施工工艺要点及质量控制研究[J]. 世界家苑, 2026, (13): 13-15.

[3] 李延国. 装配式混凝土结构住宅预制构件全过程管控研究[J]. 建筑技术开发, 2025, 52(12): 136-140.

[4] 黄恒振. 基于改进“2-4”模型的装配式建筑吊装施工安全事故行为分析[J]. 安徽建筑, 2026, 33(8):

183-185.

[5] 王明辉. 装配式建筑预制构件数字化仓储管理系统架构与实施路径[J]. 住宅与房地产, 2026, (20): 116-118.

[6] 蒋智刚, 赵永强, 李宇华. 基于 BIM 技术的装配式建筑施工管理优化研究[J]. 城市建筑, 2026, 23(16): 186-188.

[7] 邢大伟, 杨保山, 刘洋, 唐磊, 刘彪. 装配式建筑中铝模与预制构件协同施工技术[J]. 安装, 2025, (12): 92-94.

[8] 杨雪刚, 田文科, 王泽好. 装配式建筑钢结构外框架的施工技术及质量控制[J]. 四川建材, 2026, 52(8): 135-137.

[9] 林国潮, 凌礼贤, 柴吉元, 林荣顺. 多方向阈值下的装配式建筑构件吊装施工场景三维重建方法[J]. 结构工程师, 2024, 40(3): 172-178.

[10] 高杰. 基于点云匹配的装配式车站大体积混凝土预制构件合模调节控制[J]. 重庆建筑, 2026, 25(8): 35-38.

[11] 刘刚. 装配式建筑施工技术与质量保障措施[J]. 世界家苑, 2026, (16): 100-102.

[12] 张静莎, 胡俊涛. 装配式建筑施工技术及应用路径[J]. 世界家苑, 2026, (15): 76-78.

[13] 王贤生. 装配式建筑数字化智能建造技术分析[J]. 城市建设, 2026, (22): 54-56.

版权声明

© 2026 作者版权所有。本文依据“知识共享署名 4.0 国际许可协议”（CC BY 4.0）以开放获取方式发布。该许可允许使用者在任何媒介中自由使用、复制、传播与改编文章（含商业用途），惟须明确署名原作者及出处，并注明所作修改（如有）。完整协议详见：https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.zh-hans

出版声明

所有出版物中的陈述、观点及资料仅代表作者及供稿者个人立场，与 Brilliance Publishing Limited 及/或编辑人员无关。Brilliance Publishing Limited 及/或编辑人员对因内容所提及的任何理念、方法、说明或产品所导致的人身或财产损害概不负责。

DOI: 10.53104/xdkxts.2026.02.04.002

自动驾驶技术应用中的安全验证体系问题与优化方向

孙杰 [1]

1. 上海工程技术大学，上海 201620

摘要：自动驾驶技术通过环境感知、智能决策和车辆控制等技术实现车辆自主运行，为交通效率提升和事故风险降低提供了新的技术路径。然而，自动驾驶系统运行环境复杂，涉及传感器、算法、软件、硬件以及道路环境等多个因素，传统车辆测试方式难以全面评价其安全性。安全验证体系作为自动驾驶技术实现规模化应用的重要保障，需要覆盖开发测试、场景验证、仿真测试以及运行监测等多个环节。当前自动驾驶安全验证仍存在测试场景覆盖不足、极端环境验证困难、系统持续更新后的安全评价不足以及验证结果与真实运行环境衔接不充分等问题。本文围绕自动驾驶技术应用中的安全验证体系展开分析，从自动驾驶系统运行特点出发，探讨现有安全验证体系存在的问题，并结合仿真测试、场景构建、数据监测和全生命周期管理等方面提出优化方向，以期为自动驾驶技术安全应用提供参考。

关键字：自动驾驶；安全验证；仿真测试；场景测试；智能交通

Safety Verification System Issues and Optimization Directions in the Application of Autonomous Driving Technology

SUN Jie[1]

1. Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, P. R. China

Correspondence to: SUN Jie

Abstract: Autonomous driving technology enables vehicles to operate independently through environmental perception, intelligent decision-making, and vehicle control technologies, providing new approaches for improving transportation efficiency and reducing traffic accidents. However, autonomous driving systems operate in complex environments involving multiple factors, including sensors, algorithms, software, hardware, and road conditions, making it difficult for traditional vehicle testing methods to comprehensively evaluate their safety. As an essential foundation for the large-scale application of autonomous driving technology, the safety verification system needs to cover multiple stages, including development testing, scenario validation, simulation testing, and operational monitoring. Current safety verification systems still face several challenges, such as insufficient coverage of testing scenarios, difficulties in verifying extreme environments, inadequate safety evaluation after continuous system updates, and weak connections between verification results and real-world operation. This paper analyzes the safety verification system in the application of autonomous driving technology, discusses the existing issues based on the operational characteristics of autonomous driving systems, and proposes optimization directions from the perspectives of simulation testing, scenario construction, data monitoring, and lifecycle safety management, aiming to provide references for the safe application of autonomous driving technology.

引用格式：孙杰. 自动驾驶技术应用中的安全验证体系问题与优化方向[J]. 现代科学探索, 2026, 2(4): 9-17.

Key words: autonomous driving; safety verification; simulation testing; scenario testing; intelligent transportation

引言

自动驾驶技术是智能交通系统发展的重要方向，其核心目标是利用传感器、计算平台和人工智能算法替代部分或全部人工驾驶任务。与传统车辆相比，自动驾驶系统不仅需要完成车辆运动控制，还需要持续感知复杂环境，并根据实时信息完成路径规划和行为决策。因此，自动驾驶安全性并不完全取决于单一部件性能，而是受到车辆硬件、软件算法、通信网络以及道路环境等多方面因素影响。

随着自动驾驶技术由实验测试逐渐进入实际应用阶段，安全问题成为限制其进一步发展的重要因素。自动驾驶系统面对的交通环境具有高度复杂性，同一套系统可能需要处理城市道路、快速道路、恶劣天气、突发障碍物等多种情况。仅依靠传统道路测试难以覆盖所有可能出现的风险场景，也难以证明系统在未知环境中的可靠性。当前自动驾驶测试已经逐渐从单一功能测试转向包括场景设计、仿真验证、道路测试和运行监测在内的综合安全验证体系。相关研究指出，自动驾驶系统需要通过多种验证方法共同评估其安全性能，而单一测试方式难以满足高等级自动驾驶应用需求。

自动驾驶安全验证体系不仅关系到技术可靠性，也影响用户信任和产业推广。部分自动驾驶事故并非来源于单一技术缺陷，而是由于系统在特殊环境下未能正确识别风险、测试范围不足或安全管理机制不完善导致。因此，构建更加完善的安全验证体系，需要从技术测试延伸到系统运行全过程管理。本文围绕自动驾驶技术应用中的安全验证体系问题展开分析，重点讨论当前验证体系面临的不足，并提出相应优化方向。

1 自动驾驶安全验证体系的基本认识

自动驾驶安全验证体系是保障自动驾驶系统可靠运行的重要组成部分，其主要作用是在车辆投入实际道路运行之前，通过不同测试方式评估系统是否满足安全要求。与传统汽车主要关注机械性能和驾驶辅助功能不同，自动驾驶安全验证需要关注车辆是否能够在复杂环境中持续完成感知、判断和控制任务。

自动驾驶系统通常由环境感知、决策规划和执行控制三个核心环节组成。环境感知负责获取车辆周围的信息，包括道路、车辆、行人以及交通标识等内容；决策规划负责根据环境信息制定车辆行为；执行控制则负责完成加速、制动和转向等操作。任何一个环节出现异常，都可能影响整个系统的安全运行。因此，安全验证不能只针对某个模块，而需要对整个系统进行综合评价。

在实际应用过程中，自动驾驶系统面临的问题比传统车辆更加复杂。传统车辆事故通常与驾驶员操作失误、道路条件或者车辆机械故障有关，而自动驾驶事故可能涉及算法判断错误、传感器失效、数据不足、软件升级影响等多种因素。自动驾驶系统架构也逐渐由单车智能向车端、路侧和云端协同方向发展，不同系统之间的信息交互进一步增加了安全验证难度。相关研究提出，智能网联汽车需要通过车端计算、路侧处理和云端调度之间的协同，提高系统运行效率，同时也需要建立更加完善的安全防护机制。

安全验证体系通常包括功能验证、场景测试、仿真验证和实际道路测试等内容。功能验证主要检查系统是否能够按照设计要求完成指定任务，例如车辆是否能够正确识别道路信息、是否能够完成自动制动等。场景测试则关注系统在不同交通环境中的表现，例如复杂路口、夜间驾驶、行人突然出现等情况。仿真验证通过虚拟环境模拟大量交通场景，可以降低实际测试成本，提高测试效率。实际道路测试则用于验证系统在真实环境中的运行效果。

目前，自动驾驶安全验证已经逐渐从单纯的车辆性能评价转向全过程安全管理。部分研究指出，自动驾驶系统需要建立覆盖设计、开发、部署和运行阶段的持续验证机制，以适应人工智能系统不断更新的特点。

安全验证体系的重要意义在于降低自动驾驶应用风险。一方面，它能够帮助开发人员发现系统缺陷，提高技术成熟度；另一方面，它能够为监管部门和用户提供安全依据，提高公众对自动驾驶技术的接受程度。自动驾驶未来的发展并不只是提高车辆自主能力，更重要的是建立能够证明其安全性的验证体系。

2 自动驾驶技术应用中安全验证体系存在的问题

自动驾驶技术的运行环境具有开放性和复杂性，车辆需要在不断变化的道路条件、交通参与者行为以及外部环境影响下完成自主感知、判断和控制。传统汽车测试方式主要围绕车辆结构性能和基础功能展开，而自动驾驶系统涉及感知算法、计算平台、软件程序和控制策略等多个层面，其安全性难以通过单一指标进行评价。现有安全验证体系虽然已经形成了一定基础，但在测试覆盖范围、验证深度以及运行管理等方面仍存在不足。

测试场景覆盖不足是当前自动驾驶安全验证面临的重要问题。真实道路环境包含大量动态变化因素，同一道路在不同时间、天气和交通状态下可能呈现不同的运行特点。自动驾驶车辆不仅需要处理常规驾驶场景，还需要应对突发情况，例如行人突然进入道路、车辆异常变道、道路标识模糊以及临时交通管制等情况。如果测试场景设计不足，系统可能在未经过充分验证的环境中运行，从而增加安全风险。

目前部分自动驾驶测试仍依赖有限数量的典型场景和道路实验。这种方式能够发现部分明显缺陷，但难以覆盖真实交通中的复杂变化。自动驾驶系统面对的交通环境并不是完全固定的，而是由车辆、行人、道路设施和自然环境共同形成的动态系统。测试过程中未出现问题，并不意味着系统已经具备应对所有场景的能力。

道路环境多样性与自动驾驶行为表现之间存在密切联系。有研究通过大量道路几何数据和模拟测试分析发现，不同道路结构能够影响自动驾驶系统产生不同的驾驶行为，具有更高多样性的测试道路有助于发现潜在系统问题。这说明安全验证不能仅依靠固定路线测试，而需要建立更加丰富的场景库，使测试环境尽可能接近实际应用条件。

极端环境和未知场景验证不足也是影响自动驾驶安全的重要因素。自动驾驶系统依靠传感器获取外部信息，并通过算法完成环境理解。当车辆处于雨雪天气、夜间环境、强光照射或者道路遮挡等条件下时，传感器性能可能受到影响，系统感知准确性也可能下降。部分复杂场景在现实道路中出现频率较低，难以通过大量实车测试进行覆盖。

未知场景问题进一步增加了安全验证难度。自动驾驶算法通常基于已有数据进行训练，当车辆面对与训练环境差异较大的情况时，系统可能无法准确识别风险。例如，不常见的障碍物、特殊道路结构或者异常交通行为，都可能导致车辆产生错误判断。相关研究指出，未知数据和分布外场景可能导致自动驾驶系统出现错误决策，因此需要通过有效检测方式提升系统面对未知环境时的安全能力。

自动驾驶系统持续升级也给安全验证带来了新的压力。传统车辆在完成生产后，主要依靠硬件维护保持性能稳定，而自动驾驶车辆的软件系统和算法模型可能持续更新。软件升级能够改善车辆功能，但也可能改变系统原有运行逻辑，使过去完成的验证结果无法完全适用于新的系统版本。

自动驾驶安全验证需要关注车辆整个生命周期，而不是只停留在上市前测试阶段。系统运行过程中产生的数据能够反映车辆在真实环境中的表现，并帮助发现测试阶段未出现的问题。相关研究提出，自动驾驶系统需要建立运行数据获取、安全分析、监测报告和持续改进相结合的在用监测机制，以支持系统长期安全运行。

多模块协同运行增加了安全评价的复杂程

度。自动驾驶系统由感知、决策、控制、通信和计算等多个部分组成，各模块之间存在紧密联系。感知信息是否准确，会影响后续决策结果；计算资源是否充足，会影响系统响应速度；通信是否稳定，会影响车辆与外部设备之间的信息交互。因此，安全验证不能只关注单个模块性能，而需要评价不同模块之间的协同效果。

车端、路侧和云端协同模式的应用进一步扩大了安全验证范围。相比传统单车智能模式，车路云协同能够提供更丰富的信息来源，提高车辆对复杂环境的理解能力。但这种模式也增加了数据传输、系统协调和安全管理方面的问题。智能网联汽车系统架构逐渐向多层协同方向发展，如何保证不同设备和平台之间稳定运行，成为安全验证体系需要关注的重要内容。

安全验证结果与实际运行之间存在一定差距，也是当前体系需要解决的问题。实验室测试和仿真环境通常具有明确条件，能够方便控制变量，而真实道路环境存在更多随机因素。自动驾驶系统在测试阶段表现良好，并不意味着其能够完全适应长期运行中的所有情况。因此，安全验证体系需要加强测试阶段与实际运行阶段之间的数据联系，使验证过程能够持续反映系统真实状态。

3 自动驾驶安全验证体系中的关键环节分析

自动驾驶安全验证体系并不是单一测试流程，而是由功能验证、场景测试、仿真验证以及运行监测等多个环节共同组成。不同验证环节承担不同作用，通过测试结果反馈和问题修正形成循环过程。自动驾驶系统涉及感知、决策、控制、通信等多个模块，安全验证需要从单个功能评价扩展到系统整体运行能力评价。

3.1 功能验证与系统能力评价

自动驾驶系统的功能验证是安全评价的基础环节。车辆需要具备稳定的环境感知能力、合理的决策能力以及准确的控制能力，才能完成复杂交通环境下的自主运行。感知系统负责获取车辆周围环境信息，是自动驾驶安全运行的重要基础。如果车辆无法准确识别道路、车辆和行人等目标，后续决策和控制过程都会受到影响。

环境感知验证主要关注传感器和识别算法对道路信息的处理能力。自动驾驶车辆通常结合摄像头、激光雷达、毫米波雷达等多种设备获取环境信息，不同传感器之间需要保持较好的协同效果。在实际道路环境中，光照变化、目标遮挡、道路标线缺失以及天气条件变化都会影响感知结果。

针对车道识别等感知任务，相关研究指出，复杂道路条件下的车道信息获取仍然存在挑战。部分研究通过构建多任务框架提升车辆对道路结构的理解能力，并在复杂道路环境中验证其有效性。 这说明安全验证不仅需要评价系统是否能够完成基本功能，也需要关注系统在不同环境条件下保持稳定运行的能力。

决策与控制验证是自动驾驶安全体系中的核心环节。感知模块获取的信息需要经过系统分析后转化为车辆行为，例如减速、变道、停车或者绕行。相比简单功能判断，决策过程涉及道路环境、车辆状态以及其他交通参与者行为等多个因素。

自动驾驶决策系统的验证难点在于车辆需要在较短时间内完成信息处理和行为选择。系统不仅需要做出正确决策，还需要保证决策过程具有稳定性和可靠性。相关研究指出，自动驾驶决策系统直接影响车辆安全性能，需要通过技术测试验证其实时性和可靠性。

3.2 测试方式比较与仿真验证应用

自动驾驶安全验证需要采用多种测试方式，不同方法具有不同特点。实际道路测试能够反映真实交通环境中的车辆表现，但受到成本、时间和安全风险限制，难以覆盖大量特殊场景。仿真测试能够快速构建复杂环境，提高测试效率，但与真实道路之间仍存在一定差异。车辆在环测试则结合真实车辆设备和虚拟环境，在安全性和真实性之间取得平衡。

OPEN ACCESS

表 1 自动驾驶安全验证常见方式及特点

验证方式	主要内容	优势	局限
实际道路测试	车辆在真实交通环境中运行测试	环境真实性较高，能够反映实际运行情况	测试周期长，危险场景难以重复获取
仿真测试	利用软件平台构建虚拟交通环境	场景数量丰富，可重复测试复杂情况	与真实环境存在一定差异
车辆在环测试	结合虚拟环境和真实车辆设备测试	兼顾真实性和安全性	测试平台建设要求较高
运行监测	收集车辆实际运行数据并分析	能够发现长期运行问题	需要完善的数据管理机制

仿真测试是自动驾驶安全验证体系中的重要组成部分。由于真实道路测试无法覆盖大量复杂情况，仿真环境能够通过计算机技术构建不同道路条件、天气环境和交通行为，为自动驾驶系统提供重复测试条件。测试人员可以通过调整场景参数，观察车辆在不同情况下的响应情况，发现系统潜在问题。

仿真测试的价值不仅体现在降低测试成本，也体现在提高特殊场景验证效率。例如，危险场景在现实道路中出现概率较低，测试人员难以通过大量驾驶获得足够样本。而在仿真环境中，可以主动设置突发障碍物、车辆异常行为以及恶劣天气条件，对自动驾驶系统进行针对性测试。

目前，自动驾驶仿真测试逐渐从简单场景模拟向综合验证平台发展。相关研究提出，自动驾驶功能开发需要在实际部署前进行充分测试，但现实交通环境无法完全覆盖所有可能情况，因此可以通过虚拟交通环境和车辆在环测试相结合的方式，提高系统验证效率。该方法能够利用模拟交通场景和传感器信号对真实车辆进行测试，在保证测试安全性的同时提升验证范围。

3.3 场景验证与复杂环境适应能力评价

场景验证是自动驾驶安全验证体系中的关键内容。自动驾驶系统不仅需要通过一般道路测试，还需要证明其能够在设计运行范围内安全完成任务。不同道路环境、交通状态和天气条件都会影响车辆运行表现，因此测试场景的设计直接影响验证结果。

传统测试方式通常依靠工程人员设计有限场景，但自动驾驶面对的交通环境具有高度复杂性，人工设计难以覆盖所有情况。场景验证需要综合考虑道路结构、交通参与者行为、环境因素以及车辆状态，使测试结果更加接近真实应用。

自动驾驶安全验证中的场景构建不仅需要关注正常运行情况，也需要关注危险和失效场景。例如，车辆在普通道路中能够保持稳定运行，并不能说明其在传感器异常、道路信息缺失或者其他车辆突然干扰情况下仍然安全。因此，测试体系需要包含正常场景、边界场景和异常场景。

相关研究提出，自动驾驶安全验证可以围绕“设计运行范围—行为能力—测试场景—验证准则—风险评估”的逻辑建立系统化框架，通过不同类型场景评价车辆行为能力。 这种方式能够避免测试过程过度关注单一功能，而是从系统整体运行角度评价安全水平。

3.4 运行监测与安全反馈机制

数据记录与运行监测是安全验证体系的重要环节。自动驾驶系统投入实际运行后，车辆会产生大量运行数据，包括环境信息、车辆状态、系统决策过程以及异常事件记录。这些数据不仅能够用于事故分析，也能够帮助发现测试阶段未出现的问题。

传统车辆安全评价更多关注车辆出厂前是否符合标准，而自动驾驶系统具有软件持续更

新、算法不断优化的特点，安全评价需要延伸到车辆运行阶段。通过持续收集运行数据，可以发现系统在不同环境中的表现变化，并根据实际情况调整验证标准。

运行监测机制能够形成“测试—应用—反馈—优化”的闭环过程。自动驾驶车辆在真实道路运行中产生的新情况，可以反向推动测试场景完善，使后续验证更加符合实际需求。相关研究指出，自动驾驶系统部署后的安全治理需要结合运行数据获取、数据分析、安全报告和持续改进，以支持系统长期安全运行。

3.5 系统透明度与安全责任追溯

自动驾驶安全验证还需要关注系统透明度问题。由于自动驾驶决策过程高度依赖算法，部分情况下用户和监管人员难以理解车辆为何采取某种行为。当系统出现异常时，如果无法还原决策过程，也会增加事故分析和责任认定难度。

可解释性技术能够提升自动驾驶系统的透明程度，使车辆决策过程更容易被理解和评价。相关研究指出，自动驾驶系统中的解释机制不仅关系到技术可靠性，也影响用户信任、责任划分和社会接受程度。

因此，安全验证体系不能只关注车辆是否完成任务，也需要评价系统行为是否具有可解释性。通过记录车辆决策依据、运行状态以及关键数据，可以提高事故调查效率，为自动驾驶责任认定提供技术支持。

4 自动驾驶安全验证体系的优化方向

自动驾驶安全验证体系的完善需要突破传统测试模式，将功能测试、场景验证、仿真分析和运行监测结合起来。自动驾驶系统涉及感知、决策、控制、通信等多个技术模块，单一验证方式难以全面评价车辆安全水平。安全验证需要覆盖系统研发、测试、部署和运行全过程，使不同阶段产生的数据和测试结果能够相互连接，为系统持续优化提供支持。

4.1 完善多层次验证体系，强化仿真测试能力

自动驾驶安全验证需要从单一功能测试向系统综合评价转变。在系统开发阶段，需要针对感知、决策和控制等核心模块进行测试，判断各部分是否满足设计要求；在系统集成阶段，需要关注不同模块之间的信息交互和协同运行能力；在车辆实际运行阶段，则需要通过持续监测评价系统长期表现。

不同阶段的验证工作需要形成有效衔接。研发阶段发现的问题可以用于完善测试场景，实际运行过程中出现的新情况也能够反向推动系统优化。通过建立覆盖开发、测试和运行阶段的验证体系，可以提高安全评价的完整性。

自动驾驶安全问题往往集中在低概率、高风险场景中，因此测试范围不能局限于常规道路环境。安全验证需要建立更加丰富的场景库，将真实交通数据、典型风险事件以及极端环境条件纳入测试范围，使系统能够接受更加全面的安全评价。

仿真测试是提升安全验证效率的重要方式。由于真实道路测试受到成本、安全风险和时间限制，难以覆盖大量复杂交通环境，而仿真环境能够通过计算机技术构建不同道路条件、天气情况和交通行为，为自动驾驶系统提供可重复测试条件。

仿真测试能够模拟现实中难以大量获取的危险场景。例如，突发障碍物、异常车辆行为、传感器异常以及恶劣天气等情况，都可以通过虚拟环境进行测试。测试人员可以调整场景参数，观察车辆在不同条件下的响应情况，从而发现系统潜在问题。

相关研究指出，自动驾驶功能开发需要在实际部署前进行充分测试，但现实交通环境无法覆盖所有可能情况，因此可以利用虚拟交通环境和车辆在环测试相结合的方法，提高系统验证效率。该方法能够利用模拟交通场景和传感器信号对真实车辆进行测试，在降低测试风险的同时扩大验证范围。

虚拟仿真与实际道路测试结合能够弥补单一测试方式的不足。实际道路测试具有较高真实性，但难以重复危险场景；仿真测试具有较强灵活性，但需要不断提高环境真实性。两种方式结合，可以利用仿真扩大测试范围，再通

过实际道路验证测试结果，提高安全评价准确性。

4.2 建立数据闭环机制，实现全生命周期安全管理

自动驾驶系统具有持续更新特点，安全验证不能只关注车辆交付前是否满足设计要求，还需要延伸到实际运行阶段。车辆投入使用后，会产生大量运行数据，包括环境信息、车辆状态、系统决策过程以及异常事件记录等。这些数据能够反映系统在不同环境中的表现，也能够帮助发现测试阶段未覆盖的问题。

数据闭环建设能够使安全验证形成“测试—运行—反馈—优化”的循环过程。测试阶段发现的问题可以用于改进系统设计，实际运行中的异常情况可以转化为新的测试场景，从而提高后续验证的针对性。

运行数据在事故分析和风险控制中具有重要作用。当车辆出现异常行为时，通过分析传感器数据、系统决策记录以及车辆运行状态，可以判断问题来源，并为后续优化提供依据。安全验证不应停留在车辆是否通过测试，而需要关注系统长期运行过程中的稳定性。

自动驾驶系统的软件属性决定了安全评价方式需要不断调整。车辆硬件出现问题时，通常可以通过维修或更换部件解决，而算法问题可能需要通过数据调整和系统优化解决。如果系统升级后仍采用原有验证标准，可能无法准确评价新版本系统的安全水平。

相关研究提出，自动驾驶系统部署后的安全治理需要结合运行数据获取、数据分析、安全报告和持续改进机制，通过持续监测支持系统长期安全运行。

4.3 完善标准体系建设，提升系统透明度与责任追溯能力

自动驾驶安全验证体系的完善需要标准体系作为支撑。自动驾驶涉及汽车工程、人工智能、通信技术和交通管理等多个领域，不同技术环节之间需要形成统一评价标准。如果缺少明确规范，不同企业和测试机构可能采用不同验证方式，导致测试结果难以比较，也增加监管难度。

自动驾驶等级不断提升，车辆承担的驾驶任务逐渐增加，安全验证标准也需要适应技术变化。低等级自动驾驶主要关注驾驶辅助功能，而高等级自动驾驶需要评价系统自主运行能力。因此，验证标准需要结合自动驾驶等级、应用场景以及设计运行范围进行调整。

安全验证标准还需要关注测试指标的完整性。传统车辆评价更多关注车辆性能参数，而自动驾驶系统需要同时评价感知准确性、决策合理性、系统响应速度以及异常处理能力。通过建立更加全面的评价指标，可以提高安全验证结果的可信度。

系统透明度也是安全验证体系的重要组成部分。自动驾驶车辆的部分决策过程依赖人工智能算法，当车辆采取某种行为时，用户和监管人员可能难以理解其原因。如果缺少清晰的数据记录和解释机制，事故分析和责任认定都会受到影响。

可解释性技术能够帮助安全验证从结果评价转向过程分析。通过记录车辆决策依据、运行状态和关键数据，可以更加准确地分析系统行为，为故障定位和责任判断提供依据。相关研究指出，自动驾驶系统中的解释机制不仅关系到技术可靠性，也影响用户信任、责任划分和社会接受程度。

5 自动驾驶安全验证体系的发展方向

自动驾驶安全验证体系未来将向更加系统化、动态化和协同化方向发展。自动驾驶技术应用范围不断扩大，车辆运行环境也更加复杂，安全验证需要从单一车辆测试转向覆盖车辆、道路、通信和管理系统的综合评价。

车路云协同验证将成为安全验证体系的重要发展方向。传统自动驾驶测试主要关注车辆自身能力，而未来智能交通环境中，车辆与道路设施、通信网络和云端平台之间会形成更加紧密的联系。车辆能够通过路侧设备获取更远范围的信息，也可以通过云端平台完成数据分析和系统优化。这种运行模式提高了车辆环境感知能力，但也要求安全验证覆盖更大范围的

系统关系。

车路云协同模式下，安全验证对象不再只是车辆本身，而是整个交通运行系统。例如，路侧设备提供的信息是否准确、通信过程是否稳定、云端服务是否可靠，都可能影响自动驾驶车辆决策。因此，未来验证体系需要建立针对多主体协同运行的评价方法。

自动驾驶安全验证还将从结果评价逐渐转向过程评价。传统测试通常关注车辆是否完成任务，例如是否成功避障、是否保持车道等，而未来安全验证需要关注车辆如何完成决策，以及决策过程是否符合安全要求。

过程评价能够帮助发现隐藏风险。有些情况下，车辆最终结果没有出现问题，但系统决策过程可能已经存在风险。例如，车辆虽然成功避开障碍物，但判断过程依赖错误信息，类似情况如果出现在其他环境中，可能导致事故。因此，安全验证需要关注系统内部运行逻辑，而不仅是最终结果。

仿真技术将在未来安全验证中发挥更加重要的作用。自动驾驶系统需要面对大量复杂场景，而传统道路测试难以满足需求。通过建立更加真实的数字化交通环境，可以快速生成不同测试条件，提高系统验证效率。

仿真测试的发展也需要与实际道路数据结合。单纯依靠虚拟环境可能无法完全反映真实交通情况，而单纯依靠道路测试又难以覆盖大量风险场景。将真实数据用于仿真环境构建，再通过道路测试验证仿真结果，能够提高安全验证的准确性。

自动驾驶安全验证体系还需要更加重视社会应用层面的安全管理。自动驾驶技术不仅涉及车辆运行安全，也涉及用户信任、责任划分和监管体系等问题。当系统出现事故或者异常情况时，需要明确数据记录、责任判断和问题处理机制。

自动驾驶事故责任认定的复杂性已经成为技术应用中的重要问题。相关研究指出，自动驾驶汽车事故涉及驾驶员、车辆制造商、软件开发者等多个主体，传统机动车责任体系难以完全适用，需要结合自动驾驶特点完善责任认定机制。安全验证体系的发展也需要与责任管理机制相结合，使测试结果能够为事故分析和风险控制提供支持。

6 结语

自动驾驶技术的发展使车辆从传统交通工具逐渐转变为具有环境感知和自主决策能力的智能系统。自动驾驶系统运行环境复杂，安全问题不仅来源于车辆本身，也与算法、数据、道路环境以及系统协同方式有关。完善的安全验证体系是自动驾驶实现可靠应用的重要基础。

当前自动驾驶安全验证仍存在测试场景覆盖不足、极端环境验证困难、系统更新后的安全评价不足以及实际运行反馈不足等问题。解决这些问题，需要建立更加全面的验证体系，将仿真测试、实际道路测试、场景分析和运行监测结合起来。

未来自动驾驶安全验证将不再局限于车辆功能检测，而会逐渐发展为覆盖车辆生命周期和交通系统整体运行的综合安全管理体系。通过完善测试标准、加强数据反馈、提升系统透明度以及推动多主体协同验证，可以进一步提高自动驾驶技术应用的安全水平，为智能交通发展提供可靠保障。

参考文献：

[1] Kusano K D, Scanlon J M, McMurry T L, Victor T. Do time of day and day of week matter when comparing Waymo's automated driving system and human crash involvement rates?[J]. Traffic Injury Prevention, 2026.

[2] 莫玉香, 张小波, 刘钦, 姜磊. 基于自动驾驶的智能网联汽车系统架构优化路径分析[J]. 世界汽车, 2026(8): 38-39.

[3] 向世林, 褚观耀, 王霞. 基于虚拟交通和车辆在环的自动驾驶功能测试[J]. 机械制造与自动化, 2026, 55(4): 265-270.

[4] 陈俊涛, 陈贞, 杨强, 刘玉清, 贾贝贝, 李广友. 面向安全验证的自动驾驶系统行为能力与场景建模框架[J]. 汽车文摘, 2026(8): 1-15+69.

[5] 陈贞, 杨强, 陈俊涛. 自动驾驶系统部署后安全治理中的在用监测与报告机制研究[J]. 汽车文摘, 2026(8): 27-36.

[6] Klikovits S, Riccio V, Castellano E, et al. Does road diversity really matter in testing automated driving systems?[J]. Empirical Software Engineering, 2026, 32(1).

[7] Sanchi M. Systemic explainability for autonomous driving: connecting ethics to law and society[J]. AI & SOCIETY, 2026.

[8] 笪蓓秋. 基于计算机智能算法的汽车自动驾驶决策系统研究[J]. 汽车测试报告, 2026(15): 31-33.

[9] 常怡帆. 自动驾驶汽车交通事故的侵权责任认定研究[D]. 广西师范大学, 2026.

版权声明

© 2026 作者版权所有。本文依据“知识共享署名 4.0 国际许可协议”（CC BY 4.0）以开放获取方式发布。该许可允许使用者在任何媒介中自由使用、复制、传播与改编文章（含商业用途），惟须明确署名原作者及出处，并注明所作修改（如有）。完整协议详见：https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.zh-hans

出版声明

所有出版物中的陈述、观点及资料仅代表作者及供稿者个人立场，与 Brilliance Publishing Limited 及/或编辑人员无关。Brilliance Publishing Limited 及/或编辑人员对因内容所提及的任何理念、方法、说明或产品所导致的人身或财产损害概不负责。

DOI: 10.53104/xdkxts.2026.02.04.003

智能家居跨品牌设备互联互通障碍及优化策略研究

王晨宇 [1]

1. 南京信息工程大学，江苏 南京 210044

摘要：智能家居技术融合物联网、无线通信、人工智能和自动控制等技术，使家庭设备具备联网控制、环境感知和智能协同能力。随着智能家居应用范围不断扩大，用户对于家庭设备之间协同运行的需求逐渐提高，智能家居的发展也由单一设备智能向多设备联动和场景化服务转变。然而，在实际应用过程中，不同品牌智能家居设备之间仍存在连接困难、协议差异、平台隔离以及数据交互不畅等问题，影响了智能家居系统整体功能的发挥。跨品牌设备互联互通已经成为智能家居产业进一步发展的重要影响因素。本文围绕智能家居跨品牌设备互联互通展开分析，介绍智能家居系统结构及跨品牌互联的基本特点，分析当前设备互联过程中存在的标准体系不完善、技术兼容不足、平台生态分散和安全管理压力增加等问题，并从标准建设、平台开放、测试体系完善以及安全机制优化等方面提出改进策略。研究认为，智能家居未来的发展不仅需要提升单个设备的智能水平，更需要建立开放、稳定、安全的设备协同环境，以推动不同品牌产品之间实现更加高效的互联互通。

关键字：智能家居；跨品牌设备；互联互通；物联网；设备兼容；技术标准

Barriers to Cross-Brand Device Interoperability in Smart Homes and Optimization Strategies

WANG CHEN-yu[1]

1. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, P. R. China

Correspondence to: WANG CHEN-yu

Abstract: Smart home technology integrates the Internet of Things, wireless communication, artificial intelligence, and automatic control technologies, enabling household devices to achieve network-based control, environmental perception, and intelligent coordination. As smart home applications continue to expand, users increasingly require different household devices to work together efficiently, leading to a transition from single-device intelligence toward multi-device interaction and scenario-based services. However, in practical applications, smart home devices from different brands still face challenges such as connection difficulties, protocol differences, platform isolation, and inefficient data interaction, which limit the overall performance of smart home systems. Cross-brand device interoperability has therefore become an important factor affecting the further development of the smart home industry. This paper analyzes cross-brand interoperability in smart home systems by introducing the structure of smart home systems and the characteristics of cross-brand connections. It discusses major obstacles, including incomplete standard systems, insufficient technical compatibility, fragmented platform ecosystems, and increasing security management challenges. Based on these issues, improvement strategies are proposed from the perspectives of standard development, platform openness,

引用格式：王晨宇. 智能家居跨品牌设备互联互通障碍及优化策略研究[J]. 现代科学探索, 2026, 2(4): 18-25.

interoperability testing, and security mechanism enhancement. The study suggests that the future development of smart homes should not only focus on improving the intelligence of individual devices but also establish an open, stable, and secure collaborative environment to achieve more efficient interoperability among products from different brands.

Key words: smart home; cross-brand devices; interoperability; Internet of Things; device compatibility; technical standards

引言

智能家居是信息技术深入家庭生活的重要应用方向。通过物联网、传感器、智能终端以及云计算平台，家庭中的照明、环境控制、安全监测和家电设备能够实现自动化管理，为用户提供更加便利和高效的生活方式。近年来，智能家居研究逐渐从单一设备功能优化转向系统化服务能力提升，设备之间的连接能力、数据交互能力以及场景协同能力成为影响行业发展的重要因素。相关研究显示，智能家居领域的发展经历了从物联网基础建设到智能应用拓展，再到系统安全优化的发展过程，当前行业关注重点已经逐渐转向系统完整性和可信度提升[1]。

早期智能家居产品主要围绕单个设备展开，例如智能音箱、智能门锁、智能灯具等产品分别完成自身功能。随着用户需求不断变化，单一设备提供的服务已经难以满足家庭复杂应用场景。例如，在实际生活中，用户希望通过一个简单指令同时控制灯光、空调、窗帘和安防设备，实现完整的家庭场景联动。这种需求推动智能家居从“设备智能”向“系统智能”转变。

然而，不同品牌智能家居设备之间的协同仍存在明显限制。当前市场中的智能家居产品通常依托企业自身生态体系运行，不同品牌在通信协议、数据格式、控制平台和安全机制方面存在差异。用户购买多个品牌设备后，往往需要使用不同应用程序进行管理，设备之间难以形成统一的智能环境。

跨品牌设备互联互通问题已经成为影响智能家居用户体验的重要因素。相关研究指出，统一技术标准是保障智能家居设备互联、提升用户体验的重要基础，但目前行业仍存在标准体系完整性不足、国际兼容程度有限等问题[2]。此外，智能家居互联互通不仅涉及设备连接，还包括协议互联、数据交互、场景协同和用户体验等多个层面，需要建立更加完善的测试和评价体系[3]。

因此，研究智能家居跨品牌设备互联互通障碍具有现实意义。本文从智能家居系统特点出发，分析跨品牌设备互联过程中存在的问题及其形成原因，并提出相应优化策略，为智能家居产业进一步实现开放协同提供参考。

1 智能家居跨品牌设备互联互通的基本内涵

智能家居系统并不是单个智能产品的简单组合，而是由设备、网络、平台和应用服务共同构成的综合系统。家庭中的智能设备通过传感器采集环境信息，再利用通信网络完成数据传输，最终由控制平台对设备进行管理，实现自动控制和智能服务。

从技术结构来看，智能家居通常包括感知、连接、控制和应用四个层面。感知层主要负责采集家庭环境信息，例如温度、湿度、光照以及人员活动状态等；连接层负责设备之间的数据传输；控制层负责对设备状态进行管理；应用层则直接面向用户需求，提供智能照明、智能安防、能源管理等服务。

物联网技术的发展推动了智能家居设备连接能力提升。通过网络连接，家庭中的不同设备能够突破传统单独运行模式，实现远程控制和协同工作。基于物联网的智能家居控制系统能够实现设备联网、信息传递以及终端管理，为家庭智能化提供基础条件[4]。

但设备联网并不等同于设备互联互通。设备联网主要解决“设备是否能够接入网络”的问题，而互联互通则要求不同设备之间能够识别信息、交换数据并完成协同任务。对于跨品牌智能家居而言，真正实现互联互通需要解决不同企业技术体系之间的协调问题。

跨品牌设备互联互通主要包括三个方面。其一，不同品牌设备能够被统一系统识别和管理；其二，不同设备之间能够准确理解和交换数据；其三，不同品牌设备能够共同完成用户设定的智能场景。只有达到这些要求，智能家居系统才能真正发挥整体价值。

2 智能家居跨品牌设备互联互通的发展现状

智能家居产业的发展推动家庭设备逐渐由独立运行向网络化、系统化方向转变。早期智能家居主要关注单个设备功能，例如智能灯具实现远程开关，智能门锁实现身份识别，智能摄像头实现家庭监控。这类产品虽然提高了部分生活环节的便利性，但设备之间缺少有效联系，用户仍然需要分别管理不同设备。

随着物联网技术不断应用，智能家居系统开始强调设备之间的信息交流和协同控制。不同类型的家庭设备能够通过网络连接，将采集的数据传输至控制平台，并根据用户需求完成自动化操作。例如，智能传感器可以检测家庭环境变化，再由控制系统调整照明、温度等设备状态，使家庭环境更加符合用户需求。相关研究认为，智能家居已经从基础的设备连接逐渐向更加复杂的场景服务转变，系统协同性成为未来发展的重要方向[5]。

目前，智能家居市场中已经形成多种设备生态模式。一类是以单个企业为核心建立的封闭生态模式，即企业通过自身平台连接旗下设备。这种模式具有较好的稳定性，设备之间能够保持较高兼容程度。例如，同一品牌的智能音箱、智能插座和智能灯具通常能够通过一个应用程序完成管理。但这种模式也限制了用户选择空间，当用户购买其他品牌设备时，原有系统往往难以继续发挥作用。

另一类是多品牌组合使用模式。由于不同企业在产品功能、价格和服务方面存在差异，用户实际购买智能设备时往往不会局限于单一品牌。例如，用户可能选择某品牌智能音箱、另一品牌智能空调以及其他品牌智能安防设备。这种情况下，设备之间是否能够有效连接，直接影响用户对智能家居系统的整体体验。

近年来，行业开始关注跨品牌设备互联问题，并尝试通过标准化方式提升设备兼容能力。智能家居国际标准研究指出，统一标准体系是实现跨品牌设备连接的重要基础，不同标准之间的差异会影响智能设备之间的信息交流和协同运行[2]。与此同时，智能家居互联互通测试研究也提出，设备互联能力需要从接入连接、协议互联、数据互通以及场景协同等多个层面进行评价，而不能仅关注设备是否能够接入网络[3]。

从整体来看，智能家居跨品牌互联互通已经成为行业发展的重要趋势，但目前仍处于不断完善阶段。设备数量增加、应用场景扩大以及用户需求提升，都要求智能家居系统突破品牌限制，实现更加开放的设备协同环境。

3 智能家居跨品牌设备互联互通面临的主要障碍

智能家居跨品牌互联互通困难并不是单一技术问题，而是由设备标准、平台生态、数据管理和安全要求等多个因素共同造成的。在实际应用中，即使不同设备均具备联网功能，也可能因为底层技术差异而无法实现有效协同。

当前较为突出的问题是不同品牌之间缺少统一的连接规则。智能家居设备涉及硬件接口、通信方式、数据格式和控制逻辑等多个环节，不同企业通常根据自身产品特点选择技术方案。例如，有的设备更加依赖无线网络连接，有的设备则采用低功耗通信方式。不同技术路线虽然能够满足单个产品需求，但在跨品牌环境中容易形成连接障碍。

通信协议差异是影响设备互联的重要因素。智能家居设备需要依靠通信协议完成信息交换，如果不同设备采用的协议无法兼容，就

需要借助额外网关或者转换设备进行连接。这不仅增加了系统复杂程度，也可能降低设备运行稳定性。用户在实际使用过程中可能遇到设备无法识别、控制延迟或者场景执行失败等情况。

除通信协议外，数据标准不统一也限制了设备之间的信息交流。智能家居系统中的设备需要不断交换环境数据、设备状态和用户指令。例如，温度传感器需要向空调系统传递环境信息，使空调根据实际情况调整运行状态。如果不同品牌对于数据格式和指令含义的理解不同，即使设备已经连接，也可能无法完成有效协同。

智能家居互联互通测试研究指出，设备之间的协同不仅取决于连接能力，还需要关注协议互联、数据互通和业务协同效果[3]。这说明智能家居未来的发展重点不能停留在“设备联网”，而需要进一步解决“设备理解”和“设备协作”的问题。

除技术因素外，品牌生态之间的隔离也是重要障碍。当前许多企业通过建设自身生态系统增强市场竞争力，形成了相对独立的平台环境。企业希望通过控制设备入口、应用程序和数据服务提高用户黏性，但不同生态之间缺少开放连接机制，使用户难以自由组合不同品牌产品。

平台封闭会降低智能家居系统的整体价值。智能家居的优势在于多个设备共同完成复杂任务，而不是单个设备分别提供功能。如果不同设备无法形成统一系统，用户只能分别管理多个应用程序，智能化体验会明显下降。

此外，跨品牌设备连接还增加了安全管理压力。智能家居设备会收集大量家庭数据，包括用户生活习惯、家庭环境状态以及设备使用信息。当更多品牌设备实现连接后，数据流动范围扩大，安全风险也随之增加。相关研究发现，智能家居用户对于隐私保护、数据收集和安全风险存在较高关注，用户信任会影响智能家居技术的接受程度[6]。

4 智能家居跨品牌设备互联互通障碍的形成原因

智能家居跨品牌互联问题的形成，与产业发展模式和技术演进过程密切相关。智能家居涉及家电制造、通信技术、软件平台和数据服务等多个领域，不同企业在技术路线和发展目标方面存在差异。在行业快速发展的过程中，各企业通常优先完善自身产品体系，形成了不同的平台架构和技术标准。

这种发展模式在早期阶段具有一定合理性。企业通过差异化技术提升产品竞争力，可以推动智能家居市场快速扩大。但当用户需求从单个产品转向整体家庭解决方案时，原有封闭生态逐渐暴露出不足。不同品牌之间缺少统一规则，使设备之间难以形成稳定连接。

同时，智能家居技术本身具有较高复杂性。一个完整智能家居系统不仅包括终端设备，还涉及网络传输、数据处理、云平台服务以及用户交互等多个环节。任何一个环节存在差异，都可能影响系统整体运行效果。

例如，设备之间需要通过通信网络完成信息传输，需要通过数据模型理解彼此状态，还需要通过控制平台完成任务协调。如果不同品牌分别采用不同技术方案，系统之间的协调难度自然增加。

近年来，智能家居系统逐渐引入边缘计算、人工智能等新技术，以提高设备响应速度和智能化水平。相关研究表明，基于边缘计算的智能家居系统能够减少网络依赖，提高设备响应效率和运行可靠性[7]。但与此同时，新的技术应用也使系统结构更加复杂，对设备之间的数据协同提出更高要求。

此外，安全要求提高也是跨品牌互联难度增加的重要原因。智能家居开放连接后，需要保证不同设备之间的数据交换安全。如果企业为了提高兼容性而过度开放接口，可能增加安全风险；如果过度限制访问权限，又会影响设备协同效果。因此，如何在开放性和安全性之间保持平衡，是智能家居未来发展需要解决的重要问题。

5 智能家居跨品牌设备互联互通的

优化策略

智能家居跨品牌设备互联互通的实现，需要从技术标准、产业生态、安全管理以及用户体验等多个方面进行优化。当前设备之间难以形成稳定协同，根本原因在于不同企业在技术体系和管理方式上的差异。因此，优化策略不能只关注单一技术环节，而需要建立覆盖设备接入、数据交互、平台协同和安全保障的综合体系。

5.1 加强标准体系建设，提高设备兼容能力

建立统一标准是解决智能家居跨品牌互联问题的重要基础。当前不同品牌设备之间存在连接方式、通信协议和数据格式差异，导致设备之间难以直接交流。因此，需要进一步完善智能家居行业标准，使不同企业生产的设备能够按照统一规则实现连接。

标准建设首先需要关注设备接入层面。不同品牌设备进入智能家居系统时，需要具备统一的识别方式，使家庭控制平台能够快速识别设备类型和功能。例如，智能灯具接入系统后，平台需要准确了解其是否支持亮度调节、颜色变化等功能，而不仅仅是判断设备是否在线。

其次，需要加强通信协议和数据标准建设。智能家居设备之间的协同依赖大量数据交换，如果不同设备采用完全不同的信息表达方式，即使建立连接，也难以实现有效控制。因此，行业需要推动更加统一的数据模型，使不同品牌设备能够理解彼此传递的信息。

目前，智能家居标准化建设已经成为产业发展的重要方向。相关研究指出，智能家居国际标准体系对于促进跨品牌设备互联具有重要作用，但现阶段仍需要进一步提升标准体系完整性和国际兼容能力[2]。这说明未来标准建设不仅需要关注国内企业之间的协调，也需要考虑全球智能家居产业的发展趋势。

同时，标准制定还需要结合实际应用场景。智能家居并不是简单的设备集合，而是围绕用户需求形成的服务系统。因此，标准体系除了规定设备如何连接，还需要关注不同设备如何共同完成家庭场景。例如，用户设置“离家模式”后，门锁、灯光、空调和安防设备能够按照统一规则完成联动。只有将设备连接标准与场景应用结合起来，才能真正提升智能家居系统价值。

5.2 推动平台开放与生态合作，减少品牌之间的隔离

智能家居跨品牌互联不仅是技术问题，也与企业生态建设方式有关。当前许多企业通过建立自身平台形成竞争优势，但相对封闭的生态环境限制了设备之间的自由组合。

未来智能家居产业需要从单一品牌竞争逐渐转向更加开放的生态合作。企业可以通过开放接口、兼容第三方设备以及建立合作机制，提高自身平台的连接能力。用户在购买智能设备时，也能够根据实际需求选择不同品牌产品，而不必受到单一生态限制。

开放生态并不意味着企业失去竞争优势。智能家居企业仍然可以通过产品质量、服务体验和技术创新保持市场竞争力。开放的核心在于降低设备之间的连接障碍，使不同企业产品能够在统一规则下协同运行。

近年来，智能家居应用已经从单个设备功能扩展到多设备联动场景。相关研究指出，智能家居正在由设备互联向场景互通发展，场景标准化水平直接影响跨平台协同能力[5]。这说明未来智能家居竞争重点不只是设备数量和功能，而是能否提供完整、连续的家庭智能体验。

例如，在传统模式下，用户需要分别打开不同品牌应用控制设备。而在更加开放的生态环境中，用户可以通过统一入口管理多个品牌设备，实现真正意义上的家庭智能控制。这种变化不仅提高用户体验，也有助于推动整个产业链协同发展。

5.3 完善测试认证机制，保障设备协同运行稳定性

智能家居设备实现互联后，还需要保证长期稳定运行。因此，仅依靠标准规范并不足以解决所有问题，还需要建立完善的测试认证体系。

传统智能设备测试主要关注单个产品功能是否正常，而跨品牌互联测试更加关注多个设备共同运行时的表现。例如，不同品牌设备能否正常连接，数据传输是否准确，多个设备执

行场景任务时是否稳定，这些都需要通过系统测试进行验证。

相关研究提出，智能家居互联互通测试应覆盖接入与连接、协议互联与数据互通、场景构建与业务协同以及统一用户体验等多个层面[3]。这一观点说明，智能家居互联评价标准需要从简单的连接测试转向综合能力评价。

未来可以建立更加完善的第三方认证机制，对智能家居设备互联能力进行评价。企业通过测试结果了解产品不足，消费者也能够根据认证信息选择兼容程度更高的设备。

此外，测试体系还应关注智能家居系统长期运行过程中的稳定性。家庭设备通常需要持续工作，如果设备之间频繁出现断开连接、响应延迟或者控制错误，会降低用户对智能家居的信任。因此，测试内容需要覆盖不同网络环境、不同使用场景以及不同设备组合，提高系统实际应用能力。

5.4 强化安全保护机制，提高用户对跨品牌连接的信任

跨品牌设备互联意味着更多设备和平台之间需要进行数据交换，因此安全保护成为不可忽视的重要问题。智能家居设备通常涉及家庭环境信息、用户行为数据以及设备运行状态，这些信息具有较强私密性。

在开放连接环境下，企业需要建立完善的身份认证、权限管理和数据保护机制。设备接入系统时，需要确认设备来源和用户授权情况；数据传输过程中，需要避免信息被非法获取；平台管理过程中，需要限制不同设备和服务对于用户数据的访问范围。

用户对于智能家居的接受程度不仅取决于设备功能，也受到安全因素影响。相关研究发现，智能家居用户在享受便利服务的同时，也会关注数据收集目的、隐私风险以及系统安全问题[6]。因此，提升用户信任是推动跨品牌设备普及的重要条件。

安全保护并不意味着减少设备之间的连接，而是通过更加合理的安全设计实现安全连接。例如，企业可以在开放接口的同时建立权限控制机制，使用户能够自主决定哪些设备可以共享数据，哪些功能需要授权使用。

未来智能家居的发展需要形成“开放连接”和“安全管理”并重的发展模式。只有在保证用户数据安全的基础上提高设备兼容能力，跨品牌智能家居系统才能获得更加广泛的应用。

6 智能家居跨品牌设备互联互通的发展趋势

智能家居未来的发展方向将进一步从设备连接转向系统协同。随着家庭智能设备数量不断增加，用户对于智能服务的需求已经不再局限于控制单个产品，而是希望多个设备能够根据家庭环境和个人习惯自动协作。

未来智能家居系统将更加重视场景化服务。例如，用户进入家庭后，系统可以根据时间、环境和用户习惯自动调整灯光、温度以及安全设备状态。这类服务需要多个品牌设备共同参与，因此跨品牌互联能力将成为智能家居发展的重要基础。

同时，人工智能技术的发展也将推动智能家居从被动控制向主动服务转变。传统智能家居主要依靠用户输入指令，而人工智能能够通过分析环境数据和用户行为，为设备协同提供更加智能的决策支持。

不过，人工智能应用也对设备互联提出更高要求。智能系统需要获取不同设备的信息，并根据设备功能进行综合判断。如果不同品牌设备之间无法有效交流，人工智能也难以发挥整体作用。因此，人工智能的发展将进一步推动智能家居开放连接体系建设。

此外，边缘计算等技术的发展也将影响智能家居互联模式。相关研究表明，边缘计算能够降低智能家居系统响应延迟，提高设备运行效率和可靠性[7]。未来，家庭智能系统可能更多依靠本地计算和云端服务结合的方式，提高实时控制能力。

7 结论

智能家居的发展正在从单一设备智能化逐渐转向多设备协同服务，跨品牌设备互联互通

已经成为影响智能家居进一步发展的关键因素。当前，不同品牌智能家居设备之间仍存在技术标准不统一、通信协议差异、平台生态分散以及安全管理压力增加等问题。这些问题不仅降低了设备之间的协同效率，也影响了用户对于智能家居系统整体价值的认识。

从技术层面来看，智能家居设备互联互通并不是简单实现设备联网，而是需要解决设备识别、数据交换、场景协同以及系统稳定运行等多个问题。当前行业虽然已经开始推动标准体系建设和互操作测试，但由于参与主体较多，技术路线存在差异，跨品牌设备之间仍难以实现完全顺畅的协同。

解决智能家居跨品牌互联问题，需要建立更加开放和统一的发展环境。一方面，应进一步完善行业标准体系，推动设备连接规则、数据交互方式和场景控制机制的统一，提高不同品牌设备之间的兼容能力。另一方面，企业需要加强生态合作，通过开放接口、平台协同和测试认证降低设备连接成本。同时，在设备开放连接过程中，还需要重视数据安全和隐私保护，通过完善身份认证、权限管理和数据保护机制，提高用户对于智能家居系统的信任。

未来，智能家居竞争重点将不再局限于单个产品功能，而是转向整体智能体验和生态协同能力。随着人工智能、边缘计算等技术进一步应用，智能家居系统将更加依赖不同设备之间的信息共享和协同运行。因此，推动跨品牌设备互联互通，不仅是提升用户体验的现实需求，也是智能家居产业持续发展的重要方向。

参考文献：

[1] 石圆圆, 李明琛, 张阳. 基于文献计量的家居领域智能化研究热点分析[J]. 建筑科学, 2026, 42(8): 172-179.

[2] 刘洋, 郭雄, 杨宏, 郎俊奇. 信息技术设备互连领域智能家居国际标准对标达标研究[J]. 信息技术与标准化, 2026, (7): 30-34+41.

[3] 杨宏, 郎俊奇, 郭雄, 刘洋. 智能家居互联互通测试技术和测试标准研究[J]. 信息技术与标准化, 2026, (7): 42-53+58.

[4] 王先庆, 居同岭, 于靓环, 王淼, 郎俊奇. 智能家居场景互通技术研究[J]. 信息技术与标准化, 2026, (7): 54-58.

[5] 袁林华. 基于物联网视角的智能家居控制系统的实现与展望[J]. 数字技术与应用, 2026, 44(7): 23-25.

[6] 熊豪. 基于边缘计算的智能家居照明系统低时延响应与故障诊断[J]. 中国照明电器, 2026, (8): 145-147.

[7] Di Nallo E V, Chu C H, Hasan Z, et al. Examining Canadian Smart Home Technology Users' Perceptions of Privacy, Risks, Safety, and Data Collection Purposes: Cross-Sectional National Survey[J]. JMIR Formative Research, 2026, 10.

版权声明

© 2026 作者版权所有。本文依据“知识共享署名 4.0 国际许可协议”（CC BY 4.0）以开放获取方式发布。该许可允许使用者在任何媒介中自由使用、复制、传播与改编文章（含商业用途），惟须明确署名原作者及出处，并注明所作修改（如有）。完整协议详见：https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.zh-hans

出版声明

所有出版物中的陈述、观点及资料仅代表作者及供稿者个人立场，与 Brilliance Publishing Limited 及/或编辑人员无关。Brilliance Publishing Limited 及/或编辑人员对因内容所提及的任何理念、方法、说明或产品所导致的人身或财产损害概不负责。

DOI: 10.53104/xdkxts.2026.02.04.004

滨海湿地保护与生态旅游协调发展的路径探讨

张晨 [1]

1. 福建理工大学，福建 福州 350118

摘要：滨海湿地是连接陆地与海洋的重要生态空间，具有维持生物多样性、调节区域环境、改善滨海景观品质等多重功能。近年来，滨海旅游的发展为沿海地区带来了经济活力，也对湿地生态系统产生了一定压力。如何在保护滨海湿地生态功能的基础上，实现旅游利用与空间发展的协调，成为滨海地区规划建设需要关注的重要问题。本文以滨海湿地保护与生态旅游协调发展为研究对象，从滨海空间环境与生态旅游发展的关系出发，分析当前滨海地区在生态保护、空间规划、旅游设施建设以及管理机制方面存在的问题，并结合建筑与空间规划视角，从生态优先的空间布局、旅游设施融合设计、公共空间优化以及规划管理完善等方面提出协调发展路径。研究认为，滨海湿地保护并非限制旅游发展，而是为生态旅游提供长期资源基础。通过合理控制开发强度、优化空间组织方式以及加强人与自然之间的互动，可以实现滨海湿地保护与生态旅游发展的良性循环。

关键字：滨海湿地；生态旅游；空间规划；生态保护；滨海建筑

Exploring the Pathways for Coordinated Development of Coastal Wetland Conservation and Ecotourism

ZHANG Chen[1]

1. Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, P. R. China

Correspondence to: ZHANG Chen

Abstract: Coastal wetlands are important ecological spaces connecting terrestrial and marine ecosystems, providing significant functions such as biodiversity conservation, environmental regulation, and coastal landscape improvement. The development of coastal tourism has brought economic vitality to coastal regions, but it has also created pressures on wetland ecosystems through intensified land use and tourism activities. Achieving coordination between wetland conservation and ecotourism development has become an important issue in coastal spatial planning and sustainable development. This paper examines the relationship between coastal wetland conservation and ecotourism development from the perspective of spatial planning and architectural design. It analyzes the major challenges faced by coastal areas, including excessive tourism development, insufficient coordination between spatial planning and ecological protection, and inadequate integration between tourism facilities and natural environments. Based on these issues, this paper proposes several approaches, including ecological-oriented spatial planning, environmentally adaptive tourism facility design, optimization of coastal public spaces, and improvement of long-term management mechanisms. The study argues that wetland conservation does not conflict with tourism development. Instead, effective spatial organization and environmentally responsive design can transform coastal wetlands into sustainable tourism

引用格式：张晨. 滨海湿地保护与生态旅游协调发展的路径探讨[J]. 现代科学探索, 2026, 2(4): 26-36.

resources while maintaining ecological functions. Coordinated development between conservation and tourism can provide a practical direction for the future planning and construction of coastal areas.

Key words: coastal wetlands; ecotourism; spatial planning; ecological conservation; coastal architecture

引言

滨海地区通常具有丰富的自然资源和独特的景观条件，是城市发展、旅游活动和生态保护的重要空间。海岸线、滩涂、湿地、海岛等自然环境不仅为人类提供了休闲游憩场所，也承担着调节生态环境、维护区域稳定的重要作用。然而，在旅游业快速发展的过程中，部分滨海地区过度关注经济收益，大规模建设旅游设施，导致自然岸线减少、湿地空间破碎化以及生态功能下降等问题。滨海旅游的发展如果缺少科学规划，容易形成短期开发与长期保护之间的矛盾。滨海湿地作为海陆交互区域的重要生态系统，对维护区域生态安全具有重要意义。相关研究指出，滨海湿地受到城市建设、围填海工程以及人类活动影响后，容易出现面积减少、生境退化和生态功能下降等问题，需要通过生态修复和科学管理恢复其生态价值[1]。同时，滨海湿地并不是完全禁止利用的自然空间，而是可以通过合理规划形成生态保护、公众体验和旅游发展的复合空间。

滨海旅游的发展不仅涉及旅游项目建设，也涉及人与自然关系的重新组织。滨海区域中的建筑、道路、景观设施以及公共空间都会影响生态环境和游客体验。已有研究表明，滨海风景区空间结构与自然环境、人工环境、人文活动之间存在密切联系，合理的空间组织能够提升滨海地区的使用效率和环境品质[2]。因此，滨海湿地保护与生态旅游协调发展，需要突破单纯保护或单纯开发的思路，将生态价值融入空间规划和建设过程。

国内关于滨海生态保护和旅游发展的研究已经形成了一定基础，涉及湿地修复、生态旅游模式、滨海城市规划等多个方面。但如何通过规划设计协调生态保护与旅游使用之间的关系，仍具有进一步探讨的价值。本文围绕滨海湿地保护与生态旅游协调发展的现实需求，分析两者之间的关系及当前存在的问题，并从空间规划和建筑设计角度提出优化路径，为滨海地区实现生态保护与合理利用提供参考。

1 滨海湿地保护与生态旅游发展的关系

1.1 滨海湿地的生态价值与空间意义

滨海湿地位于陆地生态系统与海洋生态系统交汇区域，是具有较高生态敏感性的空间类型。其内部包含潮间带、盐沼、红树林、河口湿地等多种环境类型，在水质调节、生物栖息、海岸防护以及气候调节方面发挥重要作用。相比普通城市空间，滨海湿地具有更强的生态开放性和环境变化特征，其空间利用需要充分考虑自然过程。

近年来，随着沿海地区经济活动增加，滨海湿地受到城市扩张、港口建设、养殖活动以及旅游开发等多方面影响。部分地区为了扩大建设空间，对自然岸线进行改造，使原有湿地面积减少，生态联系受到影响。相关研究指出，围填海工程和过度开发可能导致自然岸线消失、湿地功能退化以及生态资源下降，因此滨海地区需要加强生态保护修复，并通过科学规划恢复生态系统功能[3]。滨海湿地并不是简单的建设空地，而是一种具有生态价值的特殊空间。传统滨海开发往往强调建筑体量、景观效果和游客容量，而忽视湿地自身的环境规律。例如，大面积硬质铺装可能改变地表水循环，高密度建筑可能影响自然通风和生态廊道。因此，滨海空间建设需要将湿地作为规划基础，而不是将其视为建设限制。

生态保护并不意味着完全排除人的活动。合理的生态体验空间能够帮助公众认识湿地价值，提高环境保护意识。例如，通过设置低干扰型步道、观景平台、生态展示设施等方式，可以使游客进入湿地环境，同时降低对生态系统的

影响。这种方式体现了保护与利用之间的平衡，也是未来滨海旅游空间发展的重要方向。

1.2 生态旅游对滨海地区发展的作用

生态旅游是在保护自然环境基础上的旅游活动，其核心并非简单利用自然景观吸引游客，而是在满足游客体验需求的同时维护生态系统稳定。对于滨海地区而言，生态旅游能够将湿地资源、海洋景观和地方文化结合起来，为区域发展提供新的动力。与传统滨海旅游相比，生态旅游更加重视环境承载能力和长期发展。传统模式通常依靠大型酒店、商业街区和娱乐设施提升游客数量，而生态旅游更加关注自然观察、环境教育、文化体验等内容。这种转变能够减少高强度建设对滨海生态空间的影响。研究认为，滨海旅游的发展需要建立在生态环境保护基础上，如果缺乏合理规划，旅游活动可能带来污染增加、生境破坏以及资源消耗等问题[4]。因此，生态旅游的发展重点不是扩大旅游规模，而是提高旅游空间质量，通过更加精细的规划方式实现资源利用。

生态旅游为滨海空间设计提出了新的要求。旅游建筑不再只是满足住宿、消费等功能，而需要与自然环境形成协调关系。例如，游客服务中心、生态展示馆、休憩设施等建筑，应减少对自然环境的干扰，同时增强游客与湿地之间的互动。这要求设计者关注建筑位置、材料选择、空间尺度以及环境影响，使建筑成为连接人与自然的媒介。

1.3 保护与利用协调发展的必要性

滨海湿地保护与生态旅游发展并不是相互排斥的关系。湿地生态环境是生态旅游发展的基础，而旅游活动产生的经济收益又可以反过来支持生态保护。因此，两者之间需要形成相互促进的关系。如果忽视生态保护，短期旅游开发可能带来经济收益，但长期会降低区域吸引力。当湿地景观退化、水环境恶化、生物资源减少后，旅游价值也会随之下降。相反，如果完全限制公众进入，也可能导致湿地价值难以被社会认识，保护资金和管理动力不足。

滨海地区需要建立保护与利用结合的发展模式。一方面，通过生态红线、功能分区和建设控制等方式保护核心生态空间；另一方面，在适宜区域开展低影响旅游活动，使生态资源转化为可持续发展的动力。已有研究提出，滨海旅游可持续发展需要综合考虑自然生态系统、旅游活动和社会经济系统之间的关系，通过空间规划、生态补偿和管理机制实现多方协调[5]。这一理念说明，滨海湿地保护不应局限于自然环境维护，而应与区域空间发展、建筑设计和公共服务体系结合。

2 滨海湿地保护与生态旅游发展中的现实问题

2.1 旅游开发对湿地生态空间的影响

滨海旅游的发展需要依托良好的自然环境，但部分地区在开发过程中仍然存在过度利用的问题。一些滨海区域为了提高旅游吸引力，大规模建设度假设施、商业空间以及交通基础设施，使原本连续的湿地空间被人工设施分割，影响生态系统的完整性。

滨海湿地具有较强的生态敏感性，其生态功能需要依靠自然形成的水文条件、生物群落和空间结构共同维持。当旅游开发改变湿地原有地形、水流方向或者植被分布时，可能导致生态过程受到影响。例如，部分区域为了建设滨海景观道路，对自然岸线进行硬化处理，使湿地失去缓冲作用；部分旅游设施建设侵占湿地空间，也会降低生物栖息环境质量。研究指出，近年来滨海湿地面积减少与围填海活动、养殖扩张以及土地利用变化存在密切关系，这些变化不仅影响湿地生态功能，也增加了滨海区域环境风险[6]。滨海旅游开发不能简单追求建设规模，而应根据生态空间特点确定开发边界。从建筑规划角度来看，滨海旅游建设中存在的问题并不完全来自建筑本身，而是由于建筑与生态环境之间缺少协调。部分旅游建筑仍然采用传统建设模式，将滨海空间视为普通城市土地，忽视了潮汐变化、生态缓冲和自然景观连续性。例如，在湿地区域周边设置大规模游客中心、停车场等设施，如果缺少合理布局，容易造成生态压力。滨海旅游空间建设需要改变过去“先建设、后治理”的方式，将生态条件作为空间规划的重要依据。在湿地核心区域，应减少人工干预；在外围区域，可以通过适度

建设满足游客需求，使旅游活动与湿地保护形成合理分区。

2.2 滨海空间规划与生态保护衔接不足

滨海地区具有陆海交错的特殊空间属性，其规划管理涉及自然环境、城市建设、旅游产业等多个方面。但在实际发展过程中，不同规划之间存在衔接不足的问题，导致生态保护要求难以充分落实。传统城市规划通常以陆地空间为主要对象，而滨海区域同时受到海洋环境影响。如果仅从城市建设角度进行规划，容易忽视海岸带生态系统的整体性。例如，一些滨海城市在建设过程中重视道路、商业设施和景观打造，却没有充分考虑湿地保护、水环境维护以及生态廊道连接。滨海地区生态修复需要突破单一空间治理方式，从陆海统筹角度协调土地利用、生态保护和空间建设之间的关系，通过整体规划提升生态系统稳定性[7]。这说明滨海空间规划不能将湿地、城市和旅游区域简单分开，而需要建立相互联系的空间体系。

滨海空间规划不仅关注建筑布局，也关注建筑与自然环境之间的关系。滨海建筑应成为生态空间中的组成部分，而不是独立存在的人工对象。例如，游客服务设施可以结合湿地边界设置，通过开放式空间、生态廊道和景观连接方式降低对自然环境的影响。

目前部分滨海旅游区存在功能布局不合理的问题。一些区域将大量旅游设施集中在海岸线附近，造成游客活动与生态保护空间直接冲突；另一些区域则由于缺少公共设施，游客体验不足，导致旅游价值无法充分发挥。因此，未来滨海空间规划需要根据不同区域功能进行合理划分，使保护区域、旅游区域和生活区域形成协调关系。

2.3 旅游设施建设与自然环境协调不足

旅游设施是滨海生态旅游发展的重要支撑，但设施建设方式直接影响滨海环境质量。当前部分滨海旅游项目仍然存在建筑形式单一、环境适应性不足的问题。

滨海环境具有特殊性，受到海风、潮汐、盐雾以及气候变化影响。普通建筑设计方式可能无法充分适应滨海环境，同时也可能增加能源消耗和环境压力。例如，大量使用硬质材料建设滨海广场，会降低地表渗透能力；高密度建筑布局可能阻碍自然通风，影响滨海空间舒适度。

滨海旅游设施建设应更加关注生态适应性。建筑不应只是满足游客停留和消费需求，还应承担环境教育、景观连接和生态展示功能。例如，湿地展示馆可以利用自然采光和通风方式降低能源消耗；观景平台可以采用轻量化结构减少对地表环境的破坏；生态步道可以结合原有地形减少土地扰动。

相关研究对滨海风景区空间结构进行分析后指出，滨海区域常存在交通联系不足、公共空间利用效率不高以及景区内部功能联系弱等问题，需要通过空间优化提高整体使用效率[8]。这一问题同样适用于生态旅游区域。如果旅游设施之间缺少合理联系，游客活动容易集中于局部区域，增加某些生态空间的压力。滨海旅游设施建设应从单体建筑设计转向整体空间设计。建筑、道路、景观和生态空间需要形成连续系统，使游客活动范围与生态保护范围保持合理关系。

2.4 生态保护参与机制仍需完善

滨海湿地保护涉及政府、规划部门、旅游企业、当地居民以及游客等多个主体，仅依靠单一管理方式难以实现长期有效保护。目前部分滨海地区虽然建立了保护制度，但公众参与程度仍然有限，生态保护与旅游发展之间缺少有效沟通。滨海旅游的发展不仅影响自然环境，也影响当地居民生活。部分地区在旅游开发过程中更加关注经济收益，而当地居民参与规划和管理的机会较少，容易导致保护目标与社会需求之间出现矛盾。

有研究指出，滨海地区保护与开发过程中存在管理主体分散、资源利用协调不足以及旅游产品单一等问题，需要加强政府、企业和社会力量之间的合作[9]。这表明滨海生态旅游发展不仅是空间建设问题，也是社会治理问题。公众参与同样具有重要意义。一个成功的滨海生态空间不仅需要良好的设计，也需要使用者形成保护意识。如果游客不了解湿地价值，即使建设了完善的生态设施，也可能因为不合理使用造成环境压力。

滨海旅游规划需要加强生态教育功能。例如，通过设置生态展示空间、环境说明设施和公众参与活动，让游客从单纯的景观体验者转变为生态保护参与者。同时，当地居民也可以通过生态旅游服务、文化展示等方式参与区域发展，使保护与经济收益形成联系。

滨海湿地保护与生态旅游发展面临的问题，并不是旅游活动本身造成的，而是空间开发方式、规划理念和管理机制之间存在不协调。解决这些问题，需要从空间规划、建筑设计和管理体系多个方面进行调整。

3 建筑空间视角下滨海生态旅游协调发展的优化路径

3.1 构建生态优先的滨海空间布局

滨海湿地保护与生态旅游协调发展的基础，是建立符合自然规律的空间布局方式。传统滨海开发往往以旅游设施建设为核心，将海岸线作为展示景观和吸引游客的重要资源，但这种方式容易忽视湿地生态系统自身的运行规律。对于滨海地区而言，空间规划不能简单按照城市建设逻辑进行，而应充分考虑陆地、海洋和湿地之间的联系。

生态优先的空间布局并不是限制滨海地区发展，而是在明确生态保护边界的基础上合理安排不同功能区域。滨海空间可以根据生态敏感程度划分为核心保护区、生态体验区和综合服务区。核心保护区主要承担生态维护功能，应减少人工建设活动；生态体验区可以设置低影响旅游设施，使游客能够接近自然环境；综合服务区则承担游客接待、交通转换和公共服务功能。

这种分区方式能够避免旅游活动与生态保护空间直接冲突。已有研究指出，滨海湿地保护需要加强保护区域划定和开发利用管理，通过优化岸线利用方式提高湿地保护效果[10]。因此，在建筑规划过程中，应避免将大量建筑集中布局于湿地敏感区域，而应根据生态条件选择合适的位置。

对于建筑设计而言，空间布局还需要关注建筑与自然环境之间的关系。滨海建筑不应成为阻隔自然景观的封闭空间，而应成为连接人与环境的媒介。例如，生态游客中心可以设置在湿地外围，通过开放式空间组织游客流线；观景设施可以利用架空方式减少对地面的影响，使游客能够观察湿地环境，同时避免破坏植被。

滨海空间布局还需要考虑生态网络的连续性。湿地并不是孤立存在的自然区域，而是与河流、海岸、城市绿地等共同构成生态系统。相关研究提出，滨海地区生态修复需要通过生态廊道建设和空间网络优化，提高不同生态区域之间的联系[11]。建筑规划应避免割裂生态空间，而应通过绿地、步道和景观节点形成连续的生态联系。

3.2 推动旅游设施与湿地环境融合设计

旅游设施是游客认识滨海湿地的重要载体，其设计方式直接影响生态旅游质量。过去部分滨海旅游项目更加关注建筑规模和视觉效果，而忽视建筑与自然环境之间的协调关系。生态旅游背景下，滨海建筑需要从传统功能型建筑转向环境融合型建筑。

滨海地区具有明显的自然特征，建筑设计需要适应当地气候和生态条件。例如，滨海区域风力较强，空气湿度较高，建筑材料和结构形式需要充分考虑耐久性；湿地区域地表环境变化较大，建筑基础形式也需要减少对生态环境的影响。因此，滨海建筑设计不能简单复制城市建筑模式，而应结合场地条件进行调整。在湿地生态旅游区域，建筑规模通常不宜过大。过大的建筑体量不仅会改变滨海景观，也会增加基础设施建设压力。相比集中式大型建筑，小尺度、分散式设施更适合生态敏感区域。例如，小型服务驿站、生态观察平台、环境教育空间等，可以通过合理布局满足游客需求，同时降低环境影响。

建筑材料选择也是环境融合设计的重要内容。滨海建筑可以优先采用耐候性较强、维护成本较低的材料，并结合当地自然条件选择适宜的建筑形式。同时，通过自然采光、自然通风以及雨水收集等方式，可以降低建筑运行过程中的资源消耗。从空间体验角度来看，滨海旅游建筑应加强人与自然之间的互动。传统建筑

通常强调室内空间功能，而生态旅游建筑需要提供更多观察、交流和体验空间。例如，湿地展示建筑可以设置连续观景空间，使游客在了解生态知识的同时感受自然环境；滨海休息设施可以结合景观节点布置，提高游客停留体验。

研究表明，滨海地区空间发展需要同时考虑生态保护、产业发展和空间营造三个方面，通过合理规划实现保护与利用之间的平衡[12]。这一理念说明，旅游设施建设并不是单纯增加建筑数量，而是通过设计提升空间价值。

3.3 完善滨海公共空间与生态体验体系

滨海公共空间是连接居民、游客和自然环境的重要区域，也是生态旅游发展的重要组成部分。相比封闭式旅游设施，开放性的公共空间能够提供更加持续的生态体验，使滨海环境成为公众共享的自然资源。

目前部分滨海旅游区域存在公共空间不足的问题。一些地区过度建设商业设施和收费项目，导致游客活动集中于少数区域，普通居民难以充分利用滨海空间。对于滨海生态旅游而言，公共空间建设需要兼顾旅游需求和社会共享功能。

滨海公共空间设计应突出生态体验特点。例如，可以利用滨海步道连接不同景观节点，使游客通过步行方式了解湿地环境；可以设置生态教育设施，让游客认识湿地功能；也可以通过观景平台、自然课堂等形式增强人与自然之间的联系。

绿道系统是滨海公共空间建设的重要方式。相关研究指出，滨海城区绿道能够整合自然资源和城市空间，提高居民活动环境质量，并改善滨海区域空间联系[13]。因此，在滨海旅游规划中，绿道不仅承担交通功能，也可以成为生态展示和环境体验的重要空间。

公共空间设计还需要关注游客行为对生态环境的影响。过度集中的人流可能对湿地造成压力，因此需要通过空间组织引导游客活动。例如，通过设置不同等级的游览路径，将高频使用区域与生态敏感区域分离；通过合理设置停留节点，避免游客随意进入保护区域。

滨海公共空间还可以结合当地文化特色。许多滨海地区具有渔业文化、海岛文化和地方传统，这些文化资源可以通过建筑空间、景观节点和展示设施进行表达。这样不仅能够丰富旅游体验，也能够增强当地居民对生态保护的认同。

3.4 加强滨海地区整体规划管理

滨海湿地保护与生态旅游协调发展不仅依靠空间设计，也需要完善的规划管理体系。由于滨海地区涉及生态、旅游、城市建设等多个领域，如果缺少统一协调机制，容易出现不同规划之间目标不一致的问题。

整体规划管理需要建立长期发展思维。滨海旅游不能只关注短期游客数量和经济收益，而应关注生态环境质量、空间使用效率以及区域持续发展能力。相关研究指出，滨海旅游可持续发展需要建立生态系统、旅游活动和社会经济之间的协调关系，通过科学规划实现长期稳定发展[14]。

在规划实施过程中，应加强对滨海建设活动的控制。例如，对于湿地保护区域，应严格限制高强度建设；对于适宜开发区域，应明确建筑规模、景观要求和环境标准。通过规划控制，可以避免无序建设对生态空间造成破坏。

需要加强不同主体之间的合作。政府部门负责整体规划和制度建设，旅游企业承担项目运营责任，规划设计人员负责空间优化，当地居民参与社区发展。多方共同参与能够提高规划实施效果。

对于建筑行业而言，未来滨海建设需要更加重视生态设计理念。建筑师不仅需要关注建筑形式和空间功能，也需要理解滨海生态系统运行方式。在滨海项目中，建筑设计应从单体设计扩展到区域环境设计，使建筑成为生态空间中的积极因素。

4 滨海湿地生态旅游发展的实践思考

4.1 湿地保护区中的生态旅游模式

滨海湿地保护区具有较高的生态价值，是维护区域生物多样性和生态稳定的重要空间。

由于保护区内自然环境较为敏感，其旅游开发不能采用高强度建设模式，而应以生态保护为基础，通过低影响方式开展环境体验活动。

传统旅游开发通常强调景区规模扩大和游客数量增加，但湿地保护区的核心价值在于自然生态系统本身。如果过度建设道路、商业设施和住宿空间，会改变湿地原有环境结构，降低保护区生态功能。因此，湿地保护区中的生态旅游应更加重视环境教育、自然观察和科学体验。

例如，湿地区域可以通过设置生态步道、观鸟平台、科普展示空间等方式，为游客提供接触自然的机会。这类设施对环境影响较小，同时能够提升公众对湿地保护价值的认识。建筑设计在其中发挥的是辅助作用，重点不是创造视觉中心，而是降低人与自然接触过程中的干扰。

盐城黄海湿地作为典型滨海湿地保护区域，其保护实践体现了生态保护与公众参与结合的发展思路。相关研究指出，滨海生态保护不仅需要关注自然资源维护，也需要通过制度建设和公众参与推动生态文明实践[15]。这一经验说明，湿地保护区并非完全排除旅游活动，而是需要通过科学管理确定适宜的利用方式。

在湿地保护区进行生态旅游建设时，需要控制建筑数量和空间规模。游客服务设施应尽可能布局在生态敏感区域外围，通过交通转换空间连接保护区域。同时，应避免大面积硬质铺装和人工景观建设，使建筑成为湿地环境中的补充元素。

生态旅游还可以承担环境教育功能。通过展示湿地形成过程、生物类型以及生态作用，可以提高游客对环境保护的认识。相比单纯观赏自然景观，这种体验方式更有助于形成长期保护意识。湿地保护区中的生态旅游模式应以“保护基础上的适度利用”为原则。旅游活动不是湿地发展的主要目标，而是促进公众认识生态价值、支持保护工作的辅助方式。

4.2 城市滨海空间更新中的生态融合

城市滨海区域通常具有较高的人口密度和经济活动强度，是滨海旅游开发的重要区域。与自然保护区相比，城市滨海空间面临更加复杂的发展需求，需要同时满足居民生活、公共活动、旅游体验和生态保护等多种功能。

在城市滨海更新过程中，过去部分建设模式过度强调土地利用效率，导致自然岸线减少、公共空间不足以及生态功能下降。随着城市发展理念转变，滨海空间更新逐渐从单纯建设开发转向生态、生活和旅游融合发展。

城市滨海区域的生态融合，需要重新认识建筑与自然环境之间的关系。滨海建筑不应只是商业开发载体，也可以成为改善城市环境的重要组成部分。例如，通过建设滨海公共建筑、生态展示空间以及开放式休闲设施，可以提高居民和游客对滨海环境的使用体验。

深圳大鹏新区的发展实践体现了滨海地区保护与发展的协调探索。相关研究指出，大鹏新区在空间发展过程中，需要同时考虑生态保护、产业发展和空间营造，通过合理规划实现区域价值提升[16]。这一模式说明，城市滨海更新并不是简单增加建设面积，而是在保护生态基础上优化空间结构。

城市滨海更新可以通过以下方式实现生态融合。其一，加强滨海公共空间连续性，通过步道、绿地和开放空间连接城市与海岸；其二，优化建筑布局，避免建筑形成对海岸空间的阻隔；其三，提高建筑环境适应能力，使建筑能够回应当地气候和生态条件。

城市滨海区域还应避免将旅游功能完全商业化。滨海空间不仅服务游客，也属于城市居民的重要公共资源。因此，在规划中需要保留开放空间比例，使居民能够参与滨海环境体验。这样的空间模式能够增强城市与海洋之间的联系，也有利于形成更加稳定的生态旅游环境。

4.3 海岛与滨海村落旅游发展的适度利用

海岛和滨海村落具有独特的自然景观和文化资源，是生态旅游发展的重要类型。但由于空间相对独立、资源条件有限，其旅游发展需要更加注重适度利用。海岛地区通常具有生态系统脆弱、土地资源有限、基础设施条件不足等特点。如果大量建设酒店、商业设施和交通设施，可能超过当地环境承载能力。因此，海岛旅游不适合简单复制城市旅游开发模式，而应结合当地资源条件发展特色化、低影响旅游。

珠海淇澳岛的滨海休闲旅游发展实践表明，海岛旅游需要结合生态资源和地方文化，通过合理开发促进区域发展。相关研究指出，海岛旅游发展应充分利用自身资源优势，同时关注生态保护和产业协调之间的关系[17]。

对于滨海村落而言，旅游发展可以与传统生活空间结合。相比新建大型旅游建筑，利用现有村落空间进行改造，更符合生态保护要求。例如，将传统建筑改造成文化展示空间，将闲置空间转化为游客服务设施，可以减少新的土地开发压力。建筑设计在海岛和滨海村落旅游发展中，应更加关注地域性。滨海建筑可以结合当地建筑形式、材料特点和生活方式，使旅游空间保持地方特色。过度追求现代化和商业化，可能导致滨海地区失去原有文化特征。

海岛旅游需要完善环境管理体系。游客数量增长可能带来垃圾处理、水资源利用和生态压力等问题。因此，需要通过合理规划控制旅游规模，并建立相应的环境维护机制。滨海村落和海岛旅游发展的关键，不在于建设更多旅游设施，而在于提升现有资源价值。通过保护自然环境、延续地方文化和优化空间使用，可以实现旅游收益与生态保护之间的平衡。

4.4 滨海生态旅游空间发展的综合启示

从不同类型滨海区域的发展实践来看，生态旅游建设需要根据区域特点采取差异化策略。湿地保护区强调生态维护和环境教育，城市滨海区域强调公共空间优化和生态融合，海岛与滨海村落则强调资源保护与特色利用。不同区域虽然发展条件存在差异，但共同点在于都需要避免高强度、同质化的旅游开发模式。滨海地区的核心吸引力来自自然环境和地方特色，如果开发方式破坏了这些基础资源，旅游发展也难以持续。

建筑空间在滨海生态旅游发展中承担着连接自然、社会和经济的重要作用。建筑不是独立于环境之外的人工对象，而应成为生态系统中的协调因素。未来滨海旅游建设需要更加关注空间尺度、环境适应和公共体验，使建筑与湿地、海岸和城市形成更加稳定的关系。滨海生态旅游发展还需要加强长期规划。短期项目建设可以提升区域知名度，但只有将生态保护纳入持续管理过程，才能真正实现滨海地区的可持续发展。

5 滨海湿地保护与生态旅游协调发展的保障机制

5.1 完善规划引导机制

滨海湿地保护与生态旅游协调发展，需要以科学规划作为基础。由于滨海区域同时具有生态空间、城市空间和旅游空间等多重属性，如果缺少统一规划，不同功能之间容易产生冲突。因此，需要将生态保护要求融入滨海地区空间规划全过程，使旅游开发建立在生态承载能力基础之上。

传统滨海旅游规划往往更加关注景区建设、交通组织和商业开发，而生态保护内容容易停留在原则层面。这样的规划方式难以有效应对滨海环境变化，也容易造成旅游设施布局与生态空间不匹配的问题。因此，在规划阶段需要明确不同区域的发展目标，根据生态敏感程度确定开发方式。

滨海湿地空间规划可以采用分区管理方式。对于具有重要生态价值的区域，应重点保护湿地结构和生物栖息环境，减少人工建设活动；对于具有一定开放条件的区域，可以结合生态体验需求设置低影响旅游设施；对于城市滨海区域，则可以通过公共空间优化和生态修复提升整体环境品质。

滨海地区生态修复需要从整体空间格局出发，通过“格局—策略—单元—工程”的方式推进生态保护工作，使规划要求能够落实到具体空间和建设项目中[18]。这一思路对于滨海旅游规划具有重要参考意义。建筑设计不应在规划完成后单独考虑，而应参与到区域空间组织过程中。

滨海规划还需要加强动态调整。滨海环境受到气候变化、海岸变化和人类活动影响，具有较强的不确定性。因此，规划不能只关注当前建设需求，还需要预留生态恢复和空间调整的可能。

滨海规划的核心并不是增加多少建筑，而

是通过合理的空间组织提升人与自然之间的协调关系。未来滨海地区建设需要从单一项目思维转向区域整体思维，使建筑、景观和生态空间形成统一体系。

5.2 强化生态保护技术应用

滨海湿地保护离不开科学技术支持。随着滨海区域开发活动增加，单纯依靠传统管理方式已经难以满足生态保护需求，需要结合生态修复、环境监测和绿色建设技术，提高滨海空间的适应能力。

生态修复是恢复滨海湿地功能的重要方式。对于已经受到破坏的区域，可以通过恢复植被、改善水环境、修复自然岸线等方式逐步恢复生态功能。相关研究指出，滨海湿地生态修复应坚持自然恢复为主、人工修复为辅，通过恢复生态过程提升湿地自身调节能力[19]。

在生态旅游建设中，修复技术也可以与建筑设计结合。例如，在游客设施建设过程中，可以减少对原有地形的改变，采用架空平台、生态铺装等方式降低建设影响。在滨海公共空间中，可以利用透水铺装、雨水收集和植被恢复等措施，提高空间生态性能。

环境监测技术同样能够为滨海旅游管理提供支持。通过对水质、生物变化、游客活动强度等进行长期监测，可以及时发现生态压力，并调整旅游管理措施。例如，当某一区域游客活动超过生态承载能力时，可以通过限制进入人数、调整游览路线等方式减少影响。

建筑设计也需要加强绿色技术应用。滨海建筑受到特殊气候影响，在设计过程中应充分考虑能源利用、材料选择和环境适应性。例如，通过自然通风减少能源消耗，通过遮阳设计改善室内环境，通过耐久材料提高建筑使用周期。

技术应用并不意味着依靠高成本设备解决所有问题。滨海生态空间建设更重要的是尊重自然规律，通过简单有效的设计方式降低环境影响。例如，合理利用自然地形、保护原有植被、减少不必要建设，都能够发挥生态保护作用。

生态保护技术应服务于空间协调，而不是成为单纯展示技术水平的手段。滨海旅游建设需要根据实际环境条件选择适宜技术，实现生态效益与空间使用价值的统一。

5.3 建立多主体参与模式

滨海湿地保护和生态旅游发展涉及多个利益主体，仅依靠政府管理难以实现长期有效运行。建立政府、企业、居民和游客共同参与的治理模式，是推动滨海区域持续发展的重要保障。政府在滨海生态旅游发展中承担规划制定和制度管理职责，需要明确生态保护要求，控制开发强度，并协调不同部门之间的关系。由于滨海区域涉及自然资源、城市建设和旅游管理等多个领域，加强部门之间的信息共享和协同管理十分重要。

旅游企业是滨海空间利用的重要参与者。企业在开发旅游项目时，需要改变过去追求短期经济收益的模式，将生态保护纳入项目运营过程。例如，通过建设生态型住宿设施、开展环境教育活动、控制游客规模等方式，实现旅游经营与生态保护结合。

当地居民也是滨海生态旅游发展的重要力量。滨海地区通常具有独特的地方文化和生活方式，居民不仅是旅游发展的参与者，也是生态环境保护的直接受益者。通过发展社区旅游、文化展示和生态服务，可以提高居民参与保护工作的积极性。

游客作为旅游活动的主体，也需要承担相应的生态责任。生态旅游不仅提供休闲体验，也具有环境教育功能。通过完善宣传设施和体验活动，可以引导游客形成更加环保的行为方式。

滨海旅游可持续发展需要综合考虑资源、社区和旅游行为之间的关系，通过多方协调实现生态系统稳定运行[20]。这一观点说明，滨海生态旅游的发展不能只依靠空间建设，还需要建立社会参与机制。多主体参与也会影响空间设计方向。一个优秀的滨海公共空间，应当满足游客体验需求，也应服务当地居民生活。通过开放共享的空间设计，可以增强不同群体之间的联系，提高滨海空间的综合价值。

5.4 构建生态保护与旅游发展的长期协调机制

滨海湿地保护与生态旅游协调发展并不是

一次性建设任务，而是持续调整和优化的过程。由于滨海环境不断变化，旅游需求也在持续调整，因此需要建立长期管理机制。

长期协调机制的重要内容，是建立科学的评价方式。滨海旅游发展不能只通过游客数量、经济收入等指标判断效果，还需要关注湿地生态状况、环境质量以及空间使用情况。只有综合评价生态和社会效益，才能避免片面追求经济增长。需要加强生态补偿机制建设。滨海湿地保护可能限制部分区域开发活动，但生态保护产生的公共价值需要通过合理方式体现。例如，通过生态补偿支持当地居民参与保护，通过旅游收益反哺生态维护，使保护行为具有持续动力。滨海旅游规划还需要加强风险意识。气候变化、海平面变化和极端天气可能对滨海空间产生影响。因此，在建筑和空间设计过程中，需要提高环境适应能力，使滨海地区具有更强的韧性。

滨海旅游可持续发展的关键在于建立保护、利用和管理之间的平衡关系，通过合理规划和持续监测实现长期发展[21]。这一理念说明，滨海旅游的发展目标不是最大化利用自然资源，而是在保护基础上实现资源价值提升。

6 结语

滨海湿地保护与生态旅游发展之间并不存在天然矛盾。滨海湿地为生态旅游提供了自然基础，而合理发展的生态旅游也能够提高公众对湿地保护的认识，并为区域生态维护提供支持。当前部分滨海地区仍存在旅游开发强度较高、空间规划衔接不足以及建筑设施与生态环境协调性不足等问题，需要通过空间规划优化、建筑设计调整和管理机制完善进行改善。滨海生态旅游的发展重点并不是建设更多旅游设施，而是通过合理的空间组织，使建筑、景观和自然环境形成协调关系。未来滨海地区建设应更加重视生态优先理念，将湿地保护融入空间规划全过程，通过低影响建设、公共空间优化和多主体参与，实现滨海环境保护与旅游发展的长期协调。

参考文献：

[1] 巫权锋. 滨海湿地保护现状及生态修复能力提升对策分析[J]. 低碳世界, 2024, 14(9): 22-24.

[2] 宋金悦. 基于空间句法理论的大连滨海风景区空间研究[D]. 安徽理工大学, 2025.

[3] 陈绵润, 王金华, 章柳立, 等. 粤港澳大湾区围填海工程生态保护修复对策研究[J]. 海洋开发与管理, 2022, 39(7): 3-13.

[4] 姜昳芃, 蔡静. 辽宁滨海旅游业可持续发展对策研究[J]. 资源节约与环保, 2018(6): 115-117.

[5] 徐福英. 滨海旅游可持续发展的基本框架与典型类型研究[D]. 青岛大学, 2015.

[6] 毛德华, 王端睿, 王铭, 等. 全球滨海水产养殖池变化特征: 平衡海产品需求与生态保护[J]. Science Bulletin, 2026, 71(7): 1645-1649.

[7] 袁涵蒙, 唐豪, 许植桐, 等. 陆海统筹视角下滨海地区国土空间生态修复路径与实践[J]. 规划师, 2024, 40(2): 89-97.

[8] 孙兴邈. 健康城市导向下滨海城区绿道系统选线规划研究[D]. 大连理工大学, 2025.

[9] 郭萍. 滨海地带的保护与开发研究——以“百岛之市”珠海为例[J]. 广州城市职业学院学报, 2023, 17(1): 65-69.

[10] 刘书锦, 曹海, 李丹, 等. 滨海湿地生态保护及修复研究进展[J]. 海洋开发与管理, 2022, 39(7): 29-34.

[11] 阳慧园. 湾区城市群生态网络格局动态演变及协同模式构建研究[D]. 仲恺农业工程学院, 2025.

[12] 蔡奇杉, 盛鸣, 杨晓楷. 滨海生态地区空间发展策略探索——以深圳市大鹏新区为例[J]. 规划师,

2020, 36(7): 75-79.

[13] 王丽平, 刘瑞志, 孟庆佳. 陆海统筹的滨海湿地固碳增汇实施路径探索[J]. 环境保护, 2024, 52(Z3): 53-55.

[14] 李超. 滨海城市可持续性旅游规划理论研究[D]. 天津大学, 2010.

[15] 范永龙. “绿色司法”基层实践之不足及完善路径——以世界自然遗产盐城黄海湿地生态保护为例[J]. 天水行政学院学报, 2021, 22(3): 112-117.

[16] 李林, 林若兰, 许银珊. 粤港澳大湾区建设背景下珠海海岛滨海休闲旅游业发展探索——基于珠海淇澳岛的调查[J]. 经济师, 2020(4): 153-155.

[17] 徐世丹. 北海生态城市建设与海洋生态保护协同发展探究[J]. 农家参谋, 2020(4): 268.

[18] 朱淑珍. 滨海湿地生态保护策略研究——以广州南沙万顷沙湿地为例[J]. 低碳世界, 2021, 11(9): 41-42.

[19] 贾国欣. 滨海新区积极推进北大港湿地生态保护践行生态文明思想的对策思考[J]. 产业与科技论坛, 2023, 22(8): 54-55.

[20] 程胜龙. 海岸带旅游可持续发展研究[D]. 兰州大学, 2009.

[21] 王佳. 我国沿海地区旅游环境承载力预警研究[D]. 中国海洋大学, 2014.

版权声明

© 2026 作者版权所有。本文依据“知识共享署名 4.0 国际许可协议”（CC BY 4.0）以开放获取方式发布。该许可允许使用者在任何媒介中自由使用、复制、传播与改编文章（含商业用途），惟须明确署名原作者及出处，并注明所作修改（如有）。完整协议详见：https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.zh-hans

出版声明

所有出版物中的陈述、观点及资料仅代表作者及供稿者个人立场，与 Brilliance Publishing Limited 及/或编辑人员无关。Brilliance Publishing Limited 及/或编辑人员对因内容所提及的任何理念、方法、说明或产品所导致的人身或财产损害概不负责。

DOI: 10.53104/xdkxts.2026.02.04.005

聚乳酸基可降解材料在食品包装中的应用特点与发展前景

许嘉泽 [1]

1. 河南工业大学，河南 郑州 450001

摘要：传统石油基塑料包装材料因具有良好的力学性能、加工性能以及成本优势，被广泛应用于食品包装领域，但其难以自然降解的问题也带来了长期环境压力。聚乳酸（Polylactic Acid，PLA）作为一种来源于可再生资源的生物基可降解高分子材料，凭借良好的生物相容性、加工适应性和环境友好特征，逐渐成为食品包装材料绿色化发展的重要方向。聚乳酸材料能够通过薄膜、复合膜以及功能化包装结构等形式应用于果蔬保鲜、食品储存和一次性包装等领域，在减少传统塑料使用、改善包装可持续性方面具有较大潜力。然而，PLA 材料自身仍存在韧性不足、耐热性能有限、水汽阻隔能力需要提升等问题，影响其在复杂食品包装环境中的进一步应用。针对这些问题，通过共混改性、复合增强以及功能化设计等方式改善 PLA 综合性能，成为推动其应用发展的重要途径。本文围绕聚乳酸基可降解材料的基本特征，分析其在食品包装中的应用特点，讨论当前应用过程中的性能限制，并进一步探讨其未来发展方向，为聚乳酸基材料性能优化与应用拓展提供理论分析。

关键字：聚乳酸；可降解材料；食品包装；绿色包装；材料改性

Application Characteristics and Development Prospects of Polylactic Acid-Based Biodegradable Materials in Food Packaging

Xu Jia-ze[1]

1. Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, P. R. China

Correspondence to: Xu Jia-ze

Abstract: Traditional petroleum-based plastic packaging materials have been widely used in the food packaging industry due to their excellent mechanical properties, processing performance, and cost advantages. However, their poor natural degradability has caused long-term environmental pressure. Polylactic acid (PLA), as a bio-based biodegradable polymer derived from renewable resources, has gradually become an important material for the green transformation of food packaging due to its good biocompatibility, processing adaptability, and environmental friendliness. PLA-based materials can be applied in fruit and vegetable preservation, food storage, and disposable packaging through various forms, including films, composite films, and functional packaging structures. These applications show great potential for reducing the dependence on traditional plastics and improving packaging sustainability. However, PLA materials still have limitations, such as insufficient toughness, limited heat resistance, and the need for improved water vapor barrier properties, which restrict their wider application in complex food packaging environments. To address these limitations, strategies including blending modification, composite reinforcement, and functional design have been developed to improve the overall performance of PLA materials. This paper focuses on the basic characteristics of polylactic acid-based

引用格式：许嘉泽. 聚乳酸基可降解材料在食品包装中的应用特点与发展前景[J]. 现代科学探索, 2026, 2(4): 37-44.

biodegradable materials, analyzes their application characteristics in food packaging, discusses the performance limitations in current applications, and further explores future development directions, providing theoretical insights into the performance optimization and application expansion of PLA-based materials.

Key words: polylactic acid; biodegradable materials; food packaging; green packaging; material modification

引言

食品包装是保障食品安全、延长储存时间以及减少运输损耗的重要环节。长期以来，石油基塑料凭借低成本、高强度、易加工等特点成为食品包装领域的重要材料。然而，大量塑料包装废弃物难以在自然环境中快速分解，容易造成资源浪费和生态污染。因此，开发具有环境友好特征的新型包装材料，逐渐成为材料科学与食品包装领域关注的重要方向。

可降解高分子材料利用天然资源或可降解化学结构制备，在一定环境条件下能够发生分解，被认为是减少传统塑料依赖的重要途径。聚乳酸作为典型的生物基可降解材料，主要来源于玉米淀粉等可再生资源，具有较好的透明性、加工性能和生物相容性，在绿色包装领域展现出较大的应用潜力。相关研究表明，PLA 已经成为目前应用较广泛的生物基可降解高分子材料之一，并被应用于绿色包装、生物医用等多个领域[1]。

食品包装对于材料性能具有较高要求。包装材料不仅需要具备一定的机械强度，还需要具有良好的阻隔性能，以减少氧气、水分以及外界环境因素对食品品质的影响。PLA 虽然具有可降解优势，但单一 PLA 材料存在韧性较低、热稳定性不足等问题，在部分食品包装场景中的适应能力仍有限[1]。因此，通过材料改性、复合结构设计以及功能化处理提升 PLA 性能，成为扩大其应用范围的重要方式。

目前，围绕 PLA 基可降解材料的研究已经从单纯关注材料降解性能，逐渐转向兼顾环保性、功能性和实际应用需求。PLA 保鲜膜、PLA 复合包装膜以及 PLA 功能包装材料不断出现，为食品包装绿色转型提供了新的选择[2]。本文以聚乳酸基可降解材料为研究对象，从材料特征、食品包装应用、性能限制以及未来发展方向等方面展开分析。

1 聚乳酸基可降解材料的基本特征

1.1 聚乳酸材料的组成与形成特点

聚乳酸是一种以乳酸为基础单体制备形成的聚酯类高分子材料。与传统聚乙烯、聚丙烯等石油基塑料不同，PLA 具有较明显的生物基属性，其原料来源可以依托植物资源，通过发酵等方式获得乳酸，再经过聚合过程形成高分子材料。这种生产方式减少了对化石资源的依赖，使 PLA 成为绿色材料体系中的重要组成部分。

从材料结构来看，PLA 分子链中包含大量酯键，这种结构使其能够在一定环境条件下发生水解和进一步降解。降解过程通常受到温度、湿度、微生物环境以及材料结构等因素影响，因此 PLA 并不是在所有环境中都会快速降解，而是在适宜条件下表现出较好的降解能力。这一特点使 PLA 既具备塑料材料的使用便利性，又具有区别于传统塑料的环境优势。

与其他可降解材料相比，PLA 具有较好的加工适应能力，可以通过挤出、吹膜、热成型等方式加工为不同形态的包装产品。相关研究显示，PLA 材料能够满足部分包装产品对于透明度、成型性能以及基础力学性能的需求，因此在食品包装领域具有较好的应用基础[2]。

1.2 聚乳酸材料的性能优势

PLA 应用于食品包装的基础在于其综合性能。其透明性较好，可以满足消费者对于食品外观展示的需求。相比部分天然材料包装，PLA 薄膜具有较好的成膜能力，能够形成较完整的包装结构。同时，PLA 具有一定的机械强度，可以满足普通食品包装过程中对材料支撑性的要求。

在环保属性方面，PLA 最大的特点是可降

解性。传统塑料包装进入环境后往往需要较长时间才能发生明显变化，而 PLA 在工业堆肥等适宜条件下能够逐步分解，降低包装废弃物长期积累带来的环境压力。相关研究指出，PLA 来源于可再生植物资源，并具有良好的生物降解属性，因此在绿色包装替代材料中具有较高关注度[3]。

此外，PLA 还具有较好的生物相容性，这使其不仅适用于食品包装，也能够应用于医疗材料等领域。虽然食品包装对于生物相容性的要求与医疗领域不同，但这一特点反映出 PLA 材料具有较好的安全应用基础。

1.3 聚乳酸材料的性能限制

尽管 PLA 具有明显优势，但其作为食品包装材料仍存在一定限制。首先，PLA 自身韧性较低，材料较脆，在受到弯折、冲击时容易发生破裂。这一问题限制了 PLA 在需要较高柔韧性的包装产品中的应用。

其次，PLA 耐热性能有限。部分食品包装需要经历高温环境，例如热灌装、微波加热或高温运输条件，而 PLA 在较高温度下容易出现形变，影响包装稳定性。因此，单纯依靠 PLA 材料难以满足所有食品包装需求，需要通过改性方式提升其耐热性能。

此外，PLA 的阻隔性能也需要进一步改善。食品包装通常需要阻止氧气和水蒸气进入包装内部，以维持食品品质。部分研究指出，通过构建 PLA 复合材料或引入其他功能组分，可以改善 PLA 材料的力学性能和阻隔能力，使其更适合实际包装环境[4]。

表 1 PLA 与传统食品包装塑料材料特点比较

材料	主要来源	环境特点	性能特点
PLA	可再生植物资源	可降解、生物基	透明性好，加工方便，但韧性和耐热性有限
PE	石油资源	难降解	柔韧性好，成本较低
PP	石油资源	难降解	强度较高，耐热性较好
PET	石油资源	回收利用较成熟	透明度高，阻隔性能较好

2 聚乳酸基材料在食品包装中的应用特点

2.1 聚乳酸薄膜在果蔬保鲜包装中的应用

食品包装中，薄膜材料是应用范围较广的一类包装形式。传统聚乙烯、聚氯乙烯等塑料薄膜虽然具有良好的柔韧性和加工性能，但废弃后难以自然降解，对环境造成较大压力。因此，利用可降解材料开发新型包装薄膜成为食品包装绿色化的重要方向。

PLA 薄膜具有较好的透明性和成膜性能，可以满足果蔬包装对于外观展示和基础保护的需求。在果蔬储存过程中，包装材料需要控制氧气和水分交换速度，避免果蔬因呼吸作用增强或水分流失导致品质下降。PLA 材料具有一定气体阻隔能力，通过合理调整材料结构，可以形成适合果蔬保鲜需求的包装环境。

相关研究表明，PLA 可通过植物来源原料制备，并具有较好的力学性能和降解特征，在果蔬保鲜膜领域具有应用潜力[2]。例如，PLA 可用于制作果蔬保鲜膜，通过降低包装废弃物环境影响，为传统塑料保鲜膜提供替代方案。

不过，单一 PLA 薄膜在实际应用中仍存在一定不足。果蔬包装环境通常具有较高湿度，而 PLA 材料本身对水蒸气的调节能力有限。如果包装内部水汽积累，容易影响果蔬品质。因此，目前研究重点逐渐转向 PLA 与其他材料复合，通过结构调整改善其阻隔性能和使用稳定性。

2.2 聚乳酸复合材料在食品包装中的应用

为了改善 PLA 单一材料性能不足的问题，复合改性成为提升其应用能力的重要方式。通过加入其他高分子材料、天然填料或功能性组分，可以改变 PLA 材料内部结构，使其在强度、

韧性、阻隔性能等方面得到提升。

PLA/PBAT 复合材料是目前较受关注的一类改性材料。PLA 具有较好的刚性和透明性，但脆性较明显，而 PBAT 具有较好的柔韧性，将两者结合可以改善 PLA 材料的力学性能。相关研究显示，在 PLA 中加入 PBAT 能够提高复合材料的韧性，使材料更加适合实际包装使用[5]。

这种复合方式体现了可降解材料发展的一个重要趋势，即并非单纯追求材料完全由一种环保组分构成，而是在保持可降解特征的基础上，通过不同材料优势互补，实现包装性能与环境性能之间的平衡。

除 PBAT 外，PLA 还可以与天然高分子材料结合。例如，将植物纤维、淀粉类材料等加入 PLA 体系，可以降低材料成本，同时提高资源利用效率。天然增强材料来源广泛，在改善材料刚性和环境友好性方面具有一定作用。

从食品包装实际需求来看，复合改性能够使 PLA 材料更加接近传统塑料包装的使用性能。例如，对于需要较高机械强度的运输包装，复合材料可以减少包装破损；对于需要防潮、防氧的食品包装，功能化改性可以改善材料阻隔效果。因此，复合化发展是 PLA 扩大应用范围的重要路径。

2.3 聚乳酸功能化包装材料的应用

随着食品消费方式变化，食品包装已经不仅需要承担简单的保护功能，还需要满足保鲜、抗菌以及延长储存时间等需求。因此，具有功能特征的 PLA 包装材料逐渐受到关注。

在食品保鲜过程中，微生物繁殖是影响食品质量的重要因素。通过在 PLA 材料中加入抗菌组分，可以赋予包装一定的抑菌能力。例如，PLA 与其他功能材料结合形成复合包装结构，可以在保持可降解特征的同时，提高食品储存稳定性。

相关研究开发了 PLA-PVA/LZ 复合抑菌结构，将 PLA 作为阻隔层，与具有抗菌作用的组分结合，用于即食食品保鲜。研究结果显示，该类复合结构能够改善材料耐水性能和阻隔性能，并对食品储存过程中的微生物控制具有一定作用[6]。

这类功能化设计说明，未来食品包装材料的发展方向并不是简单替代传统塑料，而是在满足环保要求的同时，提高包装材料对于食品质量控制的能力。PLA 作为基础材料，通过与其他功能组分结合，可以形成更加符合实际需求的绿色包装体系。

2.4 聚乳酸材料在不同食品包装场景中的适应性

不同食品对于包装材料的要求存在明显差异。干燥食品通常更加关注防潮、防污染性能，而果蔬、熟食等产品则更加关注气体交换、微生物控制以及储存时间。因此，PLA 材料的应用需要根据食品特点进行调整。

对于果蔬产品，PLA 薄膜可以利用其透明性和一定的气体调节能力，实现基本包装需求。对于即食食品，则需要进一步提升材料阻隔性和抗菌能力。对于冷藏食品，包装材料还需要考虑低温环境下的机械稳定性。

表 2 PLA 基材料在食品包装中的主要应用形式

应用形式	主要功能	应用特点
PLA 薄膜	包装、防护、保鲜	透明性好，适合果蔬包装
PLA/PBAT 复合膜	提升韧性	改善 PLA 脆性问题
PLA 功能膜	抗菌、阻隔	满足特殊食品储存需求
PLA 涂层材料	增强纸基包装性能	提高环保包装综合性能

由此可以看出，PLA 材料在食品包装中的应用具有较强的适应性，但不同应用场景对材料性能提出了不同要求。未来 PLA 的发展重点并不是扩大单一材料的使用范围，而是根据食品特点设计更加合理的材料体系。

3 聚乳酸基材料应用中的性能优势与现实限制

3.1 环境友好特征推动应用发展

传统食品包装材料长期依赖石油基塑料，其稳定的化学结构虽然能够满足包装过程中的强度和耐久性要求，但也导致废弃后难以快速进入自然循环。食品包装具有使用周期短、消费量大的特点，大量一次性塑料包装进入环境后容易形成长期污染。因此，开发能够降低环境负担的新型包装材料具有重要意义。

PLA 材料最大的应用优势在于其生物基来源和可降解特点。相比传统塑料依赖不可再生石油资源，PLA 可以利用植物来源原料进行制备，在资源利用方面具有一定优势。同时，PLA 分子结构中的酯键使其在适宜条件下能够发生降解，最终转化为较简单的物质，降低了包装废弃物长期积累带来的环境压力。

从食品包装角度来看，PLA 的价值不仅体现在材料本身能够降解，更在于其为包装产业提供了一种新的设计思路。传统塑料包装更多关注使用阶段的稳定性，而可降解材料需要同时考虑生产、使用和废弃全过程。例如，PLA 包装在完成食品保护功能后，可以通过适合的处理方式减少环境残留，实现材料生命周期的优化。

目前，绿色包装的发展已经不再局限于单纯替换材料，而是逐渐转向包装体系整体优化。PLA 作为其中的重要材料，可以与其他可降解材料结合，形成更加符合实际需求的包装结构。例如，PLA 与天然纤维、植物基材料复合，可以提高资源利用效率，同时保持材料绿色属性[7]。

3.2 良好的加工性能扩大应用范围

食品包装对于材料加工性能具有较高要求。包装材料需要能够通过挤出、成膜、热加工等方式形成稳定结构，以适应大规模生产需求。PLA 具有较好的热塑加工特性，可以利用现有塑料加工设备进行加工，这降低了其进入食品包装领域的技术障碍。

在实际应用中，PLA 可以加工为薄膜、片材、容器以及涂层材料等多种形式。例如，PLA 薄膜能够用于食品袋、保鲜膜等产品；PLA 片材可以通过热成型方式制备包装盒等产品。这种多样化加工能力使 PLA 具有较广的应用空间。

同时，PLA 具有较好的透明性，可以满足食品包装展示需求。消费者在购买食品时，包装透明度往往影响产品选择，而 PLA 材料能够在保持环保属性的同时提供类似传统透明塑料的视觉效果。这一特点使其在水果、蔬菜以及部分即食食品包装中具有应用优势。

不过，PLA 加工过程中的温度控制和结构稳定性仍需要进一步优化。由于 PLA 热性能与传统工程塑料存在差异，在加工过程中需要合理控制工艺条件，否则可能影响最终材料性能。因此，未来 PLA 产业化应用仍需要在加工技术和材料设计方面持续改进。

3.3 性能不足限制实际应用推广

尽管 PLA 具有较多优势，但其距离完全替代传统食品包装材料仍存在一定距离。其中，材料韧性不足是影响应用的重要因素。

纯 PLA 材料具有较高刚性，但断裂伸长率较低，在受到外部冲击或反复弯折时容易出现破损。这一特点使 PLA 在柔性包装领域受到限制。例如，传统塑料薄膜通常需要具备较好的拉伸能力，以适应包装过程中的折叠和密封，而 PLA 薄膜在这一方面仍需要改善。

针对这一问题，研究人员通常采用共混改性方式提升 PLA 韧性。PLA 与 PBAT 复合能够发挥两种材料优势，PBAT 较好的柔韧性可以改善 PLA 脆性，使复合材料更加适合包装使用。有研究表明，加入一定比例 PBAT 后，PLA/PBAT 复合材料的韧性得到明显提升，为高性能可降解包装材料开发提供了新的方向[5]。

除韧性问题外，PLA 的耐热性能也限制了部分应用场景。部分食品包装需要经历热处理或高温环境，例如热饮包装、加热食品包装等，如果材料耐热能力不足，容易发生形变。因此，如何提高 PLA 热稳定性，是未来材料优化的重要内容。

此外，PLA 降解过程受到环境条件影响。消费者通常认为“可降解”意味着材料能够快速消失，但实际上不同降解环境下材料变化速度存在差异。如果缺少适当处理条件，PLA 包

装仍可能需要较长时间才能完成降解。因此，在推广 PLA 包装时，需要结合回收、堆肥以及废弃处理体系共同发展。

3.4 成本和产业化仍是推广中的关键因素

材料成本是影响新型包装应用的重要因素。传统塑料经过长期工业发展，已经形成成熟生产体系，因此价格优势明显。而 PLA 生产涉及原料获取、聚合加工以及后处理等环节，目前整体成本仍相对较高。

成本问题不仅影响企业生产积极性，也会影响消费者接受程度。食品包装属于高频消费领域，如果绿色包装成本明显高于传统包装，可能限制其大规模应用。因此，降低 PLA 生产成本，提高规模化制造能力，是推动其商业化发展的重要条件。

除了成本因素，废弃处理体系也是 PLA 推广过程中需要关注的问题。可降解材料的优势需要建立在合理处理方式基础上。如果 PLA 包装与普通塑料混合回收，可能增加垃圾分类和处理难度。因此，未来需要进一步完善绿色包装回收体系，使材料优势能够真正体现。

4 聚乳酸基可降解材料的发展方向

4.1 通过复合改性提升材料综合性能

未来PLA材料的发展重点之一是通过复合改性解决单一材料性能不足的问题。食品包装需要同时满足强度、柔韧性、阻隔性以及安全性要求，而单一 PLA 往往难以兼顾所有性能。

复合材料设计可以根据不同应用需求调整材料性能。例如，通过加入 PBAT 改善柔韧性，通过天然纤维增强材料强度，通过功能组分提高抗菌或阻隔能力。相关研究显示，PLA 基复合材料已经成为提升可降解包装性能的重要方向[5]。

这种发展模式体现了现代材料设计理念，即通过结构优化实现性能平衡，而不是单纯追求某一种性能最大化。对于食品包装而言，材料需要在环保性和实用性之间找到合理结合点。

4.2 发展多功能食品包装材料

未来食品包装的发展趋势之一是由单纯保护功能向多功能方向转变。消费者对于食品安全、储存时间以及品质保持提出更高要求，因此包装材料需要承担更多功能。

PLA 作为基础材料，可以通过引入抗菌、防潮、抗氧化等功能组分，形成具有主动保护能力的包装体系。例如，在 PLA 包装结构中加入天然抗菌成分，可以降低食品储存过程中微生物增长风险。

目前，部分 PLA 复合包装已经开始尝试功能化设计。相关研究通过构建 PLA-PVA/LZ 复合结构，提高了材料耐水性能和阻隔性能，并表现出一定食品保鲜效果[6]。这说明 PLA 材料未来的发展方向不仅是替代传统塑料，还可以通过功能设计提升食品包装价值。

4.3 加强材料循环利用和绿色制造

可降解材料的发展不能只关注材料使用阶段，还需要考虑整个生命周期。未来 PLA 产业需要从原料来源、生产过程、使用方式以及废弃处理等环节进行整体优化。

在生产环节，应进一步提高生物基原料利用效率，降低能源消耗。在使用环节，应根据不同食品特点选择适合的包装形式，避免材料性能过剩。在废弃阶段，应建立更加完善的分类和处理体系，提高材料循环利用水平。

此外，绿色制造理念也要求材料发展减少资源浪费。PLA 与天然材料结合，可以提高可再生资源利用效率。例如，植物纤维增强可降解复合材料的发展，为低成本绿色包装提供了新的可能[7]。

5 聚乳酸基材料在绿色食品包装中的应用前景

5.1 应用领域将进一步扩大

食品包装领域具有使用频率高、材料消耗量大的特点，因此也是可降解材料最具应用潜力的领域之一。随着绿色消费理念不断深入，食品企业对于包装材料的环保性能、功能性能以及安全性能提出了更高要求。PLA 凭借生物基来源、可降解特征以及较好的加工性能，有

望在更多食品包装场景中得到应用。

目前，PLA 材料主要应用于果蔬包装、食品薄膜、一次性餐饮用品以及复合包装结构等领域。在果蔬包装中，PLA 薄膜能够发挥基础保护作用，并通过调节气体交换降低食品品质变化速度。在一次性食品包装中，PLA 制品能够减少传统塑料使用量，降低废弃包装带来的环境压力。

未来，PLA 应用范围可能进一步向更多细分食品领域延伸。例如，对于冷藏食品、烘焙食品以及即食食品等不同类型产品，可以根据食品特性设计具有针对性的 PLA 包装体系。不同食品对于包装材料的需求存在差异，未来材料开发需要从“通用型包装”逐渐转向“功能匹配型包装”。

这一变化意味着 PLA 材料的发展重点不再只是扩大产量，而是提高材料与具体应用环境之间的适配程度。通过调整材料组成和包装结构，可以使 PLA 更好地满足不同食品储存条件下的需求。

5.2 智能化与功能化将成为重要趋势

现代食品包装的发展已经逐渐突破传统保护功能，智能包装、主动包装等新型形式受到越来越多关注。PLA 材料具有较好的加工基础，可以作为功能化包装的重要载体。

例如，在 PLA 材料中加入天然抗菌成分，可以形成具有抑制微生物作用的包装材料；加入具有吸附或调节作用的功能组分，可以改善包装内部环境，提高食品储存稳定性。未来，PLA 基包装可能通过多种功能组合，实现保鲜、抗菌、环境响应等多种作用。

同时，智能化设计也为 PLA 材料提供了新的发展空间。食品包装可以通过颜色变化、传感结构等方式反映食品状态，提高消费者对于食品质量的判断能力。虽然目前相关技术仍处于发展阶段，但 PLA 良好的加工性能使其具备作为智能包装基础材料的可能。

需要注意的是，功能化并不意味着无限增加材料组成。食品包装直接接触食品，因此安全性仍然是材料设计的重要前提。未来 PLA 功能包装的发展，需要在环保性、功能性和食品安全之间保持平衡。

5.3 产业化发展需要多方面协同推进

PLA 材料从实验研究走向大规模应用，需要解决的不仅是材料性能问题，还包括生产体系、成本控制以及废弃处理等问题。

从生产角度看，提高 PLA 制备效率、降低原料成本，是推动其市场应用的重要条件。目前，PLA 材料相比传统塑料仍存在成本优势不足的问题。未来可以通过优化生产工艺、扩大产业规模以及提高原料利用效率等方式降低成本，使其更具市场竞争力。

从应用角度看，企业需要根据食品特点选择合适的 PLA 材料类型，而不是简单替换传统塑料。例如，对于普通干燥食品包装，可以重点关注材料强度和阻隔性能；对于果蔬保鲜包装，则需要更加关注气体交换和水分控制；对于即食食品包装，则需要进一步考虑抗菌和储存稳定性。

从环境管理角度看，可降解材料的发展需要与废弃处理体系相结合。只有建立完善的分类、回收和处理机制，才能充分发挥 PLA 材料的环保价值。如果缺少相应处理条件，可降解材料的环境优势难以完全体现。

5.4 聚乳酸基材料未来发展的综合路径

PLA 基可降解材料的发展需要围绕性能提升、应用拓展和绿色循环三个方向展开。

性能提升方面，应继续通过共混、复合以及结构设计等方式改善 PLA 材料的不足，使其具备更好的韧性、耐热性和阻隔能力。已有研究表明，通过 PLA 与其他可降解材料结合，可以有效改善单一 PLA 材料性能限制，为高性能绿色包装材料开发提供基础[5]。

应用拓展方面，应根据食品包装需求开发不同类型材料体系。未来的 PLA 包装不应只是传统塑料的替代品，而应成为兼具环保和功能优势的新型包装材料。例如，结合抗菌、保鲜以及智能响应功能，可以提高 PLA 包装的实际应用价值。

绿色循环方面，需要建立覆盖材料生产、使用和废弃全过程的管理体系。可降解材料的意义不仅在于材料能够降解，更在于减少资源

消耗和环境负担。因此，未来 PLA 发展需要与绿色制造、循环利用理念结合，实现材料生命周期优化。

总体来看，聚乳酸基可降解材料已经具备进入食品包装领域的重要基础。虽然目前仍存在性能和成本方面的限制，但通过材料改性、技术创新以及产业体系完善，PLA 将在绿色食品包装领域发挥更加重要的作用。

参考文献：

[1] 陈乙. 聚乳酸基嵌段共聚物材料的性能调控与应用进展[J]. 纺织科学研究, 2026, (4): 42-49.

[2] 王新雨, 施梦美, 卢钰, 胡张宇, 穆烽春, 程嘉伟, 郑淑娟. 聚乳酸可降解果蔬保鲜膜的制备、性能及其应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(15): 196-205.

[3] 张浩哲. 生物可降解高分子材料的制备与性能研究[J]. 广东化工, 2026, 53(15): 9-15+61.

[4] 陈夕. 生物可降解材料 PBS 的研究进展与展望[J]. 广东化工, 2026, 53(15): 62-65.

[5] 郑小龙, 李煌婷, 冯培勇, 经鑫. 绿色可降解 PLA/PBAT 复合材料的制备、增韧与性能调控[J]. 包装学报, 2026, 18(5): 109-116.

[6] 韩骞. PLA-PVA/LZ 抑菌垫的制备及其在即食米饭保鲜中的应用[D]. 武汉轻工大学, 2025.

[7] 袁璐璐. 低共熔溶剂木质素/PBAT 复合材料的制备与性能研究[D]. 天津科技大学, 2025.

版权声明

© 2026 作者版权所有。本文依据“知识共享署名 4.0 国际许可协议”（CC BY 4.0）以开放获取方式发布。该许可允许使用者在任何媒介中自由使用、复制、传播与改编文章（含商业用途），惟须明确署名原作者及出处，并注明所作修改（如有）。完整协议详见：https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.zh-hans

出版声明

所有出版物中的陈述、观点及资料仅代表作者及供稿者个人立场，与 Brilliance Publishing Limited 及/或编辑人员无关。Brilliance Publishing Limited 及/或编辑人员对因内容所提及的任何理念、方法、说明或产品所导致的人身或财产损害概不负责。