



国际星闪无线短距通信联盟
International SparkLink Alliance

基于星闪短距通信技术的汽车数字钥匙 蓝皮书

2025 年 10 月



国际星闪联盟 公众号

参编单位

海思技术有限公司、中汽智能科技（天津）有限公司、中国第一汽车集团有限公司、吉利汽车集团有限公司、东风汽车集团有限公司、北京汽车集团有限公司、宁波福尔达智能科技股份有限公司、北京握奇慧通技术有限公司、上海银基科技股份有限公司、远峰科技股份有限公司、大唐联仪科技有限公司、杭州永谐科技有限公司、华为技术有限公司、华为终端有限公司、深圳引望智能技术有限公司。

版权声明

本蓝皮书版权属于国际星闪联盟并受法律保护。转载、摘编本蓝皮书文字或者观点的应注明来源：《基于星闪短距通信技术的汽车数字钥匙蓝皮书》，以其他方式使用本蓝皮书应取得版权方书面同意。违反上述声明者，国际星闪联盟将追究其相关法律责任。

前言

汽车钥匙作为人车交互的重要入口，经历了从机械钥匙、遥控钥匙到智能钥匙的演进。在智能网联与电动化加速发展的背景下，数字钥匙（Digital Key）正逐步取代传统物理钥匙，成为智能汽车的关键能力之一。数字钥匙通过智能手机、穿戴设备等终端与车辆建立安全连接，实现无感进入、启动车辆与远程控制，显著提升用户体验与出行效率，并逐步延伸为智能座舱与智慧出行服务的基础入口。

当前，数字钥匙主要依托NFC、蓝牙与UWB等短距通信技术。NFC具备通用性与低成本优势，但用户通常需要贴近感应区操作；蓝牙在车载领域应用广泛，支持较便捷的感应体验，在部分复杂电磁与多径场景中，用户反馈边界稳定性与抗干扰仍有提升空间；UWB以更高定位精度见长，适合对空间感知要求较高的应用，同时在功耗与终端普及度方面仍在持续优化。总体看，随着汽车智能化对安全性、实时性、能效与稳定性的综合要求提高，行业需要面向更高体验目标的短距通信方案。

产业规模方面，多家行业研究机构预测，未来几年数字钥匙将持续提升渗透率，成为主流新车的标配或高配选项；在中国市场，配备数字钥匙的车型占比已呈上升趋势，豪华品牌与自主品牌的高端车型加速普及。数字钥匙不仅改善个人用车体验，也与共享出行、车队管理与智慧停车等业务深度联动，成为车企打造差异化服务与数据化运营的重要抓手。

标准与合规方面，国际组织与产业联盟持续推进数字钥匙相关标准与互操作框架，例如围绕终端—车辆—云端协同的接口规范与安全认证机制。国内相关部门和行业组织也在推动认证体系与通信协议的协调，促进跨品牌、跨终端的互联互通与规模化应用。统一、开放的标准体系将为产业协同与用户体验一致性提供重要保障。

在此背景下，星闪NearLink作为面向多场景的新一代全栈式无线短距通信技术，正在与产业伙伴协同推进生态与应用落地。星闪NearLink提供的低功耗接入SLE空口接入，针对低时延、低功耗与高可靠交互进行了优化，具备微秒级多设备同步、-110dBm级接收灵敏度、面向多终端的并发接入能力以及抗干扰与双向认证机制，可面向数字钥匙的“快、稳、省、安全”综合诉求。

围绕用户核心体验诉求，星闪NearLink在无感交互所需的多项关键指标上提供系统化能力：低时延支撑“靠近即解锁”，减少等待感；高可靠与抗干扰能力有助于在靠墙与室内停车等复杂环境中保持解/闭锁稳定；低功耗设计兼顾车端常时待机与手机续航；在安全层面，结合双向认证、端到端加密与密钥全生命周期管理，为防中继、防重放与数据完整性提供保障。

对车企与生态伙伴而言，星闪NearLink为数字钥匙的全生命周期管理与服务创新提供了空间。结合云平台，可实现钥匙远程分发、授权、撤销与审计追踪；在共享出行与车队管理中，可实现更精

细的权限策略与更稳定的无感流程；面向智慧出行基础设施，数字钥匙可与停车、门禁与计费系统协同，逐步融入“人—车—路—云”的一体化服务。

本蓝皮书由星闪联盟联合产业链伙伴编写，旨在梳理数字钥匙的发展背景与技术现状，阐述星闪NearLink在数字钥匙场景中的能力与应用价值，提出面向量产的系统架构与设计思路，并结合测试规程与实测数据，从用户体验视角展示在分米级定位、“乒乓”抑制、无感解/闭锁成功率与抗多径等方面的验证结论。为便于产业协同，文中对其他主流技术路线仅在必要处以数据化方式进行对照呈现，重点落在星闪NearLink带来的体验增益与工程落地方法。

我们期待本蓝皮书为整车企业、零部件公司、终端与平台厂商以及科研机构提供参考，推动数字钥匙在更广泛场景的稳健部署，促进标准协同与生态共建，加速实现安全、便捷、节能、可持续的智慧出行体验。

缩略语

缩略语	英文全称	中文全称
BCM	Body Control Module	车身控制模块
BLE	Bluetooth Low Energy	蓝牙低功耗
GB/T	Guobiao/Tuijian (National Recommended Standard of the People's Republic of China)	中华人民共和国推荐性国家标准
ICCE	Intelligent Connected Car Ecosystem Alliance	智慧车联产业生态联盟
ISO	International Organization for Standardization	国际标准化组织
KCU	Key Control Unit	钥匙控制单元
KESS	Keyless Entry and Start System	无钥匙进入/启动系统
MCU	Microcontroller Unit	微控制单元
NFC	Near Field Communication	近场通信
QoS	Quality of Service	服务质量
RSSI	Received Signal Strength Indicator	接收信号强度指示
SE	Secure Element	安全元件
SoC	System on Chip	系统级芯片
TEE	Trusted Execution Environment	可信执行环境
TDofA	Time Difference of Arrival	到达时间差
ToF	Time of Flight	飞行时间
UWB	Ultra-Wideband	超宽带

目 录

- 第一章 汽车数字钥匙发展 1
 - 1.1. 汽车钥匙发展进程 1
 - 1.1.1. 机械钥匙.....1
 - 1.1.2. 红外与遥控钥匙.....1
 - 1.1.3. 智能钥匙与无钥匙进入系统.....1
 - 1.1.4. 数字钥匙的发展（NFC、蓝牙、UWB） 2
 - 1.2. 数字钥匙关键技术演进 2
 - 1.2.1. 通信技术演进.....2
 - 1.2.2. 安全机制与加密算法.....3
 - 1.2.3. 手机与车机互联的进展.....3
 - 1.3. 未来趋势：统一标准与智能化场景拓展4
- 第二章 数字钥匙体系与通信需求 5
 - 2.1. 数字钥匙体系结构 5
 - 2.1.1. 数字钥匙体系结构.....5
 - 2.1.2. 手机端与应用程序.....5
 - 2.1.3. 云端平台与数据管理.....6
 - 2.2. 数字钥匙的核心功能 6
 - 2.2.1. 身份认证.....6
 - 2.2.2. 车辆解锁与启动车辆.....7
 - 2.2.3. 多用户权限管理.....7
 - 2.2.4. 远程控制与共享.....8
 - 2.3. 数字钥匙的关键需求 8
 - 2.3.1. 安全需求.....8
 - 2.3.2. 性能需求.....8
 - 2.3.3. 兼容性与生态需求.....10
- 第三章 星闪短距通信数字钥匙技术方案 11
 - 3.1. 通信需求与挑战 11
 - 3.1.1. 解锁时延与用户体验.....11
 - 3.1.2. 干扰环境与稳定性.....12
 - 3.1.3. 功耗与终端续航.....12
 - 3.2. 现有通信方案对比 13
 - 3.2.1. 蓝牙方案.....13
 - 3.2.2. UWB 方案.....14
 - 3.2.3. 方案局限与改进方向.....15
 - 3.3. 星闪（NFC）数字钥匙方案 16
 - 3.3.1. 星闪技术优势及特性（低时延、高可靠、低功耗） 17
 - 3.3.2. 星闪安全机制.....18

3.3.3.	星闪性能指标.....	19
3.3.4.	星闪测试与验证.....	19
3.3.5.	星闪NearLink 数字钥匙生态与规模化路径.....	19
第四章 星闪数字钥匙关键性能测试与先进性验证		21
4.1.	分米级精准定位能力	21
4.1.1.	定位精度的重要性与应用价值.....	21
4.1.2.	定位技术演进与星闪的突破.....	21
4.1.3.	测试设计.....	21
4.1.3.1.	无感解锁距离稳定性.....	21
4.1.3.2.	无感闭锁距离稳定性.....	22
4.1.4.	星闪定位稳定性测试结果分析.....	23
4.2.	“乒乓”效应抑制能力	26
4.2.1.	“乒乓”问题的机理与危害.....	26
4.2.2.	星闪抑制机制与实现原理.....	26
4.2.3.	测试设计.....	26
4.2.4.	星闪“乒乓”抑制测试结果分析.....	28
4.3.	无感解锁成功率保障	29
4.3.1.	成功率指标在产业中的意义.....	29
4.3.2.	星闪通信架构的稳定性优势.....	29
4.3.3.	测试设计.....	29
4.3.3.1.	无感解锁成功率.....	29
4.3.3.2.	无感闭锁成功率.....	32
4.3.4.	星闪无感解锁成功率测试结果分析.....	32
第五章 总结与展望		35

第一章 汽车数字钥匙发展

1.1. 汽车钥匙发展进程

1.1.1. 机械钥匙

机械钥匙是汽车钥匙发展的起点，其核心功能是通过金属齿形与车门锁芯或点火锁芯的机械匹配，实现物理开锁与启动车辆。20世纪中叶至90年代初，机械钥匙几乎覆盖所有车型，依靠结构简单、成本可控与工艺成熟实现大规模应用。与此同时，机械钥匙在安全与便利方面的不足也逐步显现：复制门槛较低、遗失后恢复成本高、夜间或恶劣天气下的插拔操作不便。为提升防盗性能，行业在上世纪80年代后引入防启动芯片（Immobilizer），在钥匙中嵌入射频识别器件，由车辆读取并完成双重校验，从而显著提升了整体安全门槛。总体而言，机械钥匙仍以“物理防护”为主，难以满足用户对更高便捷性与更一致体验的期待，电子化与智能化路线因此逐步兴起。

1.1.2. 红外与遥控钥匙

进入20世纪90年代，汽车钥匙开始由机械结构迈向电子化阶段。早期部分车型（如梅赛德斯、雷诺等）率先应用红外钥匙（Infrared Key），通过钥匙发射端与车身红外接收器的光学通信实现车门开闭。红外方案在当时显著提升了使用便利性，并首次引入了电子加密与信号认证的概念，但其必须对准使用，且易受强光干扰或遮挡影响，稳定性有限。

随着射频通信技术的发展，无线遥控钥匙（Radio Frequency Remote Key）逐渐取代红外成为主流。该技术基于315 MHz或433 MHz射频信号实现远程上锁、解锁及行李厢控制，并采用“滚动码（Rolling Code）”防止信号被截获与重放。相比红外方案，射频遥控显著改善了使用距离与抗干扰能力，在90年代中后期得到广泛应用。

红外与射频遥控钥匙的相继出现，使汽车钥匙首次具备通信与认证功能，标志着汽车防盗与门禁系统进入电子化阶段。此阶段的技术探索为后续的“智能钥匙”与“无感进入”奠定了体系基础，也开启了汽车人机交互从机械到信息化的转变。

1.1.3. 智能钥匙与无钥匙进入系统

21世纪以来，随着车载电子与传感技术的发展，智能钥匙（Smart Key）与无钥匙进入/启动系统（KESS）逐步普及。用户携带钥匙靠近车辆即可完成门锁解闭与一键启动，真正实现“人到车开”的自然交互。系统层面通常采用双向认证、挑战一应答与动态密钥等机制，相比上一代遥控方案在体验与安全上均有提升。随着应用深入，行业也持续关注链路被转发带来的潜在风险，并通过缩短

认证时延、提升物理层特征判别能力与加强密钥生命周期管理等手段迭代优化。智能钥匙由此成为中高端车型的常见配置，并逐渐向更多细分市场渗透，其核心价值在于以更少显性操作达成更顺畅的人车交互。

1.1.4. 数字钥匙的发展（NFC、蓝牙、UWB）

近年来，伴随智能手机与可穿戴设备的普及，车钥匙功能开始软件化与端侧化，数字钥匙（Digital Key）应运而生。用户可在手机、手表等终端上完成凭证持有与调用，通过近场或短距通信实现解锁、启动车辆与远程控制等能力。NFC具备通用性与成本优势，贴近感应可完成开锁，适合门禁式场景；蓝牙低功耗（BLE）生态成熟、覆盖广，便于实现被动进入等体验；UWB在空间感知精度方面具备优势，更适用于对定位分辨率有较高要求的应用。随着产业组织推进互操作框架与终端平台持续演进，数字钥匙正走向跨品牌与跨终端的协同。总体来看，数字钥匙代表了汽车钥匙由“硬件器件”向“软件凭证与服务入口”的阶段性跃迁，未来将与智能座舱、云端服务与智慧出行更深融合。面向下一阶段，星闪NearLink等新一代短距通信技术也在与产业生态协同演进，相关能力与实践将在后续章节结合测试规程与数据进行阐述。

1.2. 数字钥匙关键技术演进

1.2.1. 通信技术演进

数字钥匙的核心在于车端与用户终端之间建立稳定、低时延且安全的近距连接，因此通信技术的迭代直接决定了用户体验与可规模化部署的能力。近二十年来，技术路线大体经历了从接触式到低功耗无线，再到引入空间感知与高可靠机制的阶段性演进。现阶段常见方案包括NFC、蓝牙低功耗（BLE）与超宽带（UWB），同时，星闪NearLink为行业提供了面向未来的另一条可选路径。NFC依托成熟标准体系，具备良好的普及度与成本友好特性，典型场景是“贴靠开锁”。其优势在于确定性强、交互清晰；受限之处在于交互距离较短，主要适合门禁式交互而非完全“无感”。BLE以更低功耗与更长交互距离拓展了被动进入与远程控制等体验，生态覆盖面广、开发成本可控。面向城市复杂电磁与多径环境，行业实践与用户反馈显示，基于信号强度推算距离的方式在边界稳定性与时延一致性上仍有优化空间，这也是后续方案持续演进的方向之一。UWB通过飞行时间（ToF）/到达时间差（TDoA）实现更高分辨率的空间感知，适合对距离判定与抗中继能力要求更高的应用场景。随着产业联盟与终端平台的推进，UWB在车端与手机端的可用性逐步提升，同时在功耗管理、成本与终端覆盖方面仍在持续优化。星闪NearLink面向多场景近距连接，以低时延、高可靠与低功耗为设计要点。其低开销链路建立、精细化时间同步、抗干扰与大规模并发能力，契合数字钥匙“靠近即响应、在复杂环境下依然稳定”的目标；同时保持对移动终端与车端的能效友好，为高频使用场景提供更可预期的体验。总体来看，行业将长期呈现多路线并行与协同的格局：NFC在贴靠式交互上

具备确定性，BLE在泛在连接与生态上具有基础，UWB在空间感知上提供增强，而星闪NearLink在低时延与稳定性上补齐关键体验短板，为实现高可靠无感交互提供新的技术选项。

1.2.2. 安全机制与加密算法

数字钥匙的本质是“在终端侧持有并安全调用的车辆通行凭证”。围绕这一定位，安全体系从早期的固定码/滚动码逐步演进为挑战一应答、双向认证、端到端加密与动态密钥管理的多层防护。传统红外/射频遥控通过简化的编码实现远距开闭锁，便捷性显著提升；随着攻击手段演进，行业转而采用一次性挑战、密钥派生与重放防护，显著提高伪造门槛。进入近距无线阶段后，安全从“是否加密”扩展为“如何证明你在这里”。在BLE路径上，常见做法是将配对与会话加密与系统级安全能力结合，以降低凭证被窃取风险；在复杂环境下，仅依赖信号强度估距容易受多径与遮挡影响，行业逐步引入更多维度信号特征与行为学判定来提升抗中继能力。UWB通过时间测距在物理层增加“距离证明”的维度，进一步抬高中继攻击门槛，同时也需要与上层密钥生命周期管理、硬件信任根（如SE/TEE）与异常检测联动，形成“物理层+密码学+终端可信”的复合防护。面向下一阶段，安全演进呈现三个趋势：其一，端到端与会话级的动态密钥管理常态化，结合硬件安全域、密钥轮换与细粒度授权，覆盖发放—使用—撤销的全生命周期；其二，多因子与多模态融合，结合终端生物识别、持有证明与近距交互信号特征，在不增加用户负担的前提下提升冒用成本；其三，纵深防御与持续监测，在物理层（同步/测距/抗干扰）、协议层（重放/完整性/双向认证）与应用层（风险策略/异常行为）形成闭环。星闪NearLink在设计上强调“低时延前提下的安全确定性”，通过双向认证、端到端加密与可信执行环境协同，缩短认证往返，降低被转发窗口；配合精细化时间同步与抗干扰机制，提升异常链路的可识别性，为防中继、防重放与数据完整性校验提供基础能力。对用户而言，目标是“少感知”的同时实现“可验证”的安全；对工程实现而言，则是在功耗、时延与防护强度之间取得最优平衡。

1.2.3. 手机与车机互联的进展

数字钥匙的体验不仅取决于空口连接与安全机制，还强依赖“手机—车机—云端”的系统级协同。近年来，终端平台将数字钥匙能力逐步系统化：在手机侧，钱包/卡包、系统服务与安全硬件协同，使凭证的持有、唤醒与调用更贴近系统层；在车机侧，更多车型引入支持多制式的近距通信模组与安全芯片，并与车身控制域深度打通；在云端，围绕“发放—授权—共享—撤销—审计”的全生命周期管理与跨设备迁移逐渐完善。国际产业组织与生态伙伴持续推进互操作框架，推动跨品牌、跨平台的一致体验；国内生态也在终端OS、车机平台与云服务之间加强接口与认证体系的协同，以降低集成成本、提升一致性与可维护性。从用户角度，趋势体现在三方面：其一，更强的系统级融合，数字钥匙从“APP功能”走向“系统能力”，后台保活、权限治理与低功耗策略更加稳健；其二，更丰富的协同场景，围绕家庭共享、车队管理、共享出行与智慧停车等场景，实现更精细的权限模

型与更顺畅的无感流程；其三，标准与生态的持续共建，随着互操作要求与合规要求提升，跨品牌与跨终端的一致性将成为关键衡量指标。面向这些趋势，星闪NearLink与终端平台、车机与云的协同正在推进：低时延发现与连接为“靠近即响应”奠定基础，面向多终端的并发能力便于家庭与车队场景扩展，安全侧的双向认证与端到端加密与系统级安全域衔接，为远程分发与撤销提供可验证链路支撑。总体而言，通信、安全与系统协同三者叠加，构成数字钥匙可规模化落地的技术底座；在保持对既有生态兼容的同时，引入星闪NearLink等能力，有助于在复杂环境下实现更确定的无感体验与更可控的工程成本。

1.3. 未来趋势：统一标准与智能化场景拓展

随着智能化与网联化加速，数字钥匙正由“单点功能”走向“标准统一与多场景协同”。国际与国内相关组织持续推进互操作框架与安全合规体系，重点围绕跨品牌互联、终端—车机—云端协同、身份与权限全生命周期管理等形成通用能力集。统一标准将降低多模并存的集成复杂度，提升车企与终端厂商的协作效率，并为量产规模化与用户体验一致性提供制度与工程基础。

应用边界同步外延。数字钥匙正从“解锁/启动车辆”延伸为出行生态的“数字身份”，与智慧停车、园区门禁、社区出入、公共交通及车路协同等系统联动，实现从进出场、用车到计费连续无感流程。在多用户、多设备与多车辆的场景中，更细粒度的权限管理、可审计的授权与撤销能力，以及端—云一体的风控与隐私保护，将成为新一轮能力建设重点。

面向上述趋势，星闪NearLink以低时延、高可靠、低功耗和并发连接为特征，可与既有标准与生态协同演进，为近距高频的人车交互提供更确定的体验基线；在复杂电磁与多径环境中，凭借时间同步与抗干扰设计，支撑无感流程的稳定落地。通过与终端平台、车机与云服务的配合，星闪NearLink可作为统一身份与安全策略的可靠承载，服务更丰富的智慧出行场景与更开放的产业协作。

第二章 数字钥匙体系与通信需求

2.1. 数字钥匙体系结构

数字钥匙体系结构由车端硬件与控制单元、手机端与应用程序、云端平台与数据管理三部分协同构成，是实现安全、稳定、可扩展应用的基础。在NFC、BLE、UWB等短距通信已形成实践经验的同时，引入星闪NearLink后，体系在低时延、确定性与多场景扩展方面具备进一步优化空间。依据星闪NearLink系统架构，整体可分为接入层、基础服务层与基础应用层三部分，支持低功耗与高可靠两类接入，并提供统一的服务发现、连接管理、安全与QoS保障等能力。将数字钥匙与星闪NearLink结合，可在车端、端侧与云端实现更加高效的协同与一致的工程口径。

2.1.1. 数字钥匙体系结构

车端是数字钥匙的执行与决策枢纽，负责与用户终端的近距离通信、身份认证与车门/点火等执行控制。典型硬件构成包括：①车身控制模块（BCM），承担门锁、灯光等基础执行功能；②智能网关或钥匙控制单元（KCU），作为认证与通信处理核心，通常集成安全芯片与射频前端；③高安全微控制单元（MCU/SoC），配置硬件加密引擎与可信执行环境（TEE），用于密钥存储与敏感计算；④射频天线与功率放大/收发通道，覆盖近距离通信的收发链路。随着电子电气架构集中化趋势增强，车端对低功耗常时待机、快速唤醒与抗干扰的要求同步提升。

在星闪NearLink接入层中，SLE/SLB按场景提供低功耗与高可靠能力，配合基础服务层的连接管理与安全管理，可降低多模并行带来的系统复杂度。工程上可将车机/控制单元配置为管理节点（G节点），终端作为接入节点（T节点），以此完成资源分配、时钟与同步管理、链接维护与安全策略下发。为满足整车功能安全要求，车端控制单元需满足ISO 26262与GB/T 34590等相关标准的流程与技术约束，在异常与退化情况下保证安全状态可控。结合星闪NearLink的Polar类信道编码、跳频与信道质量评估等机制，可在复杂电磁与多径环境下提高链路的稳定性与判定一致性，降低误触发与解锁失败的风险。

2.1.2. 手机端与应用程序

手机端是数字钥匙的主要承载，通常由操作系统层、应用层与安全硬件协同实现。操作系统层提供系统级的凭证管理、后台保活与权限治理，钱包/卡包等系统能力使凭证的下发、存储与调用标准化，减少用户操作负担。应用层承担钥匙申请、绑定、分享与撤销等业务流程，并与车端/云端进

行策略与状态同步。安全硬件方面，可信执行环境（TEE）与安全元件（SE）用于密钥/证书的受限存储与加解密运算，与系统安全策略共同提升抵御篡改与窃取的能力。

星闪NearLink在终端侧的低功耗与快速发现/连接特性，有助于长期保持“随身在线”而不显著增加电量消耗；微秒级时间同步与面向被动进入的快速链路建立，为“靠近即响应”的无感交互提供时延基础。通过基础服务层的安全管理接口，可在端侧实现双向认证、端到端加密与密钥生命周期管理等能力，并与手机操作系统的安全域衔接，形成可验证、可审计的调用链路。结合国内主流终端平台与车企生态，星闪NearLink相关能力可在系统层面与应用层面做深度集成，以获得更一致的跨设备体验。

2.1.3. 云端平台与数据管理

云端平台承担数字钥匙的全生命周期管理与跨设备协同，是实现规模化运营与合规审计的关键环节。其核心职能包括：①身份与密钥管理，完成凭证发放、更新、撤销与恢复，并保证用户账号与车辆绑定关系的唯一性；②权限策略管理，支持分级、分时与场景化授权，覆盖家庭、共享出行与车队等多主体场景；③状态监控与审计，记录关键操作与事件日志，支撑风控、合规与问题追溯；④跨设备协同与迁移，在多终端之间实现安全同步与便捷迁移。

结合星闪NearLink的基础服务层能力，云端可对连接管理、安全管理与QoS策略进行统一编排，在保障端一云一致性的同时，支持对特定场景（如靠墙/室内停车）的链路策略优化。随着车联网平台与智慧出行服务的融合推进，数字钥匙可作为出行身份凭证接入停车、门禁与计费系统等系统，形成“人一车一云”的一体化服务链路。星闪NearLink在并发接入与抗干扰方面的能力为多用户与多车辆并行使用提供支撑，有利于构建面向量产与运营的高可用架构。整体上，通过车端的功能安全保障、端侧的系统级安全域与云端的策略与审计闭环，数字钥匙体系可在安全、体验与可运维之间取得平衡。

2.2. 数字钥匙的核心功能

数字钥匙的功能不再仅限于对机械钥匙的替代，而是以可信身份为底座、以安全解锁与启动车辆为核心，并在此之上提供灵活的权限管理与便捷的共享能力，逐步演进为智能出行的统一入口。不同通信与系统形态会影响这些功能的实现路径与体验一致性。结合星闪NearLink等新一代短距通信能力，核心功能正沿着低时延、高可靠与更强安全的方向持续演进。

2.2.1. 身份认证

身份认证是数字钥匙体系的基石，目标是在尽量“少感知”的前提下，确保车辆仅对合法用户开放。典型流程包括：建立近距通信链路，车端发起随机挑战，终端在可信执行环境（TEE）或安全

元件（SE）内以密钥计算应答，车端校验并授予权限；全链路配合对称/非对称密码与完整性保护，形成可验证的安全闭环。随着应用深入，行业从单一因子走向“多因子、多通道”的认证范式，常见做法是将终端生物识别、设备持有证明与近距交互信号特征进行融合，以提升冒用成本与风控弹性。在工程实现上，需要在安全强度、认证时延与功耗之间取得平衡。星闪NearLink在这一环节提供两类支撑：其一，端一端双向认证与端到端加密接口，配合密钥生命周期管理，便于云端/本地策略的统一落地；其二，基于精细化时间同步与稳定链路建立，缩短交互往返，为“靠近即通过”的认证体验提供时延基础。

2.2.2. 车辆解锁与启动车辆

解锁与启动是用户最直观的体验面。贴靠式交互（如NFC）具备确定性强与操作预期清晰的优势，适合门禁式使用；被动进入/无感交互则强调在用户自然靠近时完成解锁与入座即启，要求链路建立迅速、判定边界稳定、抗干扰能力强。工程上通常将“唤醒—发现—鉴权—执行”拆解优化：降低常时待机功耗、加速发现与配对、压缩认证往返，并保证在复杂电磁与多径环境中的稳定性与一致性。从用户视角，关键体验指标包括响应时延、解/闭锁成功率与误触发控制。星闪NearLink围绕这些指标提供支持：快速唤醒与低开销会话建立缩短“到门即开”的响应链路；在室内车库、靠墙等多径环境下，通过抗干扰与链路质量评估提升边界判定稳定性；在启动环节与车端高安全MCU协同，加速密钥校验与指令下发，减少“按下一转动”间的等待感。

2.2.3. 多用户权限管理

数字钥匙的一个重要突破在于支持多用户和多权限管理。传统物理钥匙无法灵活分配权限，智能钥匙虽可配备副钥匙，但管理不便。数字钥匙通过软件化方式，可以实现精细化的权限控制和远程分发。

在当前实践中，多用户权限管理通常体现在以下几个方面：①家庭用车场景，车主可为家庭成员分配长期使用权限；②共享出行场景，车企或出行平台可为用户分配临时钥匙，过期自动失效；③企业车队管理，可为驾驶员分配特定时段和车辆的使用权。权限控制可包括解锁、启动车辆、远程控制等不同级别，以满足差异化需求。

现有BLE和UWB方案已能支持多用户管理，但在权限分发与回收上仍依赖云端，存在延迟与兼容性问题。星闪在这一场景中具备独特优势。其安全管理功能单元能够支持密钥动态分发与本地验证结合，保证在弱网或无网环境下依然能够完成临时钥匙分发与使用。星闪的Mesh组网能力还使车辆能够与多台终端同时交互，实现多人并行管理。例如，一辆共享汽车可同时识别并管理多名授权用户，实时更新权限状态。

此外，星闪的QoS保障机制可根据不同用户等级分配通信优先级，确保车主指令优先于其他授权用户，从而提升安全性与体验一致性。未来，在智慧出行生态中，多用户权限管理将与身份认证和云端大数据结合，实现更加灵活的分时租赁、分级使用和家庭共享场景，而星闪将成为关键的底层技术保障。

2.2.4. 远程控制与共享

远程控制与共享将数字钥匙从“近距开闭锁”扩展为“车辆远程交互入口”。常见远程能力包括上/解锁、空调、寻车与状态查询；共享能力侧重安全高效的授权发放、撤销与到期自动失效。工程上需同时满足三类要求：其一，端—云—车全链路的加密与鉴权；其二，弱网场景下的时延与可靠性保障；其三，授权过程的易用性与可审计性。星闪NearLink在近距与中近距交互时，可作为高确定性、低时延的本地数据承载，降低对广域网络的即时依赖；在共享场景中，支持通过近距加密信道完成端侧快速授权，同时与云端的生命周期管理对接，保证“本地快分发、云端可追溯”。面向更广的智慧出行生态（如停车、门禁、计费与车队调度），数字钥匙可作为统一身份凭证接入多系统，形成从进场到离场的连续无感流程。借助星闪NearLink在并发接入与抗干扰方面的能力，可进一步提升多用户、多车辆并行场景下的体验一致性与运营可用性。

2.3. 数字钥匙的关键需求

数字钥匙的价值不止于替代物理钥匙，更体现在以安全为前提的“无感”体验、一致且可预期的性能，以及跨品牌、跨终端的生态兼容。面向量产与规模化运营，需求可归纳为三大维度：安全、性能与兼容生态三位一体协同推进，任何单点短板都会在高频使用场景中被放大，进而影响用户信任与产业推广效率。以下从工程落地视角对三类需求进行阐述。

2.3.1. 安全需求

安全是数字钥匙的首要约束，目标是“仅对合法终端授权，且全流程可追溯”。安全需求覆盖四层：身份与凭证、传输与会话、设备与执行、云端与审计。身份与凭证侧，要求终端与车端采用双向认证，凭证与密钥保存在安全硬件，密钥具备完整生命周期管理（签发/更新/吊销），并支持分级授权。传输与会话侧，要求挑战一应答随机性与一次性，防重放；会话密钥动态协商，具备时窗约束与失效机制；敏感数据端到端加密并带完整性保护。设备与执行侧，要求关键逻辑在受信执行环境中运行，敏感操作有二次确认与本地防护策略，门域触发与启动授权解耦。云端与审计侧，要求全链路日志留痕、设备/账号关联可追溯、越权与异常访问可检测与告警。评价指标包括双向认证完成率、抗中继/重放用例通过率、敏感数据完整性校验通过率、日志覆盖率与追溯完备度；测试与判定口径统一参照T-ICCE 305-2025安全条目与用例集。

2.3.2. 性能需求

性能决定用户对数字钥匙的体感边界与长期可用性。本节仅定义指标与统计口径，以便与后续章节的数据评价保持一致；统计与判定遵循 T-ICCE 305-2025《智慧车联产业生态联盟数字车钥匙系统测试 第5部分：性能体验》。

时延

定义：触发响应时间（Trigger Response Time, TRT）为从有效靠近/远离被识别到授权指令下发完成的端到端时间，包含链路建立、认证与执行开关指令的全过程；一致性/抖动以TRT在重复操作中的波动度表征（标准差或P95 - P50）。目标：在自然步速条件下实现“靠近即开、离开即闭”，跨机型/版本体验一致。统计：统一起止事件与观测窗口，采用分位数（P50/P95）呈现；异常（用户中断、非预期交互等）独立记账，不并入时延统计。

稳定性（门域触发距离）

定义：无感解锁/无感闭锁的触发距离稳定性，以触发距离的标准差衡量。口径：当接近至近身门域仍未解锁时，按几何参考口径记入（在以“轮廓线”为参考的情形记 0.3 m；以特定参考点为准的情形记 0 m）；当远离至远端门域仍未闭锁时记 20 m。重复试验中，如同一终端在同一动作/路径下无感失败次数>2，则该终端该路径的距离标准差计为 3.6。目标：解/闭锁边界波动小、触发点聚集度高，避免“穿边”与大幅抖动。

成功率

定义：无感解锁成功率与无感闭锁成功率分别指在预设门域与时间预算内一次完成的比例。目标：在开放空间、靠近大型反射体的窄位、以及多径/遮挡显著的室内环境中均保持高成功率。统计：统一成功判据与异常记账，接近/远离方向、携带姿态与动作脚本（如自然步行、转身、绕行等）保持一致口径；异常样本单列。

边界振荡（“乒乓”）

定义：在边界区域内出现的重复开锁/闭锁振荡次数及其抑制率；同时统计典型动作的稳定率（如转身、绕车、蹲起）。指标：乒乓次数、乒乓抑制率、动作稳定率、必要的判决延迟（为抑制振荡所引入的稳定性延时）。目标：在不牺牲自然体感的前提下显著降低边界振荡，维持状态判定的连续性。统计：统一动作脚本与计次口径，显著性判断方法一致。

抗多径适应

定义：在强反射/非视距/多用户干扰等复杂电磁环境下的解/闭锁成功率与门域距离稳定性。目标：在靠近实体反射面与结构化室内空间等典型环境中，保持与开放空间相近的成功率与稳定性。统计：沿用成功率与稳定性的统一判据与异常记账规则。

2.3.3. 兼容性与生态需求

为保证规模化应用与一致体验，数字钥匙需满足跨品牌终端、OS版本、车机软件版本与云侧接口的一致性与互操作性。兼容性要求建立机型/OS/车机版本矩阵，覆盖主流组合，统计通过率并标注限制条件（如权限、系统开关、后台策略）。在弱网/无网环境下需保障基本可用性（本地凭证有效期与离线策略），并在云端恢复后完成状态对账。多用户与多权限场景下，支持分级分时授权与撤销，权限变更在端—车—云间一致收敛。可观测性方面，要求关键事件（认证、触发、执行、失败、异常）可记录、可回放、可追溯，便于运维与问题定位。评价指标包括互操作通过率、覆盖度、离线可用用例通过率、权限一致性校验通过率与日志完备度；口径统一参照T-ICCE 305-2025相应条目。

第三章 星闪短距通信数字钥匙技术方案

3.1. 通信需求与挑战

数字钥匙的通信本质是“在近距离、短时延与强安全约束下完成一次可靠的人车握手”，并在用户几乎无感知的前提下触发解/闭锁与启动车辆。要让这项“入口级能力”在规模化场景中稳定可用，通信体系需在四个维度形成合力：低时延（靠近即响应）、高可靠（复杂环境下稳定判定）、低功耗（端侧与车端都可长期开启）、强安全（抗中继、可审计、可撤销）。工程上还必须考虑多终端、多车型、多版本与多场景的一致性，构建可观测、可回归、可运维的闭环。基于此，建议将关键体验口径统一为：无感解/闭锁成功率、触发时延的P50/P95/P99、边界稳定性（解/闭锁触发距离抖动）、乒乓次数、异常重试率与功耗预算。星闪NearLink以低时延、高可靠与能效友好为设计要点，具备面向数字钥匙的良好适配能力；但要“点状优势”转化为“量产一致性”，仍需在链路设计、抗干扰与系统协同等方面进行体系化工程落地。下文从三项核心挑战展开。

3.1.1. 解锁时延与用户体验

用户对“无感”的直观感受，来自“靠近——触发——拉门——入座——启动”这一串动作是否顺滑无停顿。通信侧要做的是把“唤醒—发现—鉴权—执行”的端到端链路压到用户自然步伐之内，同时保证异常路径的快速回退与安全兜底。为此需关注：

1）唤醒机制与发现时机。车端需在超低待机功耗下实现快速唤醒，终端侧需保持后台保活与有节奏的扫描/监听；合适的占空比与门把手/车内接近传感器的协同，可减少无效扫描并提前准备认证上下文。

2）发现与会话建立。降低广播/扫描周期带来的等待，缩短连接建立的握手轮次，避免多次跳转导致的抖动；分门（前左/前右/后门）设置就近锚点有助于减少切换。

3）鉴权与安全开销。挑战一应答的往返、密钥派生/轮换与完整性校验都要控制在紧凑窗口内；在不牺牲安全的前提下优化消息长度与序列，减少不必要的重协商。

4）执行链路与时序。通信完成后，还要考虑车身控制域的执行延迟（门锁驱动与状态回读），避免“已解锁但未及时开门”的体感落差。

5）一致性与机型差异。不同品牌与OS版本在后台策略、权限治理、功耗门限与射频参数上存在差异，常导致“部分机型快、部分机型偶发慢”。需要建立多机型/多版本的时延一致性矩阵，以P50/P95/P99衡量，并通过系统接口与应用策略共同校准。

围绕上述环节，星闪NearLink的价值在于：精细时间同步与轻量化发现/连接降低“靠近到可鉴权”的链路开销；基础服务层可把关键认证准备前移到更靠近用户接近的时刻；在系统层与车端MCU协同，加速密钥校验与指令下发，使“拉门即开、入座即启”成为可重复的稳定体验。为确保量产一致性，建议将“接近轨迹”（直线、斜向、绕车）与“携带姿态”（手持、口袋、背包）纳入统一测试脚本，并记录不同天线布局下的时延分布，从方案层面预留足够的“裕度”应对个体差异。

3.1.2. 干扰环境与稳定性

城市地下/室内车库、靠墙停放、金属密集与人流高峰环境中，多径反射、共信道干扰与邻频辐射会共同作用于近距链路，典型症状包括：触发边界抖动、误解锁/迟滞解锁、用户转身/遮挡导致瞬时判定不稳、在车辆周边小范围来回移动时出现乒乓（解锁—上锁—再解锁）。稳定性不仅取决于空口本身，还受到系统级调度与策略的强烈影响。

工程侧可从以下路径增强稳态：1）物理层鲁棒性。通过信道编码与跳频避开窄带干扰，利用链路质量评估（如包错率/重传/时序抖动）作为触发决策的参与变量，而非仅用单一强度阈值；在靠墙/室内等强多径场景，以时间同步与多路径选择增强“真实靠近”的判定可信度。2）判定与抗乒乓策略。引入距离与时间双阈值的迟滞器（hysteresis），配合动作/速度估计（由连续测量或多传感信息推断）做“稳定后再触发/上锁”的决策；对边界附近的抖动采用去抖动时间窗与最小保持时间策略，减少状态来回切换。3）多用户并发与优先级。近距离多终端同时存在时，需要QoS策略区分主用户与次用户、关键消息与非关键消息的优先级；当控制域资源紧张或链路退化时，确保主用户通路不被非关键业务占用。4）天线与布局工程。就近锚点、车门侧天线、车内/车外联合布局与方向性优化可显著提升判定一致性；对SUV/MPV等长轴距车型，需考虑“右后门先触发”等场景的切换策略。

星闪NearLink在以上路径中可提供两类底层支撑：其一，时间同步、跳频与编码机制在复杂电磁环境下提供更稳定的空口；其二，基础服务层的连接与QoS管理把“谁优先、何时触发、如何降级”固化为可下发的策略，便于端—车—云一致执行。为将能力转化为“数据化稳定”，建议在空旷、靠墙与室内三类场景下分别收集：边界稳定性、解/闭锁成功率、乒乓次数与三类动作稳定率（转身/绕车/蹲起），以闭环优化阈值与时序参数。

3.1.3. 功耗与终端续航

数字钥匙是“常驻能力”，手机与车端都需要在不牺牲续航的前提下保持“随时可用”。功耗优化要从整链路而非单点入手：1）发现与监听的占空比。终端侧通过情境化策略（运动状态、地理围栏、屏幕/传感器事件）动态调整扫描/广播频率，车端以接近传感与就近锚点触发快速路径，降低全天候高占空比带来的能耗。2）低功耗会话维持。将会话心跳与密钥有效期策略结合，既避免频繁重建，又防止长期维持导致的能耗放大；在链路空闲期进入浅睡眠，保留快速唤醒所需的最小状态。

3) 指令批处理与本地化决策。在满足安全与合规的前提下, 尽量把必要的判定前移到本地, 以减少云往返; 近距共享授权可通过端一端加密短时完成, 下行只同步生命周期与审计信息。4) 驻车场景的安全兜底。车辆长时间停放时要保证数字钥匙模块的待机电流在安全范围内, 同时在蓄电不足时有“可用性降级”策略(如保留贴靠开门的路径)。星闪NearLink的SLE接入强调低功耗与轻量化开销, 适合常驻近距场景; 其“按需通信+快速唤醒”的工作方式, 能在用户接近时迅速拉起链路, 在用户远离时维持极低负载。量产阶段建议以“整链路能耗预算表”作为验收基线(终端—车端—云侧协同), 并建立多机型/多版本/多场景的功耗回归, 保证升级后体验与续航不退化。

综上, 数字钥匙要在真实场景中实现“长期可依赖”, 需要在“时延—稳定—能效—安全”的统一坐标系内进行系统设计与验证: 时延由链路缩短与前移认证保障, 稳定由抗干扰与判定策略保障, 能效由占空比与快速唤醒保障, 安全由双向认证与全生命周期管理保障。星闪NearLink在上述四维上提供了可工程化的基础能力, 但真正的量产确定性来自标准化口径、端—车—云协同与场景化测试的闭环。第四章将依据测试规程, 分别在空旷、靠墙与室内场景给出数据化验证与经验结论。

3.2. 现有通信方案对比

数字钥匙技术从近场到低功耗再到空间测距逐步演进, 当前量产格局中, 蓝牙(BLE)与UWB是应用最广的两条主线。两者在能力侧重点、生态成熟度与典型应用场景上各有长处, 也在实际部署中呈现不同的工程关注点。为明确后续技术走向, 本节以“用户体验—工程实现—生态协同”为视角, 客观梳理两类主流方案的特性与可优化空间, 并在不贬损他线的前提下总结面向未来的改进方向。

3.2.1. 蓝牙方案

蓝牙低功耗(Bluetooth Low Energy, BLE)因终端覆盖面广、成本友好和开发门槛低而成为当下应用最普遍的数字钥匙路线。其工作于2.4GHz ISM 频段, 典型速率1-2 Mbps, 支持广播(Advertising)与连接(Connection)两种形态, 工程上常用广播做发现与唤醒、连接做鉴权与指令交互。

(1) 技术特性(面向工程落地)

发现与唤醒: 通过周期性广播实现“车端发现终端/终端发现车端”, 配合功耗策略与门把手/接近传感器降低无效扫描。

会话与鉴权: 建立连接后完成挑战—应答、密钥派生与消息完整性校验, 常与终端OS的安全域协同。

部署与调优: 依赖天线布局、发射功率、广播/扫描周期、操作系统后台保活策略等多因素配合。

(2) 优势(面向规模化)

生态与成本：手机普遍内置，车端模组成熟，整车集成与维护成本可控。

功耗与常驻：在合理占空比下可长期待机，便于“随身在线”的日常使用。

兼容协同：易与NFC形成“贴靠+近距”组合，覆盖应急与便捷两类路径。

（3）局限与注意事项（面向体验一致性）

边界稳定性：在复杂电磁/多径环境下，基于强度（RSSI）的距离判定易随环境波动；行业实践与用户反馈显示，需要通过多维信号特征与策略迟滞来提升“靠近/远离”的判定一致性。

抗中继能力：作为近距通信通道，需与更强的物理或行为特征证明结合，完善对中继类威胁的综合防护。

时延一致性：不同机型与系统版本的后台策略会带来时延差异，需建立多终端一致性测试矩阵与参数自适应机制。

（4）应用概览

量产覆盖广，适合以“低门槛、快集成”为目标的人车近距交互；在抗干扰、判定稳定与时延一致性方面，工程上通常配合多传感/多阈值与去抖动策略做系统级优化。

3.2.2. UWB 方案

超宽带（Ultra-Wideband, UWB）以高带宽脉冲信号与飞行时间（ToF）/到达时间差（TDoA）测距提供高分辨率空间感知能力，适合对“在场证明”与空间判定要求更高的场景，已在多家终端与车型中逐步应用。

（1）技术特性（面向空间感知）

物理测距：以时间维度进行距离估计，具备多径分辨能力，空间判定精度高。

抗干扰：宽带特性有利于在复杂环境中维持更稳定的测距链路。

系统协同：常与BLE/NFC协同，前者用于发现/连接，后者用于应急贴靠，UWB承担空间感知与安全定位。

（2）优势（面向安全与体验）

空间判定：可精细区分“车外/车内”“靠近/远离”，有利于减少误触发与提升无感体验的确定性。

安全增强：物理层测距在防中继方向提供额外维度，与上层密码学与硬件安全域构成复合防护。

用户体感：在合理配置下，认证响应可贴近“靠近即开”的自然节奏。

(3) 局限与注意事项（面向部署与生态）

成本与能耗：模组成本与终端普及度仍在动态优化中，功耗需通过协议与策略进一步压降。

生态协同：跨平台一致性与标准化接口需持续完善，以降低集成与维护成本。

合规与频谱：不同地区频谱管理差异带来合规性与部署策略上的差异化要求。

(4) 应用概览

适合对空间感知、安全性与边界稳定性要求更高的车型与场景；工程落地侧重“UWB定位+其他近距通道”的混合架构与端—车—云的一致性联调。

表 3.1 现有通信方案对比

指标	BLE（蓝牙低功耗）	UWB（超宽带）	星闪（NearLink）
时延	较高，几十毫秒到百毫秒级	低，通常在 10~30 毫秒	极低，毫秒级甚至亚毫秒级
定位精度	米级（3~5 米@RSSI），波动大	分米级（10~30 厘米），较稳定	分米级（最优 60 厘米），稳定
安全性	依赖软件加密，易受中继攻击	支持 TOF 测距，抗中继较强	内置双向认证+高等级加密，抗中继优
功耗	低功耗，适合长时间待机	相对较高，对终端电池压力大	低功耗（与 BLE 相当）
抗干扰	容易受 Wi-Fi 2.4GHz 干扰	抗干扰能力较强	抗干扰优化设计，性能优于 BLE
生态成熟度	成熟，终端普及度最高	终端普及度低，应用集中在高端车型	正在快速发展，车企/手机厂商积极推动
成本	低，模组成本约 1 美元级别	高，模组成本数美元	低，模组成本与 BLE 相当

3.2.3. 方案局限与改进方向

在现实量产中，没有“单一技术通吃”的最优解，更可行的路径是“以用户体验为锚点”的多项能力组装与系统级优化。

(1) BLE的改进方向（在存量生态上做强体验）

多维特征与迟滞：在判定链路中引入时间序列、包错率/重传、行为特征等多维信号，配合时间/距离双阈值与去抖动窗口，提升边界稳定性。

安全组合拳：以系统安全域（SE/TEE）与动态密钥管理固化凭证安全，结合近距行为学特征与风险策略提升抗中继能力。

多模协同：与NFC/UWB/终端传感协作，形成“贴靠/近距/空间感知”分工，提高不同场景下的体验一致性。

（2）UWB的改进方向（在高体验路径上做优成本与能效）

协议与策略降耗：减少不必要的测距往返、按需提升测距频度，在保持空间判定效果的同时降低能耗。

端到端一致性：完善跨平台接口与一致性测试，用标准化降低集成与维护成本。

生态推进：随着更多终端与车型的量产迭代，成本结构与普及度有望持续优化。

（3）多模融合与标准统一（以协同替代替换）

分工协作：NFC承担应急与贴靠、BLE承担泛在连接与低功耗通道、UWB承担空间感知与安全定位，通过策略引擎在不同场景下选择最优路径。

一致口径：在互操作与安全口径上形成统一规范，减少“机型差/版本差”带来的体验波动与维护负担。

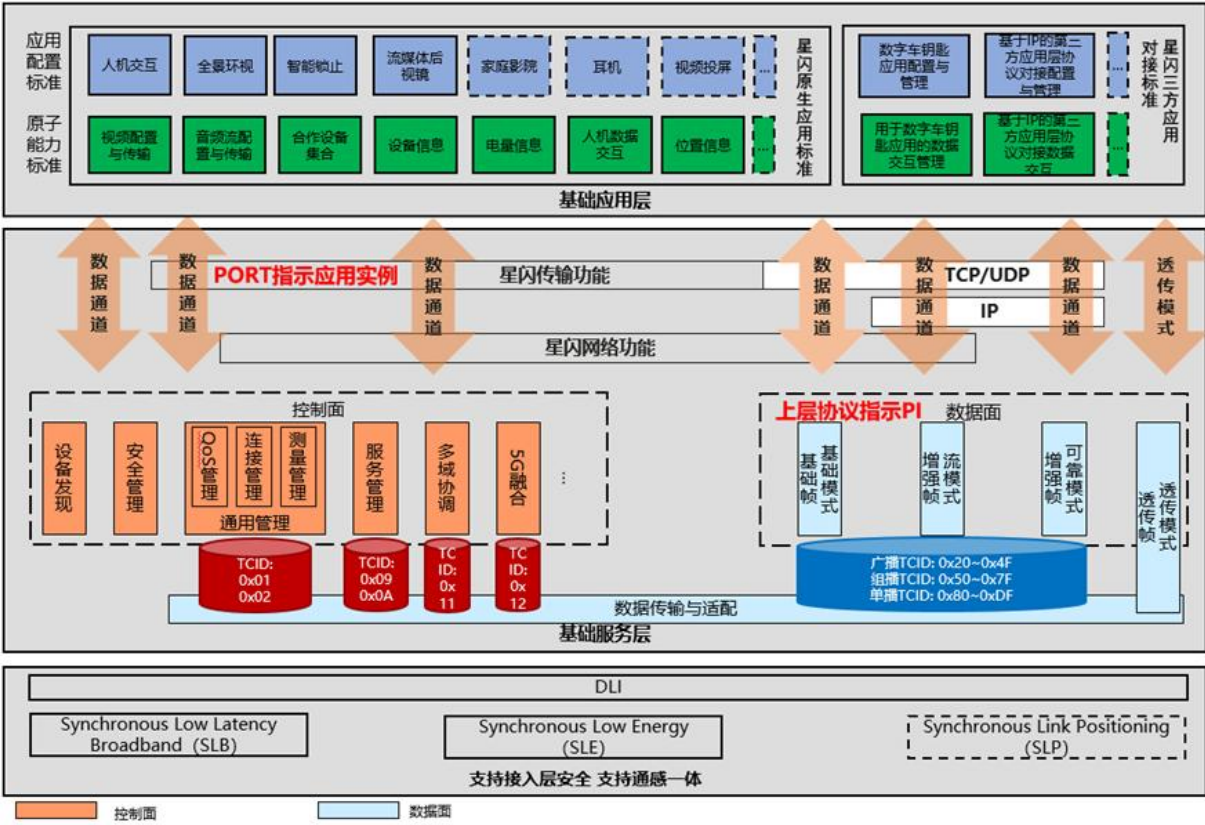
可观测与可运维：建立覆盖多设备/多版本/多场景的指标与回归体系，以数据闭环驱动持续优化。

（4）新技术引入与能力补强（面向下一步演进）

在多路线并行的格局下，新一代短距通信技术星闪NearLink提供了以低时延、高可靠与低功耗为特征的可选能力，侧重于在“发现—连接—鉴权—执行”的全链路降低开销、提升稳定性，并通过并发接入与QoS策略增强多用户场景下的确定性体验。其与既有路线并非替代关系，而是以协同与补强的方式，面向不同车型与场景给出更均衡的工程解。后续章节将基于统一测试规程与数据，对星闪NearLink在关键指标与场景中的表现进行客观呈现与验证。

3.3. 星闪（NearLink）数字钥匙方案

星闪NearLink是面向多场景近距离连接的新一代短距通信技术，强调低时延、高可靠与低功耗两大类接入能力（SLB、SLE）。在数字钥匙场景中，SLE路径更契合“靠近即响应、复杂环境仍稳定、长期常驻又省电”的目标，并可在车端—终端—云端形成统一的连接管理与安全策略闭环。



星闪协议栈示意图

3.3.1. 星闪技术优势及特性（低时延、高可靠、低功耗）

低时延：SLE以轻量化发现/连接与精细时间同步为基础，空口交互时延可压缩到亚毫秒量级，支持更前移的认证准备与快速指令下发。工程上可将“唤醒—发现—鉴权—执行”链路做端到端收敛，使解锁动作融入用户自然步伐，减少门前等待感。

高可靠：在复杂电磁与多径环境（如室内、靠墙停车）下，SLE通过信道编码、跳频与链路质量评估保持稳定连接，并以QoS策略保障关键消息优先级。面向门域判定，SLE的时间同步与多天线协同可实现分米级的触发边界控制，有助于降低边界抖动与由此引发的“乒乓”现象。

低功耗：SLE针对常驻场景优化占空比与会话维持开销，接收灵敏度可达-110 dBm，配合按需通信与快速唤醒机制，在用户远离时维持极低负载、接近时迅速拉起链路，兼顾终端续航与车端长期待机。

综合来看，SLE以“时延—稳定—能效”的平衡能力支撑数字钥匙的确定性体验；不以替代为目标，而是与现有生态形成互补，为量产一致性提供底座。

表 3.2 星闪低功耗接入（SLE）指标

规格指标	SLE
带宽	支持 1M/2M/4M 带宽 支持 12Mbps 数据传输
调制	支持 GFSK、B/Q/8PSK
信道编码	Polar 码
slot 时长	125us
时延	Sub-ms
同步精度	μs 级
多用户并发	百量级
抗干扰	+7dB
安全性	高（支持国密）

数字钥匙的关键路径（靠近检测→双向认证→解/闭锁→启动车辆授权）采用星闪NearLink的SLE低功耗接入，原因是在常驻在线与亚毫秒交互时延之间取得平衡，确保“靠近即开、离开即闭”的一致体验。

综合来看，星闪通过低时延、高可靠与低功耗三方面的优势，构建了比现有方案更均衡的数字钥匙通信基础，能够为用户提供更佳体验，为车企提供更低成本、更高可靠性的解决方案。

3.3.2. 星闪安全机制

双向认证与端到端加密：接入阶段采用双向身份校验，结合会话级密钥派生、消息完整性与防重放，形成可审计的安全通道；密钥在终端SE/TEE与车端安全MCU内受控存储与运算。

抗中继与时序一致性：依托低时延与精细同步，压缩攻击可利用的转发窗口；配合频点跳变与链路质量异常检测，提高对“非真实在场”路径的识别度。

设备与生命周期安全：在车端与终端落地可信执行与安全引导（secure boot）、固件签名与更新校验；云侧提供凭证发放/轮换/撤销与审计追踪，支撑共享与临时钥匙的可控可回溯。

合规对接与开放接口：安全能力与国内外车联网安全要求相衔接，应用层以开放接口对接整车已有的数字钥匙流程与风控策略，便于渐进式集成。

3.3.3. 星闪性能指标

本项目测试直接相关的三项能力与目标口径如下（具体数据以第四章实测为准）：①分米级定位与门域边界稳定性：在空旷、靠墙与室内场景下，解/闭锁触发距离抖动明显收敛，支撑自然步伐中的稳定判定。②“乒乓”抑制：围绕转身、绕车、蹲起三类动作的解锁稳定性，目标是显著降低边界反复开/关现象。③无感解锁成功率与无感闭锁成功率：在统一口径下统计场景1（空旷）、场景2（地库停车场）、场景3（地库靠墙）的解/闭锁成功率，设计目标为 $\geq 99.9\%$ 。

与本项目不直接测试但与工程实现相关的通用能力，简述如下（为平台化能力参考，非本次对比结论）：空口时延可达百微秒量级、接收灵敏度最高可至约-110 dBm、并发接入规模可达数百终端、微秒级多设备同步、链路层QoS与优先级管理等。这些指标用于解释系统设计的可行性与裕度，不作为本次测试结论呈现重点。

3.3.4. 星闪测试与验证

测试口径与场景：本蓝皮书遵循ICCE（智慧车联产业生态联盟）相关测试规程框架，围绕四类能力建立统一指标与场景：A 分米级精准定位（解/闭锁距离稳定性）；B “乒乓”抑制（解锁稳定性—乒乓次数，动作含转身/绕车/蹲起）；C 无感解/闭锁成功率；

方法与基线：以星闪&蓝牙数字车钥匙为被测对象，必要处设置行业常见方案作为参考基线，仅呈现客观数据、不作主观评判。页脚统一标注“按T-ICCE 305-2025《智慧车联产业生态联盟数字车钥匙系统测试 第5部分：性能体验》测试规范”。

结果呈现方式：第四章将以“指标卡+图表”的方式给出数据与区间分布，并明确与用户体验的映射关系（如：边界抖动→体感‘拉门即开’的一致性；乒乓次数→解锁自然度）。未在本次测试覆盖的能力（如极端并发容量、跨平台大规模互操作等）不作对比性结论，仅在本节做能力说明。

3.3.5. 星闪 NearLink 数字钥匙生态与规模化路径

面向规模化商用，星闪NearLink数字钥匙正围绕“标准—芯片—模组—终端—测试与认证—运维”形成贯通式体系。标准侧以NearLink协议栈为基座，对接包括T-ICCE 305-2025《数字车钥匙系统测试 第5部分：性能体验》在内的评价口径，明确控制面、数据面与安全面的抽象与接口。芯片侧聚焦低功耗近距接入与安全计算能力，夯实低时延、高可靠、可信执行的硬件根。模组侧提供车规级参考设计与车载总线接口，便于在整车E/E架构中快速集成与布置门域天线。终端侧通过操作系统级服务与密钥容器实现凭证的系统级托管、后台监听与快速唤醒。测试与认证侧建立一致性、互操作、

性能体验与安全四类用例库，配合厂商间联调与互通活动，持续收敛接口与口径，强化可复现与可追溯。

兼容生态方面坚持“多模共存、分工明确”的工程原则：SLE承担近距关键链路，确保常驻在线与靠近/离开触发的一致时延；NFC作为应急通道提升可用性；非实时的大数据传输与策略分发可由车载蜂窝或以太网承载，避免占用近距时隙。为降低跨品牌与跨版本差异，接口侧引入能力适配层与策略下发机制，统一密钥全生命周期管理与日志模型，使终端—车端—云端在权限、状态与审计上保持一致收敛，满足2.3.3提出的互操作、可用性与可观测性要求。

面向量产落地，建议按“验证—试点—扩展”的路径推进。在验证阶段完成样件与主流机型的互操作与体验门槛核验，固化统一口径的用例与判据；在试点阶段于若干量产平台上线，形成机型/OS/车机的版本矩阵与合格清单，并建立端—车—云的一体化日志与运维闭环；在扩展阶段实现多品牌车辆与多品牌终端的稳定互通，配套常态化的一致性与互操作认证与标识发布，持续扩充生态伙伴。全过程以“体验KPI—日志字段—用例库”的三位一体方法论贯穿，确保数据可度量、问题可定位、体验可复用。

通过上述路径，星闪NearLink数字钥匙在不改变整车既有电子电气架构的前提下，逐步打通标准、芯片、模组、终端与测试认证各环节，实现从单车体验到跨品牌生态的一致化，为规模化应用奠定可复制、可审计、可演进的工程基础。

第四章 星闪数字钥匙关键性能测试与先进性验证

4.1. 分米级精准定位能力

4.1.1. 定位精度的重要性与应用价值

数字钥匙的目标是把“钥匙”从显性操作变成背景能力，用户靠近车辆的自然步伐中即完成解锁、入座后自然启动车辆。要做到这一点，系统必须在极短时间内、在近身范围内做出稳定且可信的“在场判定”。定位精度不足会带来两类直接问题：一是便捷性受损——触发过早或过晚都会让用户在车门前停顿；二是安全边界模糊——系统无法准确区分“路过”“近身”与“上车”三种状态，既可能误触发，也可能在用户已到门把手时仍未解锁。分米级定位的价值在于把“门域”从模糊的米级范围收敛为清晰可控的近身区域，使触发时机与用户动作高度一致，从而把“体验确定性”与“安全确定性”同时拉齐。除门域控制外，分米级能力还能拓展更多应用：个性化迎宾（靠近哪一侧解哪一门）、儿童安全/后排优先策略、共享用车的精准人车匹配、园区/停车场的“人—车—位”协同，以及车内外状态的精细化区分（例如车内留人时的闭锁策略、尾门区域的靠近判定）等。它不只是通信指标的优化，而是数字钥匙从“功能”走向“服务入口”的关键台阶。

4.1.2. 定位技术演进与星闪的突破

现有量产实践大体经历了两步：第一步是基于强度推断距离的低功耗近距连接，部署门槛低、生态广，但在多径和遮挡下边界易抖动；第二步是引入物理测距/空间感知以增强“在场证明”，在安全与体验上更进一层。面向下一阶段，行业需要在“高精度判定—复杂环境鲁棒—能效友好”之间取得更均衡的工程解。星闪NearLink在设计上将“时间同步、抗干扰、能效与并发”作为同等重要的底层要素，形成一套适配数字钥匙的定位基线。其核心在于：更精细的时间同步与轻量握手，减少“靠近到可鉴权”的链路开销；信道编码、跳频与链路质量评估协同，使系统不仅看“强度”，还看“时序与稳定性”；资源与QoS管理把“门域判定”“关键指令”置于高优先级，减少复杂环境下被非关键业务打断的概率。在此基础上，可构建面向门域的“距离—时间—动作”联合判定：以近身距离为主特征，辅以短时序的平滑与迟滞，在用户自然靠近过程中形成稳定结论。该路径的工程意义在于：在保持能效可控的前提下，把“近身—上车”的触发区间收敛到分米级，并把判定抖动压低到用户难以察觉的水平。

4.1.3. 测试设计

为了验证星闪在分米级精准定位方面的性能，本项目的测试设计严格对标国家行业规范，覆盖不同典型使用场景，确保测试结果具有代表性和可复现性。

4.1.3.1. 无感解锁距离稳定性

在手机APP上登录车主或授权账号，开通并激活数字钥匙相关功能。

无感解锁场景1

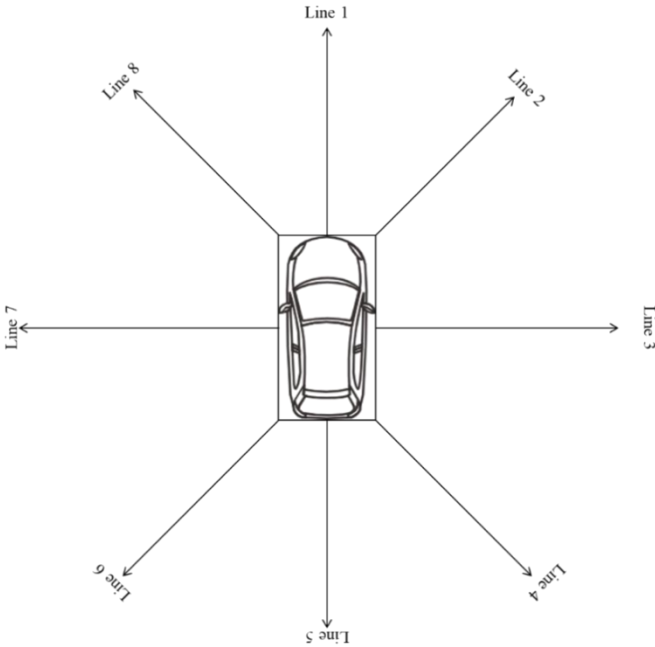


图4-1 无感场景1测试路线

测试人员携带手机钥匙，沿八条不同路线，匀速靠近被测车辆。靠近过程中，右手握持测试手机自然摆动。测试时，需将测试手机息屏，手机APP处于后台运行状态。记录车辆解锁时刻测试手机与被测车辆轮廓线的水平距离。若携带钥匙进入距离车辆轮廓0.3米范围内，车辆未自动解锁，则记录解锁距离为0.3米，记录此次无感解锁失败。每条路线各测试9次。在两次测试的间隔过程中，需要分别两次执行主驾车门的开启和关闭操作，以模拟用户上车和下车动作。无感场景1无感解锁距离测试路线与此场景下无感解锁成功率测试路线相同。按照式4-1计算各测试路线使用单部手机测试的解锁距离标准差。

$$\text{距离标准差} \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (d_i - \bar{d})^2}{9}} \quad (i=1, 2, \dots, 9) \quad 4-1$$

其中， d_i 为使用手机测试，此测试路线第*i*次测试记录的解锁距离，单位米。

4.1.3.2. 无感闭锁距离稳定性

在手机APP上登录车主或授权账号，开通并激活数字钥匙相关功能。

无感闭锁场景1（同上）

测试人员从主驾下车后，携带手机钥匙，逆时针绕车到达指定位置后，沿着八条不同路线匀速远离被测车辆。远离过程中，右手握持测试手机自然摆动。测试时，需将测试手机息屏，手机APP处于后台运行状态。记录车辆闭锁时刻测试手机与被测车辆中心点的水平距离。若携带钥匙远离车辆至距离车辆轮廓线20米处，车辆仍未自动闭锁，则判定此次闭锁失败，记录闭锁距离为20米。每条路线各测试9次。无感场景1无感闭锁距离稳定性测试路线与此场景下无感闭锁成功率测试路线相同。按照式4-2计算各测试路线使用单部手机测试的闭锁距离标准差。

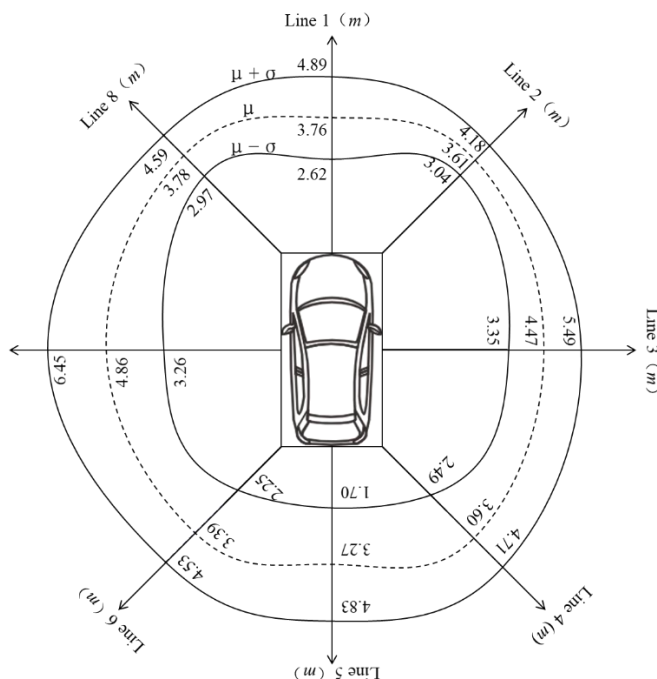
$$\text{距离标准差}\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (d_i - \bar{d})^2}{9}} \quad (i=1, 2, \dots, 9) \quad 4-2$$

其中， d_i 为使用手机测试，此测试路线第*i*次测试记录的闭锁距离，单位米。

4.1.4. 星闪定位稳定性测试结果分析

测试实验结果与分析如下：

星闪数字车钥匙解锁测试结果



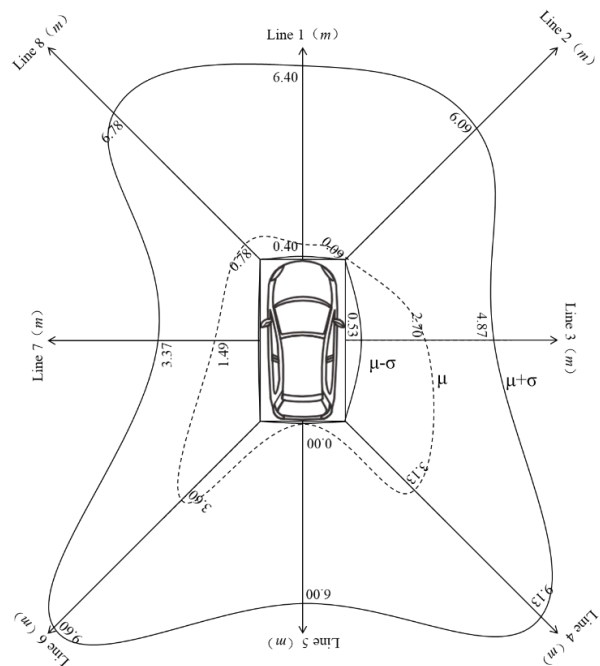
μ : 多次试验测得的无感解锁距离平均值，单位米

σ : 多次试验测得的无感解锁距离标准差，单位米

注: $\mu \pm \sigma$ 区间用于快速判断数据的“常规范围”，区间越小，说明无感解锁距离波动越小、稳定性越好。

另: 当 μ 和 $\mu + \sigma$ 均接近于零时，意味着无感解锁罚站/失败概率较高。

蓝牙数字车钥匙解锁测试结果



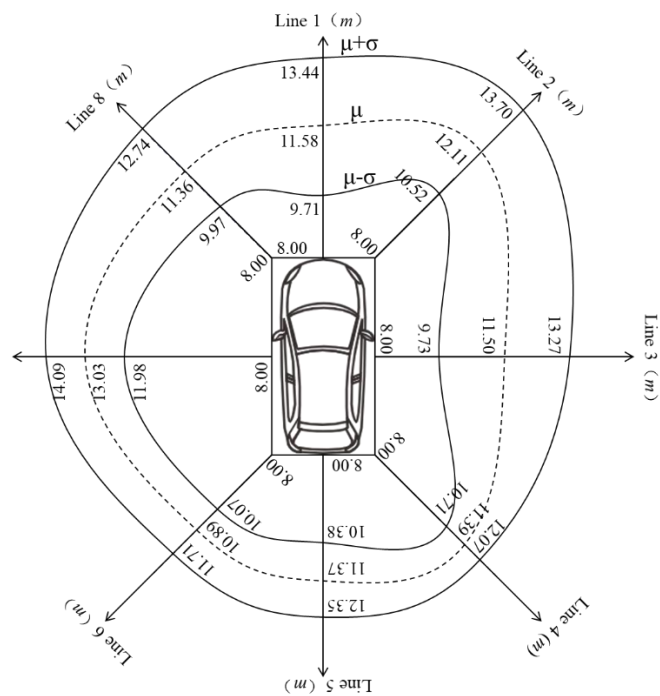
μ : 多次试验测得的无感解锁距离平均值, 单位米

σ : 多次试验测得的无感解锁距离标准差, 单位米

注: $\mu \pm \sigma$ 区间用于快速判断数据的“常范围”, 区间越小, 说明无感解锁距离波动越小、稳定性越好。

另: 当 μ 和 $\mu + \sigma$ 均接近于零时, 意味着无感解锁罚站/失败概率较高。

星闪数字车钥匙闭锁测试结果

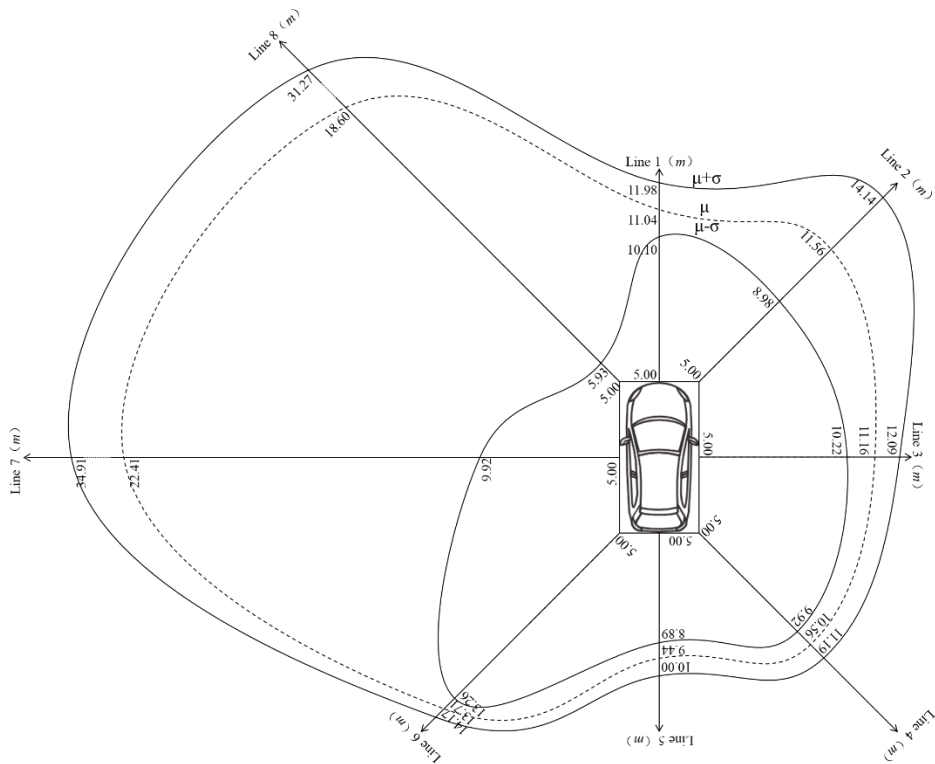


μ : 多次试验测得的无感闭锁距离平均值, 单位米

σ : 多次试验测得的无感闭锁距离标准差, 单位米

注: $\mu \pm \sigma$ 区间用于快速判断数据的“常规范围”, 区间越小, 说明无感解锁距离波动越小、稳定性越好。

蓝牙数字车钥匙闭锁测试结果



μ : 多次试验测得的无感闭锁距离平均值, 单位米

σ : 多次试验测得的无感闭锁距离标准差, 单位米

注: $\mu \pm \sigma$ 区间用于快速判断数据的“常规范围”, 区间越小, 说明无感解锁距离波动越小、稳定性越好。

测试结果分析

在空旷场地基线条件下, 以“均值 μ 与方差带 $\mu \pm \sigma$ ”的等距线刻画解/闭锁边界, 可直观反映定位稳定性与方位一致性。星闪NearLink的解锁等距线近似同心环, 八个方位的 μ 曲线起伏小, $\mu \pm \sigma$ 带连续且带宽基本均衡; 与之对比, BLE的解锁等距线呈明显的方向性形变, 个别方位出现“鼓包/收缩”, $\mu \pm \sigma$ 带在不同方位间变化突兀, 显示出更强的方位敏感性与波动。由解锁到闭锁, 星闪的闭锁边界在空间上相对解锁边界稳定外移, 迟滞关系清晰, 且 $\mu \pm \sigma$ 带在各方位保持近似的带宽与光滑过渡, 说明在“接近—解锁—离开—闭锁”的全过程中, 判定阈值具有良好的空间一致性和时间一致性。BLE的闭锁边界则出现远场“长尾”和局部方差放大现象: 在少数方位闭锁距离显著外延, 同时 $\mu \pm \sigma$ 带被拉宽, 显示闭锁触发对行进方向与瞬时信道更为敏感, 稳定性不及星闪。综上, 星闪在空旷基线场景下形成了清晰、可预测的解/闭锁阈值环, 方位间差异小、方差带连续平滑, 体

现出更强的统计稳定性与工程可标定性；BLE虽可满足基本功能，但其边界的方位依赖与远场尾部波动更明显，带来一致性与可复现性压力。

4.2. “乒乓”效应抑制能力

4.2.1. “乒乓”问题的机理与危害

在数字钥匙的应用中，所谓“乒乓”效应，是指用户在靠近或离开车辆过程中，系统反复触发解锁与上锁的现象。其典型表现为：用户站在车辆附近时，车门锁不断切换开关状态，伴随蜂鸣器提示音或闪灯反馈，严重时甚至导致车主无法正常进入车辆。这种问题不仅影响用户体验，还可能导致安全风险，例如车辆在无意间处于解锁状态，从而增加被盗风险。

“乒乓”问题的形成机理主要有三个方面：一是定位精度不足，导致系统无法准确判断用户是否处于解锁边界内；二是信号易受干扰，RSSI信号强度波动导致系统误判；三是算法设计存在缺陷，缺乏稳定的滞回机制，无法在临界状态下保持稳定判决。蓝牙方案由于依赖RSSI定位，极易在用户转身、遮挡或在车门边缘区域停留时产生“乒乓”现象。对于用户来说，这意味着车辆行为与预期严重不符，直接削弱了数字钥匙的价值感。

4.2.2. 星闪抑制机制与实现原理

星闪（NearLink）在体系设计中高度重视“乒乓”问题的解决，通过物理层、链路层和应用层的联合优化，形成了完整的抑制机制。

在物理层，星闪通过分米级定位能力有效减少了解锁边界的模糊区间，使车辆能够更清晰地区分用户是否真正靠近车门。在链路层，星闪引入了动态滤波与滞回判决机制。当用户处于解锁边界临界区时，系统不会立即切换解锁/上锁状态，而是通过多次连续判定确认后再执行操作，从而避免了因瞬时信号波动而造成的频繁切换。

此外，星闪的抗干扰与稳定性设计也对抑制“乒乓”发挥了关键作用。通过跳频与自适应信道选择，星闪能够减少因Wi-Fi或蓝牙干扰导致的RSSI波动，从根本上降低系统在边界区域的误判概率。同时，星闪在应用层支持多参数融合判定，不仅依赖定位距离，还结合用户接近方向、移动速度等信息进行综合判断。例如，当用户只是经过车辆附近时，系统能够识别其运动趋势而避免解锁，从而进一步降低“乒乓”风险。

4.2.3. 测试设计

（1）绕车稳定性

车辆处于解锁状态。测试人员携带手机钥匙，沿着设定路线从主驾侧逆时针绕车一周。测试过程中，被测车辆门锁如果出现一次完整的“解锁-闭锁-解锁-闭锁”状态变化，记为一次乒乓现象。测试过程中，右手握持测试手机自然摆动。测试时，需将测试手机息屏，手机APP处于后台运行状态。在该场景中，重复测试9次，统计测试过程中车辆门锁乒乓现象发生的总次数。在两次测试的间隔过程中，需要分别两次执行主驾车门的开启和关闭操作，以模拟用户上车和下车动作。

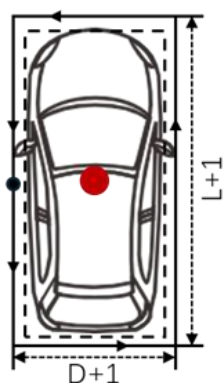


图 4-2 绕车稳定性测试路线

注：测试路线为如4-4所示。图中所示的绕车路线为矩形，该矩形以车辆中心点作为对称中心，其长度是在车辆长度（L）的基础上增加1米，即（L+1）米，宽度是在车辆宽度（D）的基础上增加1米，即（D+1）米。

（2）转身稳定性

车辆处于解锁状态。测试人员从主驾下车后携带手机沿指定路线到达指定点位，转身一周。转身过程中，如果出现车辆门锁状态的变化，记为一次乒乓现象。测试过程中，右手握持测试手机自然摆动。测试时，需将测试手机息屏，手机APP处于后台运行状态。在该场景中，各点位重复测试9次，统计各场景测试过程中车辆门锁乒乓现象发生的总次数。

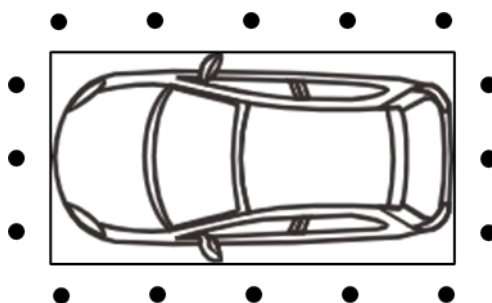


图4-3 转身稳定性测试点

（3）蹲起稳定性

车辆处于解锁状态。测试人员从主驾下车后携带手机沿指定路线到达指定点位(与转身稳定性测试点位相同)，完成一次蹲起动作。蹲起过程中如果出现车辆门锁状态的变化，记为一次乒乓现象。测试过程中，右手握持测试手机自然摆动。测试时，需将测试手机息屏，手机APP处于后台运行状态。在该场景中，各点位重复测试9次，统计各场景测试过程中车辆门锁乒乓现象发生的总次数。

4.2.4. 星闪“乒乓”抑制测试结果分析

本次试验测试结果和分析如下：

表4-1 乒乓抑制试验数据（单位：产生乒乓的次数）

指定 点位		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
绕 车	星 闪	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	蓝 牙	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
转 身	星 闪	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	蓝 牙	3	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	6
蹲 起	星 闪	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	蓝 牙	3	6	4	0	0	0	0	3	3	0	2	5	1	0	3	3

结果表明：在三类典型动作（绕车、转身、蹲起）与多条路线的组合下，星闪NearLink全为0，未出现任何乒乓触发，表现为稳定判决与一致边界。BLE在“转身”类动作下出现明显的乒乓：转身动作在多条路线有记录，个别路线计数达到6次，说明朝向快速变化对其判决影响较大；绕车动作两方案均未见触发，说明连续大幅度位移对判决的扰动相对较小；蹲起动作下BLE仅零星触发（远低于转身），星闪仍为0。

机制分析：BLE以RSSI变化为主要距离判据，人体遮挡与姿态改变会引起瞬时功率波动，且在边界区域步态微动会造成阈值反复越界，形成乒乓；星闪在物理层具备更高时间同步精度与抗扰调度，并在判决侧叠加迟滞/平滑与多参量融合（距离趋势、运动方向、一致性校验），使边界跨越具备单调性和一致性，从而有效抑制乒乓。

结论：在本批次样本下，星闪实现了近乎“100%”的乒乓抑制效果，边界判决稳定、对姿态与微动不敏感；BLE在转身动作下存在非零概率的开关锁往复，且峰值次数可达单路线6次，说明其在用户姿态快速变化与近身细微移动场景下仍有改进空间。

4.3. 无感解锁成功率保障

4.3.1. 成功率指标在产业中的意义

无感解锁是数字钥匙的核心价值体现之一，也是用户最直观的体验指标。如果解锁失败率过高，用户必须多次尝试才能进入车辆，这不仅会带来明显的不便，更会使用户对数字钥匙技术的可靠性产生质疑。产业经验表明，当无感解锁成功率低于95%时，用户普遍会感受到不稳定甚至不可信任，而一旦达到99%以上，用户则会认为体验接近传统机械钥匙甚至优于后者。

在产业链层面，无感解锁成功率直接影响车企和供应商的技术竞争力。随着智能汽车成为市场主流，数字钥匙已经逐渐进入大规模装配阶段。如果不能保证高成功率，车企将面临售后投诉增加、品牌口碑受损和市场推广受阻等问题。相反，如果能在多种复杂环境下保持高成功率，将成为产品差异化的重要卖点，有助于企业在激烈的市场竞争中脱颖而出。因此，无感解锁成功率不仅是一个技术指标，更是用户信任和产业发展的基石。

4.3.2. 星闪通信架构的稳定性优势

在现有的BLE和UWB方案中，解锁失败往往与通信链路的不稳定性密切相关。BLE依赖RSSI测距，容易受到干扰源、人体遮挡和多径效应影响，导致系统误判用户位置，从而出现解锁失败或延迟。UWB虽然具备较高精度，但其在终端普及率和功耗管理方面仍有不足，且在复杂非视距环境下性能会受到一定影响。

星闪（NearLink）在体系架构中针对这些问题进行了优化，形成了独特的稳定性优势。首先，在物理层，星闪采用高灵敏度接收机和Polar信道编码，大幅提升了在低信噪比环境下的可靠性，减少了因干扰和衰落导致的链路中断。其次，在链路层，星闪支持微秒级同步和快速链路建立，使得解锁过程能够在用户动作与系统判定之间高度重叠，从而降低失败率。再次，在应用层，星闪引入多参数融合判定机制，不仅基于距离判断，还结合用户运动趋势、接近角度等信息综合分析，避免单一指标带来的误判。

此外，星闪具备更高的抗干扰能力。在典型的地下停车场或大型商场中，Wi-Fi、蓝牙等信号密集，容易干扰数字钥匙的通信。星闪通过跳频和动态信道选择，能够有效规避干扰源，保证通信链路的稳定性。这些优势综合起来，使得星闪在多种复杂环境下均能维持较高的解锁成功率，为产业应用奠定了坚实基础。

4.3.3. 测试设计

4.3.3.1. 无感解锁成功率

在手机APP上登录车主或授权账号，开通并激活数字钥匙相关功能。

(1) 无感场景1：空旷场景

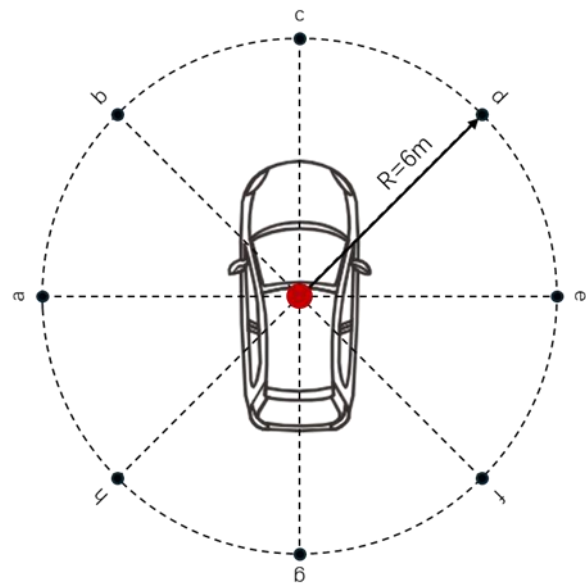


图 4-4 无感场景 1 测试路径

测试人员携带手机钥匙，沿八条不同路线，匀速靠近被测车辆。靠近过程中，右手握持测试手机自然摆动。测试时，需将测试手机息屏，手机APP处于后台运行状态。若携带钥匙进入距离车辆轮廓0.3米范围内，车辆未自动解锁，则判定此次解锁失败。每条路线各测试9次。在两次测试的间隔过程中，需要分别两次执行主驾车门的开启和关闭操作，以模拟用户上车和下车动作。按照式4-7分别计算无感场景1无感解锁成功率。

$$\text{无感解锁成功率} = \frac{\text{无感解锁成功次数}}{\text{总操作次数}} \times 100\% \tag{4-7}$$

注：无感场景1解锁测试路线如图4-1所示。路线1是以车辆中心线为起始点，与车辆纵向垂直的射线。从路线1开始，其余各路线依次以车辆中心线为轴，沿顺时针方向，以45° 的夹角依次展开。距离车辆轮廓0.3米内的区域，是指以车辆长度L与宽度D构建的矩形，和以车辆中心点为对称中心，长（L+0.6）米，宽（D+0.6）米的矩形，二者之间形成的环形区域（即阴影区域）。

(2) 无感场景2：地库停车场景

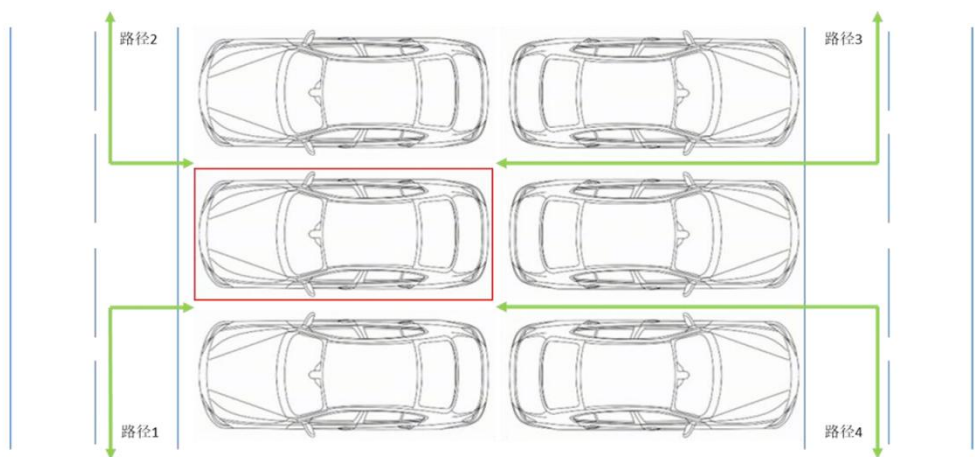


图 4-5 无感场景 2 测试路径

测试人员携带手机钥匙，沿四条不同路线，匀速靠近被测车辆。靠近过程中，右手握持测试手机自然摆动。测试时，需将测试手机息屏，手机APP处于后台运行状态。若携带钥匙按路径行进，车门仍未解锁，则认为此次无感解锁失败。在两次测试的间隔过程中，需要分别两次执行主驾车门的开启和关闭操作，以模拟用户上车和下车动作。按照式4-8分别计算无感场景2无感解锁成功率。

$$\text{无感解锁成功率} = \frac{\text{无感解锁成功次数}}{\text{总操作次数}} \times 100\%$$

4-8

(3) 无感场景3：地库靠墙停车场景

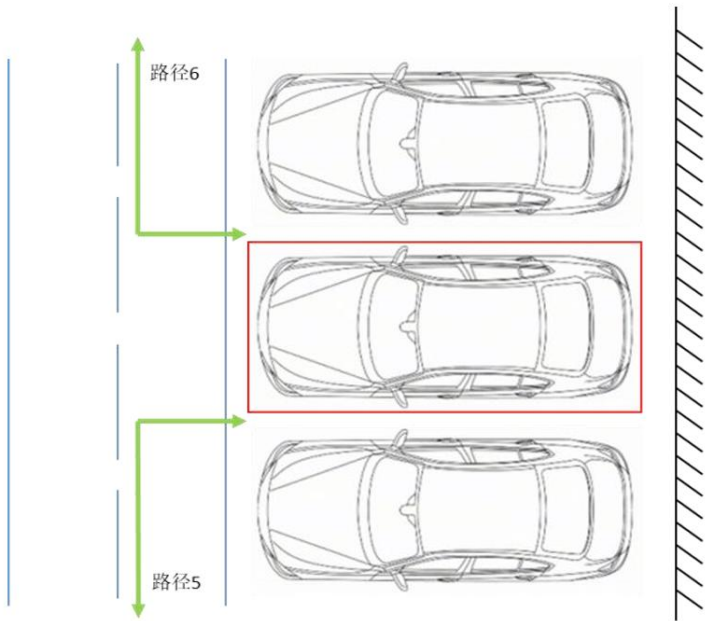


图 4-6 无感场景 3 测试路径

测试人员携带手机钥匙，沿四条不同路线，匀速靠近被测车辆。靠近过程中，右手握持测试手机自然摆动。测试时，需将测试手机息屏，手机APP处于后台运行状态。若携带钥匙按路径行进，车门仍未解锁，则认为此次无感解锁失败。每条路线各测试9次。在两次测试的间隔过程中，需要分别两次执行主驾车门的开启和关闭操作，以模拟用户上车和下车动作。按照式4-9分别计算无感场景3无感解锁成功率。

$$\text{无感解锁成功率} = \frac{\text{无感解锁成功次数}}{\text{总操作次数}} \times 100\%$$

4-9

4.3.3.2. 无感闭锁成功率

在手机APP上登录车主或授权账号，开通并激活数字钥匙相关功能。

(1) 无感场景1（同上节对应场景）

$$\text{无感闭锁成功率} = \frac{\text{无感闭锁成功次数}}{\text{总操作次数}} \times 100\%$$

4-10

(2) 无感场景2（同上节对应场景）

$$\text{无感闭锁成功率} = \frac{\text{无感闭锁成功次数}}{\text{总操作次数}} \times 100\%$$

4-11

(3) 无感场景3（同上节对应场景）

$$\text{无感闭锁成功率} = \frac{\text{无感闭锁成功次数}}{\text{总操作次数}} \times 100\%$$

















4-12

4.3.4. 星闪无感解锁成功率测试结果分析









实验结果与分析如下：









无感场景1：空旷场景

星闪数字车钥匙					
主动解锁成功率			主动闭锁成功率		
Line1		100.00%	Line1		100.00%
Line2		100.00%	Line2		100.00%
Line3		100.00%	Line3		100.00%
Line4		100.00%	Line4		100.00%
Line5		100.00%	Line5		100.00%
Line6		100.00%	Line6		100.00%
Line7		100.00%	Line7		100.00%
Line8		100.00%	Line8		100.00%

蓝牙数字车钥匙			
主动解锁成功率		主动闭锁成功率	
Line1	 11.11%	Line1	 100.00%
Line2	 50.00%	Line2	 100.00%
Line3	 100.00%	Line3	 100.00%
Line4	 66.66%	Line4	 100.00%
Line5	 33.33%	Line5	 100.00%
Line6	 33.33%	Line6	 100.00%
Line7	 88.88%	Line7	 100.00%
Line8	 66.66%	Line8	 100.00%

无感场景2：地库停车场景

星闪数字车钥匙			
主动解锁成功率		主动闭锁成功率	
Line1	 100.00%	Line1	 100.00%
Line2	 100.00%	Line2	 100.00%
Line3	 100.00%	Line3	 100.00%
Line4	 100.00%	Line4	 100.00%

蓝牙数字车钥匙			
主动解锁成功率		主动闭锁成功率	
Line1	 50.00%	Line1	 100.00%
Line2	 55.55%	Line2	 100.00%
Line3	 66.66%	Line3	 100.00%
Line4	 66.66%	Line4	 100.00%

无感场景3：地库靠墙停车场景

星闪数字车钥匙			
主动解锁成功率		主动闭锁成功率	
Line1	 100.00%	Line1	 100.00%
Line2	 100.00%	Line2	 100.00%

蓝牙数字车钥匙			
主动解锁成功率		主动闭锁成功率	
Line1	 50.00%	Line1	 100.00%
Line2	 55.55%	Line2	 100.00%

本次数据表明：星闪NearLink在8条路线的无感解锁与闭锁成功率均为100%（8/8）；蓝牙在闭锁侧同样达到100%，但在解锁侧表现出显著的方位差与不稳定性——8条路线中仅Line3为100%，最低的Line1仅11.11%，Line5/Line6为33.33%，整体平均约为56.25%（11.11%~100%分布）。就“路线达标数”看，星闪为8/8，蓝牙为1/8。

从机理看，闭锁触发条件相对宽松（远离阈值触发），两方案均可稳定完成；而解锁链路涉及“发现—建链—认证—执行”连续动作，对起始唤醒、监听窗口、链路时延与抗干扰更敏感。星闪在空旷场地的全向一致性与满分成功率，反映出其更快的唤醒/建链能力与更高的接收灵敏度，能在用户自然步态下及时完成认证并执行开锁；蓝牙解锁成功率随方向显著波动，符合其RSSI触发易受摆臂、多径与手机节电策略影响的特征。

结论上，差异主要体现在“解锁端”：星闪在同一环境、同一动作范式下实现全路线100%且方向一致性好，蓝牙虽能稳定闭锁，但解锁成功率存在大幅起伏。这一结果直接指向用户侧的无感进入体验差异：星闪可显著降低“走近未开/重复尝试”的概率，保障“靠近即开”的连贯体验。

第五章 总结与展望

面向智能网联的用车生活，数字钥匙已从“开门工具”升级为承载身份、连接服务、驱动生态的核心入口。伴随机械钥匙—红外/遥控—智能钥匙—数字钥匙的持续演进，产业对“更快的响应、更稳的体验、更省的能耗、更强的安全”形成了一致诉求。围绕这些关键指标，星闪NearLink以低时延、高可靠、低功耗和大并发为底座，为数字钥匙提供了更均衡的工程解。

对既有技术路线而言，NFC、BLE、UWB各具优势，也在不同应用阶段支撑了产业的规模化落地。近年来，来自用户侧的反馈与公开评测普遍聚焦两类痛点：一是复杂电磁环境与多径反射下的体验波动（边界抖动、偶发迟滞），二是设备与场景多样化带来的功耗与一致性挑战。这些问题并非单一技术可完全覆盖，而是需要在物理层、协议层与系统调度层的协同优化。NearLink的价值在于，以统一的接入与服务框架，在“快、稳、省”的三角中取得更好的综合平衡。

本蓝皮书的系统性验证表明：在空旷基线工况，星闪NearLink实现全路线100%的无感解锁成功率；在靠墙与室内等典型多径工况，NearLink与对照方案均达到100%成功率，但NearLink在触发距离标准差（门域边界稳定性）与动作扰动鲁棒性（乒乓抑制）上呈现更紧凑的分布和更高的一致性。换言之，在“能开能关”的功能性齐平的前提下，NearLink更有利于把“拉手即开、走远即闭”的节奏稳定在用户自然步伐内，减少门前停顿与重复开关。

分米级门域控制是体验确定性的关键支点。本次结果显示，NearLink在空旷、靠墙、室内三类场景中均能将解/闭锁触发边界收敛到分米级量级，并在“车前绕车、转身、蹲起”等典型动作下维持低乒乓水平。对用户而言，这意味着“路过不误开、靠近不等待”；对企业运营而言，意味着投诉率与售后处置的显著压降，以及在共享出行、车队管理中更高的可预期性。

能效也是规模化的前提。NearLink通过高灵敏度接收、轻量握手与快速唤醒的组合，在保持低时延与高可靠的同时，降低了终端与车端的常开负担；在长期停放、弱网或无网环境下，仍可维持“始终在线”的钥匙可用性，为更多车型级别的普及提供了能耗空间。

安全层面，数字钥匙的防护正在从单一算法走向“端—链—云”的体系化加固。NearLink以双向认证、端到端密钥管理与物理层抗中继为基础，叠加服务与策略的统一下发，把安全能力贯穿接入、会话与生命周期管理。在更大规模的部署中，这种“系统安全”的方法论，有利于在保持体验的同时，持续提升对窃听、重放与仿冒的防护强度。

从车企视角看，NearLink为“多车型、跨场景”的一致性提供了可复制路径：同一协议栈下覆盖近距门域、舱内交互与配套外设连接，减少多模拼接带来的调优成本，并为品牌统一的“靠近—开门—入座—启动车辆—离车闭锁”全链路体验奠定技术底座。随着终端厂商与操作系统对近距通信

与安全硬件的更深集成，NearLink可通过系统级能力进一步缩短链路建立时间、提升弱信号下的成功率与稳定性。

从生态视角看，数字钥匙正在从“单车功能”走向“出行入口”。NearLink具备的大并发与QoS能力，使其天然适配共享用车、园区停车、社区门禁、物流末端等多主体协同场景；结合云端的授权/回收与审计能力，可把“人—车—场—服务”衔接为连续的无感体验。随着国内外标准化工作的推进，跨品牌、跨平台的互操作将进一步降低集成门槛，NearLink的能力也可在开放接口与合规框架下，成为多技术并存格局中的高质量选项。

面向未来，数字钥匙的技术演进将呈现三条主线：其一，定位与判定更精细——在分米级门域基础上引入时序与动作特征的联合判别，进一步降低边界抖动；其二，安全更体系化——将双向认证、动态密钥与可信硬件与云侧风控融合，形成“实时感知+主动防御”的闭环；其三，生态更融合——把钥匙扩展为跨场景的数字身份，与智慧停车、社区、路侧设施协同，实现真正的“全流程无感”。NearLink在时间同步、抗干扰、能效与并发等底层能力上的长期演进，为上述三条主线提供了可持续的技术牵引。

需要强调的是，产业升级的方向不在于“谁取代谁”，而是以更好的工程组合去满足用户体验与安全合规的双重要求。NFC、BLE、UWB与NearLink在各自边界内都有价值；在实际量产中，结合应急贴靠、远距控制与近距门域的多模协同，才是通往规模化的一条务实路径。NearLink通过在关键维度的优势与与生俱来的系统化设计，为这条路径提供了更大的工程裕度与体验确定性。

综上所述，本蓝皮书的验证结果与工程分析表明：星闪NearLink能够在保持成功率的同时显著提升门域稳定性与动作鲁棒性，带来“快、稳、省、安全”的综合体验改进。我们判断，随着车端模组、手机操作系统与云端平台的协同深化，NearLink数字钥匙将率先在国内实现规模化落地，并在国际化生态与标准协同中形成可借鉴的中国方案，为全球智能出行提供稳定、可复制的技术范式。

