

T/CASME

团 体 标 准

T/CASMEXXXX—2026

具身智能空间感知系统 通用要求

General requirements for embodied intelligence spatial perception system

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

2026-XX-XX 发布

2026-XX-XX 实施

中国中小商业企业协会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	2
5 总体框架	2
5.1 架构设计原则	2
5.2 感知层架构	3
5.3 数据处理层架构	3
5.4 运维架构	4
6 技术要求	4
6.1 通用技术要求	4
6.2 感知层技术要求	5
6.3 数据处理技术要求	7
6.4 数据传输技术要求	8
6.5 安全技术要求	8
6.6 适配性技术要求	9
7 性能要求	10
7.1 性能指标规定原则	10
7.2 主要性能指标汇总	10
7.3 感知性能要求	12
7.4 实时性与时间一致性要求	13
7.5 数据质量要求	14
7.6 鲁棒性要求	14
7.7 可靠性要求	16
7.8 扩展性要求	16
7.9 能效性能要求	16
8 系统要求	17
8.1 系统组成要求	17
8.2 系统集成要求	17
8.3 系统功能要求	17
8.4 系统运行要求	18
8.5 系统性能满足性要求	18
8.6 系统鲁棒性与环境适应性要求	19
8.7 系统接口与互操作要求	19
8.8 系统安全要求	19
8.9 系统运维与维护要求	20

8.10	系统交付文件要求	20
8.11	系统符合性要求	20
9	评估与试验方法	21
9.1	评估原则	21
9.2	评估环境与设备要求	21
9.3	评估流程	22
9.4	识别性能试验与评估	22
9.5	语义理解性能试验与评估	23
9.6	目标定位与自身定位性能试验与评估	23
9.7	建图性能试验与评估	23
9.8	实时性与时间一致性试验与评估	24
9.9	数据质量与传输质量试验与评估	24
9.10	鲁棒性试验与评估	24
9.11	可靠性试验与评估	25
9.12	扩展性试验与评估	25
9.13	能效性能试验与评估	26
9.14	评估结果复核与报告	26

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由上海思岚科技有限公司提出。

本文件由中国中小商业企业协会归口。

本文件起草单位：上海思岚科技有限公司、×××、×××

本文件主要起草人：×××、×××、×××

具身智能空间感知系统 通用要求

1 范围

本文件规定了具身智能空间感知系统的总体框架、技术要求、性能要求、系统要求、评估要求等通用要求。

本文件适用于具身智能空间感知系统的设计、研发、生产、测试、运维、验证与应用，可作为具身智能机器人、自主移动设备、智能交互终端等产品空间感知能力建设的依据，也可为相关行业监管、产品选型提供参考。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 47245—2026 机器人智能控制系统总体架构

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

具身智能 embodied intelligence

与物理实体，如机器人、智能设备等相融合，能够通过感知、认知、决策和执行与环境交互，并表现出任务完成能力与环境适应能力的人工智能。

3.2

空间感知系统 spatial perception system

用于获取、处理、理解和表达环境空间信息，并为定位、建图、识别、导航、避障或交互等功能提供支撑的硬件、软件及相关算法集合。

3.3

多模态感知 multi-modal perception

利用两种或两种以上基于不同物理原理的传感源，协同获取环境信息或本体状态信息的感知方式。

3.4

语义地图 semantic map

在几何地图的基础上，通过标签化、分类等手段，赋予空间位置或物体以属性语义信息的环境表达形式。

3.5

建图 mapping

具身智能体利用感知数据构建环境空间表示的过程，可包括几何结构构建、拓扑关系建立和或语义信息表达。

3.6

定位 localization

确定具身智能体在特定参考坐标系或已知环境中位置和姿态的过程。

3.7

真值数据 ground truth

在受控条件下通过高精度测量、人工标注或权威参考系统获得的、可作为评价基准的参考数据。

3.8

响应延迟 response latency

从传感器开始采集原始数据或系统接收输入信息起，到系统输出相应处理结果所经历的时间。

3.9

鲁棒性 robustness

感知系统对环境恶劣、工况异常、场景复杂、局部传感器失效等非理想条件下，仍能保持预定功能和性能水平的能力。

3.10

抗干扰性 anti-interference capability

感知系统抵御外界电磁、信号、环境杂波、光学等外部干扰影响，保障数据采集、传输、处理过程稳定的能力。

3.11

数据质量 data quality

感知数据的准确性、完整性、一致性、时效性与有效性的综合指标，直接影响系统感知性能与决策可靠性。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

SLAM: 即时定位与建图 (Simultaneous Localization and Mapping)

LiDAR: 激光雷达 (Light Detection and Ranging)

IMU: 惯性测量单位 (Inertial Measurement Unit)

IoU: 交并比 (Intersection over Union)

P95: 第95百分位数 (95th Percentile)

MTBF: 平均无故障工作 (Mean Time Between Failures)

RGB-D: 深度相机 (Red Green Blue-Depth)

MTTR: 平均修复时间 (Mean Time To Repair)

TCP/IP: 传输控制协议 / 网际协议 (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)

AES: 高级加密标准 (Advanced Encryption Standard)

API: 应用程序接口 (Application Programming Interface)

RMSE: 均方根误差 (Root Mean Square Error)

5 总体框架

5.1 架构设计原则

5.1.1 模块化原则

系统应采用分层解耦的模块化设计，按功能划分为感知采集、数据处理、融合分析、空间表达、接口服务和运维保障等独立模块，各模块接口标准化，支持独立部署升级、替换与维护。

5.1.2 可扩展性原则

系统架构应支持硬件资源扩容、传感器品类新增、算法模型迭代、应用场景扩展，预留标准化接口与算力冗余，满足不同阶段的功能升级需求。

5.1.3 兼容性原则

系统应兼容主流操作系统、传感器硬件、通信协议、算力平台，支持通用数据格式与接口规范，异构设备、异构传感器和异构软件模块之间的协同工作要求。

5.1.4 实时性原则

系统架构应优先保障感知全链路的低延迟特性，优化数据采集、传输、处理的流程设计，减少不必要的算力开销与链路损耗，满足具身智能实体实时交互与自主行动的需求。

5.1.5 安全性原则

系统架构应覆盖全生命周期的安全设计，包括数据采集、传输、存储、处理的全链路加密，完善的访问控制机制，漏洞防护与抗攻击能力，保障系统与数据的安全合规。

5.1.6 可靠性原则

系统架构应具备冗余设计与容错机制，关键模块支持冗余备份，具备故障隔离与快速恢复能力，保障长期连续运行的稳定性。

5.1.7 鲁棒性

系统应能够适应噪声、遮挡、光照变化、动态干扰、复杂地形及局部传感器异常等非理想条件，在部分功能退化情况下仍保持基本空间感知能力。

5.1.8 可维护性

系统应支持在线监测、故障定位、日志记录、参数配置和版本管理，并宜具备在线标定、异常恢复和功能回放能力，便于后续维护与持续优化。

5.2 感知层架构

5.2.1 多模态传感器配置

应根据场景需求配置多品类、互补性的传感器，至少覆盖空间定位、环境识别、目标检测所需的基础传感能力，典型配置包括RGB 相机、RGB-D 相机、激光雷达、深度相机、IMU、声学传感器、环境参数传感器、编码器、里程计及其他用于环境感知和本体状态感知的装置，各传感器应具备标准化的硬件与数据接口。

5.2.2 数据采集接口

应具备兼容主流通信协议的标准化数据采集接口，包括但不限于以太网、USB、CAN、RS485、SPI、I2C 等接口，支持模拟信号与数字信号的接入，具备接口状态监测与异常告警能力。

5.2.3 原始数据预处理模块

应在感知层部署轻量化的原始数据预处理功能，实现数据去噪、滤波、畸变校正、时间戳对齐、数据格式标准化、无效数据过滤等基础处理，降低数据传输带宽压力与后端处理算力开销。

5.2.4 传感器状态检测模块

应具备传感器运行状态实时监测能力，包括传感器供电状态、工作温度、数据采集质量、故障状态等，可实时识别传感器异常并触发告警，为运维架构提供状态数据支撑，便于及时开展校准与维护，保障感知数据质量。

5.3 数据处理层架构

5.3.1 数据编码模块

系统应具备多源感知数据的标准化编码与压缩功能，支持不同模态数据的格式统一，适配无损 / 有损压缩算法，在保障数据完整性的前提下降低传输与存储开销，编码格式应兼容行业通用标准。

5.3.2 数据融合模块

系统应具备多模态数据时空融合能力，支持时间维度的精准同步与空间维度的联合标定，实现数据级、特征级、决策级的多维度融合，通过多源数据互补提升感知精度与可靠性。

5.3.3 特征提取模块

系统应具备空间、目标、环境的多维度特征提取能力，支持从原始感知数据中提取关键的几何特征、纹理特征、运动特征、环境特征等，适配轻量化深度学习算法与传统特征提取算法，保障特征提取的准确性与实时性。

5.3.4 语义解析模块

系统应具备底层特征到高层语义的转化能力，实现场景分类、目标属性解析、空间拓扑关系识别、行为意图理解等功能，输出结构化的语义感知结果。

5.3.5 时空推理模块

系统宜具备对目标状态、运动变化、时序一致性和空间拓扑关系进行推理和维护的能力，以支持动态环境中的连续感知和稳定输出。

5.3.6 环境表达模块

系统应能够根据应用需求输出点云、栅格图、几何地图、拓扑地图、语义地图或其他形式的环境表示结果，并支持与上层功能模块共享。

5.3.7 结果输出模块

系统应具备标准化的结果输出能力，支持感知结果、语义信息、环境模型的多格式输出，适配不同下游模块的接口需求，具备结果缓存、异常重试、数据回溯等功能，确保输出数据的可靠性与时效性，支撑具身智能体的实时决策与行动。

5.4 运维架构

5.4.1 状态监测模块

系统应具备全链路状态监测能力，监测对象应覆盖传感器连接及运行状态、数据采集质量及完整性、时间同步状态、算力资源使用率及负载、通信链路状态、算法运行状态、功耗状态和关键硬件运行参数。状态监测结果应支持实时展示、阈值告警、历史回溯，并作为故障诊断、在线标定和恢复处置的输入。

5.4.2 故障诊断与修复模块

系统应具备故障实时检测、精准定位、根因分析与自动修复能力，支持故障分级告警，针对轻微故障实现自动重启、冗余切换、参数自适应调整等自动修复；针对严重故障实现故障隔离、告警推送与修复指引，保障系统的连续稳定运行。

5.4.3 在线标定与恢复模块

系统宜基于状态监测结果支持运行过程中的参数校核、外参微调、时间同步校核和部分故障自恢复能力。在满足安全要求的前提下，可对部分异常状态执行自动重试、模块重启、数据源切换、参数回退或降级运行等处理，并应记录触发条件、处置过程和恢复结果。

5.4.4 日志与回收模块

系统应支持关键感知数据、处理结果、运行状态和异常事件的日志记录，并宜支持标准格式的数据回放与问题复现，以满足测试验证、故障分析和系统优化需求。

6 技术要求

6.1 通用技术要求

本节规定贯穿感知系统设计、实现和交付过程的共性技术要求，重点用于约束接口、坐标、时间、数据质量、配置、日志和资源隔离等技术实现要素；与第五章总体框架存在对应关系的内容，应以本节作为可验证的技术约束。

6.1.1 接口一致性

系统对外输出的感知数据接口，包括但不限于应用程序接口、消息话题、数据格式和通信协议，应符合系统声明的接口规范，并提供完整、准确、可用的接口文档。

6.1.2 坐标系与时间基准

系统应明确声明所采用的空间参考坐标系、时间基准及其相互关系。多传感器数据应统一对齐至系统规定的时间基准，并能够保持坐标转换关系的一致性和可追溯性。

6.1.3 数据质量保障

系统应具备对输出数据的完整性、有效值范围、一致性和异常变化进行实时校验的能力，并应对异常值、跳变值或失真数据进行识别、隔离或标记。

6.1.4 可配置性

系统的感知范围、分辨率、采样频率、更新频率、输出内容和告警阈值等关键参数应支持通过配置文件、管理接口或控制指令进行静态配置或动态调整。

6.1.5 日志与回收

系统应具备原始感知数据、关键中间结果、输出结果和运行状态的同步记录能力，并应支持在离线环境下进行等效过程回放、问题复现和结果核查。

6.1.6 降级策略

当部分传感器失效、数据质量下降、链路异常或算力受限时，系统应能够按照预设策略自动切换至降级运行模式，并输出状态变化信息或告警信息。

6.1.7 资源隔离

感知计算任务应与运动控制、任务规划、通信管理等关键任务在处理器、存储、网络带宽或其他关键资源上进行物理隔离或逻辑隔离，避免相互干扰。

6.1.8 兼容性声明

系统应明确声明其支持的软硬件运行环境，包括但不限于处理器架构、操作系统版本、中间件版本、驱动框架和依赖组件版本。

6.2 感知层技术要求

6.2.1 传感器参数声明

传感器供应商应提供传感器完备的规格参数清单与合格证明。参数内容应包括但不限于测量范围、视场角、盲区、分辨率、测量精度、重复性、工作波段、采样频率、输出信号类型、通信接口协议、电气接口特性、供电电压范围、典型功耗与峰值功耗、环境适应性参数等。对于安全相关或闭环控制相关传感器，还应声明启动时间、异常输出状态和故障告警信号。

6.2.2 标定、校准与复标定

系统应具备传感器内参标定、多传感器外参标定和必要的量值校准能力，并宜支持在线标定、离线标定或周期性校准核查。传感器供应商应声明标定/校准方法、适用条件、标定参数版本、有效期或复核周期。当传感器安装位置发生变化、系统遭受碰撞、振动冲击、维修更换或怀疑标定失效时，应支持复标定验证，并应记录复标定结果。

6.2.3 时间同步机制

多传感器之间的时间同步精度应满足系统设计要求。系统宜采用统一时钟、硬件触发、精密时间协议或其他适宜的高精度同步方式。

6.2.4 采集完整性

系统应实时监测各传感器数据流的到达状态、丢包情况、帧率波动和中断情况，并能够形成统计记录和异常提示。

6.2.5 健康监测

系统应对传感器连接状态、供电状态、工作温度、运行异常和关键部件状态进行监测；对于适用的光学类传感器，宜具备对镜头污染、遮挡或成像异常的检测能力。

6.2.6 抗遮挡与抗污染设计

传感器安装位置应避免受到机器人本体结构、运动部件或典型工作附件的遮挡。系统设计宜考虑防尘、防雾、防污、易清洁和抗振动等措施。

6.2.7 视场覆盖验证

系统应通过仿真分析、样机测试或实测验证等方式，验证传感器组合对关键区域的覆盖能力。关键区域可包括避障区域、行走区域、操作区域和交互区域等。

6.2.8 安全采集

对于跨模块、跨节点或跨网络传输的原始采集数据，系统应根据安全需求采取身份鉴别、访问控制或加密传输等保护措施。

6.2.9 数据采集精度、频率与质量指标

相关核心传感器的数据采集精度、采样频率、时间同步、采集完整性和健康监测能力应达到以下要求：

- 具身智能空间感知系统宜按照任务风险和运动动态程度划分为基本级和增强级。基本级适用于室内低速移动、静态或低动态交互场景；增强级适用于人机混行、高速移动、足式或轮足运动、机械臂抓取、多机协同和安全相关闭环控制场景。
- 具备相应传感器或功能的系统应满足表 1 的最低要求；未采用的传感器项目可标注为不适用，但应说明替代感知手段及其指标边界。传感器供应商声明值高于本表要求时，应以声明值作为验收依据。

表 1 感知层核心指标要求

指标类别	指标项	具体要求	说明或验证方式
时间基准	多传感器时间同步误差 (P95)	基本级 $\leq 5\text{ ms}$ ；增强级 $\leq 1\text{ ms}$ 。视觉-惯性或激光-惯性紧耦合定位场景宜 $\leq 0.5\text{ ms}$ 。	验证同步日志或外部时间测量结果；应声明同步机制，如PTP、硬件触发或统一时钟。
时间基准	时间戳分辨率与单调性	时间戳分辨率应 $\leq 1\text{ ms}$ ，增强级宜 $\leq 100\text{ }\mu\text{s}$ ；时间戳应单调递增，并可追溯至统一时间基准。	连续抽样时间不少于30 min，不应出现时间回跳或不可解释跳变。
采集链路	实际采集频率稳定性	实测平均频率应不低于声明值的95%；帧间隔P95偏差基本级 $\leq \pm 10\%$ ，增强级 $\leq \pm 5\%$ 。	按传感器数据流分别统计，统计周期不少于30 min。
采集链路	采集数据有效率	有效数据比例基本级 $\geq 99.0\%$ ，增强级 $\geq 99.5\%$ ；安全相关关键传感器宜 $\geq 99.9\%$ 。	有效数据应同时满足帧完整、时间戳有效、里程内、质量标志合格等判定条件。
采集链路	丢帧或丢包率	正常负载下丢帧或丢包率基本级 $\leq 1.0\%$ ，增强级 $\leq 0.5\%$ ；连续丢帧、数据中断或数据过期应触发告警。	以应用层接收数据和传感器输出计数的差异统计为准。
采集链路	感知层采集与预处理延迟 (P95)	基本级 $\leq 50\text{ ms}$ ，增强级 $\leq 30\text{ ms}$ ；安全避障相关近场输入宜 $\leq 20\text{ ms}$ 。	指传感器采集完成至感知层预处理输出的时间，不含上层深度推理和任务规划时延。
视觉相机	图像采集能力	RGB相机分辨率不应低于 1280×720 ，帧率应 $\geq 10\text{ FPS}$ ；动态交互或高速运动场景宜 $\geq 30\text{ FPS}$ ，或采用全局快门、短曝光等抗运动模糊方案。	应声明曝光控制、畸变参数、快门方式、低照度能力和成像异常检测方式。
深度/RGB-D/立体视觉	深度测量能力	主要工作距离内深度RMSE应 $\leq 30\text{ mm}$ 或 $\leq 2\%$ 里程取较大者；增强级宜 $\leq 20\text{ mm}$ 或 $\leq 1\%$ 里程；帧率应 $\geq 30\text{ FPS}$ ；无效深度率基本级 $\leq 10\%$ ，增强级 $\leq 5\%$ 。	应声明工作距离、视场角、材质适用边界以及室外、强光、透明或高反光条件限制。
激光雷达/三维点云	点云采集能力	二维或三维LiDAR扫描频率应 $\geq 10\text{ Hz}$ ，增强级宜 $\geq 20\text{ Hz}$ ；测距误差应 $\leq 30\text{ mm}$ 或 $\leq 1\%$ 里程取较大者，增强级宜 $\leq 20\text{ mm}$ 或 $\leq 0.5\%$ 里程；点云应携带时间戳、强度或质量信息。	应声明盲区、角分辨率、点频、反射率条件、多雷达互扰抑制方式和安全等级。
IMU/惯性单元	本体运动采集能力	IMU输出频率应 $\geq 100\text{ Hz}$ ，增强级宜 $\geq 200\text{ Hz}$ ；里程应覆盖载体最大角速度和加速度；时间戳抖动基本级 $\leq 1\text{ ms}$ ，增强级 $\leq 0.5\text{ ms}$ 。	应声明零偏稳定性、随机游走、安装坐标系、温漂补偿和饱和检测方式。

表1 感知层核心指标要求（续）

指标类别	指标项	具体要求	说明或验证方式
编码器/里程计	运动里程采集能力	更新频率应 ≥ 50 Hz, 增强级宜 ≥ 100 Hz; 短程里程误差基本级 $\leq 2\%$, 增强级 $\leq 1\%$; 脉冲丢失、计数异常或轮滑风险应可检测。	应声明轮径、传动参数、打滑判定、里程校正策略和适用地面条件。
近场/触觉/力觉/声学	近场交互与接触感知	近场避障传感更新频率应 ≥ 20 Hz, 增强级宜 ≥ 50 Hz; 触觉或力觉采样频率应 ≥ 100 Hz; 力或压力测量误差宜 $\leq 5\%$; 告警输出延迟基本级 ≤ 50 ms, 增强级 ≤ 20 ms。	适用于机械臂操作、人机接触、狭窄空间通行和近距离安全避障场景。
关键区域覆盖	空间覆盖率与盲区管控	避障区、行走区、操作区和交互区覆盖率应 $\geq 95\%$, 增强级宜 $\geq 98\%$; 不可消除盲区应声明, 并采取限速、绕行、提示或冗余感知措施。	覆盖率可按关键区域体素、栅格、视场模型或实测采样点计算。
小障碍/动态目标采集	具身安全相关目标感知性	在声明工作距离内, 关键避障区应能采集到最小特征尺寸 ≥ 50 mm的静态障碍; 增强级场景应声明对人体、宠物、移动设备等动态目标的最小尺寸、速度和距离边界。	本项为采集层可观测性要求, 不替代目标识别算法性能要求。
标定质量	单传感器内参与多传感器外参	校准后相机重投影误差应 ≤ 1.0 px, 增强级宜 ≤ 0.5 px; 多传感器外参平移重复性应 ≤ 10 mm、旋转 $\leq 0.5^\circ$, 增强级宜 ≤ 5 mm、 $\leq 0.2^\circ$; 激光-视觉配准残差应 ≤ 30 mm或 ≤ 3 px, 增强级宜 ≤ 20 mm或 ≤ 2 px。	复标定后应留存标定数据、评估报告、参数版本号 and 适用条件。
健康监测	状态更新与异常告警	连接、电源、温度、数据中断、质量下降、镜头遮挡或污染等状态监测周期应 ≤ 1 s, 增强级宜 ≤ 0.5 s; 异常告警延迟基本级 ≤ 2 s, 增强级 ≤ 1 s。	应支持质量标志输出、运行日志记录、异常恢复结果记录和状态可视化。
环境适应性	光照、污染、振动下采集保持	应声明照度、温湿度、粉尘、雾气、振动和冲击边界; 在声明边界内, 核心采集数据有效率不应低于基准条件的90%, 增强级不应低于95%。	适用于移动载体、足式载体、轮足载体、作业载体和半开放环境。
资源与带宽	链路带宽冗余	正常工况下感知采集链路平均利用率应 $\leq 70\%$, 增强级宜 $\leq 60\%$; 突发缓存不得造成关键数据时间顺序失真。	应对原始数据流、预处理数据流、诊断流和日志流分别统计。

注1: 表中基本级为通用最低要求; 增强级适用于高动态、高安全或强交互具身智能场景。若应用场景、传感器原理或法规要求存在更高要求, 应采用更严格指标。

注2: 所有指标应在传感器供应商声明的运行环境、载体运动状态和负载条件下验证, 并与第7章性能要求、第9章评估与试验方法保持一致。

6.3 数据处理技术要求

数据处理技术要求应与现行有效的相关国家标准、行业标准、团体标准、公开基准数据集或工程验证方法保持一致。对于本文件提出的指标或方法, 如高于外部标准或公开基准要求, 应说明采用理由、适用场景和验证依据; 如无直接对标标准, 应通过可复现的试验数据、真值系统或对比分析进行证明。

6.3.1 预处理规范

系统应对输入数据进行必要的预处理。预处理操作包括去噪、滤波、畸变校正、采样处理、坐标转换和质量筛选等, 以保证后续处理环节的数据一致性和可用性。

6.3.2 数据融合一致性

不同模态数据在同一坐标系下进行映射、配准和融合时, 应满足系统规定的精度要求。重投影误差、配准误差或其他关键一致性指标应在系统声明范围内。

6.3.3 物体跟踪与持久性

系统应能够在连续帧之间维持同一目标的关联关系, 并宜对同一目标分配稳定的标识。对于短时遮挡、局部缺失或短时中断后的目标, 系统宜具备重新识别与关联能力。

6.3.4 语义解析稳定性

系统输出的语义标签、目标类别或场景理解结果应具有时序稳定性。对于同一目标或同一区域, 在短时间连续观测条件下, 不应出现无合理原因的频繁类别跳变。

6.3.5 置信度输出

系统输出的关键感知结果，包括但不限于目标类别、位置、姿态、轨迹、地图信息或定位结果，应具备相应的置信度、不确定性量度或质量评价信息。

6.3.6 模型信息声明

制造商应声明所采用的关键算法模型或规则模块的版本信息、适用范围、主要输入输出特征及已知限制条件。对于基于训练数据形成的模型，宜说明训练数据的主要来源特征和典型适用场景。

6.3.7 异常检测

系统应具备对算法异常、结果漂移、跟踪失稳、地图异常或感知结果明显失真的检测能力，并能够触发告警、重置、切换或其他处置措施。

6.3.8 离线验证能力

系统应支持基于离线数据集或记录文件进行全流程处理验证，并应保证离线验证流程与在线运行逻辑具有一致性或可比性。

6.3.9 结果可审计性

对于关键感知结果，系统宜支持导出关键中间结果、关联依据、状态量或必要的辅助信息，以便进行人工核查、调试分析和责任追溯。

6.4 数据传输技术要求

6.4.1 通道分类管理

系统应根据数据类型和业务重要程度，对数据链路进行分类管理。数据流宜划分为控制信令流、原始感知数据流、感知结果流、诊断数据流和日志数据流等，并根据业务需求设置相应优先级。

6.4.2 带宽与流量控制

系统应具备带宽管理、缓存控制和流量调节能力。在链路拥塞、资源不足或突发流量场景下，应优先保障控制相关数据和核心感知数据的传输。

6.4.3 端到端时延一致性

系统在数据传输过程中应保留原始采集时间信息，并保证各环节时间信息可追溯，避免因缓存、排队或重组引起时间关系失真。

6.4.4 丢包与重传策略

系统应根据数据业务特性选择适宜的传输策略。对于关键控制信息、配置数据和状态管理信息，应采用可靠传输机制；对于高频感知数据，可采用具备容错能力的传输机制，并应记录丢包率或数据缺失情况。

6.4.5 服务质量策略

系统应声明不同数据对象或通信主题的服务质量策略，包括但不限于可靠性、持久性、历史深度、缓冲策略和超时机制。

6.4.6 加密与认证

对于跨计算节点、跨网络边界或向云端传输的数据，系统应采取身份认证、访问控制和加密保护措施，并符合相关安全要求。

6.4.7 链路监控

系统应具备对数据链路时延、抖动、吞吐量和异常中断情况的监测能力。当关键指标超过阈值时，应能够触发告警或处置动作。

6.5 安全技术要求

6.5.1 身份鉴别与授权

系统管理接口、配置接口和数据访问接口应具备身份鉴别与授权控制机制，并应按照最小权限原则分配访问权限。

6.5.2 密钥管理

系统涉及的根密钥、设备密钥、会话密钥或其他安全凭据应进行安全存储、分发、更新和失效管理。宜采用硬件安全模块、可信执行环境或受保护的软件存储机制。

6.5.3 接口暴露最小化

系统默认配置下应关闭非必要网络端口、后台服务和调试接口，仅保留已声明且经授权的服务项。

6.5.4 审计日志完整性

登录、授权失败、越权访问、配置变更、模型更新、关键策略切换和安全告警等事件应形成审计记录。审计日志应具备防篡改、防丢失或完整性保护能力。

6.5.5 固件与软件完整性校验

系统启动前或更新过程中，应对关键固件、软件镜像、配置文件或模型文件执行完整性校验，并应能够识别非法篡改或异常变更。

6.5.6 数据脱敏与销毁

对于涉及隐私、敏感场景或受保护对象的数据，系统应根据使用目的和管理要求采取脱敏、最小化保留、定期删除或安全销毁措施。

6.5.7 对抗攻击预警

系统应具备对异常物理干扰、伪造输入、恶意图案、激光干涉或其他可能影响感知结果的攻击行为进行检测和告警的能力。

6.5.8 网络数据处理安全

涉及网络数据处理活动时，系统应参照现行有效的信息安全技术网络数据处理安全要求等相关标准，明确数据分类分级、处理目的、处理边界、最小必要原则、访问控制、传输加密、日志审计、数据留存和删除策略。对跨节点、跨网络边界、云端训练或远程运维涉及的数据，应具备授权校验、完整性保护和异常处理记录。

6.6 适配性技术要求

6.6.1 空间尺度切换

系统应能够根据任务区域大小、环境复杂度或工作模式，在预定义尺度模式之间进行切换，并保持关键感知功能连续可用。

6.6.2 传感器组合灵活性

系统架构应支持不同传感器组合方式，并应在部分传感器下线、替换或新增时保持必要的感知能力和功能完整性。

6.6.3 跨平台一致性

系统在不同处理器架构、操作系统环境或加速器平台上运行时，其关键输出结果应保持一致性或满足声明的一致性误差范围。

6.6.4 跨场景迁移验证

针对新场景、新任务或新载体平台，系统应提供相应的参数迁移、重新标定和验证流程，并应明确验证基准和判定依据。

7 性能要求

7.1 性能指标规定原则

空间感知系统性能指标的设定应反映系统在正常工况和非理想工况下的核心能力。各项性能指标应至少明确以下内容：

- c) 指标名称；
- d) 指标定义或计算口径；
- e) 统计量；
- f) 单位；
- g) 应声明的测试条件；
- h) 判定方式。

7.2 主要性能指标汇总

空间感知系统的性能要求应覆盖识别性能、目标定位性能、自身定位性能、建图性能、语义理解性能、实时性、时间一致性、数据质量、鲁棒性、可靠性、扩展性和能效性能。表2规定主要性能指标、统计要求和判定方式；表3给出面向具身智能典型场景的关键性能分级要求。制造商声明值严于本文件要求时，应以制造商声明值作为验收依据。

表 2 主要性能指标汇总表

一级指标	二级指标	定义/口径	统计量	单位	测试条件要点	判定方式
识别性能	全类平均精度 (mAP)	各类目标检测平均精度的算术平均值	平均值或声明统计量		应声明目标类别范围、样本规模、目标尺度分布、遮挡比例、照度范围、背景复杂度	\geq 制造商声明值
	精确率 (Precision)	正确识别目标数占识别输出总数的比例	平均值	%	应声明类别集合、样本数量、目标密度、动态目标比例、误检判定规则	\geq 制造商声明值
	召回率 (Recall)	正确识别目标数占真实目标总数的比例	平均值	%	应声明目标类别、漏检判定规则、目标距离分布、遮挡条件	\geq 制造商声明值
	F1 分数	精确率与召回率的调和平均值	平均值		应声明样本构成、类别分布和统计周期	\geq 制造商声明值
目标定位性能	目标位置误差	系统输出目标位置与真值位置之间的偏差	平均值、最大值或 P95	cm	应声明目标距离范围、目标尺寸、观测角度、真值获取方式	\leq 制造商声明值
	目标姿态误差	系统输出目标姿态与真值姿态之间的偏差	平均值、最大值或 P95	°	应声明姿态定义方式、目标类型、观测条件和坐标系定义	\leq 制造商声明值
自身定位性能	绝对位姿误差 (ATE)	系统输出位姿与真值位姿之间的整体偏差	RMSE、平均值或 P95	cm	应声明测试路径长度、速度范围、运动方式、真值参考系统类型	\leq 制造商声明值
	相对位姿误差 (RPE)	相邻时刻或固定间隔位姿变化量与真值之间的偏差	RMSE、平均值或 P95	cm	应声明采样间隔、路径类型、运动速度和转向特征	\leq 制造商声明值
建图性能	局部点位误差	地图局部点位与参考模型之间的几何偏差	平均值、最大值或 P95	cm	应声明地图类型、参考模型来源、环境尺度、表面材质特性	\leq 制造商声明值
	全局闭环残差	闭环前后地图或轨迹的不一致程度	平均值、最大值或 P95	cm	应声明闭环路径特征、回环长度、累计运行距离	\leq 制造商声明值

表2 主要性能指标汇总表（续）

一级指标	二级指标	定义/口径	统计量	单位	测试条件要点	判定方式
建图性能	地图完整性	地图对有效环境区域的覆盖程度	覆盖率	%	应声明有效区域定义、遮挡处理规则、缺失区域判定规则	≥ 制造商声明值
语义理解性能	语义分割准确率	语义标签与真值标签之间的一致程度	平均值	%	应声明类别集合、标注规则、样本规模、背景复杂度	≥ 制造商声明值
	平均交并比 (mIoU)	各类语义目标交并比的平均值	平均值	%	应声明语义类别、标注真值来源、统计样本规模	≥ 制造商声明值
语义理解性能	语义地图一致性	语义地图与参考语义标注之间的一致程度	一致率或 mIoU	%	应声明地图更新周期、语义类别集合、标注依据	≥ 制造商声明值
实时性	端到端延迟	从原始采集到结果发布的总时长	P95 或最大值	ms	应声明延迟边界定义、时间戳采集方式、负载水平、链路配置	≤ 制造商声明值
	处理帧率	单位时间内完成处理的数据帧数	平均值、最小值	Hz 或 FPS	应声明输入分辨率、传感器频率、算法配置、运行模式	≥ 制造商声明值
	时延抖动	连续输出时延的波动程度	标准差或 P95	ms	应声明统计周期、系统负载、资源占用状态	≤ 制造商声明值
时间一致性	时间同步误差	多传感器数据时间对齐偏差	平均值、最大值或 P95	ms 或 μs	应声明同步机制、测量方法、传感器组合方式	≤ 制造商声明值
数据质量	丢包率	采集或传输过程中丢失数据占总数据量的比例	平均值、最大值	%	应声明统计周期、链路类型、数据类型和负载状态	≤ 制造商声明值
	有效率	满足质量要求的有效数据占总数据量的比例	平均值	%	应声明有效性判定规则、异常值处理规则、环境扰动条件	≥ 制造商声明值
鲁棒性	精度衰减系数	扰动条件下性能指标相对于基准条件的下降比例	平均值或最差值	%	应声明扰动类型、扰动强度、持续时间、恢复条件	≤ 制造商声明值
	功能保持率	扰动条件下维持核心功能的比例	平均值	%	应声明核心功能定义、扰动注入方式、判定准则	≥ 制造商声明值
	光照适应性范围	光照适应性范围指被测对象在特定光照强度、光谱分布、变化速率等条件下，仍能维持预期功能的区间	平均值	Lux		
	振动适应频率	在设计或试验中需承受的有效频率范围		Hz		
可靠性	平均无故障时间 (MTBF)	两次故障之间的平均运行时间	计算值	h	应声明故障定义、统计周期、运行工况和任务模式	≥ 制造商声明值
	平均修复时间 (MTTR)	故障发生后恢复至正常状态的平均时间	平均值	min 或 s	应声明故障类型、恢复边界、人工参与条件	≤ 制造商声明值
扩展性	扩展后性能保持率	接入新增模块后核心性能与基准性能的比值	平均值	%	应声明扩展内容、扩展前后配置、基准对照条件	≥ 制造商声明值
能效	平均运行功耗	感知任务运行过程中的平均功率	时间加权平均值	W	应声明运行模式、算力负载、供电条件和环境温度	≤ 制造商声明值

表2 主要性能指标汇总表(续)

一级指标	二级指标	定义/口径	统计量	单位	测试条件要点	判定方式
能效	峰值功耗	感知系统在规定工况下的最大功率	最大值	W	应声明峰值触发条件、采样频率、测量位置	≤ 制造商声明值
	单位任务能耗	完成单位感知任务或单位运行时间间的能量消耗	平均值	Wh/任务 或 Wh/h	应声明任务定义、统计周期和运行模式	

表3 具身智能空间感知系统关键性能分级要求

类别	指标项	基本级要求	增强级要求	统计口径/说明
目标识别	mAP、Precision、Recall、F1	mAP ≥ 70%; Precision、Recall ≥ 80%; F1 ≥ 0.75	mAP ≥ 80%; Precision、Recall ≥ 90%; F1 ≥ 0.85	按声明类别集、距离范围和遮挡条件统计
目标定位	目标位置/姿态误差	位置误差 P95 ≤ 10 cm; 姿态误差 P95 ≤ 5°	位置误差 P95 ≤ 5 cm; 姿态误差 P95 ≤ 3°	以真值系统或高精度标定工装为基准
自身定位	ATE/RPE	ATE RMSE ≤ 10 cm; RPE ≤ 3%行程	ATE RMSE ≤ 5 cm; RPE ≤ 1%行程	室内/半开放环境可按场景分别声明
建图	地图完整性/闭环残差	完整性 ≥ 90%; 闭环残差 P95 ≤ 20 cm	完整性 ≥ 95%; 闭环残差 P95 ≤ 10 cm	按有效区域和参考模型统计
实时性	端到端延迟/处理帧率	延迟 P95 ≤ 200 ms; 处理帧率 ≥ 10 Hz	延迟 P95 ≤ 100 ms; 处理帧率 ≥ 20 Hz	安全相关闭环控制应采用增强级或更严格要求
时间一致性	多传感器同步误差	P95 ≤ 5 ms	P95 ≤ 1 ms; 紧耦合定位宜 ≤ 0.5 ms	与6.2.9时间基准要求保持一致
数据质量	丢包率/有效率	丢包率 ≤ 1%; 有效率 ≥ 95%	丢包率 ≤ 0.1%; 有效率 ≥ 98%	按传感器链路和输出结果分别统计
鲁棒性	精度衰减/功能保持	扰动下精度衰减 ≤ 30%; 功能保持率 ≥ 90%	扰动下精度衰减 ≤ 20%; 功能保持率 ≥ 95%	覆盖光照、遮挡、通信、算力、振动等扰动
可靠性	MTBF/MTTR	MTBF ≥ 1000 h; MTTR ≤ 30 min	MTBF ≥ 3000 h; MTTR ≤ 10 min	按制造商声明的任务模式和故障定义统计

注：基本级为通用最低要求，增强级适用于高动态、高安全、人机混行、足式/轮足运动、机械臂操作、多机协同等具身智能场景；具体产品可根据应用边界声明不适用项，但应说明替代方案和验证依据。

7.3 感知性能要求

7.3.1 一般要求

感知性能应反映系统对环境目标、空间结构和语义信息的获取与理解能力。系统应在制造商声明的目标类别范围、目标距离范围、目标状态、环境参数和数据标注规则下，达到表7.2-2规定的基本级或增强级要求。

性能验证应明确样本选取方式、样本数量、有效样本判定规则和统计周期，并采用平均值、最大值、P95、RMSE或其他适宜统计量形成可复核结果。

7.3.2 目标识别性能

当系统具备目标检测或目标识别能力时，应在目标识别范围、识别准确率、识别速度和识别稳定性方面达到表7.2-2要求或制造商声明的更严格要求。目标识别性能至少应包括mAP、精确率、召回率、F1分数、识别延迟和连续稳定输出率等指标。

制造商应声明：

- 识别目标类别、类别集合、目标尺寸/距离范围和遮挡适用范围；
 - 识别准确率指标，包括 mAP、Precision、Recall、F1 分数及统计口径；
 - 识别速度指标，包括处理帧率、端到端延迟和输出更新频率；
 - 识别稳定性指标，包括连续帧类别跳变率、短时遮挡后重识别成功率和误检/漏检判定规则；
 - 样本规模、样本分布、动态/静态目标比例、照度范围、背景复杂度、标注规则和判定规则。
- 除另有声明外，识别性能应基于独立测试样本进行验证，并应与第9章试验方法保持一致。

7.3.3 目标定位性能

当系统具备静态或动态目标位置、姿态或轨迹输出能力时，应满足目标位置误差、目标姿态误差、更新频率和时间同步要求，指标应不低于表7.2-2要求或制造商声明的更严格要求。

制造商应声明：

- a) 目标距离范围；
- b) 目标尺寸和目标类型；
- c) 观测角度和坐标系定义；
- d) 真值获取方式；
- e) 所采用的统计量。

7.3.4 自身定位性能

当系统具备自身定位能力时，应满足绝对位姿误差、相对位姿误差、定位更新频率和定位连续性要求，指标应不低于表7.2-2要求或制造商声明的更严格要求。

制造商应声明：

- a) 测试路径长度和路径类型；
- b) 运动速度范围和转向特征；
- c) 真值参考系统类型；
- d) 采样间隔和统计周期；
- e) 所采用的误差定义和统计方法。

7.3.5 建图性能

当系统具备环境建图能力时，应满足局部点位误差、全局闭环残差、地图完整性和地图更新一致性要求，指标应不低于表7.2-2要求或制造商声明的更严格要求。

制造商应声明：

- a) 地图类型；
- b) 参考模型或参考地图来源；
- c) 环境尺度；
- d) 典型表面材质特性；
- e) 有效区域定义和地图缺失判定规则。

7.3.6 语义理解性能

当系统具备语义分割、语义分类或语义地图构建能力时，应满足语义分割准确率、平均交并比、语义地图一致性和语义输出稳定性要求，指标应不低于表7.2-2要求或制造商声明的更严格要求。

制造商应声明：

- a) 语义类别集合；
- b) 标注真值来源；
- c) 样本规模；
- d) 地图更新周期；
- e) 统计方式和判定规则。

7.4 实时性与时间一致性要求

7.4.1 一般要求

系统应满足闭环控制和任务执行对时效性的要求。实时性测试应基于统一时间基准开展，并应明确端到端延迟的边界定义。

7.4.2 端到端延迟

系统应对从原始采集到结果发布全过程的总时长进行评价。端到端延迟可分解为采集延迟、传输延迟、算法处理延迟和发布延迟。

制造商应声明：

- a) 延迟起止边界；
- b) 时间戳采集方式；
- c) 算法配置和运行模式；
- d) 链路配置和负载水平；
- e) 统计周期和统计量。

7.4.3 处理帧率

系统应能够在规定输入条件和负载水平下保持声明的处理帧率。处理帧率可采用平均值、最小值或其他适宜统计量表示。

7.4.4 时延抖动

系统应控制连续输出过程中的时延波动。时延抖动可采用标准差、P95 或其他统计量进行评价。

7.4.5 时间同步误差

多传感器系统应评价时间同步误差。制造商应声明同步机制、传感器组合方式、误差测量方法及允许误差范围。

7.5 数据质量要求

7.5.1 一般要求

系统应保证输入数据和输出结果在完整性、有效性和一致性方面满足声明要求。

7.5.2 丢包率

系统应对采集或传输过程中的数据丢失情况进行评价。制造商应声明统计周期、链路类型、数据类型和负载状态。

7.5.3 有效率

系统应对满足质量要求的有效数据比例进行评价。制造商应声明有效性判定规则、异常值处理规则和相关环境条件。

7.6 鲁棒性要求

7.6.1 一般要求

系统在环境扰动、动态遮挡、传感器故障、通信异常、算力受限、振动或机械冲击等非理想工况下，应能够维持核心感知能力，并保持性能在制造商声明的允许衰减范围内。

制造商应声明鲁棒性相关指标的适用范围、扰动类型、扰动强度、持续时间、恢复条件和判定准则。

7.6.2 扰动项要求

鲁棒性测试应覆盖可能影响空间感知结果稳定性的典型扰动项。扰动项可包括但不限于：

- a) 光照变化；
- b) 低纹理、高反光或透明材质环境；
- c) 动态目标密集通过或关键区域遮挡；
- d) 单传感器遮挡、污染或断连；
- e) 通信丢包、链路拥塞或时延抖动；
- f) 算力受限、处理器降频或资源竞争；
- g) 振动扰动；
- h) 机械冲击。

7.6.3 精度衰减系数

系统应对扰动条件下性能指标相对于基准条件的下降比例进行评价。

制造商应声明基准条件、扰动条件和相应性能衰减系数。

除另有规定外，扰动条件下的性能下降比例不应超过制造商声明值。

7.6.4 功能保持率

系统应评价在扰动条件下维持核心感知功能的能力。

制造商应声明核心功能定义、判失条件和功能保持率指标。

核心功能可包括但不限于目标检测、障碍识别、自身定位、环境建图和安全避障相关感知输出。

7.6.5 光照变化适应性

在照度快速变化、逆光、低照度或局部强反射条件下，系统应能够维持制造商声明范围内的目标识别、定位或建图能力。

制造商应声明照度范围、变化速率及相应性能边界。

7.6.6 低纹理和高反光环境适应性

在低纹理、高反光、透明或重复纹理环境中，系统应能够维持制造商声明范围内的深度感知、空间定位或地图构建能力。

制造商应声明相关环境特征及对应性能边界。

7.6.7 动态遮挡适应性

在动态目标密集通过、局部遮挡或关键视场被短时遮挡的条件下，系统应能够维持核心感知功能，或在声明时间内恢复稳定输出。

制造商应声明遮挡比例、遮挡持续时间及恢复要求。

7.6.8 传感器异常适应性

当单一关键传感器发生遮挡、污染、模糊、漂移或断连时，系统应能够触发备用感知路径、降级运行机制或异常告警机制。

制造商应声明异常类型、触发条件、恢复时间或允许漂移范围。

7.6.9 通信与算力异常适应性

在通信丢包、链路拥塞、处理器降频、内存压力升高或带宽受限条件下，系统应能够优先保障核心感知链路和安全相关输出。

制造商应声明链路异常条件、资源受限边界和核心功能保持要求。

7.6.10 振动适应性

系统在具身智能载体运行过程中受到持续振动、周期振动或随机振动时，应能够维持制造商声明范围内的核心感知性能，不应因振动引起传感器明显失准、数据异常中断或感知结果不可接受漂移。

制造商应声明：

- a) 振动类型；
- b) 振动方向；
- c) 振动频率范围；
- d) 振动幅值或加速度水平；
- e) 持续时间；
- f) 振动条件下的性能衰减边界。

对于依赖外参稳定性的多传感器系统，振动后应验证传感器安装状态和标定状态是否仍满足声明要求。

7.6.11 冲击适应性

系统在受到机械冲击、跌落冲击、碰撞冲击或动作瞬态冲击后，应能够保持结构连接完整、核心功能可用，或在制造商声明时间内恢复至可接受运行状态。

制造商应声明：

- a) 冲击类型；

- b) 冲击方向；
- c) 峰值加速度或等效冲击强度；
- d) 脉冲持续时间；
- e) 冲击次数；
- f) 冲击后的功能保持要求和恢复要求。

冲击后，系统应对关键传感器状态、安装稳定性、标定有效性和核心感知输出进行检查。

7.6.12 记录要求

鲁棒性测试过程中，应记录扰动注入前、扰动施加期间和扰动恢复后的关键数据。记录内容宜包括但不限于：

- a) 扰动类型及扰动参数；
- b) 扰动开始与结束时间；
- c) 感知结果及其置信度；
- d) 性能指标变化情况；
- e) 降级策略触发状态；
- f) 告警信息；
- g) 恢复时间；
- h) 关键系统状态量。

7.7 可靠性要求

7.7.1 平均无故障时间

系统的平均无故障时间应不低于制造商声明值。制造商应声明故障定义、统计周期、运行工况和任务模式。

7.7.2 平均修复时间

系统在发生故障后恢复至正常状态的平均时间应不大于制造商声明值。制造商应声明故障类型、恢复边界和人工参与条件。

7.8 扩展性要求

系统宜支持新增传感器、算法模型、感知插件或目标类别的扩展接入。扩展后，核心感知性能不应低于制造商声明的最低要求。

制造商应声明：

- a) 扩展内容；
- b) 扩展前后系统配置；
- c) 性能对照基准；
- d) 兼容性边界；
- e) 扩展后性能影响说明。

7.9 能效性能要求

7.9.1 一般要求

系统在不同运行模式下的平均功耗、峰值功耗和单位任务能耗应满足制造商声明值，并应满足具身智能载体的供电和热管理约束。

7.9.2 平均运行功耗

应评价感知任务运行过程中的平均功率。制造商应声明运行模式、算力负载、供电条件和环境温度。

7.9.3 峰值功耗

应评价系统在规定工况下的最大功率。制造商应声明峰值触发条件、采样频率和测量位置。

7.9.4 单位任务能耗

当适用时，应评价完成单位感知任务或单位运行时间所消耗的能量。制造商应声明任务定义、统计周期和运行模式。

8 系统要求

8.1 系统组成要求

具身智能空间感知系统应由感知单元、数据处理单元、环境表达单元、接口与通信单元、安全与运维单元以及必要的支撑资源组成。

系统组成应满足以下要求：

- a) 感知单元应能够完成环境信息和本体状态信息的获取；
- b) 数据处理单元应能够完成预处理、融合、识别、定位、建图、语义理解和状态估计等处理；
- c) 环境表达单元应能够输出几何地图、语义地图、目标状态或其他空间感知结果；
- d) 接口与通信单元应能够支持系统内部和外部数据交互；
- e) 安全与运维单元应能够支持系统状态监测、日志管理、故障诊断、访问控制和异常告警；
- f) 支撑资源应能够满足系统实时运行所需的算力、存储、带宽和供电要求。

8.2 系统集成要求

8.2.1 一般要求

系统集成应保证各组成单元之间在机械安装、供电、时钟、通信、数据格式、坐标关系和运行逻辑方面相互匹配，并应满足设计文件规定的接口关系和性能边界。

8.2.2 机械集成要求

应完成硬件适配与兼容性测试，确保传感器、计算单元、通信部件及相关附件的安装应牢固可靠，不应因运行振动、冲击、热变形或典型动作载荷造成松动、偏移或功能失效。

传感器安装位置应避免被本体结构、执行机构或附属装置遮挡，并应满足视场覆盖和维护便利性要求。

8.2.3 电气集成要求

系统供电设计应满足各模块额定工作要求，并应具备过压、欠压、浪涌、短时中断或瞬态扰动下的必要保护能力。

关键模块的供电状态应可监测、可记录，并应在异常时触发告警或保护动作。

8.2.4 时间与坐标集成要求

系统应采用统一的时间基准和空间参考关系/空间坐标体系，支持NTP、PTP等时间同步协议，多传感器、多模块之间的时间同步关系、坐标转换关系和标定参数应一致、可管理、可追溯。

8.2.5 软件集成要求

系统软件应采用模块化设计，支持各功能模块的协同运行。模块间的数据接口、调用关系、运行状态和异常处理逻辑应明确。兼容主流操作系统并支持参数配置，同时应具备权限管理、数据加密功能等安全性要求。

8.3 系统功能要求

8.3.1 基本功能

系统应具备以下基本功能：

- a) 环境信息和本体状态信息采集；
- b) 数据预处理与质量控制；
- c) 多源数据时空同步与融合；
- d) 自身定位、目标定位或状态估计；
- e) 环境建图、空间表达或语义地图构建；

- f) 目标识别、场景理解或语义解析（适用时）；
- g) 感知结果输出、共享与质量标识；
- h) 状态监测、异常告警与降级运行。

8.3.2 扩展功能

根据应用需求，系统可具备以下扩展功能：

- a) 语义地图构建与持续更新；
- b) 动态目标跟踪与运动趋势预测；
- c) 跨模态语义解析与上下文理解；
- d) 环境异常检测与风险提示；
- e) 离线数据回放、诊断分析与离线工作能力；
- f) 在线标定、自校正与自恢复；
- g) 多智能体或多节点协同感知；
- h) 新增传感器、算法插件或目标类别扩展。

8.3.3 核心功能保持

在部分传感器异常、资源受限、低负载、通信异常或环境扰动条件下，系统应能够维持制造商声明的核心功能正常运行，或按预设策略进入降级运行状态。

8.4 系统运行要求

8.4.1 一般要求

系统应在制造商声明的运行模式和适用条件下稳定运行，并应明确各运行模式下可达到的功能边界和性能指标，包括但不限于感知范围、输出频率、端到端延迟、定位/识别/建图精度、数据有效率、资源占用、功耗、告警阈值和恢复时间。相关指标应与第6章技术要求和第7章性能要求一致。

8.4.2 配置管理要求

系统应支持配置参数管理。关键配置项应包括但不限于传感器参数、通信参数、标定参数、时间同步参数、算法参数、输出策略、告警阈值和权限配置。配置变更应可记录、可追溯，必要时应具备版本控制和回退机制。同时配置参数修改后，应能快速生效，不影响系统正常使用。

8.4.3 运行模式要求

系统应明确不同运行模式下的功能边界、资源占用和性能边界。运行模式可包括正常运行模式、低功耗模式、降级模式、诊断模式、离线验证模式、休眠模式和应急/安全模式等。

应急/安全模式适用于传感器严重异常、通信中断、算力不足、感知结果置信度持续偏低或存在安全风险的场景。进入该模式后，系统应优先保障安全相关感知输出、告警信息和最小可用状态信息，并按预设策略限制非必要功能或请求上层控制系统采取安全处置。

8.4.4 日志与记录要求

系统应对原始数据、关键处理结果、系统状态、故障事件、告警事件和配置变更进行记录。记录内容应满足问题定位、结果复核、性能验证和责任追溯的需要。

8.4.5 回放与复现要求

系统应支持基于记录文件的离线回放与过程复现。回放结果应与在线处理流程保持一致或具备可比性。

8.5 系统性能满足性要求

系统在交付和验证时，应证明其满足第7章规定的相关性能要求。

对于具备相应功能的系统，应至少对以下性能进行声明和验证：

- a) 识别性能；
- b) 定位性能；

- c) 建图性能；
- d) 语义理解性能；
- e) 实时性；
- f) 数据质量；
- g) 鲁棒性；
- h) 可靠性；
- i) 扩展性；
- j) 能效性能。

制造商应明确各项性能的适用范围、测试条件要素、统计口径和判定依据。

8.6 系统鲁棒性与环境适应性要求

8.6.1 一般要求

系统应具备对环境变化、动态干扰、传感器异常、通信异常、资源波动以及振动冲击等非理想因素的适应能力。

8.6.2 环境适应性要求

系统应根据适用范围声明其可适应的环境条件，包括但不限于：

- a) 照度范围；
- b) 温度和湿度范围；
- c) 粉尘、雾气或污染条件；
- d) 低纹理、高反光或透明材质环境；
- e) 室内、室外或半开放环境特征。

8.6.3 振动与冲击适应性要求

对于安装于移动载体、足式载体或作业载体的空间感知系统，应考虑运行振动和机械冲击影响。

系统在制造商声明的振动和冲击条件下，不应出现结构性松动、关键功能失效、标定参数不可接受漂移或核心感知输出不可用。

8.6.4 降级与恢复要求

系统在非理想工况下，应具备告警、降级、切换、隔离或恢复能力。恢复后的系统应满足制造商声明的恢复时间和性能恢复边界。

8.7 系统接口与互操作要求

8.7.1 对内接口要求

系统内部模块之间的数据接口、时序关系和调用关系应明确，接口定义应统一，并满足系统集成和维护需求。各模块通过内部接口实现协同控制，控制模块可通过内部接口实时获取各模块工作状态、下发控制指令，传感器模块可通过内部接口将采集的数据实时传输至数据处理模块，确保系统内部形成高效协同的工作闭环。

8.7.2 对外接口要求

系统应提供满足上层功能使用需求的输出接口。输出内容可包括目标信息、位姿信息、地图信息、语义信息、质量信息和状态信息。对外接口应具有清晰的数据定义、调用规则和错误处理机制。

8.7.3 互操作要求

系统应支持与上层规划控制模块、导航模块、操作模块、任务管理模块或运维平台的互联互通。对于异构平台和异构中间件环境，系统应明确兼容边界和适配方式。

8.8 系统安全要求

8.8.1 一般要求

系统应具备身份鉴别、访问控制、数据保护、完整性校验、安全审计和异常告警能力，符合国家网络安全、数据安全相关法律法规及相关要求。

8.8.2 数据与接口安全要求

系统对敏感数据、关键配置、远程接口和跨节点传输链路应采取必要的保护措施，防止未授权访问、篡改、泄露或伪造。

8.8.3 网络安全

系统应具备严格的访问控制机制，区分管理员、操作员、访客等不同权限，明确各权限的操作范围，未授权用户无法访问系统核心功能、配置参数及敏感数据，支持与外部网络隔离，可根据应用场景需求配置网络访问策略，限制不必要的网络连接，降低网络安全风险。

8.8.4 安全运行要求

系统应能够识别关键安全事件，包括但不限于非法访问、配置异常变更、关键模块异常退出和数据完整性异常，并应形成审计记录。

8.9 系统运维与维护要求

8.9.1 状态监测要求

系统应具备对传感器状态、时钟状态、资源占用、链路状态、温度、电源和关键服务状态进行监测的能力。

8.9.2 故障诊断要求

系统应具备对传感器故障、链路异常、数据异常、标定漂移、模型异常和服务失效进行识别、定位和告警的能力。

8.9.3 维护支持要求

系统应支持在线维护、参数调整、模块替换、标定复核、软件升级和日志导出。维护活动不应破坏系统关键配置和安全边界。

8.9.4 可审计性要求

系统运行、配置变更、异常处置和升级维护等活动应具备可审计性，相关记录应完整、准确、可追溯。

8.10 系统交付文件要求

制造商交付系统时，应至少提供以下文件或资料：

- a) 系统说明书；
- b) 系统组成清单；
- c) 传感器参数及安装信息；
- d) 接口定义文档；
- e) 配置说明和版本信息；
- f) 标定参数及其管理说明；
- g) 运行环境声明；
- h) 性能声明及适用条件说明；
- i) 安全配置说明；
- j) 试验或验证报告；
- k) 运维与维护说明。

8.11 系统符合性要求

系统符合性应结合第6章和第7章进行综合判定。
符合性判定可包括以下内容：

- a) 技术要求符合性；
- b) 性能要求符合性；
- c) 接口一致性符合性；
- d) 安全要求符合性；
- e) 运维要求符合性；
- f) 交付文件完整性符合性。

系统符合性证实可采用文件审查、接口检查、静态分析、测量、试验、运行日志核查、记录核查、故障注入试验、压力试验、振动试验、冲击试验和对比分析等方法，具体按本文件相关章节执行。

9 评估与试验方法

9.1 评估原则

针对系统的评估应满足以下原则：

- a) 可追溯性：评估过程中使用的原始数据、真值数据、配置参数、计算脚本、模型版本、评估工具和结果文件应具备唯一标识，并宜通过哈希值、签名或版本编号建立关联关系；
- b) 可复现性：在相同输入数据、相同软硬件配置和相同版本条件下，评估结果应具有一致性或满足声明的一致性偏差范围；
- c) 独立性：评估数据集应独立于训练数据集；当采用公开数据集或自建数据集时，应避免训练集与评估集发生交叉污染；
- d) 覆盖性：评估样本和试验条件应覆盖制造商声明的适用范围及关键条件要素；
- e) 一致性：试验环境、真值参考、时间基准、数据处理规则和统计方法应保持一致；
- f) 客观性：评估结果应基于原始记录、真值数据和规定计算方法得出，必要时应进行复核。

9.2 评估环境与设备要求

9.2.1 真值系统要求

用于提供参考标准的外部测量或定位系统应满足评估精度要求。真值系统可包括但不限于光学动捕系统、全站仪、高精度激光跟踪仪、参考扫描系统或其他经验证的高精度测量系统。

真值系统的静态和动态测量精度应优于被测系统相应声明精度。对于核心指标验证，真值系统精度宜优于被测系统声明精度的 3 倍及以上；对于高精度验证场景，宜优于 10 倍。

真值系统应具备有效期内的检定、校准或等效校验记录，并宜可追溯至国家计量基准、国际计量基准或经认可的校准体系。

9.2.2 时空同步要求

真值系统的采样频率应满足被测指标计算所需的时间分辨率要求，并宜高于被测系统最高输出频率。

真值系统与被测系统之间应建立统一时间基准，并应采用适宜的时间同步方式，如 PTP、硬件触发脉冲或其他高精度授时机制。

时间同步精度应满足被测系统时间一致性评估要求，并提供同步精度验证记录。

9.2.3 参考模型与参考数据要求

用于识别、定位、建图和语义理解评估的参考模型、真值数据或标注数据应来源明确、定义清晰、格式完整，并应能够支持相应指标计算。

当采用人工标注数据时，应明确标注规则、标注工具和一致性控制方式；当采用外部参考模型时，应明确参考模型的获取方法、精度等级和适用边界。

9.2.4 评估数据集要求

评估所用数据集应满足独立性、完整性和可校验性要求。

离线原始数据集、真值数据集和相关中间文件应具有数字签名、哈希值或等效校验机制，以保证数据在采集、传输、存储和处理过程中的完整性。

9.2.5 评估工具要求

用于计算性能指标的软件脚本、评估工具和第三方分析工具应具备明确版本标识。

在同一评估周期内，评估工具和脚本应保持版本冻结；如发生变更，应记录变更原因、变更内容和影响分析。

9.3 评估流程

9.3.1 评估准备

应明确评估目标、评估范围、适用指标、测试条件和判定依据，完成试验环境搭建、真值系统检查和系统状态确认，并形成相应准备记录。

9.3.2 配置冻结

评估前应记录并冻结被测系统的关键配置，包括但不限于：

- a) 硬件配置；
- b) 软件版本；
- c) 算法模型版本
- d) 标定参数文件；
- e) 时间同步参数；
- f) 关键运行参数；
- g) 评估脚本和工具版本。

配置冻结后，评估期间不应随意变更。确需变更时，应重新记录并说明原因。

9.3.3 测试执行

应按规定步骤采集原始感知数据、真值数据和系统日志，并保证采集过程连续、时间基准统一、记录完整。

试验过程中应实时监控被测系统和真值系统状态，发现异常时应按规定处理并形成记录。

9.3.4 数据处理

应采用已冻结版本的评估脚本或工具，对原始数据进行解析、对齐、筛选、匹配和统计计算。数据处理过程中，应保持指标计算口径一致，并记录脚本版本、处理参数和异常处理规则。

9.3.5 结果复核

对关键评估结果、异常点位和异常统计结果，应进行复核。

必要时，复核工作宜由非原始执行人员完成，以提高结果客观性和可靠性。

9.3.6 报告归档

评估完成后，应形成标准化评估报告，并对原始数据、真值数据、计算脚本、统计结果和相关记录进行归档保存。

归档资料应满足后续复查、复现和追溯要求。

9.4 识别性能试验与评估

9.4.1 试验目的

验证系统对目标对象的检测和识别能力。

9.4.2 试验条件

试验应依据制造商声明的目标类别、样本规模、目标尺度分布、遮挡比例、照度范围和背景复杂度进行。

评估数据应覆盖静态目标和动态目标；适用时，还应覆盖不同距离、不同角度和不同密度条件。

9.4.3 试验步骤

试验按以下步骤进行：

- a) 准备带真值标注的测试数据集或实体测试场景；
- b) 运行被测系统输出识别结果；
- c) 将系统输出与真值进行匹配；
- d) 统计 TP、FP、FN；
- e) 计算平均召回率、检测精确率、F1 分数、全类平均精度等指标。

9.4.4 记录内容

应记录样本规模、类别分布、目标距离、遮挡情况、环境条件、识别结果和统计结果。

9.5 语义理解性能试验与评估

9.5.1 试验目的

验证系统语义分割、语义分类或语义地图结果与真值之间的一致程度。

9.5.2 试验条件

试验应依据制造商声明的语义类别集合、标注规则、样本规模、语义地图更新周期和统计方式进行。

9.5.3 试验步骤

试验按以下步骤进行：

- a) 准备带语义真值标注的数据集或测试场景；
- b) 运行被测系统输出语义结果；
- c) 将系统输出与真值对齐；
- d) 计算平均交并比、分类准确率或语义地图一致性等指标。

9.5.4 记录内容

应记录语义类别集合、标注规则、样本数量、输出结果和统计结果。

9.6 目标定位与自身定位性能试验与评估

9.6.1 试验目的

验证目标定位误差、自身定位绝对位姿误差和相对位姿误差。

9.6.2 试验条件

试验应依据制造商声明的目标距离范围、目标尺寸、测试路径长度、运动速度范围、路径类型、坐标系定义和真值系统类型进行。

9.6.3 试验步骤

试验按以下步骤进行：

- a) 设置测试区域、目标和参考路径；
- b) 使用真值系统采集目标真值或轨迹真值；
- c) 运行被测系统采集输出结果；
- d) 在统一坐标系和统一时间基准下进行对齐；
- e) 计算目标位置误差、绝对位姿误差和相对位姿误差。

9.6.4 记录内容

应记录目标类型、目标距离、测试路径、运动模式、真值系统信息、系统输出轨迹和误差统计结果。

9.7 建图性能试验与评估

9.7.1 试验目的

验证环境建图结果的几何精度和一致性。

9.7.2 试验条件

试验应依据制造商声明的地图类型、环境尺度、参考模型来源、表面材质特性和有效区域定义进行。

9.7.3 试验步骤

试验按以下步骤进行：

- a) 建立参考模型或参考地图；
- b) 运行被测系统进行建图；
- c) 将输出地图与参考模型进行配准；
- d) 计算点云重投影误差、局部点位误差、全局闭环残差和回环检测成功率等指标；
- e) 统计地图完整性和一致性结果。

9.7.4 记录内容

应记录参考模型来源、配准方式、建图结果、误差结果和完整性结果。

9.8 实时性与时间一致性试验与评估

9.8.1 试验目的

验证系统的算法处理延迟、发布抖动、端到端延迟和时间戳对齐偏差。

9.8.2 试验条件

试验应依据制造商声明的延迟边界定义、时间戳采集方式、输入分辨率、传感器频率、系统负载和链路配置进行。

9.8.3 试验步骤

试验按以下步骤进行：

- a) 配置统一时间基准；
- b) 在规定运行模式下采集原始时间戳、处理时间戳和发布时间戳；
- c) 计算算法处理延迟、发布抖动和端到端延迟；
- d) 对多传感器系统测量时间戳对齐偏差。

9.8.4 记录内容

应记录运行模式、负载状态、时间戳采集方式、延迟统计结果、抖动统计结果和同步偏差结果。

9.9 数据质量与传输质量试验与评估

9.9.1 试验目的

验证系统的数据完整性、有效率、平均丢包率和链路质量。

9.9.2 试验条件

试验应依据制造商声明的统计周期、链路类型、数据类型、数据负载和有效性判定规则进行。

9.9.3 试验步骤

试验按以下步骤进行：

- a) 在规定工况下连续运行被测系统；
- b) 采集网络层、系统层和应用层日志；
- c) 统计发送包数、接收包数、丢包数和异常数；
- d) 计算平均丢包率、有效率及相关质量指标。

9.9.4 记录内容

应记录统计周期、链路状态、数据类型、负载状态、丢包情况和有效性统计结果。

9.10 鲁棒性试验与评估

9.10.1 试验目的

验证系统在非理想工况下的性能保持能力和功能保持能力。

9.10.2 试验条件

试验应依据制造商声明的扰动类型、扰动强度、持续时间、恢复条件和判失准则进行。

扰动项可包括但不限于：

- a) 光照变化；
- b) 低纹理、高反光或透明材质环境；
- c) 动态遮挡；
- d) 传感器污染、遮挡或断连；
- e) 通信异常；
- f) 算力受限；
- g) 振动；
- h) 冲击。

9.10.3 实验步骤

试验按以下步骤进行：

- a) 在基准条件下测量基准性能；
- b) 注入规定扰动；
- c) 在扰动条件下运行系统；
- d) 计算性能保持率和性能衰减系数；
- e) 记录功能保持情况、降级动作和恢复过程。

9.10.4 振动与冲击试验

对需验证振动和冲击适应性的系统，应在制造商声明的振动频率范围、加速度水平、冲击方向、峰值加速度和持续时间条件下进行试验。

试验前后应检查安装状态、标定状态和核心感知性能变化。

9.10.5 记录内容

应记录扰动类型、扰动参数、扰动时长、性能变化、告警信息、降级状态和恢复结果。

9.11 可靠性试验与评估

9.11.1 试验目的

验证系统平均无故障时间和自动恢复时间等可靠性指标。

9.11.2 试验条件

试验应依据制造商声明的故障定义、统计周期、运行工况、任务模式和恢复边界进行。

9.11.3 试验步骤

试验按以下步骤进行：

- a) 在规定工况下连续运行系统；
- b) 记录故障发生时间、故障类型和恢复时间；
- c) 统计平均无故障时间；
- d) 对适用故障执行故障注入试验，并统计自动恢复时间。

9.11.4 记录内容

应记录运行时间、故障次数、故障类型、恢复过程和统计结果。

9.12 扩展性试验与评估

9.12.1 试验目的

验证系统在新增传感器、算法模型、感知插件或目标类别后的性能变化。

9.12.2 试验条件

试验应依据制造商声明的扩展内容、扩展前后配置、兼容性边界和性能对照基准进行。

9.12.3 试验步骤

试验按以下步骤进行：

- a) 测量扩展前基准性能；
- b) 接入新增模块；
- c) 在相同条件下重复执行相关性能试验；
- d) 比较扩展前后性能结果并计算扩展后性能保持率。

9.12.4 记录内容

应记录扩展内容、配置变化、兼容性处理方式和性能对比结果。

9.13 能效性能试验与评估

9.13.1 试验目的

验证系统的平均运行功耗、峰值功耗、单位任务能耗和能效比。

9.13.2 试验条件

试验应依据制造商声明的运行模式、算力负载、供电条件、环境温度、任务定义、统计周期和测量位置进行。

9.13.3 试验步骤

试验按以下步骤进行：

- a) 将系统设置到规定运行模式；
- b) 采用功率测量装置同步测量系统功耗；
- c) 在规定统计周期内记录瞬时功率、累计能耗和处理帧率；
- d) 计算平均功耗、峰值功耗、单位任务能耗和能效比；
- e) 对不同模式下结果进行比较分析。

9.13.4 模式切换试验

对于支持多种运行模式的系统，应在模式切换过程中记录功耗变化、切换时间和功能保持情况，并验证切换后系统是否满足声明要求。

9.13.5 记录内容

应记录运行模式、供电条件、环境温度、算力负载、瞬时功率、累计能耗、处理帧率和统计结果。

9.14 评估结果复核与报告

9.14.1 结果复核

对关键指标结果、异常值、边界样本和异常点位，应进行复核。

复核宜包括原始数据检查、真值检查、时间对齐检查、计算脚本检查和统计口径检查。

9.14.2 评估报告

评估完成后，应形成评估报告。评估报告至少应包括以下内容：

- a) 被测系统名称、型号、版本和配置；
- b) 评估依据；
- c) 评估日期、地点和人员；
- d) 评估环境条件；
- e) 真值系统和参考设备信息；

- f) 评估数据集和样本说明；
- g) 配置冻结信息；
- h) 评估脚本和工具版本；
- i) 试验步骤和参数设置；
- j) 原始记录摘要；
- k) 统计方法；
- l) 评估结果；
- m) 异常情况说明；
- n) 结论。

9.14.3 归档要求

评估过程中形成的原始数据、真值数据、日志文件、配置冻结记录、脚本版本信息、复核记录和评估报告应进行归档保存，以满足复查、复现和追溯要求。
