

团 体 标 准

T/GMIQMA XXX—2024

车间作业移动机器人集群调度系统设计规 范

Design specifications for scheduling system of mobile robots cluster
used in workshops

(征求意见稿)

2024—XX—XX 发布

2024—XX—XX 实施

广东省机械工业质量管理协会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	5
5 组成、分类、功能	6
6 设计原则	9
7 设计要求	11
8 运行维护要求	15
9 性能和技术指标	19
10 检验和试验方法	22
附录 A（资料性）调度系统拓扑结构	25
附录 B（规范性）调度系统报文格式	26
附录 C（资料性）调度系统检验表	27

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。

本文件由华南智能机器人创新研究院提出。

本文件由广东省机械工业质量管理协会归口。

本文件起草单位：广东嘉腾机器人自动化有限公司、华南智能机器人创新研究院、佛山大学、佛山市人工智能学会、……

本文件主要起草人：李文威、……。

车间作业移动机器人集群调度系统设计规范

1 范围

本文件规定了车间作业移动机器人集群调度系统（以下简称“调度系统”）的术语和定义、缩略语、组成、分类、功能、设计原则、设计要求、运行维护要求、性能和技术指标以及检验和试验方法等。

本文件适用于面向车间作业的移动机器人集群调度系统，不适用于人机协作移动机器人集群调度系统、室外移动机器人集群调度系统、空中和水中的移动机器人集群调度系统以及特殊环境下的移动机器人集群调度系统。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是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 8567-2006 计算机软件文档编制规范

GB/T 15532-2008 计算机软件测试规范

GB/T 20721-2022 自动导引车 通用技术条件

GB/T 38634.2-2020 系统与软件工程 软件测试 第2部分：测试过程

GB/T 41402-2022 物流机器人 信息系统通用技术规范

GB/T 42830-2023 移动机器人 词汇

3 术语和定义

GB/T 42830-2023 中 3.1、3.2、3.3、3.5、3.6 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

移动机器人集群 mobile robots cluster

由多台移动机器人组成的，用于协同完成车间运输任务的机器人自动化系统。

3.2

移动机器人集群调度系统 mobile robots cluster scheduling system (MRCSS)

协调和控制多台移动机器人并行、有序、高效运行的智能控制系统。

3.3

调度软件 scheduling software

用于协调和控制多台移动机器人协同完成车间运输任务的应用软件。

3.4

订单 order

上层业务系统向调度系统下达需要执行的业务数据。

[来源：T/SSITS 204-2023，术语和定义 3.3]

3.5

任务 task

根据当前执行订单，允许工业应用移动机器人从当前位置开始运动的相关地图资源及动作指令序列。

[来源：T/SSITS 204-2023，术语和定义 3.4]

3.6

状态 status

在工业应用移动机器人中，状态是指车体位置状态、运行状态、任务状态、电池状态、异常事件状态和设备数据等。

[来源：T/SSITS 204-2023，术语和定义 3.5]

3.7

状态码 status code

用于表示移动机器人当前状态的数字编码。

3.8

地图 map

为工业应用移动机器人做路径规划时所使用的场景数据，包含点、段、站等元素。

[来源：T/SSITS 204-2023，术语和定义 3.2]

3.9

导航标记物 deadlock

用于帮助移动机器人进行定位和导航的特定标记。

3.10

多机编队 multi-robot formation

为执行多机协同的运输任务，多台移动机器人按照一定的结构形式在三维空间内形成的相对稳定的队形，并且编队结构能根据外部情况和任务需求进行动态调整。

3.11

机载 robot-mounted

移动机器人本体上搭载的软硬件。

3.12

微基站 micro cell

微型化的基站，通常指在楼宇中或密集区安装的小型基站。

[来源：T/SSITS 205-2023，术语和定义 3.8]

3.13

上行 up-link

数据从被调度的移动机器人传输至调度系统的过程。

3.14

下行 down-link

数据从调度系统传输至被调度的移动机器人的过程。

3.15

上位系统 upper system

位于调度系统上层，向调度系统推送订单或任务的工业控制系统或工业信息系统。

3.16

联动设备 relevant equipment

通过 I/O 接口与移动机器人互联，并实现信息共享、指令传递和任务协同的设备。

3.17

任务分配 task assignment

在约束函数、效用函数和任务关联函数的制约下，将各个任务分配给空闲移动机器人执行的过程。

3.18

路径规划 path planning

调度系统根据任务要求和环境约束，设计一条从起始点到目标点的连续避障运动路径的过程。

3.19

交通管制 traffic control

为以避免碰撞、减少拥堵和提高效率，基于一定的通行策略，对移动机器人的行驶进行限制和引导的方法。

3.20

阻塞 obstruction

移动机器人因密度过大而行驶缓慢或停驶的现象。

3.21

死锁 deadlock

多台移动机器人因争夺有限的资源而相互等待，导致各个任务都无法继续向前推进的一种状态。

3.22

效用函数 utility function

反映调度系统综合性能优劣的加权函数，其权重根据目标偏好设定。

3.23

调度并发量 concurrent quantity of scheduling

同一时间内，调度系统可同时控制的移动机器人最大台数。

3.24

总存储容量 total storage capacity

调度系统内所有服务器能够存储的数据量的总和。

3.25

无线信号强度 wireless signal strength

无线网络信号的强弱程度。

3.26

作业面积 covering area

在调度系统的控制下，移动机器人集群可执行任务的物理空间范围。

3.27

位置控制精度 position control accuracy

在调度系统控制下，移动机器人在工作环境中的实际位置与期望位置之间的偏差值。

3.28

数据传输 RTT RTT of data transmission

数据从发送端发出为起始，到发送端收到来自接收端的确认信息为止所经历的往返时间。

3.29

响应时间 response time

从发出请求到收到响应所需的时间。

3.30

丢包率 packet loss rate

在数据传输过程中，丢失的数据包数量占所发送数据包总数的比例。

3.31

容错率 fault tolerance rate

调度系统能够容许的移动机器人故障比率，可通过计算故障移动机器人台数与受调度移动机器人总台数的比值来得出。

3.32

任务执行成功率 task execution success rate

在一定时间内，成功完成的任务数量与总任务数量的比例。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

2D: 二维 (Two-dimensional)

3D: 三维 (Three-dimensional)

5G: 第五代移动通信技术 (5th Generation Mobile Communication Technology)

A/D: 模数转换器 (Analog to Digital Converter)

AGV: 自动导引车 (Automated Guided Vehicle)

AI: 人工智能 (Artificial Intelligence)

AMR: 自主移动机器人 (Autonomous Mobile Robot)

AP: 接入点 (Access Point)

APS: 先进规划与排程系统 (Advanced Planning and Scheduling System)

API: 应用程序编程接口 (Application Programming Interface)

ARP: 地址解析协议 (Address Resolution Protocol)

BIM: 建筑信息模型 (Building Information Modeling)

C/S: 客户端/服务器 (Client/Server)

CPS: 信息物理融合系统 (Cyber-Physical System)

ERP: 企业资源计划 (Enterprise Resource Planning)

FMS: 柔性制造系统 (Flexible Manufacturing System)

HMI: 人机界面 (Human Machine Interface)

HTTPS: 超文本传输安全协议 (Hypertext Transfer Protocol Secure)

I/O: 输入/输出接口 (Input/Output)

ID: 身份 (Identity)

IP: 网际互连协议 (Internet Protocol)

IMR: 工业应用移动机器人 (Industrial Mobile Robot)

JSON: JS 对象简谱 (JavaScript Object Notation)

LAN: 局域网 (Local Area Network)

LPWAN: 低功率广域网络 (Low-Power Wide-Area Network)

MAS: 多智能体系统 (Multi-Agent System)

MES: 制造执行系统 (Manufacturing Execution System)

MR: 移动机器人 (Mobile Robot)

MQTT: 消息队列遥测传输 (Message Queuing Telemetry Transport)

NP: 非确定多项式 (Non-deterministic Polynomial)

PRM: 概率路线图 (Probabilistic Road Map)

- RRT: 快速搜索随机树 (Rapidly-exploring Random Tree)
- RTT: 往返时间 (Round-Trip Time)
- SaaS: 软件即服务 (Software as a Service)
- SDK: 软件开发工具包 (Software Development Kit)
- TCP/IP: 传输控制协议/网际协议 (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)
- UDP: 用户数据报协议 (User Datagram Protocol)
- UWB: 超宽带 (Ultra-Wide Band)
- Wi-Fi: 无线保真 (Wireless Fidelity)
- WCS: 仓库控制系统 (Warehouse Control System)
- WMS: 仓库管理系统 (Warehouse Management System)
- XML: 可扩展标记语言 (Extensible Markup Language)

5 组成、分类、功能

5.1 结构组成

如图 1 所示，调度系统为层次型结构，由上至下可分为五层：应用层、调度层、通信层、执行层、感知层。

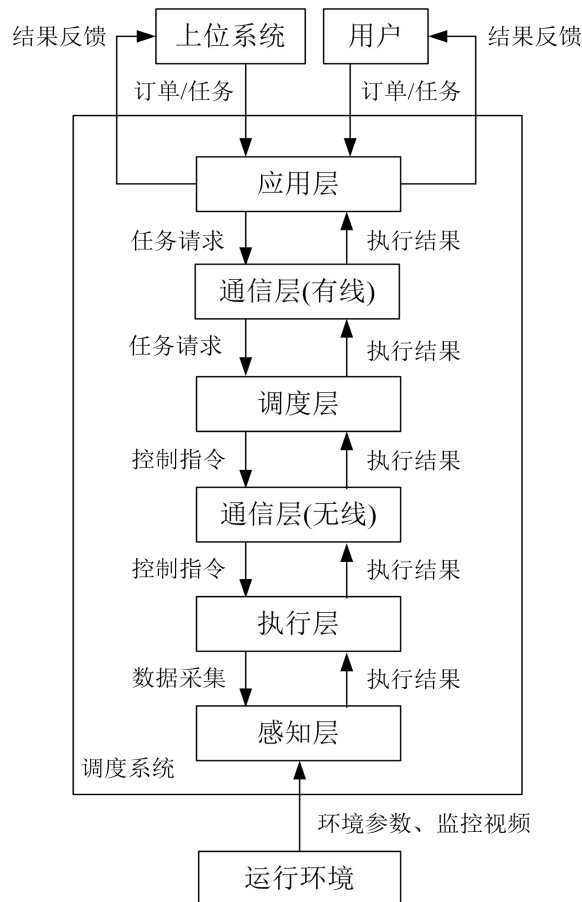


图 1 移动机器人集群调度系统的层次结构

- a) 应用层：接收和处理来自用户或上位系统推送的订单或任务请求，监控订单或任务的执行状态，包括图形用户界面、上位系统等；
- b) 调度层：根据订单或任务请求对移动机器人的运行进行调度和管理，包括调度软件、调度服务器和数据服务器等；
- c) 通信层：负责调度系统与应用层的有线通信以及调度系统与移动机器人的无线通信，包括微基站、交换机、路由器、集线器、无线 AP 等通信设备以及各种通信协议。
- d) 执行层：执行通信层下发的控制指令，包括移动机器人本体和联动设备等；
- e) 感知层：通过机载传感器采集移动机器人状态数据和车间环境数据，包括移动机器人机载传感器、环境参数采集传感器、监控相机等。

调度系统的实际拓扑结构应根据应用场景、任务需求以及移动机器人类型的不同灵活配置。调度系统的拓扑结构示例见附录 A。

5.2 类型划分

根据不同的分类方法，调度系统的类型可分为：

- a) 按服务模式划分为：SaaS 化调度系统和本地调度系统；
- b) 按空间形式划分为：平面（2D）调度系统和立体（3D）调度系统；
- c) 按运行模式划分为：无人化调度系统、人机协作调度系统和人工调度系统；
- d) 按工作节拍划分为：固定节拍调度系统、变节拍调度系统和无节拍调度系统；
- e) 按行驶路径划分为：物理轨道调度系统、虚拟轨道调度系统和无轨道调度系统；
- f) 按调度方式划分为：集中式调度系统、分布式调度系统和混合式调度系统；
- g) 按调度规模划分为：小型调度系统、中型调度系统、大型调度系统、超大型调度系统；
- h) 按兼容程度划分为：通用型调度系统和专用型调度系统；
- i) 按应用领域划分为：仓储物流调度系统和生产线调度系统。

5.3 主要功能

5.3.1 多模式运行

- a) 命令行模式：用户通过键入命令和数据控制调度系统执行单步操作；
- b) 批处理模式：调度系统读取用户输入的批处理脚本自动批量地执行任务；
- c) 交互界面模式：用户通过图形化界面操控调度系统的运行；
- d) 上位系统模式：调度系统将自身控制权交由上位系统，由上位系统控制其运行。

5.3.2 参数设置

- a) 地图参数设置：设置地图上的运行区、充电区、缓存区、障碍物、路网、虚拟轨道、节点、站点、停泊点等；
- b) 任务参数设置：设置任务优先级、起始工位、目标工位、起止时间等；
- c) 机器人参数设置：设置机器人的 IP 地址、位置、速度、加速度、朝向等；
- d) 系统运行参数设置：设置运行节拍、运行时间等。

5.3.3 智能调度

基于智能算法对移动机器人集群进行任务分配、路径规划和交通管制，使移动机器人集群安全、有序、高效地运行。

5.3.4 信息管理

- a) 用户管理：对用户信息、人员角色、操作权限等进行管理；
- b) 机器人管理：对机器人 IP 地址、机器人状态、机器人轨迹等进行管理；
- c) 地图管理：对地图创建、地图导入、地图编辑、地图列表、地图显示、地图导出、地图保存等进行管理；
- d) 订单管理：对订单新建、订单导入、订单列表、订单状态、订单优先级、订单修改、订单删除、订单开始时间、订单完成时间、订单完成进度等进行管理；
- e) 任务管理：对任务新建、任务导入、任务列表、任务状态、任务优先级、任务修改、任务删除、任务开始时间、任务完成时间、任务完成进度等进行管理；
- f) 日志管理：对用户操作日志、设备运行日志、软件运行日志、异常和故障日志等进行管理。

5.3.5 信息融合

- a) 单机信息融合：移动机器人对其自身传感器采集到的多源异构信息进行融合，以准确、全面地获取自身状态以及环境参数。
- b) 多机信息融合：多台移动机器人之间共享和整合各自获取的局部信息，实现更大场景、更高维度的信息融合，以更好地适应复杂环境，主要包括多机协同建图、多机协同定位、多机自组网通信等。

5.3.6 信息查询

调度系统应提供以下信息查询功能：

- a) 环境参数查询：可查询温度、湿度、大气压、光照等环境参数；
- b) 地图信息查询：可查询地图上的运行区、充电区、缓存区、障碍物、路网、虚拟轨道、节点、站点、停泊点等；
- c) 机器人信息查询：可查询移动机器人的位姿、速度、加速度、朝向、负载、电池电量、行驶里程、运行时间、运行轨迹、异常和故障等；
- d) 订单和任务信息查询：可查询订单数量、任务数量、订单开始时间、任务开始时间、订单完成时间、任务完成时间、订单完成进度、任务完成进度等；
- e) 系统信息查询：可查询硬件配置、硬件状态、软件版本、软件状态、系统用户、用户状态、I/O 端口状态、异常和故障、总行驶里程、总能耗、总运行时间、汇总报表、系统日志等。

5.3.7 实时监控

- a) 环境状态监控：实时监控车间的温度、湿度、大气压、光照等环境参数；
- b) 机器人状态监控：实时监控移动机器人的位置、速度、加速度、朝向、负载、电池电量、行驶里程、运行时间、运行轨迹、异常和故障等；
- c) 订单和任务状态监控：实时监控订单和任务的执行进度，包括已完成的步骤和剩余步骤；
- d) 通信和连接状态监控：实时监控移动机器人、联动设备、调度系统之间的网络连接状态；
- e) 视频监控：通过机器人机载相机或场地上方固定相机获取现场实时监控视频；
- f) 异常和故障监控：对于异常事件和故障，实时生成警报信息，给出对应的错误代码，并通知运维人员进行检查和处理。

5.3.8 状态记忆

- a) 位姿记忆：调度系统自动记忆移动机器人在环境中的位姿，当系统恢复后，移动机器人可快速重新定位到上次位姿；

- b) 轨迹记忆：调度系统自动记忆移动机器人走过的路径，当系统恢复后，移动机器人可继续沿上次路径继续行驶；
- c) 任务记忆：调度系统自动记忆任务中断数据，当系统恢复后，被中断的任务可从断点处继续执行；
- d) 连接记忆：调度系统自动记忆硬件设备的网络连接状态，当系统恢复后，硬件设备可快速重新联网。

5.3.9 自动充电

移动机器人在电量不足时，能够自动寻找充电桩进行对接充电，全程无需人工干预。

5.3.10 系统安全

应符合本文件中 6.6 的各项规定。

5.3.11 数据对接

- a) 系统与系统的对接：调度系统可与上位系统进行数据对接，如 APS、MES、ERP、WCS、WMS 等；
- b) 系统内部设备之间的对接：调度系统中，各台移动机器人之间以及移动机器人与联动设备之间可通过 I/O 接口进行数据对接。

5.3.12 二次开发

调度系统应向用户提供 API 或 SDK，允许用户通过编写代码的方式对调度系统进行个性化功能定制、流程定制和界面定制等，以扩展现有调度系统的功能。二次开发方式至少应包括以下两者之一：

- a) 高级语言二次开发：调度系统应允许专业程序设计人员利用 C++、C#、Java 等面向对象程序设计语言进行二次开发；
- b) 低代码二次开发：调度系统应允许非专业程序设计人员通过图形化操作方式（如模块拖拽、堆积木、手动连线等）进行低代码二次开发。

6 设计原则

6.1 兼容性

通用型调度系统应兼容多种可能情况：

- a) 兼容多种行业领域，如汽车、3C、新能源、快递、医药、食品等；
- b) 兼容多种智能制造场景，如搬运、分拣、配送、仓储等；
- c) 兼容多种轮式 IMR 进行混合调度，如 AGV、AMR、智能叉车等；
- d) 兼容多种移动机器人导航方式，如磁导航、激光导航、视觉导航、惯性导航、二维码导航等；
- e) 兼容多种无线通信方式，如 5G、Wi-Fi、Bluetooth、ZigBee、UWB、LPWAN 等；
- f) 兼容多种标准 I/O 接口，便于进行上位调用和底层接入；
- g) 兼容常见操作系统，如 Windows、Linux、Android 等；
- h) 兼容主流高级程序设计语言，如 C++、C#、Java 等。

6.2 并发性

调度系统可以同时调度并管理多台移动机器人并发作业,小型调度系统可同时调度的移动机器人数量为 2~10 台,中型调度系统可同时调度的移动机器人数量为 11~100 台,大型调度系统可同时调度的移动机器人数量为 101~1000 台,超大型调度系统可同时调度的移动机器人数量为 1001 台及以上。

6.3 实时性

调度系统对外部事件或请求能够快速响应:

- a) 选用低延迟的通信设备,优化调度策略,降低算法时间复杂度;
- b) 根据任务的紧急程度,设置任务的优先级,优先级高的任务先执行;
- c) 对于强实时性场景,使用实时操作系统。

6.4 扩展性

未来需求变化时,调度系统应能够灵活地进行功能扩展,而不必对整个系统进行重建:

- a) 制定统一的接口规范、数据格式、数据结构、交互方式、通信方式、通信协议,为软硬件模块扩展提供统一标准;
- b) 硬件应采用插件化设计和模块化设计,可方便地进行存储空间、外围设备、I/O 端口等的扩展;
- c) 调度软件应采用开放式架构和模块化设计,可方便地进行软件模块扩展、系统版本升级、系统漏洞打补丁等。

6.5 可靠性

调度系统可长时间无故障运行,总体可靠性应趋近 100%:

- a) 调度系统具有较强的抗干扰能力,可长时间运行于车间作业场景;
- b) 调度系统硬件预期使用寿命应覆盖调度系统全生命周期;
- c) 调度系统软件运行稳定,不得出现崩溃、宕机、死循环、数据溢出等故障。

6.6 安全性

调度系统应由经过专门培训的人员进行操作,使用过程中杜绝发生安全事故,总体安全性趋近 100%:

- a) 对于无人化调度系统,应在移动机器人运行区域之外设置边界围栏或安全光幕;
- b) 移动机器人应设定安全距离,防止移动机器人运行过程中与联动设备、边界围栏等发生机械碰撞;
- c) 采取物理防护和固件安全措施,阻止未经授权的人员对硬件进行非法操作;
- d) 移动机器人及联动设备的运行应始终处于规定的使用环境和技术要求之内,不允许带故障运行;
- e) 不要触摸通电状态下的设备,以免发生触电危险;
- f) 应设置有机械式、电气式、界面式等急停装置,在意外状况下,可使用手动急停装置或自动调用智能算法等方式停止全部移动机器人及联动设备的运行;
- g) 当操作、编程、数据输入错误时,不应产生误动作导致的设备损坏、人员伤亡;
- h) 通过攻击检测、数据加密、身份验证、权限管理、访问控制、安全通道、代码混淆等多重机制保证软件运行安全和数据传输安全;
- i) 对软件使用过程中发现的安全漏洞等应及时进行识别、分析和打补丁;
- j) 有关安全性的相关参数应设置更改权限,普通用户不可修改;
- k) 《调度系统操作规程》、警示标识等应张贴在显眼位置,并保持其牢固、清晰和耐久。

6.7 易用性

调度系统应满足易用性要求,给用户带来高效、健康和舒适的操作体验:

- a) 操作台和用户界面的设计应符合人机工程学原理，用户的交互式体验良好；
- b) 操作台和用户界面应功能层次清晰、操作流程简单，便于操作人员使用。

6.8 容错性

调度系统在遇到局部异常、错误和故障时，具有保持正常运行并成功完成任务的能力：

- a) 在调度软件中引入异常检测、错误纠正、故障隔离、算法重组、参数调整、数据恢复等机制，当调度系统出现局部异常、错误和故障时，调度软件可以自动整合调度系统的完好部分正常运行；
- b) 配备冗余的备用电源、备用服务器、备用通信网络、备用移动机器人等设备，当调度系统出现局部异常、错误和故障时，调度系统可以自动切换到备用设备。

7 设计要求

7.1 设备配置

7.1.1 计算机设备

计算机设备涉及多种服务器，包括调度服务器、数据服务器、云服务器等。服务器的主频、内存容量、硬盘容量、I/O 接口的配置应根据实际要求确定并留有一定的余量。

- a) 调度服务器：调度服务器是调度系统的核心，负责接收并处理来自客户或上位系统的订单和任务请求，对移动机器人进行任务分配、路径规划、交通管制和实时监控；
- b) 数据服务器：数据服务器用于存储和管理调度系统的所有数据、文件，确保数据和文件的安全性、完整性和一致性，并提供高效的数据查询和更新能力；
- c) 云服务器：云服务器提供灵活、高效且安全的计算服务。对于大型和超大型调度系统，可根据需要配置多台云服务器用于高速计算。

7.1.2 通信设备

7.1.2.1 通信网络

通信网络主要包括：

- a) 专用有线 LAN：调度系统内的计算机设备之间，通过双绞线、同轴电缆或光纤等传输介质连接为专用有线 LAN。专用有线 LAN 的拓扑结构可根据情况采用总线型、环形、星形、树形或网状等；
- b) 专用无线 LAN：调度系统和移动机器人之间采用专用无线 LAN 进行通信。根据调度系统的作业面积、数据吞吐量等的不同，可选用一种蜂窝式或非蜂窝式无线通信方式（如 5G、Wi-Fi、Bluetooth、ZigBee、UWB、LPWAN 等）。对于干扰、弱网、断网等不良通信状况应有相应的处置措施。

7.1.2.2 通信协议

对应于计算机网络的四层参考模型，各层可采用的协议如下：

- a) 应用层可采用 HTTPS、MQTT、VDA5050 等协议；
- b) 传输层可采用 TCP、UDP 等协议；
- c) 网络层采用 IP（IPv4 或 IPv6）协议；
- d) 网络接口层可采用 Ethernet、Wi-Fi、ARP 等协议。

调度系统报文格式见附录 B。

7.1.2.3 通信设备

通信设备主要包括微基站、交换机、网关、路由器、集线器、无线 AP 等。应根据通信网络、通信协议、覆盖范围、网络带宽等要求，选用相应的高速率、低时延、高可靠性的工业级通信设备，通信设备的技术参数应满足支撑移动机器人集群正常作业的通信质量要求。

7.1.3 移动机器人

移动机器人应符合 GB/T 20721-2022 的要求，并具有以下特征：

- a) 机器人类型：应为 AGV（潜伏式、牵引式、顶升式、滚筒式、传送带式等）、AMR、智能叉车（堆垛式、地牛式等）、复合机器人等轮式 IMR；
- b) 机器人配置：移动机器人须配备满足使用要求的非接触式导航装置、自主避障装置、自动充电装置、无线通信装置、数据采集装置等；
- c) 机器人性能：移动机器人的各项性能指标应满足使用要求；
- d) 机器人数量：移动机器人配备数量按照生产效率或节拍要求计算，并按移动机器人总台数 2% ~ 5% 的比例配备一定数量的备份机。

7.1.4 电源

电源应满足以下要求：

- a) 电源输出应稳定、可靠，具有过压、欠压、过流、过载等保护功能；
- b) 电源输出电压应避免突变，电源线电压波动 < 10%；
- c) 电源具有一定的功率裕量，以应对未来可能的扩展和升级；
- d) 电源设计应符合相关的安全标准和规范，并制定防水、防火、防雷击措施。

7.1.5 其他设备

其他设备主要包括：

- a) 联动设备：如加工设备、上下料设备、遥控手柄、呼叫器、升降机、电梯、RFID 读写器、二维码读码器、条形码读码器等；
- b) 辅助设备：如监控相机、环境参数采集传感器、边界围栏、安全光幕、电子看板、照明系统等。

7.2 软件配置

7.2.1 操作系统

操作系统应满足以下要求：

- a) 服务器操作系统安装于服务器内，可选用 Windows Server、Linux、Unix 等；
- b) 机器人操作系统安装于移动机器人的工控机或嵌入式系统内，可选用 Linux、ROS、Android、Windows 等。

7.2.2 Web 服务器软件

在服务器内安装 Web 服务器软件，可选用 Apache、Nginx、Microsoft IIS 等。

7.2.3 数据库管理系统

在数据服务器内安装数据库管理系统，用于存储调度系统的实时运行数据和历史运行数据，可选用 MySQL、SQL Server、Oracle Database 等。数据库中应建立和保存系统配置表、用户信息表、地图信息表、机器人信息表、订单信息表、任务信息表、任务分配表、任务序列表、I/O 端口状态表、调度日志表等数据表。

7.2.4 安全软件

为免受恶意攻击和防止数据泄漏，应在调度服务器、数据服务器和移动机器人内分别安装安全软件，如防火墙、数据加密软件、入侵检测软件等。

7.2.5 上位系统

上位系统主要包括 APS、MES、ERP、WCS、WMS 等。

7.3 调度软件设计

7.3.1 坐标系和地图

7.3.1.1 坐标系

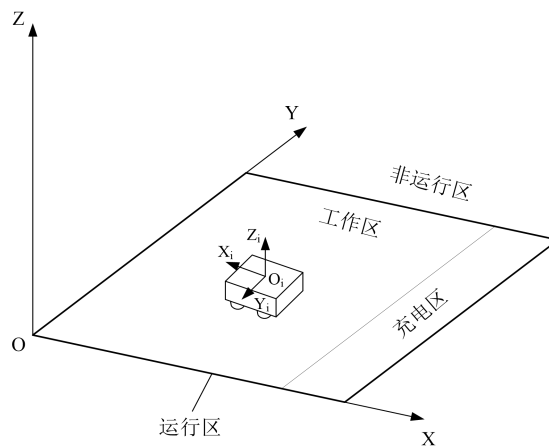


图 2 车间场地划分及坐标系规定示意图

如图 2 所示，将区域地面区域划分为运行区和非运行区，运行区又分为工作区和充电区。分别建立世界坐标系 $OXYZ$ 和 n 个局部坐标系 $O_i X_i Y_i Z_i$ 。

- 世界坐标系：世界坐标系的坐标原点位于机器人运行区的边界线上， X 轴方向与相邻墙体平行， Z 轴方向指向天花板， Y 轴方向通过右手螺旋定则确定。
- 局部坐标系：对每个移动机器人建立局部坐标系，坐标原点位于机器人车体中心， X 轴方向由车体中心指向车头， Z 轴方向指向天花板， Y 轴方向通过右手螺旋定则确定。

7.3.1.2 地图构建

在世界坐标系下，采用单机或多机协同的方式建立环境的地图。地图的表示可采用路网地图（有向图或无向图）、栅格地图、点云地图、拓扑地图、BIM 地图以及多种地图的组合。

7.3.2 核心算法

移动机器人集群调度问题具有 NP 复杂度，应联合运用多种算法等进行问题求解。为提高智能调度的效率，应选用稳定性好、时间复杂度较低的算法，并进行算法参数的调优。

- a) 建图和定位算法：建图和定位算法是利用移动机器人机载传感器建立环境增量地图并完成自身空间定位的算法，如 Cartographer 和 Gmapping 等；
- b) 订单分解算法：订单分配算法是把订单分解为互不重叠的任务，并根据各任务之间的独立、互斥和偏序关系，自动生成任务序列的算法；
- c) 任务分配算法：包括集中式分配算法和分布式分配算法，如匈牙利算法、拍卖算法和 MAS 算法等；
- d) 路径规划算法：如人工势场法、基于采样的算法（如 RRT、PRM）、启发式算法（如 A*算法、D*算法、Dijkstra 算法、Floyd 算法）和仿生学算法（如蚁群算法、粒子群算法）等；
- e) 交通管制算法；
- f) 多机编队算法：多机编队算法是用于控制多台移动机器人以一定的队形协同完成运输任务的算法，如 Leader-follower 算法等；
- g) 充电对接算法：充电对接算法是用于自主寻找充电桩并完成与充电桩对接的算法；
- h) 死锁检测算法：死锁检测算法是用于判断系统是否出现死锁的算法，如银行家算法等；
- i) 阻塞消解算法：阻塞消解算法是采用某种策略限制并发任务对移动机器人的请求，从而使系统阻塞状态得以解除的算法。

7.3.3 开发流程

调度系统的软件开发流程分为需求分析、方案设计、程序设计、软件测试和运行维护五个阶段。

- a) 需求分析阶段：收集用户需求，定义调度系统系统的功能和指标，提出完整、准确、清晰、具体的功能需求，输出软件需求说明书；
- b) 方案设计阶段：确定调度系统的整体架构和模块划分，定义调度系统各个模块的输入和输出，详细描述开发环境、数据结构、文件格式、接口规范和算法实现等，输出软件设计方案；
- c) 程序设计阶段：使用面向对象的高级程序设计语言进行软件的开发，程序语句应以结构化方式编写，输出比较成熟的源代码、可执行文件和软件设计报告；
- d) 软件测试阶段：设计测试用例，依次进行单元测试、集成测试、系统测试，验证和确认软件质量，输出软件测试报告。软件测试应符合 GB/T 15532-2008 和 GB/T 38634.2-2020 的要求；
- e) 运行维护阶段：在调度系统使用过程中，根据用户反馈的问题，不断地对软件源代码进行必要的扩充和删改，定期升级软件版本。

以上各阶段的技术文档编写应符合 GB/T 8567-2006 的要求。

7.3.4 界面设计

图形用户界面应直观、易用，并具有以下功能：

- a) 用户管理：用户注册、用户登录、密码找回、角色管理、权限控制等；
- b) 订单管理：订单新建、订单导入、订单列表、订单状态、订单优先级、订单修改、订单删除、订单开始时间、订单完成时间、订单完成进度；
- c) 任务管理：任务新建、任务导入、任务列表、任务状态、任务优先级、任务修改、任务删除、任务开始时间、任务完成时间、任务完成进度；
- d) 地图管理：地图创建、地图导入、地图编辑、地图列表、地图显示、地图导出、地图保存等；
- e) 路网设计：设计运行区、工作区、充电区、非运行区，设计运行轨道、节点、站点，设计障碍物、工位、充电桩、缓存区等的位置和范围；
- f) 机器人设置：设置机器人的位置、速度、加速度、朝向；

- g) 机器人管理：管理机器人列表、机器人状态、机器人轨迹等；
- h) 机器人控制：控制机器人的前进、后退、左转、右转、暂停机器人、急停等；
- i) 调度系统控制：启动系统、关闭系统、暂停系统、急停系统、单步语句运行、程序运行等；
- j) 现场环境监控：现场监控视频显示、环境监控参数显示；
- k) 故障与报警：异常提示、错误警告、故障报警等。

7.3.5 软件接口

- a) 调度软件可与 APS、MES、ERP、WCS、WMS 等上位系统无缝对接，并接受其控制；
- b) 调度软件可接收联动设备的数字 I/O 信号，以实现时序动作。非数字 I/O 信号应先进行 A/D 转换后再输入调度软件；
- c) 应采用较常见的文件格式（如 XML、JSON 等）作为调度数据的规范化交换格式；
- d) 转发调度数据时，应采用高强度的加密算法进行数据加密，不允许使用明文传输调度数据。

8 运行维护要求

8.1 运行条件

8.1.1 应用场景

调度系统可作为 FMS 或 CPS 等智能制造系统的子系统，应用于汽车、3C、新能源、快递、医药、食品等行业的搬运、分拣、配送、仓储等智能制造场景，实现对货物的高密度、高效率、低能耗自动运输。

8.1.2 环境条件

系统运行于室内平整场地，环境条件要求如下：

- a) 温度：20±15℃；
- b) 相对湿度：40%~80%；
- c) 大气压：86kPa~106kPa；
- d) 无强电磁干扰、无粉尘、无腐蚀性气体。

8.1.3 地面条件

- a) 区域及划分：车间场地应划分为运行区域和非运行区域，运行区域又包括工作区域和充电区域。各区域应通过划线进行明显区分。在非人机协作情景下，应当使用边界围栏、安全光幕等将运行区域与非运行区域隔开。
运行区域：移动机器人在工作或充电时，允许其活动的区域；
工作区域：移动机器人执行运输任务的区域；
充电区域：移动机器人进行对接充电的区域，区域内设有若干固定式充电桩；
非运行区域：除了运行区域以外的其他区域。
- b) 运行通道：运行通道分为单向运行通道和双向运行通道，平面运行通道和立体运行通道。运行通道上的地面应平整、坚硬、清洁、干燥、无异物，不得有移动机器人无法通过的凸台、沟槽、斜坡。地面应能承受移动机器人车轮的压力，可提供足够的附着力，导电性良好。
单向运行通道：只允许移动机器人单向通行的运行通道；
双向运行通道：允许移动机器人双向通行的运行通道；
平面运行通道：位于 2D 水平面上的运行通道；
立体运行通道：位于 3D 立体空间上的运行通道。

- c) 导航标记物：对于使用磁条、磁钉或二维码等导航的情况，应在地面上准确地铺设相应的导航标记物。

8.1.4 墙壁和顶棚条件

墙壁和顶棚应满足以下要求：

- a) 对于使用激光反光板导航的情况，应在墙壁适当高度上固定反光板；
- b) 顶棚应布置照明系统；
- c) 顶棚高度满足应调度系统运行要求；
- d) 在墙壁和顶棚上应预留通信设备、监控相机、环境参数采集传感器等的安装位置；
- e) 通信天线附近不得有大幅削弱、阻挡或屏蔽无线通信信号的结构物；
- f) 监控相机附近不得有阻碍视线的结构物。

8.1.5 网络条件

应结合应用场景、室内环境等进行无线通信网络的布设，实现对目标区域的连续覆盖，并尽可能避免同频干扰。

无线通信网络的通信标准和工作频段要求如下：

- a) 对于 5G 网络，采用 3GPP R15/R16/R17 蜂窝网络通信标准，工作频段为 n41、n46、n78 及 n79；
- b) 对于 Wi-Fi 网络，采用 IEEE 802.11 系列通信标准，工作频段为 2.4 GHz 及 5.8 GHz；
- c) 对于其他无线通信网络，采用的通信标准和使用的的工作频段应满足调度系统运行要求。

无线通信网络的技术要求如下：

- a) 布设位置：天馈系统布置于移动机器人集群上方，可壁挂或置顶；
- b) 传输方向：上行、下行；
- c) 网络带宽：50 kbps 及以上；
- d) 信号强度：不低于-80 dbm。

8.1.6 机器人注册

移动机器人新加入调度系统时，应先向调度系统注册机器人信息，以便调度系统进行调度规划。需填写的信息包括：

- a) ID：工业互联网唯一标识；
- b) IP 地址和端口号；
- c) 型号规格：结构型式、驱动方式、导航方式、通信方式、品牌、型号等；
- d) 运动学参数：许用的最大速度、最小速度、最大加速度、最小加速度等；
- e) 物理参数：电量、输入电压、输入电流等；
- f) 几何参数：车体长度、车体宽度、车体高度、车轮直径、轮距、轮胎宽度等；
- g) 负载参数：货物尺寸、最大载重、举升高度等。

8.1.7 机器人装载

机器人装载应满足以下要求：

- a) 移动机器人装载货物的最大重量不应超过移动机器人载重的允许值；
- b) 移动机器人装载货物的长度、宽度、高度和体积不应超过允许值；
- c) 对于气体、液体、粉体物料，应预先装入密闭容器，再使用移动机器人载运；
- d) 对于小件或形状不规则的货物，可预先装入托盘、料框或货架等载具，再使用移动机器人载运；
- e) 对于不宜直接放置于移动机器人上的货物，可先将其放置于栈板上，再使用移动机器人载运；

- f) 对于单台移动机器人无法搬运的大件货物，可采用多机编队的方式进行载运；
- g) 易燃、易爆、腐蚀性、放射性等危险物料不允许使用移动机器人进行载运。

8.2 运行流程

8.2.1 首次部署流程

调度系统首次部署流程如下：

- a) 场地准备：场地规划、地面清洁、导航标记物铺设、电源配置、充电桩配置、安全防护装置安装等；
- b) 设备初始化：参数标定、参数设置、里程计归零、时钟同步等；
- c) 线网连接：电源线连接、充电桩连接、传感器连接、网络连接、I/O 端口连接等；
- d) 软件安装：安装操作系统、数据库管理软件、通信软件、监控软件、调度软件等；
- e) 环境地图构建：控制移动机器人匀速环绕场地一圈，采集并保存环境地图；
- f) 移动机器人注册：按本文件中 8.1.6 的要求填写注册信息；
- g) 系统参数设定：设置机器人运动参数、传感器参数、通信参数、任务参数、安全参数等；
- h) 系统测试和参数调优：通过模拟实际场景和任务，检查系统的各项性能，并根据测试结果进行必要的参数调整和优化；
- i) 上线试运行：在真实场景中试用调度系统，检验系统运行的稳定性和可靠性。

8.2.2 开机和自检流程

调度系统上电和自检流程如下：

- a) 接通总电源；
- b) 开启调度系统各设备电源；
- c) 开启调度软件；
- d) 调度软件控制各台移动机器人开机；
- e) 调度软件开启各台移动机器人机载操作系统；
- f) 调度软件对各设备状态进行自检；
- g) 如果自检通过，调度系统将其控制权交给用户，用户使用调度软件开启调度系统；
- h) 如果自检不通过，调度系统向用户反馈设备的异常、错误或故障；
- i) 调度软件控制各台移动机器人协同地执行任务。

8.2.3 急停和恢复流程

调度系统急停和恢复流程如下：

- a) 因紧急状况发生，操作人员按下调度系统急停按钮；
- b) 非故障急停应保持设备现场状态和保存软件现场参数；
- c) 故障急停应通过人工干预方式排除故障；
- d) 满足恢复运行条件时，操作人员取消急停；
- e) 系统恢复正常工作状态，继续执行未完成的任务或执行新任务。

8.2.4 关闭流程

调度系统关闭流程如下：

- a) 等待最后一项任务执行完成；
- b) 调度软件控制各台移动机器人回到初始位置；

- c) 调度软件关闭各台移动机器人机载操作系统;
- d) 调度软件关闭各台移动机器人电源;
- e) 关闭调度软件;
- f) 关闭调度系统各设备电源;
- g) 关闭总电源。

8.3 运行状态

8.3.1 单机运行状态

单台移动机器人处于若干有限个状态中,并在这些状态之间转移。以8个状态谓词分别表示机器人各方面所处的不同状态,共组合成256种状态。移动机器人状态谓词及值见表1。以8位二进制数表示移动机器人的状态,其状态范围从00000000到11111111。调度系统开机后,正常的起始状态为开机等待状态(10000000),正常的结束状态为正常停机状态(00000000)。移动机器人状态码示例见表2。

表1 移动机器人状态谓词及值

谓词取值	已经开机	发生故障	交通管制	电量不足	正在运行	正在充电	接到任务	搭载负载
真值(是)	1	1	1	1	1	1	1	1
假值(否)	0	0	0	0	0	0	0	0

表2 移动机器人状态码示例

状态码	开机等待	空载取货	负载送货	空闲运行	回桩充电	空闲暂停	充电暂停	管制暂停	故障暂停	故障停机	正常停机
二进制	10000000	10001010	10001011	10001000	10011000	10000000	10000100	10100000	11000000	01000000	00000000
十六进	80	8A	8B	88	98	80	84	A0	C0	40	0

8.3.2 集群运行状态

移动机器人集群的运行状态是在统计各台移动机器人运行状态的基础上确定的。移动机器人集群的运行状态如下:

- a) 停机状态;
- b) 暂停状态;
- c) 等待任务状态;
- d) 任务不足状态;
- e) 正常运行状态;
- f) 局部阻塞状态;
- g) 死锁状态。

对于死锁和长时间局部阻塞的情形,应当利用阻塞消解算法或人工干预的方式,使移动机器人集群恢复到正常运行状态;对于任务不足的情形,应当增加移动机器人的任务量,使移动机器人集群的任务饱和。

8.4 维护要求

应指定专人进行调度系统的维护和保养：

- a) 应保持系统运行场地的清洁，地面不得有油污、灰尘、异物；
- b) 地面上铺设的导航标记物应保持清洁和完好，对于污损、破损的导航标记物应及时更换；
- c) 硬件设备应在其显眼处粘贴标签，标明其类型和编号；
- d) 硬件设备应定期点检，对于存在问题的设备应及时维修或替换；
- e) 移动机器人应定期保养，注意防潮、防锈、防压、防静电；
- f) 调度软件应定期升级，升级后的软件版本应保持向下兼容；
- g) 应定期填写维护保养记录，包括例行检查记录、硬件故障记录和软件 BUG 记录等；
- h) 调度系统参数应定期备份，以便恢复至以前的系统状态；
- i) 系统长时间不使用时，应关闭总电源、拔掉电源线，放于干燥、通风的室内环境中妥善保管；
- j) 长时间未使用的系统首次使用时，应全面检验其状态和性能，满足启动要求时方可启动运行。

9 性能和技术指标

9.1 主要性能指标

9.1.1 状态变量

在世界坐标系下，第 i 台移动机器人的 t 时刻的状态表示为：

$$r_i(t) = [x_i, y_i, \theta_i]^T \dots\dots\dots (1)$$

其 $t+1$ 时刻的状态表示为：

$$r_i(t+1) = G r_i(t) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & x \\ -\sin \theta & \cos \theta & y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} r_i(t) \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- x_i, y_i ——机器人的位置坐标；
- θ_i ——机器人的方向角；
- G ——位姿变换矩阵；
- x, y ——机器人的位移；
- θ ——机器人的转角。

9.1.2 约束条件

a) 可通行约束：对于 $\forall r_i$ ：

$$U[(x_i, y_i), \delta + \varepsilon] \subset D_f \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- $U[(x_i, y_i), \delta + \varepsilon]$ ——表示以 (x_i, y_i) 为圆心，以 $\delta + \varepsilon$ 为半径的领域；
- D_f ——运行区内所有未被占据位置构成的集合；
- δ ——机器人的自转半径；
- ε ——机器人与障碍物的最小允许间距。

b) 最小间距约束：对于 $\forall r_i$ 和 $\forall r_j$ ：

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \geq d_{\min} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

d_{ij} ——第 i 台机器人和第 j 台机器人之间的距离；

d_{\min} ——两台机器人之间的最小允许间距。

c) 剩余电量约束：对于 $\forall r_i$ ：

$$p_i > p_{\min} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

p_i ——第 i 台机器人的剩余电量；

p_{\min} ——机器人允许的最小剩余电量。

d) 负载重量约束：对于 $\forall r_i$ ：

$$l_{ij} \leq m_{li} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

l_{ij} ——第 i 台机器人执行第 j 项任务的负载重量；

m_{li} ——第 i 台机器人可用的负载重量。

e) 速度和加速度约束：对于 $\forall r_i$ ：

$$\begin{cases} v_i \leq v_{\max} \\ \omega_i \leq \omega_{\max} \\ a_i \leq a_{\max} \\ \alpha_i \leq \alpha_{\max} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

v_i ——第 i 台移动机器人的速度；

v_{\max} ——移动机器人的最大速度限值；

ω_i ——第 i 台移动机器人的角速度；

ω_{\max} ——移动机器人的最大角速度限值；

a_i ——第 i 台移动机器人的加速度；

v_{\max} ——移动机器人的最大加速度限值；

α_i ——第 i 台移动机器人的角加速度；

α_{\max} ——移动机器人的最大角加速度限值。

9.1.3 性能指标及其优化

调度系统优化的目标是，在各种约束条件的制约下，动态调整机器人的状态变量，使系统的一种或多种性能指标达到最优，如行驶里程最短、行驶耗时最短、行驶能耗最小等。系统性能评估指标包括：

a) 行驶总里程：系统开启后，各台移动机器人行驶里程之和，即：

$$S_d = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q s_{ij} \quad \dots\dots\dots (8)$$

b) 行驶总耗时：系统开启后，各台移动机器人运行时间之和，即：

$$T_d = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q t_{ij} \quad \dots\dots\dots (9)$$

c) 行驶总能耗：系统开启后，各台移动机器人消耗的能量之和，即：

$$W_d = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q (m_i + l_{ij}) v_{ij}^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

d) 效用函数：总里程、总时间、总能耗的的加权平均，即：

$$E_d = k_1 S_d + k_2 T_d + k_3 W_d \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

E_d ——效用函数；

S_d ——行驶总里程；

T_d ——行驶总耗时；

W_d ——行驶总能耗；

n ——移动机器人台数；

q ——任务数；

$k_1 \sim k_3$ ——权重系数；

s_{ij} ——第 i 台机器人执行第 j 项任务的行驶里程；

t_{ij} ——第 i 台机器人执行第 j 项任务的行驶时间；

p_{ij} ——第 i 台机器人执行第 j 项任务的耗电量；

v_{ij} ——第 i 台机器人执行第 j 项任务的平均速度；

m_i ——第 i 台机器人的空载重量。

9.2 主要技术指标

调度系统的主要技术指标及值见表 3。

表 3 调度系统的主要技术指标

序号	技术指标	值
1	调度并发量	符合本文件 6.2 的要求
2	总存储容量	> 1 TB
3	无线信号强度	> -80 dbm
4	作业面积	达到规定的作业面积
5	位置控制精度	< 1 cm
6	数据传输 RTT	< 200 ms
7	响应时间	< 100 ms
8	丢包率	< 0.1%

9	容错率	< 5%
10	任务执行成功率	> 99.9%

10 检验和试验方法

10.1 调度系统软硬件检验方法

10.1.1 外购品检验方法

对于外购的设备和软件，其主要功能、主要性能、主要技术参数应不低于本文件要求，并附有合格证和说明书。使用外购设备或软件前，应对照产品说明书进行设备性能试验或软件试用，在确认设备或软件运行正常后才方可投入使用。无特殊情况，无须对合格的外购设备或软件进行技术参数的重复检验。

10.1.2 调度软件检验方法

参照调度软件的用户手册或操作指南，对调度软件的基本功能、调度效率、兼容性、并发性、实时性、扩展性、可靠性、安全性、易用性、容错性和技术文档进行检验。

- a) 基本功能检验：设计测试用例，采用单元测试、集成测试、系统测试、白盒测试、黑盒测试等多种方法对调度软件的基本功能进行交叉检验；
- b) 调度效率检验：参照本文件中 9.2.3 的要求进行检验；
- c) 兼容性、并发性、实时性、扩展性、可靠性、安全性、易用性、容错性的检验可参照本文件中 6.1 ~ 6.8 的要求进行；
- d) 技术文档检验：检验调度软件提供的用户手册或操作指南是否准确、完整。

10.2 调度系统性能试验方法

调度系统的运行试验可选择在虚拟场景、模拟场景或真实场景中开展，试验的次数和时长应根据具体试验需求确定。

- a) 数字孪生体试验：搭建调度系统及其应用场景的等比例数字孪生体，并在虚拟环境中进行调度过程仿真，获得调度系统各项运行数据；
- b) 模拟场景试验：在受控环境中搭建人工模拟场景，并在模拟场景中进行调度系统的运行试验，获得调度系统各项运行数据；
- c) 真实场景试验：在真实应用场景中部署调度系统，在真实条件下进行调度系统的运行试验，获得调度系统各项运行数据。

10.3 调度系统技术指标检验方法

10.4.1 调度并发量

调度系统内的移动机器人数量到达临界值 n 台后，如果继续增加移动机器人数量至 $n+1$ 台，此时调度系统将无法对 $n+1$ 台移动机器人进行同时调度，则调度系统的调度并发量为 n 台。

10.4.2 总存储容量

将调度系统内所有服务器的存储容量相加即为总存储容量。服务器的存储容量根据其产品说明书的记载确定。

10.4.3 无线信号强度

在运行区内，使用手持式频谱仪随机检测 10 个以上点位的无线信号强度，得到的最小信号强度不应低于规定值。

10.4.4 作业面积

通过调度系统控制移动机器人围绕作业区域边缘行驶一圈，如果移动机器人可以顺利完成，则表明已达到设定的作业面积。

10.4.5 位置控制精度

移动机器人的位置控制精度使用激光干涉仪进行测量。将靶球固定在移动机器人上，在额定速度和额定负载条件下让移动机器人按照编程序运行。如图 3 所示，示教移动机器人在 AB 两点（A 点为起点，B 点为终点，两点间距为机器人自转半径的 10 倍）之间往复运动 30 次，且每次在 A 点停留 3 秒。循环 30 遍每次停在 A 点时，用激光跟踪仪采集 A 点的坐标，偏离基线标识的最大值即为位置控制精度。

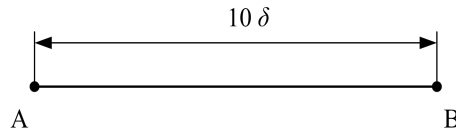


图 3 位置控制精度测量方法示意图

10.4.6 数据传输 RTT

数据传输最大 RTT 检测方法是：使用 ping 命令将 1 KB 的数据包从调度系统发送给指定的移动机器人，数据发送的时刻记为 t_1 ；调度系统接收到移动机器人确认数据的时刻记为 t_2 ；重复测试 3 次，取 $t_2 - t_1$ 的平均值即为数据传输 RTT。

10.4.7 响应时间

使用 ping 命令从调度系统向移动机器人发送运动控制指令，控制指令发送的时刻记为 t_1 ；运动控制指令被移动机器人执行的时刻记为 t_2 ；重复测试 3 次，取 $t_2 - t_1$ 的平均值即为调度系统的响应时间。

10.4.8 丢包率

分别进行上行和下行通信链路的 ping 测试。从调度系统向移动机器人 IP ping 1000 个数据包 3 次，从移动机器人向调度系统 IP ping 1000 个数据包 3 次，分别计算 6 次测试的丢包率，丢包率最大值应符合 GB/T 41402-2022 中 7.1 的要求。

10.4.9 容错率

调度系统运行过程中，随机将被调度移动机器人总台数 5% 的移动机器人同时人为停机，测试调度系统能否正常执行任务。

10.4.10 任务执行成功率

调度系统向移动机器人随机下发 100 个不同任务，记录任务被成功执行的次数。任务执行成功率按下式计算：

$$R_S = N_S \dots\dots\dots(12)$$

T/GMIQMA XXX—2024

式中：

R_s ——任务执行成功率(%)；

N_s ——任务执行成功次数。

调度系统检验表样表见附录 C。

附录 A

(资料性)

调度系统拓扑结构

图 A.1 和图 A.2 分别给出了基于 5G 和 Wi-Fi 的调度系统的拓扑结构示例。图中调度系统采用 C/S 架构，调度服务器为服务端，移动机器人为客户端。

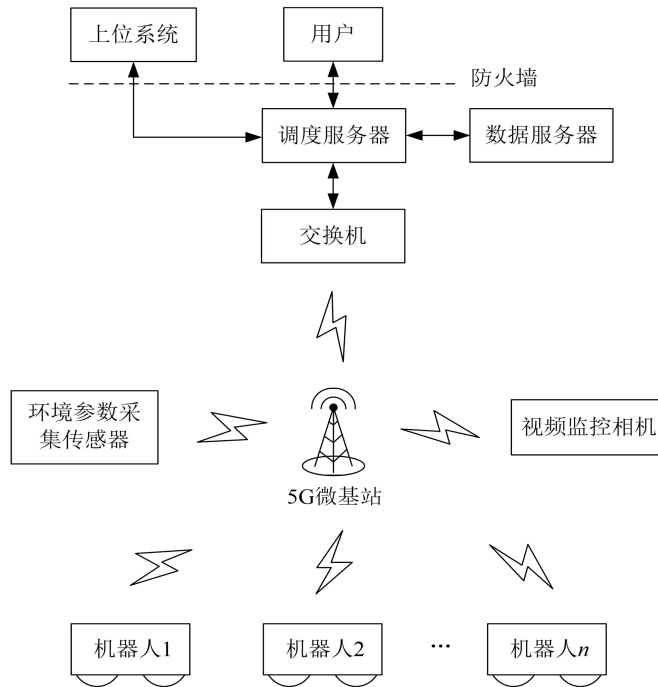


图 A.1 基于 5G 的调度系统拓扑结构示例

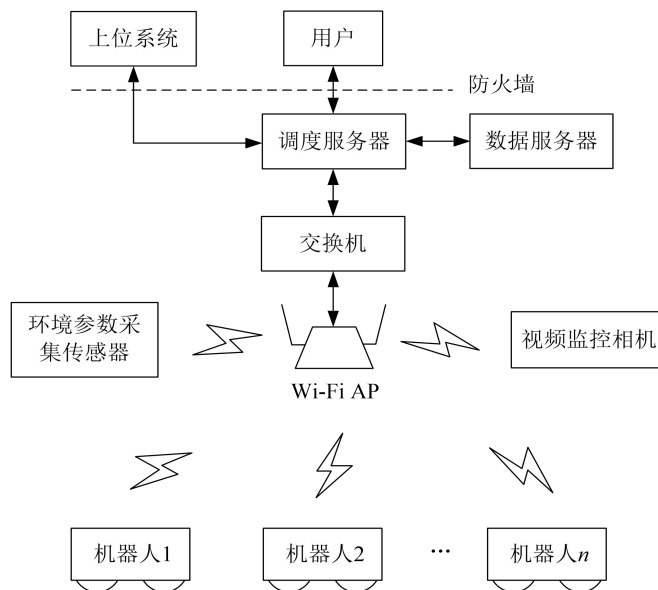


图 A.2 基于 Wi-Fi 的调度系统拓扑结构示例

附录 B

(规范性)

调度系统报文格式

调度系统与移动机器人的数据交互由报文帧头、指令数据、附加数据、校验码和报文帧尾五个部分组成，且按照小端字节序发送。报文格式示例如图 B.1 所示。

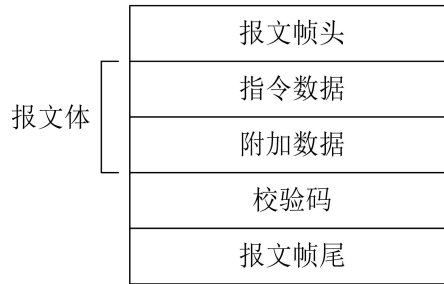


图 B.1 报文格式示例

a) 报文帧头

报文帧头包括报文类型、报文长度、源地址、目标地址和时间戳五个部分。

——报文类型：标示该报文的类型，具体类型如表 B.1 所示；

——报文长度：标示整个报文的长度；

——源地址：发送报文的系统或设备的 IP 地址；

——目标地址：接收报文的系统或设备的 IP 地址；

——时间戳：报文生成的时间。

表 B.1 报文类型表

类型	方向	类型描述	长度	选项
任务指令	下行：MRCSS→IMR	调度系统向移动机器人下达任务	定长	必选
机器人注册	上行：IMR→MRCSS	移动机器人向调度系统注册详细参数	定长	必选
地图数据	上行：IMR→MRCSS	移动机器人向调度系统发送地图数据	变长	必选
机器人状态	上行：IMR→MRCSS	移动机器人定时向调度系统发送自身状态	定长	必选
环境参数	上行：传感器→MRCSS	传感器向调度系统发送环境监测数据	定长	可选
监控视频	上行：相机→MRCSS	相机向调度系统发送实时监控视频	定长	可选
.....

b) 指令数据：指令数据包括指令和参数两部分。例如，对于任务指令 TASK()，其参数包括：任务类型、机器人目标位姿、机器人速度、任务优先级等；

c) 附加数据：根据具体指令数据附加的额外参数或信息；

d) 校验码：用于验证报文的完整性和真实性；

e) 报文帧尾：以结束标识标志报文的结束。

附录 C

(资料性)

调度系统检验表

表 C.1 为调度系统的检验表样表。

表 C.1 检验表样表

一、检验信息					
系统名称		系统型号		系统编号	
试验方法		检验地点		检验日期	
操作员		检验员		检验编号	
二、型号清单					
序号	名称	品牌	型号/版本	数量	备注
1	移动机器人				
2	调度软件				
3				
三、检验记录					
序号	检验项目	检验记录			检验结果
1	调度并发量				
2	总存储容量				
3	无线信号强度				
4	作业面积				
5	位置控制精度				
6	数据传输 RTT				
7	响应时间				
8	丢包率				
9	容错率				
10	任务执行成功率				
11				
四、检验结论					
检验结论		审核		批准	

注：1. 试验和检验方法应符合本文件中 10 的要求；2. 检验项目可根据实际情况增删。