

ANALOG DEVICES

工业移动机器人

革新未来工厂

请访问ANALOG.COM/MOBILE-ROBOTICS



前言

Shane O'Meara,
ADI公司工业自动化智能机器与机器人高级应用经理

工业机器人已从简单的重复性任务执行设备，演变为能够自主学习、适应环境并进行复杂决策的先进智能机器。当今制造业的自动化水平不断提升，推动工厂、仓库及其他场所运营效率持续改善。与此同时，工业移动机器人也需更频繁地适应不同工作流程和工艺变更。

自主移动机器人(AMR)和自动导引车(AGV)充当人与机器之间的纽带，将生产流程中的各个环节紧密相连。借助先进的传感器技术和精密的软件控制，移动机器人正变得更加智能、安全，在动态变化环境中的导航能力更强；同时，得益于高效的电池管理系统，续航时间也更长。

本电子书旨在全面概述推动工业移动机器人演进的设计挑战与技术创新，内容涵盖如何选择适合工业自动化需求的机器人类型，并深入探讨定位、导航、安全和运动控制等关键议题。相关的专家依托ADI在工业自动化领域的深厚积淀与全面的系统级专业知识，探讨了关键赋能技术如何应对挑战，助力实现更高效、更灵活的制造能力。

目录

工业移动机器人——革新未来工厂 4

依据工业自动化需求选择合适的方案——AGV还是AMR? 6

定位：实现真正自主移动机器人的关键 8

停、看、听——自主移动机器人如何感知和导航? 12

移动中保持互联——移动机器人的通信基石 16

时刻就绪——高效电池管理如何延长移动机器人续航时间 20

少了智能运动控制，移动机器人将寸步难行 24

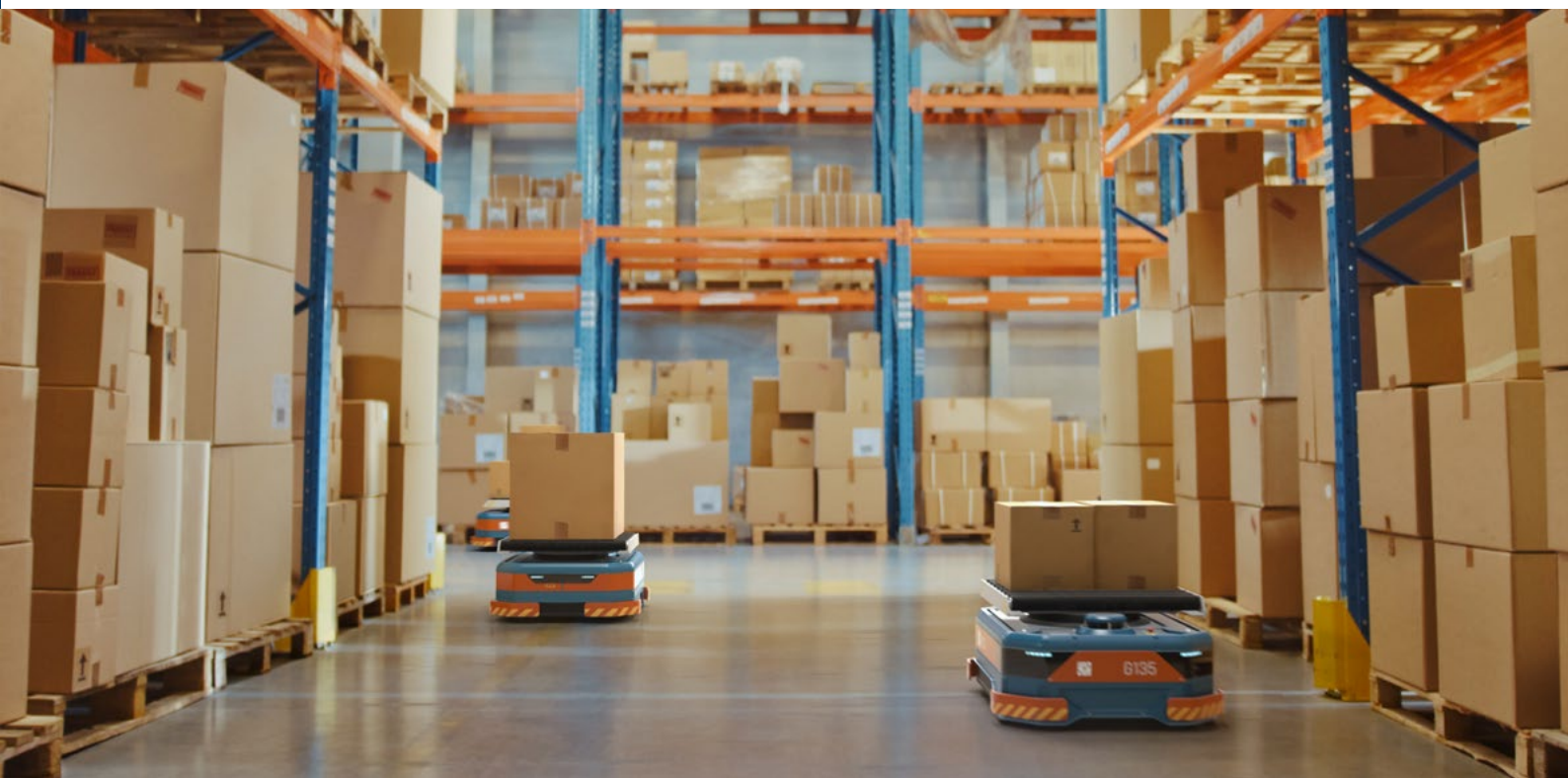
自主移动机器人规模持续扩大下的安全保障 28

机器人操作系统(ROS)如何改变移动机器人开发格局 32

构建自主移动机器人的软件架构基石 36

算法在移动机器人中扮演何种角色? 40

2025年及未来工业移动机器人的三大发展趋势 44



工业移动机器人——革新未来工厂

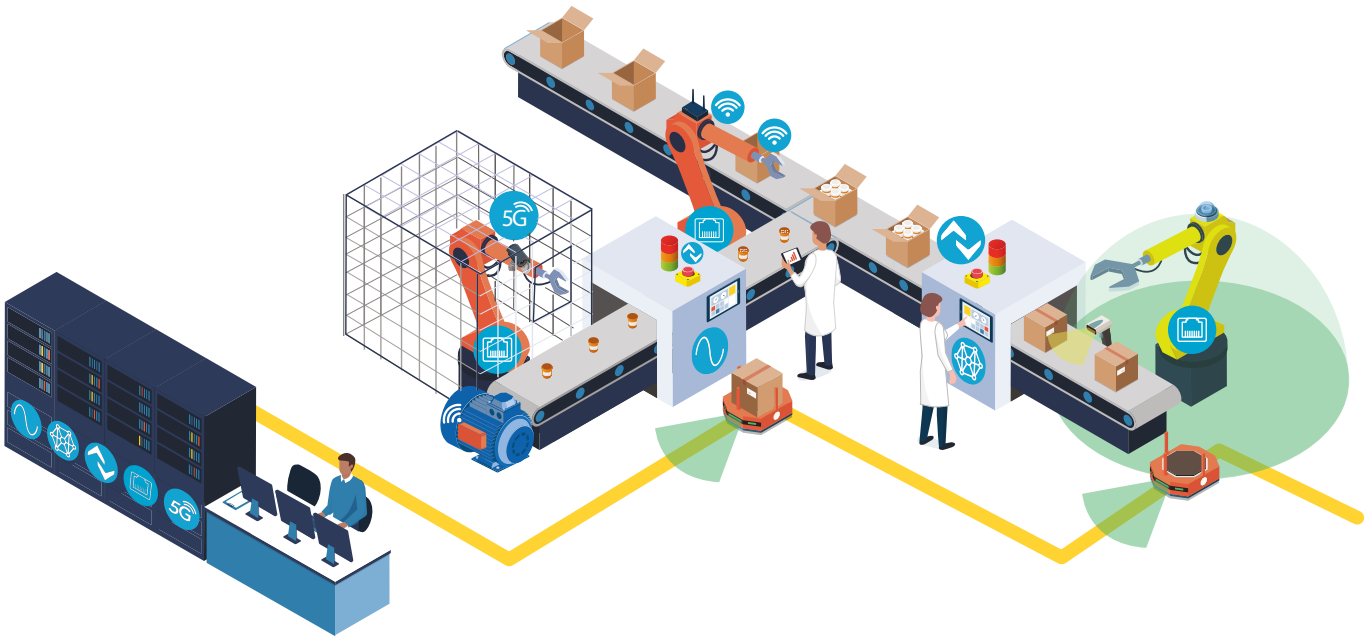
任务自动化正逐渐融入我们生活的方方面面。如今，很多人不再亲自修剪草坪，取而代之的是机器人割草机在花园中自如穿梭，将草地修剪整齐。而这仅仅是移动机器人替代人类从事重复性劳动的一个缩影。尽管免于手动割草令人愉悦，但移动机器人及任务自动化的真正影响力在工厂和仓库中体现得最为显著。在制造设施内需要持续流转物料和资产的场景中，移动机器人的强大能力得以充分展现。

自主移动机器人(AMR)或自动导引车(AGV)能够打通生产过程的各个环节，充当人员与人员、机器与机器之间的“桥梁”，实现工位间的高效物料流转。

> 移动机器人及任务自动化的真正影响力在工厂和仓库中体现得最为显著。

您或许会问：“为何移动机器人如今的影响力越来越大？”答案很简单。首先，**感知能力**增强了。数据驱动的洞察分析已成为当今自动化革命的关键推动力。通过真正的传感器融合，机器人采集并处理来自3D飞行时间(ToF)摄像头、惯性测量单元(IMU)、激光雷达和众多其他系统的数据，从而实时感知周围环境，无缝绘制环境地图，并确定自身在工厂车间内的位置。

图1：工业生产线



其次，**效率**更高了。实时感知技术的进步赋予了机器人更高的自由度，使机器人能够在动态变化的环境中自如移动。仓库和工厂自动化正依赖移动机器人来提高效率、管理库存并加速运营。在大型仓库中，移动机器人能够扫描、定位并搬运设备和产品，从而简化库存管理与流转，确保全天不间断运营，以满足零售和在线购物的履约需求。另一个关键因素是，全自动化工厂可在温度和光照相对欠佳的条件下运行。人类通常无法在此类环境中工作，但机器人不受此限制。

边缘智能的提升、电池管理技术的进步、工厂的无缝互联，均为移动机器人的部署提供了有力支撑。

机器人的移动轨迹变得可预测，带来了额外的安全保障。使用移动机器人搬运物料不仅提高了效率，还消除了某些任务中固有的风险。由人操控叉车执行任务，可能会对驾驶员和现场其他人员造成伤害，且操作可能不具有可预测性。移动机器人则会始终选择从A点到B点的最优路径，平稳移动至目标位置；即使发生意外，也不会造成人员受伤。某些任务可能涉及危险物料，或需要与危险设备交互。像是运输危险物料或靠近大型运转设备这样的场景，并不会对移动机器人构成危险；而人类操作员若执行相同任务，则面临安全风险。

再者，如今的机器人更加**灵活**，可根据流程中出现的新需求进行编程设定，以执行新的任务。随着制造业向“单件定制”生产模式演进，定制化流程成为必然需求，因此具备自适应能力的移动机器人至关重要。机器人操作系统(ROS)作为一种强大的驱动程序开发工具，已助力众多企业开启机器人之旅，通过设计各类算法，赋予移动机器人拟人化行为能力，从而胜任各项既定任务。当下正值机器人技术发展的黄金时期：标准化进程加速、行业协作日益紧密，叠加工业界数字化转型浪潮，使得移动式和固定式机器人具备了前所未有的环境感知、交互与通信能力。

边缘智能的提升、电池管理技术的进步、工厂的无缝互联，均为移动机器人的部署提供了有力支撑。虽然部分任务较易实现自动化，但在工业移动机器人领域，任务更为复杂，环境更具挑战性。机器人自身的智能水平将成为其能否无缝融入高度自动化制造环境的关键。

依据工业自动化需求选择合适的方案——AGV还是AMR?

移动式自动导引车(AGV)和自主移动机器人(AMR)拥有大部分相同的核心基本属性，并在工业应用中执行类似的自动化任务。AGV或AMR的主要功能均是将物料从工厂或仓库的一个位置运输至另一个位置。

> AGV与AMR的根本区别在于导航能力及避障能力。

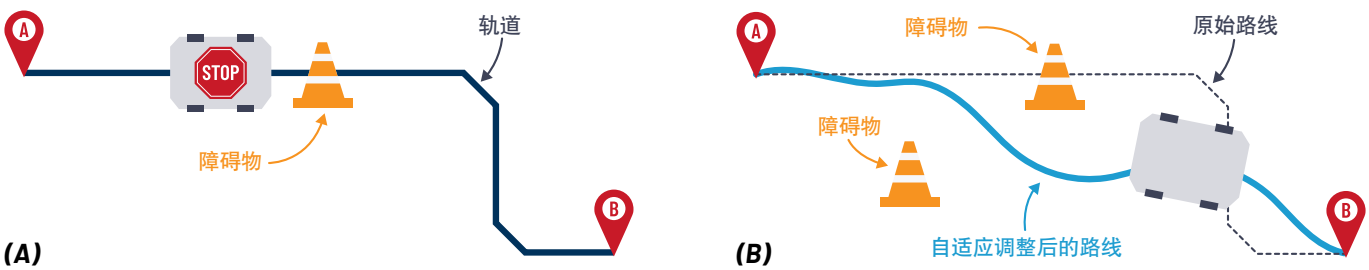
AGV与AMR的根本区别在于导航能力及避障能力。AGV沿预定轨道或路线行驶，在从一地移至另一地的过程中不会偏离既定路径。若AGV检测到路径上有障碍物，便会停止并原地等待，直至障碍物被移除。AMR同样具备障碍物检测能力，但其智能化程度更高，能够调整路线以避开障碍物，重新规划路径，并在无需人工干预的情况下继续完成任务。

AGV可采用多种传感方案来识别行驶路线。

- 粘贴于工厂地面的磁带。AGV底部的对应传感器会检测磁带位置并据此调整车身位置。还可利用额外的磁带对位置进行编码。
- 嵌入地面的感应线。同样，传感器会检测感应线并相应调整AGV位置。
- 视觉跟踪。在地面放置彩色胶带或标记物（如AprilTags），并通过RGB相机进行检测，以绘制路线并确定位置。
- 激光引导。通过安装在AGV上的360°激光扫描仪及设施内安装的多个反射板实现。AGV会测量自身与反射板的距离和角度，通过三角定位法确定自身位置。

AGV的主要优势在于能够精确且一致地沿预定路线行驶，因此非常适合大批量、重复性的任务。其主要缺点是需要对运行设施进行基础设施改造，且安装和维护工作量较大。必须在地面或墙壁上安装磁带、导线、标记或反射板，并定期进行维护。视觉标记可能受污垢影响，磁带也可能脱落。感应线虽极为坚固耐用，可一旦需要调整就会对日常运营产生重大影响，因为必须重铺地面。

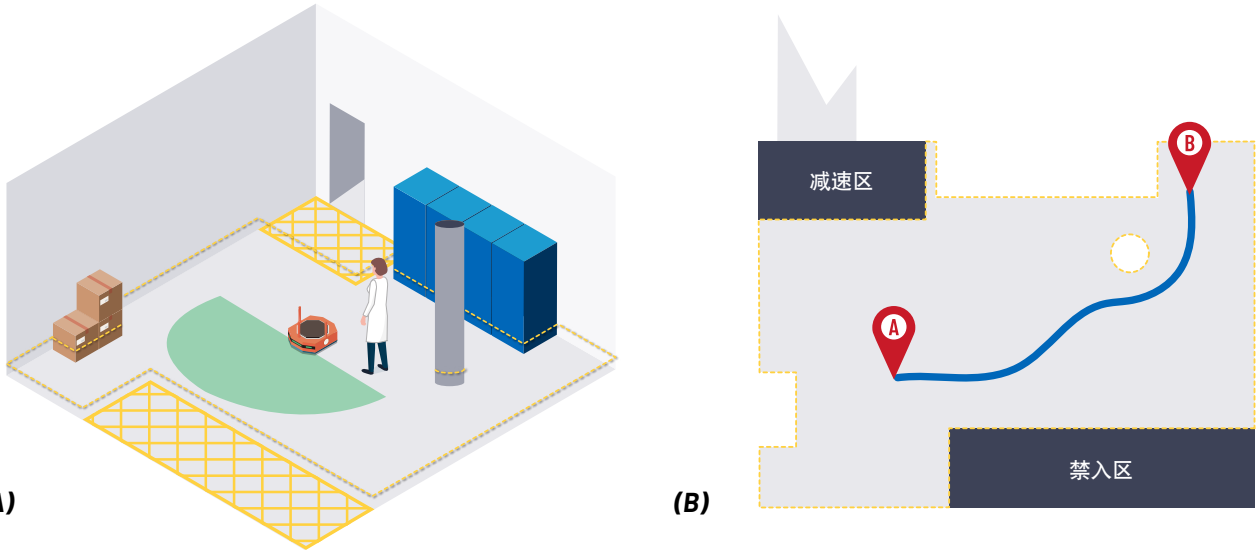
图1:
***(A)** AGV遇障碍物时的运行方式*
***(B)** AMR遇障碍物时的运行方式*



此外，如前所述，AGV不具备避障能力，检测到障碍物时会停止运行。

AMR采用同步定位与地图绘制(SLAM)技术在工厂车间内导航。安装在AMR上的深度传感器（通常为激光雷达扫描仪）用于绘制工厂车间地图。首先驱动AMR在设施内行驶，累积扫描数据以生成完整地图，并将地图存储在AMR及车队管理软件中。

图2：
(A) *AMR地图绘制*
(B) *生成的地图*



(A) ***(B)***

生成的地图可补充额外信息加以增强，例如禁入区、减速区和充电站位置。目标以x、y坐标或图钉形式标注在地图上，供AMR导航使用。运行期间，激光雷达扫描仪的最新扫描数据会与存储的地图进行比对，从而计算出AMR当前的位置和朝向。随后，AMR利用内置导航系统，结合存储的地图及沿途遇到的障碍物，规划出到达目标的最优路线。

与AGV相比，AMR的劣势在于初始成本较高，且到达目标所需时间不如AGV固定可预测。AMR的显著优势在于无需改造基础设施即可运行，因为其具备自主定位和导航所需的感知能力及智能，无需依赖外部标记。新任务和目标可在地图或车队管理软件中快速高效地更新。通过生成新地图或扩展现有地图，即可轻松适应设施扩建和自动化升级需求。

在未来工厂的动态环境中，AMR凭借易用性、灵活性和可扩展性，相较AGV具有明显优势。AMR通常具备更强的感知能力，配备远距离激光雷达、3D深度传感、雷达及RGB视觉技术。这些感知方式结合强大的算力和人工智能(AI)，为实现先进功能和改善人机交互开辟了更多可能。

定位：
实现真正自主移动机器人的关键

上一章提到，强大的感知方式和算力使自主移动机器人(AMR)在动态环境导航中相较自动导引车(AGV)更具优势。本章将深入探讨具体原因。

> 对于移动机器人而言，绘制周围环境的地图并确定自身相对于地图的位置至关重要。

定位是指确定机器人在环境中所处位置的过程。对于移动机器人而言，绘制周围环境的地图并确定自身相对于地图的位置至关重要。定位感知能力越强，任务执行就越快、越高效，因为移动机器人的大多数任务都涉及从一处移动到另一处。正是这种移动自由赋予了AMR在工厂内的独立性，而它具体是如何实现的呢？

惯性测量单元(IMU)简介

惯性测量单元(IMU)为机器人的精确定位提供关键运动数据。集成的**加速度计**会测量相对于地球重力场的加速度，**陀螺仪**会测量旋转速率以提供角速度，**磁力计**则支持在复杂环境中进行精确的朝向估计。通过整合这三种先进传感技术，IMU使机器人能够精确确定自身的朝向、位置和运动状态。



图1：工业工厂环境中的自主移动机器人(AMR)

下面探讨定位面临的挑战以及IMU如何克服这些挑战。

航位推算：一种基于先前已知位置来估算当前位置的导航技术。IMU随时间推移持续提供位置、朝向和速度数据，从而实现精确估算，助力AMR可靠导航。

鲁棒性：环境因素对传感器性能影响显著。例如，激光雷达传感器可能对环境光、灰尘、雾气及雨水敏感，导致数据质量下降甚至性能中断。相机等其他传感方式也可能面临反光表面及动态障碍物（如其他AMR或工作人员）带来的挑战。相比之下，IMU在各种条件下（包括存在电磁干扰的环境）均展现出出色的鲁棒性，能够在室内外有效运行。这种适应性使IMU成为移动机器人的理想选择，确保在复杂环境中保持稳定性能。

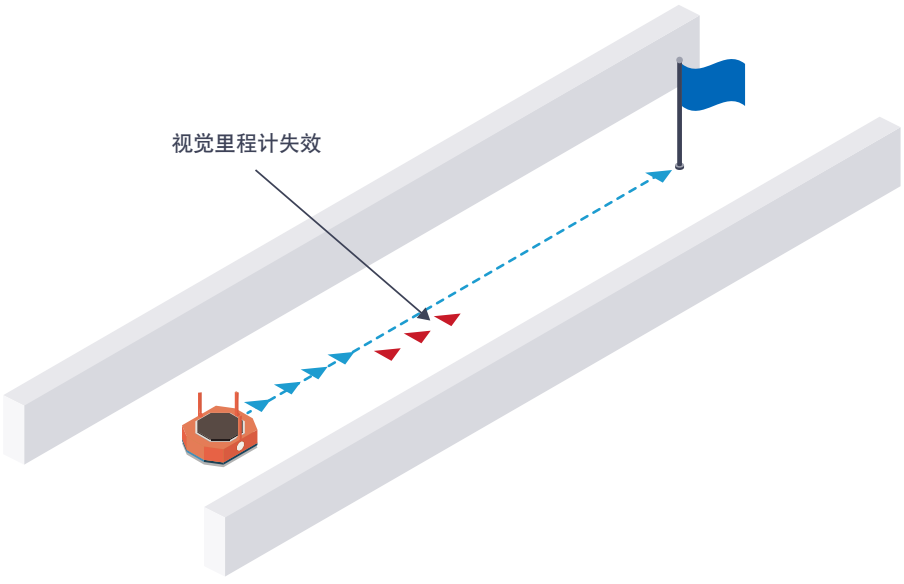
增强可靠性：IMU的突出优势在于能够以高达4kHz的速率输出高保真原始运动数据。其他感知传感器的更新速率通常仅限于约10Hz至30Hz。更高的更新速率增强了IMU性能的可靠性，尤其在动态环境中，使AMR能够在两次其他测量之间的短暂间隙内快速准确地估算自身位置。

IMU与视觉里程计对比

您可能会问，随着视觉系统的进步，为何IMU在移动机器人中仍扮演如此关键的角色？原因如下：

SLAM（同步定位与地图绘制）算法通过将观测到的传感器数据与存储数据进行匹配来实现地图内定位。但当观测到的传感器数据有限时会发生什么？例如在长走廊中，墙壁笔直且颜色、纹理或反射率均匀单一。在此类环境中，SLAM算法难以精确定位，由于缺乏显著特征，AMR极易迅速丢失位置。

***图2：**AMR地图绘制*



IMU在走廊等特征稀疏的环境中提供航向和朝向信息，充当重要的辅助导航系统。IMU在视觉传感器两次测量之间提供高短期精度和即时测量数据。与视觉里程计相比，IMU计算需求更低，增强了系统冗余度，进一步巩固了其在AMR运行中的重要性。

IMU：整体式AMR设计的一部分

尽管IMU相较其他传感器优势众多，但也容易出现漂移。在环境持续变化的情况下，AMR运行依赖多传感器输入可能更为有利。这使得各传感器能够互补局限，从而提高整体成功率。本系列下一篇博客将探讨传感器融合的工作原理及其为机器人技术带来的综合效益。

未来的工厂或许会专为AMR运行而设计和优化，但让现有仓库和工厂适配AMR仍面临诸多挑战。



停、看、听——
自主移动机器人如何感知和导航？

上一章讨论了IMU在自主移动机器人(AMR)定位中的重要作用。本章将详细阐述导航如何依赖多种传感器技术的融合，以实现AMR在动态变化环境中的真正自由移动。

AMR采用同步定位与地图绘制(SLAM)技术进行导航。

那么，移动机器人是如何学会四处移动的呢？我们从小就被教导过马路前要“停、看、听”，这一概念是否同样适用于机器人？人类依靠眼睛和耳朵来“导航”周围环境，而机器人则利用传感器感知周边状况。

AMR采用同步定位与地图绘制(SLAM)技术进行导航，驱动AMR在设施内移动并扫描环境。扫描得到的数据经整合后生成所在区域的完整地图。AMR利用一系列传感器和算法进行定位和导航。工业视觉飞行时间相机、雷达和激光雷达等传感器技术构成了AMR的“眼睛”，并结合IMU和轮式里程计（位置编码器）的数据。

然而，没有哪种传感器能够胜任所有工作。所以，关键在于多种传感器协同工作，实现在动态变化环境中的自如导航。

每种传感器各有优劣，依赖多种传感器进行导航可有效平衡各传感器的优缺点。下面探讨多传感器如何提升AMR的整体性能。

导航时的环境因素

激光雷达传感器对环境光、灰尘、雾气、雨水等环境因素较为敏感。这些环境因素会降低传感器数据的质量，进而影响SLAM算法的性能。同样，其他传感方式也会受到反光表面及动态移动物体（其他AMR或工人）的影响，进一步干扰SLAM算法。下表总结了环境对不同传感方式的影响。

传感方式	受弱光影响	受动态物体影响	受反光表面影响	依赖丰富的场景几何特征
标准RGB相机	是	是	否	否
飞行时间(ToF)	否	是	是	是
激光雷达	否	是	是	是
雷达	否	是	是	是
轮式里程计	否	否	否	否
IMU	否	否	否	否

表1：传感方式对比表

虽然IMU和轮式里程计不受工作环境中视觉元素的影响，但将这些传感器数据与视觉数据结合使用，可使AMR在各种场景下表现更佳。下面探讨在倾斜地面上导航所面临的挑战。

斜坡导航

在斜坡上行驶时，传统SLAM算法若依赖激光雷达将遇到困难，因为2D点云数据不显示坡度信息。因此，斜坡会被误判为墙壁或障碍物，导致代价地图中的代价值升高。因此，采用2D系统的传统SLAM方法在斜坡上变得无效。IMU可通过提取坡度信息来解决这一难题，助力有效完成斜坡导航。

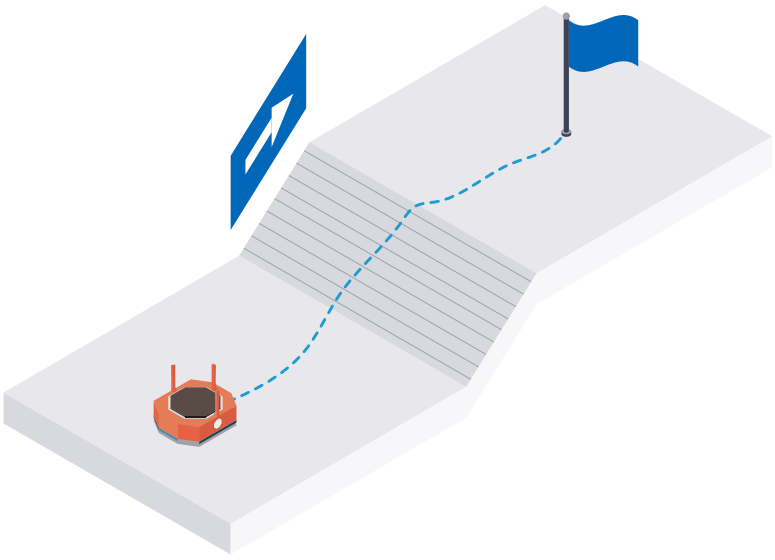


图1：AMR地图绘制

传感器数据如何融合?

在典型的ROS（机器人操作系统）中，视觉传感器与IMU及轮式里程计的数据通过传感器融合过程进行整合。robot_localization[1]是一个广泛使用的开源ROS功能包，以EKF（扩展卡尔曼滤波）算法为核心。通过融合激光雷达、相机、IMU和轮式编码器等多种传感器数据，EKF有助于更准确地估计和理解机器人状态及其所处环境。通过递归估计，EKF不断优化机器人的位置、朝向和速度，同时创建并更新周围环境的综合地图。这种传感器数据融合使移动机器人能够克服单一传感器的局限性，以更高精度和可靠性在复杂地形中导航。利用EKF等技术，可以整合多传感器的协同信息，实现多种传感方式的有效融合，使移动机器人能够有效感知环境并与之交互，助力AMR自主导航。

后续章节将详细介绍机器人操作系统。本章旨在让读者确信：传感器融合能够提高可靠性和数据质量，同时为环境中的物体和人员提供更高的安全保障，因为AMR不再依赖单一导航手段。

参考资料 / 资源:

[1] https://docs.ros.org/en/melodic/api/robot_localization/html/index.html



连续第三年，机器人
年度安装量突破
50万台大关。

国际机器人联合会(IFR)发布的《2024年世界机器人工业机器人报告》

移动中保持互联——移动机器人的通信基石

前文讨论了移动机器人如何通过多种传感器收集现实世界数据以在环境中导航。然而，我们尚未探讨这些数据如何在机器人内部传输，从而将感知转化为移动等动作。

无论是自主移动机器人(AMR)还是自动导引车(AGV)，移动机器人均由多种技术组成，这些技术必须快速可靠地相互通信，以传输用于导航和执行任务的关键信息。如需回顾这两类机器人的区别，请参阅前文关于AGV与AMR的章节。下面来看如图所示的AMR架构：

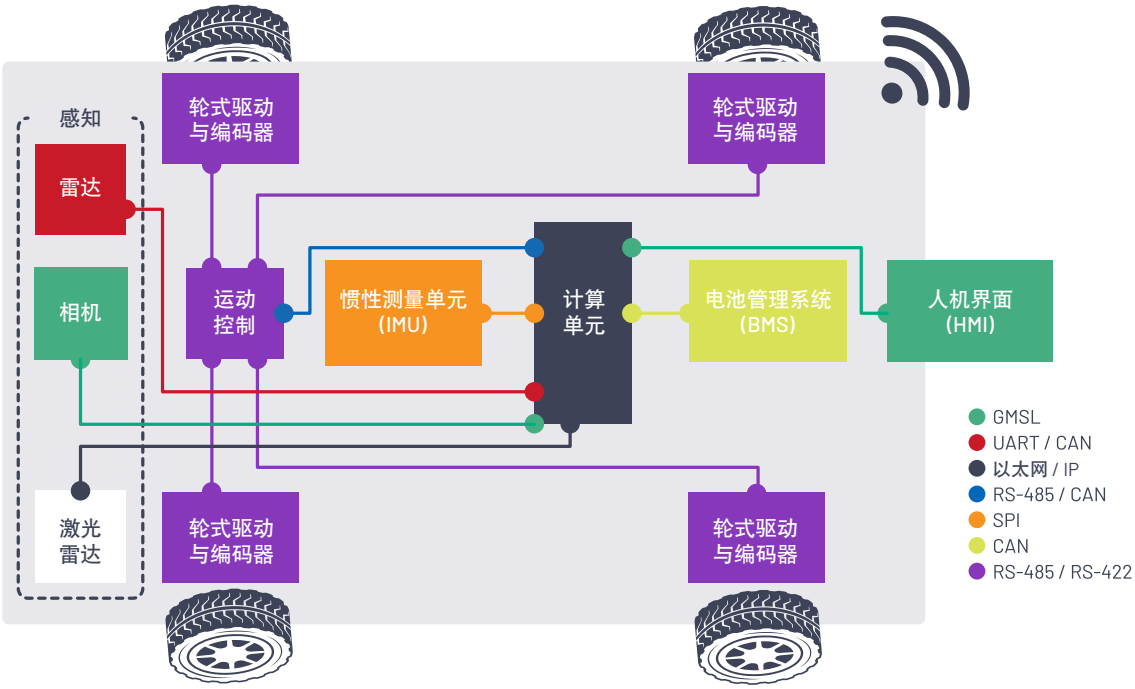


图1：AMR通信概览

任何移动机器人均由多个组件构成（如轮式驱动与编码器系统、视觉输入、IMU数据及电池管理系统），所有这些组件都需要相互通信。通信对象通常是主控制器或主计算单元，有时也可能是控制机器人特定功能的分布式单元，此举可减轻主控制器负担，并助力环境感知和执行器控制等时间关键型应用。典型移动机器人在运行中会采用多种通信方法，每种协议各有优劣。上述示例中，单台移动机器人可能采用了七种不同的通信方式：GMSL、UART、CAN、以太网、RS-485、SPI、RS-422。

移动机器人的运行通常要求通信具备接近实时响应的性能以确保有效运作。

虽然本章重点讨论有线通信协议，但需注意移动机器人通常也需要无线通信。无线通信对于移动机器人与基站交互及多机协作至关重要，有助于确保在动态环境中实现无缝协调与运行。

以下是几种技术在通信速率和延迟方面的简要对比。

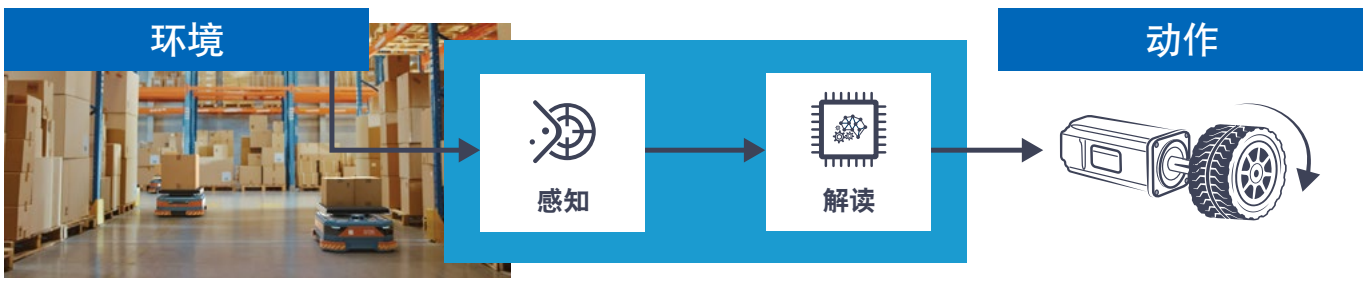
协议	类型	速率	延迟
PROFIBUS	现场总线	最高12Mbps	高
PROFINET	工业以太网	最高100Mbps	低
EtherCAT	工业以太网	最高100Mbps	极低
Ethernet/IP	工业以太网	最高100Mbps	低
千兆多媒体串行链路 (GMSL)	串行	最高6Gbps	极低

***表1：**协议速率 / 延迟对比表*

如表1所示，所列技术的速率和延迟参数各异，需根据实际需求和设计选择合适的技术，通常会组合使用多种技术。移动机器人的运行通常要求接近实时响应的通信速率以确保有效运作。这对于避障、导航及与动态环境交互等任务至关重要，因为即使微小的延迟也可能影响性能和安全性。通信需考虑的关键参数包括性能、可靠性和可扩展性。

AMR需在感知周围环境的同时进行导航以高效执行任务，工作过程见以下简单流程图：

***图2：**AMR导航功能*



感知与动作两部分均发挥着重要作用。必须先感知环境才能采取相应动作，这些数据通常通过RGB相机、深度相机、激光雷达传感器和雷达或以上部件的组合获取。然而，将所有数据传输至处理单元需要带宽充足且可靠的链路，对于工业机器人而言，还需具备抗干扰能力。GMSL等协议可承担此项关键任务。

千兆多媒体串行链路(GMSL)

移动机器人领域正引入一种新协议——GMSL。这项协议可通过同轴电缆传输先进驾驶辅助系统(ADAS)的传感器数据，速率最高6Gbps，同时通过反向通道传输电源和控制数据。这是一种高度可配置的串行器 / 解串器(SERDES)互连解决方案，支持传感器数据聚合（视频、激光雷达、雷达等）、视频分割、低延迟、低误码率及同轴电缆供电(PoC)。

GMSL应用拓扑由传感器、串行器、线缆及片上系统(SoC)端的解串器组成。

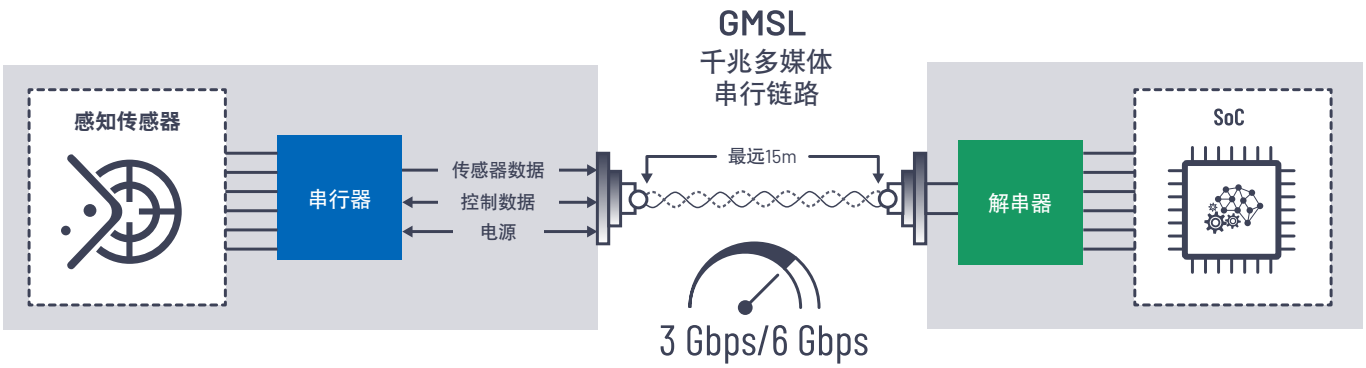


***图3：** GMSL拓扑*

由此简化了移动机器人的设计并增强了鲁棒性，因为GMSL专为传输此类数据而设计，并经过优化以确保高带宽、低延迟的数据传输。

工业以太网、GMSL和无线通信技术的协同作用正推动下一代移动机器人的发展。这些技术为移动机器人在各种环境中自主高效运行提供了稳健、高速且灵活的通信保障。随着创新不断涌现，移动机器人的能力将持续扩展，变革各行各业并改变我们的日常生活。



时刻就绪——高效电池管理如何延长移动机器人续航时间

在快节奏的自动化仓储和制造领域，分秒必争。自主移动机器人(AMR)和自动导引车(AGV)是这类生态系统的关键组成部分，即使短暂停机也可能导致严重中断。为确保机器人高效安全运行，需要对机器人组件（尤其是电池）进行精细管控。

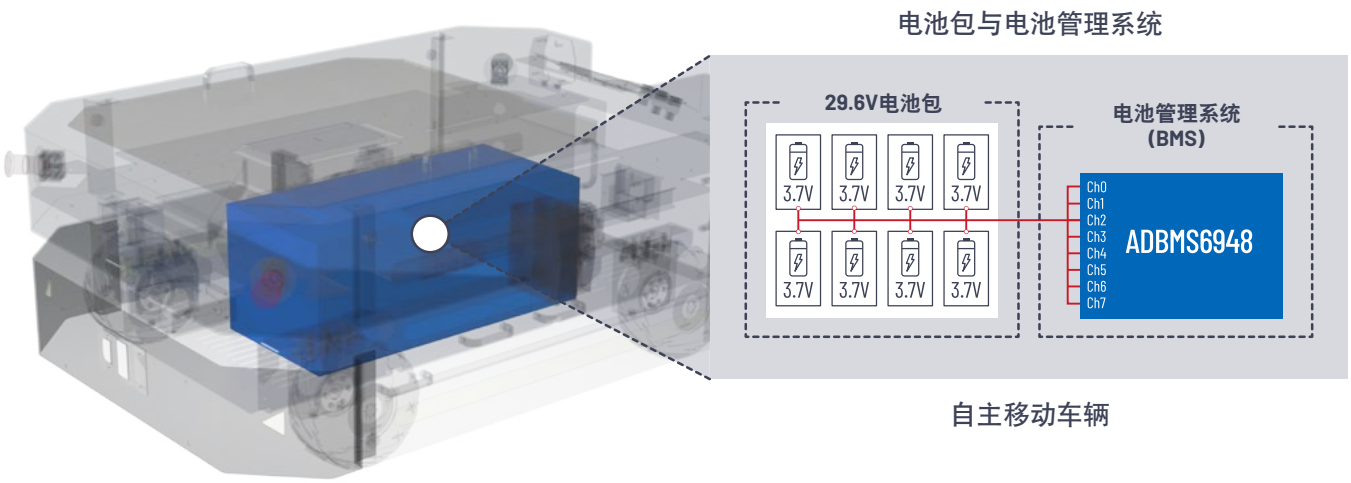


图1：移动机器人电池管理系统

电池管理系统的重要性

电池管理系统(BMS)是一种电子系统，旨在监控和管理电池包或各个电芯的各项参数。BMS系统对于最大化电池可用容量、确保安全可靠运行至关重要。高效的BMS能够精确测量电芯电压、**荷电状态(SoC)**、**放电深度(DoD)**、**健康状态(SoH)**、温度及电流。这些参数对于优化移动机器人的性能至关重要。

电池管理关键指标

- 荷电状态(SoC)：SoC表示电池当前电量占总容量的比例。以百分比表示，0%表示电量耗尽，100%表示完全充满。精确的SoC测量对于规划移动机器人运行周期及防止意外停机至关重要。

- **健康状态(SoH)：**SoH表示电池最大容量与额定容量的比值。该指标有助于评估电池老化程度及整体健康状况，对维护和延长电池寿命至关重要。
- **放电深度(DoD)：**与SoC相反，DoD表示电池已放电量占额定容量的百分比。管理DoD对于防止过放电至关重要，过放电会损坏电池并缩短电池使用寿命。

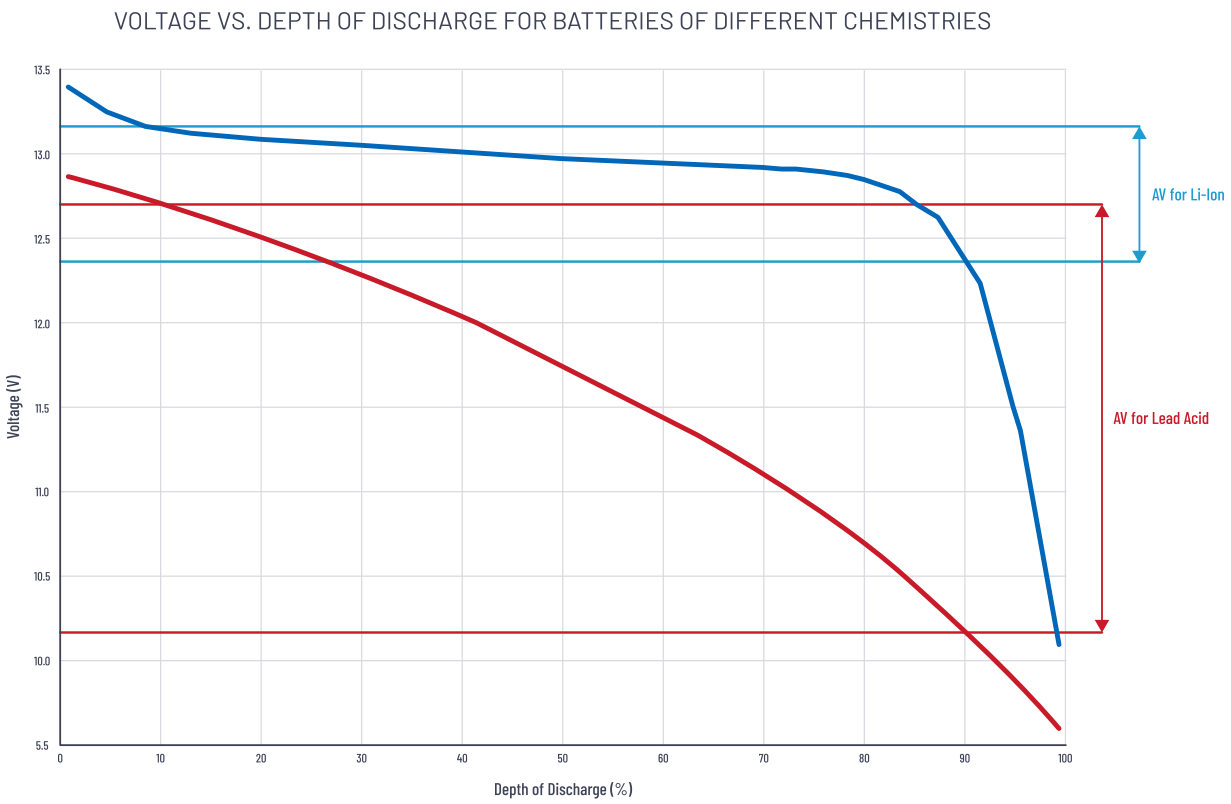
为何这些指标对AMR和AGV至关重要

锂离子电池(Li-Ion)和铅酸电池等不同类型电池各有优劣。例如，与铅酸电池相比，锂离子电池能量密度更高、重量更轻、充电更快且循环寿命更长。然而，锂离子电池成本也更高，且需精确监控才能充分发挥潜力。

以AMR中常用的典型磷酸铁锂(LiFePO4)电池包为例，它具有特定的电压范围，需要进行精确监测。即使是微小的测量误差也会显著影响性能。若用于24V系统、标称电压为27.2V的LiFePO4电池包存在测量误差，可能导致利用率不足及成本增加。因此，精确的SoC和DoD测量对于优化电池使用及延长电池寿命至关重要。

*图2*展示了两种常见电池（锂离子电池和铅酸电池）的放电深度曲线。可以看出，锂离子电池在DoD从10%到90%的过程中电压变化极小。由此可推断，几毫伏的测量精度对提高效率有重大影响。

图2：不同化学体系电池的电压与放电深度关系



高效的电池管理不仅关乎性能提升，还有助于减少浪费和降低环境影响。

另一个重要议题是电池的自然衰减。如*图3*所示，电池在整个生命周期内可用工作范围会逐渐缩小，因此精确的电压测量及SoC、DoD估算变得至关重要。

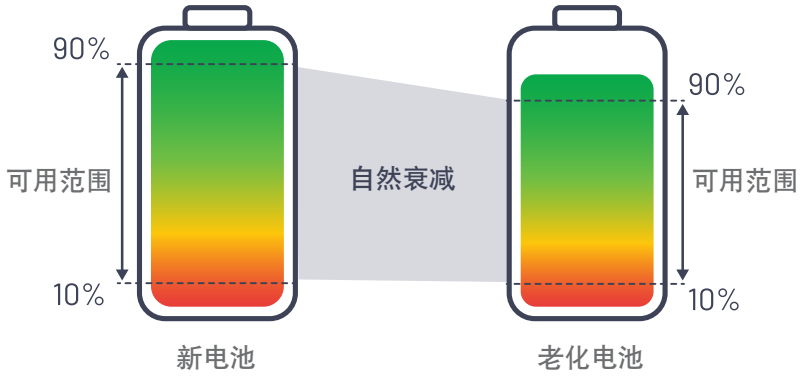


图3：电池工作范围的自然衰减

减少浪费和降低环境影响

高效的电池管理不仅关乎性能提升，还有助于减少浪费和降低环境影响。国际能源署2023年报告指出：“电池是清洁能源转型的关键。”妥善的电池管理有助于延长电池寿命，减少更换频率，最大限度降低电池废弃对环境造成的损害。

*图4*展示了电池的一些关键衰减因素，所有这些因素均可通过适当技术进行控制和 / 或监测。

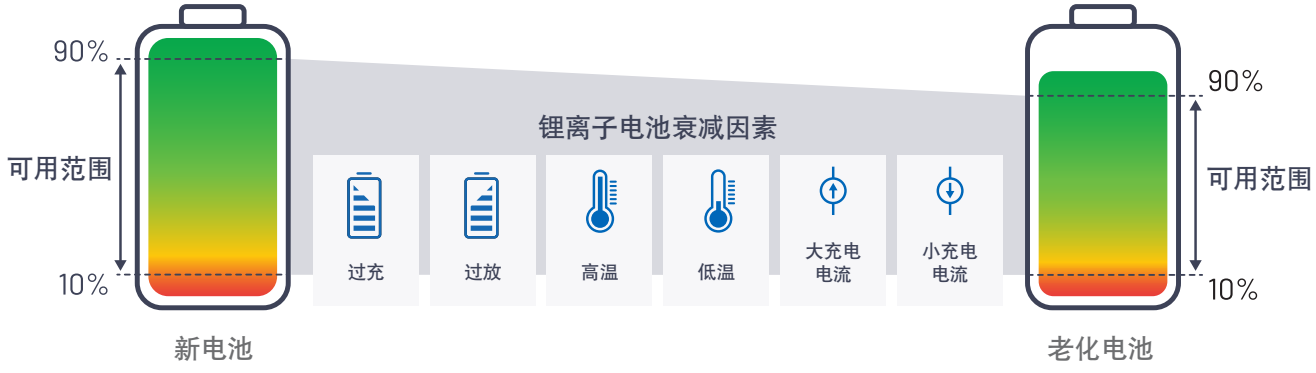


图4：电池衰减因素

ADI的BMS解决方案：提升效率与安全性

ADI的BMS解决方案(ADBMS6948)采用先进技术，提升了移动机器人应用的性能和安全性。这些系统提供精确的电芯测量、均衡充电、同步电流电压测量及快速过流检测，以优化电池性能、延长电池寿命并增强安全性。

例如，ADBMS6948具备以下关键特性：

- 电池全生命周期内总测量误差(TME)低
- 同步连续电芯电压测量
- 内置isoSPI接口，通信稳健
- 支持热插拔，无需外部保护
- 被动电芯均衡，电荷分布均匀
- 低功耗电芯监控及低休眠模式电源电流

这些特性确保电池高效安全使用，降低过充、过放及过热风险。

结语

在不断发展的自动化制造和仓储领域，移动机器人的效率和可靠性至关重要。ADI电池管理解决方案可对电池参数进行精确监测和控制，在提升机器人性能、安全性和使用寿命方面发挥着关键作用。通过延长电池寿命和减少浪费，ADI电池管理解决方案不仅能够助力提高运营效率，还可促进环境可持续发展。随着自动化技术不断进步，稳健高效的电池管理系统的重要性不言而喻。如需了解更多信息，请访问*analog.com/multicell-battery-stack-monitor*

少了智能运动控制，移动机器人将寸步难行

随着自主移动机器人(AMR)生态系统日益复杂，机器人系统设计复杂度不断增加，高效运动仍是架构设计的核心追求。

> 更智能高效的电机控制器可减少能源浪费，对于电池供电的移动机器人而言是关键因素。

前文讨论的通信方法概述了移动机器人如何感知环境、与多个内部组件通信并及时做出决策。这些因素共同促成了智能运动控制，如*图1*所示。更智能高效的电机控制器可减少能源浪费，对于电池供电的移动机器人而言是关键因素。

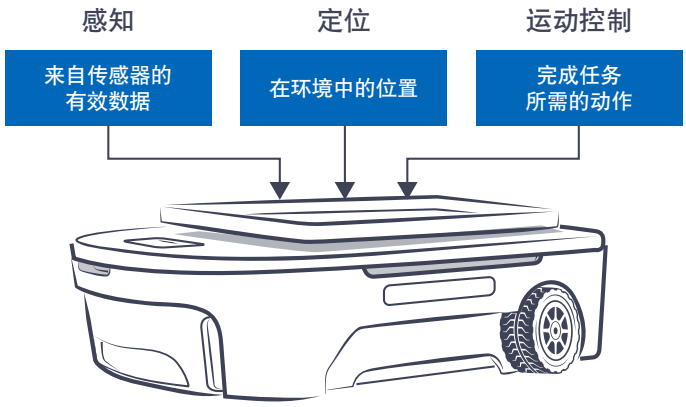


***图1：**移动机器人智能运动控制核心模块*

计算执行器需求

移动机器人应用场景多样，搬运负载类型各异。因此，移动机器人的尺寸和形状差异很大，驱动系统也是如此。通常，此类系统设计需经历若干步骤。下面通过一个简化场景来描述决策流程。假设您正在设计一款机器人，需用自重为m_{AMR}的AMR搬运$m_{payload}$千克的有效载荷。

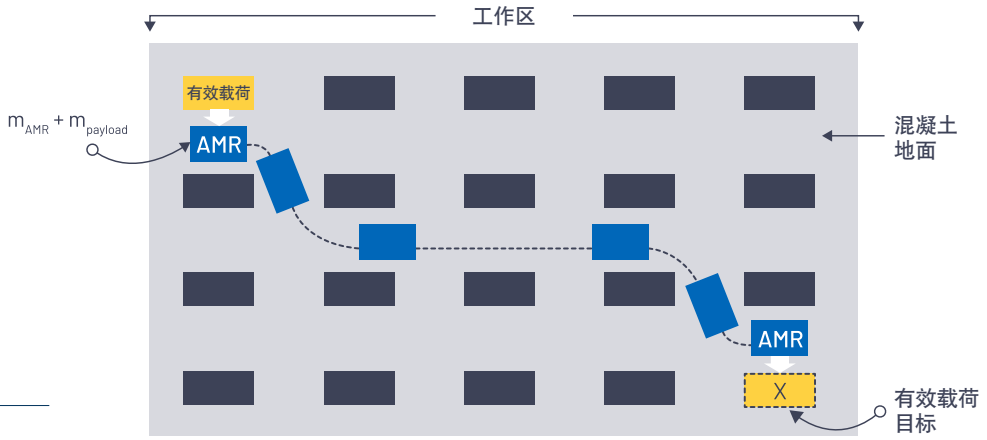


***图2：**AMR运行场景示例*

第一步是了解项目应用及约束条件。由于设计初期主要涉及机械方面，此处不深入细节，但就本例而言，需考虑以下因素：

- m_v：预计的整车质量。
- D_w：车轮外径。
- m_w：车轮质量。
- 驱动类型：差速驱动或全向驱动。
- 车轮数量：差速驱动为2个，全向驱动为4个。
- 车轮与地面间的滚动摩擦：通常难以计算，但可根据现有文献估算。
- v_{max}和v_{min}：最高速度和最低速度。
- n_{system}：系统效率。
- SF：安全系数。

惯量计算

基于上述考量，可从车辆**惯量**入手计算适合具体应用的电机规格。

$$J_{Total} = \left((m_V + m_L) + \frac{1}{2} \times m_W \times n_W\right) \times \left(\frac{D_1}{2}\right)^2$$

此惯量计算假设电机轴直接驱动；若有变速箱，GR为减速比。电机端感受到的惯量称为**折算转动惯量**，计算公式如下：

$$J_M = J_{Total}\left(\frac{1}{GR^2}\right)$$

扭矩计算

接下来需计算**加速扭矩**。如*图3*所示，达到最高速度需加速负载，具体取决于转子允许惯量。

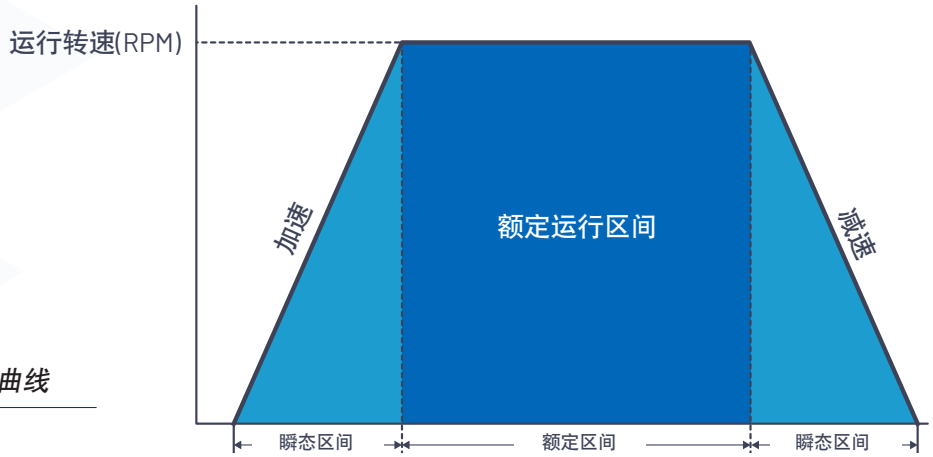


图3：*AMR应用中电机的转速曲线*

加速扭矩计算公式如下：

$$T_a = J_M \times A$$

其中J_m为折算转动惯量，A为加速度。

接着需计算**负载扭矩**(T_L)，公式如下：

$$T_L = F \times \frac{D_W}{2 \times \eta}$$

然后即可计算**总扭矩**。

$$T_{total} = (T_a + T_L) \times SF$$

电机控制

移动机器人的设计还有许多其他参数需要计算，但不在本章讨论范围内。接下来探讨如何控制电机。控制无刷直流电机的方法有多种，其中最有效的方式之一是**磁场定向控制(FOC)**。

FOC利用实际电流和转子位置信息，通过施加正交电流驱动电机。通过控制产生目标扭矩所需的电流并调节转子内磁体的磁场相位，FOC可产生精确扭矩。因此，FOC能以高精度和高带宽管理三相电机扭矩。

FOC通过精确测量转子位置来计算正交电流IQ的矢量。随后利用电流ID控制电机内部磁通。最后使用两个比例积分(PI)控制器：扭矩控制器控制IQ，磁通控制器控制ID。详细说明请点击此处查看。

> 电机控制方案需满足项目的各项要求，既要满足电机功率需求，也要兼顾接口、安全要求、效率等。

为AMR选择合适的解决方案

电机控制方案需满足项目的各项要求，既要满足电机功率需求，也要兼顾接口、安全要求、效率等。选择能够为设计提供所需灵活性的解决方案，有助于快速应对此类挑战。

例如，ADI的TMCM-2611-AGV模块是一款双轴伺服驱动平台，适用于+48V供电、最高14A RMS的三相无刷直流电机，专为移动机器人运动控制设计。其主要优势包括：

- 基于硬件的FOC控制：将控制功能集成到硬件方案中，减轻了外部处理器负担。
- 灵活通信：集成多种通信协议，提供设计灵活性。支持使用TMCL协议的RS-485、CAN和USB。
- 反馈传感器：支持增量式正交编码器和数字霍尔传感器等选项。
- 电机刹车：我们将在下一篇关于移动机器人安全标准的博客中详述此功能的重要性。

如需进一步了解ADI运动控制解决方案，请访问analog.com/intelligent-motion

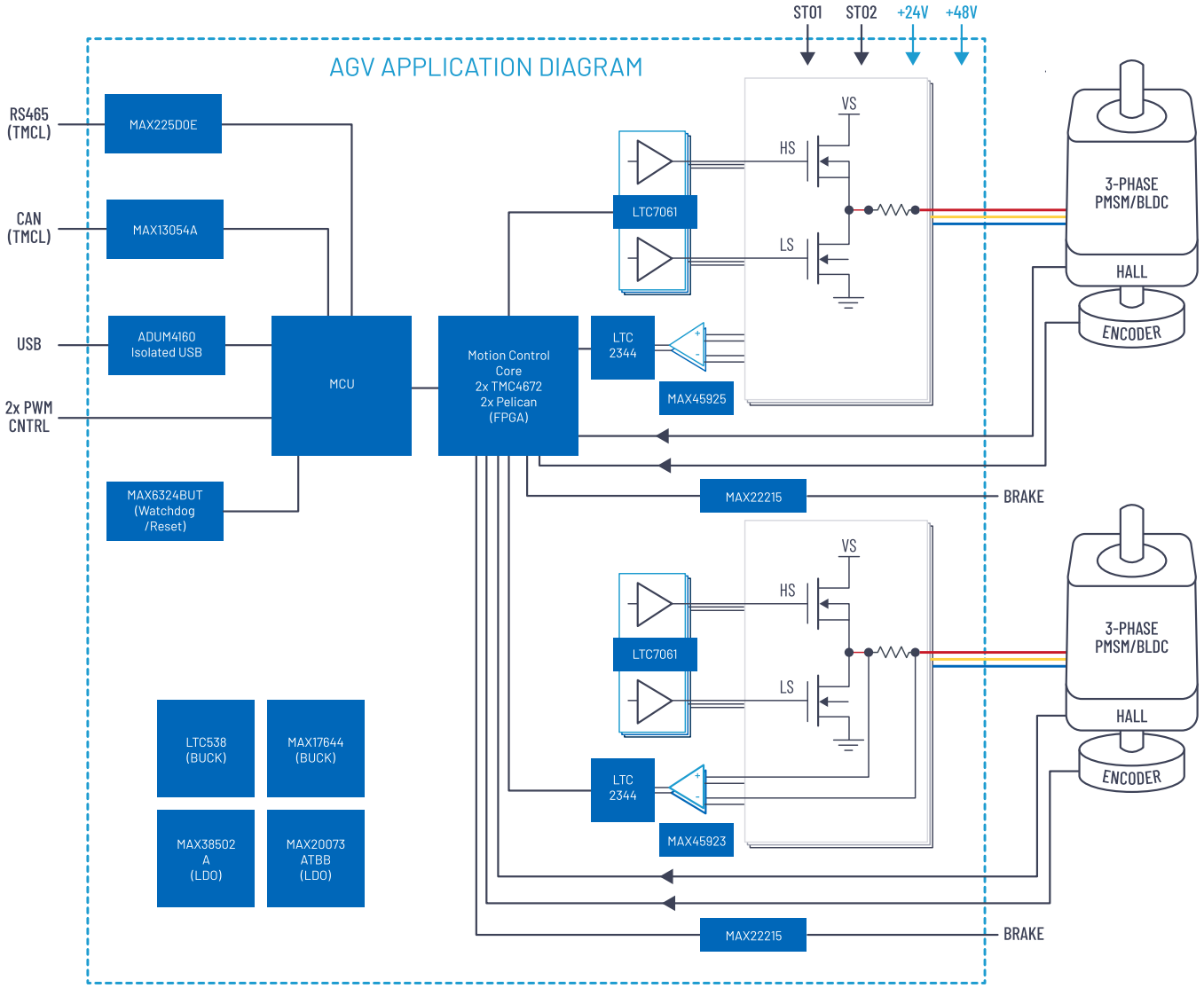


图4： *TMCM-2611-AGV功能框图*

自主移动机器人规模持续扩大下的安全保障

自主移动机器人(AMR)凭借在动态环境中自主导航的能力，在现代制造设施中高效运作，在工作站间运输有效载荷，同时不影响附近工人的健康安全。为确保安全运行，开发者、监管机构和用户必须通力合作，共同应对技术和伦理挑战。

在现代制造业中部署AMR标志着柔性制造系统的一次跨越式发展。

前几章讨论了移动机器人领域的技术进步。本章将探讨在当代制造环境中设计、开发和安全部署此类创新型移动机器人所需遵守的相关法规和标准。

欧盟机械法规

2023年6月29日发布于欧盟官方公报的欧盟新机械法规2023/1230[i]，对人工智能(AI)、物联网(IoT)和机器人等新兴技术提出了要求。这项法规将“自主移动机械”定义为在自主模式下运行且在正常运行期间能维持所有基本安全功能的移动机械。

新规将废除**机械指令2006/42/EC**，并于2027年1月20日在所有欧盟国家具有法律约束力。为确保合规，制造商必须证明产品符合协调标准。

标准分为三类：A类——基础安全标准（设计原则），B类——通用安全标准（特定安全方面），C类——机械安全标准（安全指南）。

符合协调标准

合规流程的第一步是评估在封闭空间及周边有障碍物环境下运行AMR的风险。制造商必须进行风险评估，识别潜在**危险**和**危险情形**，并提出相应的**风险降低**措施。

风险评估

A类标准EN ISO 12100:2010[ii]《机械安全——设计通用原则——风险评估与风险降低》为实现机械设计安全提供了原则和方法指导。

关于AMR相关危险的指导，EN ISO 3691-4:2023[iii]附录B列出了重要的机械、电气、热及人机工程学危险清单。该标准规定了无人驾驶车辆（包括AGV、AMR和自动导引小车AGC）的具体安全要求和验证方法。



图1：欧盟机械法规三类标准概览

风险降低

EN ISO 3691-4:2023[iii]第4章详细规定了自主移动机器所需满足的安全要求和保护措施，涵盖工作模式、路径上的人员检测、速度控制、制动系统、电气系统及自动电池充电等内容。

*图2*展示了防护措施与适用的危险情形之间的关系。共有五个性能等级(PL)，其中PL_a对风险降低的贡献最小，PL_e贡献最大。

合规实践

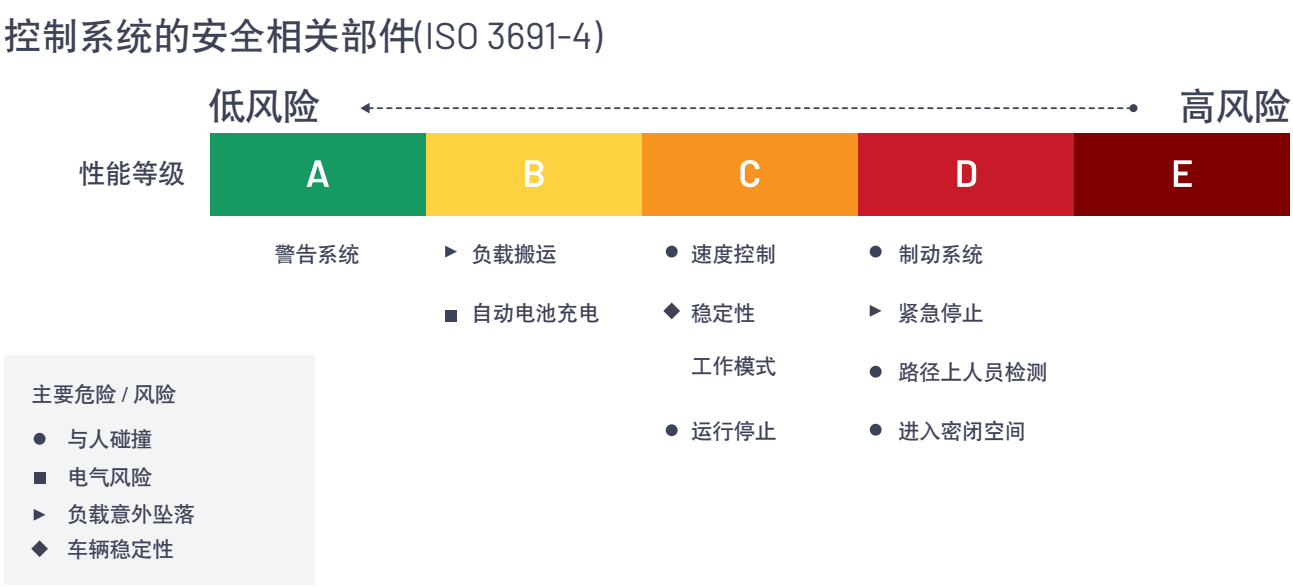
以下是符合欧盟机械法规2023/1230协调标准的示例。

通过检测AMR路径上的人员，可降低与人碰撞的风险。检测路径上人员的典型保护措施包括电敏防护设备(ESPE)，如2D激光扫描仪或3D飞行时间(ToF)传感器。

AMR配备制动系统，可在断电情况下自动触发，以保障故障安全状态。当检测到超速或路径上有人员时，制动系统应自动启动。

上述保护措施（特别是控制系统的安全相关部件）的实施必须符合ISO 13849-1:2023[iv]规定的性能等级(PL)。根据ISO 13849-1，AMR制动控制系统的安全相关部件要求最低性能等级为D(PL_d)。

***图2：** ISO 3691-4:2023第4.11条 – 表3（控制系统的安全相关部件）的可视化表示*





未来的安全发展重点

在现代制造业中部署AMR标志着柔性制造系统的一次跨越式发展。AMR的自主能力和对动态环境的适应性可提高生产力，并为人类工人提供安全工作环境。

然而，在工厂中整合AMR技术时需严格遵守法规标准，以确保安全有效运行。欧盟机械法规2023/1230的出台及技术进步强调了审慎设计的重要性，将风险评估与降低纳入产品开发流程。

如需进一步了解工业功能安全解决方案，
请访问*analog.com/industrial-functional-safety*

参考文献

[i] *https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1230/oj*

[ii] *https://www.iso.org/standard/51528.html*

[iii] *https://www.iso.org/standard/83545.html*

[iv] *https://www.iso.org/standard/73481.html*



机器人操作系统(ROS)如何改变移动机器人开发格局

如果您想开发自己的机器人系统或应用，机器人操作系统(ROS)是入门首选。ROS是一套机器人中间件，包含丰富的软件库和强大的开发工具，涵盖从驱动程序到前沿算法的各类资源。

ROS是一套机器人中间件，包含丰富的软件库和强大的开发工具，涵盖从驱动程序到前沿算法的各类资源。

我们在前一章简要展示了ROS如何有助于提升移动机器人的灵活性，特别是可根据需要来编程执行新任务。下面详细探讨ROS如何大幅简化移动机器人开发。

机器人操作系统(ROS)如何工作?

ROS**功能包**由节点组成，节点是执行特定任务的可执行程序。节点可通过发布或订阅**主题消息**相互通信，或通过**服务**以请求-响应方式交互。

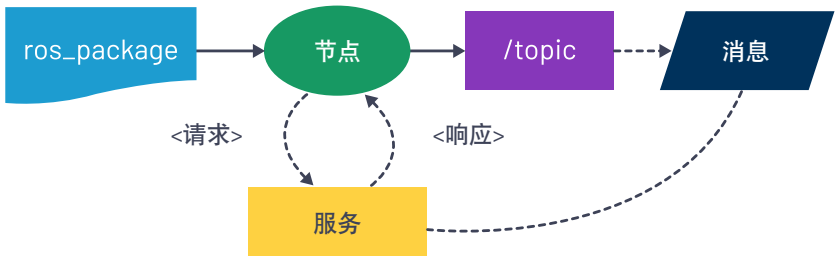


***图1：** ROS基本数据流*

移动机器人中的典型ROS节点

移动机器人中的ROS节点主要是驱动程序、封装器、应用或算法。**驱动程序**可直接访问硬件，而**封装器**调用第三方驱动程序的其他API以实现对硬件的必要访问。

例如，在拥有多个传感器和执行器的移动机器人中，每个部件都可配备驱动程序 / 封装器，使机器人能利用部件的功能。感知收集数据并将数据转化为动作的过程可相互关联，形成不同的算法和应用。

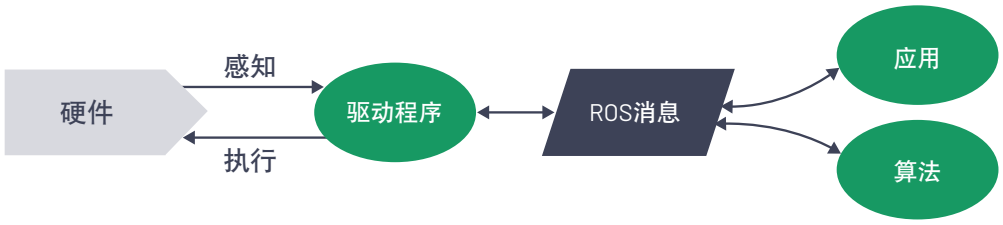


图2：移动机器人中的基本ROS节点

简易移动机器人的ROS应用

为便于理解，设想一个能从A点导航至B点并避障的简易机器人。简易机器人可配备：(1)用于定位的IMU；(2)用于绘制周围环境地图并避障的激光雷达；(3)用于驱动车轮并移动至不同位置的电机控制器。此场景下的ROS架构图如下：

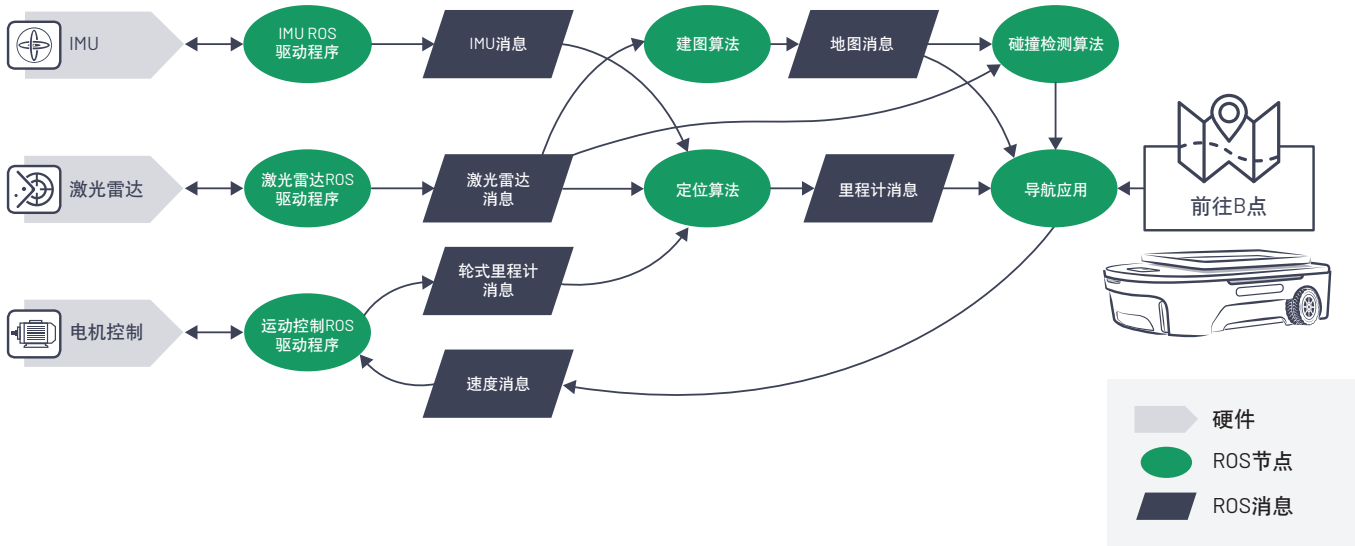


图3：基于ROS的简易机器人流程图（从A点到B点并避障）

具体发生了什么?

- **ROS驱动程序会访问硬件元件并将其与算法和应用抽象隔离。**对于IMU和激光雷达，数据由对应ROS驱动程序读取并以ROS消息形式广播。对于电机控制，ROS驱动程序会接收速度消息作为“命令”以驱动电机前往目标位置；同时也能访问轮式编码器并输出轮式里程计消息。
- **定位算法估算机器人的位置和朝向。**首先，以IMU、激光雷达和轮式里程计消息为输入，计算机器人当前位置。然后将位置信息作为里程计消息广播，供碰撞检测算法接收。最后，将结果与建图算法消息及激光雷达消息进行交叉验证。

- **导航应用通过图形用户界面发送运动命令**，通过向电机控制驱动发送速度消息来控制车轮。已知碰撞点可为机器人从A点到B点的指令提供参考。

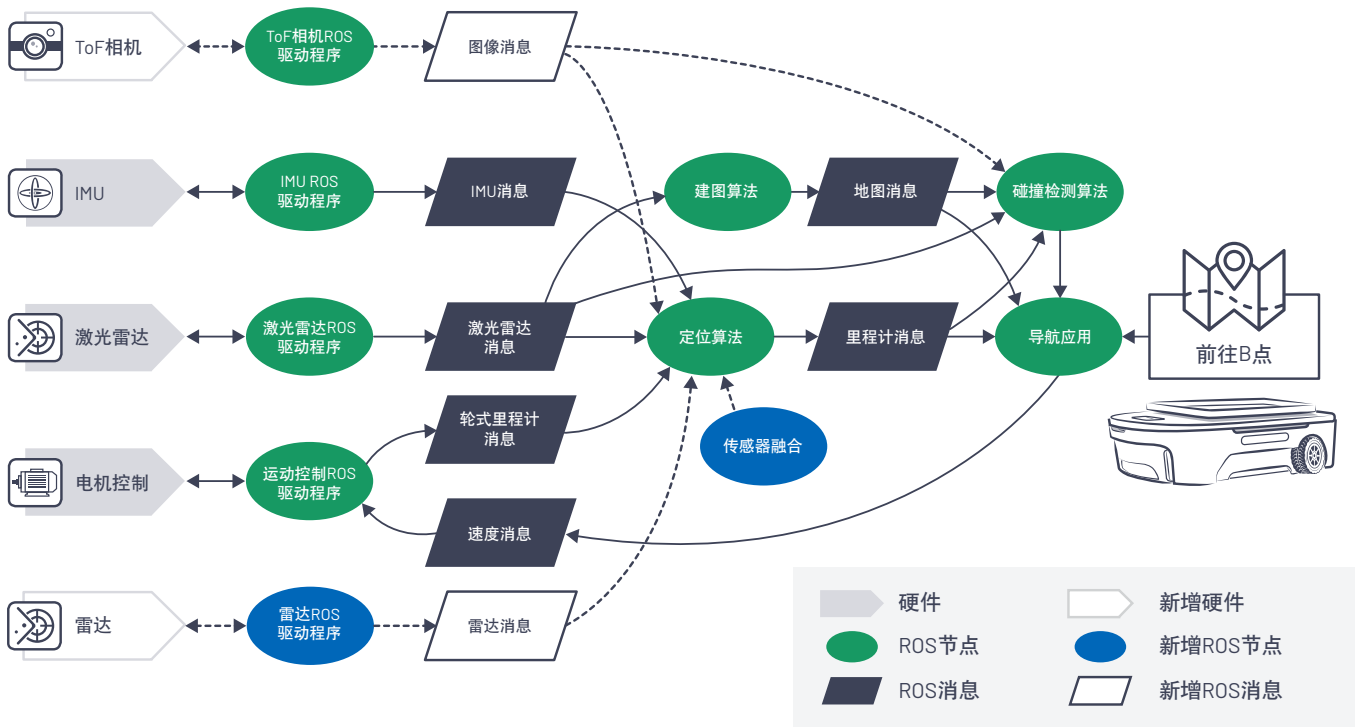
ROS如何推动机器人持续进化

ROS提供了标准消息 / 框架以实现节点间通信。因此，可通过添加更多ROS节点来复用和改进整个软件架构，为上述简易机器人增加更多功能。

例如，通过添加传感器融合和 / 或传感器噪声滤波算法，可提高定位精度。或者添加更多传感器，如使用雷达以适应弱光环境，或使用飞行时间(ToF)深度相机以实现更精确的3D建图和碰撞检测。

只要硬件系统的ROS驱动程序能够适配任何支持ROS的机器人，基于此类系统开发的算法和应用就始终具有可扩展性。

图4：简易机器人流程图的升级版



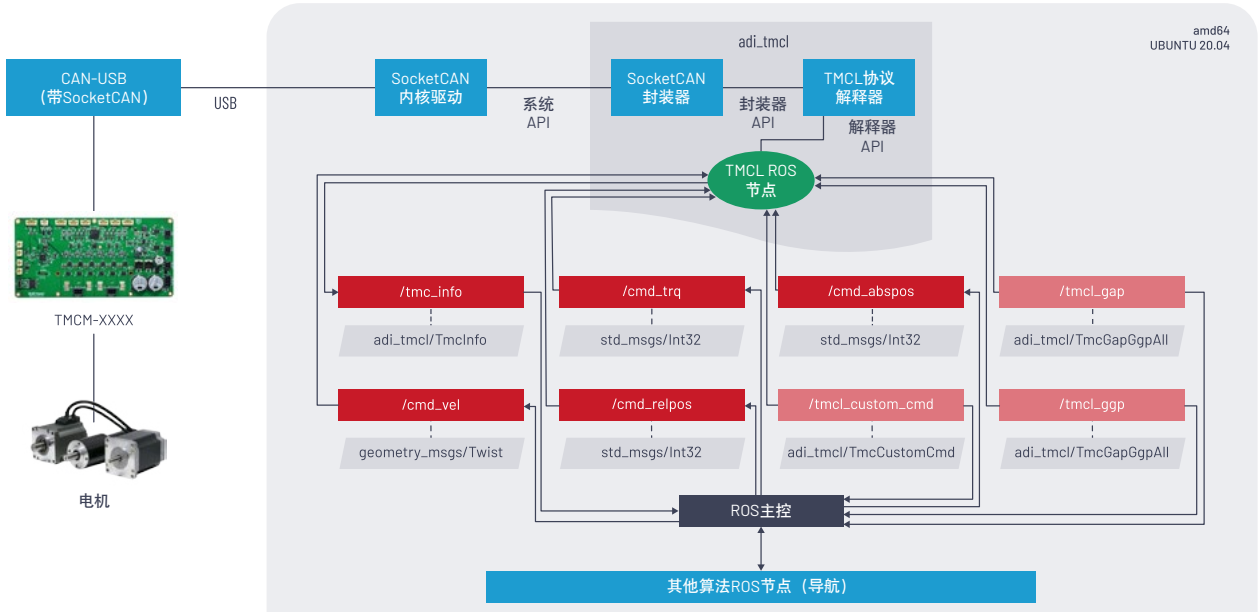
ADI Trinamic：让运动控制支持ROS

我们已经看到不同的ROS驱动程序如何输出传感器和执行器消息，作为移动机器人中算法和应用的输入输出。先进技术结合配套的ROS驱动程序，可帮助开发者摆脱为使每个硬件正常工作而需使用的众多软件开发套件(SDK)。

如此一来，移动机器人创新者能专注于立即评估新技术、开发先进算法和应用，同时避免与第三方产品的互操作性问题。

为实现上述优势，ADI Trinamic产品组合结合了ADI的运动控制专长、模拟工艺技术及电源设计能力。*图5*展示了ADI Trinamic运动控制ROS驱动程序的总体软件架构。

图5：*Trinamic运动控制ROS驱动程序软件架构*



小结

ROS应用于多个领域（消费、工业、汽车等），可部署于多种平台（Linux、Windows、MacOS及部分嵌入式平台）。ROS完全开源，并提供商业选项。得益于全球社区提供的各种专用资源，ROS拥有丰富的支持，为用户的设计和应用提供了便捷路径。

本章概述了ROS在移动机器人中的应用方式。下一章将进一步探讨如何构建自主移动机器人的整体软件架构基石。

构建自主移动机器人的软件架构基石

随着自主移动机器人(AMR)凭借自动化、导航及复杂任务执行能力不断重塑各行业，构建稳健的软件架构变得至关重要。本章将探讨AMR软件栈的基本组件，并重点介绍开发者需考虑的关键事项。

为AMR构建高效软件架构需要无缝集成硬件、中间件、软件开发套件(SDK)及终端用户应用。

AMR软件架构基础模块

软件栈由多个子系统组成，协同工作以创建完整的应用运行平台。*图1*展示了一个简化的软件架构图。

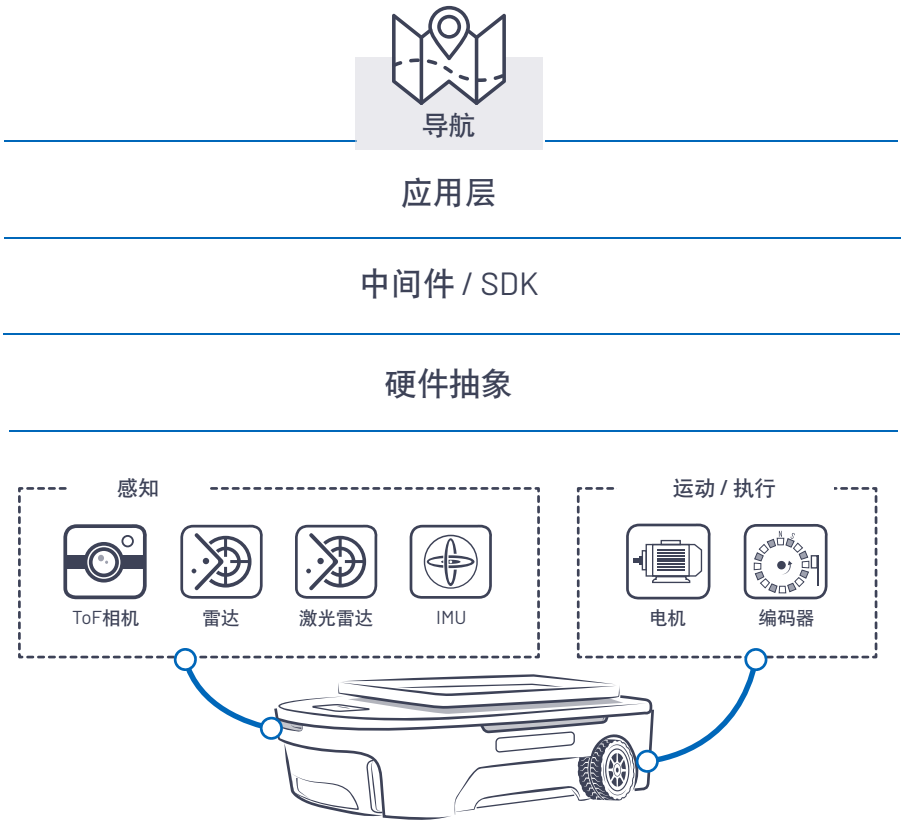


***图1：** 简化AMR软件架构图*

硬件抽象层允许操作系统在抽象层面与硬件设备交互，无需管理硬件本身的复杂性。顾名思义，**中间件**位于中间，充当操作系统与应用之间的桥梁。最后，**应用层**促进与网络中其他应用和系统的通信。掌握上述基础知识后，我们来深入探讨架构。

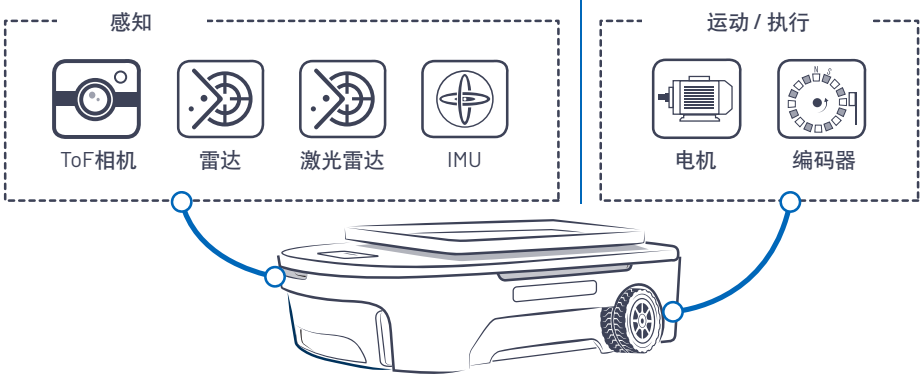
AMR软件栈关键层

为AMR构建高效软件架构需要无缝集成硬件、中间件、软件开发套件(SDK)及终端用户应用。每一层在优化性能和确保AMR有效运行方面都发挥着至关重要的作用。

*图2*更详细地分解了每一层，并概述了软硬件集成如何提升AMR整体性能。

表2：*详细AMR软件架构图*

应用层	虚拟化、数字孪生与仿真、大语言模型(LLM)、生成式AI前沿模型、数据分析	
	车队管理、任务规划、多机协调、路径优化 … …	
	人机界面 / SLAM / 安全	
	传感器融合 / 分类 / 运动规划 / 导航	
中间件 / SDK	**软件开发套件(SDK)**	**软件开发套件(SDK)**
	感知SDK及参考设计	运动SDK及参考设计
	CV库 / 雷达处理 / 视觉ISP	调优 / CBM / 运动算法
	中间件框架与库	
	通用软件库：数学、安全、通信、图像处理	
	ROS1 / ROS2框架	
硬件抽象	**底层驱动**	**底层驱动**
	感知驱动与API	运动 / 执行驱动与API
	边缘处理器	
	SoC、APU / MCU、DSP、FPGA等	
	感知传感器	**边缘传感器与执行器**
	雷达 / 激光雷达 / 视觉	电机 / 编码器
	触觉 / 惯性	力、电流、电压



硬件抽象层(HAL)或嵌入式边缘层

HAL层包含雷达、激光雷达、飞行时间(ToF)相机及惯性测量单元(IMU)等传感器硬件的底层驱动，提供环境感知和运动检测数据。在执行方面，HAL层包含AMR中常见的电机和编码器底层驱动。

感知和执行活动运行于微控制器(MCU)、计算系统或片上系统(SoC)上，通常使用嵌入式Linux或RTOS执行实时数据处理任务。HAL中的底层驱动通过直接控制系统传感器和执行器，弥合了硬件与上层软件之间的鸿沟。

中间件层

机器人操作系统(ROS)是AMR开发中用于开源 / 原型设计及传感器模态快速测试的主要中间件。它提供丰富的库和框架，简化了感知、运动控制及应用层的集成。ROS 1和ROS 2均以Ubuntu Linux为底层操作系统，并内置支持USB、以太网等多种通信协议。如需回顾ROS基础知识，请参阅上一章。

除ROS外，软件开发套件(SDK)层也为开发和部署感知与运动算法提供了基础模块。

应用层

应用层是实现物体识别、路径规划及拾放运动等高级功能的场所。此类应用依赖于软件栈下层处理的数据，直接影响机器人与环境的交互方式。

对于路径规划和导航等任务，感知与运动数据的无缝集成确保机器人能快速适应变化环境。云端集成进一步增强了机器人能力，将处理过程扩展至设备之外，使得深度学习模型训练、数字孪生仿真、远程监控及车队管理等高级功能得以实现。

系统集成商最佳实践

ADI提供尖端传感器技术、边缘处理能力及ROS 2集成包，赋能系统集成商开发出兼具智能、自适应能力、可靠性和可扩展特性的AMR。我们的整体解决方案及以下最佳实践可帮助开发者构建满足现代自动化需求的AMR。

- **利用ROS 2实现灵活可扩展的开发：**ROS 2通过模块化机制实现可扩展性，便于系统适配新传感器或功能。ADI提供各种功能的预构建ROS 2[1]节点。[2,3,4,11]
- **利用边缘处理优化实时性能：**高效的边缘处理可降低延迟并增强机器人响应能力。ADI提供模块化、实时调优的即插即用解决方案，适用于电机控制[5]、ToF[6]、IMU[7]及BMS[8]。
- **利用SDK定制应用：**SDK提供定制开发感知和运动算法的工具，使开发者能针对目标应用定制AMR性能。ADI提供基于Linux的电机控制[9]、IMU[10]及ToF[11] SDK。
- **确保云端集成安全可靠：**与云服务对接时，务必采用安全通信协议和数据管理实践，以维护数据完整性。[12]

参考资料 / 资源

[1] 机器人操作系统(ROS)开发平台

[2] Trinamic电机控制器官方ROS 2驱动(GitHub: tmcl_ros2)

[3] 飞行时间ROS 2绑定(GitHub: tof_ros2)

[4] 读取ADI IMU传感器数据并发布消息到主题的C++ ROS 2节点(GitHub: imu_ros2)

[5] TMCM-2611-AGV三相无刷直流电机双轴伺服驱动平台

[6] EVAL-ADTF3175飞行时间评估套件

[7] ADIS16500/PCB分线板

[8] ADBMS6948 16通道电池包监控系统

[9] TMC Tech Access Package – 开源IC软件API

[10] ADIS16475 IIO惯性测量单元Linux驱动

[11] ADI飞行时间SDK (GitHub: ToF)

[12] 为机器人技术的未来发展筑牢安全防线：网络安全的作用

算法在移动机器人中扮演何种角色？

算法赋予了自主移动机器人(AMR)*自主性*。算法使得移动机器人能够处理传感器数据、检测障碍物并做出实时行驶决策，以更好地在环境中导航。

随着人工智能(AI)和机器学习的进步，算法不断演进，但大致可分为三类：

- 感知
- 执行
- 通信

凭借上述三种能力，移动机器人能够感知环境、执行动作、控制运动，并实现内部子系统间的高效通信。本章重点讨论**感知**和**执行**算法类型。

算法赋予了自主移动机器人(AMR)*自主性*。

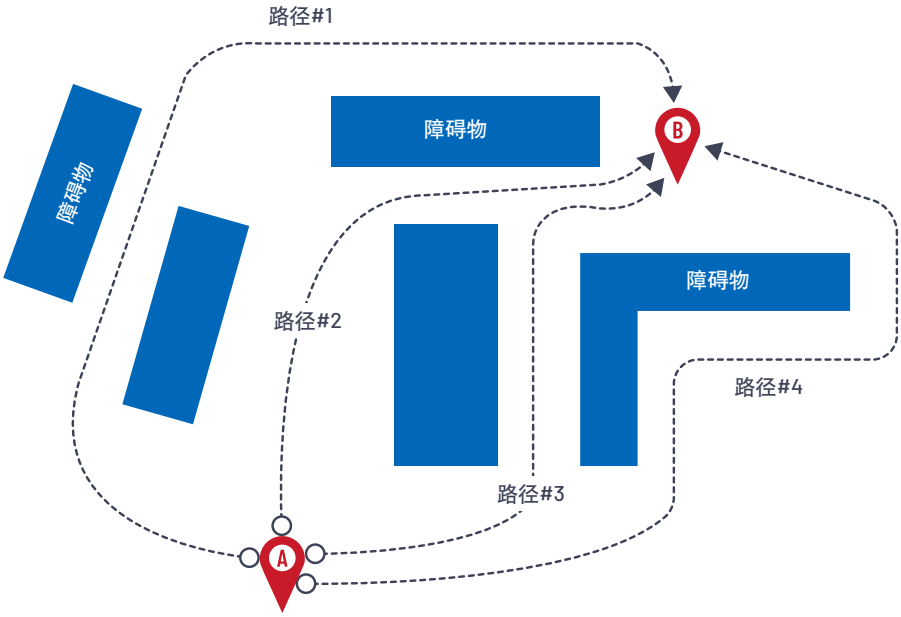


图1：自动驾驶车辆候选路径概念图

试想以下任务难度：从A点导航至B点，途中可能有无限数量的障碍物。人类用眼睛观察周围世界，据此做出判断并向期望的方向出发。行进中，我们可能会评估是否有更快或更短的路径。移动机器人的运行方式类似，利用感知和执行算法，根据收集的传感器数据做出明智决策。

感知算法

感知算法帮助移动机器人感知环境。AMR从飞行时间(ToF)相机、惯性测量单元(IMU)及激光器等多种来源收集数据。传感器通过以下算法，为AMR提供对周围环境的准确详细解读：

- 同步定位与地图绘制(SLAM)：基于激光雷达的SLAM算法帮助机器人构建周围环境地图并确定自身在地图中的位置。可采用**迭代最近点(ICP)**及**基于图的SLAM**等技术。
- 点云处理算法：ToF和激光雷达技术可生成点云，用来表示检测到的物体表面。生成的3D模型可用于分割、聚类及物体检测。
- 物体检测算法：对于障碍物检测和避障等空间感知任务，ToF传感器采用诸如连通域标记、先进深度学习等一系列算法。
- 传感器融合算法（如互补滤波器、卡尔曼滤波器及扩展卡尔曼滤波器）：传感器融合算法结合加速度计、陀螺仪及磁力计数据，提供准确的朝向、位置及速度估计。例如，卡尔曼滤波器因在导航和稳定方面的优势，常用于实时传感器融合。
- 姿态航向参考系统(AHRS)：AHRS算法基于IMU数据计算精确朝向和航向，对无人机、自平衡机器人和导航至关重要。
- 人机交互：在光照条件复杂的环境中，可采用ToF等视觉传感器实现手势识别。若环境较为安静，可使用关键词检测。这两种通信接口均可通过运行深度学习推理来实现。

执行算法

执行算法侧重于控制轮子、机械臂或夹爪等机器人组件的运动。精度自然是首要考量，因为此类算法的目的是使机器人能执行复杂运动并与环境实时交互。示例包括：

- 比例-积分-微分(PID)控制通过最小化期望状态与实际状态间的误差，确保运动控制平滑、稳定且精确。
- 模型预测控制(MPC)基于当前状态预测机器人未来状态，并利用优化技术确定给定时间内的最佳动作序列，在动态复杂环境中尤为有利。
- 轨迹生成算法会计算出机器人运动的平滑无碰撞路径，例如多项式轨迹规划和最小加加速度路径。

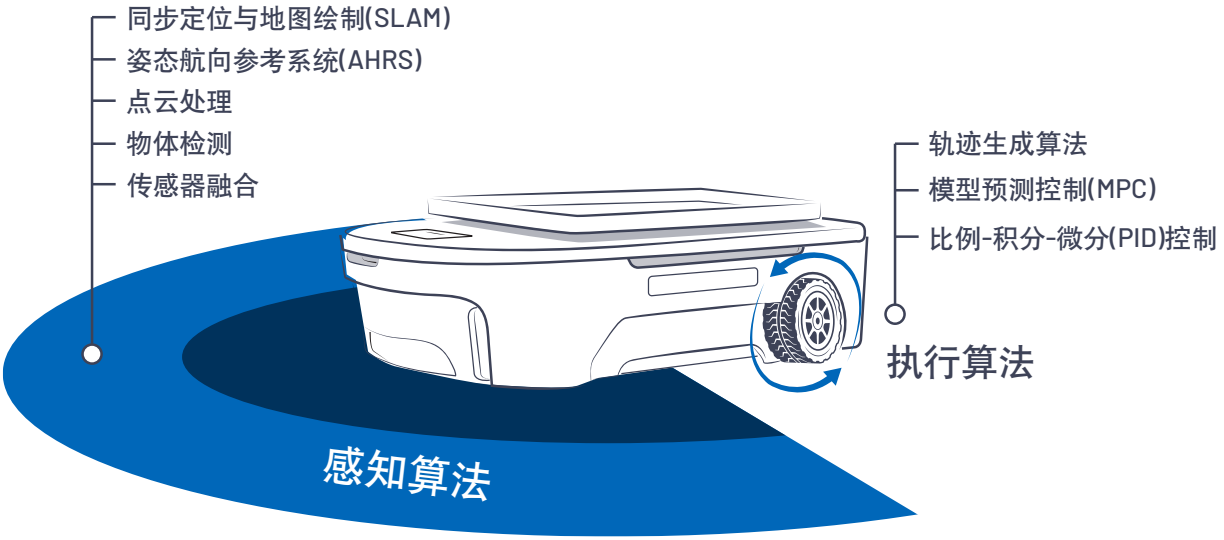


图2：自动驾驶车辆的感知算法与执行算法选项

移动机器人算法应用背景

本文讨论的算法利用硬件设备的输出，为机器人应用提供更完整的解决方案。每种算法在整体机器人设计中都有特定用途，使AMR能在动态复杂环境中适应和演进。

IMU、霍尔传感器、深度计算引擎及运动控制IC内置复杂算法，使得在其基础上运行其他算法成为可能，从而实现更高的速度和更优的能耗表现。随着算法进步，机器人的工作速度和便捷性将持续提升。



2025年及未来工业移动机器人的三大发展趋势

电话普及至1亿用户历时七十五载，而ChatGPT达成同等用户规模仅耗时两月。人工智能(AI)成为工业移动机器人领域日益增长的趋势并不令人惊讶——但AI绝非当下唯一的潮流。

本电子书开篇讨论了任务自动化如何在我们生活的方方面面成为常态。在收篇结尾之际，我们不妨将目光投向远方，探讨工业移动机器人的未来图景和今后几年的发展趋势。

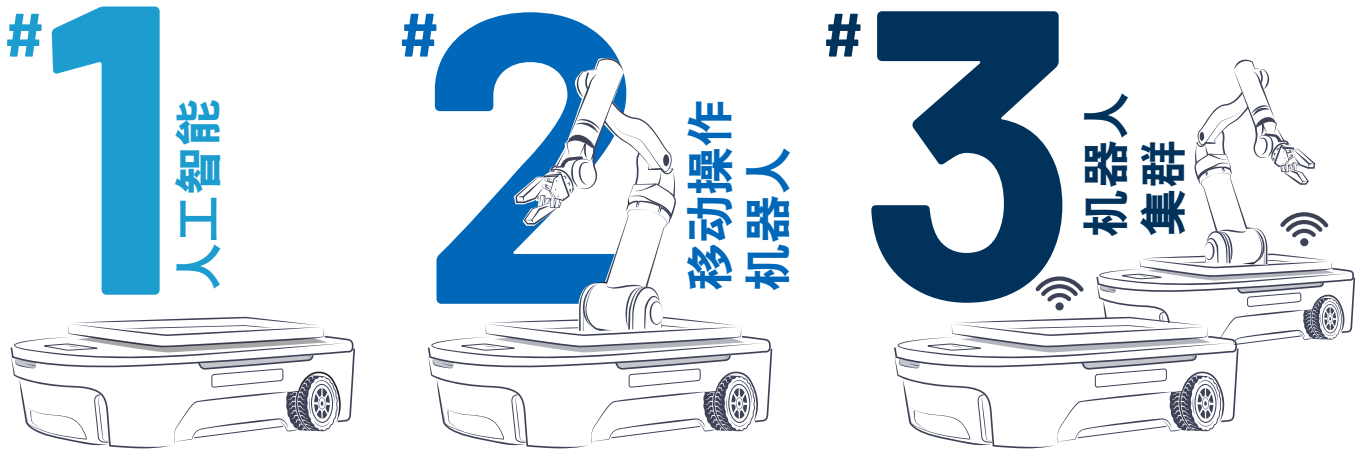


图1：工业移动机器人的三大发展趋势

#1. AI赋能机器人具备更高自主性

机器人是数字时代的标志，也是AI与物理世界之间最重要的接口。机器学习和生成式AI正在创造认知型（或实时感知型）机器人，此类机器人能从环境中学习、自主决策并适应场景变化。

> 机器人是数字时代的标志，也是AI与物理世界之间最重要的接口。

机器人正逐渐具备自学习能力，有助于应对动态环境或采取纠正措施，甚至能模拟或重现人类行为。20世纪90年代，机器人仅有昆虫级智能。如今，AI已解锁机器人的完全自主能力，使机器人能在多种人类环境中安全交互。

随着更多智能向边缘迁移，伴随市场上超低功耗卷积神经网络加速器的出现，AI引擎在本地系统运行的潜力不断增长。最终将释放更多效率，将自动化推向新高度。

> 未来的机器人创新将需要更多系统集成，因此机器人开发者与客户间的紧密协作将变得至关重要。

最后，随着人们普遍接受AI无处不在并应用于众多领域，工业流程和系统（如移动机器人）已准备好借助AI实现能力的跃升。

#2. 移动操作机器人

自主移动机器人(AMR)已证明自身价值，下一阶段的演进已在路上。移动操作(MoMa)机器人结合了AMR平台的移动性与机械臂的灵巧性，弥合了移动性与自动化之间的鸿沟。

感知能力的提升使MoMa能够加入机器人大军。MoMa具备出色的准确度和精度，借助先进传感器和相机技术，可执行检查和维护任务。MoMa将不再仅仅是连接制造各环节的运输工具，而是能够全天不间断运输物料、检查作业和维护系统。

随着路径规划、障碍物检测及避障算法的持续进步，MoMa在未来几年的潜力无可限量。AMR请让路，MoMa来了。

#3. 机器人集群

俗话说“人多力量大”，此话对机器人也同样适用。机器人集群是AMR领域一个具有变革意义的新颖理念。一群小型移动机器人协同工作，能完成以往难以想象的任务。

无缝实时通信是机器人集群实现成功运作的关键。为协作完成各种需要精确交接或并行工作的任务，机器人必须能在彼此间无延迟地收发信息。乱序接收消息（或更糟，消息丢失）可能会扰乱整个作业。

随着通信协议进步，信息技术(IT)与运营技术(OT)网络的融合使机器人集群成为可能。边缘到云端的连接、近实时通信及有线无线混合网络，正不断拓展移动机器人在流程自动化领域的能力边界。

核心要点

移动机器人的部署、开发和设计生态正随上述技术演进而发展，使未来的移动机器人更智能、更多面。未来的机器人创新将需要更多系统集成，因此机器人开发者与客户间的紧密协作将变得至关重要。

	运动控制
三相无刷直流电机双轴伺服驱动平台	TMCM-2611-AGV
单轴FOC伺服控制器栅极驱动模块	TMCM-1690
带RS-485接口的三相无刷直流电机伺服驱动器	TMCM-1640
	定位与导航
精密微型MEMS IMU	ADIS16500
宽动态范围微型MEMS IMU	ADIS16470
100万像素飞行时间模块	ADTF3175
飞行时间评估套件	EVAL-ADTF3175
	电源管理
16通道电池包监控系统	ADBMS6948
带菊花链接口的18节电池监控器	ADBMS1818
高效率140V 250mA降压稳压器	LTC3638
高效率同步降压DC-DC转换器	MAX17644
单通道2A/3A 2.2MHz低压降压DC-DC转换器	MAX20073
10.5μV_{RMS}低噪声500mA LDO线性稳压器	MAX38902A

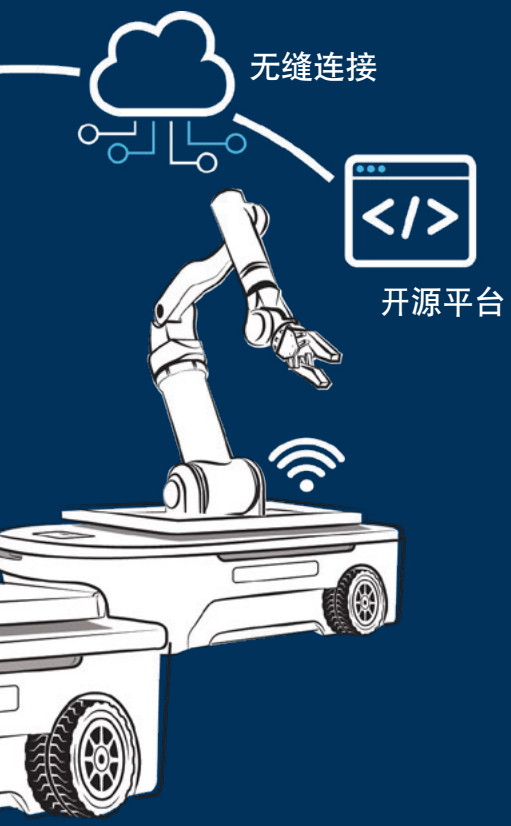


连接

MAX22500E	适用于长电缆的100Mbps半双工RS-485 / RS-422收发器
MAX13054A	+5V 2Mbps CAN收发器，具备±65V故障保护
ADuM4160	全速 / 低速USB数字隔离器
ADMV9615 / ADMV9625	60GHz毫米波短距数据链路
MAX96717 / MAX96724	GMSL串行器 / 解串器
ADIN1200 / ADIN1300	10Mbps、100Mbps及1Gbps工业以太网PHY
ADIN3310 / ADIN6310	3/6端口工业以太网时间敏感网络交换机

软件驱动

tmcl_ros (GitHub)	ADI Trinamic电机控制器(TMC) ROS驱动程序
tmcl_ros2 (GitHub)	ADI Trinamic电机控制器(TMC) ROS2驱动
tof-ros2 (GitHub)	飞行时间ROS2绑定
ADI飞行时间SDK (GitHub)	ADI深度相机跨平台库
imu-ros2 (GitHub)	IMU设备配置ROS2 C++节点
ADIS16xxx (wiki)	IMU Linux工业I/O (IIO)子系统驱动





ANALOG DEVICES

请访问ANALOG.COM/MOBILE-ROBOTICS