

工业无线电磁环境白皮书

——汽车制造领域（2018年）

工业互联网产业联盟（AII）

2018年10月



联系我们

工业互联网产业联盟 秘书处

地址：北京市海淀区花园北路52号，100191

电话：010-62305887

邮箱：aia@caict.ac.cn

网址：<http://www.aia-alliance.org>



编写说明

指导单位

工业互联网产业联盟

编写单位

华为 Wireless X Labs

编写组成员

华为技术有限公司：

陈彦彤、郭洪涛、郭朝阳、黄冠琛

北京邮电大学：张建华等

北京交通大学：刘留等

重庆邮电大学：严冬等

吉利汽车研究院（宁波）有限公司：

胡峥楠，丁华，辜自强，姚军

中国信息通信研究院：杜加懂、王琦

随着工业 4.0，中国制造 2025 等各个国家政策的推动，工业互联网已成为国家关键竞争力，智能制造正加速发展。进入二十一世纪，物联网、大数据、云计算等新一代信息技术的快速发展及应用，使得社会发生巨大的改变，人类生产工业发生变革，智能制造被赋予了新的内涵，即新一代信息技术条件下的智能制造。智能制造不仅使生产模式变得高效灵活，促使产业链更加有效的协作与整合，而且催生了新型生产服务型制造，同时协同了开发和云制造的共同发展。一方面促进劳动效率、生产效率、产品质量的提升，另一方面推动了全行业的创新和改革。

现阶段智能制造普遍采用的有线方案面临着布线工期长、易腐蚀、维护难、成本高等诸多问题，同时随着柔性制造的需求越来越强烈，未来的生产线需要适应客户个性化的定制需求，而无线技术的应用不仅可以实现生产线灵活的调整和重组，而且在部署维护等方面成本优势明显，更顺应未来智能制造产业的发展趋势。为更好地保障无线技术在工业领域的应用，研究分析典型工业场景复杂电磁环境是关键一环。充分了解工厂的干扰情况和信道特征，深入研究工业场景下电磁环境，从而进一步支撑无线网络的部署，推动无线技术与工业应用的深度融合。

本报告简要介绍了无线化智能制造的背景以及关键应用场景，以工业典型场景汽车制造领域为例，重点分析了其焊接车间的电磁环境，包括噪声干扰和信道特征两部分内容，进而针对焊接车间电磁环境特点，给出无线通信解决方案思路和方向上的建议，以供进一步网络规划作为参考。

白皮书旨在以汽车制造焊接车间的电磁环境分析为例，明确工业电磁环境对无线通信的影响以及对无线通信解决方案的指导意义，促进工业领域建网的规范化、标准化发展，保障无线网络可靠性，从而由点到面逐步快速推动无线智能制造覆盖全行业，为工业互联网的发展和 innovation 做出重要贡献。工业互联网网络是不断演进发展的，联盟将根据国内外工业无线应用的发展情况，持续推进工业典型电磁环境的研究分析，广泛吸纳产业界的反馈意见，适时修订和发布报告新版。

Alliance of Industrial Internet

目录 / CONTENTS

01 无线化智能制造背景及应用场景 01

- 1.1 智能制造发展与市场前景 01
- 1.2 无线化智能制造的优势和价值 03
- 1.3 工业无线电磁环境分析必要性 04
- 1.4 汽车制造焊装车间无线技术关键应用场景 05
 - 1.4.1 机器人与机器人协同控制
 - 1.4.2 焊装过程中的视频监控
 - 1.4.3 焊装车间工序间的物料传输AGV应用

02 汽车制造焊装车间电磁环境分析 09

- 2.1 汽车制造焊装车间电磁噪声特性分析 10
 - 2.1.1 焊装车间电磁噪声干扰源
 - 2.1.2 焊装车间电磁噪声特性
- 2.2 汽车制造焊装车间信道特征分类分析 13
 - 2.2.1 遮挡障碍
 - 2.2.2 金属屏蔽
 - 2.2.3 时变信道
 - 2.2.4 测试结论

03 工业无线通信解决方案建议 21

- 3.1 汽车制造焊装车间无线解决方案建议 21
 - 3.1.1 增加链路预算，弥补路径损耗
 - 3.1.2 控制无线电传输方向，减少NLOS场景通信
 - 3.1.3 抵抗多径干扰，保障主径分量
 - 3.1.4 扩大信道带宽，弱化多普勒效应
- 3.2 工业无线常见问题解决方案建议 24
 - 3.2.1 频谱规划与选择
 - 3.2.2 抗干扰机制
 - 3.2.3 确定性传输机制
- 3.3 小结

04 缩略语 29

05 参考文献 30

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet





01

无线化智能制造背景及应用场景

Alliance of Industrial Internet

1.1 智能制造发展与市场前景

智能制造是伴随信息技术的不断普及而逐步发展起来的。1988年，美国纽约大学的怀特教授 (P.K.Wright) 和卡内基梅隆大学的布恩教授 (D.A.Bourne) 出版了《智能制造》一书，首次提出了智能制造的概念，并指出智能制造的目的是通过集成知识工程、制造软件系统、机器人视觉和机器控制对制造技工的技能和专家知识进行建模，以使智能机器人在没有人工干预的情况下进行小批量生产。21世纪以来，随着物联网、大数据、云计算等新一代信息技术的快速发展及应用，智能制造被赋予了新的内涵，即新一代信息技术条件下的智能制造，从而使得社会发生巨大的改变，人类生产工业发生变革，使人类社会生活水平更上一个台阶^[1]。

从全球范围来看，除了美国、德国和日本走在全球智能制造前端，其余国家也在积极布局智能制造发展。例如，欧盟将发展先进制造业作为重要的战略，在2010年制定了第七框架计划 (FP7) 的制造云项目，并在2014年实施欧盟“2020地平线”计划，将智能型先进制造系统作为创新研发的优先项目；德国为应对全球挑战提出了“工业4.0”的发展计划；我国根据发展的实际情况，提出《中国制造2025》的国家战略规划^[2]。

2017年，具有连接和感知能力的机器人继续引领智能制造发展，随着AI技术的进步，工业机器人也变得更加智能，并能够感知，学习和自己做决策。结合当前全球智能制造的发展现状和发展趋势，预计到2020年，全球制造业的连接数将达125亿，保守估计未来几年全球智能制造行业将保持15%左右的年均复合增速 (CAGR, Compound Annual Growth Rate)，预计到2023年全球智能制造的产值将达到23108亿美元左右 (图1-1)^[3]。

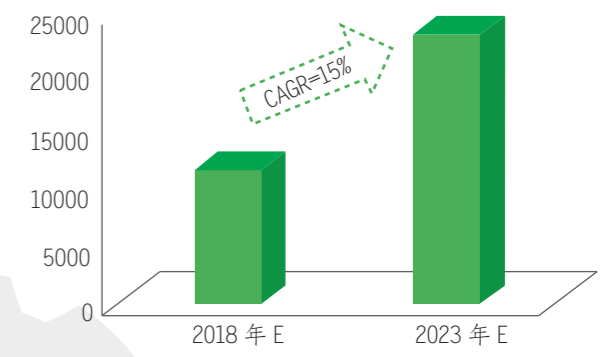


图1-1 2018-2023年全球智能制造产值规模预测 (单位: 亿美元)

经过连续三年的试点和探索，我国智能制造行业发展取得了显著成就。数据显示，2010-2017年，我国智能制造行业保持着较为快速的增长速度，到2017年，我国智能制造行业的产值规模已达到15000亿元左右 (图1-2)^[3]。

预计未来几年我国智能制造行业将保持11%左右的年均复合增速，到2023年行业市场规模将达到2.81万亿元，行业增长空间巨大 (图1-3)^[3]。

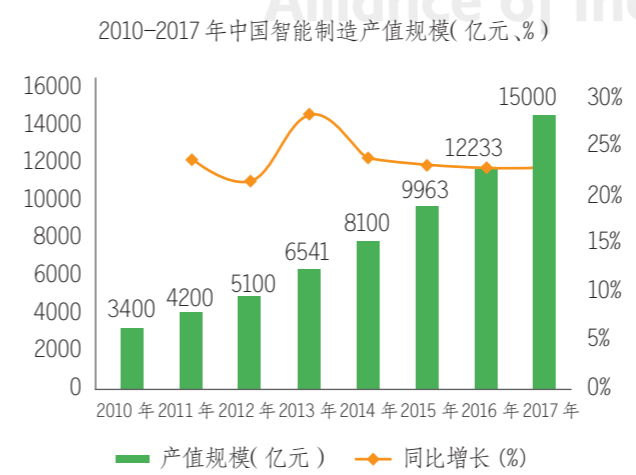


图1-2 2010-2017年中国智能制造产值规模

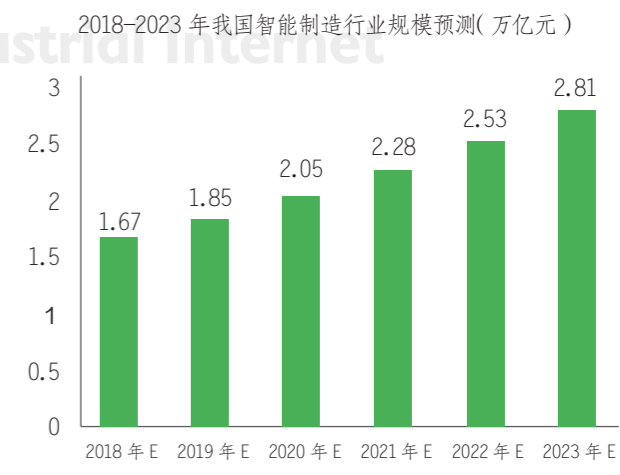


图1-3 2018-2023年中国智能制造行业规模预测

1.2 无线化智能制造的优势和价值

工业互联网作为智能工厂的基础，已成为国家关键竞争力，市场空间达 11.6 万亿美元。现阶段的传统模式下，工业互联网仍依靠有线技术来连接应用，面临着布线工期长、易腐蚀、维护难、成本高等诸多考验：

- (1) 部署成本高、工期长。以 6km² 厂区为例，退火、镀锌等采集点多（超过 1000 个），最远 1400m 部署光纤需架线，工期达 30 天，影响工厂投产；
- (2) 线缆更换成本高。硬件材料在连退、酸洗车等高温腐蚀环境，线缆易损坏，导致线缆更换频繁，每 12 个月须检测更换线缆；
- (3) 检修困难。一条自动化装配线上可能有多达上百个开关可识别托盘，有线开关安装在输送机下方，电缆则铺设在装配线地板下的通道中，如果电缆失效，往往很难检修；
- (4) 管理成本高。如果操作区域发生变化，有线需要完全重新布设以满足新定义操作区域的要求，管理成本将会更高；

随着智能制造的逐步发展，柔性生产的愿望越来越强烈，未来的生产线不仅需要适应客户个性化的定制需求，同时还要满足小批量的生产需求。这些需求要求产线可以灵活地进行调整和重组，而有线连接的方案线受限于线体长度、缠绕等问题（图 1-4）不利于产线的移动，甚至存在安全隐患。然而，无线通信在工厂中的应用会带来多方面的优势，不仅可以适应产线的灵活调整和重组，充分满足高速移动、旋转等应用场景，而且可以使网络部署维护更加高效便捷，同时降低成本。具体如下：



图 1-4 有线方案线体缠绕

▶ 无线技术可以提升效率。未来柔性制造的生产模式下，工厂可根据实际的定制化需求，灵活地调整产线结构，实时地进行不同产品的生产制造，有线技术的设备移动受限，产线结构固化，限制了产线设备的移动，而无线网络由于部署灵活性，能够满足灵活产线调整需求，同时无线还省去了线缆的部署和维护时间，提升了网络运行的效率，节省了大量的加工时间，进一步大大提升生产效率。

▶ 无线技术可以保障安全。现阶段工业自动化程度较高，产线机器人数量庞大，无线技术可避免因为有线线缆的老化导致的机器人非正常运动，降低对设备或者人员造成损害或伤亡。同时，无线技术也可避免因有线线体缠绕导致的设备骤停（图 1-4），产线故障瘫痪，进而引发大面积机器行为混乱危害人身安全。

▶ 无线技术可以降低成本。无线技术相比与有线可在硬件材料成本节省 30%-40%，安装部署成本节省 80%-90%，工程维护成本节省 45%-55%，管理成本节省 55%-70%，综合可节省 50%-70%^[4]。

综合来看，无线化智能制造可以提高生产组网的灵活性，更好的适应将来生产制造的需求，也可以降低成本和提升效率，并保障了生产环境的安全，促进智能制造行业生态的发展。近些年 WIFI、ZigBee、FRID、WirelessHART 等无线解决方案已经在制造车间立足，WIFI、ZigBee、RFID 等各类无线通信技术具有使用成本低、易部署等优点，但存在网络覆盖低、容量受限等问题，ISA 100.11a、WirelessHART 等技术受限于传输距离或者传输速率，只适用于信息采集等少量工业互联网应用，可见这些无线解决方案在带宽、可靠性和安全性等方面都存在局限性。5G 作为新一代移动通信网络具有统一规划部署、广域覆盖、抗干扰能力强、小区切换可靠性高以及端到端网络 QoS 保障等优点，将会大大克服以上问题。同时，随着工业化与信息化的深度融合，企业内部互联互通的需求渐增，通过接入网络进而达到提高产品质量和运营效率的需求更为强烈，利用新一代移动通信网络可将生产设备无缝连接，使生产更加扁平化、定制化、智能化，从而构造一个面向未来的无线化智能工厂。

1.3 工业无线电磁环境分析必要性

与商用和民用无线通信的环境相比，工业无线通信电磁环境更加特殊和复杂，这对于无线通信的信号传播有很大的影响。从信息论的角度看，无线通信传输效率、质量及应用效果主要受两个因素制约：一是传输链路的信噪比；二是传输的信道特征。

移动无线通信系统的传输速率和传输质量最终都要受到无线信道和噪声的制约。只有在充分研究和了解所设计系统的信道和噪声特性

后，才能采取与之相适应的各种物理层技术，如最佳的调制方式和编码交织方式、均衡器的设计，或者 MIMO、OFDM 系统中的天线配置选择和子载波分配等，从而充分挖掘该系统的容量，并进一步优化系统的性能。无线信道模型是人们对无线传播环境及其传播特性的一个抽象的描述，无线信道的传播特性是构建移动无线通信系统的基础部分，其在无线通信系统从设计评估到标准化以至到最终部署的各个环节中，都有重要的作用：（1）当新的无线传输技术和理论被提出时，往往使用信息论工具进行推导验证，从而为新技术提供理论依据、性能极限。（2）在无线传输技术研究、设计以及标

通信信号受到干扰，数据包无法按时准确的传送到接收端^[5-6]。

标准化阶段，都需要对各种候选方案进行性能评估。评估阶段所使用的信道模型的准确性与否直接决定了仿真结果的可靠性、准确性。因此在移动通信技术的评估过程中，各个标准化组织非常重视评估信道模型的标准化工作。(3)在实际的无线通信系统的部署中，需要根据实地无线传播环境进行网络规划，容量优化，盲区覆盖等工作。准确的信道模型（特别是路径损耗和阴影衰落模型）可以使网络部署、优化、规划的工作更加准确和有效，从而提升无线网络的覆盖能力。

从传输链路信噪比来看，在常规无线通信中信噪比的定量使用中，通常使用加性高斯白噪声，即噪声的功率谱是一个常数。工厂在工作时，电焊机、变频器、点火系统、稳压器以及高压输电线等设备都会辐射出大量的电磁噪声，这时会出现突发的脉冲噪声，这些噪声可能在功率谱形状、生命周期等方面和传统的加性高斯白噪声有着较大的不同，会导致正常的

从信道特征来看，不同的工业领域由于工艺和产品各不相同，车间内各类物理条件、设备等吸收和反射能力有很大差异，导致信道传播特征（包括路径损耗，多径分量等）均表现不同。工业环境中大型设备的密度、金属类器材与材料的密度以及各种传播障碍物的数目，对于无线通信信号的传输至关重要。机床、机械臂等金属障碍物会对电波传输损耗造成影响；金属设备在电波传播中会形成较强的镜面反射和散射，从而产生更多强度较大的多径分量；工业自动化中的机械臂转动、机器人运输移动等运动因素会让无线信道同时具有时变特性，这些特殊的信道特征都将对信号传输、网络性能产生影响。

因此，需要对典型工业场景的电磁环境进行分析研究，了解干扰源的噪声特性，并根据实际的工业环境、特点以及工业性质来提取无线信道的参数，从而进一步规划通信频段，指导工业建网，支撑无线技术的空口设计，性能评估和优化等，更好地保障工业无线通信应用在未来智能制造领域的可靠性，推动行业发展。

随着汽车行业之间竞争的日益激烈，各生产厂家都普遍面临着：提高生产效率、降低生产成本、提高生产管理水平等种种压力，汽车行业的智能制造正在飞速发展中。汽车制造是典型的多工种、多工艺、多物料的大规模生产过程，包括冲压工艺、焊装工艺、涂装工艺、总装工艺。其中焊装工艺水平直接关系到汽车产品的外观质量和使用性能，是汽车制造的最重要的环节，在焊装车间将冲压成型的车身各组件经过散件拼焊，整车拼焊，形成整车白车身。另外，焊装车间生产线众多、智能化程度高、焊接设备量大、拼焊工艺复杂，使得焊装环节电磁环境最为复杂，因此，我们以汽车制造焊装车间为例简单介绍其应用场景，并于第二章重点分析其电磁环境特征。

1.4.1 机器人与机器人协同控制

焊装是自动化程度最高、机器人使用数量最多的车间。在焊装生产过程中，存在各种机器人与机器人协同工作的情况，如：两台机器人共用一把焊枪、两台机器人协同涂胶、两台机器人协同搬运、两台机器人协同焊接等。通过无线化，减少机器人间的线缆部署，使产线部署更灵活。

机器人协同控制系统一般由4大部分组成（图1-5）：PLC、机器人控制器、无线网络、机器人，主要有两大类信号：

(1) 机械手臂任务信号：PLC通过无线网络下发任务命令（如抓举车身、焊接车身）给多个控制器，控制器按照下发的任务命令控制机械手臂进行作业；

(2) 互锁信号：控制器反馈机器人预定义作业信号至PLC，PLC实时同步互锁命令给多个控制器，保障机械手臂在运动过程中不会碰撞。

在焊接过程中，一个机械手臂通过PLC下发的任务命令抓举车身，另一个机械臂举起焊枪进行焊接操作。同时，PLC实时下发互锁命令保障机器人手臂间不会产生异常的碰撞。机器人协同控制对网络时延和实时性要求很高，环境中的干扰和信号传输问题都是影响其业务的运行的重要因素。

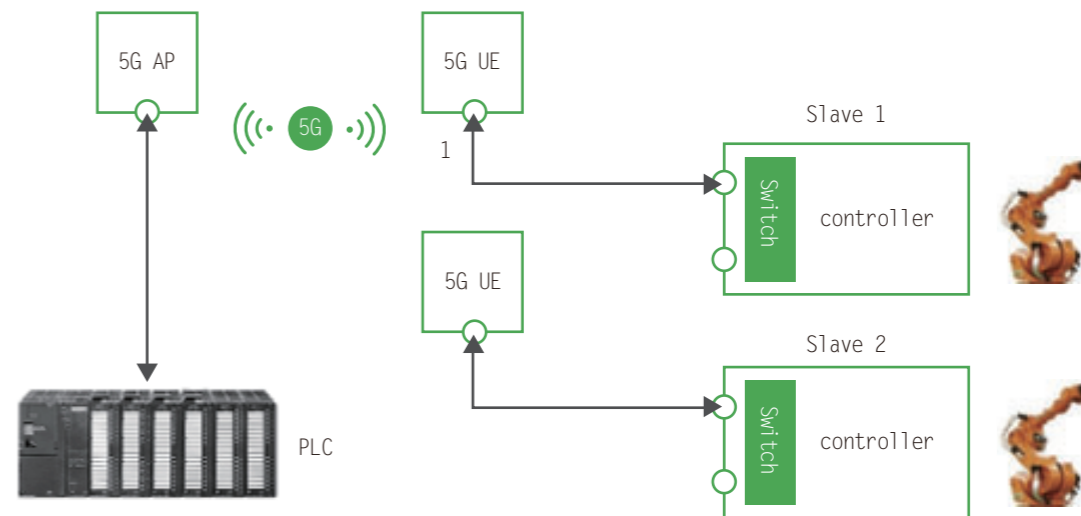


图 1-5 机器人与机器人协同控制示意图

1.4 汽车制造焊装车间无线技术关键应用场景

汽车制造业是国民经济重要的支柱产业，一直被当成工业发达国家的经济指标，在国家实力成长和社会发展中发挥着极为重要的作用。汽车制造业是典型的多工种、多工艺、多物料的大规模生产过程，反映了一个国家的综合工业水平，不仅可以带动钢铁、冶金、橡胶、石化、塑料、玻璃、机械、电子等诸多相关产业，而且吸纳各种新材料、新工艺、新设备、新技术，持续增长的生产规模和市场规模，创造了巨大的产值、利润和税收。

1.4.2 焊装过程中的视频监控

在车身制造过程中，存在各种作业机器人，包括点焊机器人、涂胶机器人、激光焊接机器人、螺柱焊机器人、搬运机器人、弧焊机器人、滚边机器人等，在整个生产区域及控制过程中，为了远程观察作业和维护，需在机器人附近安装高清摄像头，对作业过程录像，期间将产生大量的图片视频。

视频监控系统包含三部分：摄像头、无线网络、视频监控平台（图1-6）。当视频监控平台通过无线网络下发启动监控命令到摄像头，摄像头通过无线网络实时采集并上传图片 and 视频到后端视频监控平台，所需带宽为>1Mbps(720p及以上清晰度)。通过该系统可以解决限制区域人员难以进入，无法及时捕捉瞬间的问题，也可减少线缆的部署，灵活改变部署位置。大量的视频和高清图片需要无线网络提供足够的带宽，而机器人系统本身就包含很多电磁干扰源，同时大密度的设备对于信号传输也有阻碍削弱作用，这些电磁环境问题都会对视频和图片的准确可靠送达造成影响。

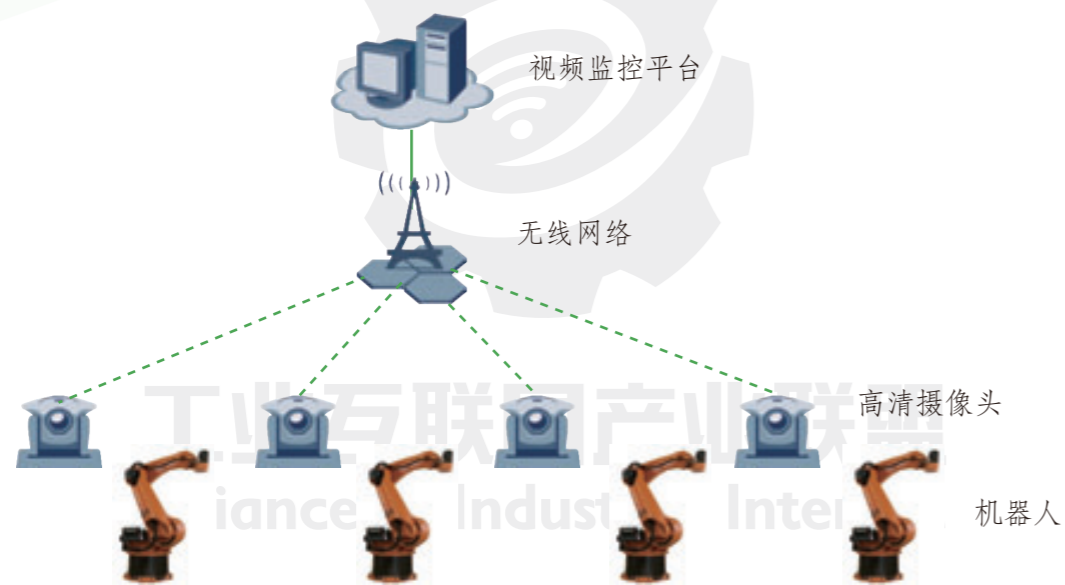


图 1-6 焊装过程的视频监控示意图

1.4.3 焊装车间工序间的物料传输AGV应用

高柔性化制造已经成为汽车制造行业发展的趋势，AGV在物流柔性方面起到重要作用。AGV系统一般由三大部分组成（图1-7）：AGV中控室、无线网络、AGV小车。AGV中控室与AGV小车之间存在着大量的交互信息均通过无线网络，主要有两大类信号：

(1) AGV小车本体控制信号：运动控制信号（AGV状态、异常信息、速度、电压、卡号、方向、管制、能派车、任务点、有无带滑撬、在等待点、吊点放行、前往站点等）、控制信号（举升装置升降等）；

(2) 与线体PLC对接信号：到位信号、允许进出工作站信号等。

自动化线工作站根据站内生产情况，提前生成物料派送任务信息（物料名称，需求工位等），并将任务信息传递给AGV派送系统，AGV派送系统根据需求工位、工艺流程以及AGV小车位置、状态，生成派送任务，并通知适合的AGV小车到达需求工位，按照工艺流程将物料送到目标工位。由于整个过程均为自动化，AGV派送系统需要实时与需求工位、目标工位进行信息交互，包括请求开门、到位、RFID读写成功、允许出门等信息。AGV在工作过程中始终处于移动状态，电磁波传播具有时变特性，这对于接手信号是有影响的，需要分析车间时变信道的特点，从而保证AGV移动过程中路径可控，运行安全可靠，防止碰撞到设备及人员、发生事故。

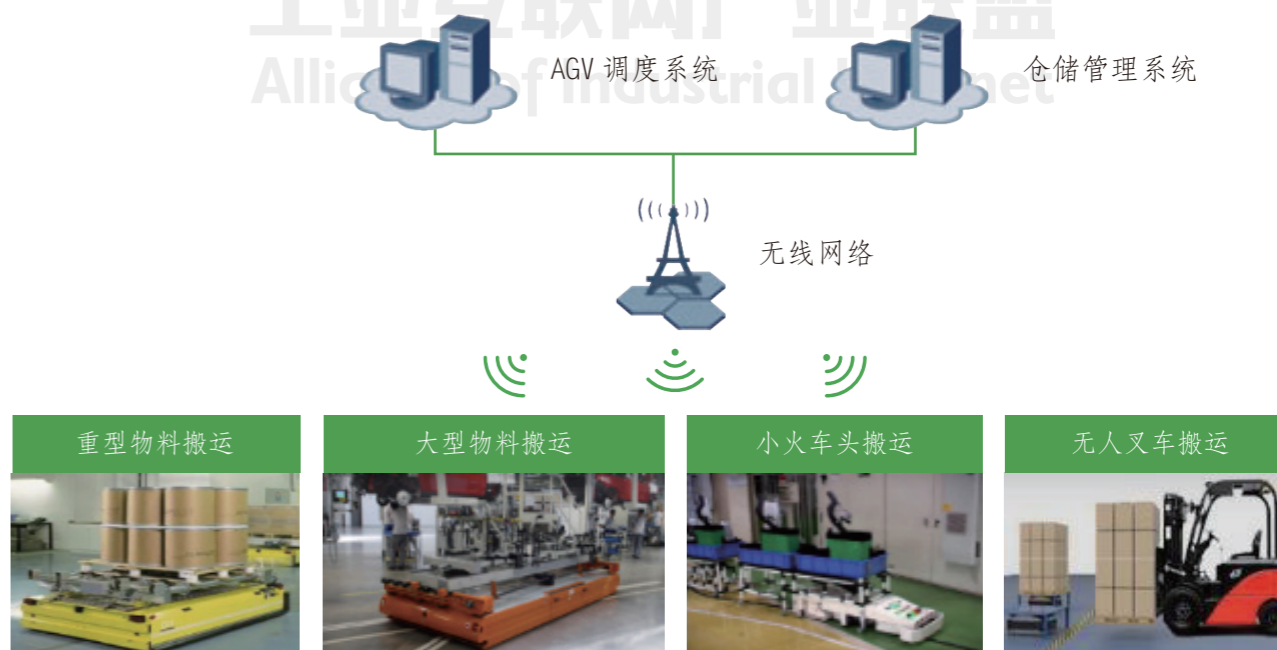


图 1-7 焊装车间工序间的物料传输示意图

如前文所述，汽车制造分为四大工艺：冲压工艺、焊装工艺、涂装工艺、总装工艺。冲压工艺主要运用模具将钢板加工成独立的汽车部件，如顶盖、发动机盖外板等，其电磁干扰主要来自冲压机床。涂装工艺、总装工艺分别进行汽车的喷漆以及汽车配件的组装工作。相比于以上三种工艺，焊装工艺是汽车制造的最重要的环节，负责散件拼焊，整车拼焊，形成整车白车身。焊装过程中需要应用电焊机，焊机工作产生电火花的会辐射出大量的电磁干扰，同时，支持电焊机工作的变频器、稳压器、电子开关等设备同样会辐射出一定的电磁干扰。另一方面，焊装车间生产线众多，智能设备使用率高，大型设备的遮挡以及金属材质的反射、散射影响，导致其信道特征更为特殊。因此，汽车制造领域的电磁环境的研究工作主要针对焊装车间展开。

2.1 汽车制造焊装车间电磁噪声特性分析

以下将介绍焊装车间的主要噪声干扰源以及噪声频谱特性分析。了解了汽车制造车间典型的干扰源，从而更准确地把握汽车厂的电磁噪声情况。

2.1.1 焊装车间电磁噪声干扰源

汽车制造厂的电磁噪声干扰源主要有电焊机、变频器、稳压器、电子开关、伺服驱动器等设备。

► 电焊机

电焊机是一个将电能转换为热能的机器，利用焊机的正负两极在瞬间短路时产生的高温电弧来熔化电焊条上的焊料和被焊材料，完成焊接工作。汽车厂大量应用的焊接机器人如图2-1所示。



图 2-1 焊接机器人

焊接是汽车制造业最重要的一个环节，车身、车门等部件都需要依靠焊接完成组装。电焊机在工作时，焊头产生的高压电弧会辐射出大量的电磁噪声，这些噪声频率范围很宽，由于焊接产生的电磁噪声可以达到数百MHz^[7]。

► 变频器

变频器通过调整输出电源的电压和频率，根据电机的实际需要来提供其所需要的电源电压，进而达到节能、调速的目的。另外，变频器还有很多的保护功能，如过流、过压、过载保护等。变频器的实物图如图2-2所示。



图 2-2 变频器

在汽车厂中，控制生产线的升降、进退的传送设备以及其他机械设备都需要应用变频器。变频器产生的电磁噪声主要来自整流桥模块、逆变器模块。整流桥在工作时其内部巨大的电流变化会产生谐波辐射，逆变器工作时会产生大量的耦合性噪声^[8]。

► 稳压器

稳压器是使输出电压稳定的设备。稳压器由调压电路、控制电路、伺服电机等组成。当输入电压或负载变化时，控制电路进行取样、比较、放大，然后驱动伺服电机转动，使调压器碳刷的位置改变，通过自动调整线圈匝数比，保持输出电压的稳定。稳压器的实物图如图2-3所示。



图 2-3 稳压器

在汽车厂中，大型的机械设备如电焊机、起重机等设备都需要应用稳压器。稳压器需要用到大量的电磁线圈，这些电磁线圈在工作时会辐射出大量的电磁噪声。

▶ 电子开关

电子开关是指利用电子电路以及电力电子器件实现电路通断的运行单元，在实际使用过程中，电子开关主要是指触摸开关、感应开关、声控开关、无线开关等墙壁开关。汽车厂中的用电设备都需要用到电子开关，但电子开关在工作中会辐射出许多电磁噪声。在开关接通的一瞬间会产生电火花，这是电子开关电磁噪声的主要来源。

▶ 伺服驱动器

伺服驱动器是用来控制伺服电机的一种控制器，通过位置、速度和力矩三种方式对伺服电机进行控制，实现高精度的传动系统定位。汽车厂焊接车间中大量应用的焊接机器人就需要通过伺服驱动器进行控制，保证机器人能够准确的定位焊接位置，进行精确的焊接工作。但由于伺服驱动器需要脉冲信号进行驱动，因此其工作时会辐射出一定的电磁干扰^[9]。

2.1.2 焊装车间电磁噪声特性

测试分析方法：针对接收端位置的不同进行噪声干扰测试分析，充分对比其干扰情况，分析噪声干扰对于无线通信的影响。电磁噪声测量运用频谱仪和对数周期天线，在汽车厂焊接车间的手工地焊机和焊接机器人（这两种设备是焊接车间最为常见的电磁噪声源，且支持电焊机工作的变频器、稳压器、电子开关等电磁干扰源，共同与电焊机组成电焊系统）各选取一个测量位置进行了300MHz~3GHz频段的测量工作，测量采用对数周期天线（定向天线）进行垂直、水平两种天线极化方式。天线方向图如图2-4，测量结果如图2-5所示。

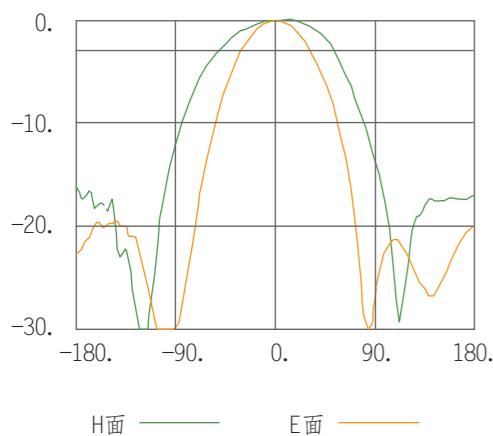


图 2-4 天线方向图

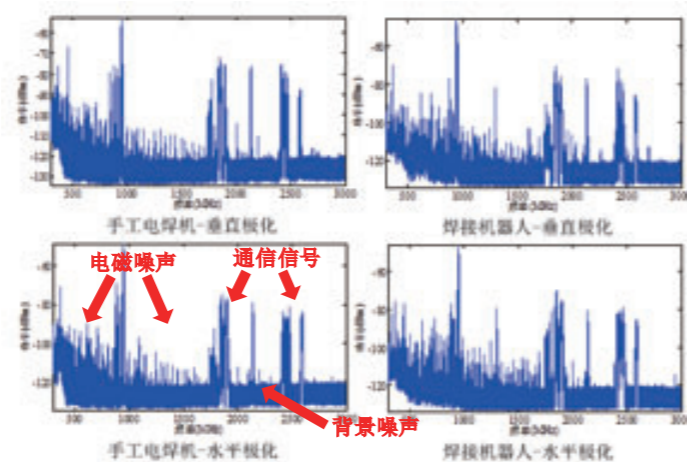


图 2-5 焊接车间频谱测量结果

通过对汽车制造车间不同位置的噪声干扰情况测试后，可看出车间内不仅包括机械设备产生的电磁干扰，同时也包含很多手机通信信号和WIFI通信信号的影响。通过与各地区公开的通信信号频谱占用情况进行对照，可以将车间内各个频段的干扰源以及干扰特征进行梳理和分析。对照后整理出汽车厂的通信信号的频谱占用情况（表2-1）。

表 2-1 通信信号频谱占用情况

频段 (MHz)	信号类型	频段 (MHz)	信号类型
478-486		825-835	CDMA 上行
518-526		870-880	CDMA 下行
526-534		890-915	GSM800 上行
614-622		935-960	GSM800 下行
654-662		1710-1755	GSM1800 上行
662-670	电视广播信号	1755-1785	FDD-LTE 上行
670-678		1805-1840	GSM1800 下行
702-710		1840-1875	FDD-LTE 下行
718-726		1885-1915	TD-LTE
758-766		2130-2145	WCDMA 下行
766-774		2401-2481	WIFI 信号
790-798		2575-2595	TD-LTE

从测量结果中可得出以下结论：

(1) 图2-5中包含工厂中的噪声信号和通信信号，在800MHz以下的频率范围存在广播电视信号。通过与公开的通信信号频谱占用情况进行对照可知，图2-5中信号功率较大的900MHz、1.8GHz附近频段存在运营商发射的手机通信信号，在2.4GHz附近频段存在WIFI信号。通信信号强度大体分布在-65~-50dBm之间。

(2) 工厂中辐射出的电磁噪声信号主要集中在300MHz~1GHz频段，功率大体分布在-120dBm~-110dBm之间，也就说明汽车制造车间的电磁干扰源主要对低频段的无线信号有影响，那么在车间建网部署的时候就要考虑对该频段的频谱的针对性选择和规避。

(3) 随着频率的升高, 工厂中辐射出的电磁噪声信号的功率呈明显的下降趋势, 在1GHz以上, 电磁噪声信号功率趋于平缓, 功率不再随频率的升高出现明显的降低。在1GHz以上的高频段的干扰主要为通信信号。因此, 未来车间的网络部署可以更好地面向1G以上频段, 合理的分配频谱, 实现与LTE、WIFI等通信信号的频谱复用, 从而实现大带宽的网络特性, 为汽车制造车间有该需求的应用场景奠定基础。

(4) 焊接车间的两种焊接设备(手工点焊机、焊接机器人)电磁噪声情况, 即频点、功率情况大体上相同。因此, 在对这两种设备进行网络部署时, 可以选取相同频点。

2.2 汽车制造焊装车间信道特征分类分析

焊装车间生产线众多, 智能设备使用率高, 大型设备的遮挡、金属外壳的反射、散射、移动设备的影响, 导致其信道特征更为特殊。如下对焊装车间的信道特征进行测试分析, 主要提取了路径损耗、K因子、信号包络、时变特性等信道参数。

路径损耗是无线系统一个重要的考虑因素, 常用公式(1)的路损模型(通用的路损模型)对无线链路传输的路径损耗进行拟合:

$$PL(d) = A + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d) + X_{\sigma} \quad (1)$$

式中n表示的是路损指数, d为收发两端的距离(单位m), A为拟合截距, X_{σ} 为阴影项, 符合高斯分布。在这里主要研究路损指数n, 其反映了无线链路功率损耗情况, 一般可认为厂房内的大型设备以及其他传播障碍物密度越大, 路径损耗指数越大, 对无线链路传播损耗越大, 因此需实际测量建立路损模型。

K因子参数, K因子是描绘主径信号与多径分量强度比的重要参数, 见公式(2):

$$\hat{K}(m) = \frac{P_{LOS}(m)}{P_{NLOS}(m)} = \frac{|h(m, l)|^2}{\sum_{l=2}^L |h(m, l)|^2} \quad (2)$$

其中 P_{LOS} 和 P_{NLOS} 分别表示LOS径和其他多径分量的功率。K因子越大表示直射分量相比散射径分量就越大, 而工厂环境中遮挡障碍削弱主径传播能量, 从而会使K因子变小。同时环境中各类设备以及其他传播障碍物会成为电磁波传播时的散射体, 厂房内的大型设备以及其他传播障碍物密度越大, 散射体就会越丰富, 电波传播时就会有更多的多径分量, 使RMS(均方根时延扩展)值增加, 体现在各个接收端信号叠加从而产生码间干扰影响通信。

信号包络是信道的小尺度信息, 表现出接收信号的分布情况, 包络方差的大小可以反映同一路径中接收端信号幅值波动情况, 方差越大、波动越大、多径影响越大, 因此在链路设计时应考虑环境中多径的影响, 从而采取相应措施。

时变特性是指当设备以恒定的速率沿某一方向移动时, 由于传播路程差的原因, 会造成电磁波相位和频率的变化, 通常将这种变化称为多普勒频移。多普勒频移会导致无线通信中发射和接收的频率不一致, 从而使得加载在频率上的信号无法正确接收, 甚至无法接收到。焊装车间有大量的AGV小车在移动执行物料搬运的任务, 运动速度越快其产生的多普勒效应越严重, 对通信所产生的影响也就越大, 需要根据业务实际运行情况进行考察。

综合来看, 信道受到影响有以下几种情况:

2.2.1 遮挡障碍

不同工业环境中的遮挡障碍, 如建筑物、机床、机械臂等对电波传输损耗造成影响不同, 同时大量的设备在电波传播中会形成反射和散射, 从而产生更多的多径分量, 致使信道参数不同^[10-11]。如图2-6所示为实际焊装车间的环境特征, 由图可以看出实际环境中存在着大量的物理建筑、设备机床、焊接机械臂等对信号传播有遮挡阻碍作用的因素。



图 2-6 实际的工业环境

表 2-2 焊接车间 LOS 与 NLOS 条件下的路损指数

中心频率 (GHz)	LOS	NLOS
1.1	2.5	3.1
1.6	2.6	3.2
2.55	2.4	3.4
3.5	2.6	3.3
5.8	2.7	3.2

路损指数是路径损耗模型的一个重要参数^[12]，它描绘了空间电磁波传输时在无线链路中损耗情况，路损指数的值越大表明无线链路损耗随着距离增加损耗越严重。表2-2是基于实际焊接车间测量的数据计算得到两种不同传播方式LOS与NLOS方式的参数。如图2-7所示为LOS与NLOS的环境，发射天线在同一位置，在LOS情况电磁波传播时没有遮挡，NLOS情况电磁波会受到建筑物、器械设备等传播障碍物的影响。

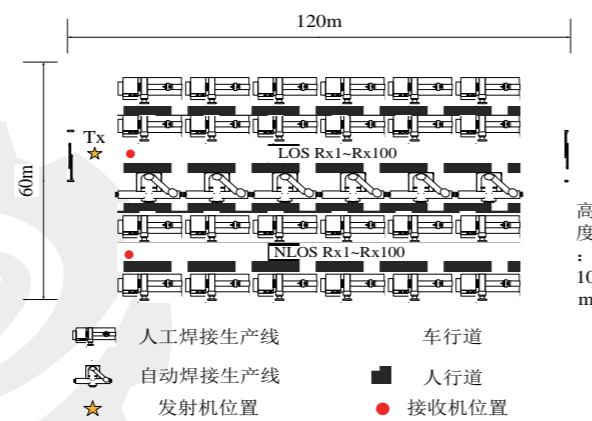


图 2-7 焊接车间 LOS 与 NLOS 测量环境

由表2-2所示不同传播条件下，NLOS传播条件下的路损指数明显大于LOS的路径损耗，这是由于NLOS的环境下，传播链路中会有许多车间内的金属机器及零部件阻挡了电波的传播，损失了传播的能量，而车间中通信接收端大部分处于NLOS的传播条件下，在下一步的信道模型建立和链路预算中应考虑选取较大的路损指数，以更好的评估车间的信号传输和覆盖。

K因子是描绘主径信号与多径分量相对大小的重要参数，K因子越大说明由于物理遮挡或金属设备反射导致环境中主径信号能量被削弱越多而多径分量占比越大，导致通信信号传输受到影响，通信质量变差。焊接车间实际测得，在LOS条件下K因子值为5dB左右，NLOS条件下K因子值约为4dB左右，NLOS的K因子明显小于LOS，这是由于NLOS场景下的电磁波传播受遮挡较为严重，主径分量被严重的遮挡，接收到的信号主要是经反射、折射等过程的多径分量，而车间大多数信号传输都面临NLOS的传播情况，因此需要采取相应措施来抵抗路径损耗以及减少多径干扰，保障主径信号传输不受影响。

时延扩展(Delay Spread, DS)量化了第一个到达信号和其他多径信号之间的时间延迟，该信道参数能客观的描绘无线信道时间色散情况，分析环境中多径影响程度，通常用时延扩展的均方根来统计数据^[12]。LOS与NLOS两种传播条件下，由于传播环境散射体的影响不同，时间色散会有很大差

别。如表2-3所示为两种传播条件下所提取的时延扩展，由于窄带的多径分辨率低，因此一般采用宽带信号统计，在测量中频点选用了5.8GHz，带宽为10MHz的宽带带宽。可以看出NLOS条件下RMS明显大于LOS条件下，这主要由于在NLOS传播条件下多径相对较强丰富，信号通过不同路径反射、折射等传播方式到达接收端。因此在设计无线系统时应考虑传播信号的符号周期应该大于RMS，NLOS条件下更应选取适合的符号周期，这样才能保证系统的稳定，不会产生码间干扰等问题。

表 2-3 均方根时延扩展值 (Root Mean Square RMS)

频点	LOS	NLOS
5.8GHz	27.23us	37.92us

信号包络信息可以用包络方差来描绘接收信号的幅值波动情况，从而反映信号传播环境受多径影响的严重程度^[13]。如图2-8所示为不同传播条件下即LOS与NLOS两种场景的信道包络情况，表2-4所示为具体场景包络方差统计量。可以看出，NLOS条件下的包络方差 σ^2 大于LOS的 σ^2 ，主要原因是NLOS场景没有直射径，接收信号是由多径传播到达，因此接收端的信号包络显示其信号波动较LOS场景更为剧烈，通信质量受影响更大。相对于普通用户传统的通信环境，焊接车间受复杂环境因素影响，无论是LOS还是NLOS场景其多径信号都更为丰富，可分辨的多径数目可以达到20-30多个，信号幅值波动更大，从而导致车间内的信号传输面临更大挑战。

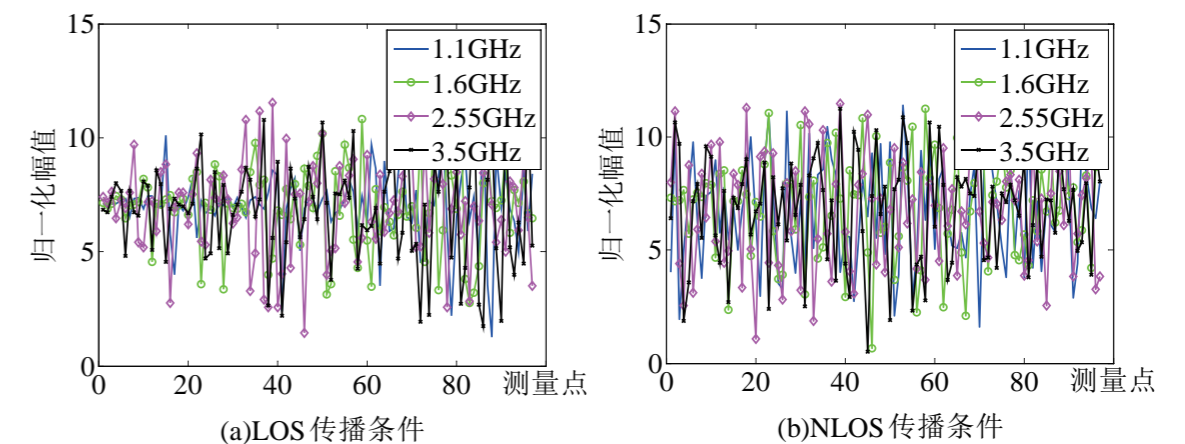


图 2-8 LOS 与 NLOS 场景包络特性

表 2-4 LOS 和 NLOS 场景下的包络方差

场景	LOS	NLOS
σ^2	3.7	5.6

2.2.2 金属屏蔽

工业互联网主要是存在大量的无线传感器来收集各种设备状态以及监护等相关数据信息，同时，未来车间大部分设备也是由无线PLC进行控制的，传感器和PLC大多存在于金属外壳组装成的大型设备、金属车体或者金属机箱的内部^[10]（如图2-9），这种情况下金属屏蔽效应对于信号的传输影响非常大。因此，为了提高无线信号传输质量，使车间内的智能设备在安全、可靠的网络条件下进行工作，需要分析具有金属屏蔽影响的信道特征。如下为焊装车间实际测试结果。



图 2-9 工业生产中的大型设备

表 2-5 机箱内外的路损指数

中心频率 (GHz)	LOS		NLOS	
	机箱内部	机箱外部	机箱内部	机箱外部
1.1	2.8	2.5	3.4	3.1
1.6	3.0	2.6	3.8	3.2
2.55	2.7	2.4	3.7	3.4
3.5	2.8	2.6	3.4	3.3

由表2-5所示相同传播条件下，机箱内部的路损指数均大于机箱外部的路损指数，平均超过0.3dB左右。其主要原因是由于金属机箱的屏蔽作用会使电磁波传播产生能量上的损耗，因此网络规划过程中应考虑大量传感器和PLC接收端存在与机箱内部或大型机器内部的情况，从而在工业环境中规划无线链路时使用较大的路径损耗指数进行信道建模来优化无线技术。

在主径与多径分量基本相同的传播条件下，机箱内外的K因子表现仍有差异，主要结果显示机箱内部的数值小于机箱外部的数值，且平均小0.7dB，这说明金属屏蔽作用对于工厂内信号传播是有一定影响的（表2-6）。这是由于在机箱内部，主径信号被金属机箱遮挡，会有能量上的损耗，其他分量大部分是靠反射折射等多径方式接收，能量上损耗基本稳定，因此机箱内部的K因子相对于机箱外部更小一些。那么，在规划工业无线网络的时候要关注接收端处于金属机箱内部的情况，采取相应措施对抗金属机箱内部的屏蔽损耗影响。

表 2-6 机箱内外的 K 因子测量值

中心频率 (GHz)	LOS		NLOS	
	机箱内部	机箱外部	机箱内部	机箱外部
1.1	4.2	4.8	3.2	3.8
1.6	3.9	4.6	4.2	4.1
2.55	4.5	5.2	3.0	4.6
3.5	4.9	5.1	3.3	3.9

如图2-10所示为对比相同传播条件机箱内外的信道包络情况，从表2-7可看出无论是LOS传播情况还是NLOS传播情况，机箱内部的信号包络方差 σ^2 均大于机箱外部。主要原因是由于在机箱内部，接收端接收更多的是经过反射、折射的信号，多径传播相对于外部更为丰富，从而使接收端的信号包络波动更为剧烈，方差更大。因此，金属机箱的屏蔽作用对于接收信号的波动程度影响明显，网络规划时需要考虑接收端信号幅值分布不均的情况，更好地进行技术优化。

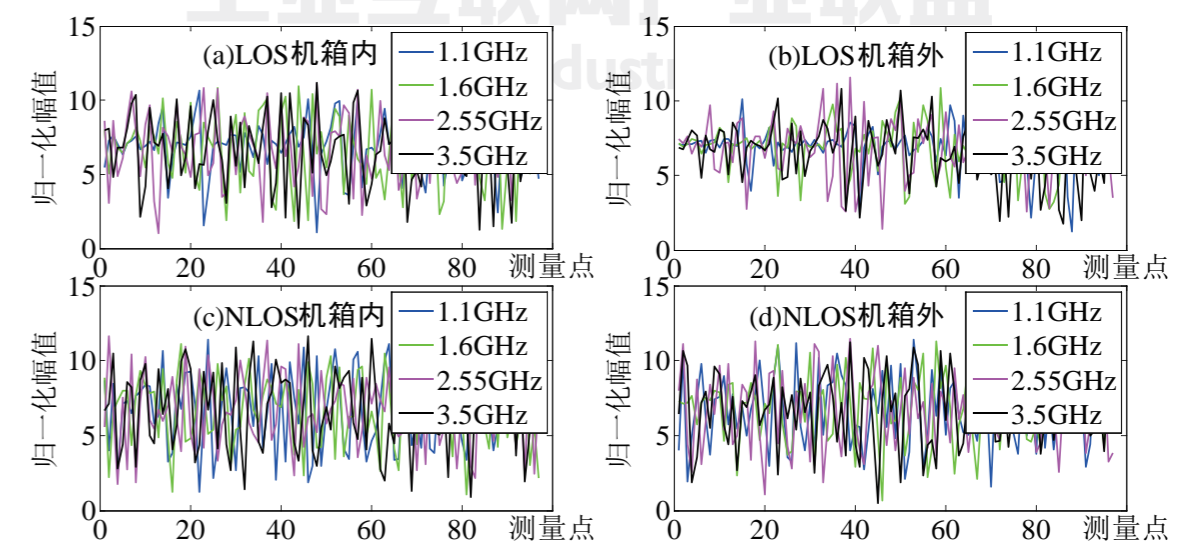


图 2-10 机箱内外包络特性

表 2-7 不同场景机箱内外包络方差

场景	LOS		NLOS	
	机箱内	机箱外	机箱内	机箱外
σ^2	5.5	3.7	6.5	5.6

2.2.3 时变信道

在移动通信中，当移动台移向基站时，多普勒频偏为正，远离基站时，多普勒频偏为负，因此移动接收或发射端会产生多普勒效应从而影响通信质量。如图2-11所示，分别是工业环境中的智能运输车 and 智能机器人。在焊装车间实际生产中有许多的运输任务，而这些运输任务大多数是机械性或者周期性的常规路线，因此会有许多的AGV智能运输车来替代工人进行实际的材料运输，进而提高工业的生产效率；另外焊装过程中会用智能机器人来替代工人进行作业生产，智能机器人的优点是能保证安全作业以及高精度作业等优点。这些情况下机器人、运输车、悬挂设备等的随机移动，都会让工厂环境中的无线信道具有时变特性，从而产生多普勒效应对无线信道产生一定的影响^[4]。



图 2-11 工业中的智能运输车与智能机器人

根据实测结果对焊装车间运输车的多普勒频移提出了一种数学模型，该模型的多普勒频移 $f_d'(t)$ 符合理论的多普勒频移 $f_d(t)$ 加具有一定高斯分布的随机频移值 Δf ，如下：

$$f_d'(t) = f_d(t) + \Delta f \quad (3)$$

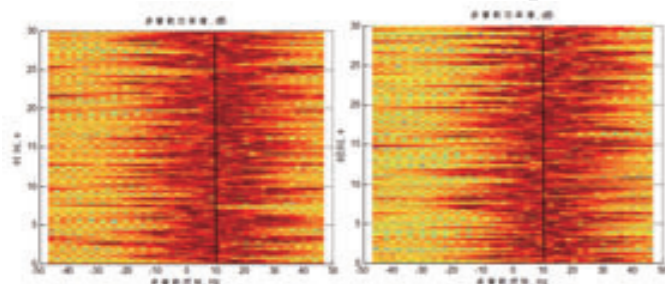


图 2-12 实测结果（左）与仿真结果（右）

公式中 $f_d(t)$ 是一定速度下的理论多普勒频移，即 $f_d(t) = v(t) \cos \alpha(t) / \lambda$ ， Δf 是均值为0，方差为 σ^2 的高斯分布变量，表2-8是各个频段的标准差数值大小。如图2-12所示为实测结果与仿真结果，可以看出随机多普勒的数学模型实测结果与仿真结果基本吻合，

这表明该随机多普勒模型可以比较全面的描绘运输车在运动时的多普勒变化规律。同时，从表2.5可以看出频率越高，随机频移值的标准差越大，多普勒效应越严重，因此在规划频段的过程中需要结合各个频段的多普勒频移结果，进行信道建模和技术优化设计。目前来看，焊接车间的AGV小车移动速度很慢为1m/s，造成的多普勒频移对通信影响不算很大。

表 2-8 各个频段的 Δf 标准差 σ

中心频率 (GHz)	1.1	1.6	2.55	3.5	5.8
σ	6	10	14	18	26

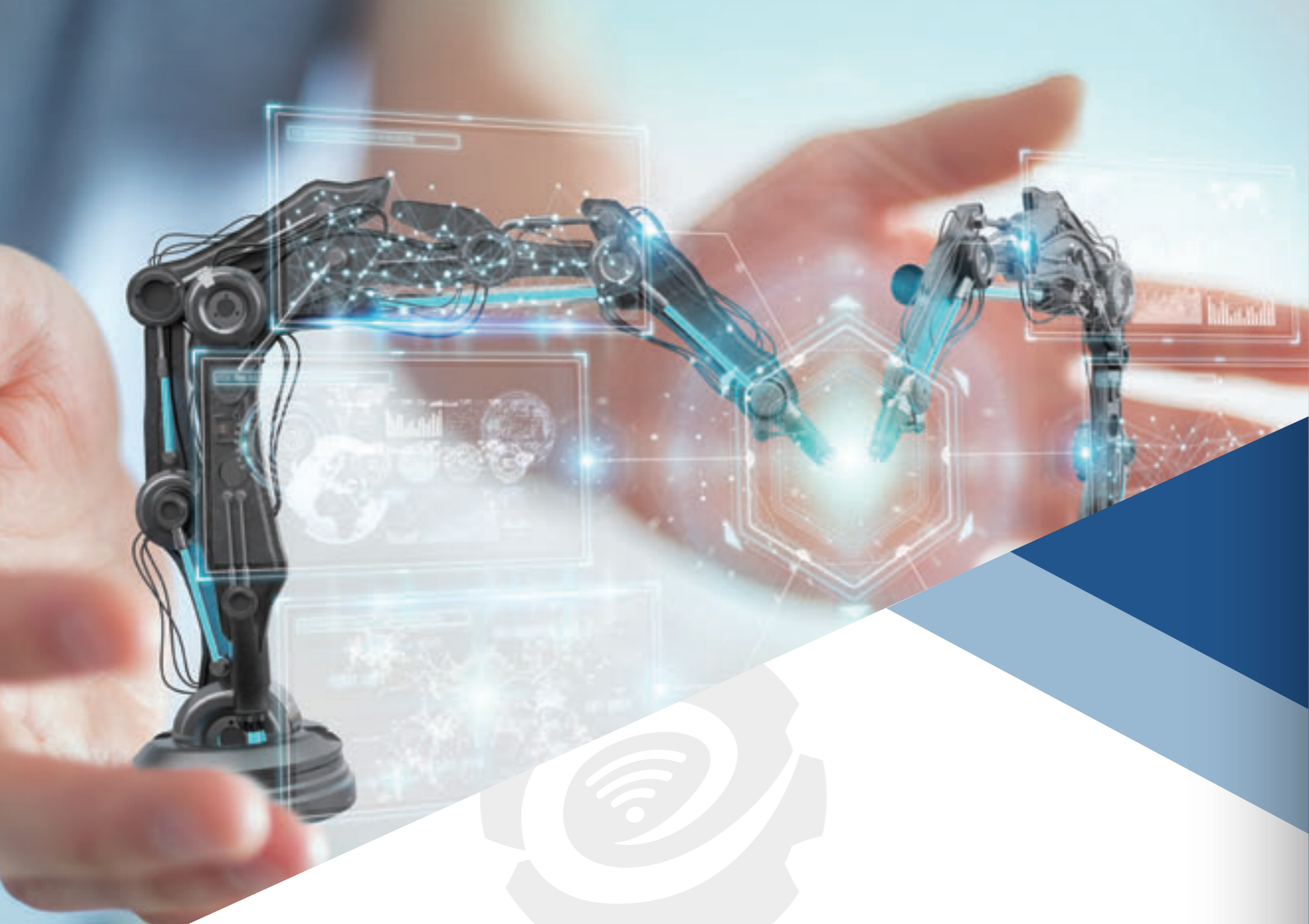
2.2.4 测试结论

1、路径损耗：NLOS与LOS场景相比路径损耗指数更大，机箱内部相对于机箱外部路损指数更大，最大值接近4dB,这说明焊接车间大密度的大型设备、各种物料的阻碍遮挡以及金属机箱的屏蔽作用大大削弱电磁波的能量，导致接收信号能量损耗。因此在信道模型建立和链路预算中应考虑选取较大的路损指数，以更好的评估车间的信号传输和覆盖，进行相应的网络规划。

2、K因子和均方根时延扩展RMS：焊接车间实际测得，NLOS场景相对于LOS场景K因子约小1dB，机箱内部相对于机箱外部K因子约小0.7dB。这是由于NLOS场景下的电磁波传播受遮挡较为严重，主径分量被严重的遮挡，接收到的信号主要是经反射、折射等过程的多径分量，而车间大多数信号传输都面临NLOS的传播情况，更有很多传感器和PLC位于机箱内部的情况，因此需要采取相应措施来抵抗能量损失，保障主径信号传输不受影响。另外，均方根时延扩展RMS参数值在NLOS场景明显大于LOS场景，也是由于NLOS场景下多径信号相对丰富，大多通过不同路径反射、折射等传播方式到达接收端。因此在无线网络规划时应考虑传播信号的符号周期大于RMS，才能保证系统的稳定，避免产生码间干扰等问题。

3、包络特性：NLOS场景的包络方差 σ^2 大于LOS场景，机箱内部的包络方差大于机箱外部，主要原因是NLOS场景没有直射径，接收信号是由多径传播到达，同时机箱内部多径传播相对于外部也更为丰富，因此接收端信号波动较更为剧烈，通信质量受影响更大。相对于普通用户传统的通信环境，无论是LOS还是NLOS场景，机箱内或外，焊接车间受复杂环境因素影响（堆放的金属材料、焊接设备、运输车以及各种建筑物），信号传播的多径信号分量更多，网络规划时需要考虑接收端信号幅值分布不均的情况，更好地进行技术优化。

4、时变特性：主要对移动AGV运输车场景提出了多普勒数学模型，通过将实测模型与仿真模型进行对比，说明所提出的模型符合实测结果，从而根据该模型中的随机频移 Δf 的标准差大小，描绘移动业务在不同频段下的多普勒效应程度以及变化情况。结果表明频率越高，随机频移值的标准差越大，多普勒效应越严重，因此在规划频段的过程中需要结合各个频段的多普勒频移结果，进行信道建模和技术优化设计。



03 工业无线通信解决方案建议

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

3.1 汽车制造焊接车间无线解决方案建议

如前所述，焊接车间的电磁噪声干扰多来源于车间干扰源sub1 GHz的频段，需在尽量规避干扰源频段的影响前提下，进一步规划建网频段。同时对焊接车间无线通信信道特征分析表明，NLOS场景相比LOS场景、金属机箱内相比金属机箱外路径损耗大、K因子小、RMS大、多径信号分量更多以及AGV搬运小车的移动特性使无线通信产生多普勒现象。接下来，针对焊接车间电磁环境的以上特点，给出一些解决方案思路和方向上的建议，以供进一步网络规划作为参考。同时，希望通过本报告明确工业电磁环境对无线通信的影响以及对无线通信解决方案的指导意义。

3.1.1 增加链路预算，弥补路径损耗

电磁波是一种能量的传输形式，随着传输距离的延展，能量会衰减，引起路径损耗。在相同条件下（相同的天线和相同传输环境），链路预算越大通信距离越远、通信质量越好，链路预算通常用发射功率与接收灵敏度的差值来表示。因此如果希望传输更远的距离，在通信设备研制阶段，可以将增加发射功率和提高接收灵敏度作为一个优化方向。增加发射功率的做法通常是使用功率放大器（PA），提高接收灵敏度的通常做法是使用低噪声放大器（LNA）。

另一方面，天线是将收发机内载波能量与空间电磁波能量相互转换的元件，辐射特性主要由材质和辐射结构两要素决定。天线的材质一般采用金属，也有非金属天线（如陶瓷天线），其中金属天线导电性好、机械强度高，但体积较大适合做外置天线；非金属天线体积小，适合做内置天线。天线的辐射结构一般按频率从低到高包括鞭状天线、对数周期天线、喇叭天线、抛物面天线和球面天线等，如图所示（图3-1）。天线的主要参数有频段、增益和方向性，天线频段决定了辐射电磁波的波长，因此一般频率越低波长越长天线的尺寸越大；天线增益表征了天线增加空间电磁能量的作用，天线增益越大辐射效果越明显，可以通过设计天线结构或采用多天线来提高增益，增加发射与接收端的链路预算。



图 3-1 天线辐射结构类型

3.1.2 控制无线电传输方向，减少NLOS场景通信

在建网规划时，可利用天线的方向性增加LOS场景应用，减少NLOS场景应用。同一个天线辐射结构在不同方向也表现出不同的天线增益，即天线的方向性。全向天线各向辐射增益比较接近，适合在工业现场中心设置，但在工业无线通信网络中有许多通信设备采用的安装方式比较特殊，如壁挂式、地埋式、吸顶式。这类无线通信设备适合使用定向天线，定向天线一般采用波束成型技术，因此定向天线辐射方向的增益一般比全向天线大5-10dBi，适用于远距离定向信息传输。另外，每个天线可作为天线阵元组合成天线阵，再配合发送分集和空间复用技术可以增加整个系统的辐射增益。例如，在不可避免的NLOS场景下使用双天线或四天线等多天线技术，以及配合控制装置组合成的智能天线，分时控制天线的主瓣方向。

3.1.3 抵抗多径干扰，保障主径分量

多径是一种传播现象，指两路或多路信号同时或相隔极短时间到达接收天线。焊接车间大量的设备机床、金属零件作为散射体，形成较强的镜面反射和散射，导致多径信号的产生。由于各个路径的时延不同，信号沿多个路径的传播造成信号到达接收机的时间不同，使接收信号发生时延扩展，不同时间、幅值和相位的多径信号与主径信号产生重叠，进而引起码间干扰。可采用提高接收机的距离测量精度、抗多径天线等措施来抵抗多径干扰。提高接收机的距离测量精度可通过窄相关码跟踪环、相位测距等技术实现。抗多径天线是指利用多个天线阵元的组合进行信号处理，自动调整发射和接收方向图，以针对不同的信号环境达到最优性能。

3.1.4 扩大信道带宽，弱化多普勒效应

汽车制造厂AGV运输车场景表现的多普勒频移现象，使原有收发一致的载波频率随相对速率的增加而出现收发频率差。当频率差超过信道带宽时，收发频率重叠区为零，导致通信失败。目前来看，实际测得的焊接车间内AGV搬运车造成的多普勒频移情况并不严重。如果未来工厂内有快速移动的设备，那处理这类问题比较实用的方法是扩大信道带宽，在多普勒频移较大时，使收发两端仍然有较宽的频率重叠区维持通信。增加带宽的另一个好处是可以提升接收机的灵敏度，但是对于多信道通信增加带宽会牺牲保护带宽，容易引起邻信道干扰或间隔信道干扰，因此需要在扩大信道带内宽度的同时增加信道间隔宽度。

以上几点解决方案建议都是针对焊接车间不同环境问题提出的，任何一种方法都不是绝对的，在实际建网过程中需要进行综合考量，权衡利弊和可行性，合理的进行无线通信技术的选择和网络性能的优化。另外，下面会基于工业领域无线通信面临的通用问题进行介绍，同时提供一些建网方案和建议。

3.2 工业无线常见问题解决方案建议

3.2.1 频谱规划与选择

随着工业互联网和物联网的发展，未来工厂无线数据流量呈爆炸式增长，这种海量的数据业务需求，不仅依赖于更先进的无线传输技术的演进，也需要更多的频谱资源的支持。目前，主流移动通信系统使用的频段主要是6GHz以下的VHF/UHF频段，然而，这些低频段现在已经很难找到连续可用的宽带频谱资源。因此，频谱向高频段拓展，发展高频段无线通信已成为业界趋势。正如蜂窝通信网从2G、3G、4G到5G使用的物理频段均逐步提高，载波射频信号频率越高，射频信号能承载的基带信号速率越高，数据带宽越高，但同时也牺牲了无线小区的覆盖面积，需要依靠增加基站数量来弥补。

另一方面，固定频率的射频信号使用上具有排他性，即相同频率的通信设备不能同时使用，否则会互相干扰，降低彼此的灵敏度。为了规范无线电频谱的合理应用，国家工业和信息化部无线电管理局发布了《中华人民共和国无线电频率划分规定》，最新版于2018年7月1日起执行。其中可以被工业无线通信网络使用的频段有甚高频（VHF）、特高频（UHF）和超高频（SHF），如230MHz频段、433MHz频段、470-510MHz频段、2.4GHz和5.8GHz频段等几个免授权频段，也包括电信运营商购买的授权频段。授权频段是国家工业和信息化部无线电管理局仅授权给一家单位使用的频段，并由国家无线电监测中心保护授权单位单独使用，避免其他单位使用该频段对其造成干扰。例如NB-IoT（蜂窝通信）技术就是使用授权频段，在其授权频段上只要有足够高的灵敏度，不需要很大的发射功率同样能达到很好的覆盖深度和广度，同时降低设备功耗。

3.2.2 抗干扰机制

工厂中除了来自通信设备的干扰外还包括前一章提到的设备干扰源的噪声，这些噪声通常具有强度大、频段宽的特点。因此，在综合多方面网络规划建议之后，若仍不可避免的采用了包含设备干扰源辐射的噪声频段，那么可参考以下机制进行抑制或规避这种骚扰：

3.2.2.1 载波监听多路访问冲突避免（Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA-CA）机制

一个工业无线通信网络在同一片接收区域内、同一时间、同一信道上只能有一台发射机工作向外传递信息，这也是无线信道的排他属性。否则一台以上的发射机相互干扰，接收机就可能丢数据包或收到错误数据包。为此可以采用CSMA-CA机制。即每个需要发送的通信终端在使用无线信道发送数据包之前，先切换为接收状态评估当前信道空口电磁能量，以此判断目前环境中该信道上是否被其他发射机占用，或是否该信道上噪声功率超标。如果信道空闲，通信设备切换到发射状态发射信

息，否则，通信终端随机退避一段时间，再次评估当前信道。如此重复评估工作信道，直到信道空闲再启动发射任务。该机制已在工业无线通信领域中使用多年，也有成熟的算法，不需要增加很多计算资源即可达到较好的效果。

3.2.2.2 跳信道机制

工业无线通信设备间的干扰通常表现为同信道干扰、邻信道干扰和间隔信道干扰，因此现有的工业无线通信协议（WIA-PA、WirelessHART和ISA100.11a）规范中在MAC层均有对信道调整的方案，即跳信道机制。该机制是基于干扰信道规避原理进行设计，并利用不同范围信道评估策略对信道的切换方法提供支持，在单个节点级别、子网级别和全网级别对信道干扰分别进行短期、中期和长期评估，评估结果将作为工业无线信道选择依据。其中单个节点级别信道评估是现场设备定期对所支持的所有信道进行评估；子网级别信道评估是子网簇首（或路由设备）定期对信道进行评估，再将评估结果发送给现场设备；全网级别信道评估是系统管理器对全网信道状态进行评估，再下发到整个网络。每种信道评估的结构都会输出信道白名单和黑名单，通信设备可依据信道黑名单选择合适的信道进行自适应信道切换。但是受工厂复杂电磁环境的影响，并不是所有黑名单信道的电磁干扰都会长期存在，多数情况下工业现场的电磁骚扰是瞬态骚扰或暂态骚扰，为此要定期进行信道评估，更新信道黑名单。

3.2.2.3 扩频调制机制

扩频调制技术是发射机通过一个独立的码序列来传输一个信息符号（或比特），接收机采用同样的码序列来解扩。这种机制将单一信息符号扩展成16位、32位或等多位的序列码，能够减少对空间传输电磁波单一波形的依赖，即使单一序列码被破坏也不影响信道符号的解扩，因此抗干扰的效果较好。扩频调制可实现多用户同时共享公用信道来传输信息，例如码分多址（Code Division Multiple Access, CDMA）技术；另外，还有很多WPAN技术的物理层均采用直接序列扩频（Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS）；还有最早应用于军用调制技术的Chirp扩展调制技术，该技术能够大幅度提高接收灵敏度，但是这种超长扩展序列码的方式实际上是以牺牲传输时间为代价的，因此实际应用的信息传输速率较低，一般用于低速率非及时性工业需求，如能源计量和定期上报等业务。

3.2.3 确定性传输机制

在工业领域制造过程中，每一道工序都有时间要求，如启动时间、操作时间、故障处理时间、完成时间都要严格规定，否则影响下一道工序。随着智能制造革命的深入，向上已经延伸到订货、设

计，向下已经推展到销售、配送，很多离散工业任务也开始趋于流程化管理。工业无线通信作为其中的重要神经枢纽，其通信任务表现出明显的时间确定性，即信息的开始发送时间、信息的路由等待时间、信息的到达时间都要有确定的范围，不能无限制等待，否则所传输的工业信息会失效。具备这类特性的通信网络也称为时间敏感性网络（Time-Sensitive Networking, TSN），如第一章场景中提到的机器人协同控制的应用。通常采用的方法是时分机制、调度优先级机制和保护通道机制。

3.2.3.1 时分机制

时分机制是把时间分割成互不重叠的时段，再将时段分割成互不重叠的时隙与通信任务一一对应，如时分多址（Time Division Multiple Access, TDMA）技术把时间分割成互不重叠的时段（帧），再将帧分割成互不重叠的时隙（信道）与用户一一对应，依据时隙区分来自不同地址的用户信号，从而完成的多址连接。该方法是在通信资源调度表中有明确的时间字段，规定发送时间、剩余时间等信息。由于在整个工业无线通信网络中的所有设备都有自己的时钟，而时分机制要求所有的通信设备都要用同一个时钟基准，否则将失去时分机制的意义。那么就要在整个网络中将所有通信设备的时钟校准，这个过程就是时间同步，如泛洪时间同步协议（FTSP）算法、延迟测量时间同步协议（DMTS）算法和IEEE1588时钟同步方法。通常工业监测应用领域无线通信网络的时间同步精度是毫秒级，如果参与控制操作网络的时间同步精度要达到微妙级，甚至到十纳秒级，这也是衡量工业无线通信网络可用性的重要指标，也是技术难点。另外，除广播信息外，单播发送信息可选择确认帧（ACK）机制，即接收机收到发送机的信息后会立刻回传ACK，告知发送机已收到信息，发送机通

过接收ACK来确认发送是否成功，若发送失败，可根据发送信息的性质选择是否重传和重传次数。

3.2.3.2 调度优先级方法

该方法是在通信任务调度中对通信任务的重要性进行分级，在路由转发时，系统管理器根据任务的优先级进行分配通信资源（包括时隙和信道），优先级高的任务在前优先享用通信资源，优先发送或接收，对于优先级相同的任务按时间先后顺序排队。这种方法避免了传统对等网的先入先出传输机制带来的网络拥塞问题，可以有效的缩短重要信息到达时间，保证了紧急信息的转发时间。

3.2.3.3 保护通道方法

该方法是在工业无线通信网络中建立保护通道，全网设备定期对该保护通道进行扫描接收。一旦现场设备出现危险警告状况时，监控该现场设备的通信设备立即启用保护通道，并向保护通道传输数据。路由设备和网关设备将保护通道的通信任务作为最高优先级进行处理并上报服务器，并调整全网进入紧急状态。这是工业无线通信网特有的保护机制。

3.3 小结

综上所述，本章从汽车制造工程焊接车间通信信道的特征分析出发，给出建网建议，并延伸给出工业制造领域常用建网建议。所有的网规建议和措施都是建立在无线通信本身及其电磁环境特征分析的基础上给出的，其中很多措施具有互斥性，具体实施要实际应用现场和客户需求综合考量。另外，未来毫米波的应用，使得基站密度将进一步加大，客观上也会使LOS通信更为广泛，也有助于减小多径干扰等问题。同时新一代移动通信网络带宽更高，以及多基站协同机制，也将实现高速运动场景下的小区无缝切换，降低多普勒现象的影响。无线信道的传播特性是构建移动无线通信系统的基础部分，本章意在根据焊接车间电磁环境特征，给予无线解决方案思路和方向上的建议。实际上工业领域的无线通信网络部署还包括很多方面的考虑，信道特征对于其涉及的无线技术的评估、验证和优化起着至关重要的作用。

除了汽车制造领域，我们将继续分析典型工业场景的电磁环境特征，包括3C制造、钢铁、石化等重工业生产制造工业环境，每一类工业场景噪声和信道特征都大不相同，特殊的电磁环境始终影响和制约无线通信网络在工业领域的进一步应用和发挥价值。只有充分分析各类工业制造领域的电磁环境特征，对无线通信技术进行评估和验证，指导工业无线网络规划解决方案，才能进一步推动工业领域新的建网规范、产品特性、以及网络架构的标准化，更好地保障工业无线通信的可靠性，更大的发挥无线通信在工业领域的优势和价值。



04

缩略语

缩略语	全称	说明
Wi-Fi	Wireless Fidelity	基于 IEEE 802.11 系列标准的无线局域网
ZigBee	-	基于 IEEE802.15.4 标准的低功耗局域网协议
WirelessHART	-	第一个开放式的可互操作无线通信标准
4G	The 4th Generation mobile communication technology	第四代移动通信技术
5G	The 5th Generation mobile communication technology	第五代移动通信技术
QoS	Quality of Service	服务质量
FRID	Radio Frequency Identification	射频识别
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用技术
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	多入多出技术
LTE	Long Term Evolution	通用移动通信技术的长期演进
PLC	Programmable Logic Controller	可编程逻辑控制器
AGV	Automated Guided Vehicle	自动导引运输车 / 无人搬运车
LOS	Line of Sight	视距传输
NLOS	Not line of Sight	非视距传输
DS	Delay Spread	时延扩展
RMS	Root-Mean Squared	均方根时延扩展
NB-IOT	Narrowband Internet of Things	一种新型窄带物联网技术
PA	Power Amplifier	功率放大器
LNA	Low Noise Amplifier	低噪声放大器
CDMA	Code Division Multiple Access	码分多址
TDMA	Time Division Multiple Access	时分多址

缩略语	全称	说明
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance	载波监听多路访问冲突避免
WIA-PA	Wireless Networks for Industrial Automation Process Automation	面向工业过程自动化的工业无线网络标准技术
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum	直接序列扩频
WPAN	Wireless Personal Area Network	无线个人局域网
MAC	Media Access Control	介质访问控制
TSN	Time-Sensitive Networking	时间敏感网络
FTSP	Flooding Time Synchronization Protocol	泛洪时间同步协议
DMTS	Delay Measurement Time Synchronization	延迟测量时间同步
ACK	Acknowledgement	应答消息

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

- [1] 吕铁, 韩娜. 智能制造: 全球趋势与中国战略[J]. 人民论坛·学术前沿, 2015,(11):6-17.
- [2] 刘峰. 全球制造业变革的前景与挑战--智能制造发展形势多重解析[J]. 人民论坛·学术前沿, 2015,(11):18-26.
- [3] 前瞻产业研究院. 《2017-2022年智能制造行业市场前瞻与投资战略规划分析报告》
- [4] HMS Industrial Market 2015, Huawei Wireless MI
- [5] Cheffena M. Propagation channel characteristics of industrial wireless sensor networks[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2016, 58(1): 66-73.
- [6] Cheffena M. Industrial wireless sensor networks: channel modeling and performance evaluation[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking, 2012, 2012(1): 1-8.
- [7] Stenumgaard P, Chilo J, Ferrer-Coll P, et al. Challenges and conditions for wireless machine-to-machine communications in industrial environments[J]. Communications Magazine IEEE, 2013, 51(6): 187-192.
- [8] 戴腾清, 许建民. 工业变频器电磁干扰现象分析及其抑制[J]. 机电工程, 2009,26(2):105-107.
- [9] 陈亚梅. 伺服驱动系统中电磁干扰问题的分析和抑制[J]. 经济技术协作信息, 2017(32):95-95.
- [10] M. Cheffena. "Propagation Channel Characteristics of Industrial Wireless Sensor Networks." IEEE Antennas & Propagation Magazine 58.1(2016): 66-73.
- [11] Şeyma Tütüncü, A. Kara. "UHF propagation measurements in heavy industry." Signal Processing and Communication Application Conference IEEE, 2016.
- [12] 魏崇毓, 参编孙海英, 邵敏等. 无线通信基础及应用[M]. 西安电子科技大学出版社, 2015.
- [13] L. Liu, K. Zhang, C. Tao, K. Zhang, J. Zhang. "Channel measurements and characterizations for automobile factory environments." International Conference on Advanced Communication Technology 2018:234-238.
- [14] B. Holfeld, D. Wieruch, L. Raschkowski, T. Wirth, C. Pallasch, W. Herfs, C. Brecher. "Radio channel characterization at 5.85 GHz for wireless M2M communication of industrial robots." Wireless Communications and NETWORKING Conference IEEE, 2016.