

ZTE中兴



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

工业无线电磁环境 白皮书 ——钢铁行业

牵头编写单位：中兴通讯股份有限公司

工业互联网产业联盟（AII）

2023年12月





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

工业无线电磁环境 (已规划频段) 白皮书 ——钢铁行业 (2023年)

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

工业互联网产业联盟 (AII)

2023年12月

声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议，不构成法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载，需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

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

工业互联网产业联盟
联系电话：010-62305887
邮箱：aia@caict.ac.cn



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

前 言

中国是钢铁大国，钢铁行业规模领跑全球。“十三五”以来，我国主要钢铁企业装备达到了国际先进水平，智能制造在钢铁生产制造、企业管理、物流配送、产品销售等方面应用不断加强，关键制造工艺流程的数控化和企业资源计划装备率等信息化程度得到了跨越式发展，但距离钢铁强国还有很长一段距离。在产业重组、淘汰落后产能、节能减排、绿色发展的大背景下，带来数字化新型钢厂、智慧产线升级改造，5G+云+AI精细化运营管理需求，促进了我国钢铁行业工业数字化转型。

钢铁行业的工序极其复杂，各个车间又具有较多金属框架建筑结构，内部分布众多生产设备、原材料和钢材，使得厂房内的信道环境较为复杂，对信号传输、网络性能产生影响。同时具备电弧炉、变频器、强磁设备运行，在各种复杂工况下，不可避免地产生各种各样的电磁噪声。

本白皮书以典型钢铁工厂场景为例，重点分析电磁环境，包括噪声干扰和信号特征内容。针对钢厂电磁环境特点，最后给出无线通信解决方案思路和5G NR无线通讯设备的电磁干扰解决方案。

编写组成员（排名不分先后）：

唐余兵 郭伟 樊毓斐 刘嘉、刘琪 付有奇、李乐榕 陆爽、、刘嘉伟、刘婧迪、刘蕾、苑东平

牵头编制单位：

中兴通讯股份有限公司

参与编制单位：

中国信息通信研究院

宝钢股份有限公司

鞍钢集团信息产业有限公司

中国移动通信集团有限公司

中国电信集团有限公司

中国联合网络通信有限公司



工业互联网产业联盟公众号



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

目 录

一、钢铁行业智能制造背景及应用场景	1
(一) 钢铁行业发展背景和数字化转型需求	1
(二) 钢铁行业数字化转型的目标	2
(三) 钢铁行业智能制造电磁环境分析的必要性 ...	5
(四) 钢铁智能制造厂无线电磁环境关键应用场景 .	7
二、钢铁行业车间电磁环境分析	9
(一) 钢厂车间电磁噪声特性分析	10
(二) 钢厂信道特征分类分析	15
三. 钢铁行业电磁环境下的无线通信解决方案建议 .	22
(一) 钢铁行业车间无线解决方案建议	22
(二) 钢铁厂厂房内无线网络规划常见问题及解决方 案建议	26
(三) 小结	32
四. 缩略语	32
参考文献	33

一、钢铁行业智能制造背景及应用场景

（一）钢铁行业发展背景和数字化转型需求

我国钢铁行业规模领跑全球，2022 年我国钢铁产量已达 10.13 亿吨（粗钢），我国粗钢产量占全球比重达 55.3%，位居全球第一，领先第二名 10 倍以上，一批钢铁材料、产品和工艺技术取得突破，达到世界先进水平。但应当看到，我国钢铁行业在实现高质量发展方面，还面临质量效益有待提升、节能绿色低碳刚性约束日趋强化、本质安全压力大等挑战。

我国钢铁行业已初步具备较好的自动化和信息化基础。钢铁行业作为我国国民经济支柱性产业，历来重视与先进制造技术和信息技术的结合发展，已形成了较为完备的自动化、信息化体系架构，如主工序装备实现了较好水平的自动化控制，ERP、MES 解决方案已经普遍应用于大型钢企等，生产、管理、供应链等流程初步实现了工序衔接和数据贯通，有效支撑了钢铁行业实现大批量、标准化和成本可控的生产运营。根据《中国两化融合发展数据地图（2018）》统计显示，2018 年钢铁行业两化融合指数达到 51.2，关键工序数控化率达到 68.7%，应用电子商务的企业比例超过 50%，业中处于相对较高水平。

“十三五”以来，我国主要钢铁企业装备达到了国际先进水平，智能制造在钢铁生产制造、企业管理、物流配送、产品销售等方面应用不断加强，关键制造工艺流程的数控化率超过 65%，企业资源计划（ERP）装备率超过 70%，信息化程度得到了跨越式发展。中国

是钢铁大国，但距离钢铁强国还有很长一段距离，主要差距体现在以下方面：

一是发展不均衡：目前我国钢铁工业机械化、电气化、自动化、信息化并存，不同企业发展差异大，宝钢等先进企业已达工业 3.0 阶段，并向工业 4.0 探索迈进，但还有大批钢企仍然处于工业 2.0 阶段。同时钢企内部不同产线间的先进性也差异巨大，个别分厂或产线实现了远程化无人化作业，而绝大部分仍然大量依靠人力。

二是行业基础薄弱：智能制造整体处于起步阶段，智能制造的标准、软件、信息安全基础薄弱，缺少行业标准，共性关键技术亟待突破。

三是投资回报率难以量化，智能化尚未成为主要生产模式：伴随着人工成本的不断加大，企业员工对作业环境和劳动舒适感尊崇感诉求的不断提升，远程化自动化生产的需求和趋势愈加明显和迫切。

四是核心知识产权掌控不足，原始创新应用比例不高：在研发方面尚未形成以产学研深度融合的技术创新体系，原始创新研发积极性不高，政策扶持力度有待加强。

（二）钢铁行业数字化转型的目标

智能制造具有很长的产业链，上游通过智能设备实现工业大数据的收集，再通过中游工业互联网平台进行数据处理，才能在下游企业中进行应用。而随着科技的发展，5G、边缘计算、大数据、工业人工智能和数字孪生等新一代 DICT 技术也会逐渐成为钢铁行业数字化转型的关键技术，伴随着产业重组和技术变革，正在发生以下变化：

1. 产业重组、淘汰落后产能，带来数字化新型钢厂需求

- 兼并重组：国务院 46 号文件—《关于推进钢铁产业兼并重组处置僵尸企业的指导意见》是钢铁业去过剩产能、结构优化调整的顶层设计方案。《指导意见》设定的总目标是，到 2025 年，中国钢铁产业 60%~70%的产量将集中在 10 家左右的大集团内，而 2018 年 CR10 只有 35%，兼并重组将加速；

- 产能置换：2018 年《钢铁行业产能置换实施办法》中明确指出，京津冀、长三角、珠三角等环境敏感区域置换比例必须不低于 1.25:1，其他区域按减量置换实施。

2. 节能减排、绿色发展带来智慧产线升级改造需求

- 节能：十三五期间能源消耗总量下降 10%；吨钢综合能耗下降 12 千克标煤；

- 减排：十三五期间污染物排放总量下降 15%；吨钢二氧化硫排放量下降 0.17 千克。

3. 智能升级，带来 5G+云+AI 精细化运营管理需求

- 柔性制造：快速生产多品种、小批量、高质量的产品；

- 智能制造：到 2020 年底，钢铁智能制造示范点超过 1000 家；

- 研发投入：2020 年研发投入占主营业务收入比重提高至 1.5% 以上，产品质量和高端产品供给能力显著提升。

4. 钢铁行业工业数字化转型投资将达 1240 亿元

工业互联网给以 ISA-95 为代表的传统制造体系带来了数字化、网络化和智能化赋能与升级。一是强化传统产业产品的数字化功能，如为工业装备提供了数据采集、传输和分析能力，形成工业数字化装备产业；二是创新融合技术下的新型产品，如工业互联网平台、工业边缘计算等近年来蓬勃发展，有望成为未来关键新兴产业。

《中国互联网发展报告（2022）》（以下简称“报告”）显示，2021 年，我国数字技术产业体系不断完善，工业互联网应用场景不断丰富，2021 年，我国“5G+工业互联网”在建项目超过 1800 个，工业互联网产业规模持续快速增长。2021 年我国工业互联网核心产业规模达到 10749 亿元，增速 18.1%。工业互联网体系化发展取得显著成效，逐步成为国民经济增长的重要支撑。在 2023 全球工业互联网大会上，中国工业互联网研究院发布的《工业互联网创新发展报告（2023 年）》（以下简称“报告”）显示，当前我国工业互联网已经从起步探索阶段转向快速推进阶段，产业规模超 1.2 万亿元。

5. 钢铁行业工业数字化转型路径

《钢铁工业调整升级规划（2016-2020 年）》显示，要将创新驱动、智能制造和服务型制造三者有机结合起来，推进钢铁工业有效供给水平的提高。一是提高自主创新能力。“十三五”期间要支持现有科技资源充分整合，实施产学研用相结合的创新模式，在钢

铁领域建设国家级创新平台、国家技术创新示范企业、国家新型工业化产业示范基地。二是发展智能制造。要通过重点培育流程型智能制造、网络协同制造、大规模个性化定制、远程运维四种智能制造新模式的试点示范，总结出钢铁工业智能制造的发展路径。三是推动服务型制造。钢铁企业要通过早期介入用户超前需求、后期跟踪改进等模式，主动由制造商向服务商转变，由单纯的提供“产品”向“产品+一揽子解决方案”转变，不仅满足用户当前需求，还要创造和引领未来需求，实现上下游共赢。

（三）钢铁行业智能制造电磁环境分析的必要性

随着 5G 网络逐步广泛地引入到钢铁智能制造领域，可靠稳定的无线网络逐步替代部分有线连接成为发展趋势，在做出这种历史性跨越之前，必须解决无线网络的可靠性与稳定性。但是，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，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。

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。

钢铁厂存在大量的金属框架，无线设备在发射、传播和接收过程中很容易受到衰减和屏蔽。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阻碍物的数量，对于无线通信信号的传输至关重要。轧机、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，需要对典型钢铁工厂场景的电磁环境进行分析研究，了解干扰源的噪声特性，并根据实际的生产环境、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，更好地保障钢铁金属智能制造工厂无线通信应用在智能制造领域可靠性，推动行业发展。

（四）钢铁智能制造厂无线电磁环境关键应用场景

通过深化 5G、大数据、人工智能等新一代信息技术在生产全流程的应用力度，全面提升钢铁行业生产操作与生产管理的智能化水平，实现生产智能管控和运营智慧决策，打造全流程动态优化和精准决策的生产模式。

（1）生产过程优化。钢铁行业生产制造工序多、工艺复杂，传统生产过程的人力与经验依赖较为严重。基于工业互联网改变各工序原有运转模式：一是在生产环境危险系数较高、人员劳动量较大的场景实现机器换人；二是通过先进传感技术实现人员状态、设备状态、物料状态、环境状态与其他工况的监控分析；三是通过将数据建模与机理建模结合，全面实现工序控制优化，典型场景有原料场监控、自动作业、料堆三维测控、智能调度等。

（2）工序协同优化。钢铁生产工序流程长，各工序生产过程差异较大，围绕工序协同场景，基于工业互联网建立各类型集控中心，可带来两大方面应用创新，一是各工序内部协同，基于集成化平台系统实现铁、钢、轧等主要工序内部多环节、多业务的协同优化，主要包含炼铁工序协同、炼钢工序协同、轧钢工序协同等。二是跨工序协同，利用钢铁工艺流程优化界面技术，打通相邻工序间的 PCS [6]、MES、ERP 等系统，实现跨工序的一体化作业计划与生产管控，主要包含铁钢界面优化、铸轧界面优化。

（3）能源管控。钢铁行业是高耗能行业，能源管控是钢铁企业重要业务之一，围绕这一场景，工业互联网可带来五大方面应用创

新，一是能源监控，通过 5G 等先进网络实时采集能耗数据，实现全方位的用能情况感知。二是能源诊断分析，利用分析模型对能源数据进行深度挖掘，对用能合理性进行诊断分析，为能源管理决策提供支撑。三是能源计划，通过平台集成 ERP、MES 等系统内生产计划及设备定检修计划，根据能源用户需求，借助平衡计算公式，实现各类能源介质供需计划的灵活制定，有效提升用能合理程度。四是能源预测，通过用能计划、设备定修计划等信息，构建能源消耗预测模型，开展能源中长期预测和基于数据驱动的能源实时动态预测，为能源优化调度提供决策支撑。五是智能化能源调度，基于用能情况、生产实际、能源价格等建立优化调度模型，结合能源预测等数据，开展多能量流协同管控，实现全 15 局能源动态平衡与优化调度，保障供能平稳、高效。

（4）设备管理。钢铁生产流程连续性强，设备性能劣化及设备故障将对产品质量与生产稳定性造成影响。围绕设备管理场景，工业互联网可带来三大方面应用创新，一是在线健康监测，通过在生产过程中采集设备实时运行数据，结合人工诊断专家规则库，实现设备健康状态全方位监测。二是预测性维护，结合设备历史运行数据，通过机器学习等技术建立设备健康模型，对设备当前运行数据进行深度分析，实现对设备故障智能化预警，并及时进行针对性维护。三是智能故障分析，在设备发生故障后，结合专家故障库对设备运行数据进行分析，找到故障原因，提升设备运维效率。

（5）质量管理。钢铁生产工序较长，质量管控难度大，围绕质量管控场景，工业互联网可带来三方面应用创新，一是生产前质量缺陷预分析及报警，基于前工序及历史多维质量数据，使用大数据分析在线及离线分析技术及各类专业规则模型，可实现生产缺陷的

提前预知。二是生产中主要工艺参数实时在线监控，通过广泛采集生产全流程质量数据，结合大数据分析，可实现生产过程中对产品质量状态的快速感知。三是产品质量动态改进，通过建设质量工艺动态设计优化模型、在线判定模型、自动处置模型，对生产操作参数及时调整以改善产品质量。

(6) 安全管理。钢铁企业生产由于特殊的生产条件和工艺，往往具有较多的安全隐患，围绕安全管理场景，工业互联网可带来三方面应用创新，一是标准化安全管理，以安全生产法、安全生产标准化等为依据，构建基于工业互联网的标准化安全管理系统，通过固化流程提升安全管理工作标准化水平。二是生产现场安全态势感知与预警，基于地图整合安全风险分布、重大危险源、异常监测信号等信息全方位展现安全生产态势，利用大数据技术，分析安全风险和隐患变化情况，实现对生产现场安全状况的全方位感知。三是应急处理，结合危险状态分析结果，通过平台实现应急预案推荐。

(7) 环保管理。绿色环保是钢铁行业发展的核心主题之一，围绕环保管理场景，工业互联网可带来三大方面应用创新，一是气体污染物浓度超限预警，通过平台集成全厂污染物监测分析仪表数据，并对数据进行实时监测，实现污染物浓度超限预警，以支撑操作管理人员进行及时处置。二是环保质量评价，通过建立不同维度的环保质量评价模型，实现对企业环保状况的智能化诊断分析，针对性提出改进措施建议。三是固废循环利用管理优化，通过在线监测技术、智能分析技术、协同平衡与优化调度技术，实现企业固废循环利用全方位监控和优化管控。

二、钢铁行业车间电磁环境分析

钢铁行业的主工序极其复杂，根据物理化学、热力学、动力学、传输原理和反应工程以及金属学等基本原理解，从矿石中提取金属，经精炼，再用各种加工方法制成具有一定性能的钢铁材料。主工序包括：炼铁、炼钢、连铸、轧钢四个环节，一般对应厂区有炼铁厂、炼钢厂、厚板厂、热轧厂、冷轧厂等，各个车间有大量生产设备，在大功率及各种复杂工况下，不可避免地产生各种各样的电磁噪声；厚板厂内部具有复杂的钢制建筑结构，内部分布众多生产设备、原材料和钢材，使得厂房内的信道环境较为复杂，同时具备电弧炉、变频器、强磁设备运行，作为钢铁行业的电磁环境调研重点来展开。

（一）钢厂车间电磁噪声特性分析

钢厂四个环节存在一些显著的干扰源，比如各车间大功率电力电气设备、变频器、炼钢车间的电炉、连铸车间的电磁搅拌工艺、强电磁吸吊设备等。

1. 车间电磁噪声源

炼钢生产流程可分为转炉炼钢和电炉炼钢。电炉是采用电能作为热源进行炼钢的炉子的统称，一般来说有利用电阻热原理的电渣重熔炉，利用电磁感应原理的感应熔炼炉，依靠电子碰撞原理的电子束炉，利用等离子弧原理的等离子炉，以及利用高温电弧原理的电弧炉等几种炼钢的电炉。目前，世界上电炉炼钢主要是指电弧炉炼钢。以废钢为原料和以三相交流电作电源的电炉炼钢，是靠电流通过石墨电极与金属料之间放电产生电弧，使电能转化为弧光中转变为

热能，借助辐射和电弧的直接作用来加热、熔化炉料，冶炼出各种成分的钢和合金的一种炼钢方法。

电弧炉有交流和直流的，基于成本考虑一般采用交流电弧炉居多。交流电弧炉在运行期间，存在较大的工频电磁辐射，在电弧炼钢融化期间，经常由于塌料引起电弧炉短网系统上的电流波动，产生较多的高频电磁辐射分量，使得电弧炉炼钢厂的电磁环境相当复杂，经相关文献研究结果，炉体周围的工频电磁感应强度大大超过了 500 μ T。超高功率对电网也造成了严重的电磁污染，如电弧电流急剧变化，引发强烈的无功冲击导致电压快速波动和闪烁，频率一般在 0.1-30Hz 之间。同时由于运行导致的三相不平衡或非线性等问题会产生严重的谐波电流，主要包括 2-7 次谐波。这些复杂的电磁现象，不仅对人体更对周围的电气电子设备产生严重的电磁干扰。现代电弧炉已经成为一个低成本的快速熔炼设备，以电弧炉为核心的短流程炼钢工艺也成为现代炼钢生产两大流程之一，正朝着低成本、低消耗、高效率、高质量、环保型的方向发展。但国内由于电价高和其他废钢分拣技术等问题，目前主要还是转炉炼钢为主。随着碳达峰、碳中和等目标的落地，电炉炼钢更被提倡，减少碳排放和污染的电炉炼钢将会逐渐成为大趋势，因此电炉炼钢引起的复杂电磁环境效应值得关注。

连铸生产工艺中的电磁搅拌是提高铸坯产品质量的重要工艺手段，它通过周期电磁场搅拌结晶器内的钢水，提升铸坯表面质量，减少缺陷。该装置工作时周围产生强大电磁场，干扰周边控制设备，无法正常生产，必须通过配套的抗干扰手段，保证生产控制设备在电磁搅拌干扰条件下稳定运行。同样，在厚板厂类似强电磁吸吊等

大型起吊设备周围，都可能存在较强磁场干扰，部署相关无线通信系统及终端设备时，需要详细评估。

另外，钢厂中存在强电电路和强电设备所形成的恶劣的电磁环境，特别是变频器大量应用后，产生日益复杂和严重的电磁环境和电磁干扰问题。变频器由主回路采用半控（晶闸管器件）不可控器件（二极管）及全控器件（IGBT）等功率器件在导通或关断过程中产生较高 di/dt 、 dv/dt ，与主回路中的分布参数作用，将产生差模噪声和共模噪声。另外变频器的逆变器大多采用 PWM 技术，由于 PWM 逆变器固有的脉冲特性造成了逆变器输出很高、不平衡的瞬时电压，产生很大的共模电压，在动力电缆形成干扰电流，影响到相关电子设备工作。

2. 车间基站电磁兼容性分析

电磁兼容性分析，首先要进行环境电磁场测量，根据不同频率及噪声源的电场、磁场特点，会用到不同的测量仪器和天线探头，如采用对数周期天线、高频喇叭天线，宽频或选频探头等（参见表 2.1）。

表 2.1 常用电磁场测量设备

设备名称	型号	技术参数	品牌
磁场测量仪器	ELT 400	测试范围：1kHz~400kHz	Narda
电磁辐射测量仪	NBM-550 EF0391	测试范围：100kHz~3GHz	Narda

电场测量	EF5091	测试范围: 300MHz~50GHz	Narda
磁场测量	EHP-50F	测试范围: 1kHz~400kHz	Narda

基于上节对电磁噪声源特性理论分析, 在对应噪声源附近不同位置处, 且在噪声源典型工况下进行电磁场强的测试。其最终测试最终结果见表 2.2, 部分主要干扰源的测量波形见图 2.1 和图 2.2。

表 2.2 车间电磁场测量结果

频段	0kHz~400kHz	400kHz~420MHz	420MHz~6GHz
电磁场	磁场	电场	电场
Peak 值	0.1659A/m	≤ 1.25V/m	2.364V/m

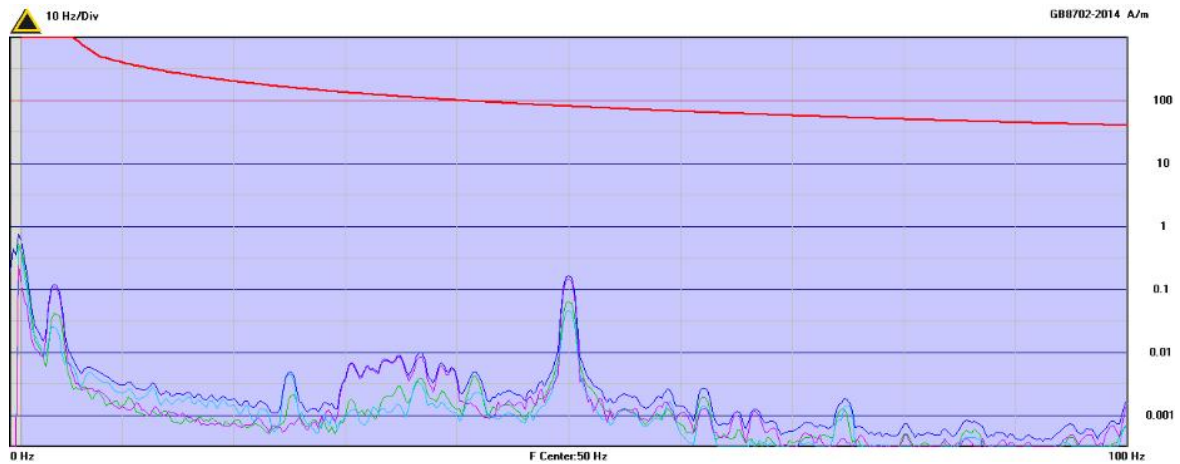


图 2.1 车间磁场测试结果

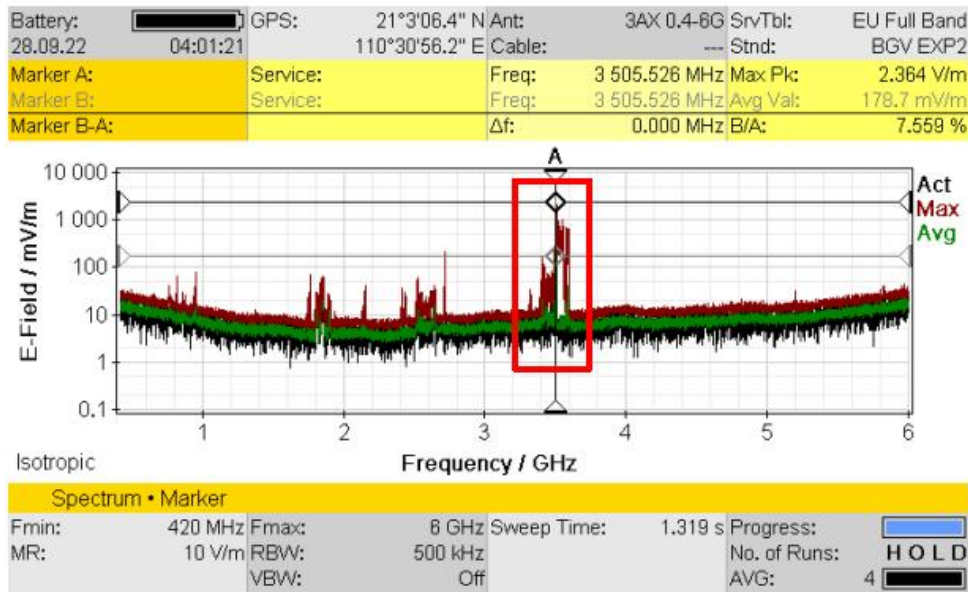


图 2.2 车间电场测试结果

从以上测量结果中可分析得出，电弧炉、强电磁吸吊等大型设备会带来明显的工频磁场干扰，对于靠近部署的无线终端及其他磁场敏感设备仍需要特别关注磁场抗干扰防护。对于基站系统设备（如 4G/5G RRU 或 AAU），大都具有完整的屏蔽外壳，主要是无明显磁场敏感元器件或电路设计，至少具备 30A/m 抗工频磁场干扰能力，磁场干扰一般不用特别考虑。在车间里除了电气设备产生的无意发射电磁噪声外，还存在其他有意发射的无线通信信号，比较显著的是 800/900MHz 的 GSM 信号、1.8/2.1GHz 的 LTE 信号、2.4GHz 的 WiFi 信号及 2.6/3.5GHz 的 5G NR 信号等频段，而大于 3.5GHz 以上基本没有明显的电磁干扰信号。

整体来看，车间其他位置电磁场干扰均小于 GB/T 17626.8 定义的常规磁场应力水平 3A/m 和 GB/T 17626.3 的最低辐射抗扰度水平 3V/m，部署无线设备本身受电磁干扰影响不大，但一些特别靠近噪声干扰源的无线系统及终端设备，如含有磁感应及霍尔元器件的设备仍需注意干扰防护。根据现场各种现存无线频谱分布情况，车间

网络部署还是需要通过合理频谱分配和考虑钢厂特殊复杂的环境进一步进行无线信道干扰模型和特征分析。

(二) 钢厂信道特征分类分析

随着钢铁制造行业智能化和自动化的不断演进与逐步深入，钢厂迈向机械化和自动化的同时，钢铁厂房中的重型设备、钢架结构、自动化机械呈爆炸式增长，使得厂房内部形成了独特复杂的信道环境，经典的室内外信道模型不能直接应用于现代钢铁厂房当中。通过对现代智能钢厂的实地分析，主要提取了路径损耗、时间色散、频率色散等三个方面的信道特征。

路径损耗是指发送端有效发射功率和接收端实际接收功率之间的差值，直接决定了信号接收功率的大小，是衡量无线信道大尺度衰落的重要指标。自由空间路径损耗的通用表达式为：

$$PL = \alpha \lg(d) + \beta \lg(f) + \gamma$$

其中， α 、 β 、 γ 为常系数，与信道场景有关， d 为收发端之间的三维距离， f 为传输信号的载波频率。通常情况下，当基站位置、用户位置和基站布网频段确定后，传输距离和载波频率也就随之确定了，而随信道场景变化的常系数则需根据实际场景测试得到，才能建立准确的信道模型。智能钢厂中重型设备众多、钢架结构复杂、锻造过程中自由空间里微观粒子变化都使得电磁信号在自由空间的传播会受到严重的能量损耗，因此在通信系统建模过程中应充分结合钢厂实际场景，选择合适的衰减因子。

时间色散是指受物理环境影响，电磁波从发端到收端间除直线传播外，还有多条折射反射径均能到达，不同路径到达接收端的信号会发生时间上的重叠，从而彼此间产生干扰。从频域上看，对于

多载波信号而言，某一频率的子信号在经过上述多条路径后，每条路径电磁波传播的距离不同，因而旋转的相位也不相同，同相叠加相涨，反相叠加相消，因此不同的子信号最终呈现的信号强度也不同，最终表现为不同频率的信号在经过上述多径后功率高低也不相同，导致信号包络起伏较大，为信号解调带来挑战。智能钢厂设备众多、结构紧凑、金属密集，电磁波在此类环境中传播极易发生多次折射反射，时间色散十分严重，因此在整个通信链路设计的过程中都应充分考虑时间色散的影响。

频率色散是指信号在传输过程中，受多普勒效应的影响，接收信号的频率与原始发送信号相比出现弥散，导致接收信号出现频率偏差。具体表现为当基站和用户发生相对运动时，发送信号的波长会随相对运动的方向被拉长或压缩，接收信号的频率也会随之降低或升高，相对运动速度越高，相应的频率偏差也越严重。智能钢厂在生产过程智能化、生产设备自动化、状态监控云端化的过程中，厂房中无人自主设备（如焊接智能机器人、物料自主巡航车、高精度机械臂）必然爆炸式增长，而上述自主设备与云端管理平台的实时状态交互、钢材冶炼轧制的实时监控都会带来海量的数据传输需求，期间自主运动过程中的信息传输不可避免的多普勒效应，将带来明显的频率色散。因此，在通信算法的设计过程中，应结合实际场景的业务需求设计合适的频率色散应对方案。

具体而言，智能钢厂的信道特征主要包括如下几个方面：

1. 路径损耗

智能钢厂结构复杂，设备众多，电磁波传播过程中的固有损耗、大型设备遮挡的阴影效应和铁尘微粒的丁达尔效应，都会导致传播

过程中信号的能量损失。另一方面，钢厂物理环境的特殊性使得经典的室内外场景中的损耗模型难以直接应用于钢厂信道当中。因此，智能钢厂的路径损耗模型需要结合钢厂的实际情况具体分析，主要由以下三部分构成。

首先，电磁波信号自由空间传播的固有损耗会直接影响传播过程中能量损耗的强度。通常情况下，当基站和用户距离较近且没有建筑物遮挡时，发端发送的电磁波可以沿着直线传播到达接收端，该传播路径被称为直接视距路径，简称直射径（Line-Of-Sight, LOS）。而其他需要在建筑物或大型设备的遮挡下，通过绕射、反射或折射到达接收端的方式，被称为非直射径（Non Line-Of-Sight, NLOS）。无论是哪种传输方式，电磁波只要在自由空间中传播，均会受到空间固有损耗的影响。

其次，大型设备遮挡导致的阴影效应也会导致电磁波接收信号强度的下降。智能钢厂中设备众多、厂房结构复杂，信号传播只有LOS径的场景非常少，因而除上述电磁波传播的固有损耗外，设备器械的遮挡所带来的阴影效应也会带来能量的损耗。具体而言，电磁波在无线信道传播时遇到障碍物，穿透障碍物的过程中会有一些部分的电磁波被阻挡，导致障碍物背面的场强明显降低，由此到达接收端的能量会产生明显的衰减。

最后，智能钢厂在加工铁矿石、锻造钢铁、轧制钢铁的过程中，会有微小的氧化铁、粉尘弥散到空气当中，形成空气胶体，电磁波在传播过程中会产生丁达尔效应。弥散的大量微小氧化铁和粉尘对电磁波产生多次的折射、反射、散射，而每次折射反射都会带来能量损耗，导致接收端的信号强度明显下降。

综上，智能钢厂的物理环境十分复杂，电磁波传播的固有损耗、大型设备和钢架结构遮挡的阴影效应以及弥散微粒在空气胶体中的丁达尔效应，都会使得信号在无线信道的传播过程中出现明显的能量损耗。因此，经典室内外信道路径损耗模型并不能直接应用于智能钢厂中，应根据实际钢厂的信道环境实际测量分析，多次计算模拟出恰当的损耗因子才能实现准确的信道建模。

2. 时间色散

如前所述，智能钢厂大型设备、金属环境都会电磁波产生多次折射反射，信号在厂房中传播存在严重的多径效应，先后到达的信号产生码间干扰。从时域上看，多条路径传播距离不同，到达时间也有先后，在第一条路径上的信号已经到达接收端时，还有传播时间更长路径上的信号陆续到达，后续到达路径上的符号和先达路径上的符号同时被接收，此时两条路径上被接收的符号并非同一符号，互相产生干扰。

通常情况下，多径时延（Delay Spread, DS）描述了第一条路径到达时间和最后一条路径到达时间的差异，是刻画多径效应严重程度的重要指标。通过实地测试，图 2.3 比较分析了正常街道环境和智能钢厂信道响应的时域功率谱。观察发现，正常街道信号的时域功率谱接收信号的时间持续很短，小于 1us，说明当前场景中只有少数几条径能够到达接收端，后达径并不会对先达径产生干扰；智能钢厂的时域功率谱显示接收信号的持续时间很长，多径时延长达 3.5us，远远超过了协议规定的保护间隔，此时上一个符号较晚到达路径上的信号还没完全结束时，下一符号第一条路径上的信号也已到达，将带来严重的码间干扰。

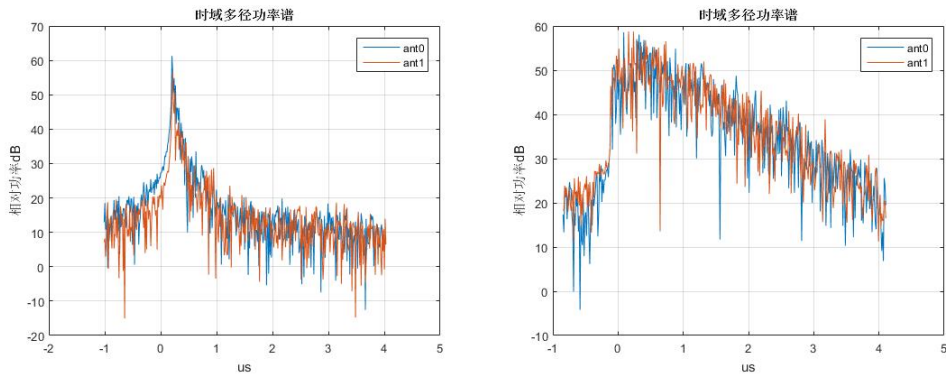


图 2.3 正常街道信号（左）和智能钢厂实测信号（右）时域功率谱

从频域来看，现有 5G 系统的多载波信号是由多个子载波信号相互叠加后的结果，不同频率的子载波信号在经历多条路径后，由于多径间传播距离的差异和子信号频率的不同，导致不同子载波信号到达接收端时相位的旋转角度也不相同，多条路径上子载波信号同相叠加后增强，反相叠加后减弱，最终表现为接收端不同频点上的子载波信号有强有弱。具体而言，信号在接收端的不同频点信号差异巨大，包络极不平坦，呈现衰落特性。这种衰落是随频率变化的，因而又被称为频率选择性衰落。

相干带宽（coherent bandwidth）是指信号在频率信道响应保持平坦特性的带宽大小，是描绘频率选择性衰落强弱程度的重要指标。通常情况下，相干带宽的大小为

$$B_c = \frac{1}{\sigma_{Tm}}$$

其中， σ_{Tm} 是均方根时延扩展，也是多径时延的量化指标之一。多径时延越大，相干带宽越小，信道保持平坦的带宽范围越小，信号包络变化越剧烈。图 2.4 展示了一段带宽内的频域信道响应，可以发现智能钢厂的相干带宽小，在频率上变化非常快，且衰落的幅度大，最高达到了 40dB。也就是说，此时接收信号在不同频点上的

信号功率差异极大，信号包络起伏速度快、幅度强，这对智能钢厂通信系统对模拟波束的增益控制能力和应对快衰信道的算法性能都带来了严峻的挑战。

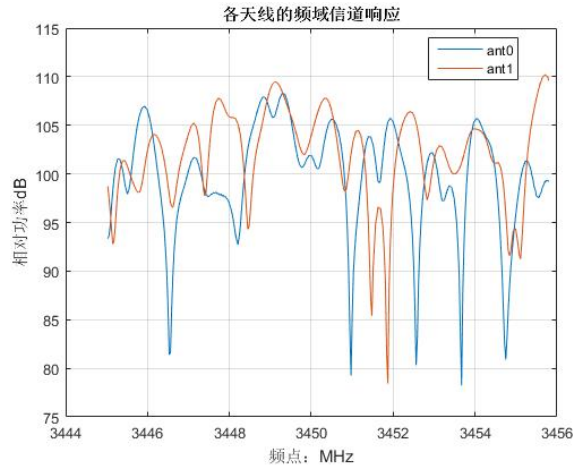


图 2.4 智能钢厂频域信道响应

综上所述，由于冶钢行业工艺流程的特殊性，钢铁分厂大型设备、金属环境会构成复杂的多径环境，带来严重的时间色散，由此产生的码间干扰和频率选择性衰落都非常严重。因此，在设计无线系统时应该采用合理的网络规划设计方案，尽可能减少用户与基站间的多径数目，同时充分考虑多径时延带来的码间干扰对解调性能的挑战，并设计增益适应力强的硬件产品以应对信号包络的强烈变化。

3. 频率色散

智能钢厂在生产过程智能化、生产设备自动化的过程中，厂房逐步迈向信息化、智慧化、无人化的同时，相关的智能设备（如焊接智能机器人、物料自主巡航车、高精度机械臂）必然呈爆炸式增长。另一方面，随着监控管理中心化、状态共享云端化的不断演进，

云上管理平台与上述智能设备的实时交互，将带来海量的传输数据（如视频数据、姿态数据、运动数据等）。然而，这些自主无人设备在作业过程中常常需要模拟人的姿态和行为，运动过程将不可避免地带来多普勒效应，从而产生明显的频率色散，导致信号接收过程中出现频偏。多普勒效应带来的频率偏移可被建模为：

$$f_D = \frac{v \cdot \cos \theta}{\lambda}$$

其中， v 是无人设备的运动速度， θ 为运动方向与直线方向的夹角， λ 为子载波信号的波长。

相干时间（coherent time）是指信道冲激响应维持不变的时间间隔的统计平均值，是描绘多普勒频偏的重要指标。通常情况下，相干时间的大小为：

$$T_c = \frac{1}{f_D}$$

通过上式可知，多普勒频偏越大，相干时间越短，信道保持平坦的时间长度越短。实地测试发现，智能钢厂的运行速度都不快，多普勒效应引起的频偏范围相较于载波频率不大，由此带来的相对频偏值对信号解调影响不大。但为保障无人自主作业设备的安全可靠运行，云端管理平台应实时准确获取自主设备的传感器信息，因此在设计钢厂通信网络时，也应结合实际测试情况进行技术优化，设计高效可靠的接收方案。

4. 测试结论

路径损耗：智能钢厂环境复杂，电磁波传播的固有损耗、大型设备和钢架结构遮挡的阴影效应以及弥散微粒在空气胶体中的丁达尔效应，都会导致接收信号的能量发生衰减。因此，在钢厂信道建

模的过程中，应充分考虑上述因素的衰减效应，并实地考察不同钢厂物理环境的差异，根据实际测量结果，反复计算模拟得到合适的损耗因子，以准确建立信道模型用于理论分析及性能测试。

时间色散：智能钢厂中的复杂环境将不可避免地带来多径效应，而多径效应对电磁波在时间上的色散作用，将导致信号在无线信道传播过程中产生码间干扰和频率选择性衰落。因此，在设计钢厂智能化通信网络时，要充分考察厂房的物理环境，采用合适的网络规划设计方案，减少多径数目，从源头上减轻多径效应的影响；同时设计鲁棒性强的解调方案应对频率选择性衰落的影响，并定制化硬件设备以应对信号包络的快速变化。

频率色散：随着智能钢厂生产过程智能化、生产设备自动化、状态监控云端化进程的不断深入，厂房中的无人作业设备将呈爆炸式增长。为了减轻无人设备运动过程中多普勒效应的影响，在规划通信网络方案时，应充分考虑不同场景下无人设备的速度变化，设计差异化的应对策略。

三.钢铁行业电磁环境下的无线通信解决方案建议

（一）钢铁行业车间无线解决方案建议

钢铁厂房内环境复杂，存在大量的金属隔板，NLOS 场景多，又由于钢板的强反射能力，无线传播反射衰减小，多径丰富。由于各个路径的时延不同，信号沿着多个路径传播到达接收机的时间不同，使接收机发生时延扩展，另外不同时间、强度的多径信号会与主径信号产生重叠，导致厂房内多站点多 CPE 间可能会存在大的干扰。

针对钢铁厂房内的以上特点，给出一些解决方案和方向上的建议，以供网络规划作为参考。

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，远处点位的信号强度会减小。为了有效评估信号的传播距离，引入链路预算，考虑信号从基站到终端的整个链路上的增益、损耗以及阴影衰落余量等，计算出路径损耗，并带入对应的传播模型，计算出满足终端业务需求的基站覆盖距离。

相比其他常规公网的链路预算，钢铁厂房内有两点需要特别考虑，一是厂房反射路径多，小区间干扰大。二是目前没有特定的厂房内的传播模型，3GPP 定义仅定义了统一的厂房内传播模型，该模型分 LOS 和 NLOS 场景，通常采用 NLOS 模型。根据厂房的大小和环境特性的不同，模型分为 InF-SL、InF-DL、InF-SH、InF-DH 四种。InF-SL 和 InF-SH 模型适用于厂房内设施稀疏（S 代表 sparse）场景，InF-DL 和 InF-DH 模型适用于厂房内设施密集（D 代表 dense）场景，L 表示基站的收发天线高度低于（L 代表 low）厂房内物体平均高度，H 表示基站的收发天线高度高于（H 代表 high）厂房内物体平均高度。3GPP 推荐的以上四种无线传播路径损耗模型的表达式如表 3.1 所示：

表 3.1 3GPP 推荐的四种厂房内无线传播路径损耗模型的表达式

视距 (LOS) / 非视距 (NLOS)	工业厂房内无线传播环境的特征	无线传播路径损耗 (dB)
LOS	基站到终端视距直达	$PL=31.84+21.501g(d3d)+19.001g(fc)$

NLOS	InF-SL	$PL=33.00+25.501g(d3d)+20.001g(fc)$
	InF-DL	$PL=18.60+35.701g(d3d)+20.001g(fc)$
	InF-SH	$PL=32.40+23.001g(d3d)+20.001g(fc)$
	InF-DH	$PL=33.63+21.901g(d3d)+20.001g(fc)$

在上表中， $d3d$ (m) 和 fc (GHz) 分别指基站到终端的空间距离及系统的中心频率。

为了获得满足实际钢铁厂厂房内无线传播路径损耗模型，可以在厂房内对 5G NR 基站无线信号的实际覆盖情况进行测试（例如图 3.1 所示的是在某钢铁公司厚板厂厂房内的 5G NR 基站信号强度 SS RSRP 覆盖情概况的测试结果）；同时，根据厂房内的地物密度和 5G NR 基站天线挂高，从 3GPP 推荐的 InF-SL、InF-DL、InF-SH、InF-DH 四种厂房内无线传播路径损耗模型中，选择一种适用于该厂房内环境特征的模型，并基于该模型对 5G NR 基站的 SS RSRP 覆盖能力进行链路预算，获得 5G NR 基站覆盖半径的理论计算结果；然后将该理论覆盖半径与在厂房内的实测结果进行对比，并根据对比结果对无线传播路径损耗模型中的相关参数进行修正，使基于修正后的模型计算得到的 5G NR 基站的信号强度 (SS RSRP) 与实际测试结果之间的差值尽量小。经过这种方式修正后的无线传播路损模型，能够更好地反映无线电波在该厂房环境中的传播特征，然后在对该厂房环境内 5G NR 基站覆盖能力进行预测的链路预算中采用该模型，能够获得更准确的预测结果。

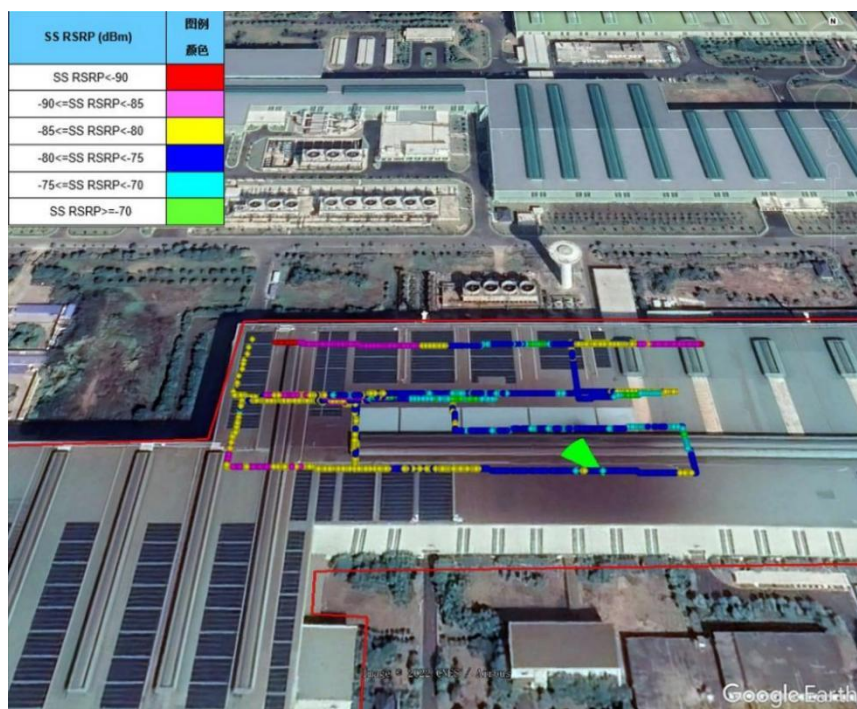


图 3.1 某钢铁公司厚板厂厂房内的 5G NR 基站 SS RSRP 覆盖测试结果示例

由于钢铁厂厂房的环境具有高温、多尘的特点，因此无线网络不适合采用吸顶式全向天线型的室分设备，而多采用定向天线型设备，常用的设备包括 64T64R、32T32R AAU 设备和 8T8R、4T4R RRU 设备。AAU 设备因其大的天线阵列和高发射功率，具有分集增益大、覆盖能力强、支持容量大的特点，但在密闭的厂房内相邻小区之间会存在同频干扰；RRU 设备天线阵列规模小，发射功率较 AAU 设备低，因此覆盖能力和容量支持能力都弱于 AAU 设备，但多个物理小区（最多可达 12 个）之间可以组成一个超级小区（super cell），组成超级小区的各个物理小区会被作为同一个逻辑小区，因而各物理小区之间将不存在同频干扰。

为了满足钢铁厂房内的 5G NR 业务覆盖要求，在进行站点规划时，需要选择合适的安装点位，充分利用基站天线的方向性，使各基站的覆盖路径中，尽量多 LOS 场景，少 NLOS 场景。例如可以将设

备安装在厂房内的横梁上，同时为了增加基站和终端 CPE 之间的直射径，可将 CPE 拉远或外接定向天线。

（二）钢铁厂厂房内无线网络规划常见问题及解决方案建议

常见的钢铁厂智能化生产业务类型包括行车远控、无人铁水运输、带钢表面智能检验等。

传统的行车操控主要依靠现场行车操作室内操作人员手动完成，工作条件比较恶劣。行车远控则通过无线网络，实时回传生产现场的视频画面，以及 PLC 控制信息、行车状态监测信息等，使操作人员在远离生产现场的操控室内就能够对行车进行操作，大大改善了操作人员的工作环境，保障了生产安全，提高了生产效率。

铁水运输是连接高炉出铁和炼钢环节的纽带，通常在钢企园区中是利用有轨机车牵引鱼雷罐车来运输温度高达上千度的铁水。在人工驾驶机车场景下，由于钢企园区内高炉林立，道路纵横交错，驾驶员在机车驾驶室内常常很难提前看清前方路口的环境，因此目前只能通过低速驾驶和提前设置栅栏等措施来保证运输安全，影响了运输效率。利用无线网络，可以实现在机车内对前方非视距范围内的道口路况提前查看；进一步地，操作人员还可以在远端操控室内，通过查看现场回传的实时路况视频和铁水罐车温控等信息，远程操控和智能调度铁水罐车，实现无人自动驾驶。

传统的带钢表面检测依靠人工检测，检测效率较低，并且较难识别微小缺陷。通过利用无线网络和人工智能机器视觉技术，能够实时采集多个检测点的表面高清图像并传输到 MEC 边缘云平台，然

后与缺陷信息库进行智能比对，并确认带钢表面是否存在质量缺陷以及缺陷的具体类型，从而大大提高带钢表面质量缺陷的实时检测准确度和检测效率，并避免人工检测时易出现的漏检、错检等情况。

行车远控、无人铁水运输和带钢表面智能检测几项业务对于无线网络的上行速率、时延和可靠性的要求如表 3.2 所示，可以看出这几种 ToB 业务在上行速率、时延、可靠性等几方面都有着较高的要求。5G NR 网络的大带宽、低时延、高可靠、广连接特性，使其在满足行车远控等钢铁企业 ToB 业务对于无线网络的需求方面，相比 3G 或 4G 网络具有不可替代的优势。

表 3.2 钢铁行业几种常见 ToB 业务对无线网络性能的要求

TOB 业务类型	TOB 业务描述	上行速率要求	平均时延要求	可靠性要求
行车远控	图像/视频流上传	>50Mbps (8K)	<20ms	99.9%
	PLC 指令下达	50kbps	<20ms	99.99%
无人铁水运输	图像/视频流上传	>50Mbps (8K)	<20ms	99.9%
	PLC 指令下达	50kbps	<20ms	99.99%
带钢表面智能检测	图像/视频流上传	>50Mbps (8K)	<20ms	99.9%

1. 频谱规划与选择

中国移动可用频段有：700MHz/900MHz/1.8GHz/1.9GHz/2GHz/2.3GHz/2.6GHz/4.9GHz 每个频段定位如下：700MHz 为广电和移动共建共享，用于 5G NR 连续覆盖打底层。900MHz 频段长期定位为 LTE 覆盖打底层，兼顾 GSM、NB 需求。1.8GHz、1.9GHz、2GHz 频段为 LTE 覆盖和容量主力频段。2.3GHz 频段用于 LTE 室内覆盖。2.6GHz 是 5G NR 覆盖和容量主力层，其后 60M 目前仍有 LTE 应用。4.9GHz 用于 5G NR 热点区域容量补充及行业应用。

中国电信可用频段有：800MHz/ 1.8GHz/ 2.1GHz/ 3.5GHz。800MHz 可用于 CDMA、LTE 和 5G NR 网络的广覆盖，同时开通了 NB-IoT。1.8GHz 是 LTE 室外覆盖的主力频段，2.1GHz 频段主要用于补盲和室内覆盖，目前电信已重耕 2.1GHz 频段做 5G NR 的广覆盖和室内覆盖，并与联通开展共建共享。3.5GHz 频段为 3.4G-3.5GHz，为 5G NR 专用频带，和联通共建共享。

中国联通可用频段有：900MHz/ 1.8GHz / 2.1GHz / 3.5GHz。900MHz 主要做 GL 双模、GU 双模，1.8GHz 是联通 LTE 的主力频段，2.1GHz 是 UMTS 的主力频段，个别城市也开通了 2.1GHz LTE，3.5GHz 为 3.5G-3.6GHz，用于 5G NR 覆盖。

钢铁园区的无线频段选择，与各运营商使用的主流 5G NR 频段基本保持一致，中国移动为 2.6GHz，电信联通为 3.5GHz。由于钢铁厂的生产业务场景对可靠性和网络性能要求较高，中国移动的无线网络推荐以 4.9GHz 频段为主（100MHz 带宽），2.6GHz 为辅；电信联通项目可以考虑在 3.5GHz 频段上共享 200MHz（3.4GHz-3.6GHz）频宽，甚至借用 3.3GHz-3.4GHz 的一共 300MHz 带宽。为追求更大上

行容量能力，如果需要使用 1D3U 帧结构时，在 4.9GHz 上需要考虑是否现网存在 4.9GHz 的站点，进行干扰规避；3.5GHz 上由于电信联通已大规模部署 5G NR 站点，需要重点考虑室内外异帧结构干扰协同，具体评估是否具备开通 1D3U 的条件。

2. 钢铁厂厂房内无线网络规划的可靠性保障及容灾方案

不同行业对 5G NR 网络的可用性等级需求不同，表 3-2 中列出了典型的应用场景对 5G NR 网络的可用性等级需求，可以看出冶金生产行业对 5G NR 专网的可用度等级要求很高，为 99.999%。

表 3.3 5G NR 专网可用性要求的等级

等级	网络可用性要求 (%)	典型应用场景
SLA 1	[99, 99.9)	通常应用于个人设备
SLA 2	[99.9, 99.99)	通常在警务专网、平安城市等项目中的视频监控、维护信息采集等业务场景
SLA 3	[99.99, 99.999)	通常应用于保障生产效率的场景，如港口 PLC 控制等场景
SLA 4	[99.999, 99.9999)	通常应用于安全强相关场景，如智能列控（高铁、轨交）、钢铁生产控制等场景
SLA 5	≥ 99.9999	比以上场景对可用性有更高要求的场景

造成钢铁厂厂房中 5G NR 专网不可靠的因素包括设备软硬件故障、设备间链路故障、用户误操作、网络拥塞等（如图 3.2 所示），其中前两项因素是影响网络可靠性的主要因素，所以对设备和链路的冗余备份提出比较高的要求。

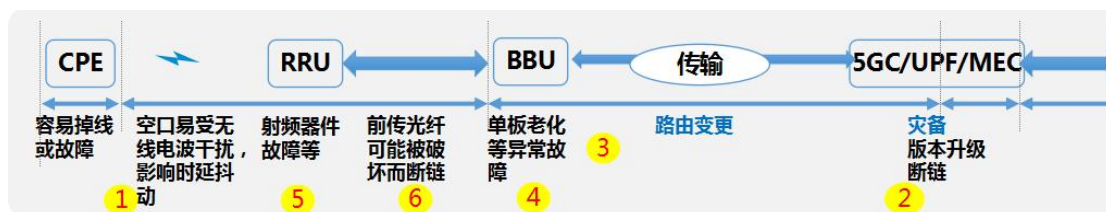


图 3.2 影响 5G NR 专网端到端可靠性的主要因素分析

针对各网元节点对 5G NR 专网可靠性的影响，设计高可用的组网方案，如图 3-3 所示：

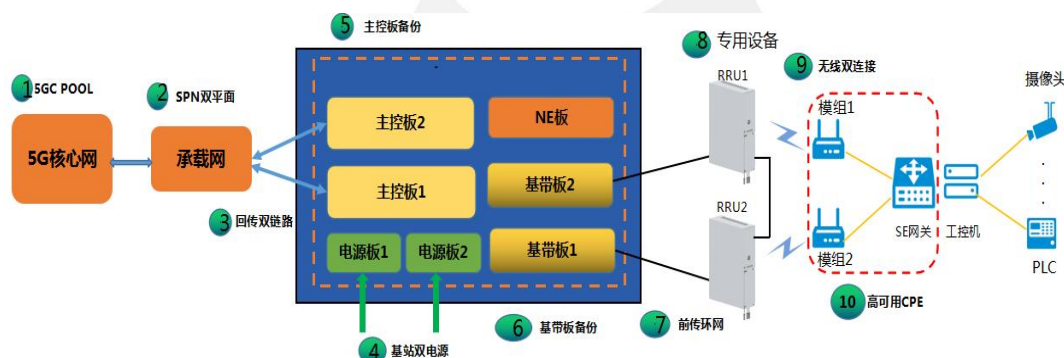


图 3.3 5G NR 专网高可靠性组网方案

1. 设备的高可靠设计：满足钢铁行业特殊环境适应性的硬件；
2. 设备冗余备份：通过设备的备份提升网络可用性，包括电源板备份、主控板备份、基带板备份、无线链路双发选收等，当某一模块出现故障时可快速自动切换到备用模块，保障网络的正常运行；
3. 链路备份：前传环网、前传双上联、回传双链路等，改善传输链路可靠性问题；

4. 网断业不断，惯性运行：通过 UPF 下沉或者部署算力 NE (Node Engine) 单板，实现 NG-C 断链后的业务保持能力，网断业不断，保障业务的正常运行；

5. 通过承载的双平面、承载环网实现传输链路的可靠性；

6. 通过核心网 UPF 池化、控制面池化、网元热备等实现核心网的高可靠性；

通过以上端到端的高可靠的方案，满足垂直行业 99.999% 的高可用网络要求。

3. 优先级保障机制

在通信任务调度中对通信任务的重要性普遍进行分级，系统管理器根据任务的优先级分配通信资源（包括时隙和信道），优先级高的任务优先享用通信资源，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。

优先级保障机制，是根据不同业务类型，对其业务优先级进行划分，从而根据优先级的顺序对不同的业务提供不同的保障机制。

在钢铁智能制造过程中，涉及到大量不同类型的工序，对 5G NR 无线网络提出不同的要求，需要根据不同的业务类型，灵活选择无线网络的调度方法及优先级。

对于时延要求高的业务类型，保障目标业务能获得足够的调度资源，保障相关钢铁智能制造中的关键业务满足生产需要。例如小业务量的机器控制指令，要求及时准确传递至生产设备，可采用高优先级进行业务保障。

对于传输数据量高的业务类型，在保障一定的传输时延要求的同时，使用对应的优先级进行调度保障。例如对于无需实时传递的各类生产过程记录保存信息，可采用低优先级进行业务保障。

（三）小结

综上所述，本文从钢铁行业数字化转型背景及电磁环境分析的必要性出发，首先分析钢铁制车间电磁干扰环境，对整体电磁干扰水平进行了基于实测的量化定义，对于特殊区域设备电磁抗扰度要求也给出了建议。其次，本文基于钢厂通信信道的特征分析，给出了 5G NR 网络的建网建议。钢铁厂厂房内通常存在大量的金属建筑结构、大型生产设备，和堆放的众多生产原料、钢铁产品等，无线环境较为复杂。针对这一场景，建议根据厂房内设施、设备等的密度、基站挂高等实际情况，在选用 3GPP 推荐的厂房内无线传播模型基础上进行基于实测-计算模型修正的无线网络规划，同时也需要考虑 CPE 终端的安装位置。在频段选择方面，需要综合考虑运营商的频谱资源情况、钢铁厂厂房内业务的上行速率和容量要求、与公网的干扰协调等问题。在网络设备的组网和选择方面，针对复杂无线场景，可以考虑同时使用多层级的网络可靠性保障容灾方案，以提高网络的可靠性。

四.缩略语

NLOS: 非视距离 (Non Line-Of-Sight)

LOS: 视距 (Line-Of-Sight)

SLA: 服务等级协议 (Service Level Agreement)

CPE: 客户终端设备 (Customer Premise Equipment)

UPF: 用户面功能 (User Plane Function)

PLC: 可编辑的逻辑控制器 (Programmable Logic Controller)

OFDM: 正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

MIMO: 多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output)

VoNR: 新空口承载语音 (Voice over New Radio)

CDMA: 码分多址 (Code Division Multiple Access)

GSM: 全球移动系统 (Global System for Mobile)

LTE: 长期演变 (Long Term Evolution)

NB: 窄带物联网 (Narrow Band Internet of Thing)

5GC: 5G 核心网 (5G Core)

参考文献

- [1]. 3GPP TS 22.104 Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains; Stage 1 (Release 18)
- [2]. 3GPP TS 22.261 Service requirements for the 5G system; Stage 1 (Release 16)
- [3]. 3GPP TR 22.804 Study on Communication for Automation in Vertical domains (CAV) (Release 15)
- [4]. ITU-T QoS (2022): ESTR-KPI-RAN - Key performance indicators (KPIs) for radio access mobile networks

-
- [5]. 王显文, 电弧炉电磁辐射的危害及防护的思考, 工业加热, 2015 年
- [6]. 赵玉寿, 电弧炉引起的电压波动和闪变的抑制方法研究, 武汉科技大学, 2012 年



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