

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

(有色金属制造行业)

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

# 工业无线电磁环境白皮书

——有色金属制造行业

(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

# 前 言

我国有色金属冶炼和加工原料品质波动大，冶炼和加工工艺复杂，产品精度要求高，生产运行速度快和物流调度频繁，在企业已有自动化、信息化建设基础上，需要推进互联网、大数据、人工智能、5G、边缘计算、虚拟现实等前沿技术应用，实现设备、物料、能源等制造要素数字化汇聚，网络化共享和平台化协同，具备在工厂层面全要素数据可视化在线监控，实时自主联动平衡和优化的能力，建成全流程自动化产线，集产品质量全生命周期管控，精细化能效管控，供应链协同优化运营于一体，促进企业转型升级，建成有色金属智能冶炼和加工工厂，提升企业综合竞争力和可持续发展能力。

针对有色金属冶炼智能化需求，设备工作电磁环境又比较复杂，需要对有色金属行业工作场景做全面分析和研究，本白皮书重点介绍电解铝行业的电磁环境专项研究成果。

## 编写组成员（排名不分先后）：

倪冬兵、赵维铎、赵洪涛、辛毅、郭伟、刘嘉、仇亚男、陆志恩、李永彪、曹蓟光、管子健、黄颖、安岗、刘京领、万占永、王攀、李建、王省伟、黄琦、曾育新、陈震、赵亚辉、谭宏凯、颜非亚、杨涛、吴道林、张晔、王培

## 牵头编写单位：

中兴通讯股份有限公司

## 参与编写单位：

中国信息通信研究院

中国联合网络通信有限公司研究院

云南神火铝业有限公司

新疆神火煤电有限公司

贵阳铝镁设计研究院有限公司

工业互联网产业  
Alliance of Industrial



工业互联网产业联盟公众号



# 目录

一、 有色金属智能制造背景及应用场景 .....	1
(一) 有色金属智能制造发展与应用场景 .....	1
(二) 有色金属智能制造优势和价值 .....	2
(三) 有色金属智能制造电磁环境分析的必要性 .....	3
(四) 金属铝智能制造电解分厂无线电磁环境关键应用场景 .....	5
二、 金属铝智能制造电解分厂电磁环境分析 .....	7
(一) 电解分厂电磁噪声特性分析 .....	7
(二) 金属铝智能制造电解分厂信道特征分类分析 .....	11
三、 工业无线通讯解决方案建议 .....	19
(一) 金属铝智能制造电解槽车间无线解决方案建议 .....	19
(二) 有色金属智能制造常见问题解决方案建议 .....	20
(三) 小结 .....	24
四、 缩略语 .....	24
五、 参考文献 .....	25

## 一、有色金属智能制造背景及应用场景

### （一）有色金属智能制造发展与应用场景

近年来，全球制造业正走进数字化、智能化时代，而有色金属市场结构产能过剩、市场供求失衡等矛盾和问题亟需解决，新时代下，发展方式开始从规模速度型向质量效率型转变，结合《中国制造 2025》，发展智能制造，解决生产制造、应用服务过程中的复杂性和不确定性问题，提高资源利用效率，劳动效率，实现资源优化、效益最大化生产方式，达到本质安全、环保达标、质量保证、效率提高、环境优良、能效领跑、劳动强度和成本降低的目标。

有色金属智能制造是指以新一代信息技术为手段，信息应用为支撑，实现工厂基础设施优化、开发管理精细化、功能服务专业化和产业发展智能化的综合发展。

在有色金属行业中，由于有色金属种类繁多，工厂管理难度大，产业链分散，一直没有系统化的完整智能制造体系，对于智能化的有色金属行业互联网，智能制造系统应用场景分为以下三个部分。

**集中化监管应用场景：**通过集中化监管，能够将不同种类或不同地区的有色金属工业集中分析处理，实现资源共享，这样不仅能够减轻逐个分析的负担，更能显著提高工作效率和工作质量，随着有色金属冶炼技术进一步提高，处理的数据必将大幅增加，相应的对集中监管系统的要求也随之增加。

**远程控制应用场景：**有色金属智能制造要实现自动化控制，关键步骤是实现远程控制，例如，通过 5G 摄像头+机器视觉平台，对有色金属工厂实时状况进行图像传递，通过远程控制台对现场的设备进行操作控制，达到远程检查控制的效果，同时也能保证设备与机器的稳定运行和正常工作。

**现场监管应用场景：**现场监管应用是确保有色金属智能制造系统能够正常运作，通常一个控制命令的完成，最终都以现场监管系统运转作为结束指令，利用集控边缘云技术+5G云化PLC技术，可以将已有的现场PLC网关，进行现场监管，拉远控制，建立具有高精度、响应时间短、多方协同的现场监管模式。

## （二）有色金属智能制造优势和价值

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收集，再通过中游工业互联网平台进行数据处理，然后在下游企业中进行应用，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技术也逐渐成为有色金属智能制造的关键技术，其优势和价值体现在如下方面。

**网络全覆盖化：**有色金属工厂信息基础设施建设主要沿着“宽带、融合、泛在、安全”的方向发展，不断夯实宽带网络建设，促进整个工厂有线网络、无线网络、物联网络、安防网络等各类网络全面融合。

**平台集约化：**数字平台是融合技术、聚合数据、赋能应用的机构数字服务中枢，以智能数字技术为部件、以数据为生产资源、以标准数字服务为产出物。通过集约型的数字平台，融合云计算、大数据、视频技术、物联网、人工智能等新兴技术，持续整合，将整个有色工厂的技术能力封装在平台内，为有色工厂高质量持续健康发展和运营提供技术支撑，打破各厂之间的壁垒，方便信息交互，同时降低标准服务接入壁垒，促进线上线下聚集性及集约性，提升整体生产效率。



**应用智能化：**利用信息技术，合理使用相关数据进行应用创新，构建“开放、共享、高效、智能”的平台，从被动响应到主动预防，进行实时业务创新，促进有色工厂智能化发展。

**环境生态化：**为顺应低碳环保、节能减排的潮流，有色金属行业智慧工厂建设将会更加注重高新技术、绿色节能、生态环保型产业的发展，有色金属行业智慧工厂融入低碳管理理念，将新技术、管理手段、管理平台与工厂的创新结合在一起。

**管理智慧化：**有色金属行业工厂利用生产设备网络化、生产数据可视化、生产文档无纸化、生产过程透明化、生产现场无人化等先进技术，打造优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产管理环境，从而建立基于工业大数据和“互联网”的智慧工厂，使工厂资产效率、生产质量得以提高，制造工艺持续改进，企业成本降低，生产过程更加安全，生产管理的可持续性保持良好态势。

### （三）有色金属智能制造电磁环境分析的必要性

与商用和民用无线通信环境相比，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影响。从信息论角度看，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制约，只有在充分研究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各个环节中，

都有重要的作用，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。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标准化工作。

在实际无线通信系统部署中，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。

有色金属冶炼工厂在设备工作时会辐射大量的电磁噪声，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，会导致正常的通信信号受到干扰，数据包无法按时准确传送到接收端。从信道特征来看，不同的有色工厂车间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、电力谐波、金属类器材与材料密度以及各种传播阻碍物的数目，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，需要对典型有色金属冶炼工厂场景的电磁环境进行分析研究，了解干扰源噪声特性，并根据实际生产环境、特点以及工业

性质来提取无线信道参数，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，更好地保障有色金属智能制造工厂无线通信应用在智能制造领域的可靠性，推动行业高质量快速发展。

#### （四）金属铝智能制造电解分厂无线电磁环境关键应用场景

近年来，随着铝电解工艺技术的创新发展，我国铝电解企业的建设向规模化、容量大型化、高效环保 节能方向发展。其目的是降低吨铝投资、提高劳动生产率、给铝厂带来最大的经济效益。目前国内投产运行的最大容量的电解槽达到 620 kA， 500 kA、400 kA 和 300 kA 槽型是产能最多的三个槽型，目前我国在建或拟建项目中，约 95%以上的产能采用 500-600 kA 槽型，未来大容量、高效节能槽型的产能占比将越来越大。随着电解槽容量的增大，系列电流强度不断增加，电流强度越高，铝电解槽内部及周围的静磁场就越大。由于生产的需求，铝电解槽内部的磁场得到精心的设计和严格的控制，但槽周围环境磁场一直未受到关注。电解铝厂是生产铝的主要场所，从当前的生产实践分析来看，电解铝生产现场环境具有特殊性，因为其生产环境是强电场和强磁场并存的，在这样的特殊环境下，为了实现电解铝厂无线通信网络的稳定，必须要对电磁干扰问题做分析和解决。

电解分厂的任务是生产出合格的铝液，采用的工艺主要是冰晶石-氧化铝熔盐电解法，该工艺是由美国的霍尔和法国的埃鲁 1886 年分别申请的世界专利，主要经济指标包括：电流效率、氧化铝单耗、直流电单耗、可比交流电耗、阳极毛耗、氟化盐单耗。主

要设备包括：整流供电机组、电解槽、多功能机组等，电解分厂设备实景如图 1-1。



图 1-1 电解分厂设备实景

电解铝的工艺原理如下，氧化铝溶解在熔融冰晶石熔体中，形成具有良好导电性的均匀熔体，采用碳素材料做阴阳两极，当通入直流电后，即在两极上发生电化学反应。在阳极上产生阳极气体，阴极上析出液态铝，用真空抬包周期性从电解槽吸出，送铸造分厂铸重熔用铝锭。电化学反应过程中，阳极不断消耗，阳极母线不断下降，要进行阳极更换和母线提升作业，另外通过计算机控制，利用超浓相输送向电解槽定时添加氧化铝、氟化铝，保证生产连续平稳运行，对应的工艺流程如图 1-2。

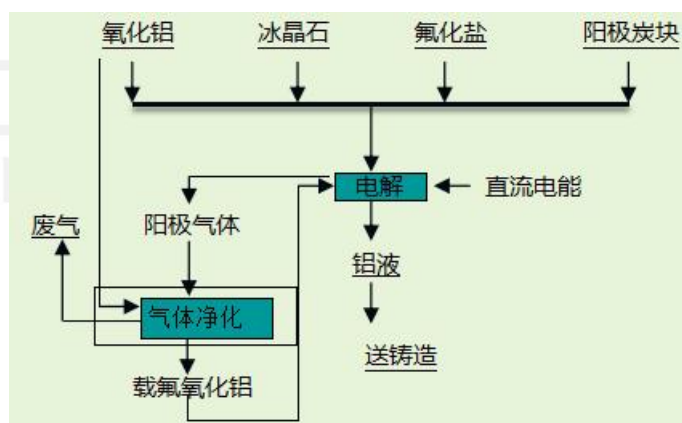


图 1-2 工艺流程

铝电解生产操作包括：阳极更换、出铝、熄灭阳极效应、抬母线、原铝/电解质水平测量等，阳极效应是电解过程中发生在阳极上的特殊现象，随着电解质中氧化铝含量降低，电解质对阳极碳块湿润能力下降，电解反应所产生的气体排不出来，聚集在阳极下方，

形成气膜，使槽电压急剧上升，俗称阳极效应。阳极效应虽然可以洁净槽底，规整炉膛，清理阳极底掌，校正  $Al_2O_3$  浓度，清洁电解质，但弊端是浪费大量电耗、人力、物力，严重时烘化炉帮，使系列最大负载值增加，主要操作如图 1-3。



图 1-3 铝电解生产操作（换极-出铝-运铝）

铝电解槽内和槽外存在着大量自由电流及铁磁材料，如上部钢结构、钢质槽壳、钢爪、钢结构厂房等，电磁干扰会对设备元件形成影响，进而导致设备故障，因此，需要对实际磁场环境进行测量、建模、仿真，从而更好地保障有色金属智能制造工厂无线通信应用在智能制造领域的可靠性。

## 二、金属铝智能制造电解分厂电磁环境分析

### （一）电解分厂电磁噪声特性分析

#### 1. 电解分厂电磁噪声源

铝电解分厂主要生产设备为电解槽，铝电解槽分为阴极结构、阳极结构、母线结构及电气绝缘四大部分，阴极结构中槽底由上至下是一层阴极炭块组，三层耐火砖、一层氧化铝粉、两层保温砖、一层硅钙板及一层石棉板。阴极炭块组由阴极炭块同埋设在炭块内的钢质导电棒构成，炭块组采取错缝排列，长和短错开，以保证槽底坚固耐久，炭块组之间用细粉糊粘接；位于阴极上方的阳极炭块及附属部件均属阳极结构，阳极结构由阳极炭块组和阳极提升机组

成，阳极炭块组由阳极炭块、钢抓、铝导杆三部组成，阳极提升机构由螺旋起重机、减速机、传动机构和马达组成，起升降阳极作用；打壳下料装置由打壳和下料系统组成，打壳装置由打壳汽缸和打击头组成；下料系统由槽上料箱、下料器组成，图 2-1 为常用的预焙铝电解槽结构。

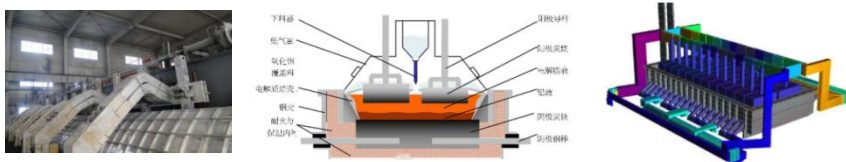


图 2-1 铝电解槽结构

由于电解槽工作过程中，需要的电解电流为直流 300-600KA，会在电解槽周边形成强大的磁场，主要的磁场干扰源在电解槽内部主要是阳极结构和阴极结构之间，在电解槽外部主要集中在直流母线、阳极母线和导杆以及阴极钢棒上，电解槽内部强磁场大部分通过电解槽屏蔽了，这里重点研究分析的是阳极母线和导杆以及阴极钢棒对电解槽外部空间形成的磁场干扰。

## 2. 电解分厂电磁特性

### (1) 电磁辐射源

随着铝电解槽电流强度的不断增加，其电流产生的磁场也越来越大。对于电解槽内部磁场，可以通过改变阴极母线的配置以及某些补偿方法来将磁场调整到合理的数值，在电解槽的工艺设计中往往会忽略大电流所产生的磁场对车间周边环境的影响。而实际上常会遇到电解车间的某些设备如天车、计算机、通信设备等电子设备工作异常的问题，比如天车出现启运行困难和朝导向轮一侧跑偏；手机出现死机、花屏、黑屏等问题。单纯从理论计算来考虑这些问

题，往往由于磁场环境的不确定因素而失去其准确性。铝电解槽磁场一般由三个部分组成：

- a) 母线电流（交直流母线、阴极棒和阳极导杆）产生的磁场；
- b) 极块、阳极块及熔体铝液中电流所产生的磁场；
- c) 铁磁物质（包括槽壳、钢质上部结构等）对磁场的影响。

一般情况下，靠近电解槽的阴极棒和阳极导杆的空间，由于磁感线最密集，因此场强最大，其次是电解槽内部，再其次是电解槽附近的铁磁特质，总之离电解槽越远，磁场强度越小，由于电解需要稳定的电场，因此通过电解槽两极形成的是恒定强磁场，磁场源头如图 2-2。



图 2-2 现场磁场源头

本白皮书对大型预焙阳极电解铝业公司进行环境电磁场测试分析，电解铝厂车间内经常出现手机死机、花屏、黑屏等现象，通过对现场磁场强度测量，并以此开展更加严谨和科学的行业设计和设备选型工作。

## (2) 现场监测方案

该铝业公司的四个电解分厂设施分布、供电、分段、空间等基本一致：只需一个厂区进行测试；每个厂区均分为三段，各段也基本一致：选取一段进行测试；每个工段，根据电解槽位的分布特征，均匀取 6 个槽位进行测试；每个槽位按照距离分解为 4 个点进行测试，具体为点 1：电解槽中间；点 2：过道第一道黄线；点 3：过道第二道黄线；点 4：至过道第三道黄线；每个点测量三个高度测试：40CM, 80CM, 120CM，磁场检测仪器型号：ETL-400；频率范围：

30Hz~400KHz；电场检测仪器型号：NBM-550 和 EF 0391；频率范围：100 kHz to 3 GHz。车间电解槽布局图如 2-3 所示。

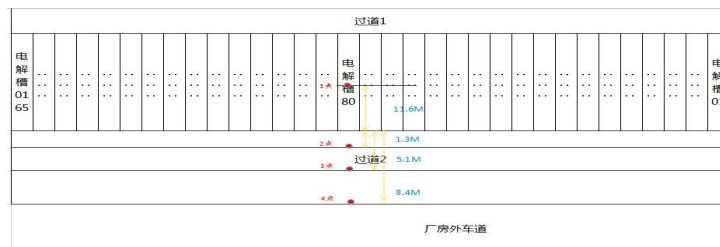


图 2-3 车间电解槽布局图

### (3) 现场测量数据

根据现场测量得出通电臂为磁场源头；由于场波动、槽位叠加，在厂区有限空间内，距离差异对测试到的磁场强度影响不大，高度差异对测试到的磁场强度影响不大；磁场测试值变化范围大：从几 uT 到几千 uT 持续波动；电场测试值在 0.4~1.5V/m；测试值变化暂时找不到规律性：包括周期、次序、线性、幅度，磁场测量数据如图 2-4 所示。

现场测量(电磁场)																					
测量点	测量高度 /M	电场槽	磁场实测 值 uT	电场实测 值 V/m	电场槽	磁场实测 值 uT	电场实测 值 V/m	电场槽	磁场实测 值 uT	电场实测 值 V/m	电场槽	磁场实测 值 uT	电场实测 值 V/m	电场槽	磁场实测 值 uT	电场实测 值 V/m	电场槽	磁场实测 值 uT	电场实测 值 V/m		
1点	0.4		7700	1.2		7200	1.1		5400	0.6		6080	0.9		6600	0.8		4200	0.4	3800	0.4
	0.8		6400	0.8		5980	0.7		5600	0.7		6200	1.1		6600	0.7		5530	0.7	4500	0.5
	1.2		5800	0.6		5500	0.6		5300	0.6		5500	0.6		6700	0.8		5700	0.8	3900	0.4
2点	0.4		6600	0.8		5800	0.8		6800	1.2		6500	1.2		4600	0.4		6700	0.9	5180	0.8
	0.8		6400	0.7		6600	0.9		3900	0.8		6700	1.2		6200	0.8		5300	0.7	5900	1.1
	1.2	2003	6800	0.8		7400	1.3		4900	1.1		6800	1.3		5200	0.7		5800	0.7	6300	1.3
3点	0.4		6800	0.5	2013	8300	1.5	2023	5700	0.6	2038	6600	1.3	2038	5700	0.7	2050	4800	0.5	4600	0.6
	0.8		6600	0.5		5700	0.7		6700	0.9		5600	0.6		5700	0.7		5600	0.7	4680	0.6
	1.2		6700	0.6		5200	0.6		5900	0.6		5400	0.6		5900	0.7		6640	1	4440	0.5
4点	0.4		3710	0.4		5800	0.8		4800	0.5		8080	1.4		4800	0.5		4800	0.5	5800	0.9
	0.8		6740	0.7		5480	0.6		7200	1.2		6500	0.8		6300	0.8		5600	0.8	6600	1.2
	1.2		7500	1		5600	0.7		5900	0.6		4600	0.6		6600	0.9		6040	0.9	5300	0.8

说明：  
 测试条件：  
 磁场测量设备：ETL-400  
 频率范围：30Hz-400KHz  
 取值：均方根值  
 电场测量设备：NBM-550和 EF 0391；  
 频率范围：100 kHz to 3 GHz  
 取值：峰值

图 2-4 现场测量数据

### (4) 结论

经过铝业电解分厂的电磁环境测试发现，现场的磁场强度非常高，测量值最大为 8200uT (6508A/m)，测量值最低也达到 3710uT (2944A/m)，远远大于 GB/T 17626.8 定义最高磁场应力要求



30A/m，所以对带有磁感应及霍尔元器件产品在这个电磁环境下工作影响较大。

现场的电场强度较小，测量值只有 0.4~1.5V/m，低于 GB/T 17626.3 定义通信产品最低辐射抗扰度应力要求 3V/m。

## (二) 金属铝智能制造电解分厂信道特征分类分析

金属铝智能制造电解分厂设备众多，环境复杂，尤其是电解槽等重型设备、新一代智能装备、电解工艺的固有磁场，使得金属铝智能制造电解分厂形成了特有的、复杂的、多变的电磁物理环境，也为通信信道建模带来了挑战。通过对电解分厂的实地分析测试，主要提取传播损耗、频选特性、时变特性、电磁干扰等四个方面的信道特征。

传播损耗是电磁波在自由空间传播过程中产生的能量损耗，直接影响接收信号功率的大小，对通信系统的可靠性有着至关重要的作用。通常情况下，自由空间路径损耗的通用表达式如下。

$$P_{\text{Loss}} = \alpha \log_{10}(d) + \beta \log_{10}(f) + \gamma$$

其中， $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$ 为常系数，与所处的物理环境相关， $d$ 为收发端之间的距离， $f$ 为电磁波的频率。容易发现，传播损耗除了与传输距离和信号频率相关外，与物理环境也直接相关，物理空间中的遮挡越多，环境越复杂，对应的系数也越大。金属铝智能制造电解分厂中重型设备的遮挡、金属外壳的反射等复杂物理环境都使得信号在传播过程中的能量损失十分严重。

频选特性是多径信道中电磁波通过直射、反射、折射等不同路径传播到接收机位置时，由于每条路径的传播距离不同，因此各条路径到达接收机时的时间、相位都不相同，同相叠加信号幅度增强，反向叠加信号幅度削弱。对于目前 5G 的多载波系统而言，不同频率的信号在经历相同的多径后，由于本身信号频率的不同，传播相同

距离下的相位的旋转程度也不相同，导致不同频率的信号有些正向叠加，有些反向相消，最终信号在不同频率上幅度呈现有选择的衰落，因此叫做频率选择性衰落。频选特性是最为典型的小尺度衰落之一，其本质上是由多径效应引起的，多径数量越多，频选也就越严重。金属铝智能制造电解槽车间中金属较多，生产设备、生产物料都会使得信号发生多次电磁折射和反射，导致接收端的信道存在大量多径，带来的频选特性为准确接收信号带来了挑战。

时变特性是由于终端在运动过程中，发送或接收的信号频率会随着用户的移动速度和方向不同而发生变化，这种变化被称为多普勒频移。由于终端运动的速度和方向会随时间变化，即使在不同时刻发送相同的信号，接收端收到的信号也是不同的。每个频率的信号受多普勒效应的影响，都会产生一定的频率色散。时变特性也是一种非常典型的小尺度衰落，其主要受多普勒效应的影响，终端运动速度越快，时变也就越明显。金属铝智能制造电解分厂装备随着生产装备智能化的逐步深入，自动化设备互联化管理、云端化操控的过程中，必然会出现生产装备（如无人小车、自主作业机器人等）运动过程中的数据通信需求，期间多普勒频移带来的时变特性将对通信的准确度带来更高的要求。

电磁干扰是指在电磁波通信的过程中，除自由空间存在呈高斯分布的加性电磁噪声外，还存在其他形式的电磁信号，对通信过程中的有效电磁波产生干扰。金属铝智能制造电解分厂由于其工作内容的特殊性，在电解槽工作的过程中会产生巨大的电磁场，对有效信号的接收产生干扰，因此需要更为有效的干扰消除方案。

金属铝智能制造电解分厂的信道特征主要分析如下。

## 1. 传播损耗

如前所述，传播损耗与物理环境、传播距离、信号频率三者息息相关，其中传播距离和信号频率在信道建模中常常容易确定，而物理环境带来的损耗、遮挡、屏蔽和多径等特性却难以被建模为统一的数值模型，需要根据具体场景具体分析。

通常情况下，收发双方中间没有遮挡，电磁波能够沿着直线传播的传输方式称为视距传播（LOS），该传播路径被称为直视径；收发双方存在遮挡，电磁波通过反射、折射、衍射等方式到达接收端的传播方式，被称为非视距传播（NLOS）。在金属铝智能制造电解分厂中，除了 LOS 场景中电磁波在自由空间沿着直线传播过程中的固有能量损耗之外，电解槽等大型设施的遮挡、金属工作环境的屏蔽和复杂环境中多次折射反射等也都会有对信号能量有着严重的衰减效应。

其一，重型设备遮挡带来的阴影效应对传播损耗有着明显的影响。在电解分厂中，由于电解槽等大型设备的存在，出现 LOS 传播的概率非常小，主要以 NLOS 场景为主。电磁波在传播的过程中，受到上述设备的遮挡，电磁波沿着 NLOS 径只能通过衍射的方式到达接收端，此时设备的背面会产生电磁波的阴影，造成场强中值的变化，接收端接收到的信号强度会产生明显的衰减。

其二，金属工作环境的屏蔽效果会加剧传输过程中能量的损耗。由于行业本身的特殊性，金属电解分厂中会存在较多的金属密闭环境，如物料仓库中的遍布的金属铝材料就形成了天然的屏蔽环境。囿于金属本身的孔径较小，电磁波几乎不能通过金属，导致该类金属密闭环境中能接收到电磁波信号十分有限，能量损耗严重。

其三，复杂工作环境信号的多次折射反射也会对建模传播损耗带来诸多不确定因素。如前所述，电解分厂中的重型设备和金属环境都会对电磁波信号带来明显的折射和反射。每次反射、折射后信

号的能量都会存在损耗，电解分厂中设备和金属众多，信号很有可能需要多次反射才能顺利到达接收端，由此带来的能量损失也十分明显。

综上所述，电解分厂的物理环境十分复杂，大型设备的阴影效应、金属环境的屏蔽效果、NLOS 径的多次折射反射都会对信号的能量带来严重的损耗。因此，相较于其他通信场景，电解分厂的信道建模中应选取较大的传播损耗因子，需要根据不同工厂的实际测试结果，才能达到合适的建模效果。

## 2. 频选特性

电解分厂物理环境复杂，折射反射径众多，频选特性是多径信道中最为典型的特性之一。从模拟域来看，接收端接收到的是不同路径的电磁波叠加后的结果，而不同频率的信号经过上述多径后相位旋转的角度不同，因此部分频率的信号经过不同路径后相位相同，正向增强；部分频率的信号经过不同路径后相位相反，反向相消，最终接收到的信号会在不同频率位置呈现衰落特性，从而导致接收到的信号极不平坦，如图 2-5 所示。

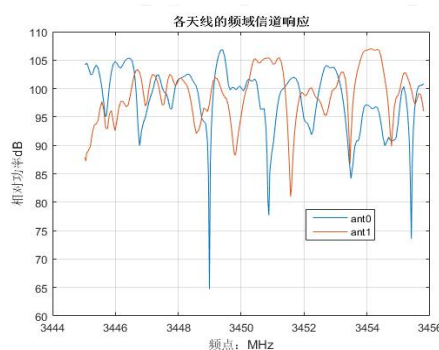


图 2-5 电解分厂频域信道响应

图 2-5 截取了 10MHz 带宽内信道的频域信道响应变化趋势，可以发现不同频率的信号经过多条路径的折射反射后，在接收端叠加

的结果差异巨大，信道增益在不同频点处的差异达到了 40dB。换言之，多载波信号在经过上述信道后，不同频率的信号功率存在明显差异，导致信号包络极不平坦，这对工业网络通信系统的硬件能力和算法设计都提出了更高的要求。

从数字域来看，多径效应的具体表现为在接收端在已经接收到第一条路径上的信号时，还有其他折射反射径上的信号陆续到达，后达径上的第  $n$  个符号和先达径上的第  $n-1$  符号同时被接收，从而产生干扰，因而也叫码间干扰。

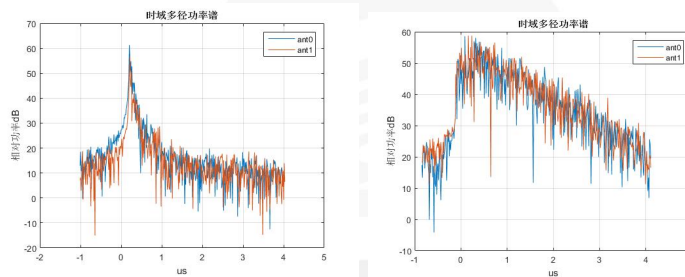


图 2-6 正常街道信号（左）和电解分厂实测信号（右）时域功率谱

图 2-6 展示了正常街道信号和电解分厂实测信号的时域功率谱，即接收到不同路径上信号的时间。从图中可以发现，正常街道信号中有信号的抽头数目较少，持续时间短，说明此时信号都集中在某一小段时间内到达，即只有几条非常接近的路径；而电解分厂信号中抽头非常多且时间跨度很大，信号先后到达的特性非常明显，说明此时信号传播的路径数目很多，后达径和先达径同时接收，会产生码间干扰。

多径时延 (Delay Spread, DS) 通过计算第一条路径和最后一条路径之间的时延差，从数值上量化了上述码间干扰的严重程度。为了减轻码间干扰对接收信号的影响，协议在每两个符号之间都规定了一段间隔时长，称为保护间隔。以最为常见的 100M TDD 系统

为例，保护间隔的持续时间约为 2.6us。只要信道的多径时延小于上述间隔时间，后达径的第 n 个符号就不会对先达径的第 n-1 个符号产生干扰。从图 2-y 中可以发现，正常街道信号的多径时延约为 0.8us，小于保护间隔，不会产生符号间干扰。电解分厂信号的多径时延长达 4.2us，已经远远超过了协议规定的保护间隔，此时将会产生严重的符号间干扰，导致前后符号混叠难以解析。

综上所述，电解分厂是非常典型的 NLOS 信道，其多径时延十分严重，在信号的模拟域上会在不同频率位置带来深度衰落，在数字域上将带来严重的符号间干扰。因此，在设计无线系统时应该采用一定的技术手段规避多径效应的影响，同时设计信号检测算法以应对频率选择性衰落带来的幅值波动，并合理规划系统符号间的间隔时间以避免先后到达符号之间的码间干扰。

### 3. 时变特性

金属铝智能制造电解分厂生产过程管理智能化和生产工序装备智能化的进程中，特别是在自动化设备互联化管理、云端化操控的过程中，必然会深度融合自动化智能设备，如智能循环小车、自主作业机器人等。这些智能设备在运行过程中需要与云端监控平台实时通信，保障无人自主作业的平稳运行，而这些智能设备在作业过程中常常都是非静止的，不可避免地带来多普勒效应，接收信号会发生频率色散从而失真，这也对信号的准确接收带来了挑战。

通常情况下，多普勒效应带来的频率偏移可被建模为

$$\Delta f = f_c \frac{v \cdot \cos \theta}{c}$$

其中， $f_c$  为载波频率， $\theta$  为运动方向与 LOS 径方向的夹角， $v$  和  $c$  分别为运动速度和光速。通过测试发现，这些智能设备的运行速度都不超过 3m/s，由此带来的频偏不过百赫兹量级，相较于载波频率并

不算大。但考虑到无人自主作业设备实时通信的稳定性，为实现工业物联网安全可靠的目标，在设计接收方案时，也应结合实际测试情况进行技术优化，设计高效可靠的频偏补偿方案。

#### 4. 电磁干扰

日常生活环境中处处存在电磁信号，构成了接收电磁波信号中的底噪，这些噪声通常呈现高斯加性特性，且功率不高，不会对有效信号的接收产生干扰，然而金属铝智能制造电解分厂由于工艺流程的特殊性，电解过程会产生非常强烈的电磁场，从 2.1 电解分厂电磁噪声特性分析结果可知，电解分厂中电场不强，约为 0.4-1.5V/m，而磁场极高，最高可达 8200uT，在电解分厂不同点位对接收到的 5G 信号分析发现，该磁场与电磁波信号的物理传播特性并不相同，并不会直接对 5G 信号产生干扰，然而，在测试过程中，极强的磁场仍对金属设备产生作用力，导致金属设备内部出现紊乱，包括但不限于部分手机花屏、黑屏等，在设计定制化网络通信设备时，需要考虑到电磁干扰对通信设备可能产生的影响，各厂区电磁干扰影响结果如表 2-1。

表 2-1 金属铝智能制造工厂各厂区电磁干扰影响

厂区	调研结论	设备影响评估
MEC 数据中心	附近变电站会使机房内工频磁场及其倍频的磁场强度较高，但低于工业场景要求；电场强度低于电信中心要求	在用设备无磁敏感器件，磁场对设备无影响
组装分厂	监测到工频及其倍频信号、中频炉工作频率及其倍频信号；电场强度低于电信中心要求	在用设备无磁敏感器件，磁场对设备无影响
电解分厂（电解槽、漏液检测）	电解分厂磁场强度整体比其他厂区高 1~2 个数量级；在几十 kHz 以上已超出“GB 8702 电磁环境控制限值”安全要求	在用设备无磁敏感器件，磁场对设备无影响；磁场对人体有一定影响，需进行相关防护或避免长时间接触

电解分厂(空气净化系统)	距离电解分厂几十米处仍有较强磁场,超出“GB 8702 电磁环境控制限值”安全要求	
铸造分厂	区域内大功率设备在工频及其倍频处出现骚扰峰,骚扰强度低于工业标准要求	在用设备无磁敏感器件,磁场对设备无影响
机修分厂	区域内大功率设备在工频及其倍频处出现骚扰峰。强度低于铸造分厂	在用设备无磁敏感器件,磁场对设备无影响

## 5. 测试结论

**传播损耗：**电解分厂属于典型的 NLOS 场景，大型设备遮挡带来的阴影效应、金属密闭空间对电磁信号的屏蔽作用、多次折射反射带来的能量损耗，都会对接收信号的能量产生严重的衰减。因此，在规划工业互联无线网络时，需要根据不同工厂的环境布局和设备摆放合理规划不同站点的分布情况；同时在信道建模的过程中，也需要根据实际测量结果，选取合适的损耗因子，以合理可靠地评估当前厂房的信道情况。

**频选特性：**频选特性的主要原因是物理环境多径带来的衰落影响，在模拟域上不同频率的信号呈现差异巨大的信号强度，在数据域上符号间存在严重的码间干扰。因此，在定制工业化网络时，要充分结合厂家的物理环境，减轻多径效应的影响，同时在发送和接收机的设计上也应该采取合适的技术手段，抵消频率选择性衰落带来的信号幅值波动，并选择合适的保护间隔以应对码间干扰。

**时变特性：**随着工业物联网智能化程度的不断深入，无人作业设备将呈爆炸式增长。为保障无人设备与云端控制平台之间通信的可靠稳定，并充分发挥 5G 通信低时延、广连接的技术优势，在设计工业通信网络的过程中，应充分考虑不同场景下无人作业



设备的速度差异和不同频段的电磁信号特性，建立准确的信道模型，并设计差异化的频偏补偿方案。

电磁干扰：经过前期测试发现，电解分厂存在高达 8200uT 的强磁场，虽然不会对 5G 信号产生明显的信号干扰，但是会影响金属设备内部的电子运动规律，导致部分金属设备失灵。因此，在定制工业互联网络设备的过程中，要充分考虑强磁场对金属设备的影响，进行必要的电磁防护，以保障网络设备长久可靠运行。

### 三、工业无线通讯解决方案建议

#### （一）金属铝智能制造电解槽车间无线解决方案建议

有色冶金厂房内环境复杂，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。针对有色冶金厂房内的以上特点，给出一些解决方案和方向上的建议，以供进一步网络规划作为参考。

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，其是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，带入对应的传播模型计算出满足终端业务需求的站点覆盖距离。

相比其他常规公网的链路预算，有色冶金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室内传播模型 LOS 和 NLOS，如前所述，有色金属制造厂房一般采用的是 NLOS 模型，

根据厂房的大小和环境不同，模型也分为 InF-SL、InF-DL、InF-SH、InF-DH 四种。InF-SL 和 InF-SH 用于室内建筑稀疏，InF-DL 和 InF-DH 用于室内建筑密集，L 表示站点和终端的高度都低于室内物体高度，H 表示站点或终端的高度高于室内物体高度。

由于厂房的高温、多尘等恶劣条件，不适合吸顶式全向天线型的室分设备，多采用定向天线型设备。常见的设备有大 MIMO 设备，如 64TR/32TR 设备，也有小 MIMO 设备，如 8TR/4TR 设备，大 MIMO 设备因其大的天线阵列，分集增益大，覆盖能力强，容量大，但在密闭的厂房内多小区间也会形成邻区干扰。小 MIMO 设备天线少，覆盖能力弱，容量小，但可采用多个组成超级小区减小小区间干扰。

为了满足厂房内的业务覆盖要求，在站点规划时，要选择合适的安装点位，充分利用基站设备的方向性，增加 LOS 场景，减少 NLOS 场景。可选择将设备安装在厂房四周横梁上，同时为了增加基站和 CPE 的直射，可将 CPE 拉远或外接定向天线。

## （二）有色金属智能制造常见问题解决方案建议

### 1. 频谱规划与选择

中国移动目前拥有的频谱有 700MHz /900M Hz /1.8GHz / 1.9GHz / 2.6G Hz / 4.9G Hz。每个频段定位如下：700MHz 为广电和移动共建共享，用于 VoNR 连续覆盖、兼顾部分浅层深度覆盖、低时延业务。900M Hz 定位为语音，长期打底覆盖，针对不同场景使用不同方案兼顾 GSM、NB 和 LTE 需求。F1/F2 频段为 LTE 基础覆盖频段，F3 频段用于容量补充，A 频段用于 LTE 补忙补热。E 频段用于 LTE 室内覆盖。2.6GHz 主要用于 5G 覆盖，其后 60M 为 LTE 容量和覆盖主力层。4.9GHz 用于 5G 热点区域容量补充使用、解决室内外同频干扰以及行业应用。

中国电信可用频段有：800MHz/ 1.8GHz/ 2.1GHz/ 3.5GHz。800MHz 作为 CDMA 和 LTE 的广覆盖使用，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，目前电信正在重耕 2.1GHz 频段做 5G 的广覆盖和室内覆盖。3.5GHz 频段为 3.4G-3.5GHz，为 5G 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 主力频段，2.1GHz 是 UMTS 主力频段，个别城市开通 2.1GHz LTE，3.5GHz 为 3.5G-3.6GHz，用于 5G 覆盖。

有色冶金园区的无线频段选择，跟各运营商使用的主流 5G 频段基本保持一致，中国移动为 2.6GHz，电信联通为 3.5GHz。针对钢企的生产业务场景，由于对可靠性和网络性能要求较高，中国移动项目可以推荐以 4.9GHz 为主（100MHz 带宽），2.6GHz 为辅；电信联通项目可以考虑在 3.5GHz 上网络共享开启 200MHz 频宽，甚至借用 3.3G~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 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 条件。

## 2. 有色冶金专网可靠性保障及容灾方案

不同行业对 5G 网络的可用性等级需求不一样，如下是列出典型的应用场景对网络的可用性等级需求，可以看出冶金生产行业对 5G 专网的可用度等级是 5 个 9 的需求，具体要求如下表 3-1 所示。

表 3-1 冶金行业 5G 专网可用度

等级/ 指标	网络可用度(%)	典型应用场景
SLA 1	$99.9 > A \geq 99$	一般应用于个人设备
SLA 2	$99.99 > A \geq 99.9$	一般在警务专网、平安城市等场景，视频

		监控、维护信息采集等业务场景
SLA 3	$99.999 > A \geq 99.99$	一般在影响生产效率场景，如港口 PLC 控制等场景
SLA 4	$99.9999 > A \geq 99.999$	一般在安全强相关场景，如智能列控（高铁、轨交）、钢铁生产控制等场景
SLA 5	$A \geq 99.9999$	更高要求的场景

造成在有色冶金行业里面 5G 专网不可靠因素：设备软硬件故障、设备间链路故障、用户误操作、网络拥塞等，而“故障”是影响网络可靠性主要因素，对设备和链路的冗余备份提出比较高的要求；图 3-1 是专网端到端容易影响网络可靠性说明。

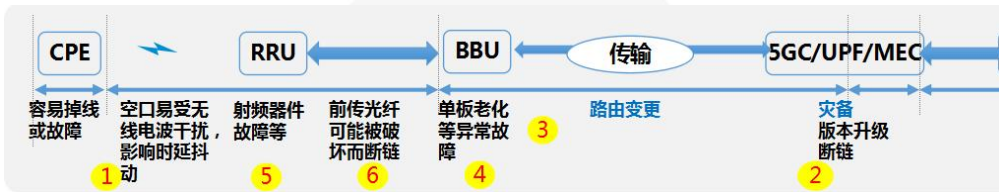


图 3-1 专网端到端网络可靠性

针对各网元节点，对其影响可靠性的因素，设计高可用的组网方案如图 3-2。

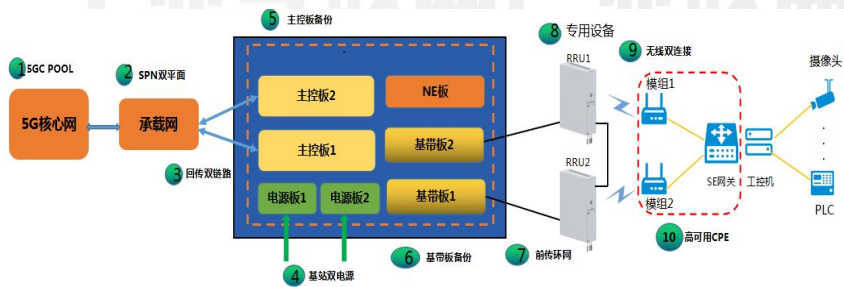


图 3-2 5G 专网高可靠性组网方案

高可靠专网组网方案有如下优势。

- 1) 设备的高可靠设计：满足有色冶金行业特殊环境适应性的

硬件设备冗余备份：通过设备的备份提升网络可用性，电源板备份、主控板备份、基带板备份，无线链路双发选收等，当某模块出现故障可快速自动切换到备用模块，保障网络的正常运行。

2) 链路备份：前传环网、双上联，回传双链路，改善传输链路可靠性。

3) 对于 5GC 下沉园区，网断业不断，惯性运行：通过 UPF 下沉或者部署算力 NE 单板；实现业务惯性运行，关键是核心网会话不能间断。

4) 通过承载的双平面、承载环网实现传输链路的可靠性。

5) 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方案，满足垂直行业 5 个 9 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进行分级，传输过程中，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。

优先级保障机制，是根据不同业务类型根据制造过程的不同需求，对相关业务类型的业务优先级进行划分，根据优先级的不同顺序，对不同业务提供不同保障机制。

在有色金属智能制造过程中，涉及到大量不同类型的工序，对工业无线提出不同类型的要求，需要根据不同种类的业务类型，灵活选择无线网络调度方法及优先级。

对于时延要求高的业务类型，识别用户优先级进行保障，保障目标业务在获得足够的调度资源，保障相关有色金属智能制造中的

关键业务满足生产需要，如小业务量机器控制指令，要求及时准确传递至生产设备时，可采用高优先级进行业务保障。

对于业务数据量高的业务类型，在保障传输时延要求的同时，使用对应优先级进行调度保障，保障核心业务满足制造过程中各类型流程要求，例如各类生产过程记录保存信息，无须实时传递的可采用低优先级进行业务保障。

### （三）小结

综上所述，本文从有色金属智能制造车间通信信道的特征分析出发，给出建网建议，厂房内一般存在大量的金属结构件和大型建筑设备，无线环境较为复杂，针对这类场景推荐使用 NLOS 模型，并根据厂房内情况有针对性选择不同的子模型进行网络规划，并同时考虑 CPE 等终端的安装条件和位置；在频段选择方面，需要考虑项目合作运营商的频谱、专网容量和速率、与公网干扰协调等问题；在网络设备组网和选择方面，针对复杂无线场景，可以考虑同时使用多层级网络可靠性保障容灾方案，以提高网络的可用性；在网络开通阶段，考虑为一些容易受到网络干扰的业务进行单独网络优化；电磁环境强磁场干扰也需要重点关注，虽然强磁场不会直接对 5G 信号产生干扰，然而强磁场会导致金属设备内部出现业务紊乱，对其加工过程必须进行必要的电磁防护。

后续可以考虑将无线信道相关电磁信号模型导入相关设备仪表进行大量验证测试，达到控制仪表和设备智能化应用，同时希望有色金属行业场景的电磁环境分析方法可以供其他工业领域参考使用，在各工业领域电磁环境分析完成的基础上形成各行业电磁环境分析模板，进而形成统一的开放性模板平台，并不断优化改进，对各工业场景通讯设备的稳定可靠运行也有很好的借鉴意义。

## 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)

## 五、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