



团 体 标 准

T/CES XXX—XXXX

电力隧道无线传感网络及通信设备配置 技术规范

Technical specification for configuration of wireless sensor networks
and communication equipment in power tunnels

(征求意见稿)

XXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目次

前 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本构成 2

 4.1 无线传感网络基本架构 2

 4.2 传感器节点组成 2

5 通用要求 2

 5.1 被监测量 2

 5.2 传感器类型 3

 5.3 通信装置 3

 5.4 部署方式 3

 5.5 组网方式 6

 5.6 安装方式 6

6 技术要求 7

 6.1 设计要求 7

 6.2 功能要求 9

7 电气特性基本要求 9

 7.1 无线电骚扰限值 9

 7.2 射频电磁场辐射抗扰度 9

 7.3 工频磁场抗扰度 9

 7.4 脉冲磁场抗扰度 9

 7.5 静电放电抗扰度 9

 7.6 射频场感应的传导骚扰抗扰度 9

 7.7 对运行设备的电气特性影响 10

8 试验方法 10

 8.1 试验基本条件 10

 8.2 安全试验 10

 8.3 电磁兼容性试验 10

8.4 环境试验..... 11

8.5 外壳防护等级试验..... 11

9 检验规则..... 12

9.1 检验规则..... 12

9.2 型式试验..... 12

9.3 出厂试验..... 12

9.4 到货检验试验..... 12

9.5 现场试验..... 12

9.6 特殊试验..... 13

10 调试和验收..... 13

11 标志、包装、运输与贮存..... 13

11.1 标志..... 13

11.2 包装..... 13

11.3 运输..... 13

11.4 贮存..... 14

附录 A（资料性附录）隧道直线、弯道及竖井三种结构下的无线通信实测..... 15

A.1 隧道直线、弯道及竖井三种结构..... 15

A.2 隧道直线区段通信测试..... 15

A.2 隧道弯道区段与多层竖井通信测试..... 16

附录 B（资料性附录）无线传感网络自组网结构..... 17

B.1 平面结构..... 17

B.2 分级结构..... 17

参 考 文 献..... 18

前 言

本标准依据 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国电工技术学会提出。

本标准起草单位：国网上海市电力公司电缆分公司、华东电力试验研究院、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中国电力科学研究院、国网上海市电力公司电力科学研究院、华东交通大学、云南电网有限责任公司电力科学研究院、中光华研电子科技有限公司。

本标准主要起草人：李伟、周韞捷、司文荣、李海、蒋晓娟、吴辰斌、杨天宇、仝杰、屈志坚、李红亮、楼铁城、项恩新、裴蕴智、张明皓、李荡。

本标准首次发布。

电力隧道无线传感网络及通信设备配置技术规范

1 范围

本标准规定了无线传感网络与通信设备的术语和定义、基本构成、通用要求、技术要求、电气特性基本要求、试验方法、检验规则。

本标准适用于电力隧道内部多参量综合监测用无线传感设备、通信设备的选择、设计、性能测试、部署与验收。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的，凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件，凡是不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 191 包装储运图示标志

GB/T 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分 试验方法 试验 A：低温

GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分 试验方法 试验 B：高温

GB/T 2423.22 环境试验 第2部分：试验方法 试验 N：温度变化

GB/T 4208 外壳防护等级(IP 代码)

GB 4943.1—2011 信息技术设备 安全 第1部分：通用要求

GB/T 9254 信息技术设备的无线电骚扰限值和测量方法

GB/T 17618 信息技术设备抗扰度限值和测量方法

GB/T 17626.1 电磁兼容 试验和测量技术 抗扰度试验总论

GB/T 30269.2—2013 信息技术 传感器网络 第2部分：术语

GB/T 30269.901—2016 信息技术 传感器网络 第901部分：网关：通用技术要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

传感器节点 sensor node

在传感器网络中，能够进行采集，并具有数据处理、组网和的控制管理功能单元。

3.2

网关 gateway

连接由传感器网络节点组成的区域网络和其它网络的设备，具有协议转换和数据交换的功能。

3.3

无线传感网络 wireless sensor network

利用传感器网络节点及其他网络基础设施，通过无线连接方式对物理世界进行信息采集并对采集的信息进行传输和处理，为用户提供服务的网络化信息系统。

3.4

无线通信 wireless communication

多个节点间不经由导体或缆线传播进行的远距离传输通讯。

3.5

自组织网 self-organizing network
没有固定的路由器，网络中的节点可随意移动并能以任意方式相互通信。

4 基本构成

4.1 无线传感网络基本架构

无线传感网络有传感器节点与网关组成,传感器节点采集的数据通过网关与基站通信发送至服务器,并在监控平台显示。

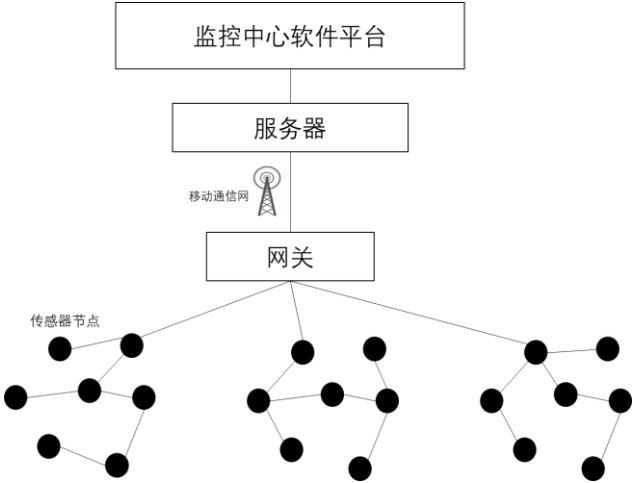


图 1 无线传感网络

4.2 传感器节点组成

传感器节点由传感器模块、无线自组网通信模块、CPU、电源模块、天线、外围电路、外壳及其它连接配件组成。

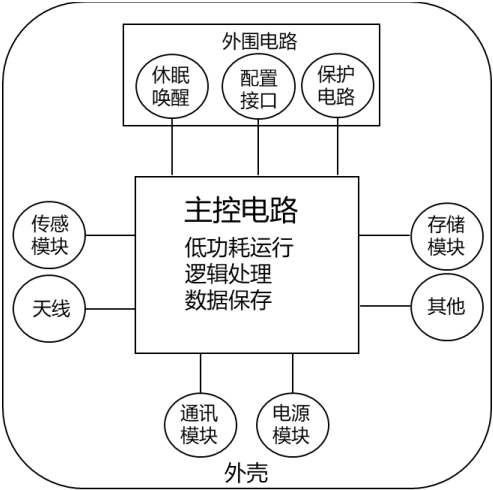


图 2 传感器节点组成框架示意图

5 通用要求

5.1 被监测量

5.1.1 环境参量

被监测的环境参量包括：

- a) 环境温湿度；
- b) 易燃气体；
- c) 有害气体；
- d) 液位；
- e) 烟雾。

5.1.2 电气参量

被监测的电气参量包括：

- a) 电缆表面温度；
- b) 电缆接头局放；
- c) 接地环流。

5.2 传感器类型

主要传感器类型包括：

- a) 温湿度传感器（隧道内环境监测）；
- b) 气体传感器（包含 CO₂、CO、NO、CH₄ 等有害易燃气体）；
- c) 液位传感器；
- d) 烟感探测传感器；
- e) 温度传感器（用于设备本体监测）；
- f) 局放传感器；
- g) 电流传感器。

5.3 通信装置

5.3.1 无线自组网通信模块

通信模块应具有传感设备相互间自行组网功能，低功耗，上下行速率根据实际需要确定。单网节点接入量应达到 500 个，网络通信时延应低于 1s。

5.3.2 无线通信网关

网关应支持 4G、5G 等主流通讯方式，支持电力专网，具有信息安全加密功能，应满足国网加密要求，满足单网节点接入量 500 个的通讯需求。

5.4 部署方式

5.4.1 依据被监测量及隧道内部设施，选择设备最佳安装位置。针对隧道直线与弯道及竖井三种情况（参见附录 A），为保证无线通信的稳定性，传感器与通信网关安装的位置不同。

5.4.2 在传感设备与通信设备部署前，应对电缆隧道内部的无线通信状况进行测试，三种情况的测试方法如下，：

- a) 直线情况：

以每 10m 为间隔，不断增加两传感设备的间距，直至间距为 100m，每次测试 20min，丢包率均应 < 10%；

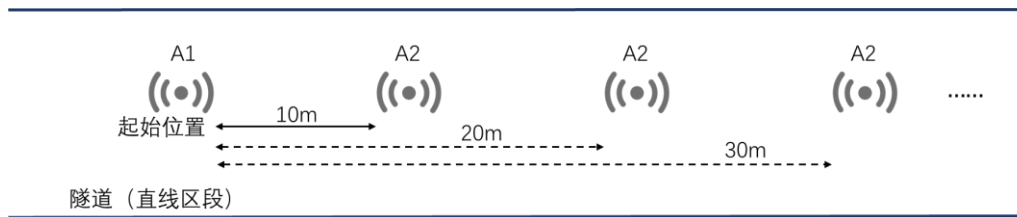


图 3 隧道直线区段通信测试方法

- b) 弯道情况:
- 以每 5m 为间隔, 不断增加两传感器设备间的距离, 直至弯道可视距离或 20m, 每次测试 20min, 丢包率均应 < 10%;

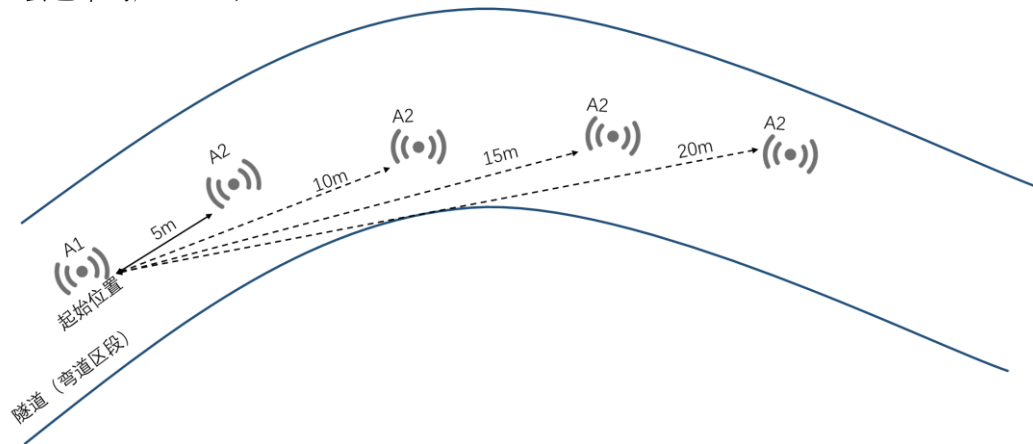


图 4 隧道弯道区段通信测试方法

- c) 竖井情况:
- 在井口附近布置一个固定的传感设备作为中继节点, 分别在井上与井下进行距离测试, 以每 2m 为间隔增加井上、井下两传感设备与井口设备的距离, 测试通信情况, 直至井上、井下传感器与井口传感器距离均为 10m, 每次测试 20min, 丢包率 < 10% 的位置为较佳的安装距离。

5.4.3 根据自组网内部通信连接距离, 确定最优安装位置。

- a) 直线情况:
- 直线区段的长度小于 100m, 在直线区段内根据监测需要布设传感设备的间距。

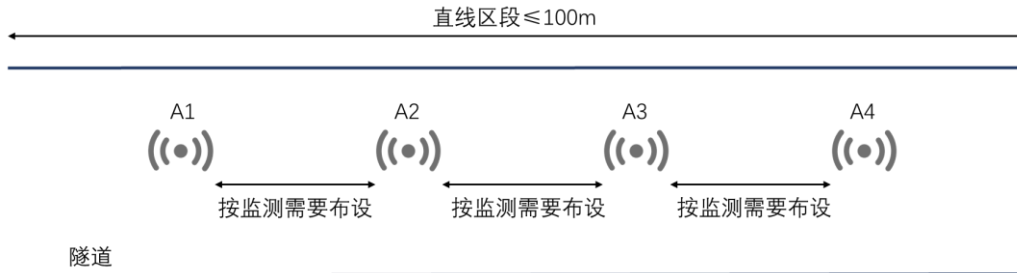
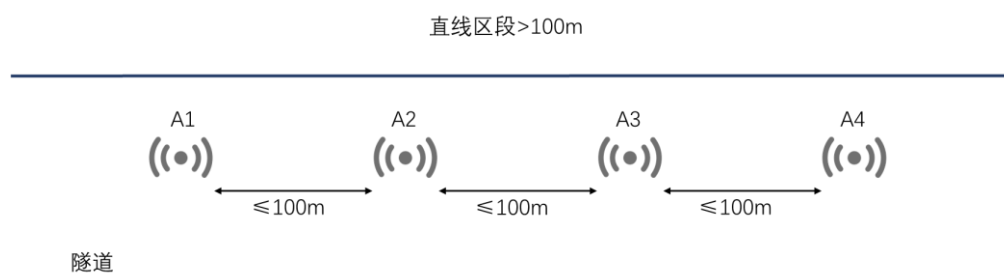


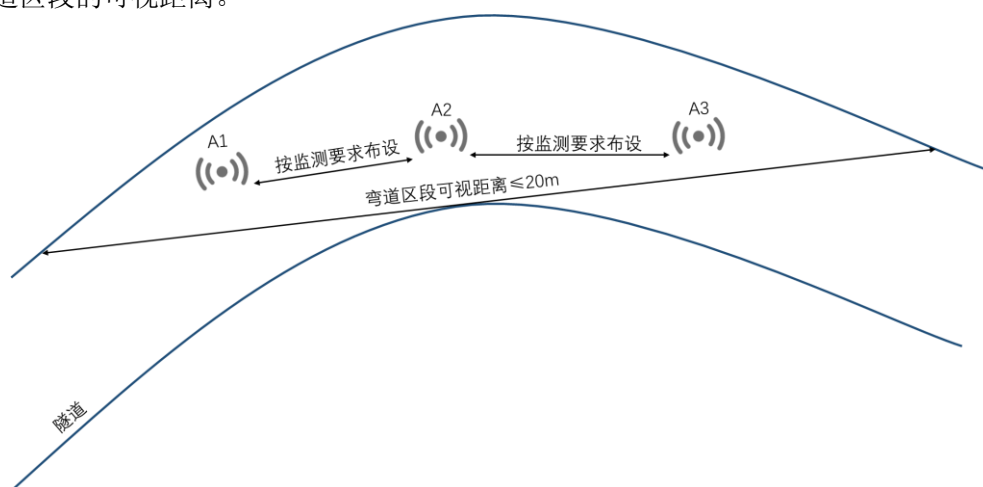
图 5 隧道直线区段 ≤ 100m 时的传感设备布设间距

- 直线区段的长度大于 100m, 在直线区段内两传感设备的间距不应大于 100m。

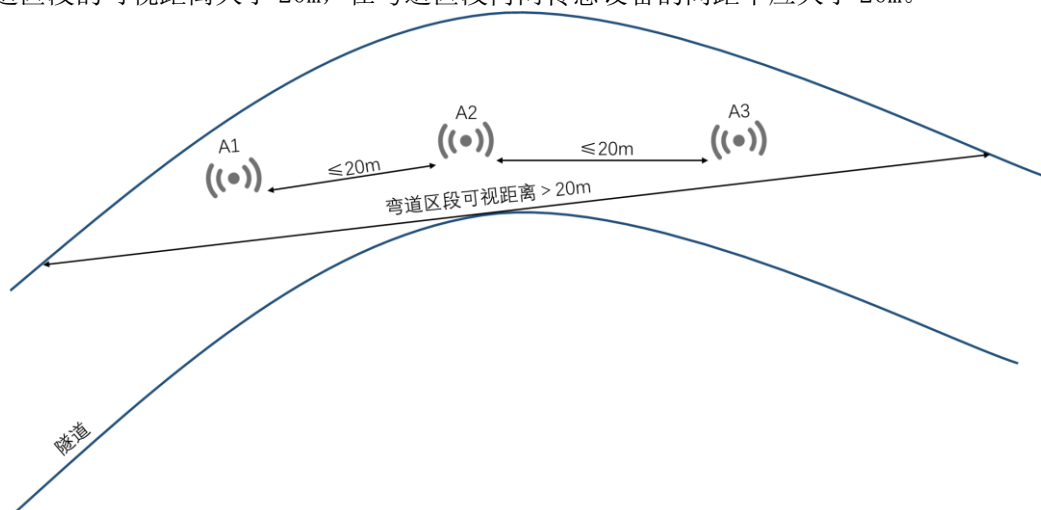
图6 隧道直线区段 $>100\text{m}$ 时的传感设备布设间距

b) 弯道情况

——弯道区段的可视距离小于 20m ，在弯道区段内可根据监测需要布设传感设备，两传感设备的间距不应大于弯道区段的可视距离。

图7 隧道弯道区段可视距离 $\leq 20\text{m}$ 时的传感设备布设间距

——弯道区段的可视距离大于 20m ，在弯道区段内两传感设备的间距不应大于 20m 。

图8 隧道弯道区段可视距离 $>20\text{m}$ 时的传感设备布设间距

c) 竖井情况

混凝土层对无线电波的遮挡较为严重，为保障无线传感网络通信的稳定性，每层竖井的井口均应至少安装1个传感或通信节点。为保证无线传输的稳定性，每层井口处的传感节点与对应隧道内相邻传感节点的间距不应大于 10m 。竖井分为两种情况，一种是相连竖井，即竖井上下层井口在一条竖直线上；另一种是交错竖井，即竖井上下层井口在一条斜线上，非竖直线上。

相连竖井情况下，上下井口间距大于 10m 时应测试两井口处传感设备间的无线通信稳定情况，若测试 20min 内的丢包率大于 10% ，应在上下井口处增设通信节点。

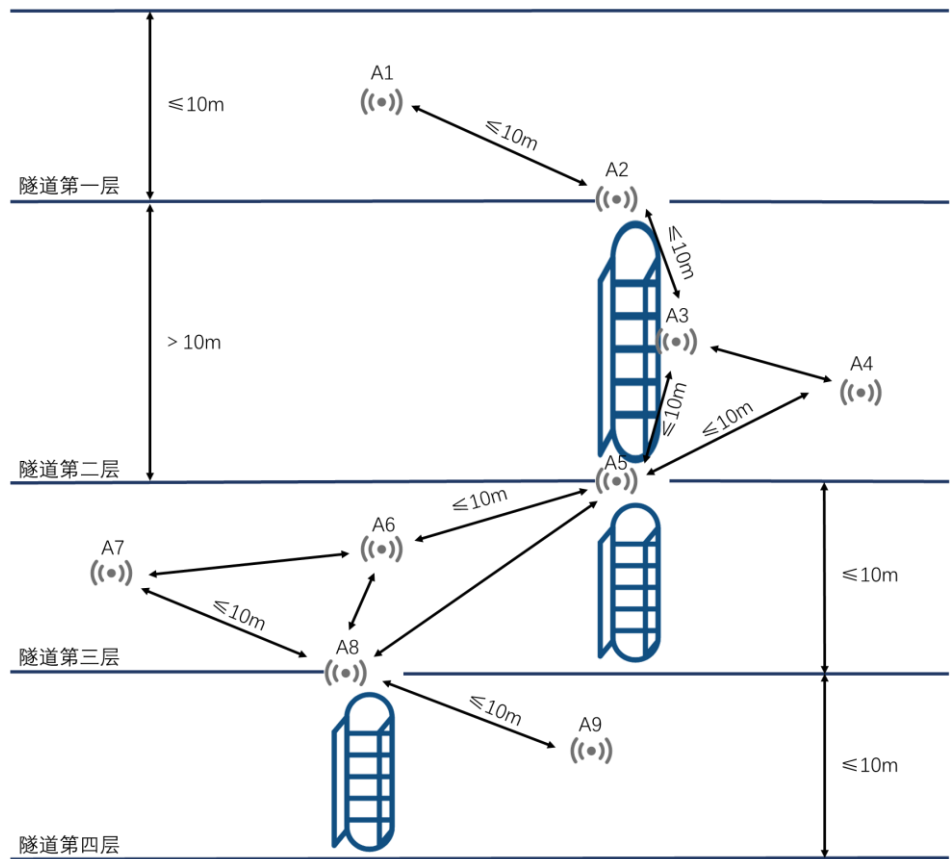


图 9 隧道竖井情况下的传感设备布设间距

5.5 组网方式

无线传感网络为自组网方式（参见附录B），网络拓扑结构应为去中心化的网状网，传感设备上电后，自行搜索附近信号并选择信号最强的设备进行连接，且无中心节点，各节点之间均能进行相互通信，无线传感网络拓扑结构如下图10所示。最终，各传感节点的数据统一汇聚至网关，传感数据由网关通过电力专网或经过加密后通过公网统一发送至监控平台。

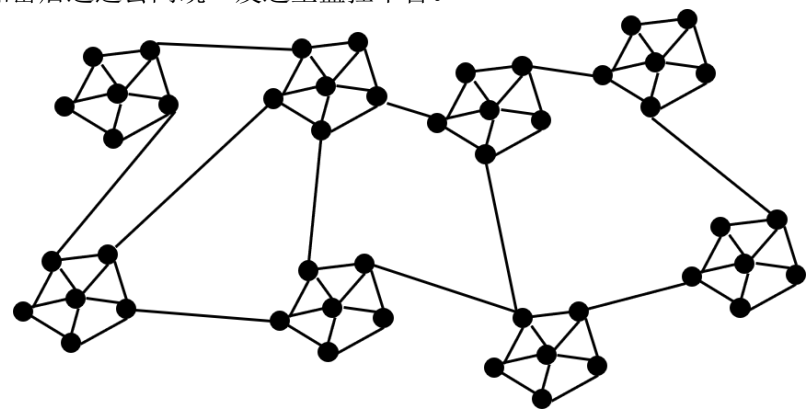


图10 无中心节点的无线传感网络拓扑结构

5.6 安装方式

5.6.1 粘贴

在较平整且较低位置处，传感器应根据监测需要采用胶粘、磁吸、螺栓等方式固定安装。

5.6.2 捆扎

附近有柱形固定点时，应采用U型卡或扎带绑扎的方式进行安装。

5.6.3 支架

在较高或较低位置处，但无固定点时，应先安装固定支架，再安装传感器与通信网关。若为金属支架，安装时应保证支架与检修电源箱等电气设施保持间距1m以上。

6 技术要求

6.1 设计要求

6.1.1 硬件设计要求

6.1.1.1 在传感器终端及通信设备设计时,应结合电缆隧道实际应用环境进行设计,应满足隧道使用的特殊要求,进行易安装维护、可靠性、绝缘性、电磁兼容性、安全性等设计。

6.1.1.2 组成传感器的各模块和器件应满足低功耗的设计要求。工作模式下的功耗mW级，休眠模式下的功耗 μ W级。

6.1.1.3 传感器尺寸应尽可能小，各传感器集成通信、电源等模块，应根据监测需要缩减尺寸，往集成化、小型化、低功耗、智能化的方向设计，便于集成与安装。

6.1.1.4 各传感器节点均需将传感与通信一体化集成,在满足各参量数据采集的同时,应具有数据无线传输的能力。

6.1.1.5 供能

传感设备可采用电池供电的方式，电池应满足GB 8897.4中的工业用电池相关要求，电池使用寿命应达3~5年，在低温环境下应具有较低的放电率，年自放电率应 $\leq 1\%$ ，在隧道复杂环境下长期稳定工作。网关设备可就近由检修电源箱供电，电源接线应符合检修电源箱使用规范。

6.1.1.6 无线通信工作频率

应支持中心频率900MHz、2.4GHz等主流通信频段，符合国家无线电频率划分规定。

6.1.1.7 无线通信距离

隧道内部的无线通信距离要求:

- a) 直线情况下, 两节点间能够达到的最远通信距离不应低于100m;

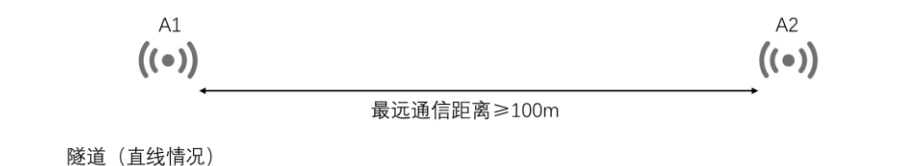


图11 隧道直线情况下无线通信设备两节点间的最远通信距离要求

- b) 在视距大于20m的弯道情况下,两节点间能够达到的最远通信距离不应低于20m。

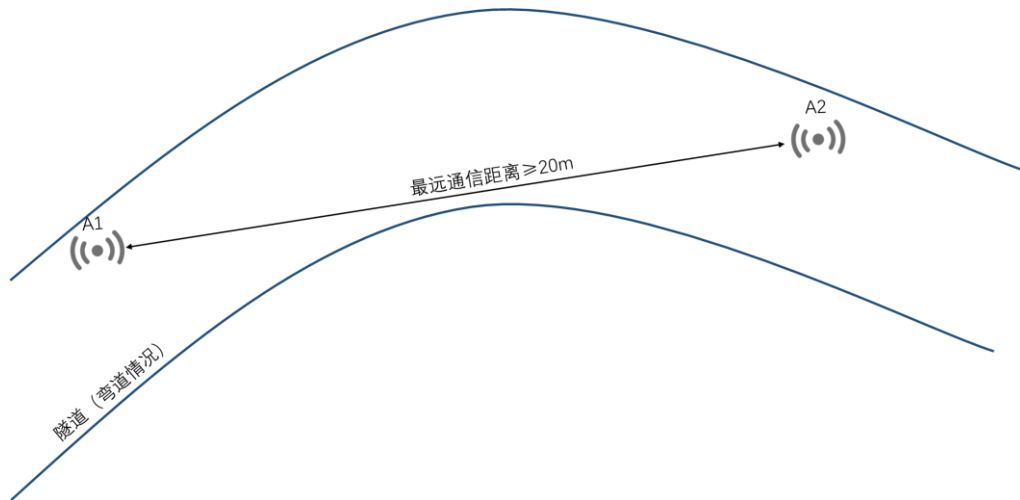


图12 隧道弯道情况下无线通信设备两节点间的最远通信距离要求

c) 竖井处上下井口两节点间最远通信距离不应低于10m;

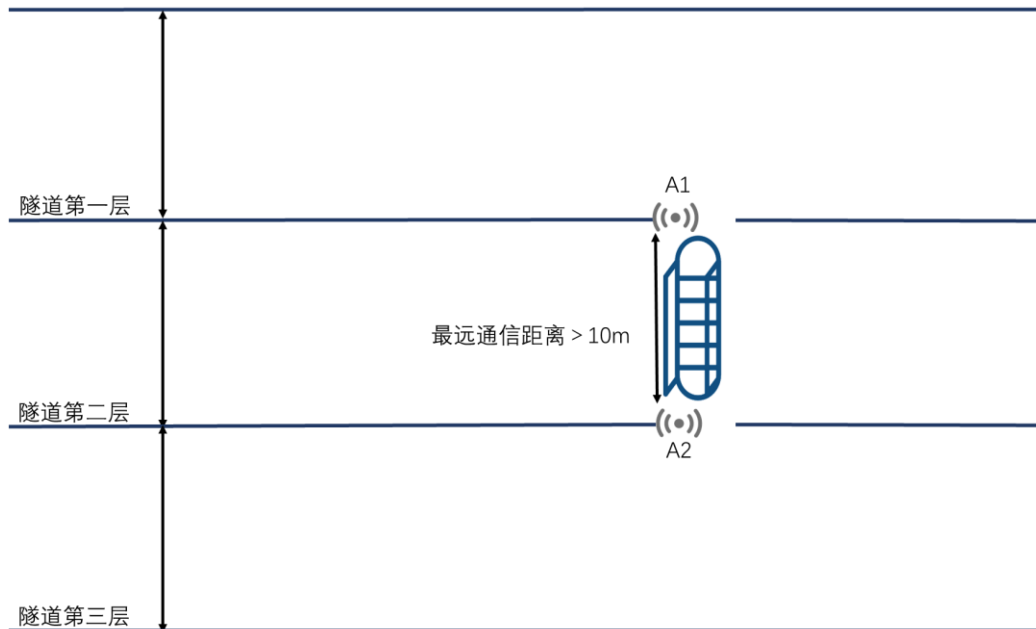


图13 隧道竖井情况下无线通信设备两节点间的最远通信距离要求

利用5.4.1的方法检测传感设备、通信设备的无线通信距离，检测结果须满足上述通信距离要求。

6.1.1.8 可扩展性

无线通信模块具有RS485、RS232等主流通信接口接入功能，能够与已有的现场有线通信设备集成。

6.1.2 外壳和结构设计要求

6.1.2.1 防水等级

隧道内部环境阴暗潮湿，在传感器与通信设备设计时，应考虑防水，电路板刷三防漆保护，闭合处应加装密封圈，以满足隧道使用要求，防水等级应达到IP68，部分特殊功能传感器可放宽为IP67（如气体传感器），在潮湿环境下长期稳定工作。

6.1.2.2 易安装

传感器与通信设备终端的外壳应充分考虑安装部署位置及安装方式，遵循安装方便快捷、易维护的原则。

6.1.2.3 绝缘性（

传感设备、网关等外壳应为绝缘材料，具备良好的绝缘性。

6.1.2.4 防腐蚀

设备外壳应涂覆耐腐蚀涂料，需具有较高的防腐蚀性能。

6.2 功能要求

6.2.1 网关

6.2.1.1 通信接口

向上应满足电力专用网络或移动通信网络接入要求，向下应支持无线传感器接入。配置扩展接口，满足本地其它传感设备的接入需求，至少支持RS485、USB接口。

6.2.1.2 接口适配

将各种外部接口转换为网关内部可识别的接口形式。

6.2.1.3 设备管理

通过本地或远程的方式管理维护网关设备自身的软硬件。同时，可通过网关对网关所连接的传感终端进行配置和更改。

6.2.1.4 安全

对网关设备应进行软、硬件加密处理，对传感数据上传及指令下发具有数据加密功能。

6.2.2 传感网络

6.2.2.1 传感器终端本身应具有路由功能，可对外进行广播和信号搜索。

6.2.2.2 传感器应具有自组网功能，可通过自身的通信模块自行组建传感网络，任意传感节点都可以与其他任意传感节点和任意网关进行组网通信。

6.2.2.3 传感器应具有自选择能力，可通过信号强度比较选择连接稳定性高、信号强的设备。

6.2.2.4 无线传感网络应具有自愈能力，在节点损坏后，自行识别、判断、重新加入传感网络，构建新的网络拓扑结构。

7 电气特性基本要求

7.1 无线电骚扰限值

应符合GB 9254中的B级限值要求。

7.2 射频电磁场辐射抗扰度

除工作频带以外，在一般工作环境下应能承受试验场强10V/m的射频辐射电磁场的骚扰而不发生死机、错误动作及数据丢失。

7.3 工频磁场抗扰度

传感设备应能承受频率为50Hz、磁场强度为400A/m的工频磁场影响而不发生故障，并能正常工作。

7.4 脉冲磁场抗扰度

传感设备应能承受脉冲磁场强度为1000A/m的5次正极性脉冲和5次负极性脉冲的影响而不发生死机、错误动作及数据丢失。

7.5 静电放电抗扰度

传感设备应能承受施加电压为8kV的加在传感设备外壳和人员操作部分上的直接静电放电以及邻近设备的间接静电放电而不发生死机、错误动作及数据丢失。

7.6 射频场感应的传导骚扰抗扰度

传感设备应能承受频率范围在150kHz~80MHz、试验电压为10V的射频场感应的传导骚扰而不发生故障，并能正常工作。

7.7 对运行设备的电气特性影响

7.7.1 高压及以上环境

对于直接带电安装在高压及以上环境下的传感设备应满足以下条件：

a) 外形

对于带电安装的传感设备安装后应不成为周围带电体的制高点，或者应安装均压环以保证高压电场不形成新的极点，并且不能破坏原设备的绝缘性能。

b) 外壳

对于安装在带电体上的传感设备应采用金属导电材料屏蔽，并直接接触高压带电体形成等电位安装，以保护内部电子产品不受高压电场的破坏。

7.7.2 中、低压环境

对于直接带电安装在中、低压环境下的传感设备安装后不应破坏原设备的绝缘性能。

8 试验方法

8.1 试验基本条件

8.1.1 试验环境条件

在本标准中，试验应在以下气候环境进行：

a) 环境温度：+15℃~+35℃；

b) 相对湿度：45%~75%；

c) 大气压力：86kPa~106kPa；

注：静电放电抗扰度试验应在相对湿度30%~60%的环境条件下试验。

8.2 安全试验

按GB 4943.1的有关规定进行。

8.3 电磁兼容性试验

试验前，确保设备在正常工作状态。

8.3.1 无线电骚扰限值试验

应参照GB 9254中的测试方法进行试验，并满足其限值要求。

8.3.2 射频电磁场辐射抗扰度试验

应参照GB/T 17626.3,在一般试验等级条件下进行，条件如下：

a) 严酷等级：3级；

b) 频率范围：80MHz~1000MHz；

c) 正弦波：1kHz，80%幅度调制；

d) 施加部位：整机；

e) 试验场强：10V/m（非调制）。

8.3.3 工频磁场抗扰度试验

8.3.3.1 应参照GB/T 17626.8，将传感器设置于与频率为50Hz的随时间正弦变化的、强度为400A/m的稳

定磁场的线圈中心，传感设备能够正常工作。

8.3.3.2 传感设备在整个试验期间显示出其抗扰度，传感设备的功能和性能均正常，且试验后传感设备能正常工作，则表明试验合格。

8.3.4 脉冲磁场抗扰度试验

8.3.4.1 应参照GB/T 17626.9，并在下述条件下进行：

- a) 严酷等级：5级；
- b) 磁场强度：1000A/m；
- c) 试验发生器与感应线圈距离：不超过3m。

8.3.4.2 传感设备在整个试验期间显示出其抗扰度，传感设备的功能和性能均正常，且试验后传感设备能正常工作，则表明试验合格。

8.3.5 静电放电抗扰度试验

8.3.5.1 应参照GB/T 17626.2，并在下述条件下进行：

- a) 严酷等级：4级；
- b) 试验电压：8kV；
- c) 直接放电：于传感设备外壳接触直接放电；
- d) 放电次数：正负极各5次，每次放电时间5s，间隔1s。

8.3.5.2 对于金属材料外壳的传感设备，采用接触式放电；对于绝缘材料外壳的传感设备，采用空气放电，试验电压8kV。

8.3.5.3 传感设备在整个试验期间显示出其抗扰度，传感设备的功能和性能均正常，且试验后传感设备能正常工作，则表明试验合格。

8.3.6 对运行设备的电气特性影响试验

用高压发生器对传感设备施加电压，逐步升高电压值，直到传感设备按绝缘耐压水平分类的最高电压等级。若在试验过程中，用紫外成像仪观测到传感设备上未产生电晕，则表明试验合格。

8.4 环境试验

8.4.1 温度试验

8.4.1.1 工作温度下限试验

按照GB/T2423.1-2008中“试验Ab：非散热试验样品稳定渐变的低温试验”的要求进行试验，试验中，取低温试验温度为 $-10\pm 3^{\circ}\text{C}$ ，试验持续时间为2h。在试验前、试验期间和试验结束后，传感设备应能正常工作。

8.4.1.2 工作温度上限试验

按照GB/T2423.2-2008中“试验Ab：非散热试验样品稳定渐变的高温试验”的要求进行试验，试验中，取高温试验温度为 40°C ，试验持续时间为2h。在试验前、试验期间和试验结束后，传感设备应能正常工作。

8.4.1.3 工作温度下的恒定湿热试验

按照GB/T2423.3-2016中的要求进行试验，试验温度为 $40\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 $93\pm 3\%$ 的环境下保持96h。在试验前、试验期间和试验结束后，传感设备应能正常工作。

8.5 外壳防护等级试验

按照GB 4208中的测试方法进行。

9 检验规则

9.1 检验规则

设备检验分为型式试验、出厂试验、到货检验试验、现场试验和特殊试验5类。型式试验、出厂试验、到货检验试验、现场试验的试验项目按表1的规定进行。特殊试验根据应用需求，经双方协商需要增补的试验项目。

表1 试验项目

序号	检验项目	技术要求	型式试验	出厂试验	到货检验试验	现场试验
1	通信距离试验	6.1.1.6	○	●	*	●
2	外观和结构检查	6.1.2	●	●	●	●
3	功能检查	6.2	●	●	●	●
4	电磁兼容性能试验	7.1	●	○	*	○
5	环境适应性试验	8.4	●	○	*	○
注：●表示规定应做的项目；○表示规定可不做的项目；*表示根据要求选做的项目。						

9.2 型式试验

型式试验应该由制造厂商将设备送交具有国家级或者省级检测资质的检测单位，由检测单位依据本标准规定进行检验，检验项目按表1中规定的检验项目逐个进行，并出具型式检验报告。有以下情况之一时，应进行型式试验：

- a) 新产品定型；
- b) 正式投产后，如设计、工艺材料、元器件有较大改变，可能影响产品性能时；
- c) 产品停产一年以上又重新恢复生产时；
- d) 出厂试验结果与型式试验有较大差异时；
- e) 国家技术监督机构或受其委托的技术检验部门提出型式试验要求时；
- f) 合同规定进行型式试验时；
- g) 必要时，设备使用单位可提出要求。

9.3 出厂试验

每套设备出厂前在正常试验条件下逐个按规定进行例行检验，检验合格后，附有合格证，方可允许出厂。

9.4 到货检验试验

入网检测是对指挂网运行的设备进行检验试验，由制造厂商送交具有国家级或者省级检测资质的检测单位进行检验。试验合格后，方可入网运行。

9.5 现场试验

现场试验由设备使用单位或具有资质的检测单位对设备性能进行测试。

9.6 特殊试验

根据应用需求，经双方协商需要增补的试验项目。

10 调试和验收

调试和验收主要工作包括：

- a) 按照无线传感设备、通信设备的使用说明书和相应的国家标准、行业标准的规定及实际应用的需求进行调试与验收；
- b) 调试主要针对无线传感设备、通信设备及其功能实现，具体调试内容为：无线传感设备可进行正常的数据采集与无线传输，能够实现无线自组网，并通过网关上传数据。
- c) 验收资料应包括完备的设备使用说明书、型式试验报告、出厂试验报告、现场试验报告和特殊试验报告。

11 标志、包装、运输与贮存

11.1 标志

11.1.1 无线传感设备与通信设备的显著位置应有下列标志：

- a) 规格型号；
- b) 设备名称；
- c) 制造厂名称；
- d) 额定参数；
- e) 出厂年月及编号；
- f) 安全注意事项及设备使用要点。

11.1.2 在包装箱的适当位置，应标有显著、牢固的包装标志，内容包括：

- a) 生产企业名称；
- b) 设备名称、型号；
- c) 设备数量；
- d) 收货单位；
- e) 发货单位。

11.2 包装

11.2.1 设备包装前的检查

设备包装前的检查要求如下：

- a) 设备的合格证书和使用说明书、附件、备品、备件齐全；
- b) 设备外观无损伤；
- c) 设备表面无灰尘。

11.2.2 包装的一般要求

设备应有内包装和外包装，包装应有防尘、防雨、防水、防潮、防振等措施。

11.3 运输

设备应适用于陆运、空运、水(海)运，运输装卸按照包装箱上的标准进行操作。运输允许的环境温度为-40℃~+70℃，相对湿度不大于85%。

11.4 贮存

包装好的设备宜存贮在环境温度为 $-25^{\circ}\text{C}\sim+55^{\circ}\text{C}$ 、湿度不大于85%的库房内，室内无酸、碱、盐及腐蚀性、爆炸性气体，不受灰尘雨雪的侵蚀。特殊要求按照双方约定执行。

附录 A
(资料性附录)
隧道直线、弯道及竖井三种结构下的无线通信实测

A.1 隧道直线、弯道及竖井三种结构

隧道直线、弯道及竖井三种结构如图 A.1 所示。



图 A.1 隧道直线、弯道及竖井三种结构测试环境

A.2 隧道直线区段通信测试

分别使用 900MHz、2.4GHz、5.8GHz 三种工作频率的无线通信设备在隧道直线区段进行通信测试，测试设备的参数如表 A.1 所示。

表 A.1 无线通信测试设备参数表

	M900	M2400	M5800
工作频段	900MHZ	2.4GHZ	5.8GHZ
设备带宽	5M	5M	5M
发射功率	27dBm	27dBm	27dBm
无线标准	802.11 a/n	802.11 a/n	802.11 a/n

测试通信距离分别为 100m、200m、500m、2000m 时信号强度、灌包吞吐量等各项通信指标，测试结果如表 A.2 所示。

表 A.2 各频率无线通信设备不同距离下的通信性能

(a) 测试距离 100m 时的通信性能

	设备扫频	信号强度	灌包吞吐量	连接稳定性
M900	无干扰	-50dBm	3.1M	良好
M2400	无干扰	-55dBm	4.2M	良好
M5800	无干扰	-51dBm	4.1M	良好

(b) 测试距离 200m 时的通信性能

	设备扫频	信号强度	灌包吞吐量	连接稳定性
M900	无干扰	-89dBm	20K	差

M2400	无干扰	-51dBm	4. 2M	良好
M5800	无干扰	-51dBm	4. 3M	良好

(c) 测试距离 500m 时的通信性能

	设备扫频	信号强度	灌包吞吐量	连接稳定性
M900	无干扰	--	--	--
M2400	无干扰	-87dBm	80K	差
M5800	无干扰	-51dBm	3. 8M	良好

(d) 测试距离 2km 时的通信性能

	设备扫频	信号强度	灌包吞吐量	连接稳定性
M900	无干扰	--	--	--
M2400	无干扰	--	--	--
M5800	无干扰	-68dBm	4. 1M	良好

从表 A. 2 的通信测试结果可知，各频段无线通信设备在隧道直线区段 100m 距离内的无线通信连接均较为稳定。

A. 2 隧道弯道区段与多层竖井通信测试

利用 2. 4GHz 无线自组网通信的传感设备在隧道弯道区段和多层竖井环境下进行网络可靠性测试，测试结果如表 A. 3 所示，隧道弯道区段 10m 间隔放置传感节点时，数据丢包率较低，无线通信稳定性高。隧道多层竖井 10m 间隔放置传感节点，测试 20 分钟，数据丢包率<10%，通信稳定性高，能够满足多层竖井无线通信需要。

表 A. 3 隧道弯道区段、多层竖井通信可靠性测试结果

	测试时间	组网状态	综合丢包率
10 米间隔（弯道）	20min	成功	5. 95%
20 米间隔（弯道）	20min	成功	6. 84%
10m 间隔 3 层立体组网	20min	成功	9. 55%

附录 B
(资料性附录)
无线传感网络自组网结构

无线自组网的网络结构一般采用无中心的分布式控制结构,即完全分布式网络结构和分层分布式控制网络结构。完全分布式结构即平面结构, 分层分布式控制网络也称为分级结构。

B.1 平面结构

平面结构的自组网如图 B.1 所示。这种网络结构形式简单,所有网络节点在路由选择、传输方向和流量控制等方面都是平等的。这种结构没有瓶颈限制,网络比较坚强。每两个节点之间可以存在多条路由,能够很好的实现负载均衡和最优路由选择。这种结构的缺点是当网络节点数目很多时,节点控制开销较大,路由选择容易重复等问题,无法实施集中管理和控制。

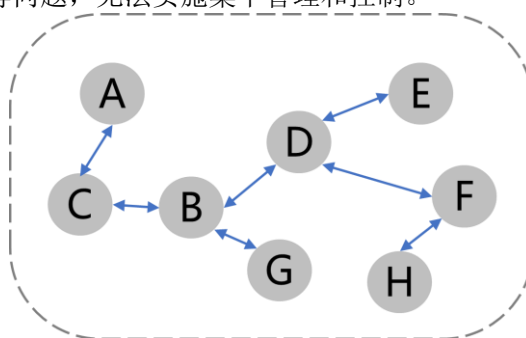


图 B.1 无线自组网平面结构

B.2 分级结构

分级结构的自组网络如图 B.2 所示。自组网划分为一个到多个簇,每一个簇由簇首和多个簇成员构成。在分级结构中,簇首负责簇群中数据的转发,它可以指定下一个节点,也可以通过算法决定节点的数据传输方向。在这种结构的网络中,簇首作用非常重要,需要维护整个簇的路由信息,簇成员的功能相对简单,只是数据传输作用。此外,簇头节点可以根据需要随时产生,这种网络结构具有很强的鲁棒性。

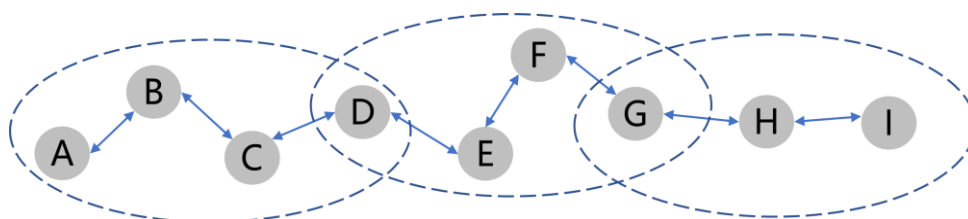


图 B.2 自组网分级结构

参 考 文 献

- [1] GB/T 191 包装储运图示标志
 - [2] GB/T 2423.1 电工电子产品环境试验 第 2 部分 试验方法 试验 A: 低温
 - [3] GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第 2 部分 试验方法 试验 B: 高温
 - [5] GB/T 2423.22 环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 N: 温度变化
 - [6] GB/T4208 外壳防护等级(IP 代码)
 - [7] GB/T 17626.1 电磁兼容 试验和测量技术 抗扰度试验总论
 - [8] Q/GDW 1857-2012 无线传感器网络设备电磁电气基本特性规范
 - [9] Q/GDW 11641-2016 高压电缆及通道在线监测系统技术导则
 - [10] Q/GDW 11455-2015 电力电缆及通道在线监测装置技术规范
-