

基于 LoRa 的工业无线监测终端硬件电路 优化设计研究

徐啸威¹, 郦秋梅^{2*}

1. 中国电信股份有限公司杭州萧山区分公司, 浙江 杭州 311200

2. 浙江中元照明股份有限公司, 浙江 杭州 311200

DOI: 10.61369/TACS.2025140012

摘 要 : 工业无线监测终端是工业物联网感知层的重要组成, 用于实现多源传感数据采集、边缘预处理与远距离无线回传。LoRa 技术以远距离、低速率和低功耗为特征, 适合在供电受限、布线困难的工业现场部署。然而在强电磁干扰、金属遮挡与供电波动等条件下, 终端常出现采样噪声与漂移增大、链路稳定性波动、平均功耗偏高以及接口防护不足等问题。本文首先分析基于 LoRa 的工业无线监测终端硬件电路构成与典型瓶颈, 在此基础上从信号采集与调理、射频前端与天线匹配、电源管理与休眠策略、主控与通信协同、抗干扰与工业防护等方面提出优化设计思路, 为终端的高可靠、低功耗与工程化部署提供参考。

关 键 词 : LoRa; 工业无线监测终端; 硬件电路; 低功耗; 抗干扰

Research on Optimized Design of Hardware Circuit for Industrial Wireless Monitoring Terminals Based on LoRa

Xu Xiaowei¹, Li Qiumei^{2*}

1. Hangzhou Xiaoshan District Branch, China Telecom Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang 311200

2. Zhejiang Zhongyuan Lighting Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311200

Abstract : Industrial wireless monitoring terminals are crucial components of the perception layer in the Industrial Internet of Things (IIoT), responsible for collecting multi-source sensor data, performing edge preprocessing, and transmitting it wirelessly over long distances. LoRa technology, characterized by its long-range, low data rate, and low power consumption, is well-suited for deployment in industrial settings where power supply is limited and wiring is challenging. However, under conditions of strong electromagnetic interference, metal obstruction, and power supply fluctuations, terminals often encounter issues such as increased sampling noise and drift, unstable link performance, high average power consumption, and inadequate interface protection. This paper first analyzes the hardware circuit composition and typical bottlenecks of LoRa-based industrial wireless monitoring terminals. Based on this analysis, it proposes optimized design strategies in areas such as signal acquisition and conditioning, radio frequency (RF) front-end and antenna matching, power management and sleep strategies, main control and communication coordination, and anti-interference and industrial protection. These strategies provide references for achieving high reliability, low power consumption, and engineering deployment of the terminals.

Keywords : LoRa; industrial wireless monitoring terminal; hardware circuit; low power consumption; anti-interference

引言

工业生产状态感知与远程运维正在从“离线巡检”转向“在线监测 + 预测性维护”, 无线监测终端因此成为工业物联网落地的高频形态。相较于仅追求吞吐量的通信系统, 工业监测更强调“低速小包、长寿命供电、稳定可维护”, 并要求设备在复杂电磁环境与结构安装约束下长期连续运行^[1]。

LoRa 属于低功耗广域网 (LPWAN) 体系中的非授权频段技术路线之一, 其工程目标是以较低比特率实现较远通信距离并延长电池供电型传感器寿命; 在此基础上, LoRaWAN 在物理层之上定义介质接入与安全机制以提升互操作性, 其中相关规范由 LoRa Alliance 推动形成。我国常用区域参数中, CN470 对应可用频段范围约为 470 MHz 至 510 MHz。

从通信参数看, LoRa 通过发射功率、扩频因子、带宽与编码率在覆盖、速率与发送时间之间权衡; 扩频因子增大可提高灵敏度与覆盖范围, 但会降低数据速率并延长单包占用时间。因此, 终端设计需要把空口参数选择与功耗预算、缓存策略和链路可靠性机制同步考虑^[2]。

工程实践表明, 终端可用性并不只由空口参数决定。若采集链路噪声高、电源纹波大、射频匹配不良或 ESD/ 浪涌防护不足, 系统仍可能在现场出现丢包、复位甚至器件损坏。同时, 国内无线电监管文件强调不得擅自扩大发射频率范围、加大发射功率或擅自更改发射天线等要求, 对终端射频硬件设计具有合规参考意义。因此, 本文面向工业现场的“采集-供电-射频-接口-防护”全链路提出硬件电路优化方案, 强调问题-措施-预期效果的闭环表达, 以便直接用于产品设计与工程实施。

一、基于 LoRa 的工业无线监测终端硬件电路现状分析

(一) 硬件电路构成单元解析

基于 LoRa 的工业无线监测终端通常由主控与外围、传感采集与调理、LoRa 射频通信、电源管理、接口与防护等功能单元组成^[3]。主控单元一般以低功耗 MCU 为核心, 完成传感采集调度、数据打包、无线收发控制与休眠唤醒管理; 为降低系统复杂度, 也可采用集成 Sub-GHz 无线的 MCU 方案, 将射频收发与主控统一在同一芯片平台上, 减少外设总线与功耗开销。

传感采集与信号调理单元承担“把工业现场的弱信号转化为可用数字量”的任务。典型输入包括 4~20 mA 电流环、0~10 V 电压量、桥式/电阻式传感器(如 PT100/NTC)、振动加速度与压力等。由于线缆长、共模干扰强、传感器输出幅值小, 前端通常需要运放/仪放、滤波、保护、隔离与 ADC 转换配合, 以获得足够的信噪比和重复性。

LoRa 射频通信单元一般由收发器或模组、匹配与滤波网络、天线接口以及必要的射频保护组成。以模块化产品为例, 常通过 SPI 与 MCU 连接, 并提供 DIO 中断脚用于收发完成、CAD 检测等事件; 同时明确建议将模块靠近板边、天线朝外并远离电感、继电器等强干扰器件, 以降低耦合与失配风险。

电源管理单元通常需要同时满足“宽压输入适配或电池供电”“峰值电流支撑”“低静态电流”“模拟电源低噪声”等要求。接口与防护单元则面向工业现场的 ESD、电快速瞬变、电源浪涌、反接与误插拔等风险, 常通过 TVS、共模扼流圈、隔离器件与合理接地回路路径实现系统级抗扰度。

(二) 传感采集精度与链路可靠性不足

从监测业务看, 工业无线终端的价值依赖于数据可信度。部分工程实现中, 采集链路采用低成本运放与中低分辨率 ADC, 且缺少对输入保护、滤波与参考源的系统化设计, 导致在温漂、电源纹波与共模干扰作用下产生零点漂移、量程压缩或采样抖动。长线缆引入的感应噪声、地电位差与浪涌脉冲也可能使采样电路进入非线性区, 进一步放大测量误差与故障概率。

链路可靠性方面, LoRa 通过发射功率、载频、扩频因子、带宽与编码率等参数在覆盖、速率与空口占用之间权衡。工程上若只依赖参数配置而忽略硬件链路预算, 则会出现“在部分点位稳定、换点位就丢包”的现象。其根因常包含: 天线匹配不一致、外壳/金属支架导致辐射效率下降、射频与数字电路耦合引入底

噪抬升、以及接口 ESD 导致的间歇性故障等。

进一步地, LoRa 的扩频因子、带宽与编码率选择会影响接收灵敏度与发送时间。例如, 有研究指出扩频因子每增加 1 将提升接收机灵敏度并扩大覆盖, 但会降低数据速率; 同时纠错冗余越高传输效率越低。若终端在链路差的场景下长期使用高 SF 与高冗余配置, 将导致单包占空时间增加, 叠加重传后易引发功耗与时延的连锁上升。此外, LoRa 系统的单次载荷长度存在上限(典型可达约 256 字节量级), 模块侧也通常提供 CRC 与分组引擎; 因此在采集侧噪声、抖动与异常数据未被抑制时, 即便无线侧传输正确, 最终到达的数据仍可能不具备业务可用性。

(三) 终端功耗控制不足制约长期在线运行

工业无线监测节点常部署于巡检困难区域, 运维侧更关注“平均功耗”而非“瞬时功耗”。在未进行系统级低功耗设计时, 常见问题包括: 传感器持续上电、MCU 轮询等待而非事件驱动、射频模块频繁唤醒以及电源转换链路效率偏低等, 导致电池寿命难以预测。另一方面, LoRa 终端可在不同工作模式下运行, 不同模式面向不同业务模型与省电需求; 若软硬件协同不足, 就可能出现唤醒窗口过长、无效上报频繁或重传失控, 从而把空口占用与功耗同步推高^[4]。

在硬件层面, 射频发送的峰值电流往往显著高于接收与待机电流, 若电源输入阻抗偏大或去耦不足, 可能在发射瞬间产生压降, 造成收发器锁相环失锁、包错误或系统复位, 从而形成“越弱链路越发不出去”的恶性循环。此外, 部分模块说明中直接给出较高的供电电流裕量要求, 提示工程设计需为发射峰值留出能量缓冲与走线电流能力。

(四) 复杂工业环境下运行稳定性与抗干扰能力欠佳

工业现场的 ESD/浪涌多从电源口、传感器接口、调试口与天线口进入。若防护器件远离连接器、回路路径阻抗大或存在“残桩”走线, 会导致 ESD 电流无法被有效分流, 进而在受保护 IC 端产生更高的应力电压。此外, 模拟采集区与开关电源区、射频区与数字高速区若未合理分区, 容易发生串扰与地回路耦合, 引发采样漂移、收发灵敏度下降或系统复位。上述问题会直接降低终端连续运行可靠性, 提高现场维护成本。

从机理上看, ESD 是一类高 di/dt 瞬态事件, PCB 中极小的寄生电感也会在瞬态电流作用下产生显著电压抬升; 因此“TVS 到地的电感”“TVS 到连接器/受保护 IC 的距离关系”往往比单纯选择更大功率的 TVS 更关键。若布线存在过孔过多、回流绕行或 TVS 与受保护线之间形成残桩, ESD 电流将更难被有效分流到

地，进而提升系统死机与损坏概率。

二、基于 LoRa 的工业无线监测终端硬件电路优化设计

（一）信号采集与调理电路的精度提升设计

本节目标是把“弱信号采集的可重复性”作为第一约束，优先降低噪声与漂移对业务判断的影响。总体建议采用“输入保护－抗混叠滤波－低噪声放大／差分转换－高分辨率 ADC－基准与校准”的分层结构^[5]。

在器件类别上，模拟前端可按信号类型分组：对电流环与小信号电压，建议使用零漂移／低噪声运放或仪表放大器实现增益与共模抑制（如 OPA333/OPA2188 类零漂移运放、INA333 类低失调仪放等）；对电阻式传感器（RTD/NTC）建议采用恒流源激励＋差分采样，减少供电变化对测量的乘性误差；对振动类信号可采用带通／低通有源滤波抑制工频与高频干扰。ADC 方面，慢变量监测（温湿度、压力、液位）可优先选择 16－24 bit $\Delta-\Sigma$ ADC（如 ADS1220/ADS124S08 一类、内置 PGA 更利于弱信号），较高采样率需求（振动特征量提取）可选择 SAR ADC 并配合前端抗混叠滤波。

在结构与布局上，建议将保护器件靠近连接器，使浪涌电流在进入板内前被钳位／泄放；模拟区采用连续参考地与差分走线，基准源与 ADC 参考端采用“短回路＋充分去耦”的布置方式，并避免开关电源的高 di/dt 回路穿越模拟区域。若传感器线缆较长或存在地电位差，建议引入隔离放大器或数字隔离器（隔离 SPI/I²C/USB-UART）实现信号与地回路隔离，降低共模干扰造成的采样漂移与误触发。

在长期一致性方面，可预留硬件自检／校准通道：如通过模拟开关将 ADC 输入切换到高稳定度参考电压／电阻网络，定期采样形成漂移指纹，并在上报侧做趋势监测。预期效果是：采样噪声底降低、漂移可感知、异常线缆／传感器问题更早暴露，从而减少误报与漏报。

（二）LoRa 射频前端与天线匹配电路的可靠化设计

射频链路的工程目标是“链路预算稳定”和“批量一致性可控”。建议从收发器／模组选型、匹配滤波、天线系统与 PCB 分区四方面同时优化。

收发器选型上，工程上常采用芯片＋射频前端匹配的方式，或直接采用完成射频集成的模组。以 Semtech 的 SX1276/77/78 系列等常见 LoRa 收发器为例，可支持多种带宽与扩频因子组合，便于在距离与速率间进行配置权衡。块化方案的优势在于射频关键参数更易收敛，但需严格遵循其布板与供电要求。以某系列 LoRa 模组资料为例，其建议将模块靠近板边、天线朝外，并远离继电器、电感等强电磁器件；同时提示供电电流需满足较高裕量，以覆盖发射瞬时峰值电流需求。

匹配与滤波上，建议按“RF 口－ π 型/LC 匹配－谐波抑制／带通滤波－天线座／弹簧天线”的顺序布局，并预留可调器件位于驻波与谐波的产测微调。对于 470 MHz 附近应用，天线与地

参考的几何结构会显著影响等效阻抗，建议把天线区域作为“禁布区”，避免铜皮、走线与金属件靠近造成失配。若终端工作环境干扰较强或对接灵敏度要求更高，可考虑加入低噪声放大器（LNA）或采用射频前端模块（含 LNA/PA/ 开关及部分匹配），以降低链路预算波动并减少射频调试成本。参考典型模组规格，基于 SX1278 的方案可提供超过－148 dBm 的接收灵敏度与＋20 dBm 量级功率输出，为长距离链路预算留出余量。

PCB 分区上，建议将射频区与数字高速区、开关电源区物理隔离，射频走线保持参考地连续，周边通过地过孔栅栏降低辐射泄漏；必要时对收发器与匹配网络加屏蔽罩并以多点接地降低缝隙辐射。预期效果是：不同安装点位的 RSSI/SNR 波动减小、同配置下丢包率受控、批量生产的一致性更高。

同时需要强调合规边界：监管文件明确提出不得擅自扩大发射频率范围、加大发射功率（包括额外加装射频功率放大器）以及不得擅自外接或更改发射天线等要求；终端若按相关路径进行合规或借鉴其工程约束，应在硬件预留、说明书与调试权限上同步控制。

（三）电源管理与低功耗控制电路的优化设计

电源部分建议采用“分域供电＋分级稳压＋峰值电流缓冲”的体系（例如主电源采用同步降压 DC-DC，敏感模拟支路采用低噪声 LDO，外设分时供电采用负载开关）。分域供电指对射频域、数字域、模拟域分别供电或通过可控开关分时上电（如 TPS229xx 类负载开关／理想二极管方案），以减少相互干扰与漏电源；分级稳压指用高效率 DC-DC 承担主功耗（如 TPS6217x/MPM 系列等）并用低噪声 LDO 为模拟前端／参考源做二次净化（如 TPS7A2x 类），从而在效率与噪声之间折中；峰值电流缓冲则指在射频发射时通过本地储能（大电容或小型超级电容）降低供电电压降与纹波。

以模块类产品为例，其资料常给出发射电流接近百毫安量级，且明确提示供电电流需要留足裕量；因此建议在射频模组电源脚附近布置“10 μ F $\sim$ 47 μ F＋0.1 μ F”的组合去耦，并把去耦回路做短、粗、低电感，必要时增加 π 型滤波抑制电源线引入的高频噪声。对工业宽压输入场景，可在电源入口增加浪涌抑制、反接保护与 EMI 滤波，避免瞬态干扰通过电源耦合到 ADC 参考与射频 PLL。

休眠策略上，建议构建“采集窗口－处理窗口－发送窗口－深睡眠”的闭环：其一，传感器分时供电：采集前短时上电并等待稳定，采集后立即断电；其二，主控采用 RTC/ 低功耗定时器唤醒，并尽量用中断驱动替代轮询；其三，射频按需唤醒，发送结束即回到低功耗状态；其四，对告警类数据与周期类数据分级上报，避免无效高频发送。预期效果是：平均电流显著下降，电池寿命更可预测，同时电源噪声对采样与射频的耦合风险降低。

（四）主控与通信电路的协同化优化设计

主控与通信协同的核心是“缩短有效唤醒时间”和“提高单次唤醒的有效数据成功率”。硬件层面建议在接口选型、时序组织与抗干扰上形成约束。

接口方面，收发器／模组常通过 SPI 或 UART 与 MCU 互联。

SPI 适合高吞吐与低协议开销, UART 适合 AT 命令式模组与调试维护。以某系列 LoRa 模组为例, 其引脚定义包含 SCK/MISO/MOSI/NSS 与多路 DIO 脚, 便于以中断方式处理“发送完成/接收完成/信道活动检测”等事件, 从而减少主控轮询等待并降低功耗^[9]。对高速边沿信号可在时钟与数据线上串联小阻值电阻(如 22~47 Ω)抑制振铃, 并保证接口参考地连续, 避免返回电流跨分割地造成的串扰与误码。

可靠性机制方面, LoRa 芯片/模组通常提供 CRC 与分组引擎, 并支持一定长度的载荷; 同时 LoRa 物理层采用纠错编码以提升抗噪声能力, 但其冗余会带来传输效率下降的代价。因此, 建议终端在应用层进一步构建轻量级帧结构(设备 ID+帧序号+时间戳+载荷 CRC), 对告警类数据启用确认与有限次重传, 对周期类数据采用非确认上报, 以在可靠性与功耗/空口占用之间取得平衡。为应对网关短时离线或信道拥塞, 可在终端侧加入小容量 FRAM/Flash 缓存, 把“采集与上报解耦”, 避免因链路抖动丢失关键数据。

(五) 抗干扰与工业防护电路的系统化优化设计

抗干扰设计建议遵循“入口防护优先、回流路径可控、分区分域、屏蔽与接地一体化”的原则。接口防护方面, ESD 事件通常经电缆/连接器进入系统, 防护效果高度依赖 TVS 器件与走线寄生电感(如 SMF/SMBJ 系列 TVS, 或小封装 ESD 阵列器件)。相关布局指南强调: 将 TVS 尽量靠近 ESD 源(连接器), 使 TVS 到连接器距离小于 TVS 到受保护 IC 距离(形成有利的寄生电感比), 避免 TVS 与受保护线之间出现残桩, 并尽可能降低 TVS 到地的电感, 以减少受保护节点的应力电压。该类原则对传感器接口、调试口与天线口同样适用。

EMC 分区方面, 建议把 PCB 划分为模拟采集区、射频区、数字控制区与电源区: 模拟区避免开关电源高 di/dt 回路经过; 射频区保持参考地连续并减少高速数字线穿越; 电源区把电感、MOSFET 等高噪声器件集中并就近回流; 数字区的时钟与高速线远离射频匹配与 ADC 参考。接地方面, 建议采用“信号地-电源地-机壳地”分层管理: 信号地优先保证采样与射频参考的连续性, 电源地承担大电流回流, 机壳地用于泄放 ESD/浪涌能量并与屏蔽结构连接; 三者单点或受控位置连接, 避免地回路引入共模干扰。结构方面, 建议对收发器与敏感模拟链路采用屏蔽罩/金属壳体, 天线区域保持禁布与净空, 减少金属遮挡与近场耦合导致的失配。

三、结语

本文围绕基于 LoRa 的工业无线监测终端, 分析了硬件电路在采集精度、链路可靠性、低功耗运行与工业抗扰度方面的典型瓶颈, 并提出了面向工程落地的模块化优化设计方案: 通过低噪声采集链路与高分辨率采样提升数据可信度; 通过匹配滤波、分区布局与天线系统优化提升链路预算一致性; 通过分域供电与休眠策略降低平均功耗; 通过接口时序协同、CRC 与有限次重传提高关键数据到达概率; 通过 EMC/ESD、接地与屏蔽的系统化方法降低现场故障率。上述方案可作为工业无线监测终端硬件迭代的通用设计框架, 后续可结合具体行业的传感器类型、安装结构与合规要求进一步细化器件选型与产测校准流程, 以支撑规模化部署。

参考文献

- [1] 宋振雷, 吴冬燕, 张卫星, 薛福霞. 基于 LoRa 的智慧工厂环境监测系统的设计 [J]. 电子制作, 2021, 29(9): 79-81.
- [2] 万树德, 徐儒. 基于 LoRa 的中小企业工厂安防监测系统设计与实现 [J]. 物联网技术, 2021, 11(4): 5-7.
- [3] 朱轩毅, 郭思为, 冷泽松, 陈靖翰, 王平. LoRa 自组网的智能感知终端监控验证平台 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2022, 22(9): 58-62.
- [4] 傅仁轩, 王庆华, 陈龙飞. SCADA 系统的低功耗通信模式研究与设计 [J]. 电气自动化, 2021, 43(2): 91-93.
- [5] 杨月婷, 董韶军, 陈杰翔. 脉宽调制电路在传感器信号调理电路中的应用 [J]. 自动化仪表, 2003, 24(8): 54-56.
- [6] 康晋. 基于 LoRa 无线通信的工业机器人远程监控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 119-124, 132.