

基于无线通信的地铁商业电气监控系统开发

林 捷

(深圳市地铁商业管理有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要 随着电气设备性能的提升和智能化的普及, 电气监控逐步由传统分散管理转为智能集中监控。在该趋势引领下, 本文开发一套适配地铁商业板块需求的电气设备集中监控系统, 以提升经营品质, 减少运维成本。本文从商业需求角度入手, 剖析该系统开发思路, 介绍相关模块及上位机开发成果, 并给出拓展方向及优化建议。

关键词: 地铁商业; 电气监控; 单片机; 集成管理; 无线通信

Development of subway commercial electrical monitoring system based on wireless communication

LIN Jie

(Shenzhen Metro Business Management Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong 518000)

Abstract With the improvement of electrical equipment performance and the popularization of intelligence, electrical monitoring has gradually moved from traditional decentralized management to intelligent centralized monitoring. Under this trend, this article develops a centralized electrical equipment management system that meets the needs of the subway commercial sector to improve management quality and reduce maintenance costs. Starting from the perspective of business needs, this article analyzes the development ideas of the system, introduces relevant modules and upper computer development achievements, and proposes expansion directions and optimization suggestions.

Keywords: subway commerce; electrical monitoring; single-chip computer; integrated management; wireless communication

0 引言

地铁商业项目是指地铁以公共交通为导向的开发 (transit-oriented development, TOD) 模式下可供商业开发的区域。与车站运营的稳定性不同, 商业区的电气设备具有需求波动大、人为决策权重大、不确定性强等特点。例如, 个别商户超额用电导致区域跳闸停电, 影响其他商户正常经营。针对此类问题, 采用智能化远程集中监控可节省大量人力和时间成本, 提升故障处理能力^[1]。

为了确保地铁商业电气设备安全稳定运行, 智能集控系统需对下位设备的电压、电流、功率、电量、开关状态等进行数据采集并快速响应。因此, 系统应兼具实时性及稳定性。实时性要求系统具备短延时、不间断的电气数据采集能力和实时处理能力; 稳定性要求系统通信稳定, 在故障时能自动切

断问题区块, 使系统运作正常。

从经济性考虑, 智能集控的目的是节省人力、时间成本, 因此系统还须具备远程集中抄表、后台远程起停设备, 以及数据分析等功能^[2]。

1 技术方案比选

1.1 互连方式的分析比选

智能集控系统框架分为采集终端、数据处理层及上位机显示控制端 3 层。为了确保各设备层有效互连, 须选配互连方式。

互连方式可分为光纤、网线、串口等实物有线互连, 以及工业、科学和医学 (industrial scientific medical, ISM) 使用频段、无线保真局域网通信技术 (wireless fidelity, WiFi)、蓝牙等无线互连两类。两种互连方案对比见表 1。

鉴于地铁商业电气设备对监控实时性要求高,

表1 两种互连方案对比

方案描述	优点	缺点
采用光纤、网线、串口等有线互连	信号稳定、抗干扰能力强、延迟低	耗材大，搭建、改造成本高
采用 ISM、WiFi、蓝牙等无线互连	成本低、组网灵活，可一对多通信	抗干扰能力较差，强磁场下易失真 ^[3]

设备组网伴随业态布局须进行频繁调整，集控系统互连方式选用无线互连方式，同时节省成本，压缩投资回收期。

1.2 容错纠错算法的分析比选

在设备堆叠、强电磁干扰等不利因素影响下，无线通信传输失真导致误报警、误动作的可能性较大，因此通信报文须考虑容错纠错算法机制。几种常用的容错纠错算法如下。

算法一：单次重复多发算法。发送端一次性发送多条重复报文，接收端对报文逐帧比对，若比对一致则执行完整报文，若比对有误差则仅执行比对无误的报文段，或直接不执行并丢弃。

算法二：脉冲调制编码算法。系统调制一个稳定高频时钟信号作为基波脉冲，并利用脉冲振荡波段和稳态波段组合代表不同信号。例如，红外传输由系统调制出频率为 38kHz 的脉冲波，再通过脉冲波的启停组合来传递信息。

算法三：自带校验编码算法。报文自带校验码段，校验正确后再执行指令，即发送端按计算规则得出校验码附后同步发送，接收端以同样规则进行校验码复验，再与原校验码比对，从而判定报文正误。例如，奇偶校验码、循环冗余校验（cyclic redundancy check, CRC）码等。

上述 3 种容错纠错算法对比见表 2。

表2 3种容错纠错算法对比

算法类型	优点	缺点
单次重复多发算法	指令短、响应快、算法简单	容错差，强磁环境下报文丢弃多，执行效率低
脉冲调制编码算法	抗干扰能力强、脉冲能量强，传输远	效率低，指令只能一对一传输，不能快速分发
自带校验编码算法	正确率高、传输效率高	发送前与接收后均须解析验算，对硬件要求高

为确保系统稳定运行和快速响应，须保证报文正确率和传输效率，因此选用自带校验编码算法，以提升报文容错纠错能力^[4-5]。

1.3 规约协议的分析比选

由于智能集控系统全数据链条均为自主研发，不涉及第三方成品的特殊协议，因此可自主选择协议类型。常见的协议包括基于互联网的传输控制/网际通用协议（transmission control protocol/Internet protocol, TCP/IP）、基于串口的 ModBus 远程终端单元通用协议（ModBus remote terminal unit, ModBus-RTU），以及国际电工委员会（international electrotechnical commission, IEC）编制的基于电力系统专用的 103、104 协议等。

上述 3 种协议对比见表 3。

表3 3种协议对比

协议类型	优点	缺点
TCP/IP	可多路复用、架构灵活	协议穿透复杂，实时性、安全性差
ModBus-RTU	硬件简单，实时性强，可一对多通信，带 CRC	主从关系固定，网络拓扑性能差，不具备延展性 ^[6]
IEC 103、104	性能最大限度满足行业需求	有行业壁垒，兼容性差，移植难度大

由于系统呈现“一对多”的链路结构，且需要引入纠错机制来规避报文出错风险，因此选用 ModBus-RTU 协议作为系统通用协议，以兼容多种传感设备通信并保证稳定传输。此外，协议具备广播模式，可满足系统“一对多”的控制需求。

2 开发思路分析

2.1 整体架构链路

智能集控系统包括自下而上的数据采集链路和自上而下的控制链路。

数据采集链路以单片机为控制中心，利用通用异步收发接口（universal asynchronous receiver/transmitter, UART）搭载 ModBus-RTU 协议，从下位采集模块及传感器获取实时数据并整理封包，再通过 WiFi 发送至上位机。上位机对捕获数据流进行拆包解析后，一方面以可视化图表等形式在后台展示并推送报警信息，另一方面进入大数据统计容器，用以开展电气特性分析等潜在价值挖掘^[7]。

控制链路由上位机交互界面触发控制指令，通过指令编码远程传递至下位机，下位机解析报文后向执行机构发送指令，完成电气设备遥控操作。

2.2 安全性能设计

安全是系统可靠运行的保证。由于地铁商业常

规设备用电为 220V 标准市电，而智能模块通常工作在 5V/3.3V 的弱电等级。为避免电流冲击，市电与弱电并存时需要考虑隔离设计，如电压、电流互感器设备与计量芯片间采用电磁耦合隔离，单片机控制端与继电器执行机构间采用光电隔离。此外，通过高、低压分开布置，以及噪声滤波、单点共地等方式提升模块工作的稳定性，通过电流测算、电磁干扰评估等方法指导电路板设计及元器件布局，确保系统性能稳定及使用安全。

2.3 电气故障定位、可视化及数据分析

除满足地铁商业电气设备日常运维需求外，系统还应具备设备故障定位及分析功能。因此，同步考虑短路、断路、电气量超限、通信中断等故障的监测、定位及相关数据分析^[8]。比如，短路故障会引起瞬时电流陡增，功率超限表现为稳态功率数值高位异常等，通过数据侦查可间接判断故障类型，通过报文携带的地址码可定位具体故障设备，并精准推送声光报警信息。

为了更直观地描述并处理故障事件，上位机具备可视化界面，涵盖图标着色、数据曲线、占比图、操作按钮等元素，便于运维人员操作^[9]。此外，监测数据被导入数据库，作为后台大数据分析样本，据此可间接掌握电气设备性能及潜在故障风险，为后期运维计划调整、备品备件采购等提供指导。

3 成品设计与应用

3.1 主控芯片选型

根据功能需求及架构分析，下位机主要负责数据采集。由于数据通过不同传感设备采集，要求主控芯片尽量适配多种传感设备接口。为了减少端口占用，传感设备与主控芯片一般选用串口方式互连，而串口通信包括 UART、串行外设接口（serial peripheral interface, SPI）、集成电路（inter-integrated circuit, I2C）总线接口、控制器局域网（controller area network, CAN）总线接口等多种模式，要求主控芯片在硬件上支持多种串口类型。此外，由于集控系统要求实时响应，选用具备直接内存访问（direct memory access, DMA）功能的主控芯片可在硬件层响应外设请求，实现快速响应。最后，由于下位机点位多、体量大，系统量产需要考虑经济适用性，选用性价比高的芯片类型。

经查阅相关资料，STM 单片机能够满足上述需求。由于传感器模块及 WiFi 模块均采用 UART 串

口通信，要求主控芯片至少具备两组独立的 UART。因此，选用 STM8S2X 系列单片机作为该智能集控系统的主控芯片。

3.2 硬件设计

硬件以“性能稳定、高度集成”为设计导向。

“性能稳定”是系统正常工作的基本保证。通过降低信号干扰的线路设计，采用元器件贴片工艺，以及调用芯片内部硬件模组进行功能开发等方式来提升系统稳定性。比如，利用芯片内部晶振向系统提供稳定时钟源；分区设计高、低压电路并进行物理分隔；结合模块特性采用多点共地敷铜工艺等。

“高度集成”是节约空间、提升效率的有效方式。选用集成底层驱动力的模块成品，利用芯片封装模组及软件编程的方式开发产品功能，使硬件设计更简约，生产成本更低廉。比如，本系统选用自带 ModBus-RTU 协议的电气采集模块，无需对底层规约二次开发；WiFi 选用支持 AT（Attention）精简指令集的模块，确保报文高效传输。此外，上位机与数据服务器集成开发，将数据存储、计算、显示等功能一体化，节约设备成本，减少空间占用。本文开发的电气数据采集传输模块实物如图 1 所示。



图 1 电气数据采集传输模块实物

3.3 软件设计

下位机电气参数由成品模块完成数据采集及协议封装，经 UART 串口传输至单片机，再由单片机通过软件编程方式对数据包进行读取、解析、上传等操作。下位机开发主要采用 C 语言编程，结合算法完成报文计算校验及信息提取，并通过字符串传送模式及串口中断方式对接 WiFi 模块 AT 指令集，实现功能调用。此外，在程序运行时，利用 IAR 开发平台及 ST-Link 调试工具对变量实时监控、获取状态信息、及时诊断程序并修复漏洞。图 2 为采集模块报文解析函数的部分代码及调试过程，可看到电气参数的实时数据更新及 WiFi 模块的工作状态。

```

void Analysis_Im1281b_data4(void) //解析出报文中电压、电流、功率、电量4个参
{
    union crcdata
    {
        u16 word16;
        u8 byte[2];
    } crcnow;
    if(receive_Im1281b_finished == 1) //全部数据接收完成,标志位置1
    {
        receive_Im1281b_finished = 0; //清零标志位

        if(uart3_rec_buff[0]==0x01) //确定是来自ID为1的设备
        {
            crcnow.word16 = get_CRC(uart3_rec_buff,uart3_rec_p-2); //计算CRC
            if((crcnow.byte[0]==uart3_rec_buff[uart3_rec_p-2])&&(crcnow.byte[1]
                Voltage_data=((u32)(uart3_rec_buff[3])<<24)|((u32)(uart3_rec
                Current_data=((u32)(uart3_rec_buff[7])<<24)|((u32)(uart3_rec
                Power_data=((u32)(uart3_rec_buff[11])<<24)|((u32)(uart3_rec_t
                Energy_data=((u32)(uart3_rec_buff[15])<<24)|((u32)(uart3_rec_t
        }
    }
    uart3_rec_p=0; //指针复位
    memset(uart3_rec_buff,0,sizeof(uart3_rec_buff)); //清零接收数组
}

```

Expression	Value	Location	Output
uart3_rec_buff	0x0000000000000000	0x00029C	ESP8266 WiFi 模块检查【成功】
Voltage_data_DEC_Int	230	0x0002DC	2: ESP8266 station 已连接AP,获得IP地址
Voltage_data_DEC_Fra	4000	0x0002DE	3: ESP8266 station 已建立TCP或UDP传输
Current_data_DEC_Int	0	0x0002E0	
Current_data_DEC_Fra	117	0x0002E3	
Power_data_DEC_Int	1	0x0002E4	
Power_data_DEC_Fra	1000	0x0002E6	

图2 采集模块报文解析函数部分代码及调试过程

上位机负责数据存储、解析、显示及控制指令的封包下发。利用工控机作为开发载体,软件选用LabVIEW的G语言编程,并调用类封装库,实现数据分析及图形化显示。此外,当界面按钮被触发时,由软件封包相应控制指令,并转化为AT指令后通过WiFi模块下发。为了循环更新采集数据、轮询监测界面按钮是否动作,上位机程序结构采用“状态机”开发模式,即在程序“初始化”后,循环执行“系统等待”“数据处理”等状态切片程序,并在捕获到退出指令时触发中断,执行“退出系统”的状态切片。图3为LabVIEW电气数据解析及波形显示程序。

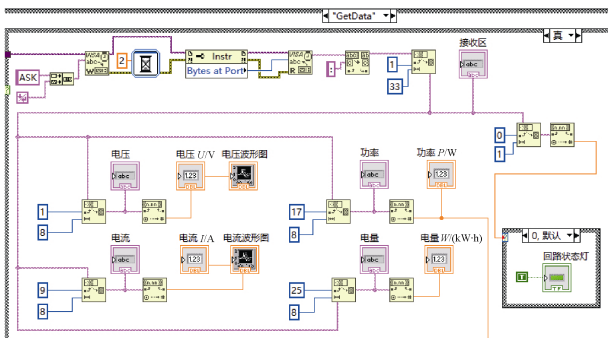


图3 LabVIEW 电气数据解析及波形显示程序

3.4 成品应用

成品主要挂载于地铁终端商户配电箱、防火分区配电间、环控电控室等部分用电设备上,并在后台搭建管理系统,用于远程运维监控。其中,地铁商业电气智能监控系统功能界面如图4所示。

通过实时获取链路商户的进线电压、电流、功率、电量等数据及进线开关状态,远程监测每个商户的用电情况,并实现远程抄表、商户开关遥控等



图4 地铁商业电气智能监控系统功能界面

功能,节省现场处理的时间及人力成本^[10-12]。

通过预设报警阈值,选配报警信息点,可在数据超限时触发设备动作并推送声光报警。比如,在监控系统中预设单户电流超额动作阈值,实现商户超负荷用电时自动切断回路,确保区域用电安全。

通过绘制电压、电流等电气参数曲线及功率占比图,可直观展示回路供电品质、商户用电情况等内容,并将数据存储至后台,以便进一步分析商户用电习惯,修正需求认知偏差,指导备件采购等^[13]。

通过分、合闸按钮分开设置并分别封装带校验码的动作指令,除满足远程开关控制的需求外,可避免操作人员误操作或信号干扰导致的误动作。

4 优化建议及拓展方向

地铁商业电气智能监控系统的模块设计、项目搭建及开发应用,已在设备远程监控、系统运维、故障诊断及数据挖掘等方面取得了阶段性成果。

TOD模式下,地铁商业区电气设备现仍采用设备定点有线互连的监控方式,由此产生的架构固化、耗材大、多协议转换导致兼容性差等问题难以解决。随着集控系统上线,设备间的无线通信摆脱了有线束缚,使组网更加灵活。同时,管理人员在后台即可实时监控下位电气设备数据并及时响应。集控系统的应用既解决了前往就地端修复故障的响应滞后问题,又解决了占地维修及抄表等影响商户经营的问题。但是,系统目前仅支持电气类设备的监测运维,机械类、视检类故障等仍需要人工现场处理,具有一定局限性,后期须进行调整优化。

结合当前系统运行状况及功能需求,可在以下3个方向进行优化拓展。

方向一:传感模式优化。传感器是数据采集端

的感知部件,受单片机特性所限,传感参数须转换为电信号才能被识别。此外,单片机不擅长处理模拟量,要经模数转换后才能利用。上述限制使系统监测主要以电压、电流等电气类参数及开关状态类参数为主,尚未考虑机械行程类、热磁感应类、力学测量类等传感类型的参数。因此,传感模式优化可从以下两个思路拓展研究:一是改变传输类型,即在传感模块端完成数据采集及模数转换后,再将数据传输给单片机;二是改变传输策略,即传感器不直接传递监测数据,而是依据预设规则先行判断数据正常与否,再将判断结果传递给单片机作进一步处理。通过上述传感模式优化,可有效弥补单片机的数据采集短板,使数据监测更加多样化^[14]。

方向二:算法优化。项目采用自带CRC编码的ModBus-RTU协议,该协议的容错算法是在校验出错时直接丢弃报文。当报文连续多次校验出错时,无法保证系统实时响应,并产生大量无效报文,造成网络拥塞。因此,可在报文中加入纠错机制,即不再将错误报文简单丢弃,而是以一定规则自检并修复错误码段,力求每条报文均有效收发,减少系统卡顿。

方向三:产品定制及选型优化。为了满足各类外设的接口条件,研发阶段选用大众开发平台及通用产品,可有效避免因硬件接口不适配而被迫更换开发平台事故的发生。因此,系统选用STM8通用系列单片机作为主控芯片,其具备DMA硬件加速及驱动能力,并能提供UART、SPI、I2C、CAN等丰富的通信接口,可满足各类传感模块的硬件要求,有利于初、中期系统多样化开发。但是,随着模块功能趋于稳定,通用型产品中未使用的硬件区块将被闲置,需求较大的硬件接口却因单体芯片资源不足而需要扩容,造成资源及成本浪费。因此,后续可结合具体需求进行定制设计,并选用适配的专用芯片。

5 结论

本文从电气互连模式、故障诊断处理、数据挖掘分析等角度开发了一套基于无线通信的地铁商业电气监控系统,并提供了成果应用实例,解决了传统电气设备互连路由空间受限、线材接口繁冗复杂等问题,并在数据可视化、系统智能化等方面进行了功能升级,使系统更适配商业板块的电气监控使

用需求。

参考文献

- [1] 琚永刚,徐德勤,侯红磊,等.智能模块化终端配电系统设计[J].电气技术,2022,23(5):68-72.
- [2] 张逸,李渴,邵振国,等.基于数据关联性分析的工业用户电能质量特征识别[J].电工技术学报,2023,38(13):3512-3526.
- [3] 黄震,敬沅坤,闫克,等.面向输变电场景的无线传感网通信性能测试研究[J].电气技术,2024,25(3):53-57.
- [4] 陈亚鹏,杨阳,舒乙凌,等.基于业务性能偏差感知的电力通信网路由优化策略[J].电工技术学报,2024,39(11):3411-3421.
- [5] 贾惠彬,武文瑞,吴堃,等.基于异步整形机制的智能变电站通信队列调度策略[J].电工技术学报,2024,39(17):5422-5433.
- [6] 杨更更.Modbus软件开发实战指南[M].2版.北京:清华大学出版社,2021.
- [7] 薛君.无线传感器网络技术与应用[M].北京:电子工业出版社,2019.
- [8] 马志溪.建筑电气及智能化工程设计[M].北京:化学工业出版社,2019.
- [9] 牛晓玲.电气设备智能化监控系统设计[J].无线互联科技,2021,18(16):53-54.
- [10] 谢文君,刘猛,谢金莲,等.城市轨道交通数据采集与监控系统拓扑着色与二次逻辑可视化方法研究[J].电气技术,2024,25(9):65-70.
- [11] 李伟杰.基于智能物联网的电池组群管护系统[J].电气技术,2023,24(2):64-70.
- [12] 柳全成.基于无线通信技术的建筑电气智能化控制系统[J].自动化与仪器仪表,2022(11):139-142.
- [13] 韩翔宇,纽春萍,何海龙,等.电磁式断路器状态监测与智能评估技术综述[J].电工技术学报,2023,38(8):2191-2210.
- [14] 无线传感器网络设备电磁电气基本特性规范:DL/T 2065—2019[S].北京:中国电力出版社,2019.

收稿日期:2024-11-01

修回日期:2024-11-20

作者简介

林捷(1986—),男,广东省深圳市人,本科,高级电气工程师,主要从事企业电气设备智能化及电力监控方面的管理及研究工作。