

新型无线列调场强测试系统设计与实现

摘要: 无线列车调度指挥系统对保障铁路系统安全高效运行起着至关重要的作用。保障无线列车调度指挥系统自身安全的关键系统之一为无线列调场强测试系统。随着我国铁路系统的发展,虽然 GSM-R 数字通信系统得到了大量的普及,但是 450MHz 无线列调系统在我国铁路仍有着非常广泛的应用。目前,大部分铁路局现役的 450MHz 无线列调场强测试系统大都存在因设备老旧而导致的测试精度不高、兼容性差等问题。同时,科技水平的提高也对无线列调场强测试系统性能提出了更高的要求。本文以此为目标,依托于实验室的场强测试系统升级改造项目,根据场强测试系统结构特点,利用全新的测试仪器和设计方案对原有的场强测试系统进行全面的升级优化。

本文从场强测试系统的发展需求出发,融合以往场强测试系统的设计优点,基于多传感器定位融合理论设计了拥有全新系统架构的无线列调场强测试系统,并以此为基础实现了各类数据的采集、分析、处理、保存、实时曲线绘制、列车位置自动校正、人机交互界面等功能的实现,并通过仿真平台、实物平台测试了该系统的可行性后,完成了乌鲁木齐铁路局的现场测试任务。

关键词: 无线列调; 场强测试; 多模式; 数据融合; 多传感器

中图分类号: U284 **文献标志码:** A

Design and Implementation of Novel Wireless Field Strength Test System

Abstract: The wireless train dispatching command system plays an important role in ensuring the safe and efficient operation of the railway system. One of the key systems to ensure the safety of the wireless train dispatching command system is the wireless column scale test system. With the development of China's railway system, although the GSM-R digital communication system has been a lot of popularity, but the 450MHz wireless regulation system in China's railway still has a very wide range of applications. At present, most of the railway station active 450MHz wireless column scale test system mostly exist due to the old equipment caused by the test accuracy is not high, poor compatibility and other issues. At the same time, the improvement of the level of technology also on the wireless column field strength test system performance put forward higher requirements.

Based on the development of field strength test system, this paper designs the advantages of

收稿日期: ; **修订日期:**

基金项目:

the design of field strength test system. Based on the multi-sensor positioning and fusion theory, this paper designs a wireless column scale test system with a new system architecture. Based on this, Class data acquisition, analysis, processing, preservation, real-time curve drawing, train location automatic correction, human-computer interaction interface and other functions, and through the simulation platform, physical platform to test the feasibility of the system, completed the Urumqi Railway Bureau Of the field test tasks.

Key words: Railway Wireless Dispatching System; Field Strength Test; Multi-mode; Data fusion; Multi - sensor

引言

研究背景及意义

铁路系统对我国目前社会主义现代化建设起着至关重要的作用，其中列车无线通信调度指挥系统在保证铁路运行指挥，安全防护方面起着非常关键的作用。无线列调场强测试系统的职责既是按期检测各铁路沿线的无线列调场强的覆盖情况，记录相应数据并生成测试数据图表并找到弱场区。先前，为完成场强测试任务铁路部门要投入大量的人力在测试线路沿线各个车站提前待命协助测试。之后我国各个铁路局为改善这一情况相继开发了针对各自路局的无线列调场强测试系统，初步解决了人力物力资源浪费的问题。但目前铁路系统不断更新完善，但场强测试系统却一直没有进行大版本更新。随着铁路发展的需求，铁路标准统一化成为必然，满足列车高速运行中对无线列调场强信号的实时测量，适应多种无线电制式和兼容里程计 Odometer（简称 ODO）、机车安全信息综合检测装置 Comprehensive Supervisor for Locomotive Safety Information（简称 TAX 箱）、Global Positioning System（简称 GPS）等多种测试模式的场强测试系统。基于优化的计算机技术、多传感器技术、GPS 列车定位技术的新型无线列调场强测试系统也成为完善我国铁路无线列调场强测试的关键技术设备。

研究现状

现阶段在列车调度指挥方面，我国铁路系统中广泛使用的是 150/450MHz 单双工兼容制列车无线列调通讯系统，该系统利用配置在机车上的机车电台和在铁路沿线各车站的车站电台以及配置在调度所的无线调度总机等共同构成了铁路调度指挥系统专用的无线通讯系统。

我国现在大部分路局所使用的无线列调场强测试系统都是单工作模式，如北京交通大学曾与乌鲁木齐铁路局，上海局，南昌局等铁路局合作开发了诸如适用于里程计、适用于 TAX 箱定位和适用于 ESPI、EB200 等场强仪的的场强测试系统。之后为提高定位准确度有后续开发了基于 GPS 的辅助定位校正系统，来进一步精确列车定位。

无线列调场强测试中核心设备之一便是场强测试仪。随着科学技术的提高和铁路系统的发展，场强测试中对场强仪的性能要求也在不断提升。目前全路现有场强测试系统所用到的场强仪有 wiltek、ESPI、EB200、PR100 等。这些场强仪都能随都具备对场强的测试功能但其内在原理、通信模式、测量精度与频率大不相同。以 wiltek 和 ESPI 场强仪为代表的场强仪为测量精度较好、电平值输出，以 EB200，PR100 为代表的为测量精度高、字符串输出。

近年来我国铁路系统不断发展，对各类设备的性能要求都在不断提高。目前铁路系统除了推进设备升级之外，铁路设备标准统一化也成为了铁路相关设备系统的一种发展趋势。无线列调场强测试系统发展至今已有十余年历史，其系统性能全面提升与设备标准的统一也是其未来发展的主要方向。

选题意义及创新点

本文在对目前无线列调场强测试系统发展过程和现状研究的基础上，对我国目前歌铁路局对于既有无线列调场强测试系统的升级需求进行了详细分析。从系统、硬件、软件、功能模块四个层级对其进行了研究论述。本文在此基础上提出了基于全新设备的新型无线列调场强测试系统设计方案，并在对其功能经行进一步分析后设计了基于全新硬件软件结构的拥有多工作模式的新型无线列调场强测试系统，并完成了对该系统的设计实现与现场测试。

提出新的基于多源异步数据多线程采集分析技术的多工作模式的软件系统结构。并在此结构上对软件整体功能进行了模块化细分。提出了利用 GNSS 定位来辅助 ODO 或 TAX 箱实现列车运行里程自动校正算法的设计和实现。讨论了场强统计过程中参数最优值的配置并对其进行了实现，提出

了新的软件数据处理方式并对其进行了设计实现。本章最后对该软件系统的整体实现情况进行了仿真平台、实物平台测试并参与了乌鲁木齐铁路局的现场测试。论文的总结构如图 1-1 所示。

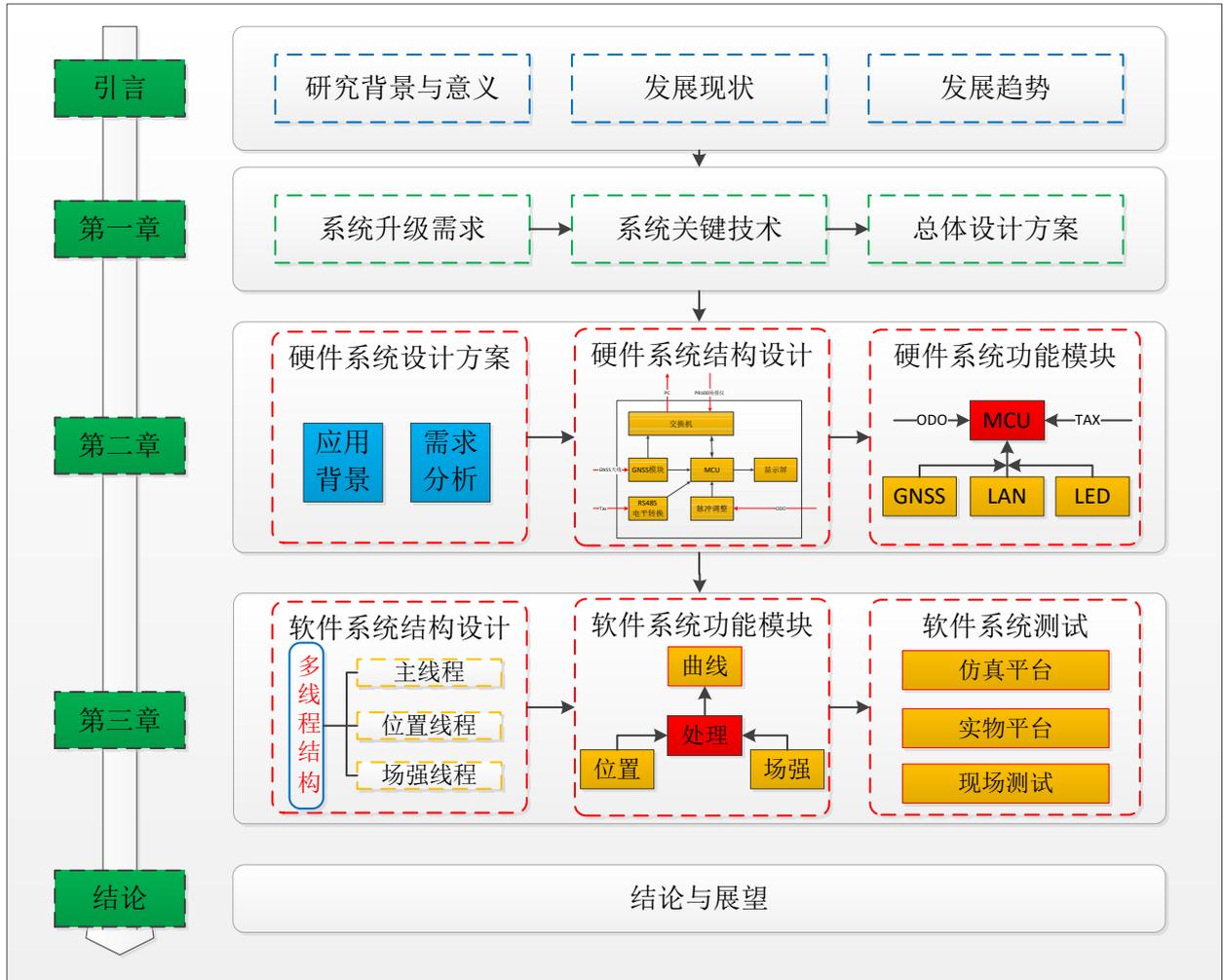


图 1-1 论文组织结构图

Fig 1-1 Organizational chart of paper

1 无线列调场强测试系统升级需求及关键技术分析

1.1 无线列调场强测试系统升级需求分析

铁路系统经历了快速的发展，GSM-R 通信数字通信系统得到了大量的普及，但 450MHz 无线列调系统在我国铁路仍有着非常广泛的应用。无线列调场强测试系统从开发至今已有十余年的历史，加之近几年科学技术得到了快速的发展，目前大部分铁路局现役的 450MHz 无线列调场强测试系统设备大都因为年代久远而存在设备老化、稳定性降低、测量精度不足等问题。因此目前全路大部分铁路局都有着强烈的无线列调场强测试升级需求。

1.2 系统关键技术分析

无线列调场强系统在多年的发展过程中，高精度的列车定位、更加准确的场强值采集、更准确的数据同步是场强测试系统不断尝试突破的指标。通过不断的尝试和长期的现场测试基本确定了影响这些技术指标中所涉及到的关键技术种类，包括：里程计（ODO）、TAX2 型机车安全信息综合检测装置（以下简称 TAX 箱）、GNSS 模块、多传感器定位融合、场强仪等。本文以下将就这几项关键设备进行技术分析。

1.2.1 基于 ODO 的列车定位关键技术

利用 ODO 来实现列车定位是现有列车定位方式中使用最普遍的一种。ODO 传感器成本低，使用简单，运行稳定。里程计 ODO 在车轮转动时会产生方波脉冲，按照对此脉冲进行计数和测频就可以得到列车的速度和里程，所以里程计可适用作列车定位系统中的传感器^{错误!未找到引用源。}。然而由于 ODO 与车轴硬件连接在一起，会受到硬件层面的直接干扰，因此更易造成各种误差，而且由于 ODO 累计的特性会使这些误差也随着距离增加不断增加，使测量误差逐渐增大。利用 ODO 对列车定位时的误差一般出于两种情况：一个是计数误差：如空转、打滑、滑行、蠕滑；另一个是车轮磨损：因为车轮摩擦消耗导致车轮直径与标称值不同，因此导致里程计算的误差产生^[2]。

1.2.2 基于 TAX 箱的列车定位关键技术

TAX 箱全称为：TAX2 型机车安全信息综合检测装置。该装置为株洲电力机车研究所牵头研发的机车安全信息综合检测装置。该装置将机车运行中各种相关的安全信息检测板卡集成在同一机箱内，可同时获得列车运行过程中的各项监控数据如车次号、时间、速度、公里标等信息，具有高度集成的特点。

根据 TAX 箱的通信协议，本文通过将其发送的数据根据通信协议解包的方法得到相应的列车时速、位置信息，从而实现列车定位。TAX 箱通信协议如表 2-1 所示：

表 2-1TAX 箱通信协议

Tab 2-1 TAX Communication Protocol

| 序号 | 内容 | 字节数 | 内容说明 |
|----|-----------|-----|-------|
| 1 | 本版地址（39H） | 1 | |
| 2 | 特征码 | 1 | |
| 3 | 检测单元号 | 1 | |
| 4 | 月、日、时、分、秒 | 4 | |
| 5 | 时速 | 3 | D9-D0 |
| 6 | 预留 | 1 | |

| | | | |
|----|---------|---|--------|
| 7 | 预留 | 1 | |
| 8 | 预留 | 2 | |
| 9 | 预留 | 1 | |
| 10 | 公里标 | 3 | 单位：米 |
| 11 | 总重 | 2 | |
| 12 | 计长 | 2 | 单位：0.1 |
| 13 | 辆数 | 1 | |
| 14 | 本/补，客/货 | 2 | |
| 15 | 车次 | 1 | |
| 16 | 区段号 | 1 | |
| 17 | 车站号 | 2 | |
| 18 | 司机号 | 2 | |
| 19 | 副司机号 | 2 | |
| 20 | 机车号 | 1 | |
| 21 | 机车型号预留 | 2 | |
| 22 | 预留 | 2 | |
| 23 | 检查和 | 1 | |
| 24 | | | |

1.2.3 基于 GNSS 的列车定位关键技术

GNSS 的两项重要参数便是精度和准确度。实际应用中精度和准确度较少分开提及。精度的定义为测量值在测量均值附近的聚合程度，于此同时准确度的定义为估计值与真值的贴合程度^{错误!未找到引用源。}。在研究当中，大多数情况下并不会把两者单独处理，一般情况用精度来统一表示观测值与真值的符合度。

GNSS 测量精度的估计可以使用静态和动态测量技术手段实现。静态测量即为对同一坐标点在某一时间段内进行测量后对测量数据进行相关统计得到精度的统计结果。精度可以用均方根误差（root mean square error-RMS）和圆概率误差（circular error probable-CEP）表示^{错误!未找到引用源。}。

根据置信概率相关理论可以得知：1，2，3 倍标准差的置信概率分别为 68.3%，95.5%，99.7%。通常条件下对精度的计算大都以 1 倍标准差为基准，且通常使用距离均方根（DRMS）、2DRMS、圆概率误差（CEP）和圆心偏离概率（R95）表示二维精度，如表 2-2 所示：

表 2-2 精度参数计算表

Tab 2-2 Precision parameter calculation table

| 精度计算 | 计算公式 | 置信概率 |
|-------|---|------|
| DRMS | $DRMS = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ | 65% |
| 2DRMS | $2DRMS = 2\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ | 95% |
| CEP | $CEP = 0.59(\sigma_x + \sigma_y)$ | 51% |
| R95 | $CEP = 1.2272(\sigma_x + \sigma_y)$ | 95% |

GNSS 接收机的关键性能参数之一便是定位精度。目前定位精度在 10 米左右的 C/A 码 GPS 接收机应用比较广泛，此外还有测试精度可以达到厘米级的高精度 GPS 接收机。场强测试系统能否利用 GNSS 来进一步提升现有定位方案所考察的关键点便是其定位精度^[5]。

1.2.4 多传感器定位融合理论

对于多传感器定位系统而言，信息源传感器往往包括如陀螺仪、加速计、GPS 接收机、里程计等是多传感器信息融合定位的硬件基础。这些传感器所采集到的数据便是要融合的子对象，把这些子对象按照一定的算法结构进行融合，最终得到最优的定位方案，这样便构成了多传感器定位定位系统^[6]。

在列车定位系统中，通常依靠里程计、加速度计、陀螺仪、GPS 等传感器提供的列车运行状态信息对列车进行定位。目前还不存在能够单独提供完全准确的列车定位信息的传感器存在，所以要利用多传感器信息融合技术来对多个传感器系统进行数据融合，进而得到精确度更高，更可靠的定位信息^[7]。

1.3 新型无线列调场强测试系统总体设计方案

1.3.1 系统功能需求分析

无线列调场强测试系统是为了测试铁路沿线无线列调场强值强度是否符合铁路通信标准的测试系统。本文在分析了多个路局现有的场强测试系统设计结构以及结合各路局在现场测试中对系统使用所遇到的问题进行了分析，提出了新型场强测试系统应该满足的设计需求和相应的解决方案，如图 1-2 所示：

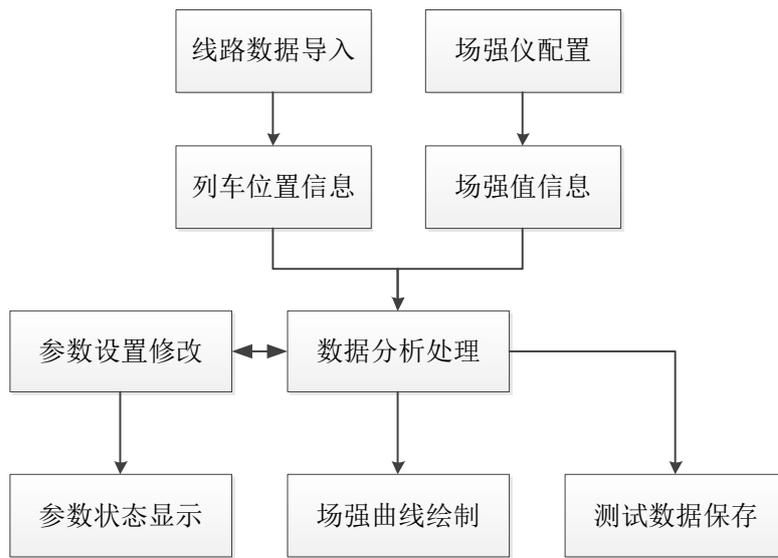


图 1-1 系统需求流程图

Fig 1-2 System requirement flow chart

1.3.2 系统结构设计与模块分析

1) 系统结构设计

本文在对系统需求、功能需求、升级需求进行了详细的分析之后设计了本系统的整体结构。系统整体设计采取高度集成的设计思想，将 ODO、TAX、GNSS、交换机及相关模块全部集成在了适配器当中，与计算机通过网口进行通信，采用 PR100 场强仪和联想 ThinkPad 作为外界设备。具体系统结构如图 1-3 所示：

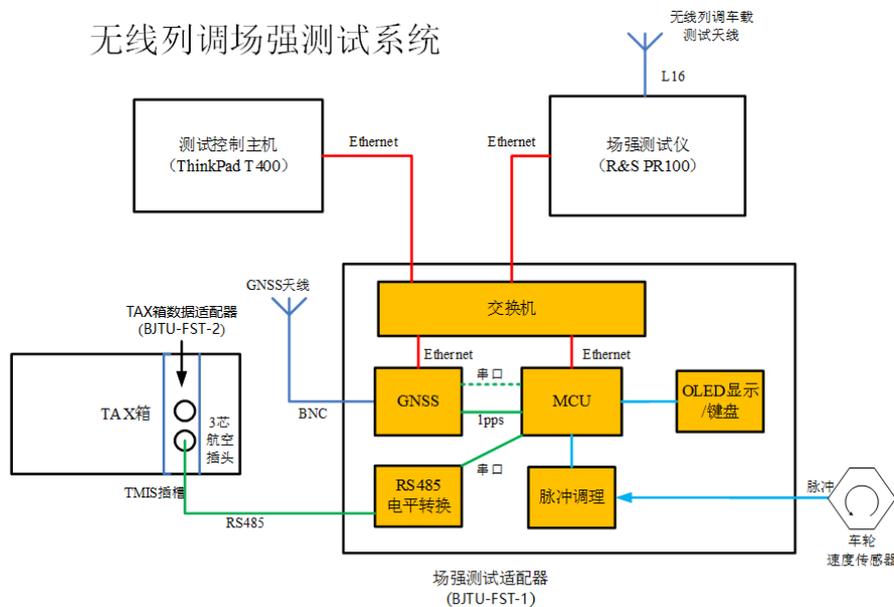


图 1-2 硬件系统架构图

Fig 1-3 Hardware system architecture diagram

(2) 系统模块分析

本文为实现新型无线场强测试系统的主要功能，在原有场强需求基础上结合本文所提出的多工

作模式对系统设计了如下功能模块来满足系统需求。包括：里程库选择模块、场强仪设置模块、列车定位模块、场强采集模块、模式选择模块、数据处理模块、数据储存模块、参数显示模块、参数修改模块、曲线绘制模块。模块间相互关系如图 1-4 所示：

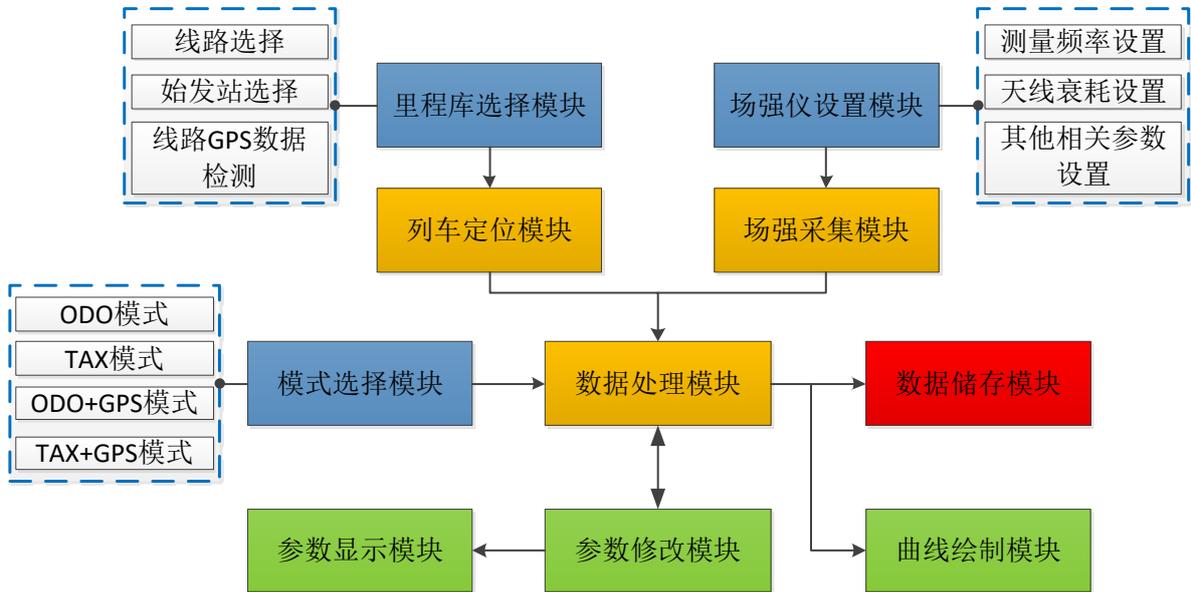


图 1-3 系统模块分析图

Fig 1-4 System module analysis diagram

2 无线列调场强测试系统硬件设计与实现

无线列调场强测试系统的主要职能为对铁路沿线无线调度通信设备的场强分布做实时测量、场强曲线图绘制以及数据处理、记录的综合测试系统。在系统主要硬件设备包括测试控制主机（笔记本电脑）、场强测试仪、场强测试适配器、车轮速度传感器、TAX 箱以及场强适配器。

2.1 硬件系统设计方案与思路

2.1.1 适配器设计方案

本系统主要应用于对我国铁路沿线 450MHz 无线列调场强的测试。场强测试适配器用来将 GNSS 接收机、车轮速度传感器以及 TAX 箱数据适配器的列车位置、速度、里程信息进行同步，并发送给测试控制主机，同时场强测试适配器还通过以太网交换机，提供场强测试仪、测试控制主机以及场强测试适配器之间的网络通道。

2.1.2 适配器结构设计与模块分析

本文在对适配器设计方案进行仔细分析后提出基于模块化的适配器硬件设计方案，具体结构如图 2-1 所示：

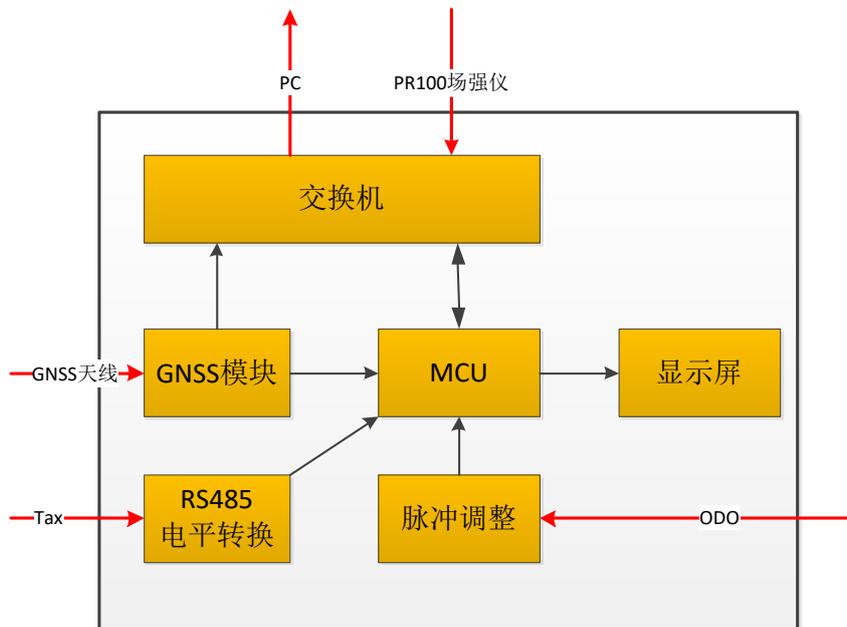


图 2-1 硬件系统结构图

Fig 2-1 Hardware system structure diagram

在设计中本文根据适配器设计需求对其设计了若干功能模块，具体包括：接口模块、供电模块、显示模块、GNSS 模块、交换机模块、主控模块。

2.2 通信协议设计

在对系统需求和硬件系统结构设计完成之后，本文在此基础上设计了基于新型适配器和 PC 的通信协议，考虑到系统开发时间周期，本系统在初版协议中暂时不添加场强控制主机向场强测试适配器发送命令内容，只做协议预留。场强控制主机向场强测试适配器发送命令详细格式如表 2-1 所示：

表 2-1 适配器通信协议

Tab 2-1 Adapter Communication Protocol

| 帧头 | 帧数据 | | | 帧尾 |
|-------|-----|-------------|--------|-----|
| \$ODO | 流水号 | 每 100ms 脉冲数 | 累计总脉冲数 | 校验位 |
| \$TAX | 流水号 | TAX2 原始数据 | | 校验位 |
| \$GPS | 同步位 | NMEA 原始数据 | | |

2.3 场强适配器硬件实现与系统调试

2.3.1 硬件模块设计实现与调试

在本系统硬件的设计与实现部分，本文主要研究硬件系统的调试过程。所以本文后续将着重从模块调试的角度来对各模块设计与实现进行介绍。

1) 主控模块设计实现与调试

对主控模块的调试基于 Keil5 软件开发环境。本文根据硬件系统需求分析对主控板采用以 STM32F103 单片作为本系统的核心 MCU。该 MCU 可很好的满足系统关于数据传输和处理的需求并且性价比很高应用很广泛。根据系统架构和需求陆续设计了两套 PCB 板如图 2-2、图 2-3 所示。



图 2-2 一代主控模块

Fig 2-2 First generation master control module



图 2-3 第二代主控模块

Fig 3-3 Second generation master control module

2) 电源模块选型

考虑到硬件部分需要用到 DC-14V\5V\3.3V 多种电源输入，经过比较选型后选择的电源模块为：永明电源生产的型号为 YMGUL-2085DIXA 电源模块，如图所示：



图 2-4 电源模块

Fig 2-4 Power supply module

3) 显示模块设计与调试

为了更直观的显示测试情况，实时显示适配器运行状态和部分测试数据，系统采用 OLED 显示屏来显示相关测试信息。显示屏为 5V 供电 0.96 寸的单色显示屏，在实际调试中显示效果如图所示：



图 2-5 LED 显示模块

Fig 2-5 LED display module

4) GNSS 模块设计与实现

考虑到列车定位需求，在 GNSS 模块选择中本系统采用了 UB351 北斗/GPS/GLONASS 高精度 OEM 板作为 GNSS 模块的核心板，之后为满足系统自身的设计需求又在核心板基础上设计了 GNSS 模块扩展板卡，用于满足适配器的设计需求。两者共同构成 GNSS 模块，如下图所示：



图 2-6 GNSS 模块

Fig 2-6 GNSS model

GNSS 模块的使用需要进行初始参数的配置,具体配置方式要通过 TTL-232 串口转接器向 GNSS 模块发送配置指令。本文经过对 UB351 模块的仔细研究后,依照配置要求对其进行调试和参数配置,该 GNSS 模块配置为通信频率为 1HZ,提供 GNRMC、GNGGA 等 GNSS 相关信息,具体调试结果如图所示:



图 2-7 GNSS 调试数据

Fig 2-7 GNSS debug data

5) GNSS 天线选型

本文依据硬件系统需求分析,为满足列车高精度定位的需求,本系统采用了 Novatel 公司生产的型号为 GPS-701-GG 的 GPS 天线,利用该天线可以较好的完成相关定位数据采集任务。如图所示:



图 2-8 天线外观图

Fig 2-8 Antenna appearance

天线的外观参数数据如下图所示：



图 2-9 天线参数图

Fig 2-9 Antenna parameter diagram

6) 网络交换机模块选型

网络交换机模块用于将主控板和 PR100 场强仪的输出数据用过一个 LAN 口发送至 PC。根据需求分析。设备图片及详细参数如下：



图 2-10 交换机模块

Fig 2-10 Switch Module

图为在调试中交换机工作图：

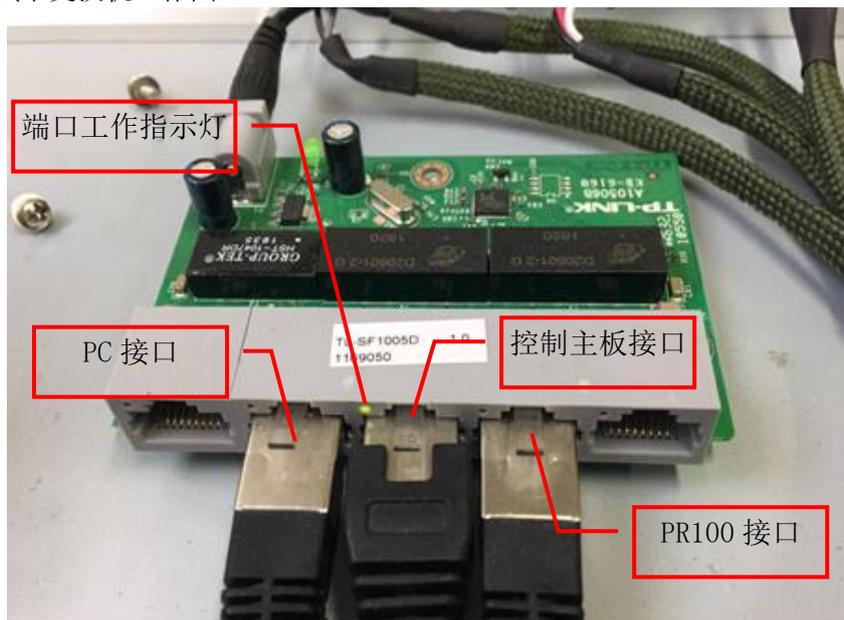


图 2-11 交换机工作图示

Fig 2-11 Switch working diagram

2.3.2 硬件系统整体实现结果

本文通过硬件系统需求分析、方案设计、结构设计、各模块功能实现一系列工作后完成了对硬件系统的整体实现。适配器内部各模块链接如图所示：

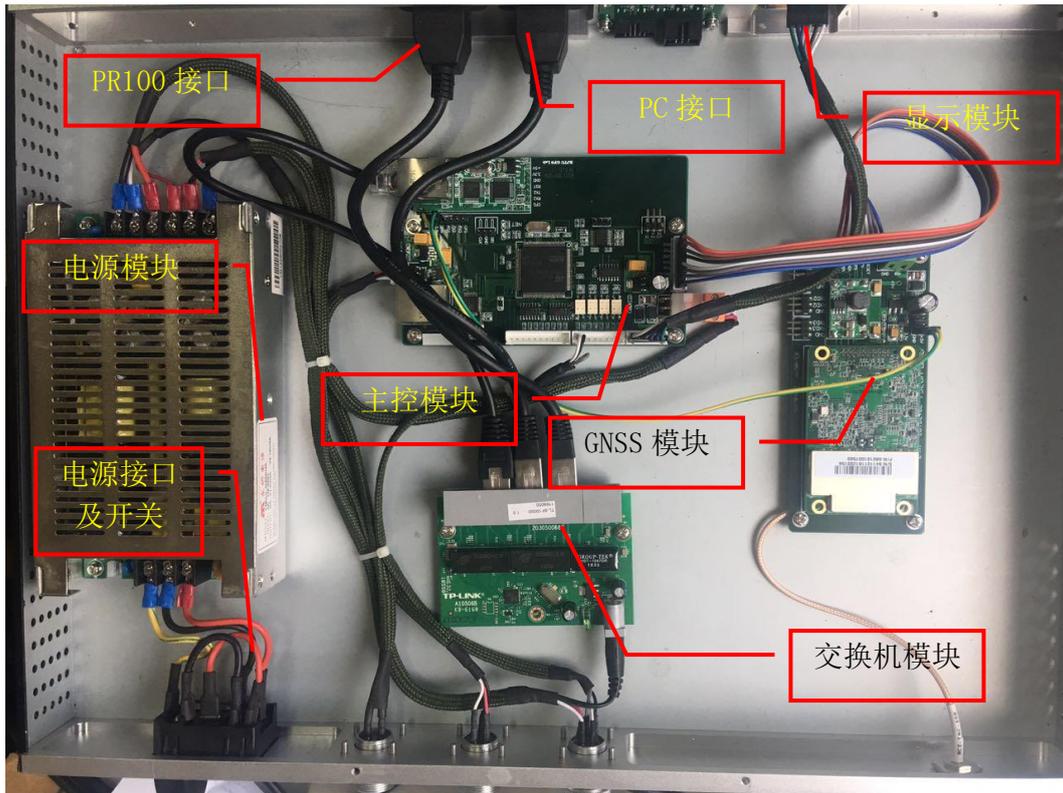


图 2-12 硬件系统整体结构

Fig 2-12 Overall structure of hardware system

在图中我们可以清晰地看到电源模块、主板模块、GNSS 模块、交换机模块、显示模块之间的连接关系。该适配器经过调试目前已经可以自动接收来自 ODO、TAX 箱、GNSS 定位板的数据信息，并自动将其按照通信协议组包后，经由交换机模块发送至 PC。前面板的 LED 显示模块不仅让测试效果更加明显也让系统调试中一般情况下无法直接看到的中间量通过 LED 显示出来，对以后硬件开发也具有借鉴意义。

3 无线列调场强测试系统软件设计与实现

无线列调场强测试软件是整个测试系统中最为关键的部分，本文基于前几章对于场强测试系统需求及设计方案的深入分析，在此对无线场强测试软件整体的设计与实现进行详细的研究。

3.1 软件设计方案与思路

3.1.1 软件应用背景与需求分析

无线列调场强测试软件是整个系统中对测试数据进行处理、分析、统计、显示的平台，也是操作人员进行测试任务的手段工具。再结合本文之前对系统功能方面的分析，目前我国针对场强测试软件所存在的功能需求主要有：位置信息采集功能、场强信息采集功能、数据处理分析处理功能、基本参数设置功能、场强曲线绘制功能、测试参数实时显示功能、相关参数实时修改功能、测试数据存储功能，各功能需求之前的关系如图 3-1 所示：

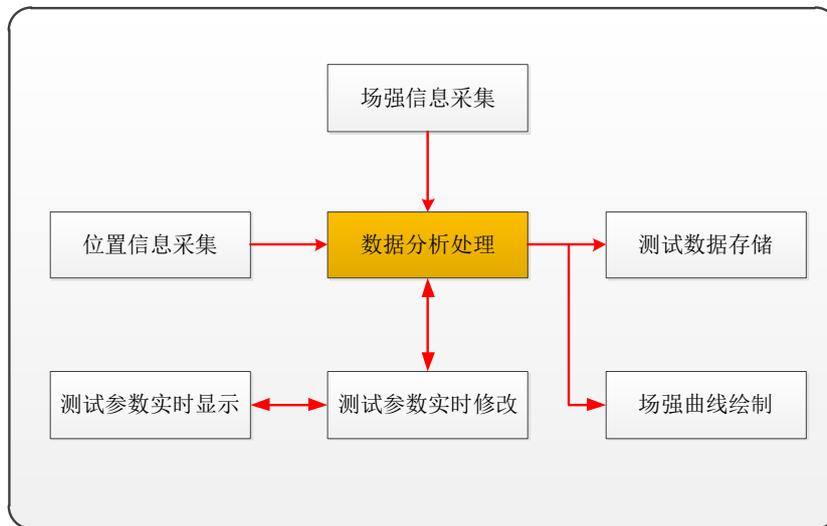


图 3-1 软件功能需求分析图

Fig 3-1 Software functional requirements analysis diagram

3.1.2 软件结构设计与模块分析

本文在系统整体结构设计和系统硬件设计的基础上，结合软件方面的需求分析对软件结构进行了细致的设计。软件采用 MFC 框架，利用多线程技术，在 VS2015 上进行开发。软件整体设计架构如图 3-2 所示：

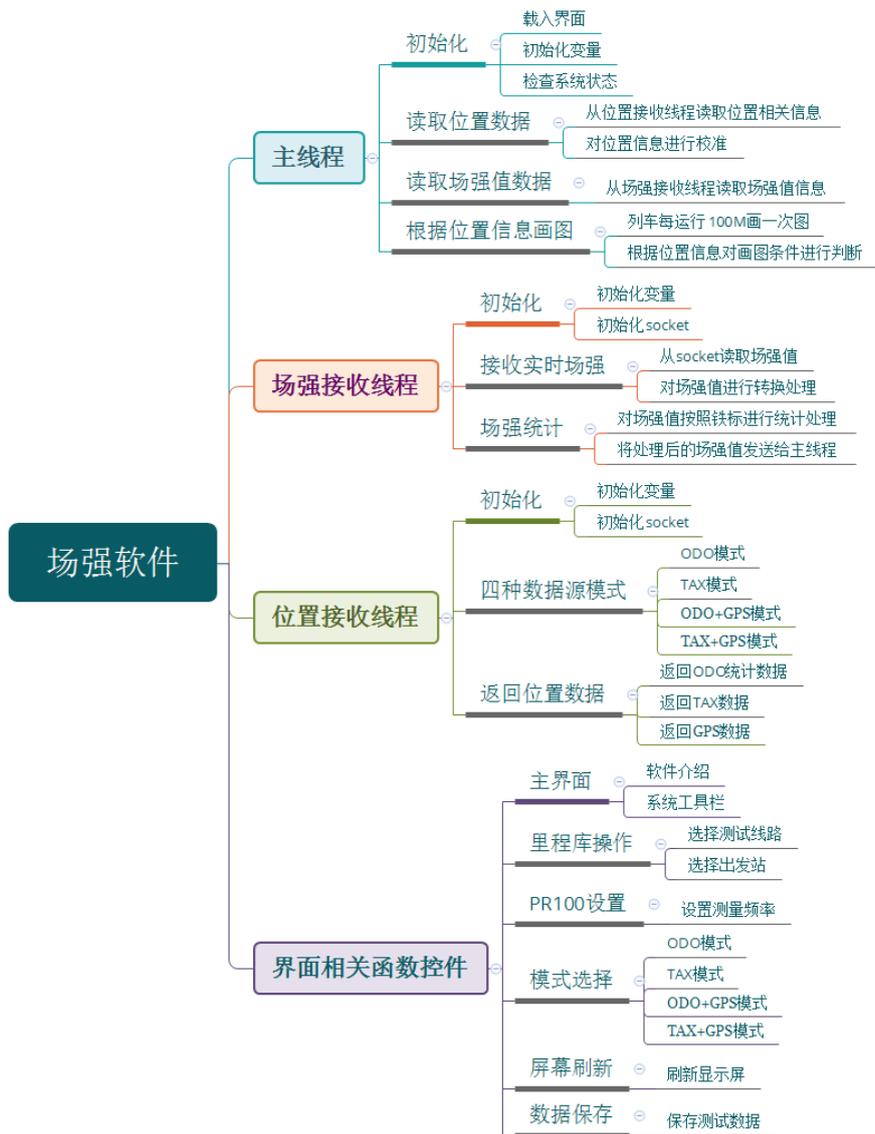


图 3-2 软件系统架构图

Fig 3-2 Software system architecture diagram

本文所设计的软件结构一大特点是其采用了多线程技术，主线程、场强值接收线程和位置接收线程各司其职，巧妙地解决了多个通信频率不同的设备集成控制问题。

本文在该设计结构的基础上为了进一步细化设计方案，将软件整体拆分产若干功能模块是系统结构设计更加细化。软件内部功能模块设计及其功能如图所示：

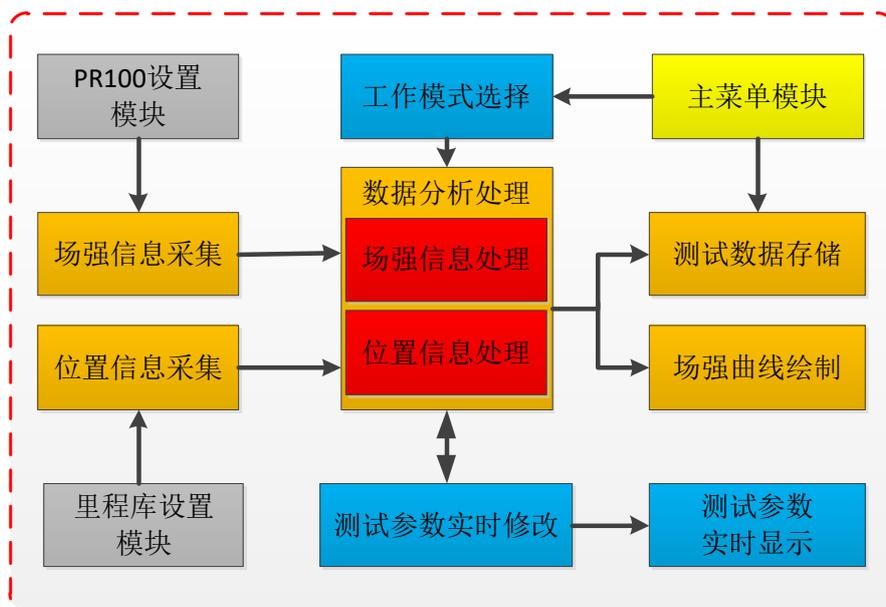


图 3-3 软件功能模块

Fig 3-3 Software function module

3.2 软件功能设计与实现

3.2.1 多模式列车位置信息采集方案设计与实现

本系统实现列车位置信息采集的模式有四种，分别为 ODO 模式、TAX 模式、ODO+GPS 模式、TAX+GPS 模式。适配器将各种传感器原始数据按照通信协议传送至接收主机之后，软件根据当前的工作模式来对接收到的数据进行相应的解包分析操作。

(1) 基于 ODO 模式的位置信息采集方案

里程计 ODO 产生的原始数据为正交编码的方波脉冲，脉冲通过航插输入至适配器主控模块进行计数和统计，并返回每 100ms 脉冲计数值和累计脉冲数至 PC。软件在该模式下，对接收到的数据进行 ODO 数据提取操作，通过对帧头、帧尾标识的判断解包出此刻的 ODO 数据，并根据通信协议格式取出当前的每 100ms 脉冲数和累计脉冲数。根据每 100ms 脉冲数我们可以计算得到列车当前行驶速度，具体计算方式为：

$$U = \frac{\pi d}{1000 pulse} \quad (1)$$

式中： U—— 车轮传感器每产生一个脉冲所表示的列车行进距离（单位： m）；

d—— 表示车轮直径（单位： mm）；

pulse—— 该型号的车轮传感器随车轮转一圈所产生的脉冲总数。

接下来我们根据 U 便可计算出列车此刻的速度值，计算公式如下：

$$V = \frac{10n \times U \times 3.6}{2} \quad (3.2)$$

式中： n—— 每 100ms 所采集到的脉冲数；

3.6—— m/s—km/h 转换系数；

2—— 适配器分频系数；

由上面两式联立化简可得：

$$V = 0.018 \frac{n\pi d}{pulse} \quad (3.3)$$

式中各个变量均为可直接获取量。

根据累计脉冲数我们可以计算得到列车累计行驶里程，具体计算方式为：

$$S = (N_{\text{总}} - N_0) \times U \quad (3.4)$$

式中： $N_{\text{总}}$ ——适配器此刻统计到的总脉冲数；

N_0 ——表示列车在出发点时适配器显示的总脉冲数；

2) 基于 TAX 模式的位置信息采集方案

在该模式下，列车速度与位置信息均由 TAX 获取。TAX 箱相应板卡的数据输出通过 485 串口接入适配器的接收单元，再由适配器打包后按照通信协议格式发往 PC。

在此模式下，PC 接收到 TAX 数据后，先计算校验位来检测数据有无出错，再对其流水号、本版地址、特征码、检测单元号进行校验，以判断 TAX 箱数据有无丢失、TAX 配置格式是否正确等。以上检查都无误通过后，根据数据间的分隔符来依次解包取出数据中包含的列车相关信息。包括时间、实速、机车信号、公里标等相关信息。

之后将接收到的实速、公里标信息进行移位转换操作转换成可供软件计算操作的格式后直接供主线程进行位置判断及画图操作。

3) 基于 ODO+GPS 模式的位置信息采集方案

在该模式下，除采用里程计（ODO）作为位置信息采集源以外还利用 GNSS 模块采集列车的实时 GPS 定位信息，通过融合算法来实现对 ODO 定位的误差校正。

通过 GNRMC 数据得到相应位置的经纬度信息，通过格式转化将其转换为二维坐标位置点 $N_n(x_n, y_n), N_{n-1}(x_{n-1}, y_{n-1})$ 。则两点间实际距离可由以下公式计算得到：

$$L = \sqrt{(x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2} \quad (3.5)$$

式中： $N_n(x_n, y_n)$ 错误!未找到引用源。——当前位置坐标点；

$N_{n-1}(x_{n-1}, y_{n-1})$ 错误!未找到引用源。——代表前一个基准点位置坐标点；

L——两点实际距离

则此时通过 ODO 里程信息可以分别得到在两个校正点位置的 ODO 总脉冲数，此时可以通过 ODO 总脉冲数计算得到 ODO 测得的列车行驶距离。计算方式如下：

$$L_{odo} = (N_n - N_{n-1}) \times U \quad (3.6)$$

式中： N_n ——在此基准点 ODO 传感器的总脉冲数；

N_{n-1} ——在前一个基准点 ODO 传感器的总脉冲数；

L_{odo} ——通过 ODO 传感器计算得到的两个较准点间的距离；

虽然此方法对列车定位的精度在 m 级。但在列车场强测试中此精度已完全可以满足场强图绘制精度以及数据测试精度的要求。且该融合定位方案结构简单成本较低，运行稳定，故本系统中采取如上的设计结构来实现对列车的定位。

4) 基于 TAX+GPS 模式的位置信息采集方案

在该模式下，除采用 TAX 箱作为位置信息采集源以外还利用 GNSS 模块采集列车的实时 GPS 定位信息，通过融合算法来实现对 TAX 中列车位置数据的误差校正。TAX 箱可以通过读取相应字节的数据来获取列车当前的速度和位置信息。

5) 多模式列车定位信息采集方案的软件实现

基于上述文中的设计思想，操作人员在对工作模式进行设定之后，软件根据设定对接收数据根据通信协议进行解包，进而提取其中的列车位置数据。具体软件设计流程如图 3-4 所示：

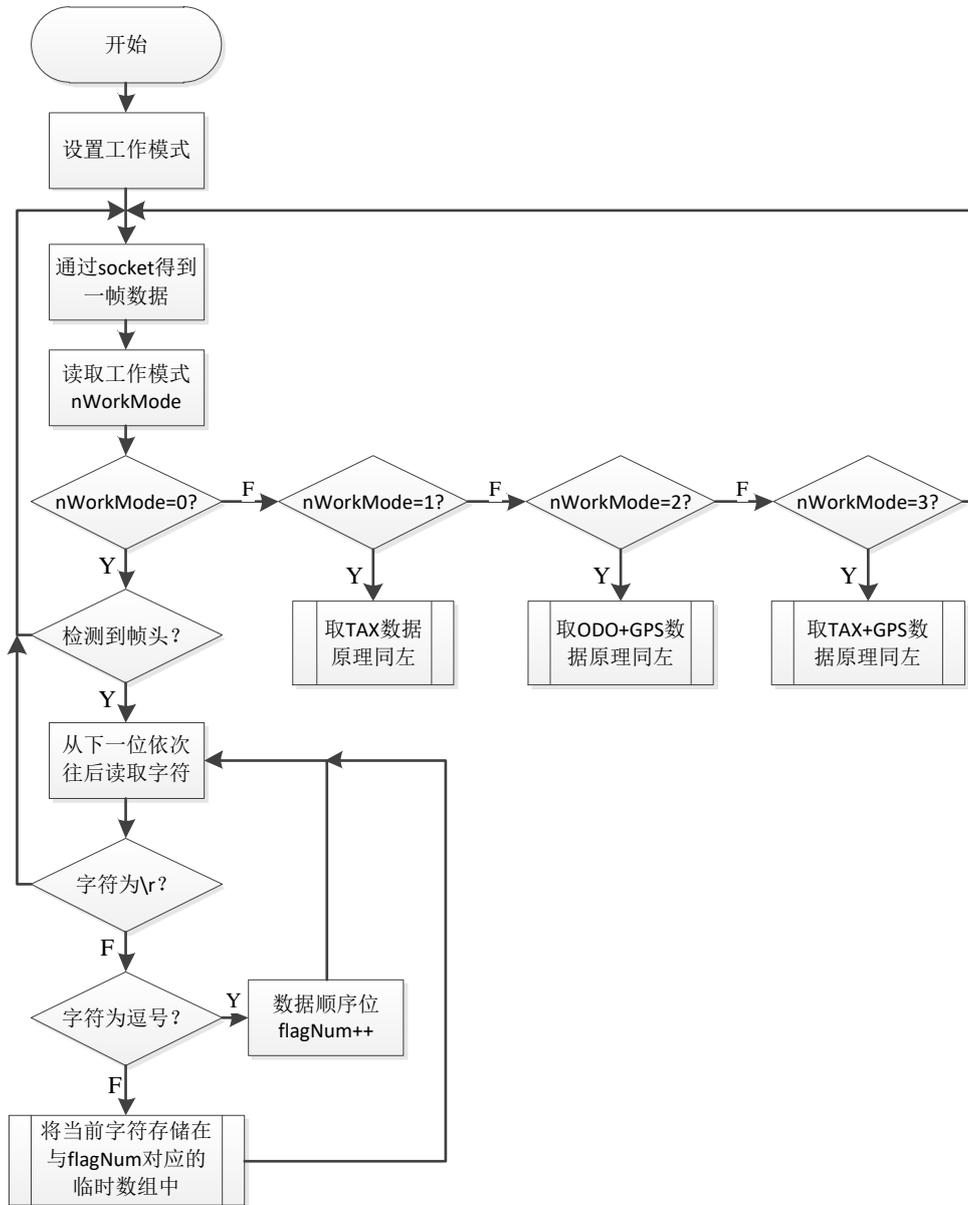


图 3-4 位置线程解包流程图

Fig 3-4 The position of thread unpacking flowcharts

3.2.2 场强值信息采集方法及实现

本文对场强值采集、统计、处理的过程根据铁道部关于无线列调场强测试的文件标准要求进行设计。软件系统将场强原始数据通过场强接收线程读取进来保存在临时变量中，然后按照铁标相应标准统计得出在该位置的采样率为 95%，90%，50%的统计场强值，并结合列车位置信息绘制成铁路线路场强测试曲线、并在测试界面实时显示。并将测试数据存储存储在测试文件中以便通过数据处理软件进行进一步分析、打印。具体软件实现流程如图 3-5 所示：

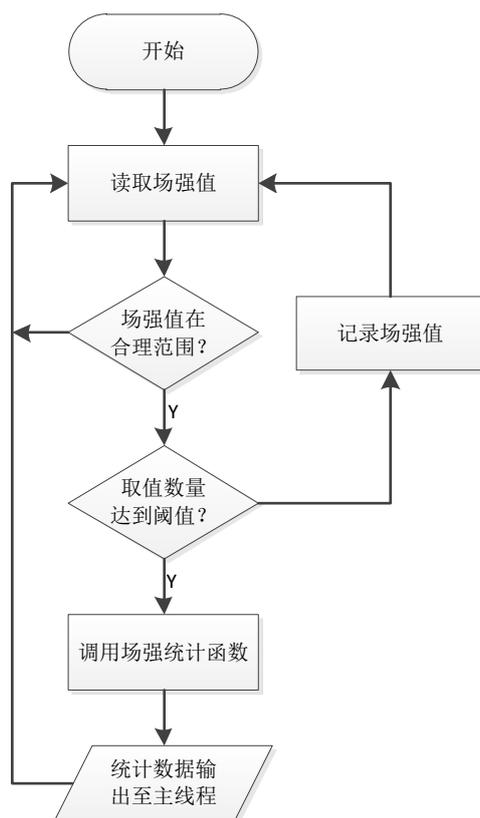


图 3-5 场强值线程流程图

Fig 3-5 Field strength thread flow chart

接收线程独立工作，场强统计任务在线程内部完成，独立于主线程，提高了系统对异步数据的兼容能力，提高了系统的运算速度。

3.2.3 软件系统整体实现结果

在以上工作的基础上，以 C++ 为主要编程语言，结合 GitHub 托管平台，在 Windows 环境下利用 Visual studio 2015 对软件整体进行了实现。整个软件是基于 MFC 框架的应用程序，具体实现效果展示如下：

单击“启动测试”按钮启动当前的测试任务，如果在此之前没有进行过参数设置，则会提示先进行设置。系统将出现测试画面。此时可对测试线路的其他参数进行设置或修改，如车轮直径、统计概率、维护电平、测试补偿等，参数设置完毕后点击工具栏的“启动测试”按钮，系统开始实时对沿线场强进行测试、并在主界面画出场强测试曲线以及实时显示列车测试中的各项参数状态，如图所示：

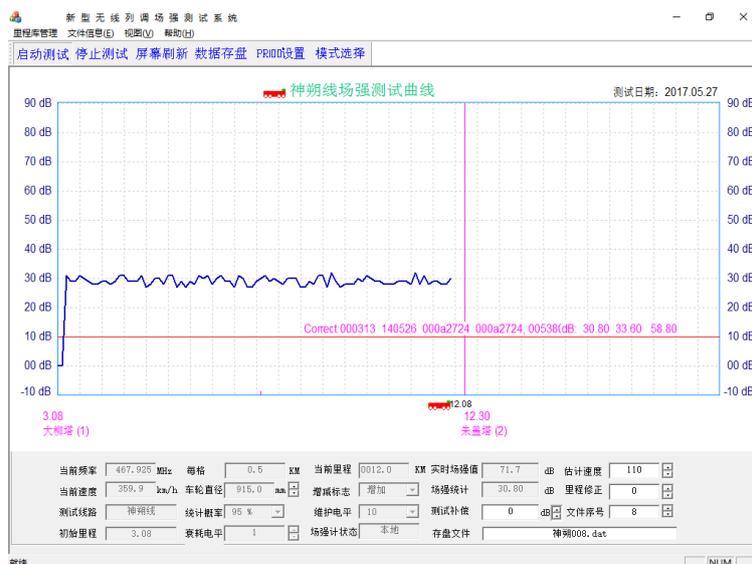


图 3-6 测试画面

Fig 3-6 Test picture

3.3 系统测试与效果分析

本系统为在 windows10 操作系统下全新开发的无线列调场强测试系统，目前整套系统在仿真平台、实物平台测试良好，本系统在 2017 年 3 月曾在乌鲁木齐铁路局春季场强测试中参与跟车测试，当时由于时间原因只开发完成了 ODO 一个模式，并较好的完成了初步测试。本文接下来将详细介绍新型无线列调场强测试系统的使用方法及其在各种条件下的测试与效果分析。

3.3.1 仿真环境测试与效果分析

为满足系统开发的各项要求，本系统还配套开发了场强测试仿真环境，具体包括：模拟适配器、模拟 PR100 软件。在仿真环境下，首先配置好模拟 PR100 和模拟适配器的 IP 地址，然后点击运行，运行结果如图：

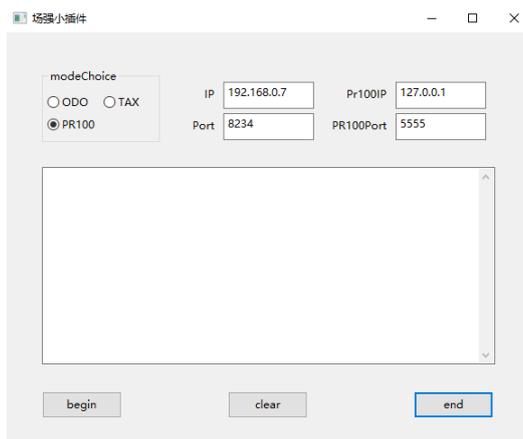


图 3-7 PR100 模拟器

Fig 3-7 PR100 simulator

在配置模拟适配器时，在 modeChoice 中选择 ODO 或 TAX，此时模拟器为模拟适配器接入 ODO 或 TAX 的工作状态。之后在右侧第一列编辑框中输入适配器 IP 和端口，分别为：IP: 192.168.0.7; Port: 8234.之后点击 begin，模拟器开始运行。

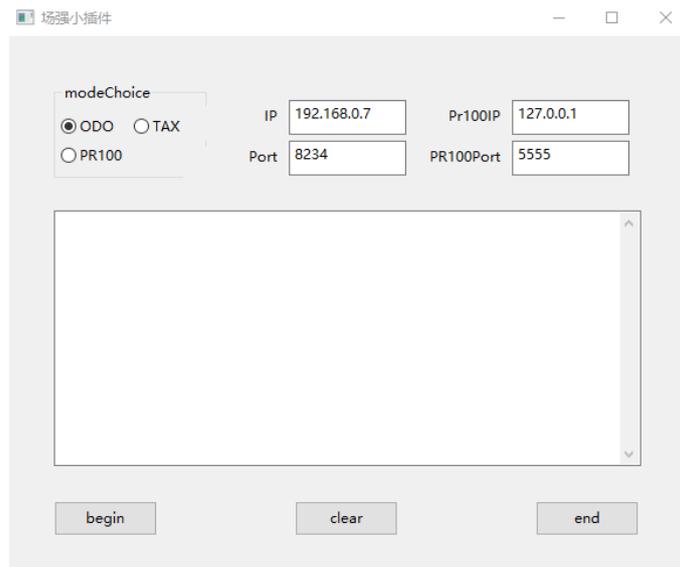


图 3-8 ODO 模拟器

Fig 3-8 ODO simulator

接下来打开软件，设置工作模式，设置场强仪，选择测试线路后在仿真条件下开始运行。如图所示：

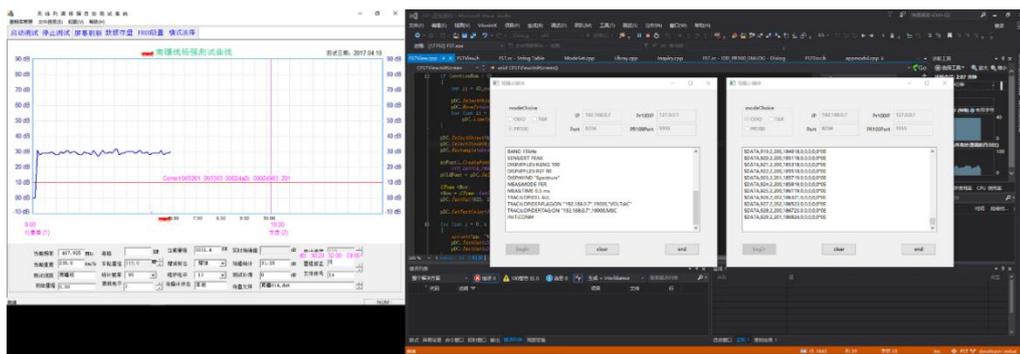


图 3-9 测试画面

Fig 3-9 Test picture

测试软件在仿真环境下的运行结果：



图 3-10 测试主界面

Fig 3-10 Test main interface

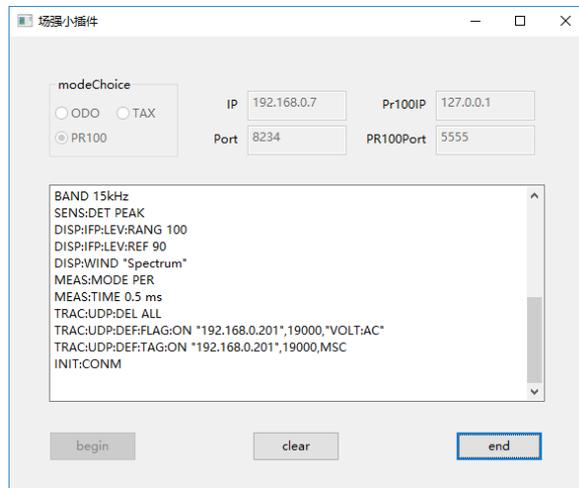


图 3-11 模拟 PR100 工作状态图

Fig 3-11 Simulated PR100 working state diagram

3.3.2 乌鲁木齐局测试与效果分析

本系统目前已开发至第二代软硬件版本，第一代单里程计（ODO）版本，也就是现系统的模式一。第一代使用旧版适配器硬件以及全新开发的软件，在乌鲁木齐局 2017 年 3 月份测试任务中圆满完成了其无线列调场强测试任务。下图为无线列调场强测试系统全部仪器设备。



图 3-12 第一代系统全部设备图

Fig 3-12 All equipment diagram of the first generation system

这次跟测任务的线路为：

乌鲁木齐—吐鲁番，吐鲁番—库尔勒，库尔勒—阿克苏

我们从乌鲁木齐铁路局机务段乘上测试专用车厢 SY998622，并跟挂在 9777 次机车后，对客运线路的电气化和非电气化区段全部进行测量。

下图为测试车厢 SY998622



图 3-13 测试车

Fig 3-13 Test car

测试途中我们与控发人员以及乌局测试人员对测试图像进行观察分析。记录下弱场区域，及时讨论解决方案，由于长途客运专线为夜间行车，我们所有人员坚守测试整夜，虽然非常劳累，但是一路测试都非常顺利，测试任务也圆满完成。

下图为在现场测试途中所绘制的场强图：



图 3-14 实际测试中绘制的场强曲线

Fig 3-14 Field strength curve drawn in actual test

现场测试效果良好，该系统很好的完成了沿线的场强测试任务，并且场强值测试精确、里程值误差控制良好，在实测中运行 1000Km 的统计误差只有 100 米左右。

5 结论

5.1 论文的主要工作和结论

在保障铁路系统安全、高效、有序的运行，无线列调扮演着至关重要的角色。在当前计算机技术飞速发展，铁路标准统一化环境下，为满足来自各方面的需求，无线列调场强测试任务迫切需要支持更新的操作系统，兼容更多测试环境，具有更多人性化功能，测试更加稳定、高效的无线列调场强测试系统。以往的场强测试系统随着时代的发展渐渐无法满足当今铁路系统的需求，因此本系统根据目前各路局对于无线场强测试的需要，设计实现了基于多模式的无线列调场强测试系统，并支持主流的操作系统且无需驱动软件，有效的兼容了各种测试环境，并为系统的进一步升级优化打下了良好的设计思想和基础。具体工作和总结如下：

1) 论文从兼容性、稳定性、可改造性方面分析了现有的无线列调场强测试系统在各铁路局的使用情况，分析了现有无线列调场强测试系统的局限性，并对本系统的兼容性和稳定性进行了测试和分析。

2) 论文研究了基于多传感器的列车定位系统的实现，构建了一种基于多传感器定位理论的以多模式定位为核心的无线列调场强测试系统。在系统的构建过程中，分析了 ODO、TAX、GNSS 的定位理论，在对多传感器定位理论进行分析之后实现了多模式定位系统的设计方案。论文研究了系统的硬件及软件实现，系统可以实现基于 ODO、TAX、ODO+GPS、TAX+GPS 四种模式下的列车定位、信息采集、数据记录、图表绘制以完成无线列调场强测试任务。

3) 论文提出了一种基于 GNSS 的列车运行里程校准算法，通过 GNSS 的定位数据来辅助校准 ODO 或 TAX 带来的里程误差，减小了测试数据和图表绘制的误差。

论文对于构建的新型无线列调场强测试系统以及相应的算法在乌鲁木齐铁路局 2017 年 3 月测试中完成了乌鲁木齐—吐鲁番，吐鲁番—库尔勒，库尔勒—阿克苏的跟测任务。测试结果表明，新型无线列调场强测试系统可以完成列车定位及速度信息的采集、分析、校正，以及沿线场强的实时采集、补偿、统计和场强测试实时曲线的绘制以及相关数据的保存等功能。在实验室平台测试中对各个模式定位性能都进行了测试，证明了设计的可行性。对多模式无线列调场强测试系统的稳定性、兼容性、可升级性进行了分析，且测试设备均为各铁路局使用的真实设备。论文从理论结合实际的角度对测试系统进行了分析、评价，既有理论依据，也有实测经验。

5.2 进一步研究与展望

本文基于对现有无线列调场强测试系统的发展现状、需求分析和功能模块分析，提出了一套新型无线列调场强测试系统设计方案，并以此为基础设计实现了硬件和软件系统，为下一代无线列调场强测试系统研发提供了初步设计思路。但目前所做的设计与实现还处于比较初级的优化，还有待进一步的研究，包括：

1) 高可靠性的自动控发功能，使本系统可以真正意义上完全解放测试人员的工作量，并大幅提升测试的完整性，减少因为人员操作导致的测试问题。

2) 适配器的自适应功能，使适配器可以根据外部输入设备的变化自动调整工作模式，增强系统的自适应能力。

综上所述，在本文的基础上，还需进一步在不同的铁路局利用不同的测试设备在不同的测试环境下对系统进行大量测试，已验证起系统结构的稳定性。

致 谢

本论文的工作是在上官伟老师的悉心指导下完成的,上官伟老师严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。上官伟老师悉心指导我完成了该论文的科研工作,并亲自带领我完成了在乌鲁木齐铁路局的场强测试,期间令我对学习、科研有了全新的认知,对生活和未来的人生有了全新的规划。在此向上官伟老师表示衷心的感谢。

学习研究期间,王剑老师、陈斌博士、靳洪都、尉江华师兄对于我的科研工作和论文都提出了许多宝贵的意见和热心的帮助,在此表示衷心的感谢。

该论文进行期间,同实验室的邱威智、李秋艳同学给了很好的建议,陈俊杰、刘鑫源、张立爽、尉江华、杜煜等都给予了很大的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 刘江,蔡伯根,唐涛,王剑. 基于 GPS 与惯性测量单元的列车组合定位系统[J]. 中国铁道科学,2010,(01):123-129.
- [2] 张辉. 基于 GNSS/ODO 的列车定位方法研究[D].北京交通大学,2008.
- [3] 于蒙. 无线场强测试系统的关键技术与应用[J]. 铁道通信信号,2008,(09):52-54.
- [4] 王祖元,蒋志勇,刘斌,张弘毅. 多制式兼容型 450MHz 无线列调场强测试控发设备设计[J]. 中国铁路,2013,(01):76-78.
- [5] 张跃军. 西安铁路局宝成线无线列调系统更新改造方案及实施[D].北京邮电大学,2011.
- [6] 郭华真. 多传感器融合列车测速定位技术的研究[D].北京交通大学,2013.
- [7] 康随武,刘晓娟. 基于多传感器信息融合的列车定位方法研究[J]. 铁路计算机应用,2014,(01):14-17.