

北京交通大学

本科毕业设计（论文）

新型无线列调场强测试系统设计 with 实现

**Design and Implementation of Novel Wireless Field
Strength Test System**

学 院： 电子信息工程学院

专 业： 轨道交通信号与控制

学生姓名： 白正伟

学 号： 13212030

指导教师： 上官伟

北京交通大学

2017年6月

学士学位版权使用授权书

本学士学位作者完全了解北京交通大学有关保留、使用学士学位的规定。特授权北京交通大学可以将学士学位的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，提供阅览服务，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：

指导教师签名：

签字日期： 年 月 日

签字日期： 年 月 日

中文摘要

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。本文的主要研究内容包括：

(1) 论文详细的阐述了无线列调场强测试系统的发展现状，并对本文所研究的对象，既新型无线列调场强测试系统进行了详细的需求性分析。针对场强测试的特点，参照铁路系统的发展历程、借鉴原有场强测试系统的设计理念，提出了全新的无线列调场强测试系统整体结构设计方案，并详细的分析了新型场强测试系统所涉及的关键技术。在理论分析的过程中，对 ODO 定位性能、误差来源、定位精度、TAX 箱原理与定位技术、GPS 定位性能与可用性连续性测试以及多传感器信息融合理论进行了细致分析。

(2) 本文在原有场强测试系统结构基础上构建了一种基于 PR100 场强测试仪的以多模式定位为核心的无线列调场强测试系统。本文研究了新型场强测试系统的硬件及软件设计与实现，具体包括：系统设备需求分析、基于 ODO、TAX、GNSS 的多模式定位方案设计与实现、系统硬件方案设计与实现、系统软件方案设计与实现。本文提出了一种基于 GPS 的列车运行里程校准算法，减小测试图表绘制的误差。

(3) 本文根据以往系统在进行测试任务时所遇到的问题分别在实验室搭建了无线列调场强测试系统基于虚拟仿真软件和实物设备的测试平台，并对本文所设计实现的系统进行多方面。除此之外，该系统还在乌鲁木齐铁路局的实际现场测试中较为出色的完成了场强测试任务。

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。该系统将在各路局进行推广使用，市场潜力巨大。

关键词：无线列调；场强测试；多模式；数据融合；多传感器

ABSTRACT

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. According to the structural characteristics of the field strength test system, the new test equipment and design scheme are used to optimize the original field strength test system, which is based on the field strength test system. The main contents of this paper include:

(1) The paper expatiates on the development status of the wireless column field strength test system in detail, and carries on the detailed demand analysis to the object of this paper, both the new wireless column scale test system. Aiming at the characteristics of field strength test, referring to the development course of railway system and drawing on the design concept of the original field strength test system, a new design scheme of the whole structure of wireless column field strength test system is proposed, and a new field strength test is analyzed in detail. The key technologies involved in the system. In the process of theoretical analysis, the ODO positioning performance, error source, positioning accuracy, TAX box principle and positioning technology, GPS positioning performance and usability continuity test and multi-sensor information fusion theory were analyzed.

(2) Based on the structure of the original field strength test system, this paper constructs a wireless column scale test system based on PR100 field strength tester with multi-mode positioning as the core. This paper studies the hardware and software design and implementation of the new field strength test system, including: system equipment requirements analysis, design and implementation of multi-mode positioning scheme based on ODO, TAX and GNSS, system hardware design and implementation, system software design and implementation. This paper presents a GPS-based train mileage calibration algorithm to

reduce the error of test chart mapping.

(3) Based on the problems encountered in the previous system, the test platform based on virtual simulation software and physical equipment is designed in the laboratory, and the system designed and implemented in this paper is carried out. Multifaceted. In addition, the system also in the Urumqi Railway Bureau of the actual field test in the more excellent completion of the field strength test task.

Based on the development of field strength test system, this paper designs the advantages of 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. The system will be used in the various bureaus, the market has great potential

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

目 录

中文摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目 录.....	IV
1 引言.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 研究现状.....	1
1.3 论文所研究的内容.....	3
2 无线列调场强测试系统升级需求及关键技术分析.....	5
2.1 无线列调场强测试系统升级需求分析.....	5
2.2 系统关键技术分析.....	6
2.2.1 基于 ODO 的列车定位关键技术.....	6
2.2.2 基于 TAX 箱的列车定位关键技术.....	7
2.2.3 基于 GNSS 的列车定位关键技术.....	9
2.2.4 多传感器定位融合理论.....	10
2.2.5 基于列车运动的数学模型.....	11
2.3 新型无线列调场强测试系统总体设计方案.....	12
2.3.1 系统功能需求分析.....	12
2.3.2 系统结构设计与模块分析.....	13
2.3.3 系统整体任务安排.....	15
2.4 本章小结.....	15
3 无线列调场强测试系统硬件设计与实现.....	16
3.1 硬件系统设计方案与思路.....	16
3.1.1 适配器设计方案.....	16
3.1.2 适配器结构设计与模块分析.....	16
3.2 通信协议设计.....	17
3.3 场强适配器硬件实现与系统调试.....	18
3.3.1 各硬件模块设计实现与调试.....	18
3.3.2 硬件系统整体实现结果.....	23

3.4 本章小结	24
4 无线列调场强测试系统软件设计与实现	25
4.1 软件设计方案与思路	25
4.1.1 软件应用背景与需求分析	25
4.1.2 软件结构设计与模块分析	26
4.2 软件功能设计与实现	28
4.2.1 多模式列车位置信息采集方案设计与实现	28
4.2.2 场强值信息采集方法及实现	32
4.2.3 数据处理模块功能设计与实现	34
4.2.4 软件系统整体实现结果	35
4.3 系统测试与效果分析	40
4.3.1 仿真环境测试与效果分析	40
4.3.2 实物平台测试与效果分析	42
4.3.3 乌鲁木齐局测试与效果分析	45
4.4 本章小节	47
5 结论与展望	48
5.1 论文的主要工作和结论	48
5.2 进一步研究与展望	49
参考文献	50
致 谢	52
附 录	53

1 引言

1.1 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铁路运输指挥过程中，起到车站值班员与机车司机之间信息交互的作用。因此无线列调系统的稳定可靠在保证铁路运行指挥，安全防护方面起着非常关键的作用。随着我国铁路的飞速发展，相关设备系统及时的更新换代显得尤为重要。要在新条件下保证列调通讯的畅通，铁路沿线的场强覆盖以及场强值必须要符合铁道部的相关标准。所以无线列调场强测试系统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。对于测试不合格的区段，要尽快分析出问题所在，且按计划设计出改造弱场区段场强覆盖的方案来保证车机联控的可靠。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，而其由于参与人员较多，或者对测试要求不熟悉导致测试操作出错的几率很大，使得场强检测数据不完整，严重的甚至需重新进行检测，花费了大量的人力物力成本。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。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。

1.2 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。该系统将机车司机，列车调度员，车站值班员，外勤值班员及运转车长共同纳入一个通信网络内，在该安全网络内各职员可以实现语音和数据的发送与接收。

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。

（1）基于 ODO 里程计的无线列调场强测试系统

ODO 作为成本低、运行稳定的列车传感器之一，在铁路场强测试系统中扮演者非常关键的角色。基于 ODO 的场强测试系统在全路目前有着广泛的应用，该系统基本工作原理是根据采集由 ODO 内部测试元件随着车轮转动所产生的脉冲数来对车轮的运动状态进行计算，从而得到列车的当前行进里程以便和场强仪测试得到的数据进行匹配。主要功能是可以利用场强测试设备和场强测试软件对沿线场强进行实时测量记录，实时场强曲线绘制，并将数据保存至文档。在测试结束后还可以利用数据处理软件对测试数据进行进一步分析，粗大误差剔除或报表生成及打印等功能。

（2）基于 TAX 箱的无线列调场强测试系统

TAX 箱主要用于与列车运行相关的安全信息的检测与传输，其传输的信息中包含当前列车运行的多项数据信息，其中就包括列车当前的位置信息。故以此设备为基础设计的无线列调场强测试系统在全路也有着比较广泛的引用。该系统的主要功能与基于 ODO 的测试系统相似，并可以获得更多的列车运行信息。在测试结束后也可利用数据处理软件对测试数据进行后续分析处理。

（3）用于场强测试的场强仪发展现状

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。

1.3 论文所研究的内容

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线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，并在对其功能进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。

本文共五个章节，各章内容简介如下：

第一章，引言，对本论文的所设计系统的研究背景、意义及国内的研究现状进行了详细介绍，综述了目前全路在 450MHz 场强测试中主要使用的几种无线列调场强测试系统对其特性和发展进行了分析，并介绍本文框架结构。

第二章，对新型无线列调场强测试系统的升级需求从多方面详细的进行了分析。之后对新型无线列调场强测试系统所涉及的关键技术进行了分析。构建了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。在构建系统的过程中，分析了 ODO，TAX 箱，GNSS 对于列车定位的理论方法，设计了一种基于 GPS 的列车运行里程校准算法，减小了测试图表绘制的误差。对多传感器融合定位理论和列车运动学模型进行了阐述。并以此为基础提出了对新型无线列调场强测试的总体设计方案与任务安排。

第三章，对无线场强测试系统硬件设计需求进行了细致分析，提出了基于全新设备和设计的硬件系统设计方案与模块分析，并在此基础上设计了新型无线列调场强测试系统的硬件设计方案以及通信协议。并在此方案基础上进行了设备选型与实现。最后对该硬件系统的调试结果进行了阐述。

第四章，对无线列调场强测试软件的应用背景和设计需求进行了进一步分析，在此基础上提出基于多线程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。

第五章，总结全文所做工作，提出结论与改进建议，并对接下来的工作做了展望。
论文的总体结构如图 1-1 所示。

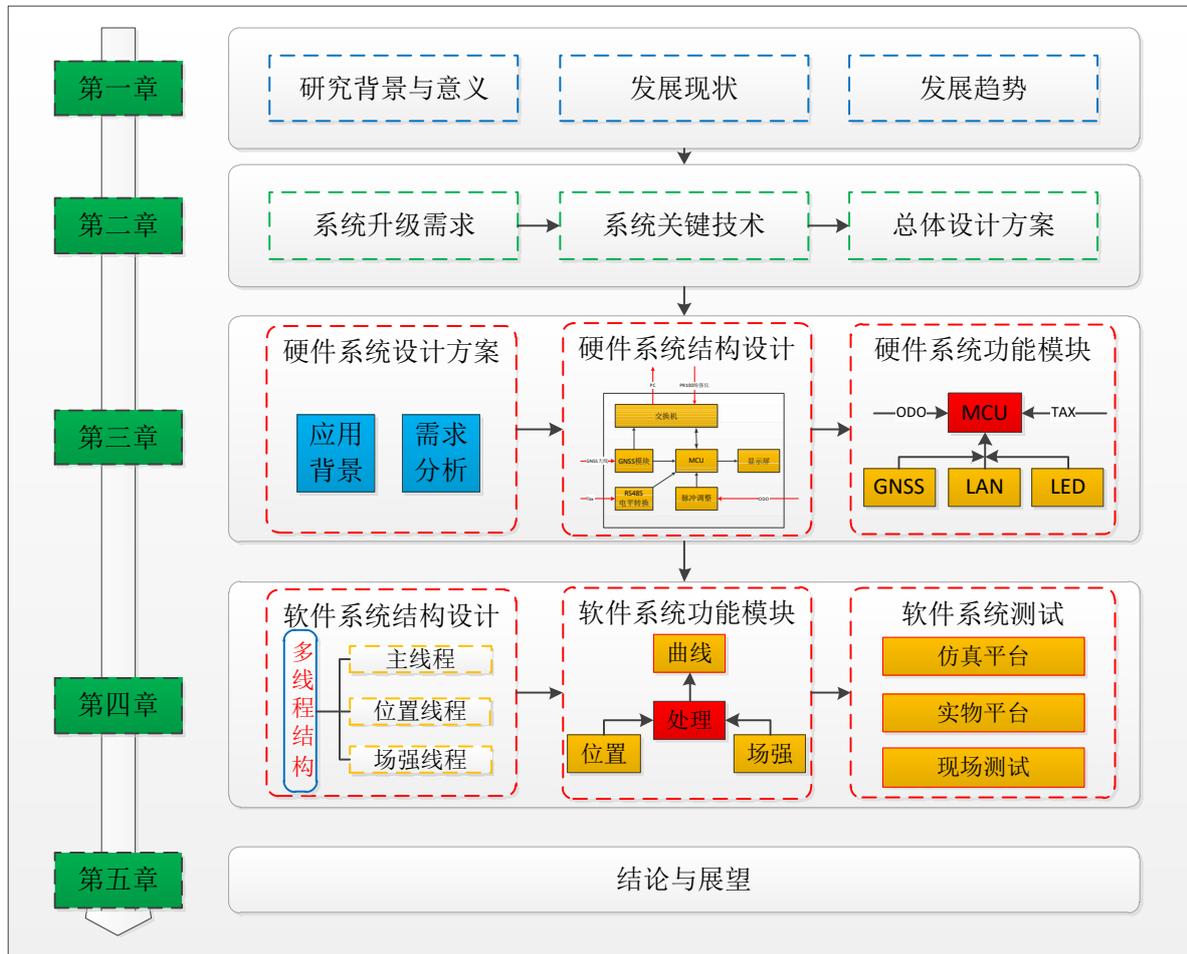


图 1-1 论文组织结构图

2 无线列调场强测试系统升级需求及关键技术分析

2.1 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。该需求具体来着以下几个方面：

（1）设备需求

上文曾提到，目前科学技术水平和我国铁路系统都得到了长足的发展，与之相对应的便是设备生产厂商对设备的不断升级和铁路系统对于性能更强的设备的需求。目前我国铁路局所采用的场强测试系统中的场强仪主要为 ESPI、EB200 等，甚至有一些使用的还是年代更远的 wiltek 场强仪。而近几年随着科技的发展，这些场强仪因为其设计老旧、性能低下、操作繁琐等原因，基本都已被市场所淘汰。而相对应的生产厂家也大都停止了这些设备的生产和技术支持。所以需要有一新一代的场强仪来接替之前的工作，服务于无线列调长钱测试中。

（2）用户需求

在用户角度出发，近年来随着微软对操作系统的不断升级，目前 windows 7 及以上操作系统已几乎覆盖了绝大多数 windows PC 市场。然而由于目前大部分铁路系统的 450MHz 场强测试软件是在 XP 系统下的 VC 平台上开发的，而且现有大部分适配器都需要 PC 安装相应驱动程序才能与之连接。这就使得现在场强测试所使用的电脑还局限于 XP 的环境。但微软早已停止了对 XP 系统的更新维护，再加上现在日益严峻的网络安全，XP 系统俨然成为了非常不适合铁路系统这类对信息安全高度苛求的系统使用。所以需要一套适用于主流操作系统的，适配器兼容性更好的场强测试系统软硬件设备。

（3）发展需求

从最早设计实现的无线列调场强测试系统开始，随着铁路系统的不断发展，铁路沿线场强测试的标准也在不断变化，与之匹配的场强测试系统需求也在不断改变。多年来研发人员为各铁路局不断提升的测试需求不断地有针对性的在其原有场强测试系统基础上进行升级优化。目前，铁路标准统一化已经成为我国铁路系统的发展趋势，作为其中关键的测试系统一直，场强测试系统标准统一化也必定是其升级趋势。然而目前我国全路各局由于测试设备不同，其测试系统之间并没有统一的数据标准，各路局之间的

场强测试系统也不具备通用性。所以为适应铁路系统未来的发展需求，有必要设计一种适用于不同铁路局的无线列调场强测试系统。

2.2 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。

2.2.1 基于 ODO 的列车定位关键技术

（1）里程计（ODO）定位性能分析

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。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；另一个是车轮磨耗：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^[1]。

对于 ODO 传感器的线性误差如系统误差和随机误差，Alonzo Kelly 对其单调性、同步性进行了分析。将误差的零极点特性做了详细描述，并对基于里程计的定位系统设计与误差校正提出相应的设计思路^[2]。

目前固定门限检测法普遍应用于对空转和打滑的监测。Samer 及其团队利用 Kalman 滤波器对 ODO 测试数据进行了处理，得到了速度与其加速度的检测值，并按照机车车辆在加速和减状态下出现的加速度和减速度的变化量极值作为参考，进而对系统是否处于空转和状态的加速度标准差的门限值进行判别^[3]。周达天对其进行了细致研究，并提出判定车轮空转和滑行的开始门限值：加速度的标准差 $>0.1\text{m/s}^2$ ；以及空转和滑行的结

束门限值：加速度的标准差 $<0.03\text{m/s}^2$ 。此判断标准可用于对较为明显的空转打滑进行监测判断，然而无法适用于较为微弱的轮轨间相对运动，所以固定门限检测法对微小的空转打滑监测判断无法进行^[4]。

（2）ODO 误差来源及定位精度分析

ODO 运行过程中的误差主要来源为空转和打滑。空转经常出现于车辆由静止向运动转变时。由于列车的物理特性，其速度与加速度只能连续变化无法突变。但是当发动机给予车轮过大的初始动能使得车轮与钢轨的静摩擦力无法束缚车轮保持与钢轨的静摩擦状态时，车轮就会出现空转状态。而此时因为车轮已经转动所以 ODO 依然会采集到数据，这时候里程计就会输出错误的里程信息，从而导致测量误差产生。

打滑大多数情况出现于车辆减速制动状态。如果闸瓦对车轮产生的减速效果过大，车轮会处于抱死状态，此时车轮就处于打滑状态。当车轮打滑时，由于车轮处于停止转动的状态，但车辆处于滑动前行的状态，所以此时 ODO 取得的车辆里程值也会产生误差，导致测试里程值偏小。

由于 ODO 测量中容易产生误差的特性，在利用 ODO 测量时有必要经行相应的历程修正。里程修正可以通过人为的在车站或某些标志点进行人为补偿修正，也可以通过 GPS 辅助手段进行自动校正。

定位精度是里程计的一项重要性能参数。ODO 虽然结构简单、运行稳定但也因如此而存在易受各种外界因素影响的问题。大多数情况下为了尽可能的减少车轮空转和打滑发生的次数，铁路局目前已广泛应用了对列车粘着控制技术，大大减少了严重的空转和打滑发生的机率。因此出现机率较多的都是轻微的车轮空转和打滑。但是这些微弱的空转打滑高频率的发生情况下就会对里程计定位造成不小的误差，因此不能小觑。

2.2.2 基于 TAX 箱的列车定位关键技术

（1）TAX 箱列车定位技术分析

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。

TAX 箱的数据记录模块可以利用 RS-485 串行通讯方式根据状态监控模块得到列车

当前的年月日、时分秒、公里标、运行速度、机车号、车次、车种、区段号、车站号、司机号、副司机号、列车编组等信息，并能把相关数据通过其他 RS-485 端口按照 20Hz 的频率发送至设备内部各模块单元。各模块部分把通过测试判别定与需要保存的数据信息反馈至通信记录模块保存^[5]。

（2）基于 TAX 箱的列车定位原理

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 2-1 TAX 箱通信协议

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			

2.2.3 基于 GNSS 的列车定位关键技术

(1) GNSS 定位性能分析

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，两者之间的关系与区别如图 2-1 所示^[6]：

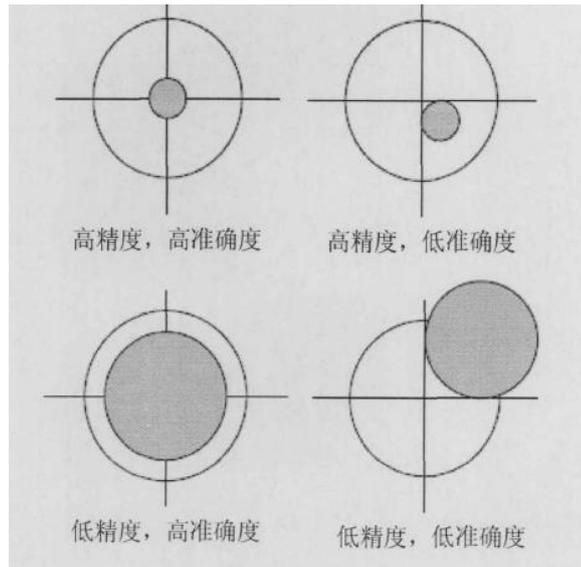


图 2-1 GPS 精度与准确度示意图

在图中，坐标中心代表真值点，深色部分代表测量值覆盖范围，深色部分中心点代表测量均值。所以深色部分的面积大小就代表其测试精度，而深色部分中心点与坐标中心的距离就代表其准确度。从上图我们可以看出，左上定位性能兼具准确度与精度，右下精度和准确度都较低。而对右上和左下两者的定位性能来说，前者优于精度欠于准确度，后者优于准确度欠于精度。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^[7]。

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

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%

(2) GNSS 定位精度及可用性连续性测试

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的关键点便是其定位精度。所以本文主要对接收机的实际精度进行了测试。

GNSS 技术虽有很多优势,但因为其设计原理会存在遮挡,信号干扰以及其他不可控因素对定位性能的影响。而且如要保证高精度的定位性能,需要保证 4 颗及以上的卫星同时对其定位,所以利用 GNSS 来实现列车的高精度定位需要对其可用性和连续性进行测试。直接应用 GNSS 来定就会可能导致在某些地域和时间点存在定位失效点进而导致 GNSS 对列车定位的不连续性。在青藏线格拉段测试中,通过双频接收机对列车从格尔木站运行至拉萨站沿线的定位数据进行了测量。从测试结果可知,青藏线的综合测试环境比较适合于 GNSS 定位。捕获卫星数大都在 6 以上。但是有 0.78%的时间可见卫星数在 4 以下^[8],这种情况下为保证测试连续性需要采用特殊的定位算法。

2.2.4 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系统。

(1) 多传感器的信息融合

信息融合技术在系统中的应用将扩展其在时间空间上的覆盖率,并增加该系统的可

靠性、提升精度、增加信息利用率。

对组合定位系统而言,各子系统所测量的原始信息的数据格式和种类都有所不同,比如有速度、距离、加速度、角度等。所以首先要对这些数据进行统一格式的预处理,才能用于之后的融合工作。只要方法为通过坐标变换和单位换算,把各传感器产生的原始数据转换成统一的格式,之后根据相关的算法对这些数据进行处理,最终得到利用信息融合技术得到的定位结果。

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。

2.2.5 基于列车运动的数学模型

如何建立合理、准确的运动模型是在对运动载体的动态定位的最优滤波问题研究时需要重点考虑的问题。有了运动模型,我们才能对其抽象出的系统写出相应的系统方程。使用比较广泛的运动载体模型有:常速模型、常加速模型、Noval 统计模型、微分多项式模型、“当前”模型、时间相关模型等。

(1) 机动载体的常加速模型

常加速模型可以用在无机动载体在做一维直线匀速或匀加速运动时,考虑随机干扰情况下可采用三阶常加速模型。

常加速模型:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(t) \quad (2.1)$$

式中: x ——运动载体的位置

\dot{x} ——运动载体的速度

\ddot{x} ——运动载体的加速度

$w(t)$ ——均值为零、方差为 σ^2 的高斯白噪声

(2) 机动载体的“当前”模型

在现实环境中物体的运动状态很少处于纯粹的匀速或是匀加速,而是处于非匀速或

非匀加速运动状态。而为了让模式更具有普适性我们就需要结合实际情构建更为符合实际情况的机动载体运动模型。根据加速度本身的物理属性我们可以知道，此刻处于某一加速度运动状态下的机动载体的下一阶段时刻的加速度状态数值必定存在于一定范围之内。机动载体的“当前”统计模型便因加速度的此特性而被提出。本质上该模式是基于非零均值时间相关模型的衍生模型。所以机动载体加速度的模型可由特定函数分布构建。此时，一阶时间相关模型为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \alpha \end{bmatrix} \bar{a}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(t) \quad (2.2)$$

该模型相比较于 Singer 模型其主要优点为，该模型结构采取了非零均值和普适性较强的修正端利分布表征机动加速度特性，可以将机动范围和强度变化更为贴近实际状态的体现出来，是当前比较优秀的数学模型^[9]。

2.3 新型无线列调场强测试系统总体设计方案

2.3.1 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。

（1）系统功能需求分析

系统需要在进行线路数据导入和场强仪相关参数配置工作后通过相关设备采集到列车实时位置信息和场强值信息，并对其进行数据分析统计后在软件主界面上显示出当前的各项测试参数的实时状态以及实时场强曲线的绘制，并且能够对测试中的各类数据进行保存和后续分析。具体流程如下：

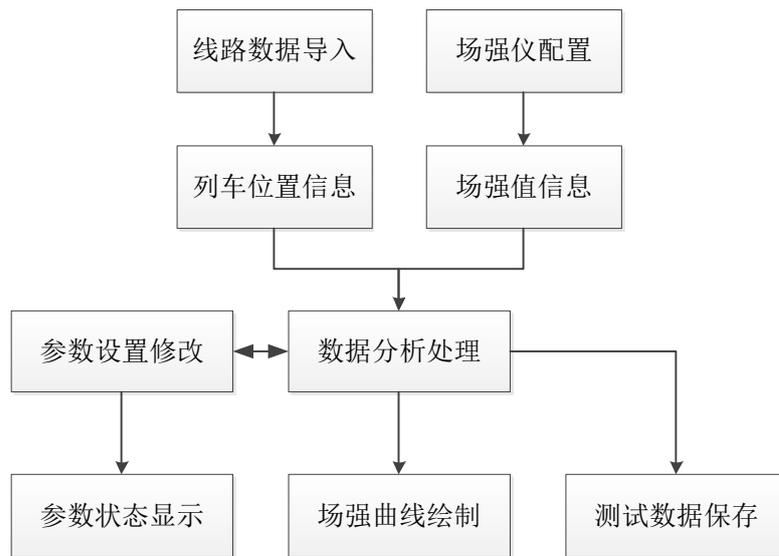


图 2-2 系统需求流程图

（2）解决方案

为实现上述系统中的功能需要对每项功能的设计需求进行分析：设计相关参数配置功能需要系统设计一套简洁明了的人机交互界面与操作逻辑，引导操作者完成相关测试参数的配置；列车定位方式的设计需要根据系统目前所适用的传感器采集列车位置信息；沿线场强值统计功能的设计需要选择一台性能满足测试要求且短期内不会被淘汰的场强仪，并分析其通讯协议、场强采集频率和数据传输频率；参数状态显示功能的设计要求系统设计一套全面、清晰、简洁的测试状态显示功能；场强曲线绘制功能需要系统将采集到的列车定位信息和场强值信息按照铁标要求统计后在软件显示界面准确清晰的展示出来。数据信息存储功能要求系统能够自动或手动对测试所记录的各类数据按照特定格式进行保存，以便后期进行数据分析处理。

2.3.2 系统结构与模块分析

（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 2-3 所示：

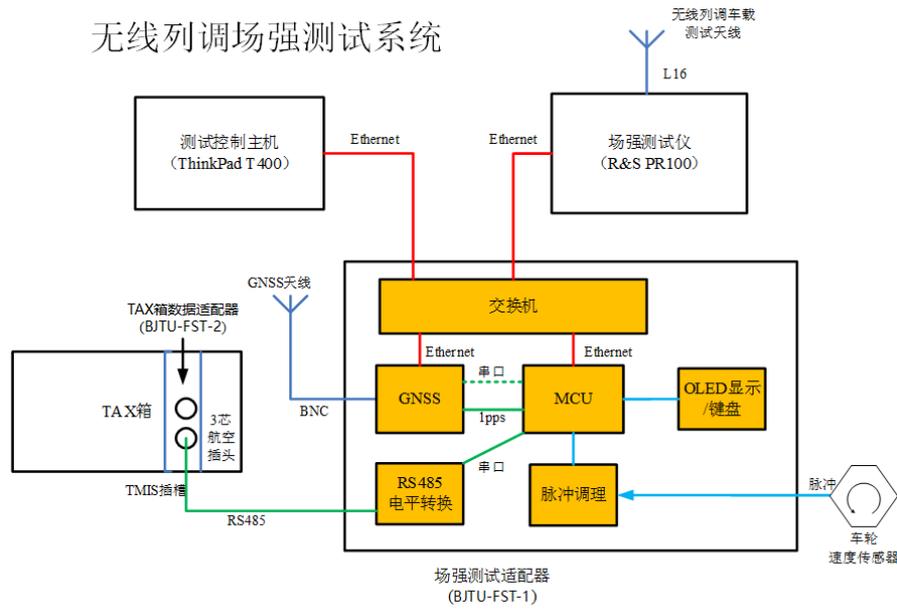


图 2-3 硬件系统架构图

(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。模块间相互关系如下图所示：

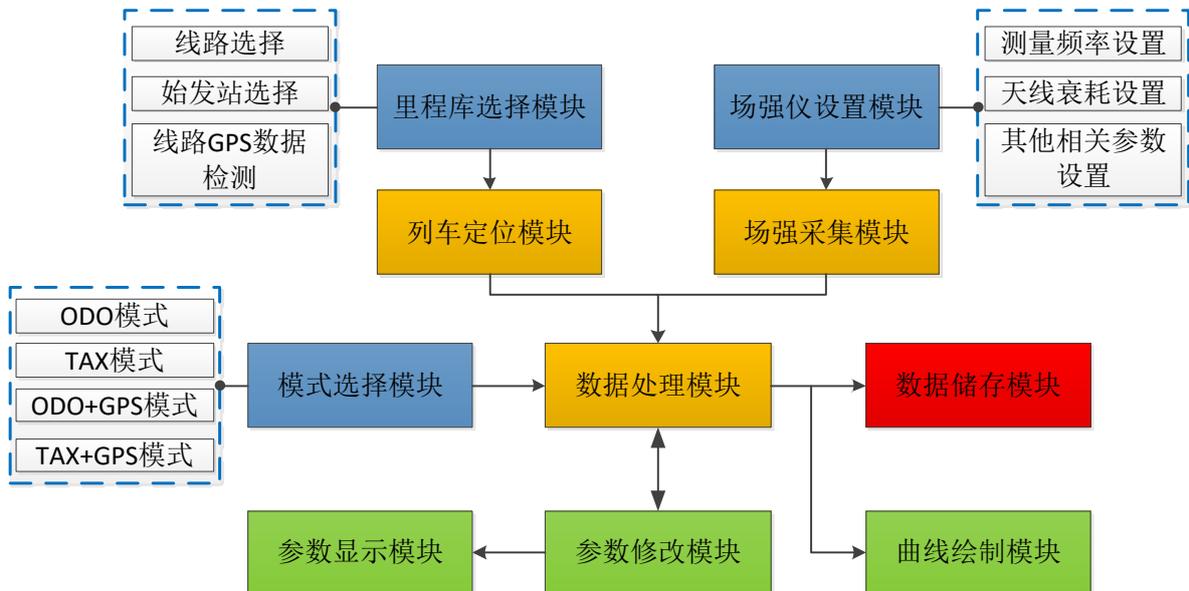


图 2-4 系统模块分析图

2.3.3 系统整体任务安排

本文所设计实现的新型无线列调场强测试系统依托于实验室对乌鲁木齐铁路局现有无线列调场强测试的升级改造项目，系统整体性能要求高、设计复杂、开发工程量大。因此在系统设计开发过程中有幸与各位老师、团队及企业进行合作。在系统开发的全部过程中具体任务主要有：

系统需求分析、系统整体结构设计、硬件结构设计、硬件电路设计与实现、硬件嵌入式代码设计与实现、通信协议制定、硬件电路及代码调试、适配器机壳及外设设计与制造、历代软件代码调试与分析、新版场强测试软件结构设计与实现、仿真平台搭建、实物平台搭建、新版软件调试与仿真环境下测试、实物平台测试、乌鲁木齐铁路局现场测试。

在其中，本文主要参与研究的部分有：系统需求分析与结构设计、通信协议的制定、硬件设备的调试与嵌入式代码的修改、历代软件代码的调试与分析、新版场强测试软件的需求分析、设计、实现、调试以及乌鲁木齐铁路局现场测试。

2.4 本章小结

本章从需求分析角度对新型无线列调场强测试系统升级从多方面详细的进行了分析。并对新型无线列调场强测试系统所涉及的关键技术进行了研究。并在这些理论和实际需求的基础上提出了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设计方案。分析了 ODO, TAX 箱, GNSS 对于列车定位的理论方法, 对多传感器融合定位理论和列车运动学模型进行了阐述。并以此为基础提出了对新型无线列调场强测试的总体设计方案与任务安排。

3 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。

3.1 硬件系统设计方案与思路

3.1.1 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。其硬件系统首先需要兼容铁路现有传感器设备，如支持里程计 ODO、TAX 箱，适用于列车供电系统等。其次很重要的一点便是硬件系统的稳定性、可靠性、准确性，以及新适配器对不同设备的兼容性。硬件系统结构设计主要是指场强适配器的设计，场强适配器是连接传感器仪表和 PC 的桥梁，起到原始数据采集和数据组包发送的作用。

（1）硬件系统外接设备

在实际测试中硬件系统外接设备包括：安装有实时测试软件和测试数据处理软件的测试控制主机、里程计 ODO、TAX 箱、GNSS 天线、场强仪。

（2）硬件系统内部功能模块

适配器内部功能模块包括：控制主板、GNSS 模块、交换机模块、电源模块、显示屏模块。

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。

3.1.2 适配器结构与模块分析

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，

具体结构如下图所示：

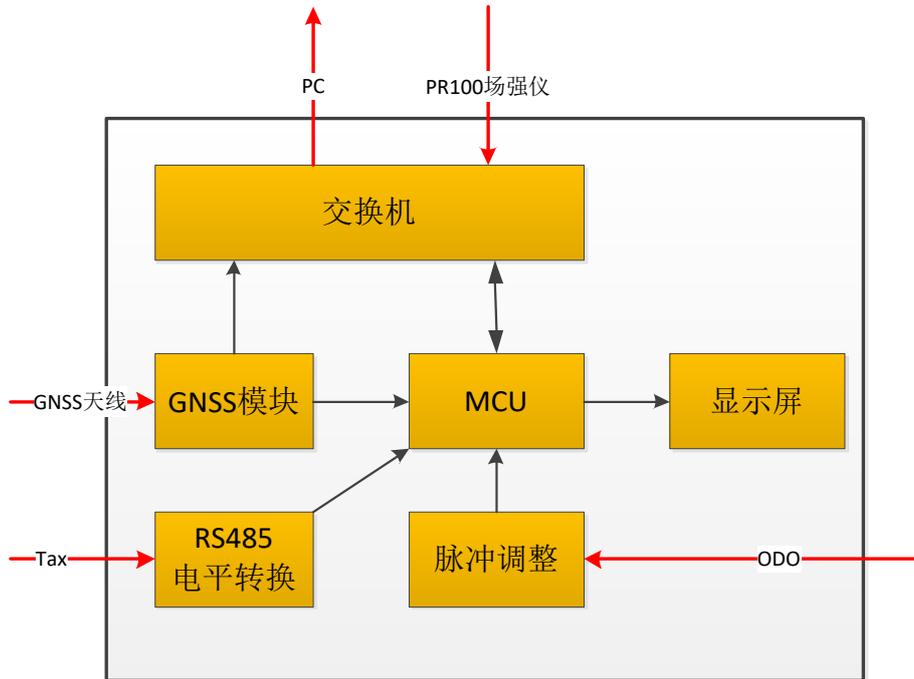


图 3-1 硬件系统结构图

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。

其中接口模块设计内容有：电源电缆接口、天线接口(TNC 接头)、网线接口(双 RJ45 接头)、TAX 适配器串口电缆接口(航插接头)、车轮速度传感器电缆接口(航插接头)、调试接口(DB9)；显示模块设计内容有小规模显示屏和 LED 显示灯(电源指示灯、定位指示灯、系统运行指示灯、车轮传感器脉冲指示灯、TAX 箱数据指示灯)；供电模块设计功率为 220V-300W。

3.2 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。具体协议内容为：场强控制主机向场强测试适配器发送命令：预留；场强测试适配器向场强控制主机发送数据基本格式为：\$帧头，数据，*校验位\r\n。如：GPS 信息报文，原始 NMEA 信息，不进行数据加工。TAX 报文:\$TAX，(40 个字节的 TAX 箱数据)*校验位\r\n。ODO 报文:\$ODO，流水号，每 100ms 脉冲数，累计脉冲数*校验位\r\n。

详细格式如下表所示

表 3-1 适配器通信协议

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	\r\n
\$TAX	流水号	TAX2 原始数据		校验位	\r\n
\$GPS	同步位	NMEA 原始数据			\r\n

表中：流水号和同步位用来记录数据帧数以便对数据丢失的判断和多传感器数据的同步；每 100ms 脉冲数为里程计（本系统测试对象为 DF16 车轮传感器）每 100ms 发送至适配器的脉冲数；累计总脉冲数为里程计发送至适配器的脉冲总数，校验位采用 CRC 校验，TAX2 原始数据格式和 NMEA 原始数据格式见附录。

3.3 场强适配器硬件实现与系统调试

3.3.1 各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。在调试过程中所涉及到的调试工具有 stm32 J-Link 烧写器和 TTL-232 转接器，分别用来对主控模块和 GNSS 模块进行调试。

（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，图 3-2 所示为第一版 PCB，该版在测试过程中 ODO、TAX 数据采集良好，但 GNSS 模块无法正常工作。在对电路进行详细调试和检测后发现，是因为电源芯片模组的设计缺陷导致无法正常驱使 PCB 模块工作，现已被淘汰。



图 3-2 第一代主控模块

由于上一版 PCB 设计存在的严重问题，第二版在对前者问题进行细致分析和方案设计后又设计了第二版主控模块的 PCB，如图所示：

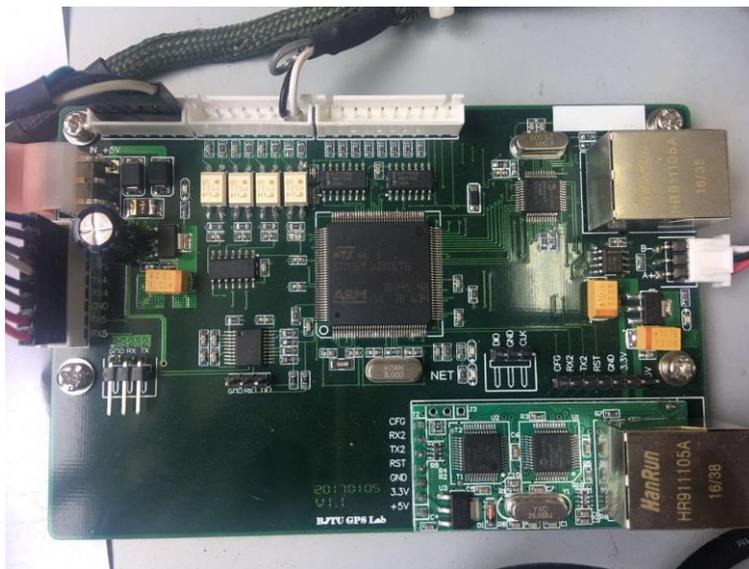


图 3-3 第二代主控模块

对该版本的测试中着重对其各类接口进行的调试。该版本将 MCU，网口，SD 卡，车轮传感器滤波、GNSS 接口、RS485 接口集成在一块 PCB 上。左上角为 LED 显示屏输出接口，正上方为 ODO、TAX 数据输入接口，右下方为将组包后数据输出至交换机的 LAN 口，左下角为调试接口。在实际调试中我对改版本进行了详细测试，并未出现异常，各部件工作稳定正确。

（2）电源模块选型

考虑到硬件部分需要用到 DC-14V5V3.3V 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 3-4 电源模块

电源模块参数：输入电压：AC167-264V；输出电压：V1：DC5V/5A，V2：DC12V/5A；输出的两路电源分别为 PCB 和 ODO 传感器供电（选用）

（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 3-5LED 显示模块

（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和芯星通设计的：UB351 北斗/GPS/GLONASS 高精度 OEM 板来作为 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 3-6 GNSS 模块

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：

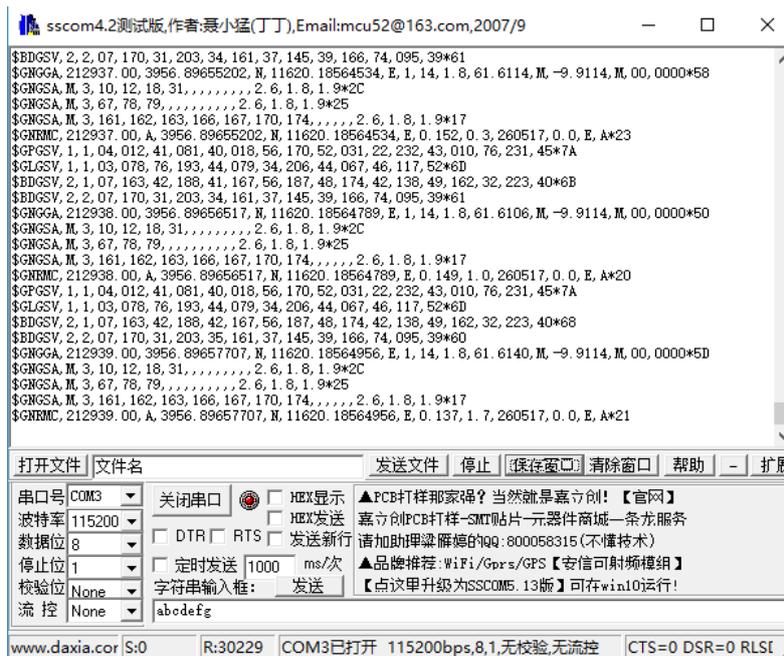


图 3-7GNSS 调试数据

从调试截图可以看到 GNSS 模块配置成功，可以按照配置要求将采集到的定位信息发送至适配器，适配器也接收到了其传送的数据。

(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 3-8 天线外观图

天线的外观参数数据如下图所示：



图 3-9 天线参数图

（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，本系统采用 TP-LINK 生产的型号为 TL-SF1005D 网络交换机。该设备有 5 个 LAN 口可供使用且为 12V 供电，可以很好的满足设计需求。设备图片及详细参数如下：



图 3-10 交换机模块

图为在调试中交换机工作图：

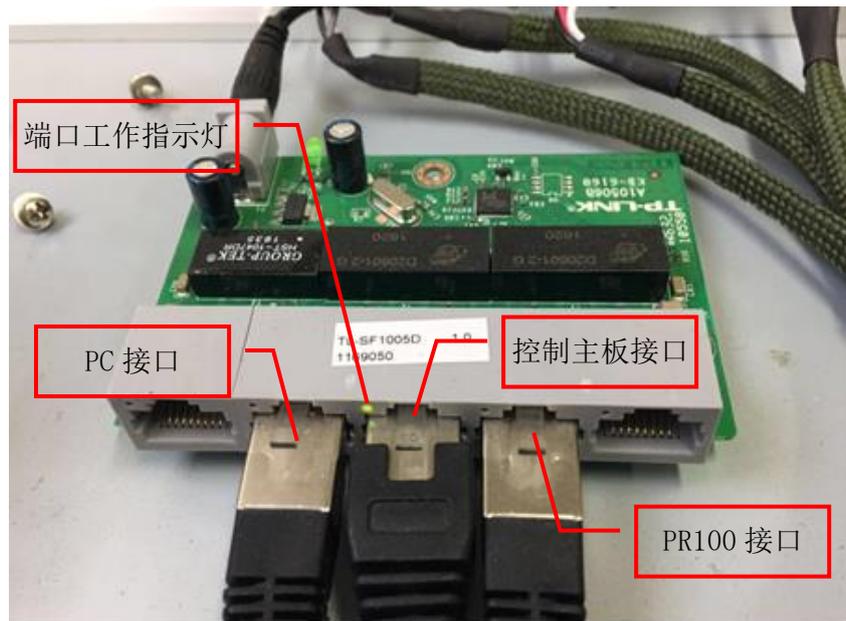


图 3-11 交换机工作图示

3.3.2 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：

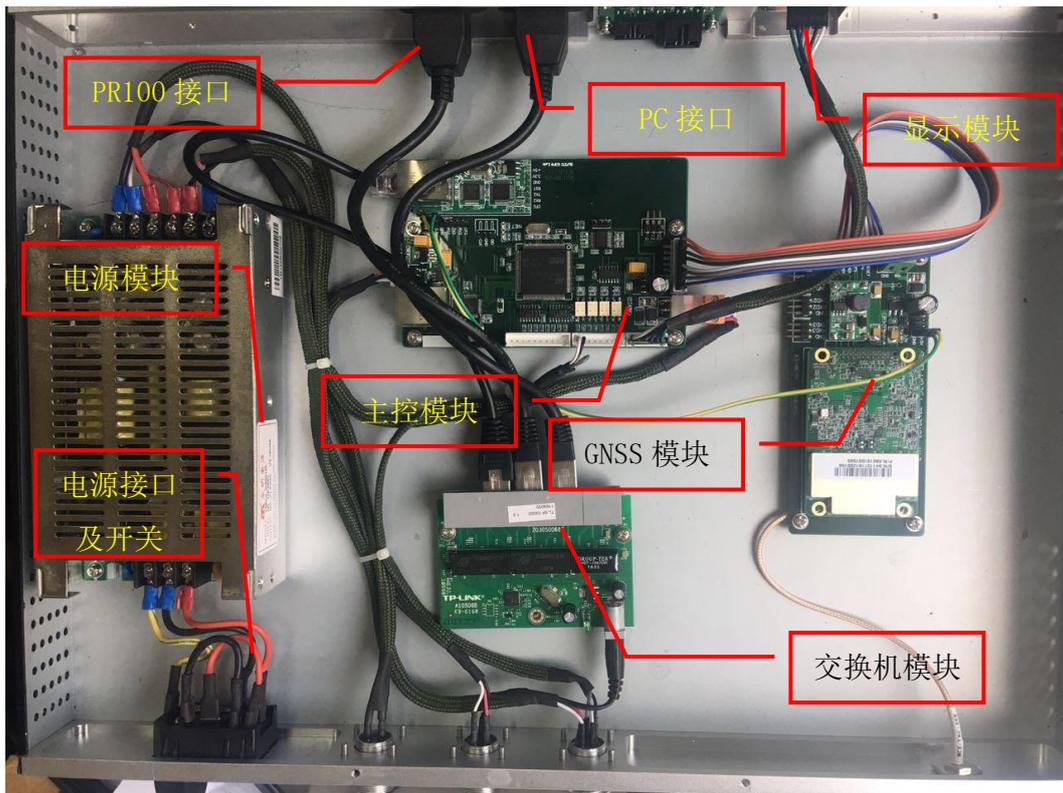


图 3-12 硬件系统整体结构

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。

3.4 本章小结

本章在对硬件适配器设计需求和功能模块深入分析的基础上，提出了基于全新设备和设计的硬件系统设计方案与模块分析，并在此基础上设计了新型无线列调场强测试系统的硬件设计方案以及通信协议。并在此方案基础上进行了设备实现与调试。最后对该硬件系统的调试结果进行了阐述。

4 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。采用 C++ 语言，结合 GitHub 在 Windows 操作系统环境下基于 VS2015 所设计开发全新的场强测试软件，并在实际测试中得到了不错的使用反响。

4.1 软件设计方案与思路

4.1.1 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。随着科学技术的发展，系统兼容性更好、操作界面更为友好、操作逻辑更为简洁是目前所有软件的发展趋势。然而目前大部分铁路局的场强测试软件开发年代都十分久远，基本只能在 XP 或以下的系统上运行。由于 XP 系统现在已失去微软的支持，维护和更新也早已终止，这使得运行于 XP 系统的软件安全性收到了很大威胁。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所示：

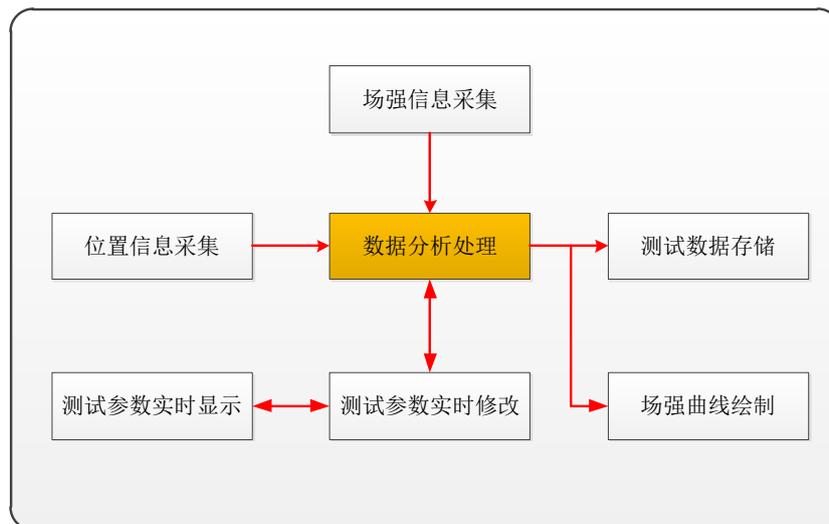


图 4-1 软件功能需求分析图

4.1.2 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所示：

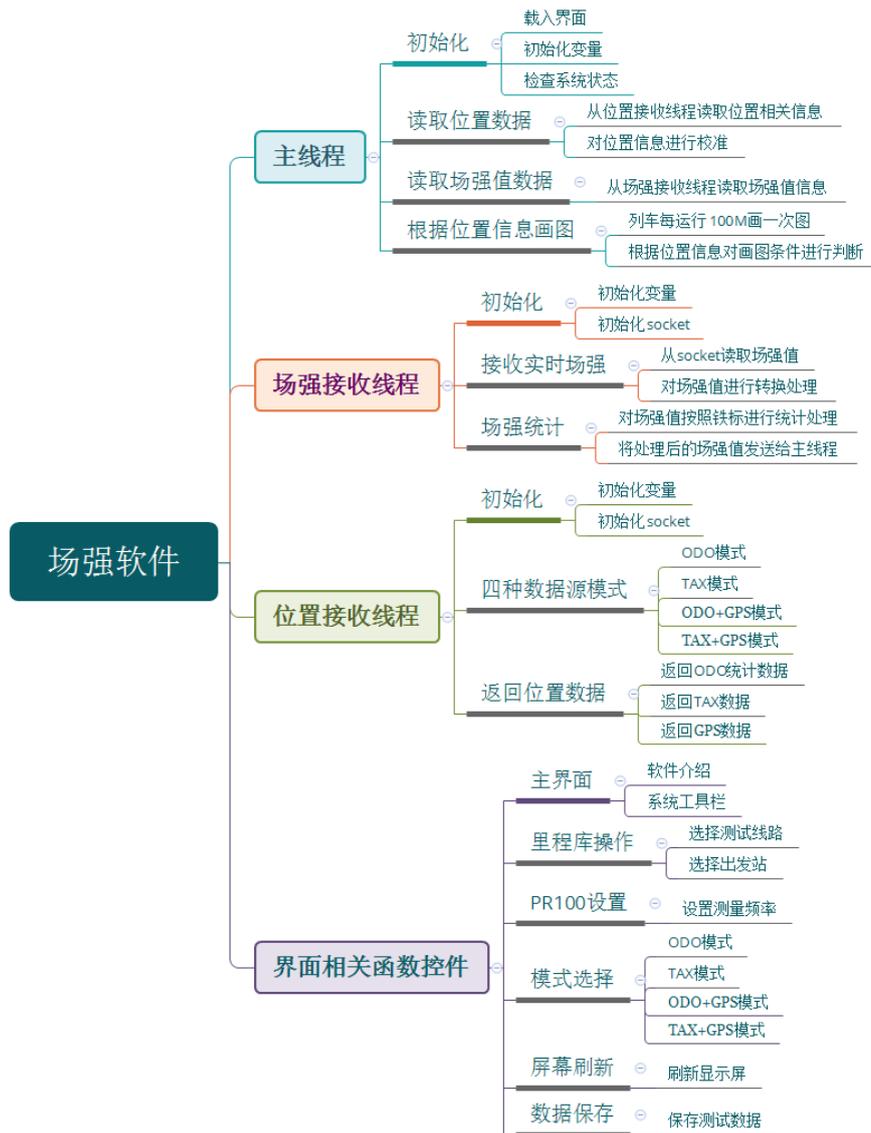


图 4-2 软件系统架构图

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。

第二个特点在于将目前我国大部分铁路局所采用的场强测试方案都集成在了一起，目前设计有 4 种工作模式，分别满足不同铁路局的测试需求。而这些模式都在统一化的

参数标准下执行的，对后续的维护、优化、升级都大有裨益。且在无线场强采集上采用了性能更加优异的 PR100 场强仪，使得测试精度更高，稳定性更好。在定位数据采集上的四种模式分别为：ODO 模式；TAX 模式；ODO+GPS 模式；TAX+GPS 模式。四种模式基本可以覆盖我国目前大部分的场强测试环境，而且使用了统一化标准，且支持最新的 WIN10 操作系统，更好的实现了系统的扩展性、统一性、稳定性。

本文在该设计结构的基础上为了进一步细化设计方案，将软件整体拆分为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：

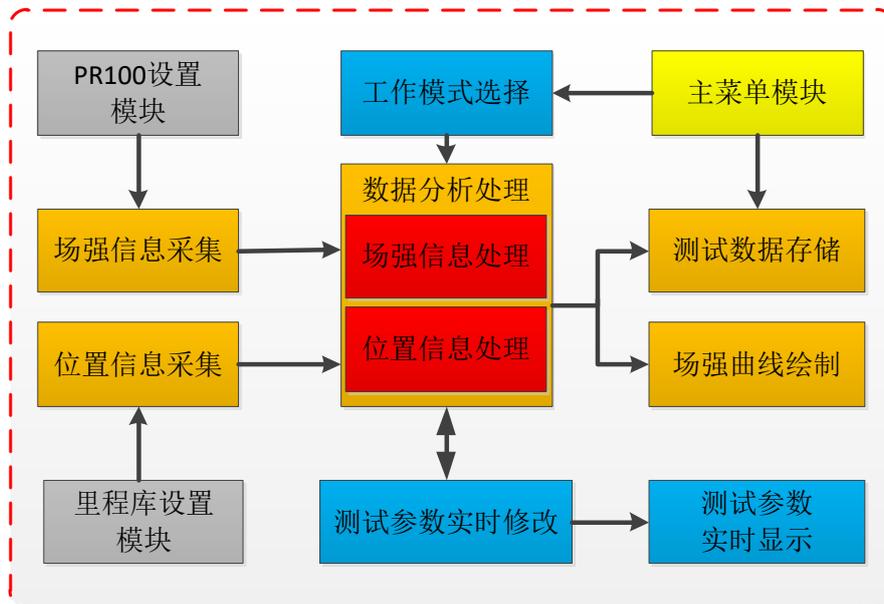


图 4-3 软件功能模块

在功能结构图中：主菜单模块功能为对软件主要功能进行操作。工作模式选择模块功能为实现四种工作模式的选择切换：ODO 模式、TAX 模式、ODO+GPS 模式、TAX+GPS 模式。PR100 设置模块功能为设置测试场强频率等相关参数，初始化场强仪和内部线程。里程库设置模块功能为设置场强测试里程库相关配置，线路数据检验，载入测试线路数据。主菜单模块功能为提供“启动测试”、“停止测试”、“屏幕刷新”、“数据存盘”、“模式选择”、“场强仪测试”操作按钮。测试参数修改模块功能为提供测试状态如车速、位置、频率等测试数据的实时显示以及测试补偿、里程修正、轮径修正等参数修正操作控件。位置信息采集模块功能为通过位置信息采集线程采集 ODO、TAX 箱、GNSS 板卡关于列车位置、速度等相关信息。场强值接收模块功能为通过场强值接收线程从适配器接收 PR100 发送过来的实时场强值。测试数据存储模块功能为实现对测试数据按照标准统一化格式的记录保存，以便之后通过数据处理软件进行回放、修改、查看和打印。场强值数据处理模块功能为实现对测试所记录的原始场强值按照铁标进行统计处理并储存在文件中。场强曲线绘制模块功能为实现以里程为横坐标、场强值为纵坐标的实时测试曲

线绘制显示以及线路信息的标注。

4.2 软件功能设计与实现

4.2.1 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到接收主机之后，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：

因为车轮传感器（ODO）有多种制式，但其原理都是相同的。车轮在转动一圈时车轮传感器会产生一个固定的脉冲数 $pulse$ ，而不同制式的车轮传感器车轮转一圈的 $pulse$ 值并不相同，为满足兼容多种传感器制式此处我们需要先求出 ODO 产生的每个脉冲所代表的距离，公式如下：

$$U = \frac{\pi d}{1000 pulse} \quad (4.1)$$

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：

$$V = \frac{10n \times U \times 3.6}{2} \quad (4.2)$$

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：

$$V = 0.018 \frac{n\pi d}{pulse} \quad (4.3)$$

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：

$$S = (N_{\text{总}} - N_0) \times U \quad (4.4)$$

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。TAX 相关的通信格式见下表：

表 4-1 TAX 通信协议

帧头	TAX 原始数据（40 字节）						帧尾
\$TAX	流水号	本板地址	特征码	检测单元号	数据信息	校验	/r/n

表中：TAX 原始数据内容详见附录。

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。首先 ODO 的定位方式本文已在 4.2.1 章节中详细介绍，此处不再赘述。

本系统的 GPS 模块接收频率为 1 Hz，通过 GPS 扩展卡将模块接收到的 GNSS 定位数据传送至主控板，经过主控板数据组包后通过交换机模块发送至 PC。GPS 的数据格

式如下表所示：

表 4-2 GPS 通信协议

帧头	GNSS 原始数据（NMEA 格式）			帧尾
\$GPS	同步位	GPRMC 原始数据	校验	/r/n

表中 GPRMC 原始数据格式内容详见附录

在此模式下，PC 接收到 GPS 数据后，先对其进行校验计算，以确认接收数据无误。其次根据数据分隔符“，”取到同步位数据来完成 ODO 数据和 GNSS 数据时间基准同步问题。

在硬件系统内部在系统启动时设有一个全局时间基准流水号，即该流水号从系统启动开始每 100ms 加一，此 100ms 定时也是适配器计数器采集 ODO 传感器脉冲的触发条件。即每个 100ms 适配器记录一次脉冲数，并叠加至总脉冲数上，此脉冲计数器清零准备下 100ms 计数，于此同时时基流水号+1。也就是说 ODO 的采样频率是 10Hz，而 GPS 的采样频率是 1Hz，此时我们就需要利用时基流水号来对 GPS 和 ODO 信息做数据同步匹配。具体方法为：当主模块接收到 GNSS 数据时，读取全局时间基准流水号此时的计数值作为 GPS 同步位数据，将此 GNSS 信息匹配到 ODO 数据中流水号和此同步位数据值相同的 ODO 数据中，以此实现 ODO 与 GPS 数据的同步。

在同步 ODO 和 GPS 信息之后，判断当前 GPS 所示位置距离下一个里程修正点的距离是否小于捕获半径。如果列车已经入捕获区域，则从 GPS 数据库读取该较准点的数据并计算两点之间的距离 L，计算方法如下：

通过 GPRMC 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：

$$L = \sqrt{(x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2} \quad (4.5)$$

式中： $N_n(x_n, y_n)$ ——当前位置坐标点；

$N_{n-1}(x_{n-1}, y_{n-1})$ ——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：

$$L_{odo} = (N_n - N_{n-1}) \times U \quad (4.6)$$

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。首先 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，详细的定位方式本文已在 4.2.2 章节中详细介绍，此处不再赘述。

此外，通过 TAX 取得当前位置信息时也一并取到了主控板在接收 TAX 数据时运行的针对 TAX 箱数据频率的全局时基流水号，当得到 GPS 数据时采用和 4.2.3 章节中提到的 ODO 和 GPS 数据同步原理相似的方法来实现 TAX 和 GPS 数据的同步工作。

同步完成后根据 TAX 检测到的列车位置，判断是否进入 GPS 基准点捕获范围，如果已经进入捕获范围则读取 GPS 文件中两点的位置信息，通过相关公示计算出两点实际距离。在通过在基准点的 TAX 公里标数据来计算出 TAX 测得的列车行驶距离。用 GPS 得到的距离来对 TAX 得到的距离进行历程修正补偿。详细的计算原理与 4.2.3 章节中，利用 GPS 对 ODO 定位实现里程修正的原理相似，此处不再赘述。

（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所示：

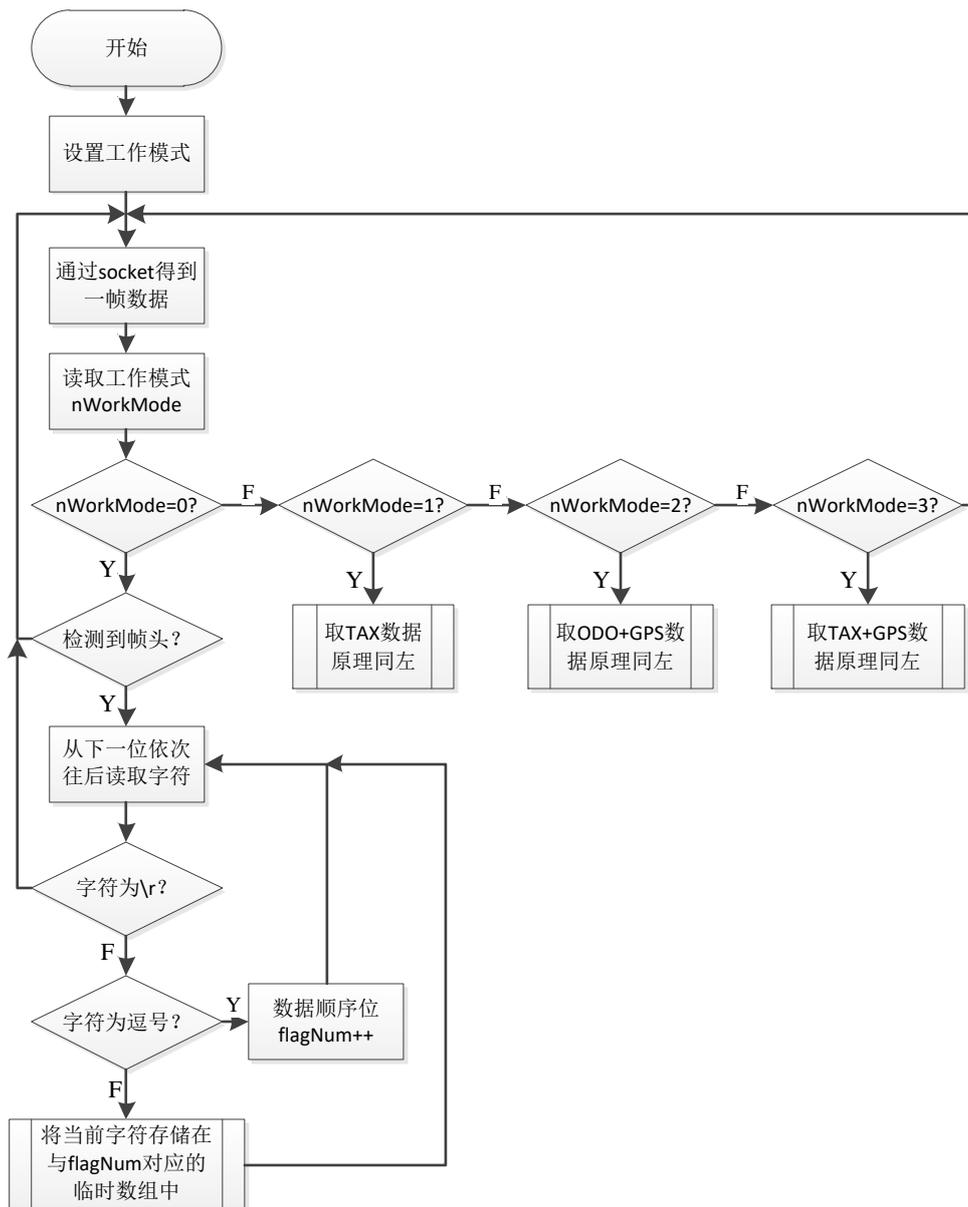


图 4-4 位置线程解包流程图

软件实现方式为，利用 switch 语句是数据进入各自工作模式的工作流中，在各个模式循环内通过回车字符、逗号字符和数据顺序位 flagNum 来将整个字符串数据解包成单独的字符串数据并存在各自的临时变量中，之后利用类型转换函数将其转换为可运算变量传递至数据处理模块进行后续运算。

4.2.2 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。并将测试数据存储于测试文件中以便通过数据处理软件进行进一步分析、打印。

（1）场强值信息采集方法

本系统采用 PR100 场强仪进行铁路沿线的无线电场强测试取值，软件通过在 PR100 设置模块中的相关设置操作配置好 PR100 的测试频率、通信 IP、通信频率等参数后便会自动对测试频率进行测试，并自动向交换机进行数据发送，场强数据再通过交换机发送至 PC。PC 通过场强值接收线程单独接收。PR100 的发送的数据结构为 32 字节，其中场强值信息占据两个字节，软件将此数据接收到之后发送至场强值处理模块进行统计处理。本文对软件设计采用多线程架构，场强值采集任务为一个单独的运行线程。该线程通过 socket 不断接收原始数据并进行统计处理

（2）场强统计处理及统计数阈值计算

本文在设计软件系统的画图功能时，大部分界面设计和画图逻辑都按照历代场强测试系统沿袭下来的设计方案进行实现。其中画图部分要求列车每运行 100M 画一个点，这也就需要场强在列车运行 100M 期间至少统计出一个场强值，否则就会导致记录数据的丢失。由于 PR100 的发送频率有限，因此在一定时间内 PC 能接收到的实时场强值数量也有限。场强统计过程中，统计数阈值太小会导致统计值不稳定性增加，太大又会导致在列车时速较快的情况下丢失场强统计值。因为本文对该阈值的确定进行了对 PR100 场强仪的详细测试与计算。本文利用 python 脚本向 PR100 发送指令让其发送测试数据，并用该脚本检测接收 PR100 发出的 30000 帧数据所耗时间。根据测试最终得到 python 脚本接收到 30000 帧数据耗时 156s，即 192.3 帧/秒约合 200 帧/秒。450MHz 无线列调场强测试系统主要应用于普速线路的场强测试，因此列车运行时速在 120Km/h 以下。此处为保证测试安全将速度假定为 130Km/h，此时计算出列车行驶 100m 时 PR100 发送数据帧数为 532.5 帧。因此在软件实现中将次阈值设为 530，以保证场强统计值的准确性。

具体软件实现流程如图所示：

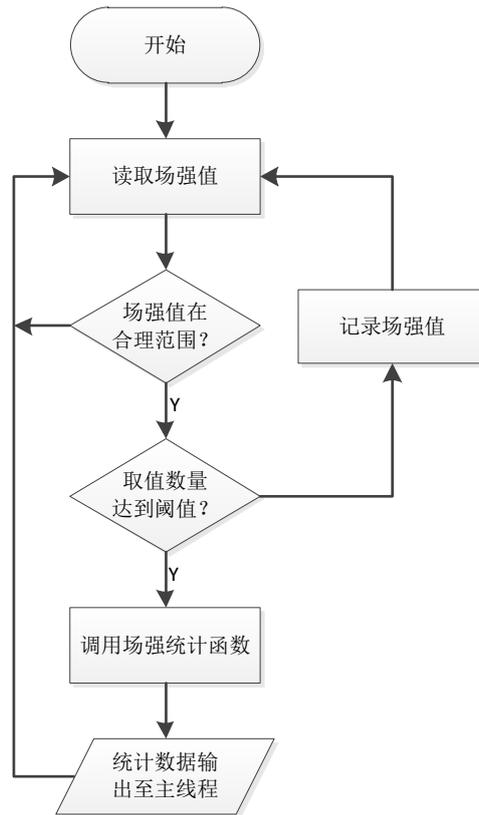


图 4-5 场强值线程流程图

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。

4.2.3 数据处理模块功能设计与实现

数据处理模块的主要功能是将列车位置信息和场强统计信息进行整合，控制系统主体进程，也就是软件设计中的主线程。数据处理模块主要需设计完成两大任务：列车位置计算与场强曲线绘制。

在场强测试系统中，列车位置的计算其实就是列车实际行进距离的计算，由于场强曲线画一个点的触发条件是列车行进 100 米，那么如何精确计算列车行进的距离便是本文在此处研究的重点。在系统设计中从系统运行开始，便设有一个全局变量用来记录列车行驶的总里程，在软件中主线程通过不断读取变量的数值就可以对列车何时行进到了 100 米的整数倍，从而触发画图。具体设计方案为，在每次软件画图条件触发之后系统都将此时列车的总里程值保存起来，当下一个读取到总里程值时将这两者分别作为计数循环的起始点和结束点，在计数过程中对里程值是否是 100 米的整数倍进行判断，以此便精确计算到列车运行在 100 米整数倍的时刻，从而精确画图，具体流程如图所示：

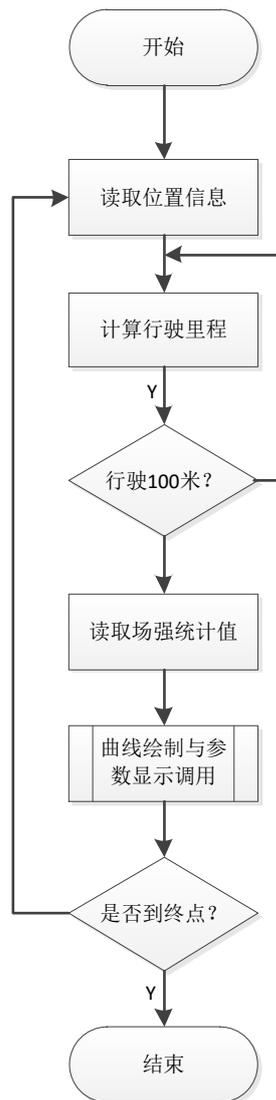


图 4-6 主线程数据处理相关流程图

4.2.4 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：

(1) 软件主界面模块

在桌面上双击“场强测试”图标，即可启动车载实时测试软件。如图所示：

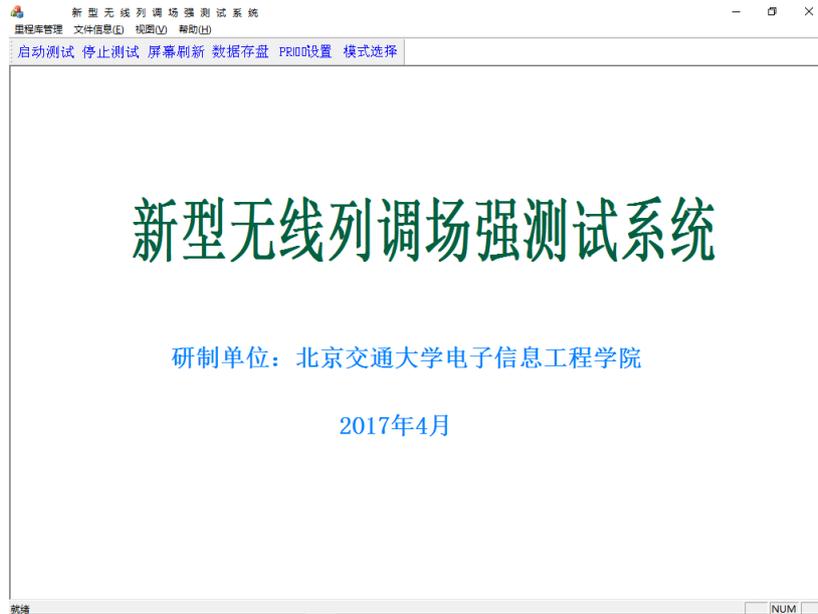


图 4-7 软件主界面

测试画面包括三个部分：菜单选择部分包括：里程库管理、软件说明；快捷键按钮部分按钮键有：“启动测试”、“停止测试”、“数据保存”、“屏幕刷新”、“PR100 设置”、“模式设置”；主界面测试控件部分可进行的参数修改有：测试补偿，轮径校准、里程校准、文件命修改、上下行修改以及实时速度、位置、GPS 信息的实时显示。

（2）PR100 配置模块

首先配置电脑 IP，将电脑 IP 配置为：IP：192.168.0.201.子网掩码：255.255.255.0 默认网关：192.168.0.7.点击 PR100 设置按钮，根据窗口指示配置相关参数。如图所示：



图 4-8PR100 设置窗口

按“确定”按钮后，请等待几秒钟后，如果通讯线连接正确，则出现设置成功的界

面。如果不成功请检查连接和 IP 配置是否正确。

（3）模式设置模块

点击“模式设置”按钮，会弹出模式设置窗口，如图所示

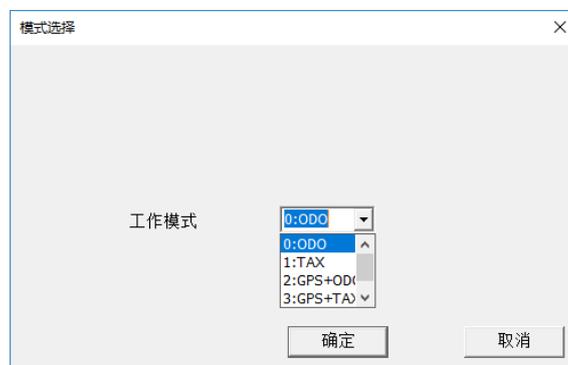


图 4-9 模式选择窗口

选择测试所需模式，点击“确定”按钮，系统显示“模式设置成功”则模式设置完成，

（4）里程库设置模块

在左上角选择点击“线路管理”再点击“打开线路数据库”用来导入当前所测试的线路数据库，如图所示：

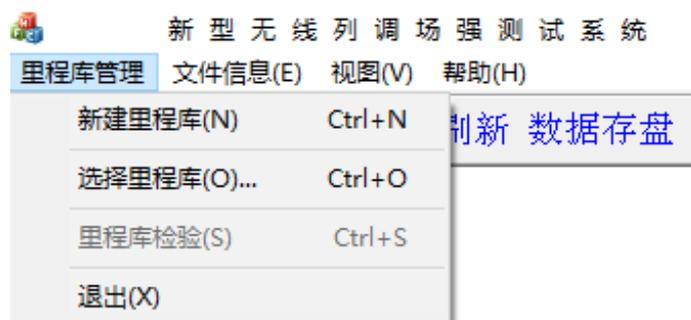


图 4-10 里程库选择

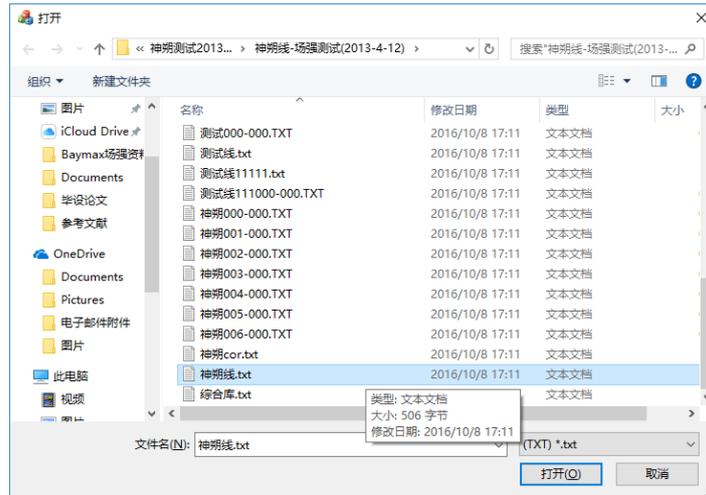


图 4-11 选择线路文件

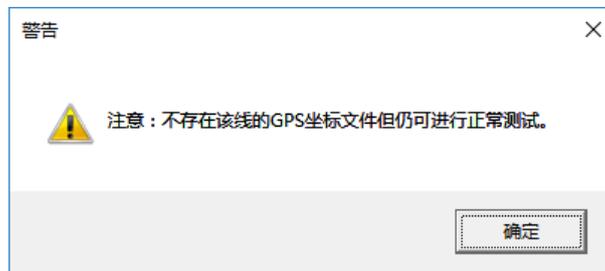


图 4-12GPS 文件检验

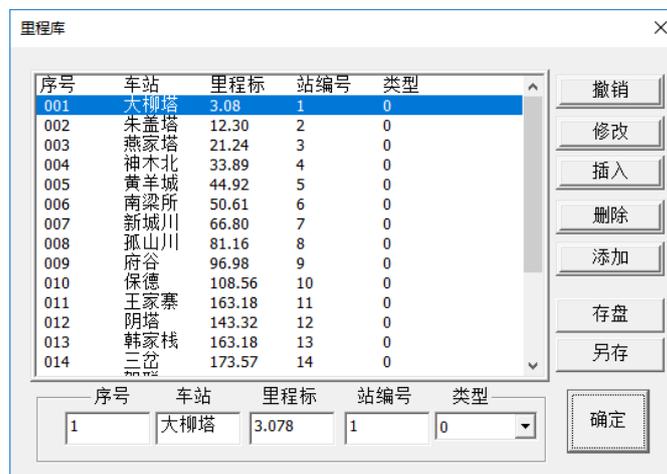


图 4-13 始发站选择

（注：里程库文件可以选择利用文本编辑器编辑相应线路数据并以文本文件存盘，以“txt”为扩展名。）打开线路数据库后，请查找测试开始位置的车站名，选择之后系统会自动导入其相关数据。比如设置“吐鲁番”为场强检测开始车站，之后点击“确认”按钮。

(5) 启动测试

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：

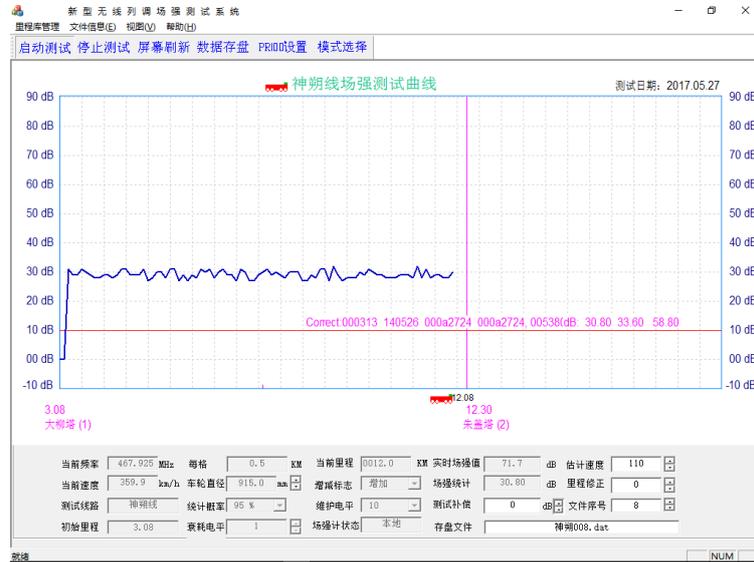


图 4-14 测试画面

测试中偶尔会出现定位不准的情况，此时可以在主界面控件区找到“里程校准”模块，点击上下箭头对其进行校正。在测试中软件会每隔 1 小时自动保存一次测试数据，以防数据丢失。操作者也可以通过点击工具栏的“数据存盘”按钮来实现实时记录保存，存盘文件名将在控件区的“文件名”窗口显示。“测试补偿”快捷键用于对测试数据进行人为补偿修正来修正因设备产生的测试误差。如果要对下行线路的场强进行测试，请将“增减标志”改为“减少”。

当线路运行到终点时系统会自动停止并提示测试完成，如图所示：

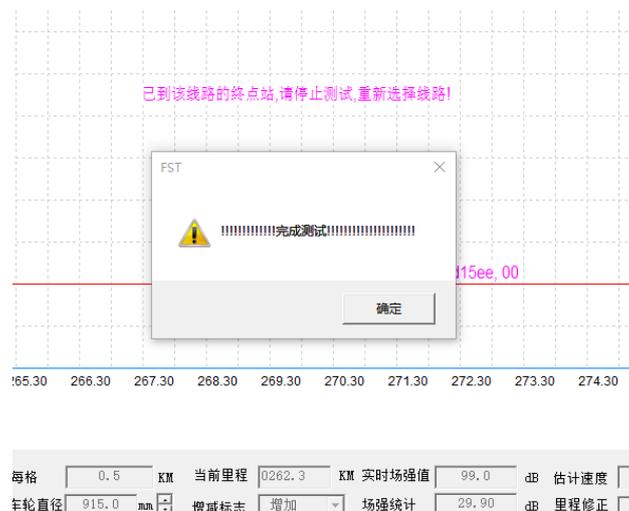


图 4-15 线路测试完成

4.3 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。

4.3.1 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：

在配置模拟 PR100 时，首先在 modeChoice 中选择 PR100，此时模拟器为模拟 PR100 工作状态，之后在右侧第二列编辑框中输入模拟 PR100IP 地址和端口，分别为 IP：127.0.0.1；Port：5555，之后点击 begin，模拟器开始运行。

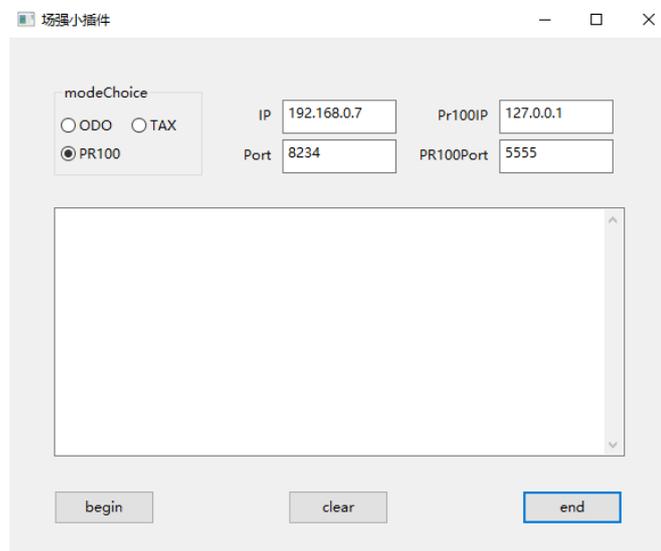


图 4-16PR100 模拟器

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。

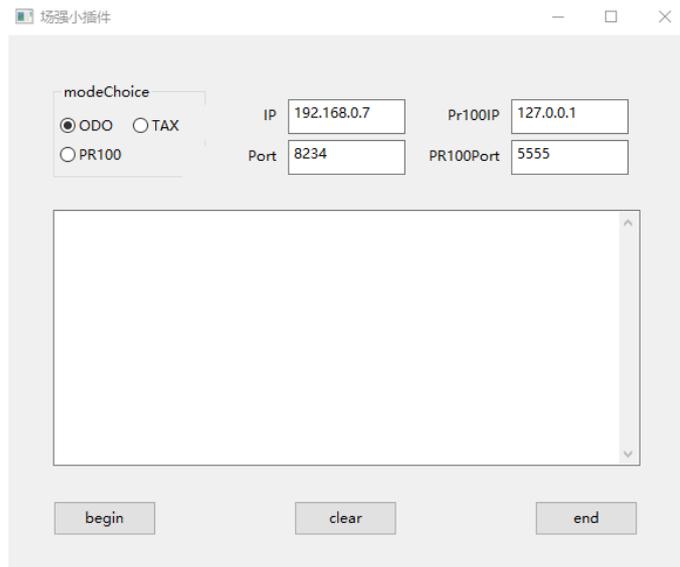


图 4-17 ODO 模拟器

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：

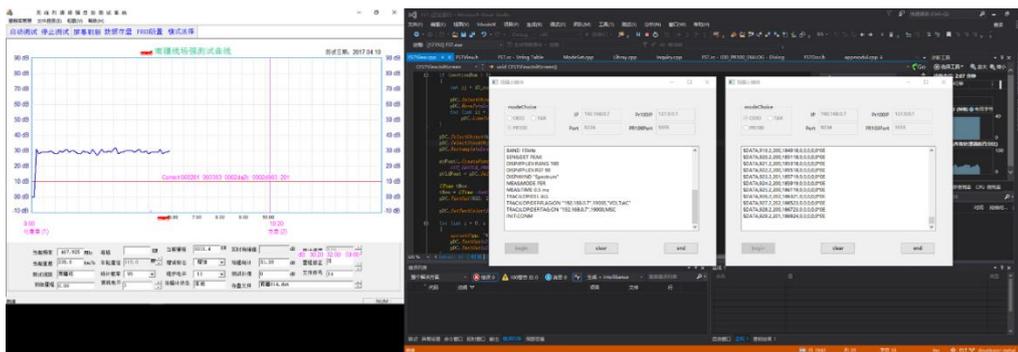


图 4-18 测试画面

测试软件在仿真环境下的运行结果：

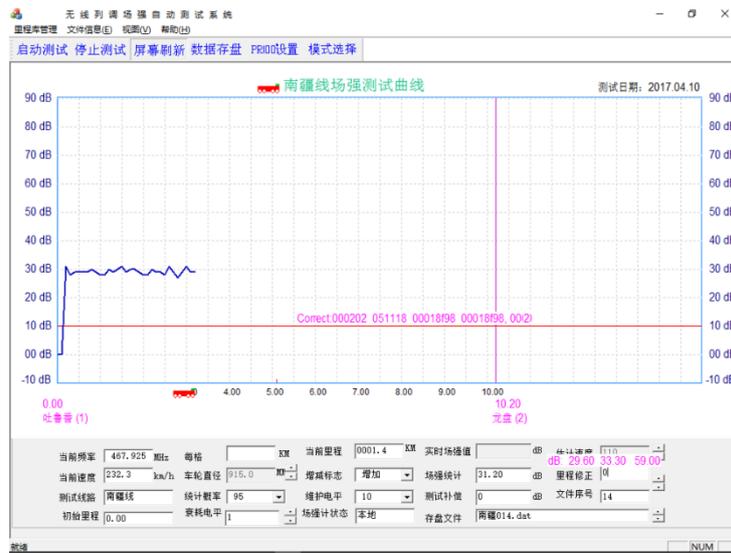


图 4-19 测试主界面

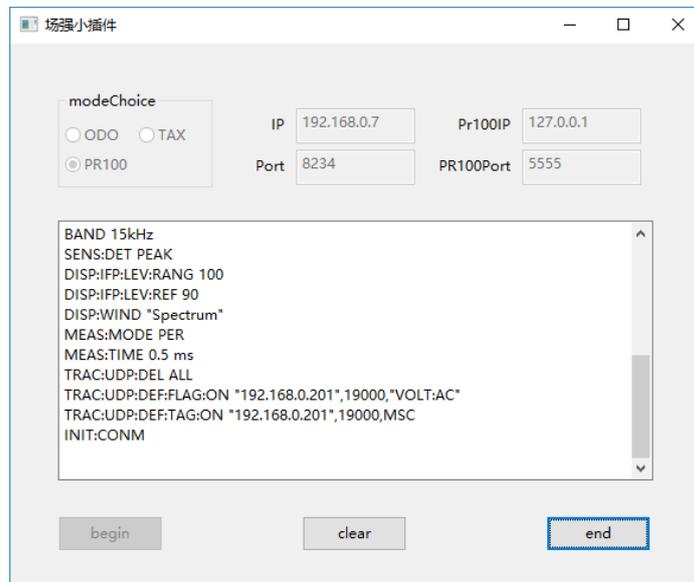


图 4-20 模拟 PR100 工作状态图

4.3.2 实物平台测试与效果分析

为进一步检测软件的稳定性、可靠性，本系统在实验室特意搭建了一套全实物设备的测试环境，来对系统设备进行尽可能模拟现场测试环境条件的综合测试。包括对系统进行安全性、稳定性、可靠性测试。具体测试设备及方法如下：

PR100 场强仪，用于场强值的测量，设备如图所示：

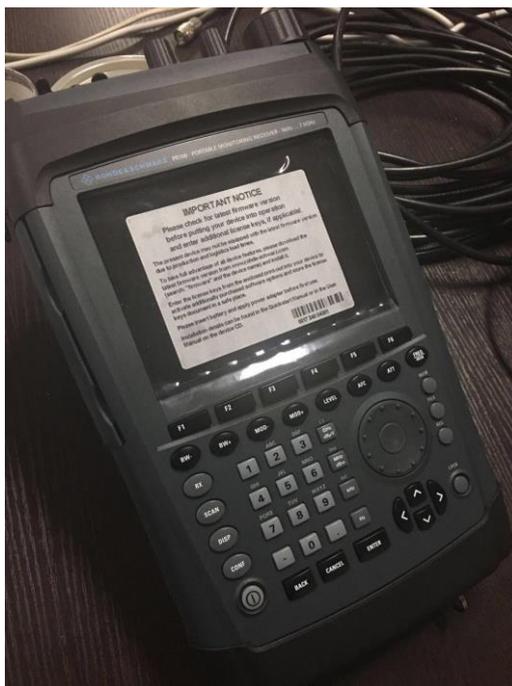


图 4-21 PR100 设备图

TAX 箱实物测试平台，用于产生 TAX 数据，通过串口发送至适配器，设备如图所示：



图 4-22 TAX 箱及其测试仪



图 4-23 ODO 实物测试平台



图 4-24 GPS 天线



图 4-25 前面板连接图

前面板连接图(蓝线连接 PC、白线连接 PR100), 左侧 LED 显示屏显示当前的 ODO、GPS 工作状态。

测试结果如图所示:

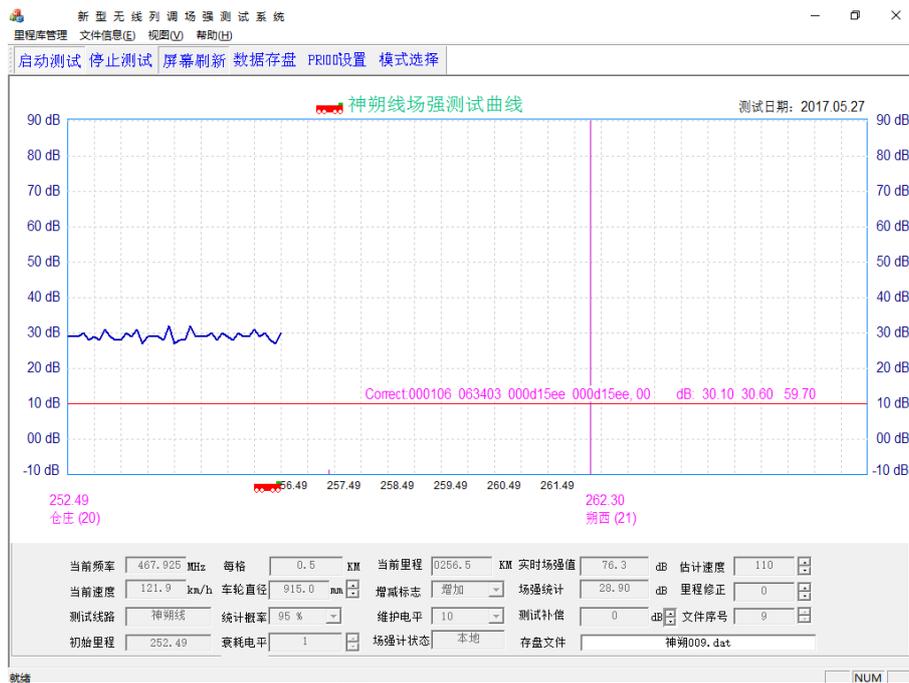


图 4-26 测试画面

4.3.3 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 4-27 第一代系统全部设备图

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 4-28 测试车

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:

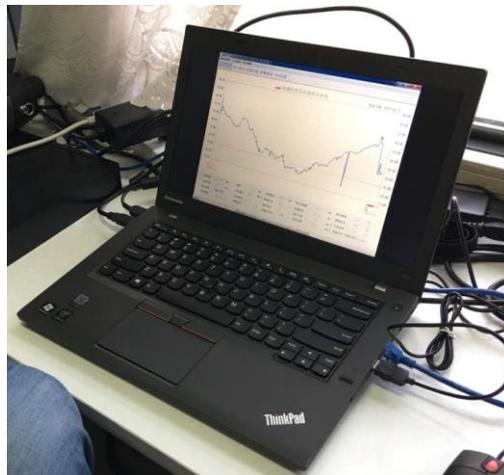


图 4-29 实际测试中绘制的场强曲线

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。

4.4 本章小节

本章在对软件应用背景和需求分析的基础上,就和硬件设计结构,提出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软件设计方案。在具体实现过程中采用多线技术来提升设备性能和兼容性。并在次基础上提出了一种基于 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。最后对系统进行了仿真平台、实物平台的测试,并完成了乌鲁木齐铁路局的现场测试任务。

5 结论与展望

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程序，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。

参考文献

- [1] 乔超, 唐慧佳. 列车里程计定位方法的研究[J]. 兰州交通大学学报, 2003, 22(3):116-119.
- [2] ERNEST Petr, MAZL Roman, et al. Train locator using inertial sensors and odometer[C]//2004 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Parma, Italy: University of Parma, 2004: 157-164.
- [3] 张辉. 基于 GNSS/ODO 的列车定位方法研究[D]. 北京交通大学, 2008.
- [4] 周达天. 基于多传感器信息融合的列车定位方法研究[D]. 北京交通大学, 2007.
- [5] 张秀莉. 秦沈客运专线车载动态轨道检测装置[D]. 吉林大学, 2008.
- [6] NovAtel. GPS Position Accuracy Measures. APN-029 Rev1. 2003.
- [7] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法. 科学出版社. 北京. 2003
- [8] 王剑. 基于 GNSS 的列车定位方法研究[D]. 北京交通大学, 2007.
- [9] 万德钧, 房建成, 王庆. GPS 动态滤波的理论、方法及其应用[M]. 江苏科学技术出版社, 2000:68-70.
- [10] 卜艳青. 无线列调场强测试系统的研究与开发[D]. 大连理工大学, 2006.
- [11] 焦婷, 董昱. 多传感器融合定位在高速铁路的应用[J]. 电子科技, 2009, (11):40-42.
- [12] BEVLY David M, RYU Jihan, et al. Integrating INS sensors with GPS measurements for continuous estimation of vehicle sideslip, roll and tire cornering stiffness[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(4): 483-493.
- [13] SEYR Martin, JAKUBEK Stefan. Proprioceptive navigation, slip estimation and slip control for autonomous wheeled mobile robots[J]. IEEE, Robotics, Automation and Mechatronics, 2006, 4(2): 109-114.
- [14] 蔡伯根, 贾怀义. 无线列调场强自动测试系统的研究[C]//第四届全国电磁兼容学术交流大会论文集. 1996:362~366.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 王振美. 无线列调场强自动测试系统[J]. 铁道通信信号, 2001, (04):10-11.
- [18] 于蒙. 无线场强测试系统的软件结构设计与实现[J]. 铁路计算机应用, 2008, (12):24-25.
- [19] 李廉, 丁英善. 青海铁通对兰青线、青藏线无线列调场强进行测试[J]. 铁道通信信

- 号,2004,(05):38.
- [20]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.
- [21]李晟阳. 融合 GSM-R 技术的铁路无线列调系统[D].西安工业大学,2012.
- [22]阎树田,曹长虹. 多传感器信息融合的列车定位方法研究[J]. 机械与电子,2011,(04):19-22.
- [23]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.
- [24]铁道部株洲电力机车研究所. TAX2 型机车安全信息综合检测装置[S]. 铁道部株洲电力机车研究所,1999
- [25]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.
- [26]张振兴. 城市轨道交通中的列车定位方法研究[D].北京交通大学,2008.
- [27]杨海波. 列车组合定位系统数据的仿真方法研究[D].北京交通大学,2011.
- [28]殷琴,蔡伯根,王剑,蒋大旺. GPS/ODO 列车组合定位系统[J]. 现代电子技术,2010,(19):168-171+175.
- [29]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.
- [30]刘越,宁滨. 列车测速测距方式的探讨[J]. 铁道通信信号,1997,(12):3-5.
- [31]刘江. 基于鲁棒估计理论的列车组合定位方法研究[D].北京交通大学,2011.
- [32]张洋,周达天,刘宏杰,刘波. 基于多传感器融合的列车测速定位方法[J]. 都市快轨交通,2011,(04):30-32.
- [33]赵磊,张小林. 列车测速定位误差的仿真研究[J]. 城市轨道交通研究,2014,(03):35-41.
- [34]唐一哲. 基于 GNSS 的列车定位完善性研究[D].北京交通大学,2007.
- [35]张俊. 基于 GNSS 高速列车多源信息融合定位模型及其算法研究[D].华东交通大学,2013.
- [36]张鹏超. 基于车载监测装置的机车自动过分相装置的研制[J]. 中国铁道科学,2009,(02):141-144.
- [37]齐向春,李博,杨晓. 高速铁路运行试验列车追踪间隔测试体系研究[J]. 中国铁路,2017,(04):7-10.
- [38]王家祺. 无线列调电台的干扰问题[J]. 铁道通信信号,2006,(11):31-32.
- [39]田永水. 无漏泄电缆无线列调弱场区通信系统设计[J]. 无线电通信技术,2011,(01):6-9.
- [40]王军,苏剑波,席裕庚. 多传感器融合综述[J]. 数据采集与处理,2004,(01):72-77.
- [41]高方伟. 多传感器融合的技术研究[D].西安电子科技大学,2007.

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本科毕业设计的科研工作，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。

毕设论文进行期间，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。

衷心感谢我的家人，他们一直给我以精神上的鼓励、物质上的支持和学习上的帮助，使我能够安心完成我的学业。

附 录

附录 A 外文翻译

Train Locator Using Inertial Sensors and Odometer

Abstract: The paper describes a solution to railway vehicle localization problem for the cases, where no global positioning information (like GPS) is temporarily unavailable. The given solution also assumes no additional landmarks or other extraordinary installations aside the train track. The presented approach is based on smart fusion of onboard-gathered data making use of Kalman filter. The available data sources include a vehicle odometer and accelerometer.

I. INTRODUCT

WHIDESPREAD usage computer control and other telecommunication technologies enable to achieve steadily increasing operational safety at optimization of costs for transportation services. Classical train-control systems are based on trackside equipment for signaling and train position localization in particular.

Unfortunately, standard type of such system has many disadvantages like: protection against vandalism or no support of dynamic configuration changes on traffic lines etc. Therefore, new trends in design of train control systems apply distributed intelligent control system principles which integrate the train track as well as the vehicle itself.

The main requirement for implementation of intelligent train control system is general knowledge about railway configuration and position of the train on railway. A satellite navigation systems (GPS) can be used for basic train localization. Nevertheless, there are singular situations in which even the GPS systems fail. This occurs in environment where insufficient GPS signal (tunnels, deep valleys etc.) appears. The failure cases might influence the railway control and safety, therefore these cases should be treated in other ways.

Generally, while satellite signal is not available, the train localization system can not rely on the GPS. This sets requirement on handover of the localization task to other onboard sensors as accelerometers, odometers etc. In simplified case, the GPS might be substitute for a while by data fusion from odometer and accelerometers and applying a dead-reckoning principle. Each of the mentioned sensors has specific features and sophisticated combination of these together with the GPS could operate as highly robust and safe train localization system.

Dead reckoning a train position from odometer may fail when worse adhesion between train wheel and rail occurs. The adhesion level impairs whenever the train is accelerating or braking.

Authors in [1] compute the train velocity using a fuzzy inference system and neural networks based on differences between odometers joined with multiple wheels. There are also many references in the robotics field on data fusion from gyroscopes, accelerometers and odometer using Kalman filter, PDAF techniques. An attractive navigation system is presented in [2], in which the approach to data fusion is driven by belief, that the most typical errors of these sensors are uncorrelated. The meaningful odometry errors occur during acceleration or braking phases could be successfully discovered by accelerometers. The navigation system described in [3] for mobile robots uses Kalman filter for calculating estimation of the position by measured odometry and from ultrasonic beacons, etc.

The usability of inertial sensors like gyros and accelerometers does not depend very much on system status and conditions, but using them for the navigation system might causes incorrect position of the train over long time periods. These kinds of sensors suffer from multiple fluctuating parameters as drift, offset and nonlinearity. Accurate and not easy estimation of the sensor parameters (mainly the offset) is needed to guarantee the required precision and reliability of the localization system.

Therefore, this paper introduces a smart data fusion approach to integration of the train odometer and onboard accelerometer using Kalman filter estimation. The method enables to obtain an efficient estimation of the sensor parameters (offset), position of the train. The long-term stability of the position localization is guaranteed by periodic calibrations via the GPS system.

II. PROBLEM SETUP

The train locator provides estimation of forward position on the rail with no respect to existence of the GPS system status and errors caused by slippage of the vehicle wheels on rail.

Whenever the GPS system operates, obtained positioning accuracy is sufficient for determination of the train position. In cases the GPS system fails, the position of the train can be computed from odometer (in case the slippage of the wheel is not detected) and the offset estimation of the accelerometer is provided using Kalman filter algorithm. For the case the slippage of the wheels on the railway is detected, the prediction of the position on railway is determined from measurement of vehicle acceleration. The use of accelerometer requires respecting of the predicted offset of the sensor, which is done in backward steps (a sliding window concept). This data-tracking strategy is described in the Figure 1.

Vehicle position predicted from measured acceleration is usable only for a short time period while the accelerometer offset is variable in time. The acceleration offset value clearly depends on the current acceleration value itself and on the temperature of environment in general.

The herewith proposed solution of the train locator applies Kalman filter algorithm split into two methods. The differences between these methods stand in slippage detection and its' subsequent correction. The implementations of these algorithms are described in chapter IV. The chapter V shows experimental results obtained with these algorithms.

III. PROBLEM MODELLING AND DATA PREPROCESSING

This chapter provides description of modelling the problem using Kalman filter as the optimal estimator of the vehicle position and accelerometer offset. The filter inputs are: vehicle acceleration from accelerometer and velocity from odometer (in case the GPS signal is not taken into account).

In the case, sliding of a wheel has been detected, the train-position estimation from odometer is substituted by a time-predicted position (via integration of the acceleration). This is done while respecting the known offset of the measured acceleration.

The navigation system using Kalman Filter is defined as a discrete time system, where each sample interval corresponds to the real time sampling of the measured data. The Kalman Filter algorithm is defined in terms of two equations: the state equation and the output measurement equation.

IV. DATA FUSION

This chapter describes algorithm for data fusion from GPS, odometer and accelerometer applying Kalman filter. This approach should respect possible errors which might occur on each of type of sensor used. The approach assumes, the GPS signal is available in most the cases, therefore position estimate is obtained from GPS. In case the GPS fails, the actual position of the train is estimated by Kalman filter algorithm using measured acceleration and velocity from odometer as sketched above. There are provided two algorithms using Kalman filter, implementing different approaches to detection of wheel slippage as well as two ways how to predict train position on the rail.

A. Observation error based approach

The first algorithm is based on recognition of the slippage from the observation error value from the Kalman filter.

The introduced approach uses switch strategy of estimated positions between Kalman filter and GPS position. This switch strategy is based on availability of GPS signal.

The algorithm applies prediction of the state vector in two standard steps of Kalman filter. In the case a slippage is detected, the covariance matrix R is assigned high value, so that the algorithm omits the influence of the velocity from odometer. The predicted position is obtained from measured acceleration in state prediction step. The state prediction x and covariance

matrix P provide weak dependency on current velocity measurement from odometer in a prediction step. On the other hand, improper choice of the c_2 and EMAX parameter values might cause unstable behavior of the state prediction.

B. Bounded offset based approach

This algorithm is based on recognition of the slippage by checking for min/max of the sensor current offset value.

The approach described in this chapter uses the same switch strategy as approach described in previous chapter. The main difference between previous approach (OEBA) is in jumping over the measurement prediction step, in case the offset gets over the limitations.

This algorithm is based on prediction of the state vector in two steps of the Kalman filter as the preceding approach based on the observation error.

Minor disadvantage of the method stands in requirement to choose the parameters by preceding data analysis, while the accuracy of the predicted position depends strictly on these parameters. Nevertheless, this drawback might be overcome by on-line estimation of the offset bounds.

V. EXPERIMENTAL RESULTS

The algorithms for train position estimation were designed for application with railway vehicles (locomotives) to serve for coupling GPS-based and dead-reckoning train positioning systems. Experimental data were gathered with a train setup carrying an incremental optical encoder offering a resolution of 400 pulses/rev. and industrial accelerometer type Crossbow CXL01LF. The reference position of the train has been obtained from differential GPS receivers operating in RTK (Real Time Kinematics) mode with the accuracy range of about 0.02m. The experiment was performed on a real railway with intentionally created slippage fields. The measured odometry and acceleration data were provided to the described algorithms for performance evaluation. The quality of the position estimation has been verified against the GPS data.

The following presents some results from the observation-error based method.

A. Experimental results of the OEBA approach

The used data incorporate slippage visible in the odometer velocity (dashed line) in Figure 5. The uncorrected integrated acceleration (speed with the integrated offset) is shown by broken line and the estimated velocity using Kalman filter is represented in the Figure 5 by solid line. In the Figure 7 is presented result of the distance estimation plot. The error in distance caused by slippage of the odometer achieves 14,4 % (dashed line) of the real distance measured by the GPS (solid line). The error of the estimated distance using Kalman filter is 0.8 %.

B. Experimental results of the BOBA approach

Behavior of the bounded-offset based method is presented below and has been tested with

identical input data. The following presents some results from the bounded-offset based method.

VI. CONCLUSION

The presented algorithms show two straightforward possibilities of inertial sensor and odometer fusion, serving as a short time substitute for satellite navigation system with railway vehicles. The level of achievable long-time precision depends mainly on accuracy of the odometer and proper detection of wheel slippage as well as on the accelerometer offset.

Comparing both the above described approaches, real-data tests have shown, that the maximum achievable robustness is provided by the bounded offset approach. Nevertheless, its' accuracy is lower. The observation error approach offers better accuracy but less stability (robustness) of the Kalman filter.

From the safety point of view the usage of the more stable and reliable approach might be enforced for the applications in transportation applications.

The presented approaches to localization system are not only the possible solutions to the given problem. Although, the achieved results are quite good the investigation of the sketched approaches are still in progress.

ACKNOWLEDGMENT

The presented research has been supported by the Czech grant agency under project no. GA102/02/0641 and by the Ministry of Education of the Czech Republic within the frame of the projects "Decision making and Control for Manufacturing" no. MSM 212300013.

基于惯性传感器和里程计的列车定位装置

摘要：本文介绍了一些解决方案，其中没有全球定位信息（如 GPS）暂时不可用。给定的解决方案也不包括额外的地标或其他非凡的安装，除了火车轨道。所提出的方法是基于使用卡尔曼滤波器的车载聚集数据的智能融合。可用的数据源包括车辆里程表和加速度计。

一. 引言

使用计算机控制和其他电信技术能够在运输服务成本优化方面实现稳步增长的安全运营。

古典列车控制系统基于特别是信号发送和列车位置定位的轨道设备。

不幸的是，这种系统的标准类型有许多缺点，如：防范破坏行为或不支持交通线路上的动态配置更改等。因此，列车控制系统设计的新趋势应用了集成火车轨道的分布式智能控制系统原理作为车辆本身。

实施智能列车控制系统的主要要求是铁路轨道配置和铁路列车位置的一般知识。卫

星导航系统（GPS）可用于基本火车定位。尽管如此，还有一些奇怪的情况，甚至 GPS 系统都失败了。这发生在 GPS 信号不足（隧道，深谷等）不足的环境中。失败案件可能会影响铁路运输的安全，因此这些案件应以其他方式对待。

一般来说，卫星信号不可用时，火车定位系统不能依靠 GPS。这将本地化任务切换到其他机载传感器作为加速度计，里程表等的要求。在简化情况下，GPS 可能会通过里程表和加速度计的数据融合代替一段时间，并应用推算原理。所提到的每个传感器都具有特定的特征，而这些组合与 GPS 的复杂组合可以作为高度鲁棒和安全的火车定位系统运行。

火车轮与轨道之间的附着力较差时，从里程表推算的火车位置可能会失败。每当火车加速或制动时，附着力会受到影响。中的作者使用模糊推理系统和基于与多个车轮连接的里程表之间的差异来计算列车速度。使用卡尔曼滤波器，PDAF 技术，陀螺仪，加速度计和里程表在机器人领域也有许多参考。在中提出了一种有吸引力的导航系统，其中数据融合的方法是由信念驱动的，这些传感器的最典型的错误是不相关的。在加速度或制动阶段发生有意义的测距误差可能会被加速度计成功发现。移动机器人中描述的导航系统使用卡尔曼滤波器，通过测量的距离和超声波信标等来计算位置的估计。

诸如陀螺仪和加速度计之类的惯性传感器的可用性并不在很大程度上取决于系统状态和状况，而是将其用于导航系统可能导致火车在长时间内的位置不正确。这些传感器受到多个波动参数的影响，如漂移，偏移和非线性。需要精确和不容易估计传感器参数（主要是偏移量）来保证定位系统所需的精度和可靠性。

因此，本文介绍了使用卡尔曼滤波估计的智能数据融合方法来集成火车里程表和车载加速度计。该方法能够获得传感器参数（偏移），列车位置的有效估计。通过 GPS 系统的定期校准，保证了位置定位的长期稳定性。

因此，本文介绍了使用卡尔曼滤波估计的智能数据融合方法来集成火车里程表和车载加速度计。该方法能够获得传感器参数（偏移），列车位置的有效估计。通过 GPS 系统的定期校准，保证了位置定位的长期稳定性。

二. 问题提出

火车定位器提供对轨道上前进位置的估计，而不考虑 GPS 系统状态的存在和由车轮在轨道上的滑动引起的错误。

每当 GPS 系统运行时，获得的定位精度足以确定列车位置。在 GPS 系统发生故障的情况下，列车的位置可以从里程表计算（在没有检测到车轮滑移的情况下），并使用卡尔曼滤波算法提供加速度计的偏移估计。在这种情况下，检测到铁路上的车轮滑移，根据车辆加速度的测量来确定铁路位置的预测。使用加速度计需要遵循在后退步骤（滑动窗口概念）中完成的传感器的预测偏移。该数据跟踪策略在图 1 中描述。

从测量的加速度预测的车辆位置仅在短时间段内可用，而加速度计偏移量在时间上

是可变的。加速度偏移值通常取决于当前的加速度值本身和环境温度。

本文提出的列车定位器解决方案将卡尔曼滤波算法分为两种方法。这些方法之间的区别在于滑移检测及其后续校正。这些算法的实现在第四章中描述。第五章显示了使用这些算法获得的实验结果。

三. 问题建模与数据预处理

本章提供了使用卡尔曼滤波器作为车辆位置和加速度计偏移的最佳估计器来建模问题的描述。滤波器输入是：来自加速度计的车辆加速度和里程表的速度（在不考虑 GPS 信号的情况下）。

在这种情况下，已经检测到车轮的滑动，来自里程计的列车位置估计被时间预测位置（通过加速度的积分）代替。这是在已知偏移测量的加速度的同时进行的。

使用卡尔曼滤波器的导航系统被定义为离散时间系统，其中每个采样间隔对应于测量数据的实时采样。卡尔曼滤波算法根据两个方程定义：状态方程和输出测量方程。

四. 数据融合

本章介绍 GPS，里程表和加速度计应用卡尔曼滤波器的数据融合算法。这种方法应该尊重每种使用的传感器可能发生的可能的错误。该方法假定，GPS 信号在大多数情况下可用，因此位置估计是从 GPS 获得的。在 GPS 故障的情况下，列车的实际位置是通过卡尔曼滤波算法，使用上述里程表测得的加速度和速度来估计的。提供了使用卡尔曼滤波器的两种算法，实现了不同的方法来检测车轮滑移，以及如何预测轨道上的列车位置。

基于观察误差的方法

第一种算法是基于来自卡尔曼滤波器的观测误差值的滑移识别。引入的方法使用卡尔曼滤波器和 GPS 位置之间的估计位置的开关策略。这种切换策略是基于 GPS 信号的可用性。

该算法在卡尔曼滤波的两个标准步骤中应用状态向量的预测。在检测到滑移的情况下，协方差矩阵 R 被分配高值，使得算法省略了里程表的速度的影响。预测位置由状态预测步骤中的测量加速度获得。状态预测 x 和协方差矩阵 P 在预测步骤中对来自里程表的当前速度测量提供弱依赖性。另一方面，不适当地选择 c_2 和 $EMAX$ 参数值可能会导致状态预测的不稳定行为。

基于偏移的方法

该算法基于通过检查传感器电流偏移值的最小/最大值来识别滑移。本章中描述的方法使用与上一章中描述的方法相同的切换策略。以前的方法（OEBA）的主要区别是跳过测量预测步骤，以防偏移超过限制。

该算法基于卡尔曼滤波器的两个步骤中的状态矢量的预测，作为基于观测误差的前述方法。该方法的缺点在于通过前面的数据分析来选择参数，而预测位置的精度严格依

赖于这些参数。然而，这个缺点可以通过在线估计偏移界限来克服。

五、实验依据

用于列车位置估计的算法被设计用于铁路车辆（机车）的应用，用于耦合基于 GPS 的和推算机的定位系统。采用带有增量光学编码器的列车装置收集实验数据，分辨率为 400 脉冲/转。和工业加速度计类型 CXL01LF。列车的参考位置已经从 RTK（实时运动学）模式的差分 GPS 接收器获得，精度范围约为 0.02m。实验在有意创造的滑移场的实际铁路上进行。测量的测距和加速度数据被提供给所描述的用于性能评估的算法。已经针对 GPS 数据验证了位置估计的质量。下面给出了基于观察误差的方法的一些结果。

A. 实验结果的 OEBA 方法

所使用的数据包含在图中的里程计速度（虚线）中可见的滑动。未校正的积分加速度（具有积分偏移的速度）由虚线示出，并且使用卡尔曼滤波器的估计速度在图中由实线表示。在图中给出了距离估计图的结果。由里程表滑移导致的距离误差达到了由 GPS（实线）测量的实际距离的 14.4%（虚线）。使用卡尔曼滤波器估计距离的误差为 0.8%。

六、结论

所提出的算法显示了惯性传感器和里程表融合的两个简单的可能性，作为具有铁路车辆的卫星导航系统的短时间替代品。可实现的长时间精度的水平主要取决于里程表的精度和车轮打滑的正确检测以及加速度计偏移。

比较上述方法，实数据测试表明，通过有界偏移方法提供了最大可实现的鲁棒性。然而，它的准确性更低。观察误差方法提供了更好的准确度，但是卡尔曼滤波器的稳定性（鲁棒性）较弱。

从安全角度看，运输应用中的应用可能会采用更稳定可靠的方法。提出的本地化系统的方法不仅是给定问题的可能解决方案。虽然取得的成果相当不错，但草图方法的调查工作仍在进行中。

致谢

所提交的研究得到了捷克资助机构的支持。研究在和捷克共和国教育部“制造和制造决策制定”项目框架内进行。