摘要

车载组合导航是现代智能车辆必不可少的一项重要功能。为满足自动辅助驾驶系统对小型化低成本低功耗导航系统的需求，本课题基于微电子机械系统(MEMS)惯性传感器和全球定位系统，完成了MEMS惯导/GNSS组合导航模块的设计。

本文着重理解分析了组合导航的基本原理，建立MEMS惯导姿态、速度和位置误差模型，推导了卡尔曼滤波的状态方程和观测方程。系统采用位置/速度松组合导航算法和卡尔曼滤波器完成导航系统数据的信息融合，研究过程主要可以可分成硬件设计和软件设计。主要研究内容如下：

1、导航模块以ARM微处理器、MEMS惯性器件、卫星接收机等为主要组成部分，

详细给出系统硬件结构框架、硬件选型方案及接口设计。最后完成硬件原理图和电路板

实物制作。

2、以MEMS惯导15维导航参数误差作为状态量，建立组合系统数学模型。在硬件实

验平台的基础上，提出了系统相应的软件设计方案，并编写组合导航算法软件，实现了

组合系统的多传感器通信，数据的融合解算、导航信息的存储等功能。

3、设计了MEMS惯导/GNSS组合系统的实时监控软件，可以实现导航模式选择、运

行轨迹显示、历史数据加载、数据的保存等功能，可以直观地显示车辆的运行状态。

最后，对所设计的组合导航模块进行车载实验，结果表明本设计的MEMS惯导/GNSS组合系统完成了实时导航系统的基本功能，且位置误差约5 ∼ 7m，速度误差约0.2 ∼ 0.5m/s，姿态误差约为8◦，满足车载组合系统小型化、低成本和实时性的设计要求。

关键词: 小型化；MEMS惯导；车载组合导航；卡尔曼滤波

第 1 章 绪论

1.1课题研究的目的与意义

车辆是人们日常生活中的重要的出行工具，随着生活水平的提高和汽车的普及，大多数百姓都拥有了私家车，导致城市交通的拥堵状况日益加重，从另一方面给人们的出行带来极大的不便。车辆定位导航技术随着智能交通系统的发展，基于惯性器件和GNSS多模卫星导航的车载组合系统为汽车提供全道路连续导航，大大缓解城市的交通拥堵现象，给人们的生活带来便利。

现代智能交通系统中，车辆定位导航技术处于极为重要的地位，他是实现车辆智能化与交通系统网络化的关键技术之一。智能交通系统在国外很早就受到支持并进行研究，早在20世纪60年代，欧美等发达国家就开始研究车辆定位技术及导航系统设计。20 世纪90年代，随着计算机技术和通信技术的快速发展，车载导航定位系统开始进入真正的实用阶段。尤其当美国全球定位系统GPS（Global Position System）投入民用阶段之后，采用GPS与电子地图的车载导航，精度得到大幅度的提高，为人们出行提供准确的三维（经度、纬度、高度）导航数据。不过GPS也存在诸多不足，尤其受到一些城市特定环境的影响，如多路径效应、电磁干扰、高楼树木的遮挡等，这些因素都会造成GPS信号可见性变差，定位信息中断，导航数据失效的现象，用户将无法获取准确的定位信号。

近年来，随着硅工艺水平的提高，使得捷联惯导系统朝着体积更小，低功耗，低成

本方向发展。基于微硅机械系统（Micro-Electro-Mechanical System，MEMS）的惯性测

量单元（IMU，Inertia Measurement unit）已经成为低成本导航制导产品的代表

[8]，一方面MEMS惯导具有小型化、低成本、测量范围大、寿命长等传统惯导难以比拟的优势，另一方面也因为工作稳定性差，受温度影响大等缺点无法像光纤陀螺激光陀螺等传统惯导那样可以长时间独立工作。因此，国外的MEMS惯导组合产品主要集中在与GNSS的

组合系统，除军事应用外，MEMS INS/GNSS组合系统也被用于汽车、智能穿戴设备、无人机、机器人等设备上，其应用已经遍布在我们的生活当中。

随着多传感器技术及信息融合技术的快速发展，为组合导航系统提供了物质前提和理论基础，解决单一传感器应用不足的弊端，组合导航系统目前已经成为导航系统发展的主要方向之一，受到越来越多的重视，尤其是对定位精度和可靠性有一定需求的车辆导航系统中。中国作为一个人口大国，汽车市场拥有非常大的潜力，而目前高校实验室和一些科技公司主要还是针对某些路段或特殊车辆进行无人驾驶与智能驾驶的测试，智能导航并没有完全应用到人们生活中去。

在自动化和智能工程方面，中国明确了在机器人和自动化机械领域成为领先者的

目标，正在努力成为开拓者，无人驾驶和智能辅助驾驶在汽车市场已占据主导地位。车

辆是低成本INS/GPS组合导航系统很大的应用市场，以往受制于惯性器件的成本，只在

军用作战车辆，特种车辆等装备上配备激光或光纤惯导，直到小型化、低成本MEMS惯

导/GNSS组合系统的出现才成功将车载组合导航系统的应用扩展至民用车辆领域。最近

十年来随着MEMS惯性器件使用的增加，车载组合导航技术的广泛使用带来无比广阔的

市场效应，为提高在导航产品的竞争力和吸引力，提高系统精度的同时降低成本是最为

有效的一种手段。国内也将MEMS组合导航研究作为一个研究热点，但由于研究起步晚

及制造工艺水平低于发达国家，目前还存在一定差距。

本文以低成本小型化MEMS惯导/GNSS组合导航系统设计为目标，根据车载实际环

境提出有针对性的解决方案，设计基于ARM控制器的微小型车载组合定位系统。首先根

据技术要求，进行系统的总体设计；对各个模块工作原理及功能进行分析说明，并给出

原理图和PCB图完成硬件平台的制作；接着完成组合导航的软件算法设计，利用卡尔曼

滤波器实现组合导航数据融合，得到导航信息；最后对设计的组合系统进行试验分析。

1.2

研究背景和研究现状

1.2.1

MEMS惯性传感器

微机电系统（Micro Electro–mechanical System，MEMS）是在半导体制造技术基础

上发展起来的，具有微型化、智能化、高集成度和适合大批量生产等特点，最初大量

用于汽车安全气囊，而后以MEMS传感器的形式被大量用于汽车的各个领域。MEMS-

IMU是基于MEMS技术的惯性测量单元，它集成了硅微陀螺仪和微加速度计，是一种新

型的捷联惯导系统，继承了传统SINS（strapdown Inertial navigation system）的特性：完

全自主式、保密性强、不存在信号电磁干扰等优点，又具有重量轻、低成本、低功耗、

便于安装调试等优势。经过四十多年的研究和发展，各种高中低精度的MEMS惯导相继

问世并得到广泛的应用，是当今惯性技术发展的一个重要方向。

自上世纪七十年代MEMS技术开始发展以来，凭借深厚的工业基础和科研能力，欧

美各国在MEMS惯性导航系统技术始终处于领先地位。博世（BOSCH）是德国工业企

业之一，从事汽车与智能交通技术、工业技术、传感器生产等产业，博世以其创新尖

端的产品及系统解决方案闻名于世，也是全球顶级MEMS供应商，每天的MEMS产量超

过400万颗。Draper实验室在MEMS惯性技术领域进行了大量的研究工作，并且取得了丰

硕的成果，在过去的几年中推动着MEMS惯性技术以及组合导航的发展和应用。其他的

如波音、霍尼韦尔、Rockwell公司等工业巨头为代表的一大批公司大力开展对MEMS惯

导/GNSS的开发与研究，并在航空器，地面无人车辆等设备中成功应用。而以美国

斯坦福大学、宾夕法尼亚大学，麻省理工、香港科技大学等知名大学都将MEMS惯

导/GNSS组合导航研究列为近年的重点研究方向，并做了大量的实践，成功将组合导航

产品应用到诸如无人机、无人车以及户外机器人上，推动整个领域的进步。欧洲的英

国、法国、德国、以及日本也在相继进行相关技术的原理的研究工作，并不断研发出新

的产品与技术[12]。

我国于上世纪九十年代初开始对MEMS惯导的研究，主要研究主要集中于清华大

学、航天科技集团十三所所、中国航天科工集团3院第33研究所、哈尔滨工业大学、中

国科学院上海冶金所等高校与科研院所[11]。由于MEMS惯导的研发所需时间较长且对制

造工艺有较高要求，我国对MEMS惯导的研究时间较短且缺乏核心技术，所研发的产品

在工艺水平、可靠性、器件精度等方面与欧美还有一定的差距。

1.2.2

卫星导航

GNSS（Global Navigation Satellite System）泛指所有的卫星导航系统，主要包括美

国的GPS、俄罗斯的Glonass、欧洲的Galileo、我国的自主研发的北斗卫星导航系统。卫

星系统主要由空间卫星星座部分、地面控制站、用户接受设备三部分组成，能为全球陆

海空的军民载体，全天候、连续提供高精度三维位置、速度和时间信息，对导航定位、

武器制导、交通管制、大地测量等均具有重要意义，卫星导航在军事和民用方面都得到

了广泛的应用。

在卫星导航系统中，GPS最为成熟，且渗透到人类生活的方方面面。完整的GPS星

座由24颗在轨卫星（其中21颗工作卫星、3颗备用卫星）组成，位于距地表20200千米空，运行周期为12小时。卫星均匀分布在6个轨道面上，倾角为55◦。理想状态下，全球

任意一点、任何时间都可观测到4颗以上的卫星。目前GPS在轨工作卫星数量31颗，空间

信号用户定位误差1.6m，授时精度20ns。2016年2月5日，美国联合发射联盟公司的“宇

宙神”5-401型运载火箭在卡纳维拉尔角空军站发射了美国空军的GPS-2F12导航卫星[14]。

至此第二代GPS卫星的十二颗卫星已全部发射，第三代GPS-3卫星的发射进入倒计时[15]。

图 1.1 北斗卫星系统

北斗卫星系统是我国自主研制的卫星导航系统，我国北斗卫星导航系统采取的是

“三步走”发展战略[16]，北斗一号是有源定位(RDSS)，北斗二号是有源定位＋无源定位，可覆盖全球1/3区域，而北斗三号将实现真正的全球覆盖，卫星性能也大幅提升，单星设计寿命达到12 年。按计划到2020年，建成由5颗静止轨道和30颗非静止轨道卫星组网而成的全球卫星导航系统，形成全球覆盖能力，建成世界一流的全球卫星导航系统。中国北斗卫星导航系统利用地球同步卫星对目标实施快速定位，同时兼有报文通信和授时定时功能，北斗卫星导航系统的建设是表征我国航天事业完成由面向专业领域到大众用户、由单星研制到组批生产的历史性转变。北斗卫星导航系统的建设将对维护我国国家安全、推动社会的进步与发展提供重要保障[17]。总体说来，美国的GPS研究走在中国北斗的前面，我国的北斗系统是后起之秀。就目前而言，GPS能为全球用户提供定位、导航、授时服务，定位精度达到1米以下。我国的北斗导航系统目前只有23颗卫星在运行，还不能全球覆盖，只能暂时为亚洲地区提供定位、导航、授时、通信服务。但随着北斗系统的不断完善以及技术水平的日益提高，未来北斗与其他卫星导航系统产品的兼容性将逐渐增加，多模联合定位，已成为国际趋势，GNSS的互操作能够带来导航、定位和授时性能的显著提高。宽带天线技术、高性能射频前段技术和微电子技术的发展以及高速多核并行处理器的出现使多模GNSS信号接收机的小型化和广泛使用成为可能。卫星导航系统具有全天候、高精度的显著优势，但任何单一卫星导航系统无法提供三维姿态信息，且播发无线电信号易受遮挡、多路径和干扰等影响而无法满足连续、可靠定位的实际需要，但与惯性导航系统的组合可以较好克服上述问题,组合系统时各分析系统的互补、互相提高的集成，并非简单的切换，使系统的性能更强，应用领域更广[18, 19]。依据工作原理，表1.1比较了惯导与GNSS的主要优缺点。

表 1.1 GNSS与惯导特性比较

系统特性

1.3

组合导航定位系统发展及现状从1921年的滚动式地图到如今无人驾驶汽车导航，车载导航系统的发展经历了接近一个世纪的锤炼，在此期间出现各类有代表的产品。

本田公司在1977年使用气体轴承陀螺仪来辅助汽车导航，该导航设备能够追踪方向

性转变并进行导航，同时能够在一个单色CRT显示器上展示汽车行驶状态，使用一个零

起点和透明地图叠盖在给定的路线上追踪汽车的位置。1981年，这套系统作为辅助设备

推送给经销商，但却从未进入成批生产。在该系统上，集成实时导航方式，为车辆组合

导航定位系统的发展奠定了良好的基础。

在八十年代，自主式路径导航定位系统得到发展，利用集成的高精度电子地图进行地图匹配，并通过航位推算技术进行组合定位，实现车载组合定位。典型的有美国“Navigation”导航定位系统，德国BOSCH公司的“EVA”，以及荷兰的Autoguide等,这些系统，由于航位推算容易产生误差累计，定位精度低，实用性受到很大限制[20, 43]。

随后多种车辆组合导航定位系统在此基础上得到发展，先后研究出挠性捷联惯导/GPS、光纤捷联惯导/GPS、激光捷联惯导/GPS，但这些设备设备结构庞大复杂，造价昂贵，不利于在民用市场普及。高性能的SINS因为价格昂贵使得其应用受到极大的限制，但随着MEMS技术的发展，基于MEMS SINS/GNSS的小型化组合导航技术发展相当迅速，美国等欧美国家

在MEMS惯性器件以及微型导航系统技术方面处于世界领先地位。美国国防部DARPA以

及其他政府部门在MEMS的军事和商业应用方面进行战略性投入，每年投入大量资金并且逐年增加，引领MEMS技术向构建低成本、战术级导航系统发展，其技术越来越完善，组合产品的性能也越来越好[23]。如：美国Crossbow公司的MEMS IMU/GPS组合导航模块Nav440如图1.2所示，其质量仅为0.58kg，功率只有4W，定位精度为3m，姿态测量精度均方根（Root mean square，RMS）为0.4度。德国的iMAR公司的iVRU-CB-M和iVRU-SNC的质量只有550g，功率只有6W，定位精度为5m，姿态测量精度RMS为0.5度。

图 1.2 Nav440组合导航模块

Wepilot1000集成GPS、IMU、磁罗盘、气压高度计和空速计等多种传感器。最大测量角速率为士100度/秒, 最大测量加速度为士2g，位置精度可达3m，而且Wepilot1000具有非常丰富的外围接口, 可直接与无线链路、图像载荷等设备相连接。其功耗为54W，质量1020g，尺寸仅为120mm\*154mm\*125mm。

另外还有Geneva Aerospace公司的FlightTEK导航模块，美国Athena Technologies Inc

公司生产的GS511战术级导航驾驶仪和Crossbow Technology，Inc。公司生产的用于小型

化设备的MNAV100CA导航模块等等，都达到了国际上先进的水平，并且已投入生产使

用。我国在“十一五”、“十二五”、“十三五”期间得到总装备部、国家科技部、国家自然科学基金委和教育部的重点支持。全国已有50多家高等院校、研究院所和企业开展了惯导与GNSS组合导航方面的研究工作，并在MEMS惯性传感器及基于MEMS惯导组合导航算法研究等诸多方面取得一定成果。清华大学设计出基于美国BEI公司的微型谐振陀螺仪和硅微加速度计的MEMS IMU，系统车载试验表明组合系统在GPS失锁时间内组合系统能保持较高的定位精度；哈尔滨工业大学研发了MEMS IMU/GPS/TAM组合导航系统原理样机，已投入使用；南京航空航天大学导航研究中心设计并实现了采用ADXRS150的MEMS陀螺以及ADXL320的MEMS加速度计IMU，同时采用Ublox GPS接收机与其组成MEMS组合导航系统，并成功应用于运动载体。

图 1.3 XW-GI5610导航系统

除了高校与科研院所外，国内多家科技公司也陆续推出具有自主产权的MEMS组合导航产品，并在智能驾驶车辆中投入使用。如：北京星网宇达科技股份有限公司推出的XW-GI5610组合导航产品如图1.3所示，该产品在卫星定位方面采用GPS/GLONASS/北斗多模方案，具有全天候、全球覆盖、高精度、应用广泛等优点，与此同时XW-I5610内置惯性测量单元，借助新一代多传感器数据融合技术，弥补卫星信号易受建筑物、山林等高大物体遮挡或多路径影响带来的卫星短时间信号丢失的问题，大大提高系统可靠性，同时还可提供卫星导航所不能提供的航向姿态等信息。北京华力创通科技有限公司出产的HWANAV-BGI-7210是专为汽车导航服务而开发的，基于汽车级MEMS惯性传感器和BDS/GPS卫星接收机芯片为主的组合方案，同时，融合磁传感器、车速信息，可实现高效经济的车载组合导航解决方案。

在军用领域，自动驾驶技术具有广泛的应用价值，包括运送军事物资、执行高危任务等，从而提升作战效率、减少大量兵员，但第一代、第二代军用无人车技术受制于高成本难以普及，如今小型化低成本的解决方案有助于突破这一瓶颈。而在民用领域，国内消费水平提升带动了物流运输特别是电商物流的快速发展，拉动了对公路用车的需求，与此同时，随着中国人口红利的消失，中小企业及私营运输市场普遍面临劳动力短缺和人力成本上升压力。经济型、可商用的自动驾驶技术将显著降低运输市场的人力成本，并减免因疲劳驾驶造成的交通事故发生率。另外一方面，得益于集成电路的发展，ARM处理器芯片价格越来越低，性能日益提高，广泛用于信号处理、通信、自动控制中，使用ARM代替传统PC机作为导航系统的

核心处理器设计小型化组合导航系统将会有更大的市场竞争力[21]。

随着我国自主研发的“北斗”双星定位导航系统的组网成功，未来国内车载组合定位系统将有着更加广阔的应用前景[17]。

目前，对于车辆组合定位系统来说，很多理论尚需完善，相应的技术方案还需要在实际的测试及工程应用中得到改进。随着新型传感器的发展和应用，车辆导航系统向小型化不断发展的趋势，结合相关信息融合理论，可实现对自动驾驶技术的突破，完成对车载组合导航系统的更新换代，小型化组合系统在自动辅助驾驶系统中将扮演更多更重要的角色。

1.4

论文的内容及编排

本课题以低成本惯性组合导航系统为研究对象，设计一款用于自动驾驶辅助系统的小型化导航模块，实现小型化、低成本的设计目的。根据课题任务，采用浮点型ARM控制器作为数据微处理器，低成本MEMS IMU等惯性器件和Ublox 多模卫星接收机组成MEMS组合导航模块，采集传感器数据对车辆姿态，速度和位置信息进行解算，设计相应组合导航算法实现导航数据融合，解算出可靠性高的导航信息，通过车载实验验证模块的实用性。最后，设计组合导航系统的实时导航监控软件，方便用户掌握车辆运行状态。

本文主要内容安排如下：

第一章： 绪论。简要介绍课题研究背景，分析MEMS的发展趋势，GNSS卫星导航

技术，以及车载组合导航产品的国内外发展现状，阐述了小型化MEMS惯导/GNSS组合

导航系统产品研究的重要意义。

第二章： 组合导航系统方案设计。按照车载组合导航系统小型化低成本的

要求，分析坐标变换方法及捷联惯性导航系统姿态、位置和速度更新方程，介

绍GNSS与SINS定位原理，研究MEMS惯导误差，通过Allan方差法对MEMS惯导进行

标定。最后给出GNSS/SINS 车载组合系统总体设计方案。

第三章： 车载组合系统硬件设计。搭建车载组合定位系统的硬件框架，详细介绍硬

件设计、器件选型及原理图与PCB的绘制，进行信号完整性分析，完成硬件调试。

第四章： 车载组合系统软件算法设计。软件设计包括低成本捷联惯性组合导航系统

的算法设计、底层驱动程序、及软件的各个模块进行介绍。

第五章： 车载实验结果与分析。编写导航上位机软件，实时监控导航状态。然后分

别进行静态试验和动态车载实验，采集实验数据并分析误差，验证该方案在工程实践上

的可行性。

第六章： 总结和展望。对课题的所做的内容进行总结与分析，并对后续工作的展

望。

第 2 章

组合导航系统方案设计

2.1

引言

车载组合定位系统是采用多项车载传感器进行组合定位的实时系统，随着MEMS 惯性器件工程化及精度的提升，其小型化、低成本、低功耗抗稳定性好的特点在车辆组合导航系统中得到了广泛的应用[10]。

本文致力于设计小型化车载组合定位系统，通过合理的布局及系统设计开发，将MEMS 惯性器件、GNSS接收机、数据处理器，数据存储等设备高度集成在一块板卡上，并设计相应导航软件，实现车辆的实时导航定位。

本章首先介绍导航系统研究中几种常见的坐标系及相互之间的转换，分析车载定位

系统的定位原理并给出基于四元数和旋转矢量法的MEMS惯导姿态、位置和速度更新方

程，最后给出车载组合定位系统的总体方案设计。

2.2

导航系统坐标定义及转换

在导航定位过程中，需要为车辆提供姿态、速度、位置等导航信息，这些信息需要必须建立在相应的参考坐标系中。对于不同的研究对象和任务要求，需要选择不同的坐标系[24, 25]。

2.2.1

导航坐标系定义

在陆地车辆组合导航系统中，常见的坐标系有：惯性坐标系、地球坐标系、地理坐标系、机体坐标系、导航坐标系

[29]。

(1)惯性坐标系(i系)

惯性坐标系(以下简称惯性系)是遵循牛顿定律的坐标系，即相对于惯性空间做匀速直线运动或绝对静止的坐标系，惯性坐标系为惯性器件测量的参考基准。完全理想的惯性坐标系本身并不存在，在实际应用中通过使用近似的地心惯性坐标系来代替惯性坐标系进行运算。

(2)地球坐标系(e系)

如图2.1，地球坐标系O-XeYeZe与地球固连，以地球质心为坐标原点，Xe轴指向格林威治经线，Ye轴位于赤道平面指向东经90◦方向，Ze轴平行于极轴，X-Y-Z构成由右手系随着地球一起转动，又称为地固坐标系。地球坐标系非惯性系，但可以很方便的描述地球表面点的位置。

图 2.1 地球坐标系与地理坐标系示意图

(3)地理坐标系(g系)

如图2.1所示，地理坐标系O-XgYgZg的原点O取在载体的重心，Xg轴在当地水平面内的指东，Yg轴在当地水平面指北，Zg轴则沿当地地垂线指向天空的方向，O−XgYgZg三轴

构成右手直角坐标系。地理系是随着载体运动的，可以按“东北天”“北西天”或者“北东地”顺序构成，本文中的地理坐标系选择“东北天”坐标系描述。

(4)载体坐标系(b系)

图 2.2 机体坐标系示意图

如图2.2所示，载体坐标系的原点Ob位于载体重心位置，与运载体固联，Xb轴沿载体的横轴方向，Yb沿载体的纵轴方向，Zb垂直机体水平面向上，XbYbZb轴构成右手直角坐系，载体坐标系相对于地理坐标系的方位称为载体的姿态和航向。

(5)导航坐标系(n系)

导航坐标系是惯性导航系统求解导航参数时所采用的坐标系用O-XnYnZn。针对捷联惯导来说，传感器所采的数据是沿载体坐标系轴向的，必须将该采集的信息分解到便于描述和求解导航参数的坐标系内，然后进行导航解算，这个坐标系即导航坐标系。本文选择的导航坐标系为地理坐标系即东北天坐标系。

当物体在地球上运动时，物体相对地球的位置是不断改变的，与此同时，地球上某点的地理坐标系相对于地球系的角位置也是不同。运载体相对地球运动引起地理坐标系相对地球坐标系的转动。地理坐标系相对惯性坐标系的转动角速度有两部分组成：一个是地球坐标系相对于惯性坐标系的转动角速度；另一部分是地理坐标系相对于地球坐标系的转动角速度。两部分具体的计算过程在后续章节详细介绍。确定物体的地理位置，就是确定地理坐标系相对于地球坐标系的方位关系，即经度λ纬度L和到地球地心的距离R；而物体的姿态则是确定载体坐标系相对于地理坐标系的方位关系。

2.2.2

坐标系变换原理

由上面定义的几种坐标系可知，在分析惯性导航系统运动时，将用到多种坐标系，而这些坐标系并不是相互孤立的。虽然空间中一个向量在不同的坐标系里的坐标是不同的，但是通过坐标变换，可以将一个坐标系下的向量坐标转换到另一个坐标系下。这种变换包括平移和旋转，在惯性导航中坐标系的变换我们更关注坐标之间的角度关系，即旋转坐标变换，具体的转换方法见文献[26]。以下介绍两种坐标之间的转换。

(1)地球坐标系与地理坐标系之间的转换

根据图(2.1)可知，地球坐标系和地理坐标系的原点不重合，地球系(Xe,Ye,Ze)可以通过位置矩阵转换为地理系坐标(Xg,Yg,Zg)。设地理系当前位置的纬度为L、经度为λ，则其转动过程可以描述为地球坐标系绕Ze轴转动(λ)，再绕变换后的X 轴转动(90◦-L), 最后绕变换后的Z轴旋转90◦，整个过程的表达式如式2.1所示：

(2.1)

(2.2)

e为地球坐标系到地理坐标系的变换矩阵；Cij为变换矩阵的元素(i = 1,2,3; j =1,2,3)。

(2)地理坐标系和载体坐标系之间的转换

载体的姿态和航向实际上就是载体坐标系和地理坐标系之间的方位关系。载体的姿

态可用如下欧拉角表示：

俯仰角（θ）：载体绕横轴Xb转动时，载体的纵轴与水平面之间会形成一个夹角，该

角即为俯仰角，一般用θ表示,向上角度为正，向下为负，俯仰角取值范围为[−90◦,90◦]。

翻滚角（γ）：载体绕纵轴Yb转动时，载体的横轴与水平面之间会形成一个夹角，该

角即为翻滚角，一般用γ表示，以右端向下为正，翻滚角取值范围为[−90◦,90◦]。

航向角（Ψ）：载体绕方位轴Zb转动时，载体纵轴Yb在地理坐标系下的水平投影与地

理子午线N 的夹角称为航向角，一般用Ψ表示，以正北方向为起点并以北偏东方向逐渐

增加，航向角取值范围为[0◦,360◦]。

载体坐标系和导航坐标系之间可以绕Z−X −Y的顺序转动三次完成转换，载体姿态

矩阵Cn

b实现转换,变换公式如下：

第一次转动：坐标系绕Z轴负向转动角Ψ：

第二次转动：坐标系绕X轴负向转动角θ：

第三次转动：坐标系绕Y轴负向转动角γ：

定义Cn

b为如下形式：

b就是导航系统中通常所称的捷联矩阵，载体的姿态角可以计算如下：

对于地面车辆导航系统，式2.9中，俯仰角θ 、翻滚角γ定义在区间[−90◦,90◦]中，在

计算反正弦和反正切函数中没有多值问题；航向角Ψ定义在[0◦,360◦]区间，需要分情况

考虑根据主值区间和方向矩阵的数值来确定角度大小，其真值表如表所示

[24, 25]。

表 2.1 航向角Ψ的真值表

2.3

捷联惯导定位原理

在捷联惯性导航系统（SINS）中惯性测量器件（陀螺仪和加速度计）直接与运载体

固联，通过导航计算机采集惯性器件的输出信息并进行数值积分求解运载体的姿态、速

度和位置等导航信息，这三个过程分别是姿态更新、速度更新和位置更新。MEMS惯导

一般采用角速率输出采样方式，简单的将输出信号乘以采样间隔Ts即可变换为近似的角

增量，利用单位时间角增量数据可以实现载体姿态的更新，姿态指的是载体坐标系相对

于导航坐标系的角位置。MEMS惯导信息的解算核心是姿态更新，对整个系统的解算精

度影响最为突出，具有重要的研究和应用价值。

2.3.1

四元数与姿态更新

根据所选的变量参数不同，常用的姿态更新算法有方向余弦法、欧拉角法和四元数

法（Quaternations）。这几种姿态解算方法分别适合不同的姿态变化情况。欧拉角算法通过求解欧拉角微分方程直接求解姿态角。欧拉角解算简单明了，概念直观，容易理解，但求解过程中需要频繁解算三角函数，运算比较困难，而且当俯仰角近90◦时会引起万向节死锁问题，所以该方法适合水平姿态变化不大，实时性要求不的情况下。

方向余弦和欧拉角并没有本质上的区别，因为是用欧拉角表示的方向余弦阵，避免了退化的问题，可以计算全姿态，但是姿态矩阵微分方程包含九个未知量，因此算法设计计算量大，实时性差，不利于工程上的应用。

四元数表示方法虽然有些抽象，但它的优点有很多，利用起来非常方便，算法实现上简单易操作，是很实用的工程方法。本课题是基于四元数法完成姿态矩阵的解算。四元数是由威廉卢云哈密尔顿在1843年爱尔兰提出的数学概念，其基础思想为：一个坐标系到另一个坐标系的变换可以通过绕一个定义在参考系中的矢量µ的单次转动来实现，四元数提供该转动的数学描述，一个单位四元数可以为表示一个旋转。四元数法实质上是旋转矢量法中的单子样算法，对有限旋转引起的的补偿程度不够，只适用于低动态运载体的姿态解算，而对于高动态运载体的姿态解算中漂移非常严重，对于低动态的车载组合导航系统来说，四元数方法十分适用。

1、四元数定义

四元数是由四个元构成的数

[33]：

(2.10)

式2.10中，q0、q1、q2、q3是实数，q0也称为实部，qv= q1i+q2j+q3k 称为虚部，i、j、

k 是互相正交的单位向量，可以将四元数看作是四维空间中的一个向量或者一个超复数。

四元数的虚单位i、j、k之间满足如下乘法运算规则

[13]:

(2.11)

其中，运算符”⊗”表示四元数乘法运算，虚部单位矢量的叉乘运算特点，可以将四元数

的虚数部分qv= q1i+q2j +q3k 看成是在三维空间中的映像，反之，一个三维矢量可以

看做一个零标量四元数。

2、四元数与姿态矩阵的转换

类比于复数的三角表示法，四元数写成三角函数为

[24, 41]:

(2.12)

特别地，当∥Q∥ = 1时，即对于单位四元数，有q0= cosϕ

2，qv= µsinϕ

2且q2

0+

qvTqv= 1；µ 为单位长度的三维矢量，即µTµ = 1；ϕ为某一角度值。在刚体转动理

论中，载体系相对于导航系的位置，可以等效成载体系绕某定轴旋转一定角度θ，用向

量µ表示该定轴，则两坐标之间的位置关系可以用角度θ和单位向量µ 来表示如下图2.3。

图 2.3 坐标系旋转变化

因此，推导出由四元数表示的载体系至导航系的转换矩阵

(2.13)

3、姿态更新四元数算法

根据四元数理论，坐标系转换过程可以表示为

[33]：

(2.14)

式中，Qn

b表示导航系n到载体系b的变换四元数，(Qn

b)∗是Qn

b的共轭表示，vn和vb为

同一向量在导航系n和载体系b下的表示，该向量分别为；

(2.16)

由式(2.3-2.7)方向余弦理论对坐标系的转换可得：

(2.17)

比较式2.14和2.17，可以得到变换过程中姿态角的四元数计算方法：

)

(2.18)

由式(2.12)已知Q为导航系至载体系的四元数表达式，对两端求导得四元数的微分方

程：

(2.19)

由刚体动力学知识可知

(2.21)

其中，ωb

nb是载体系相对于导航系下的角速度，将式2.20和2.21代入式2.19可得：

nb不能由MEMS陀螺直接测量获得，陀螺输出的ωbib是载体系相对于惯性系的角速度，其中包含了地球自转速率ωnie和位置速率ωnen，可以计算

(2.26)

其中，L是导航系所在地理纬度，VE、VN为当时时刻载体的东向和北向速度，ωie是

地球自转角速度。

2.3.2

速度更新

本文选择“东-北-天”地理坐标系作为导航坐标系(n系)，则有惯导比力方程

[46]：

(2.27)

其中fsf为加速度计测量的比力，2ωn

ie×vn

en为由载体运动和地球自转引起的哥氏加

速度，ωn

en×vn

en为由载体运动引起的对地向心加速度，gn为重力加速度。式表明，在加速度计输出中去掉有害加速度后，就可获得载体在导航系下的真

实加速度˙Vn

en,设速度的更新周期为T，在每个更新周期内对角增量和速度增量作N次采样，

对上式作积分运算，得到tm时刻载体在导航系内的速度：

(2.28)

式2.28中，VmVm−1分别是tm和tm−1时刻载体的速度；Cn(m−1)

b(m−1)是tm−1时刻的姿态矩阵。

若δVn

g/corm表示在时间[tm−1,tm] 内有害加速度引起的速度补偿量，δVsfm是由比力引起的

速度补偿量，则式2.27可以改写成:

δθm、∆Vm为更新周期内的陀螺角增量和加速度计速度增量。因为载体角速度和加速

度变化复杂，无法通过确定的数学公式加以描述，工程中常采用曲线拟合的方法来近似

求解。根据比力方程，可以得到离散系统时速度在导航系的增量为：

(2.31)

由于低成本MEMS传感器属于低精度，陀螺精度（零偏稳定性及重复性）为0.1◦量

级，加速度精度为5mg，传感器标定在下节介绍具体方法，此处忽略划桨效应，可对其

作大幅简化。

2.3.3

位置更新

在图2.1，假设地球表面运动的物体在地理坐标系下的坐标记为Og(λ,L,h)。Oo点

是Og与地心连线在地球表面的交点，以该点建立直角坐标系，纬圈切线指东为Ooxo轴，

经圈切线指北Ooyo轴、椭球面法线方向指天Oozo轴。

如果Oo点对地球坐标系Oxeyeze的速度在Oxoyozo系的投影记为vo

。

注意，由于OoXo轴与纬圈相切，故经度会随着vx0而变化，同理，纬度也会随着vy0产生

变化：

(2.32)

对于地理高度为h的Og点，假设其速度为vg

,根据图2.1中地理几何关

系，有：

(2.34)

上述两式分别带入式2.32:

(2.36)

写成矩阵形式有：

(2.37)

与捷联惯导姿态和速度更新算法相比，位置更新算法引起的误差一般比较小，采用

梯形积分法将上式离散化

[30]，得

(2.38)

2.3.4

低成本惯导的姿态初始化

对于MEMS器件的低精度惯导系统而言，地球自转角速率完全湮没在陀螺的噪声里，

陀螺精度相对较低，因此利用陀螺来进行方位对准，其对准精度很难达到要求，因此不

具备自助式的初始化对准功能，MEMS系统只能通过机动运动来增加系统滤波器的可观

性从而完成动态的初始化。这里，在导航初始化时，水平姿态角可以在静止状态下通过

加速度计输出，而方位对准在运动条件下依靠卫星导航信息来完成。

1、利用加速度计进行水平姿态对准

在静态环境下，运载体的线运动及其导数均为0，比力方程可以简化为

[3, 25]

为当地重力加速度的大小。转换有

(2.40)

可以推出：

2、利用卫星导航进行方位对准

对于车辆导航来说，其运动方向一般沿载体的正前方(纵轴方向)，在完成水平对准

后，在卫星信号可用的情况下，测量得到速度矢量，可以得到载体纵轴相对于地理北向

的方位角，利用该方位角，与由Cn

b计算获得的俯仰角和横滚角完成姿态初始化

[25]。

2.4

组合系统方案分析与设计

2.4.1

惯导/GNSS组合方式

结合GPS定位的长期稳定性与SINS系统定位的短期精确性，整合两套设备的导航信

息可以提高整个系统的定位性能，目前常见的组合方法有：GPS/SINS松组合、紧组合和

超紧组合等模式

[27]。

(1)GNSS/SINS松组合

松组合是采用滤波计算的较为基础的组合方式，从GNSS接收机和惯导系统各自

输出的速度、位置之差作为系统量测，通过组合滤波器对惯导系统的速度、位置误差

和姿态误差进行估计，然后作为反馈信息完成对MEMS惯导传感器的校正，从而实现

对SINS系统的累积误差的消除，提高组合系统的导航精度。

松组合的特点是：系统结构简单，易于实现，计算量小等，GNSS可以限制惯导误

差的增长，当GNSS失去信号时惯导可短时间内自主导航，惯性传感器误差实时估计并

修正。适合车载导航、民用航空等领域。其结构示意图如图2.4

图 2.4 松组合示意图

(2)GNSS/SINS紧组合

紧组合是在松组合得基础上增加了伪距与伪距率作为滤波输入，属于高水平的组合

模式，原理框图如图2.5所示，该组合方式中，用GNSS给出的星历数据和SINS 给出的位

置和速度计算出相应于SINS 位置的伪距和伪距率，并将其与GPS 测量的伪距和伪距率

相比较作为量测值，通过Kalman 滤波器估计SINS 和GPS 的误差量，然后对两个系统进

行校正，由于GPS 的测距容易建模，因而可以把它扩充为状态，通过滤波器加以估计，

然后对GPS收机进行校正。GNSS/MEMS惯导紧组合系统也逐渐成为欧美发达国家陆地

车辆导航辅助的主要装备。

24

北京理工大学硕士学位论文

紧组合的特点是：可以实现GNSS与惯导内部相互辅助，在小于四个卫星的情况下

依然可以正常输出定位信息更新，相比松组合具有更高的定位精度及输出稳定性，抗干

扰能力强等特点，但是需要参与大量的GNSS接收机的基带处理过程，导致计算量增大，

软硬件架构复杂，应用有一定限制。

图 2.5 紧组合示意图

2.4.2

MEMS惯性传感器的误差模型

MEMS惯性传感器的输出信号中误差主要由确定性误差和随机性误差组成。确定性

误差不随传感器工作时间的长短发生变化，可通过建模和测试予以补偿，在传感器数据

导入惯导解算之前，这部分的误差应该首先被补偿。确定性误差包括零偏、刻度因子误

差、传感器三个轴之间的非正交性以及刻度因子的非线性误差。而一般所指的惯性器件

精度习惯上为静态条件下测试的随机误差，一般包括：零偏稳定性、白噪声、零偏重复

性、加速度计速度随机游走、角度随机游走等，随机性误差比较复杂，通常可以用随机

常数、随机游走和一阶高斯马尔可夫过程等统计方法来对随机误差进行建模。

目前对于低精度低成本的惯性传感器，越来越多的建模方法被使用，如自相关函数

法、功率谱密度法、自回归平滑模型法和Allan方差法等。由于Allan方差分析简单和有

效，是针对传感器随机误差参数确定的常用方法之一

[39]，本课题采用此方法对MEMS惯

导的随机误差进行分析。Allan方差作为陀螺随机误差一种时域分析技术,是公认的IEEE标准规范

[43]。他是美国学者David Allan为研究原子钟的震荡器稳定性而提出的概念，Allan方差随后被引入到中、低精度陀螺的随机误差辨识中，实用性很强，取得良好效果。

1、Allan方差的定义

[44]

如图，数轴上有N个连续的采样点，每个采样点的间隔都是∆t，然后连续n数据点可

以创建一个簇(n < N/2)。每一簇的时间为τ = n∆t。

假设传感器的瞬时采样速率为Ω(t)，那么在时间tk和t(k+1)内的第K簇平均值为：

(2.42)

其中，¯Ωk(τ)代表从第k个数据点开始，持续n个数据点输出的速率平均值。则Allan方

差定义为

[53]：

(2.43)

式中符号⟨⟩代表无穷时间内的平均值，在实际中，对于有限N个MEMS惯导数据，

时间长度为τ的簇的数目也是有有限的，测试试验中n已知，则Ω(t)是可以测量的，

Allan方差σ2(τ) 和MEMS惯导各项随机噪声的功率谱密度(PSD)有唯一对应关系(IEEE

(2.44)

图 2.6 Allan方差分析曲线图

其中，SΩ(f)是Ω(T)的随机功率谱密度。由于陀螺数据的Allan方差与功率谱密度之间存在定量关系，利用此关系，将陀螺输出数据在样本长度上进行计算，可以得到陀螺数据中的各种噪声特性。同时，该结果还为后面的Kalman滤波器初始参数的设置提供依据，可减小滤波器因噪声参数统计不准确而发散的风险。Allan方差分析通常能辨识出零偏不稳定性B、随机游走系数N、量化噪声Q 等多种随机噪声。通过Allan 方差法对MEMS 陀螺与加速度计长时间静止数据进行处理后，可以得到类似图2.6的双对数曲线图。不同噪声出现在不同的τ区域上。各误差项在Allan标准差双对数曲线上的对应的斜率和τ值如表2.4所示

[53]。

表 2.2 Allan方差

在曲线图上绘制某一斜率的直线，在该斜率直线上找到对应τ处的σ(τ)值，便可以

分离出相应的随机噪声系数

[44]。

2、MEMS惯性传感器Allan方差实验将制作的设备固定于静止工作台上，上电预热后，以50Hz采样频率采集了6h数据，在matlab上计算数据的Allan方差并绘制对数图，实验数据的Allan方差分析结果如图所示；根据上述结果可以得到MEMS惯导的随机误差参数，如表所示：

表 2.3 MEMS陀螺随机误差参数

零偏不稳定性

角度随机游走

陀螺X轴

14.43deg/h

0.883deg/√h

陀螺Y轴

9.93deg/h

0.75deg/√h

陀螺Z轴

9.35deg/h

0.75deg/√h

2.4.3

系统总体方案自动辅助驾驶系统是一个复杂的系统集合，汽车依靠人工智能、视觉计算、雷达、监控装置和组合导航系统协同合作，并结合高精度地图获取车辆的运行状态。其中车载

图 2.7 MEMS陀螺Allan方差双对数曲线图

图 2.8 MEMS加速度计Allan方差双对数曲线图

表 2.4 MEMS加速度计随机误差参数

零偏不稳定性

速度随机游走

加速度计X轴

0.73m/s2

0.2m/s/√h

加速度计Y轴

1.83m/s2

0.2m/s/√h

加速度计Z轴

0.93m/s2

0.2m/s/√h

组合导航系统包括传感器的数据采集与处理，实时数据解算和融合，导航信息显示等是

自动辅助驾驶的重要组成部分。

本课题以组合导航解算理论为基础，根据实际工作环境完成了芯片选型与硬件设计，

并编写相关导航算法软件，最终可以成功地为地面车辆提供姿态位置和速度信息，完成

了一款小型化导航模块的工程实现。此模块以ARM 处理器为核心，主要由MEMS惯性

传感器，多模卫星接收机等设备组成。构建的SOPC(system-on-a-programmable-chip) 嵌

入式系统具有体积小，功耗低，数据计算功能强等优点，为小型化、低功耗，低成本导

航系统硬件设计提供了解决方案，其总体方案如图2.9所示：

图 2.9 系统总体方案图

从图中可以看出，首先将MEMS惯性器件通过SPI通信接口以100Hz的频率采样，降

频至10Hz送入ARM芯片数据缓存区，降频采用简单的均值滤波并做误差补偿，供后续

系统做惯导解算使用；另一路GNSS模块通过串口连接到ARM 芯片，并以1Hz 速率将数

据送入数据缓存区；ARM芯片在解析惯导数据和GNSS数据后，通MEMS数据进行时间

对齐，然后用卡尔曼滤波融合对导航数据进行最优估计，最后通过串行总线把导航解算

数据传送到PC端进行显示，并将结果实时记录在SD中，方便后期对数据的分析和系统

的调试。

根据上述系统总体方案的介绍，GNSS/INS组合导航系统中，不仅要完成导航信息

解算等软件问题、首先要完成硬件平台的开发。结合本系统的功能及特点可以将设计的

主要任务主要分成以下几点：

1、硬件平台设计及模块调试

导航模块硬件设计是整个任务要求的第一步，设计最初，要根据平台的设计功能和

算法需求特点进行主要器件的选型，然后依据电气连接规则绘制电路原理图和PCB图并

加工制作电路板，硬件设计的过程在将在第三章详细介绍。

2、软件设计

在硬件平台搭建完成之后，要实现导航定位的功能还需要软件系统的支持。根据系

统总体设计思想，软件设计分为相关芯片驱动部分、惯导数据解算、以及组合滤波误差

处理几部分。具体过程为：首先对ARM硬件系统进行初始化，定时器、串口、SPI接口

等外设初始化，然后通过定时器对IMU 和GNSS数据进行采集，对惯导数据进行导航解

算，解算结果与GPS观测量通过卡尔曼滤波得到最优的导航信息，软件的设计将在本文

第四章进行介绍。

3、导航数据输出显示

一个完整的系统设计最终需要一个人机交互的功能，导航解算后的数据要给用户显

示出来，最终的设计将导航结果通过串口连接至电脑端，并能实时监测物体的运行状态

和轨迹，同时显示当前搜索到的卫星，并将导航数据保存下来以便调试使用。

较之传统定位系统，本系统具有导航定位独立，运行设计可靠，利于在中低端设备

上实现等优点。

2.5

本章小结

本章主要介绍了捷联惯导的基本原理，推导了MEMS惯导的位置、姿态、速度更新

算法，以及MEMS惯导的误差模型，给出了航位推算的方法，结合卫星导航与SINS导航

组合原理，整合各传感器的特点，给出了小型化组合导航系统的总体方案，提出了系统

设计的任务要求及需要实现的功能，为后文提供理论基础。

第 3 章

组合导航系统硬件设计

3.1

引言

根据前一章系统总体方案的设计，本章的重点工作是制作系统的硬件平台。本车载

组合定位系统硬件设计分为：需求分析、硬件方案设计、器件选型、嵌入式ARM系统设

计、外围设备设计、数据传感器设计，电路测试等。本课题设计过程考虑到成本、硬件

尺寸、产品功耗、抗干扰性能和产品实用性等问题，提出自己的解决方案，实现了一个

低成本、精度可接受的MEMS SINS/GNSS 组合的小型化组合导航系统。设计流程如下

图3.1 所示：

图 3.1 硬件设计流程图

硬件电路的设计是在Altium Designer 10 上进行设计的。这是一款由Altium 公司开发

的基于Windows环境下的电路板设计软件，在电子行业运用十分普遍，是电子工程师设

计印刷线路板的首选工具，它具有简单易学，操作便捷，资源丰富，人机交互良好等优

点。

31

北京理工大学硕士学位论文

3.2

硬件方案设计

3.2.1

需求分析与电路规划

本课题是利用MIMU构建捷联惯性导航系统，然后接收卫星信号对导航结果进行补

偿和融合，得到可信度高的姿态、速度和位置等信息，最终可以应用在地面车辆上，并

具备良好的稳定性和抗干扰能力。所以，在设计时需要对其进行规划分析，还要根据工

作环境和运行条件进行芯片的选型。首先，完成给出硬件总体方案的设计。

图 3.2 硬件总体框架

根据系统要实现的功能和特点，硬件系统上可以分为电源设计、传感器通信、最小

系统、数据保存等几个部分。

(1)电源部分：电源是系统的工作基础，电源的设计直接影响到系统能否正常工作。

根据设计要求，模块可通过USB供电或者引出电源接口由外部电源供电，再由系统稳压

芯片输出稳定的电压。考虑系统中元件工作要求和系统可扩展性，需要的电压有3.3V

和5V，因此本系统对电源做了两级处理，前级电源输出5V的电压，接着连接3.3V的稳压

芯片，保证了系统供电的稳定性。降压模块选择输出电压稳定性高，纹波噪声小的线性

稳压芯片。

(2)通信接口部分：MEMS惯性器件采集到数据通过SPI接口传送给处理器，SPI是全

双工工作，速度很快，适合MEMS 数据高速通信的场合；GNSS模块将采集的GPS数据

通过串口提供给处理器；系统涉及到的通信方式还有SDIO、USB从机通信等。

(3)最小系统部分：电路中的数字处理器要完成信号采集、数据滤波、捷联解算的等

服务，是整个系统的关键。在对处理器选型时，应当需要具有精度高、速度快，实时性

好、功耗低，体积小等特点。同时，解算后的导航数据还可以保存或通过串口连接到上

位机进行显示和处理，所以还需要考虑处理器是否具有相应功能外设，最后基于所选器

件开发最小系统。

通过上面的分析，对组合导航系统的硬件电路有一定的规划后，经过整理和修改，

制定如图3.2所示的系统硬件电路框图。为保证系统可靠稳定的运行，考虑到组合系统的

工作环境和尺寸要求，尽量采用技术成熟、市场通用的高集成度元器件，以下介绍器件

选型的过程。

3.2.2

核心器件选型

一、ARM处理器芯片

图 3.3 主控制器芯片

在设计导航系统时，需要考虑CPU的处理能力、存储容量及运行速度、IO端口的分

配、通信接口、电平要求等等，同时也要满足组合导航系统的精度要求和实时性，综合

这些因素考虑本系统采用的处理芯片为ST公司的STM32F405VGT6型号的ARM 芯片，该

处理器内核架构是基于Cortex-M4 内核的，是一款升级版的处理器，具有高性能、低成

本、低功耗多方面的优势

[34]，外形如图3.3所示，该芯片的特点如下：

(a)相比于Cortex M3芯片,STM32F4最大的优势就是内置单精度FPU和DSP指令，可

提升控制算法的执行速度，提高代码执行效率，本设计中涉及导航数据的解算而且导航

解算对实时性要求比较高，该优势可以很好地展现出来。

(b)芯片主频达到168Mhz，片上flash可达1MB,SRAM有192KB，有着丰富的内存资

源，满足本设计程序和数据的处理和存储要求。

(c)在实现高性能和低功耗方面更灵活。本设计的目的是实现小型化低功耗的导航模

块,而STM32F40x的功耗为：在主频168MHz情况下，在闪存中执行基准测试程序，功耗

仅为230uA/MHz。在运行模式下，STM32F4具有更高的功耗效率，特别适合需要一定运

算量的应用场合。

(d)功能强大、价格低廉，性价比高。

STM32F405RGT6是F4系列的一款设备，我们选用LQNF100封装，内置有1M闪存。

其主要通讯接口和外设如下:

• 4个10.5Mbit/s的USART，加上两个UART；

• 3个42Mbit/s的SPI；

• 3个I2C；

• 2个CAN；

• 1个SDIO接口，满足本设计数据保存接口的需求；

• 1个全速USB OTG和一个高速USB OTG；

二、MEMS惯性器件

图 3.4 MEMS惯性芯片

本设计采用的MEMS惯性器件是德国博世公司研发的六轴惯性传感器芯片BMI160，

该模块整合了三轴陀螺仪、三轴加速度计和温度传感器，并含有IIC和SPI接口，可用于

连接外部主从设备，向应用端输出完整的六轴惯性数据，相比较多组件方案，免除了组

合陀螺仪与加速度时之轴间差的问题，减小了安装空间，当加速度计和陀螺仪在全速模

式下运行时，耗电典型值低至950µA，且外形尺寸仅为2.5mm×3.0×0.83mm，十分符合

本设计小型化低功耗的设计要求，实物图如3.4 所示。BMI的特点包括：

(1)集成可程序控制，范围±2g、±4g、±8g和±16g的三轴加速度传感器。

(2)具有263LSBs◦/s敏感度与全格感测范围为±125◦/s、±250◦/s、±500◦/s、±1000◦/s、

±2000◦/s 的三轴角速度传感器。

(3)VDD供电电压为3.3V ±5%；VLOGIC可低至1.8V ±5%。

(4)陀螺仪工作电流：500uA，陀螺仪待机电流：5uA；加速度计工作电流：500uA，

省电模式电流：20uA@50Hz。

(5)自带1024字节FIFO，有助于降低系统功耗。

惯性器件能通过信号调节功能优化动态性能，且工厂校准为每一个传感器提供了灵

敏度、偏置、带宽、零偏等参数，并为内部每个传感器提供补偿，可以提供高精度的传

感器输出。

BMI160的性能指标如表3.1所示

表 3.1 BMI160性能指标图

三、卫星接收模块

卫星接收模块采用的是U-blox公司的NEO-M8N系列芯片。NEO-M8N是一款高性

能,高灵敏度的卫星信号接收模块，虽然其外形尺寸只有16×12.2×2.4mm,却可以提供丰

富的卫星数据信息，模块的高灵敏度、低功耗及轻巧的体积，非常适用于车载、手机、

无人机及其他移动定位系统的应用。其实物如图如图3.5所示：

图 3.5 卫星接收模块

NEO-M8N模块采用u-blox公司最新推出的第八代高灵敏度GPS芯片，此模块拥

有22个跟踪通道，66个捕获通道，能够同时获取和跟踪不同的GNSS系统：并行接

收GPS/QZSS、GLONASS、或BeiDou 卫星。热启动下捕获卫星信号的速度不足一秒，其

捕获和跟踪灵敏度甚至达到-160dBm。同时，这款芯片采用创新设计和技术，能有效抑

制干扰源和多路径效应，在恶劣环境下也能提供有效的导航信息。为车辆的实时导航提

供很好的解决方案。

NEO-M8N有多种接口方式：UART、SPI以及USB接口三种模式；数据输出格式有：

NMEA、UBX和RTCM。本文将NEO-M8N与STM32芯片相连，采用最为方便利于开发

的USART接口连接方式，输出数据格式采用工程中常用的NMEA-0183协议，波特率选

用115200bps，基本性能见表3.2。

表 3.2 NEO-M8N性能指标表

硬件电路设计

3.3.1

系统原理图设计

本节的工作是设计系统的原理图，设计时需要参考所选器件的芯片手册，规范电路

的设计，考虑电源信号滤波等防止电磁干扰的措施。根据系统设计的要求，原理图设计

的重点在ARM的外围电路，信号IO接口电路。电源设计、各模块的电路设计等。

ARM最小系统原理图如图3.6如下所示：

图 3.6 ARM最小系统原理图

系统采用STM32F405RGT6处理器作为控制器，控制器电路设计包括：晶振时钟电

路、复位电路、boot启动模式设置接口等，从图(3.6)中可以看出，主控单元采用3.3V 供

电方式，数字地和模拟地采用电感隔离，避免信号的干扰，基准电压参考地。

STM32是低电平复位的，复位电路如图如图3.7，电阻R28和电容C25构成上电复位

电路。当系统上电时，电源接通给电容充电，电容两端电压上升至3.3V，系统正常工作，

当复位按键按下，开关导通电容两端形成回路开始放电，RST电位被拉低，低电平复位。

图 3.7 复位电路

ARM的BOOT0和BOOT1管脚用于设置STM32的启动方式，其对应启动模式如表3.3

表 3.3 启动模式设置接口

STM32的程序下载有多种方法：USB、串口、JTAG、SWD。上面介绍了程序的启动

模式，我们配置了BOOT0和BOOT1都接地，程序即从flash启动。由于板子尺寸较小，选

择SWD方式下载程序，此模式占用的IO很少，只需要四根线，而且下载速度也非常快，

SWD不仅可以下载代码，还可以实时跟踪调试，寻找程序中的bug, 让开发事半功倍。

本系统中ARM所使用的外设接口情况如下表3.4；

表 3.4 ARM外设主要接口

电源稳定的输出是系统正常工作的前提，因此要选择输出电压稳定性高、纹波噪声

小的稳压芯片。为使传感器能够稳定工作，设计过程中采用隔离的供电方式，配置了

两个稳压芯片，其中一个单独供GPS 传感器供电，可以通过程序控制该芯片使能管脚

的电平控制电压输出，另外一路稳压芯片为主控芯片和其他外设供电。在输入输出增

加100nF的小电容以此来滤掉高频的干扰信号，而滤低频干扰的电容用4.7UF大电容，还

加入500mA的保险丝作为过流保护。电源电路如图3.8 所示：

图 3.8 电源管理设计

MEMS传感器模块设计相应的原理图如图3.9，图中采用退耦电容C18、C21消除电源

纹波对供电电路的影响，从电路图也可以看出BMI160使用SPI高速串行接口来和ARM处

理器进行数据通讯。BMI160 是一个自动测量系统，当系统上电后，器件自检通过后，

就可以输出六轴传感器数据，默认采样频率为3.2KHz。程序设置100Hz取数，使控制器

执行终端可实现100Hz带宽。一般带宽大时，动态响应虽提高，当动态在大于200Hz 时，

大约有3dB的信号损失，噪声（即稳态误差）也会增加，表现出来的是惯性传感器零偏

稳定性变差。

图 3.9 BMI160硬件电路设计

BMI160作为从设备，与主设备进行通讯采用SPI接口，SPI采用全双工模式，这样当

设备发送目标地址给BMI160 时，主设备能够读取其寄存器的内容，这一过程在同一个

时钟信号SCLK中完成。数据采用选择普通模式，如图3.10所示。

图 3.10 SPI数据采集模式

查阅芯片手册，找到相应寄存器地址，读出目标测量的数据。寄存器对应表如下

表3.5：从表中可以看出，BMI160内部寄存器都是八位宽度，通过一个字节的地址可以

访问该寄存器。如加速度计测量值寄存器、陀螺仪测量值寄存器和温度等外部传感器

数据存储器都是由2个寄存器集合组成，例如X轴加速度计输出寄存器XACCL OUT，是

由2部分分高低八位两个字节组成的16位数值，存储最近X 轴加速度计的测量值，当需

要读取X轴加速度计的输出数据时，只需要通过编程在给芯片写入0x12和0x13的数据，

SPI即可在输出端返回寄存器的数据，再通过二进制补码的格式将其转换成十进制，乘

以相应的刻度即可得到X轴加速度计的数据。

表 3.5 BMI160寄存器对应表

在导航运行过程中的导航数据需要实时保存，可以方便后期对数据分析和设备

的调试，因此在设计中为导航系统添加了标准的SD卡存储接口。使用STM32F405自带

的SDIO接口驱动，4 位模式，最高通信速度达48Mhz，最高每秒可传输24M 字节，完全

可以满足导航数据的存储要求，系统硬件的SD卡座（SD CARD）在PCB背面，可以直

接插拔SD卡。下图3.11为SD卡硬件电路图：

图 3.11 SD卡硬件电路设计

图 3.12 NEO-M8N电路图

在设计卫星接受模块电路时，为减小信号间的串扰采用了隔离供电的方式，模块引

出电源引脚连接稳压芯片3V3 2，可以由处理器编程控制稳压电源芯片的输出使能来达

到控制卫星芯片工作的目的。IPX天线接口可用于扩展GPS有源天线，适合地面车辆的

使用。设备TIMEPULSE端口连接到状态指示灯D4，此端口的输出特性可以通过程序进

行设置，在默认情况下，有两个状态，这样通过指示灯可以方便判断当前卫星定位的情

况。选择STM32的USART3连接设置NEO-M8N模块，连线引脚图如图3.11所示

表 3.6 启动模式设置接口

硬件板载一个Micro USB接口，可用于USB从机(SLAVE)通信，接通USB后电脑可

以访问设备中SD的数据，同时还可以为系统供电。USB电路连接如下图3.13

图 3.13 USB电路图

利用ST提供的USB OTG库，设计USB的驱动程序，成功配置USB后，连接USB线电

脑提示发现新硬件3.14，并开始自动安装驱动，就可以在电脑上看到导航设备的磁盘如

图3.15

图 3.14 电脑安装USB驱动

图 3.15 USB访问SD卡

3.3.2

系统PCB设计

使用Altium Designer10完成原理图设计后，还要绘制PCB图来制作印刷电路板，

PCB板是电路元件的载体，提供了元器件之间的电气连接。在设计PCB 时，必须遵守电

路设计的一般规则，不仅要解决好信号的传输问题，还要消除电磁耦合的影响。在设计

电路板时，主要遵循了以下几个规则

[48]：

(1)器件布局

在设计中，元器件布局上承原理图设计，下接PCB布线设计，布局方式的优劣直接

决定布线的成功与系统最终工作的性能，合理的布局特别是晶振、系统接口、电阻电容

等关键器件的是整个电路信号完整性的关键，在确定PCB形状和尺寸后，器件摆放要尽

量紧凑，各模块之间以主处理器为中心，其他器件以扇形状态置于元器件周围，使得总

的连线尽可能短，关键信号线最短。使用同一电源的器件尽可能的放在一块，便于电源

管理。

(2)布线

布线是在布局完成后将是系统硬件设计中一个关键环节，本设计中布线遵循了环路

最小原则，即信号线与其回路构成的环面积要尽可能小，环面积越小，对外的辐射越少，

接收外界的干扰也越小；信号线之间会因较长的平行布线引起相互干扰，主要是由于平

行线间的分布电容和分布电感的作用，扩大线间距、尽可能少走平行线，不走环行线以

此来克服串扰。增加线宽度，重要信号间，平行地线的方法隔离。

(3)接地

接地技术的目的是最小化接地阻抗，以减少从电路返回到电源之间的接地回路的电

势。去耦电容放置在距离IC 供电线和接地层之间尽可能近的地方。

显然，由于电路板面积，总体安装位置等的限制，按上述原则设计会受到一定

的限制。因此，在设计时需要对布局和布线分别考虑，达到最佳的状态。设计完成

的PCB板3D模型如图(3.16)所示的和实物如图(3.17)：

图 3.16 PCB3D模型

图 3.17 组合系统实物图

电路板设计加工完成后，要进行硬件电路的测试，调试没有问题后才可以继续进行

系统软件测试。将主芯片通过JLINK调试器连接到电脑，使用JTAG调试代理软件，就可

以检查到板上的芯片，说明硬件设计正常。编写一段测试程序，验证各模块正常工作，

至此，硬件设计完成。电子电路经静态和动态调试正常之后，测试系统长时间工作状态，

便可对课题要求的技术指标进行测量，测试并记录数据，确定电路技术指标符合设计要

求。此模块的性能参数有：

1、工作电压：3V ∼ 6V；

2、电流：< 40mA；

3、体积：4cm \* 4.5cm \*1.2cm；

4、量程：加速度计：±16g 角速度：±2000◦/s ；

5、数据接口：串口（TTL电平，波特率支持最大230400bps）、USB接口、SD卡接

口、IPX天线接口、SWD下载调试接口；

3.4

本章小结

本章主要说明了组合导航系统的硬件实现情况，首先根据总体方案的设计要求，对

各芯片模块功能和原理进行说明并完成选型，设计相应芯片的硬件接口及通信方式，最

后给出系统原理图和PCB 图的设计，制作出完整的系统硬件平台，为后续软件算法设计

提供物理基础。

第 4 章

组合导航系统算法软件设计

4.1

引言

在上一章完成硬件平台的设计的基础上，本节讨论MEMS惯导/GNSS组合系统基本

滤波器的设计，采用第二章中图2.4所示的松组合结构，松组合是一种简单、直观的组

合方式，此模式中MEMS 惯导和GNSS接收机保持独立工作，选则导航误差作为系统状

态量

[30]，以位置、速度信息作为外部观测量，通过卡尔曼滤波对数据进行融合并将得

到的误差量反馈给MEMS惯导进行修正求出导航最优解，给出低成本IMU/GNSS 组合导

航系统滤波组合算法，该算法具有实现简单，可靠性较高，计算量低等优点。最后完

成MEMS 惯导/GNSS组合系统的软件工程实现，主要从嵌入式软件，卡尔曼滤波算法，

上位机显示等方面进行说明。

4.2

卡尔曼滤波原理

4.2.1

线性离散系统的数学模型

卡尔曼滤波器是组合导航系统中最常用的一种数据融合算法。它是在上世纪60年代

随着现代控制理论的发展提出的一种最优估计技术，对于具有零均值高斯分布噪声的线

性系统而言，是通过与信号有关的观测量估计出所需信号的一种实时递推的最小方差估

计方法，可以估计系统的各种误差状态，利用误差状态的估计可以校正补偿系统，达到

系统组合的目的。因此，设计组合导航系统的卡尔曼滤波器的设计是非常重要的一步。

在实际的应用设计中，为了便于计算机进行迭代运算，通常需要将连续形式的的系

统方程进行离散化。离散后的系统方程如下

[18]：式中，ϕk,k−1是k−1时刻至k时刻的n阶的一步状态转移矩阵，Γk−1是n× p维系统噪

声输入矩阵，Wk−1为k−1时刻的系统噪声。Hk为k时刻的量测矩阵，Vk是k时刻的量测噪声。

在卡尔曼滤波计算中，对系统的模型要求十分严格，要求Wk和Vk是互不相关的，同

时两者为零均值的白噪声序列，他们满足如下式子

[18]：

(4.3)

Qk是系统过程噪声方差矩阵，满足非负定的条件；Rk是系统观测噪声方差矩阵，满

足对称正定阵；δkj为Kronecker−δ函数，且过程噪声和测噪声均满足与初始状态X0不

相关。这在实际工程环境下，观测误差的特性与数值实际上不会受到系统初始状态的影

响；其次，系统的过程噪声理论也不会受到初始状态的影响。

4.2.2

离散化卡尔曼滤波基本方程

若被估计状态Xk与其观测量Zk满足卡尔曼滤波的约束条件，假设K 时刻的观测为Zk，

且已获得k−1时刻状态Xk−1的最优估计值ˆXk−1，则状态Xk的估计值ˆXk可由如下方程

[18]；

离散系统k−1时刻至k时刻的状态一部预测： (4.4)

离散系统k时刻状态估计： (4.5)

离散系统k时刻滤波增益矩阵：

(4.6)

离散系统k−1时刻至k时刻的一步预测误差方差矩阵

(4.7)

离散系统k时刻的估计误差方差矩阵：

Pk= [I−KkHk]Pk,k−1[I−KkHk]T+KkRkKT

k

(4.8)

公式(4.4-4.8)即为随机离散系统的卡尔曼滤波递推方程。只需要给定初始的ˆX0、初

始噪声误差协方差矩阵P0、系统初始过程噪声方差矩阵Qk与初始观测噪声方差矩阵Rk，

则可以通过卡尔曼滤波递推的方式根据k时刻的观测值Zk计算出该时刻的状态最优估计

值ˆXk。本文中的MEMS 惯导/GNSS组合系统中的误差量看成小量，误差量的高阶项可看

做高阶小量而略去，可将误差方程描述为线性方程，采用的是线性卡尔曼滤波器，在下

一节将推导导航系统的状态方程和量测方程来构造卡尔曼滤波器，对MEMS惯导进行反

馈校正。

4.3

组合系统模型设计

4.3.1

捷联惯导系统误差建模

(1)姿态误差方程

不考虑任何误差时，理想姿态四元数满足：

(4.9)

考虑实际误差时，真实的四元数表示为：

(4.10)

记φ为姿态误差角矢量，即ˆQ和Q确定的两个导航坐标系之间的偏差角矢量，ωb

nb参

考式2.25。根据文献[25, 37]推导，可以得到MEMS惯导姿态误差方程矢量形式:

当以地理系为导航坐标系时。则4.11矩阵形式为：

(4.12)

展开后得；

(4.13)

其中：

(4.14)

式4.14中，T11等参数时MEMS惯导姿态矩阵Cb

n的系数

[37]。

(2)MEMS惯导速度误差方程

根据式(2.31)的MEMS惯导比力方程，理想状态下当忽略系统误差时速度解算方程表

示为：

(4.15)

若考虑系统中存在的各种扰动误差，则实际的速度计算应该表示为

[29]：

(4.16)

式中：

(4.17)

其中，φ为姿态误差角，▽为加速度计随机误差，用式4.16减去4.15，忽略δg的影响，并

略去二阶小量，得速度误差方程：

(4.19)

这样东北天各向速度误差可表示为

[29]：

(4.24)

式4.24中，T11等参数是MEMS惯导姿态矩阵Cb

n的系数。

(3)MEMS惯导位置误差方程可由式2.35推导得到

[29]：

(4.25)

式中，RN是地球参考椭圆卯酉圈上的曲率半径，RM则是地球参考椭圆子午圈上各点的

曲率半径。

4.3.2

系统状态方程

综合MEMS惯导的误差方程(4.12、4.19、4.25)，可以得到MEMS惯导/GNSS组合系

统的状态方程表达式

[19, 50]：

˙X(t) = F(t)X(t)+G(t)W(t)

(4.26)

本设计中组合系统以15维导航误差作为系统的待估计状态，误差包括三维姿态、三

维速度、三维位置、还有陀螺漂移及三个加速度计零偏，状态向量表示为：

X = [φe φn φn δVe δVn δVu δL δλ δh εx εy εz ▽x ▽y ▽z]T

(4.27)

其中：

[φe φn φn]T为导航坐标系上的东北天三维姿态误差角；

52

北京理工大学硕士学位论文

[δVe δVn δVu]T为分别为东北天方向三维速度误差；

[δL δλ δh]T为纬度、经度和高度误差；

[εx εy εz]T为沿载体坐标系x、y、z轴上的陀螺漂移，模型建立为一阶高斯马尔可

夫；

[▽x ▽y ▽z]T为沿载体坐标系x、y、z 轴上的加速度计零偏，模型建立为一阶高斯

马尔可夫；

在误差建模时，不仅要考虑陀螺和加速度计的零偏，还应考虑刻度系数误差和安装

误差，但考虑到增加了系统建模的复杂性且对导航结果提高有限，故只考虑陀螺和加速

度计的零偏，其中ε = [εx εy εz]T，▽ = [▽x▽y▽z]T分别为陀螺和加速度计零偏，而ε,▽

可写成以下形式一阶高斯马尔可夫模型：

(4.28)

其中，α，β是马尔可夫过程的相关时间，ηa，ηb分别是陀螺和加速度计白噪声。

W(t)是系统噪声：

W(t) = [ωgx ωgy ωgz ωax ωay ωaz]T

(4.29)

其中，ωgx、ωgy、ωgz是MEMS陀螺仪随机白噪声，ωax、ωay、ωaz是MEMS加速度计随

机白噪声，F和G分别为15×15维组合系统状态转移矩阵和15×6维的噪声输入矩阵：

(4.30)

其中各式子矩阵表达式如下

[25, 29]：

系统量测方程

GNSS/MEMS惯导松组合模型的观测方程我们采用速度和位置的方式，即选

择GNSS信号得到的速度和位置与惯性解算得到的速度与位置之差作为观测量

[56]。

54

北京理工大学硕士学位论文

位置观测向量ZP为：

(4.34)

其中，HP= [03×6 I3×3 03×6],下标I表示MEMS惯导，下标G表示卫星信号，Vp为卫

星信号的位置观测噪声。同理，速度观测量Zv为：

(4.35)

其中，且Hv= [03×3 I3×3 03×9]，Vv为卫星信号的速度噪声。合并以上两式，可以得

到组合系统的观测方程如下

[29]，

(4.36)

式中，组合系统观测噪声V是卫星信号的三维速度噪声和三维位置噪声，在算法中，

设置为零均值的白噪声，观测噪声V与MEMS惯导的噪声无关，对观测噪声进行建模不

会影响到系统状态方程。

4.4

嵌入式软件设计

4.4.1

系统程序设计方案

根据前面章节系统总体设计和卡尔曼滤波算法的分析，车载组合导航软件设计主要

有：硬件驱动的设计、外设传感器软件配置、数据的处理和导航算法移植等。软件设计

时采用C语言编程来实现，方便程序代码的裁剪和移植

[55]。

本课题设计的低成本MEMS惯导/GNSS组合系统的软件流程如图4.1所示，首先

对ARM硬件系统进行初始化，串口、SPI、SDIO接口等的初始化以及定时器的初始化，

并通过定时器中断方式来不断接收和处理MEMS惯导和GNSS的数据。其中BMI160 我

们以100Hz 取数，远高于GNSS1Hz 的采集频率。程序在循环中等待惯导的初始化对

55

北京理工大学硕士学位论文

准，在对准完成之前，系统以GNSS数据为准进行导航，对准完成后，完成MEMS惯导

和GNSS数据的时间同步。当GNSS数据标识位无效时，处理器只对MIMU信号处理并输

出捷联导航系统的解算信息；当GNSS 数据有效时，数据导入卡尔曼滤波器中进行解算，

得到的结果对惯导进行误差校正，最后输出的组合导航信息以串口方式发送给上位机进

行实时显示或保存至SD卡中。

图 4.1 组合系统流程图

一、MEMS传感器配置

为了MEMS传感器能够正常工作，需要配置它的工作方式，传输速率和通信方式

等,在设计加速度计软件驱动时，首先要考虑其测量范围，根据在载体实际所处的环境设

置相应的测量范围：±2g，±4g，±8g，±16g，测量精度均为16位，车辆运行过程属于

低动态，设计中加速度计采用±2g测量范围，陀螺仪量程选择±125◦/s。MEMS陀螺仪初

始化配置程序主要完成陀螺仪的初始化配置，首先是设置数据采样率，即数据输出率，

同时需要设置信号带宽及截止频率。然后设置工作模式，BMI160设计有低功耗模式，在

不采集数据时，可以设置成睡眠模式，降低系统功耗，数据输出格式采用二进制补码数

据格式，在软件上编写数据转换代码即可得到所需要的数据，由于误差，导致输出数据

时常出现临界跳变，在软件中做相应逻辑分析，剔除无效数据，由于常值漂移，还要设

置BMI160的偏移寄存器，补偿常值漂移。

先利用sensor BMI160 init()对BMI160初始化，使用SPI writed单字节写入函数写入寄

存器数据，配置陀螺仪、加速度计量程，设置采样频率等，每次采样结束后，加载数据

到输出寄存器中，然后在定时器中断函数中的

s8 bmi160 read sensor data(&bmi160 data[ g8BmiWrPt ] ) 函数对BMI160里面的数据进行

获取。

定义BMI160数据结构体

typedef struct

{

uint timeTag;

/∗time in [ms]∗/

int sensor[MAX DR NUM SNSR];

/∗3gyrodeg/s, 3accel m/s2,scaled by1000;∗/

} tExternalDRSensorData;

二、GNSS模块配置

NEO-M8N模块同处理器芯片采用UART(串口)方式，默认波特率115200bps,输出

的GNSS定位数据采用NMEA-0183 协议。在开启GPS模块前，首先要使能给该模块单独

供电的稳压芯片，然后对模块以及串口进行初始化。

(1)模块初始化：

初始化操作通过函数void ublox cfg ininit(void)实现。此函数完成寄存器的设置完成

57

北京理工大学硕士学位论文

开启NMEA信息输出，配置波特率至115200，使能北斗或GPS卫星信号通道，配置输出

频率在1Hz等工作。

(2)卫星信号提取：

通过函数voidReceive GpsData byte(unsignedchar∗data)接收卫星模块的NMEA0183语

句信息,其中data为接收到的数据缓冲区。

(3)卫星信号解析：

函数Process GpsDataInHandler()循环处理到达的GPS信息，每次在获得新的数据包

后将数据解码，获取有效信息保存在结构体变量struct tUbxRawData中，然后送入滤波器

中进行算法融合。

4.4.2

中断程序设计

ARM系统的中断处理流程主要有定时中断、串口中断处理、外部触发中断等。

(1)定时器中断

定时器中断主要模式主要为系统提供了时钟基准，本系统使用了TIM3、TIM4、

TIM5三个定时器。

TIM3设置了10ms（100Hz）定时中断，在中断处理函数中执行BMI160的数据采集，

判断GPS数据是否有效，完成时间同步处理。执行LED状态翻转指示。另外，在10ms中

断中还设置了时间片函数Time slice()，在函数中定义了频率变化为100Hz、10Hz、1Hz的

标志位，方便时间上的管理。如，在数据存储中，我们执行1s追加一次数据流的操作就

是由TIM3定时器控制。

TIM4配置为脉冲捕获，定时管脚接GNSS的秒脉冲引脚（TIMEPULSE）端口，

TIMEPULSE管脚在GNSS模块接收到GPS时间信息后，该引脚的电平会以1Hz频率发生

跳转，通过TIM4实现脉冲捕获，实现对系统中数据时间与GPS 时间的同步。

TIM5作为一个1us的时间计数器，计算算法等待时间的长度，判断数据解算的有效

性。

(2)串口接收中断

串口作为MCU的重要外部接口，是软件开发的重要调试手段。编写中断处理函

数USART2 IRQHandler()，主要给用户提供接口，方便程序的下载与调试。一方面系统

58

北京理工大学硕士学位论文

采用USART进行两个控制器的数据传输，采用USART中断接收GNSS的数据，写入相应

寄存器中，同时也通过USART接口完成与上位机的通信功能，其中USART2负责双机通

信与上位机或其他设备通信，USART3 接收GNSS模块数据；此外通过检测串口接收数

据中是否收到要进入程序升级的标志，跳转至bootloader 代码中执行更新中断服务程序，

设计了如表4.1 串口接收数据更新的协议：

表 4.1 串口更新协议

# remainSend # length data[ ] CRC check

4.4.3

Bootloader下载设计

图 4.2 Bootloader下载器

在嵌入式系统中，Bootloader即是系统的引导程序，其作用与电脑操作系统上

的BIOS非常类似，通过Bootloader可以完成对ARM板上的主要器件如CPU、FLASH、

串口等进行初始化，还可以对Flash进行读写操作实现软件升级功能，简而言之，

Bootloader就是在操作系统内核运行之前运行的一段程序，通过这段程序，我们可以初

始化硬件设备、建立内存空间的映射图，从而将系统的软硬件环境分配处在一个合适的

状态。本课题为方便产品程序的下载，单独编写了一个用于下载程序的上位机程序，界

面如图4.2所示。MDK编译可以生成二进制BIN文件，在得到XX.bin文件后,用户程序在

运行过程中对User Flash的部分区域重新烧写即可更新设备的软件代码，这样后期可以方

便的通过预留通信接口对产品进行更新升级。

图 4.3 闪存Flash模块组织

图4.3展示了STM32F405的flash地址映射表，可以看出STM32F4的内部闪存(flash)容

量有1M字节，起始于0X08000000,该部分用来存放代码和数据常数，设备falsh上刷写

了两部分程序，一个bootloader引导程序和一个出厂时最初的导航程序。当BOOT0、

BOOT1 都接地时，就是从该位置开始运行代码的。此外STM32 是基于Cortex-M4 内核的

微控制器，其内部通过一张“中断向量表”来响应中断，程序启动后，将首先从“中断

向量表”取出复位中断向量执行复位中断程序完成启动，而这张“中断向量表”的起始

地址是0x08000004，当中断来临，STM32F4 的内部硬件机制亦会自动将PC 指针定位到

“中断向量表”处，并根据中断源取出对应的中断向量执行中断服务程序。bootloader更

新程序要满足以下要求：

(1)新程序必须在bootloader程序之后的某个偏移量为X的地址开始。

(2)必须将新程序的中断向量表相应的移动X个偏移量。

4.4.4

FAT32文件系统的移植系统的数据调试选择SD卡保存数据，基于调试方便的原则，在程序中添加FAT32文件系统，来实现存储数据的管理。FAT文件系统是一个免费开源的FAT文件系统模块，专门为小型的嵌入式系统而设计。他完全用标准C 语言编写，具有良好的硬件平台独立性。SD卡和ARM是通过SDIO通信接口连接的，相比于SPI通信方式，SDIO接口具有更快的读写速度，一般为SPI读写SD 卡的4倍速度左右。导航程序运行前，首先要完成SD的硬件初始化，系统检索是否存在SD卡，判断SD卡是否符合ARM支持的类型并提供文件系统与SD 卡底层接口，如果SD 驱动不成功，将返回STA NOINIT 标志位。SD 硬件初始化成功之后，文件系统将完成注册工作区功能，这一部分可以视为文件系统的初始化，该部分完成SD卡每个卷注册工作区。搜索根目录并显示完成对SD 卡根目录读取。主要执行流程：

(1)使用SD Init()函数对Micro SD进行初始化。

(2)利用GPIO initTypeDef定义GPIO 初始化结构体变量，利用NVIC InitTypeDef定

义中断结构体变量。

(3)对SDIO IO口初始化,对SD卡的使用进行配置如，SD卡上电、获取卡的信息以

及SD卡的时钟配置等。

(4)使用FAT32文件系统管理SD卡，完成数据文件的读写。

4.5

本章小结

本章详细说明了组合导航系统的软件工程设计情况，首先从组合导航系统的工作原

理出发，基于MEMS惯导的误差方程推导组合系统的状态方程，并结合惯导与卫星信号

的位置、速度差值作为观测量推导系统的观测方程，完成了系统的建模。并在硬件设计

基础上，给出导航流程图，编写软件架构，进行系统编程，完成系统软件上的设计。

第 5 章

组合导航系统测试与分析

5.1

系统上位机软件设计

本系统从用户使用角度出发，设计了方便人机交互的上位机监控软件。一方面用户

可以通过导航监控软件实时获取当前车辆的运行状态和位置，另一方面也可以由上位机

发送管理指令，对导航系统进行软件配置。上位机软件界面如图5.1所示，可实现对数据

的保存、导航模式选择、数据加载、轨迹显示、历史记录回放等功能，可以直观地显示

车辆的运行状态，具有很强的工程应用性。

图 5.1 MEMS惯导/GNSS组合导航系统监控界面

本课题的PC端监控软件是在Visual Studio 2013环境下编写的，实现的功能有数据保

存与导入、参数设置，结果显示，KML文件的生成等。定位相关的功能包括两大类：定

位工程管理和定位信息处理。

定位工程管理完成串口的配置，数据的保存与导入，定位信息的回放等功能。上位

机通过串口与下位机硬件完成通讯，在导航软件中配置相关应用程序，由串口配置下位

机应用程序，方便切换导航模式和扩展后期的功能。

定位信息处理包括以下方面：

63

北京理工大学硕士学位论文

(1)获取串口实时数据，解析数据并画出运行轨迹，同时显示当前模块搜到的卫星；

(2)解析存储的数据文件，并将数据文件中的数据回放在界面中，同时显示轨迹；

(3)将已保存的数据文件转换成kml文件，KML文件是基于XML语法与格式的用于描

述和保存地理信息的编码规范，可以被Google Earth识别并显示。

图 5.2 上位机软件流程图

导航设备与PC机之间信息传输遵循一定的数据格式，导航设备将导航信息打包上传给PC处理，数据段中包含相应字节的时间、经纬度、速度姿态等导航信息，上位机在接受到该数据后完成解析和校验，即可按字段显示定位导航信息。另一方面，设备也可以响应PC命令开启定位功能。上位机软件信息处理过程如流程图5.2所示。

5.2

跑车试验

基于所设计的MEMS惯导/GNSS组合导航系统设计，本章对设计的设备进行实地测试，开启系统数据记录功能，将实时采集的数据及结算后的数据保存至SD中，并对数据进行分析验证设备的工程实用性。

图 5.3 UGV实验平台

图 5.4 实验装置

本次试验于2017年4月在北京理工大学附近进行，实验平台为上图5.3所示的北京理

工大学组合导航与智能导航实验室的自主改装的红旗轿车。测试同时搭载实验室自主开

发的高精度GNSS/SINS组合系统（位置1σ精度：2cm；姿态精度：0.06°）作为本设计

精度判定的标准，各系统以输出的GPS时间（UTC时）作为数据时间对齐基准。

跑车实验，将本课题设计的导航设备（图5.4中的②）与作为基准的高精度组合系统

（图5.4中的①）一起固联于试验车内部，两系统的X-Y-Z轴分别对应车体右-前-上方向，

GPS天线沿车体放置于车外，小型化导航设备通过串口转USB 与笔记本电脑连接，可以

实时观测数据情况，同时数据保存在设备的SD卡内。车载实验装置如图5.4所示。

跑车实验轨迹如图5.5所示，车辆从北京理工大学自动化学院出发，绕过苏州桥底沿

西三环辅路，魏公村路、沿北三环西路回到自动化学院。行驶过程中，GNSS信号频繁

受到高架桥，高楼，树木的遮挡，导致GNSS接收机定位精度差或无定位现象。其中路

段2和路段3人为中断GNSS信号的时长分别约为30s和180s。图5.6和图??是设计的导航上

位机所得的轨迹图，蓝色部分为卫星信号失锁时的路线。

图 5.5 车载实验轨迹图

图 5.6 监控界面轨迹图

5.3

数据分析与结果

5.3.1

组合定位结果

将实验所得到的数据结果和基准数据经matlab处理后，给出了组合系统的位置、速

度和姿态误差曲线图：

图 5.7 车载实验轨迹图

图 5.8 MEMS惯导/GNSS组合后位置误差图

如图5.8给出了组合导航系统输出的位置误差，将经纬度根据地球的地理模型转换

成相应的距离可以得到，北向误差最大为26m，东向误差最大为45m，天向误差最大

为10m。从图中也可以看出在GNSS失效的区间内，卫星信号数据没有更新从而导致导航

结果误差有所增加。

图 5.9 三维姿态对比图

图 5.10 GNSS/MEMS惯导组合后姿态误差图

如图5.9给出了MEMS惯导/GNSS组合系统的姿态对比图，其中姿态角均为车在实验

非静止时刻的数据，因对于MEMS器件而言，地球自转角速率完全湮没在陀螺的噪声里，

因此不具备自助式的初始化对准功能。MEMS系统只能通过机动运动来增加系统滤波器

的可观性从而完成动态的初始化对准，初始化阶段依据GNSS 动态信息对其进行标定。

图 5.11 东北天三维速度对比图

图 5.12 MEMS惯导/GNSS组合后速度误差图

经统计得出组合系统速度误差曲线图，从图5.11中可以看出，速度大小与基准速度

的曲线基本吻合，可以很好地跟随。

经RMS(root-mean-square)统计后得到系统精度如表5.1中所示：

表 5.1 位置、速度、姿态误差值

类型

5.3.2

卫星失锁时定位效果

为验证本设计的导航系统在卫星接收信号弱或无定位时，仍然可以通过惯性导航实

现定位。试验中人为断开天线使GNSS卫星接收机信号失效三分钟，失效时车辆处于红

绿灯路口处，图5.13和5.14为组合系统在卫星失效情况下的导航情况，

当GNSS无有用信号时，导航系统仍可以为车辆提高定位信息，在该阶段，定位误

差有所增加，当有效GPS信号到来时迅速将位置拉回，所得到的运行轨迹与基准轨迹也

基本吻合，能够满足车辆导航要求。

图 5.13 GNSS失锁路段一

图 5.14 GNSS失锁路段二

为进一步评价GNSS失效时间内本文设计的组合导航模块工作性能，对比了

在GNSS遮挡的时间内系统与基准数据的位置误差和航向角误差，在路段二（失效时

间930s-960s）和路段三(失效时间1000s-1800s)位置在信号丢失的短时间内还可以与基准

数据保持一致，在GNSS 信号长时间遮挡，此时无外部传感器辅助的情况下，MEMS-

70

北京理工大学硕士学位论文

SINS累积位置误差会逐渐增大，达到每秒数米的量级，位置误差大小如图5.15所示，很

明显在断开GPS之后，误差增加明显，北向最大误差约20m，东向位置误差最大约40m。

当GPS信号接收正常后，误差迅速收敛。

图 5.15 GNSS失效段位置误差图

图 5.16 GNSS失效段航向误差图

5.4

本章小结

针对车载MEMS惯导/GNSS组合导航系统在城市环境中的导航应用，对设计的组合

系统进行了动态试验。从便于人机交互的角度考虑，编写上位机监控软件界面，直观显

示车辆运行状态，完善了系统的功能。整个实验结果表明本设计的组合导航系统满足设

计的要求，为辅助驾驶系统提供了一套简单有效的低成本导航解决方案。

第 6 章

总结与展望

6.1

研究工作总结

本文主要针对陆地车辆导航应用，以自动辅助驾驶系统小型化导航模块设计与实

现为课题，应用低成本MEMS惯性芯片、多模卫星接收芯片，搭建以ARM处理器为核心

的小型化MEMS惯导/GNSS 组合导航系统，完成了相应的卡尔曼滤波器的设计和算法实

现。

(1) 在导航解算方面，从理论上详细讨论捷联惯性导航的工作过程，包括导航坐标系

的建立以及它们之间的变换，基于四元数法与旋转矢量法推导了MEMS惯导的姿

态、速度和位置的更新方程。整合卫星导航与MEMS惯导的导航特点，给出了小型

化组合导航系统的总体设计方案。

(2) 根据小型化低成本的方案设计要求，完成系统硬件的选型，给出了系统原理图

和PCB图的设计，完成系统硬件平台制作，并对设计的硬件进行完整的系统调试。

(3) 对基于位置速度的松组合进行数学建模，建立以MEMS 惯导15维导航参数误差作

为状态量推导系统状态方程和量测方程，给出卡尔曼滤波的求解过程。在硬件实

验平台的基础上，给出系统相应的软件设计方案，在ARM中实现组合导航算法程

序，主要有传感器数据接收、导航解算、卡尔曼滤波、系统校正，数据保存等。

(4) 设计了MEMS惯导/GNSS组合系统的实时监控界面，实现对数据的保存，模式选

择、数据加载、轨迹显示等功能，可以直观地显示车辆的运行状态，具有很强的工

程应用性。最后通过动态跑车实验的误差分析，其位置误差约5 ∼ 7m，速度误差

约0.2 ∼ 0.5m/s，姿态误差约为8◦，说明了本套实验装置的可行性，具有一定的导

航精度。

6.2

工作展望

本文主要开展了MEMS惯导/GNSS组合系统的设计研究，但仍有很多问题需要进一

步的研究与完善：

73

北京理工大学硕士学位论文

(1) 硬件设计方面，可以利用ARM扩展一些模块功能，如蓝牙无线模块，可以连接手

机等终端设备，提高系统功能多样性，增强用户体验。

(2) 上位机监控界面可以加入其他功能，如地图显示界面，方便实时定位车辆信息；增

加导航功能选择按键，可以方便用户切换导航模式。

(3) 更加深入研究MEMS惯性导航系统的误差补偿问题，特别是惯性器件模型的建立以

及误差补偿。

(4) 加入多任务实时操作系统对系统软件任务的资源分配更加合理。

(5) 采用多种组合方式对定位信息融合。由于本文只采用了GNSS和MEMS惯导的组合

定位，但在硬件设计过程中预留多种接口可以方便系统功能的扩展，如果增加其

他传感器如磁力计，气压计等，若建立更加准确的系统模型及滤波方法，研究相关

组合导航算法可以提高系统定位精度。

对于车辆组合导航的研究，将有助于我国智能交通（ITS）的发展，是当前技术的

热点。车辆中采用智能化导航定位系统，将大大增强系统的可操作性，对人们出行的人

身安全也具有重要的意义。