

# 轨道交通领域的北斗卫星导航应用研究

宋子豪

中国中车集团有限公司 北京 100036

**【摘要】**：北斗卫星导航系统作为我国自主建设运行的全球卫星导航系统，为轨道交通领域提供了精准可靠的定位、导航与授时服务，对提升运营安全与效率具有重要意义。本文首先简述北斗系统的发展历程及其在混合星座、短报文通信等方面的特色，并分析轨道交通在列车控制、设施监测、运营调度等方面对卫星导航的迫切需求。进而，重点探讨多源传感器信息融合定位、非暴露空间精准定位与高精度授时与时间同步以及北斗时空基准等技术。通过典型案例，剖析北斗在动车组车载信息无线传输设备、机车车辆远程监控系统、列车运行控制系统、以及冷链储运装备的北斗应用等方面的实际应用场景与成效。分析表明，当前北斗在轨道交通领域的深化应用仍面临复杂环境下定位稳定性、多源信息深度融合、标准体系构建等挑战。未来，随着北斗系统与5G、人工智能等技术的进一步融合，其在轨道交通领域的应用将向更泛在、更融合、更智能的方向发展。本研究为理解北斗在轨道交通中的应用现状与前景提供了系统性的视角。

**【关键词】**：轨道交通；北斗应用；卫星导航

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.044

## 1 北斗系统在轨道交通领域的应用基础

### 1.1 北斗卫星导航系统的发展与特色

北斗卫星导航系统是我国自主建设运行的全球卫星导航系统，采用“三步走”发展战略，逐步从试验系统、区域系统发展到全球系统。该系统由空间段、地面段和用户段组成，采用混合星座设计，不仅提供基本导航服务，还具备短报文通信、星基增强等特色功能。与其他全球卫星导航系统相比，北斗的创新之处在于将导航与通信能力融为一体，用户不仅能知道自身位置，还能通过短报文功能报告位置和状态。这一特色使北斗在应急通信和偏远地区作业中具有独特优势。系统采用多频点信号设计提高定位精度和可靠性，其星载原子钟精度达到国际领先水平，为高精度授时服务奠定基础。北斗三号系统更创新性地采用星间链路技术，实现卫星之间的通信与测距，增强系统自主运行能力。

### 1.2 轨道交通系统对定位导航技术的需求

轨道交通系统对定位导航技术有着特殊要求，这些要求首先体现在安全性方面。列车运行控制要求定位系统能够提供连续、实时的列车位置信息，以实现最小的行车间隔和最大的线路通过能力<sup>[1]</sup>。此外，轨道交通环境复杂，存在大量“非暴露空间”（隧道、地下等无法直接接收卫星信号的空间），这些区域占运营环境的相当大比例，使得解决此类环境下的定位连续性成为关键技术挑战。轨道交通的运维管理同样需要精准定位技术支持，轨道基础设施的形变监测、沉降预警以及日常维护检修都需要高精度定位服务。随着智慧城轨发展，对统一时空基准的需求日益迫切，以集成各类信息系统，避免时空信息冲突风险。

### 1.3 北斗系统应用于轨道交通的优势与理论基础

北斗系统应用于轨道交通领域具有多重优势，其理论基础

与轨道交通需求高度契合。作为我国自主可控的时空基础设施，北斗提供了统一的时空基准（CGCS2000坐标系），为轨道交通各子系统提供一致的空间参考，这对于集成列车自动控制、环境监测等复杂信息系统至关重要。值得注意的是，利用不同类型和原理的传感器辅助北斗系统进行组合定位是必然选择<sup>[2]</sup>，这一技术特点进一步增强了系统的可靠性。北斗特有的短报文通信功能为轨道交通提供了一种独立的通信手段，在山区、隧道等地面通信信号覆盖不到的区域，可作为应急通信的重要手段。从理论基础来看，多传感器信息融合技术是核心支撑，该技术通过整合北斗卫星导航与其他传感器（如惯性导航系统）的数据，利用先进算法实现高精度、连续的定位导航。综合PNT（定位、导航、授时）体系是另一重要理论基础，该体系利用多种PNT信息源，通过多传感器集成和数据融合，生成时空基准统一的PNT服务信息。

## 2 北斗在轨道交通中的关键应用技术研究

### 2.1 多源传感器信息融合定位技术

多源传感器信息融合定位技术通过整合北斗卫星导航系统与惯性导航系统、里程计、5G等定位技术，构建了冗余备份与互补增强的定位解决方案。该技术采用卡尔曼滤波系列算法及联邦滤波等先进算法，有效处理各传感器数据的时间同步与空间配准问题，有效解决了轨道交通复杂环境下的连续高精度定位难题。通过人工智能方法如神经网络的自适应学习能力，进一步提升了系统非线性场景下的定位稳定性，为列车运行控制提供了可靠的位置信息支撑。

### 2.2 非暴露空间精准定位技术

针对隧道、地下站台等非暴露空间的定位难题，非暴露空间场景综合运用北斗+UWB（Ultra-Wideband，超宽带）融合定位技术，通过伪卫星、信号引入等技术手段实现室内外定位

的无缝衔接。双模 UWB+北斗定位技术可提供厘米级定位精度, 5G+UWB 小基站时间精度达纳秒级, 解决了地铁内信号干扰和人体遮挡导致的定位不准问题。该技术通过建立统一时空基准, 结合空间数字化三维电子地图, 实现了从室外到室内定位服务的连续性、精确性和可靠性, 填补了非暴露空间高精度定位的技术空白。

### 2.3 高精度授时与时间同步技术

北斗三号系统搭载的高性能星载原子钟建立了 300 万年误差仅 1 秒的高精度时间基准, 系统授时精度优于 20 纳秒, 为轨道交通列控系统提供了可靠的时间同步保障。基于 Ka 波段相控阵的星间链路技术实现了卫星之间的高精度时间同步, 使定轨精度提升至厘米级。该系统还具备抗干扰捕获模块和 RDSS 短报文校时功能, 即使在外部信号丢失情况下也能维持时间同步, 确保列车运行控制、信号系统等关键操作的时间同步误差不得超过毫秒级要求。

## 3 北斗在轨道交通中的典型应用场景分析

### 3.1 动车组车载信息无线传输设备的北斗应用

动车组车载信息无线传输设备(WTD)是构建现代动车组地车安全信息一体化传输体系的核心车载单元。其基于中国自主研发的北斗卫星导航系统实现了深度技术融合, 显著提升了动车组的运行安全保障能力与智能化运维水平。在授时方面, WTD 通过内置的北斗接收模块, 直接接收北斗卫星播发的标准时间信号, 以此作为列车各车载系统的统一时间基准。这项技术攻克了分布式系统中多个设备间的时间同步难题, 确保了故障记录、状态监测等数据的时标具有高度一致性和准确性, 为后续的数据分析、故障追溯与关联分析提供了可靠的时间维度支撑。在定位方面, WTD 持续获取北斗系统提供的列车经纬度、速度等实时定位信息, 并依托 5G 等高速移动通信网络, 构建了一条稳定、高效的车地数据传输通道。这使得列车的实时位置、运行轨迹、关键设备状态及故障报警信息得以近乎实时地传输至地面数据中心, 实现了对在途动车组的远程、可视化监控。该应用通过“北斗+5G”的技术集成创新, 成功构建了一个天地一体化的动车组运行状态监测网络。系统目前已在和谐号、复兴号等系列动车组上实现规模化装车应用。

### 3.2 机车车辆远程监控系统的北斗应用

机车车辆远程监控系统(CMD)作为保障铁路运输安全、提升机车运维智能化水平的关键系统, 其效能高度依赖于稳定、精准的时空基准信息。该系统的北斗深度应用, 标志着我国铁路核心技术自主化与智能化运维的重大进展。CMD 系统创新性地融合了北斗卫星导航系统的多维度功能: 一是高精度定位与授时。系统通过车载北斗终端, 实时获取机车的经纬度、速度等定位信息, 并同步北斗卫星的原子钟时间, 为车载各类监测设备提供统一、标准的时空基准。这确保了从不同传感器

采集的海量数据在时间与空间维度上的一致性, 为后续的大数据分析与融合处理奠定了坚实基础。二是北斗短报文通信的冗余保障。针对铁路运营中遇到的机车断电或偏远地区公网信号覆盖盲区等极端工况, 系统配备了北斗短报文通信模块。当移动通信网络不可用时, 该系统可利用机车蓄电池供电, 通过北斗特有的短报文功能, 将关键的机车位置、状态等少量但至关重要的信息发送至地面中心, 极大提升了机车管理效率与安全保障能力。截至目前, 该系统已在主流机车车型上实现规模化应用, 并成功接入在线运营机车的实时数据, 地面运维中心能够实现对机车运行状态的远程实时监测、故障的早期预警与智能诊断, 大幅提升了机车的利用率和运营可靠性。

### 3.3 列车运行控制系统的北斗应用

列车运行控制系统(LKJ)作为我国铁路列车控制领域的核心安全装备, 被誉为控制列车安全运行的“大脑”和“神经中枢”。其与北斗卫星导航系统的深度融合, 标志着我国列控技术实现了从依赖地面信号到构建“空天地”一体化感知决策能力的关键跨越, 是保障铁路运输安全、提升运营效率的里程碑式创新。LKJ 系统的北斗应用核心在于利用其高精度定位与授时功能, 为列车运行控制构建了可靠统一的时空基准。首先, 在授时应用上, LKJ 系统通过接收北斗卫星播发的精准授时信号, 为车载各单元提供统一时间同步。在列车高速运行场景下, 卫星信号在传输过程中更有可能遭遇信号遮挡、同频干扰等多重挑战。为此, 最新方案采用北斗与 NTP 双源时钟设计, 通过智能校时算法确保时间同步精度控制在 500ms 以内<sup>[3]</sup>。其次, 在定位应用上, 最新一代的 LKJ-15 采用北斗差分定位技术, 通过接收地面基准站的修正信息, 有效消除电离层延迟、卫星钟差等误差, 将列车的绝对定位精度从常规的米级提升至厘米级。更重要的是, LKJ-15 通过深度的信息融合算法, 将高精度的北斗定位信息与惯性导航系统、雷达测速等多源数据进行实时融合校验, 成功解决了卫星信号在隧道、山区等复杂场景下短时丢失或衰减的行业难题, 实现了列车在运营全过程中的连续、稳定、精确的定位。这一技术突破, 为列车从辅助驾驶向全自动驾驶等级的演进提供了不可或缺的感知基础。

### 3.4 冷链储运装备的北斗应用

基于北斗的冷链储运装备监控系统通过对冷链运输全过程的可视化、透明化与智能化管理, 有效解决了传统冷链物流中“断链”的行业痛点, 为保障食品药品等特殊物品的运输安全提供了关键技术支撑。该系统的核心在于构建一个集成了北斗定位、授时、通信与传感器技术的物联网信息物理系统。在感知与数据传输层, 装备于冷藏箱等储运装备的智能终端, 内置北斗定位芯片, 能够实时、高精度地采集装备的地理位置信息。同时, 终端集成的温湿度、震动等多类传感器, 持续监测货箱内部的微环境参数。在数据处理与协同层, 北斗系统提供的高精度授时服务确保了位置信息与状态参数在时间维度上

的严格同步与关联,为后续的数据追溯与事件分析提供了可信的时序基准。这些关键数据通过移动通信网络或卫星通信链路,加密传输至云端中央管理平台。在应用与决策层,平台利用大数据分析技术,对海量数据进行实时处理与建模。系统不仅可实现运输轨迹的实时跟踪,还能基于预设的温湿度阈值进行智能判断。一旦监测到参数异常,系统将即刻触发多级报警机制,使管理人员能够迅速定位问题装备、评估风险并执行干预,从而实现从“被动响应”到“主动预警”的运维模式变革。

#### 4 北斗技术与轨道交通融合发展的挑战与趋势

尽管北斗技术在轨道交通领域的应用已取得显著成效,但从宏观技术融合的角度审视,仍面临一系列共性挑战。首先,在复杂运行环境下确保高可靠、高精度的连续定位是核心难题。轨道交通线路贯穿城市峡谷、密集隧道群、高山峡谷等复杂地理环境,对卫星信号造成严重的遮挡、反射和多路径效应,导致定位信息频繁中断或精度劣化。尽管通过融合惯性导航等辅助技术可在一定程度上缓解此问题,但如何构建一个在任何场景下(尤其是卫星信号完全丢失的长时间隧道内)都能保持稳定可信的时空基准体系,仍是亟待突破的技术瓶颈。其次,技术的规模化应用与成本控制之间存在矛盾。为实现上述高可靠性,往往需要引入更昂贵的多源传感器和更复杂的融合算法,这限制了技术在庞大存量轨道交通装备中的普及速度,如何通过技术创新在保证性能的同时大幅降低单设备成本,是实现全覆盖的关键。再者,不同系统间的信息融合与协同控制尚处于初级阶段。当前北斗提供的位置、速度、时间等信息更多是作为辅助参数服务于各独立系统,如何将其深度融入到列车控制、调度指挥、乘客服务等核心业务的闭环中,实现从“信息支撑”到“决策驱动”的跨越,构建真正意义上的“北斗+”智能轨道交通技术生态,是更高层次的挑战。

面向未来,北斗与轨道交通的深度融合将呈现出清晰的发

展趋势。首要趋势是定位测速技术的全场景无缝化与高精度化。未来的研究将着力于构建“北斗+5G/6G+惯性导航+其他传感器”的深度融合导航体系,攻克隧道内部等盲区的精准定位技术,实现从车场、正线到站台的全程厘米级甚至毫米级无缝定位,这将为列车全自动运行、精准停靠提供不可或缺的感知基础。其次,是实现从“可用”到“好用”的技术自主化与应用深化。随着北斗三号全球系统短报文等特色服务的成熟,“单北斗”应用将成为主流,逐步摆脱对GPS等其他系统的依赖。这不仅关乎技术安全,更将催生新的应用范式。最后,两者的融合将推动智能化水平的质变。基于北斗提供的统一时空基准,结合大数据、人工智能和数字孪生等技术,未来有望实现对全线列车群的协同智能调度、设备状态的预测性维护以及能源管理的动态优化,最终构建起一个安全、高效、绿色、智慧的下一代轨道交通系统。这一进程不仅是技术的演进,更是推动我国轨道交通产业向全球产业链高端迈进的核心驱动力。

#### 5 结论

北斗卫星导航系统通过其定位、导航、授时及短报文通信等特色功能,在轨道交通领域形成了全方位、多层次的应用体系,展现出显著的技术优势与应用价值。在多源信息融合定位、非暴露空间精准定位、高精度时间同步等关键技术的支撑下,北斗系统已成功应用于动车组车载信息传输、机车远程监测、列车运行控制及冷链储运管理等典型场景,实现了列车实时定位追踪、设备状态智能诊断、运行控制精准化等核心功能,显著提升了轨道交通系统的安全性、可靠性与运维效率。尽管在复杂环境定位稳定性、多源信息深度融合等方面仍面临挑战,但随着技术持续创新,北斗与轨道交通的融合发展将进一步提升系统的智能化水平。总体而言,北斗系统已成为推动我国轨道交通技术创新和产业升级的重要支撑,其深化应用将为构建安全、高效、绿色的现代化轨道交通体系提供坚实保障。

#### 参考文献:

- [1] 蔡伯根,樊玉明,王剑,等.基于北斗导航卫星系统的轨道交通应用关键技术研究[C]//中国智能交通协会.第八届中国智能交通年会优秀论文集——轨道交通.北京交通大学,2013:293-301.
- [2] 蔡焯,陶汉卿,侯宇婷,等.北斗卫星导航系统在列车定位中的应用研究与发展[J].铁道科学与工程学报,2022(008):019.
- [3] 梁飞,肖立志.基于北斗与NTP双源时钟的LKJ校时方案研究[J].控制与信息技术,2025,(04):80-84.