

基于卫星导航系统的高速列车定位技术研究

李卫东, 侯丽虹

大连交通大学电气信息学院, 辽宁 大连 116028

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61471080)

通信作者: 侯丽虹, 1219261449@qq.com 收稿/录用/修回: 2015-04-08/2015-10-27/2016-01-15

摘要

首先, 介绍全球卫星导航系统的发展状况, 对比分析全球卫星导航系统性能. 并结合国内外基于卫星导航系统的列车定位技术的研究成果和应用情况, 将列车定位技术分为四大类. 然后, 从精准性、有效性、安全完整性三个方面对列车定位技术综合性能进行分析, 总结其存在的问题并给出解决方法. 最后对基于卫星导航的高速列车定位技术的未来发展趋势进行展望.

关键词

卫星导航系统
列车运行控制系统
列车定位技术

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Research on High-speed Train Positioning Technology Based on Satellite Navigation System

LI Weidong, HOU Lihong

School of Electronic and Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China

Abstract

In this paper, we first introduce the development of a global navigation satellite system and analyze its performance. By combining our research results and the application of a train positioning technology that uses domestic and international satellite navigation systems, we divide the train positioning technology into four categories. Then, we comprehensively analyze the performance of the train positioning technology with respect to accuracy, effectiveness, and safety integrity; summarize the existing problems; and suggest solutions. Finally, we make recommendations regarding the future development of high-speed train positioning technology based on satellite navigation.

Keywords

satellite navigation system;
train operation control system;
train positioning technology

1 引言

铁路是我国国民经济发展的命脉, 在提高铁路运输效率、减少运营维护成本、保障铁路运输安全方面, 列车运行控制系统的智能化起着至关重要的作用, 而实现列车的自主定位是列车运行控制系统智能化发展的重要环节, 同时也是建设便捷、安全、经济、高效和绿色铁路运输网络的前提条件. 传统的列车定位技术主要有轨道电路定位、查询/应答器定位、交叉感应环线定位、测速定位和基于里程计累加测距定位等^[1-3], 但是上述方法往往存在结构单一、定位精度低和抗干扰能力差的问题.

近年来迅速发展的卫星导航系统因其具有实时性和精确性等特点被广泛应用到铁路列车定位领域中^[4]. 法国高速铁路列车运行控制系统(U/T)、德国列车速度控制系统(landes zentral bank, LZB)、欧洲列车控制系统(European train control system, ETCS)和中国列车运行控制系统(Chinese train control system, CTCS)等都在积极研究卫星导航

技术在列车定位系统中的应用. 卫星导航服务可以对列车定位产生重要影响, 借助卫星定位技术, 可以减少轨旁设备, 降低列车安全运行的成本; 并且能够与现有定位技术形成优势互补, 增强系统的互操作性和安全性. 我国关于卫星导航应用于列车运行控制系统的研究工作起步较晚, 对北斗卫星导航系统与惯性器件的组合形式、定位数据的融合方式、地图匹配算法的优化、电子地图的构建进行了初步探索. 从目前铁路领域对于列车自主定位的需求来看, 基于卫星导航的列车定位系统的研究具有巨大的发展空间.

2 全球四大卫星导航系统概述

2.1 全球四大卫星导航系统发展现状

GPS 导航系统是目前发展最为成熟的军民共用的全球卫星导航系统, 主要提供导航、测量和授时 3 种服务. 21 世纪, GPS 现代化建设的工作有 3 个方面: 一是播发新的民用导航信号; 二是播发新的军用导航码; 三是发射第三代 GPS 卫星^[5]. GPS 现代化建设计划预计于 2025—2030 年完成, 新一

代的 GPS 系统定位精度将达到 0.5 m, 授时精度达到 1.2 ns.

GLONASS 是继美国 GPS 系统之后第二个建成的全球卫星导航系统^[6]. GLONASS 系统的发展分为两个阶段: 第一阶段是 2002—2011 年的系统恢复性建设阶段; 第二阶段是 2012—2020 年的系统发展、运行以及维护阶段. 俄罗斯预计在 2012—2020 年间对 GLONASS 系统在空间星座、地面控制、特别是信号体制方面进行全面升级, 定位精度在 2015 年达到 1.4 m, 2020 年可以达到 0.6 m^[7].

GALILEO 是迄今为止欧洲开发的最重要的航天计划, 是世界上第一个基于民用的全球卫星导航定位系统. 该系统已于 2014 年底投入试运行, 欧盟预计在 2020 年完成全部的卫星组网工作, 由 30 颗卫星组成的“伽利略”全球卫星定位系统可以实现全球覆盖, 定位误差不超过 1 m^[8]. 欧盟现已制定了 2020—2025 年的工作部署, 准备开始研发第二代“伽利略”导航卫星. 最终建设完成的 GALILEO 系统, 将极大地改进定位的可靠性和有效性, 提供比现有卫星导航系统更加准确的测量结果, 特别是在高纬度地区.

北斗卫星导航系统是我国正在实施建设的自主研发、独立运行的具有双向通信能力的全球卫星导航系统. 遵循

开放性、自主性、兼容性和渐进性的四项原则, 按照“先区域、后全球、先有源、后无源”的总体发展思路, 制定了科学合理的“三步走”总体规划. 2011 年 12 月北斗卫星导航系统进入试运行阶段, 2012 年 12 月正式向我国周边地区提供区域服务, 实现了覆盖亚太地区的导航能力^[9]. 目前, 我国已经建成了“5GEO + 5IGSO + 4MEO”的北斗卫星区域导航系统空间星座结构^[10].

2.2 全球四大卫星导航系统性能对比分析

卫星导航系统自诞生之日起就和铁路运输系统有着密不可分的联系, 随着全球卫星导航系统的进一步发展, 铁路运输业将成为最大的受益者. 全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)是一个综合的星座体系, 主要包括美国 GPS 导航系统、俄罗斯 GLONASS 导航系统、欧洲 GALILEO 导航系统、中国北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)以及欧盟 EGNOS、日本 QZSS、印度 IRNSS、美国 WAAS 和 LAAS 等区域卫星导航系统^[11]. 如表 1 所示, 四大卫星导航系统各具特色. 目前, GPS 系统和 GLONASS 系统处于现代化建设阶段, GALILEO 系统和我国的 BDS 系统顺利进入运行试验阶段.

表 1 四大导航系统主要参数对比

Tab.1 Main parameters comparison among the four navigation systems

	对比参数	GPS	GLONASS	GALILEO	BDS
不同点	卫星数量	32	30	30	35
	轨道数目	6	3	3	3
	轨道倾角	55°	64.8°	56°	55°
	轨道间隔	60°	120°	120°	120°
	轨道高度	20 200 km	19 100 km	23 222 km	35 786 km/21 528 km
	运行周期	11 h 58 min	11 h 15 min	14 h 4 min	12 h 50 min
	时间系统	GPST	GLONASST	GST	BDT
	坐标系统	WGS-84	PZ-90	ITRF-96	CGCS-2000
	信号接收方式	CDMA	CDMA/FDMA	CDMA	CDMA
	定位精度	10 m	10 m	6 m	10 m
	通信功能	无	无	无	有
	信号频段数量	3	3	4	4
	信号频段种类	L1/L2/L5	L1/L2/L3	E1/E5a/E5b/E6	B1/B1-2/B2/B3
系统特点	发展成熟	抗干扰能力强	精确度高	双向通信	
相同点	覆盖范围: 全球 应用范围: 军民两用 定位原理: 三球交汇原理 系统构成: 空间端 + 地面端 + 用户端				

卫星导航系统的定位精度受很多因素影响, 比如在轨卫星的星历误差、钟差、电离层对导航信号的干扰、无线电传输过程中的时延误差和接收机对信号的基带处理能力等. 目前 GPS 在轨卫星数量远超过额定设计数目, GPS 单点实时定位精度得到大幅度提高, C/A 码为 5 ~ 10 m, P 码为 1 ~ 2 m, 民用的接收机定位精度可达到 5 m, 军用导航信号精度达到分米级. GLONASS 系统除了具有常规的码分多址(code division multiple access, CDMA)信号接收方式, 还采用了频分多址(frequency division multiple access,

FDMA)信号体制. GLONASS 系统播发双重信号的功能, 有效地提高了系统抗干扰的能力, 提高了定位精度和测距范围, 并且增强了与其他卫星导航系统的兼容性. 目前, GLONASS 系统在地面增强系统的辅助下, 在俄罗斯境内定位精度达到 0.5 m, 随着地面控制站和信号接收终端技术的发展, 在全球范围内的导航误差可以控制在 1 m 的范围内. GALILEO 系统采用额定状态下由 30 颗卫星参与的中高轨道星座组网, 有利于向用户提供更高精度的定位服务. GALILEO 系统的民用信号定位精度可以达到 6 m, 高

于 GPS 的 C/A 码精度,并且可以向普通授权商业用户提供误差小于 1 m 的定位服务.我国的北斗卫星导航系统在 L、S 两个频段播发导航信号,并且采用了不同于其他导航系统的混合星座组网模式,经测试系统试运行期间可以达到平面 25 m、高程 30 m 的定位精度,0.4 m/s 的测试精度以及单向 100 ns、双向 20 ns 的授时精度.随着组网卫星数目的增多,系统将进一步扩大服务区域和导航定位质量,最终成为覆盖全球的卫星导航系统.

3 列车定位技术分类

在列车的自主定位过程中,单独的定位系统不能保证在任何时间和地点都实时地跟踪显示列车运行状况,必须融合多种定位技术的优点,才能有效地提高列车定位系统的信息可信度,以及时间和空间的覆盖范围.近年来,卫星导航技术和其他定位技术相互结合的列车定位系统得到了极大的发展,代表了现代列车定位系统发展的重要方向.主要的辅助定位技术有多传感器信息融合、无线传感器网络、启发式算法和电子地图匹配.美国 GE 公司的 ITCS 系统通过差分 GPS 与里程计组合,实现了列车动态位置跟踪,并成功应用于我国青藏铁路.法国阿尔斯通公司采用 GNSS 定位技术实现低密度线路的列车控制,该方法已经被纳入 ETCS 规范的重要组成部分.欧盟研究机构针对 GNSS 列车自主定位及其在低密度线路的应用开展了一系列研究项目,GARDEROS、RUNE、INTEGRAL 等项目利用卡尔曼滤波算法,将卫星导航系统与陀螺仪、加速度计等辅助设备融合定位,并且进一步通过地图匹配获得更加精确的定位结果.捷克 LIS 智能实验室,试制了列车定位仿真测试平台,可以模拟 GNSS 数据和列车传感器测量数据,并实现 GNSS 数据与传感器运动的同步^[12].

3.1 基于多传感器信息融合的列车定位技术

列车在高速运行的过程中,卫星的连续定位容易受到恶劣天气和外界电磁波的影响,设备测量结果往往会产生较大误差,甚至无法正常工作^[13].为了保证在卫星定位失效的情况下定位数据的持续输出,可以采用多传感器信息融合的方法进行辅助定位.多传感器信息融合通过对各个传感器及其观测信息的合理支配和使用,把多个传感器在空间和时间上的互补信息依据某种准则进行组合,获得被测对象的一致性解释或描述^[14].

多传感器信息融合是一种多源信息处理技术,但不意味着传感器的数量和种类越多越好,需要根据不同的环境和条件,选择合适的传感器组合方案和信息融合算法.合理地利用传感器,可以有效地补偿测速轮对空转滑行、轮径磨耗以及列车振动引起的测量误差.含有惯性导航器件的自主式导航系统的定位误差会随时间累积造成误差漂移,陀螺仪是惯性导航系统的核心单元,因此,减小定位误差的关键是提高陀螺仪的精度.随着微电子技术的发展,光纤陀螺取代传统机械陀螺和静电陀螺已经成为必然趋势.地理信息辅助导航技术也可以校正惯性导航误差,该技术需要以大量地理信息和强大的数据处理能力作为支撑.近年来,各种低成本、抗干扰、抗腐蚀能力强的集成

涡流、视觉、光纤光栅传感器在列车运行控制系统中的应用成为了研究热点^[15].法国阿尔斯通公司将光纤光栅传感器埋入高速列车的转向架结构中,用以监测新型复合材料的性能.Fred Riewe 在位置测定系统的研究中,利用光纤陀螺提供的角速度信息分辨列车通过道岔时的运行方向^[16].北京交通大学等科研机构对光纤光栅传感技术在中低速磁浮列车定位中的应用进行了研究;武汉理工大学生产的 FBG 传感器件已经成功应用到了武汉地铁和京广铁路等工程项目^[17].

将卫星导航系统和车载传感器进行信息融合,可以增强系统的容错性和可靠性.为了克服不同传感器的缺点,增强多传感器信息之间的互补性与相容性,改进融合算法是提高测量精度的关键.经典的信息融合算法有卡尔曼滤波法、 H_{∞} 滤波法和贝叶斯估计法.卡尔曼滤波法需要知道干扰信号的准确数学描述才能利用状态转移方程和递推公式对当前数据进行估计和推算,非常适用于动态测量,但是计算量大、可靠性差^[18]; H_{∞} 滤波法无需对干扰信号进行假设,系统鲁棒性好,但是测量精度较低;贝叶斯估计法通过先验概率和当前观测信息计算后验概率,形成统一先验信息和当前信息的框架结构^[19],但是往往假设条件过多,与实际情况偏差较大.针对以上问题,国内外学者提出了许多改进算法,如扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filtering, EKF)、无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filtering, UKF)、容积卡尔曼滤波(cubature Kalman filtering, CKF)、Cubature 粒子滤波等.综上所述,多传感器信息融合列车定位技术的研究将主要集中在 3 个方面:减小传感器的系统误差,提高融合算法的精度,降低定位系统的成本.

3.2 基于无线传感器网络的辅助列车定位技术

用于辅助列车定位的无线传感器网络是一种分布式传感网络,它由分布在铁路沿线的传感器或移动基站以及安装在列车上的接收设备两部分组成,网络设置灵活,并且可以和互联网进行无线连接.列车运行控制系统的发展初期,基于轨道电路的列车定位方法和基于查询/应答器的列车定位方法是 2 种被广泛使用的获取列车位置信息的手段,但是上述方法过度依赖于轨道电路,并且只能实现地面对列车的单方向信息传输.随着移动通讯技术的发展,基于无线传感器网络的辅助列车定位技术成为了未来列车定位技术发展的新方向,它既可以实现列车与地面之间高精度、安全可靠、双向连续的通信,又能够补偿卫星导航系统失效时造成的定位误差.

国际上主流的列车运行控制系统的共同点是都满足基于无线通信的列车自动控制系统(communication based train control system, CBTC)的基本设计标准,它的特点是通过无线通信媒体实现列车和地面设备的双向通信,代替轨道电路控制列车运行.日本铁路技术协会正在研究和开发基于计算机和无线电辅助的列车控制系统.欧洲 ETCS 等级 2 和等级 3 都属于 CBTC 的范畴,采用 GSM-R 技术实现地面与列车之间双向的信息传输^[20];我国 CTCS 规范中规定铁路列车控制系统各个等级中都含有查询应答器,只是在不同线路间转换时,应答器提供不同的等级转换命令,并且

CTCS-3 和 CTCS-4 也同样属于 CBTC 的范畴, CTCS-3 是基于轨道电路和 GSM-R 的列车自动保护系统, CTCS-4 是完全基于 GSM-R 的列车自动保护系统. 目前, GSM-R 作为蜂窝网移动通信网络与基站一起进行定位的优势还没有完全发挥出来. Laitinen 等将位置指纹定位应用于 GSM 系统, 在市区中, 定位相对稳定, 定位精度也比较高^[21]. Lakmali 等对指纹数据获取、指纹数据库建立、定位估计算法等问题进行了深入的研究, 给出了 KNN、WKNN 等算法的具体实现方法, 将室外的定位精度提高到了 40 ~ 100 m^[22-23]. Kemppe 对 GSM 用户进行定位估计涉及的各种问题进行了详细分析, 并且在指纹算法中引入门限阈值的概念, 增强了指纹数据的有效性, 将改进的指纹算法成功应用于 GSM 系统网络^[24]. 除了 GSM-R 技术以外, Zigbee 技术、移动通信定位技术 (mobile positioning technology, MPS) 和射频识别技术 (radio frequency identification, RFID) 也是目前应用较多的无线网络传感技术.

由于 RFID 技术的非视距、非接触、低功耗、低成本、高扩展等特性, 显示出比其他无线网络传感技术更大的优势, 将其应用到列车定位系统具有重大意义. 国内外学者对 RFID 技术在列车控制系统中应用的可行性以及应用领域做了详细的分析和研究. 孟祥先等提出了基于嵌入式的列车定位方案, 利用 RFID 定位技术辅助和校正 GPS 定位, 达到了提高定位精度, 降低列车跟踪定位成本的目的^[25]. 夏博光等对 RFID 技术检测列车定位的精确性做了分析, 并且在低速和高速两种情形下分别验证了 RFID 辅助里程修正系统的有效性^[26]. 陈凯将 RFID 应用于 CTCS-2 列控系统中, 实现了车载应答器信息接收模块和地面应答设备之间的数据通信, 但是通信距离和作用范围有限^[27]. Zhang 等分析了 RFID 技术在中国铁路系统的应用状况, 指出了在高速铁路识别中存在的信息碰撞和阅读时间不足等问题, 并提出了相关的改进建议^[28]. Vivek 详细阐述了逆向 RFID 技术的概念, 并且分析了该技术在印度交通运输中的应用状况^[29]. RFID 技术在列车控制系统中的应用主要包括: 铁路车号自动识别系统, 列车控制车载—地面信息传输系统, 铁路机车 RFID 追踪定位和自动转换轨道系统. RFID 系统由电子标签、阅读器和中央信息数据库三部分组成, 工作原理如图 1 所示. 当前, RFID 技术研究主要集中在工作频率选择、天线设计、防碰撞算法和安全与隐私保护等方面. 此外, 基于无线网络定位的 4 种基本算法, 信号强度定位法、方向测量定位法、到达时间定位法以及到达时差定位法也在快速发展^[30]; 无线定位的抗同频干扰、抗邻信道干扰和抗多径干扰等抗干扰措施也成为了定位机制的研究重点.

3.3 基于启发式算法的列车定位技术

启发式算法是相对最优化算法提出的, 涉及的学科领域和理论方法非常多, 其中最具代表性的有模糊控制理论、遗传算法和人工神经网络. 神经网络算法能够充分逼近复杂的非线性映射关系, 学习与适应系统的动态特性, 具有较强的鲁棒性和容错性, 还可以方便、快速地进行大量运算. 神经网络的这些特点非常适合应用于大容量、多

信息的复杂列车运行控制系统中. 单一的列车定位方法存在局限性, 可以利用启发式算法对多传感器融合定位技术和无线网络定位技术进行改进, 将列车在运行过程中出现碰撞、挤岔以及追尾等安全事故的概率降到最低.

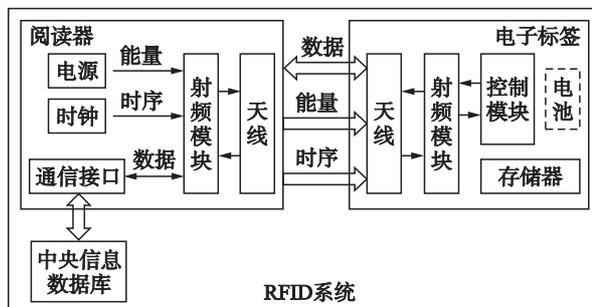


图 1 RFID 系统工作原理

Fig.1 Working principle of RFID system

近年来, 通过学者们的不懈努力, 在神经网络算法与无线定位技术的融合方面已经取得了一定的成果. 由于定位环境的复杂性, 传统的无线定位算法会产生多径效应使系统的定位精度降低, 被遮挡时存在严重的非视距效应, 并且读写器在接收信号时容易受到干扰. 毛永毅提出了基于遗传算法优化神经网络的定位方法, 该方法通过移动基站提供的信号强度和方位角信息定位移动台的位置, 有效地降低非视距传播的影响, 避免了神经网络初始权值的随机性所带来的网络震荡^[31]. 张宏君提出了一种基于 BP 神经网络的混合定位算法, 利用 BP 神经网络对基站的测量值和 GPS 伪距差值进行修正, 解决了采用基站或者 GPS 单独定位时, GPS 卫星观测数目不足导致无法定位的问题^[32]. 杨筱宇在 RSSI 无线测距问题的基础上, 进行了基于 BP 神经网络的 Zigbee 无线定位技术的研究, 在短距离定位中具有较好的定位性能^[33]. 彭宇倩为了进一步降低 RSSI 测距过程中非视距误差对定位精度造成的影响, 提出了基于 BP 神经网络的实时动态参数定位方法, 能根据实际环境实时的调整定位模型参数, 使 RSSI 测量值与视距环境下的接近, 有效地提高了定位精度^[34]. Malvezzi 等尝试对空转和滑行进行模糊化, 对速度传感器的输入进行模糊推理, 判断空转和滑行的发生, 采用前馈神经网络估计列车运行速度, 并且采用遗传算法优化门限值参数, 定位的准确度得到进一步提升^[35]. 随着启发式算法多元化的发展, 未来还会给列车定位技术的优化带来更多新思路.

3.4 基于电子地图匹配算法的列车定位技术

高精度的专用电子轨道地图, 是实现基于卫星导航系统的列车定位的关键^[36]. 车载设备可以利用地图掌握轨道线路特性和列车的位置信息, 地面监控中心可以根据可视化的电子地图监控列车的运行状态, 并且利用地图数据库中存储的列车位置数据, 矫正卫星导航系统接收数据的误差, 提高定位精度. 国外包括 WCRM, LOCOPROL, Open Track 和 ITCS 列车运行控制系统均对轨道电子地图进行了研究^[37]. 实时性、鲁棒性及匹配精度是衡量地图匹配效果的 3 个重要指标. 提高地图匹配的精度和实用性可以从优

化电子地图匹配方法,降低辅助地图匹配设备的成本,开发电子地图制作和仿真工具 3 个方面出发.

电子地图作为列车定位的基本参考标准,其制作和生成方法直接关系到列车定位系统的精度.国外对轨道电子地图的研究工作起步较早,专业 GIS 开发工具、地图制作标准以及在轨道交通中的应用都比较成熟.ESRI 公司与位于惠灵顿的 ONTRAK 列车控制室联合提出了建立基于网络的 GIS 可视化解决方案;旧金山的 MUNI 公司曾与 Next Bus 信息系统公司合作开发了多个列车定位地理信息系统;通桥有限公司的 RTCASTM 自动控制系统利用地面感应器进行列车定位,根据建立的综合轨道数据库能实时动态地显示出列车在地图上的位置.我国的电子地图设计研究仍处于初级阶段,北京交通大学、西南交通大学等高校对轨道地图数据库的设计、铁路站场设备的模型描述、GNSS 与地图匹配组合定位技术等方面进行了研究;中科院地理信息产业发展中心也在积极开发 Active Map 等新一代组件式 GIS 产品;我国的国家测绘局联合国家基础地理信息中心等多个部门正在加紧制定自己的导航电子地图标准.统一电子地图设计标准,完善 GIS 信息系统,加强与现有铁路规范的兼容性是未来电子地图领域的发展方向.

电子地图匹配方法的效率是决定列车定位系统性能的关键,常用算法有直接投影法、相关性算法、概率统计法、曲线拟合法、模糊逻辑算法等^[38].近年来,国内外学者在传统地图匹配算法的基础上进行了深入研究,并且取得了丰硕成果.刘江等研究了列车定位轨道电子地图数据约简算法,在保证精度的前提下有效地约简了原始地图的测量数据^[39].苏奎峰等提出了基于曲率特征的自主车辆地图匹配方法,消除了航迹推算传感器估计偏差引起的错误匹配问题^[40].殷燕如等将道路网络分块的思想引入地图匹配算法,节省了搜索地图数据库的时间^[41].Newson 等介绍了一种基于隐马尔可夫模型(hidden Markov model, HMM)的时间标记经纬度序列的方法匹配车辆行驶路径^[42].Chen 等提出了一种使用曲线简化逼近实际曲线的 Fréchet 距离的可扩展地图匹配算法^[43].Saab 提出了一种基于地图匹配的轨道占用识别算法,通过比较数据库中存储的角速度以及测量所得的角速度,判断备选路段是否是列车的当前位置^[44].电子地图匹配方法的优化主要集中在缩短匹配时间,减小数据冗余,降低误差积累三个方面.

4 列车定位系统综合性能评价

在控制领域,衡量控制系统性能的标准是稳、准、快,列车定位系统作为列车运行控制系统的核心单元也有相应的性能评价指标.铁路运输业的特殊性决定了基于卫星导航的列车定位系统要同时满足卫星导航系统的性能评价标准和列车定位系统的控制需求.高效精确的卫星导航系统可以从精确度、连续性、完好性和可维护性四个方面来评判.铁路 RAMS(reliability, availability, maintainability, safety)规范明确规定了列车定位的评价标准有可靠性、可用性、可维护性和安全性^[45].如图 2 所示,为了融合和体现两种评价体系的优点,本文归纳了列车定位系统设计应遵循的

主要原则是精确性、有效性和安全完整性.

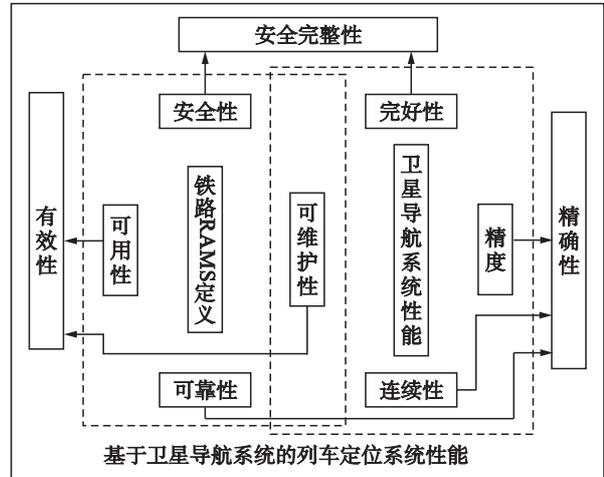


图 2 列车定位系统综合性能评价标准
Fig.2 Comprehensive performance evaluation standard of train positioning system

精确性是指测量值在测量均值附近的聚合程度,满足精确性原则的目的是为列车定位控制系统提供一套准确的位置识别机制,实现列车的连续、可靠定位,通常可以用均方根误差(root mean square error, RMS)和圆概率误差(circular error probability, CEP)表示.有效性是指在外部资源提供保障的前提下,在某个瞬间或给定的时间间隔,系统正常执行所需功能的能力^[46].满足有效性原则的目的是验证在真实环境下外在因素对系统识别性能的影响,确保系统可以正常运行.安全完整性是指在规定的时间及规定的条件下,一个系统较好的实现所要求的安全功能的概率,包括安全性和完好性两个方面.列车定位系统的安全完整性是基于列车运行控制系统的安全需求提出的,必须达到安全完整性等级最高级别 4 级.满足安全完整性原则的目的是为系统提供基本的安全保障,能够有效地实现系统认证并且保护系统的隐私.

基于卫星导航的列车定位系统的安全完整性研究,主要有两个研究方向:一是采用容错设计及故障检测与隔离法追踪故障的来源,评估系统的安全性.王剑通过故障分析、风险分析和完整性模型分析,提出了被动式列车定位系统完整性监视算法,可以根据列车定位的水平误差调节列车的安全缓冲距离^[47].唐一哲利用故障树模型和马尔可夫链模型分析了基于 GNSS 的多传感器列车定位系统的完善性风险^[48].李聪进行了基于故障树和 Petri 网的列车定位系统安全性研究^[49].张洪建立了列车定位系统的故障树模型,结合三角模糊数、信息熵理论对定位系统的危险源进行风险分析^[50].法国阿尔斯通、日本日信、德国西门子将“二取二”以及“三取二”等不同冗余结构应用在列车运行控制系统的故障检测设备中,推出了多种不同类型的安全计算机^[51].Filip 等提出的基于 GNSS 的多普勒雷达、惯性传感器组合的列车定位单元,采用了“两级二取一结构”,根据可靠性框图,通过计算相关参数,对该冗余

系统的平均失效率进行估计^[52]。二是采用卫星定位增强系统和多种卫星导航系统组合的方式提高定位精度。比如美国的广域增强系统 WAAS, 日本的多功能运输卫星增强系统 MSAS, 欧洲的境地导航重叠系统 EGNOS 以及中国的多星座联合系统(BDS + GPS)等。Simsy 等提出了一种基于 GNSS、欧洲 EGNOS 系统和美国 WAAS 广域增强系统的

列车定位方法, 根据列车运行的一维特性, 利用卫星伪距和铁路电子地图辅助手段得到定位结果^[53]。Harmegnies 采用 GPS 和 GLONASS 双模系统对列车进行单点定位, 实验结果表明双模定位精度比 GPS 单模定位精度提高了 20%^[54]。Albanese 等将 GPS 和欧洲 EGNOS 系统进行组合, 应用于列车定位系统^[55]。

表 2 列车定位系统综合性能分析

Tab.2 Comprehensive performance analysis of train positioning system

	精确性	有效性	安全完整性
存在问题	传感器的误差; 定位算法的精度; 导航卫星的精度	设备维护成本; 导航卫星信号受到遮挡或者偏差较大	设备故障
解决办法	卫星导航系统组合定位; 冗余结构和容错技术; 改进多传感器融合算法; 研发抗干扰性强的新型传感器件	采用虚拟应答器; 多传感器融合辅助定位; 电子地图匹配辅助定位	地面增强技术; 卫星导航增强系统; 新一代 GNSS 导航系统; 卫星接收机自主完好性检测(RAIM)

在表 2 中, 本文从精确性、有效性和安全完整性三个方面归纳了列车定位系统存在的主要问题, 并且给出了相应的解决办法。为了提高基于卫星导航的列车定位系统的完好性, 可以分别从内部和外部进行改善, 其中内部又包含导航卫星自身的完善和各类融合算法的改进两层含义。基于卫星导航技术的列车定位系统与传统的列车定位系统相比, 突出的特点是系统的设计满足等同性原则, 即系统的整体和子系统采用相同的安全设计标准; 系统的定位单元采用了相应的安全冗余结构, 符合故障导向安全原则; 系统具有故障诊断功能, 且诊断功能与其他功能保持独立; 通过逻辑单元的处理, 系统可以在单独卫星导航和组合导航模式之间进行转换; 系统的车载卫星定位单元对外接口采用兼容性设计, 可以直接替换列车运行控制系统中使用的定位单元, 与车载主机通过主线相连接进行自主定位。

5 未来发展展望

随着我国铁路运输业的迅速发展, 高速列车及高密度线路越来越多, 这对列车定位系统提出了更高要求。传统的、单一的列车定位技术已经不能满足人们日益增长的位置服务需求, 新一代的基于卫星导航技术的合作型列车定位模式指明了列车定位技术的发展方向。基于卫星导航系统的多模组合定位技术在列车定位系统中的应用意义重大, 不仅能够削弱国外定位技术的垄断地位, 提高列车定位的安全性和抵御风险的能力; 而且可以改善卫星的空间布局, 提高遮挡盲区的定位精度。未来在基于卫星导航的铁路列车定位领域还有许多工作需要进一步深化和改革, 主要集中在以下 3 个方面:

1) 提高卫星导航系统的运营服务质量。卫星导航系统已经从 GPS 一枝独秀的时代过渡到多星座系统并存的百花齐放的新时期。为了进一步提高定位精度, 服务全球用户, 未来的卫星导航系统将向着多层次结构、多系统兼容、多模块应用、多手段集成的方向发展。新型的卫星导航服务方式可以有效地解决单一卫星导航系统存在的信号

丢失、信号强度低等问题, 可以预见, 卫星导航系统的全面升级必然带动列车定位技术的发展。

2) 组合使用多种导航定位技术。到目前为止, 还没有一种定位技术能满足列车定位系统的全部要求, 只有将卫星导航技术与其他定位技术综合使用、取长补短, 才能满足实际需求。惯性传感器与 GPS 的组合, 卫星导航系统与其增强系统的组合等都是提高列车定位系统精度的有效措施。随着数据融合技术的发展, 通过建立多种定位技术的紧密耦合结构, 充分利用现有设备和融合估计算法, 使卫星导航与传感器检测相结合, 将有助于摆脱卫星导航信号被遮蔽导致定位失效的困扰。

3) 建立适用于我国铁路系统的列车定位安全评估管理体系。随着北斗卫星导航系统在列车定位系统中应用进程的加快, 有针对性地制定安全应用参考标准, 严格管理系统的设计、开发、验证、评估等生命周期全过程, 形成统一规范, 构建有效的仿真测试平台, 优化理论方法, 是卫星导航技术与列车定位技术结合的重要前提。

6 总结

卫星导航领域将形成 GPS、GALILEO、GLONASS、北斗卫星导航系统四大全球性导航系统为主, 日本和印度等国家的区域导航系统为辅的格局。我国自主研发的北斗卫星导航系统的发展既面临机遇又面临挑战。因此, 既要借鉴其他导航系统的发展经验, 又要充分发挥自身的优势, 形成具有自身特色的全球性卫星定位网络。结合现今列车定位技术的发展状况, 从市场发展和需求来看, 以卫星导航系统为基础的多传感器融合技术、无线传感器网络、启发式算法和电子地图匹配算法的改进和优化是提高列车定位精度的根本保证。安全、高效的列车定位系统不仅需要坚实的技术基础还需要统一规范的安全评估准则作为约束。因此, 重视开展列车定位系统的安全评估方法和科学管理体制的研究工作, 尽快建立一套适用于我国铁路运输系统的安全评估管理体系将成为下一步的工作重点。

参考文献

- [1] 徐伟. 城市轨道交通列车定位系统[J]. 铁路通信信号工程技术, 2009, 6(2): 41-44.

- Xu W. Urban rail transit train positioning system [J]. *Railway Signalling & Communication Engineering*, 2009, 6(2): 41–44.
- [2] Montague R G, Bingham C M, Atallah K. Dual-observer-based position-servo control of a magnetic gear[J]. *IET Electric Power Applications*, 2011, 5(9): 708–714.
- [3] Ng J K Y, Zhou J Y, Chu K M K, et al. A train-once approach for location estimation using the directional propagation model[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2242–2256.
- [4] Hegarty C J, Chatre E. Evolution of the global navigation satellite system (GNSS)[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2008, 96(12): 1902–1917.
- [5] 陈俊勇. GPS 技术进展及其现代化[J]. *大地测量与地球动力学*, 2010, 30(3): 1–4.
Chen J Y. On progress in technology and modernization of GPS[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(3): 1–4.
- [6] 宁津生, 姚宜斌, 张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. *导航定位学报*, 2013, 1(1): 3–8.
Ning J S, Yao Y B, Zhang X H. Review of the development of global satellite navigation system[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2013, 1(1): 3–8.
- [7] 徐菁. 2013 年世界导航卫星回顾[J]. *国际太空*, 2014(2): 32–37.
Xu J. Review of world navigation satellite in 2013[J]. *Space International*, 2014(2): 32–37.
- [8] 马兰, 孔毅, 郭思海, 等. 世界几大卫星导航系统的比较[J]. *现代测绘*, 2011, 34(3): 3–6.
Ma L, Kong Y, Guo S H, et al. Comparison of several major satellite navigation systems in the world[J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2011, 34(3): 3–6.
- [9] 马景金, 赵金龙, 丽世宝. 中国卫星导航系统发展状况及应用前景展望[J]. *地矿测绘*, 2013, 29(1): 44–45.
Ma J J, Zhao J L, Li S B. The Situations and prospects of application of BeiDou satellite navigation system[J]. *Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources*, 2013, 29(1): 44–45.
- [10] 米红, 谢军, 宋志强, 等. 北斗星载时间频率系统发展综述[J]. *导航定位学报*, 2014, 2(2): 1–5.
Mi H, Xie J, Song Z Q, et al. An overview for BeiDou on-board time & frequency system development history[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2014, 2(2): 1–5.
- [11] 纪龙蛰, 单庆晓. GNSS 全球卫星导航系统发展概况及最新进展[J]. *全球定位系统*, 2012, 37(5): 56–61.
Ji L Z, San Q X. The recent development and application of GNSS global satellite navigation system[J]. *GNSS World of China*, 2012, 37(5): 56–61.
- [12] Filip A, Bazant L, Mocek H, et al. Satellite navigation based railway signaling concept[C]//Proceedings of International conference of COMITE. Prague, Czech: European GNSS Agency, 2001: 1–20.
- [13] Liu J, Cai B G, Wang J. Precise position estimation of high railway train for collision early warning system[J]. *International Journal of Advancements in Computing Technology (IJCAT)*, 2013, 5(8): 1155–1166.
- [14] 江春红, 苏惠敏, 陈哲. 信息融合技术在 INS/GPS/TAN/SMN 四组合系统中的应用[J]. *信息与控制*, 2001, 30(6): 537–542.
Jiang C H, Su H M, Chen Z. Multi-sensor in formation fusion technique and it's application in INS/GPS/TAN/SMN integrated navigation systems[J]. *Information and Control*, 2011, 30(6): 537–542.
- [15] Geistler A, Bohringer F. Robust velocity measurement for railway applications by fusing eddy current sensor signals[C]//2004 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 664–669.
- [16] Riewe F. Low-cost multiple sensor inertial measurement system for locomotive navigation[R]. Washington, USA: ENSCO Inc., 2004.
- [17] 刘争平. 光纤光栅传感技术在轨道交通车辆的应用[J]. *都市快轨交通*, 2013, 26(6): 103–106.
Liu Z P. Application of fiber bragg grating sensing technology in rail transit vehicles[J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2013, 26(6): 103–106.
- [18] 陶俊勇, 邱静, 温熙森, 等. 自适应联合滤波模型及其在车载 SINS/GPS 组合导航系统中的应用[J]. *信息与控制*, 2000, 29(2): 168–172.
Tao J Y, Qiu J, Wen X S, et al. Adaptive combined filtering model and its application in SINS/GPS integrated navigation system[J]. *Information and Control*, 2000, 29(2): 168–172.
- [19] Chen Z. Bayesian filtering: From Kalman filters to particle filters, and beyond[J]. *Statistics*, 2003, 182(1): 1–69.
- [20] 叶建斌. RFID 技术在列车控制系统应用的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
Ye J B. Research on application of RFID technology in train control system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [21] Laitinen H, Lähteenmaki J, Nordström T. Database correlation method for GSM location[C]//IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 2504–2508.
- [22] Lakmali B D S, Dias D. Database correlation for GSM location in outdoor & indoor environments[C]//4th International Conference on Information and Automation for Sustainability. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008, 42–47.
- [23] Lakmali B D S, Wijesinghe W H M P, De Silva K U M, et al. Design, implementation & testing of positioning techniques in mobile networks [C]//3th International Conference on Information and Automation for Sustainability. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007, 94–99.
- [24] Kemppe P, Nousiainen S. Database correlation method for multi-system positioning[C]//IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 866–870.
- [25] 孟祥先, 贺柯元, 刘昌生. RFID 技术在列车定位系统中的应用[J]. *信息技术与信息化*, 2014(1): 124–127.
Meng X X, He K Y, Liu C S. The application of RFID technology in train positioning system[J]. *Information Technology and Information*, 2014(1): 124–127.
- [26] 夏博光, 王卫东, 王登阳. 无线射频 (RFID) 技术在高速检测列车精确定位中的应用[J]. *铁道建筑*, 2011(12): 102–106.
Xia B G, Wang W D, Wang D Y. Application of radio frequency identification (RFID) technology in the precise positioning of high speed train [J]. *Railway Engineering*, 2011(12): 102–106.
- [27] 陈凯. RFID 技术在列车运行控制系统中的应用[J]. *沿海企业与科技*, 2008(12): 19–21.
Chen K. Application of RFID technology in train operation control system [J]. *Coastal Enterprises and Science & Technology*, 2008(12): 19–21.
- [28] Zhang X Q, Manos Tentzeris. Applications of fast-moving RFID tags in high-speed railway systems[J]. *International Journal of Engineering Business Management*, 2011, 3(1): 27–31.
- [29] Vivek R. Reverse RFID based tracking of public transport[J]. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2012, 4(7):

- 3107–3110.
- [30] Ho K C, Xu W W. An accurate algebraic solution for moving source location using TDOA and FDOA measurements[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(9): 2453–2463.
- [31] 毛永毅, 谢川. 基于遗传算法优化神经网络的定位算法[J]. *西安邮电大学学报*, 2014, 19(4): 45–48.
Mao Y Y, Xie C. A location algorithm based on BP neural network optimized by genetic algorithm[J]. *Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications*, 2014, 19(4): 45–48.
- [32] 张宏君. 基于 BP 神经网络的无线定位算法研究[D]. 西安: 西安邮电大学, 2013.
Zhang H J. Research on wireless localization algorithm based on BP neural network[D]. Xi'an: Xi'an University of Posts & Telecommunications, 2013.
- [33] 杨筱宇. 基于 BP 神经网络的 Zigbee 无线定位技术[J]. *现代计算机*, 2012(4): 20–24, 39.
Yang X Y. Zigbee wireless positioning technology based on BP neural network [J]. *Modern Computer*, 2012(4): 20–24, 39.
- [34] 彭宇倩, 曾碧, 肖红, 等. 基于 BP 神经网络的实时动态参数定位方法[J]. *计算机工程与设计*, 2014, 35(10): 3679–3684.
Peng Y Q, Zeng B, Xiao H, et al. Real-time positioning method with dynamic parameters based on BP neural network[J]. *Computer Engineering and Design*, 2014, 35(10): 3679–3684.
- [35] Malvezzi M, Toni P, Allotta B, et al. Train speed and position evaluation using wheel velocity measurements[C]//2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 220–224.
- [36] Allotta B, Colla V, Monica M. Train position and speed estimation using wheel velocity measurements[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2002, 216(3): 207–225.
- [37] Gerlach K, Horste M. A precise digital map for GALILEO based train positioning systems[C]//Proceedings of 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 343–347.
- [38] 王磊. 基于 GPS 和 GSM-R 的列车定位系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
Wang L. The study of trains positioning system based on GPS and GSM-R[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [39] 刘江, 蔡伯根, 王剑, 等. 列车定位轨道电子地图数据约简算法研究[J]. *铁道学报*, 2011, 33(8): 73–79.
Liu J, Cai B G, Wang J, et al. Research on algorithm of electronic track map data reduction for train locating[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(8): 73–79.
- [40] 苏奎峰, 邓志东, 黄振. 基于曲率特征的自主车辆地图匹配定位方法[J]. *机器人*, 2012, 34(4): 440–448.
Su K F, Deng Z D, Huang Z. A novel localization approach for autonomous vehicles based on map matching with curvature features[J]. *Robot*, 2012, 34(4): 440–448.
- [41] 殷燕如, 刘金乐. 基于 GPS 列车定位系统的快速地图匹配算法研究[J]. *铁道通信信号*, 2011, 47(11): 60–76.
Yin Y R, Liu J L. Research on fast map matching algorithm based on GPS train positioning system[J]. *Railway Signalling & Communication*, 2011, 47(11): 60–76.
- [42] Newson P, Krumm J. Hidden Markov map matching through noise and sparseness[C]//ACMSIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. New York, NJ, USA: ACM, 2009: 336–343.
- [43] Chen D, Driemel A, Guibas L, et al. Approximate map matching with respect to the Fréchet distance[J]. *Algorithm Engineering and Experiments*, 2011: 75–83.
- [44] Saab S S. A map matching approach for train positioning. I. Development and analysis[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2000, 49(2): 467–475.
- [45] Saab S S. A map matching approach for train positioning. II. Application and experimentation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2000, 49(2): 476–484.
- [46] 刘立月. GNSS 列车定位有效性及安全完整性研究[J]. *华东交通大学学报*, 2014, 31(1): 39–42.
Liu L Y. Research on the effectiveness and safety of GNSS train location [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2014, 31(1): 39–42.
- [47] 王剑. 基于 GNSS 的列车定位方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
Wang J. Research of the train positioning technologies based on GNSS technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [48] 唐一哲. 基于 GNSS 的列车定位完善性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
Tang Y Z. Research in GNSS based train positioning integrity[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [49] 李聪. 基于故障树和 Petri 网的列车定位系统安全性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
Li C. The research of train positioning system security based on fault tree and Petri net[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [50] 张洪. 列车定位系统安全性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
Zhang H. Security research on the train positioning system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [51] 肖杰. 基于 GNSS 的列车定位单元设计及其可靠性和安全性指标分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
Xiao J. Design of the GNSS-based train positioning unit and reliability and safety index analysis[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [52] Filip A, Mocek H, Bazant L. GPS/GNSS based train positioning for safety critical application[J]. *Signal Draht*, 2001(5): 51–55.
- [53] Simsky A, Wilms F, Franckart J P. GNSS-based failsafe train positioning system for low-density traffic lines based on one-dimensional positioning algorithm[C]//Proceedings of the 2nd ESA Workshop Satellite Navigation User Equipment Technologies. (2004–12)[2015–04–08]. <http://www.researchgate.net/publication/242748198>.
- [54] Defraigne P, Harmegnies A, Petit G. Time and frequency transfer combining GLONASS and GPS data[C]//Frequency Control and the European Frequency and Time Forum. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1–6.
- [55] Albanese A, Marradi L. The RUNE project: The integrity performances of GNSS-based Railway user navigation equipment[C]//Proceedings of the 2005 ASME/IEEE Joint Rail Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 211–218.

作者简介

李卫东(1963–), 男, 博士, 教授. 研究领域为铁路信息与通信智能化技术, 复杂系统分析与控制, 智能控制等.
侯丽虹(1990–), 女, 硕士生. 研究领域为铁路信息与智能控制技术.