



“十二五”国家重点出版物出版规划项目  
国家自然科学基金——铁道联合重点项目  
国家国际科技合作专项项目

## 列车运行控制方法与技术丛书

丛书编审委员会主任 宁 滨

# 列车运行控制系统 测速定位技术

LIECHE YUNXING KONGZHI XITONG  
CESU DINGWEI JISHU

蔡伯根 王 剑 刘 江 周达天 编著

中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

“十二五”国家重点出版物出版规划项目  
国家自然科学基金——铁道联合重点项目  
国家国际科技合作专项项目  
铁路科技图书出版基金资助出版

列车运行控制方法与技术丛书

# 列车运行控制系统测速定位技术

蔡伯根 王 剑 刘 江 周达天 编著



中国铁道出版社

2018年·北京

## 内 容 简 介

本书为《列车运行控制方法与技术丛书》之一,系统研究、分析了列车测速定位技术,主要内容包括:基于轮轴传感器的测速定位、基于卫星导航的测速定位、基于轨旁设备的位置确认、其他列车测速定位技术、数字轨道地图及地图匹配、惯性导航和组合定位、列车定位举例及列车测速定位系统的安全完整性评估等。

本书可作为高等院校轨道交通信号及控制、自动化等专业教材,也可作为在职专业人员的继续教育教材或相关工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

列车运行控制系统测速定位技术/蔡伯根等编著. —北京:  
中国铁道出版社,2018. 11  
(列车运行控制方法与技术丛书)  
ISBN 978-7-113-09898-8

I. ①列… II. ①蔡… III. ①列车-运行-控制系统-定位  
系统 IV. ①U284. 48

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 329436 号

书 名: 列车运行控制方法与技术丛书  
列车运行控制系统测速定位技术  
作 者: 蔡伯根 王 剑 刘 江 周达天 编著

策 划: 崔忠文  
责任编辑: 朱敏洁 编辑部电话: 010-51873134 电子邮箱: zhuminjie1105@163.com  
封面设计: 崔 欣  
责任校对: 胡明锋  
责任印制: 高春晓

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)  
网 址: <http://www.tdpress.com>  
印 刷: 中国铁道出版社印刷厂  
版 次: 2018年11月第1版 2018年11月第1次印刷  
开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 12.75 字数: 306千  
书 号: ISBN 978-7-113-09898-8  
定 价: 70.00 元

## 版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)  
打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

# 《列车运行控制方法与技术丛书》 编审委员会

## 名誉主任

- 孙优贤 中国工程院院士 浙江大学  
施仲衡 中国工程院院士 中国地铁工程咨询公司  
孙永福 中国工程院院士 中国铁道学会  
桂卫华 中国工程院院士 中南大学

## 主任

- 宁 滨 中国工程院院士 北京交通大学校长

## 副主任

- 刘朝英 教授级高工 中国铁路总公司首席电务专家  
唐 涛 教授 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室主任

## 委员(按姓氏笔画排序)

- 卜长坤 北京交通大学  
王飞跃 中国科学院自动化研究所  
刘大为 中国铁路总公司科技和信息化部  
李开成 北京交通大学  
陈建译 中国铁路广州局集团有限公司  
杨志杰 中国铁道科学研究院集团有限公司  
赵会兵 北京交通大学  
段 武 中国铁道科学研究院集团有限公司  
郜春海 北京交通大学  
莫志松 中国铁路总公司工电部  
郭 进 西南交通大学

崔忠文 中国铁道出版社

黄卫中 中国铁路通信信号股份有限公司

程荫杭 北京交通大学

董海荣 北京交通大学

蔡伯根 北京交通大学

# 序

截至 2014 年底,我国高速铁路运营里程达到 1.6 万公里,成为世界高速铁路运营里程最多的国家。高速铁路把环渤海经济圈、中原城市群、关中城市群、武汉城市圈、长株潭城市群、长三角经济圈、珠三角经济圈等经济区紧密联系在一起,大幅缩短城市间的时空距离,有效减低出行时间成本,对促进区域经济协调发展发挥巨大作用。我国在 22 个城市开通运营城市轨道交通,总通车里程达 3000 多公里,北京、上海的城市轨道交通日运量已达 1000 万人以上。高速铁路、城市轨道交通已成为我国公共交通骨干,在国民经济、社会发展中发挥着重要作用。

铁道信号系统是用于控制和防护列车运行的一类特殊设备,旨在保证轨道交通安全、高效运行。计算机、通信及控制等现代信息技术的应用,使铁道信号技术向系统化、网络化、智能化发展,构成了无缝覆盖铁路车、线、站,实时控制列车运行全过程的复杂自动控制系统——列车运行控制系统。伴随着高速铁路、城市轨道交通发展起来的列车运行控制技术和装备,是保证列车安全、高效运行的核心,是高速铁路、城市轨道交通技术先进性的体现。

过去十年,伴随着高速铁路和城市轨道交通的发展,国家高度重视列车运行控制技术和装备的发展,先后在北京交通大学建立了轨道交通控制与安全国家重点实验室、轨道交通运行控制工程研究中心及北京实验室等国家和省部级研究平台,设立了一系列国家自然科学基金、863 计划、国家科技支撑计划及省部级研究项目,围绕高速铁路、轨道交通迫切需要列车运行控制技术和装备,开展相关的应用基础、前沿技术和装备研究。经过潜心研究、努力攻关和拼搏实践,我国已攻克了列车运行控制核心技术,掌握了列车运行控制原理和方法,形成了需求提取、系统集成和联调联试、运用维护等涵盖列车运行控制系统全寿命周期的方法和技术,取得了一系列重大成果,使我国列车运行控制装备技术水平居世界前列。在借鉴欧洲列车控制系统(ETCS)技术规范基础上,我国提出了中国列车运行控制系统(CTCS)技术体系,制订了 CTCS 技术规范和标准。在引进国外核心技术基础上,自主研发了 CTCS-2 级列车运行控制系统和基于 GSM-R 的 CTCS-3 级列车运行控制系统的成套技术装备,实现了互联互通,保证了列车在高速铁路网中长距离、跨线安全、高效运行。经过多年努力,在攻克核心技术基础上,我国自主研制了适

于城市轨道交通的基于通信的列车控制(CBTC)系统。2010年底,北京亦庄线CBTC示范工程顺利开通运营,使我国成为第四个掌握CBTC技术的国家,解决了多年困扰城市轨道交通发展的技术难题。2010年至今,带动CBTC信号系统每公里造价下降达30%以上,降低了城市轨道交通全寿命周期成本,有效支撑了城市轨道交通快速发展和安全运营。

《列车运行控制方法与技术丛书》在系统总结近年来我国列车运行控制核心技术攻关、关键装备研制、工程建设与运用维护等方面所取得的丰富成果基础上,全面介绍了列车运行控制系统的基本原理和关键技术,系统设计、测试验证、安全保障及运营维护等方法。本丛书由轨道交通控制与安全国家重点实验室、轨道交通运行控制国家工程研究中心组织编写,荣幸地入选“十二五”国家重点出版物出版规划项目,并得到铁路科技图书出版基金、轨道交通控制与安全国家重点实验室的支持与资助。

《列车运行控制方法与技术丛书》对于列车运行控制系统领域具有较高的学术价值和实用意义,可为从事列车运行控制的科学研究、关键技术装备研发和运营维护人员提供参考。

编审委员会

2015年10月

# 前 言

铁路是我国国民经济大动脉、国家重要基础设施、大众化交通工具和重大民生工程,在我国经济社会发展中的地位和作用至关重要。列车运行控制系统作为铁路运输的“神经中枢”,是保障铁路行车安全、提高运输效率的核心系统,需要对列车的运行速度及制动方式等状态进行实时监督、准确控制和在线调整。

列车测速定位技术是指在任何时刻、任何地方都能精确及时地确定列车的具体速度和位置,辅助列车实现区间追踪运行和车站精确停车,它作为列车运行控制系统的一项关键技术,与轨道交通系统的安全性和经济性紧密相关。随着传感器技术的快速发展,列车测速定位系统可以采用的传感器日渐丰富,除了传统的轨道电路外,应答器定位技术可以点对点式地获取列车的绝对位置信息;车轮传感器定位技术通过实时速度推算获得列车运行距离,安装简单、易于实现;计轴器定位技术可以检测轨道区段的占用和空闲状态;多普勒雷达定位技术可以克服车轮磨损、空转和滑行等造成的误差,实时性好,频率较高;交叉感应环线定位技术通过车载设备对其相位变化进行计数,从而推断出列车的实际位置;卫星定位技术设备简单、精度高,可以实现全球全天候的实时列车定位;惯性导航系统环境适应能力强,可以随时随地提供列车方向、速度、位置等多维度信息;地图匹配技术可以采用较高精度的线路信息来修正定位系统的误差,从而使得定位性能得到改善。

列车测速定位技术适用于普通铁路、高速铁路、城市轨道交通、低密度线路以及磁悬浮等。通过分析国外列车定位系统中的测速定位技术,以及国内有关院所和部分高校在组合定位方面做出的研究工作,确定在列车测速定位中可能出现的组合方式,并深入研究精确可靠的列车自主定位方法,对于推动列车运行控制系统的研究和轨道交通系统的发展具有重大和深远的意义。

为了满足科研和教学人员的需求,同时为了深入研究列车测速定位技术,帮助广大读者学习和掌握列车测速定位理论和方向,作者在国家自然科学基金——铁道联合重点项目和国家国际科技合作专项项目的支持下,对现有的列车测速定位方法进行了系统的研究,并基于相关研究成果,撰写了《列车运行控制系统测速定位技术》,希望这本书能成为广大读者的良师益友,为进一步推动我国列车运行控制系统的发展做出应有的贡献。

本书由蔡伯根、王剑、刘江、周达天编著。参加撰写的人员有：蔡伯根(第一章),王剑(第三章、第八章),周达天(第二章),刘江(第四章、第七章),上官伟(第五章),姜维(第六章),陆德彪(第九章)。蔡伯根审阅了全书,并提出了重要的修改意见。本书共九章,各章节主要内容及其安排分别为:

第一章绪论,概述了列车测速定位系统及其发展历史,分析了列车测速定位技术的地位和重要性,分析了现有测速定位方法及其特点,并介绍了列车测速定位技术的发展趋势。

第二章基于轮轴传感器的测速定位,根据轮轴传感器的测速原理,从不同的转速传感器出发,分别介绍了光电脉冲传感器、霍尔传感器、测速电机的工作原理及其特点,并分析了各传感器的误差来源及补偿技术,同时研究了空转滑行现象对轮轴传感器用于列车测速的影响。

第三章基于卫星导航的测速定位,围绕卫星导航系统,介绍了卫星导航定位原理、差分卫星定位技术和卫星增强系统,较为详细地分析了列车卫星定位存在的精度问题、可用性问题和完好性问题。

第四章基于轨旁设备的测速定位,介绍了轨旁设备分类、组成及其主要技术特点,详细阐述了轨旁设备测速定位的基本工作原理和方法,包括基于轨道电路的列车定位、基于计轴器的列车定位、基于应答器的列车定位、基于感应环线的列车定位等。

第五章其他测速定位技术,论述了基于雷达传感器的测速定位技术的原理、特点及应用实例,基于图像传感器的测速定位方法、误差分析、实验现象,基于涡流传感器的测速定位的工作和测量原理、电路设计、系统误差分析。

第六章数字轨道地图及地图匹配,概述了数字轨道地图概念、应用和模型,介绍了数字轨道地图的内容分类和格式规范,以及介绍了地图匹配算法和定位方法,同时描述了虚拟应答器技术的工作原理和应用情况。

第七章基于多源信息融合的测速定位技术,介绍了惯性器件中陀螺仪、加速度计及稳定平台的工作原理,阐述了信息融合的概念、结构及其算法,在介绍组合导航系统的组成和卡尔曼滤波算法的基础上,分别阐述了松组合、紧组合和深组合的系统状态方程和观测方程,分析了不同组合方式的优缺点和研究方向,并给出了一个列车组合定位实例。

第八章列车定位举例,详细阐述了地铁列控系统中里程计、加速度计和应答器的列车组合定位模式,增强型列控系统中里程计、差分GPS和数字轨道地图组合定位模式,CTCS-2级和CTCS-3级系统中实际采用的列车定位方法,目前属于研究热点的列车多传感器融合定位项目,以及磁悬浮列车的定位模式。

第九章列车测速定位系统的安全评估,首先介绍了功能安全相关标准,以及功能安全评估的基本概念、方法和步骤。基于此针对基于卫星的列车测速定位方法的性能要求进行了介绍,最后利用 Markov 链方法分析了列车组合定位单元的安全完整性性能水平。

本书的工作是在国家自然科学基金——铁道联合重点项目“基于自主感知的列车运行安全控制和保障理论与方法”(U1334211)及国家国际科技合作专项项目“基于卫星导航的列车运行控制技术合作研究”(2014DFA80260)的资助下完成的,在此表示衷心感谢。

李四辉、陶维杰、陈思睿、袁文、杨嘉明、乔方博、程熙、王锋、刘丹、朱强、杜煜等在资料整理、文字录入和图表设计等方面做了大量的工作。在本书的编写过程中,中国铁道科学院集团有限公司通信信号研究所、北京卡斯柯信号有限公司、北京和利时系统工程有限公司、香港铁路有限公司提供了设备资料和技术手册,在此谨向他们表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中存在的缺点和错误,欢迎广大读者和同行专家指出,我们将继续完善相关研究,为我国列车运行控制系统测速定位技术的发展略尽绵薄之力。

编 者

2018年3月于北京

# 目 录

第一章 绪 论	1
第一节 测速定位方法的概述	1
第二节 测速定位技术的种类	2
第三节 测速定位技术的发展趋势	4
第二章 基于轮轴传感器的测速定位	6
第一节 光电脉冲编码器	6
第二节 基于霍尔效应的速度传感器	10
第三节 测速电机	14
第四节 空转滑行现象对轮轴传感器测速的影响	17
第三章 基于卫星导航的测速定位	22
第一节 卫星导航系统概述	22
第二节 卫星导航定位原理	26
第三节 卫星导航测速原理	33
第四节 卫星导航测姿原理	34
第五节 卫星定位增强技术	35
第六节 典型列控系统 with 卫星导航接收机	41
第四章 基于轨旁设备的测速定位	44
第一节 基于轨道电路的列车占用检查	44
第二节 基于计轴的列车定位	45
第三节 基于应答器的列车定位	51
第四节 基于轨道交叉感应环线的列车定位	54
第五章 其他测速定位技术	58
第一节 基于雷达传感器的测速定位	58
第二节 基于图像传感器的测速定位	65
第三节 基于涡流传感器的测速定位	78

第六章	数字轨道地图及地图匹配 .....	83
第一节	数字轨道地图概述 .....	83
第二节	数字轨道地图内容及格式规范 .....	85
第三节	地图匹配辅助定位方法 .....	92
第四节	虚拟应答器技术 .....	96
第七章	基于多源信息融合的测速定位技术 .....	101
第一节	惯性导航 .....	101
第二节	信息融合及其算法 .....	114
第三节	组合定位模式 .....	123
第四节	组合定位实例 .....	134
第八章	列车定位举例 .....	138
第一节	地铁列控系统列车定位举例 .....	138
第二节	ITCS 列车定位 .....	142
第三节	CTCS 列控系统列车定位 .....	146
第四节	磁浮列车定位 .....	148
第五节	多传感器融合定位 .....	156
第九章	列车测速定位系统的安全评估 .....	167
第一节	功能安全 .....	167
第二节	列车测速定位系统的性能要求 .....	177
第三节	基于 Markov 链列车测速定位安全完整性分析 .....	182
参考文献	.....	187

# 第一章 绪 论

## 第一节 测速定位方法的概述

列车运行控制系统是保证列车安全高效运行的“大脑和神经”，列车定位技术是其中的一项关键性技术，主要提供实时、准确的列车位置和速度信息。列车测速定位的作用主要体现在以下几个方面：

(1) 车载设备获取列车的位置和速度信息，计算列车速度曲线，实施列车超速防护。常用的列车测速定位方法有：基于轮轴传感器的测速定位、基于卫星导航的测速定位、基于多传感器信息融合的测速定位方法等。

(2) 地面控制系统根据列车的位置信息，进行区段占用/出清的判断，从而实现间隔控制，保证追踪运行的列车的安全间隔，列车轨道占用监测主要是通过计轴设备以及轨道电路来实现。

(3) 列车调度指挥系统(包括 TDCS 和 CTC)根据列车位置信息，实时监控列车状态，作为调度命令下达的决策支持。

列车测速定位需要满足以下几项技术要求：

(1) 精确性：列车定位系统的精确性需满足两种不同的要求，一个是列车在同一轨道上纵向的定位精确性，另一个是列车在不同轨道之间的横向的定位精确性。

(2) 可用性：定位系统必须具有执行列车定位而不发生任何间断的能力，即在时间上有很好的可用性。

(3) 连续性：不管列车运行在任何地理区域，定位信息必须不间断地提供给列车运行控制系统，即在空间上有良好的可用性。

(4) 可靠性和安全性：定位系统与列车运行控制系统的其他子系统相互独立，其具有连续 ze 常 ze 工作的能力，并能够检测和报告本身发生的失效和故障。

(5) 可维护性：定位系统的设计和使用必须综合考虑预防性维护和校正性维护等因素，从而使定位系统的生命周期成本最小。

(6) 故障—安全性：当定位系统出现故障时，系统导向安全侧，通报故障状态，而且必须有保证列车安全的相应措施。

列车测速定位技术的发展与列车运行控制系统的发展密切相关，以我国的列车运行控制系统(Chinese Train Control System, CTCS)为例，CTCS-0 级和 CTCS-1 级由机车信号和列车运行监控装置组成，利用轨道电路或计轴完成列车占用检测及完整性检查，车轮传感器完成列车测速；CTCS-2 级和 CTCS-3 级面向高速铁路，两者都依靠轨道电路完成列车占用检查，雷达或车轮传感器完成速度测量，并且使用应答器提供列车用于位置校正的基准信息。而随着卫星导航系统的发展，国内外研究人员在基于卫星导航的列车定位技术与方法方面开展了大量工作，例如 GADEROS 定位单元利用 GNSS 接收机、陀螺仪及速度传感器经 Kalman 滤波

获取列车位置和速度。

总之,从目前来看,随着轨道交通朝着高密度、自动化和智能化的方向发展,列车运行控制系统结构功能日趋复杂,列车运行控制技术越先进,对列车定位技术的精密度也就提出更高要求。车轮空转、打滑、磨耗等速度传感器测速定位的制约因素引发定位系统优化的迫切需要,应答器、多普勒雷达、惯性传感器、涡流传感器、卫星导航系统等方式下的列车定位方案不断产生,实现了低成本与高自主,满足了现代铁路安全/非安全应用服务的发展需要。

## 第二节 测速定位技术的种类

随着工程技术的发展,人们提出了多种列车定位技术,目前,在世界各国轨道交通列车控制系统中使用的列车定位方式有很多,其分类如图 1-1 所示。

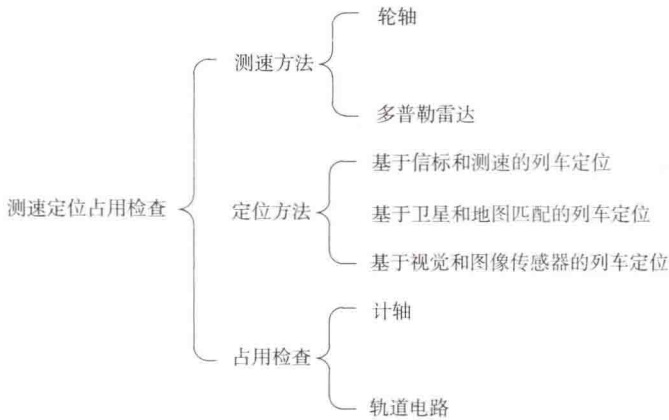


图 1-1 测速定位占用检查方法分类

### 一、基于信标和测速的列车定位

#### (一)信标定位

信标是安装在线路沿线反映线路绝对位置的物理标志。信标分为有源信标和无源信标两种,有源信标可以实现车地的双向通信,在列车经过信标所在位置时,车载天线发射的电磁波激励信标工作,并传递绝对位置信息给列车。信标的作用是为列车提供精确的绝对位置参考点。由于信标提供的位置精度很高,达厘米量级,常用信标作为修正列车实际距离的手段。采用信标定位技术的信息传递是间断的,即当列车从一个信息点获得地面信息后,要到下一个信息点才能更新信息,若其间地面情况发生变化,就无法立即将变化的信息实时传递给列车,因此,信标定位技术往往作为其他定位技术的补充手段。常用的信标定位包括应答器定位和交叉感应环线定位。

#### (二)测速

测速定位就是通过不断测量列车的即时运行速度,对列车的即时速度进行积分(或求和)的方法得到列车的运行距离。由于测速定位获取列车位置的方法是对列车运行速度进行积分或求和,故其误差是积累的,而且测得的速度值误差对最终距离值的误差影响也是非常直接。因此,利用该种定位方法的关键在于两点:速度测量的准确性和求位移算法的合理性。另外,

测速定位法总体来说属于相对定位,它无法获取列车的初始位置,要获得列车的绝对位置仅仅依靠这种方法本身几乎是不可能的。测速传感器的种类很多,有磁电式、光电式、离心式、霍尔式等轮轴测速传感器,还有多普勒雷达等。

信标+测速的定位方法利用了测速传感器进行速度测量,通过积分获取列车走行距离,结合信标进行不断的距离校正,获得高精度的列车位置。

## 二、基于卫星和地图匹配的列车定位

### (一)卫星定位方法

卫星定位系统即全球定位系统(GPS, Global Positioning System),是由位于地球上空 24 颗卫星和监视管理这群卫星的 5 个地面站组成。这些卫星用原子钟作为标准时间,24 h 连续向地球播发精确的时间及位置信息。配有 GPS 接收机的用户,可在地球上任何地方、任何时刻收到卫星播发的信息,通过测量卫星信号发射和接收的时间间隔,计算出用户至卫星的距离,然后根据 4 颗卫星的数据,即可实时地确定用户所在地理位置。

属于卫星导航系统的有美国的全球定位系统(GPS)、欧盟的伽利略卫星导航系统以及前苏联开发的全球导航卫星系统(GLONASS);还有我国自主研发的北斗卫星定位系统等。

对于列车的实时定位而言,卫星定位技术是一种新的手段。这方面使用较为成熟的是美国的 GPS 系统,采用差分 DGPS 可以达到 3~5 m 的定位精度。但使用 GPS 也有着诸多的缺陷,例如 GPS 可能出现信号丢失的情况,导致定位信息的不连续,而且受到美国政府的控制。

### (二)地图匹配

使用卫星定位的时候,用户首先获取的是载体的三维地理坐标,列车在一维轨道上行驶,因此需要使用地图,将三维地理坐标转换为二维的轨道里程标,这个过程称之为地图匹配。应用地图匹配技术要具备两个前提:

- (1)用于匹配的数字地图包含高精度的道路位置坐标。
- (2)被定位的车辆正在路网中行驶。

当满足这些条件时,就可以把定位数据和车辆运行轨迹数字化地图所提供的道路信息相比较,通过合适的匹配过程来确定车辆最可能的行驶路段以及车辆在该路段中最可能的位置。由于列车在除了进入车站等地之外大多情况都位于铁路网络中,因此通常可以满足使用地图匹配技术的条件。地图匹配的主要算法有投影法、基于几何信息的地图匹配算法、基于拓扑关系的地图匹配算法、基于概率的地图匹配算法、综合匹配算法等,其中基于几何信息的地图匹配算法是铁路中最常用的一种算法。

## 三、基于视觉和图像识别的定位

基于图像传感器的定位是通过比较相邻两幅图像中某特征的位移计算列车的实际位移,通过积分获取列车行驶位置。对铁路而言,线路两侧的信号机、桥涵标、线路的道岔以及公里标信息,这些特征点的精确位置都可以保存在数据库中,若能利用图像识别的方法确定摄像机到特征点的距离,就可以确定列车的具体位置,或者实现列车的位置校正。

除上述常用的列车定位技术外,近年来提出了一些各具特色的定位方法,如利用接触网定位器辅助列车定位;通过电涡流传感器检测铁路线路沿线由钢轨扣件和道岔产生的非均质特性随机信号进行列车的测速和定位等。

#### 四、基于计轴和轨道电路的列车位置确认

轨道电路是将钢轨分割成不同的区段,在每个区段的始端与终端加上发送/接收器,从而构成一个信息传输回路。当区段空闲时,信息由发送器通过回路传输到接收器,接收继电器励磁吸起;当列车进入区段,此区段占用时,轮对将两根钢轨短路,信息不能送到接收器,接收继电器失磁落下,从而达到列车检测及定位的目的。

计轴定位是在区段端头的计轴点处安装车轴检测传感设备,该设备能检测识别车轮,当有车轮经过时,会产生一个脉冲信号,将这个脉冲信号通过通信电缆传送给室内计轴评估器,室内计轴评估器结合运行方向记录(增轴或减轴),不断统计和比较轨道区段端头进入和离开的轮对数量,确认相应区段的占用或空闲状态,从而确定列车位置。

### 第三节 测速定位技术的发展趋势

随着高速铁路飞速发展,在速度超过 350 km/h 的高速铁路线路上,列车的测速定位问题显得越来越重要。测速和定位的精度从根本上制约着高速铁路列车运行中自动控制系统的控制精度。为确保列车运行安全,并充分发挥运输效能,只有时刻掌握高速列车运行的即时速度和位置,才能确保列车的正点到达和安全运行。传统的轮轴转速传感器收到打滑抱死、蠕滑等影响,需要不断地进行校正和补偿,轨道电路和计轴设备只能用于区段占用的确认。测速和定位还可采用惯性传感器、多普勒雷达等等各种手段获得列车的位置和速度信息,但是测量精度受到一些因素的制约,在性价比方面存在局限性。

因此,组合导航的思想应运而生。组合导航是指两种或两种以上导航技术的组合。根据不同的要求,有各种不同的组合方式。

国外关于多传感器组合在列车定位中的研究已经取得了一定的进展。

在多传感器融合的列车导航系统研究方面,英国谢菲尔德大学的学者构建了基于 GPS、多普勒雷达、陀螺仪、转速计、数字地图和应答器等传感器的导航系统。通过对这些传感器的组合,应用数据融合技术(主要是卡尔曼滤波算法)以较低的成本获得数据精确度和可靠性。

由欧洲宇航局资助的 INTEGRAL 项目是为了论证和演示 EGNOS (European Geostationary Navigation Overlaying System)在铁路中的管理和运用。通过应用卫星导航技术获得列车位置和速度,并结合传统的传感器数据信息,以提高现有的基于速度传感器的列车速度和定位测试系统。该项目主要目标之一就是提供自治的定位系统,使之能够通过惯性测量单元和 GPS/EGNOS 的组合,提高列车定位和速度估计精度。因此,RUNE 项目利用多个传感器的位置融合以提高精度,通过多普勒雷达的数据和应答器的数据作参考,来比较所得速度、位置数据的精确性;利用 EGNOS/WAAS 和信息冗余(多传感器,虚拟应答器)以减少物理应答器和轨旁设备等。

除了以上项目研究,在欧洲的 ETCS-3 级系统中,为了减少对特定的轨旁设备的依赖,以便使列车运行控制系统能够兼容,并且降低生命周期费用,列车定位采用伽利略卫星导航系统、速度传感器和查询一应答器组合的方法。捷克技术大学的 Roma 和 Libor 采用了一种交替融合的方式,在 GPS 不可用的时候,采用里程计和加速度计进行航位推算来确定列车定位。在 GE 公司的 ITCS 系统中,通过 DGPS+里程计实现列车动态位置跟踪,车载计算机采用卡



尔曼滤波算法,对影响到定位精度的各种干扰因素,特别是卫星信号遮挡、差分数据接收延迟等因素,通过严密的数学模型推导计算将误差减小到系统容许的范围。研究基于多传感器融合的列车定位技术是一个发展趋势。

国内有关院所和一些高校都在组合定位方面做了很多研究工作:“北斗”导航系统是我国独立自主建立的卫星导航系统,已用于青藏铁路列车定位。青藏铁路列车控制系统采用 GPS(全球卫星定位系统)结合铁路数字移动通信技术(GSM-R),实现数字化调度指挥与管理;北京交通大学的蔡伯根分析了 GPS 和 DR(Dead reckoning)的优缺点,提出用卡尔曼滤波技术来实现 GPS 和惯性传感器的融合和集成的组合定位,给出了现场测试的结果,证明了方法的有效性;国内的列车定位系统向着国际先进水平发展,例如北京地铁 2 号线、4 号线和 10 号线,成都地铁一号线等采用多传感器信息融合的方式,从而实现可靠、安全的列车定位,并达到使列车定位更加精确的效果。

目前在列车测速定位中,可考虑 GPS/DR 组合、DR/Balise 组合、DR/GPS/Balise 组合、多普勒雷达/GPS 组合、GPS/INS/多普勒雷达/速度传感器组合等。

由于组合导航系统中含有多个导航传感器,不同的导航传感器具有不同的特征,如何将多个导航传感器进行优化配置,加以性能互补,消除它们之间可能存在的矛盾,降低不确定性,从而获得更为全面、可靠的导航结果是组合导航系统的主要目的。将信息融合技术用于多传感器组合导航系统,处理来自各个导航传感器的信息,就形成了信息融合导航系统。

从目前来看,轨道交通正朝着高密度和自动化的方向发展,列车自动控制技术越先进,对列车定位技术的精度和可信度也就提出更高要求。原有的定位技术越来越难满足行车安全和指挥系统的要求,因此先进的列车控制系统可结合多种列车定位技术来弥补各自的固有缺陷,以适应列车运行的发展趋势。