



“十二五”国家重点出版物出版规划项目

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 安全信息传输技术

LIECHE YUNXING KONGZHI XITONG
ANQUAN XINXI CHUANSHU JISHU

李开成 马连川 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
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

列车运行控制系统安全信息传输技术

李开成 马连川 编著

中国铁道出版社

2016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,从三个方面系统介绍了列车运行控制系统的安全信息传输技术,主要包括:封闭传输系统和开放传输系统面临的通信安全威胁以及实现通信安全需要采用的防护措施;列车运行控制系统中广泛使用的计算机网络、GSM-R、WLAN、现场总线、应答器、轨道电路和轨道环线等传输系统所采用的安全信息传输技术;密钥管理技术等。

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

列车运行控制系统安全信息传输技术/李开成,马连川
编著. —北京:中国铁道出版社,2016.6
(列车运行控制方法与技术丛书)
ISBN 978-7-113-21628-3

I. ①列… II. ①李… ②马… III. ①列车—运行—
控制系统—安全信息—信息传输 IV. ①U284.48

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 055926 号

书 名: 列车运行控制方法与技术丛书
列车运行控制系统安全信息传输技术
作 者: 李开成 马连川 编著

策 划: 崔忠文
责任编辑: 亢嘉豪 编辑部电话: (路)021-73146 电子邮箱: dianwu@vip.sina.com
(市)010-51873146

封面设计: 崔 欣
责任校对: 孙 玫
责任印制: 陆 宁 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: 2016年6月第1版 2016年6月第1次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 12.75 字数: 311 千

书 号: ISBN 978-7-113-21628-3

定 价: 58.00 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 工程院院士 浙江大学
施仲衡 工程院院士 中国地铁工程咨询公司
孙永福 工程院院士 中国铁道学会
桂卫华 工程院院士 中南大学

主任

- 宁 滨 教授 北京交通大学校长

副主任

- 刘朝英 教授级高工 中国铁路总公司运输局电务部主任
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部
李开成 北京交通大学
陈建译 广州铁路(集团)公司
杨志杰 中国铁道科学研究院
赵会兵 北京交通大学
段 武 中国铁道科学研究院
郜春海 北京交通大学
莫志松 中国铁路总公司运输局
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、工程建造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

列车运行控制系统是列车的“大脑”和“神经系统”。在列车运行控制系统的指挥和控制下,列车在线路上按给定的进路和速度,安全、高效地运行。随着通信技术、计算机技术、网络技术和自动控制技术的发展及其在铁路信号领域的应用,列车运行控制系统已发展成为基于计算机技术、通信技术和网络技术的复杂和分布的系统。从广义来说,列车运行控制系统由四个子系统构成:一是位于调度中心的中央运行控制子系统;二是位于车站和轨旁的地面运行控制子系统;三是位于列车上的车载运行控制子系统;四是连接中央运行控制子系统、地面运行控制子系统和车载运行控制子系统的通信网络子系统。

列车运行控制系统是一个安全苛求系统,为了保证行车安全,列车运行控制系统必须达到规定的安全等级要求,包括构成系统的各种控制设备必须达到相应的安全等级,连接控制设备的通信网络子系统也必须达到相应的安全等级要求。为降低研发成本和缩短研发周期,列车运行控制系统通常采用通用和成熟的通信系统。列车运行控制系统地面设备通常采用计算网络通信;列车运行控制系统的车载设备采用 RS-422 串行总线或现场总线;列车运行控制系统车载设备与地面设备之间,实现车地列控信息双向传输的方式有 GSM-R、WLAN 和轨道环线,实现地对车列控信息单向传输的方式有轨道电路和应答器。这些通信系统是非安全的传输通道。列控信息安全是国家信息安全战略的重要组成部分,利用通用和成熟的通信系统实现列控信息的安全传输,满足安全等级要求,需要采用安全信息传输技术,确保列车运行控制系统信息的安全和可靠传输。

本书结合我国高速铁路列车运行控制系统和城市轨道交通 CBTC 系统的建设和运营维护需要,根据通信技术在铁路信号中的应用形式以及铁路信号对通信的要求,以图文并茂方式,从三个方面系统介绍了列车运行控制系统的安全信息传输技术。首先,系统介绍了封闭传输系统和开放传输系统面临的通信安全威胁以及实现通信安全需要采用的防护措施;然后,介绍了列车运行控制系统中广泛使用的计算机网络、GSM-R、WLAN、现场总线、应答器、轨道电路和轨道环线等传输系统所采用的安全信息传输技术;最后,介绍了密钥管理技术。

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。

本书由李开成、马连川编著。李开成编写第一、五、六、七、八、九章,马连川编写第二、三、四章,李开成负责全书的统稿。本书承郭进教授审阅,并提出了许多宝贵的修改意见。在编写过程中也得到了轨道交通控制与安全国家重点实验室、轨道交通运行控制系统国家工程研究中心、北京交通大学电子信息工程学院的许多同事和研究生的热情支持和帮助。在此,对他们一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在许多错误和不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2016年3月于北京

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 概 述	1
第二节 列车运行控制中的通信技术	4
第三节 列车运行控制系统对通信的要求	9
第四节 故障—安全与安全通信	10
第二章 安全信息传输技术	13
第一节 概 述	13
第二节 安全信息传输模型及技术	17
第三节 通用的网络安全技术	26
第四节 安全信息传输标准	40
第三章 计算机网络的安全信息传输技术	42
第一节 概 述	42
第二节 安全应用中间子层技术	44
第三节 消息鉴定安全层技术	62
第四节 冗余适配管理层技术	63
第五节 传输层和网络层	76
第六节 网络安全管理	81
第四章 现场总线的安全信息传输技术	87
第一节 概 述	87
第二节 Profisafe 安全信息传输技术	90
第三节 ETCS-STM 安全信息传输技术	98
第五章 应答器传输通道的安全信息传输技术	113
第一节 概 述	113
第二节 应答器报文格式和安全编码策略	114

第三节	加扰和扩展技术·····	116
第四节	信息校验技术·····	119
第五节	候选报文测试技术·····	120
第六章	GSM-R 安全信息传输技术 ·····	122
第一节	概 述·····	122
第二节	安全服务模型·····	124
第三节	安全协议·····	129
第四节	安全协议管理·····	138
第五节	无线报文·····	139
第七章	无线局域网的安全信息传输技术 ·····	143
第一节	概 述·····	143
第二节	WLAN 安全机制 ·····	144
第三节	基于 IPSec 的 WLAN 安全系统设计 ·····	155
第四节	基于 3GPP AKA 的 WLAN 接入认证 ·····	163
第五节	CBTC 系统的 WLAN 安全技术 ·····	169
第八章	其他车地传输方式的安全信息传输技术 ·····	177
第一节	概 述·····	177
第二节	轨道电路的安全信息传输技术·····	177
第三节	轨道环线的安全信息传输技术·····	184
第九章	密钥管理 ·····	187
第一节	概 述·····	187
第二节	封闭网络环境下的密钥管理·····	189
第三节	开放网络环境下的密钥管理·····	190
参考文献	·····	193

第一章 绪 论

列车运行控制系统是列车的“大脑”和“神经系统”。在列车运行控制系统的指挥和控制下,列车在线路上按给定的进路和速度,安全、高效地运行。

随着铁路运输需求的多样化和复杂性,以及科学技术的发展,特别是通信技术、计算机技术、网络技术和自动控制技术的发展及其在铁路信号领域的应用,列车运行控制系统的功能和内涵发生了巨大的变化,列车运行控制系统已发展成为基于计算机技术、通信技术和网络技术的复杂、分布的安全苛求系统,是保证列车行车安全、提高运输效率、提供列车运行信息和改善劳动强度的铁路基础设施,是铁路的关键技术装备之一。

第一节 概 述

一、列车运行控制系统的发展

列车运行控制系统经历了地面人工信号、地面自动信号、机车信号、自动停车、自动速度防护等阶段,未来将向自动驾驶方向发展。通过广泛运用 3C(Computer、Communication、Control)技术,列车运行控制系统实现了以下 5 个转变:

- (1)由面向地面固定信号显示的控制到面向移动列车的直接控制的转变;
- (2)由只是对信号显示控制而不能控制列车执行与否的开环控制到列车必须按要求执行信号命令的闭环控制;
- (3)由车站分散控制到调度集中统一指挥控制的转变;
- (4)由调度单一指挥行车到行车指挥、进路控制和临时限速等综合操控的转变;
- (5)由广播式简单通信到点对点和对多点的多功能移动通信转变。

二、列车运行控制系统的组成

按设备所在的区域划分,列车运行控制系统由四个子系统构成:一是中央运行控制子系统,也称调度系统,位于调度中心;二是地面运行控制子系统,包括车站设备、轨旁设备,其设备通常沿铁路线路分布;三是车载运行控制子系统,位于机车或者动车组上;四是通信网络子系统,包括有线网络和车地通信网络,是连接中央运行控制子系统、地面运行控制子系统和车载运行控制子系统的纽带。列车运行控制系统的分层结构如图 1-1 所示。

列车运行控制系统的各个层次之间通过网络和通信等技术有机结合,实现地面控制与列车控制结合、本地控制与中央控制结合,构成一个以安全设备为基础,集行车指挥、运行调整、列车运行速度自动控制、集中监测等功能为一体的集中指挥、分散控制的综合性、闭环控制系统。

中央运行控制子系统,通常也称为调度集中系统(CTC),由调度中心和所辖区段沿线信号室中的 CTC 站机共同组成。中央运行控制子系统根据列车运行状态、沿线行车设备状态及

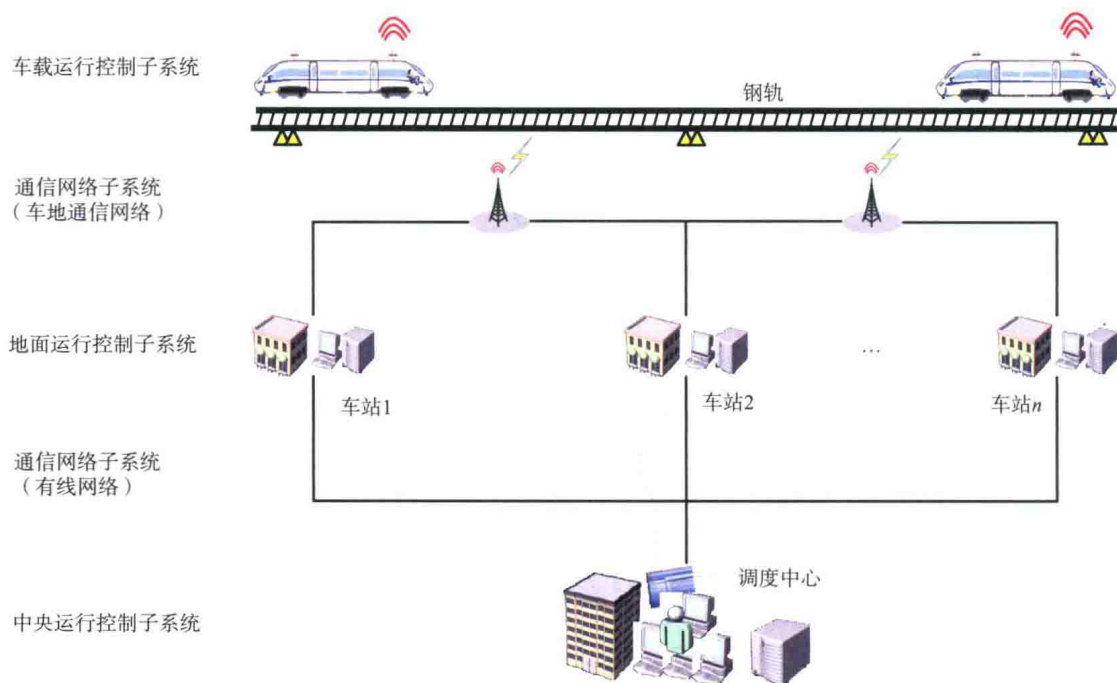


图 1-1 列车运行控制系统的分层结构

维修作业情况的实时信息,按照列车运行计划统一指挥全区段的列车运行。中央运行控制子系统的主要功能包括:

- (1) 监视线路状态和列车运行状态;
- (2) 发布调度命令、临时限速命令,指挥列车运行。

地面运行控制子系统的设备分布在车站信号楼内和铁路沿线(俗称轨旁设备),通常包括控制列车进路的联锁设备、实现自动列车间隔的闭塞设备、生成列车行车许可的无线闭塞中心/区域控制器、实现列车定位基准的应答器等。地面运行控制子系统的主要功能包括:

- (1) 控制列车运行进路和运行间隔;
- (2) 生成列车行车许可;
- (3) 向车载设备提供线路数据(包括坡度、固定限速和临时限速等);
- (4) 管理列车及其运行状态。

车载运行控制子系统安装在列车或者动车组上,根据地面运行控制子系统提供的行车许可、线路数据,以及车载设备存储的信息实时生成速度-距离模式曲线,监控列车安全运行;同时,向地面运行控制子系统报告列车运行状态。车载运行控制子系统的主要功能包括:

- (1) 根据静态速度曲线实时生成动态速度曲线;
- (2) 实时测量列车位置和运行速度,确保列车不超速运行、不超过行车许可终点;
- (3) 向地面运行控制子系统报告列车状态信息(位置、速度和设备状况等)。

通信网络子系统包括有线网络和车地通信网络。有线网络实现中央控制子系统、地面运行控制子系统之间的信息交互,也实现中央运行控制系统内部设备间、地面运行控制子系统内部设备间的连接;车地通信网络实现地面—列车之间双向、大容量的信息传输。通信网络子系统的主要功能包括:

- (1) 有线网络实现地面设备之间的信息安全、可靠、实时传输,涵盖了中央运行控制子系统

内部的设备之间通信、地面运行控制子系统内部的设备之间的通信、中央运行控制子系统与地面运行控制子系统之间的通信；

(2) 车地通信网络实现地面固定设备与列车移动设备之间的信息安全、可靠、实时传输。

列车运行控制系统不仅是一个分布式系统，而且是一个复杂系统，主要体现在每个子系统均由多种类型的设备组成。以我国高速铁路的列车运行控制系统为例，CTCS-3 级列车运行控制系统构成如图 1-2 所示，是一个典型的分布式、复杂系统。

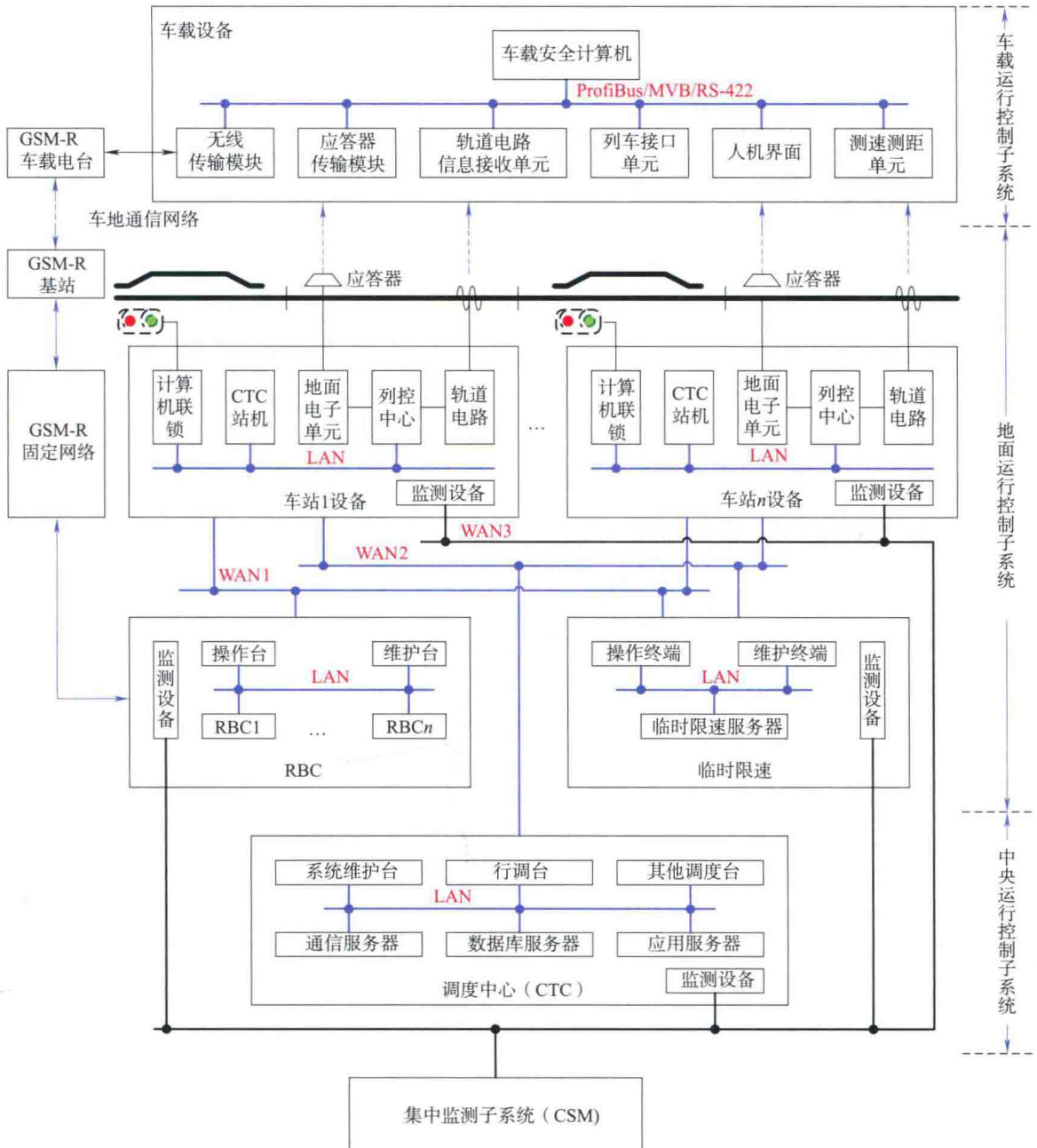


图 1-2 CTCS-3 级列车运行控制系统构成

CTCS-3 级列控系统各设备之间的信息交互如图 1-3 所示。由此可见，网络技术和通信技术是将复杂、分布的列车运行控制系统有机结合的桥梁和纽带，在列车运行控制系统中，安全

信息传输呈现如下的特点：

(1)数据通信方式:各子系统/设备之间交互的信息均为数据类型；

(2)网络通信方式:中央控制设备与地面控制设备(含车站设备和轨旁设备)通过有线网络连接;地面控制设备与车载控制设备通过车地通信网络交换信息,形式包括无线通信、轨道电路和应答器感应方式等。

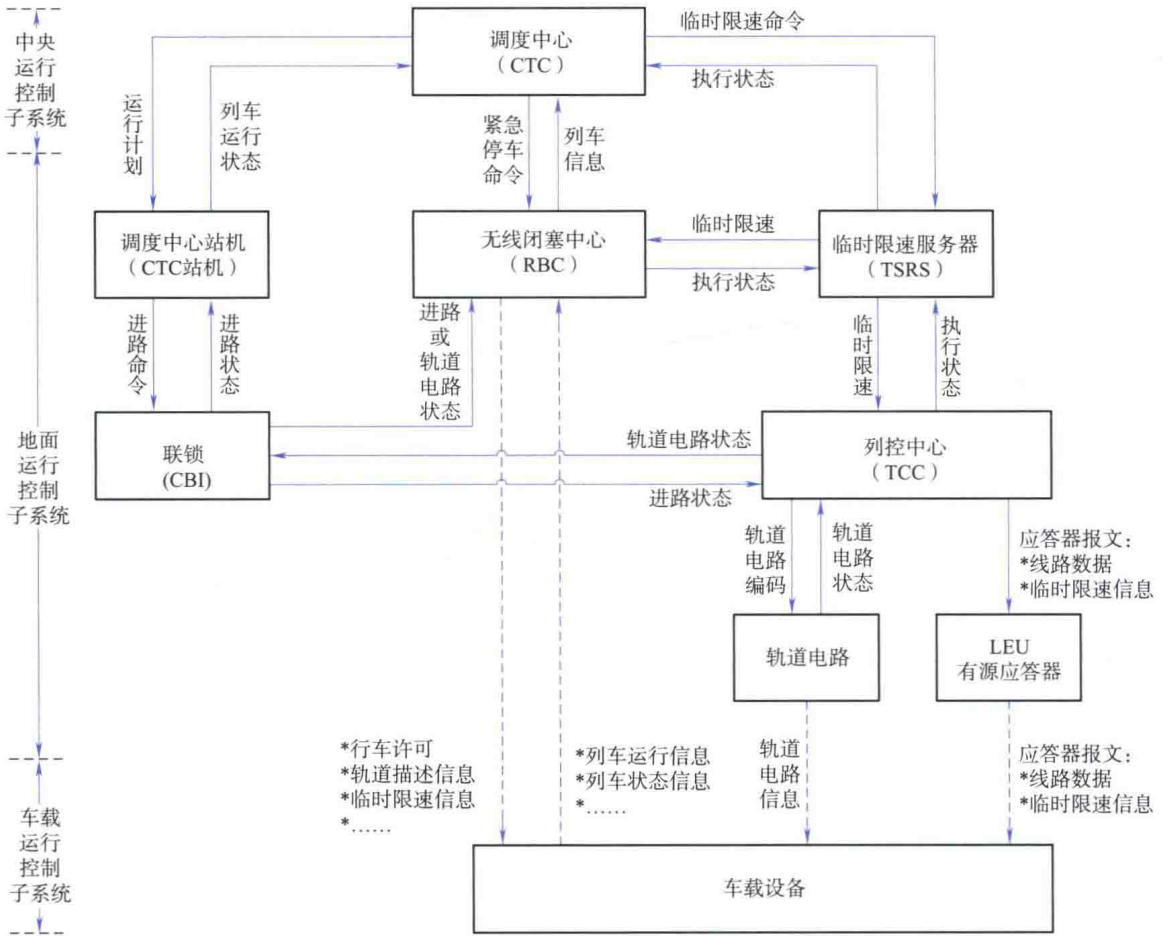


图 1-3 CTCS-3 级列车运行控制系统各设备之间的信息交互

第二节 列车运行控制中的通信技术

在列车运行控制系统中,各个子系统之间,或者子系统内部各设备之间传输控制命令、线路数据、设备参数或者状态等信息,由于列车运行控制系统是一个分布、复杂系统,而且其信息传输涉及系统安全,所以需要采用不同的信息传输技术和手段。目前,在列车运行控制系统中,使用的通信技术主要有网络通信技术、移动通信技术、现场总线通信技术,以及实现安全通信的安全信息传输技术等;应用形式主要分为三类:计算机网络通信、车地移动通信和现场总线通信,安全信息传输技术均运用到这三种应用形式中,确保列车运行控制系统安全相关信息的安全和可靠传输。

一、计算机网络通信

在列车运行控制系统中,地面运行控制子系统的设备沿着铁路线路分布,地面运行控制子系统的各设备之间,以及地面运行控制子系统与中央运行控制子系统之间的连接采用计算机网络。随着技术的发展,TCP/IP 协议逐渐取得了计算机网络协议标准的地位,列车运行控制系统信息传输的 IP 化趋势非常明显。

列车运行控制系统中使用的网络技术包括局域网和广域网络。通常情况下,中央运行控制子系统与地面运行控制子系统之间、沿铁路分布的各地面运行控制子系统之间采用广域网连接;中央运行控制子系统内部各设备之间、地面运行控制子系统内部各设备之间采用局域网连接。例如,在高速铁路 CTCS-3 级列车运行控制系统中,调度中心的行调台、系统维护台、数据服务器、通信服务器、应用服务器等设备之间通过局域网连接,RBC(无线闭塞中心)与 RBC 之间、RBC 与操作台和维护台之间通过局域网连接,临时限速服务器和维护终端之间通过局域网连接,位于车站信号机械室内的计算机联锁系统、CTC 站机、列控中心(TCC)之间通过局域网连接;调度中心、RBC、临时限速服务器、车站信号室内设备(如联锁、TCC)之间采用广域网连接。

CTCS-3 级列车运行控制系统的地面设备通过信号安全数据网连接,信号安全数据网为广域网,其基本网络结构如图 1-4 所示。为提高可靠性,每一独立环网络中用于交换机串接的光纤和用于迂回通道中继器(交换机)连接的光纤取自通信专业提供的两条不同路径的干线光缆,干线光缆与交换机连接的尾缆或尾纤采用不同的引入路径;用于两个独立环网迂回通道中继器(交换机)串接的光纤取自通信提供的两条不同路径的干线光缆,干线光缆与交换机连接的尾缆或尾纤采用不同的引入路径。

二、车地移动通信

车地移动通信技术是实现地面设备对列车(移动体)实时和闭环控制的关键,是列车运行控制系统中所有功能完成的信息基础和保障。车载运行控制子系统完全依靠地对车传输通道从地面运行控制子系统接收行车许可和线路数据,然后依据这些信息生成动态速度曲线来监控列车安全运行;另一方面,中央运行控制子系统和地面运行控制子系统也需要通过车对地传输通道实时了解列车的位置信息,实现对进路的准确安全控制,从而实现闭环控制。

在众多类型的列车运行控制系统中,有代表性的车地移动通信技术主要有以下 4 种。

(1)基于应答器的点式地对车单向传输方式:主要用于列车位置定位基准,也可以为列车运行控制系统提供点式信息;

(2)基于轨道电路的连续式地对车单向传输方式:在传统的列车运行控制系统中使用,主要有模拟轨道电路和数字编码轨道电路两种方式;

(3)基于 GSM-R 的连续式地车双向传输方式:在我国和欧洲高速铁路列车运行控制系统中广泛使用;

(4)基于 WLAN 的连续式地车双向传输方式:在城市轨道交通 CBTC(基于通信的列车控制)系统中广泛使用。

CTCS-3 级列车运行控制系统使用的 GSM-R 车地双向传输系统结构如图 1-5 所示。GSM-R 采用单网交织的冗余覆盖方案,由移动交换中心(MSC)、基站控制器(BSC)、基站(BTS)、光传输设备(OTE)、移动终端(MT)、码型转换和速率适配单元(TRAU)等组成。

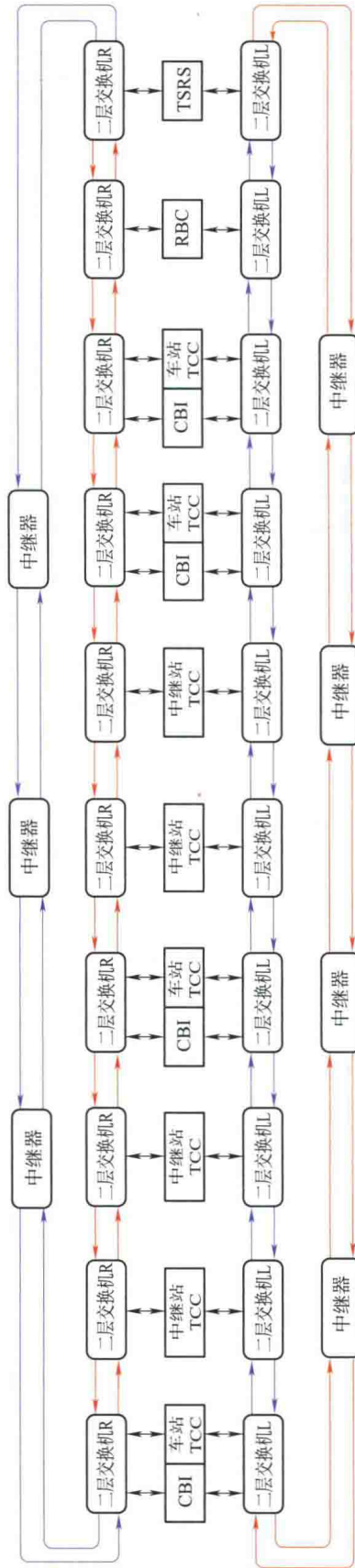


图 1-4 信号安全数据网基本网络结构图