

高等学校城市轨道交通系列教材

城市轨道交通卓越工程师教育培养计划系列教材

城市轨道



列车运行自动控制技术

■ 主 编：徐金祥

■ 副主编：贺 鹏 冲 蕾 原 萍

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等学校城市轨道交通系列教材
城市轨道交通卓越工程师
教育培养计划系列教材

城市轨道交通 列车运行自动控制技术

主 编 徐金祥

副主编 贺 鹏 冲 蕾 原 萍

中 国 铁 道 出 版 社

2013年·北 京

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通列车运行自动控制技术/徐金祥主编.
—北京:中国铁道出版社,2013.8
高等学校城市轨道交通系列教材
ISBN 978-7-113-17179-7

I. ①城… II. ①徐… III. ①城市铁路—轨道交通—
列车—自动控制—高等学校—教材 IV. ①U284.48

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 191121 号

书 名: 高等学校城市轨道交通系列教材
城市轨道交通列车运行自动控制技术
作 者: 徐金祥 贺鹏 冲 蕾 原 萍

策划编辑:殷小燕
责任编辑:殷小燕 电话:(010)51873147
封面设计:陈东山 崔丽芳
责任校对:龚长江
责任印制:陆 宁

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:北京精彩雅恒印刷有限公司

版 次:2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷

开 本:787mm×960mm 1/16 印张:20.5 字数:383千

印 数:1~3 000册

书 号:ISBN 978-7-113-17179-7

定 价:39.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部联系调换。

电 话:市电(010)51873170 路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504 路电(021)73187

编者的话

城市轨道交通列车运行自动控制系统,是确保列车运行安全、提高行车效率的重要设备。它采用传统又新型的控制技术,传统在其控制的理念:必须满足“故障导向安全”的原则;新型在其采用了最先进的计算机信息技术。城市轨道交通的“车载信号”,替代了传统的“地面信号”;“车载信号”内容,是列车运行的目标距离或目标速度;列车由车载计算机直接控制,实现列车的自动运行、超速防护和车站的程序对位停车。尤其是基于无线通信技术的列车运行自动控制(CBTC)系统,为进一步缩短行车间隔,实现列车自动运行创造了条件。城市轨道交通信号系统是一个“闭环”的自动控制系统,还需要与运营管理、线路、车辆控制、供电、驾驶等专业紧密配合,完成列车运营安全控制和调整、超速防护的重要使命。

城市轨道交通高等院校,随着城市轨道交通的发展应运而生;不少高校也设置了“轨道交通信号与控制”专业。“列车运行自动控制技术”是该学科的主干课程,也是相关专业的必修课程。城市轨道交通的超常规发展,信号系统由原来的“联锁、闭塞”系统,发展为“列车运行自动控制系统”。为此,笔者在早些年就编写了“列车运行自动控制技术”讲义;之所以迟至今日才完成教材的编写,主要原因是“CBTC系统”直到近年才正式投入运营;笔者也要学习、理解,才能充实和完善讲义的内容,所以本书是“学”和“教”的实践积累;笔者也曾参与城市轨道交通相关事故的调查,理论联系实际是本书的特色。

在本书的编写过程中,得到上海申通地铁集团有限公司和信号系统供应商提供的资料和指导,在此表示衷心地感谢;同时要感谢上海轨道交通培训中心的黄浩强老师为本书校对做出的贡献;另外,还要感谢轨道交通相关院校的老师 and 同学,他们对讲义提出了很好的建议,为本书的出版打下了基础。

本书适用于“信号与控制”专业教学用书;也可作为城市轨道交通运营管理和其他相关专业教学参考用书。

城市轨道交通信号系统在不断发展,对其的认识和理解都会有一个过程,本书的阐述和分析有不妥之处,敬请指正!

编者

2013年4月于上海

目 录

第 1 章 城市轨道交通列车运行自动控制系统概述	1
1.1 城市轨道交通信号系统的作用和特点	1
1.2 城市轨道交通列车运行自动控制系统的发展	7
1.3 城市轨道交通列车运行自动控制系统基本架构.....	13
第 2 章 列车运行自动控制技术基础	16
2.1 列车运行自动控制系统基础.....	16
2.2 信号系统“故障导向安全”技术.....	20
2.3 信号安全评估系统.....	25
2.4 列车运行间隔的控制技术.....	28
2.5 列车运行进路控制技术(联锁).....	34
2.6 城市轨道交通列车定位技术.....	40
2.7 车—地通信技术.....	46
2.8 数据传输技术.....	50
第 3 章 基于轨道电路的列车运行自动控制系统	60
3.1 列车运行自动控制系统的结构和基本功能.....	61
3.2 ATC 系统的控制模式	64
3.3 不同结构的 ATC 系统	71
3.4 列车自动监控 ATS 子系统	74
3.5 列车自动防护(ATP)子系统	97
3.6 车载 ATC 设备与列车自动运行 ATO 子系统.....	169
第 4 章 基于通信的列车运行自动控制系统(CBTC)	193
4.1 CBTC 系统概述	194
4.2 基于无线通信(Radio)的 CBTC 系统之一	205
4.3 基于无线通信的 CBTC 系统之二(无人驾驶的 CBTC 系统).....	272
4.4 基于交叉感应环线通信的移动闭塞系统	309
参考文献	321

第 1 章 城市轨道交通列车运行 自动控制系统概述

城市轨道交通与其他交通工具相比,具有运量大、速度快、能耗低、污染少、安全可靠、舒适性好、占地面积少等优势,随着城市规模的扩大,在建设资金允许的情况下,城市轨道交通已经成为国内外城市解决城市交通问题的首选方案。

城市轨道交通以列车为移动设备、以线路、车站、停车场等固定设备为基础,以车站为运输基地,实现旅客运输的庞大系统。城市轨道交通技术专业涵盖铁道工程、桥隧、车辆机电、计算机控制、供电、通信、信号、运营管理等许多领域。列车运行采用集中调度、统一指挥的控制原则,行车组织按预先编制的行车时刻表自动控制。围绕行车组织和运营服务就形成了既各自独立又相互联系的多个专业。这些不同性质的专业在功能实现方面,除了需要确保本专业系统的可靠运行外,更需要各专业间的相互合作、密切配合,才能确保安全运行目标的实现。在这个大系统中,除了有基本的设备管理和维护系统之外,必须有一套行车组织系统,制定满足乘客运营需求的行车计划,组织列车运行。这样一套运行指挥系统,就是城市轨道交通列车运行自动控制系统,简称为城市轨道交通信号系统。本书主要阐述的是城市轨道交通的信号系统,对铁路的信号系统基本不涉及。

1.1 城市轨道交通信号系统的作用和特点

信号系统是城市轨道交通保证列车运行和乘客的安全、实现快速、高密度、有序运行的最重要系统之一。它能够在保障列车运行安全的前提下,满足运营性能的要求。传统的信号系统,是通过设置在地面的色灯信号机传递不同的行车命令,司机根据地面信号的显示,按照行车规则,操纵列车运行。随着科学技术的发展,特别是微电子技术、计算机、通信、控制技术的发展,传统依赖于司机保证行车安全的信号控制技术,已经逐渐被先进的列车运行自动控制系统所取代,信号系统成为保证列车运行安全、高效、改善运营管理、提高服务水平的重要系统。

列车运行自动控制系统以列车速度自动控制为核心,满足城市轨道交通行车高密度、高安全的要求。列车运行自动控制系统已成为城市轨道交通运行控制的共同选择。目前在城市轨道交通中,应用先进的城市轨道交通列车运行自动控制技术,最小行车间隔已缩短至 90 s 以下。采用先进的城市轨道交通列车运行自动控制 ATC

(Automatic Train Control)技术,将极大地提高行车的安全性,使得司机忽视信号显示、违章作业等人为因素以及由于设备故障而造成的事故概率大大降低。

列车运行自动控制系统设有列车运行控制中心,列车运行控制中心的计算机和列车车载计算机之间建立起了可靠、有效的通信通道。因此,列车运行的信息,如车次号、速度、位置等,都可以经通信骨干网,向控制中心发送,在控制中心内可将整条线路上每列车的实时状态,显示在行车调度人员面前。与此信息流向相反,列车运行自动控制需要的信息,如线路状态、前方列车的位置或前方停车点的位置等,也通过车—地通信通道,发送给列车车载计算机,车载计算机计算出实时的最佳速度,并显示在驾驶台上,列车自动地按照计算的速度运行,使列车运行处于最佳状态,列车运输效率得到最充分的发挥。此外,列车运行控制技术还可以避免不必要的突然减速和加速,这不仅可提高行车的稳定性,对节能也具有重要的作用。

随着通信技术的发展,特别是无线通信技术的广泛应用,基于通信技术的列车运行自动控制(CBTC-Communication Based Train Control)系统应运而生。由于无线通信可以实现大信息量的车—地双向通信,除了满足列车控制的需要外,还可以满足城市轨道交通信息化的要求。CBTC系统可以实现车—地双向实时信息传输和更高的传输速率、更多的信息量。CBTC系统借助于先进的车—地无线通信技术,列车运行已摆脱对传统轨道电路的依赖,甚至可以突破数字轨道电路行车运行间隔的瓶颈,实现真正意义的移动闭塞,行车间隔大大缩短,增加系统在线控制的实时性,从而提高运能,因此可以说,CBTC系统是城市轨道交通运行控制技术的发展方向。随着信息技术的发展,信号系统与通信系统等信息化系统,正在重新整合,数字化、网络化、智能化和综合化,成为轨道交通信号系统发展的趋势。

城市轨道交通运量的增加,势必导致列车运行间隔缩小、行车速度进一步提高,信号系统与列车行车安全密不可分。

1.1.1 城市轨道交通信号系统的要求

城市轨道交通的主要运行特点是行车密度高、站间距离短,以及行车间隔时间短。目前载客高峰期的行车间隔最小可达90 s,甚至更小。如此短暂的行车间隔对城市轨道交通信号系统的自动化程度,提出了较高的要求。

1. 高安全性和高可靠性

城市轨道交通尤其是地铁隧道空间小,行车密度大,故障排除难度大,若发生事故难以救援,损失将非常严重,所以对行车安全的保证,即信号系统必须要求高安全性和高可靠性。在城市轨道交通的信号系统中,功能被划分为“安全相关”和“非安全相关”两大类。实现“安全相关”类功能的设备,必须严格按照“故障—安全”原则设计,普遍采用硬件或软件冗余及安全编码技术,并且具有自检功能;对软

件的安全性也要进行严格的测试。

2. 自动化程度高

城市轨道交通的行车间隔非常短,所以必须采取高度自动化的手段,来保证列车安全准点运行。目前的城市轨道交通信号系统可以实现列车自动运行,即列车进路的排列,列车的启动、加速、惰行、制动,开闭车门,以及终点的折返等自动功能。这既可最大限度地提高效率,防止人为因素造成的事故与贻误,又可实现最大限度上的平稳和节能驾驶。另外,城市轨道交通列车密度大,行车工作十分频繁,而且地下部分环境潮湿,空气不佳,没有阳光,工作条件差,所以要尽量采用自动化程度高的先进装备,以减少工作人员,并减轻他们的劳动强度。

3. 高效率

为了保证高效率的行车组织,现代的城市轨道交通信号系统中都包括列车自动监控系统,实现运行管理及调度指挥自动化。该系统不仅能使运行人员在控制中心内,方便地监视整条线路的列车运行状况,而且在运行计划一旦偏离正常情况时,能及时地进行纠正和控制。城市轨道交通一般不设站线,这样列车正常运行的顺序是固定的,有利于实现行车调度自动化。

4. 正线车站的联锁设备相对简单

城市轨道交通正线车站多数为无岔站,而且有岔站的道岔数量少;又因为采用了以车一地通信为基础的超速防护子系统,所以可不设进、出站信号机,从而使联锁设备的控制对象减少,联锁条件也变得较为简单。目前的城市轨道交通信号系统中,通常四、五个车站设置一套联锁设备,而且将联锁控制与 ATP 子系统的功能相融合,技术要求更高。城市轨道交通车辆段的线路较多、道岔较多、信号设备远多于正线车站,通常独立采用一套计算机联锁装置。

5. 强的抗干扰能力

城市轨道交通车辆采用直流电力牵引,要求信号设备对牵引电流及其他机电设备的电磁干扰,具有抗电气干扰和电磁兼容的能力。

6. 服务功能

为了缩短停站时分、实现车门和屏蔽门的协调联动,要求城市轨道交通信号系统确保列车在车站能够对位停车,一般停车精度的误差控制在 25~50 cm 左右。为了改善服务质量,在每个站台上、每个车厢内,都应设置醒目的导乘信息系统。

1.1.2 城市轨道交通信号系统的作用主要是:

1. 确保列车运行的安全

城市轨道交通信号系统是指挥列车安全运行的关键设备,只有在列车运行前方的轨道区段没有列车占用(列车进路空闲)、道岔位置正确、敌对或相抵触的信号

没有建立等条件满足,才允许向列车发出允许列车前行的信号,所以列车只要严格按照信号的显示运行,就能够确保列车的安全运行;反之,如果列车不遵循信号的显示运行(违章运行),将导致事故。在城市轨道交通运输中,确保乘客的旅途安全,比什么都重要。所以信号系统,担负着确保列车运行安全的重要使命,有了信号系统的保障,可以杜绝和减少列车运行事故、降低事故等级、缩小事故损失。

2. 提高城市轨道交通的运行效率

信号设备在城市轨道交通建设中的投资尽管很少,但是对于提高行车效率起着极其重要的作用。

在铁路建设中,用于通信、信号的投资不到总投资的5%,但其效益占铁路运输总效益的25%以上。在城市轨道交通中,采用了先进的列车运行自动控制系统,系统根据设定的列车运行时刻表,自动控制列车安全运行速度、列车停站时分和自动折返。使列车的行车间隔大大缩短,可以达到1.5至2min的最小运行间隔。反之,如果信号系统失灵,或信号停用,将导致列车自动行车指挥系统处于瘫痪状态,只能靠“人工”指挥列车运行,靠运营人员(调度员、行车值班员和驾驶员)配合,确保行车安全;这不仅增加了运营人员的劳动强度,还导致行车效率降低,稍有不慎还会发生象上海轨道交通10号线的列车追尾事故(2011年9月27日),行车安全难以保证,

3. 信号系统是城市轨道交通现代化信息技术综合应用的集中体现

我国城市轨道交通信号系统中,已经普遍采用基于计算机实时控制的列车运行自动控制(ATC)系统,该系统由列车自动监控(ATS)子系统、列车自动防护(ATP)子系统、列车自动运行(ATO)子系统组成。列车运行自动控制系统是自动控制技术、计算机技术和数据通信技术在信号系统中的集中体现,也可以说是现代化信息技术在城市轨道交通信号系统的综合应用。

世界信息技术的最新成果迅速地在城市轨道交通信号系统中得到应用,我国城市轨道交通(地铁、轻轨等)在近20年来得到迅速发展,原来设置于轨旁的“地面信号”,完全由“车载信号”所替代,其“信号”的内容,已发生根本性的变化,它不再是用“颜色”显示不同的速度等级,而由车载信号直接接收列车运行的“目标速度”、“目标距离”或“进路地图”,并且由车载计算机,直接控制列车的自动运行,实现列车在车站的程序对位停车和自动超速防护;随着数字编码技术的不断发展,模拟技术的信号系统已被数字信号系统所替代,这一点在信号系统的“轨道电路”技术发展中尤为突出,模拟轨道电路中,只能向列车传送有限的“固定信息”,而利用数字编码轨道电路,可以向列车传送各种不同的“变量”,以实现列车运行的自动控制。

尤其是近几年,随着信息技术、光纤传输通信技术和无线通信技术的不断发展,信号系统产生了“革命性”的变化。基于无线通信的列车自动控制(CBTC)系

统,也已经在国内多个城市轨道交通信号系统中采用,为信号系统中废除传统的“轨道电路”和“地面信号”,为进一步缩短行车间隔,真正实现“无人驾驶”的列车自动运行,奠定了基础。随着科学技术的进步,城市轨道交通信号系统的功能,总是以确保行车安全为中心,而不断地丰富和深入发展。

1.1.3 城市轨道交通信号系统的特点

城市轨道交通的信号系统是保证列车运行安全和提高线路通过能力的重要设施,城市轨道交通的信号系统是在继承铁路信号系统的基础上发展,其技术含量和自动化程度更高,传统的铁路信号系统采用独立的联锁系统、闭塞系统和调度集中系统,已不能适应城市轨道交通的需求,所以必须用一种能实现列车运行自动控制、列车运行间隔自动防护和调整的新系统来代替,这就是列车运行自动控制系统(ATC-Automatic Train Control)。

城市轨道交通信号系统的特点,主要反映在以下几个方面:

1. 正线有岔站设置地面信号机

由于城市轨道交通的大多数车站仅有上、下客的功能,在大多数车站不设置站线、也不设置道岔,所以也不设置地面信号机。只有在终端折返站、中间折返站以及少数设有存车线的车站,才设置道岔及相应的防护信号机,相应地设置联锁设备,所以一般有岔站除了控制本站的信号设备外,还控制附近相邻2~3个无岔站的信号设备,例如:紧急停车按钮和发车指示灯等。由于这些联锁设备的监控对象相对较少,所以有的ATC系统,只在控制中心设置一个计算机联锁系统,实现全线车站的联锁功能;当然停车场必须独立地设置计算机联锁系统。

这里必须指出的是,CBTC系统本身不需要设置地面信号机,但是由于考虑到万一CBTC系统的某一个或几个区域控制器故障(宕机),导致“通信列车”失去通信,而成为“非通信列车”,为了确保这些列车的运行安全,所以CBTC系统,大多数都设置了类似“固定闭塞”的后备模式。后备模式中列车占用轨道区段的检测,基本上都采用计轴器;并在车站的出口处设置出站信号机,区间的轨道区段分割点,设置通过信号机,区间内通过信号机的设置数量,可以根据区间长度和列车运行密度而调整。信号机的显示信息以及运行前方的速度、距离等条件信息,通过设置于轨间的有源传感器传送至列车。有的供应商将这种后备模式,称为轨旁信号防护(WSP)模式。其实这种方式类似于点式ATC系统,它不仅有ATP防护功能,也可以实现ATO自动运行功能。

2. 正线的正向信号及折返信号都设置成自动信号

由于城市轨道交通每天承担巨大的客流量,因此要求较短的列车运行间隔,并对信号系统的列车运行速度的监控提出了极高的要求,以确保列车运行安全。城

市轨道交通的站间距离一般为 1 km, 相对较短, 而且列车的编组基本相同, 列车行车时刻表的规律性很强, 按工作日和节假日不同时间段的行车时刻表运行。所以城市轨道交通的信号系统, 按时刻表编制的程序, 具有进路自动排列功能; 当然, 控制中心和联锁集中站(有岔站)在必要的时候, 都可以人工介入, 排列进路。

城市轨道交通正线信号由 ATC 系统控制, 有岔站的地面信号机, 平时都设置成自动信号或连续通过信号; 也就是说, 这些信号机所建立的防护进路, 是根据列车运行目的地和列车接近而自动触发, 建立与列车运行目的地相一致的进路, 锁闭相应的道岔以后, 开放信号, 列车进入信号机内方, 信号机自动关闭; 待列车通过进路后, 进路自动解锁。当然这些自动信号在特殊情况下也可以人工介入, 控制这些信号。

停车场的信号机, 是由信号楼值班员控制。出、入库信号机, 分别由停车场信号楼和相邻的正线车站值班员控制; 停车场的信号显示方式与铁路的停车场基本相同。基于城市轨道交通的特殊性, 停车库内的停车线, 可以不设置终端信号机。

正线联锁集中站的地面信号机都是矮柱信号机, 其红灯显示, 指示列车必须在信号机前停车; 绿灯显示, 表示进路中道岔开通定位状态(一般指开通直股), 指示列车可以越过信号机; 白灯(或黄灯)显示, 表示进路中道岔开通反位状态(一般指开通弯股), 指示列车可以越过信号机; 指引列车驶入站台的信号机, 一般可以设置为引导信号, 当开放允许信号的条件不能满足时, 可以开放引导信号, 其红灯+白灯显示, 指示列车可以低速进入站台区域。有的城市开放引导信号时, 显示红灯+黄灯, 这只要一个城市都统一定义就可以了。

3. 车载信号为主体信号

城市轨道交通正线区间一般不设置地面信号, 有岔站为了防护列车运行进路, 所以在道岔区域设置地面信号机; 而且这些信号机平时都由 ATC 系统控制自动动作; 只有在人工驾驶的情况下, 驾驶员根据这些信号机的指示运行。

铁路信号系统多数还是将地面信号作为主体信号, 司机根据地面信号显示, 操纵列车运行, 车载信号作为辅助信号, 可以发出列车超速警告。城市轨道交通的 ATC 系统, 取消了传统的地面信号, 将车载信号作为主体信号, 信号的含义也发生了质的变化, 车载信号的内容由指示列车运行的“速度信息”, 发展为“距离信息”, 进而发展为“进路地图信息”。列车根据地面传送的这些“速度信息”、“距离信息”或“进路地图信息”, 自动地控制列车的运行。当列车超过上述信息的限制, 列车会自动进行超速防护, 确保列车运行安全。

另外, 城市轨道交通信号系统, 向列车传递信息的方式, 由“轨道电路”发展为“无线传输”; 实现了车一地之间的不间断双向通信。驾驶模式也可以由“ATO 自动运行”, 发展为“无人驾驶”系统; 当然无人驾驶的 ATC 系统有很多特殊的性能,

在后文中会加以阐述。

1.2 城市轨道交通列车运行 自动控制系统的发展

从城市轨道交通的发展历史来看,为了确保行车安全,信号系统从传统到现代经过几次大的变革。按时间顺序来看,二十世纪六十年代和二十世纪九十年代是信号系统大发展的两个重要拐点。

1.2.1 20世纪60年代以前

1863年,世界上第一条地铁诞生在英国首都伦敦,信号设备最早为臂板式信号机。臂板式信号机是1841年英国人戈里高利提出的,他用长方形臂板作为信号显示,首次使用装设在铁路伦敦桥车站。1879年,爱迪生发明电灯,随着电灯的普及,臂板式信号机进化为色灯信号机。色灯信号一般有红、绿、黄3色,分别表示列车通过、停车、慢行。在地铁中,司机观测色灯信号机更为方便。

20世纪早期,模拟轨道电路最早在伦敦地铁上使用,轨道在物理上划分成适当长度的闭塞分区,其长度根据在最不利情况(最大速度、最大负荷、最不利制动率、最大列车长度等)下的安全制动距离来决定,列车间隔距离至少为一个闭塞分区,轨道电路用来检测列车位置并指导下一趟列车的运行。城市轨道交通信号系统中的车载信号,是建立在地面轨道电路基础上的,它装在机车司机室内,解决了司机瞭望条件不良,以及列车高速运行时,地面显示距离不能满足紧急刹车要求的问题,这样就避免了单纯依赖地面信号而造成的行车危险。

20世纪60年代,基于模拟轨道电路的自动闭塞装置出现,它将原来车站间的一个闭塞区间,划分为若干个与列车制动距离有关的较短的闭塞分区,从而使两个车站之间的运行区间可以开行多列列车,大大提高了线路的通过能力。随着自动闭塞装置在城市轨道交通中的应用,自动停车装置也相应在城市轨道交通中得到应用。

1.2.2 20世纪60年代到90年代

20世纪60年代,随着工业化程度的提高,世界城市人口急剧膨胀,从而对城市轨道交通的载客能力和安全性提出了更高的要求。此时,计算机技术的飞速发展也为发展列车速度自动控制提供了技术基础。于是,依靠人工控制车速的传统运行方式,被以列车速度自动控制为核心的列车运行自动控制系统ATC(Automatic Train Control)所取代。1968年,世界上第一条具有ATC系统的线路—英

国伦敦维多利亚线投入运营。

20 世纪 70 年代后,世界上一些著名的信号公司,相继推出基于数字轨道电路的 ATC 系统,使城市轨道交通的通过能力和安全性大大提高。此间,ATC 的核心技术—列车定位和车—地信息通信技术不断完善,继轨道电路之后,出现了应答器、轨间环线电缆等。不同的 ATC 系统,根据车—地通信是否连续,ATC 系统分为点式 ATC 和连续式 ATC 系统。目前各国正在运营的地铁线路中,基于数字轨道电路的准移动闭塞制式占大多数。作为准移动闭塞 ATC 系统的基础,数字轨道电路正朝着双向信息传输和更高的传输速率、更多的信息量方向发展。

1.2.3 20 世纪 90 年代

20 世纪 90 年代起,为了进一步缩短列车运行间隔,提高运营安全性,减少系统的安装和维护费用,各大信号公司开始研究新一代 ATC。20 世纪 90 年代以来,随着计算机技术和无线通信技术的快速发展,以移动闭塞为技术特征的 CBTC 系统,受到了日益广泛的重视。CBTC 列车定位和车—地交换信息不再依赖于轨道电路,其列车定位精度更高,车地间通信采用双向、大容量、无线方式。

1999 年 9 月,IEEE 为 CBTC 制定了第一个标准,将 CBTC 定义为:

“不依赖于轨道电路的高精度的列车定位,双向连续、大容量的车—地数据通信和车载、地面安全功能处理器来实现列车连续自动控制的系统”。

CBTC 作为移动闭塞系统,与准移动闭塞相比,有更多优势。CBTC 系统采用无线通信技术,实现列车和地面控制设备之间的双向通信,构成闭环控制系统,使列车运行的安全性大大提高,并方便互联互通。作为移动闭塞制式,CBTC 可缩短列车运行间隔,提高行车效率,维护工作量小,是城市轨道交通列车运行自动控制技术的发展趋势。目前,CBTC 系统传输方式有基于空间波、波导管、交叉感应环线的系统。

在城市轨道交通信号系统发展的各个阶段,世界上一些著名的信号公司的产品一直代表了当时国际信号最高水平。下面对这些大公司及其产品作一个简单的介绍。

SIEMENS 公司,开发的点式 ATC 系统,已应用于上海轨道交通 5 号线;开发的准移动闭塞 ATC 系统,已应用于广州地铁 1、2 号线,深圳地铁 1、4 号线和南京地铁 1 号线;开发的移动闭塞 CBTC 系统,已应用于北京轨道交通 10 号线等。

ALSTOM 公司,开发的准移动闭塞 ATC 系统,应用于上海轨道交通 3、4 号线;开发的移动闭塞 CBTC,已应用于上海轨道交通 10 号线。

ALCATEL 公司,开发的移动闭塞 CBTC,已应用于上海轨道交通 6、7、8、9、11 号线,武汉轨道交通 1 号线和广州地铁 3 号线。

其他的世界著名信号公司还有英国 West House(西屋公司)和美国 US&S 公司等,如美国 US&S 公司开发有准移动闭塞 ATC 系统,应用于上海地铁 2 号线。

国外城市轨道交通 ATC 发展过程中,形成了一些著名的技术规范。1996 年,欧洲制定了“欧洲铁路列车控制系统”ETCS(European Train Control System)的技术规范;在 ETCS 规范中,对列车速度自动控制系统规定了 3 个发展等级:一级水平,仍以传统信号设备为主,车载设备必须装备有接收天线、数据处理单元以及和机车制动器相连的接口,地面必须设置多显示色灯信号机。二级水平,区间仍划分为固定的闭塞分区,采用轨间电缆或音频轨道电路,或全无线方式实现连续列车速度自动监控,使用欧洲应答器用于列车定位,车载设备要有完善的显示和记录设备,即实现车载信号主体化,是否保留地面信号机可作为选择项。三级水平,即当前最高级,主要特点如下:连续式列车速度监控,信息通道可借助于轨间电缆或借助于 GSM 或 GSM-R,即可以有线或无线,取消固定闭塞分区及信号机、区间轨道电路,但可保留车站轨道电路为联锁提供必要的条件,实现从制动距离出发的列车间隔控制,即移动闭塞。列车使用欧洲应答器自行定位,列车的位置,由列车传至区间侧的无线闭塞中心,并由它传至后续列车。车载设备要有完善的数字式车载信号及运行记录装置,并装备“列车完整性检测”装置。

1.2.4 国内城市轨道交通 ATC 系统的发展

我国城市轨道交通信号系统是随着北京地铁的兴建而起步的。我国第一条北京地铁,于 1971 年通车。根据当时国情,北京地铁采用的信号系统,由国内自主研发。该信号系统通过继电联锁、自动闭塞、调度集中等技术,实现行车集中调度、集中监控和列车运行自动化。整个系统的研制接近当时的国际水平,但由于当时的条件,调度集中和自动驾驶都没有使用。

进入 20 世纪 90 年代,随着我国改革开放的深入,经济得到迅速发展,城市人口膨胀,掀起了建设城市轨道交通的热潮。而在这种情况下,我国城市轨道交通信号技术储备不足,因此开始引进国外先进的城市轨道交通信号设备。北京、上海、广州、深圳等城市轨道交通项目的信号系统,先后采用了英国西屋公司、美国 GRS 公司、德国西门子公司、美国 US&S 公司、法国阿尔斯通公司和泰雷兹公司等各具特色的信号系统。

国内早期的 ATC 系统,采用模拟式无绝缘轨道电路为基础的 ATP 子系统,它是模拟信号时代一种先进的制式。上海城市轨道交通 1 号线 ATC 系统就是这种制式的典型。它根据闭塞设计,将线路划分成不同长度的轨道区段(闭塞分区),每个轨道区段设置一个无绝缘轨道电路。平时在轨道电路中传送用于检测列车的

模拟检测信号,以检测列车是否占用该轨道区段;当检测到列车占用该轨道区段时,利用轨道电路,向列车发送速度命令等模拟信号。由于这种制式的 ATC 系统只向列车传送“速度命令”,告知列车离开该轨道区段的“出口速度”,在城市轨道交通闭塞系统的分类中,将其归类为“速度码”制式的 ATC 系统。

随着数字信号时代的到来,ATC 系统采用了数字轨道电路,可以向列车传送更多的行车信息。如上海 2 号线利用音频数字轨道电路,向列车传送速度和距离信息,再由车载设备结合固定的车辆性能数据,计算出适合于列车运行的目标距离速度模式曲线(最终形成一段曲线控制方式),保证列车在目标距离速度模式曲线下安全运行;而且列车对位停车以后,地面只向列车传送“开门”信息,而不像模拟信号必须送出“开左门”“开右门”的具体信息,开哪一侧的车门,列车根据轨道区段的编码,来判断是“岛式站台”还是“侧式站台”,由列车决定开哪一侧的车门。上海 3、4 号线利用更为先进的报文式数字轨道电路,向列车传送“进路地图”信息,这种控制方式,虽然还需要借助于信号设备划分固定的闭塞分区,但是由于列车所得到行车信息更多,因此已经朝着移动闭塞方式迈出了一大步。

由于列车精确定位以及车地之间实时双向通信的实现,城市轨道交通列车运行自动控制,进入了基于通信的列车运行控制系统(CBTC)时代,该控制系统支持移动闭塞制式。在 CBTC 系统控制之下,列车进行精确定位,并通过通信媒介,将自身的精确位置报告给控制中心和区域控制器,由区域控制器根据前方障碍物的位置,计算出每列车的“移动授权极限”,并通过无线通信实时告知列车,进而控制列车之间保持最小的安全间隔运行。

1.2.5 ATC 系统的选择和国产化

我国近年来城市轨道交通建设快速发展,选择信号系统时应根据城市实际情况,满足运行间隔要求,选择技术先进、成熟的系统,一味地追求技术先进思路不可取。对应于我国特大城市、大城市和中等规模城市,相应的城市轨道交通运量大致分为高密度、中密度、低密度。根据列车运行间隔等级,可选择不同的信号系统技术方案。

高密度线路,运行间隔小于 2 min,必须选择全套的 ATS、ATP、ATO 子系统,包括高性能的联锁设备。性能先进的 ATS 系统,负责行车调度、管理;站内应安装发车显示器、车辆自动识别及乘客导向装置。ATP 子系统选择基于数字轨道电路的准移动闭塞或移动闭塞。ATO 子系统是必需的,虽然成本会有一定提高,但可以明显提高运行密度,同时带来节能、舒适、安全等辅助效果。

中密度线路,运行间隔 2~3 min,选择完善的 ATS、ATP 子系统,包括联锁设备,ATO 子系统备选。ATP 子系统可以选择基于轨道电路的准移动闭塞系统。

低密度线路,运行间隔 4 min 以上,只选用 ATS、ATP 子系统,包括联锁设备。ATP 子系统作为安全设备,是必需的。可采用基于轨道电路的准移动闭塞或点式 ATP 子系统。可以不予考虑 ATO 子系统,在低密度的线路上采用 ATO 子系统,其性能价格比很低。

ATC 系统的引进,缩小了我国地铁信号装配水平和国外的差距,取得了较好的效果。但引进国外设备的同时带来诸多问题,例如:造价昂贵,耗资巨大;返修渠道不畅,维修成本太大,备品备件得不到保证;制式混杂,给网络的扩展和管理带来极大的困难。照此发展下去,必将严重影响我国城市轨道交通的发展,所以信号系统必须走国产化的道路。信号系统的国产化可以通过“引进—消化—吸收—创新”的方式,使这项工作的起点平台与国际水平相一致。

如果选定“准移动闭塞”作为基本制式,那么国产化的主要内容包括:安全型计算机的故障—安全操作系统;数字轨道电路的发送与接收环节;车载 ATP 设备;ATS 子系统,包括运行控制中心的设备配置,列车运行信息的采集、传输及显示,列车运行图的生成及管理,列车运行仿真系统等;ATO 子系统,包括列车运行速度曲线的生成、定点定位停车等。如果选定无线移动闭塞 CBTC 作为基本制式,则国产化的主要内容除了上述内容外,还要增加以下内容:制定技术规范;确定数据通信系统 DCS 的总体结构,确定所采用的信号调制方式,确定 DCS 与地面设备及车载设备的标准接口等;无线信号的发射、连接及接收设备;开放式传输系统的密钥技术,安全防护技术;信源码及信道码的生成和解码技术。

1.2.6 ATC 系统和“互联互通”运营的借鉴

近 10 年来,我国城市轨道交通发展迅速,我国特大城市北京、上海、广州等已经拥有多条城市轨道交通线路,由于制式不同,不能实现多条线路的互联互通与联合维护。

发达国家的一些大城市,如纽约、旧金山、巴黎等,其轨道交通信号系统大多经历了一个多世纪的发展历程,也呈现出多种制式并存的状态,既有 19 世纪末的机械装置,也有 20 世纪末的微电子技术。为了改变这种局面,国外这些城市的交通主管部门都致力于以实现互联互通为目标的信号系统改造。纽约、巴黎的这种改造工作正在进行之中,而由休斯公司参与的旧金山海湾地区轨道交通 BART(Bay Area Rapid Transit)信号系统的改造取得成功;BART 信号系统改造所采用的是基于无线的列车控制 RCBTC(Radio Communication Based Train Control)技术,可以实现互联互通的功能。近年来,人们对用 RCBTC 技术改造原有信号系统的兴趣日益增加。经改造后的 RCBTC 系统,如图 1.1 所示:在原来点式 ATC 系统的基础上安装区域控制器与联锁接口;安装轨旁光纤网和轨旁无线设备,为现行的

控制中心提供网络接口;安装车载网络和无线设备,并为现行的车载控制器提供网络接口。该系统具有分布式结构,它是以列车为中心的系统。

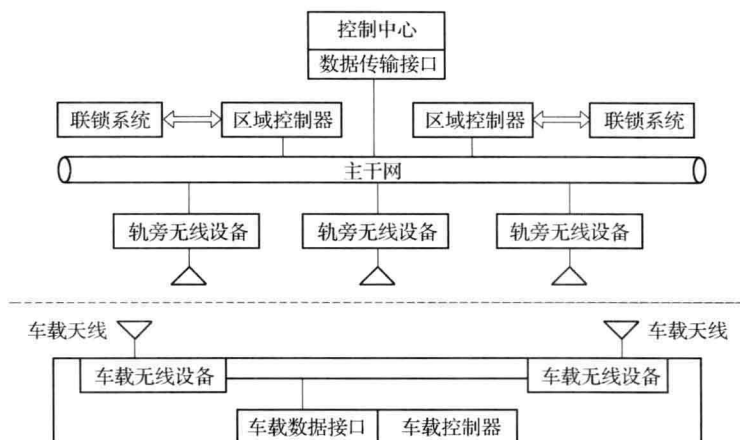


图 1.1 RCBTC 系统布局与结构

在原来基于轨道电路的 ATC 系统中,可分别对轨旁设备和车载设备进行改造。

对轨旁设备的改造,如图 1.2 所示,将区域控制器安装在轨旁,现行系统提供轨道占用状态和道岔位置,区域控制器在区域内与任一列 CBTC 列车通信,并视其他未装配 CBTC 车载设备的列车,为非通信列车。CBTC 列车的定位报告作为列车跟踪的依据,允许在一个数字轨道区段上,运行两列 CBTC 列车,但是对于尾随一列非通信列车的 CBTC 列车,要求其服从现行的轨道区段固定闭塞规则。

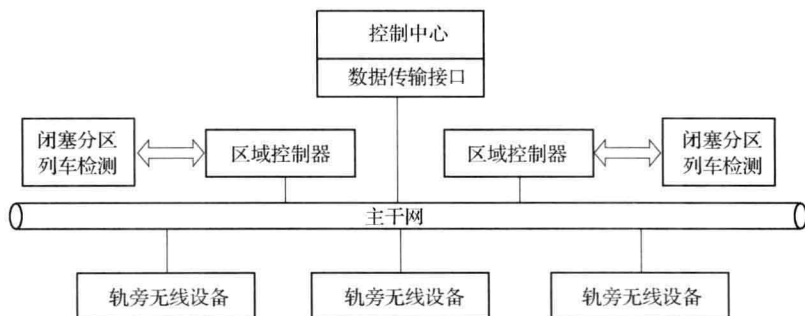


图 1.2 轨旁设备的改造框图

对车载设备的改造。在列车上安装一套 CBTC 车载控制器,包括所有外围设备,即车载无线设备、车速传感器、车载应答器。驾驶员可以转换运行 CBTC 车载控制器和数字编码轨道电路车载控制器。从而在一个采用数字编码轨道电路的系