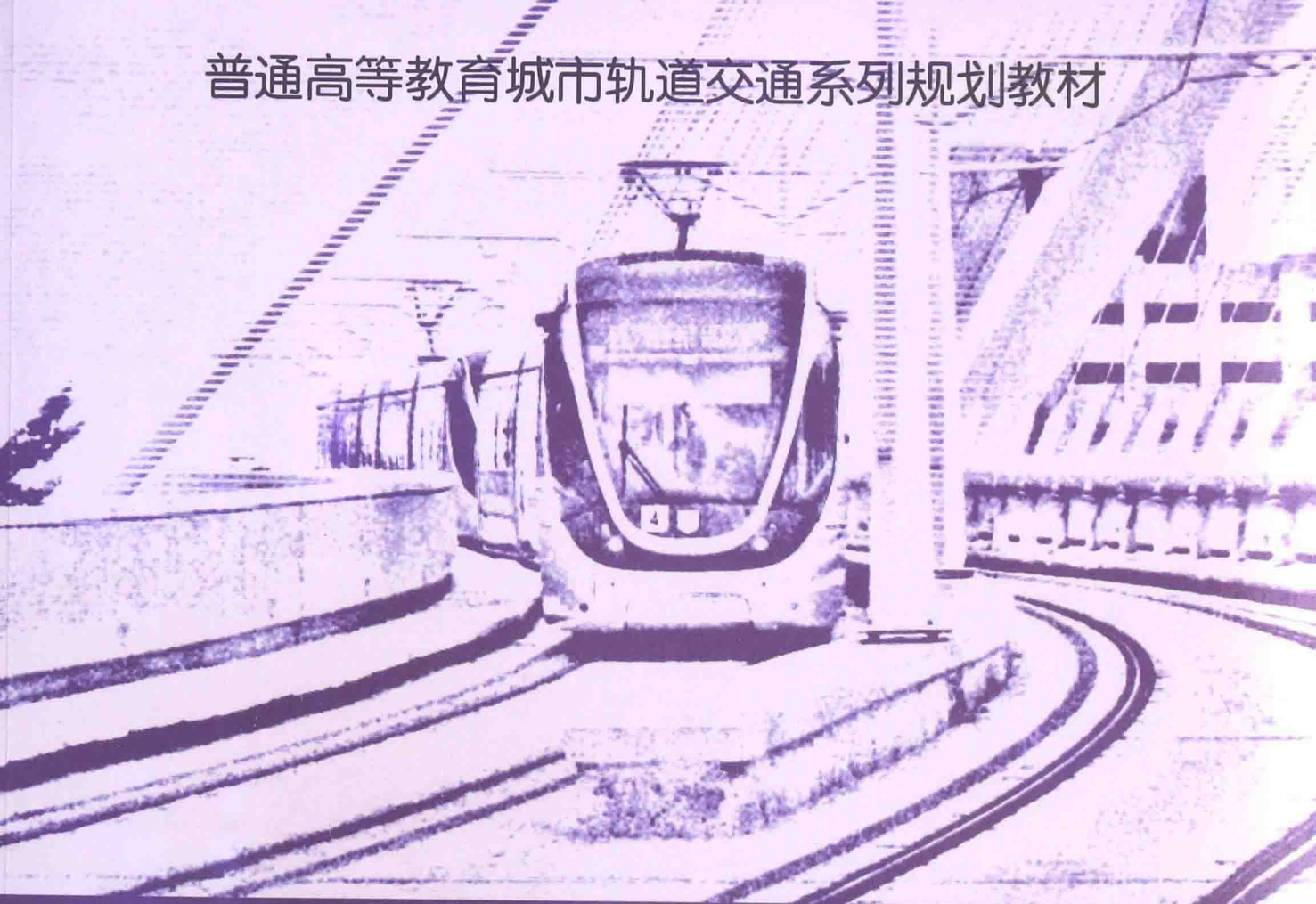


普通高等教育城市轨道交通系列规划教材



轨道交通列车运行控制技术

Control Technologies of Train Operation

主 编 彭宏勤 尹相勇

主 审 毛保华



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

普通高等教育城市轨道交通系列规划教材

轨道交通列车运行控制技术

Control Technologies of Train Operation

主 编 彭宏勤 尹相勇

主 审 毛保华



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书根据轨道交通列车运行控制技术的发展现状,结合轨道交通专业人才的培养需求,介绍了当前我国轨道交通列车运行控制技术的基本原理和应用情况。全书共分9章,内容包括:列车运行控制技术发展概况、列车运行图和通过能力、行车调度指挥、列车自动控制(ATC)系统原理、地-车信息传输技术和列车定位技术、信号基础设施、区间行车控制、车站信号控制系统与机车信号、CTCS列控系统。

本书可供轨道交通相关专业的本科生和研究生学习使用,也可供轨道交通有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

轨道交通列车运行控制技术 / 彭宏勤,尹相勇主编. —
北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.8

ISBN 978-7-114-11521-9

I. ①轨… II. ①彭…②尹… III. ①轨道交通—列
车—运行—控制系统 IV. ①U284.48

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 147930 号

书 名: 轨道交通列车运行控制技术

著 作 者: 彭宏勤 尹相勇

责任编辑: 吴燕伶

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盈盛恒通印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 12

字 数: 288 千

版 次: 2014 年 8 月 第 1 版

印 次: 2014 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11521-9

定 价: 32.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

随着国民经济的持续快速发展和城市化进程的加快,我国已逐步进入了轨道交通时代。作为高效便捷、节能经济、安全环保、大运量的运输方式,轨道交通是解决城市快速发展进程中交通拥堵、环境污染等城市化问题的有效手段,也是提升沿线区域经济价值与社会价值、提高运输效率的重要举措。

列车运行控制系统是轨道交通运输系统的大脑与神经中枢。列车运行控制技术是以控制理论为基础,以实现列车安全控制、线路控制和驾驶控制为目标,融合当代先进装备技术和优化理论的系列技术。作为保证列车行车安全、提高运输效率的技术装备,列车运行控制设备也是整个轨道交通系统的关键技术装备之一。近二十年来,计算机、通信、自动化等先进技术在各领域得到广泛应用,列车运行速度和密度的不断提高也对轨道交通信号与控制设备提出了更高要求,各种先进的自动控制技术与系统不断被应用于列车运行控制系统,在列车运行全过程、实时及各种运行场景的控制中发挥了重要作用,有力地保证了列车高速、高密度运行的安全性。

本书是编者在过去四年开设的北京交通大学城市轨道交通专业(方向)重要的专业课程“轨道交通列车运行控制技术”的讲义基础上撰写的。编写中借鉴、参考了国内外大量相关文献以及国内轨道交通系统建设、运营的实际资料。在内容设计上,编者结合了我国轨道交通系统的具体国情特点,力求反映国内外列车运行控制领域中最新的理论与实践成果。本书可以作为轨道交通相关专业的本科生或类似层次专业技术培训的教材或教学参考资料,也可供从事轨道交通相关专业工程设计与技术咨询人员学习参考。

本书由彭宏勤和尹相勇主编。全书编写分工为:彭宏勤(第1、4、5、9章),尹相勇(第2、3、7、8章)、柏赞(第6章)。全书由彭宏勤统稿,毛保华主审。

本书是在北京交通大学“城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室”完成的。在编写过程中,编者得到了北京交通大学中国综合交通研究中心、北京交通大学交通运输学院城市轨道交通系各位同事的大力支持和帮助,特致感谢。编者还要特别感谢卫和君(北京全路通信信号设计研究院有限公司)、Tin-kin Ho(汕头大学)、方琪根(北京全路通信信号研究设计院有限公司线站处)、苏梅(中铁第四勘察设计院集团有限公司技术中心)、李夏苗(中南大学)、牛惠民(兰州交通大学)、蒋玉琨(北京地铁集团有限责任公司)、孙年友(广州铁路集团公司科学技术研究所)的帮助和指导。人民交通出版社陈志敏、吴燕伶,在本书出版过程中提供了许多帮助和建议,在此一并表示感谢。

编 者

2014年3月

目 录

■ 第 1 章 概述	1
1.1 列车运行控制技术与系统	1
1.2 列车运行控制技术发展历程	2
1.3 我国列车运行控制技术发展现状	5
思考题	8
■ 第 2 章 列车运行图和通过能力	9
2.1 列车运行图	9
2.2 车站间隔时间与追踪列车间隔时间	14
2.3 通过能力	18
思考题	21
■ 第 3 章 行车调度指挥	22
3.1 列车调度指挥系统	22
3.2 列车运行日常调度指挥	26
3.3 非正常情况下列车运行组织	32
3.4 行车调度分析	36
思考题	38
■ 第 4 章 列车自动控制(ATC) 系统原理	39
4.1 ATC 系统	39
4.2 ATP 系统	47
4.3 ATO 系统	53
4.4 ATS 系统	57
思考题	62
■ 第 5 章 地-车信息传输技术和列车定位技术	63
5.1 故障-安全技术	63

5.2 地-车信息传输技术	68
5.3 列车定位技术	75
思考题	87
第6章 信号基础设备	88
6.1 信号继电器	88
6.2 信号机及灯光显示	90
6.3 道岔	97
6.4 轨道电路	106
思考题	114
第7章 区间行车控制	115
7.1 区间行车概述	115
7.2 固定自动闭塞	116
7.3 移动闭塞	128
思考题	135
第8章 车站信号控制系统与机车信号	136
8.1 车站信号控制系统	136
8.2 车站计算机联锁系统	154
8.3 机车信号	160
思考题	164
第9章 CTCS 列控系统	165
9.1 CTCS 基本功能与系统构成	165
9.2 CTCS-2 级列控系统	167
9.3 CTCS-3 级列控系统	172
思考题	181
参考文献	182

◀ 第 1 章 概述

本章主要介绍列车运行控制技术与列车运行控制系统的相关概念、作用以及列车运行控制技术发展历程。列车运行控制的目标是指挥列车安全、高效地运行。随着列车速度、密度和安全要求的逐步提高,列车运行控制技术经历了地面人工信号、地面自动信号、机车信号、自动停车装置和列车自动防护系统等几个阶段,以满足不同时期不同轨道交通系统的运营和安全需求。

◀ 1.1 列车运行控制技术与系统

轨道交通运输系统是以机车、车辆或动车组为移动设备(以下简称列车),以线路(轨道、桥梁、隧道等)为固定设备,以站场(车站、编组场等)为运输生产基地,实现旅客和货物运输的庞大系统。轨道交通运输系统的安全、高效运行与国民经济和人民生活息息相关。

为满足客货运输需求,确保运输生产秩序,充分发挥运输系统生产能力,必须对线路上运行的列车实施有效的指挥和控制,保证行车安全。列车运行控制是轨道交通运营管理系统中最重要的组成部分,其主要作用是控制列车速度和运行路线,主要功能是实现安全控制、路线控制和驾驶控制。

◀ 1. 列车运行控制技术

列车运行控制技术是以控制理论为基础,以实现列车安全控制、路线控制和驾驶控制为目标,融合当代先进装备技术和优化理论的系列技术。

列车运动的驱动力源自车轮与钢轨之间的摩擦。列车因速度快、重量大的特点,决定了其制动距离较长,且一般会超出司机瞭望距离。列车在区间内不可能避让,因此需要采用一定的技术手段,确保在同一时间,不将同一资源(即轨道相同区段)分配给多列列车,以保证行车安全。此外,效率也是轨道交通运输系统应该考虑的重要因素。因此,一套可靠的行车指挥和控制系统,是指挥列车高效运行的保证。

行车指挥和控制系统的主要技术装备是信号系统。随着列车速度、密度和安全性要求的不断提高,对信号系统提出了更高的要求。计算机、通信、自动化技术等先进技术与装备的广泛应用,推动了信号系统的快速发展,使得信号系统已发展为包含调度集中、联锁设备、列车运行控制系统等在内的先进自动化控制系统,成为轨道交通运输系统的大脑和神经中枢,保证列车安全、高速、高密度运行,改善员工劳动条件。

◀ 2. 列车运行控制系统

列车运行控制系统是指由地面设备和车载设备构成,运用列车运行控制技术,用于控制列

车运行速度、保证列车安全和高效运行的控制系统,是轨道交通信号系统的重要组成部分。

列车运行控制系统根据前方行车条件,包括进路状态、轨道占用情况、线路状况以及调度命令等,为列车生成行车许可,并通过地面信号和车载信号,向司机提供安全运行的凭证。车载设备根据接收到的行车许可产生允许速度,当列车速度超过允许速度时控制列车实施制动,使列车降速甚至停车,防止发生列车超速颠覆或与前方列车追尾等事故,保证行车安全。

列车运行控制系统是一个有司机参与操作的人机系统,一般具有如下基本功能:

①向司机提供允许列车运行的信号、限制速度或目标距离等信息。

②具备自动实施速度控制,一旦列车速度超过允许速度,应实施制动控制,使列车减速甚至停车。

③防止与同一轨道运行的其他列车相撞或追尾。

④防止列车超过规定的限制速度运行,包括信号显示规定的限制速度、线路限速、车辆限速、临时限速等。

1.2 列车运行控制技术发展历程

列车运行控制技术的发展水平与经济发展程度和生产力水平紧密相关。日益增长的客货运输数量和质量需求,持续发展的电气、电子、信息及自动化技术,不断推动和促进了列车运行控制技术的发展,技术装备的系统化和自动化程度的提高。此外,列车运行控制技术也是总结事故教训的结果,是人们经验智慧的结晶。从一次次重大行车事故中,人们不断发现原有系统的安全漏洞,寻求技术手段防止人为失误,从而逐渐完善系统的功能、性能,推动列车运行控制技术不断发展,保证运行安全,提高运行效率。

列车运行控制技术的发展经历了如下几个阶段。

1. 地面人工信号

自19世纪初,世界第一条铁路在英国开始运营,就引发了如何控制列车间隔以保证行车安全的问题,从而产生了行车闭塞法。起初,线路上只有一列列车在白天来回运行,所以不必考虑列车相撞的问题。随着社会的发展,客货运量不断增长,铁路运行线路长度不断增加,车站数量和运行列车也随之增多。为防止列车相撞,于是在线路上安装各种信号设备。通过地面信号显示系统,以物体大致形状、灯光的数目和颜色等视觉信号或音响等听觉信号给司机以各种运行条件的指示,提醒司机采取相应的措施,以避免发生列车正面冲突和追尾事故。1832年,美国开始在车站上设置信号机,为站与站之间传送信息。信号机上挂有果物笼状的物体,外面包白布或黑布,吊在10m高的柱子上,这个信号叫球信号。当列车从车站发车时,发车站将白球挂在柱顶,指示列车可以出发。接车站将白球挂在柱子中间,指示列车进站停车;将白球挂在柱顶,指示列车通过;将白球挂在柱下,指示列车站外停车。若发车站将黑球挂在柱顶,则表示列车晚点。由于当时车站之间尚无通信手段,相邻车站用航海望远镜观察,通过球信号的颜色和位置向司机传送信号。从这个阶段起,信号机已经具有闭塞机的作用,只不过两站之间闭塞关系靠人工保证,而不是靠设备保证。

这个阶段,主要是依靠信号工的眼睛观测(传感器),通过人工控制的信号向司机传递行

车命令(传输),由信号工控制列车间隔。列车由司机驾驶,并负责列车的运行安全。在轨道电路出现之前,每个车站均安装此类指示信号,保证列车在调度员和司机共同负责的情况下行车,以提高行车安全性。

2. 地面自动信号

1872年,美国人鲁滨孙发明了轨道电路,利用轨道继电器的吸起和落下,检测轨道区段空闲与否,根据列车在轨道区段的占用与出清,点亮轨道旁设置的信号机,实现列车占用线路状态自动检查。利用轨道电路所检测到的列车占用轨道的状态信息,同时通过控制信号显示,实现了地面自动信号,使地面信号显示能真实反映线路空闲状态。按信号显示行车,就能够防止列车发生冲突事故。只有当线路在空闲状态时,信号开放才安全。轨道电路的发明,为轨道交通的列车自动控制,提供了最基础的地-车信息传输媒介。

这个阶段,列车的间隔调整,采用半自动闭塞或自动闭塞。半自动闭塞是人工办理闭塞手续,列车凭信号显示发车后,出站信号机自动关闭的闭塞方法。自动闭塞是根据列车运行状态及有关闭塞分区状态,自动变换信号显示,司机凭信号显示行车的闭塞方法。

地面信号显示仅仅指明列车前方线路状态,列车由司机驾驶,司机根据轨旁的信号机显示行车。信号机的显示定义带有速度含义,司机必须根据信号机的显示来控制列车。可见,行车安全几乎完全掌握在司机手中。

3. 机车信号

以地面信号显示为主的轨道交通信号系统,只是向司机提供地面视觉信号,由司机解释信号显示意义从而驾驶列车。由于地面信号显示有时受到自然环境(如雾、风沙、大雨等)的影响以及地形的限制,司机往往不能在规定的距离内,及时瞭望前方信号机的信号显示,因而有冒进信号的危险。为将列车运行前方所接近信号机的显示情况及时通告司机,机车信号设备应运而生。它将地面的视觉信号通过技术手段引入司机驾驶室,大大改善了司机瞭望条件。这样司机就能够在任何条件下从容地驾驶列车,且当前方信号为禁止信号时及时采取制动措施,提高了列车运行的效率和安全程度。

在以地面信号为主体的信号系统中,地面信号显示仍是行车凭证,机车信号只是地面信号的复示信号。

4. 自动停车装置

无论地面信号还是机车信号,都只能确保显示正确可靠,提醒司机及时采取措施,但无法防止由于司机失去警惕或操作失误而发生危及列车运行安全的事故。实际上,行车时司机有时会产生精神不集中、睡觉、操纵错误等情况。据铁道研究所(中国铁道科学研究院的前身)1957年的调查,1955年和1956年全路发生列车冒进进站信号的事故中,由于司机失去警惕而造成的事故分别占57.6%和53.4%。因此,列车自动停车装置的研制成为趋势,其功能是当地面信号的“禁止命令”未被司机接收时,自动实施紧急制动,强迫列车停车。尤其是电码轨道电路的出现,使得利用轨道电路向机车传送信息成为可能。地面轨道电路、机车信号与自动停车装置结合,构成了简单的列车运行自动控制系统。当“禁止信号”未被司机接受或未及时停车时,自动停车装置就自动实施紧急制动,强迫列车停车。这样,信号系统不再只是指明安全运行条件,列车的安全由设备和司机共同保证。在这个阶段,地面信号仍是安全行车的凭证,

机车信号只是辅助信号。

◀5. 列车自动防护系统

20 世纪 50 年代后,高速铁路的崛起和发展,给世界铁路的重新振兴带来了勃勃生机,对信号技术设备与系统提出了更高的要求。传统的以地面信号显示传递行车命令,司机按行车规定操纵列车运行已不能满足要求。当列车运行速度提高到某一程度时,由于司机瞭望和确认地面信号的时间很短,不能保证行车安全和效率,无法依靠地面信号显示正常行车。

根据国际铁路联盟(International Union of Railways, UIC) 734R 法令推荐:依据地面信号行车,可接受的最高运行速度为 $140 \sim 160\text{km/h}$;列车速度为 $160 \sim 200\text{km/h}$ 时,应安装使用机车信号或列车自动控制系统作为辅助以增强地面信号;列车运行速度高于 200km/h 时,必须采用带有速度监督的连续式列车自动控制系统,以机车信号为行车凭证。

随着轨道交通的发展,特别是列车运行速度和密度的不断提高,列车运行控制系统也逐步由以地面信号显示传递行车命令,发展到以列车自动控制车载设备给司机显示,根据地面发送的信息和列车参数,实时计算出列车运行允许速度,自动监督列车运行。一旦列车运行速度超过允许速度,列车自动控制车载设备,可自动实施常用制动或紧急制动,从而有效地防止“两冒一超”事故,确保行车安全。这样由地面设备和车载设备构成的系统也称为列车自动防护系统。

电子技术和信息传输技术的发展,使得轨道电路能够传输多个赋予不同速度含义的低频信息。车载控制设备根据接收到的不同低频信息实施不同的速度控制方式,从而保证列车不论是在三显示还是四显示情况下,都可以实现完全安全防护,大大提高了行车的安全性。

随着新技术的应用,通过轨道电路、点式应答器或其他地-车信息传输方式,可以向列车传输更多的信息,出现了基于速度—距离模式曲线控制的系统。在该类系统中,由于列车可以准确获得自身位置的定位信息,从而后续列车可以尽可能地接近前行列车,与速度码控制系统相比,可以大大缩小列车的追踪间隔。

◀6. 列车自动驾驶系统

随着自动检测与自诊断技术的发展,以及对轨道交通运行安全性、可靠性、服务质量要求的提高,均衡列车性能和能量消耗的列车自动运行系统,被逐步运用于轨道交通系统。

20 世纪 60 年代,有司机驾驶的 ATO 系统在欧洲出现,当时我国在北京地铁 1 号线也进行了 ATO 系统的相关试验与应用。20 世纪 80 年代,有人驾驶的 ATO 系统得到进一步完善,初步形成了无人驾驶系统(Driverless Train Operation System,以下简称 DTO 系统)。早期的此类系统主要应用在小运量或中运量的自动旅客运输系统(Automatic People Movers System,以下简称 APM 系统)中,如欧洲、北美、亚洲的 APM 系统均采用全自动驾驶系统。

20 世纪 90 年代,随着通信、控制和网络技术的发展,可以在地车之间实现大容量、双向的信息传输,从而为高密度、大运量的地铁系统实现真正意义的 ATO 系统提供了可能。2000 年,法国巴黎 14 号线,首次实现了重型大运量的地铁全自动驾驶系统。该系统采用地面铺设环线实现地车信息的双向传输,设计间隔达到 90s,该系统的车辆段仍采用人工驾驶和管理的方式。2003 年 6 月,新加坡的东北线正线和车辆段均采用了全自动驾驶系统。

目前 ATO 系统已在我国多个城市的轨道交通系统投入使用。

概括地说,列车运行控制技术的发展经历了如下过程。

- ①地面手动信号;
- ②自动闭塞+地面主体信号;
- ③自动闭塞+地面主体信号+机车信号辅助信号;
- ④自动闭塞+地面主体信号+机车信号辅助信号+自动停车;
- ⑤列车自动防护系统;
- ⑥列车自动防护系统+列车自动驾驶系统。

1.3 我国列车运行控制技术发展现状

1.3.1 我国铁路列车运行控制系统技术现状

随着我国客运专线的建设和高速铁路的发展,对铁道信号技术提出了新的挑战。为了建立一套完整的兼顾既有线路和高速铁路的列车运行控制系统,在现有国内技术水平基础上,参照国外列车运行控制系统规范和运用经验,结合我国铁路运输特点,遵循全路统一规划的原则,原铁道部于2002年确定构建中国列车运行控制系统(Chinese Train Control System,以下简称CTCS)。结合我国国情,从实际需求出发,遵循以地面设备为基础,车载与地面设备统一设计的原则,按系统构成和功能将CTCS系统划分为CTCS-0级、CTCS-1级、CTCS-2级、CTCS-3级和CTCS-4级。

为了规范性和一致性,将目前干线铁路应用的既有地面信号设备和车载设备,定义为CTCS-0级。CTCS-0级由通用机车信号和列车运行监控装置组成。

CTCS-1级由主体机车信号+安全型运行监控装置组成,面向160km/h及以下的区段,在既有设备基础上强化改造,达到机车信号主体化要求,增加点式设备,实现列车运行安全监控功能。利用轨道电路完成列车占用检测及完整性检查,连续向列车传送控制信息。CTCS-1级与CTCS-0级的差别在于全面提高了系统的安全性,是对CTCS-0级的全面加强。

CTCS-2级列控系统是基于轨道电路和点式信息设备传输信息的点-连式列车运行控制系统,其中轨道电路负责列车占用检测及完整性检查,连续向列车传送列车前方轨道区段空闲数量;点式信息设备传输位置校正信息、进路参数、线路参数、临时限速等。CTCS-2级面向提速干线和高速铁路,地面可不设通过信号机。

CTCS-3级列控系统是基于通信的列车运行控制系统。它以CTCS-2级列控信息传输系统为基础,采用轨道电路检查列车占用,点式信息设备提供列车信息用于测距修正,以无线通信系统(如GSM-R)实现地-车连续、双向信息传输。行车许可由地面无线闭塞中心(RBC)产生,通过无线通信系统传送到车载设备,并实时计算目标-距离模式曲线监控列车运行速度。通过双向信息传输,CTCS-3级实现了地面控制设备与移动体车载设备的闭环控制。CTCS-3级列控系统主要面向高速铁路,地面不设通过信号机。

CTCS-4级是基于无线通信(如GSM-R),实现移动闭塞的列车运行控制系统。由车载设备通过地-车间无线通信系统,实时将列车位置及完整性信息等传送给地面无线闭塞中心

(RBC)。行车许可由地面无线闭塞中心产生,通过无线通信系统传送到车载设备,并实时计算目标—距离模式曲线监控列车运行速度。通过双向信息传输,CTCS-4 级实现了地面控制设备与移动体车载设备的闭环控制。

CTCS 各级系统的车载设备,应向下兼容,在系统故障条件下应允许降级使用。级间转换应自动完成,且不影响列车正常运行。符合 CTCS 规范的列车运行控制系统,应能满足一套车载设备全程控制的运用要求。

经过多年努力,特别是六次提速,我国铁路通过引进、消化、吸收和自主创新,逐渐形成了既有干线信号系统、既有干线铁路 CTCS-2 级列控系统、200 ~ 250km/h 高速铁路 CTCS-2 级列控系统、300km/h 以上高速铁路 CTCS-3 级列控系统技术平台。

◀1. 既有干线铁路信号系统

既有干线铁路信号系统,主要由新一代分散自律调度集中系统(CTC)、计算机联锁、ZPW-2000A 无绝缘轨道电路(四显示自动闭塞)、JT1-CZ2000 型主体机车信号系统构成。计算机联锁负责列车的进路控制;ZPW-2000(UM)系列轨道电路(电码化)提供主体化机车信号信息;JT1-CZ2000 型主体机车信号负责接收轨道电路信息,将可以作为行车凭证的主体机车信号显示给司机,并提供给监控装置,生成目标—距离模式曲线,监控列车运行。

◀2. 以 CTCS-2 级列控系统为核心的既有干线铁路信号系统

其主要用于适应既有线运行时速 160km/h 以上的动车组。该系统由新一代分散自律调度集中系统、计算机联锁、点式应答器、ZPW-2000A 无绝缘轨道电路、列控中心及列控车载设备构成。点式应答器提供线路坡度、轨道电路长度、频率、位置坐标、临时限速、进路、级间转换等信息;ZPW-2000(UM)系列轨道电路(电码化)提供自动闭塞连续信息;车站列控中心接收列车进路信息,并接收调度所下达的临时限速信息,经过报文选择,传送至有源应答器;车载设备通过接收轨道电路和应答器信息,生成速度和目标—距离模式曲线,控制列车安全运行。

◀3. 以 CTCS-2 级列控系统为核心的 200 ~ 250km/h 高速铁路信号系统

200 ~ 250km/h 高速铁路信号系统是在既有线 CTCS-2 级基础上进行优化后构建的系统。

该系统主要由调度集中、计算机联锁、ZPW-2000 轨道电路和应答器及地面列控中心及车载设备构成。与既有线 CTCS-2 级列控系统不同,每个闭塞分区设应答器组,列控中心负责轨道电路编码。

◀4. 以 CTCS-3 级列控系统为核心的 300km/h 以上高速铁路信号系统

为适应 300km/h 以上高速铁路需要,在 CTCS-2 级列控系统的基础上,引进、消化、吸收欧洲标准,基于 GSM-R 无线传输的 ETCS 列控技术,形成统一的、互联互通的 CTCS-3 列控技术体系。300km/h 以上高速铁路信号系统,主要由调度集中、计算机联锁、ZPW-2000 轨道电路和应答器及地面列控中心、无线闭塞中心及车载设备构成。车载设备兼容 CTCS-2 级列控系统功能。正常情况下,车载设备接收由地面无线闭塞中心的行车许可信息,以此生成目标—距离模式曲线监控列车速度。在遇到地-车无线系统故障等情况下,车载设备自动转换到以 CTCS-2 级方式控制列车运行。

1.3.2 我国城市轨道交通列车运行控制系统技术现状

城市轨道交通系统作为大容量、高密度的公共交通工具,其安全性直接关系到广大乘客的生命安全。为保证这一系统安全、高效地运行,需要有一套安全可靠的列车自动控制系统(Automatic Train Control,以下简称ATC)。城市轨道交通列车自动控制系统一般由列车自动监控系统(Automatic Train Supervision,以下简称ATS)、列车自动防护系统(Automatic Train Protection,以下简称ATP)及列车自动驾驶系统(Automatic Train Operation,以下简称ATO)组成,实现列车调度指挥、间隔控制、安全防护及速度控制等的自动化,有效提高列车运行的安全性和效率。

在2010年以前,除少数几条线外,已开通运营的城市轨道交通列车运行控制系统核心技术和装备,大多采用国外的信号系统。从技术上看,城市轨道交通列车运行控制系统可以分为速度码控制的固定闭塞系统、基于速度—距离曲线控制的准移动闭塞系统及基于通信的移动闭塞系统。下面简要介绍各类系统基本构成。

1. 速度码控制的固定闭塞系统

基于速度码控制的固定闭塞系统,从20世纪70年代开始应用。目前在国外的旧线和郊区线应用比较广泛,在国内应用该类制式的系统主要有以下两类。

①北京地铁1号线(包括八通线)、13号线:采用英国西屋公司的FS2500轨道电路和FS2000的ATP车载设备。该系统采用的控制方式是速度码的限制速度/目标速度的出口控制方式,区间不设置信号机,只有ATP防护系统,没有ATO系统。

②上海地铁1号线:引进美国GRS公司的ATC系统。该系统的轨道电路信息一共8个低频信息、6个速度信息、2个车门信息,车载设备完全采用速度码的入口控制方式。该系统包括ATP和ATO部分,并且ATO系统只是在车站应用。车站的定点停车通过在车站及其附近安装地面应答器来进行位置确认。在区间上,列车的位置由轨道电路进行检测。

2. 基于目标距离控制的准移动闭塞系统

基于目标距离控制的准移动闭塞系统,不再根据闭塞分区进行速度分级,而是以前方列车占用的闭塞分区入口为目标点生成连续速度—距离模式曲线,实时监控列车运行速度。该系统极大地改善了原来固定闭塞的不足,系统的安全性、通过能力等显著提高。在国内典型应用该系统的有如下几条路线。

①北京地铁5号线、天津地铁1号线:这两条线均引进英国西屋公司的TBS100系统,其地面轨道电路仍采用FS-2500(模拟)系列轨道电路,它向车载设备传送的是前方轨道电路区段的空闲数量,线路静态参数完全存储在车载设备中,列车的位置确定通过列车自身测量和地面APR应答器校正实现。

②上海地铁2号线、3号线:2号线引进美国US&S公司的AF900型数字轨道电路。该系统采用AF900型数字轨道电路实现地车间的信息传输。3号明珠线引进法国ALSTOM公司的准移动闭塞系统SACEM系统,线路信息和移动授权全部由数字轨道电路提供。

③广州地铁1号线和2号线、深圳地铁1号线和4号线、南京地铁1号线:引进德国西门子公司的LZB700M模块化ATC系统。该系统采用FTGS-917音频数字轨道电路实现地-车信

息实时传输,列车定位完全依靠轨道电路和载频信息交叉校正实现,车载设备采用速度传感器的速度和距离测量,进行列车移动体自身的测量。在该系统中,在车站ATO定点停车时,采用敷设交叉环线实现。

④天津滨海线:采用美国US&S公司的AF900系统。该系统采用AF900轨道电路实现地-车的信息传输,该系统包括ATP系统和ATO系统。

3. 基于通信的列车控制(CBTC)系统

在城市轨道交通中,基于通信的列车控制(Communication Based Train Control,以下简称CBTC)系统,一般指不依赖轨旁列车占用检测设备的高分辨率列车主动定位,连续、大容量地-车双向数据通信,并具有能够执行安全功能的列车运行控制系统。

随着技术的发展,无线通信系统的可靠性、可用性大大提高,使地-车间安全、可靠地双向实时传输列车运行控制信息成为可能,促进传统的信号技术与计算机、通信及自动控制技术交叉融合,可以实现以移动闭塞为代表的闭环控制,有效缩小追踪间隔,实现灵活方便的调度指挥,使列车运行控制系统的作用和地位大大增强。CBTC是列车运行控制系统的发展趋势,我国2003年以后新建及改造的城市轨道交通,基本采用CBTC系统。

目前国内采用的CBTC系统普遍使用IEEE802.11标准的WLAN通信系统,以无线自由波、漏泄波导管为传输通道,实现地车信息的双向传输。列车定位采用速度传感器进行测速及移动体位置测量,轨旁设置应答器或信标进行位置校正。基于移动闭塞原理,采用目标距离(Distance-to-go)控制方式实现列车运行的连续闭环速度控制。

思考题

1. 什么是列车运行控制技术?
2. 什么是列车运行控制系统?
3. 简述列车运行控制系统的重要性。
4. 简述列车运行控制系统的基本功能。
5. 列车运行控制技术的发展经过哪几个阶段?

第2章

列车运行图和通过能力

列车运行图是列车运营的基础,列车运营要按图行车。为了实现运输生产过程,完成运输任务,轨道交通必须具有一定的通过能力。本章介绍了列车运行图的作用、分类及影响要素,对列车运行图主要构成因素(车站间隔时间与追踪列车间隔时间)进行了计算,分析了影响轨道交通通过能力的因素。

2.1 列车运行图

列车是指由机车牵引,以轨道线路运行为目的,按规定辆数编成并具有列车标志的车组。在双线行车时,地铁、轻轨列车按右侧单向运行,国铁列车和市郊列车按左侧单向运行。

列车运行图是利用坐标原理,表示列车运行时空关系的图解形式。列车运行图规定了列车占用区间的次序,列车在每个车站出发、到达或通过的时间,区间运行时分,车站停车时分。它也同时规定了线路、站场、车辆和通信信号等设备的运用与行车有关部门的工作。列车运行图是采用图解方式表示列车在轨道交通区间运行及在车站到发或通过时刻的技术文件。

2.1.1 列车运行图的作用

列车运行图的作用主要体现在以下两个方面。

1. 列车运行图是列车运行的基础

列车运行图规定了各次列车占用区间的顺序,在每个车站到达、出发或通过时刻,列车在区间的运行时间,以及列车在车站的停站时间和在折返站折返所需时间等。它能直观地显示列车在时间和空间上的关系,显示列车在区间的运行及在车站停车或通过的状态。

2. 列车运行图是一个综合性的计划

轨道交通在组织旅客或货物运输过程中,要求各个部门、各个工种、各项作业之间相互配合,动作协调、时间准确地工作,因此必须制订列车运行图,使各次列车按一定的时刻运行,以免在时间上互相牵制或抵触。与运输有关的各个业务部门,都应根据列车运行图所规定的要求安排工作,共同保证列车安全与正点运行。

由此可见,编制一张经济合理的列车运行图,可充分利用轨道交通设备的能力,满足不同时期、不同时段客货运输需求,使运能与运量很好地匹配,既方便旅客出行或货物运输的需要,又能使轨道交通运营企业获得最佳的经济效益,具有重要的意义。

2.1.2 列车在区段内运行的速度

列车在区段内运行的速度分为技术速度和旅行速度。

1. 技术速度($v_{\text{技}}$)

它是不包括列车沿途停站时间的平均速度,对某一列车来说,其计算公式为:

$$v_{\text{技}} = \frac{L \times 60}{\sum t_{\text{运行}}} \quad (\text{km/h}) \quad (2-1)$$

式中: L ——区段长度(km);

$\sum t_{\text{运行}}$ ——列车在区段内运行时间总和(min);

60——分钟化为小时的系数。

2. 旅行速度($v_{\text{旅}}$)

它是包括列车在中间站沿途停站时间的平均速度,对某一列车来说,其计算公式为:

$$v_{\text{旅}} = \frac{L \times 60}{\sum t_{\text{运行}} + \sum t_{\text{中停}}} \quad (\text{km/h}) \quad (2-2)$$

式中: $\sum t_{\text{中停}}$ ——中间站停车时间的总和(min)。

技术速度反映线路平纵断面状况、机车质量、司机操纵水平、停站次数和信号制度的质量。信号显示达不到规定距离、引起停车或增减速度都会使技术速度降低。

旅行速度反映技术速度和运输组织工作的质量,也是加速机车车辆或动车组等移动设备周转和尽快送达旅客或货物的关键,它是一项综合指标。

平均技术速度是几个区段技术速度的平均数,平均旅行速度考虑了各车站的停站时间,也反映车站工作质量。信号设备可缩短接发车进路的办理时间,改善信号显示,减少列车停车时间,加快运行速度,进而提高旅行速度。

2.1.3 列车运行图的图解表示

列车运行图是运用坐标原理,表示列车运行的一种图解形式。在运行图上可以清楚地看出列车在各站到、发、通过及停站的时间,也能看出列车在区间的运行时分。

在列车运行图上,各横线为站名线,相当于各个车站到发线中心位置。纵坐标表示距离 S ,横坐标表示时间 t ,用竖直线划分时间等分,称为时分线。斜线表示列车的运行线。如图 2-1 所示。

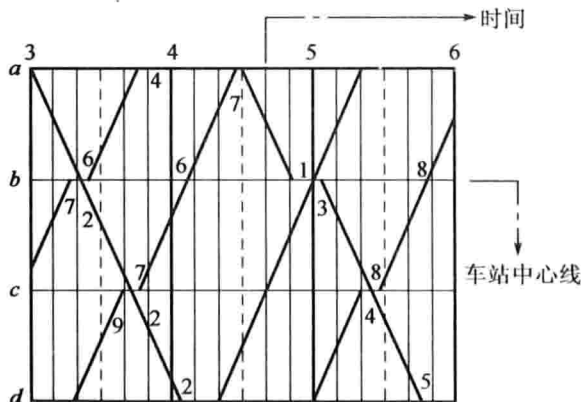


图 2-1 列车运行图

所示。

为适应不同的列车运行需要,列车运行图按照时间的划分而不同,主要有以下四种基本格式。

1. 一分格运行图

它的横轴以 1min 为单位用竖线进行等分。此种运行图主要在地铁、轻轨线路采用,如图 2-2 所示。

2. 二分格运行图

它的横轴以 2min 为单位用竖线进行等分。

此种运行图主要在市郊轨道交通线采用,如图 2-3 所示。一分格、二分格运行图主要在编制新列车运行图时使用。

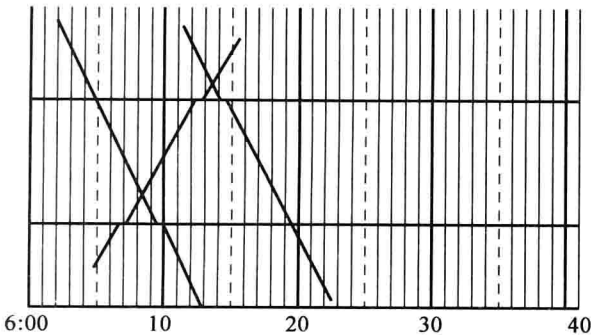


图 2-2 一分格运行图

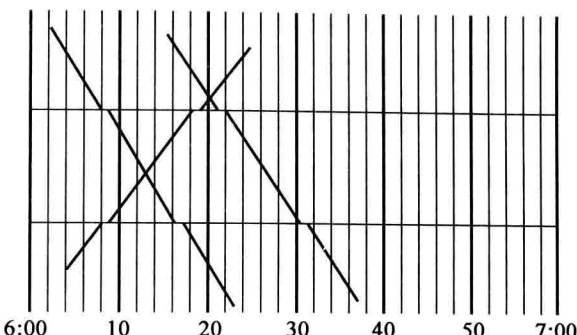


图 2-3 二分格运行图

3. 十分格运行图

它的横轴以 10min 为单位用竖线进行等分,0.5h 格用虚线表示,1h 格用粗线表示,并且在运行图上需标注 10min 以下的数字。此种运行图主要在轨道交通运输企业编制列车运行调度调整计划和绘制实绩运行图时使用,如图 2-4 所示。

4. 小时格运行图

它的横轴以 1h 为单位用竖线进行等分,并且在运行图上需标注 60min 以下的数字。此种运行图主要在编制旅客列车方案图和机车周转图时采用,如图 2-5 所示。

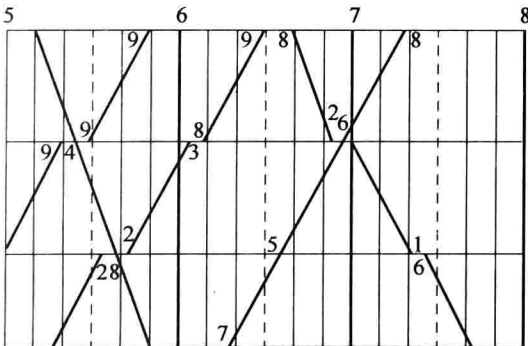


图 2-4 十分格运行图

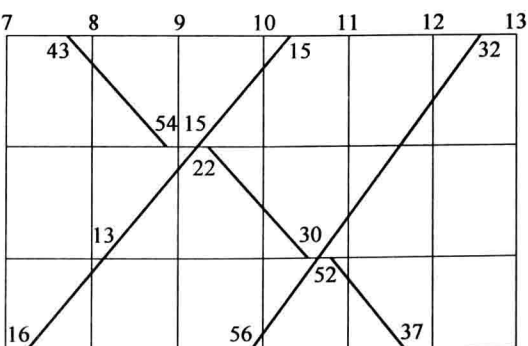


图 2-5 小时格运行图

列车运行图中,斜线为列车运行线,是列车移动的轨迹。斜线的斜率与列车速度成正比,斜率越陡,表示列车运行速度越高。

2.1.4 列车运行图的分类

根据列车运行速度、列车运行方式和上下行方向的列车数量及铁路线路的技术设备等条件,列车运行图可以分为不同类型。

1. 按运行速度划分

按各种列车运行速度的不同,列车运行图可分为以下两种。

(1) 平行运行图

在同一区间内,同一方向列车的运行速度相同,并在区段内没有列车越行的运行图,因而