



普通高等教育铁道部规划教材

# 列车运行控制系统

唐涛 主编 莫志松 主审



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等教育铁道部规划教材

# 列车运行控制系统

唐 涛 主 编  
莫志松 主 审

中国铁道出版社

2012年·北京

## 内 容 简 介

本书是普通高等教育铁道部规划教材。全书主要介绍了列车运动学基础、列车控制系统基本原理与组成、列控系统地面设备功能原理、列控车载设备、CTCS-3 级列车运行控制系统、城市轨道交通 ATC 系统。

本书可供铁道信号相关专业的本科生和研究生学习使用,也可供铁道信号工程技术人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

列车运行控制系统/唐涛主编. —北京:中国铁道出版社,2012.7

普通高等教育铁道部规划教材

ISBN 978-7-113-14798-3

I. ①列… II. ①唐… III. ①列车—运行—控制系统  
—高等学校—教材 IV. ①U284.48

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 149357 号

书 名:列车运行控制系统

作 者:唐 涛 主编

---

责任编辑:朱敏洁 编辑部电话:010-51873134 电子信箱:zhuminjie\_0@163.com

封面设计: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:中国铁道出版社印刷厂

版 次:2012年7月第1版 2012年7月第1次印刷

开 本:787mm×960mm 1/16 印张:13.25 字数:281千

印 数:1~3 000册

书 号:ISBN 978-7-113-14798-3

定 价:26.00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)51873170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

# 前 言

本书是普通高等教育铁道部规划教材,是由铁道部教材开发领导小组组织编写,并经铁道部相关业务部门审定,适用于高等院校铁路特色专业教学以及铁路专业技术人员使用。本书为铁道信号系列教材之一。

列车运行控制系统是保证列车行车安全、提高运输效率的铁路设备,是铁路的关键技术装备之一。随着计算机、通信、自动化技术等先进技术的广泛应用,列车速度和密度的不断提高对铁道信号提出了更高要求,列车运行控制系统已发展为先进的自动化控制系统,在列车运行中进行全过程、实时及各种运行场景的安全控制,从而有效保证列车高速、高密度的运行安全,已成为铁路运输系统的大脑和神经中枢。

本书结合目前铁道信号技术的现状,并兼顾信号技术的历史过程,参考了大量的文献编写而成。全书描述了列车动力学基本知识、列控系统基本原理与组成、列控系统地面设备功能原理、车载设备功能原理及典型列控系统介绍等内容。其中,在描述列控系统地面设备功能原理时,重点结合典型的列控系统地面设备具体应用和配置方案,介绍系统的原理、关键技术和设备组成等。在介绍车载设备功能原理时,鉴于目标距离控制方式已广泛应用于高速铁路、城市轨道交通及干线铁路,本书重点针对目标距离控制方法,介绍车载设备的原理、关键技术和设备组成等。在介绍典型列控系统时,重点介绍应用于干线铁路的 CTCS-3 级列控系统,包括系统总体方案、场景和模式等,同时介绍应用于城市轨道交通的 CBTC 系统的总体方案。

鉴于铁路运输系统和城市轨道交通系统的需求和技术演变过程有所不同,铁道信号系统的概念和组成也存在一定差异,本书主要结合中国干线及高速铁路所使用的列车运行控制技术和装备进行编写。

本书由北京交通大学唐涛主编,铁道部运输局电务部莫志松主审。其中第一章由唐涛编写,第二章由刘雨、郭保青编写,第三章、第五章由唐涛、刘雨编写,第四章由赵林海、王海峰编写,第六章由袁磊编写,第七章由赵波波编写。本书撰写



过程中得到铁道部有关部门的大力支持和指导,特别是运输局电务部的指导,也得到了北京交通大学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和电子信息工程学院同仁们的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

科学技术发展日新月异,作者水平也存在局限性,错误遗漏在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2012年4月

# 目 录

第一章 概 述	1
第一节 列车运行控制系统的作用	1
第二节 列车运行控制技术发展历程	2
第三节 我国列车运行控制技术发展现状	4
复习思考题	8
第二章 列车运动学基础	9
第一节 列车运动过程分析	9
第二节 列车牵引力	10
第三节 列车运行阻力	13
第四节 列车制动	17
复习思考题	22
第三章 列控系统基本原理与组成	23
第一节 行车闭塞	23
第二节 速度防护	31
第三节 列控系统基本组成	38
复习思考题	48
第四章 列控系统地面设备功能原理	49
第一节 机车信号系统地面设备	49
第二节 CTCS-2 级列控系统地面设备	62
第三节 CTCS-3 级列控系统地面设备	89
第四节 城市轨道交通 CBTC 地面设备	102
复习思考题	111



<b>第五章 列控车载设备</b> .....	112
第一节 列控车载设备原理与组成.....	112
第二节 列车测速与定位原理.....	118
第三节 速度监控曲线生成及实施.....	134
第四节 列控车载设备人机界面.....	149
复习思考题.....	160
<b>第六章 CTCS-3 级列车运行控制系统</b> .....	161
第一节 系统概述.....	161
第二节 CTCS-3 级系统运营场景 .....	168
第三节 CTCS-3 级系统车载工作模式 .....	179
复习思考题.....	183
<b>第七章 城市轨道交通 ATC 系统</b> .....	184
第一节 基本概念.....	184
第二节 ATC 系统组成 .....	187
第三节 基于通信的城市轨道列车运行控制系统(CBTC) .....	194
复习思考题.....	203
<b>参考文献</b> .....	204

# 第一章

## 概述

本章主要介绍了列车运行控制系统的定义、作用及其技术发展历程。列车运行控制系统的核心作用是指挥列车安全、高效的运行,随着列车速度的提高、技术的发展和要求的提高,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、自动停车装置和自动列车防护系统等几个阶段,满足各种不同轨道交通系统的运营和安全需求。

### 第一节 列车运行控制系统的作用

铁路运输是以机车、车辆为移动设备(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。列车运动的基本物理原理是依靠车轮与钢轨之间的摩擦产生动力,其速度快、质量重的特点决定了其制动距离较长,一般会超出司机瞭望距离,又由于列车在区间内不可能避让,因此,需要采用技术手段确保在同一时间不能把同一资源(即轨道)分配给多列列车,列车运行中不能给本列车或其他列车(或环境)带来危险,以保证行车的安全;另一方面,效率也是铁路运输系统应考虑的一大因素。为使铁路运输系统高效运营,应采取相应的技术尽可能晚地给列车分配资源、尽可能快地释放资源。因此,需要一套行车指挥和控制系统,可靠、安全地按运行计划指挥移动设备——列车在这一庞大系统中安全、高效地运行。行车指挥和控制系统的主要技术装备称为铁道信号系统,简称铁道信号。

计算机、通信、自动化技术等先进技术的广泛应用以及列车速度和密度的不断提高对铁道信号提出了更高的要求,铁道信号已发展为包含调度集中、联锁设备(计算机联锁)、列车运行控制系统等的先进自动化控制系统,保证列车安全、高速、高密度运行,改善铁路职工劳动条件,成为铁路运输系统的大脑和神经中枢。

所谓列车运行控制系统,是指由地面设备和车载设备构成,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,是铁道信号系统的重要组成部分之一。

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,为每列车产生行车许可,并通过地面信号和车载信号的方式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,使列车降速乃至停车,防止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)给司机显示允许列车运行的信号、限制速度或目标距离等。

(2)应能自动实施速度控制。一旦列车速度超过允许速度,应实施制动控制,使列车减速乃至停车。

(3)防止与同一轨道运行的列车相撞或追尾。

(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。

## 第二节 列车运行控制技术发展历程

列车运行控制技术在不断提高的列车速度、密度等运营需求下,不断发展的电气、电子、信息及自动化技术推动下,功能不断增强完善,自动化程度不断提高。此外,列车运行控制技术也是总结事故教训换来的,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过了如下几个阶段。

### 1. 地面人工信号

自1804年世界首条铁路在英国开始运营,就产生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。起初只有白天行车,且铁路上只有一列列车来回运行,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,铁路运行线路不断增长,车站增多,运行列车增多。为防止列车相撞,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信号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东西,外面包白布或黑布,吊在10 m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,指示列车停在站外。若发车站将黑球挂在柱顶,则表示列车晚点。由于当时站间还没有通信手段,相邻车站用航海望远镜观察,根据球信号的颜色和位置向司机传送信号。从那个时代起,信号机已经开始起闭塞机的作用,只不过两站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),通过人控制的信号给司机传递行车命令(传输),由信号工控制列车间隔。列车完全由司机驾驶,并负责列车的运行安全。

### 2. 地面自动信号

1872年,美国人鲁滨逊发明了轨道电路,实现了列车占用钢轨线路状态自动检查。利用



轨道电路检查到的列车占用轨道的状态信息控制信号显示,出现了地面自动信号,使地面信号显示能真实反映线路空闲状态,也就是说按信号显示行车能够防止列车冲突事故。只有当线路在空闲状态时,信号开放才是安全的。

这一阶段列车的间隔调整采用半自动闭塞或自动闭塞。所谓半自动闭塞即人工办理闭塞手续,列车凭信号显示发车后,出站信号机自动关闭的闭塞方法。而自动闭塞则是列车根据运行及有关闭塞分区状态,自动变换通过信号机的显示,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,列车完全由司机驾驶,安全掌握在司机手中。

### 3. 机车信号

以地面信号显示为主的铁道信号系统只是向司机提供地面视觉信号。但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的信号机的信号显示,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,发明了机车信号设备,将地面的视觉信号通过技术手段引入司机室,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。

值得指出的是,在以地面信号为主体信号的信号系统中,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,人们又研制了列车自动停车设备(Automatic Train Stop,简称ATS)。其功能是当地面信号的“禁止命令”未被司机接收时就自动实施紧急制动,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,列车运行控制系统(铁道信号)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. 自动列车防护系统

自动停车装置的使用,有效地消除了因司机失去警惕而造成的冒进禁止信号,在保障行车安全方面发挥了巨大的作用。但是,由于自动停车装置存在警惕按钮。司机在不清醒状态下,若通过习惯性地按压警惕按钮,仍会使自动停车装置不起作用,而又不实施人工制动,则仍然可能发生冒进信号的事故,成为危及行车安全的一大隐患。此外,自动停车装置报警频繁,在报警声持续时间内,司机在操纵列车的同时还必须兼顾按压警惕按钮,对司机的正常操纵带来



一定的影响,继而使司机对此设备产生反感,出现违章关机现象。

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,对铁道信号装备提出了更高的要求。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(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140~160 km/h;列车速度为160~200 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200 km/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。

随着铁路的发展,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,发展到以列控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的允许速度,自动监督列车运行,一旦列车运行速度超过允许速度,列控车载设备自动实施常用制动或紧急制动,有效防止两冒一超事故,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自动列车防护系统。

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)自动列车防护系统。

### 第三节 我国列车运行控制技术发展现状

#### 一、我国铁路列车运行控制系统技术现状

随着中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,铁道部于2002年确定构建中国列车运行控制系统(Chinese Train Control System,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。

##### 1. CTCS-0级

为了规范的一致性,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。

## 2. CTCS-1级

CTCS-1级由主体机车信号+安全型运行监控装置组成,面向160 km/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。

## 3. CTCS-2级

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。

## 4. CTCS-3级

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用于测距修正,以无线通信系统(如GSM-R)实现车—地连续、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。

## 5. CTCS-4级

CTCS-4级是基于无线通信(如GSM-R)且实现移动闭塞的列车运行控制系统。由车载设备通过车—地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,且级间转换应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,特别是铁路六次提速,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级列车系统、200~250 km/h高速铁路CTCS-2级系统、300 km/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,给司机可以作为行车凭证的主体机车信号显示信息,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

适应既有线运行时速160 km/h以上的动车组。该系统由新一代分散自律调度集中系统(CTC)、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200~250 km/h高速铁路信号系统

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

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300 km/h以上高速铁路信号系统

为适应300 km/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级列控技术体系。300 km/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(RBC)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(RBC)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。车地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。

## 二、我国城市轨道交通列控系统技术现状

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ATC(信号系统)。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,简称ATS)、列车自动防护系统(Automatic Train Protection,简称ATP)及列车自动驾驶系统(Automatic Train Operation,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控系统核心技术和装备均采用国外先进的信号系统。从技术上看,城市轨道交通列控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是 20 世纪 70 年代的开始应用。目前在国外的旧线和郊区线还应用比较广泛,在国内应用该类制式的系统主要有:

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,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。目前该线路的最小间隔为 2.5 min。

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,列车的位置由轨道电路进行检测。目前该线路的最小间隔为 2.5 min。

### 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。在国内典型应用的系统有:

①北京地铁的 5 号线、天津地铁 1 号线:这两条线均引进采用西屋公司的 TBS100 系统,其地面轨道电路仍采用 FS2500(模拟)系列轨道电路,它向车载设备传送的是前方轨道电路的空闲数量,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 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的传输,列车轨旁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,采用敷设交叉环线来实现。

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 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 System, 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



量车一地双向数据通信,并具有能够执行安全功能的车载和地面处理器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,使车一地间安全、可靠地双向实时传输的列控信息成为可能,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。

目前国内目前采用的 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。

近年来,国内多个单位都在研发城市轨道交通 CBTC 系统。在国家相关部委及北京市支持下,政、产、学、研、用协同创新,北京交通大学与北京地铁等密切合作,针对系统安全保障、高密度防护控制、高可信车地通信、特殊场景的现场不可测等问题,历经十多年努力,突破了 CBTC 核心技术,研制出 CBTC 成套技术装备——LCF-300 型列车并已成功应用于北京亦庄线、昌平线等。该系统可以兼容无线自由波、漏泄波导管、漏泄电缆等三种传输方式,实现了移动闭塞、固定闭塞、站间闭塞三级控制,保证了列车高密度、安全平稳运行和精确停车。



### 复习思考题

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

## 第二章

# 列车运动学基础

本章主要介绍列车运动学基础,包括列车运动过程中的受力分析,列车的牵引力、阻力和制动力等相关原理和计算。在本章的学习中,应重点掌握列车在各种运动状态下的受力情况,了解牵引力、阻力和制动力的形成原理,掌握空转、打滑等受力异常情况的产生原理和危害,熟悉列车制动距离计算的原理。

### 第一节 列车运动过程分析

#### 一、列车的受力分析

如图 2-1 所示,作用在列车上的力总体共分为三类:列车牵引力、列车运行阻力和列车制动力。

##### 1. 列车牵引力 $F$

列车牵引力是列车运行动力的来源,它是与列车运行方向相同并可根据需要控制的外力。

列车牵引力是由牵引机车或动车的动力装置发出的内力经传动装置传递,在轮周上形成切线方向力,再通过轮轨间的黏着产生的、由钢轨反作用于轮周上的外力,从而使列车发生平移运动。这种由钢轨作用于动轮轮周上的切向外力之和,即为列车轮周牵引力,简称列车牵引力。

##### 2. 列车运行阻力 $W$

列车运行中由自然条件产生的与运行方向相反、阻碍列车运行、不能由司机控制的外力叫做列车运行阻力。

按照列车运行中阻力产生的原因,可分为基本阻力和附加阻力。基本阻力是指在运行中永远存在的阻力;附加阻力是指个别情况下发生的阻力,如坡道阻力、曲线阻力、隧道阻力等。

将这些阻力合在一起的力称之为全阻力。

##### 3. 列车制动力 $B$

列车运行中与运行方向相反、阻碍列车运行、司机可以根据需要调节的外力叫做列车制动力。

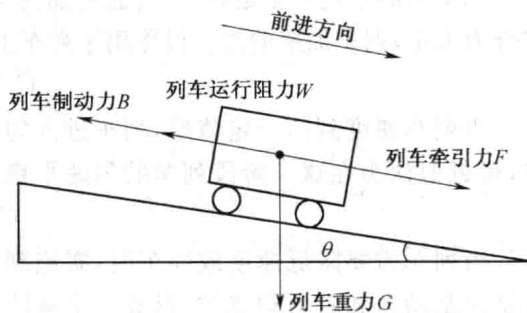


图 2-1 列车受力示意图





由定义可以看出,制动力一个明显的特点就是由人为方法产生的。产生制动力的方法可分为摩擦制动(包括闸瓦制动和盘形制动)、动力制动和电磁制动。

## 二、列车运动状态

在线路上运行的列车,其运动状态可分为:加速牵引、匀速惰行和减速制动,如图 2-2 所示。

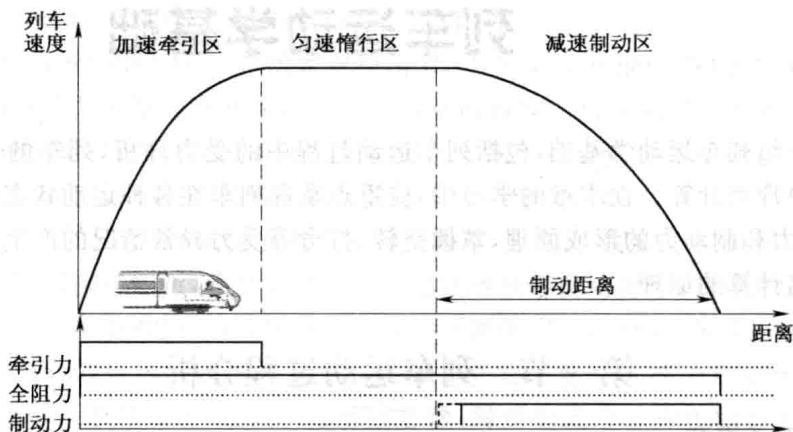


图 2-2 列车运行速度曲线

列车从静止到开始运行,一直进行加速运动,这个阶段只有牵引力和阻力作用于列车,使列车合力为正,列车加速前进。设作用于列车上的牵引力为  $F$ ,列车运行阻力  $W$ ,其合力  $C$  表达为

$$C = F - W \quad (2-1)$$

当列车速度到达一定值后,列车进入匀速区,此时无牵引力和制动力,只有阻力作用于列车,可近似认为在这一阶段列车的匀速平稳运行。设作用于列车上运行阻力  $W$ ,故合力为

$$C = -W \quad (2-2)$$

当列车需要降低速度或停车时,实施制动给列车施加相应的制动力,这时作用于列车的合力是由制动力和阻力构成的,形成一个减速度,使列车速度下降。设作用于列车上的制动力为  $B$ ,列车运行阻力为  $W$ ,其合力为

$$C = -(B + W) \quad (2-3)$$

需要注意的是,图 2-2 中下方的曲线仅表示此时牵引力、阻力、制动力的有效或无效,并不表示这些力的具体值。因为无论是牵引力、阻力还是制动力,都是一个曲线变化的过程,与速度、地面条件等各种因素有关。

## 第二节 列车牵引力

### 一、牵引力的形成

列车牵引力是由牵引机车或动车的动力装置发出的内力经传动装置传递,在轮周上形成