

轨道交通 智能技术导论

张秀彬

[巴基] 曼苏乐
(Muhammad Mansoor Khan)

叶尔江·哈力木

著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书在现代科技及人工智能(AI)理论与技术高度发展的基础上,系统阐述了轨道交通智能技术的科学原理与技术。内容包括轨道交通系统智能监控、列车动力系统的智能传感与识别、轨道交通系统运管中的人工智能技术、人工智能在轨道交通运维中的应用、列车车辆环境的智能维护等的技术原理、理论算法与实用工程技术。

本书可以作为高等院校轨道交通系统、通信、自动化、智能装备设计与制造、人工智能、计算机科学与技术、电气工程与自动化等相关专业的教材或教学参考书,也可作为轨道交通系统设计、运行与维护专业人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

轨道交通智能技术导论/张秀彬,(巴基)曼苏乐,叶尔江·哈力木著. —上海:上海交通大学出版社, 2021.9

ISBN 978-7-313-25170-1

I. ①轨… II. ①张…②曼…③叶… III. ①人工智能—应用—城市铁路—轨道交通—高等学校—教材 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 143199 号

轨道交通智能技术导论

GUIDAO JIAOTONG ZHINENG JISHU DAOLUN

著 者:张秀彬 [巴基]曼苏乐 叶尔江·哈力木

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:江苏凤凰数码印务有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

字 数:327千字

版 次:2021年9月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-25170-1

定 价:68.00元

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:18.25

印 次:2021年9月第1次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:025-83657309

序

历经十几年,我和我的同事及多位学生(曼苏乐、吴浩、应俊豪、莫臻、计长安等博士,还有众多的硕士和学士)的研究工作涉及传动与节能、网络与通信、检测与控制、传感与信号处理、状态识别、图像处理、数学模型与智能算法、人工智能在轨道交通系统中的实用技术等。他们中有些人还直接参与轨道交通系统装备技术改造、研发或运行管理,并取得了相应成果。这些早就促使我要将相关成果编撰成书。唯因自己忙碌,一时便将此事置之脑后。如今,我的学生叶尔江正在深入研究智能理论及其算法,于是又激活了我的思维和“冲劲”。

虽然自己已出版若干论著,但还是想就所涉足的学术领域继续做一些归纳与整理,以鼓励我所教过的学生们继续努力,为完善相关理论与技术再做出些许贡献。

或许,这又是自己的一次“躬蹈矢石”之举,然而静心而思,感触良多:繁华已散尽,痴心仍不改!借用自己曾经的“涂鸦”以表心意:“天云舒卷未阅尽,遥望远景叹不已;攀登之路甚乏力,欲罢矢志却难移!”

将本书谓之“导论”,颇有概述与帮扶之意,希望所阐述之内容能够起到“引索”作用。轨道交通是一庞大复杂的系统,所涉及的知识面极为广阔,其所涵盖的学科均可列出专项课题予以深入研究而无止境。

十分感激曼苏乐与叶尔江,还有其他弟子们“云屯雾集”般的鼎力扶助!为回报大家的辛勤劳作,以此抛砖引玉为序。

上海交通大学张秀彬

2021年8月25日于上海

目 录

第 1 章 轨道交通发展简史	1
1.1 世界近代轨道交通发展史简述	1
1.2 中国轨道交通发展史	5
1.2.1 清朝的科技悲哀	5
1.2.2 新中国成立后的轨道交通	7
1.3 世界轨道交通曾经的灾难	12
1.3.1 世界列车事故列举	12
1.3.2 列车事故发生的原因	17
1.3.3 现代列车安全运行的基本要素	19
1.4 轨道交通发展史带给人们的启示	24
1.4.1 轨道交通离不开科学基础理论和技术创新的支撑	24
1.4.2 保障中国轨道交通发展的社会制度优越性	27
第 2 章 轨道交通系统智能监控	31
2.1 CBTC 基本工作原理	31
2.1.1 移动闭塞工作原理	32
2.1.2 移动授权工作原理	32
2.2 对 CBTC 的基本分析与评价	33
2.2.1 无线局域网的发展过程概述	33
2.2.2 原有 CBTC 技术的局限性	35
2.3 全系统智能通信与监控	36
2.3.1 数据通信系统	36
2.3.2 状态信息无线传感网	38
2.3.3 无线传感与高铁车联网	41
2.4 列车子系统工作原理简述	45

2.4.1	信号连锁	45
2.4.2	列车自动防护子系统	45
2.4.3	列车自动监督子系统	46
2.4.4	列车自动驾驶子系统	47
2.4.5	数据通信子系统	47
2.5	车车通信协同原理	48
2.5.1	车车通信技术结构	48
2.5.2	车车通信的原理步骤	48
2.5.3	车车通信系统与列车自动监督系统的功能区分	49
2.6	路况智能识别与决策	50
2.6.1	列车自主智能视感系统	50
2.6.2	对前方列车的快速识别方法	63
第 3 章	列车动力系统的智能传感与识别	83
3.1	电力机车动力装置智能传感结构与控制	83
3.1.1	高铁动力装置智能传感构成基础	83
3.1.2	列车牵引智能控制	84
3.2	动力系统异常状况的智能识别	85
3.2.1	识别系统构成	85
3.2.2	音讯识别智能算法理论	87
3.2.3	支持向量机的基本算法	104
3.2.4	VC 维理论	110
3.2.5	系统学习	114
3.2.6	在线识别过程	116
3.3	地铁机车牵引电路故障诊断	117
3.3.1	系统构成	118
3.3.2	识别原理	120
3.3.3	算法步骤	121
第 4 章	轨道交通系统运管中的 AI 技术	124
4.1	AI 的发展概况	124
4.2	人脸识别技术在交通运管中的应用	126
4.2.1	人脸识别理论基础	126

4.2.2	人脸图像特征提取	161
4.3	人脸识别实用算法	172
4.3.1	基于几何特征匹配的人脸识别算法	172
4.3.2	基于特征脸的识别算法	177
4.3.3	基于“弹性束图”匹配的人脸识别算法	188
4.3.4	基于神经网络的人脸识别算法	194
4.3.5	基于支持向量机的人脸识别算法	199
4.3.6	基于隐马尔可夫模型的人脸识别算法	204
第 5 章	AI 在轨道交通运维中的应用	215
5.1	典型应用领域	215
5.1.1	编制列车运行图	215
5.1.2	节能视角下的列车运行图编制	223
5.1.3	电话闭塞法	229
5.2	音视频全面智能化识别技术的普及	233
5.2.1	AI 安防大系统基本模型	234
5.2.2	声纹识别在交通系统的作用	237
5.2.3	保障音视频信息安全的基本原理	240
第 6 章	列车车辆环境的智能维护	241
6.1	车厢温度智能调节	241
6.1.1	车厢室温的双闭环智能调节原理	241
6.1.2	车厢温度智能调节优越性	243
6.2	乘车安全保障智能技术	243
6.2.1	站台屏蔽门智能控制系统	244
6.2.2	算法步骤	247
6.3	车厢内环境的智能辅助	250
6.3.1	装置结构及其设置方法	251
6.3.2	核心算法	252
第 7 章	轨道交通未来的技术发展	259
7.1	高速列车技术现状与发展	259
7.1.1	高铁发展历程回顾	259

7.1.2	我国现有技术的薄弱环节	260
7.1.3	国外高速列车技术现状及其发展方向	261
7.2	世界轨道交通总体发展趋势	265
7.2.1	轮轨技术发展趋势	265
7.2.2	磁悬浮技术发展趋势	266
7.3	轨道交通智能运维的系统架构	270
7.3.1	轨道交通智能技术装备的发展思路	271
7.3.2	轨道交通智能技术愿景	275
	参考文献	278
	索引	283

第 1 章 轨道交通发展简史

以史为鉴可以知兴替。

我国曾经历过一段极为“可悲”的历程。中华民族曾经有过的辉煌科技成就被昏庸无能的封建统治者“掩埋”于历史的“尘埃”之中。尤其是腐败的清朝统治者，在近代西方工业革命浪潮早已波及世界之时，却“毫无察觉”。长期以来，封建统治者面对落后与颓败的封建制度冥顽不化，还对当时先进的“西学”采取排斥态度，将当时西方“方兴未艾”的科学理论与技术鄙称为“夷学”，根本无心“取人之长”来弥补自身科学与技术的“短缺”。从雍正的“百年禁教”起，早在明朝时期已经“孕育”起来的“西学东渐”被阻隔长达 160 多年之久，从而导致我国成为世界科技发展史上最可悲的井底之蛙。恰在此期间，西方科技却在“思想解放”的浪潮中蓬勃兴起，如牛顿(Newton, 1643—1727, 英国著名物理学家)的“物体运动三定律”开启了经典物理学的时代；瓦特(Watt, 1736—1819, 英国发明家、企业家)的蒸汽机催生了世界第一次工业革命；麦克斯韦(Maxwell, 1831—1879, 英国物理学家、数学家)的经典电动力学与经典统计力学形成；法拉第(Faraday, 1791—1867, 英国物理学家、化学家)的电磁感应定律产生；等等^[1]。

本书就轨道交通智能技术的发展而论，自然需要对世界近现代轨道交通的发展状况做一简要的阐述，以助读者能够思前想后、行成于思。

1.1 世界近代轨道交通发展史简述

早在公元 60 年前后，希罗(Heron, 公元 10—公元 70 年，古罗马数学家、工程师)就已创造出了蒸汽发动机雏形——利用蒸汽推动的空心钢球，蒸汽从钢球两根方向相反的弯管中排出，形成一个扭力，使球转动，俗称“汽转球”。这是人类最早发明的、将蒸汽转变为动力的一种简单机械技术方法。希罗为此还撰写了一本叫作《压缩空气的理论和应用》的专著，留存于世^[2]。

尽管,1698年西弗里(Severy,英国工程师)、1712年纽科门(Newcomen, 1664—1729,英国工程师)和1769年瓦特,都对早期蒸汽机技术的发展做出了贡献,但是,最终要数瓦特的贡献更为突出。这是因为瓦特运用当时已有的科学理论,逐渐发现了这种蒸汽机的技术缺陷,于1776年制造出第一台具有实用价值的蒸汽机。

蒸汽机的重要性在当时就已经超出了人们的想象,而瓦特对原有蒸汽机机械结构的改进,极大地提高了蒸汽机的能量转换效率,在工业生产领域具有极高的实用价值。

很快,蒸汽机被广泛地应用于工业生产,成为几乎所有机器的动力装置,从而改变了人们的生产方式,极大地推动了技术进步,进而拉开了西方工业革命的序幕。其中极为重要的是,由瓦特发明的离心飞摆调速器是早期动力机械运动速度控制的重要技术。自从有了瓦特调速器,便解决了蒸汽机推动机械转动速度的调节与稳定问题,这也是人类自动化技术发展史上开天辟地的理论创立与技术进步的基础^[1]。

在瓦特首次解决了机械转速稳定与速度自动调节技术难题之后,世界上第一

台蒸汽机车才问世。即1804年特里维斯克(Trevisk,英国矿山技师)根据瓦特蒸汽机及其调速器的原理制造出世界上第一辆蒸汽机车“新城堡号”,其质量为6.5 t,可以牵引30 t货物,动轮直径为4 ft(1 ft=0.304 8 m),轨距为4 ft 8 in(1 in=24.5 mm)(合1 422 mm)(见图1-1)。

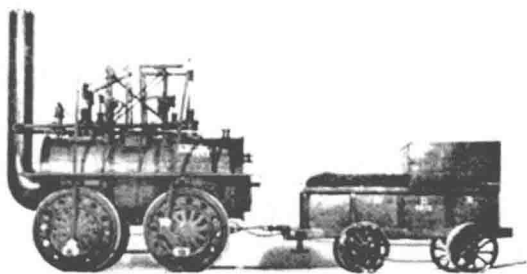


图 1-1 世界上第一台蒸汽机车

尽管最早的蒸汽机车结构简单,热效率低,体型笨重,其他辅助技术也极其简陋,但却是当时英国贵族出行的时髦交通工具(见图1-2)。

19世纪,尽管火车还不如一匹马跑得快(见图1-3),但是它却能够载运大批量的货物进行较长距离的运输,这一优点在当时就已经非常突出。1814年,英国铁路火车运营已经成为一项成熟的轨道交通工具(见图1-4)。

1894年,继英国之后,德国研制成功第一台汽油内燃机车并投入运营,从此开创了火车技术的新纪元。图1-5所示为国外早期的内燃机车。

临近20世纪,西方的蒸汽机车便已开始“驶进”历史博物馆,铁路运输开始了电力机车和内燃机车的新时代。

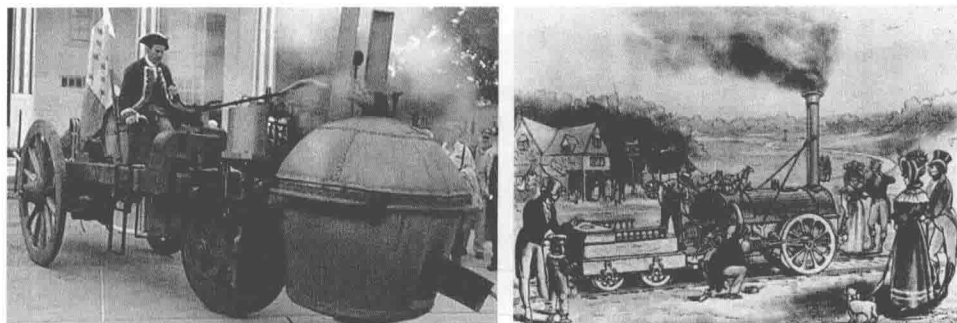


图 1-2 英国贵族曾经的时髦交通工具

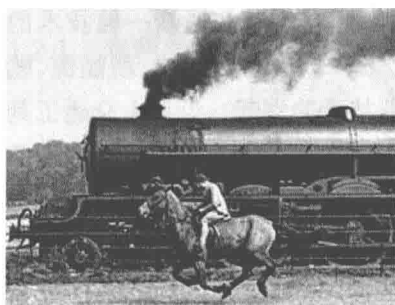


图 1-3 19 世纪的火车不及马跑得快

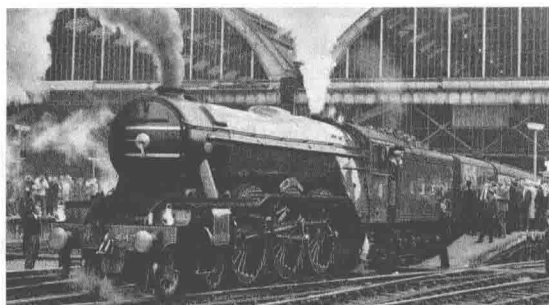


图 1-4 英国 1814 年的运营火车

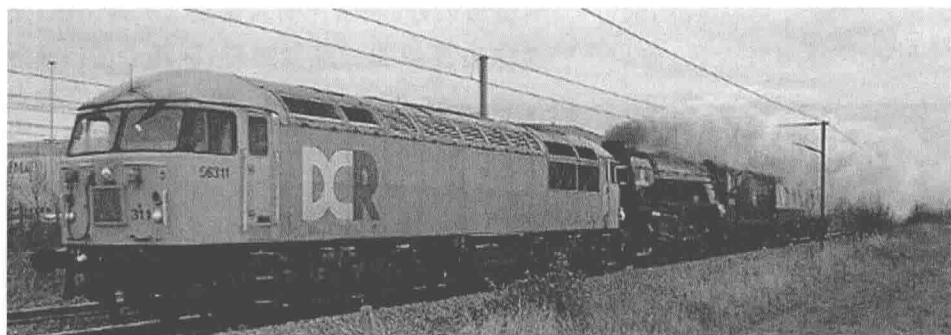


图 1-5 国外早期内燃机车

自 1900 年开始,美国紧随欧洲大规模地兴建铁路,直至 1945 年达到“鼎盛”。其间的 1924 年,德、美、法等国均成功研制了各种柴油内燃机车,并在世界上广泛使用。1941 年,瑞士研制成功新型燃油汽轮机车,这种机车以柴油为燃料,结构简单、震动小、运行性能好,被当时的西方工业国家普遍采用。

据历史资料显示,1941 年,全世界铁路总长度就已达 126 万千米,这是世界轨道交通技术史上最蓬勃发展的一段时期。



图 1-6 美国 20 世纪拆除铁路的场面

然而,在 1946 年至 1964 年间,随着汽车技术的发展和普及,以美国为首的欧美国家又纷纷开始拆除多余的铁路(见图 1-6)。这是由于汽车具有“门对门”的“代步”优势和社会投入/产出的经济效益,以及轨道交通技术的发展暂时出现了“停滞”所致。

从 20 世纪 60 年代后期开始,随着轨道交通新一轮技术的发展(包括牵引方式、新能源、轨道结构、隧道桥梁网络、车身设计、运行速度等新技术的兴起),世界上交通工具的整体发展态势又出现了翻天覆地的变化。新技术的层出不穷使得轨道交通又重新回到了历史进程的“高位”。

1964 年,日本建成了世界上第一条速度为 200 km/h 的高速铁路,一时轰动世界,使世界各国重新开始重视轨道交通的发展,并且纷纷效仿日本技术建造高速列车和兴建高速铁路^[3]。其间,日本与德国迅速成为高速铁路技术的“发源地”。图 1-7 所示为日本“新干线”运行时的壮观景象;图 1-8 为德国高速列车的“雄姿”。



图 1-7 日本新干线



图 1-8 德国高速列车

面对伴随着电子、计算机、通信、控制乃至智能高科技而迅速发展起来的轨道交通技术,我们中国人曾经感慨万千。赶上和超过世界先进科技水平成为国人深藏心中的努力方向和埋头苦干的无穷动力。以下,简要介绍我国轨道交通技术发展史。

1.2 中国轨道交通发展史

我国轨道交通的发展可以从两段历史中审视。第一阶段为新中国成立前的一段艰辛历程,这一时期轨道交通的发展可以说先是“惨不忍睹”,经过了一段时间的艰辛“爬坡”后,刚刚开始极为勉强地有个“抬头机会”的时候,又遇上连连战乱与外敌侵略,始终处于可悲可叹的境地。第二阶段为新中国成立至今,中华民族厚重的历史被翻开新的一页,我国以崭新的雄姿重新屹立于世界民族之林,从此铺开了交通发展的伟业宏图。

1.2.1 清朝的科技悲哀

1864年,中国出现了第一条铁路,是英国人在北京宣武门外修建的,长约500 m,为窄轨铁路,根本就没有也无法进行营业。在其试行的时候,还闹出了一个很大的笑话。

李岳瑞[1862—1927,清光绪八年(1882年)中举,次年中进士,曾任工部主事,主办铁路矿事务]在笔记体小说《春冰室野乘》中记载:“同治四年七月,英人杜兰德,以小铁路一条,长可里许,敷于京师永定门外平地,以小汽车驶其上,迅疾如飞。京师人诧所未闻,骇为妖物,举国若狂,几至大变。旋经步军统领衙门飭令拆卸,群疑始息。此事更在淞沪行车以前,可为铁路输入吾国之权舆。”

最初,铁路建成后,清朝的实际掌控者慈禧太后(1835—1908,清朝晚期的实际统治者)对“铁路”这件新事物饶有兴趣,还“一本正经”地举行了“通车典礼”(见图1-9)。

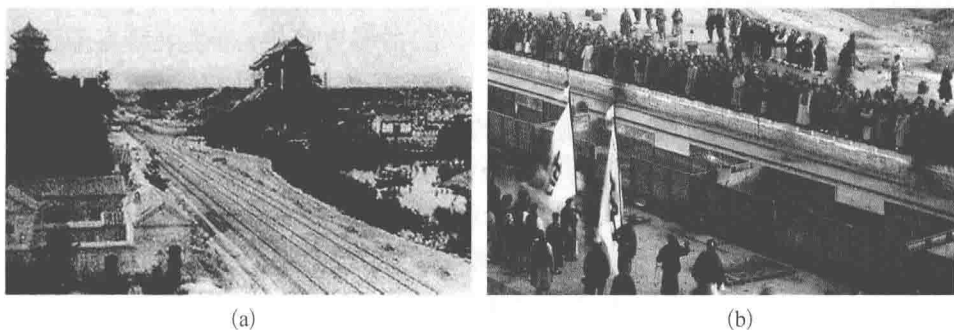


图 1-9 中国曾经的第一条铁路

(a) 中国第一条铁路;(b) “通车典礼”

当时列车行驶得飞快,声音很大,让从没见过火车的京城人士惊吓不已,纷纷指责这是怪物。慈禧太后也不喜欢这样新奇的事物,加上民间也不接受火车,就立马派人将这条小铁路拆了,中国出现的第一条铁路就这样以闹剧收场^[4]。

当时的清朝虽然已经开始承认自己的落后,但还是不愿意“以夷制夷”,接受西方世界的新事物,而全国上下对西学有兴趣的也寥寥无几。

魏源(1794—1857,清代启蒙思想家、政治家、文学家)的《海国图志》被清人视为妖书,反倒被日本人当成宝物,并成为日本明治维新的关键读物。当时的洋务运动刚刚开始,巨大的阻力也让洋务派无暇顾及铁路的发展^[5]。

1876年,英国人又在中国修建了一条铁路——吴淞铁路,它是和清朝商人合营偷偷修建的,没有得到清政府的允许,这也是中国第一条营业的铁路。铁路运营一年多,终因各种矛盾被迫停止,清政府开始和英国谈判,谈判的结果是,清政府以285 000两白银赎回铁路,随后铁轨被摧毁并全都抛进了大海。虽然此时的清朝已经接受了铁路,但这条铁路还是没运营起来。

一年后,洋务派大员丁日昌在台湾基隆矿区修建了一条铁路,主要运输煤矿,这也是我国自行修建的第一条铁路。

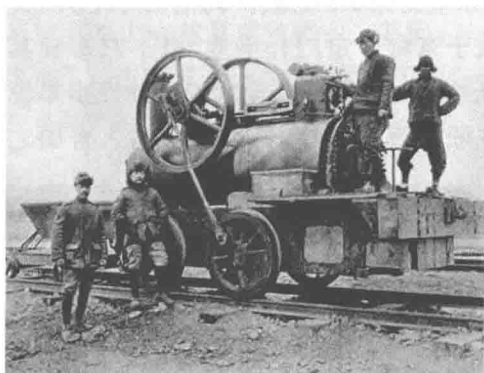


图 1-10 中国历史上的“火箭号”

1881年,中国制造了第一辆简易蒸汽机车“火箭号”(见图1-10)。这是当年唐胥铁路通车之际,中国工人凭借时任唐山开平矿务局工程师的英国人金达(Kinder, 1852—1936,英国工程师)的几份设计图纸,采用矿场起重锅炉和竖井架的槽铁等旧材料试制而成。

1888年,经过李鸿章(晚清名臣)的多方斡旋,慈禧太后力排众议准许了李鸿章在中南海紫光阁修建铁路的奏折。这条窄轨铁路从皇宫中的北海到中南海,总长度为1 510 m。铁路建成后,李鸿章又从法国进口了一台蒸汽机车和六节客车车厢作为慈禧的御车(见图1-11)。

1909年,京张铁路建成,这是中国第一条自行设计和建造的铁路,全长200多千米,历时4年多建成,是中国铁路工程技术的创举,意义颇为重大。

以上是我国在19世纪末至20世纪初,轨道交通技术“低吟浅唱”的一曲历史悲歌。

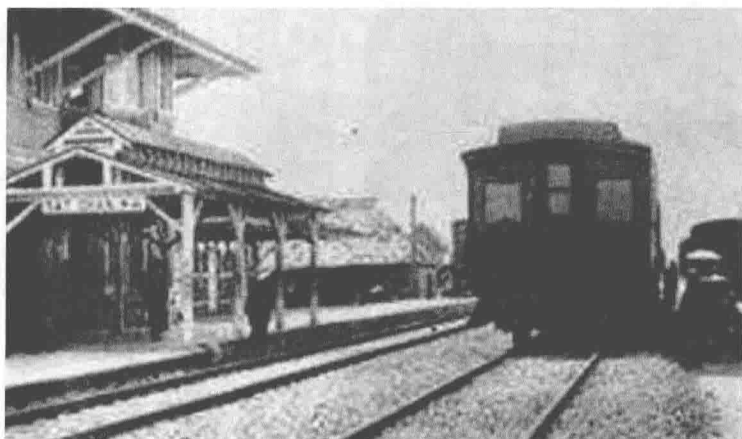


图 1-11 从北海至中南海的窄轨铁路及火车

1.2.2 新中国成立后的轨道交通

沉重的历史被伟人毛泽东领导下的中国共产党揭开了最为光辉的一页——中华人民共和国成立了，从此中国人民站起来了！

可是，由于中华民族数百年来积贫积弱的困苦，让我们不得不负重前行。

新中国成立之初，交通运输面貌十分落后，全国铁路总里程仅有 2.2 万千米。据 1949 年新中国成立初统计，当时全国有 4 069 台机车，分别来自 9 个国家的 30 多个厂家，机车型号多达 198 种，因此被人们戏称为“万国机车博物馆”。图 1-12 所示为当时被保留下来的日本 1936 年生产的火车。

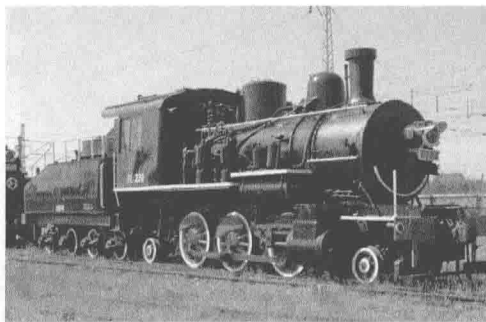


图 1-12 日本遗留的 1936 年生产的火车

随着新中国铁路运输事业的发展，对机车的需求日益增加。但是，由于我国当时铁路牵引动力以蒸汽机车开始起步，只能沿着改造、仿制到自行设计的技术路线，循序渐进。如图 1-13 所示，“前进型”到“建设型”蒸汽列车的发展代表了当时极为典型的一类机车动力发展过程。

1958 年，我国第一台内燃机车仿照苏联的 T3 型电传动内燃机车在大连机车车辆工厂试制成功（见图 1-14）。该机车速度仅为 100 km/h。

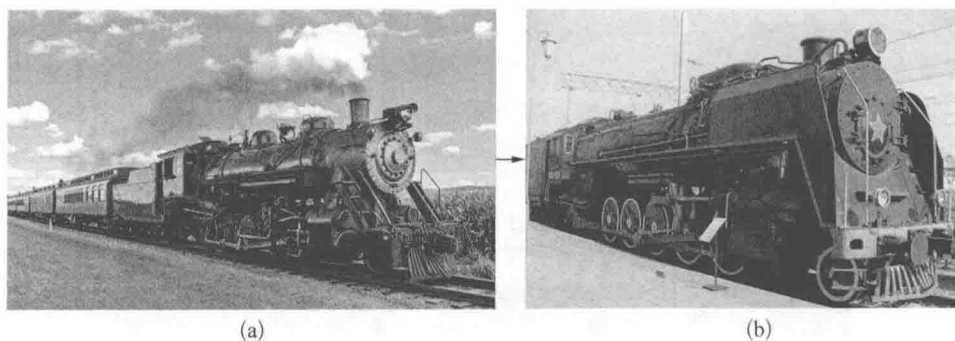


图 1-13 从“前进型”到“建设型”火车

(a) “前进型”列车; (b) “建设型”列车

1964年,我国生产的“东方红1号”内燃机车速度已经达到120 km/h(见图1-15)。此后,“东方红”系列内燃机车相继问世,列车时速及其他技术性能也得到极大的改进与提高。其间,我国以西南交通大学为主要研究单位,从1986就已经开展磁悬浮列车技术研究。1989年,国防科技大学研制出中国第一台磁悬浮试验样车。1990年,西南交通大学磁浮团队研究成功了由4台小电磁铁构成的磁浮模型车,并实现了模型车的稳定悬浮和基于直线电机的驱动。1994年,该研究团队成功地研制出了我国第一辆磁悬浮列车,并实现了系统的稳定悬浮与运行。接着,1995年,中国第一条磁悬浮列车试验线在西南交通大学建成。不过,国内在磁悬浮技术研究与应用方面与德国技术相比尚有一定差距。



图 1-14 “巨龙号”电传动内燃机车



图 1-15 “东方红1号”内燃机车

我国从2000年开始生产“神州号”内燃机车(见图1-16)。与此同时,我国电动机车的研制与生产也在同步进行。其中,以“韶山”系列为代表的列车(见图1-17),其行驶速度与整体技术性能都在迅速提升。2007年,我国开始吸收“西门子”技术生产“和谐号”电动机车(见图1-18)。

2013年,以CRH380BL技术平台为基础,中国北车所属长客股份有限公司和唐车公司联合设计生产CRH3A型动车组。CRH3A型动车组设计速度最高达250 km/h。紧随其后的CRH3C型电力动车组采用动力分布式,每列8节编组,4动4拖,最高运营速度达350 km/h(见图1-19)^[6]。



图 1-16 “神州号”内燃机车

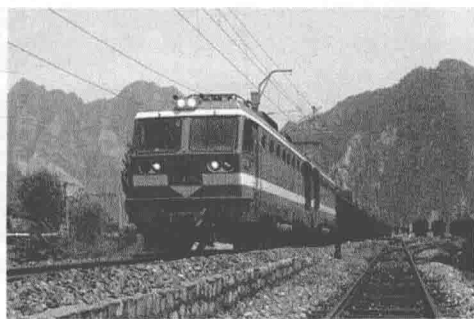
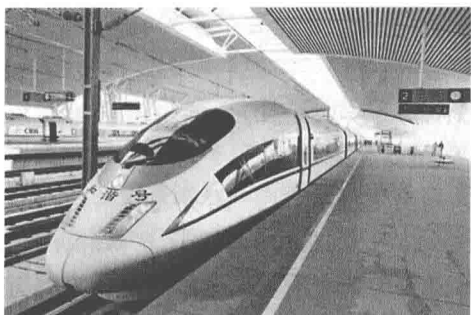


图 1-17 国内早期电力机车



(a)



(b)

图 1-18 “和谐号”电动列车

(a) “和谐号”客列;(b) “和谐号”货列

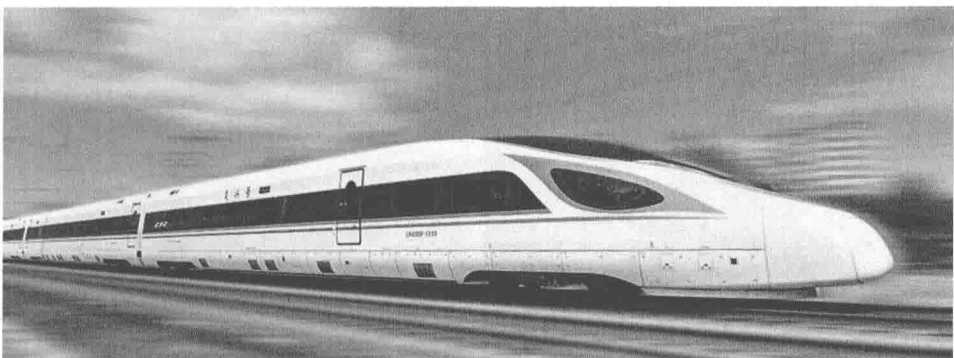


图 1-19 最高速度为 350 km/h 的“复兴号”电气机车

2006年,采用德国技术的上海磁浮列车示范运营线开通运营,这也是我国首条商业化运营的磁浮线路。上海现有4列磁浮列车,其中有1列为国产化列车(见图1-20)。

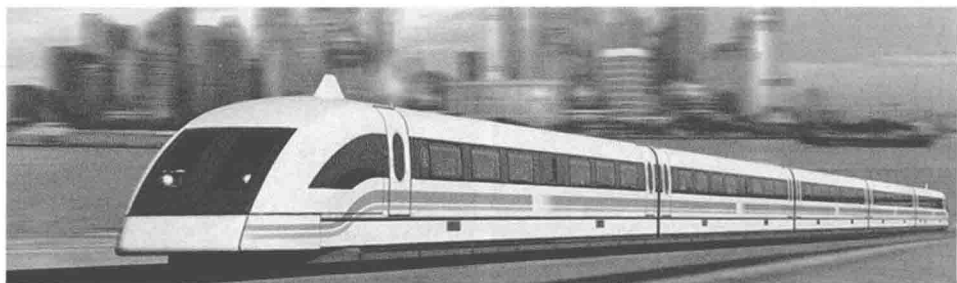


图1-20 上海运营中的磁悬浮列车

2017年,国内最高速的悬挂式单轨列车在“中车四方”下线,进入型式试验和试运行阶段,其设计速度为80 km/h,最高运行速度为70 km/h。“中车四方”研制的悬挂式单轨列车应用了部分高铁技术,提升了运营安全性和乘客舒适度,适用于景区、山地、城市轻型交通。

2017年由中车株洲电力机车研究所有限公司研制的智能轨道快运系统(autonomous rail rapid transit, ART)在株洲首次亮相(见图1-21)。这种融合了现代有轨电车和公共汽车各自优势的新型交通工具属于“跨界之作”,它颠覆了人们对城市交通的传统认识,为解决大中城市出行难带来了新的选择和体验。实际上,这是一种采用图像识别技术,使得列车能够自主遵循地面交通标志线行驶的技术,因此将其称为智能轨道快运系统。其中的“轨道”并不是实际的轨道,而是两条并行的彩色线条,故称其为虚拟轨道。

2018年,国内最高时速的悬挂式单轨列车在青岛正式进入试运行阶段(见图1-22)。此类空中列车采用的是新型的永磁电机,爬行能力是普通列车的



图1-21 全球首辆智能轨道快运列车

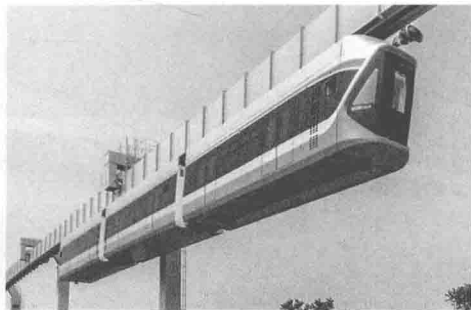


图1-22 我国最高时速悬挂式单轨列车