

轨道交通电气化概论

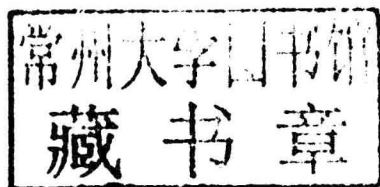
GUIDAO JIAOTONG DIANQIHUA GAILUN

■ 杨中平 吴命利 主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

轨道交通电气化概论

杨中平 吴命利 主编



中国铁道出版社

2013年·北京

内 容 简 介

本书为轨道交通电气化相关教材,全书共6个章节。第1章介绍了轨道交通发展概况,包括世界轨道交通发展概况以及我国轨道交通发展概况,同时介绍了轨道牵引电气化的发展概况。第2章介绍了直流牵引供电系统中的城市轨道交通供电系统、直流牵引变电所及直流牵引网等内容。第3章介绍了交流牵引供电系统的基本概述、交流牵引网、变电所、电力供电系统及电力调度自动化系统等内容。第4章介绍了刚性接触网、柔性接触网及受流等内容。第5章介绍了轨道交通电力牵引传动系统、列车辅助供电系统及列车网络控制等内容。第6章介绍了信号系统中信号系统概述及作用、轨道电路、计算机联锁、调度集中等相关内容。

图书在版编目(CIP)数据

轨道交通电气化概论/杨中平,吴命利主编. —北京:
中国铁道出版社,2013.8
ISBN 978-7-113-17007-3

I. ①轨… II. ①杨… ②吴… III. ①电气化铁道-
电气系统-概论 IV. ①U22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 162023 号

书 名: 轨道交通电气化概论
作 者: 杨中平 吴命利 主编

责任编辑: 黄璐 王风雨 电话: 010-51873138 电子信箱: tdpres@126.com
封面设计: 郑春鹏
责任校对: 马丽
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.tdpres.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: 700 mm×1000 mm 1/16 印张: 12.75 字数: 164 千
书 号: ISBN 978-7-113-17007-3
定 价: 43.00 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

近年，我国干线铁路和城市轨道交通发展十分迅速，有力地推动了国民经济的快速增长，极大地方便了人们的出行，并以其建设速度快、规模大、新技术应用多而受到国内外的广泛关注。以干线铁路为例，在运营里程方面，到 2012 年年底，我国干线铁路营业里程已达 98 000 km，居世界第二位。其中，高速铁路里程达到 9 356 km，在全球拥有高速铁路的 14 个国家或地区中，起步较晚的我国拥有的里程已跃居世界第一位。根据《铁路“十二五”发展规划》，到 2015 年，我国铁路营业里程将达 120 000 km，其中，高速铁路将达到 12 000 km。在技术方面，“和谐号”大功率交流电力机车、“和谐号”CRH 系列动车组、基于 GSM-R 无线通信的 CTCS-3 级列车运行控制系统等已成功投入应用，多条 300~350 km/h 速度等级、世界一流水准的高速铁路的成功开通，标志着我国轨道交通技术已达到一个崭新的水平。与此同时，我国的城市轨道交通也正处于蓬勃发展的时期，截止到 2012 年 12 月 31 日，我国内地共有 17 个城市拥有 64 条投入运营的城市轨道

交通线路，线路里程达 2 102 km。目前，我国已拥有普通地铁、直线电机地铁、独轨交通、现代有轨电车等多种交通制式，在技术上呈现出多样化。

随着我国轨道交通的持续快速发展，国家需要培养大量的专业技术和管理人才来适应这种发展形势。轨道交通是由工务工程、牵引供电、列车、列车运行控制、运营调度、客运服务等多个子系统组成的一个庞大复杂的现代化系统，并融合了土木、机械、材料、电气、电子、计算机、通信、控制等学科的高新技术。目前，我国已有很多针对轨道交通的工务工程、牵引供电等子系统技术的专业书籍出版，然而，就我们知道的范围，还少有针对性针对轨道交通中某学科技术介绍的书籍。“电气”作为轨道交通的一个重要学科方向，几乎在轨道交通的各子系统中都有应用。为了让轨道交通专业的在校学生、科研人员以及管理人员对轨道交通电气化有一个全面的、初步的了解和认识，我们组织编写了这本《轨道交通电气化概论》。

全书共由 6 章组成。

第 1 章《绪论》介绍了电气化铁道的发展历程，并简述了其中的关键技术的演变过程。

第 2 章《直流牵引供电系统》主要结合我国城市轨道交通，阐述直流牵引供电系统的构成和原理。

同直流牵引供电系统相比，交流牵引供电系统具有供电电压高、传输功率大的特点，在干线电气化铁道得到广泛应用。第 3 章《交流牵引供电系统》主要结合我国电气化铁道技术现状，介绍了交流牵引供电系统的构成和原理。

作为牵引供电系统的重要组成部分，接触网承担着向列车传输电能的作用，第 4 章《接触网》先简要介绍了接触网的工作特点及基本要求，然后对接触网和受流装置的构成及原理作了详细

说明。

第5章《轨道交通机车车辆》首先介绍了轨道交通机车车辆的分类及组成，在此基础上重点阐述了其中的电力牵引传动系统、辅助供电系统、列车网络控制系统的功能及结构原理。

第6章《信号系统》首先介绍了信号系统的基本概念与发展，其次对轨道电路、计算机联锁、调度集中等关键子系统的构成与原理作了进行了说明，最后对我国城市轨道交通的信号系统以及我国高速铁路列车运行控制系统作了简明介绍。

本书由北京交通大学电气工程学院杨中平、吴命利组织编写，各章节的具体执笔分工是：第1章由曾国宏编写；第2章由吴命利编写；第3章第3.3节由李腾编写，其余章节由吴命利编写；第4章由刘文正编写；第5章第5.1节由吴健编写，第5章第5.2节由曾国宏编写，第5章第5.3节由刘建强编写，第5章第5.4节由黄彧编写；第6章由曹源编写。全书由杨中平统稿，并由刘建强完成文字修改和图表的录入整理工作。

作为轨道交通电气化的一本入门书，为了易于读者理解书中内容，我们尽量避免用复杂的数学公式，而是力图通过浅显的文字和图片来说明相关内容。然而，由于我们的学识有限，错误与遗漏之处在所难免，我们殷切地期待读者的批评、指正。

编者

2013年7月

目 录

1 轨道交通电气化概述

- 1.1 轨道交通发展概况 1
 - 1.1.1 世界轨道交通发展概况 1
 - 1.1.2 我国轨道交通发展概况 7
 - 1.1.3 我国铁路发展蓝图 11
- 1.2 轨道牵引电气化发展概况 14
 - 1.2.1 电力牵引发展历程 15
 - 1.2.2 电气化轨道交通现状 23
 - 1.2.3 电力牵引的优点 25

2 直流牵引供电系统

- 2.1 城市轨道交通供电系统概述 27
 - 2.1.1 供电系统构成 27
 - 2.1.2 电网向城市轨道交通的供电 29
 - 2.1.3 直流供电电压 31
- 2.2 直流牵引变电所 31
 - 2.2.1 主接线及供电方式 31
 - 2.2.2 整流机组 34
 - 2.2.3 直流馈线保护 39
- 2.3 直流牵引网 40
 - 2.3.1 网络构成 40
 - 2.3.2 钢轨电位 42

2.3.3 杂散电流及其防护	43
----------------	----

3 交流牵引供电系统

3.1 交流牵引供电系统概述	45
3.1.1 供电系统构成	45
3.1.2 供电电压	47
3.1.3 外部电源	48
3.1.4 牵引变电所向牵引网的供电	48
3.2 交流牵引网	50
3.2.1 供电方式	50
3.2.2 高铁牵引网	52
3.3 变电所	53
3.3.1 主接线	53
3.3.2 牵引变压器	55
3.3.3 高压开关设备	57
3.3.4 无功补偿及电能质量	60
3.3.5 防雷与接地	63
3.3.6 综合自动化系统	65
3.4 铁路电力供电系统	66
3.5 电力调度自动化系统	68

4 接触网

4.1 接触网概述	71
4.1.1 接触网的工作特点及基本要求	71
4.1.2 接触网的分类	72
4.2 刚性接触网	73
4.2.1 接触轨	73
4.2.2 架空接触轨	75

4.3 柔性接触网	77
4.3.1 柔性接触网的悬挂类型	78
4.3.2 接触网的组成	80
4.3.3 接触网系统的构成	85
4.4 受流	89
4.4.1 受流器的构造	89
4.4.2 高速受流	91

5 轨道交通机车车辆

5.1 轨道交通机车车辆概述	93
5.1.1 轨道交通机车车辆分类	93
5.1.2 轨道交通车辆的组成	102
5.2 电力牵引传动系统	110
5.2.1 牵引传动系统的功能	111
5.2.2 直流牵引传动系统构成及原理	115
5.2.3 交流牵引传动系统的构成及原理	123
5.3 列车辅助供电系统概述	133
5.3.1 列车辅助供电系统分析	133
5.3.2 列车辅助供电系统组成	137
5.3.3 列车辅助供电系统控制策略	145
5.4 列车控制网络	147
5.4.1 列车网络控制系统的功能	148
5.4.2 列车网络控制系统构成及原理	150
5.4.3 典型列车网络控制系统	157

6 信号系统

6.1 信号系统以及信号系统作用	164
6.1.1 信号的种类及显示方式	166

6.1.2	地面信号	168
6.1.3	车载信号	172
6.2	轨道电路	173
6.2.1	闭塞与轨道电路	173
6.2.2	轨道电路状态	175
6.2.3	ZPW2000A 轨道电路	176
6.3	计算机联锁	177
6.3.1	计算机联锁的定义	178
6.3.2	计算机联锁系统的功能	179
6.4	调度集中	180
6.4.1	CTC 系统硬件结构	181
6.4.2	CTC 系统软件结构	182
6.5	列车运行控制系统	184
6.5.1	列车运行控制系统构成	184
6.5.2	列车运行控制系统控制模式	184
6.6	中国城轨交通信号系统	186
6.6.1	城市轨道交通信号的结构	186
6.6.2	城轨交通 ATC 系统组成	187
6.6.3	CBTC 技术	188
6.7	中国高速铁路列控系统	190



轨道交通电气化概述

从木质轨道到钢铁轨道、从马拉车辆到万吨列车、从蒸汽机车到高速动车，轨道交通的发展经历了近两百年的历史。自从世界第一条铁路正式运营至今，轨道交通技术不断发展，机车功率和速度纪录被不断刷新，形式多样的轨道交通列车为我们的生活提供了便捷的出行条件。轨道交通的兴起和发展的过程，是人类社会对交通运输安全、经济、舒适、快速、重载等目标不断追求的过程，也是科学技术发展成果在轨道交通运输领域推广应用的过程。回顾轨道交通发展的历史，有助于我们形成对轨道交通的发展过程、目前状况和发展趋势的初步认识。本章将通过电气化铁路的发展历程和当前状况的描述，介绍其中的关键技术和发展历程，呈现轨道交通电气化的全貌，相关的技术细节将在后续各章中详细阐述。

1.1 轨道交通发展概况

1.1.1 世界轨道交通发展概况

1. 蒸汽机车的诞生和英国铁路的发展

早在 13 世纪，英国实验科学先驱罗吉尔·培根曾经预言过：“在将来，马车不用马拉，并会以难以置信的速度飞驰”。尽管这个预言在当时被看成是“异端邪说”，但随着特里维西克造出世界上第一台蒸汽机车，这个大胆而新颖的设想终于开始了实践的过程并逐步成为现实。

16 世纪中叶的英国，人们用木头铺设两条平行的轨道，马匹拉着小车在上面行驶，以便更为容易地运送煤炭和矿石。由于木质轨道磨损大、不耐用，1767 年出现了生铁做的轨道，才有了“铁路”的称谓。19 世纪初形成了实用的轨道方案，即把铁轨钉在枕木上以分散总量，再将枕木铺在碎石道床上，不仅可以均匀地将重量分散到路基上，还可以防止枕木移动、缓冲车辆运行的冲击，方便调整轨道高度和线路维护，这样的“马车铁路”使运输效率得到了一定的提高。

18 世纪中叶，英国人詹姆斯·瓦特（James Watt）改良了蒸汽机，推动了人类从手工劳动向大规模机器生产的重大转变，随后工业革命由英国传播到整个欧洲大陆，19 世纪传播到北美地区。工业革命大大提高了劳动效率，采矿、冶炼、纺织、化工、机械制造等工业相继出现，并由此带动了煤炭、矿石、钢铁、纺织品等原材料和制成品的大规模、长距离运输，同时还推动了城市化和人口向城市的转移。在这样的背景下，各种传统的运输工具，如马车、牛车、人力车、木帆船等，已远远满足不了大规模人员和货物运输快速增长的迫切要求，尤其是牵引动力方面的制约，这促使人们发展更大容量、更加快捷的新型运输方式。因此，铁路运输在英国出现具有历史的必然性，一方面是科学技术的发展，另一方面是工业革命的迫切需求，同时，铁路的发展提高了运输效率，进一步促进了工业革命的深入和科学技术的进步。

18 世纪后半叶，蒸汽机已得到了普遍的应用，许多富有创新精神的人开始了将蒸汽机用于运输牵引的探索和尝试。1804 年，英国人理查德·特里维西克（Richard Trevithick）制成了世界第一台在铁轨上行驶的蒸汽机车，总质量为 5 t，每小时可拉 10 多吨的货物行驶 8 km，如图 1-1 所示。这种机车运行过程中排出大量的烟雾和蒸汽，因而一开始就有了“火车”这个称谓，并且沿用至今——尽管现代的机车早已远离了“火”源。早期的机车本身很重，同时还必须搭载大量的水和煤，所以在载重量上和速度上都不如马拉的轨道车辆，然而它却是现

代轨道交通发展的起点。

1825 年,在英格兰东北部建成了当时世界最长的铁路——全长 32 km 的斯托克顿—达林顿 (Stockton-Darlington) 铁路。斯蒂芬森 (George Stephenson) 参与了轨道的设计和改进,并于 9 月 27 日亲自驾驶自己设计的“动力”1 号机车,满载 550 名乘客从达林顿出发,以 24 km/h 的速度成功完成了首次运行试验,由此被人们尊称为“蒸汽机车之父”。1829 年斯蒂芬森又研制了 45 km/h 的“火箭号”蒸汽机车 (图1-2),并开创了自己的公司,向包括英国在内的欧洲国家及美国提供高性能的蒸汽机车。

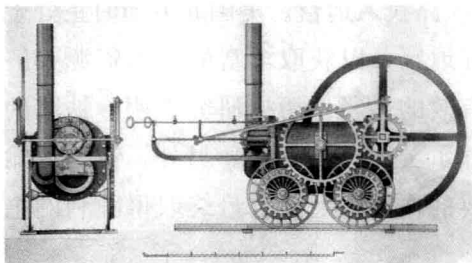


图 1-1 特里维西克的蒸汽机车草图

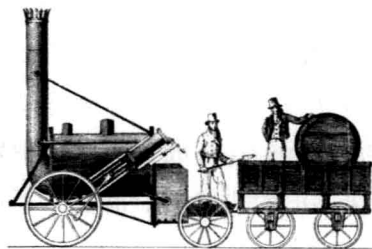


图 1-2 斯蒂芬森的“火箭号”蒸汽机车

1830 年,英国第一条城际铁路,也是世界首条复线客运铁路,全长 56 km 的利物浦—曼彻斯特铁路建成并投入商业运行。包括标准轨距 (1 435 mm, 即 4 英尺 8.5 英寸)、左手行车、行车信号、车钩连接等诸多制式由此开始设立并在世界范围推广。铁路迅速、便利、经济等诸多优点得到了人们的认可,同时钢铁产量的大幅提高,为英国铁路的高速发展提供了条件,在随后短短的 20 年时间里,英国就建成了近 1.2 万 km 的铁路;到 1890 年形成了总长达 3.2 万 km 的铁路网。

在英国首条铁路的成功运营和示范效应的带动下,其他国家也相继开始兴建铁路,使其在很短的时间内在世界范围内得到推广,其中首条铁路通车的国家及通车时间见表 1-1。

表 1-1 各国首条铁路通车年份

开通年份	国名	开通年份	国名	开通年份	国名
1825	英国	1837	俄国	1851	巴西
1830	美国	1838	奥地利	1853	印度
1832	法国	1839	荷兰	1854	澳大利亚
1835	比利时	1839	意大利	1855	埃及
1835	德国	1844	瑞士	1872	日本
1836	加拿大	1848	西班牙	1876	中国

2. 美国和欧洲轨道交通的大规模建设

美国于 1830 年建成了从巴尔的摩到俄亥俄的全长 21 km 的铁路，到 1850 年已有 1.45 万 km 左右的铁路投入运营。美国北方当时正处于工业化的发展初期，亟待开发西部地区，以获取丰富的自然资源并解放劳动力，而发展铁路运输是最有效的途径。历史研究表明，铁路的建设在美国经济成长的过程中发挥了关键性的作用。另外，铁路运输在美国的南北战争中也发挥了重要的作用，是北方最终取得胜利的主要因素之一。

从 1850~1910 年的 60 年间，美国共修筑了 37 万余 km 的铁路，平均每年筑路 6 000 余 km。1916 年，美国铁路总里程达到了历史最高峰——40.8 万 km，构成了美国特有的多线平行的路网结构。图 1-3 所示为美国铁路网的分布情况，图 1-4 所示为美国在 1830~1920 年期间铁路累计里程的增长情况（单位：千英里，1 千英里=1 609.3 km）。

法国于 1827 年在里昂附近建成了一条长 21 km 的圣艾蒂安—昂德雷济约铁路，用于矿山与港口之间的煤炭运输。最初利用列车的自重下行，用马匹牵引空车上行。在此基础上，1832 年开通了圣艾蒂安—里昂之间的客运线路，第一次采用蒸汽机车牵引。截止到 1842 年的 15 年时间里，法国仅修建了 569 km 的铁路，但铁路的优越性在此期间已逐渐被政府和民众所接受。这一年，法国政府通过了给私人公司参与铁路建设提供补贴的法案，法国铁路从此进入快速发展期。1850 年铁路里程达到了 3 000 km，1872 年增长到 17 340 km，1914 年第一次世

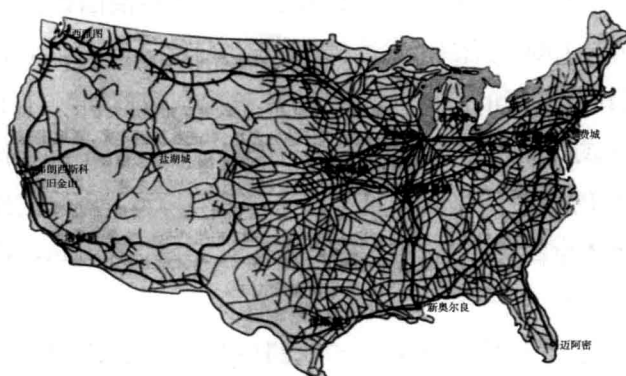


图 1-3 美国铁路网分布及早期建设历程

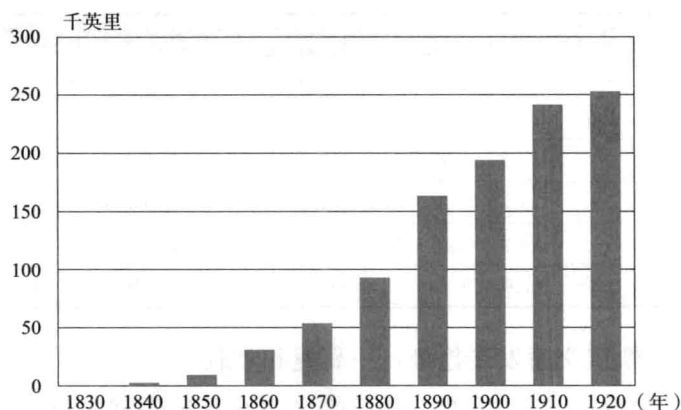


图 1-4 美国 1830~1920 年铁路里程增长情况

世界大战前达到了 40 000 km。

德国于 1835 年 12 月 7 日首次在巴伐利亚州纽伦堡—菲尔特的铁路上使用斯蒂芬森公司生产的蒸汽机车，1845 年铁路里程达到了 2 000 km，10 年后增加到 8 000 km，1890 年达到了 50 000 km。与法国的发展模式不同，德国铁路建设一直以国有化为主，并以工业化为目标。

俄国于 1837 年建成了圣彼得堡—沙皇村（普希金市）之间 17 km 的铁路；1851 年建成了第一条总长 649.7 km 的圣彼得堡—莫斯科干线铁路，并形成了 1 524 mm 的俄国轨距标准。1861 年农奴制被废除，为

铁路的发展提供了劳动力、市场和需求。1880 年俄国铁路总里程达到了 23 000 km, 1900 年增长到 56 000 km。从 1891 年开始, 出于对西伯利亚和亚洲其他地区的战略和政治利益考虑, 俄罗斯倾注了大量的财力、物力 (远超过同期的军费开支), 修建了从莫斯科—符拉迪沃斯托克 (海参崴) 的西伯利亚大铁路, 这条全长 9 288 km 的世界最长铁路直到 1916 年才全部完工, 铁路总里程达到了 85 400 km, 排在美国之后列世界第二位。

到 20 世纪 20 年代, 欧美各国铁路的建设先后达到巅峰, 占全球铁路总里程的 79.4%, 具体数据见表 1-2。

表 1-2 世界各地 1840~1922 年铁路总里程变化情况 (单位: 万 km)

地区	1840	1850	1860	1870	1880	1890	1900	1910	1916	1922	比例
欧洲	0.34	2.40	5.26	10.57	16.89	22.30	27.81	31.78	33.95	35.01	29.56%
美洲	0.56	1.59	5.48	9.40	17.55	33.23	40.30	52.72	58.76	59.24	49.87%
亚洲	—	—	0.13	0.80	1.69	3.50	6.61	11.83	13.35	14.81	12.47%
非洲	—	—	0.06	0.19	0.48	0.95	2.02	3.69	4.82	4.95	4.17%
澳洲	—	—	0.04	0.18	0.79	1.89	2.40	3.10	3.64	4.74	3.99%
总计	0.90	3.99	10.97	21.14	37.40	61.87	79.14	103.12	114.52	118.75	—

3. 世界轨道交通发展趋势——高速和重载

从 20 世纪 20 年代开始, 由于铁路建设及运输需求逐渐饱和, 同时航空运输的发展及公路运输的普及对铁路运输形成了强有力的竞争, 欧美国家铁路建设速度逐渐趋缓或停止, 铁路客货运量的比重日益降低, 很多铁路无利可图、亏损严重, 甚至在一些国家铁路被看做是“夕阳产业”。从 20 世纪 50 年代开始, 不少国家不得不将铁路收归国有, 并持续封闭和拆除线路, 缩减运营里程, 以降低运营成本。例如美国铁路总里程已从巅峰时期的接近 41 万 km, 减少到 2012 年的 22.3 万 km, 缩减了 45%; 英国缩减的比例更高, 从接近 3.9 万 km 减少到 1.7 万 km, 缩减了 56%; 法国铁路里程从 1938 年的巅峰 6.48 万 km 减少到 2010 年的 3.14 万 km, 缩减了 51.5%。

20 世纪 60 年代末开始,尤其是 70 年代中期的世界石油危机后,因为铁路能源消耗较飞机、汽车低,噪声污染较小,运输能力大,安全可靠,作为陆上运输的骨干地位被重新确认。除美国、加拿大仍以传统的内燃牵引为主外,很多国家都确定以电力牵引为发展方向,先进技术被广泛采用,例如牵引动力变革、集装箱运输、通信信号改进、轨道结构加强,以及管理自动化等,高速铁路和重载运输成为重点发展的方向。

1964 年日本建成了从东京到大阪的东海道新干线,最高时速 210 km,实现了与航空竞争的预期目标,客运量不断增加,利润逐年提高。高速铁路为亏损严重的资本主义国家的铁路提供了一种解脱困境的出路。于是从 20 世纪 60 年代开始,很多发达国家纷纷兴建新线和改建旧线,以满足 250~300 km/h 的速度要求。1981 年 9 月,法国巴黎—里昂之间的 TGV (法语“高速列车”的缩写)开始运营,打败了巴黎—里昂的航空运输业并很快盈利,仅用 10 年的时间就完全收回了建设成本,还在 1990 年 5 月 18 日创造了 515.3 km/h 的世界试验纪录,2007 年 4 月 3 日再次将该纪录提高到 574.8 km/h。

铁路的重载列车发展很快,牵引吨数都在 6 000 t 以上,很多超过了 10 000 t。美国、加拿大、澳大利亚等国,采用同型车辆固定编组,循环运转于装卸点之间,称为单元重载列车。俄罗斯除积极发展重载列车外,还大量开行两列甚至三列合并运行的组合列车,在不需要普遍延长站线的情况下,提高铁路的输送能力。

1.1.2 我国轨道交通发展概况

在欧美开展轰轰烈烈的资产阶级革命和工业化时期,中国还处于封建社会。受当时社会形态和生产力发展水平的制约,从统治者到普通百姓,都还没有认识到铁路运输的必要性和重要性,甚至将其视为会破坏风水的妖物而加以拒绝。西方国家出于自身的利益考虑,多次试图说服清政府修建铁路,甚至在没能得到许可的情况下,英、美等