

改革开放40年中国重载铁路的发展

刘建新¹, 蔡久凤²

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:为不断满足国民经济的发展需求,改革开放40年来中国大力发展了重载铁路运输,取得了巨大的成就。在这40年里,中国重载铁路最大列车牵引重量从3500 t到3万t,重载铁路线路从既有线路扩能改造,到新建大秦铁路、包神铁路、神朔铁路、朔黄铁路,再到中国第一条30 t轴重设计标准的山西中南部铁路,直到正新建的最长运煤专线蒙华铁路,中国铁路科技人员始终秉承“交通强国、铁路先行”的理念,不断提升和优化铁路重载技术。当前,中国已经拥有了25 t、27 t轴重重载铁路的成套成熟技术和标准体系,也发展出中国特有的30 t轴重重载铁路技术。在概述世界重载铁路发展历程的基础上,论述了1980年代中国重载铁路既有线路扩能改造工程,重点介绍了改革开放40年来中国重点建设的、发挥重要作用并取得巨大成就的几条重载运输大通道;介绍了重载铁路技术面临的长期挑战;从机车、货车、轨道、控制和通信技术方面重点阐述了取得的进展和技术成就以及重载运输的国际合作交流情况和相关重大获奖成果;结合现今世界重载铁路发展趋势和中国铁路技术现状,提出了中国重载铁路发展的重点和方向:大轴重重载铁路技术、多式联运技术、重载快捷化技术和清洁化、智能化、互联互通化。

关键词:改革开放;重载铁路;运输通道;技术进展;国际合作

中图分类号:F532

文献标志码:A

文章编号:1671-6248(2018)06-0068-12

Development of heavy-haul railway over the past 40 years of Reform and Opening up

LIU Jianxin¹, CAI Jiufeng²

(1. State-Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031,

Sichuan, China; 2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong

University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

收稿日期:2018-09-11

作者简介:刘建新(1965-),男,新疆伊犁人,教授,博士研究生导师,工学博士。

Abstract: Over the past 40 years of Reform and Opening up, China has been vigorously developing heavy-haul railway in order to meet the needs of the growing national economy and has made significant achievements. In the past 40 years, the maximum traction weight of Chinese heavy-haul railway has been improved from 3500 tons to 30000 tons. Transportation lines of heavy-haul railway were transformed from expansion of existing lines to building new ones such as Datong-Qinhuangdao railway, Baotou-Shenmu railway, Shenmu-Shuozhou railway, Shuozhou-Huanghua railway, Chinese first 30-ton axle-load line-Shanxi's Mid-South region railway, and the longest special coal transportation line-Inner Mongolia-Jiangxi railway, which is currently under construction. Upholding the concept of "railway construction leads to a stronger transportation country", the railway technicians have been upgrading and optimizing heavy-haul technology. Nowadays, China has owned a complete set of mature technologies and standard system for 25 tons and 27 tons axle-load heavy-haul railways, and has developed distinctive 30 tons axle-load heavy-haul railway technologies. In this article, the world's heavy-haul railways are outlined, and the capacity expansion of existing heavy-haul railways of China in the 1980s are highlighted, with a focus on summarizing several major heavy-haul transport corridors that have been given great efforts, which played an important role and have made great achievements in the past 40 years of Reform and Opening up, and the long-term challenges facing heavy-haul railway technology. It also highlighted significant progress and technological achievements in locomotive, wagon, track, control and communication industries. Then, it commented on international cooperation and communications as well as related major award-winning achievements in heavy-haul transportation. Finally, combined with the development trend of world's heavy-haul technologies and the current situation of Chinese railway technologies, the main development trend and directions of heavy-haul railways in China are discussed, such as big axel load heavy-haul railway technology, multimodal transport technology, fast heavy haul technology and clean, intelligent and interconnected development.

Key words: Reform and Opening up; heavy-haul railway; transport corridor; technological progress; international cooperation

当今世界,铁路被看作国民经济的大动脉,在很多国家的经济发展中都发挥着至关重要的作用。对于一些幅员辽阔、资源丰富及诸多能源和矿石需求较大的国家而言,确保大宗货物高效率、低成本的运输是国家经济发展的当务之急,但是普通铁路的线路情况和运能远远不能够满足这种发展需求。在这种情况下,具有运能大、效率高、运输成本低等诸多优点的重载铁路运输在世界范围内发展起来。作为一个土地面积 960 多万 km^2 、煤炭等诸多资源丰富但分布不均匀以及人民物质需求极大的国家,中国自改革开放以来也积极地加入到大力发展重载铁路的浪潮中来。

在中国重载铁路运输的研究过程中,孙竹生等在 20 世纪 80 年代就研究了中国重载铁路运输建设的重要性^[1-2],孙翔提出建立完整的铁路重载运输技术体系^[3],其后田葆桢、胡亚东、耿志修和凌云等分别从不同角度阐述了中国重载铁路和世界重载铁路运输的发展历程^[4-7]。本文重点介绍了改革开放 40 年来,中国重点建设的、发挥了重要作用并取得巨大成就的几条重载运输大通道,点明了中国重载铁路技术面临的长期挑战,从机车、货车、轨道、控制与通信等几个方面,较为全面地阐述了中国重载技术在近几十年来取得的进展和技术成就,并梳理了中国在重载运输技术方面取得的相关重大获

奖成果。最后,文章结合现今世界重载铁路趋势和中国铁路技术现状,提出了中国重载铁路发展的重点和方向。

一、概述

20 世纪,随着世界经济的发展,人们对生活资料和生产资料的需求越发增大,国际贸易也越来越频繁,普通的运输方式比如公路运输、航空运输和普通铁路的运能已经不能够满足大宗货物的运输需求,而且成本较高。另外,重载铁路运输在环境保护方面具有可持续发展的优势也逐渐成为国际共识。在这种时代背景下,重载铁路在世界范围内逐渐兴起,尤其是在幅员辽阔和资源丰富的国家中备受关注。

美国作为主要发达国家,国内对于大宗生产资料等资源需求日益剧增,于是率先大力发展起重载铁路。1958 年,世界首列重载单元列车在美国开行^[4]。这列重载列车由美国南太平洋铁路公司(SP)负责运营,载重达到 7 600 t。美国铁路大宗货物重载运输主要以煤炭运输为主。现美国铁路总长 23 万 km,而其中重载运输 I 级线路就达到 19.4 万 km,居世界首位。受到美国的影响,加拿大随后也大力发展重载铁路,目前其重载运输里程约 5.7 万 km。因加拿大重载运输模式与美国一致,所以业内一般将两者合称北美重载运输。南非由于矿产等资源丰富,运输需求大,所以在 20 世纪 60 年代末就结合世界重载技术,发展了具有本国特色的重载铁路。现在南非重载运输线路主要有 2 条:一条是由塞申到萨达纳港的矿石运输线;另一条是由德兰士瓦煤田到理查兹湾的煤炭运输线。澳大利亚上世纪 80 年代引进北美重载运输技术,现重载运输产值占全澳 GDP 的 1.7%,重载运输货运量占澳货运市场的近 50%。而俄罗斯则是继承了前苏联的重载铁路运输模式,主要以超长组合列车的方式运行。俄罗斯在 2015 年进行线路改造,增大货车载重,开始在客货混运线路上开行 9 000 ~ 12 000 t 重载列车。

一般认为,建设有重载运输专线,同时列车重量 5 000 t 以上,称为重载铁路。现在,发展重载运输的国家已经遍及了五大洲所有铁路大国,像中国、巴西、瑞典、印度、德国、波兰等国也在 20 世纪后期纷纷加入发展铁路重载运输的行列。

二、重载铁路的发展

(一) 既有线扩能改造和前期技术储备

20 世纪 80 年代初,中国的铁路运输能力与国民经济的发展依旧存在着严重不匹配。当时中国铁路货运量的 60% 以上集中于京广、津沪、京沈、哈大等总长约 1.25 万 km 长的 14 条繁忙干线上^[1],因此,主干线所承载的货物运输量尤其是西部煤炭资源的运输量已经接近甚至达到了线路所能承载的极限。但是与运量成为对比的是,在中国这 14 条繁忙主干线上,所能承载的平均列车重量为 2 400 t,最大列车重量也仅为 3 500 t。相比较而言,前苏联 1980 年的最大列车重量已经达到 6 000 t,美国的最大列车重量更是达到了 15 000 t^[2]。因此,既有线运能还具有很大潜力可以挖掘。

改革开放初期,中国财力和物力紧张,无法在较短时间内对铁路建设进行大规模投资,无条件立即建造货运重载专线,而改造既有线工期短,收效快,可以采取边运营边改造的方式,还可以在短时间内缓解铁路货运的困难。于是,对具有较大运能潜力的既有线进行改造成了当时的必要选择。

在 20 世纪 80 年代初中期,中国铁路重载技术研究的重点就是打好重载运输的基础并进行技术储备,主要有两个研究方向:一方面积极创造条件,开行少量的不同模式的重载列车,例如在既有线石德线和石太线等铁路线段开行 5 000 ~ 6 000 t 整列式列车以及 7 000 ~ 8 000 t 的组合式列车;另一方面发展超普牵引的 4 000 ~ 5 000 t 货物列车,并提高列车运行速度。

1984 年 11 月,北京铁路局在大同一沙城—丰

台—秦皇岛间首次开行由两列普通货物列车合并的重载列车,随后于1985年3月开行了大同一秦皇岛的组合式重载列车,列车总重7 400 t,属双机牵引。1986年4月1日正式纳入运行图,每天开行6对^[8]。在之后2年内,济南、郑州、上海和沈阳铁路局纷纷开行了组合式重载列车。1985年10月,在石太、石德、津浦线(主要是大郭村—济南西)开行了非固定式的重载组合列车,每天开行1列;在平顶山—武汉间,隔日开行1列双机牵引6 500 t的重载组合列车;徐州北—南京东每日开行1对双机牵引(7 000~8 000 t)的重载组合列车。1986年4月,山海关—沈阳段下行方向正式开行了7 000 t重载组合列车^[9]。

20世纪80年代既有线改造工程的成功实施,为中国后续新建重载运输通道奠定了丰富的前期技术储备基础。

(二)西煤东运重载运输通道

1. 第一条北通道——大秦铁路

在20世纪80年代末期,中国决定修建第一条双线重载电气化运煤专用一级铁路——大秦铁路。线路设计全长653 km,纵贯山西、河北、北京、天津,是中国西煤东运的第一条北方通道,主要承担晋北、内蒙西部和陕北的煤炭外运任务。大秦铁路于1985年开工,1988年12月28日第一期工程试运开通,1992年12月31日全线试运开通^[10-11]。2014年4月2日,中国第一列牵引轴重超过3万t、全长共3 971m的重载列车在大秦铁路上试验运行成功,成为中国重载运输上的一个重要里程碑。自一期工程线路段试运开通之后,若以煤炭年运量作为评价指标,可将大秦铁路重载运输发展过程分为4个阶段^[12-14]:

第一阶段为1989至2002年。这一阶段主要开行5 000 t级货物列车,年运量较少。1989年大秦铁路年运量2 007万t,之后几年以每年13.4%的增速成长,到2002年年运量达到10 339万t。

第二阶段为2003到2007年。为了缓和铁路运输的紧张情况,大秦铁路2002年进行了第一次扩能

改造,2003年9月正式开行单元万吨重载列车,年运量开始急剧增大。2004年开行万吨组合重载列车,2006年3月开行2万t组合列车。2007年,大秦铁路年运量达到3.04亿t。

第三阶段为2008到2014年。为了进一步提升大秦铁路运输能力,2008年开始对大秦铁路进行第二次扩能改造。2010年大秦铁路年运量达到4.05亿t,2011至2014年年运量均超过4亿t。2014当年运量甚至达到4.5亿t。值得一提的是,在2014年3~4月,大秦铁路上试验了3万t重载列车,是中国重载运输的一个里程碑。

第四阶段为2015到2018年。这段期间,全国煤炭消费总体下降,铁路煤炭运输业务经历了低迷到恢复的变化过程。2015年,大秦铁路年运量降到3.96亿t,到2016年年运量持续下降到3.5亿t。但是2017年恢复到4.32亿t,预计2018年大秦铁路的年运量将达到4.7亿t。

2. 第二条北通道——包神—神朔—朔黄铁路

随着20世纪90年代国内经济快速发展,大秦铁路不能完全满足华东和华南地区的工业发展需求,大秦铁路直通港口——秦皇岛港的海运能力逐渐饱和,急需新增一条西煤东运大通道,而包神—神朔—朔黄铁路就是在这样的背景下发展起来的。这条北方通道分为三段,也即包神铁路、神朔铁路和朔黄铁路。

(1)包神铁路。包神铁路于1986年5月开工,1989年3月开通运营,正线全长172km。北起京包、包兰线的万水泉站,向南经鄂尔多斯至陕西神木县大柳塔镇与神朔铁路相连,通过朔黄铁路至黄骅港出海,是神府、东胜煤田煤炭外运的北线通道^[15]。自建成以来,包神铁路货运量逐年递增,从1989年年运量81万t到2007年实现货运量10 133万t。2008至2016年年运量均超过亿t,到了2017年年运量甚至达到了19 053万t,担负着神华集团煤炭外运装车总量60%以上的任务。

(2)神朔铁路。神朔铁路在1996年7月开通运营,是中国“八五”计划重点工程建设项目。起始站为陕西神木县大柳塔镇,终点站为朔州西,正线

全长 266km。2004 神朔铁路复线贯通。2009 年,成功开行万吨列车。2014 年 3 月,神朔铁路 3 亿 t 扩能改造项目立项。2016 年 3 月开通“3+0”单元万吨列车和两万吨组合列车,仅 2016 年的年运量就达到了 2.25 亿 t。

(3)朔黄铁路。朔黄铁路于 1997 年 11 月开工建设,2002 年 11 月开通运营,西起山西朔州的神池县神池南站,与神朔铁路相连,东至河北省黄骅市黄骅港口货场,正线全长 598km。2016 年 3 月,朔黄铁路正式开行了两万吨重载列车,这创下了国内在曲线半径小、线路坡度大、操作难度高的线路上开行两万吨重载列车之最。2017 年 4 月,朔黄铁路在开行两万吨列车一周年之后,完成煤炭运输 4 076.4 万 t。目前朔黄铁路还是以开行“3+0”单元万吨列车和“2+2”组合万吨列车为主,但是量化开行 2 万 t 重载列车将成为必然选择^[16]。

3. 中南通道——山西中南部铁路

山西中南地区涵盖河东、西山、霍西和沁水四大煤田,煤炭产量占山西省的三分之二,石太铁路等既有线路因为技术标准低,铁路覆盖程度低,不足以满足该地区煤炭运输的要求,山西中南部铁路因此而建立。该铁路又称晋豫鲁铁路或瓦日铁路,是中国西煤东运的中南通道,西起山西瓦塘镇,东至山东日照港,于 2014 年 12 月正式建成通车,正线全长 1 260 km。这是中国第一条按 30 t 大轴重重载列车运行标准建设的铁路。

在 2014 至 2016 年期间,正值中国煤炭运输业务低迷,铁路煤炭运送总量大幅下降。因此,2015 年,山西中南部铁路货物年运量仅 97.4 万 t,2016 年货物年运量 297.4 万 t。2017 年年运量开始大幅增长,达到 1 993 万 t,但是与当初设计的货物年运量有很大出入。2018 年 1 月 16 日,山西中南部铁路上正式开行万 t 列车,货物运输量再次加速增长,仅 2018 年上半年就超过了 1 400 万 t,预计到 2020 年山西中南部铁路可以实现货物年运量 6 200 万 t,能够较大程度发挥该铁路重载运输通道的作用。

总而言之,这条铁路的建成代表着中国重载铁路运输技术又发生了一个大跳跃。尤其在其上 30 t

轴重重载列车运输的成功试验^[17],标志着中国 30 t 轴重重载技术趋近成熟。

(三)北煤南运重载运输通道——蒙华铁路

中国北煤南运主要是依靠铁路、水运和公路联合运输,例如大秦铁路—秦皇岛港水运、神黄铁路—黄骅港水运、山西中南部铁路—日照港水运、京广铁路以及京大—京塘高速公路等方式。可以看出北煤南运主要依托西煤东运重载运输通道直通港口,然后往南部水运,小部分依托既有线如京广、京九等客货混运线路来运煤。随着几个北方港口运量紧张,旧有的运送方式不能完全满足华中地区的工业发展需求。

2014 年,中国启动新建北煤南运重载运输大通道蒙华铁路项目,预计 2019 年底开通。这是中国在建中的最长运煤专线铁路,北起内蒙古浩勒报吉,南至江西省吉安市。蒙华铁路全长 1 814.5 km,规划设计运输能力为 2 亿 t/年^[18]。

这条铁路自 2014 年修建至今,刷新了多项国内外铁路技术记录,使得中国铁路设计及建造能力上了一个新台阶。在铁路桥梁方面:2015 年 12 月,荆州长江公铁特大桥主跨钢梁合龙,标志着中国重载铁路首次跨江成功;2017 年 8 月,世界最大跨度三塔铁路斜拉桥——蒙华铁路洞庭湖大桥主桥钢桁梁合龙,标志着世界上首次在斜拉桥上采用钢箱钢桁组合结构形式、先箱后桁成桥方法取得成功;2018 年 8 月 14 日,峡河特大桥 38.9 m 高转体成功,刷新了中国重载铁路桥梁转体的施工高度。在隧道工程方面:2017 年 12 月 20 日,亚洲最长黄土砂质隧道——万荣隧道贯通;2017 年 12 月 28 日,国内最长纯黄土隧道——郑庄隧道贯通;2018 年 5 月 16 日,双线穿越Ⅵ级(最高级)围岩的隧道——五原隧道贯通;2018 年 5 月 27 日,大中山隧道提前 5 个月贯通;2018 年 8 月 21 日,蒙华铁路第一长隧道——崑山隧道贯通。

蒙华铁路的修建增补了中国铁路南北向能力和路网灵活性,填补了区域路网的空白,是连接华

中腹地与欧亚路桥的便捷通道和国家货物运输的重要后方通道,具有非常重要的战略意义。

三、重载铁路的进步

(一)重载铁路的技术挑战

重载列车随着近几十年来的发展,列车牵引质量和轴重越来越大。因此,重载列车在提高铁路运能的同时,也对列车本身、轨道结构和基础设施的安全造成了十分严峻的挑战,这也是世界重载铁路发达国家普遍面临的工程技术难题和挑战。

1. 轮轨磨耗

由于牵引质量和轴重的增加,重载列车的车轮磨耗、钢轨侧磨和钢轨疲劳损伤愈发严重。钢轨侧磨是小半径曲线上股钢轨的主要伤损类型之一,尤其在重载铁路线上,钢轨因侧磨损伤严重不得不提前更换的例子屡见不鲜^[19]。轴重大幅提升造成了轮轨接触几何状态发生显著变化,轮轨多点接触和共形接触不可避免,造成列车的车轮磨耗和钢轨磨耗加剧^[20-21]。另外根据相关统计结果,国内重载铁路钢轨疲劳损伤严重,呈逐年增长态势,主要损伤类型是核伤、剥离掉块和裂纹,极为影响钢轨使用寿命^[19,22]。而国际上延长重载铁路线钢轨使用寿命的通用做法是钢轨打磨,但是各国的做法不太一样。中国钢轨该怎么打磨,打磨成何种形态没有一套十分成熟的方法和标准。因此,建立中国重载钢轨打磨技术的标准体系也是当前中国铁路科研人员的研究重点之一。

2. 线路基础结构损伤

因为运行列车的运量大,重载铁路所承受的载荷远远超过普通铁路,严重加剧了线路基础结构的损伤。除了钢轨的疲劳核伤外,轨道结构还存在焊接接头伤损,轨枕环裂、纵裂,扣件松动,弹条断裂,道床板结、脏污以及翻浆严重,线路空吊等问题^[19-21]。仅以焊接接头伤损为例,大秦铁路在2005年铺设B厂U75V钢轨,当累计通过总重达754百万t时,钢轨累计重伤达到16处/km,而查出发生在

母材上的重伤有3.57处/km,这说明焊接接头所造成的重伤率所占比例很大^[23]。目前中国重载铁路线路基础结构的强化重点是轨道结构部件,比如采用新型轨枕和扣件,而对道床和路基强化技术研究相对较少,这也使得中国重载铁路线路的损伤防护和修复有时并不是很理想。如何实现重载列车和轨道性能匹配,依旧是研究人员所研究的热点问题。

3. 长大重载列车纵向冲动

重载列车的特点在于又重又长,2014年4月,中国在大秦铁路上成功试验3万t的重载列车,其长度将近4000m,涉及到4台机车和300多辆货车。现今在中国重载铁路线路上运行的重载列车至少是万吨列车,大多数都是2万t和3万t。这些重载列车在牵引、制动及运行过程中都不可避免地产生强烈的纵向冲动。纵向冲动过大所导致的重载列车车钩断裂、脱轨的事故也时有发生。为此,中国学者在重载铁路发展之初就已经开始重视重载列车的纵向冲动问题^[24-25],经过三十多年的研究已经取得了优异成效。但是在例如长大列车制动技术、车间联接技术、列车操纵控制技术等方面还需要加大研究深度,保证重载列车的运行安全。

(二)重载铁路的技术进步

1. 大轴重电力机车技术

现在在重载铁路上担当重载列车牵引任务以25t轴重重载货运电力机车为主,开行少量30t轴重重载货运电力机车。作为25t轴重重载铁路的典型代表,大秦铁路单机牵引1万t和以1+1编组方式牵引2万t重载的牵引任务是由和谐系列HX_D1和HX_D2型重载货运电力机车负责。这类机车属交流传动,最大功率9600kW,最高运行速度120km/h,具有恒功范围宽、轴功率大、粘着性能优良、运行安全以及维护成本低等优点^[5]。

而与此同时,中国30t轴重重载电力机车在近几年发展迅速。2014年5月,中国研制出一列世界单机功率最大(14400kW)的30t轴重重载电力机车——“神华号”,并于同年8月在朔黄铁路上成功牵引万吨重载列车开行。同年,中国自主研发的

HXD₁F和HXD₂F型30 t轴重电力机车完成型式试验,机车牵引功率9600 kW^[5],并首次实现了不同厂家设计制造的不同型号机车间的互联互通、重联运行。现今中国已基本掌握了30 t轴重重载运输牵引技术。

2. 大轴重货车技术

2014年6月,中国首次在大秦线成功开行由27 t轴重、80 t载重的C_{80E}型通用敞车组成的重载列车,标志着中国铁路迈入国际重载铁路先进行列。经过多年的努力,中国研制出包括C_{80E}型通用敞车、P₈₀型通用棚车、NX₈₀型平-集共用车、KM₈₀型煤炭漏斗车及KZ_{80X}型石砟漏斗车等9个27 t轴重、载重80 t的通用货车,形成了系列产品,初步构建起27 t轴重通用货车标准体系和技术平台。

而为了适应世界铁路重载运输发展和国内煤炭运输需求,中国还专门设计了30 t轴重标准轨距专用货车,例如用于山西中南部铁路运输的C₉₆和C_{96H}型专用运煤敞车。这两型车具有车体强度高、载重率高的特点,也满足以100 km/h速度运行时对车辆稳定性和运行平稳性的要求^[26-27]。如今中国重载铁路货车技术已经达到了世界领先水平。根据统计,中国铁路货车企业已经向澳大利亚、巴西、新西兰、沙特、哈萨克斯坦等三十多个国家,出口了30~40 t大轴重重载货车过万辆^[6]。

3. 新型重载轨道结构

(1)重载钢轨成套技术。中国形成了30 t轴重重载铁路钢轨成套技术:30 t轴重条件下不同轨型(60和70 kg/m),不同材质(U75V, U78CrV, U77MnCr等),不同廓形(60N和75N)的钢轨。

(2)30 t轴重重载铁路无砟轨道成套技术。中国形成了独特的30 t轴重重载铁路无砟轨道成套技术;提出了重载弹性支承块式、双块式、长枕埋入式这三种无砟轨道结构形式,并配套研发了适用于弹性支承块式无砟轨道的弹条Ⅶ型扣件,适用于双块式或长枕埋入式无砟轨道的WJ-12型扣件^[28]。

(3)重载道岔技术。中国研制了适用于30吨轴重60 kg/m钢轨的12号、18号道岔和75 kg/m钢轨的12号、18号道岔,提出了30 t轴重重载道岔施

行的技术条件^[29]。

4. 网络化无线同步控制技术

网络化无线同步控制技术不同于国外常用的无线同步控制技术Locotrol,是利用GSM-R铁路专用移动通讯系统来无线网络化同步控制机车牵引及制动。单独运用Locotrol牵引制动的重载列车是采用数据电台作为通信传输平台的,十多年前由于电台受到地形、功率限制,有效传输距离不超过800 m。但在2002年之后,大秦铁路上开行的万吨列车,两万吨列车的长度均超过1300 m,超过电台的有效传输距离。中国迫切需要开发一种新的同步控制系统以满足国内重载运输技术的升级要求。在2006年3月,中国大秦铁路以铁路GSM-R为传输平台,结合无线机车同步操纵技术Locotrol技术,开发出一种新的网络化无线同步操纵系统,解决了机车间通信距离限制问题^[30]。这也是世界上首次实现Locotrol技术和GSM-R平台的有机融合,近3 km长的重载列车实现前后同步控制,误差仅为0.6 s^[31]。

5. 第四代宽带通信技术

第四代宽带通信技术LTE-R系统对传统的3G网络架构进行优化,网络结构扁平化,能够实现高带宽、高传输效率和低传输时延。LTE-R与GSM-R系统采用的技术方法截然不同,前者还加入了比如多输入多输出技术、自适应调制编码技术以及正交频分复用技术等,使得这种系统的峰值速率大大提升^[32]。

2014年9月30日,全世界首列基于第四代宽带通信技术LTE-R开行的重载列车从西神池南站抵达河北黄骅港站。这使得中国成为首家将LTE-R通信技术应用到铁路生产运营的国家。这种LTE-R通信技术目前在中国朔黄铁路上运用的比较广泛,不仅实现了重载铁路的可控列尾和同步控制,方便多机车同步操控,还实现了重载铁路的调度通信和调度命令传递,这方便管理人员对现行重载列车的实时控制和调度,为重载铁路的安全可靠运行提供了更强有力的保证。而近年来业内学者更是对LTE-R技术进行优化研究:通过在地面增加调度优化系统和在机车头部增加辅助智能操控系统,来构建一套基于LTE-R网络的连续车-地通信系统,对列

车进行精确定位和优化控制^[33]。

(三) 运输管理组织水平的进步

除去车辆及相关装备以外,重载铁路运输的管理组织水平也至关重要,因为重载铁路是大宗货物的运输通道,出发站到终点站这段过程中的工作效率和协同能力决定了整体效益。早在 1990 年 5 月 22 日至 6 月 28 日期间,中国曾在大秦铁路上进行了一次万吨重载单元、组合列车的大规模试验^[3]。这次试验取得圆满成功,研究人员也从中发现了一些问题和不足,那就是中国对于重载运输的组织管理水平还需提高。例如在本次试验中,由于受到列车制动缓解后充风速度的限值,使得重载列车无法适应自动闭塞的要求。

为了让运输管理水平跟上技术更新的步伐,铁路部门和相关研究单位坚持对中国重载铁路运输组织体系的改进。重载铁路集疏运一体化的建立与实施也是在这种时代发展的背景下完成的^[34]。集疏运系统对于重载铁路运行过程中的协同合作起到很重要的作用,形成了拉动效应,降低了运输成本,提高了运输效率。而随着 21 世纪的技术更新和大数据的兴起,现在也有相关学者将大数据技术应用到重载铁路上来,为生产调度指挥提供优化措施,也为管理者提供了管理决策支持^[35]。

(四)《重载铁路设计规范》的出台

一个国家的重载铁路规范标准最能够反映该国重载运输的发展程度。而为了满足重载铁路设计和发展需要,统一重载铁路设计技术标准,使重载铁路设计符合安全可靠、先进成熟、经济适用的要求,中国国家铁路局根据中国货物运输需求和机车车辆技术装备的发展研究制定发布了《重载铁路设计规范》^[36]。

这部规范是中国第一部重载铁路行业标准,也是世界上首部系统完整、内容全面的重载铁路设计规范,填补了重载运输领域技术标准的空白,进一步丰富和完善了中国铁路工程建设标准体系。《重载铁路设计规范》考虑到现行规范如《铁路主要技术政策》不能适应 25 t 及以上轴重的机车车辆运行

的需要,结合国内外重载铁路轴重的现状,将设计轴重分为 3 个档次:25 t、27 t 和 30 t。同时考察了中国现有朔黄铁路、大准铁路、大秦铁路、准朔铁路、北同蒲铁路、山西中南部铁路、张唐铁路等重载铁路列车牵引重量的现状,规范中规定列车牵引重量必须在 10 000 t 及以上。

总而言之,《重载铁路设计规范》中对重载铁路的主要技术标准包含铁路等级、设计轴重、正线数目、设计速度、最小平面曲线半径、限制坡度、机车类型、牵引质量到发线有效长度和闭塞类型等进行了详细规定。整部规范的编制基于中国具体国情,遵循了系统优化的建设理念,以及安全可靠、经济适用的基本原则,具有很高的适用性和经济性。

四、合作交流和重大成果

(一) 重载铁路的国际交流与合作

重载运输在世界铁路货运的发展中占据了越来越重的比例,它不仅代表着一个国家铁路货运领域的先进生产力,更重要的是带来了更高的劳动生产率和巨大的经济效益。随着世界范围内的铁路重载技术的发展,同时为了更好地协调和促进发展,1978 年,北美铁路协会(AAR)联合当时发展重载铁路的主要国家例如美国、加拿大、澳大利亚和南非等国,在澳大利亚珀斯(Perth)召开了历史上第一次国际铁路重载会议。随着中国在 20 世纪 70 年代末 80 年代初开始着手发展铁路重载技术后,在 1982 年,中国代表团首次参加了在美国斯普林斯召开的第二届国际重载大会^[37]。1984 年,中国与美国、加拿大、澳大利亚和南非共 5 国在华盛顿商议筹建国际重载运输协会(以下简称 IHHA),并在 1985 年成功创立该协会。这个协会的成立为世界的重载铁路运输行业的相互交流提供了良好的平台,将重载铁路运输国家的丰富经验流传开来。

IHHA 每四年举行一次国际重载大会,现今已经举办了 11 届。每两年举行一次专家技术会议,每一年举行一次理事会年会。另外除了让会员国能

更好地交流之外,国际重载运输协会的成立还有一个很重要的作用,那就是统一了国际重载铁路的标准定义。在这 40 年来,IHHA 关于重载铁路的定义经过 3 个阶段^[38],将之归纳于表 1。

表 1 重载铁路定义的变化情况

时间	会议名称	定义标准
1986 年 10 月	第三届国际重载运输会议	(1)列车质量至少达到 5 000 t; (2)货车轴重 21 t 及以上; (3)年货运量 2 000 万 t 及以上
1994 年 6 月	理事会年会	(1)列车质量至少达到 5 000 t; (2)货车轴重达到 25 t 及以上; (3)在长度至少为 150 km 的线路上,年货运量不低于 2 000 万 t
2005 年 6 月	第八届国际重载运输会议	(1)列车质量至少达到 8 000 t; (2)货车轴重达到 27 t 及以上; (3)在长度至少为 150 km 的线路上,年货运量不低于 4 000 万 t

自从 20 世纪 80 年代,中国决定下大力气发展重载铁路运输事业以来,就积极参加国际重载铁路技术交流,重视重载技术人才培养。在 1988 年,中国首次以主办国的身份主持 IHHA 自成立以来的首次重载技术专题会议,会议主题是重载铁路制动系统。1993 年 6 月,中国铁道学会在北京举办了第五届国际重载运输大会,共有包含北美铁道学会、日本铁道综合技术研究所、德国慕尼黑技术工业大学、西南交通大学等 24 个国家和地区的科研部门和各公司、高校等,会议主题为重载运输的高效率和安全。2009 年 6 月,原铁道部协同 IHHA 在上海主办了第九届国际重载运输大会,作为东道主的中国着重向世界展示了大秦铁路的运行情况和技术现状,并邀请与会代表实地考察大秦铁路重载运输技术创新成果。2016 年 9 月,中国在北京、大同和西安成功举办国际重载协会理事会年会,研讨国际重载铁路关键技术发展。同时,为了促进世界各国重载铁路的长期持续发展,鼓励重载铁路领域年轻科技工作者的不断科技创新,在本次理事会年会,各理事决定在 2017 年评选多名长期从事重载铁路领域科研工作且做出贡献

的优秀青年工程师。2017 年 9 月,中国共有 5 名研究人员在第十一届国际重载运输大会上获得优秀青年工程师称号。

(二)与重载铁路相关的重大获奖成果

在这 40 年里,中国重载铁路最大列车牵引重量从 1980 年的 3 500 t 到现在的 3 万 t,重载铁路线路从既有线扩能改造,到新建大秦铁路、包神铁路、神朔铁路、朔黄铁路,再到中国第一条 30 t 轴重设计标准的山西中南部铁路,到现在中国正新建的最长运煤专线蒙华铁路,中国铁路研究人员始终秉承着“交通强国、铁路先行”的理念,不断提升和优化铁路重载技术。现在,中国已经拥有了 25 t、27 t 轴重重载铁路的成套成熟技术和标准体系,也发展出了中国特有的 30 t 轴重重载铁路技术,并首次实现了世界上 Locotrol 控制技术与 GSM-R 平台的有机交互,以及重载列车运营管理与 LTE-R 第四代宽带通信技术的高度融合。

中国重载铁路运输事业的巨大发展和突出成就,都离不开重大项目的研究和项目取得创新成果的支撑。下面列举并介绍获得国家级奖项的重载铁路相关项目的重大成果:

《铁道机车车辆—轨道耦合动力学理论体系、关键技术及工程应用》项目获得 2005 年度国家科学进步奖一等奖,该项目创建了机车车辆—轨道耦合动力学全新理论体系,建立了机车车辆-轨道统一模型,提出了机车车辆与线路最佳匹配设计原理及方法,开发了轮轨动态作用安全性的现场测试评估技术等。

《大秦铁路重载运输成套技术与应用》项目获得 2008 年度国家科技进步奖一等奖。该项目开展了重载铁路机车车辆新型装备及改造、网络化机车同步操纵无线通信、大运量运输组织、重载铁路工程改造、2 万 t 重载组合列车优化操纵和综合测试等研究,掌握了 1 万 t 和 2 万 t 重载列车成套技术。

《六轴 7 200 kW 大功率交流传动电力机车的研发与应用》项目获得 2010 年度国家科学进步奖一等奖,形成 8 项专利,其中发明专利 2 项。该项目建

立了六轴 7 200 kW 交流传动系统和车载计算机控制及通讯网络系统,研制了大容量的牵引变压器、大功率交流异步牵引电机以及具有计算机控制网络的空气制动系统等。

《基于自主技术平台的系列化大功率交流传动电力机车研发及应用》项目获得 2014 年度国家科技进步二等奖,形成专利 88 项,其中发明专利 23 项。该项目研发了适用于不同运行环境条件的系列化大功率交流传动电力机车产品,解决了大功率交流传动牵引系统车网匹配、动态响应等世界级共性技术难题。

《高速、重载列车牵引控制关键技术及应用》项目获得 2015 年度国家技术发明二等奖,形成发明专利 23 项。该项目发明了车网谐波最优控制和电压动态自适应技术、牵引电机恒转差频率高性能适量控制方法、蠕滑率快速辨识和最速梯度下降控制方法以及基于决策级信息融合的动力/速度协同控制方法等。

《智慧协同网络及应用》项目获得 2017 年度国家技术发明二等奖,申请发明专利 82 项。该项目发明了以“两域”“三层”“三映射”为典型特征的智慧协同网络系统及其核心设备,实现了大数据可靠传输,为列车运维提供重要技术保障。

五、重载铁路的展望

随着“一带一路”倡议的提出,重载运输行业在可预见的未来将进一步发展。本文结合重载铁路发展脉络和技术发展,分析重载铁路未来的发展重点和方向。

(一) 发展重点

1. 大轴重重载铁路技术进一步研究

大轴重重载铁路技术进一步研究的主要工作任务有:(1)既有线上 27 t 轴重通用货车普及开行和适用性标准体系的完善。对既有线开展疲劳试验,强化轨道结构;解决小跨度钢筋混凝土桥涵结构、双线桥梁等结构的受力性能和长期适应性的问题;提高编组站基础设备性能;研究 27 t 轴重货车

与其他轴重货车混编的安全性问题。(2)30 t 轴重重载铁路技术和标准体系的深入研究和完善工作。加速完善中国 30 t 重载铁路钢轨和道岔成套技术、适应 30 t 轴重重载铁路要求的重载货车装载方式及 30 t 轴重通用货车技术等。(3)更大轴重重载铁路相关技术的研发。研制系列 35 ~ 40 t 轴重通用货车;强化既有重载专线的轨道结构,提高载重能力;研制更高功率的重载电力机车;研发适用 35 ~ 40 t 轴重的新型轨道部件。

2. 多式联运技术

多式联运是由两种及其以上的交通工具相互衔接、转运而共同完成的运输过程。国家《物流业发展中长期长期规划(2014 ~ 2020 年)》已经提出构建高效运行的多式联运要求,中国学者对多式联运的方式也进行过诸多研究^[39],还需要进一步研究和完善。笔者认为可以从以下方面进行研究:(1)研发适用于重载铁路运输的铁路集装箱技术;(2)建设与重载铁路相连的内陆枢纽卸货点,以加强重载铁路与公路的相互联合运输;(3)研发新一代港口内运输车等核心设备,提升重载铁路直通港口卸货效率;(4)建立各种条件下多式联运协商模式和全程服务网络,协调承运方和托运方的相关事宜;(5)建立含重载铁路在内的多式联运路径优化系统,节省运输成本。

3. 重载快捷化技术

重载快捷化也即将重载列车运行速度进一步提升。中国现行重载列车运行速度大多在 80 km/h 到 100 km/h 之间,随着产业和产品结构调整,重载列车提速能更好提高货运效率。研发成套重载快捷化技术主要包含以下工作:(1)深化研究重载列车车辆结构轻量化技术,降低货车自重;(2)研制低动力作用转向架;(3)研制更高强度的车钩;(4)研制高强度轨道结构部件;(5)研制高载荷桥梁;(6)研究大功率机车与无线列车控制配套技术。

(二) 发展方向

当前,全球新一轮科技革命和产业革命正在兴起,中国重载铁路运输要具有创新竞争力,就必须

跟上世界科技的发展。重载铁路运输领域未来将朝着清洁化、智能化和互联互通化的方向发展。

1. 清洁化发展

重载铁路运输清洁化的重点就是加快封闭型货车和驼背运输车等核心装备研发,然后依托多式联运等运输技术来大幅降低成本。未来中国铁路集装箱运输装备发展可以从以下几方面入手^[40]:

(1) 新型驼背-集装箱重载铁路运输专用车。优化重载列车车体的结构形式,研发双层井式车体结构,实现驼背-双层集装箱重载铁路运输专用车的使用;(2) 研制新型公铁联合运输两用车,确保铁路-公路联运模式的快捷性。

2. 智能化发展

《国务院“十三五”现代综合交通运输体系发展规划》提出货运智能化的长远发展要求,智能货车技术已成为新的发展趋势和研究方向。中国应该以智能控制、智能检测、智能养护、智能运输、智能管理等为主要内容,来打造智慧重载铁路^[7,41]:(1) 深化研究重载列车控制技术,研发新型车载通信系统——无线智能网列车重联同步车载通信系统;(2) 进一步加大大数据技术在重载铁路中的应用;(3) 建立云计算数据处理中心,利用智慧协同网络系统进行重载铁路智能检测和维护;(4) 进一步完善无人化监控和操纵系统,建立网络化报警系统。

3. 互联互通化发展

随着中国与亚欧大陆国家的陆路联系越发紧密,中国铁路陆续与周边国家例如越南、朝鲜、蒙古、俄罗斯、哈萨克斯坦等,乃至西欧国家例如德国、法国等铁路相连。直至 2018 年 8 月底,中欧班列累计开行量已突破 10 000 列。在 2018 年 9 月 4 日,又一条国际货运线路(内蒙古呼和浩特到伊朗的巴姆)开通,中国铁路运输越来越与国际接轨,互联互通化发展成为一个热门方向。研究可以从以下方面入手:(1) 深化研究列车变轨距技术;(2) 优化现有互联互通线路,试运行重载列车;(3) 研发互联互通线路专用运输集装箱型号,形成统一管理;(4) 新建跨国运输专线,建立统一化标准和列车监控系统。

六、结语

时至今日,中国不但是世界高速铁路发展的大国,也是世界重载铁路发展的大国。本文概述了世界重载铁路大国的发展,介绍了 20 世纪 80 年代中国重载铁路的起步和既有线扩能改造,重点展示了改革开放 40 年来,中国重点建设的、发挥了重要作用并取得巨大成就的几条重载运输大通道发展;本文点明了重载铁路技术面临的长期挑战,并从机车、货车、轨道、控制与通信等几个方面,较为全面地阐述了中国重载技术在近几十年来取得的进展和技术成就;同时介绍了中国与国际重载大国的合作交流情况以及在 IHHA 中起到的积极作用,并在文章中整理了中国在重载运输技术方面取得的相关重大获奖成果;最后,文章结合现今世界重载铁路趋势和中国铁路技术现状,分析了中国重载铁路发展的重点和方向。

本文对大数据等网络技术在重载铁路领域应用的相关整理还不全面,同时由于篇幅所限以及文章侧重不同,对世界重载铁路运输技术的发展以及其对中国重载铁路运输技术的影响的阐述比较少。但是不可否认的是,中国重载铁路运输技术的革新离不开世界重载铁路运输技术的发展,同时对世界重载铁路运输技术的创新也有着十分积极的促进作用。

参考文献:

- [1] 孙竹生,孙翔. 充分发挥旧线在我国铁路运输中的主力军作用[J]. 铁道工程学报,1987(1):155-162.
- [2] 孙竹生,孙翔. 以单编列车作为我国铁路发展重载运输的主要形式[J]. 内燃机车,1988(4):1-7.
- [3] 孙翔. 建立完整的铁路重载运输技术体系——由大秦铁路万吨列车试验得到的启示[J]. 西南交通大学学报,1991(1):14-20.
- [4] 田葆栓. 世界铁路重载运输技术的运用与发展[J]. 铁道车辆,2015,53(12):10-19,5.
- [5] 胡亚东. 我国铁路重载运输技术体系的现状与发展[J]. 中国铁道科学,2015,36(2):1-10.
- [6] 耿志修. 铁路重载运输的实践与发展[C]. 北京:铁路重载运输技术交流会论文集,2014:9-21.

- [7] 凌文. 科技创新引领中国智慧重载铁路发展[J]. 铁道学报, 2018, 40(1): 3.
- [8] 李庆生, 桑翠江. 重载铁路关键技术标准分析与研究[J]. 铁道经济研究, 2013(5): 18-22.
- [9] 李庆生, 孙海富. 中国重载铁路发展及技术标准[J]. 工程建设标准化, 2015(4): 53-56.
- [10] 耿志修. 大秦铁路重载运输技术[J]. 铁道知识, 2009(3): 4-9.
- [11] 张殿卿. 中国重载铁路发展之回顾与展望[C]. 北京: 中国铁道学会重载铁路建设养护与安全研讨会, 2014: 249-254.
- [12] 梁成谷. 我国铁路重载运输再创世界奇迹——大秦铁路年运量突破4亿t[J]. 铁道运输与经济, 2011, 33(1): 14.
- [13] 李晓建. 大秦铁路重载运输发展对朔黄铁路的启示[J]. 神华科技, 2009, 7(2): 53-56.
- [14] 胡小平, 邓成尧, 韩金刚, 等. 大秦铁路重载运输分析与启示[J]. 交通运输工程与信息学报, 2015, 13(2): 33-38.
- [15] 孙建龙, 孔亮, 潘寒川. 包神铁路重载运输发展的建议[J]. 铁道运营技术, 2012, 18(1): 31-35.
- [16] 王春毅. 朔黄铁路量化开行2万t重载列车运输组织研究[J]. 中国铁路, 2018(7): 48-53.
- [17] 王宇嘉, 徐利民, 贾永刚, 等. 山西中南部通道重载列车运输试验及对线路设计的启示[J]. 铁道货运, 2015, 33(10): 27-31.
- [18] 韩星俊. 中国最长重载铁路——蒙华铁路隧道工程[J]. 隧道建设: 中英文, 2017, 37(12): 1627-1633.
- [19] 周清跃, 张建峰, 郭战伟, 等. 重载铁路钢轨的伤损及预防对策研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(1): 27-31.
- [20] 翟婉明, 赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 209-226.
- [21] 王开云, 刘鹏飞. 车辆蛇形运动状态下重载铁路轮轨系统振动特性[J]. 工程力学, 2012, 29(1): 235-239.
- [22] 康熊, 宣言. 我国重载铁路技术发展趋势[J]. 中国铁路, 2013(6): 1-5.
- [23] 习年生, 周清跃, 张建峰, 等. 大秦重载铁路钢轨伤损规律及寿命预测研究[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2007.
- [24] 孙翔. 车钩、缓冲器、制动装置与重载列车的纵向冲动[J]. 铁道车辆, 1988(10): 1-8.
- [25] 孙树磊, 丁军君, 周张义, 等. 重载列车纵向冲动动力学分析及试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 138-146.
- [26] 铁道部产品质量监督检验中心机车车辆检验站. C96型专用运煤敞车[R]. 北京: 铁道部产品质量监督检验中心机车车辆检验站, 2013.
- [27] 铁道部产品质量监督检验中心机车车辆检验站. C96H型专用运煤敞车[R]. 北京: 铁道部产品质量监督检验中心机车车辆检验站, 2013.
- [28] 张志方. 30t轴重重载铁路轨道结构技术创新与发展[J]. 中国铁路, 2014(3): 12-15+20.
- [29] 钱坤, 王树国. 75kg/m钢轨12号单开道岔30t轴重货车动力学试验研究[J]. 铁道建筑, 2014(3): 92-95.
- [30] 耿志修, 钟章队. 网络化无线机车同步操作控制的研究与应用[J]. 铁道学报, 2008(2): 103-107.
- [31] 赵春雷. 自主创新 降本增效着力打造中国铁路重载运输的旗帜[J]. 铁道学报, 2018, 40(3): 3.
- [32] 孔宾. LTE-R网络技术在重载铁路的应用[J]. 铁路计算机应用, 2015, 24(8): 42-45.
- [33] 孙永生. 基于车-地通信的朔黄铁路列车追踪优化研究[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(4): 115-118.
- [34] 叶峻青. 重载铁路集疏运系统协同相关问题研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [35] 孙云. 大数据技术在重载铁路运营中的应用研究[J]. 电子技术与软件工程, 2016(14): 178-179.
- [36] 国家铁路局. 重载铁路设计规范: TB 10625-2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [37] 钱立新. 世界重载铁路运输技术的最新进展[J]. 机车电传动, 2010(1): 3-7.
- [38] 夏胜利, 杨浩, 张进川, 等. 我国重载铁路发展模式研究[J]. 铁道运输与经济, 2011, 33(9): 9-13.
- [39] 李玉民, 郭晓燕, 杨露. 考虑多目标的中欧集装箱多式联运路径选择[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(10): 2239-2248.
- [40] 张瑞国, 申燕飞. 铁路集装箱多式联运发展探讨[J]. 信息记录材料, 2018, 19(8): 233-234.
- [41] 谷志茹, 龙永红, 唐军. 无线智能网列车重联同步车载通信系统可行性分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2018, 15(6): 15-18.