

# 大秦线开行 20 kt 级重载组合列车 系统集成与创新

耿志修

(中华人民共和国铁道部,北京 100844)

[摘要] 大秦线是我国第一条双线重载电气化运煤专线,西起北同蒲线,东至秦皇岛,全长 653 km,设计运量为  $1 \times 10^8$  t/a,于 1992 年 12 月通车。为满足国民经济发展的要求,须尽快大幅度提高大秦线的运输能力。铁道部依靠自主创新,首次实现了 GSM-R 技术与 Locotrol 技术的结合,800 MHz 数据电台与 Locotrol 技术的结合,单套 Locotrol 系统与 SS4 机车的结合,以及 2 台和谐型大功率机车加可控列尾的创新方式,开发了重载配套装备,通过集成创新,使大秦线开行 20 kt 级重载组合列车获得成功,年运量由 2002 年的  $1 \times 10^8$  t 提高到 2007 年的  $3 \times 10^8$  t,是原设计能力的 3 倍。

[关键词] 中国铁路;大秦线;20 kt 级重载组合列车;集成创新

[中图分类号] U26 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)03-0031-13

大秦线是我国第一条双线重载电气化运煤专线,西起北同蒲线的韩家岭车站,东至秦皇岛地区的柳村南站,全长 653 km,1992 年 12 月全面开通,设计年运量  $1 \times 10^8$  t。作为我国最重要的煤运通道,大秦线承担着全国 6 大电网、5 大发电公司、350 多家主要发电厂、10 大钢铁公司和 6 000 多家企业生产用煤和民用煤、出口煤的运输任务,全国原煤产量的近 1/10、铁路煤炭运量的近 1/5 依靠大秦线运输。2002 年大秦线煤炭运量已达到  $1 \times 10^8$  t 设计能力。为尽快缓解煤电油运紧张状况,满足国民经济发展的要求,必须依靠内涵扩大再生产,在较短时间内大幅度提高大秦线的运输能力。

2003 年以来,铁道部经过科学论证,系统组织,依靠自主创新,在大秦线成功开行了 20 kt 级重载组合列车,使大秦线年运量由 2002 年的  $1 \times 10^8$  t,提高到 2007 年的  $3 \times 10^8$  t,是大秦线原设计能力的 3 倍。不仅大幅度提高了大秦线的运输能力,有效缓解了晋煤外运紧张状况,为国民经济又好又快发展做出了重要贡献,同时也标志着我国铁路重载运输技术达到了世界先进水平。

## 1 开行重载列车的技术论证

### 1.1 世界铁路重载运输发展分析

20 世纪 50 年代以来,重载铁路运输因其运能大、效率高、运输成本低而受到世界各国铁路的广泛重视,特别是在一些幅员辽阔、资源丰富、煤炭和矿石等大宗货物运量占有较大比重的国家,如美国、加拿大、巴西、澳大利亚、南非等发展尤为迅速。

为推动世界重载运输的发展,1985 年,美国、澳大利亚、中国、加拿大、南非等 5 国铁路发起成立了国际重载协会。该协会现有澳大利亚、巴西、加拿大、中国、印度、南非、俄罗斯、瑞典、挪威和美国等 9 个会员国<sup>[3]</sup>。

世界各国铁路由于运营条件、技术装备水平不同,采用的重载列车运输形式和组织方式也各有特点。主要有以下 3 种模式<sup>[10]</sup>。

1) 重载单元列车。列车固定编组,货物品种单一,运量大而集中,在装卸地之间循环往返运行。

2) 重载组合列车。两列或两列以上列车连挂合并,机车分散布置在长大列车中。

[收稿日期] 2007-12-21

[作者简介] 耿志修(1952-),男,河北石家庄市人,高级工程师,铁道部副总工程师、科技司司长

3) 重载混编列车。多机重联牵引混合编组而成。

目前,美国、加拿大、巴西、澳大利亚和南非等国家既开行重载单元列车,又开行重载组合列车。南非除此之外还开行重载混编列车。俄罗斯重点发展重载组合列车和超重超长的单元列车。

20世纪80年代以后,由于新材料、新工艺、计算机控制和信息技术等现代高新技术在铁路上的广泛应用,铁路重载运输技术及装备水平不断提高。牵引动力向大功率交流传动发展,货车向大轴重发展,牵引制动向机车同步控制技术发展,为了适应轴重增加的要求,在轨道结构技术方面也有了新的提高<sup>[8]</sup>。

在运输量方面,巴西维多利亚—米纳斯铁路(898 km),年运量为 $1.3 \times 10^8$  t;南非姆普马兰加—理查兹铁路(580 km),年运量为 $1.13 \times 10^8$  t;澳大利亚纽曼—黑德兰铁路(426 km),年运量为 $1.09 \times 10^8$  t;其他各国重载线路的年运量均在 $1 \times 10^8$  t以下。

### 1.2 大秦线开行重载列车的技术经济分析

为快速大幅度提高大秦线运输能力,铁道部组织进行了深入的技术经济分析、论证。

列车速度、密度、质量是构成铁路运输能力的3大要素,提高任一项都可以提高运输能力。2002年,大秦线实现年运量 $1 \times 10^8$  t,列车最高运行速度为80 km/h,列车密度最高为87列/日,列车重量为5 000~6 000 t。

按铁路运输能力的计算公式:

$$G_{d,\max} = A \frac{Q_{\text{总}}}{I} \quad (1)$$

式中, $G_{d,\max}$ 为铁路货运方向的日均最大运输能力; $Q_{\text{总}}$ 为列车牵引总重; $I$ 为列车追踪间隔时间,是列车密度的倒数; $A$ 为涉及固定作业时间、区间可有效利用率以及列车净载重系数等因素的常数。

如在大秦线将列车追踪间隔时间由14 min压缩至10 min,仅能提高40%的运输能力。通过压缩列车追踪间隔时间、增加列车密度的方式,提高运输能力有限,并且受信号系统、闭塞分区设置以及编组能力、装卸能力等条件的限制,改造工程量很大。

将公式变形为按照列车运行速度计算铁路运输能力(以运送的货物吨数表示)的公式:

$$G_{d,\max} = BQ_{\text{总}} f(v_{\text{运}}) \quad (2)$$

$B$ 为涉及固定作业时间、区间可有效利用率、列

车净载重系数以及闭塞分区长度、列车总长等因素的常数; $v_{\text{运}}$ 为列车运行速度。

如在大秦线将列车最高运行速度由80 km/h提高至120 km/h,受列车起停车时间和车站作业时间影响,最多提高50%的运输能力,并且这种方式受机车功率、车辆构造、线路条件以及闭塞分区设置等因素的限制较多,投资很大。

通过提高列车质量的方式提高运输能力,是世界各国提高货运能力的普遍方式,具有投资省、能力提高幅度大的优势。在大秦线依靠多机牵引、采用先进的机车同步操纵技术以及重载配套技术等能够将列车质量提高到20 kt及以上,可以大幅度提高运输能力。如将列车牵引质量从5 000 t提高到20 kt,无论按式(1)还是式(2)计算,都将能提高3倍的运输能力。

据预测,“十一五”期间大秦线运输需求将达到 $4 \times 10^8$  t/a。为实现大秦线运输能力的大幅度提高,满足运输需求,在不新建线路的条件下,只能通过提高列车质量的扩能方式实现。将列车质量提高到20 kt后,每列车净载重将达到16.8 kt,每天开行66对列车,即可实现 $4 \times 10^8$  t的年运量。可见,提高列车质量是最经济和见效最快的方式。

### 1.3 开行重载列车关键技术比选

开行20 kt重载列车的关键是要解决多台机车同步操纵牵引长大列车这一核心技术问题。为此,铁道部组织技术人员,进行了全面的考察、论证和比选。

目前,解决多台机车同步操纵牵引长大列车这一问题有2种方法,一种是通过无线传输指令的机车无线同步操纵技术(Locotrol),另一种是通过有线传输指令的电控空气制动技术(ECP)。

#### 1.3.1 Locotrol 技术主要特点

Locotrol系统主要提供机车遥控功能,由主控机车遥控分布在列车中的其他机车,使它们置于同步牵引、制动或缓解工况,做到优化整列车的动力分配和制动控制,加快制动波速和缓解波速(见图1)<sup>[9]</sup>。

#### 1.3.2 ECP 技术主要特点

ECP系统由机车和每辆车辆上的控制单元及列车网络组成,通过列车网络传递控制信息,使每节车辆同步制动或缓解,最大程度减少列车纵向力(见图2)。

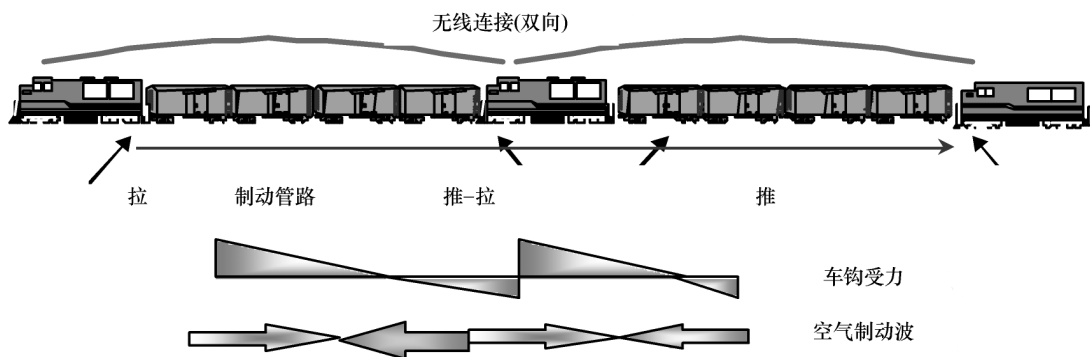


图1 Locotrol 系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of locotrol system



图2 ECP 系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ECP system

### 1.3.3 Locotrol 技术与 ECP 技术对比分析

Locotrol 系统实现了机车在长大列车中分散布置时处于同步工况,有效减少了纵向冲动和纵向力;缩短了制动距离和制动时间,使列车起动和停车更加迅速、平稳,减小车钩受力,提高了列车运行安全和效率<sup>[7]</sup>。ECP 技术采用电控制动系统,可以做到每辆车同步制动和缓解。2 种技术都能满足开行 20 kt 重载列车的需要。

与 ECP 技术相比,Locotrol 系统由于采用无线同步控制方式,牵引动力分布在列车不同位置,具有几项优点:a. 结构简单,列车控制系统都集中配置于机车,减少了货车改造工作量,成本较低;b. 有利于运输组织,列车不需要用有线网络连接,有利于列车按不同目的地解编;c. 易于维护和管理,更适应中国铁路的运用特点,更有推广意义。

但采用 Locotrol 技术,必须保证有可靠的无线通信。铁道部技术考察组在深入考察美国、南非等国铁路采用 Locotrol 技术与 ECP 技术开行重载列车的基础上,针对我国国情、路情进行了认真分析,认为:Locotrol 技术成熟、可靠,在解决无线通信的前提下,在全路更有推广意义。根据技术考察组的意见,铁道部决定采用 Locotrol 技术,在大秦线开展 20 kt 重载组合列车的技术创新工作。

### 1.4 三大关键技术难题分析

大秦线多山区、多隧道、多曲线,共有隧道 48 个,累计总长 65.8 km。最长的军都山隧道长约 8.4 km,且重车方向有 2 段长大下坡道:一段线路长度为 47 km,平均坡度达  $-8.2\%$ ;另一段线路长度为 50 km,平均坡度  $-9.1\%$ ,最大坡度达  $-12\%$ ,是大秦线重载运输的最困难区段。采用 Locotrol 技术开行 20 kt 重载组合列车必须解决 3 大关键技术难题。

#### 1.4.1 山区铁路中的通信可靠性

20 kt 重载列车由多个机车牵引,采用 Locotrol 技术,机车控制命令由主控机车通过无线方式传输给各从控机车。机车操纵的同步性十分关键,如果不同步,将产生很大的纵向力,影响列车安全。大秦线地处山区、多隧道,不利于无线信号的传播,采用无线通信方式传送列车控制指令,必须做到准确、不间断,这对通信可靠性提出了很高的要求。

#### 1.4.2 长大下坡道的周期循环制动

列车周期制动是指在列车接近限速时,以小减压空气制动作用加上动力制动,使列车减速到一定速度时缓解再实施空气制动的连续制动方式。每次空气制动消耗的压缩空气量必须在下次制动前得到

补充,亦即“再充气”,如果再充气不足,将影响下次制动的制动力。

在大秦线2处长大下坡道区间,必须兼顾机车电制动能力、列车带闸时间、机车供风系统能力、机车车辆的纵向载荷限值、线路限速条件、列车空气制动缓解限速条件等要素,围绕周期循环制动的要求,制定合理的操纵方案,实现重载组合列车在长大下坡道的运行速度在可控范围内安全运行。

#### 1.4.3 长大列车的纵向冲动

20 kt 重载组合列车总长 2 672 m,列车制动管总长约 3 000 m,受空气制动系统波速限制,在常用制动或紧急制动时,如列车前后制动力不一致,将产生巨大的纵向力。

列车纵向运动的因素,包括机车的牵引和动力制动特性、列车空气制动系统和钩缓装置的特性,还有各种运行阻力,均可分别按物理模型进行仿真,再对每台机车和车辆建立运动方程式,求解列车中所有机车车辆的纵向运动过程。

分析表明,列车纵向力的大小与整列机车车辆实施制动的同步性、车钩间隙、缓冲器性能、制动系统本身特性有关。在目前大秦线线路条件、机车车辆技术性能的限制下,开行 20 kt 重载组合列车必须采取相关的技术手段。

大秦线采用 Locotrol 技术开行 20 kt 重载组合列车必须紧密围绕 3 大关键技术问题,确定技术体系,开展技术创新工作。

### 1.5 重载组合列车技术体系

围绕大秦线开行 20 kt 重载组合列车,铁道部提出了需求牵引、工程依托、系统集成、整体推进的技术创新思路,把大秦线工程技术改造和技术创新工作紧密结合起来,确定了大秦线重载组合列车技术体系(见图 3)。

铁道部先后安排了 60 多项科研项目,以攻克 3 大技术难题为主要目标,在列车同步操纵、无线数据传输、牵引、制动技术、车辆重载技术、基础设施强化技术、牵引供电强化技术、重载运输组织技术、重载组合列车优化操纵、综合维修技术等方面开展了一系列科研、试验和技术改造,持续不断地推进大秦线 20 kt 重载组合列车的技术创新工作。

## 2 重载组合列车技术创新<sup>[1]</sup>

从 2004 年开始,铁道部先后组织进行了采用 4 台 SS4 型电力机车开行 4 × 5 000 t 重载组合列车的技术创新工作,采用 4 台 SS4 型电力机车开行 2 ×

10 kt 重载组合列车的技术创新工作,采用 2 台和谐型机车开行 2 × 10 kt 重载组合列车的技术创新工作。

### 2.1 SS4 型机车开行 4 × 5 000 t 重载组合列车系统集成

采用 Locotrol 技术开行 20 kt 重载组合列车,主要依靠无线通信方式由主控机车向从控机车传输控制指令,因此,20 kt 组合列车的机车布置方式主要取决于无线通信的传输距离。在综合分析大秦线线路情况、运输特点、无线电台通信可靠传输距离、机车车辆动力和制动系统的基础上,确定采用 4 列 5 000 t 列车组合的方式,即开行 4 × 5 000 t 重载组合列车。

为了开行 4 × 5 000 t 重载组合列车,应做到如下几点:一要选取满足大秦线需要的无线通信频率;二要实现无线通信车载设备和 Locotrol 设备的系统集成;三要进行 SS4 型电力机车配置 Locotrol 系统及 CCB II 制动机的技术集成;四要组织综合试验进行验证。

#### 2.1.1 确定采用 800 MHz 无线通信频率

国外的 Locotrol 系统都是与 450 MHz 无线通信配合使用,这种通信频率只适用于平原开阔地形,在山区隧道地区传输距离仅为 650 m,不适应大秦铁路的线路条件。针对 Locotrol 系统的特点和工作方式,特别是系统对无线数据通信的要求,经过对无线通信频率在不同地形条件下传输距离的技术分析,在大秦线选择了有中国特色的 800 MHz 无线通信系统,在大秦全线测试比较了 800 MHz 和 450 MHz 数传电台的传播特性。结果表明,800 MHz 无线数传的误码率和信息转发成功率均优于 450 MHz,其在山区、隧道地段传输距离可达到 790 m,能够满足每个 5 000 t 列车间机车 690 m 的传输要求。

#### 2.1.2 开展无线通信车载设备和 Locotrol 设备的系统集成

在铁道部的组织下,相关部门开发了 800 MHz 无线数据传输设备样机,经实验室测试后,与 Locotrol 设备进行了联合调试,确定了接口方式、数据协议以及无线数据传输内容等,并改善了天线增益,采取了数据传输纠错编码处理、多次重传等技术措施。

在 SS4 机车的 A 端配备一套 800 MHz 无线数据传输设备 RDTE - A,与 Locotrol 系统的 CIOM 接口单元相接,机车 B 端配置一套 800 MHz 无线数据

传输设备 RDTE - B,通过机车贯通电缆连接到机车 A 端的 CIOM 接口单元。如图 4 所示。

无线数据通信设备,如图 5 所示。

4 台机车主控机车采用广播和接力相结合的方式传送信息,见图 6。

在  $4 \times 5\,000\text{ t}$  组合列车的 4 台机车上都配备有

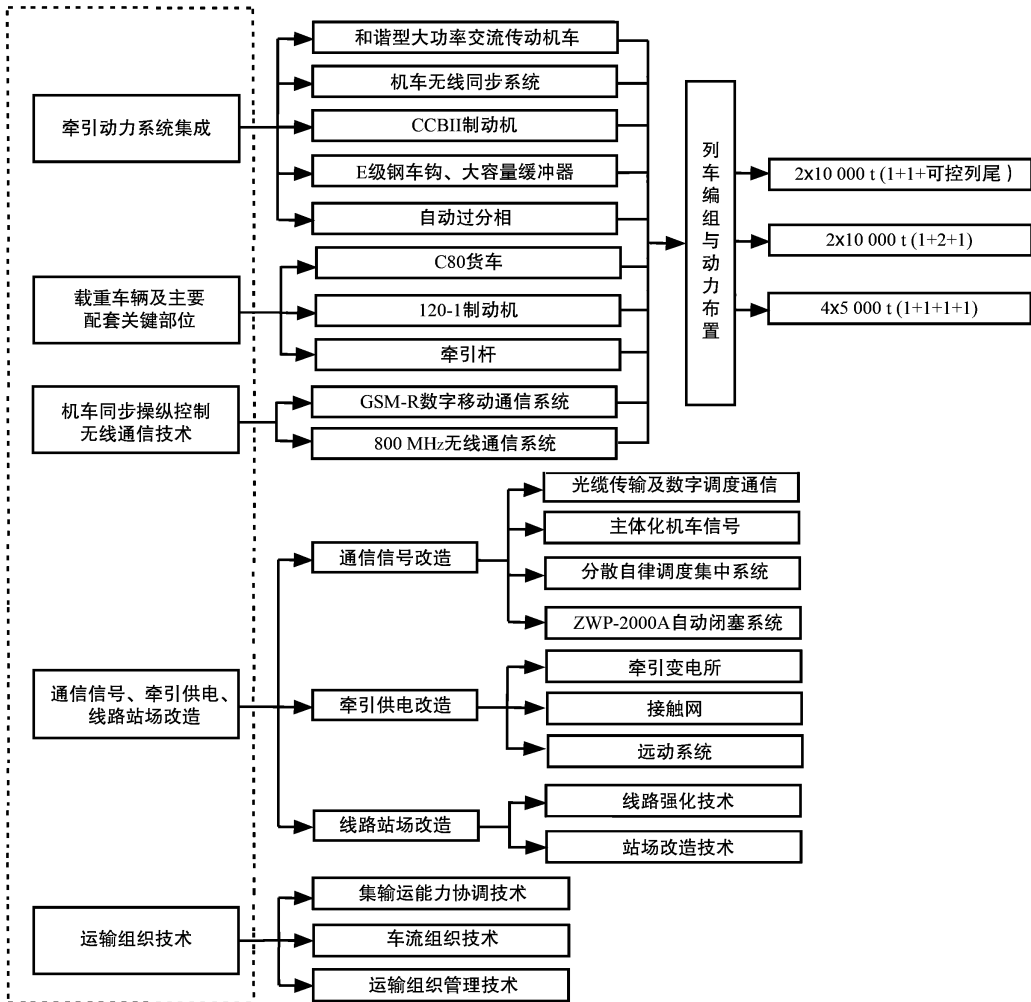


图 3 20 kt 重载组合列车技术体系

Fig. 3 Technical system of 20 kt combined heavy-haul train

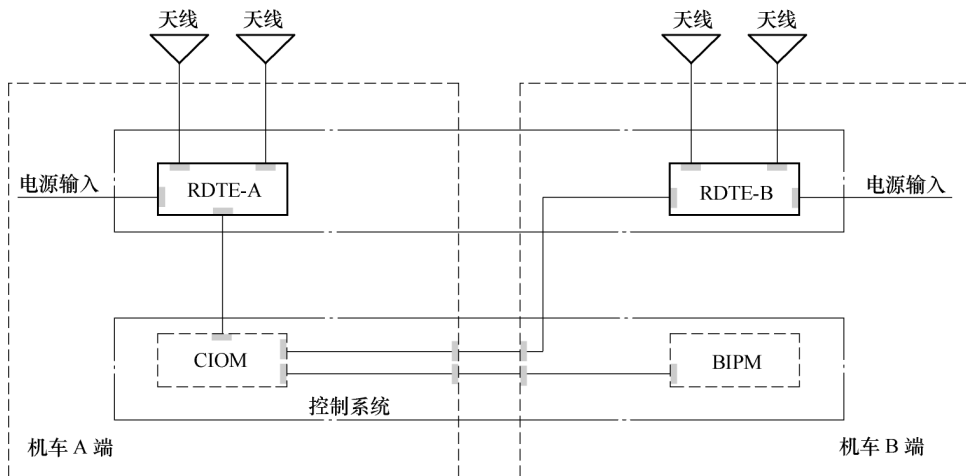


图 4 800 MHz 无线数据传输设备机车配置示意图

Fig. 4 Diagram of locomotive configuration for 800 MHz radio data transmission

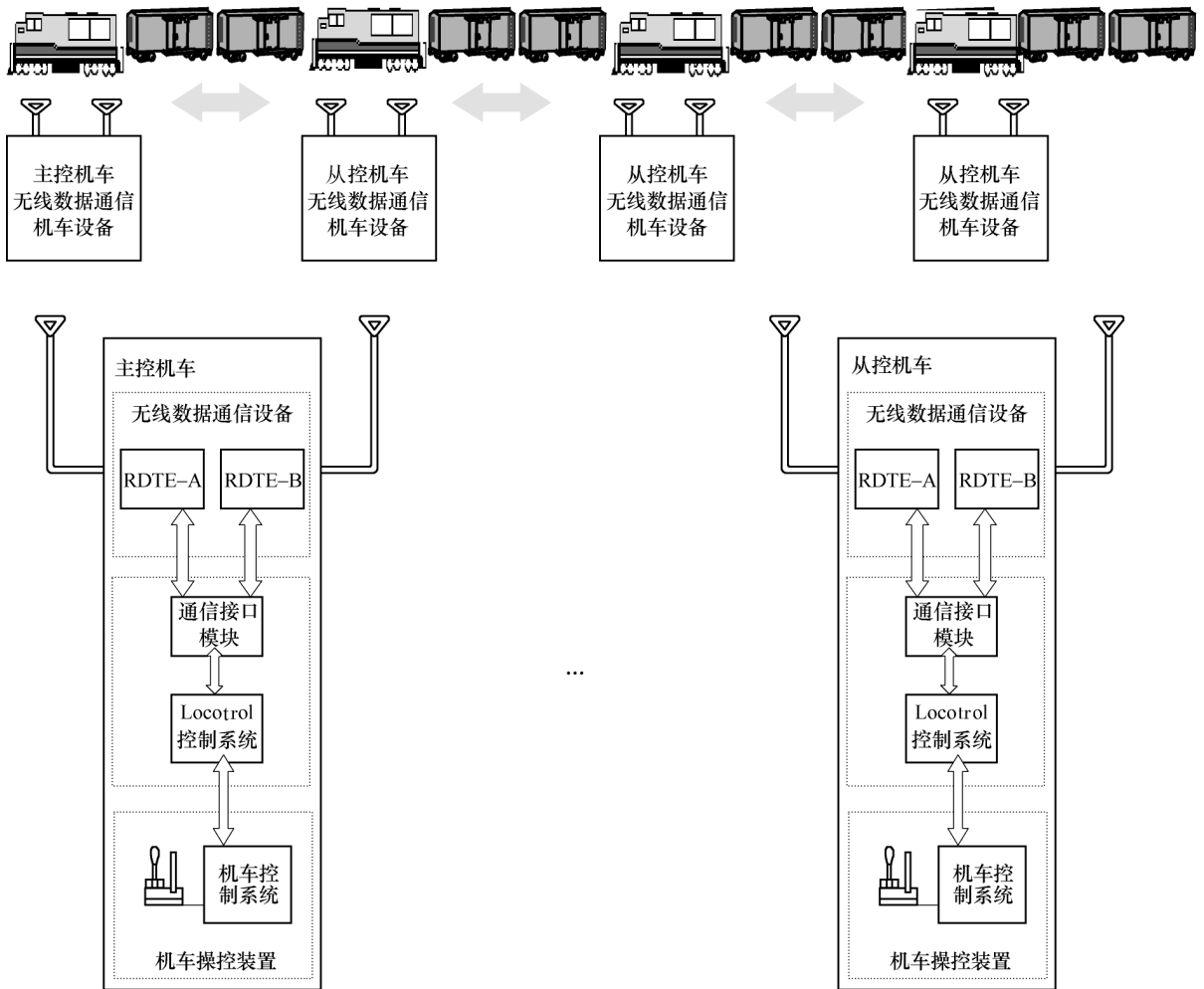


图 5 800 MHz 无线数据传输系统构成图

Fig. 5 Configuration of 800 MHz radio data transmission system

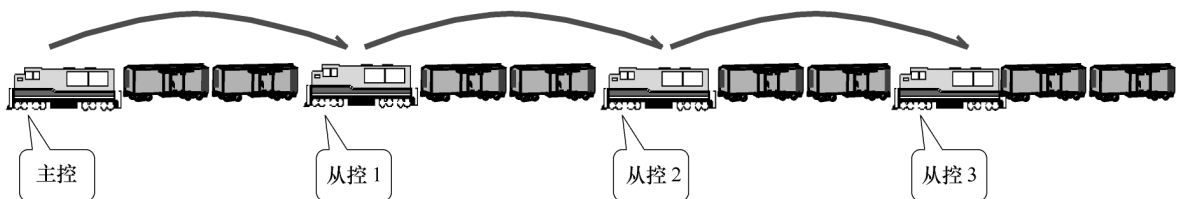


图 6 接力转发示意图

Fig. 6 Diagram of repeater

通过 800 MHz 和 Locotrol 系统的集成,实现了 4 × 5 000 t 重载组合列车的主控机车和从控机车之间控制命令实时、可靠地无线数据传输。

### 2.1.3 SS4 型电力机车配置 Locotrol 系统及 CCB II 制动机的技术集成

经过设计研究,提出了 SS4 机车与 Locotrol 及 CCB II 制动机的技术集成的总体方案,确定了电气、

空气、机械接口规范和同步操纵控制方式。对机车无线控制指令、机车状态与报警信息、机车安全联锁和保护措施等进行了具体设计,解决了 Locotrol、CCB II 系统设备在机车内的安装、布线及电磁干扰、机械震动冲动防护技术和工艺问题。通过优化方案,主控机车应用单套 Locotrol 设备实现了双端同步操纵功能。试验验证表明,SS4 机车与 Locotrol、

CCB II 制动机及配套设备的系统集成是成功的,满足了多台机车同步牵引和制动的需要。

#### 2.1.4 组织 4 × 5 000 t 重载组合列车综合试验验证

在铁道部的组织下,进行了2个阶段 4 × 5 000 t 重载组合列车综合试验。第一阶段综合试验历时2个月,于2004年12月12日成功试验开行了中国铁路第一列 20 kt (4 × 5 000 t) 重载组合列车。在这一阶段综合试验中,验证了 800 MHz 电台与 Locotrol 技术的结合,验证了 SS4 机车与 Locotrol 技术、CCB II 制动机的结合。第二阶段综合试验从2005年7月7日至7月13日,重点对 SS4 机车改造方案、新型 C80 车辆(3辆一组,采用牵引杆、120-1 型制动机、大容量胶泥缓冲器)、机车自动过分相设备进行试验验证。

2个阶段综合试验表明:

1) 采用 800 MHz 无线数据传输设备,在大秦线可以满足以 4 × 5 000 t 方式组成的 20 kt 组合列车 Locotrol 系统应用的要求;

2) 采用 Locotrol 技术的 20 kt 组合列车的制动

距离与单编 5 000 t 列车的常用全制动距离和坡道紧急制动距离基本相当,采用 Locotrol 分布式动力控制系统能有效加快机车控制指令的传递速度,缩短超长列车充气及排气时间;

3) 4 × 5 000 t 组合列车比单编 5 000 t 列车纵向力有所增大,最大纵向力发生在列车中部即第三台机车前后,但能满足列车运行安全要求,车辆安装牵引杆和 120-1 新型货车空气控制阀以后,在紧急制动和常用全制动时,列车的纵向冲动和最大纵向力明显减小;

4) 经过改造的 SS4 电力机车和自动过分相装置等设备,可满足开行 4 × 5 000 t 重载组合列车的需要。

通过技术开发、系统集成和综合试验验证,我国铁路具备了采用 Locotrol 系统开行 4 × 5 000 t 重载组合列车的条件。

#### 2.2 SS4 型机车开行 20 kt 重载组合列车系统集成

在大秦线开行 20 kt 重载组合列车符合大秦线的运输特点。大秦线是一个树型结构,见图 7。

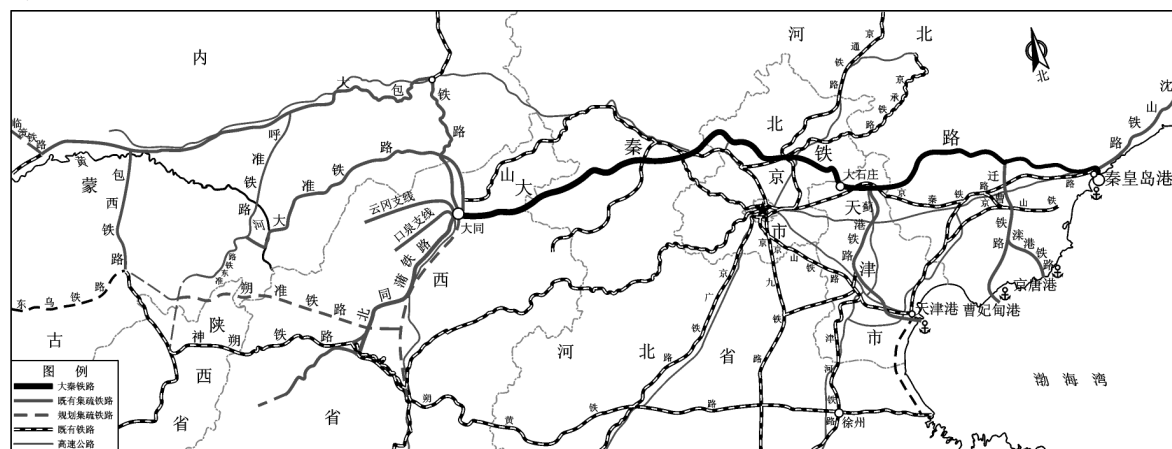


图 7 大秦线路示意图

Fig. 7 Diagram of datong-qinhuangdao line

在大秦线的货源地,5 000 t 级以上的战略装车点接近 80 个,其中有 10 kt 装车点 35 个,20 kt 装车点 9 个,见图 8。

随着运量的增加,开行 20 kt 重载组合列车更有利于提高运输效率。为此铁道部决定利用大秦线 GSM-R 通信传输平台,在大秦线开展 20 kt 重载组合列车试验研究。

开行 20 kt 重载组合列车,首先需要实现 GSM-R 与 Locotrol 设备的系统集成,其次需要对 20 kt 重载组合列车的编组方式进行分析计算,三是组织

综合试验验证。

##### 2.2.1 GSM-R 与 Locotrol 设备的系统集成

GSM-R 是一种无线—有线—无线的传输方式。理论上讲,GSM-R 在其网络覆盖范围内不受传输距离的限制,能够解决 800 MHz 电台有效传输距离 790 m 限制的问题。在 GSM-R 网络通信平台上传输机车同步操控系统的信息,可以满足 20 kt 重载组合列车的通信要求。

用于 Locotrol 系统的 GSM-R 通信系统,由地面应用节点 (AN)、GSM-R 网络及 GSM-R 车载

通信单元(OCU)构成。每台机车上安装一台车载通信单元,通过 GSM-R 网络与地面节点相链接,地面节点将每一列车全部机车车载通信单元编成一组,实现主、从控机车间数据的实时传送<sup>[4]</sup>。

为此,结合 GSM-R 网络的实际情况,在太原建立了一套与 GSM-R 网络连接的地面应用节点,开发了车载通信单元,制定了《Locotrol 系统 GSM-

R 数据通信设备技术规范》。从 2005 年 4 月中旬开始,进行了多次 GSM-R 实验室静态试验和运行试验,验证了 GSM-R 网络与 Locotrol 的结合和 GSM-R 网络与 800 MHz 的自动切换。试验结果表明,通过 GSM-R 和 Locotrol 系统的集成,可以实现 20 kt 重载组合列车的主控机车和从控机车之间控制命令实时、可靠地无线数据传输<sup>[6]</sup>。

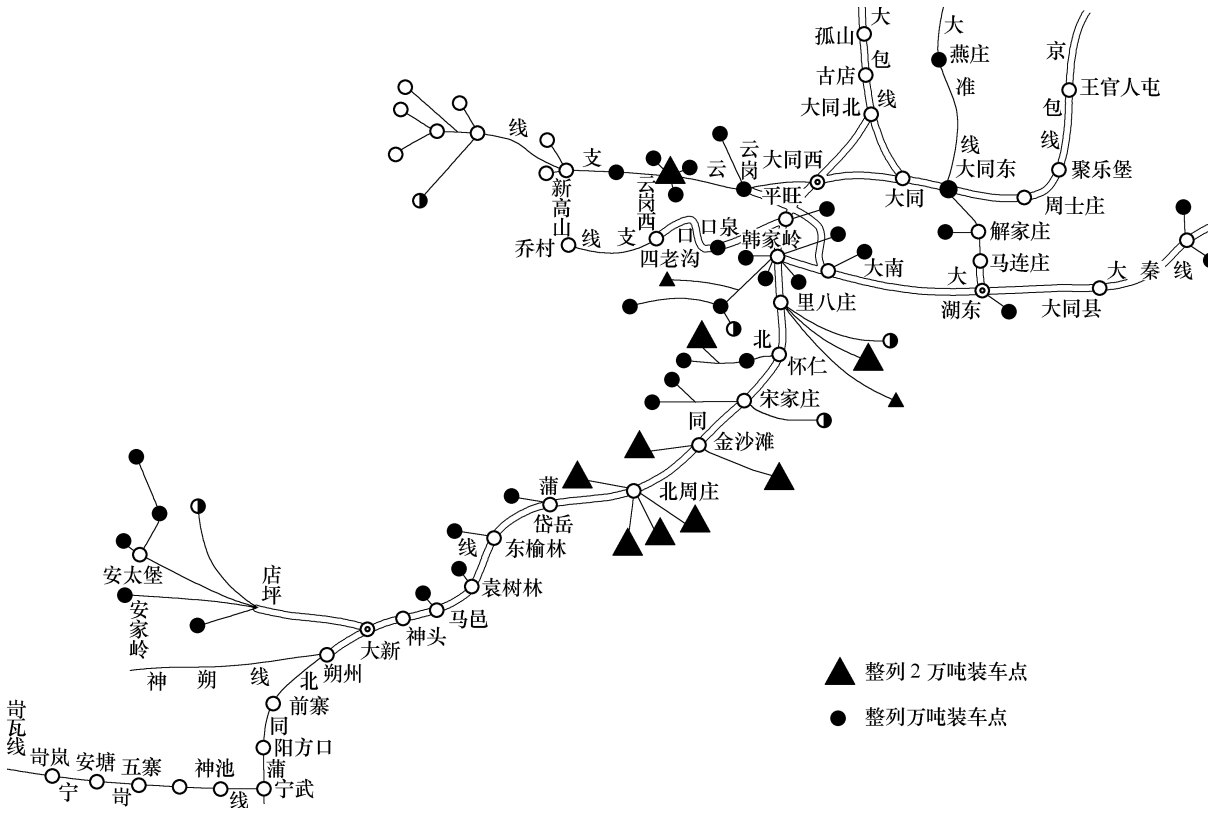


图 8 大秦线万吨级以上列车装车点

Fig. 8 Loading points above 10 kt on datong - qinhuangdao line

### 2.2.2 确定了 20 kt 重载组合列车的编组方式

重载组合列车采用 20 kt 编组,其机车的布置方式有多种,如“1+2+1”、“2+1+1”和“2+2”方式。为了确定编组方式,铁道部组织进行了仿真计算和综合比选。

主要的 3 种方案如下:

- 1) “2+2”方案:SS4 × 2 + C80 × 102 + SS4 × 2 + C80 × 102;
- 2) “2+1+1”方案:SS4 × 2 + C80 × 102 + SS4 × 1 + C80 × 102 + SS4 × 1;
- 3) “1+2+1”方案:SS4 × 1 + C80 × 102 + SS4 × 2 + C80 × 102 + SS4 × 1。

这 3 种方案的动力制动、牵引能力差别不大,根据大秦线的运行条件,关键问题是长大下坡道区间

的循环制动能力和产生的列车纵向力问题,同时要最大限度满足运输组织需要,提高运输效率,因此选择大秦线 K275—K325 进行长大下坡道区间循环制动的充气能力和纵向力的比较分析。

计算结果表明,在未充分利用动力制动的条件下,3 种方案在 K275—K325 区间的循环制动次数均达到 11 次之多,其中最短的再充气时间不足 2 min。对于“1+2+1”或“2+1+1”方案,由于尾部机车的充气作用,该充气时间仍可充分满足要求;“2+2”方案由于无尾部机车,存在再充气不足的可能性,其运行安全性不如“1+2+1”或“2+1+1”方案。此外,在同样操纵条件下,例如在 80 km/h 紧急制动时按“2+2”方案仿真计算的纵向力为 1 600 kN,比“1+2+1”或“2+1+1”方案要大 50% 以上,在



40 km/h低速紧急制动时纵向力已接近 2 000 kN,缺乏安全余量,不宜采用。与“2+1+1”方案相比,“1+2+1”方案更有利于列车制动机的充风和运输组织。

研究结果表明,“1+2+1”机车布置方案具有运输效率高、可操纵性强的优势,能提高组合列车牵引和循环制动性能,有效减少组合列车纵向力和冲动,同时尾部机车代替列尾装置构成列车完整性检查回路,有利于组合列车的安全,是大秦线开行 20 kt 重载组合列车的最佳选择。

### 2.2.3 组织综合试验验证

从 2005 年 11 月至 2006 年 1 月,采用“1+2+1”编组方式,进行了 4 个阶段 20 kt 综合试验(204 辆 C80);并且为了进一步挖潜扩能,于 2006 年 5 月进行了 2×10 500 t 综合试验(210 辆 C80)。

第一阶段和第二阶段综合试验分别对普通 C80 和新型 C80 编组的组合列车,进行了纵向动力学性能及制动性能试验。

第三阶段和第四阶段综合试验分别对普通 C80 和新型 C80 编组的组合列车,进行了机车加装 CI-OM 模块的功能及性能验证试验。

第五阶段综合试验主要验证了车辆由 204 辆增加到 210 辆的列车纵向动力学性能及制动性能。

5 个阶段综合试验表明:

1) 采用 GSM-R 网络可以满足 2×10 kt 方式组成的 20 kt 组合列车 Locotrol 系统应用的要求;

2) 采用 Locotrol 分布式动力控制系统和“1+2+1”的编组方式,能有效加快列车制动作用传递速度,明显缩短超长列车充气时间,减小列车冲动;

3) 在 GSM-R 网络平台上采用 Locotrol 技术可以满足长大坡道上 20 kt 列车循环制动性能和紧急制动距离的要求;

4) 在 GSM-R 网络平台上采用 Locotrol 技术可以满足列车纵向动力学的要求。新型 C80 比普通 C80 列车最大纵向力减小 41%~59%;

5) 车辆由 204 辆增加到 210 辆的列车纵向动力学性能及制动性能能够满足运行要求。

通过技术开发、系统集成和综合试验,我国铁路具备了采用 Locotrol 系统开行 2×10 kt 重载组合列车的条件。

## 2.3 和谐型机车开行 2×10 kt 重载组合列车系统集成

和谐型机车是我国铁路通过引进消化吸收再创

新生产的大功率交流传动电力机车,设计速度 120 km/h,牵引功率 9 600 kW,轴重(23+2) t,起动牵引力 760 kN。只需采用 2 台和谐型机车可以满足牵引 20 kt 重载组合列车的需要,大幅度减少了机车台数,有利于提高运输效率和经济效益。

### 2.3.1 研制了可控列尾装置

为了配合和谐型大功率机车在大秦线的投入使用,提出在 20 kt 组合列车尾部加挂可控列尾,保证和谐型机车采用“1+1”编组方式开行 20 kt 重载组合列车运行的安全性和平稳性。

可控列尾装置主要由列尾机车控制盒、列尾主机和数据传输通道组成,主要功能是当重载组合列车主控机车开始空气制动减压时,列尾装置主机同步减压,尾部车辆开始制动,达到加快整个列车制动速度,减少列车纵向冲动,缩短列车制动距离,提高整个列车制动效果的目的。

可控列尾装置的研制需要解决机车制动信息的提取、制动信息数据的可靠传输和列尾主机的准确动作 3 个关键技术问题。大秦线使用的可控列尾装置在解决 3 个关键技术问题上,充分利用现有装备资源,与 Locotrol 系统紧密结合,其中机车制动信息的提取来自机车运行监控记录装置(LKJ),通过通信接口将信息传送给列尾机车控制盒。制动信息数据的可靠传输利用 Locotrol 系统的通信模块(OCU),采用同样的传输方式,既保证了系统数据的可靠传输,也充分利用了现有资源,大大加快了项目研发的进程,并将降低整个装置的造价。列尾主机是在既有列尾多年成功应用的基础上研究开发的,有效解决了制动电磁阀、通信模块(TCU)的可靠性及电池容量等技术问题。

可控列尾装置于 2007 年 6 月 12 日在大秦线随“1+1”组合 20 kt 列车进行了实车试验,获得了成功。

### 2.3.2 组织综合试验验证

2007 年 5 月至 7 月,成功进行了用 2 台大功率和谐型电力机车加可控列尾装置牵引 20 kt 级重载组合列车的综合试验和专项试验。综合试验对机车无线同步控制系统的性能、20 kt 级列车常用制动、长大连续坡道循环制动、平直道启动、列车纵向力、机车动应力及可控列尾等性能进行了综合测试。专项试验重点对列车在 12‰下坡道的紧急制动性能和 4‰上坡道的启动牵引能力进行测试。综合试验和专项试验结果表明,采用 2 台大功率和谐型电力

机车加可控列尾装置牵引 20 kt 重载组合列车是安全可行的。

目前,大秦线每天正式开行 10 列左右由 2 台大功率和谐型电力机车牵引的 20 kt 级重载组合列车。

### 3 主要技术装备研究开发和配套技术改造 工程

为开行 20 kt 重载组合列车,铁道部系统组织了 20 kt 重载组合列车主要技术装备研究开发和配套技术改造工程。

#### 3.1 和谐型大功率交流传动电力机车

该型机车采用世界最先进的交流传动技术,共有 8 个动轴,单轴功率达到 1 200 kW;电制动为再生制动,电制动功率高;功率因数接近于 1,谐波含量低;机车的机械强度按满足 20 kt 重载列车牵引要求设计;运营速度为 120 km/h,轴重为(23 + 2)t;采用机车微机网络控制系统;机车制动机为世界先进的 CCB II 制动机。

在铁道部的组织下,通过引进消化吸收再创新,掌握了机车总成、网络控制、车体、制动系统、驱动装置、牵引变流器、牵引变压器、牵引电机和转向架等 9 项核心技术以及受电弓等 10 项主要配套技术。国产的和谐型大功率交流传动电力机车已批量交付运营。

#### 3.2 新型 E 级钢车钩及大容量缓冲器

大秦线原有的机车车钩、缓冲器不能适应 20 kt 级重载列车运输的需要,为此研究开发了新型车钩、缓冲器。

研制了 E 级钢机车车钩及钩尾框,强度比 C 级钢提高了 20%,满足了机车牵引 20 kt 级列车的需要。E 级钢与 C 级钢车钩及钩尾框具有相同的结构尺寸,便于推广及更换。

研制了 QKX100 型大容量弹性胶泥缓冲器,容量达到 100 kJ,为 SS4 原 MT-2 型缓冲器容量的 2 倍,冲击速度达 10 km/h,降低了机车的纵向力和纵向加速度。新型弹性胶泥缓冲器与既有缓冲器能互换使用。

#### 3.3 新型 C80 货车及牵引杆

研制了载重 80 t 的铝合金 C80 型和不锈钢 C80B 型重载货车。这两种车的转向架采用 25 t 轴重下交叉支撑转向架或 25 t 轴重摆动式转向架,具有运行速度快、动力学性能稳定等特点;车体自重轻,容积大,与 C76, C63A 相比单辆载重分别提高了

6.7%、31.1%;车辆外形尺寸满足秦皇岛第三、四期翻车机及其附属设施的匹配要求,可以实现不摘钩连续翻卸作业。

研制了 RFC 型货车牵引杆。牵引杆采用 E 级铸钢制造,提高了强度,破坏载荷大于 4005 kN;杆身为箱体结构,与 16 号、17 号车钩相比,降低自重约 280 kg, 20 kt 重载列车减轻列车重量约 38 t;牵引杆设有挡肩结构,两端面为球面,满足了拨车机及翻车机的作业需要;采用牵引杆后,缩小了车辆间隙,有效降低了车辆纵向冲动,提高了车辆动力学性能。

#### 3.4 120-1 型车辆制动机

研制了新型 120-1 型货车制动机。在 120 型制动机基础上,针对大秦线长大下坡道循环制动性能要求,增加了常用制动功能,同时对 120 制动机局减阀、紧急阀结构上的不足进行了改正,稳定了阀的性能,提高了可靠性。120-1 型制动机的主要性能已达到国外先进水平,能与 Locotrol 装备配套使用以满足重载列车运行要求。120-1 型制动机与 120 型制动机相比,150 辆编组列车的常用全制动时间缩短 30% 以上。大秦线 20 kt 级重载组合列车试验表明,120-1 型制动机能有效提高循环制动能力,减少纵向冲动,缩短了制动距离。同时,120-1 制动机可与 GK 制动机、120 制动机混编使用,符合中国铁路货车运行实际。

#### 3.5 机车自动过分相装置

大秦线机车自动过分相装置方案分别考虑了单台机车自动过分相、双台外重联机车自动过分相和无线分布式组合列车中机车自动过分相 3 种工况,并预留特殊条件手动过分相的功能。该装置是由车载控制装置、感应接收器、灯显和地面感应器组成。在应用 Locotrol 系统开行 20 kt 组合列车时,自动过分相车载控制装置通过与 Locotrol 系统配合,实现主从控机车顺序解除同步状态,完成自动过分相后,各机车自动恢复同步状态。机车过分相时,车载装置自动控制牵引和电制动级位逐级下降或上升,以减少列车冲动。采取有针对性的防干扰措施,消除了因重载列车牵引电流增大引起的自动过分相误动现象<sup>[5]</sup>。

#### 3.6 调度集中系统(CTC)

大秦线分散自律调度集中系统综合了运输组织、计算机、网络通信和现代控制技术,采用智能化分散自律设计原则,以列车运行调整计划为中心,兼

顾了列车与调车作业的特点,在实现列车进路自动控制的同时,将调车进路控制也纳入系统统一管理,避免了行车调度人员与车站行车人员频繁交接控制权的问题,提高了系统的使用效率,实现了调度指挥系统的高度自动化。该系统集智能调度决策、实时遥控、故障安全和信息安全技术为一体。在系统的硬件选型、结构设计、软件模块、冗余设计、故障安全等方面体现了先进性、可靠性、安全性和模块化设计。

大秦线 CTC 系统的开通,为重载铁路运输提供了安全高效的保证,可充分发挥线路的通过能力,提高劳动生产率,改善劳动条件。

### 3.7 20 kt 级列车仿真计算及优化操纵技术

大秦线地形复杂,隧道多、桥梁多、弯道多,线路纵断面连续长大下坡道,最大为 12‰下坡,4‰上坡,对 20 kt 级重载组合列车操纵技术提出了很高要求。为此,采取了一系列技术措施,进行了全程计算机仿真,并制定了科学合理的操纵规程,主要包括:启动操纵、起伏坡道操纵、关键区段操纵、慢行地段操纵、通讯中断时操纵、不良天气情况下操纵等多项优化操纵规程,保证了 20 kt 级重载组合列车的平稳安全运行。

### 3.8 站场、牵引供电、通信信号配套工程改造

为开行 20 kt 重载组合列车,实现增运扩能目标,铁道部组织对站场、牵引供电、通信信号配套工程进行了改造。

#### 3.8.1 站场技术改造

大秦线重点对湖东、阳原、化稍营、涿鹿、延庆、茶坞、蓟县西、遵化北、迁安北、后营(新建站)、柳村南等 11 个车站站场进行了改造,到发线有效长延长到 2 800 m 及以上,到发线有效长范围内坡度不大于 1.5‰。对大秦线列车集结的湖东站和疏解的柳村南站重点进行了改造,湖东站新增了 3 个线束(每个线束由 2 条到发线和 1 条机走线组成),柳村南站重车场新增了 5 个线束,轻车场新增了 4 个线束,满足了 20 kt 级列车的编解和行车需要。

#### 3.8.2 线桥设备强化改造技术

为满足大秦线运量快速增长对线桥设备的要求,系统开展了大秦线适应 20 kt 级列车运行的检测技术研究和试验,并根据检测试验结果及养护维修要求,利用综合施工天窗进行线桥强化。更换钢轨和道岔、用 III 型枕更换 II 型枕、进行道床清筛及捣固、钢轨打磨、隧道病害整治等,并对 20 m 及以下并

置梁、32 m 简支梁、圆形中高墩进行治理和加固,对 8 m 钢筋混凝土梁进行了疲劳性能和寿命评估。通过线桥设备强化技术改造,为大秦线 2007 年实现年运量  $3 \times 10^8$  t 的运输目标和安全生产打下了坚实的基础。

#### 3.8.3 牵引供电系统增容改造和配套技术

为满足大秦线大牵引负荷需要,开展了重载铁路牵引供电系统配套技术研究,提出了增容改造方案。增设了 5 座牵引变电所,更换了 8 台容量不足的主变压器;新建了牵引供电综合自动化远动系统;采用了增压变压器、可调电容无功补偿装置、150 mm<sup>2</sup>大截面接触导线、接触网上下行全并联的运行方式等综合技术措施;开展了多机多弓运行条件下的弓网关系研究,研制了大截面接触导线配套零部件。通过增容改造和采用新的技术装备,提高了牵引供电能力和接触网可靠性,保证了 20 kt 级重载列车受流的需要。

#### 3.8.4 通信信号设备的配套改造

加强和完善了 GSM-R 无线双网系统。在太原建立移动交换中心;在太原、大秦线沿线设置了基站;在隧道区段设置了光纤直放站,敷设各型多芯光缆 1 100 多 km。

配套改造了信号设备。信号采用四显示制式,区间设置通过信号机,采用 ZPW-2000 A 无绝缘轨道电路,将 15 个站(场)改造为计算机联锁,道岔转辙机采用电液转辙机,机车信号采用主体化机车信号设备。通过理论分析计算和试验验证,对信号设备进行了改造,满足了抗 200 A 以上不平衡牵引电流干扰的要求。

## 4 大秦线开行 20 kt 重载列车的创新点

### 4.1 系统集成创新

1) 在世界上首次实现了 Locotrol 技术与 GSM-R 技术的结合,并成功应用于 20 kt 级重载组合列车。把 Locotrol 技术由过去的点到点通信传输,发展为系统网络通信传输,解决了机车间通信距离限制的关键问题,标志着我国铁路重载技术上了一个新的台阶。

2) 首次实现了采用 2 台和谐型大功率机车加可控列尾的方式,开行 20 kt 级重载组合列车。

3) 首次实现了 800 MHz 数据电台与 Locotrol 技术结合,并成功应用于大秦铁路 20 kt 级重载组合列车。使通信传输距离由 450 MHz 的 650 m 提高到

800 MHz 的 790 m,进一步拓展了 Locotrol 技术的应用领域。

4)首次采用单套 Locotrol 系统与 SS4 机车结合,实现了主控机车双端同步操纵控制功能。与原方案相比,200 台 SS4 机车仅设备改造就节约资金 1 亿元。

#### 4.2 技术装备创新<sup>[2]</sup>

1)实现了大功率交流传动电力机车引进消化吸收再创新,系统掌握了核心技术和主要配套技术,国产的和谐型重载机车首次投入运用,填补了我国大功率交流传动电力机车的空白。

2)研制了载重 80 t 的 C80 重载货车,采用 25 t 轴重下交叉支撑转向架(转 K6 转向架)和 25 t 轴重摆动式转向架(转 K5 转向架),运行速度快,动力学性能稳定,车体自重轻,容积大。形成了铝合金和不锈钢两种系列产品,大批量投入运用。

3)研制了 120-1 制动阀、中间牵引杆、E 级车钩和大容量弹性胶泥缓冲器等主要配套装备。这些装备的使用,大幅度减少了列车纵向冲动,提高了列车安全性。

4)首次采用自主研发的机车自动过分相装置,实现了单台机车、双台外重联机车和无线分布式组合列车机车的自动过分相,确保了重载组合列车安全平稳运行。

5)首次在重载煤运专线采用我国自行研制的分散自律调度集中系统,有效提高了线路的通过能力,提高了劳动生产率,改善了劳动条件。

#### 4.3 运输组织创新

1)优化了运输组织。大秦铁路在世界上首次采用 4 台机车“1+2+1”的方式、2 台和谐型大功率交流传动电力机车“1+1+可控列尾”的方式开行 20 kt 级重载组合列车。我国针对大秦铁路运输特点所采用的 2 种 20 kt 级重载列车组合方式,具有运输效率高、制动性能好、纵向冲动小、安全平稳等特点。

2)实现了集疏运一体化。20 kt 级重载组合列车满足了大秦铁路 35 个万 t 和 9 个 20 kt 装车点的需要,缓解了湖东站的编组压力。20 kt 装车点可开行点对点的重载组合列车,充分发挥了先进技术装备的优势,构建了集疏运一体化的格局,大幅度提高了运输效率和效益。

### 5 取得的经济社会效益

大秦线 20 kt 级重载组合列车的开行,大幅度提

高了大秦线运量,经济社会效益显著。

#### 5.1 运量显著提高

2002-2007 年,大秦铁路运量从  $1 \times 10^8$  t 提高到了  $3 \times 10^8$  t,相当于又新建了 2 条大秦铁路。从 2006 年 3 月 28 日正式开行 20 kt 重载组合列车到 2007 年 12 月 31 日,累计运量达到  $1.4 \times 10^8$  t,已高于国外重载铁路的年运量。

#### 5.2 运输收入显著增长

大秦铁路的运输收入从 2002 年的 79 亿元增加到 2007 年的 172 亿元,增加了 118%,经济效益显著。

开行 20 kt 级重载组合列车,大幅度压缩了全周转时间,降低了运营成本,提高了运输效率和效益。

#### 5.3 社会效益十分显著

目前,大秦铁路每天开行 30 列 20 kt 级重载组合列车,年增运煤炭 84 Mt,可多发电  $1\ 800 \times 10^8$  kW·h。

随着和谐型大功率交流传动电力机车的陆续投入运用,20 kt 重载组合列车开行对数增加,为大秦铁路在“十一五”末实现  $4 \times 10^8$  t 运量打下了坚实的技术基础。

此外,还推动了其他方面的建设和发展。煤炭生产基地建设了一批现代化的装车设备,港口新建了深水码头和翻车机,从而增加了“三西”地区的经济收入,拉动了秦皇岛港、京唐港、天津港等港口的发展,使海运市场升温,为区域经济发展注入了新的活力。

### 6 结语

大秦线 20 kt 级重载组合列车的开行,标志着我国重载技术达到了世界先进水平,不仅为大秦铁路运量大幅度提高奠定了坚实的技术基础,也为《中长期铁路网规划》中其他煤运基地铁路运输通道建设起到了示范作用。大秦铁路已成为煤运通道重载运输的示范性工程、既有线扩能改造的样板性工程和铁路内涵扩大再生产的标志性工程。

#### 参考文献

- [1] 耿志修. 大秦线开行 20 kt 重载组合列车系统集成与创新[J]. 中国铁路,2007(9):25-29
- [2] 耿志修. 中国铁路科技进步与发展成就[J]. 铁路合作组织通讯,2005(2):15-21
- [3] 钱立新. 世界铁路重载运输技术[J]. 中国铁路,2007(6):49-53
- [4] 宋 钢. 大秦线 GSM-R 系统构成与功能[J]. 中国铁路,2007(6):45-48

- [5] 宁涛,李明.大秦线电力机车自动过分相系统的改进[J].铁道机车车辆,2007(1):42-42,56
- [6] 高春明,冀彬,张波,等.大秦线重载组合列车的Locotrol技术应用研究[J].电力机车与城轨车辆,2006(6):5-7,41
- [7] 邹士杰.美国铁路重载运输[J].国外铁道车辆,2006(5):1-5,26
- [8] Dave van der Meulen. Railway globalization and heavy haul[A]. High Tech in Heavy Haul [C]. International Heavy Haul Association 2007 Specialist Technical Session, 2007(6) 329-338
- [9] Dietrich Küsspert, David A, Kirchner. Locotrol RCL - an integrated locomotive system solution[J]. Signal and Draht,2006(10):36-39
- [10] Carlson F G, Round K C. Development and implementation of advanced brakes and improved suspension systems for the North American network[A]. Implementation of Heavy Haul Technology for Network Efficiency [C]. International Heavy Haul Association 2003 Specialist Technical Session, 2003(5):1.1-1.10

## System Integration and Innovation of Operating 20 kt Combined Heavy-haul Train on Datong—Qinhuangdao Line

Geng Zhixiu

(Ministry of Railways, Beijing 100844, China)

[Abstract] Datong—Qinhuangdao line, as the first electrified double-track heavy-haul line dedicated to coal transportation in China, extends from Beitongpu line in the west, reaches Qinhuangdao in the east, and opened in Dec. , 1992, totaling 653 km with designed volume of  $1 \times 10^8$  t/a. In order to meet the requirements of national economical development, the transport capacity of the line must be expanded rapidly. Depending on independent innovation, MOR, for the first time in the world, realized the integration between GSM-R and Locotrol, the integration between 800 MHz digital radio and Locotrol, and the integration between a single set of Locotrol and SS4. Meanwhile, it developed auxiliary equipment for heavy-haul transportation through combining 2 Hexie heavy-duty locomotives with controllable train ends. Relying on integration innovation, it succeeded in operating 20 kt-level combined heavy-haul train on Datong—Qinhuangdao line, which triples the annual volume of the line from  $1 \times 10^8$  t in 2002 to  $3 \times 10^8$  t in 2007.

[Key words] China railways; Datong—Qinhuangdao line; 20 kt-level combined heavy-haul train; integration innovation