

通信技术

交流—直流机车混编重载组合列车互联互通系统设计

沈红平, 徐富宏, 罗皓中, 伍子逸, 胡国宏, 燕富超
(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 为了实现重载列车中交、直流机车的混编互联, 文章提出一种基于图形化语言的分布式组合列车互联互通系统, 其克服了交、直流机车在动力性能匹配上存在差异的困难, 解决了交、直流机车不同牵引特性、不同控制指令、不同状态显示 3 大互联互通难题, 实现了交流机车和直流机车编组同步操纵功能。此方法已被应用于朔黄铁路 1.6 万 t 重载组合列车, 静态和动态试验结果显示, 各项试验参数均在安全范围内, 有效保障了列车的正常运行。

关键词: 重载组合列车; 动力分布; 互联互通; 动力匹配; 同步控制

中图分类号: U292.92⁺3

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)02-0092-08

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.02.016

A Design of Interconnection System for Heavy Haul Combined Train Based on AC-DC Mix Grouping Locomotive

SHEN Hongping, XU Fuhong, LUO Haozhong, WU Ziyi, HU Guohong, YAN Fuchao
(Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: In order to realize the hybrid interconnection of AC and DC locomotives in heavy haul combined trains, a distributed combined train interconnection system is proposed based on graphic language, which overcomes the difficulty of the difference in locomotive power matching performance between AC and DC locomotives, and solves three major problems of different traction characteristics, different control commands and different status display of AC / DC locomotives. This method has been successfully applied to the operation of 16000-ton heavy haul combined trains on Shuohuang Railway. Experimental results show that the parameters are in the safe range, which verifies the feasibility of this scheme.

Keywords: heavy haul combined train; dynamic distribution; interconnection; dynamic matching ; synchronous control

0 引言

2020 年 7 月 10 日, 55102 次首列 1.6 万 t 重载列车由神池南站发车, 成功驶抵黄骅港站, 这标志着朔黄铁路 1.6 万 t 重载组合列车正式开行。此次开行的列车采用交、直流机车混合“1+1”组合列车编组方式以及中车株洲电力机车研究所有限公司研制的 TEC-TROMS 无线重联同步控制系统^[1]。TEC-

TROMS 系统在实现重载组合列车无线重联同步控制功能^[2]后再次创新, 实现了交、直流机车的混编和互联互通功能, 对朔黄铁路 1.6 万 t 重载组合列车正式开行起到了关键性的作用。

目前国内应用重载组合列车交、直流机车混编技术的还有大秦铁路^[3], 其机车为 SS4, HXD₁ 和 HXD₂ 型, 采用了 GE 公司的 LOCOTROL-DP 系统^[4]将 3 种机车合理编入同一列车中, 扩展了机车混编牵引功能, 使大秦线的运输效率得到充分发挥。

重载组合列车中交、直流机车互联互通的难点在于不同车型的控制方式和接口不相同, 有不同的控制

收稿日期: 2020-12-09

作者简介: 沈红平(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究无线重联同步控制软件设计及开发。

指令和不同的显示状态。如何将这些区别进行统一，是互联互通系统设计的核心目标。本文重点针对朔黄铁路无线重联重载组合列车中交流机车和直流机车的控制指令和状态显示信息的不同，对 TEC-TROMS 系统进行软件兼容性设计及控制研究，最终实现了交、直流机车的混编控制。

1 TEC-TROMS 系统

1.1 工作模式

TEC-TROMS 系统基本工作模式如图 1 所示：置于重载组合列车最前端的机车为“神华号”交流主控机车，置于列车中部的机车为 SS4B 型直流从控机车，交流机车和直流机车之间的为车辆；采用长期演进（long term evolution, LTE）通信方式构建交流机车和直流机车之间的通信桥梁^[5]，实现多台机车动力分布同步牵引及制动控制。

主、从控机车建立无线通信编组链接后，由主控机车同步控制分布在列车中的从控机车。乘务员操纵机车时，主控机车 TEC-TROMS 系统采集本车的控制信号并调制成控制数据包，通过 LTE 无线网络传输给从控机车。从控机车接收到主控机车传输来的控制指令后进行计算分析，将驱动输出信号传输到机车电气设备或其他电气设备，实现直流机车与交流机车的同步操控；同时通过 LTE 无线网络反馈本车的状态信息及故障信息。在此基础上，TEC-TROMS 重联

控制系统根据实时反馈信息进行列车的故障诊断及安全导向。

1.2 系统组成

由于交流机车和直流机车存在性能差异，主要包括机车的特性控制不一致（直传动机车为准恒速控制、交流传动机车为恒力矩控制）、机车的功率不一致、机车的电气逻辑线路不一致、机车的辅助系统不一致等。因此重载组合列车中不同型号的机车难以被直接混编互联控制。交、直流机车主要技术参数详细对比见表 1，其中牵引特性和功率的不同将影响牵引力的发挥，电气逻辑线路的不同会影响接口的处理，辅助系统的不同则影响辅机的启停控制等。

表 1 交、直流机车主要技术特征
Tab. 1 Main technical characteristics of the AC and DC locomotives

主要技术特征	SS4B 型直传动电力机车	“神华号”交流传动电力机车
特性控制方式	准恒速控制	恒力矩控制
机车功率（持续制）/kW	6 400	9 600
机车持续牵引力 /kN	450	532
机车启动牵引力 /kN	628	≥ 760
电制动力 /kN	382（10~50 km/h）	461
辅助系统	劈相机、牵引风机、制动风机	主辅一体

1.2.1 交流机车的 TEC-TROMS 系统

TEC-TROMS 系统在朔黄“神华号”HXD1 型机车上的配置及网络拓扑如图 2 所示。系统由通信单

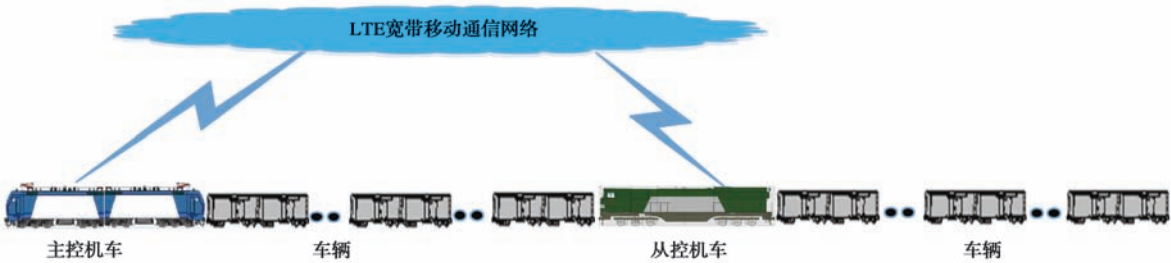


图 1 TEC-TROMS 系统基本工作模式示意
Fig. 1 TEC-TROMS system operating mode

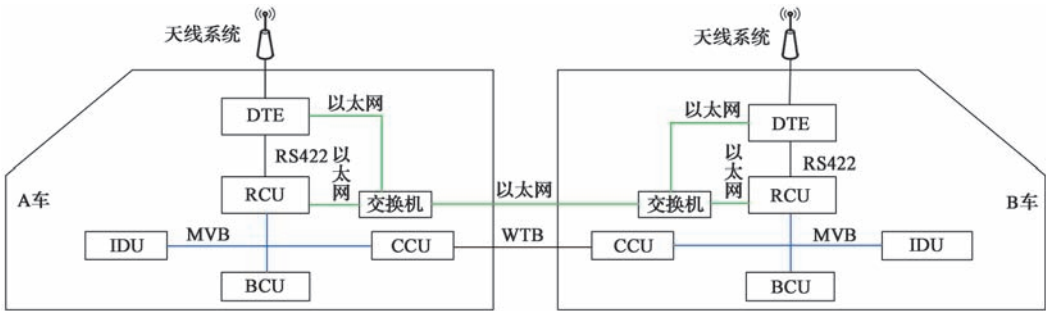


图 2 交流机车 TEC-TROMS 系统架构
Fig. 2 TEC-TROMS system of AC locomotive

元 DTE、远程控制单元 RCU、中央控制单元 CCU、信息显示及人机接口单元 IDU、制动系统 BCU 组成。其中, DTE 负责编组及控制信息的发送和接收; RCU 负责编组逻辑及同步操纵控制功能; CCU 为重联控制软件提供机车牵引控制相关数据; IDU 负责采集和显示编组及控制信息。CCU 为 MVB 总线中央处理单元, 单节车中 CCU, RCU 及 IDU 通过 MVB 进行通信, RCU 与 DTE 之间通过串口 RS422 进行通信; 两节车之间的 RCU 和 DTE 分别通过以太网进行数据交互, 互为冗余, 协同工作, 以提高系统可靠性。

1.2.2 直流机车的 TEC-TROMS 系统

TEC-TROMS 系统在朔黄 SS4B 型直流机车上的配置及网络拓扑如图 3 所示^[1]。

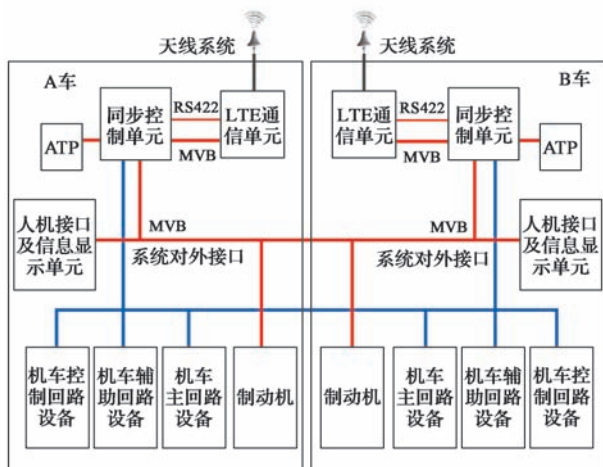


图 3 SS4B 型机车 TEC-TROMS 系统架构

Fig. 3 TEC-TROMS system of SS4B locomotive

系统由通信单元 LTE、同步控制单元、人机接口及信息显示单元 IDU、制动系统 BCU 和机车主回路、辅助回路、控制回路系统组成。其中, LTE 单元负责编组及控制信息的发送和接收; 同步控制单元负责编组逻辑及同步操纵控制功能; IDU 负责采集和显示编组及控制信息。系统设计时遵循通用化原则, 在网络的逻辑拓扑结构上, 将位于单节机车上的同步控制单元作为 MVB 总线中央处理单元; 数据通信系统、人机显示接口和机车信号接口通过多功能车辆总线 (multifunction vehicle bus, MVB) 与同步控制系统连接, 构成一个星形网络。两节机车的操控系统、机车信号接口以及数据通信系统互为冗余, 协同工作, 以提高系统可靠性。

重载组合列车 TEC-TROMS 系统具有重载重联远程通信、远程同步操纵控制、故障诊断及处理、安

全导向、信息显示及人机对话、制动系统控制及状态监测等功能。

1.3 系统软、硬件

TEC-TROMS 系统采用高可靠的 Compact PCI 平台、高性能的低功耗 PowerPC 处理器、安全可靠的嵌入式 VxWorks 实时操作系统以及高效的图形化应用软件开发工具设计而成。

软件系统采用实时操作系统, 以保证微机控制系统反应的实时性; 机车通信网络采用 IEC61375 标准规定的网络协议, 以保证整个网络系统通信的实时性、可靠性及兼容性。控制系统软件采用模块化结构设计; 功能控制部分采用图形语言编写, 以保证软件的开发、验证及维护^[1]。TEC-TROMS 系统产品实物如图 4 所示。



图 4 TEC-TROMS 系统设备

Fig. 4 Equipment of TEC-TROMS system

2 TEC-TROMS 系统互联互通功能设计

2.1 设计原理和方案

为达到两种机车之间的相互兼容, 采用分级控制模式。第一级为机车远程通信及列车控制, 可以实现交、直流机车之间的重联控制通信和管理, 以及机车间的控制策略及计算; 同时由于交、直流机车的控制信息不同、通信信息格式也不一样, 要实现交、直流机车的混编互联, 需将机车的控制及状态数据归一化为标准的无线通信协议数据。第二级为机车车辆控制, 即实现“神华号”交流机车和 SS4B 型直流机车在重联运行模式下的本车同步控制及处理计算, 同时实现系统与机车控制系统的电气连接, 并进行数据及信息交互。从控机车接收主控机车的控制信息, 根据主控车及本车的控制模式进行牵引运行控制; 同时, 采集本车的状态并提取主控机车特有的状态及故障信息, 通过无线通信传输给主控机车。交、直流机车互联互通原理如图 5 所示。

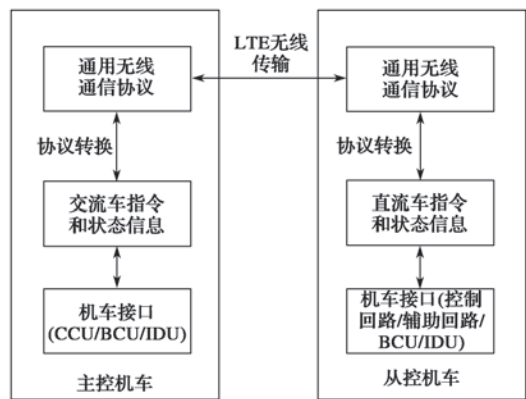


图 5 TEC-TROMS 系统互联互通原理
Fig. 5 Schematic diagram of the interconnection function of TEC-TROMS system

主控机车 RCU 通过机车接口接收本车的控制指令，经过协议转换后转成通用无线通信信号，再经过 LTE 无线传送给从控机车；从控车 RCU 接收到无线通信信号后，经过协议转换，并进行相关算法等逻辑控制设计转换成符合机车控制系统要求的控制指令，将该信号送给各自的执行单元，以实现主、从控机车的同步控制。

主控机车 RCU 将本车所有的状态信息根据通用的无线通信协议进行转换；从控机车 RCU 通过无线通信接收到状态信息后，按照本机车的特点将其转换成符合机车控制系统要求的状态信息，并送给 IDU 进行显示，以便 IDU 能同时显示本机车和主控机车的状态信息，方便乘务员同时监测整列车的机车状态。

从控机车 RCU 将本车所有的状态信息根据通用的无线通信协议进行转换；主控机车 RCU 通过无线通信接收到状态信息后，按照本机车的特点，将其转换成符合机车控制系统要求的状态信息，并送给 IDU 进行显示，以便 IDU 能同时显示主控机车和从控机车的状态信息，方便乘务员同时监视整列车的机车状态。

此方案无须改动“神华号”交流机车和 SS4B 型直流机车原有的接口，避免了大量的改造工作。

2.2 通用无线通信协议设计

通用无线通信协议需兼容“神华号”交流机车和 SS4B 直流机车所有的控制指令和状态信息。控制指令分为通用型和特有型两部分；状态信息也分为通用型和特有型两部分。特有的控制信息和状态信息是以交流机车还是直流机车的为基准，则需要针对每个信息进行区别分析，找到最合理的信号作为通用信息。协议构架如图 6 所示。



图 6 通用无线通信协议构架
Fig. 6 General wireless communication protocol architecture

2.3 交、直机车差异化设计

由于交流机车和直流机车本身的差异性，不同机车的控制指令和状态显示信息各不相同，要实现互联互通功能，重点需要解决下面几个问题：（1）交、直流机车的牵引不同匹配；（2）交、直流机车控制指令匹配；（3）交、直流机车状态信号显示匹配。

2.3.1 控制特性差异化设计

“神华号”交流机车牵引 / 电制动采用恒力矩控制模式；SS4B 直流机车牵引采用准恒速控制模式，电制动采用恒力矩控制模式。两种机车特性控制的区别主要在牵引特性方面。交流机车与牵引特性相关的列车级指令用于设定牵引力 F ，直流机车与牵引特性相关的列车级指令用于设定级位 n 。

2.3.1.1 “神华号”交流机车牵引特性

“神华号”机车牵引特性曲线如图 7 所示^[6]。在起始状态下，当速度为 0~5 km/h 时，牵引力恒为 760 kN；速度达到 5 km/h 之后，机车电机进入恒转矩区，整车的牵引力与速度呈线性关系，斜率为 $-3.8 \text{ kN}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$ 。当速度大于 65 km/h 时，机车电机进入恒功率区，整车功率保持 9 600 kW 不变，根据公式 $P=F \times v/3.6$ （式中： P 为机车功率， F 为机车牵引力， v 为机车速度）可以推出，此时机车牵引力与速度成反比^[7]。

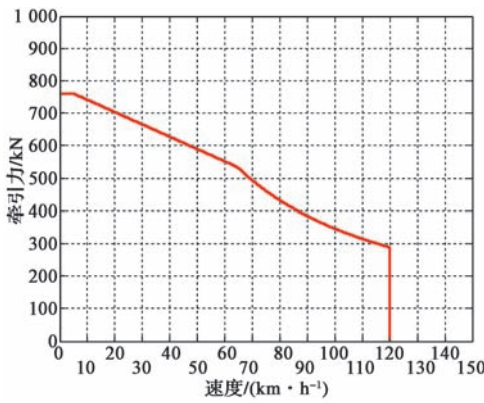


图 7 HXD1 型机车牵引特性曲线
Fig. 7 Traction characteristic curve of HXD1 locomotive

“神华号”机车的牵引力计算公式为

$$F = \begin{cases} 760, & 0 < v \leq 5 \\ 760 - (v-5) \times \frac{228}{60}, & 5 < v \leq 65 \\ 9600 \times \frac{3.6}{v}, & 65 < v \leq 120 \end{cases} \quad (1)$$

2.3.1.2 SS4B 型直流机车牵引特性

SS4B 型机车采用无级调压、有级磁场削弱方式，实现恒流—准恒速特性控制，司机手柄控制分为 10 级。牵引特性曲线如图 8 所示^[8]。

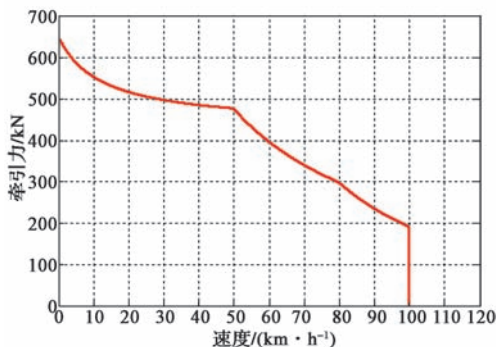


图 8 SS4B 型机车牵引特性曲线

Fig. 8 Traction characteristic curve of SS4B locomotive

SS4B 型机车速度在 0~50 km/h 范围内时，其牵引力受黏着力限制，最大牵引力与 $(100+8v)$ 成反比；机车 50~55 km/h 速度范围是电机超压区段，电机在电压达到 1 100 V 之后，才能对其进行磁场削弱控制；50~80 km/h 速度范围是机车恒功率区。

牵引电机电流的司机给定控制函数为

$$I_a = \min(150n, 600n-54v, 1096) \quad (2)$$

式中： I_a ——牵引电机给定电流，A。

电机电流的司机给定控制曲线见图 9^[9]。

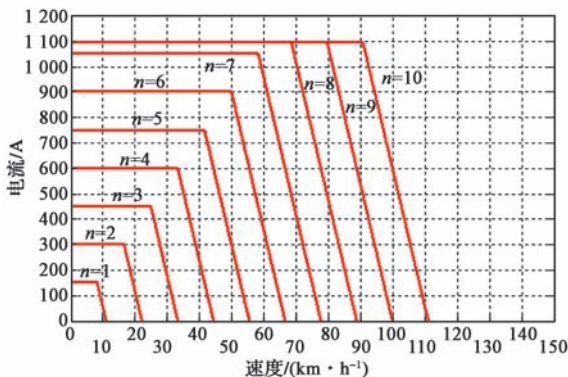


图 9 SS4B 型机车牵引电机电流的司机给定控制曲线

Fig. 9 Driver given control curves of SS4B locomotive traction motor current

2.3.1.3 交、直流机车牵引特性一致性设计

以“神华号”交流机车（主控机车）的牵引力为

基准，转换 SS4B 型直流机车（从控机车）的级位，从而调节 SS4B 型机车的牵引力，来实现两台机车的牵引特性匹配。

机车牵引力与级位、速度的关系如下：

(1) 当 $1 \leq n \leq 7$ 时，

$$F = \begin{cases} \frac{150nU_M\eta_c\eta_k}{600v}, & v < \frac{25}{3}n \\ \frac{(600n-54v)U_M\eta_c\eta_k}{600v}, & \frac{25}{3}n \leq v < \frac{100}{9}n \\ 0, & v \geq \frac{100}{9}n \end{cases} \quad (3)$$

(2) 当 $8 \leq n \leq 10$ 时，

$$F = \begin{cases} \frac{1096U_M\eta_c\eta_k}{600v}, & v < \frac{600n-1096}{54} \\ \frac{(600n-54v)U_M\eta_c\eta_k}{600v}, & \frac{600n-1096}{54} \leq v < \frac{100}{9}n \\ 0, & v \geq \frac{100}{9}n \end{cases} \quad (4)$$

式中： U_M ——电机电压； η_k ——牵引电机空载效率； η_c ——机车齿轮传动效率。

主控机车的牵引力指令通过无线网络传输给从控机车；从控机车接收到指令后将其转成设定目标值，并送给微机柜进行整车的级位控制，从而实现与主控机车的牵引匹配。

2.3.2 控制指令差异化设计

交、直流机车通用控制指令包括电钥匙信号、受电弓升起、受电弓降下、主断路器闭合、主断路器断开、牵引、电制动、方向向前、方向向后、压缩机启动、压缩机停止、撒砂、分相预备、大闸目标值、大闸运转、初制动、常用制动、全制动、重联、紧急制动、惩罚制动、小闸运转、制动区、小闸全制动及单缓。其特有控制指令如表 2 所示。

表 2 特有控制指令

Tab. 2 Specific control commands

机车类型	特有控制指令
“神华号”交流机车（主控车）	设定牵引力
SS4B 型直流机车（从控车）	设定级位、劈相机启动、牵引风机启动、制动风机启动

因直流机车有单独的劈相机启动、牵引风机启动、制动风机启动指令，而交流机车由于主辅一体化，没有单独的辅机启动指令，所以在无线重联混编模式下，需要设计控制辅助机组自动启动和停止逻辑功能。

2.3.2.1 劈相机控制功能设计

劈相机启停的基本思路为根据机车通用控制原理，通过现有的控制指令进行逻辑模拟生成。劈相机启动和停止过程控制设计为主、从控机车编组完成后，主控机车开始进行升弓操作；主、从控机车受电弓升弓到位后，主控机车进行闭合主断操作。此时，从控机车通过无线通信接收到主控机车发送的“主断合”指令，并根据“主断合”指令先执行本车的主断闭合；当本车主断闭合并等待几分钟、无异常后，即开始自动生成劈相机启动指令，通过机车接口送给辅助回路控制劈相机启动。当主控机车在停车状态下进行主断分操作后，从控机车通过无线通信接收到主控机车发送的“主断分”指令并等待几秒（这里等待几秒是为了确保在主断断开前劈相机已经停止启动）无异常后，即开始自动生成“劈相机停止”指令，并通过机车接口送给辅助回路以控制劈相机使之停止工作。

2.3.2.2 牵引风机控制功能设计

当从控直流机车劈相机启动成功后，收到主控机车牵引或电制动指令时，自动生成“牵引风机启动”指令，并通过机车接口送给辅助回路以控制牵引风机启动；当主控机车进行主断分操作时，从控机车通过无线通信接收到主控机车发送的“主断分”指令，等待几秒后自动生成“牵引风机停止”指令，并通过机车接口送给辅助回路以控制牵引风机停止。要特别注意的是，牵引风机停止指令要在劈相机停止之前执行，收到“主断分”指令后生成“牵引风机停止”指令的等待时间要小于生成“劈相机停止”指令的；否则劈相机停止后，牵引风机只会被动停止。

2.3.2.3 制动风机控制方法

当从控直流机车牵引风机启动后，收到制动指令时，系统自动生成“制动风机启动”指令，并通过机车接口送给辅助回路以控制制动风机启动；当主控机车制动指令消失或者牵引风机停止，从控机车自动生成“制动风机停止”指令，并通过机车接口送给辅助回路以控制制动风机停止。

由于模拟产生劈相机和牵引风机停止指令的前提条件都有“主断分”指令，直流机车必须在辅机都停止后才能断开主断路器，主断路器断开的控制逻辑需要进行对应修改。当主控机车收到主断路器断开指令时，延时 2 s 再送给直流机车。直流机车延时 2 s 断开主断路器，可以避免辅机在主断路器断开的同时被动停止，给辅机带来损伤。

直流机车辅助机组启动、停止指令设计流程如

图 10 和图 11 所示。

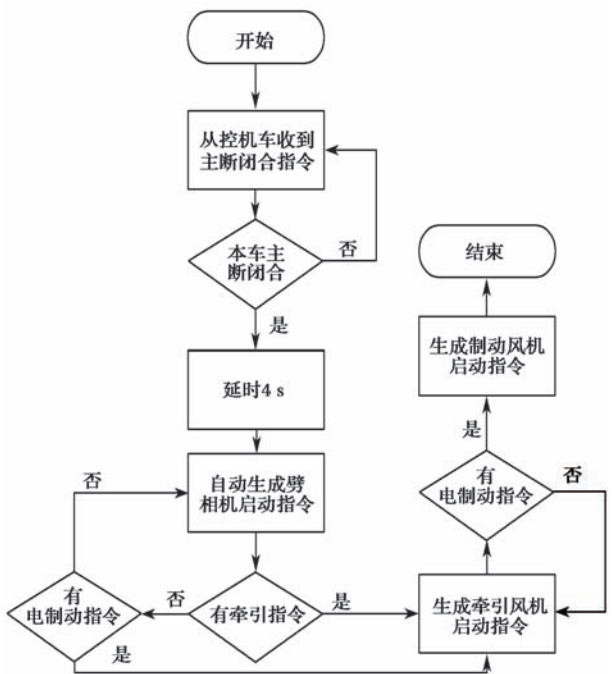


图 10 启动控制流程
Fig. 10 Start control process

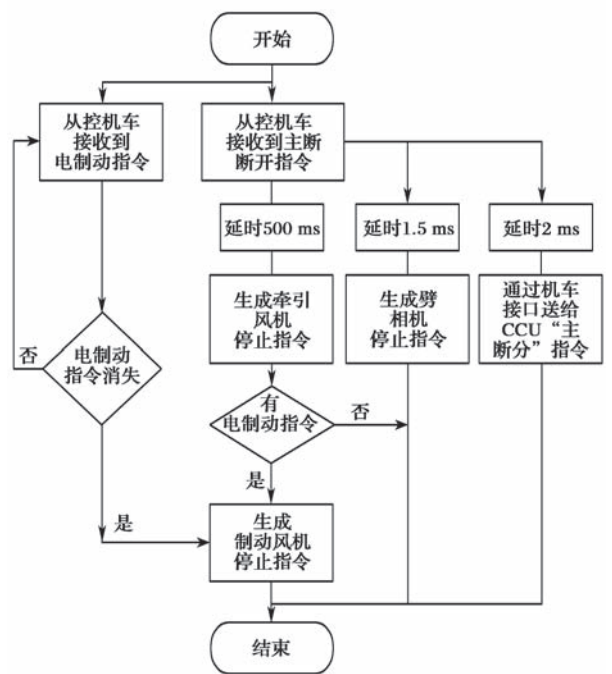


图 11 停止控制流程
Fig. 11 Stop control process

2.3.3 状态显示信息差异化设计

状态显示信息主要是在人机交互显示器界面显示的整列车的机车信息，供调试人员及乘务员查看。交、直流机车通用的部分状态信息涉及受电弓状态、主断路器状态、运行速度、网压、分相状态、总风缸压力、大闸目标值、均衡风缸压力、列车管压力、流量计、闸缸、列尾压力。其特有状态信息如表 3 所示。

由于显示信息不涉及机车控制，相对而言要求低一些，通用的信息可以放一起供查看，而特有的信息则根据机车类型进行分区查看。

表 3 机车特有状态信息显示
Tab. 3 Specific status information display

机车类型	特有状态信息
“神华号”交流机车（主控机车）	牵引力实际值
SS4B 型直流机车（从控机车）	电机电流、预备、零位

人机交互显示器界面如图 12 所示。



图 12 无线重联状态显示界面

Fig. 12 Status display interface of the wireless multi-traction

3 重载组合列车互联互通系统试验

3.1 静态试验

2020 年 6 月在朔黄铁路进行了 1.6 万 t 交、直流机车混编列车静态试验，试验项点见表 4。列车编组模式如下：“神华号” 7074 机车（主控机车）+108 辆 C80 车辆（空车）+SS4B0189 机车（从控机车）+66 辆 C64 车辆（空车）+ 试验车 + 可控列尾。

静态试验结果表明，朔黄 1.6 万 t 重载组合列车编组逻辑、无线链路通信、同步操纵控制、空气制动试验及机车状态信息显示等功能均正常，具备进行动态试验条件。

3.2 动态试验

2020 年 6 月~7 月又进行了多次 1.6 万 t 交、直流机车混编列车动态运行试验，其中包括 55102 次重载组合列车，试验主要项目见表 5。编组模式如下：“神华号” 7074 机车+108 辆 C80 车辆+SS4B0189 机车+58 辆 C70 车辆 + 试验车 + 可控列尾。运行区间为神池南—肃宁北，上行限制坡道 4‰，下行限制坡道 12‰。其动力学特性如表 6 所示。

表 4 静态试验项点
Tab. 4 Static test items

序号	试验项点	试验结果
1	主、从控机车无线编组设置及执行	组网成功
2	方向测试	正常
3	升弓、降弓测试	正常
4	合主断测试，给牵引或者电制动指令	主控机车主断闭合正常，从控机车主断闭合正常、劈相机启动正常、给牵引指令时牵引风机启动正常、给电制动指令时电制风机启动正常
5	分主断测试	主控机车主断路器断开正常，从控机车电制风机、牵引风机、劈相机依次断开后，主断路器断开
6	常用制动及缓解试验	初制动减压后整列车排风时间为 42 s，再充风时间为 150 s；减压 70 kPa 后排风时间为 55 s，再充风时间为 230 s；减压 100 kPa 后排风时间为 68 s，再充风时间为 300 s；常用全制动后排风时间为 86 s，再充风时间为 430 s
7	紧急制动及缓解试验	紧急制动后排风时间为 11 s，再充风时间为 610 s
8	主控机车和从控机车指令的时延	<2 s，符合要求
9	机车基本状态信息显示	正常

表 5 动态试验试项目
Tab. 5 Dynamic test items

序号	试验项目	区段	试验内容及结果
1	正常运行试验	神池南至肃宁北	同步操纵控制功能正常
2	紧急制动试验，初始速度 80 km/h	定州西站内	紧急制动距离 450 m，紧急制动时间 30 s，最大车钩力 900 kN
3	坡起试验	西柏坡至三汲	列车起车阶段，交直流机车级位发挥相同，持续约 2 min；加速阶段，满足 1.6 万 t 列车坡起牵引条件
4	LTE 双网中断停车试验	神池南至肃宁北	断开从控机车两节之间 RCU 与 DTE 串口通信及网口通信，双网中断时，从控机车维持当前工况运行；双网闪红时，从控机车进入惰行模式，牵引卸载

表 6 试验动力学特性
Tab. 6 Dynamic characteristics

动力学参数	全程试验结果	紧急制动试验值	安全限定值
轮轴横向力 /kN	41.8	11.2	90
最大拉钩力 /kN	803	1221	2 250
最大压钩力 /kN	861	730	2 250
脱轨系数	0.73	0.07	0.9
车钩偏转角 /($^{\circ}$)	2.8	1	6
轮重减载率	0.38	0.10	0.65

全部试验工况下车钩力最大值均小于对应限定值，满足试验安全性指标要求，被试货车运行稳定性指标（脱轨系数、轮重减载率和轮轴横向力）均满足试验要求。

4 结语

本文从“神华号”交流机车和 SS4B 型直流机车的差异性入手，在分析其不同的牵引驱动方式、特性控制、机车功率的基础上，提出分级控制模式方案，实现了不同机车之间的接口兼容和控制及状态数据的归一化；通过对通用无线通信协议进行设计，并针对交、直流机车不同控制特性、不同控制指令和不同状态信息显示进行差异化设计，实现了交、直流机车的互联互通功能。试验结果验证了此方案的可行性，为 1.6 万 t 重载组合列车安全平稳运行提供了保证。在此次研究成果的基础上，后期可以进行其他车型的混联互编研究，比如 HXD2/HXD3 型机车等，以提高编组的灵活性。

参考文献：

[1] 沈红平, 徐富宏, 李铁兵, 等. 无线重联同步控制系统中无线组网功能设计及应用 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2017, 40(4): 11-15.
SHEN H P, XU F H, LI T B et al. Design and application of wireless networking in wireless multi-traction control system[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2017, 40(4): 11-15.

[2] 李蔚. 重载列车机车无线重联同步控制系统关键技术研究与应用 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.

[3] 高春明, 龚彬, 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, 39(6): 5-7, 41.
GAO C M, JI B, ZHANG B, et al. Research and application of LOCOTROL technologies for heavy haul trains on Datong-Qinhuangdao railway line[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2006, 39(6): 5-7, 41.

[4] 姚小沛. 大秦线 HXD₁ 与 HXD₂ 机车 LOCOTROL 互联互通试验报告 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院机车车辆研究所, 2009.

[5] 郭其一, 陈琳芝, 黄世泽, 等. 基于无线通信的重载列车同步控制技术研究 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2013, 41(2): 223-228, 246.
GUO Q Y, CHEN L Z, HUANG S Z, et al. Wireless Communication-based Synchronization Control Technology for Heavy Haul Train[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2013, 41(2): 223-228, 246.

[6] 张曙光. HXD₁ 型电力机车 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992.

[7] 南车株洲电力机车有限公司, 朔黄铁路发展有限责任公司, 中国神华能源股份有限公司神朔铁路分公司. 神华重载运输大功率交流传动电力机车 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.

[8] 刘友梅. 韶山 4B 型电力机车 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999: 1-16.

[9] 张有松, 朱龙驹. 韶山 4 型电力机车 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998: 1-47.