

列车操纵控制辅助系统

杨 成

(西安铁路局 电务处, 陕西 西安 710034)

摘 要: 为解决高坡地区多机车协同牵引同一列车时, 本务机车和补机之间信息的互联互通问题, 提出开发列车操纵控制辅助系统。对列车操纵控制辅助系统的基本需求与功能方面进行分析, 确定了列车操纵控制辅助系统的硬件设计和软件设计方案。系统样机运用试验表明, 在2台或3台机车协同牵引列车时, 该系统能够实现本务机车与补机之间信息交换, 为乘务员协同操纵提供可视化的数字信息。

关键词: 列车操纵; 通信; 本务机车; 补机; 辅助系统; 宝成线

中图分类号: U268.4⁺3; U260.36

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.01.013

Train Manipulation Assistant System

YANG Cheng

(Electrical Department, Xi'an Railway Bureau, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: To solve the communication problems within the multiple locomotives collaboratively pulling one train in the high slope area, the train manipulation assistant system was presented. By focusing on the analysis of basic needs, functions, design plan and control program were determined. Through the operation of prototype, it was led to the conclusions that the designed system could achieve information exchange between leading and complement locomotive as 2 or 3 locomotives collaboratively pulling the train, and provide the crew with the visualization of digital information for the collaborative manipulation.

Keywords: train manipulation; communication; leading locomotive; complement locomotive; assistant system; Bao-Cheng line

0 引言

西安铁路局管辖内的宝成线秦北区段全长45 km, 属于单线半自动闭塞区段。该区段30%以上坡道多达9处, 其中上坡道20%以上的区段长达33 km, 占秦北区段总长的73%, 直线距离约9 km, 高差达680 m。为保障列车在此区间牵引力需求, 宝鸡东—秦岭设为补机区段, 对于秦岭—宝鸡东间上行货物列车, 在列车头部和尾部各加挂补机一台(即前二后一推挽方式)。这种多台机车协同牵引列车的加补运行方式, 担当列车第一位牵引任务的本务机车与后续的补机必须达到牵引、制动同步才能保证实现高效、安全的运

输目标。

目前该区段多机车协同牵引同一列车时存在通信问题, 各机车的实时信息无法互通, 实际运行中采用人工电台轮询通话方式。以人工电台轮询通话功能为依托的多机车编组运行智能化程度低, 增加了乘务员的工作强度, 不能满足目前机车运用需求。为解决这一问题, 需研制开发列车操纵控制辅助系统, 设计思路是该系统采集本务、中补、后补机车运行状态信息, 将其通过无线方式发送至各联编机车, 各联编机车显示器实时显示机车运行状态信息, 指导乘务员规范操作, 实现本务机车与补机间机车牵引、制动等信息互通, 为乘务员协同操纵提供可视化的数字信息, 以保证列车多机协调安全运行。

1 系统功能及需求分析

研制开发列车操纵控制辅助系统是以保证各个联编机车协调安全运行为主要目的。为了更好地协助司机进行多机操纵，降低或者避免列车停车、脱钩、脱轨等事故的发生，保障宝成线秦北区段列车的运输安全，经对宝成线秦北区段现场调研分析，确定了列车操纵控制辅助系统功能需求。

1.1 提示功能需求

根据新丰镇机务段《宝鸡东至秦岭间下行货物列车三机牵引加力技术操纵办法》等相关技术资料并结合现场调研情况，总结提示项

表 1 公里标提示项点（本务机车）

序号	公里标	前方信号	提示项点
1	1 244 300	停车	机外停车
2	1 550	通过 / 停车	注意过相分
3	8 350	通过 / 停车	注意过相分
4	14 400	停车	机外停车
5	15 165	通过 / 停车	注意过相分
6	37 540	通过 / 停车	注意过相分
7	37 900	停车	注意减速
8	38 679	停车	注意减速

注：序号 1 的公里标在陇海线。

表 2 公里标提示项点（中补机车）

序号	公里标	前方信号	提示项点
1	1 244 649	停车	加载动力制动
2	1 550	通过 / 停车	注意过相分
3	7 850	通过	手柄回零
4	8 350	通过 / 停车	注意过相分
5	37 540	通过 / 停车	注意过相分
6	41 650	通过 / 停车	手柄回零

点包括公里标提示项点如表 1、表 2 所示，以及途中运行提示项点如表 3 所示。其中公里标提示项点是

表 3 途中运行提示项点（变量提示功能）

序号	机车位置	提示项点	项点逻辑
1	本务	预告绿灯	预告信号机绿灯，提示本务预告绿灯
2	中 / 后补	预告好了	预告信号绿灯，提示中补、后补司机
3	本务	预告黄灯	预告信号黄灯，提示本务预告黄灯
4	中 / 后补	机外停车	预告黄灯进站红灯提示中补后补司机
5	本务	进站信号绿灯	提示本务司机前方进站信号为绿灯
6	中 / 后补	正线通过	提示中补、后补司机正线通过
7	本务	进站信号黄灯	提示本务司机前方进站信号黄灯
8	本务	进站限速 5 km/h	杨家湾站进站信号机提示限速

1.2 多机通信功能需求

列车操纵控制辅助系统是通过电台实现各个联编机车之间信息交换，指导乘务员同步控制列车。本务机上面的电台向中补和后补机车发送本机数据，同时接收补机数据，如图 1 所示，补机乘务员根据列车操纵控制辅助系统的提示控制机车，从而实现同步操控，对应优化操纵曲线如图 2。

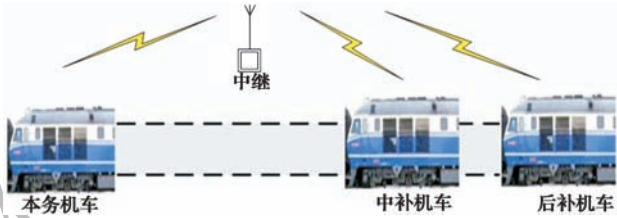


图 1 本务机与补机通信示意图

根据以上需求，列车操纵控制辅助系统电台在多机通信功能方面应满足：需要合理分配电台通信信息量，保证在不影响乘务员操作的时间内，完成信息交换，即同一区域应满足规定时间内至少 3 台设备之间传输

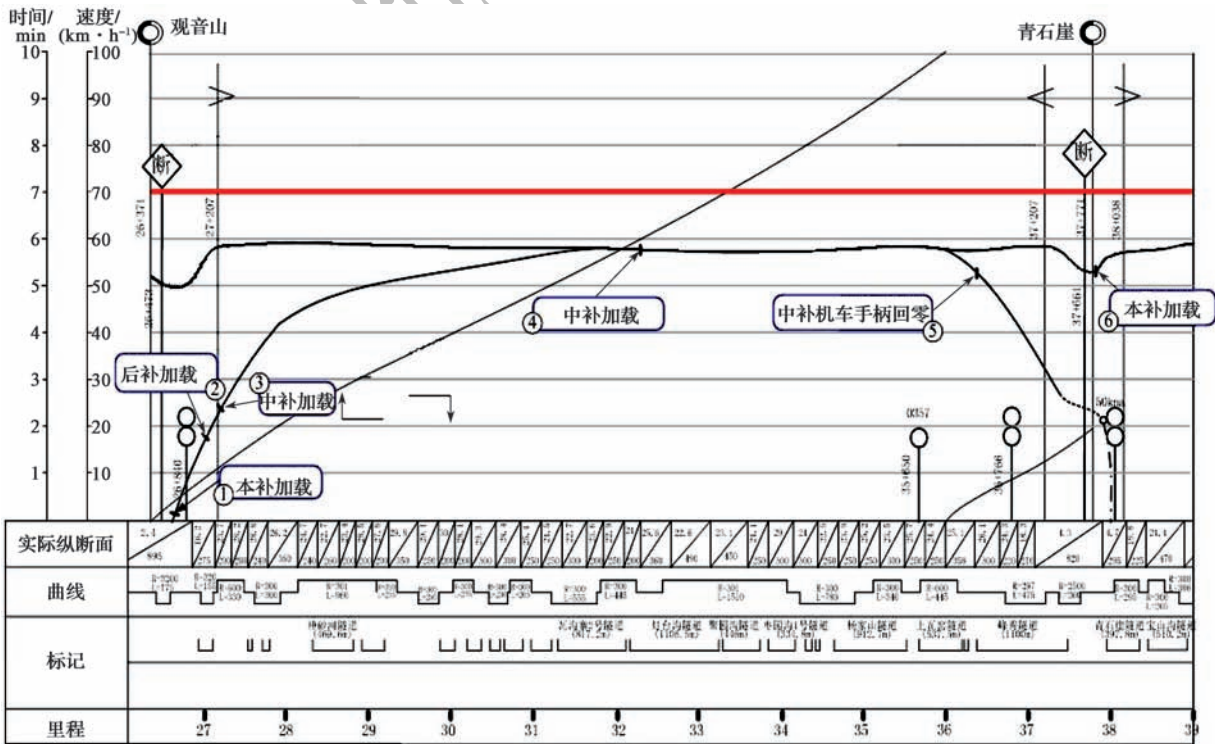


图 2 观音山站 - 青石崖站操纵优化曲线图

数据要求。

1.3 满足秦北区段优化曲线要求

筛选西安铁路局新丰镇机务段乘务员实际操纵曲线，结合列车牵引计算验证安全性后，确定宝成线秦北区段的各车站间优化操纵曲线，以宝成线秦北区段观音山至青石崖站间优化操纵曲线为例，如图 2 所示曲线为观音山至青石崖车站通过和停车情况下的优化操纵曲线。优化操纵曲线的最高运行速度为 60 km/h，保证列车在常用制动时，制动距离满足安全要求。

2 系统硬件设计

列车操纵控制辅助系统采集本务、中补、后补机车的数据，通过无线方式发送至本列车的其他各联编机车，再依据公里标位置和机车信号信息生成提示项点。系统主要分为主机、显示器、电台 3 部分，主机由采集插件、数据处理插件、通信插件组成。主机通过 CAN 总线连接列车运行监控装置（以下简称 LKJ），通过 RS485 总线采集 HXd3 型机车微机柜数据，通过模拟采样方式获取 SS4 机车牵引电流，通过 CAN 总线连接显示器，通过 RS422 总线连接电台。系统原理框图如图 3 所示。

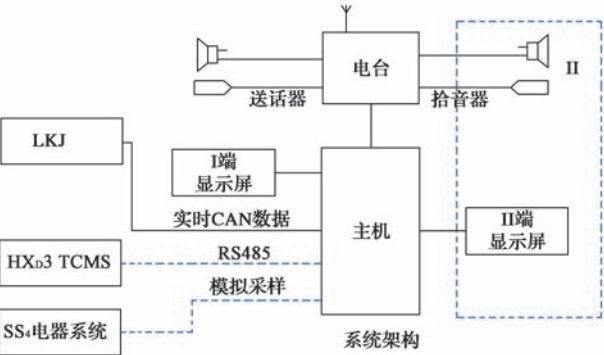


图 3 系统原理框图

2.1 数据处理插件设计

数据处理插件是整个系统的核心，主要完成如下功能：

- ①通过 CAN 总线接收通信插件及采集插件的数据，根据预制的算法，生成提示项点，并通过 CAN 总线发送给显示器进行提示；
- ②通过 CAN 总线接收显示器发送的用户交互信息，进行本补联编及系统设置；
- ③以记录文件的方式存储采集到的机车当前状态信息，并提供文件转储接口。

数据处理插件的结构框图如图 4 所示，部件构成及相关信息为：核心处理单元采用 Vortex86DX 处理器；运行主频 800 MHz，拥有 512 MB 内存（DDR2）；4 MB 时钟同步串行通信接口闪存（SPI Flash）；4 个 USB 接口；5 路串行数据总线接口（UART）；通用可编程 I/O 端口（GPIO），脉冲宽度调制接口（PWM）；此外还有 2 个看门狗定时器（Watchdog）；最重要的

是具备 ISA 总线。数据处理插件通过 ISA 总线，扩展为 1 路以太网接口（ETH），6 路 CAN 总线接口。6 路 CAN 总线接口均采用信号隔离及电源隔离的方式设计，其中的 2 路用于系统主机内部通信，另外 4 路分别用于与机车两端的显示器通信。1 路 USB HOST 接口用于插接专用 U 盘用于升级程序及数据。GPIO 用于控制插件 8 个指示灯，用于指示插件工作状态。

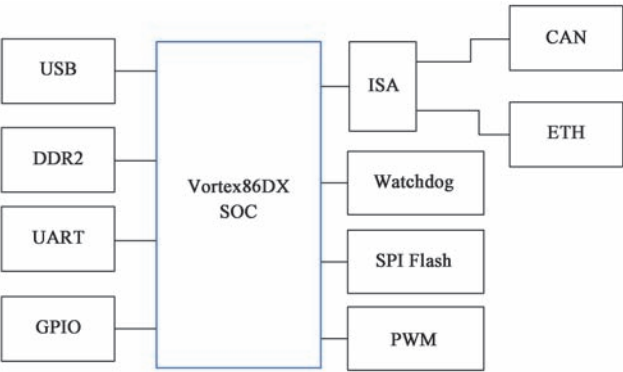


图 4 数据处理插件结构图

2.2 采集插件设计

采集插件结构框图如图 5 所示。处理器采用 LPC2294，其 2 路串行接口（RS485）用来采集 HXd3 型机车微机柜数据；1 路模数转换（ADC）用来采集 SS4 机车牵引电流；2 路 CAN 总线用于系统主机内部通信；电源部分为插件提供所需电源及 ADC 参考电压；测试接口（JTAG）用于系统调试，以及插件工作状态指示（LED）。

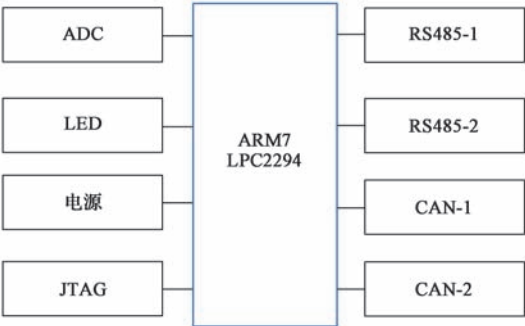


图 5 采集插件硬件架构框图

2.3 通信插件设计

通信插件主要负责 LKJ 数据的采集以及本补机车间的无线通信。通信插件硬件架构如图 6 所示，处理器采用 STM32F107VCT，片载 64 KB RAM 及 256 KB Flash。通信插件的 1 路串行接口（RS422）用于 400 MHz 电台的数据通信；1 路串行接口（RS485）用于 XBEE 插件通信。4 路 CAN 总线接口中 2 路用于采集 LKJ 数据，2 路用于系统主机内部通信；4 个 LED 指示灯用来标识系统工作状态；通用可编程 I/O 端口（GPIO）进行开关量控制；一个 USB 接口用来插接 U 盘进行软件升级；电源模块为系统提供直流 5 V 及 3.3 V 电源；测试接口（JTAG）用于系统调试。

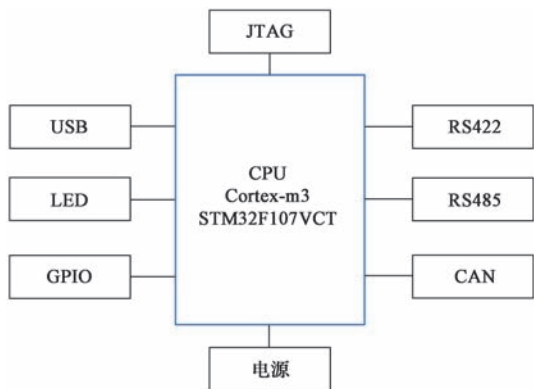


图6 通信插件硬件架构框图

2.4 显示器

列车操纵控制辅助系统的显示器内部电路采用模块化设计，其主要部分由主控单元、扩展单元、液晶屏及电源模块组成。各个模块之间采用不同的连接器连接，降低了设备维护的复杂度。主控单元为显示器的控制核心，扩展单元为显示器扩展了必要的接口电路，显示器结构如图7所示。

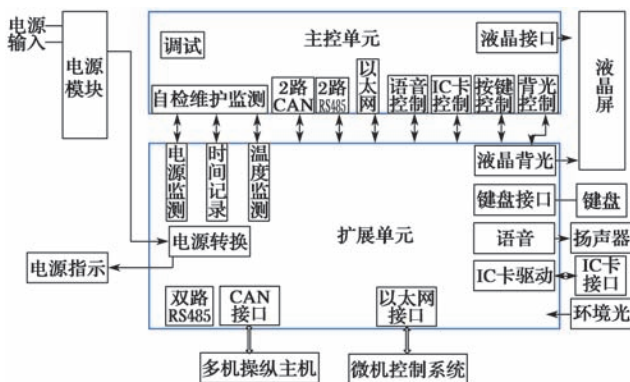


图7 显示器结构图

显示器主控单元作为控制核心，处理器使用LPC4357微控制器。LPC4357微控制器为一款双核异构处理器，由1颗Cortex-m4微处理器核心和1颗Cortex-m0微处理器核心组成。2颗处理器核心共同挂载在系统AHB总线矩阵，共享LPC4357的片上资源。2颗处理器核心通过特殊的IPC机制进行通信，该IPC机制通过在系统内存中构建HOST及MSG buffer，再利用彼此的中断资源完成2颗处理器核心的通信。Cortex-m4为DSP增强型内核，适合负责高运算复杂度的任务，在显示器中主要负责完成绘图、高速IC卡控制、音频解码及CAN通信的任务。Cortex-m0作为一颗协处理器，主要完成IO控制、键盘扫描、液晶背光控制等任务。LPC4357具有1个LCD控制器，用于连接控制213 mm（8.4英寸）24 bit RGB液晶屏。

2.5 电台选用

本列车操纵控制辅助系统的数字式无线数据传输电台采用AnyMesh400B*400 MHz频段通信电台，电台具有前向纠错、均衡软判决等功能。AnyMesh400电台是网状网电台，多台设备之间可以互相组网，最

多支持16个节点。数据在AnyMesh400电台上的单频率网络中传输，构成一个自组、自愈的网络，支持Ip包在以太网上进行传输。AnyMesh400网络电台数据带宽为6~8 Mbps，这个带宽足以用来传送节点之间的数据。AnyMesh400的频率范围为340~470 MHz，可以根据现场的频率干扰情况来调整自己的频率，利用设备的频谱扫描就可以测试出当地干扰，从而选择最好的频率来工作，配上相应天线即可正常运行。

要实现同步操控，无线传输时间决定了同步操作的准确性和实时性的重要因素。当本务机车进行加速、减速、制动时，中补机车和后补机车要及时同步进行加速、减速、制动。无线传输的时间由几部分构成，即数据处理时间 T_D 、电台处理时间 T_R 、电台数据传输时间 T_{bps} ，如图8所示。

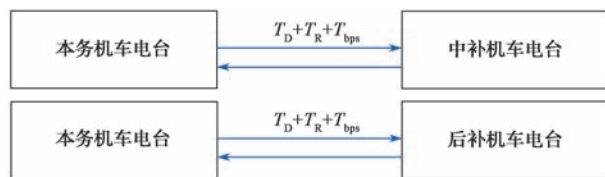


图8 无线传输时间示意图

无线传输总时间为本务机车电台发送到中补机车电台、中补机车电台发送到本务机车电台、本务机车电台发送到后补机车电台、后补机车电台发送到本务机车电台的时间总和。 T_D 时间软件控制在20 ms以内，AnyMesh400电台对数据的处理时间 T_R 为20 ms，AnyMesh400电台传输速率最大为8 Mbps，系统设置为1 Mbps，那么按照传输数据250字节外加TCP/IP的协议帧头等数据一共300个字节，以1 Mbps速率传输，可以得出 T_{bps} 需要3 ms就足够。可以计算出整个通信过程所需要的时间如式（1）所示。

$$4 \times (T_D + T_R + T_{bps}) = 4 \times (20 + 20 + 3) = 172 \text{ ms} \quad (1)$$

联编机车本机和补机的同步时间在1 s之内符合机车乘务员操作需求，显然AnyMesh400电台是能够满足系统对通信时间的要求。同时在能满足联编机车本机和补机通信时间 T_{MAX} 的范围内，允许同一区域同时存在的列车数量计算如式（2）所示。

$$T_{MAX}/172 = 1000/172 \approx 5.8 \quad (2)$$

式中： T_{MAX} 为允许最大通信时长。

通过计算，同一区域满足5列机车正常通信，符合现场3台机车运用需求。

3 系统软件设计

列车操纵控制辅助系统的硬件设计中主要使用的计算控制核心有微处理器及微控制器2种。微控制器包括LPC4357、LPC2294及STM32系列，这一类微控制器使用的编译环境为Keil MDK5.18，主要使用C语言及汇编语言进行代码开发，使用JLINK进行开发调试。系统使用的微处理器是Vortex86DX，运行定制的

Linux 系统，其开发方式使在 red hat 9 中使用文本编辑工具编辑代码，使用 GCC 进行代码编译。

列车操纵控制辅助系统主机软件接收平台内总线信息，监视内总线状态和复位内部总线，周期性发送自检信息到内部总线；并响应人机界面命令，组织发送 LKJ 实时信息、无线电台通信状态和信息提示命令。系统主机软件流程图见图 9。

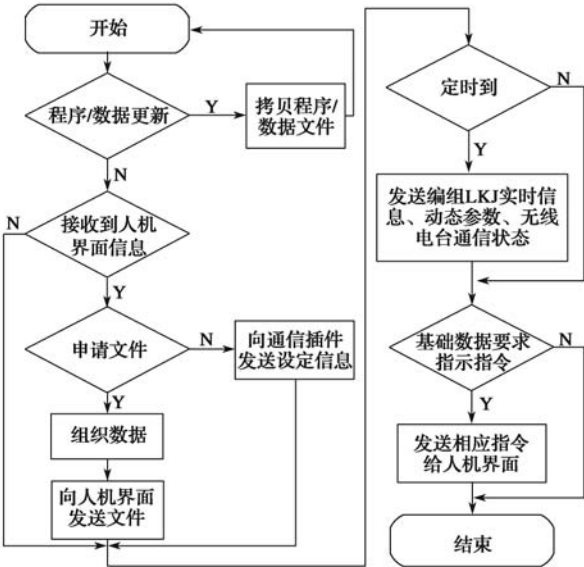


图 9 系统主机软件流程图

4 系统现场测试

4.1 系统安装

列车操纵控制辅助系统完成开发后，对其进行装车运行试验。运行试验由 2 台 HXd3 机车和 1 台 SS4 机车组成。运行测试在宝成线秦北区段，机车编组如下：上坡道时 SS4 机车为本务机车，2 台 HXd3 机车分别为中补和后补；下坡道时，SS4 机车为中补机车，2 台 HXd3 机车分别为本务和后补。

4.2 测试情况

4.2.1 试验设备

安装列车操纵控制辅助系统的 HXd3 与 SS4 这 2 种车型，机车号分别为：HXd30180，HXd30640，SS40129，3 台机车内加装设备如表 4 所示。

表 4 试验机车装车设备

机车车型	加装设备名称及数量
SS40129	主机 2 台，显示器 2 台，电台 2 台
HXd30180	主机 1 台，显示器 2 台，电台 1 台
HXd30640	主机 1 台，显示器 2 台，电台 1 台

4.2.2 试验方法

按照实际运行情况对 3 台机车进行本务、中补、后补进行编组，按照试验项目对系统功能进行测试，如表 5 所示。

表 5 运行试验测试表

测试项目	测试要求	测试方法
与 LKJ 通信功能	主机可与 LKJ 进行 CAN 通信，能够获取色灯、速度、限速、距离、里程、支线号、侧线号、列车管压力、制动缸压力、机车号	在非联编状态下，对比 LKJ2000 屏显和操纵系统屏显的显示内容一致（包含色灯，速度，限速，距离，里程，支线号，侧线号，列车管压力，制动缸压力，机车号）
机车信息采集	①能够获取 SS4 机车牵引电流值； ②通过 HXd3 机车接口，能够获取 HXd3 机车牵引力和牵引级位	① SS4 机车通过系统屏显查看牵引电流值并与实际值进行比对，验证采集数值正确性； ② HXd3 机车通过系统屏显查看牵引力及级位值，并与实际值进行比对，验证采集数值正确性
电台通信测试	①能够获取其他联编机车的 LKJ 信息、机车牵引信息等的动态数据信息； ②能够通过电台与联编机车进行数据交互	①联编注册状态下，通过人机界面观察与电台通信指示状态（红色为通信故障，绿色为通信正常）； ②通过屏显能够看到其他联编机车的动态数据信息
联编机车注册	①能够通过电台、人机单元办理 3 机车的联编注册，形成以本务机车为主的主从式多机车通信模式； ②必要时，能够办理联编机车的注销	①通过屏显“注册”按键将 3 台机车分别注册为“本务”、“中补”和“后补”； ②可对注册过的设备通过人机界面“注销”按键对设备解除编组
关键信息提示	根据操纵基础数据要求，向显示器提供操纵提示指令	在实际运行过程中，验证提示信息正确性和合理性
优化操纵曲线显示	根据操作，设备显示界面能够显示优化操纵曲线，指导司机按要求行车，当机车运行速度偏离优化曲线达到预定值时能提示司机控速	操纵显示器【查询】键，在弹出窗口按压【确认】键
记录功能测试	①能够记录设备的关键数据和关键操作； ②具有记录数据的转储功能	使用 IC 卡转储文件，通过地面软件对转储文件进行校对

4.2.3 试验结果

通过宝成线运行试验测试，系统的几项主要功能均能很好地得到实现，包括线路关键点的提示功能，操纵优化曲线的显示功能，多机通信功能，测试结果如下。

1) 关键点提示功能测试结果

已实施并实现本务机车公里标提示项点 12 项、中补机车公里标提示项点 20 项、后补机车公里标提示项点 12 项以及途中运行提示类项点 17 项。项点涵盖本务及补机关于尾部风压、中补加力 / 减力标以及机车信

号、开车对标、限速提示项点。

2) 操纵优化曲线功能测试结果

通过预置地面模拟数据,列车运行中联编机车按照对应位置显示相应的操纵优化曲线,同时系统结合实时列车运行状态信息,自动判断机车操纵是否符合操纵优化曲线,在差异达到设定值的情况下,系统提示乘务员进行相应的加减速操作。实施过程中能够准确显示当前机车所处位置的操纵优化曲线。

3) 多机通信功能测试结果

通过采用分时使用的方法,本务机车可以实时获取补机运行状态信息,补机可以实时获取本务机车运行状态信息,达到本/补机车之间信息互通,经测试通信状态良好,数值能够准确显示。运行试验中,SS4129 机车为本务、HXD3640 机车为中补、HXD3180 机车为后补。显示屏显示本务机车、中补机车、后补机车的运行状态信息。运行状态信息包括机车级位、手柄位、制动缸风压、速度、机车位置、牵引电流、列车管压力,且这些数据信息均显示准确。

5 结语

列车操纵控制辅助系统通过无线通信方式使本补

机车之间信息能互联互通,且将 LKJ 数据与机车微机柜数据进行了整合,实现了本补机车间的实时监测以及在关键地点和时机自动对本补机车进行语音提示的功能。该系统解决了既有联编机车之间数据信息传输实时性和可靠性不高的问题,使补机司机能及时掌握列车运行前方机车信号、本务机车手柄工况等列车状态信息,有效地解决了长期以来西安铁路局秦北区段多机联控不及时的问题。该系统具备在全路范围内推广使用的价值,可以充分解决既有联编机车间信息动态管理的传统难题。随着我国铁路交通的迅猛发展,该系统必将获得广泛的应用,并带来可观的社会效益和经济效益。

参考文献:

- [1] 杨志刚. LKJ 列控技术与应用 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
- [2] 张中央. 列车牵引计算 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006: 110-115.

作者简介: 杨 成 (1972-), 男, 硕士, 工程师, 从事列车车载设备技术开发及应用工作。

(上接第 54 页)

②构架对接接头寿命次数普遍偏高, 应考虑降低基板厚度以减轻结构重量和节约制造成本。

③名义应力法较缺口应力法的分析结果更为保守, 由于缺口应力法的准确性已得到越来越多的验证, 因此从结构轻量化和局部优化的角度出发, 缺口应力法在结构疲劳设计中更具优势。

参考文献:

- [1] 王文静, 刘志明, 李强, 等. CRH2 动车转向架构架疲劳强度分析 [J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(1): 5-9.
- [2] 彭其德, 许平. 120 km/h 整体焊接转向架构架的疲劳分析 [J]. 铁道机车车辆, 1999(1): 28-30.
- [3] 周张义, 卜继玲, 李芾. 机车车辆焊接结构疲劳分析关键问题研究 [J]. 机车电传动, 2008(1): 28-31.
- [4] 李晓峰, 谢素明, 时慧焯, 等. 车辆焊接结构疲劳寿命评估方法研究 [J]. 中国铁道科学, 2007, 28(3): 74-78.
- [5] 刘旭, 张开林, 姚远, 等. 缺口应力法在机车焊接构架疲劳分析中的应用 [J]. 铁道学报, 2015, 37(1): 24-29.
- [6] Sonsino C M. Notch stress concepts for the fatigue assessment of welded joints-Background and applications [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 34: 2-16.
- [7] Railway applications-wheelsets and bogies method of specifying the structural requirements of bogie frames: BS EN13749 [S]. 2005.
- [8] Fricke W. Guideline for the fatigue assessment by notch stress

analysis for welded structures: IIW-Doc XIII-2240r1-08/XV-1289r1-08 [S]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.

- [9] Niemi E. Stress determination for fatigue analysis of welded components [M]. Cambridge: Abington Publishing, 1995: 12-15.
- [10] Hobbacher A. Fatigue design of welded joints and components: IIW doc. XIII2151r1/ XV-1254r1-07 [S]. Cambridge: Abington Publishing, 2007.
- [11] Kassner M, Küppers M, Bieker G, et al. Fatigue design of welded components of railway vehicles-influence of manufacturing conditions and weld quality [J]. Welding in the World, 2010, 54: 267-278.
- [12] Sonsino C M. S-N lines for welded thin joints-suggested slopes and fat values for applying the notch stress concept with various reference radii [J]. Welding in the World, 2010, 54: 375-392.
- [13] Radaj D, Sonsino CM, Fricke W. Fatigue assessment of welded joints by local approaches [M]. Cambridge: Woodhead Publishing and Maney Publishing, 2006: 92-99.
- [14] Design and fatigue strength assessment of welded joints of steel railway structures: DVS-guideline 1612 [S]. Dusseldorf: DVS-Verlag, 2009.
- [15] Barsoum Z, Khurshid M, Barsoum I. Fatigue strength evaluation of friction stir welded aluminium joints using the nominal and notch stress concepts [J]. Materials and Design, 2012, 41: 231-238.

作者简介: 赵峰强 (1983-), 男, 高级工程师, 从事机车车辆转向架设计工作。