

# 上海轨道交通 2 号线信号系统的更新改造

张 郁

(上海地铁维护保障有限公司, 200070, 上海//高级工程师)

**摘 要** 上海轨道交通 2 号线信号系统已进入大修年限。从技术性、经济性、可实施性出发,对信号系统的 3 种更新改造方案进行比选。结合 2 号线运营及维护的具体需求,选择采用“TBTC(基于轨道电路的列车控制)+CBTC(基于通信的列车控制)”双信号异型冗余系统改造方案,即以轨道电路作为降级模式的 CBTC 系统方案。详细介绍了该改造方案的总体架构、轨旁架构、车载架构,以及车辆基地和运营控制中心的实施方案。目前该“TBTC+CBTC”双系统兼容改造的列车已上线投用。

**关键词** 城市轨道交通;信号系统;更新改造;双信号异型冗余

**中图分类号** U231.7

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2020.06.030

## Signal System Renewal and Transformation of Shanghai Urban Transit Line 2

ZHANG Yu

**Abstract** The signal system of Shanghai metro Line 2 has entered the overhaul period. Considering the technical, economic features and project feasibility, 3 types of renovation solutions for current signal system are comparatively analyzed. Combined with the operation and maintenance requirements of Line 2, the "TBTC + CBTC" (train-based and communication-based train controls) dual-signal redundant system transformation scheme is recommended, in which, the the track circuit it taken as the degraded mode of CBTC system. On this basis, the overall structure, track side structure and vehicle structure, as well as the implementation scheme of train depot and operation control center are introduced. Currently, the "TBTC + CBTC" dual-signal redundant system reconstruction scheme has been applied to train operation.

**Key words** urban rail transit; signal system; renewal and transformation; dual signal heterogeneous redundancy

**Author's address** Shanghai Metro Maintenance Co., Ltd., 200070, Shanghai, China

上海轨道交通 2 号线是上海轨道交通线网中最重要的线路之一。该线横穿市中心,连接浦东和虹

桥两大重要的国际、国内航运枢纽,途经多个金融商业圈。线路全长 64 km,共设 30 座车站(含 11 座换乘车站),日均客流超过 170 万人次,是目前上海轨道交通线网中客流量最大、运营时间最长、运营线路长度超长的线路。2 号线的列车配属数为 100 列,分属 3 种不同的车型。

上海轨道交通 2 号线共分 4 个阶段建设。其中:一期段(中山公园站—龙阳路站)已投运 19 年;西延伸段(中山公园站—淞虹路站)已投运 12 年。既有的信号系统受设备老化、系统制式和技术水平的限制,其可靠性指标已无法与 2 号线在线网中的重要性相匹配,难以满足日益增长的高客流运输需求。同时,随着市民对轨道交通依赖性的增强,对运营线路在安全、便捷、准点、运营时长等多方面的期望值也逐步增加,亟需通过改造升级来提升 2 号线信号系统的可靠性。

## 1 信号系统更新改造方案

城市轨道交通线路信号系统的更新改造方案着重于提升系统的可靠性和可用性,方案应符合信号系统技术的发展方向,满足未来长期的运营服务水平需要。在可实施性上,改造方案需尽可能减少改造工程量、实施难度及工期时长,以减少对运营的影响。此外,面向上海轨道交通 2 号线高运营效率、小间隔行车等运营需求,本次改造对工程实施提出更多要求:① 不可因调试改造而停运;② 后备系统的运能不能大幅下调;③ 严控改造和割接风险,保障超大客流条件下线路的正常运营。同时,在经济性上还需有效控制系统的建设成本和维护成本。2 号线信号系统的更新改造主要有以下 3 种方案。

### 1.1 沿用既有 TBTC(基于轨道电路的列车控制)系统方案

沿用既有的 TBTC 系统,要求系统设备架构与既有设备须保持一致。上海轨道交通 1 号线上海火

车站站—莘庄站区段信号大修工程为国内首个保持既有系统制式的信号系统更新改造项目,可实现车站的分段改造,但只能使用原信号系统供应商在上世纪 80 年代中期生产的产品,这不符合信号系统技术发展方向。而且,线路的系统功能及性能与 CBTC(基于通信的列车自动控制)系统也存在一定的差距,达不到改造后运能提升的要求。由于 2 号线列车不具备自动折返功能,TBTC 系统无法保证 30 对/h 的列车开行对数,即无法达到 2 min 的折返能力要求,因此,该方案的预期改造效果与 2 号线在上海轨道交通线网中的重要地位不匹配。

1.2 新增 CBTC 及点式降级系统方案

全线采用 CBTC 系统方案进行改造,即采用 CBTC 作为主用信号系统,增设计轴和有源应答器设备并与计算机联锁,共同构建具备 ATO(列车自动运行)/ATP(列车自动防护)功能的降级系统。北京地铁 1 号线、2 号线和上海轨道交通 5 号线信号系统的升级改造均采用此方案。该方案符合信号技术发展方向,可以保证 30 对/h 的列车开行对数,达到 2 min 折返能力要求。但实施该方案时车站无法分段改造,改造过程风险大,车载信号系统在改造期间需同时配备 TBTC 和 CBTC 2 套设备,运营时只能由一套车载系统工作,通过倒接装置实现与车辆接口的切换。该方案涉及 2 号线既有 69 列车的同步改造及调试,改造周期较长,车载倒接装置的长期使用对运营安全存在一定的风险隐患。另外,本方案下的割接、测试、演练等操作每次全程实行完毕需要 8 h,这意味着 2 号线需提前结束运营,客运组织的困难也相当大。

1.3 “TBTC + CBTC”方案

新增 CBTC 作为主用信号系统,并与既有 TBTC 系统兼容,升级既有数字轨道电路设备,作为降级系统使用。新设的计算机联锁设备和 ATS(列车自动监控)子系统设备应与既有 TBTC 系统设备相兼容,具备在准移动闭塞制式下通过升级后的数字轨道电路和 TWC(车-地通信设备)实现对列车 ATO/ATP 的监控功能。新设的车载设备同时具备在 CBTC 和 TBTC 系统下对列车的控制功能。德国纽伦堡市轨道交通 2 号线、墨西哥合众国墨西哥城地铁 12 号线、新加坡地铁南北线等均采用以轨道电路为后备模式的 CBTC 系统;国内高速铁路的 CTCS-3(中国列车运行控制系统 3)兼容 CTCS-2(中国列车运行控制系统 2)系统方案也为双信号异

型冗余,在 CTCS-3 制式下系统通过轨旁无线闭塞中心(RBC)提供移动授权,在 CTCS-2 制式下系统通过 ZPW-2000 型无绝缘轨道电路提供移动授权。

对比 CBTC 加点式降级方案,在主用系统故障的情况下,点式降级方案需在线路特定位置(有源应答器设置点)才能进行信号系统切换。“TBTC + CBTC”降级系统是一套连续通信的准移动闭塞系统,具有极大的运行效率优势,线路的行车间隔仍可达到 2 min,其技术领先于国内常用的降级系统。改造升级后列车具备自动折返功能,具备 2 min 折返能力。同时由于系统异构,系统具备高冗余。2 号线采用“TBTC + CBTC”方案改造后系统的能力指标如表 1 所示。该方案可提升全线信号系统性能,保留既有信号系统作为降级系统,提高了主/备系统切换的及时性,避免了前期投资的浪费;割接风险小,车站和线路可以分段改造;轨旁改造和列车改造也可同步进行,69 列车可逐一改造且单列完成后即可投运,仍由既有 TBTC 系统控制列车运行。

表 1 2 号线“TBTC + CBTC”改造后的系统能力

指标	CBTC	TBTC
设计间隔/s	≤90	100
折返间隔/s	徐泾东站	117
	淞虹路站	115
	浦东机场站	120
旅行速度/(km/h)	>42	>35
出入库间隔/min	2(自动化停车场)	>3

1.4 2 号线信号系统改造方案的比选

如表 2 所示,通过对各方案综合比较,“TBTC + CBTC”双信号异型冗余改造方案具有较优的技术水平和较好的可实施性,易于掌控风险,工程投资适中。该改造方案使系统的整体可用性得以大幅提升,符合工程实施对日常运营的影响降低到最小的原则,可满足 2 号线高可用性、高可靠性,以及效率高、间隔短的实际运营需求,也与 2 号线在上海轨道交通网络中的重要性相匹配。该方案与其他方案相比均具有明显的优越性,故 2 号线采用“TBTC + CBTC”双信号异型冗余方案对线路进行改造。

2 “TBTC + CBTC”双信号异型冗余技术方案

2.1 总体方案及其系统架构

上海轨道交通 2 号线采用新增 CBTC 系统作为

表 2 信号系统更新改造方案对比

比较项目		沿用既有 TBTC 系统方案	新增 CBTC 及点式降级系统方案	“TBTC + CBTC” (新增 CBTC 并兼容既有 TBTC 系统)方案
技术性	主用系统	TBTC	CBTC	CBTC
	降级系统	人工	点式通信的准移动闭塞系统	连续通信的准移动闭塞系统
	技术发展趋势	不符合	符合	符合
	系统可用性	低	中	高
	降级系统运营间隔能力	低	中	高
经济性	建设成本	低	中	中
	维护成本	高	中	中
可实施性	工程案例	上海轨道交通 1 号线	北京地铁 1、2 号线 上海轨道交通 5 号线	墨西哥城地铁 12 号线， 纽伦堡市轨道交通 2 号线
	实施难度	较低	高	较低
	对运营的影响	较低	大	低
	工期	长	长	长
	工程管理难度	易管理	难管理	易管理

主用信号系统，并与既有 TBTC 系统兼容，保留部分既有 TBTC 系统设备。改造对既有的 AF-904 数字轨道电路部分设备进行升级，使之作为降级系统使

用。改造后“TBTC + CBTC”系统的总体架构如图 1 所示。

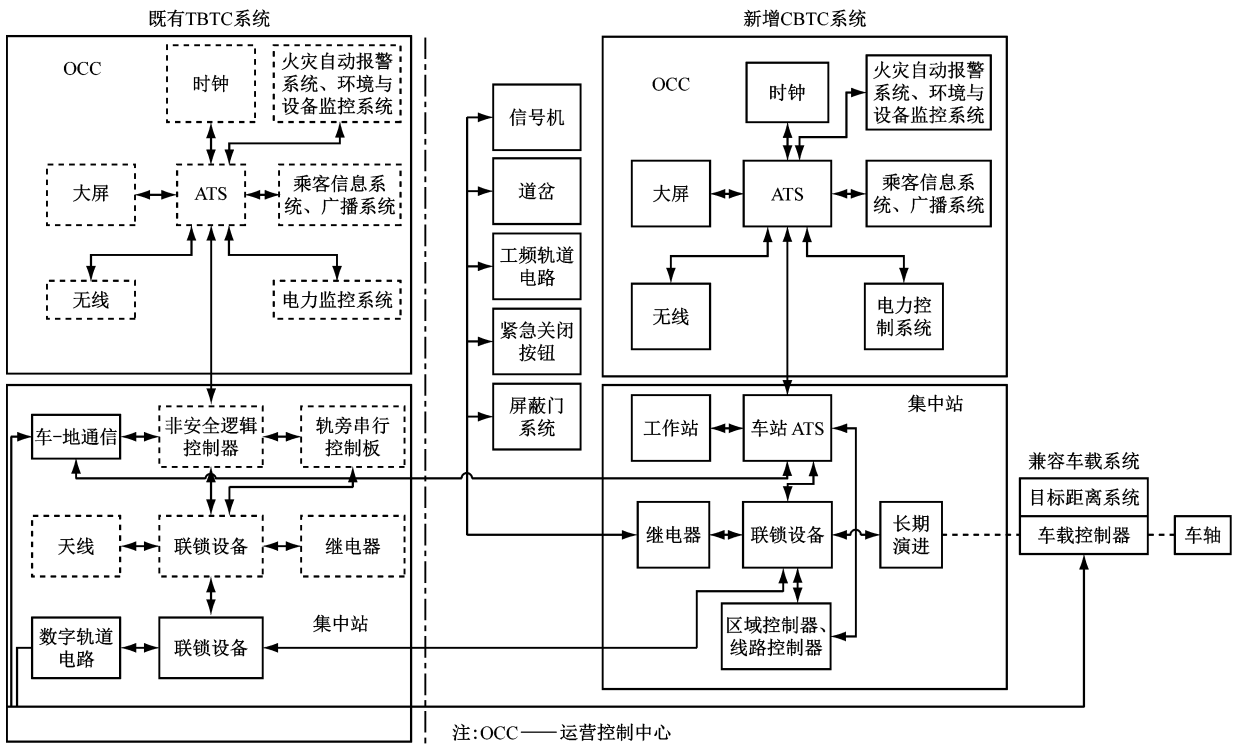


图 1 “TBTC + CBTC”系统总体架构

新设的计算机联锁设备和 ATS 子系统设备应与既有 TBTC 系统设备相兼容，具备在准移动闭塞制式下，通过升级后的数字轨道电路和车-地通信实

现对列车 ATO/ATP 级的监控功能。新设的车载设备同时具备在 CBTC 和 TBTC 系统下对列车的控制功能，以取代既有的信号车载设备。改造方案具体

实施项目如表 3 所示。

表 3 “TBTC + CBTC”系统改造方案实施

项目	改造前	改造期间	改造后
中央控制	CBTC	CBTC	CBTC
列车控制	TBTC	自动、强制 CBTC、强制 TBTC	自动、强制 CBTC、强制 TBTC
轨旁控制	TBTC	分段控制	CBTC + 轨道电路后备
运营需求	满足“十三五”增能提效的 85 列运用列车数量	按照实际情况可灵活进行分段 CBTC 改造,在分界车站停站降级 TBTC、可不停车升级 CBTC	获得系统高冗余性,如 ZC(区域控制)或 DCS(数据传输系统)故障时降级至 TBTC,同时满足 2 min 的追踪间隔

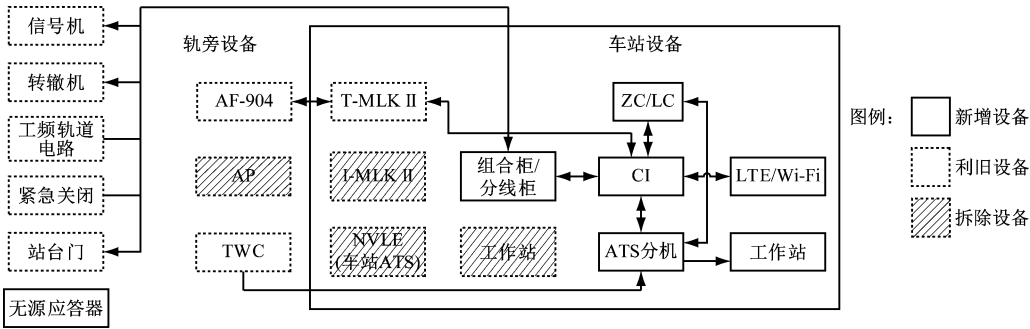
从表 3 可以明显看出,改造方案解决了 2 号线一期段和西延伸段由于信号系统设备老化引起故障率明显升高及既有信号系统的子系统 DTS(数据传输系统)难以修复的问题;消解了既有信号系统技术支持和服务水平日益降低在正常运营中的安全隐患;提升了全线信号系统的性能,有利于提升 2 号线的运行效率。改造方案将既有信号系统保留为降级系统,提高了主/备系统切换的及时性,避免了前期投资的浪费,使信号系统在降级运行时依旧可以保证 2 min 的运行间隔;轨旁改造和列车改造可以同步进行,不会相互制约;系统倒接风险小,可实施性强,灵活性大,符合项目实施对日常运营的影响降低到最小的原则,也有利于控制整体工期。

2 号线信号系统大修改造实施后,将 CBTC 系

统作为正线主用信号系统,既有 TBTC 系统作为降级系统使用,从而为 2 号线构建了一套具有更高可用性和整体可靠性的信号系统。

2.2 轨旁方案及其架构

设备集中站的设置与既有 TBTC 系统保持一致。在轨旁方案中,最大限度地利用 TBTC 原有的设备,将 CBTC 和 TBTC 利用联锁系统相互联系。如图 2 所示,将轨旁原有的设备都经过组合分线柜传给联锁,同时原有的音频轨道电路 AF-904 通过 T-MLK II 也将信息传给联锁,这样列车就可以通过同一个联锁机制统一判断列车的行车规则。在 CBTC 遇到突发情况时,系统可以随时降级到 TBTC,继续不间断行车。



注:CI——计算机联锁;Wi-Fi——无线网络;T-MLK II 等——联锁设备名称;AP——接入点;TWC——车-地通信;ZC——区域控制器;LC——线路控制器

图 2 轨旁设备方案

2.3 车载方案和架构

车载 ATC 设备用于保障列车运行安全和实现列车运行最佳控制。以安全控制计算机为平台,2 号线所采用的车载设备应能同时具备在 CBTC 和 TBTC 两个系统下的列车运行控制,如图 3 所示,车载设备由车载 ATP/ATO 计算机单元、车-地无线通信设备、外围设备等组成。每列列车配备二乘二取二的车载 ATC 设备,包括 ATP/ATO 计算机、操作

和显示单元、各类接收天线、多普勒雷达、测速装置等。

图 3 的车载设备方案中,保留 DTG(目标距离)车载设备与既有轨旁系统和车地通信系统的接口,用以负责处理接口信息。增加 CC(车载控制器),可整合原有 TBTC 车载设备和新增的 CBTC 车载设备,将信息汇总后进行统一处理,最终实现车载 CBTC 和 TBTC 双系统同时运行的功能。CC 是基

于安全编码处理器和二乘二取二技术的车载系统，在每列车的首尾处各设一套完整的 CC，首尾热备冗余，其核心运算和输入输出模块都采用二乘二取二结构，做到双系冗余设备无扰切换。

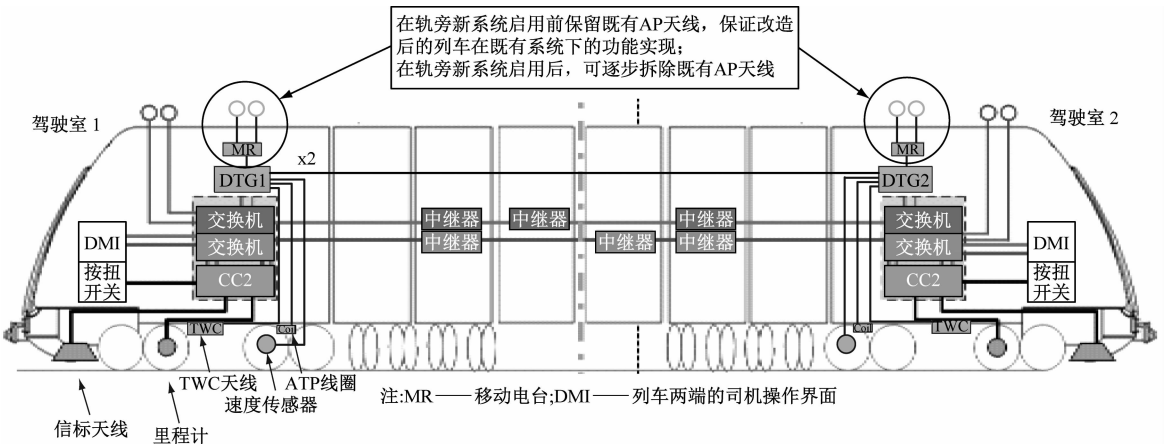


图3 车载设备方案

车载ATO模块与车载ATP模块的结构相同，为首尾冗余。

CC与DTG在设备上相互独立，没有共用设备。每端的DTG分别通过2根以太网网线和CC的红蓝网交换机连接，从而实现接口冗余。

DTG本身是头尾冗余设备，并与每一端的车底ATP接收线圈连接。当车头的DTG故障（包括任一板卡故障、速度传感器故障）时，车尾的DTG预处理单元设备仍然能够通过车头的ATP接收线圈接收和处理列车信号，确保列车正常运行。DTG头尾车载预处理单元设备完全故障时，仅影响TBTC制式下的列车运行，不影响CBTC制式下的列车运行。

每一端的TWC天线和ATP接收线圈不是冗余设备。单端TWC天线及处理模块故障后，将影响该方向的TWC相关功能；单端ATP接收线圈故障后，将影响该方向TBTC制式下的ATP/ATO功能。

2.4 车辆基地改造方案

经过对车辆基地的功能和效率等方面的评估，2号线车辆基地最终采用了ATC（列车自动控制）系统方案。此方案在列车升级至CBTC模式后，系统的自动化水平得以提高，能够以ATO/ATP模式自动完成进出场作业。该方案还可根据最优速度曲线自动控制列车运行，提高列车的出/入库效率。本方案在国外的温哥华、底特律、吉隆坡、纽约以及我国北京、上海、成都等城市的城市轨道交通线路中都有成功的运营经验。

相比其他方案，ATC系统方案在自动化区域需

设室内和室外的ATO/ATP设备，造价较高，但该方案在降低司机和调度人员的工作量、提高列车防护等级等方面具有较大的优势。同时，ATC系统方案也代表了车辆基地信号系统的发展趋势，并统一了车辆基地和正线信号系统的设备配置。因此，2号线车辆基地使用ATC系统方案，基地内自动控制区域具备CBTC级别下ATP/ATO控制功能。

2.5 OCC改造方案

2号线原有OCC位于新闻路控制中心内，现作为备用OCC。为实现上海轨道交通网络运营调度管理大楼对所有线路的统一调度管理，2号线现有OCC设备现设于C3大楼内，并且设立一套可同时兼容CBTC和TBTC系统的ATS系统，使得ATS汇集CBTC和TBTC的系统信息后统一处理，无需切换界面同时显示和下发指令。图4为2号线OCC的配置，配有1个综合显示屏系统，同时配有2个调度工作站。

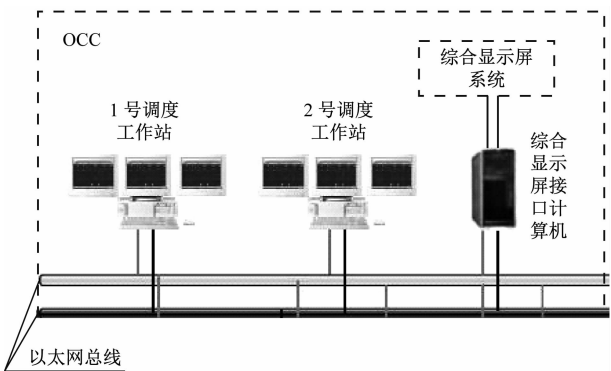


图4 2号线OCC配置

### 3 结语

上海轨道交通2号线“TBTC+CBTC”双信号异型冗余改造方案具有较好的可实施性,实施难度相对较低,可缩短工程整体工期并易于调整管理。系统降级时仍能满足2 min的运营间隔要求,信号系统整体的可用性较好,且有利于工程的风险掌控,有效减小了改造实施期间对运营造成的影响。采用“TBTC+CBTC”双套车载系统的列车已经正式投入正线运营,经实际运营验证,2号线信号系统大修改造方案是经过详细评估与验证得出的既不影响运营且改造效果较好的方案选项。

### 参考文献

- [1] 武少峰. 准移动闭塞系统针对市域快线的适用性分析[J]. 都市快轨交通, 2014(3):94.
- [2] 何占元,何永发,贾利生. 重载铁路移动闭塞降级系统方案研究[J]. 铁道通信信号, 2018(4):8.
- [3] 陈通. 地铁既有线信号系统上叠加点式功能的改造方案设计[J]. 城市轨道交通研究, 2019(8):162.
- [4] 刘会明. 城市轨道交通既有线更新改造将成为常态[J]. 城市轨道交通研究, 2019(6):190.
- [5] 袁雪源. 广州地铁一号线信号系统改造工程风险分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2019(4):58.
- [6] 辛骥,徐大兴. 地铁信号系统既有线路改造方案探讨[J]. 铁道通信信号, 2016(1):67.

(收稿日期:2019-12-23)

(上接第125页)

16位地址取出来,结合之前确定的高16位地址就可确定这一行语句的存储位置。然后,取出这一行中存储的数据内容,准备写入FLASH。由于HEX文件以2个16进制数为一个字节,而在DSP的片上FLASH中以4个16进制数为一个字节,为了防止地址信息出现错误,要将接收到的HEX文件数据前一个字节作为高位,后一个字节作为低位,将这相邻的两个字节合并成一个字节。最后调用FLASH烧写函数,将处理好的数据烧写到对应地址,即可完成一行HEX文件的烧写。在接收到新一行文件时,程序将重复上述流程,直至完成整个HEX文件的FLASH烧写。

### 4 系统功能测试

测试时先编写监控终端和升级终端软件,再将悬浮诊断DSP 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、20<sup>#</sup>3个DSP诊断模块通过CAN总线连接搭建磁浮列车的悬浮诊断系统实验平台。3个DSP诊断模块的通讯ID(标识)分别设置为1、2和20,用以代表悬浮诊断网络的1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>和20<sup>#</sup>诊断DSP节点。以1<sup>#</sup>DSP为升级对象进行单节点DSP在线升级测试,通过监控终端将通讯ID为1的更新指令及更新程序发送至CAN总线,此时只有1<sup>#</sup>节点的DSP识别到升级指令并完成程序更新。在进行多节点DSP同时在线升级测试时,以1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>和20<sup>#</sup>DSP为升级对象,通过监控终端将通讯ID为1、2和20的更新指令及更新程序发送至CAN总线,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、20<sup>#</sup>3个节点的DSP均能识别到指令并完

成程序升级。

### 5 结语

针对磁浮列车悬浮诊断系统DSP程序更新操作繁琐的问题,本文设计了一种基于既有CAN总线的DSP程序在线升级方案。升级终端通过诊断网络CAN总线向指定节点的DSP模块发送升级指令及相应程序的HEX文件,即可完成诊断DSP程序的在线升级。测试结果表明,该方法可以稳定、高效地完成单个或批量DSP程序的在线升级,而不需要对设备及电路板进行拆卸,从而大大简化了工作流程。

### 参考文献

- [1] 谭喜堂,陶灵,朱琴跃,等. 基于CAN总线的重载列车制动机控制网络设计与实现[J]. 计算机应用, 2018, 38(增刊2):231.
- [2] 姜宏伟,汪婷. 基于CAN总线的中低速磁浮列车悬浮控制调试监控系统[J]. 科技信息, 2013(7):136.
- [3] 陈晓聪,游林儒,黄招彬. 基于CAN通讯便携式DSP程序下载器的设计[J]. 自动化与仪表, 2013, 28(9):41.
- [4] 高世皓. 利用HEX文件实现TMS320F28335的程序升级方法[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2017, 17(7):13.
- [5] 苏奎峰,常天庆,徐克虎,等. TMS320x2833x DSP原理及其C程序开发[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2015:565.
- [6] 刘浩,李荣冰,刘建业,等. 基于串口通信的DSP在线烧写技术研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(7):184.

(收稿日期:2019-08-21)