

# 中低速磁浮列车悬浮诊断系统数字信号 处理器在线升级方法\*

陈红霞<sup>1</sup> 张晨昊<sup>2</sup> 靖永志<sup>2</sup>

(1. 南京铁道职业技术学院, 210031, 南京; 2. 西南交通大学电气工程学院, 610031, 成都//第一作者, 讲师)

**摘要** 针对中低速磁浮列车悬浮诊断系统 DSP(数字信号处理器)程序升级操作繁琐的问题,设计了一种基于既有诊断网络 CAN(控制器局域网)总线的 DSP 程序在线升级方案。在 DSP 程序升级时,升级终端将升级指令和升级程序的文件发送到 CAN 总线。DSP 识别到升级指令后转至升级工作模式,接收新程序文件并将其烧写到闪存中,从而实现在线升级。测试结果表明,该方法能安全、高效地对单个或批量的 DSP 完成程序在线升级。

**关键词** 中低速磁浮列车; 悬浮诊断系统; 数字信号处理器; 在线升级

**中图分类号** U237.7

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2020.06.029

## Online Updating Method for the DSP in Levitation Diagnosis System of Medium and Low Speed Maglev Train

CHEN Hongxia, ZHANG Chenhao, JING Yongzhi

**Abstract** Aiming at the tedious operation of digital signal process (DSP) program upgrading in medium and low speed Maglev train levitation diagnosis system, an online upgrading method for DSP program based on the existing diagnostic network controller area network (CAN) bus is designed. In the upgrading process of DSP program, the upgrade terminal sends the upgrading instruction and upgrading program file to the CAN bus. After instruction recognition, DSP will transfer to upgrade mode, receive the new file and download it to the flash memory for online upgrade. The experimental results show that this method can safely and effectively upgrade the program online for single or a batch of DSP.

**Key words** medium and low speed maglev train; levitation diagnostic system; DSP; online upgrade

**First-author's address** Nanjing Institute of Railway Technology, 210031, Nanjing, China

长沙机场线磁浮线作为我国第一条自主知识产权的中低速磁浮线路,自从开通以来广受各界好评。该线列车采用3节编组,每节车辆设有20个悬浮控制器来保证列车的平稳运行。列车的悬浮诊断系统则通过与之相匹配的20个DSP(数字信号处理器)模块来完成对悬浮控制器悬浮状态的诊断,以保证悬浮控制器的可靠性。悬浮诊断系统需要对气隙传感器、加速度传感器、悬浮控制器和接触器的状态,以及气隙值、悬浮控制器主电路电压值和电流传感器值等参数进行监测,并将这些数据通过CAN(控制器局域网)总线传输到监控终端进行存储,并给司机提供操作参考。

悬浮诊断系统的实现需要使用高性能的处理器。TMS320F28335作为一款高性能32位浮点的DSP,具有成本低、性能高、模数转换更精确快速等优点,而且可以使用串口和CAN接口与外部设备通信。鉴于以上优点,长沙机场磁浮线的悬浮诊断系统采用了TMS320F28335作为处理器。磁浮列车在调试和运营过程中会根据实际需要增加监控目标量,或增加如切除悬浮节点、软件复位等新的操作命令,因此需要对诊断DSP模块进行软件升级。磁浮列车用于悬浮控制的DSP模块也存在程序升级问题,但需要铺设专用的CAN总线电缆并预留专用接口才能完成在线升级。一般情况下,使用软件CCS(代码编译集成环境)和JTAG(联合测试行动组)接口来完成DSP程序的编译和烧写,而在列车的调试过程中,由于DSP模块在列车悬浮控制器机箱的内部,升级程序需要反复插拔电路板和JTAG口,其操作繁琐,甚至会造成硬件的损坏。针对上述问题,本文设计了一种基于既有诊断网络CAN总线的DSP程序在线升级方案,通过升级终

\* 国家自然科学基金资助项目(51577160)

端即可实现对 DSP 程序的在线升级,从而提高了工作效率。

### 1 总体方案设计

磁浮列车在运行时,列车司机室监控终端与车载关键设备之间需要进行大量的数据通信,所以磁浮列车的设备通信采用稳定性好、传输速度快的 CAN 总线通信网络<sup>[1-2]</sup>。为了避免重复布线造成设备冗余,本次对悬浮诊断系统进行的在线升级方案利用既有的车载诊断网络 CAN 总线来完成。

实现网络升级功能的悬浮诊断系统组成结构如图 1 所示。磁浮列车每节车体包含了 20 个悬浮控制回路,每个悬浮控制回路包含了一个悬浮控制器,每个悬浮控制器都有一个用于悬浮诊断的 DSP 模块。在正常工作状态下,诊断 DSP 模块通过 CAN 总线与司机室监控终端进行双向数据流交互,监控终端向 DSP 模块发送悬浮命令及列车运行速度等状态信息。此时诊断 DSP 模块也在诊断模式下工作,可将悬浮节点的电压、电流、悬浮间隙和加速度等关键状态信息发送给监控终端,同时侦测是否收到系统升级终端的升级指令。DSP 模块收到系统升级命令后将转至升级工作模式。系统升级终端只有在需要对某些或全部悬浮节点的 DSP 程序进行升级时才会介入网络,在升级终端的人机界面中可以选择单个或批量的程序升级方式。升级终端采用与监控终端不同的通讯协议和命令,悬浮控制器中的诊断 DSP 可依此区分数据命令来源并识别升级命令。

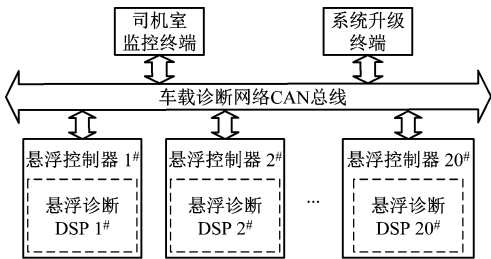


图 1 可在线升级的悬浮诊断系统结构

DSP 的片内 FLASH(闪存)中同时存有底层引导升级程序和悬浮诊断用户程序,通过配置 CMD 文件可以对这两部分程序空间进行分扇区操作。对诊断节点的 DSP 程序进行软件升级时,系统升级终端通过人机界面向 CAN 总线上的 DSP 发送升级指令和新程序的 HEX(十六进制)文件。DSP 的底层程序侦测到升级终端发来的程序升级指令,则由

诊断工作模式切换到程序升级工作模式:先擦除用户程序所在 FLASH 扇区原有的程序内容,再将接收到的新用户程序写入相应的 FLASH 扇区;写入成功并完成数据校验无误后,复位引导新的悬浮诊断用户程序,重新返回诊断工作模式。

### 2 DSP 烧写文件格式与 FLASH 操作

#### 2.1 烧写文件格式

传统 DSP 程序下载更新是基于 JTAG 仿真器实施的。CCS 软件对程序进行调试和编译并生成烧写文件,通过 JTAG 仿真器与 DSP 连接,将烧写文件由 JTAG 直接烧入 DSP 的片上 FLASH 中。通过 CAN 总线进行程序升级时,需要先将程序发送到 DSP,再由运行在 DSP 内 RAM(随机存储器)中的程序对片上 FLASH 进行操作,将新程序烧写在 FLASH 中。而 CCS 编译生成的. out 格式烧写文件是模块化格式,即程序中代码和数据分别存放在不同的段中,因而不能直接用来烧写 FLASH<sup>[3]</sup>,需要将其转换为可以直接烧写到 FLASH 中的. HEX 文件。使用某公司的 Hex2000 插件可以完成. out 文件到. HEX 文件的转换。

. HEX 文件内容有其特有的形式:文件代码以一行为单位,每行由冒号开头,内容以十六进制数表示。其每一字节的具体内容如表 1 所示。其中,数据类型有多种样式,如 0x00 为数据记录,0x01 为文件结束记录,0x02 为扩展段地址记录,0x03 为开始段地址记录,0x04 为扩展线性地址记录,0x05 为开始线性地址记录。最后字节为校验和,用来检验所接收到数据的正确性。

表 1 . HEX 文件格式

字节	内容
1	本行中数据的字节数
2~3	低 16 位地址
4	数据类型
...	数据
最后 1 个字节	校验和

现举例分析. HEX 文件的格式如下:

```
:020000040033C7
:04FFF60000708AA06D
:00000001FF
```

1) 第 1 行表示:有 2 个字节的数据;低 16 位地址为 0x0000;数据类型为 0x04,代表其数据为扩展

线性地址记录;高 16 位地址为 0x0033;C7 为校验和。

2) 第 2 行表示:有 4 个字节的数据;低 16 位地址为 0xFFFF6,可计算出本句的实际地址为 0x0033FFF6;0x00708AA0 代表存储的数据;6D 为校验和。

3) 第 3 行是 .HEX 文件固有的结束语句<sup>[4]</sup>。

## 2.2 DSP 的 FLASH 操作

由于 RAM 断电后数据会清除,如果 DSP 需要将程序保存并长期运行时,就需要将程序存储到 DSP 片上 FLASH 中。TMS320F28335 片上设有 256 × 16 位嵌入式 FLASH,该存储器由 8 个 32 kB × 16 位扇区组成。FLASH 的操作以扇区为单位,可以选择其中一个或多个扇区进行擦除和烧写,其他未选择扇区则保持不变。但是,由于 TMS320F28335 片上的 FLASH 并不支持在其中一个扇区运行程序擦除或烧写其他扇区的内容,所以需将完成接收数据和烧写 FLASH 工作的程序搬移至片内 RAM 或片外 RAM 上运行。用 ramfuncs 函数可实现这些程序的搬移<sup>[5]</sup>。

若要对 FLASH 进行擦除、烧写等操作,只需将 FLASH\_API 库文件添加到项目中,就可以实现 FLASH 相关函数的调用<sup>[6]</sup>。对 DSP 片上 FLASH 的擦除、烧写和校验可分别通过调用 Flash\_Erase()、Flash\_Program()、Flash\_Verify() 函数来实现。

## 3 DSP 程序设计

### 3.1 工作模式设计

悬浮诊断系统有诊断工作模式和程序升级两种工作模式。为了满足应用需求,可将 DSP 底层程序设计为两种工作模式:一种为正常工作时的用户程序诊断模式,另一种是进行用户程序更新的程序升级模式。其软件整体流程如图 2 所示。

如图 2 所示,在正常情况下,工作在诊断模式的 DSP 程序执行悬浮诊断程序,与司机室监控终端进行信息交互,同时 DSP 侦测是否收到升级终端发来的升级指令。若收到升级指令,则会将工作模式切换至程序升级模式。进入程序升级模式后,DSP 根据升级终端发送的不同指令,对 FLASH 进行擦除和烧写等操作,同时接收 .HEX 文件。若 .HEX 文件接收并全部烧写成功,DSP 程序将自动跳转回诊断模式。运行升级后的悬浮诊断程序工作在诊断模式。

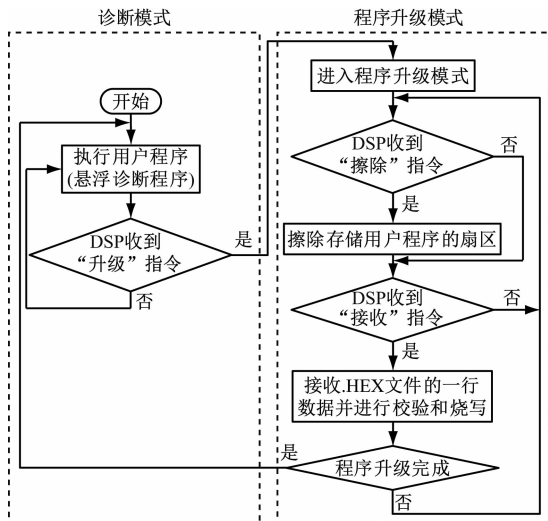


图2 DSP程序整体流程图

### 3.2 接收与烧写模块设计

在 DSP 程序升级的过程中,.HEX 文件的接收与烧写是最重要的环节。由于 .HEX 文件的每一行可能存储有不同类型的信息,因此在每接收到新一行 .HEX 文件后,需对其数据类型进行判别,并进行相应的处理,才能将其成功烧写到 DSP 的片上 FLASH 中。.HEX 文件接收与 FLASH 烧写部分的 DSP 程序流程如图 3 所示。

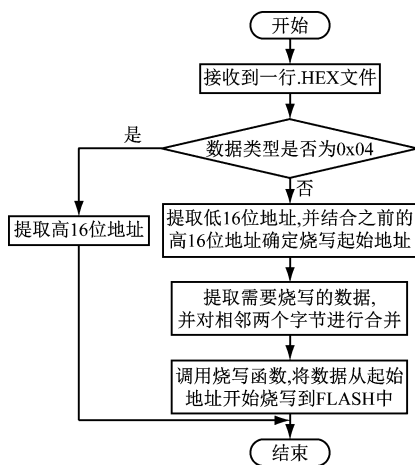


图3 .HEX文件接收与FLASH烧写流程

图 3 中,程序将在接收到一行 .HEX 文件后先判断其数据类型。若数据类型为 0x04,则表示这一行语句的数据位记录了整段 .HEX 文件的高 16 位地址信息,取出高 16 位地址后,这一行处理完毕;若数据类型不是 0x04,则代表这一行包含的是升级程序数据,需要写入 FLASH。同时,这行数据的第 2 和 3 字节存储了这段语句的低 16 位地址,要把其低

(下转第 131 页)

### 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。

(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

### 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交路改造方案探讨[J]. 铁道通信信号, 2016(1): 67.

(收稿日期: 2019-12-23)

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)