

# 基于串口的 TMS320F2812 软件升级 方法研究与实现

许廷金, 朱虹, 袁鑫全, 杨爱武

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:** 针对传统 DSP 应用程序烧写的缺陷, 通过对 DSP 应用程序烧写原理的分析, 设计了一种利用串口对应用程序进行升级的方法; 首先阐述了在线升级方案的必要性、所依赖的硬件系统组成和在线升级方案的总体构架, 然后分别对应用程序 HEX 数据文件的转换方法、HEX 文件重新编码的 Labview 上位机软件设计方法和 DSP 嵌入式升级软件设计方法等进行了详细的描述, 最后通过开环实验、FLASH 数据对比实验及 DSP 控制系统功能验证实验, 证明了基于串口的 TMS320F2812 软件升级方法的正确性和可行性, 解决了 DSP 控制软件必须通过下载器进行烧写的缺点, 提高了系统嵌入式软件升级的灵活性、可靠性, 延长了产品寿命, 该方法简单、实用, 移植性强, 为激光器控制系统及其它领域软件进行系统远程、无线升级奠定了基础。

**关键词:** LabVIEW; TMS320F2812; 在线升级; API; DSP

## Research and Implementation of TMS320F2812 Software Upgrade Method Based on Serial Port

XU Tingjin, ZHU Hong, YUAN Xinquan, YANG Aiwu

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of traditional DSP application programming, through the analysis of the application programming principle, a method for upgrading application programs using serial ports is designed. Firstly, this paper expounds the necessity of online upgrading scheme, the composition of the hardware system, and the overall architecture of online upgrading scheme. Then, it describes the conversion method for application HEX data file, designs the method for LabVIEW host computer software with re-encoding HEX files and embedded DSP upgrading software, respectively. Finally, the correctness and feasibility of the TMS320F2812 software upgrading method based on serial port are verified through the open-loop experiments, FLASH data comparison experiments, and DSP control system functional verification experiments, the method solves the disadvantage that DSP control software must be burned and written through a downloader, improves the flexibility and reliability of the embedded software upgrading, and prolongs the life of the product. It has the advantages of simple, practical and strong portability, which lays a foundation for the remote and wireless upgrading of laser control systems and other software in other fields.

**Keywords:** LabVIEW; TMS320F2812; online upgrading; API; DSP

### 0 引言

星载激光器控制系统主要功能是控制激光器出光、对激光器关键参数进行初始化, 以及调整激光出光功率等功能。由于此类激光器应用的空间环境比较复杂且存在未知干扰因素, 为了确保激光器关键参数的可靠性, 不被上级控制系统等因素干扰, 一般将此类经过调试确定满足要求后的关键参数, 通过控制软件给变量赋值的方式将其固化, 但这样也会带来一些问题, 若星载激光器产品长时间在轨运行后, 可能出现激光功率下降等问题后, 想要通过调整关键参数的方法来确保产品某些指标达标, 必须修改控制软件。传统 DSP 嵌入式软件主要采用 JTAG 方式进行烧写, 但产品应用于复杂系统或复杂领域时, 系统开发极为复杂,

同时利用外接 JTAG 口进行下载时, 可能由于下载引线过长, 使程序容易受到外界干扰, 增加程序跑飞的风险, 通过这种传统方法烧写程序不仅增加了产品的维修成本, 同时也增加了程序烧写失败的风险。特别是星载激光类产品在轨执行任务时, 若要对软件进行维护、升级时, 必然不能采用 JTAG 口方式对其软件产品进行升级维护。

TMS320F2812 是 TI (德州仪器) 公司推出的一款高性能、多功能、高性价比的 32 位定点 DSP (数字信号处理器) 芯片。这款芯片被广泛应用于数字控制领域, 被认为是性能最好的 DSP 芯片之一<sup>[1]</sup>。TMS320F2812 主频高达 150 MHz, 具备 UART、I2C、SPI、CAN、PWM 等外设接口<sup>[2]</sup>, 由于体积小、性能强、便携性高等特点广泛应用

收稿日期: 2024-01-15; 修回日期: 2024-02-04。

作者简介: 许廷金(1993-), 女, 硕士, 工程师。

引用格式: 许廷金, 朱虹, 袁鑫全, 等. 基于串口的 TMS320F2812 软件升级方法研究与实现[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(8): 188-193, 200.

于各种控制类工业设备, 随着应用领域的不断增多, 控制系统功能更新迭代周期大幅缩短<sup>[3]</sup>。由于 TMS320F2812 受众广泛, 因此对 TMS320F2812 在线升级方案的研究具有重要意义, 随着技术的不断发展和改进, 对 TMS320F2812 的软件进行升级可以使其具备更强大的功能和更高的性能。通过在线升级方案, 可以方便地对 TMS320F2812 的软件进行升级, 使其能够适应新的应用需求和环境变化。

针对不能采用 JTAG 接口方式烧写程序的场景, 同时为了增加软件升级灵活性、延长产品寿命、提高经济效益, 设计了一种基于串口的 TMS320F2812 嵌入式软件升级方法, 该方法采用控制系统中常用的串口作为升级接口, 并未额外增加产品体积和成本, 该方法简单、实用<sup>[4-6]</sup>。星载激光器控制系统若要对软件进行升级时, 只需要通过卫星将升级软件重新编码后的可执行文件数据流传输给星载激光器控制系统的上级设备, 上级设备通过串口按升级协议将数据发送给星载激光器控制系统, 即可实现星载激光器控制软件的软件升级与维护。

### 1 星载激光器控制系统硬件组成

星载激光器控制系统主要用来与上一级设备通讯并完成对光纤和固体激光器的控制等功能。星载激光器主要由光纤激光器光学单元、固体激光器机头和电气单元组成。其中电气单元包括激光控制器、种子驱动源、预放驱动源、功放驱动源、固体驱动源、固体 Q 开关驱动源、种子源温控、固体及功放机温控等部分组成, 星载激光器控制系统组成如图 1 所示, 星载激光器控制软件依赖的硬件环境为 TMS320F2812 控制器, RS422\_SWJ\_CZQ 为星载激光器控制系统与上级设备的通信接口, 通过该接口作为软件升级接口不会造成硬件成本和体积的增加, 而且串口通信通常比 JTAG 接口更可靠, 它更不容易受到电磁干扰和信号衰减的影响, 这使得基于串口的升级方法在某些恶劣环境下也能正常工作, 提高了系统的可靠性。

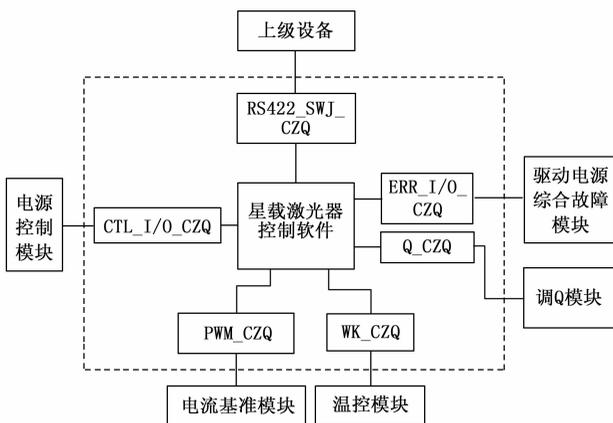


图 1 星载激光器控制系统组成图

### 2 在线升级系统总体构架

DSP 软件烧写的本质是将程序员编写的程序代码烧写到 DSP 的存储器中, 使得 DSP 能够按照这些指令执行相应

的操作。这一过程需要使用到一些特定的工具和开发环境, 这些工具和环境可以帮助程序员将他们的想法转化为实际的程序代码, 并且能够将这些代码烧写到 DSP 中。

首先, 选择合适的开发环境是至关重要的。开发环境通常包括编译器、调试器和一些辅助工具, 这些工具可以帮助程序员编写、编译和调试程序。

其次, 选择合适的烧写工具也是非常重要的。烧写工具通常包括编程器和仿真器等, 这些工具可以帮助程序员将编译后的程序代码烧写到 DSP 的存储器中。

在烧写过程中, 程序员需要将程序代码编译成可以在 DSP 上运行的二进制文件。这个过程需要使用到编译器, 编译器可以将程序代码转换成二进制文件, 这个文件可以被 DSP 识别并执行。

最后, 将二进制文件烧写到 DSP 的存储器中。这个过程通常需要使用编程器或仿真器等烧写工具。这些工具可以通过与 DSP 的通信接口连接, 将二进制文件写入 DSP 的存储器中。

传统应用程序烧写过程即通过官方上位机软件与仿真器配合将 CCS 生成的 .OUT 文件中包含的功能程序数据烧写到 FLASH 对应地址上。传统方式过分依赖仿真器与 TI 官方提供的程序烧写软件, 在外场测试及产品集成度过高的场合, 使用极其不便, 因此改变 DSP 软件烧写方式迫在眉睫。

在线升级方法即上位机通过通用的 USART、SPI、CAN 等接口将应用程序数据流文件传输并烧写到 FLASH 上。CCS 编译生成的可执行文件 (COFF) 是 .OUT 格式, 该格式包含很多附加信息, 不能直接烧写到 FLASH 中, 因此必须将 .OUT 文件转化为可供 FLASH 识别的 .HEX 文件<sup>[7]</sup>。TMS320F2812 片内自带 128K FLASH, 可进行多次数据的擦除与写入, 同时也可分扇区进行数据擦除, 该特点为 DSP 嵌入式软件在线升级提供了基础。应用程序在线升级总体流程如图 2 所示。

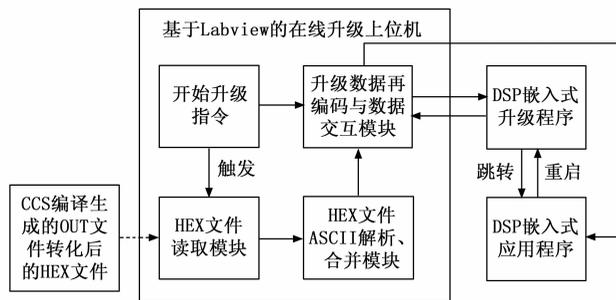


图 2 在线升级方案总体构架

基于 TMS320F2812 的软件在线升级方法首先采用 TI 官方发布的 HEX2000 软件通过 HEX2000-romwidth 16-memwidth 16-i-o H\_File\_Name. HEX O\_File\_Name 命令将 .out 文件转化为可供在线升级上位机解析的 HEX 文件<sup>[6]</sup>, 其中: H\_File\_Name. HEX 为所要生成的 .HEX 文件名称, O\_File\_Name 为待转换的 .OUT 文件, 然后通过自己开发的上位机软件将 HEX 文件数据解码, 合并, 重

新编码,接着重新编码后的数据先通过卫星发送给星载激光器控制系统的上级设备,最后通过串口到达星载激光器控制系统,其 DSP 内部的升级程序将上位机传输的应用程序数据通过 API 烧写到自带 Flash 中。

将可执行文件进行重新编码的好处是减小上级设备的内存压力。基于串口的星载激光器控制软件升级方案省略可执行文件重新编码后的数据通过卫星抵达星载激光器控制系统的上级设备的过程,利用上位机中的数据交互模块模拟星载激光器控制系统的上级设备,着重介绍软件基于串口升级的整体设计方案。

### 3 基于 LabVIEW 的上位机设计

LabVIEW 的作用是为大型复杂测试系统提供通用的软件开发平台,LabVIEW 是 NI 推出的一款图形化编程软件,其开发环境由前面板和流程图组成,LabVIEW 包含了丰富的函数库,可以支持各种数据处理、信号处理、控制和测量等应用,编程简单,界面友好,被广泛地应用于各个领域<sup>[8-9]</sup>。LabVIEW 具有资源丰富的 VISA 库。VISA 指的是虚拟仪器的软件构架。VISA 库的目的是简化仪器 I/O 编程,提供统一的设备资源管理、操作和使用的机制。通过使用 VISA 库,开发人员可以方便地与各种仪器进行通信和控制,而无需关心底层硬件的细节。VISA 库存在于 PC 机系统之中,实现 PC 机与仪器间的连接<sup>[10-11]</sup>。

#### 3.1 上位机软件设计思路

经 HEX2000 软件转换得到的应用程序 HEX 文件格式如图 3 所示,每一行均以“:”开头,以“\r\n”换行。第一行:02000004003DBD 可以看作是 0x02, 0x00, 0x00, 0x04, 0x00, 0x3D, 0xBD, 其中前 4 个字节和最后一个字节有特殊含义,中间为应用程序有效的数据信息。图 3 第一行数据表示本行数据有 2 个有效数据,根据第 4 字节可知,本行传递的信息为扩展线性地址为 0x003D,详细描述如表 1 所示。

0	10	20	30	40	50	60	70
1	:02000004003DBD						
2	:20800000767D8BDC3B1076260000762F000FF69767D8E95767D8EBD767D854C767D80691E						
3	:208010007622761F00358F3D8737A80C761F00348F3D875BA81A8F3D8776A81C761F00371E						

图 3 HEX 文件数据格式

表 1 HEX 文件格式解析

数据格式	数据含义
第一个字节	数据长度,例:0x02 表示有 2 个数据
第二、第三字节	0x00,0x00 表示本行的起始地址为 0x0000 高位在前,低位在后
第四个字节	0x00: data record,用来记录数据,HEX 文件的大部分记录都是数据记录
	0x01: 文件结束记录,放在文件的最后,表示文件的结尾
	0x02: 扩展段地址记录
	0x03: 开始段地址记录
	0x04: 扩展线性地址记录
最后一个字节	校验和=0x100-累加和

从 HEX 文件图及格式解析表可以看出,当 HEX 作为文件被上位机读取时,是以字符为单位的,即“:”被读取后对应的十六进制为 0x3A,而“02”被读取后对应的十六进制为 0x30、0x32,与实际意义的 0x02 不符,因此上位机软件首先需要对读取后的 HEX 文件进行解码、合并为预期值供后续模块试用。

#### 3.2 上位机软件实现方法

通过以上分析设计了一款基于 LabVIEW 的数据流文件读取,数据解析,数据合并,数据发送为一体的上位机软件,其工作流程如图 4 所示。

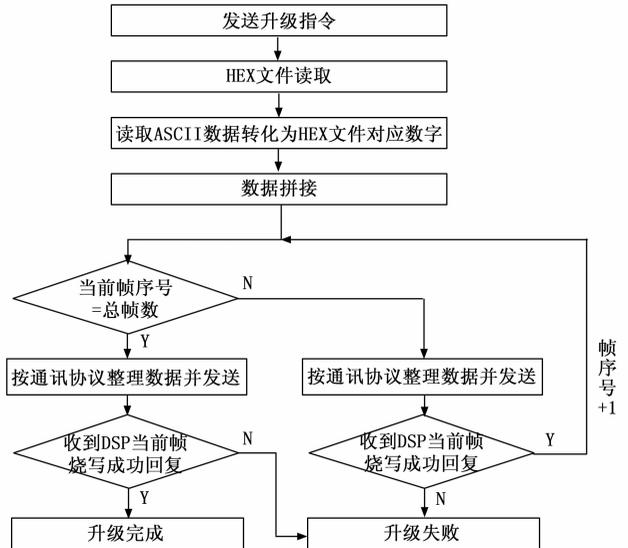


图 4 上位机工作流程图

上位机与硬件产品进行数据交互时,上位机要对硬件产品的升级状态进行监督,每一帧数据发送完毕后收到 DSP 反馈的烧写成功应答指令后方能进行下一帧数据的发送,当超过固定时间未收到烧写成功应答指令后,上位机自动弹出升级超时对话框,当上位机发送的当前数据帧序号等于总帧数,而且收到 DSP 反馈的烧写成功应答指令后,上位机自动弹出升级成功窗口。上位机的弹窗设置能够及时告知开发人员在线升级的进度及遇到的问题,这不但有利于问题定位,而且还能减少由于信息延迟导致的时间浪费。

基于 LabVIEW 的在线升级上位机界面如图 5 所示,详细操作步骤如下:

- 1) 将上位机与硬件产品通过串口线连接,选择正确的串口号、波特率、校验位、停止位等信息,点击打开串口按钮;
- 2) 当 DSP 应用程序需要升级时,点击在线升级上位机的开始升级按钮,随后依次触发上位机软件的 HEX 文件读取模块、HEX 文件 ASCII 解析、合并模块,将 HEX 数据处理为可供升级数据再编码与数据交互模块使用的数据,同时获取应用程序数据总帧数;
- 3) HEX 文件解析完毕且收到硬件产品的有效升级命

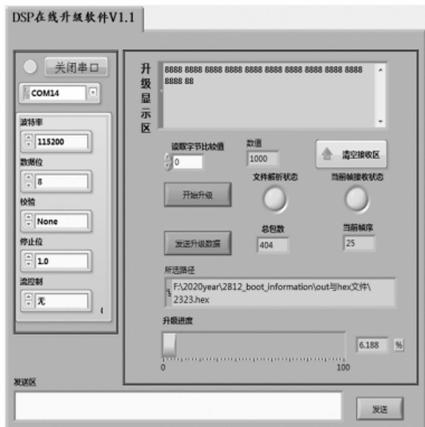


图 5 在线升级上位机界面

令应答后, 点击发送升级数据按钮, 将应用程序升级数据流文件根据事先制定的通讯协议封装并将封装后的数据通过硬件串口传输到控制系统端;

4) 升级数据流文件总包数与当前升级进程在上位机界面清晰明了, 当升级数据全部发送完毕并收到控制系统端反馈的烧写成功应答指令后, 上位机软件端会有提示框弹出, 显示升级成功, 操作简单且实用。

### 3.2.1 HEX 文件读取模块

文件读取模块主要用来将电脑内存中的 HEX 文件内容读取到 LabVIEW 内存中, 供后续模块处理, 该模块利用 LabVIEW 中的文件对话框、路径选择、文件打开/创建/替换文件等多个集成函数将 HEX 文件以二进制形式存放于文件读取数组中。

### 3.2.2 HEX 文件解析、合并模块

由 3.1 及表 1 分析可知需要对读取后的 HEX 文件进行解码、合并为预期值供后续模块使用。

HEX 文件解析、合并模块首先通过数组索引法搜寻“:”(0x3A)的个数, 获取 HEX 文件总包数, 然后以 3A 为基准, 寻找其后的第一个、第二个字符获取当前帧有效数据长度, 接着根据获取的数据长度解析出 HEX 文件中每行的预期值, 得到 HEX 解析数组, 将有效数据两两合并后即可还原实际数据内容得到合并数组。

HEX 文件原始数据、文件读取数组数据、HEX 解析数组数据和合并后数组第一行数据对比如图 6 所示, 可以看出经过 HEX 文件解析、合并模块处理后的数据能够真实还原与 FLASH 烧写有关的数据, 在上位机层面还原数据可以大大减少硬件产品中的嵌入式软件工作量。

### 3.2.3 升级数据再编码与数据交互模块

DSP 嵌入式软件是硬件产品的灵魂, 因此在进行软件升级时, 必须将应用程序数据的可靠性放在首位, 为了提高升级可靠性和安全性, 本文制定了升级协议和握手机制。

上位机得到预期数据后, 需要按照数据协议进行上位机与升级程序之间的数据交互, 为了提高升级可靠性和安全性, 制定了升级协议如表 2 所示, 协议格式: 帧头, 数据

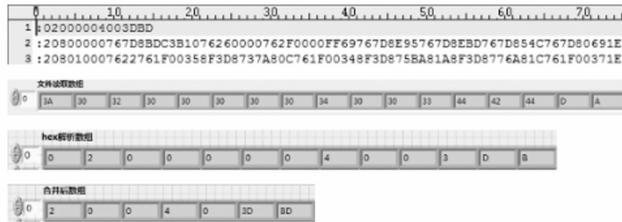


图 6 解析过程数据对比图

总包, 当前数据包, 应用程序数据, 校验和, 帧尾, 详细数据格式见表 2。升级数据再编码与数据交互模块主要负责将 HEX 文件解析、合并模块输出的数据根据协议进行封装并将封装后的数据通过硬件串口传输到控制系统端。

表 2 升级协议

通讯协议	
含义	占用字节数
帧头	0xFF
数据总帧数	占用 2 字节
当前帧序号	占用 2 字节
数据长度	占用 2 字节
本帧起始地址	占用 2 字节
记录数据类别	占用 1 字节
升级数据	未知字节
.....	
升级数据	校验和 = 0x100 - 累加和
校验和	
帧尾	0xFE

## 4 基于 TMS320F2812 的嵌入式软件设计

TMS320F2812 芯片上整合了 256 kB 的 Flash 存储器, 由于在线升级程序占用内存较小, 不需要额外增加外部存储器来存储在线升级程序<sup>[12]</sup>。应用程序升级的总体设计如下, 将 Flash 分为应用程序存储区, 升级标志存储区, 升级程序存储区<sup>[13-15]</sup>。

应用程序存储区主要用来存放系统的功能程序, 程序入口地址为 0x003D8000, 占用 Flash 的 SECTORI 和 SECTORJ 区, 应用程序起始地址和占用内存可根据不同产品功能程序大小进行调整。功能程序分为两个模块: 1) 执行系统的主体功能; 2) 接收到正确的升级指令后, 擦除升级标志存储区并写入有效升级标志 0x0001, 随后启动看门狗功能, 使系统复位。

升级标志存储区地址为 0x3E4000, 占用 Flash 的 SECTORF 区, 有效标志为 0x0001。

升级程序存储区起始地址为 0x003EC000, 占用 Flash 的 SECTORA - SECTORD, 其入口地址位于 0x3F7FF6, 主要执行系统正常启动跳转功能和应用程序升级功能。

### 4.1 API 操作

不论升级软件设计还是应用程序设计过程中都要对 DSP 自带 Flash 进行擦除、编程和校对操作, 而 TI 只提供

了一种操作 Flash 的库函数，因此 boot 升级程序语言操作 2812 底层 flash，对 flash 底层操作步骤如下<sup>[16-17]</sup>：

- 1) 将 Flash2812\_API\_V210.lib 文件添加到升级程序工程中；
- 2) 将 Flash281x\_API\_Config.h 和 Flash281x\_API\_Library.h 两个文件均复制到升级程序库文件路径中；
- 3) 配置 Flash281x\_API\_Config.h 中的时钟参数以适应工程实际使用频率；
- 4) 将 API 函数从 FLASH 中搬运到 RAM 中；
- 5) 执行 FLASH 擦除和编程前必须将代码安全模块解锁。

准备好上述 5 个操作后，就可着手进行升级程序设计了。

### 4.2 升级程序软件设计

在线升级方案流程如图 7 所示，Flash 分区如图 8 所示。

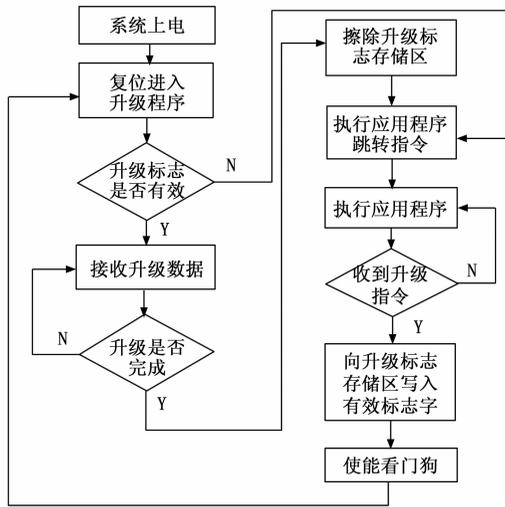


图 7 在线升级方案总体流程图

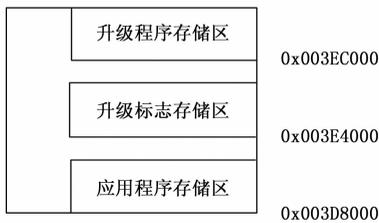


图 8 Flash 分区示意图

星载激光器控制系统上电或复位后自动进入升级程序，读取 0x3E4000 地址下存储的升级标志值，若升级标志有效，则擦除应用程序存储区数据，等待升级数据串口响应中断，接收上级设备发送的升级数据，并进行数据处理及烧写，若升级标志无效，则执行应用程序跳转指令，进入功能程序。

升级软件接收升级数据后处理的详细流程如图 9 所示。串口中断响应模块判断数据帧头、帧序号、校验和、帧尾等信息是否正确，若一帧数据校验成功，则将该帧数据写入数据缓冲区。数据处理模块对数据缓冲区数据进行判断，获取

数据存储的扩展线性地址，起始地址和待烧写数据后，进行数据写 FLASH 操作，直到收到结束帧且校验成功，擦除升级标志存储区，执行应用程序跳转指令，进入功能程序。

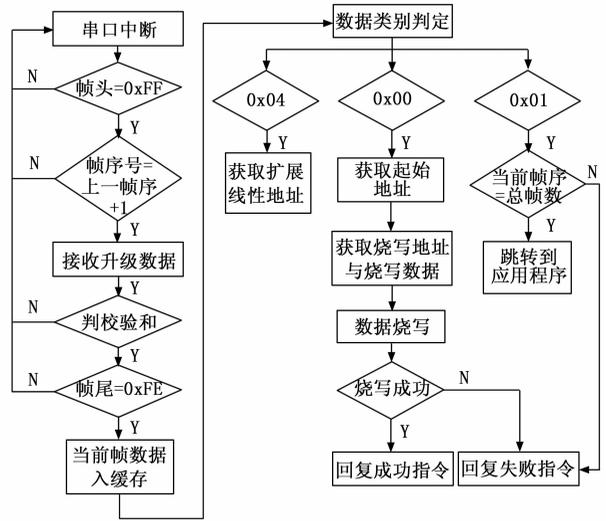


图 9 升级程序工作流程图

### 4.3 应用程序软件设计

应用程序运行过程中若收到上位机发送的升级指令，则利用 API 库函数擦除升级标志存储区标志、写入有效标志字并使能看门狗，使系统重启，并进入升级程序。应用程序升级流程如图 10 所示。

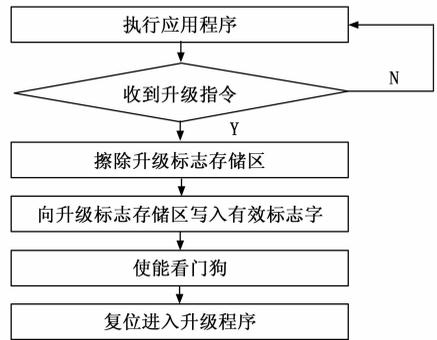


图 10 应用程序工作流程图

## 5 功能验证

### 5.1 上位机功能开环验证

利用虚拟串口将电脑的两个 COM1 口和 COM2 口连接，分别分配给在线升级上位机和通用上位机 SSCOM，将在线升级上位机的握手机制取消，改为每行数据流文件定时 (100 ms) 发送，随后依次点击开始升级和发送升级数据按钮，观察到的 SSCOM 通用上位机显示信息如图 11 所示，从 SSCOM 上位机窗口可知，本文设计的在线升级上位机发送的数据帧格式与约定的通讯协议格式一致。由图 13 可知，本次升级数据流文件总包数为 276 (0x0114)，实际发送 276 (0x0114) 包，两者数据吻合，因此可以证明本文设计上位机可以通过 LabVIEW 的 VISA 模块将需要升级

的应用程序数据流文件发送给其他上位机, 数据格式与数据内容均正确。

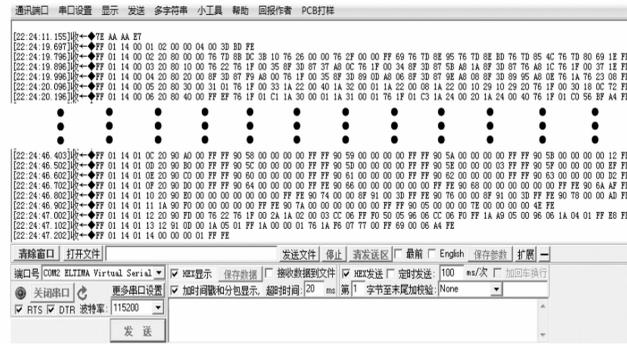


图 11 开环验证图

### 5.2 FLASH 数据对比验证

利用 DSP 仿真器在 CCS5.5 开发环境中运行应用程序 APP1.out, 同时利用 CCS 插件 Memory Browser 将 Flash 的 SECTOR1 和 SECTORJ 区数据导出保存为 CCS\_APP1.dat, 随后上位机发送升级指令, 同样利用 DSP 仿真器在 CCS5.5 开发环境中运行升级程序 2812\_Boot.out, 随后利用 CCS 插件 Memory Browser 可观察到 Flash 的 SECTOR1 和 SECTORJ 数据已被擦除, 随后上位机发送 APP1.HEX 经过重新编码后的数据, 在升级程序执行应用程序跳转指令处断点, 同样利用 CCS 插件 Memory Browser 将 Flash 的 SECTOR1 和 SECTORJ 区数据导出保存为 CCS\_APP2.dat, 通过 Beyond Compare 软件对 CCS\_APP1.dat 与 CCS\_APP2.dat 数据进行对比, 发现两个数据无差异, 证明通过升级程序接收烧写的应用程序数据正确, 对比如图 12 所示。

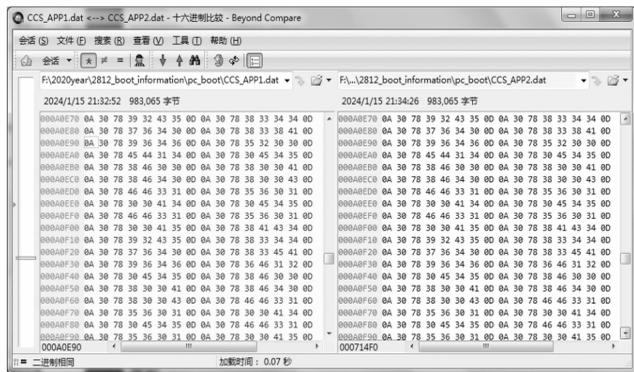


图 12 数据对比图

### 5.3 功能验证

利用 CCS5.5 将升级程序 2812\_Boot.out 和应用程序 APP1.out 烧写到 FLASH 中, 激光器控制系统重启, 应用程序 APP1 运行正常, 说明在应用程序升级标志无效时, DSP 可以正常跳转到应用程序, 与设计相符。

上位机软件发送应用程序升级指令, 通过上位机接收数据可知, DSP 进入升级程序, 上位机随后发送 APP2.

HEX 应用程序数据, 升级过程如图 13 所示, 升级完成后 DSP 中的应用程序 APP2 运行正常, 表明升级程序可正常接收应用程序数据并能正常地将数据烧写到 FLASH 中, 与设计相符。

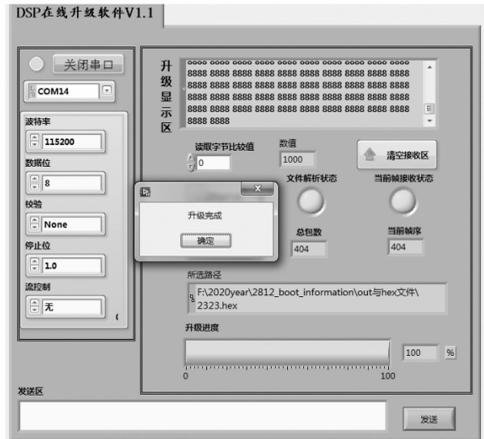


图 13 软件升级完成图

## 6 实验结果与分析

通过上位机开环功能验证试验图可知, 本文设计的基于 LabVIEW 的在线升级上位机通信功能、数据读取功能、数据解析功能、数据合并功能、数据再编码与数据交互功能与设计相符, 能够将应用程序可执行数据流文件的总帧数、烧写地址、有效数据准确地传递。打通了上位机与 DSP 芯片利用串口进行应用程序升级的通道。

通过 FLASH 数据对比验证功能结果可知, 利用 CCS 方式进行程序烧写后的应用程序存储区数据与通过串口进行升级后的存储区数据完全一致, 证明本文设计的基于串口的在线升级方案能够准确无误地将应用程序数据写入 DSP 内部 FLASH 对应地址处。

通过实际功能验证试验可知, 本文设计的基于 LabVIEW 的在线升级上位机软件和基于 TMS320F2812 在线升级嵌入式软件能够实现基于串口对软件进行升级的功能, 与设计相符。

## 7 结束语

通过第 5 节试验可知, 基于 TMS320F2812 的应用程序在线升级方法合理可行, 能够实现应用程序的在线升级, 提高了系统嵌入式软件升级的灵活性、可靠性, 该方法简单、实用, 为星载激光器控制系统及其它领域软件进行系统远程、无线升级奠定了基础。

基于串口的 DSP 应用程序升级方法解决了复杂产品更新程序拆装困难的问题, 只需要通过现有的串行通信接口即可实现应用程序的灵活升级, 节省了人力, 物力, 时间成本, 操作方便, 降低了产品拆装过程造成的次生灾害, 例如: 产品密封问题, 电磁兼容问题等, 提高了系统的可靠性, 灵活性和可维护性。

(下转第 200 页)